

UNIVERZITET U BEOGRADU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Mladen S. Ćosić

**NELINEARNA STATIČKA I DINAMIČKA  
SEIZMIČKA ANALIZA OKVIRNIH  
ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA**

doktorska disertacija

Beograd, 2014



UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Mladen S. Ćosić

**PERFORMANCE-BASED NONLINEAR  
STATIC AND DYNAMIC SEISMIC  
ANALYSIS OF FRAMEWORK  
BUILDINGS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014



---

mentor: Prof. dr Stanko Brčić dipl.inž.građ.  
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

---

Prof. emeritus dr Radomir Folić dipl.inž.građ.  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

---

Prof. dr Đorđe Lađinović dipl.inž.građ.  
Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka

---

V. Prof. dr Rastislav Mandić dipl.inž.građ.  
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

---

V. Prof. dr Ratko Salatić dipl.inž.građ.  
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

datum odbrane:



## ZAHVALNOST

*Veliku zahvalnost dugujem profesoru dr Stanku Brčiću što je prihvatio da budem njegov doktorant, srdačno pomogao, kontinuirano pregledao, kritički analizirao i davao primedbe na istraživanje u toku izrade doktorske disertacije, a bez čijeg mentorstva se ista ne bi mogla realizovati.*

*Zahvaljujem se članovima komisije profesoru emeritus dr Radomiru Foliću i profesoru dr Đorđu Lađinoviću na prijemu teme doktorske disertacije, pregledu doktorske disertacije i prihvatanju iste za odbranu. Zahvaljujem se članovima komisije profesoru dr Rastislavu Mandiću i profesoru dr Ratku Salatiću na pregledu doktorske disertacije i prihvatanju iste za odbranu. Takođe, zahvaljujem se profesoru dr Branislavu Ćoriću na prijemu teme doktorske disertacije.*

*Zahvalnost dugujem svojim roditeljima Vesni i Selimiru i svojim najbližima što su bili uz mene u toku izrade doktorske disertacije i pružali mi moralnu i materijalnu podršku, i u "teška" vremena, a bilo ih je previše, i u vremena kada je išlo "lako", a bilo ih je baš premalo.*





## NELINEARNA STATIČKA I DINAMIČKA SEIZMIČKA ANALIZA OKVIRNIH ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA

### Rezime:

U ovoj doktorskoj disertaciji su sprovedena istraživanja 2D i 3D modela okvirnih sistema zgrada prema performansama za uslove seizmičkog dejstva, a u skladu sa PBEE (*Performance-Based Earthquake Engineering*) metodologijom. Istraživanja se mogu klasifikovati u četiri bitno različite celine: istraživanja na polju akceleroograma i spektara odgovora, istraživanja na polju nelinearnog odgovora 2D modela okvirnih sistema koji participiraju u konstruktivnom sistemu okvirnih zgrada (dekomponovani ili tretirani kao nezavisne celine), istraživanja na polju nelinearnog odgovora 3D modela okvirnih zgrada i istraživanja na polju odnosa kapacitet konstrukcije/seizmički zahtev 2D i 3D modela okvirnih zgrada.

Istraživanja na polju akceleroograma zasnivaju se na primeni akceleroograma realnih zemljotresa i akceleroograma veštačkih zemljotresa. Prethodno su dvokomponentalni akceleroogrami realnih zemljotresa selektovani i preuzeti iz PEER GMDB baze. Veštački akceleroogrami su razmatrani kao nepotpuni i potpuni nestacionarni veštački akceleroogrami, pri čemu je pri kreiranju potpunih nestacionarnih veštačkih akceleroograma uzeta u obzir i analiza seizmičkog hazarda. Procesiranje akceleroograma je sprovedeno po teoriji signala kroz analize: formatiranje, konvertovanje, skaliranje, kalkulacija, procesiranje, kompatibilizacija, filtriranje, generisanje i transformacija. Postupak generisanja međukomponentata akceleroograma po uglovima je sproveden rotacijom komponentata akceleroograma u pravcu raseda i upravno na pravac raseda. Integracijom međukomponentata akceleroograma kreirana je površ akceleroograma (*ground motion record surface*). Na osnovu generisanih međukomponentata akceleroograma razvijeni su spektri odgovora i integrisani u površ spektra odgovora (*response spectra surface*). Za sve akceleroograme i spektre odgovora su analizirane mere intenziteta i kreirane anvelope mere intenziteta (*intensity measure envelope*). Istraživanjem su razmatrani aspekti skaliranja i kompatibilizacije akceleroograma i njihov uticaj na formu površi spektra odgovora.

Istraživanja na polju nelinearnog odgovora 2D modela okvirnih sistema zasnivaju se na primeni linijskih konačnih elemenata, čiji je poprečni presek diskretizovan na vlakna i kod kojih se uzimaju u obzir razvoj neelastičnih deformacija.

Definisani su opšti modeli *pushover* krivih koji su poslužili kao podloga za dalja razmatranja u doktorskoj disertaciji: visoko duktilno, visoko ili srednje duktilno, nisko ili neduktilno ponašanje zgrada i prelazna kategorija. Takođe, sprovedena je i klasifikacija *pushover* krivih varijacijom duktilnosti, duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja i koeficijenta odnosa krutosti u nelinearnom i linearnom domenu. Primenom ova tri parametra generisan je set tipoloških modela *pushover* krivih kod okvirnih 2D i 3D modela zgrada. Istraživanje tipa raspodele lateralnog seizmičkog opterećenja kod NSPA *pushover* analize sprovedeno je razmatranjem rešenja dobijenih iz INDA analiza zemljotresa. Predložena je parabolična raspodela kao alternativa ravnomernoj i ekvivalentnoj. Prednost ovakve raspodele je dokazana upoređujući sa rešenjem dobijenim iz regresione analize za grupu zemljotresa, odnosno diskretne vrednosti INDA analiza. Takođe, istraživanjem je utvrđeno da se primenom *pushover* krive za ravnomernu raspodelu lateralnog seizmičkog opterećenja postiže dosta dobro pokrivanje INDA anvelope u kapacitativnom domenu. Istraživanje uticaja TU (*total updating*), IU (*incremental updating*) i HU (*hybrid updating*) korekcije je razmatrano na 2D modelu okvira, pri čemu se najkvalitetnija rešenja dobijaju primenom NSAPA-DBA analize, u odnosu na INDA analizu. U cilju određivanja potrebnog broja NDA analiza u okviru jedne INDA analize, razvijena je metoda koja se bazira na rešenju dobijenom iz NSPA analize. Sa druge strane, u cilju predikcije rešenja koje se dobija iz INDA analize 2D i 3D modela okvirnih zgrada sa mogućnošću razmatranja odgovora sistema u kapacitativnom domenu, a pri tome ne povećavajući znatnije vreme potrebno za procesiranje, razvijena je hibridna inkrementalna nelinearna statička-dinamička analiza (HINSDA - *Hybrid Incremental Nonlinear Static-Dynamic Analysis*). Istraživanjem su dobijene veće vrednosti driftova u slučaju primene  $PGA-IDR_{max}$  parametara, nego kod primene  $PGA-DR$  parametara. Najmanje odstupanje HINSDA krive od INDA krive dobija se primenom trećeg UBEPKHS konstitutivnog modela, dok se najveće odstupanje dobija primenom prvog UBEPKHS konstitutivnog modela.

Istraživanja na polju nelinearnog odgovora 3D modela okvirnih sistema zasnivaju se na primeni linijskih konačnih elemenata, dok se na krajevima štapova apliciraju plastični zglobovi u kojima se omogućava razvoj nelinearnih deformacija. Efekti egzistencije tavanica modelirani su primenom elemenata veze. S obzirom da se kod 3D modela zgrada nelinearan odgovor razmatra primenom *pushover* krivih za

različite uglove dejstva zemljotresa, to je integracijom istih dobijena *pushover* površ (*pushover surface*) za NSPA i za INDA (IDA) analizu. Razmatranjem je prikazan opšti model *pushover* površi i ukazano je na neke specifične modele *pushover* površi. Tipološki modeli NSPA *pushover* površi su definisani u funkciji varijacije duktilnosti, duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja i koeficijenta odnosa krutosti u nelinearnom i linearnom domenu za jedan i dva glavna pravca. Generalno razmatrajući identifikovane su četiri grupe *pushover* površi: rotaciono polisimetrične u osnovi, monosimetrične u osnovi, bisimetrične u osnovi i asimetrične u osnovi. Uvedenim koeficijentom površi duktilnosti (*ductility area coefficient*) moguće je analizirati performanse 3D modela zgrada uzimajući u obzir duktilnost za sve pravce, odnosno uglove dejstva zemljotresa. Istraživanjem je pokazano da INDA (IDA) *pushover* površ ima drugačiji oblik, u odnosu na NSPA *pushover* površi, s obzirom da je primenjena druga mera intenziteta i inženjerski parametar zahteva. U cilju analize performansi 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4, 15x4x4-6 i 9x6x5-12 3D modela zgrada sproveden je monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama, a koji je prezentovan preko izopovrši u polarnim koordinatama. Takođe, razmatrane su realizovane krive u polarnim koordinatama za driftove, relativnu vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade i duktilnost. Istraživanjem je utvrđeno da su kod svih modela zgrada realizovani manji ili nešto veći maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  od globalnog drifta  $DR_{IO}$ , za IO performansni nivo prema FEMA propisima. Kod zgrada veće spratnosti se lakše realizuje viša klasa duktilnosti, a da se povećanjem neregularnosti u osnovi ova duktilnost redukuje. Razmatrajući realizovane NSPA *pushover* površi u prostornim koordinatama utvrđeno je da je kod svih 3D modela zgrada krutost u nelinearnom domenu gotovo horizontalna  $K_n \approx 0$  ili blago pozitivna, osim u pojedinim slučajevima, gde sa povećanjem nelinearnih deformacija krutost postaje negativna  $K_n < 0$ . Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade su realizovane znatno manje maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile, u odnosu na relativne vrednosti ukupne smičuće sile kod 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela zgrada, a što je direktna posledica proračuna seizmičkog dejstva prema SRP propisima. U odnosu na krive relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  određene NSPA analizama koje su kružnog ili približno kružnog oblika, krive relativnog spektralnog ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  određene IDA analizama su elipsoidnog oblika ili složenije forme.

U početnom delu istraživanja odnosa kapacitet konstrukcije/seizmički zahtev 2D i 3D modela okvirnih zgrada definisani su opšti modeli odnosa *pushover* krivih i krivih zahteva (BR/SD), a koji su poslužili kao podloga za dalja razmatranja ciljnih pomeranja. U drugom delu je razvijena iterativna metoda koeficijenata pomeranja (IDCM - *Iterative Displacement Coefficient Method*) kojom su određeni nivoi ciljnih pomeranja. Na osnovu IDCM metode i sprovedenih numeričkih testova na *pushover* krivama standardizovanih modela odgovora i *random* funkcija odgovora, utvrđeno je da se postiže veoma zadovoljavajuće slaganje vrednosti driftova realizovanih prema IDCM i NDA analizi. Takođe, minimalna su odstupanja relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta realizovana IDCM metodom, u odnosu na rešenja dobijena NDA metodom pri nivoima ciljnih pomeranja  $(V/W)_t$ . U trećem delu je sprovedeno istraživanje za nivo seizmičkog zahteva 3D modela zgrada, a prezentovano je preko anvelope ciljnog pomeranja (*target displacement envelope*) i driftova za: performansne nivoe, srednju vrednost, medijanu ciljnog pomeranja i maksimalno pomeranje. Takođe, prikazane su i relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja i za maksimalni globalni drift. Na osnovu definisane anvelope ciljnog pomeranja razvijen je niz koeficijenata kojima se ocenjuju performanse 3D modela zgrada. Takođe, performanse zgrada su analizirane i primenom razvijene površi globalnog drifta (*drift surface*) i površi međuspratnog drifta (*interstorey drift surface*). U četvrtom delu je, na osnovu razvijene NSPA analize zasnovane na principu projektovanja zgrada prema mehanizmima loma (NSPA-DMBD - *Nonlinear Static Pushover Analysis - Damage Mechanisms-Based Design*) i istraživanjem na modelu okvirnog sistema, ukazano da je čak kod inicijalne NSPA analize indikator nepovoljnog mehanizma loma bio preko graničnih dilatacija betona. Kod nižih spratova, prema NSPA-DMBD metodi, vrednosti međuspratnih driftova se redukuju, dok se kod viših spratova povećavaju uravnotežujući na taj način odgovor konstrukcije.

**Ključne reči:** površ akceleroograma, površ spektra odgovora, okvirni sistemi, nelinearne seizmičke analize, PBEE, performanse, *pushover* površ, anvelopa ciljnog pomeranja, drift, mehanizmi loma

Naučna oblast: teorija konstrukcija

Uža naučna oblast: zemljotresno inženjerstvo

UDK:

## **PERFORMANCE-BASED NONLINEAR STATIC AND DYNAMIC SEISMIC ANALYSIS OF FRAMEWORK BUILDINGS**

### **Summary:**

Research of 2D and 3D models of frame building system according to the performances for the seismic action, and in accordance with the Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE) methodology is presented in this doctoral dissertation. Research can be classified into four distinctly different areas: research in the field of ground motion record and response spectra, research in the field of nonlinear response of 2D model system frameworks that participate in building structural system framework (decomposed or treated as independent entities), research in the field of nonlinear response of 3D model frameworks and research in the field of the relationship of building capacity/seismic demand of 2D and 3D model frameworks.

Research in the field of ground motion record is based on the application of natural earthquakes and artificial earthquakes. Previously, the two-componential ground motion records of natural earthquakes are selected and downloaded from the PEER GMDB database. Artificial ground motion records were considered as incomplete and complete non-stationary artificial accelerograms, whereby when creating complete non-stationary artificial accelerograms the analysis of seismic hazard is taken into consideration. The signal processing theory is used for analysis of accelerograms: formatting, converting, scaling, calculation, processing, spectral matching, filtering, generating and transformation. The process of generating inter-components of accelerograms by angles is carried out by rotating components of accelerograms in the fault parallel and fault normal direction. The ground motion record surface is created integrating inter-components of accelerograms. Based on the generated inter-components of the accelerograms the response spectra are developed and integrated into the response spectra surface. For all accelerograms and response spectra intensity measures were analyzed and the intensity measure envelopes were created. The research examined the aspects of scaling and spectral matching of accelerograms and their impact on the form of the response spectra surface.

Research in the field of nonlinear response of 2D model system frameworks is based on the application of the beam finite elements, whose cross-section is discretized into fibers and which take into account the development of inelastic deformations. The

general models of the pushover curves are defined, which served as a basis for a further consideration in this doctoral dissertation: highly ductile, highly or medium ductile, low or brittle behavior of buildings and transitional category. Also the classification of the pushover curves is implemented by variation of ductility, ductility in the field of stiffening/softening and coefficient of the relation of stiffness in nonlinear and linear domain. By applying these three parameters the set of typological model of the pushover curves is generated for 2D and 3D models of framework buildings. Research the type of distribution of lateral seismic loads for the NSPA pushover analysis was conducted considering the solutions obtained from the INDA analysis of earthquakes. The parabolic distribution is proposed as an alternative to the uniform and equivalent. The advantage of this distribution is demonstrated by comparing with the solution obtained from the regression analysis for a group of earthquakes or discrete values of the INDA analysis. Also, research has found that the application of the pushover curve for the uniform distribution of the lateral seismic loads is achieved quite good coverage of the INDA envelope in the capacity domain. Exploring the impact of the TU (total updating), IU (incremental updating) and HU (hybrid updating) is discussed for 2D model system frameworks, where the highest quality solutions are obtained for the NSPA-DBA analysis, compared to the INDA analysis. In order to determine the required number of the NDA analysis within one INDA analysis, a method is developed based on the solution obtained from the NSPA analysis. On the other hand, in order to predict a solution that is obtained from the INDA analysis of 2D and 3D models of framework buildings with the possibility of considering the response of the system in the capacity domain, but not significantly increasing the time required to process, the Hybrid Incremental Nonlinear Static-Dynamic Analysis (HINSDA) is developed. Higher values of drifts are obtained in a case of application of  $PGA-IDR_{max}$  parameters, than in a case of application of  $PGA-DR$  parameters. The least deviation of the HINSDA curve to the INDA curve is obtained using the third UBEPKHS constitutive model, while the maximum deviation is obtained using the first UBEPKHS constitutive model.

Research in the field of non-linear response of 3D models of framework buildings is based on the application of the beam finite elements, while at the ends of the beams and columns are applied plastic hinges which enable the development of

inelastic deformations. Effects of existence of interstorey plates were modeled using the link elements. Given that in 3D models of framework buildings nonlinear response is considering using the pushover curves for different angles of seismic actions, the pushover surface is obtained by integrating the pushover curves for the NSPA and the INDA (IDA) analysis. The general model of the pushover surface is shown and some specific models of the pushover surfaces are pointed. The typological models of NSPA pushover surfaces are defined as a function of variations in ductility, ductility in the field of stiffening/softening and coefficient of the relation of stiffness in nonlinear and linear domain for one and two main directions. Generally considering, the four groups of pushover surfaces are identified: rotationally polysymmetrice at a base, monosymmetric at a base, bisymmetric at a base and asymmetric at a base. Introducing the ductility area coefficient it is possible to analyze the performance of 3D models of framework buildings taking into account the ductility in all directions or angles of seismic actions. Research has shown that the INDA (IDA) pushover surface has a different shape, compared to the NSPA pushover surface, since the different intensity measure and engineering demand parameter are applied. In order to analyze the performance of 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4, 15x4x4-6 and 9x6x5-12 3D models of framework buildings, monitoring of the plastic hinges development at incremental stages was conducted, which is presented as isosurfaces in polar coordinates. Also, the implemented curves are discussed in polar coordinates for a drift, the relative value of the total base shear force of building and ductility. Research found that in all models of buildings are realized smaller or something larger maximum global drifts  $DR_{max}$  from global drifts  $DR_{IO}$ , for the IO performance level according to the FEMA regulations. The higher ductility class is easier to realize for buildings with a larger number of storeys, and increase in irregularities at a base reduces ductility. Considering the realized NSPA pushover surface in spatial coordinates, for all 3D models of framework buildings, was found that stiffness in the nonlinear domain  $K_n \approx 0$  is almost horizontal or slightly positive, except in certain cases where with increasing nonlinear deformations stiffness becomes negative  $K_n < 0$ . For 9x6x5-12 3D model of framework building was realized significantly lower maximum relative value of the total base shear force of building in relation to the relative value of the total base shear force of building for 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 and 15x4x4-6 3D models of framework buildings. It is a

direct consequence of calculation of the seismic action according to the SRP regulations. In relation to the curve of the relative value of the total base shear force of building  $(V/W)_{adeq}$  for maximum global drift  $DR_{max}$  calculated by the NSPA analyses that are circular or nearly circular in shape, curve of the relative spectral acceleration  $S_a/S_{a,y}$  calculated by the IDA analyses are ellipsoidal or more complex forms.

In the initial part of research of the relationship of building capacity/seismic demand of 2D and 3D model frameworks the general models of relations for the pushover curves and the demand curves (BR/SD) were defined, which served as a basis for further consideration of target displacements. In the second part of research the Iterative Displacement Coefficient Method (IDCM) was developed, which was used for analyses of the target displacements. Based on the IDCM method and numerical tests conducted on the pushover curves for standardized models of responses and the random response function, it is found that the values of drifts are in very satisfactory agreement according to the IDCM and the NDA analyses. Also, the minimum deviation of the relative value of the total base shear force of building realized by the IDCM method, compared to the solutions obtained by the NDA method at levels of target displacements  $(V/W)_t$ . In the third part of research the level of seismic demands of 3D models of framework buildings were conducted, and is presented through the target displacement envelope and drifts: for performance levels, mean, median of target displacement and maximum displacement. Relative values of the total base shear force of building for target displacements and maximum global drift are also shown. Based on the defined target displacement envelope a series of coefficients were developed which are used to assess the performance of 3D models of framework buildings. The performances of buildings are analyzed also using the developed global drift surface and interstorey drift surface. In the fourth part, based on the Nonlinear Static Pushover Analysis - Damage Mechanisms-Based Design (NSPA-DMBD) and research on the model of framework system, indicated that even at the initial NSPA analysis unfavorable fracture mechanism was through the ultimate concrete strain. At lower storeys, according to the NSPA-DMBD method, the values of interstorey drifts are reduced, while at the higher storeys are increased thus balancing the response of the structure.

**Key words:** ground motion record surface, response spectra surface, framework



buildings, nonlinear seismic analyses, PBEE, performances, *pushover* surface, target displacement envelope, drift, damage mechanisms

Scientific field: theory of structures

Specific scientific field: earthquake engineering

UDC:



## SADRŽAJ:

<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1. PROBLEM I PREDMET ISTRAŽIVANJA .....	1
1.2. CILJ ISTRAŽIVANJA .....	7
1.3. ZADACI ISTRAŽIVANJA .....	7
1.4. RADNE HIPOTEZE .....	8
1.5. NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA .....	8
1.6. NAUČNA OPRAVDANOST I OČEKIVANI REZULTATI .....	8
1.7. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	9
1.8. PUBLIKOVANI NAUČNO-ISTRAŽIVAČKI RADOVI AUTORA DISERTACIJE (IZDVOJENO) .....	26
1.9. ORIGINALNOST ISTRAŽIVANJA .....	29
1.10. NAJZNAČAJNIJI NOVI TERMINI .....	30
1.11. KRATAK PRIKAZ DOKTORSKE DISERTACIJE PO POGLAVLJIMA .....	31
<b>2. METODOLOGIJA ANALIZE OKVIRNIH ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA</b> .....	33
2.1. UVODNE NAPOMENE .....	33
2.2. OPŠTA TEORIJSKA FORMULACIJA ZA ANALIZU ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA .....	33
2.3. KRATAK PRIKAZ RAZVIJENIH SOFTVERA ZA ANALIZU ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA .....	38
2.4. KONCEPT ANALIZE ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA RAZVIJEN I IMPLEMENTIRAN U <i>Nonlin Quake</i> .....	40
2.4.1. OSNOVE KONCEPTA .....	40
2.4.2. <i>Nonlin Quake</i> DB .....	49
2.4.3. <i>Nonlin Quake</i> GMP .....	50
2.4.4. <i>Nonlin Quake</i> AA .....	51
2.4.5. <i>Nonlin Quake</i> SHA .....	52

2.4.6. <i>Nonlin Quake</i> RSP .....	53
2.4.7. <i>Nonlin Quake</i> PP.....	54
2.4.8. <i>Nonlin Quake</i> PCS.....	55
2.4.9. <i>Nonlin Quake</i> HINSDA.....	56
2.4.10. <i>Nonlin Quake</i> TD.....	57
2.4.11. <i>Nonlin Quake</i> SP.....	58
2.4.12. <i>Nonlin Quake</i> TDE .....	59
<b>3. PROCESIRANJE AKCELEROGRAMA I MODELIRANJE OKVIRNIH</b>	
<b>ZGRADA</b> .....	61
3.1. UVODNE NAPOMENE .....	61
3.2. SELEKCIJA AKCELEROGRAMA .....	61
3.3. FORMATIRANJE AKCELEROGRAMA.....	64
3.4. PROCESIRANJE AKCELEROGRAMA .....	67
3.5. GENERISANJE AKCELEROGRAMA .....	81
3.5.1. NEPOTPUNI NESTACIONARNI VEŠTAČKI AKCELEROGRAMI ..	81
.....	
3.5.2. POTPUNI NESTACIONARNI VEŠTAČKI AKCELEROGRAMI....	86
3.5.3. ANALIZA SEIZMIČKOG HAZARDA .....	88
3.5.4. GENERISANI VEŠTAČKI AKCELEROGRAMI.....	92
3.6. PROCESIRANJE SPEKTARA ODGOVORA.....	95
3.7. MODELIRANJE OKVIRNIH ZGRADA.....	102
3.7.1. KONCEPT MODELIRANJA OKVIRNIH ZGRADA .....	102
3.7.2. MODEL SA PLASTIČNIM ZGLOBOVIMA .....	104
3.7.3. MODEL SA VLAKNIMA .....	106
3.7.4. NUMERIČKI MODELI ZGRADA .....	108
3.8. PRELIMINARNA ANALIZA .....	113
<b>4. ANALIZA NELINEARNOG PONAŠANJA OKVIRNIH ZGRADA</b> .....	119
4.1. UVODNE NAPOMENE .....	119
4.2. NSPA ANALIZA .....	119
4.2.1. TEORIJSKI ASPEKTI NSPA ANALIZE.....	119
4.2.2. NSPA <i>PUSHOVER</i> KRIVA: DEFINICIJA I TIPOLOGIJA .....	126
4.2.3. KONVENCIONALNA I ADAPTIVNA NSPA ANALIZA .....	133

4.3.	INDA ANALIZA .....	145
4.3.1.	TEORIJSKI ASPEKTI INDA ANALIZE.....	145
4.3.2.	INDA <i>PUSHOVER</i> KRIVA: DEFINICIJA.....	151
4.4.	NSPA I INDA <i>PUSHOVER</i> POVRŠI.....	152
4.4.1.	NSPA <i>PUSHOVER</i> POVRŠ: DEFINICIJA I GENERISANJE .....	152
4.4.2.	TIPOLOGIJA NSPA <i>PUSHOVER</i> POVRŠI.....	160
4.4.3.	KOEFICIJENT POVRŠI DUKTILNOSTI .....	165
4.4.4.	INDA <i>PUSHOVER</i> POVRŠ: DEFINICIJA I GENERISANJE .....	168
4.4.5.	PROCESIRANJE <i>PUSHOVER</i> KRIVIH I POVRŠI .....	172
4.4.6.	TESTIRANJE PROCESIRANJA <i>PUSHOVER</i> KRIVIH I POVRŠI.....	180
4.5.	HINSDA ANALIZA .....	182
4.5.1.	TEORIJSKI ASPEKTI HINSDA ANALIZE.....	182
4.5.2.	TESTIRANJE HINSDA ANALIZE.....	192
4.6.	IDA ANALIZA .....	199
4.6.1.	TEORIJSKI ASPEKTI IDA ANALIZE.....	199
4.7.	PROCESIRANJE <i>PUSHOVER</i> POVRŠI OKVIRNIH ZGRADA .....	201
4.7.1.	NSPA <i>PUSHOVER</i> POVRŠI 3D MODELA ZGRADA.....	201
4.7.2.	IDA <i>PUSHOVER</i> POVRŠI 3D MODELA ZGRADA.....	229
<b>5.</b>	<b>ANALIZA ODNOSA KAPACITET KONSTRUKCIJE/SEIZMIČKI ZAHTEV</b>	
	.....	241
5.1.	UVODNE NAPOMENE .....	241
5.2.	ODNOS REALIZOVANI/ZAHTEVANI KAPACITET OKVIRNIH ZGRADA .....	241
5.3.	NSPA ANALIZA CILJNOG POMERANJA .....	250
5.3.1.	TEORIJSKI ASPEKTI NSPA ANALIZE CILJNOG POMERANJA.....	250
5.3.2.	TESTIRANJE NSPA ANALIZE CILJNOG POMERANJA.....	269
5.4.	NDA ANALIZA CILJNOG POMERANJA .....	275
5.4.1.	TEORIJSKI ASPEKTI NDA ANALIZE CILJNOG POMERANJA .....	275
5.4.2.	TESTIRANJE PROCEDURA ZA SKALIRANJE	

AKCELEROGRAMA .....	280
5.4.3. SKALIRANI I KOMPATIBILNI AKCELEROGRAMI I SPEKTRI ODGOVORA PREMA FEMA 750P .....	282
5.5. ANVELOPA CILJNOG POMERANJA .....	285
5.5.1. DEFINICIJA I GENERISANJE.....	285
5.5.2. PROCESIRANJE ANVELOPE CILJNOG POMERANJA.....	289
5.6. PROCESIRANJE ANVELOPA CILJNOG POMERANJA, GLOBALNIH I MEĐUSPRATNIH DRIFTOVA OKVIRNIH ZGRADA .....	301
5.7. KONCEPT METODE PROGRAMIRANOG PONAŠANJA U NELINEARNOJ ANALIZI OKVIRNIH ZGRADA .....	329
5.7.1. TEORIJSKI ASPEKTI METODE PROGRAMIRANOG PONAŠANJA ZA NSPA ANALIZU.....	329
5.7.2. PERFORMANSE OKVIRNIH ZGRADA PREMA NSPA-DMBD METODI.....	336
<b>6. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>349</b>
6.1. ZAVRŠNA RAZMATRANJA .....	349
6.2. ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA.....	350
6.2.1. ISTRAŽIVANJA NA POLJU AKCELEROGRAMA I SPEKTARA ODGOVORA .....	350
6.2.2. ISTRAŽIVANJA NA POLJU NELINEARNOG ODGOVORA 2D MODELA OKVIRNIH SISTEMA .....	352
6.2.3. ISTRAŽIVANJA NA POLJU NELINEARNOG ODGOVORA 3D MODELA OKVIRNIH ZGRADA.....	355
6.2.4. ISTRAŽIVANJA NA POLJU ODNOSA KAPACITET KONSTRUKCIJE/SEIZMIČKI ZAHTEV 2D I 3D MODELA OKVIRNIH ZGRADA .....	359
6.3. PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA .....	364
<b>LITERATURA.....</b>	<b>365</b>
BIBLIOGRAFSKA GRAĐA .....	365
WEB IZVORI.....	387
<b>PRILOG .....</b>	<b>397</b>
<b>Biografija autora</b>	

**Izjava o autorstvu**

**Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada**

**Izjava o korišćenju**





## POPIS TERMINA:

### A

- *acceleration displacement response spectrum format* (ADRS) - spektar odgovora u formatu spektralno pomeranje-spektralno ubrzanje
- *acceleration response intensity* - intenzitet odgovora ubrzanja
- *acceleration response spectra* (ARS) - spektar odgovora u formatu spektralno ubrzanje-period vibracija
- *acceleration response spectra surface* (ARSS) - površ spektra odgovora ubrzanja
- *Adaptive Capacity Spectrum Method* (ACSM) - adaptivna metoda spektra kapaciteta
- *Adaptive Incremental Dynamic Analysis* (AIDA) - adaptivna inkrementalna dinamička analiza
- *adaptive modal combination* (AMC) - adaptivna modalna kombinacija
- *Applied Element Method* (AEM) - metoda primenjenih elemenata
- *Applied Technology Council* (ATC) - savet za primenjene tehnologije
- *artificial accelerogram* - veštački akcelerogram
- *Average Acceleration Method* (AAM) - metoda prosečnog ubrzanja
- *average spectral acceleration* - prosečno spektralno ubrzanje
- *average spectral displacement* - prosečno spektralno pomeranje
- *average spectral velocity* - prosečna spektralna brzina
- *axial load ratio* - koeficijent aksijalnog opterećenja

### B

- *backbone curve* - kriva obvojnica
- *base line correction* (BLC) - korekcija bazne linije
- *base shear force* - ukupna smičuća sila u osnovi objekta
- *base shear capacity* - kapacitet nosivosti
- *bi-directional seismic ground motion* - bidirekciono seizmičko dejstvo zemljotresa
- *bilinear curve* - bilinearna kriva

- *bi-linear model with kinematic strain hardening* (BL-KSH) - bilinearni model sa kinematičkim ojačanjem u zoni nelinearnih deformacija
- *bounded Gutenberg-Richter relation* - modifikovana verzija *Gutenberg-Richter*-ove relacije
- *brittle behavior* - krto (neduktilno) ponašanje
- *building response* (BR) - odgovor zgrade u L, N i C domenu

## C

- *California Institute of Technology* (*Caltech*) - kalifornijski insitut za tehnologiju
- *capacity curve* - kriva kapaciteta
- *capacity curve discrepancy factor* (CCDF) - faktor odstupanja NSPA *pushover* krive od INDA *pushover* krive
- *Capacity Design Method* (CDM) - metoda programiranog ponašanja
- *capacity domain* - kapacitativan domen
- *capacity spectrum factor* - faktor spektra kapaciteta
- *Capacity Spectrum Method* (CSM) - metoda spektra kapaciteta
- *characteristic intensity* - karakterističan intenzitet
- *collapse prevention* (CP) - zaštita od rušenja
- *complete quadratic combination* (CQC) - kompletna kvadratna kombinacija
- *concrete spalling* - pucanje betona
- *confined concrete fibres* - vlakna utegnutog betonskog jezgra
- *confinement factor* - faktor odnosa utegnutog i neutegnutog napona pritiska u betonu
- *co-rotational formulation* - korotaciona formulacija
- *cumulative absolute displacement* (CAD) - akumulirano apsolutno pomeranje
- *cumulative absolute impulse* (CAI) - akumulirani apsolutni impuls
- *cumulative absolute velocity* (CAV) - akumulirana apsolutna brzina
- *curvature ductility* - duktilnost za maksimalnu krivinu

## D

- *damage analysis* - analiza oštećenja
- *damage measure* (DM) - mera oštećenja
- *Damage Mechanisms-Based Design* (DMBD) - projektovanje prema mehanizmima

loma

- *database* (DB) - baza podatka
- *decision variables* (DV) - odluka o varijablama
- *deformation capacity* - kapacitet deformacija
- *degree of collapse* - stepen kolapsa
- *demand curve* (DC) - kriva zahteva
- *demand model* - model seizmičkog zahteva
- *Deterministic Seismic Hazard Analysis* (DSHA) - deterministička analiza seizmičkog hazarda
- *Direct Displacement-Based Design* (DDBD) - neiterativna analiza koja se zasniva na proračunu prema pomeranju
- *direct loss* - direktni gubitci
- *Discrete Fourier Transformation* (DFT) - diskretna *Fourier*-ova transformacija
- *Displacement-Based Analysis* (DBA) - nelinearna statička *pushover* analiza prema pomeranju
- *Displacement-Based Design* (DBD) - procedure koje se zasnivaju na proračunu prema pomeranju
- *Displacement-Based Seismic Design* (DBSD) - metodologija proračuna konstrukcija prema pomeranju za seizmičko dejstvo
- *Displacement Coefficient Method* (DCM) - metoda koeficijenata pomeranja
- *displacement ductility* - maksimalna raspoloživa duktilnost
- *displacement intensity* - intenzitet pomeranja
- *Displacement Modification Method* (DMM) - metoda modifikacije pomeranja
- *displacement response intensity* - intenzitet odgovora pomeranja
- *displacement response spectra* (DRS) - spektar odgovora u formatu spektralno pomeranje-period vibracija
- *displacement response spectra surface* (DRSS) - površ spektra odgovora pomeranja
- *displacement-velocity frequency ratio* - koeficijent odnosa pomeranje/brzina
- *down time/loss of function* - gubitak funkcije objekta
- *drift* (DR) - odklon, pomak
- *drift surface* - površ globalnog drifta
- *ductile behavior* - duktilno ponašanje

- *ductility coefficient* - koeficijent duktilnosti
- *ductility area coefficient* - koeficijent površi duktilnosti
- *dynamic pushover node* (DPN) - čvor za monitoring diskretnih vrednosti iz NDA analiza

## **E**

- *east-west* (EW) - istok-zapad komponenta zemljotresa
- *Earthquake Engineering Research Institute* (EERI) - istraživački institut za zemljotresno inženjerstvo
- *effective modal superposition* (EMS) - efektivna modalna superpozicija
- *effective peak acceleration* - efektivno maksimalno ubrzanje
- *effective peak displacement* - efektivno maksimalno pomeranje
- *effective peak velocity* - efektivna maksimalna brzina
- *Endurance Time Method* (ETM) - metoda vremena izdržljivosti
- *engineering demand parameter* (EDP) - parametar inženjerskog zahteva
- *intensity measure envelope* - anvelopa mere intenziteta
- *equal degrees of freedom* (EDOF) - princip ekvivalencije stepeni slobode pri modeliranju tavanica
- *Equivalent Linearization Method* (ELM) - metoda ekvivalentne linearizacije
- *Eurocode* (EC) - evropski propisi za projektovanje i proračun konstrukcija
- *excel macro-enabled binary* (XLSB) - *excel*-ov tip fajla gde se informacije čuvaju u binarnom formatu
- *Extended Incremental Dynamic Analysis* (EIDA) - proširena inkrementalna dinamička analiza
- *Extreme Value Theory* (EVT) - metoda ekstremnih vrednosti

## **F**

- *fault-normal* (FN) - upravno na pravac pružanja raseda
- *fault-parallel* (FP) - paralelno pravcu pružanja raseda
- *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) - državna uprava za vanredna dejstva
- *fibres* - vlakno

- *Finite Element Method* (FEM) - metoda konačnih elemenata
- *Force-Based Analysis* (FBA) - nelinearna statička *pushover* analiza prema silama
- *Force-Based Design* (FBD) - procedure koje se zasnivaju na proračunu prema silama
- *fragility curve* - kriva povredljivosti
- *fragility surface* - površ povredljivosti

## **G**

- *global instability* (GI) - globalna nestabilnost
- *graphic user interface* (GUI) - korisnička forma
- *ground motion processing* (GMP) - procesiranje zapisa ubrzanja tla (akcelerograma)
- *ground motion record* (GMR) - zapis ubrzanja tla (akcelerogram)
- *ground motion record surface* (GMRS) - površ zapisa ubrzanja tla (akcelerogram)

## **H**

- *Hazard Analysis* - analiza hazarda
- *hazard curve* - kriva hazarda
- *HAZUS-compatible capacity curve* - kompatibilna kriva kapaciteta prema HAZUS-u
- *high class ductility* (DCH) - klasa visoke duktilnosti
- *high-pass filter* (HPF) - visokopropusni filter
- *Hilber-Hughes-Taylor* (HHT) - *Hilber-Hughes-Taylor*-ov postupak numeričke integracije korak po korak
- *Hybrid Incremental Nonlinear Static-Dynamic Analysis* (HINSDA) - hibridna inkrementalna nelinearna statička-dinamička analiza
- *Hybrid Nonlinear Static-Dynamic Analysis* (HNSDA) - hibridna nelinearna statička-dinamička analiza
- *hybrid updating* (HU) - hibridna korekcija
- *hysteretic energy* - histerezisna energija

## **I**

- *immediate occupancy* (IO) - trenutna useljivost
- *Improved Capacity Spectrum Method* (ICSM) - poboljšana metoda spektra

kapaciteta

- *Iterative Displacement Coefficient Method (IDCM)* - iterativna metoda koeficijenata pomaranja
- *Incremental Dynamic Analysis (IDA)* - inkrementalna dinamička analiza
- *Incremental Dynamic Analysis based on Modal Pushover Analysis (IDA-MPA)* - inkrementalna dinamička analiza zasnovana na MPA analizi
- *Incremental N2 Method (IN2)* - inkrementalna N2 metoda
- *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis (INDA)* - inkrementalna nelinearna dinamička analiza
- *Incremental Response Spectrum Analysis (IRSA)* - inkrementalna analiza spektra odgovora
- *incremental updating (IU)* - inkrementalna korekcija
- *indirect loss* - indirektni gubitci
- *inelastic displacement-based frame element (INFRM-DB)* - pomoranjem definisan neelastični gredni element
- *inelastic response spectra (IRS)* - neelastični spektar odgovora
- *initial state* - inicijalno stanje
- *injuries and fatalities* - povređeni i poginuli
- *intensity measure (IM)* - mera intenziteta
- *interstorey drift (IDR)* - međuspratni drift
- *interstorey drift-based scaling* - skaliranje prema međuspratnom driftu
- *interstorey drift surface* - površ međuspratnog drifta
- *Inverse Discrete Fourier Transformation (IDFT)* - inverzna diskretna *Fourier*-ova transformacija
- *Iterative-Interactive Design (IID)* - iterativno-interaktivno dimenzionisanje

## **L**

- *Lagrange multipliers* - *Lagrange*-ovi multiplikatori
- *large displacement and rotation* - velika pomaranja i rotacije
- *Least Square Method (LSM)* - metoda najmanjih kvadrata
- *life safety (LS)* - bezbednost života
- *Linear Dynamic Analysis (LDA)* - linearna dinamička analiza

- *Linear Acceleration Method (LAM)* - metoda linearnog ubrzanja
- *Linear Static Analysis (LSA)* - linearna statička analiza
- *link elements* - elementi veze
- *load control* - kontrola inkrementalnog priraštaja opterećenja
- *load factor* - faktor opterećenja
- *force/displacement vector* - vektor apliciranih sila/pomeranja
- *local buckling* - lokalno izvijanje
- *loss analysis* - analiza štete
- *loss of gravity load capacity* - gubitak kapaciteta nosivosti na gravitaciono opterećenje
- *low class ductility (DCL)* - klasa niske duktilnosti
- *low-pass filter (LPF)* - niskopropusni filter
- *Luco 1<sup>st</sup> mode predictor* - *Luco*-ov prediktor prvog svojstvenog oblika

## M

- *maximum concrete strain* - maksimalna dilatacija betona
- *maximum concrete stress* - maksimalni napon u betonu
- *maximum curvature* - maksimalna krivina
- *maximum displacement* - maksimalno pomeranje
- *maximum moment* - maksimalni moment
- *maximum shear force* - maksimalna smičuća sila
- *maximum steel strain* - maksimalna dilatacija čelika
- *maximum steel stress* - maksimalni napon u čeliku
- *medium class ductility (DCM)* - klasa srednje duktilnosti
- *Method of Modal Combinations (MMC)* - metoda modalnih kombinacija
- *Mid-America Earthquake Center (MAE)* - centar za zemljotresno inženjerstvo
- *Modal Pushover Analysis (MPA)* - modalna *pushover* analiza
- *modified Mercalli intensity scale (MMIS)* - modifikovana *Mercalli*-eva skala
- *modified Newton-Raphson method (mNR)* - modifikovana *Newton-Raphson*-ova metoda
- *moment magnitude scale (MMS)* - skala momentne magnitude
- *moment resisting frame (MRF)* - konstruktivni sistem koji prihvata i prenosi

permanentno i seizmičko opterećenje gredama i stubovima

- *Multi-Component Incremental Dynamic Analysis* (MIDA) - multikomponentalna inkrementalna dinamička analiza
- *multi-degree of freedom* (MDOF) - više stepeni slobode
- *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research* (MCEER) - multidisciplinarni centar za istraživanje zemljotresnog inženjerstva
- *Multi-Mode Pushover Procedure* (MMPP) - multimodalna *pushover* analiza

## N

- *N2 Method* - N2 metoda
- *Network for Earthquake Engineering Simulations* (NEES) - mreža centara za simulacije u zemljotresnom inženjerstvu
- *Newton-Raphson Method* (NR) - standardna *Newton-Raphson*-ova metoda
- *nominal load vector* - vektor nominalnog opterećenja
- *Non-Iterative Capacity Spectrum Method* (NICSM) - neiterativna metoda spektra kapaciteta
- *nonlinear analysis* (NA) - nelinearna analiza
- *nonlinear constant confinement concrete model* (NL-CCC) - nelinearan utegnuto model betona
- *Nonlinear Dynamic Analysis* (NDA) - nelinearna dinamička analiza
- *Nonlinear Dynamic Analysis - target displacement* (NDA-TD) - analiza ciljnog pomeranja za nelinearnu dinamičku analizu
- *Nonlinear Seismic Analysis* (NSA) - nelinearna seizmička analiza
- *Nonlinear Static Adaptive Pushover Analysis* (NSAPA) - nelinearna statička adaptivna *pushover* analiza
- *Nonlinear Static Conventional Pushover Analysis* (NSCPA) - nelinearna statička konvencionalna *pushover* analiza
- *Nonlinear Static Analysis* (NSA) - nelinearna statička analiza
- *Nonlinear Static Pushover Analysis* (NSPA) - nelinearna statička *pushover* analiza
- *Nonlinear Static Pushover Analysis - Damage Mechanisms-Based Design* (NSPA-DMBD) - nelinearna statička seizmička analiza - projektovanje prema mehanizmima loma



- *Nonlinear Static Pushover Analysis - target displacement* (NSPA-TD) - analiza ciljnog pomeranja za nelinearnu statičku seizmičku analizu
- *non-uniform rational basis spline* (NURBS) - neuniformni racionalni bazni splajn
- *normalized hysteretic energy* - normalizovana histerezisna energija
- *normalized scaling vector* - vektor normalizovanog skaliranja
- *north-south* (NS) - sever-jug komponenta zemljotresa

## O

- *operational level* (OL) - operacioni nivo

## P

- *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER) - pacifički istraživački centar za zemljotresno inženjerstvo
- *peak ground acceleration* (PGA) - maksimalno ubrzanje tla
- *peak ground displacement* (PGD) - maksimalno pomeranje tla
- *peak ground velocity* (PGV) - maksimalna brzina tla
- *peak spectral acceleration* (PSA) - maksimalno spektralno ubrzanje
- *peak spectral displacement* (PSD) - maksimalno spektralno pomeranje
- *peak spectral velocity* (PSV) - maksimalna spektralna brzina
- *peak strength* - maksimalna čvrstoća
- *penalty functions* - penalne funkcije
- *Performance-Based Earthquake Engineering* (PBEE) - metodologija proračuna konstrukcija prema performansama
- *Performance-Based Plastic Design* (PBPD) - energetski postupak za analizu konstrukcija po teoriji plastičnosti
- *Performance-Based Seismic Design* (PBSD) - seizmički proračun konstrukcija prema performansama
- *performance level* (PL) - performansni nivo
- *physical spectrum* - fizički spektar (površ u prostoru)
- *plastic hinge* - plastični zglob
- *plastic rotation* - plastična rotacija
- *polynomial baseline correction* - korekcija bazne linije polinomskog tipa

- *power spectral density* - funkcija spektralne gustine snage kretanja tla
- *Probabilistic Seismic Damage Analysis (PSDamA)* - probabilistička analiza seizmičkog oštećenja
- *Probabilistic Seismic Demand Analysis (PSDA)* - probabilistička analiza seizmičkog zahteva
- *Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA)* - probabilistička analiza seizmičkog hazarda
- *Probabilistic Seismic Loss Analysis (PSLA)* - probabilistička analiza seizmičkih gubitaka
- *Progressive Incremental Dynamic Analysis (PIDA)* - progresivna inkrementalna dinamička analiza
- *project parameters (PP)* - parametri projekta
- *pseudo-spectral acceleration* - pseudospektralno ubrzanje
- *pseudo-spectral velocity* - pseudospektralna brzina
- *pushover curve (PC)* - *pushover* kriva
- *pushover surface (PS)* - *pushover* površ

## **R**

- *residual displacement* - rezidualno pomeranje
- *residual displacement index* - indeks rezidualnog pomeranja
- *residual strength* - rezidualna otpornost
- *response control* - kontrola inkrementalnog priraštaja pomeranja
- *response spectra (RS)* - spektar odgovora
- *response spectra processing (RSP)* - generisanje spektara odgovora
- *response spectra surface (RSS)* - površ spektra odgovora
- *response spectrum intensity (Housner)* - Housner-ov intenzitet spektra odgovora
- *rigid diaphragm* - kruta tavanica
- *rigid end factor* - faktor krutosti krajeva štapa
- *rigid link elements* - kruti elementi veze
- *root mean square acceleration* - kvadratni koren srednjeg kvadrata ubrzanja
- *root mean square displacement* - kvadratni koren srednjeg kvadrata pomeranja
- *root mean square velocity* - kvadratni koren srednjeg kvadrata brzine

## S

- *scaling procedure* (SP) - procedura skaliranja
- *Secant Modes Superposition* (SMS) - neiterativna sekantna analiza
- *seismic demand* (SD) - seizmički zahtev
- *Seismic Hazard Analysis* (SHA) - analiza seizmičkog hazarda
- *shear resisting frame* (SRF) - konstruktivni sistem koji dominantno radi smicanjem
- *significant duration* - vreme trajanja značajnog dela zemljotresa
- *single degree of freedom* (SDOF) - jedan stepen slobode
- *softening system* - sistemi koji omekšavaju
- *Soil-Structure Interaction* (SSI) - interakcija konstrukcija-tlo
- *specific energy density* (SED) - specifična gustina energije
- *spectral matching* - kompatibilizacija akcelorograma
- *Spectral Modal Analysis* (SMA) - spektralno-modalna analiza
- *square root of sum of squares* (SRSS) - kvadratni koren sume kvadrata
- *steel fibres* - vlakna armature
- *step by step* - rešavanje određene procedure korak po korak
- *Stochastic Incremental Dynamic Analysis* (SIDA) - stohastička inkrementalna dinamička analiza
- *strain hardening parameter* - faktor odnosa postelastične i inicijalne elastične krutosti
- *strike angle* - ugao položaja raseda
- *strong beam-weak column* - projektovanje konstrukcija primenom principa jake grede-slabi stubovi
- *strong column-weak beam* - projektovanje konstrukcija primenom principa jaki stubovi-slabe grede
- *strong ground motion* - jako kretanje tla
- *strong motion duration* - trajanje jakog kretanja tla
- *structural analysis* - analiza konstrukcije
- *structural performance levels* (SPL) - nivoi performansnih stanja noseće konstrukcije

## T

- *target displacement* (TD) - ciljno pomeranje
- *target displacement envelope* (TDE) - anvelopa ciljnog pomeranja
- *top displacement* - pomeranje vrha objekta
- *total failure* - totalni kolaps
- *total Lagrange formulation* - totalna *Lagrange*-ova formulacija
- *total updating* (TU) - totalna korekcija
- *triangular load pattern* - ekvivalentna lateralna raspodela seizmičkih sila

## U

- *ultimate capacity* - granični kapacitet
- *unconfined concrete fibres* - vlakna neutegnutog betona
- *uniaxial bi-linear elastic-plastic with kinematic hardening and softening* (UBEPKHS) - jednoaksijalni bilinearni elasto-plastični model sa kinematičkim ojačanjem i omekšanjem
- *uniform load* - ravnomerno (jednakopodeljeno) raspodeljeno opterećenje
- *unscaled ground motion accelerations* - neskaliirani akcelerogrami
- *update Lagrange formulation* - korigovana *Lagrange*-ova formulacija

## V

- *velocity-acceleration frequency ratio* - koeficijent odnosa brzina/ubrzanje
- *velocity intensity* - intenzitet brzine
- *velocity response intensity* - intenzitet odgovora brzine
- *velocity response spectra* (VRS) - spektar odgovora u formatu spektralna brzina-period vibracija

## W

- *wavelet theory* - teorija talasića
- *wireframe model* - žičani model

## Y

- *yield curvature* - krivina na granici tečenja
- *yield displacement* - pomeranje na granici tečenja
- *yield energy* - energija za granicu tečenja

- *Yield Point Spectra* (YPS) - analiza spektra granice tečenja



## POPIS OZNAKA:

### A - Z

- $A_{adj}(t)$  - amplituda funkcije talasića kojom se sprovodi usklađivanje u vremenu  $t_i$
- $A_{d,max}$  - površina oblasti ograničena maksimalno realizovanim pomeranjima
- $A_{d,max}^{max}$  - površina oblasti ograničena anvelopom maksimalno realizovanog pomeranja svih zemljotresa
- $A_{d,t}$  - površina oblasti ograničena anvelopom ciljnog pomeranja
- $A_{d,t}^{max}$  - površina oblasti ograničena anvelopom ciljnog pomeranja svih zemljotresa
- $A_{d,t,maxd}$  - površina oblasti ograničena anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja
- $A_{d,t,maxd}^{max}$  - površina oblasti ograničena anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja svih zemljotresa
- $A_{d,t,mind}$  - površina oblasti ograničena anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja
- $A_{d,t,mind}^{min}$  - površina oblasti ograničena anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja svih zemljotresa
- $A_{d,x}$  - površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za  $x$  osu
- $A_{d,x}^{max}$  - površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za  $x$  osu svih zemljotresa
- $A_{d,y}$  - površina oblasti ograničena pomeranjima na granici tečenja
- $A_{d,y}^{max}$  - površina oblasti ograničena anvelopom granice tečenja svih zemljotresa
- $A_{d,y}$  - površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za  $y$  osu
- $A_{d,y}^{max}$  - površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za  $y$  osu svih zemljotresa
- $A_{CP}$  - površina oblasti ograničena anvelopom CP performansnog nivoa
- $A_i$  - amplituda
- $A_{IM}$  - površina oblasti ograničena anvelopom mere intenziteta  $IM$
- $A_{IM,max}$  - površina oblasti ograničena anvelopom maksimalne vrednosti za datu  $IM$  meru
- $A_{IO}$  - površina oblasti ograničena anvelopom IO performansnog nivoa

- $A_{LS}$  - površina oblasti ograničena anvelopom LS performansnog nivoa
- $A_1$  - armatura u donjoj zoni poprečnog preseka grede
- $A_2$  - armatura u gornjoj zoni poprečnog preseka grede
- $[C]$  - matrica prigušenja
- $CAV$  - akumulirana apsolutna brzina
- $CCDF$  - faktor odstupanja NSPA *pushover* krive od INDA *pushover* krive, odnosno diskretnih vrednosti INDA analize
- $C_d$  - kapacitet deformacija
- $C_{d,t,max/code}$  - koeficijent koji je u funkciji minimalne potrebne površi duktilnosti za nivo ciljnog pomeranja prema propisima
- $C_{IM}$  - odnos površina oblasti ograničene anvelopom mere intenziteta  $IM$  i anvelopom maksimalne vrednosti za datu  $IM$  meru
- $C_M$  - centar masa
- $[C]_m$  - kvadratna matrica sa elementima koji prezentuju amplitude svakog pojedinačnog odgovora SDOF sistema u vremenu  $t_i$  gde odgovor treba da se usklađuje
- $C_m$  - koeficijent efektivne mase
- $C_R$  - centar krutosti
- $C_r$  - koeficijent korelacije
- $C_{r,Reg}$  - koeficijent korelacije (RegNSPA/RegINDA)
- $C_S$  - koeficijent stabilnosti
- $C_s$  - kapacitet nosivosti
- $C_v$  - kovarijansa
- $C_w$  - težinski koeficijent
- $C_0$  - modifikacioni koeficijent kojim se konvertuje spektralno pomeranje ekvivalentnog SDOF sistema u pomeranje najvišeg čvora MDOF sistema
- $C_1$  - modifikacioni koeficijent koji predstavlja odnos očekivanog maksimalnog nelinearnog pomeranja sa pomeranjem linearno-elastičnog odgovora
- $C_2$  - modifikacioni koeficijent koji predstavlja efekat uštinuća histerezisne petlje, degradaciju krutosti i deterioraciju nosivosti pri maksimalnom nivou pomeranja
- $C_3$  - modifikacioni koeficijent kojim se uvodi povećanje pomeranja usled dinamičkih  $P-A$  efekata



- $C_{3,i}$  - diskretna vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata prema IDCM metodi
- $C_{3,m}$  - srednja vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata prema IDCM metodi
- $C_{3,Reg,i}$  - diskretna vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata regresionom analizom
- $C_{3,Reg,m}$  - srednja vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata regresionom analizom
- $D$  - pomeranje
- $D_{adeq}$  - adekvatno pomeranje za maksimalnu vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $D_{adeq,BC}$  - adekvatno pomeranje za maksimalnu vrednost ukupne smičuće sile za bilinearni model
- $D_{CP}$  - pomeranje za performansni nivo zaštite od rušenja
- $D_C$  - prečnik
- $D_c$  - deformacija sistema na granici iniciranja kolapsa
- $D_{d,min}$  - minimalno potrebno pomeranje da bi se realizovalo povoljno duktilno ponašanje
- $D_{eff}$  - efektivno pomeranje
- $DI$  - indeks oštećenja
- $DI_t$  - indeks oštećenja za nivo ciljnog pomeranja
- $D_{IO}$  - pomeranje za performansni nivo trenutne useljivosti
- $D_{LS}$  - pomeranje za performansni nivo zaštite života
- $D_i$  - diskretna vrednost pomeranja objekta
- $D_{inf}$  - donja granica pomeranja
- $D_{max}$  - maksimalna vrednost pomeranja objekta
- $D_n$  -  $n$ -ta (krajnja) vrednost pomeranja
- $D_{P,max}$  - maksimalna vrednost za selektovani domen, odnosno performansni nivo
- $D_{P,min}$  - minimalna vrednost za selektovani domen, odnosno performansni nivo
- $DR$  - globalni drift
- $DR_{adeq}$  - globalni drift adekvatnog pomeranja za maksimalnu vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta

- $DR_{adeq,BC}$  - globalni drift adekvatnog pomeranja za maksimalnu vrednost ukupne smičuće sile bilinearnog modela
- $DR_c$  - globalni drift za nivo iniciranja kolapsnog domena
- $DR_{CP}$  - globalni drift za performanski nivo zaštite od rušenja
- $DR_{d,min}$  - globalni drift za minimalno potrebno pomeranje da bi se realizovalo povoljno duktilno ponašanje
- $DR_{GI}$  - globalni drift za performanski nivo globalne nestabilnosti
- $DR_{INDA,i}$  - diskretna vrednost drifta INDA analize
- $DR_{INDA,max}$  - maksimalna vrednost drifta INDA analize
- $DR_{IO}$  - globalni drift za performanski nivo trenutne useljivosti
- $DR_i$  - diskretna vrednost globalnog drifta
- $DR_{LS}$  - globalni drift za performanski nivo zaštite života
- $DR_{max}$  - maksimalni globalni drift
- $DR_{max,env}$  - anvelopa maksimalnih globalnih driftova
- $DR_{max,extr}$  - ekstremna vrednost maksimalnih globalnih driftova
- $DR_{min}$  - minimalni globalni drift
- $DR_{NA,i}$  - diskretna vrednost drifta nelinearne (NSPA ili INDA) analize
- $DR_{NA,m}$  - srednja vrednost drifta nelinearne (NSPA ili INDA) analize
- $DR_{NSPA,i}$  - diskretna vrednost drifta NSPA analize
- $DR_{NSAPA-DBA,i}$  - diskretna vrednost drifta NSAPA-DBA analize
- $DR_{NSAPA-DBA,max}$  - maksimalna vrednost drifta NSAPA-DBA analize
- $DR_{NSAPA-FBA,i}$  - diskretna vrednost drifta NSAPA-FBA analize
- $DR_{NSAPA-FBA,max}$  - maksimalna vrednost drifta NSAPA-FBA analize
- $DR_{NSCPA,i}$  - diskretna vrednost drifta NSCPA analize
- $DR_{NSCPA,max}$  - maksimalna vrednost drifta NSCPA analize
- $DR_{Reg,max}$  - maksimalna regresiona vrednost drifta
- $DR_t$  - globalni drift za nivo ciljnog pomeranja
- $DR_{t,ave}$  - srednja vrednost globalnog drifta za nivo ciljnog pomeranja
- $DR_{t,exp}$  - očekivani globalni drift za nivo ciljnog pomeranja
- $DR_{t,max}$  - maksimalna vrednost globalnog drifta za nivo ciljnog pomeranja
- $DR_{t,med}$  - medijana globalnog drifta za nivo ciljnog pomeranja
- $DR_y$  - globalni drift za nivo granice tečenja

- $DR_{y,BC}$  - globalni drift za nivo granice tečenja bilinearne krive
- $D_{sup}$  - gornja granica pomeranja
- $D_t$  - ciljno pomeranje
- $D_y$  - pomeranje na granici tečenja
- $D_{y,BC}$  - pomeranje na granici tečenja za bilinearni sistem
- $D_{y,PC}$  - pomeranje na granici tečenja za objekat
- $D_I$  - pomeranje objekta za prvu diskretnu vrednost
- $E$  - energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija
- $E_B$  - energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija iz bilinearizacije
- $E_c$  - modul elastičnosti betona
- $EDP_{d,i}$  - inženjerski parametar zahteva za abscisu
- $EDP_{f,i}$  - inženjerski parametar zahteva za ordinatu
- $E_{INDA}$  - energija elastoplastičnih deformacija realizovana primenom INDA analize, a prezentovana preko odnosa kapacitet nosivosti-deformacija
- $E_{NSPA}$  - energija elastoplastičnih deformacija realizovana primenom NSPA analize, a prezentovana preko odnosa kapacitet nosivosti-deformacija
- $E_s$  - modul elastičnosti čelika
- $E_{s,p}$  - modul elastičnosti u fazi postelastične krutosti čelika
- $E_x, E_y$  - proračunske vrednosti uticaja usled horizontalnih komponenti (u x i y pravcima) seizmičkog dejstva
- $E_\theta, E_{\theta+90^\circ}$  - proračunske vrednosti uticaja usled horizontalnih komponenti (za oglove  $\theta$  i  $\theta+90^\circ$ ) seizmičkog dejstva
- $\{F\}$  - vektor spoljašnjih generalisanih uticaja (opterećenja) FEM modela
- $\bar{F}$  - vektor normalizovanog skaliranja
- $F_s$  - faktor skaliranja
- $F_{s,INDA}$  - faktor skaliranja INDA analize
- $F_{s,n}$  - poslednji faktor skaliranja
- $F_{s,0}$  - početni faktor skaliranja
- $G$  - odnos magnituda ulaznog i izlaznog signala
- $G(\omega)$  - funkcija spektralne gustine snage kretanja tla
- $G_0$  - spektralna gustina snage idealno belog šuma
- $H$  - visina objekta

- $H_{eff}$  - efektivna visina
- $H_i$  - visina  $i$ -tog sprata
- $I_a$  - Arias-ov intenzitet
- $I_c$  - karakterističan intenzitet
- $IDR$  - međuspratni drift
- $IDR_{EC8}$  - granična vrednost međuspratnog drifta prema EC 8
- $IDR_{max}$  - maksimalni međuspratni drift
- $IDR_{min}$  - minimalni međuspratni drift
- $IDR_t$  - međuspratni drift za nivo ciljnog pomeranja
- $IDR_{t,exp}$  - očekivani međuspratni drift za nivo ciljnog pomeranja
- $IDR_{t,m}$  - prosečna vrednost međuspratnog drifta za nivo ciljnog pomeranja
- $I_i(DR_b, (V/W)_i)$  - diskretna vrednost odgovora iz proračunske inkrementalne situacije
- $I_t(DR_b, (V/W)_t)$  - diskretna vrednost odgovora za nivo ciljnog pomeranja
- $I(t)$  - anvelopa amplituda generisanog akceleroograma
- $K$  - krutost
- $[K]$  - matrica krutosti FEM modela
- $K_c$  - krutost u domenu kolapsa
- $[K_e]$  - matrica krutosti elastičnih deformacija FEM modela
- $K_e$  - inicijalna elastična krutost objekta
- $K_{eff}$  - efektivna krutost
- $K_i$  - diskretna vrednost krutosti
- $K_L$  - krutost u linearnom domenu
- $K_n$  - krutost u nelinearnom domenu
- $K_{n,BC}$  - nelinearna krutost određena postupkom bilinearizacije
- $K_{n,PC}$  - nelinearna krutost MDOF sistema za razvijenu NSPA *pushover* krivu
- $K_{sec}$  - sekantna krutost
- $K_{t,sec}$  - sekantna krutost za nivo ciljnog pomeranja
- $[K_t]$  - tangentna matrica krutosti FEM modela
- $K_t$  - tangentna krutost
- $L$  - dužina štapa
- $L_b$  - dužina grede računajući od osnih rastojanja stubova
- $L_{FE}$  - dužina konačnog elementa

- $[M]$  - matrica masa
- $M$  - momenat savijanja
- $M$  - magnituda
- $M_{A,y}$  - momenat savijanja za osu  $y$  i čvor  $A$
- $M_{A,z}$  - momenat savijanja za osu  $z$  i čvor  $A$
- $M_{B,y}$  - momenat savijanja za osu  $y$  i čvor  $B$
- $M_{B,z}$  - momenat savijanja za osu  $z$  i čvor  $B$
- $M_{\mu}^{max}$  - koeficijent raspoložive površi duktilnosti za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_{d,t/d,Y}$  - koeficijent realizovane površi duktilnosti, a predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom granice tečenja
- $M_{d,t/d,Y}^{max}$  - koeficijent realizovane površi duktilnosti za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_{d,t/CP}$  - koeficijent odnos površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom CP performansnog nivoa
- $M_{d,t/CP}^{max}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom CP performansnog nivoa za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_{d,t/IO}$  - koeficijent odnos površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom IO performansnog nivoa
- $M_{d,t/IO}^{max}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom IO performansnog nivoa za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_{d,t/LS}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom LS performansnog nivoa
- $M_{d,t/LS}^{max}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom LS performansnog nivoa za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_{d,t,maxd/d,t}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja
- $M_{d,t,maxd/d,t}^{max}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom

maksimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja za sve zemljotrese koji se razmatraju

- $M_{d,t, mind/d,t}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja
- $M_{d,t, mind/d,t}^{min}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_{d,x/d,Y}$  - koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $x$  osu, a predstavlja odnos površina oblasti ograničene idealizovanom anvelopom pomeranja za  $x$  osu i oblasti ograničene anvelopom granice tečenja
- $M_{d,x/d,Y}^{max}$  - koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $x$  osu za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_{d,y/d,Y}$  - koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $y$  osu, a predstavlja odnos površina oblasti ograničene idealizovanom anvelopom pomeranja za  $y$  osu i oblasti ograničene anvelopom granice tečenja
- $M_{d,y/d,Y}^{max}$  - koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $y$  osu za sve zemljotrese koji se razmatraju
- $M_i$  - momenat savijanja
- $M_{max}$  - maksimalna vrednost magnitude
- $M_{min}$  - minimalna vrednost magnitude
- $M_T$  - momenat torzije
- $M_w$  - momentna magnituda
- $M_\mu$  - koeficijent površi duktilnosti
- $N$  - broj zemljotresa sa magnitudom  $M$  ili većom
- $N$  - aksijalna sila
- $N_{FE,min}$  - minimalan broj konačnih elemenata na koje treba diskretizovati jedan štap
- $N_{in,h}$  - broj inkremenata za pomeranje kod bilinearizacije
- $N_{in,v}$  - broj inkremenata za silu kod bilinearizacije
- $N_{it}$  - broj iteracija
- $N_{it,sub}$  - broj subiteracija
- $N_{ph}$  - broj formiranih plastičnih zglobova pri različitim nivoima drifta
- $N_{st}$  - broj spratova

- $N_w$  - ukupan broj talasića
- $\{P\}$  - vektor unutrašnjih generalisanih sila FEM modela
- $PGA$  - maksimalno ubrzanje tla
- $PGA_s$  - skalirano maksimalno ubrzanje tla
- $PGA_{s,0}$  - maksimalno ubrzanje skaliranog akcelerograma na početnu minimalnu vrednost ubrzanja
- $PGA_{s,1}$  - maksimalno ubrzanje tla skalirano na inicijalnu vrednost
- $PGA_y$  - maksimalno ubrzanje tla skalirano za vrednost nivoa granice tečenja
- $PGA_o$  - maksimalno ubrzanje originalnog formatiranog neskalinog akcelerograma
- $PGD$  - maksimalno pomeranje tla
- $PGV$  - maksimalna brzina tla
- $P_i$  - koncentrisana sila
- $P_{NCR}$  - referentna verovatnoća prekoračenja jednom u 50 godina referentnog seizmičkog dejstva za zahtev da se objekat ne sruši
- $P(T)$  - verovatnoća da se zemljotres sa povratnim periodom  $R(M)$  godina dogodi u intervalu od  $T$  godina
- $P_t$  - vektor apliciranih sila/pomeranja
- $P_o$  - vektor nominalnog opterećenja
- $\{Q\}$  - vektor spoljašnjih generalisanih sila
- $Q_{NM}$  - kvalitet numeričkog modela
- $Q_{NM,0}$  - kvalitet inicijalnog numeričkog modela
- $Q_{NM,1}$  - kvalitet numeričkog modela bez elemenata ispune
- $R$  - koeficijent odnosa elastične nosivosti i nosivosti na granici tečenja
- $R$  - faktor krutosti krajeva štapa
- $\{R\}$  - vektor rezidualnog opterećenja
- $R(M)$  - povratni period
- $R_{epi}$  - epicentralno rastojanje
- $R_{rup}$  - udaljenost od mesta iniciranja propagacije seizmičkih talasa
- $S$  - faktor tla
- $S_a$  - spektralno ubrzanje
- $S_a/S_{a,y}$  - relativna vrednost spektralnog ubrzanja
- $S_{a,d}(T)$  - spektralno ubrzanje ciljnog (projektnog) spektra odgovora u funkciji od  $T$

- $S_{a,j}$  - ordinata (ubrzanje) spektra odgovora za  $j$ -ti svojstveni oblik
- $S_{a,us}(T)$  - spektralno ubrzanje razmatranog (neskaliranog) akcelerograma u funkciji perioda vibracija  $T$
- $S_{a,y}$  - spektralno ubrzanje na granici tečenja
- $S_{DC}$  - skup uređenih parova diskretnih vrednosti  $DR_j, (V/W)_j$
- $S_d$  - spektralno pomeranje
- $S_{d,j}$  - apscisa (pomeranje) spektra odgovora za  $j$ -ti svojstveno oblik
- $S_e$  - standardna greška regresije
- $SED$  - specifična gustina energije
- $S_e(T)$  - spektralno ubrzanje elastičnog spektra odgovora u funkciji od  $T$
- $S_{PC}$  - skup uređenih parova diskretnih vrednosti  $DR_i, (V/W)_i$
- $S_{TD}$  - skup uređenog para diskretne vrednosti  $DR_b, (V/W)_t$
- $S_{TD,\theta}$  - skup uređenih parova diskretnih vrednosti  $DR_b, (V/W)_t$  po uglovima  $\theta_i$
- $S_v$  - spektralna brzina
- $S_{\theta}(T)$  - novi generisani spektar odgovora za ugao  $\theta$
- $T$  - period vibracija
- $T_0$  - donja granica perioda u oblasti sa konstantnim spektralnim ubrzanjem
- $T_A$  - donja vrednost perioda vibracija
- $T_B$  - gornja vrednost perioda vibracija
- $T_D$  - vrednost perioda koja definiše početak oblasti spektra sa konstantnim odgovorom pomeranja
- $T_e$  - inicijalni elastičan period vibracija
- $T_{eff}$  - efektivan period vibracija
- $T_{e,opt}$  - optimalan period vibracija
- $T_k$  - period vibracija  $k$ -tog svojstvenog oblika
- $T_{max}$  - maksimalan period vibracija
- $T_{NCR}$  - referentni povratni period referentnog seizmičkog dejstva za zahtev da se objekat ne sruši
- $T_n$  - period vibracija sistema u nelinearnom domenu
- $T_p$  - impulsni period zemljotresa
- $T_r$  - projektni seizmički hazard
- $T_r$  - radialna koordinata perioda vibracija



- $T_S$  - karakterističan period vibracija na spektru odgovora pri prelasku iz domena konstantnog ubrzanja u domen konstantnih brzina
- $T_{t,sec}$  - sekantan period vibracija za nivo ciljnog pomeranja
- $T_x$  - period vibracija u ortogonalnom koordinatom sistemu ( $x$  koordinata)
- $T_y$  - period vibracija u ortogonalnom koordinatom sistemu ( $y$  koordinata)
- $T_I$  - period vibracija za prvi svojstveni oblik
- $U_{i,max}$  - maksimalno spratno pomeranje
- $U_x$  - pomeranja u pravcu  $x$  ose
- $U_y$  - pomeranja u pravcu  $y$  ose
- $U_z$  - pomeranja u pravcu  $z$  ose
- $V$  - ukupna smičuća sila u osnovi objekta
- $V_{adeq}$  - adekvatna ukupna smičuća sila u osnovi objekta
- $V_{eff}$  - ukupna smičuća sila u osnovi objekta za nivo efektivnog pomeranja
- $V_i$  - diskretna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $V_{max}$  - maksimalna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $V_{max,BC}$  - maksimalna vrednost ukupne smičuće sile za bilinearni model
- $V_t$  - ukupna smičuća sila u osnovi objekta za nivo ciljnog pomeranja
- $V/V_y$  - normalizovana vrednost ukupne smičuće sile (odnos ukupne smičuće sile prema ukupnoj smičućoj sili na granici tečenja)
- $(V/W)_{adeq}$  - adekvatna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $(V/W)_{INDA,i}$  - diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta INDA analize
- $(V/W)_i$  - diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $(V/W)_{max}$  - maksimalna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $(V/W)_{max,BC}$  - maksimalna relativna vrednost ukupne smičuće sile za bilinearni model
- $(V/W)_{NA,i}$  - diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize
- $(V/W)_{NA,m}$  - srednja relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize
- $(V/W)_{NSAPA-DBA,i}$  - diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSAPA-DBA analize

- $(V/W)_{NSAPA-FBA,i}$  - diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSAPA-FBA analize
- $(V/W)_{NSCPA,i}$  - diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSCPA analize
- $(V/W)_{NSPA,i}$  - diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSPA analize
- $(V/W)_{Reg,INDA,i}$  - diskretna regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta INDA analize
- $(V/W)_{Reg,INDA,m}$  - srednja regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta INDA analize
- $(V/W)_{Reg,NA,i}$  - diskretna regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize
- $(V/W)_{Reg,NA,m}$  - srednja regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize
- $(V/W)_{Reg,NSPA,i}$  - diskretna regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSPA analize
- $(V/W)_{Reg,NSPA,m}$  - srednja regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSPA analize
- $(V/W)_t$  - relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta za nivo ciljnih pmeranja
- $(V/W)_y$  - relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta za nivo granice tečenja
- $(V/W)_{y,BC}$  - relativna vrednost ukupne smičuće sile za nivo granice tečenja bilinearne krive
- $V_y$  - sila na granici tečenja
- $V_{y,BC}$  - sila na granici tečenja za bilinearni sistem
- $V_{y,PC}$  - sila na granici tečenja za objekat
- $V_I$  - ukupna smičuća sila u osnovi objekta za prvu diskretnu vrednost
- $W$  - ukupna težina objekta
- $X_k$  - diskretna *Fourier*-ova transformacija
- $X_{k,fil}$  - filtrirana diskretna *Fourier*-ova transformacija
- $Y$  - parametar pmeranja tla

## **a - z**

- $a$  - ubrzanje
- $\{a\}$  - vektor ubrzanja
- $a_{FN}(t)$  - akcelrogram za FN pravac
- $a_{FP}(t)$  - akcelrogram za FP pravac
- $a_g$  - projektno ubrzanje tla
- $a_{NM}$  - aproksimacija numeričkog modela (izbor tipa konačnog elementa)
- $a_{RMS}$  - kvadratni koren srednjeg kvadrata ubrzanja
- $a_s(t)$  - skalirano ubrzanje za  $t$  korak vremena
- $a(t)$  - ubrzanje za  $t$  korak vremena
- $a(t)_{BLC}$  - ubrzanje za  $t$  korak vremena određeno prema proceduri korekcije bazne linije
- $a(t)_{Reg}$  - ubrzanje za  $t$  korak vremena određeno prema regresionoj analizi
- $a_{vg}$  - projektno ubrzanja tla u vertikalnom pravcu
- $a_{\theta}(t)$  - novi generisani akcelrogram za ugao  $\theta$
- $\{b\}$  - vektor koji predstavlja faktore skaliranja talasića, a koji se koriste za usklađivanje
- $b_{NM}$  - model ponašanja okvirne zgrade (fleksioni i smičući)
- $c$  - prigušenje
- $d$  - pomeranje
- $\{d\}$  - vektor pomeranja
- $d_a$  - koeficijent neelastičnosti atenuacije
- $d_e$  - pomeranje iste tačke konstrukcijskog sistema koje je određeno prema linearnoj analizi zasnovanoj na projektnom spektru odgovora
- $d_{NM}$  - diskretizacija numeričkog modela (izbor veličine i potrebnog broja konačnih elemenata)
- $d_r$  - proračunsko međuspratno relativno horizontalno pomeranje, izračunato kao razlika između osrednjenih horizontalnih pomeranja  $d_s$  na vrhu i na dnu posmatranog sprata
- $d_{RMS}$  - kvadratni koren srednjeg kvadrata pomeranja
- $d_s$  - pomeranje tačke konstrukcijskog sistema usled projektog seizmičkog dejstva
- $d_0$  - inicijalno relativno pomeranje

- $f$  - frekvencija
- $f_c$  - čvrstoća betona pri pritisku
- $f_{c,calc}$  - proračunska vrednost čvrstoće betona pri pritisku
- $f_{cutoff}$  - frekvencija do koje se filtrira signal
- $f_j$  - računaska nosivost "jačeg" (ili jačih) elementa čije bi rušenje moglo ugroziti globalnu stabilnost konstrukcije
- $f_s$  - računaska nosivost "slabijeg" elementa (ili elemenata) koji ne ugrožava globalnu stabilnost konstrukcije i za koji je moguće obezbediti dovoljan duktilitet
- $f_{sam}$  - frekvencija semplovanja
- $f_1(M)$  - funkcija magnitude
- $f_2(R)$  - funkcija epicentralnog rastojanja
- $f_3(S)$  - funkcija kojom se uzimaju u obzir geološke karakteristike tla
- $h$  - visina sprata
- $h_b$  - visina grede
- $h_c$  - visina konusne površi
- $h_e$  - dubina žarišta
- $inf$  - infimum
- $k$  - krutost
- $k_c$  - faktor odnosa utegnutog i neutegnutog napona pritiska u betonu
- $k_{i,sec}$  - sekantna krutost
- $k_{i,t}$  - tangentna krutost
- $k_{so}$  - broj svojstvenih oblika koji se uzima u analizi
- $k_w$  - faktor koji uzima u obzir preovlađujuću vrstu loma konstrukcijskih sistema
- $m$  - masa
- $m_{NSA,0}$  - količina podataka dobijenih iz procesiranja inicijalnog numeričkog modela
- $m_{NSA,1}$  - količina podataka dobijenih iz procesiranja modela bez elemenata ispune
- $m_{NSA=1}$  - količina podataka dobijenih iz procesiranja jedne NSA analize
- $m_i$  - masa  $i$ -tog sprata
- $n$  - broj spratova
- $n_{se}$  - parametar superelipse
- $n_e$  - broj zemljotresa
- $n_{it}$  - broj iteracija po jednom inkrementu

- $n_{NDA,L}$  - broj NDA analiza za linearan domen
- $n_{NDA,N}$  - broj NDA analiza za nelinearan domen
- $n_{NM}$  - broj numeričkog modela
- $n_{NSA}$  - broj nelinearne statičke ili dinamičke seizmičke analize
- $n_s$  - broj korekcija matrice krutosti po iteracijama
- $n_\theta$  - broj ugla za koji se razmatra dejstvo zemljotresa
- $o_{NM}$  - ostali parametri relevantni u procesu kreiranja numeričkog modela (konturni uslovi, opterećenje, mase, prigušenje, performansni kriterijumi...)
- $p$  - parametar parabole
- $p_o$  - parametar ovalne krive
- $p_n$  - komponenta kontinualnog opterećenja u pravcu normale
- $p_t$  - komponenta kontinualnog opterećenja u pravcu tangente
- $q$  - faktor ponašanja
- $q_d$  - faktor ponašanja za pomeranja
- $q_0$  - osnovna vrednost faktora ponašanja, zavisna od tipa konstrukcijskog sistema
- $\{r\}$  - vektor potrebnog usklađivanja, a koji predstavlja razliku maksimalnog odgovora SDOF sistema realnog akcelerograma i amplitude prema ciljnom spektru odgovora
- $s_{NM}$  - volumen numeričkog modela (spratnost i broj polja)
- $sup$  - supremum
- $t$  - vreme
- $t_{acc}$  - vreme trajanja zemljotresa
- $t_{NSA,0}$  - vreme procesiranja inicijalnog numeričkog modela
- $t_{NSA,1}$  - vreme procesiranja modela bez elemenata ispune
- $t_{NSA=1}$  - vreme potrebno za procesiranje jedne NSA analize
- $t_r$  - radijalna koordinata vremena
- $t_{s1}$  - vreme iniciranja stacionarnog dela akcelerograma
- $t_{s2}$  - vreme finalizacije stacionarnog dela akcelerograma
- $t_{smd}$  - vreme jakog kretanja tla
- $t_x$  - vreme u ortogonalnom koordinatom sistemu ( $x$  koordinata)
- $t_y$  - vreme u ortogonalnom koordinatom sistemu ( $y$  koordinata)
- $\{u\}$  - vektor generalisanih pomeranja FEM modela

- $v$  - brzina
- $\nu$  - faktor redukcije kojim se uzima u obzir niži povratni period seizmičkog događaja koji se odnosi na granično stanje upotrebljivosti
- $\{v\}$  - vektor brzine
- $v_M$  - modalna vrednost magnitude
- $v_{RMS}$  - kvadratni koren srednjeg kvadrata brzine
- $v_{s,30}$  - brzina smičućih talasa tla za gornjih 30m dubine
- $v_0$  - inicijalna relativna brzina
- $x_n$  - inverzna diskretna *Fourier*-ova transformacija

### **A - $\Omega$**

- $\Gamma_j$  - faktor participacije za  $j$ -ti svojstveni oblik
- $\Delta_a$  - pomeranje u pravcu ose štapa
- $\Delta D$  - inkrement pomeranja
- $\Delta DR_L$  - razlika drifta za dve uzastopne NDA analize u linearnom domenu
- $\Delta DR_N$  - razlika drifta za dve uzastopne NDA analize u nelinearnom domenu
- $\Delta E$  - mera odnosa relativnih vrednosti energija deformacije
- $\Delta E_{min}$  - minimalno procentualno odstupanje energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija NSPA analize i bilinearizacije
- $\Delta F_s$  - inkrement faktora skaliranja
- $\Delta_i$  - projektno pomeranje  $i$ -tog sprata
- $\Delta K$  - vrednost redukcije inicijalne elastične krutosti
- $\Delta t_{acc}$  - inkrement vremena akceleroograma
- $\Delta V$  - inkrement sile
- $\Delta V_{max}$  - povećanje maksimalne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $\Delta(V/W)_{max}$  - povećanje maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta
- $\Delta\theta$  - inkrement ugla rotacije
- $\Sigma M_{Rb}$  - zbir proračunskih vrednosti momenata nosivosti gređa vezanih u čvoru
- $\Sigma M_{Rc}$  - zbir proračunskih vrednosti momenata nosivosti stubova vezanih u čvoru
- $\Psi_E$  - koeficijent kombinacije promenljivog dejstva
- $\Phi_{ij}$  - vrednost normalizovanog svojstvenog oblika za  $i$ -ti sprat i  $j$ -ti svojstveni oblik

## **$\alpha - \omega$**

- $\alpha$  - koeficijenta odnosa krutosti u nelinearnom i linearnom domenu
- $\alpha_{BC}$  - odnos krutosti u nelinearnoj zoni ponašanja  $K_{n,BC}$  određena postupkom bilinearizacije prema efektivnoj krutosti  $K_{eff}$
- $\alpha_f$  - ugao položaja raseda
- $\alpha_{PC}$  - odnos krutosti u nelinearnoj zoni ponašanja  $K_{n,PC}$  prema efektivnoj elastičnoj krutosti  $K_{eff}$  *pushover* krive
- $\alpha_s$  - faktor odnosa postelastične i inicijalne elastične krutosti
- $\gamma_I$  - faktor značaja
- $\varepsilon_i$  - faktori korekcije za granične kriterijume
- $\varepsilon_c$  - dilatacija betona pri naponu pritiska
- $\varepsilon_{c,max}$  - maksimalna dilatacija betona pri naponu pritiska
- $\varepsilon_{c,u}$  - granična dilatacija pritiska betona
- $\varepsilon_s$  - dilatacija čelične armature
- $\varepsilon_{s,h}$  - dilatacija čelika pri iniciranju zone kinematičkog ojačanja
- $\varepsilon_{s,u}$  - granična dilatacija čelične armature
- $\varepsilon_Y$  - parametar kojim se uzima u obzir nepouzdanost  $Y$  parametra
- $\varepsilon_y$  - dilatacija čelika na granici tečenja,
- $\eta$  - faktor korekcije prigušenja sa referentnom vrednošću  $\eta=1$  za viskozno prigušenje od 5%
- $\theta$  - ugao rotacije komponenata zemljotresa
- $\theta_{A,y}$  - rotacija za osu  $y$  i čvor  $A$
- $\theta_{A,z}$  - rotacija za osu  $z$  i čvor  $A$
- $\theta_{B,y}$  - rotacija za osu  $y$  i čvor  $B$
- $\theta_{B,z}$  - rotacija za osu  $z$  i čvor  $B$
- $\theta_{pu}$  - kapacitet plastične rotacije
- $\theta_T$  - rotacija za osu štapa
- $\kappa$  - krivina
- $\lambda$  - parametar inkrementalnog opterećenja (odnos inkrementalnog i punog opterećenja)
- $\lambda_M$  - recipročna vrednost zakrivljenosti krive raspodele
- $\mu$  - koeficijent duktilnosti

- $\mu_{CODE,min}$  - minimalna potrebna duktilnost prema propisima
- $\mu_{CP}$  - koeficijent duktilnosti za performanski nivo CP
- $\mu_{coll}$  - koeficijent duktilnosti za kolapsno stanje
- $\mu_{d,max/d,Y^i}$  - koeficijent raspoložive duktilnosti za diskretnu vrednost po uglovima  $\theta_i$
- $\mu_{d,max/d,Y^m}$  - koeficijent prosečne raspoložive duktilnosti po uglovima  $\theta_i$  za sve zemljotrese
- $\mu_{d,t/d,Y^i}$  - koeficijent realizovane duktilnosti za diskretnu vrednost po uglovima  $\theta_i$
- $\mu_{d,t/d,Y^m}$  - koeficijent prosečne realizovane duktilnosti po uglovima  $\theta_i$  za sve zemljotrese
- $\mu_{extr}$  - ekstremna vrednost duktilnosti
- $\mu_h$  - koeficijent duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja
- $\mu_{IO}$  - koeficijent duktilnosti za performanski nivo IO
- $\mu_{inf}$  - donja granica koeficijenta duktilnosti
- $\mu_{LS}$  - koeficijent duktilnosti za performanski nivo LS
- $\mu_m$  - srednja vrednost koeficijenta duktilnosti
- $\mu_{max}$  - koeficijent maksimalno raspoložive duktilnosti
- $\mu_{sup}$  - gornja granica koeficijenta duktilnosti
- $\mu_t$  - koeficijent realizovane duktilnosti za nivo ciljnog pomeranja
- $\mu_{x,0}$  - koeficijent duktilnosti za centar zatvorene ovalne krive (x pravac)
- $\mu_{x,max}$  - koeficijent maksimalne realizovane duktilnosti za x pravac
- $\mu_{x,min}$  - koeficijent minimalne realizovane duktilnosti za x pravac
- $\mu_Y$  - koeficijent duktilnosti za granicu tečenja
- $\mu_{y,0}$  - koeficijent duktilnosti za centar zatvorene ovalne krive (y pravac)
- $\mu_{y,max}$  - koeficijent maksimalne realizovane duktilnosti za y pravac
- $\nu_c$  - *Poisson*-ov koeficijent betona
- $\nu_s$  - *Poisson*-ov koeficijent čelika
- $\xi$  - koeficijent relativnog prigušenja
- $\xi_g$  - koeficijent relativnog prigušenja lokalnog tla
- $\sigma$  - standardna devijacija
- $\sigma_s$  - napon u čeličnoj armaturi
- $\sigma_{s,ult}$  - maksimalna vrednost napona čelika
- $\sigma_{s,y}$  - napon na granici tečenja čelika



- $\sigma_2$  - efektivni bočni napon pritiska usled utezanja
- $\varphi_o$  - ugao rotacije zatvorene ovalne krive
- $\varphi_i$  - fazni ugao  $i$ -te sinusoida koji se generiše funkcijom slučajnog broja u intervalu  $0 \div 2\pi$
- $\omega$  - ugaona frekvencija
- $\omega_g$  - ugaona frekvencija lokalnog tla



# 1

## 1. UVOD

### 1.1. PROBLEM I PREDMET ISTRAŽIVANJA

Zemljotres (tektonski) je prirodna pojava koja se realizuje iznenadnim oslobađanjem energije u litosferi. Efekat oslobađanja ove energije je umereno do snažno podrhtavanje tla sa blagim do katastrofalnim posledicama. U poslednjih 100 godina snažni zemljotresi velike momentne magnitude, kao što su *San Francisco*  $M_w=7.8$  (USA, 1906), *Haiyuan*  $M_w=7.8$  (Kina, 1920), *Kanto*  $M_w=7.9$  (Japan, 1923), *Tangshan*  $M_w=7.8$  (Kina, 1976), *Loma Prieta*  $M_w=6.9$  (USA, 1989), *Manjil*  $M_w=7.4$  (Iran, 1990), *Northridge*  $M_w=6.7$  (USA, 1994), *Izmit*  $M_w=7.5$  (Turska, 1999), *Bam*  $M_w=6.6$  (Iran, 2003), *Kashmir*  $M_w=7.6$  (Pakistan, 2005), *Sichuan*  $M_w=7.9$  (Kina, 2008), *Chile*  $M_w=8.8$  (Chile, 2010), *Haiti*  $M_w=7$  (Haiti, 2010) [364], prouzrokovali su velike gubitke ljudskih života i značajnu materijalnu štetu. Statistički posmatrano godišnje se u svetu prosečno dogodi više od 1500 zemljotresa magnitude  $M_w>5$ , a više od 150 zemljotresa magnitude  $M_w>6$  [364]. Posledice dejstava zemljotresa na konstrukcije reflektuju se u vidu neznatnih oštećenja, preko stanja koja zahtevaju sanaciju, pa sve do kolapsnih stanja objekata.

U odnosu na realne fizičke modele objekata, matematički modeli konstrukcija predstavljaju idealizovane modele ponašanja sa manjim ili većim stepenom aproksimacije. Analiza propagacije talasa kroz tlo usled dejstva zemljotresa, interakcija konstrukcija-tlo i numeričko modeliranje konstrukcija izloženih dejstvu zemljotresa konstantno se unapređuje razvojem računarske mehanike. U svakodnevnoj inženjerskoj praksi se primenjuju linearno-elastični modeli ponašanja konstrukcija za analizu

statičkih i dinamičkih uticaja. Analize koje pripadaju ovoj grupi su linearna statička analiza (LSA - *Linear Static Analysis*) i linearna dinamička analiza (LDA - *Linear Dynamic Analysis*), odnosno ekvivalentna statička analiza i spektralno-modalna analiza (SMA - *Spectral Modal Analysis*). Uobičajeni postupak primene linearnih proračunskih modela za statičku ili dinamičku analizu ne daje uvid u realno ponašanje zgrada izloženih dejstvu zemljotresa, jer ne uzima u obzir pojavu i razvoj nelinearnih deformacija u nosećoj konstrukciji. Savremene metode za analizu konstrukcija u uslovima dejstva zemljotresa zasnivaju se na primeni nelinearnog ponašanja, uzimajući u obzir razvoj i geometrijske i materijalne nelinearnosti. Analize koje pripadaju ovoj grupi su nelinearna statička analiza (NSA - *Nonlinear Static Analysis*) i nelinearna dinamička analiza (NDA - *Nonlinear Dynamic Analysis*). NSA analiza se sprovodi u kapacitativnom domenu (*capacity domain*), a poznatija je kao *pushover* analiza ili nelinearna statička *pushover* analiza (NSPA - *Nonlinear Static Pushover Analysis*). Razvoj koncepta NSPA analiza i analiza ciljnog pomeranja zgrada za uslove seizmickog dejstva iniciran je pre više od dve decenije, a zvanične implementacije su usledile u ATC 40 [10], FEMA 273 [78], *Eurocode EC 8* [66], FEMA 356 [80] i FEMA 440 [81] propise. Danas postoji širok spektar NSPA analiza i analiza ciljnog pomeranja, kao što su:

- metoda spektra kapaciteta (CSM - *Capacity Spectrum Method*),
- neiterativna metoda spektra kapaciteta (NICSM - *Non-Iterative Capacity Spectrum Method*),
- poboljšana metoda spektra kapaciteta (ICSM - *Improved Capacity Spectrum Method*),
- adaptivna metoda spektra kapaciteta (ACSM - *Adaptive Capacity Spectrum Method*),
- metoda koeficijenata pomeranja (DCM - *Displacement Coefficient Method*),
- metoda ekvivalentne linearizacije (ELM - *Equivalent Linearization Method*),
- metoda modifikacije pomeranja (DMM - *Displacement Modification Method*),
- N2 metoda (*N2 Method*),
- inkrementalna N2 metoda (IN2 - *Incremental N2 Method*),
- modalna *pushover* analiza (MPA - *Modal Pushover Analysis*),
- metoda modalnih kombinacija (MMC - *Method of Modal Combinations*),

- multimodalna *pushover* analiza (MMPP - *Multi-Mode Pushover Procedure*),
- inkrementalna analiza spektra odgovora (IRSA - *Incremental Response Spectrum Analysis*).

NSA analize koje se zasnivaju na neiterativnim i/ili neinkrementalnim postupcima ili primenjuju poluiterativne i/ili poluinkrementalne postupke su:

- analiza spektra granice tečenja (YPS - *Yield Point Spectra*),
- energetski postupak za analizu konstrukcija po teoriji plastičnosti (PBPD - *Performance-Based Plastic Design*),
- procedure koje se zasnivaju na proračunu prema silama (FBD - *Force-Based Design*),
- procedure koje se zasnivaju na proračunu prema pomeranju (DBD - *Displacement-Based Design*),
- neiterativna analiza koja se zasniva na proračunu prema pomeranju (DDBD - *Direct Displacement-Based Design*),
- neiterativna sekantna analiza (SMS - *Secant Modes Superposition*).

U odnosu na rešenja koja se dobijaju u kapacitativnom domenu primenom NSA analiza, kod NDA analiza rešenja se dobijaju u vremenskom domenu. Međutim, ukoliko se primeni set NDA analiza sukcesivno povećavajući faktor skaliranja akcelorograma, tada se konačno rešenje dobija u kapacitativnom domenu. U ove analize se ubrajaju:

- inkrementalna dinamička analiza (IDA - *Incremental Dynamic Analysis*),
- inkrementalna nelinearna dinamička analiza (INDA - *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*),
- adaptivna inkrementalna dinamička analiza (AIDA - *Adaptive Incremental Dynamic Analysis*),
- proširena inkrementalna dinamička analiza (EIDA - *Extended Incremental Dynamic Analysis*),
- progresivna inkrementalna dinamička analiza (PIDA - *Progressive Incremental Dynamic Analysis*),
- multikomponentalna inkrementalna dinamička analiza (MIDA - *Multi-Component Incremental Dynamic Analysis*),
- stohastička inkrementalna dinamička analiza (SIDA - *Stochastic Incremental Dynamic Analysis*),

- inkrementalna dinamička analiza zasnovana na MPA analizi (IDA-MPA - *Incremental Dynamic Analysis based on Modal Pushover Analysis*).

Prethodno klasifikovane statičke i dinamičke analize konstrukcija proračunavaju se primenom neke od metoda za matematičko-numeričko modeliranje i simulaciju ponašanja konstrukcija. Najveću primenu u rešavanju problema seizmičkih proračuna konstrukcija prema performansama (PBSD - *Performance-Based Seismic Design*) je pronašla metoda konačnih elemenata (FEM - *Finite Element Method*), a u poslednje vreme značajan doprinos u rešavanju problema kolapsa konstrukcija usled dejstva zemljotresa postignut je razvojem metode primenjenih elemenata (AEM - *Applied Element Method*) [206] i metode vremena izdržljivosti (ETM - *Endurance Time Method*) [12].

Razvojem savremene opreme i laboratorija za testiranje elemenata, konstruktivnih celina, modela i realnih konstrukcija omogućeno je kvalitetnije sagledavanje ponašanja i povećan je nivo sigurnosti novoprojektovanih konstrukcija na dejstvo zemljotresa. Sa druge strane, razvoj savremenih numeričkih metoda i implementacija u softverska rešenja, a podržano hardverskim resursima čiji se kapacitet konstantno povećava, omogućava simulaciju ponašanja konstrukcija na veoma visokom nivou kvaliteta. Razvoj savremene metodologije analize performansi konstrukcija u uslovima seizmičkog dejstva (PBEE - *Performance-Based Earthquake Engineering*) omogućava kompletnije i kompleksnije sagledavanje i tretiranje problema kroz analizu hazarda (*hazard analysis*), analizu konstrukcije (*structural analysis*), analizu oštećenja (*damage analysis*) i analizu štete (*loss analysis*) [142], [169]. Globalno ponašanje konstrukcije u nelinearnom području usled dejstva zemljotresa predstavlja se preko *pushover* krive (*pushover curve*) ili krive kapaciteta. Za NSPA analizu sa inkrementalnim priraštajem ravnomerne raspodele lateralnog seizmičkog opterećenja koristi se termin konvencionalna analiza (NSCPA - *Nonlinear Static Conventional Pushover Analysis*), dok se za analizu sa korigovanom raspodelom lateralnog seizmičkog opterećenja koristi termin adaptivna analiza (NSAPA - *Nonlinear Static Adaptive Pushover Analysis*). Kontrola inkrementalnog koncepta za NSCPA i NSAPA analizu moguća je preko sila (FBA - *Force-Based Analysis*) ili pomeranja (DBA - *Displacement-Based Analysis*). U zavisnosti od primenjene kontrole dobijaju se rezultati sa manjim ili većim stepenom tačnosti, gde se posebno naglašava primena

inkrementalnog koncepta pomeranja. Ovakva analiza se sprovodi na realnom (MDOF - *multi degree of freedom*) sistemu (prvi matematički model), bez dodatne redukcije stepeni slobode. Određivanje merodavnih lateralnih seizmičkih sila sprovodi se prema konceptu ciljnog pomeranja (TD - *target displacement*) na sistemu (drugi matematički model) sa jednim stepenom slobode (SDOF - *single degree of freedom*) ili se direktno proračun sprovodi na osnovu realizovane *pushover* krive.

Razvoj savremenih hardverskih i softverskih rešenja otvara mogućnosti za znatno realističniju analizu konstrukcija u uslovima seizmičkog dejstva. Međutim, postojeća softverska rešenja imaju određena ograničenja i nedovoljno implementiranu PBEE metodologiju. Najveći napredak je učinjen na polju implementacije analiza ciljnog pomeranja i verifikacije na 2D i 3D modelima konstrukcija. U tom smislu istraživanje prezentovano u ovoj disertaciji ima za cilj da napravi korak dalje u razvoju i implementaciji originalnih rešenja iz oblasti analize nelinearnog ponašanja konstrukcija i proširenja PBEE metodologije. Istraživanje u ovoj disertaciji sprovešće se sa ciljem da se utvrde performanse sistema pri projektnom seizmičkom zahtevu (SD - *seismic demand*) i pri maksimalnom raspoloživom kapacitetu nelinearnih deformacija. U domenu nelinearnog odgovora očekuje se realizovanje projektnog seizmičkog zahteva, dok maksimalan raspoloživi kapacitet nelinearnih deformacija karakteriše predkolapsno, odnosno kolapsno stanje. U prvom delu istraživanja razmatraće se nelinearno ponašanje sistema primenom NSPA analiza, pri čemu se performanse sistema utvrđuju proračunom prema silama (FBA), pomeranju (DBA) i mehanizmu loma (DMBD - *Damage Mechanisms-Based Design*). Procedura određivanja nivoa ciljnog pomeranja sprovešće se unapređenjem postojeće metode koeficijenata pomeranja (DCM) iz FEMA 356 [80]. Za ovako određene diskretne vrednosti ciljnih pomeranja konstruisaće se anvelope ciljnih pomeranja (TDE - *target displacement envelope*), koje predstavljaju moguća stanja zahtevanih globalnih driftova jednog sistema. Performanse sistema razmatraće se i primenom NDA analize, a koja predstavlja analizu sa najvišim stepenom pouzdanosti. S obzirom da se rešenja dobijena NSPA analizama zasnivaju na odgovoru pomeranje - ukupna lateralna sila, to se za nelinearan dinamički odgovor primenjuje INDA, odnosno IDA analiza. INDA (IDA) analizom je konstrukcija izložena seriji NDA analiza sukcesivno skalirajući akcelerogram, pri čemu se prati odgovor konstrukcije od početnog elastičnog, preko nelinearnog ponašanja pa sve do graničnog

stanja, odnosno stanja kolapsa. Merodavne vrednosti ovako dobijenih analiza su globalni driftovi ili duktilnosti kao parametar inženjerskog zahteva (*EDP - engineering demand parameter*), a odgovarajuća spektralna ubrzanja kao mere intenziteta (*IM - intensity measure*). Dobijena rešenja predstavljaju dinamičku *pushover* ili inkrementalnu dinamičku krivu. Primenom INDA (IDA) analiza dobiće se maksimalne vrednosti lateralnog pomeranja sistema, odnosno globalna dinamička nestabilnost sistema (*GI - global instability*) izražena preko globalnog drifta.

Veliki problem u sprovođenju INDA analiza na realnim modelima konstrukcija, pri razvoju i geometrijske i materijalne nelinearnosti, je vreme potrebno za procesiranje i kapacitet memorijskog prostora. Postupak izvršavanja INDA analiza kompleksnih 3D modela konstrukcija gotovo je nemoguće sprovesti na personalnim računarima. Savremena softverska i hardverska rešenja danas primenjuju umrežavanje procesora u klastere, tako da se INDA analize 3D realističnih modela konstrukcija sprovede tehnikom paralelnog procesiranja. Stepem primenjivosti rešenja zavisi od kompleksnosti geometrije modela koji se analizira, stepena aproksimacije i diskretizacije FEM modela, modela razvoja nelinearnih deformacija i broja NDA analiza. Ukoliko se izvršava serija NDA analiza (INDA), tada je potreban znatan kapacitet hardvera za fazu procesiranja. Takođe, javlja se i potreba za memorisanjem podataka dobijenih iz NDA analiza, a čija vrednost može preći i nekoliko stotina GB. U tom cilju će se razmotriti rešenje dobijeno IDA analizom, a koje se bazira na prethodno dobijenom rešenju iz NSPA analize. U procesu definisanja modela okvirnih sistema prethodno će se izvršiti detaljna analiza veličine modela (broja štapova sistema i konačnih elemenata), aspekti razvoja materijalne nelinearnosti (zone veze stub-greda, propagacija neelastičnih deformacija duž štapa), vremena trajanja zemljotresa, broja i veličine inkremenata kojima se sprovodi skaliranje u INDA (IDA) analizi.

Konstrukcija izložena dejstvu zemljotresa različitog intenziteta formira različite mehanizme loma, tako da određeni poprečni preseki ostaju u domenu linearnog ponašanja, dok određeni prelaze u domen nelinearnog ponašanja. Za okvirne sisteme karakteristično je formiranje mehanizma loma preko plastifikacije poprečnih preseka u zonama veza stub-greda. Modeliranje okvira prema ovakvom postupku sprovešće se tako što će se omogućiti plastifikacija duž svih štapova. U drugom postupku se uzima u obzir da neće uvek biti poželjno formiranje različitih mehanizama loma, pogotovo ne u



stubovima. Na osnovu ovakvih polaznih pretpostavki razvijena je metoda programiranog ponašanja (CDM - *Capacity Design Method*). Glavna ideja ove metode je da se unapred izaberu elementi, odnosno načini neelastičnog deformisanja koji mogu formirati mehanizme sa velikom sposobnošću absorpcije energije i koji ne ugrožavaju vertikalnu nosivost konstrukcije. U zavisnosti od kompleksnosti problematike procesiranja INDA (IDA) analiza, a koja je prethodno izložena, razmatraće se ravanski i prostorni regularani i neregularni okvirni sistem.

## **1.2. CILJ ISTRAŽIVANJA**

Istraživanje u ovoj disertaciji sprovešće se sa ciljem da se utvrde performanse 2D i 3D regularnih i neregularnih modela konstrukcija pri projektnom seizmičkom zahtevu (ciljnom pomeranju) i pri maksimalnom raspoloživom kapacitetu nelinearnih deformacija. Primenujući najnovija svetska saznanja iz zemljotresnog inženjerstva i definišući sopstvene procedure, izvršiće se brojne i odgovarajuće parametarske analize i numeričke simulacije sa ciljem da se utvrdi odgovarajuća metodologija i pristup koji bi omogućio što pouzdaniji i bolji uvid u ponašanje 2D i 3D modela zgrada za uslove dejstva zemljotresa.

## **1.3. ZADACI ISTRAŽIVANJA**

Na osnovu definisanog cilja istraživanja, zadaci istraživanja su:

- analiza prethodnih istraživanja na osnovu definisanog predmeta i cilja istraživanja,
- razvoj i programiranje originalnog softvera sa korisničkim interfejsima,
- testiranje originalno razvijenog softvera,
- selekcija i procesiranje akceleroograma,
- planiranje programa, definisanje modela konstrukcija i izvođenje numeričkih NSPA i INDA (IDA) analiza,
- obrada i interpretacija dobijenih rezultata iz numeričkih eksperimenata,
- sprovođenje metodoloških postupaka za određivanje nivoa ciljnog pomeranja sistema i predkolapsnog stanja,
- analiza performansi sistema,

- izvođenje zaključaka i preporuka za dalja istraživanja.

#### **1.4. RADNE HIPOTEZE**

Polazne hipoteze u disertaciji su:

- za sve proračunske modele uzima se u obzir razvoj materijalne i geometrijske nelinearnosti,
- analiza ciljnog pomeranja zasniva se na principu bilinearizacije odgovora MDOF sistema,
- kod NSPA analize prigušenje u sistemu se određuje indirektno,
- uzimaju se u obzir samo horizontalne ortogonalne komponente akcelrograma.

#### **1.5. NAUČNE METODE ISTRAŽIVANJA**

U istraživanju će se koristiti sledeće metode istraživanja:

- analiza i sinteza postojećih saznanja iz predmetne oblasti,
- metoda konačnih elemenata,
- inkrementalno-iterativni postupci,
- nelinearna statička seizmička analiza NSPA,
- inkrementalna nelinearna dinamička analiza INDA, odnosno inkrementalna dinamička analiza IDA,
- metode za analizu performansi konstrukcija.

#### **1.6. NAUČNA OPRAVDANOST I OČEKIVANI REZULTATI**

Predložena disertacija će posmatrati najnovija saznanja i pristupe analizama iz oblasti zemljotresnog inženjerstva, a koja su nastala i razvijaju se u poslednjih desetak godina. Takođe, razvoj sopstvenih procedura i implementacija u originalno softversko rešenje predstavljace značajan doprinos u ovoj oblasti istraživanja. Kao rezultat rada na ovom istraživanju očekuje se dobijanje boljeg uvida u nelinearno ponašanje konstrukcija zgrada za uslovne dejstva zemljotresa, kako bi se utvrdile performanse sistema i rezidualna nosivost, odnosno rezidualan nivo deformacija nakon dostizanja nivoa postavljenog seizmičkog zahteva.

## 1.7. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Istraživanja na temu nelinearne statičke i dinamičke seizmičke analize zgrada inicirana su i sprovode se u visokosofisticiranim naučnim centrima, od kojih se izdvajaju vodeći američki centri:

- Istraživački institut za zemljotresno inženjerstvo (EERI - *Earthquake Engineering Research Institute*) [258],
- Centar za zemljotresno inženjerstvo (MAE - *Mid-America Earthquake Center*) [290],
- Multidisciplinarni centar za istraživanje zemljotresnog inženjerstva (MCEER - *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*) [293],
- Pacifički istraživački centar za zemljotresno inženjerstvo (PEER - *Pacific Earthquake Engineering Research Center*) [315],
- Džon A. Blum centar za zemljotresno inženjerstvo (*The John A. Blume Earthquake Engineering Center*) [361],
- Kalifornijski institut za tehnologiju (*Caltech - California Institute of Technology*) [245],
- Mreža centara za simulacije u zemljotresnom inženjerstvu (NEES - *Network for Earthquake Engineering Simulations*) [298],
- Državna uprava za vanredna dejstva (FEMA - *Federal Emergency Management Agency*) [270],
- Savet za primenjene tehnologije (ATC - *Applied Technology Council*) [237].

U ovim centrima se sprovode teorijska razmatranja, numerička analize, eksperimentalna istraživanja i hibridne simulacije.

Razvoj koncepta NSPA analize zgrada za uslove seizmičkog dejstva iniciran je pre nešto više od dve decenije, dok je razvoj koncepta INDA (IDA) analiza zgrada iniciran u poslednjih desetak godina. NSPA analize su zvanično implementirana u ATC, FEMA i EC propise, dok implementacija INDA (IDA) analize još zvanično nije usledila, s obzirom da postoje brojna pitanja na koja tek treba dati odgovore. U nastavku ovog podpoglavlja je dat hronološki prikaz najbitnijih istraživanja na temu NSPA i INDA (IDA) analiza okvirnih zgrada za uslove seizmičkog dejstva. Preliminarno je pregledano i proanalizirano nekoliko desetina hiljada naučno-istraživačkih i stručnih radova na temu zemljotresnog inženjerstva, PBEE metodologije, modeliranja i analiza

konstrukcija. Prikazani su ključni radovi sortirani u četiri celine: naučno-istraživački radovi, doktorske disertacije, knjige i izveštaji, propisi za projektovanje objekata u seizmičkim područjima i simpozijumi.

**Naučno-istraživački radovi:**

- *Fajfar P., Fischinger M. (1987) [69]:*  
Prezentacija N2 metode kod zgrada, a koja je implementirana u EC 8. Osnova od koje se pošlo u NSPA analizi je da se MDOF sistem analizira preko SDOF sistema.
- *Lawson R., Vance V., Krawinkler H. (1994) [153]:*  
Komparativna analiza granica primenljivosti, prednosti i nedostataka NSPA analize u odnosu na LSA i NDA analizu.
- *Biddah A., Heidebrecht A., Naumoski N. (1995) [19]:*  
Primena NSPA analize za procenu oštećenja armiranobetonskih okvirnih zgrada izloženih dejstvu zemljotresa.
- *Faella G. (1996) [67]:*  
Komparacija NSPA i NDA analize za okvirne sisteme različite spratnosti, a koji su projektovani prema EC 8. NSPA analiza je izvršena sa promenljivom raspodelom poprečnih sila po visini okvira, a koje su skalirane sve do dostizanja ciljnog pomeranja dobijenog na osnovu CSM metode.
- *Krawinkler H. (1996) [140]:*  
U radu su prezentovani osnovni koncepti proračuna konstrukcija prema performansama za uslove seizmičkog dejstva.
- *Paret T., Sasaki K., Elibeck D., Freeman S. (1996) [179]:*  
U radu je prikazano proširenje NSPA analize identifikacijom mehanizama loma na osnovu efekata viših svojstvenih oblika u nelinearnom domenu.
- *Bracci J., Kunnath S., Reinhorn A. (1997) [24]:*  
Uvedeno je poboljšanje NSPA analize koja koristi potpuno prilagodljivu raspodelu poprečnog opterećenja, pa je shodno tome data analiza dobila naziv adaptivna NSPA analiza. Analiza počinje sa inicijalnom poprečnom raspodelom opterećenja, pri čemu se dodatno opterećenje u naknadnim inkrementima proračunava iz trenutne smičuće sile i spratne nosivosti prethodnog koraka opterećenja.

- *Krawinkler H., Seneviratna G. (1998) [141]:*  
U radu su izložene teorijske osnove NSPA analize i izvršena parametarska istraživanja za faktor redukcije nosivosti, normalizovani spektar zahtevanog pomeranja i normalizovana zahtevana nelinearna pomeranja.
- *Spacone E., Martino R., Kingsley G. (1999) [205]:*  
U ovom radu je razvijen novi softver na platformi postojećeg softvera FEAP za NSPA analizu armiranobetonskih zgrada.
- *Fajfar P. (2000) [71]:*  
U radu je prezentovana N2 metoda koja kombinuje NSPA analizu MDOF sistema, sa spektralnom analizom ekvivalentnog SDOF sistema. Metod je formulisan u formatu spektralno ubrzanje - spektralno pomeranje (ADRS - *acceleration displacement response spectrum*), koji omogućava vizuelnu interpretaciju procedure i relaciju između osnovnih veličina kontrolišući seizmički odgovor. Primenjen je neelastičan spektar (IRS - *inelastic response spectra*), a što karakteriše osnovnu razliku u odnosu na CSM metodu koja koristi elastičan spektar sa ekvivalentnim prigušenjem i periodom vibracija. Razmatrane su sličnosti i razlike između prikazane metode i NSPA analiza implementiranih u FEMA i ATC propise.
- *Gupta B., Kunnath S. (2000) [100]:*  
Prezentovana je adaptivna NSPA analiza kod koje se aplicirano opterećenje konstantno poboljšava u zavisnosti od trenutnih dinamičkih karakteristika konstrukcije. Prema datoj metodi, analiza svojstvenih oblika se izvršava pre svakog inkrementa opterećenja, uzimajući u obzir trenutno stanje krutosti sistema. Za svaki svojstveni oblik, spratne sile se dobijaju kao proizvod faktora modalne participacije, normalizovanog svojstvenog oblika, težine sprata i spektralne amplifikacije razmatranog svojstvenog oblika. Statička analiza se izvršava za svaku svojstvenu vrednost nezavisno, a zatim se sprovodi kombinacija na osnovu pravila kvadratni koren sume kvadrata (SRSS) i dodaje se odgovarajućim vrednostima iz prethodnog proračunskog koraka. Na kraju proračunskog koraka stanje krutosti konstrukcije se procenjuje kako bi se moglo koristiti za analizu svojstvenih vrednosti sledećeg proračunskog koraka.
- *Llera J., Vasquez J., Chopra A., Almazan J. (2000) [156]:*

U radu su prikazani aspekti modeliranja i nelinearne analize 3D modela zgrada primenom makro elemenata. Odgovor ovakvog numeričkog modela razmatran je preko 3D površi konstruisane za smičuće sile (dva ortogonalna pravca) i momenat torzije u osnovi zgrade.

- *Moghadam A., Tso W.* (2000) [171]:

U radu je prezentovana 3D NSPA analiza za procenu oštećenja 3D modela zgrade u uslovima dejstva zemljotresa.

- *Chopra A., Goel R.* (2001) [50]:

Razvijena je MPA analiza koja je zasnovana na teoriji dinamike konstrukcija. Prema ovoj metodi *pushover* krive koje odgovaraju različitim svojstvenim oblicima vibracija su idealizovane i transformisane u bilinearne krive ekvivalentnog sistema sa jednim stepenom slobode, radi proračuna ciljnog pomeranja i parametara odgovora za svaki svojstveni oblik posebno. Seizmički zahtev je određen korišćenjem pravila SRSS.

- *Memari A., Rafiee S., Motlagh A., Scanlon A.* (2001) [165]:

U radu su prikazani rezultati procene seizmičkog oštećenja visoke armiranobetonske zgrade. Indeks oštećenja dat u softveru IDARC je interpretiran i njegove implikacije upoređene sa dobijenim koeficijentima drifta. Upoređeni su rezultati NSPA i NDA analiza i razmatran je mehanizam kolapsa dobijen primenom ove dve analize. Utvrđeno je da se mehanizmom kolapsa dobijenim NSPA analizom može predvideti oblik rušenja date zgrade.

- *Mwafy A., Elnashai A.* (2001) [174]:

U radu je prikazana komparacija NSPA i NDA analiza na dvanaest različitih zgrada neregularnog i regularnog skeletnog sistema. Primenom više od hiljadu IDA analiza razvijene su dinamičke *pushover* idealizovane anvelope, a koje su poslužile za komparaciju sa rezultatima dobijenim NSPA analizom sa različitom raspodelom opterećenja.

- *Dolce M., Ponzio F.* (2002) [60]:

U radu je razmatran nelinearni seizmički odgovor zgrada projektovanih prema EC 8 propisima. Kao ulazni podaci korišćeni su veštački akcelerogrami koji su naknadno kompatibilizovani prema spektru odgovora EC 8 propisa.

- *Christopoulos C., Pampanin S., Priestley N.* (2003) [52]:

U radu je razmatran seizmički odgovor SDOF sistema kao aproksimacija okvirnog sistema i uzimajući u obzir da pri nelinearnom odgovoru egzistiraju rezidualne deformacije.

- *Deierlein G., Krawinkler H., Cornell C. (2003) [58]:*

U radu su prikazane osnove zemljotresnog inženjerstva baziranog na performansama, gde se procena sprovodi za konstrukciju, interakciju konstrukcija-tlo i akceleroگرامe.

- *Lađinović Đ., Folić R. (2003) [145]:*

U radu je prikazana mogućnost korišćenja zamenjujućeg SDOF sistema za kompleksan MDOF model zgrade i nelinearan odgovor ovog sistema za uslove dejstva zemljotresa.

- *Pampanin S., Christopoulos C., Priestley N. (2003) [177]:*

U radu je razmatran seizmički odgovor MDOF okvira uzimajući u obzir da pri nelinearnom odgovoru sistema egzistiraju rezidualne deformacije.

- *Antoniou S., Pinho R. (2004) [7]:*

U radu je prikazana NSCPA i NSAPA analiza. Adaptivna analiza uzima u obzir uticaj efekata viših svojstvenih oblika i progresivnu degradaciju krutosti na raspodelu seizmičkih spratnih sila. Izvršena je komparacija sa rezultatima mnogobrojnih NDA analiza. Korekcija seizmičkih sila se sprovodi primenom totalne korekcije (TU - *total updating*) i inkrementalne korekcije (IU - *incremental updating*).

- *Aschheim M., Tjhin T., Inel M. (2004) [9]:*

U radu je prikazana skalirana NDA analiza u cilju eliminisanja postojećih ograničenja konvencionalne NSPA analize, a gde se izdvajaju uticaji viših svojstvenih oblika koji se ne mogu adekvatno obuhvatiti konvencionalnom NSPA analizom.

- *Chopra A., Goel R. (2004) [51]:*

U radu je prezentovana MPA analiza za procenu seizmičkih zahteva zgrada neregularnih u osnovi.

- *Dong P., Carr A., Moss P. (2004) [62]:*

U radu su razmatrani efekti skaliranja akceleroگرامa za NDA analizu duktilnih okvirnih sistema, a primenom šest različitih procedura za skaliranje.

- *Goel R., Chopra A. (2004) [96]:*  
U ovom radu je prikazana komparacija razvijene MPA analize i postojeće NDA analize. MPA analiza je procesirana u skladu sa FEMA propisima. Utvrđeno je da povećanjem broja svojstvenih oblika raspodela spratnih driftova i plastičnih zglobova, proračunatih prema MPA analizi, postaje slična ponašanju dobijenom prema NDA analizi.
- *Guyader A., Iwan W. (2004) [102]:*  
U radu je dat detaljan prikaz konvencionalne CSM metode, a koja koristi sekantan period vibracija kao efektivan linearan period vibracija pri određivanju ciljnog pomeranja. Modifikacija CSM metode ogleda se u tome što se seizmički zahtev u ADRS formatu modifikuje.
- *Han S., Kwon O., Lee L. (2004) [105]:*  
U radu je prikazana evaluacija seizmičkih performansi eksperimentalnim ispitivanjem trospratne armiranobetonske zgrade okvirnog sistema.
- *Kalkan E., Kunnath S. (2004) [130]:*  
U radu je prikazan MMC metod koji uvodi uticaj viših svojstvenih oblika u proračun, a zasniva se na raspodeli poprečnih sila koje se formiraju iz nezavisnih modalnih uticaja. Validnost procedure proverena je komparacijom međuspratnog drifta i potrebne duktilnosti štapova sa drugim NSPA i NDA analizama.
- *Kappos A., Panagopoulos G. (2004) [137]:*  
U radu je prezentovana procedura za proračun 3D okvirnih armiranobetonskih zgrada prema performansama, a primenom NSPA i NDA analize uzimajući u obzir i 3D efekte.
- *Kunnath S., Kalkan E. (2004) [143]:*  
U radu se razmatra procena korelacija između različitih raspodela lateralnog opterećenja, a koje se koristi u NSPA analizi. Takođe, ispitano je određivanje seizmičkog zahteva preko spratova i preko celog sistema. Drugi deo istraživanja se odnosi na komparaciju NSPA i NDA analiza višespratnih okvirnih sistema.
- *Lin Y., Miranda E. (2004) [155]:*  
U radu je prikazana NICSMM metoda zasnovana na ekvivalentnoj linearizaciji za procenu zahtevanog nelinearnog pomeranja zgrada, odnosno nivoa ciljnog pomeranja.



- *Medina R.* (2004) [164]:  
Na višespratnim okvirnim sistemima razmatran je uticaj različitih lateralnih raspodela (parabolična, trougaona i ravnomerna) na nivo promene spratne duktilnosti po visini konstrukcije. Rezultati studije pokazuju da je parabolična raspodela efikasnija za limitiranje spratnih duktilnosti pri vrhu konstrukcije, dok su trougaona i ravnomerna raspodela efikasnije za limitiranje spratnih duktilnosti pri osnovi.
- *Akkar S., Miranda E.* (2005) [1]:  
U radu je prikazana statistička evaluacija analiza nivoa ciljnog pomeranja. Posebno su razmatrani aspekti određivanja maksimalnih zahtevnih pomeranja postojećih konstrukcija zgrada.
- *Barros R., Almeida R.* (2005) [14]:  
U radu je razmatrana NSPA analiza asimetričnih trodimenzionalnih okvirnih sistema. Izložena je NSPA analiza povezana sa CSM metodom, pri čemu se koristi vektor opterećenja proporcionalan prvom svojstvenom obliku. Takođe, razvijen je novi vektor opterećenja koji je zasnovan na participaciji većeg broja svojstvenih oblika.
- *Goel R., Chopra A.* (2005) [97]:  
U radu je ukazano na ulogu viših svojstvenih oblika kod MPA analize pri nelinearnom seizmičkom odgovoru zgrada.
- *Iervolino I., Cornell A.* (2005) [115]:  
U ovom radu je prikazana metodologija selekcije i skaliranja akcelerograma koji se uzimaju u obzir za NDA analizu.
- *Janković S.* (2005) [119]:  
Studija pouzdanosti seizmičkih analiza u okviru kojih su posebno razmatrane statičke i dinamičke analize višespratnih okvira: LSA, LDA, NSPA i NDA analiza. NSPA analiza je razmatrana u skladu sa propisima FEMA. Rezultati analiza prikazani su pomoću tri parametra seizmičkog odgovora: maksimalnog drifta okvira, srednje vrednosti maksimalnih spratnih driftova (opisuje nekonstruktivno oštećenje) i maksimalnog spratnog drifta (opisuje stanje kolapsa). Za utvrđene spratne sile za sve analize, izračunati su odnosi NDA/LSA, NDA/LDA i NDA/NSA za sva tri parametra seizmičkog odgovora.

Pouzdanost seizmičkih analiza ocenjuje se za vrednosti medijana i 84%-tnih fraktila NDA/(LSA, LDA, NSA) odnosa seizmičkih odgovora, a za dva nivoa seizmičkog hazarda (10%/50 i 2%/50).

- *Makarios T.* (2005) [160]:

Koristi se ekvivalentan nelinearni SDOF sistem kao zamena za višespratni okvir, gde se zatim razvijena *pushover* kriva aproksimira bilinearnom krivom na osnovu jednakosti energija deformacija. Kao reprezentativan model za analizu prikazan je okvir kod koga su grede modelirane kao T poprečni presek i kod kojih se uzima u obzir interakcija ploča-greda.

- *Papanikolaou V., Elnashai A., Pareja J.* (2005) [178]:

Istraživanjem u ovoj studiji utvrđene su granice primenjivosti konvencionalne i adaptivne NSPA analize za okvirne sisteme, a za različite nivoe konstrukcijske neregularnosti i duktilnosti. Razmatrana su stanja ponašanja: globalno, na prvom spratnom nivou i na srednjem spratnom nivou.

- *Bradley B., Dhakal R., Mander J.* (2006) [25]:

U radu je prikazana primena IDA analize za ocenu povredljivosti zgrada, a u funkciji tipa akcelerograma.

- *Han S., Chopra A.*: (2006) [106]:

U radu je prikazana razvijena IDA-MPA analiza. Testiranje je sprovedeno sa prva tri svojstvena oblika i dobijeni su veoma zadovoljavajući rezultati u odnosu na rešenja IDA analize.

- *Kalkan E., Kunnath S.* (2006) [131]:

Razvijena je i prikazana nova NSPA analiza nazvana adaptivna modalna kombinacija (AMC - *adaptive modal combination*). Data metoda koristi direktnu tehniku kombinovanja više svojstvenih oblika i integrisan koncept metode spektra kapaciteta prema ATC, adaptivnu metodu i NSPA analizu. Viši svojstveni oblici se proračunavaju kombinacijom odgovora individualnih modalnih *pushover* analiza i inkorporiranjem efekata promene dinamičkih karakteristika u toku neelastičnog odgovora, a preko adaptivnih karakteristika. Aplicirane lateralne sile koje se koriste u adaptivnoj NSPA analizi zasnovane su na trenutnoj raspodeli inercijalnih sila za svaki svojstveni oblik po visini objekta. Ciljno pomeranje je proračunato i korigovano u toku analize objedinjavanjem

- krive kapaciteta i spektra kapaciteta konstantne duktilnosti.
- *Bradley B., Dhakal R., Mander J. (2007) [26]:*  
U radu je prikazano modeliranje i analiza višespratne zgrade projektovane uvažavajući principe duktilnosti i mehanizma loma, a primenom IDA analize.
  - *Goulet C., Haselton C., Mitrani-Reiser J., Beck J., Deierlein G., Porter K., Stewart J. (2007) [98]:*  
U radu je prikazana metodologija procene seizmičkih performansi armiranobetonskih okvirnih zgrada projektovanih prema propisima, uzimajući u obzir nivo seizmičkog hazarda, procenjujući kolaps i veličinu ekonomskih gubitaka pri oštećenju.
  - *Kalkan E., Kunnath S. (2007) [133]:*  
U radu je prikazana procena postojećih NSPA analiza za seizmičku evaluaciju zgrada, gde su razmatrane lateralne raspodele opterećenja prema FEMA propisima, modifikovana MPA analiza i NSPA analiza sa AMC kombinacijom.
  - *Magliulo G., Maddaloni G., Cosenza E. (2007) [159]:*  
U radu je prikazana komparacija NDA i NSPA analiza 3D modela zgrade projektovane prema EC 8 propisima.
  - *Mollaioli F., Mura A., Decanini L. (2007) [173]:*  
U radu je izvršena procena zahtevanih nelinearnih deformacija višespratnog okvirnog sistema, odnosno nivo deformacija pri ciljnom pomeranju.
  - *Vamvatsikos D. (2007) [216]:*  
U radu su razmatrani aspekti paralelnog procesiranja kod IDA analize, a takođe su razmatrani i aspekti postprocesiranja u cilju određivanja kolapsnog stanja konstrukcije preko dinamičke *pushover* krive.
  - *Villaverde R. (2007) [219]:*  
U radu su prikazani uporedni testovi eksperimentalnog istraživanja i analitičkih metoda za procenu kapaciteta i kolapsa konstrukcije, a čime je ukazano na dobre i loše strane postojećih analitičkih metoda.
  - *Ambrisi A., Stefano M. (2008) [4]:*  
U radu su razmatrane seizmičke performanse neregularnih 3D modela okvirnih zgrada. Ulazni signal je tretiran preko šest akceleroograma koji su dodatno skalirani prema EC 8 projektnom spektru odgovora.

- *Baros D., Anagnostopoulos S. (2008) [15]:*  
U radu je dat prikaz NSPA analiza zgrada koje su torziono osetljive. Komparacija nekoliko različitih NSPA analiza sprovedena je preko drifta i plastične rotacije na krajevima greda.
- *Dolšek M. (2008) [61]:*  
U radu su razmatrani uticaji nepouzdanosti koji su uvedeni u proračun probabilističke IDA analize performansi zgrada. Varirani su parametri nepouzdanosti: mehaničke karakteristike materijala, gravitaciono opterećenje i odgovarajuća masa sistema, viskozno prigušenje, efektivna širina ploče i granične rotacije.
- *Iervolino I., Manfredi G. (2008) [116]:*  
U radu je prikazana strategija selekcije zapisa ubrzanja tla za NDA i IDA analize.
- *Janković S., Stojadinović B. (2008) [121]:*  
U radu je prezentovana metodologija određivanja kapaciteta međuspratnog drifta okvirnih armiranobetonskih sistema, a koja je bazirana na indeksu oštećenja.
- *Ladinović Đ. (2008) [148]:*  
U radu je prezentovana nelinearna seizmička analiza zgrada koje su nesimetrične u osnovu. Seizmički odgovor je razmatran uspostavljajući korelaciju između ukupne smičuće sile i momenta torzije u osnovi zgrde.
- *Vejdani-Noghreiyani H., Shooshtari A. (2008) [218]:*  
U radu je prikazana komparacija IDA i IDA-MPA analize višespratnih armiranobetonskih okvirnih sistema.
- *Fragiadakis M., Vamvatsikos D., Ascheim M. (2011) [93]:*  
U radu je ukazano na aspekte primenljivosti NSPA analiza kod armiranobetonskih okvirnih sistema, pri čemu je istraživanje sprovedeno N2 metodom, DCM metodom i MPA analizom.
- *Vamvatsikos D., Ascheim M., Comratin C. (2011) [217]:*  
U radu je prikazana komparacija krivih kapaciteta realizovanih NSPA i IDA analizom.
- *Jeong S., Mwafy A., Elnashai A. (2012) [123]:*  
U radu je prikazana probabilistička metoda za procenu seizmičkih performansi

višespratnih armiranobetonskih zgrada prethodno projektovanih prema propisima.

- *Kazantzi A., Vamvatsikos D.* (2012) [138]:  
U ovom radu je prikazana studija o korelaciji između disipacije histerezisne energije i seizmičkih performansi primenom IDA analize.
- *Yasrebina Y., Poursharifi M.* (2012) [223]:  
U radu je prikazano istraživanje 3D NSPA analize nesimetričnih torziono osetljivih armiranobetonskih zgrada.
- *Fragiadakis M., Vamvatsikos D., Ascheim M.* (2013) [94]:  
U radu je ukazano na aspekte primenljivosti NSPA analiza kod armiranobetonskih okvirnih sistema, pri čemu je istraživanje sprovedeno N2 metodom, DCM metodom i MPA analizom.
- *Kalkan E., Chopra A.* (2013) [135]:  
U radu je prikazana procedura skaliranja akceleroograma za visoke zgrade modalnom MPA analizom.
- *Kalkan E., Kwong N.* (2013) [136]:  
U ovom radu su prikazani aspekti primene akceleroograma kod kojih se uzima u obzir da li je zapisa ubrzanja tla paralelno i upravno na pravac prostiranja raseda za NDA analize višespratnih zgrada.

#### **Doktorske disertacije, knjige i izveštaji:**

- *Nassar A., Krawinkler H.* (1991) [176]:  
U ovoj studiji su razmatrani seizmički zahtevi za SDOF i MDOF sisteme. U slučaju SDOF sistema razmatran je model sa degradacijom krutosti i bilinearni histerezisni model, dok su u slučaju MDOF sistema razmatrana tri različita tipa konstrukcije.
- *Seneviratna G., Krawinkler H.* (1997) [201]:  
U ovoj studiji su razvijene procedure za kvantifikaciju seizmičkog zahteva MDOF sistema za nivo konceptualnog projektovanja, a gde se za seizmički signal koristi spektar odgovora (RS - *response spectra*).
- *Sarvghad-Moghadam A.* (1998) [197]:  
U ovoj doktorskoj disertaciji je razmatran torzioni odgovor asimetričnih višespratnih okvirnih zgrada za uslove dejstva zemljotresa. Performanse su

razmatrane preko *pushover* krivih, promene perioda vibracija sistema, globalnog i međuspratnog drifta.

- *Satyarno I.* (2000) [198]:

U ovoj doktorskoj disertaciji je prikazan razvijen algoritam adaptivne NSPA analize za procesnu seizmičkih performansi postojećih armiranobetonskih zgrada.

- *Bagchi A.* (2001) [13]:

U ovoj doktorskoj disertaciji je izvršena evaluacija seizmičkih performansi armiranobetonskih okvirnih sistema preko duktilnosti i međuspratnog drifta.

- *Farrow K., Kurama Y.* (2001) [75]:

U ovom istraživanju su prikazani odnosi indeksa mere kapaciteta konstrukcije i seizmičkog zahteva za konstrukcije koje su projektovane prema performansama. Takođe, razmatrane su i metode za skaliranje akceleroograma za NDA analizu.

- *Vamvatsikos D.* (2002) [209]:

U ovoj doktorskoj disertaciji je predstavljena IDA analiza. Date su osnove proračuna konstrukcija okvirnih zgrada primenom IDA analiza, razmotrene su specifičnosti i merodavni performansni parametri.

- *Lađinović Đ.* (2002) [144]:

U ovoj doktorskoj disertaciji je prezentovana višekriterijumska analiza seizmičke otpornosti konstrukcija armiranobetonskih zgrada. Deo istraživanja je usmeren na analizu parametara konstrukcije od kojih presudno zavisi seizmički odgovor konstrukcije pri nelinearnom ponašanju. U disertaciji je, između ostalog, i formulisan i prikazan postupak projektovanja konstrukcija koji se zasniva na proceni oštećenja.

- *Menjivar M.* (2003) [166]:

U ovoj studiji je prikazana analiza ponašanja neregularnih trodimenzionalnih modela zgrada za uslove dejstva zemljotresa, a koji su formirani od linijskih konačnih elemenata. Dva numerička modela su testirana primenom NSCPA i NSAPA analiza sa različitim raspodelama lateralnog seizmičkog opterećenja. Kao merodavna uzeta je u obzir IDA analiza. Razmatrani su uticaji pravca apliciranog opterećenja, efekti uvođenja dijafragmi na ponašanje sistema i komparacija NSCPA i NSAPA analize.

- *Jeong S., Elnashai A. (2004) [122]:*  
U ovoj studiji je prikazano eksperimentalno istraživanje neregularne 3D zgrade za uslove dejstva zemljotresa. Korišćen je pseudodinamički test, dok je seizmička pobuda sprovedena preko akceleroograma za bidirekciono dejstvo.
- *Ibarra L., Krawinkler H. (2005) [114]:*  
U ovom istraživanju je prikazana metodologija procene globalnog kolapsa okvirnih konstrukcija zgrada usled dejstva zemljotresa, a bazirana na IDA analizi.
- *Ruiz-Garcia J., Miranda E. (2005) [194]:*  
U ovoj doktorskoj disertaciji su analizirane performanse konstrukcije zgrada uzimajući u obzir rezidualno pomeranje koje se dobija iz NDA i IDA analiza.
- *editori: Bozorgnia Y., Bertero V. (2006) [23]*  
U ovoj knjizi su prezentovana obimna numerička i eksperimentalna istraživanja iz oblasti zemljotresnog inženjerstva, analiza nelinearnog ponašanja konstrukcija, determinističkog i probabilističkog koncepta analize prema performansama.
- *Kalkan E. (2006) [132]:*  
U ovoj doktorskoj disertaciji je prikazana metodologija predikcije seizmičkog zahteva armiranobetonskih zgrada, a bazirana na NSPA i NDA analizama.
- *editor: Pecker A. (2007) [182]:*  
U ovoj knjizi su prikazan NSCPA i NSAPA analize, a takođe je izložen i proračun prema DBA i DDBD analizama.
- *Haselton C., Dierlein G. (2007) [107]:*  
U ovoj studiji razvijene su metode za procenu rizika od kolapsa okvirnih armiranobetonskih konstrukcija IDA analizom, pri čemu se uzima u obzir nekoliko aspekata, od pomeranja tla preko modeliranja konstrukcije pa do kvantitativnog razmatranja nepouzdanosti.
- *Park K. (2007) [180]:*  
U ovoj doktorskoj disertaciji su razmatrane različite lateralne raspodele seizmičkog opterećenja kod NSPA analize za konceptualno seizmičko projektovanje konstrukcija okvirnog statičkog sistema.
- *Priestley M., Calvi G., Kowalsky M. (2007) [189]:*

- U ovoj knjizi je prezentovana metodologija proračuna konstrukcija zgrada prema performansama, a primenom DBA analiza. Posebno je stavljen naglasak i na neiterativne DDBD analize.
- *Zaghlool B.* (2007) [226]:  
U ovoj doktorskoj disertaciji razmatrano je ponašanje 3D armiranobetonskih konstrukcija za bidirekciono seizmičko dejstvo, pri čemu je za ulazni signal korišćen akcelerogram, a razmatrana su nezavisno dva ortogonalna pravca.
  - *Elnashai A., Sarno L.* (2008) [64]:  
U knjizi su, između ostalog, izloženi aspekti analize konstrukcija prema performansama, a takođe teorijski aspekti proračuna konstrukcija prema pomeranju.
  - *Haselton C.* (2009) [108]:  
U ovom istraživanju je prikazana metodologija selekcije zapisa ubrzanja tla i metode za predikciju medijane međuspratnog drifta kod nelinearnog odgovora zgrada.
  - *Ramirez C., Miranda E.* (2009) [190]:  
U ovom istraživanju su razvijene metode za procenu štete zgrada usled dejstva zemljotresa, a bazirajući se na određenim pojednostavljenima prema PBEE metodologiji.
  - *Zareian F., Krawinkler H.* (2009) [227]:  
U ovom istraživanju je razmatrana pojednostavljena metoda za procenu performansi konstrukcija u okviru PBEE metodologije, a uzimajući u obzir tri različita domena: hazard, konstruktivni sistem zgrade i procenu štete.
  - *Chandrasekaran S., Nunziante L., Serino G., Carannante F.* (2010) [47]  
U knjizi su prezentovani osnove proračuna okvirnih sistema od proračuna na nivou poprečnog preseka pa do kompletnog nelinearnog odgovora preko *pushover* krive.
  - *Fardis M.* (2010) [74]:  
U knjizi su razmatrane napredne tehnike iz oblasti zemljotresnog inženjerstva prema performansama.
  - *Yazgan U.* (2010) [224]:  
U ovoj doktorskoj disertaciji je kao indikator seizmičkih performansi



konstrukcija razmatrano rezidualno pomeranje koje se dobija iz NDA analiza, pri čemu je algoritam razvijen uzimajući u obzir teoriju verovatnoće.

- FIB izveštaj (2012) [92]:

U ovom izveštaju je dat pregled dosadašnjeg stanja projektovanja konstrukcija prema performansama bazirano na probabilističkom seizmičkom konceptu.

- Kalkan E., Kwong N. (2012) [134]:

U ovoj studiji je ukazano na potrebu za uvođenjem uticaja komponeneta zapisa ubrzanja tla paralelno i upravno na pravac prostiranja raseda kod NDA analize višespratnih zgrada.

### **Propisi:**

- ATC 40 (1996) [10]:

CSM metoda je implementirana u ove propise, gde se ciljno pomeranje određuje na osnovu preseka krive kapaciteta (*capacity curve*) i krive zahteva (*demand curve*). Kriva kapaciteta se dobija konvertovanjem *pushover* krive u ADRS format, dok se kriva zahteva određuje iz spektra odgovora, modifikovanog usled efekata histerezisnog prigušenja. *Pushover* kriva se razvija na osnovu nelinearnog ponašanja MDOF sistema. Zatim se sprovodi bilinearizacija *pushover* krive SDOF sistemom.

- FEMA 273 (1997) [78], FEMA 274 (1997) [79], FEMA 356 (2000) [80]:

Ovi propisi se baziraju na linearnoj i nelinearnoj statičkoj i dinamičkoj analizi zgrada za uslove dejstva zemljotresa. Za određivanje nivoa ciljnog pomeranja se koristi DCM metoda, gde se zahtevano pomeranje proračunava modifikacijom pretpostavki o neelastičnom pomeranju. Prvo se sprovodi NSPA analiza na MDOF sistemu, a zatim razvija *pushover* kriva i određuje nivo ciljnog pomeranja.

- Eurocode 8 (2003) [66]:

Za razliku od prethodno prikazanih propisa, evropski propis EC 8 sažeto prikazuje NSPA analizu, odnosno implementiranu N2 metodu. Data je koncepcija transformacije MDOF sistema u SDOF sistem i određivanje nivoa ciljnog pomeranja.

- FEMA 440 (2005) [81]:

Unapređenje propisa FEMA 356 u oblasti NSPA analiza novih i postojećih

objekata predstavljeno je u propisu FEMA 440. Ovaj propis detaljno objašnjava oblasti od posebnog interesa: procena nelinearnih statičkih analiza koje su implementirane u propise FEMA i ATC, problem degradacije krutosti kod nelinearne analize, poboljšanje procedura za proračun modifikacije pomeranja, poboljšanje procedure za ekvivalentnu linearizaciju, uticaj efekata više stepeni slobode, odgovor zgrada sa kratkim periodom vibracija i interakcija konstrukcija-tlo (SSI - *Soil-Structure Interaction*).

- FEMA 440A (2009) [82]:

U ovim propisima prikazani su uticaji efekata degradacije krutosti i nosivosti na odgovor sistema, a primenom IDA analize. Razmatran je veliki broj parametarskih analiza, a na različitim histerezisnim modelima ponašanja. Predložena su poboljšanja postojeće DCM metode za analizu nivoa ciljnog pomeranja.

- FEMA 450 (2003) [83], FEMA 451 (2006) [84], FEMA 451B (2007) [85], FEMA 750P (2009) [87], FEMA 749P (2010) [88]:

Propisi za projektovanje objekata u seizmičkim aktivnim područjima sa dodacima i primerima, a gde se, između ostalog, preporučuje primena LSA i NSPA analiza.

- FEMA 695P (2009) [86]:

U ovoj knjizi su prikazani kvantifikovani seizmički performansi faktori određeni na okvirnim sistemima primenom IDA analiza.

- TBI (2010) [207]:

U ovim propisima su prikazani aspekti projektovanja konstrukcija visokih zgrada prema performansama uzimajući u obzir razvoj nelinearnih deformacija pri jakom kretanju tla (*strong ground motion*).

- FEMA P-58-1 (2012) [89], FEMA P-58-2 (2012) [90], FEMA P-58-3 (2012) [91]:

U ovim najnovijim propisima prikazana je metodologija analize i ocene performansi zgrada razvijana u poslednjih petnaestak godina.

### **Simpozijumi (PBEE - *Performance-Based Earthquake Engineering*):**

- editori: *Fajfar P., Krawinkler H.* (1992) [70]:

*Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings,*

- Workshop on Nonlinear Seismic Analysis of Reinforced Concrete Buildings, 369p, Bled, Slovenia
- editori: *Kabeyasawa T., Moehle J. (1999) [124]:*  
*The 1<sup>st</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, PEER Report 1999/10, 380p, Maui, Hawaii
  - editori: *Kabeyasawa T., Moehle J. (2000) [125]:*  
*The 2<sup>nd</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, PEER Report 2000/10, 431p, Sapporo, Japan
  - editori: *Kabeyasawa T., Moehle J. (2001) [126]:*  
*The 3<sup>rd</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, PEER Report 2002/02, 443p, Seattle, Washington
  - editori: *Kabeyasawa T., Moehle J. (2002) [127]:*  
*The 4<sup>th</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, PEER Report 2002/21, 372p, Toba, Japan
  - editori: *Kabeyasawa T., Moehle J. (2003) [128]:*  
*The 5<sup>th</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, PEER Report 2003/11, 418p, Hakone, Japan
  - editori: *Fajfar P., Krawinkler H. (2004) [72]:*  
*Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation*, PEER Report 2004/05, 531p, Bled, Slovenia
  - editori: *Fardis M., Negro P. (2005) [73]:*  
*Seismic Performance Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings, An Event to Honour the Memory of Prof. Jean Donea*, 304p, Ispra, Italy
  - editori: *Moehle J., Kabeyasawa T. (2005) [170]*  
*The 1<sup>st</sup> NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures*, PEER Report 2005/10, 429p, Berkeley, USA
  - editori: *Kabeyasawa T., Moehle J. (2006) [129]*

*The 2<sup>nd</sup> NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures*, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 299p, Kobe, Japan

- editori: *Bento R., Pinho R.* (2008) [17]  
*Nonlinear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures*, 184p, Lisbon, Portugal

## **1.8. PUBLIKOVANI NAUČNO-ISTRAŽIVAČKI RADOVI AUTORA DISERTACIJE (IZDVOJENO)**

Istraživanje na temu metodologije analize performansi konstrukcija u uslovima dejstva zemljotresa (PBEE) autor je započeo na postdiplomskim studijama, a izradom i odbranom magistarskog rada dodatno se usavršio na polju ovih analiza zgrada. Kontinuitet istraživanja PBEE metodologije kod okvirnih zgrada je uspostavljen u ovoj doktorskoj disertaciji razvojem originalnih ideja, implementacijom u softversko rešenje i testiranjem. U toku višegodišnjeg usavršavanja na polju PBEE metodologije i u toku izrade doktorske disertacije autor je sam i u koautorstvu objavio veći broj (ukupno 49) naučno-istraživačkih radova, a koji su publikovani u međunarodnim i domaćim naučnim časopisima i na naučno-stručnim simpozijumima.

Magistarska teza:

- Ćosić M.: *Nelinearna statička seizmička analiza višespratnih okvira*, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 230str, Novi Sad, Srbija, 2010.

Međunarodni i domaći naučni časopisi:

- Ćosić M.: *Metoda programiranog ponašanja u nelinearnoj analizi okvirnih konstrukcija zgrada*, Časopis Nauka+Praksa, Vol. 12, br. 2, str. 4-7, 2009.
- Ćosić M.: *Analiza odnosa zahteva i odgovora sistema za procenu performansi u uslovima seizmičkog dejstva*, Zbornik radova Građevinsko-arhitektonskog fakulteta Univerziteta u Nišu, Br. 25, str. 41-48, 2010.
- Ćosić M., Brčić S.: *Metodologija pripreme i obrade akcelerograma za linearne i nelinearne seizmičke analize konstrukcija*, Časopis Izgradnja, Vol. 66, No. 11-12, str. 511-526, 2012.

- Ćosić M., Brčić S.: *Iterative Displacement Coefficient Method: Mathematical Formulation and Numerical Tests*, *Građevinar, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, Vol. 65, No. 3, pp. 199-211, 2013.
- Ćosić M., Brčić S.: *Typology of NSPA Pushover Curves and Surfaces for 3D Performance-Based Seismic Response of Structures*, *Building Materials and Structures*, Vol. 56, Iss. 4, 2013, pp. 19-38.
- Ćosić M., Brčić S.: *The Development of Controlled Damage Mechanisms-Based Design Method for Nonlinear Static Pushover Analysis*, *Facta Universitatis*, 2014. (prihvaćeno za publikovanje)
- Ćosić M., Brčić S.: *Analiza mehanizama loma zgrada razmatranjem statičke neodređenosti i kinematičke stabilnosti*, *Časopis Izgradnja*, 2014. (prihvaćeno za publikovanje)

Međunarodni i domaći naučno-stručni simpozijumi:

- Ćosić M., Lađinović Đ.: *Nelinearna statička konvencionalna i modifikovana pushover metoda*, *INDIS, X nacionalni i IV međunarodni naučni simpozijum*, str. 267-274, Novi Sad, Srbija, 2006.
- Ćosić M.: *Model interakcije višespratni okvir-poluprostor tla za pushover analizu*, *XXIV kongres i simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u oblasti materijala i konstrukcija*, str. 187-192, Divčibare, Srbija, 2008.
- Lađinović Đ., Ćosić M.: *Pushover analiza višespratnih armiranobetonskih okvira*, *Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, I naučno-stručno savetovanje*, str. 113-120, Soko Banja, Srbija, 2008.
- Lađinović Đ., Ćosić M.: *Seizmička analiza okvirnih konstrukcija primenom nelinearne statičke metode*, *XXIV kongres i simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u oblasti materijala i konstrukcija*, str. 215-222, Divčibare, Srbija, 2008.
- Ćosić M.: *Analiza interakcije konstrukcija - tlo nelinearnom statičkom seizmičkom metodom*, *Geotehnički aspekti građevinarstva, III naučno-stručno savetovanje*, str. 137-142, Zlatibor, Srbija, 2009.
- Ćosić M.: *About the Required Capacity of Nonlinear Deformations of the SDOF System with the Pushover Analysis*, *The 2<sup>nd</sup> International Congress of Serbian*

- Society of Mechanics, pp. D-06:1-9, Palić, Serbia, 2009.
- Ćosić M.: *Global Stability Analysis of the System Failure Critical Mechanism*, The 2<sup>nd</sup> International Congress of Serbian Society of Mechanics, pp. D-05:1-11, Palić, Serbia, 2009.
  - Lađinović Đ., Folić R., Ćosić M.: *Comparative Analysis of Seismic Demands of Regular Multi-Story Concrete Frames*, Banja Luka Earthquake - 40 years of Construction Experience, International Conference on Earthquake Engineering, pp. 129-144, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2009.
  - Lađinović Đ., Folić R., Ćosić M.: *Target Displacement Analysis of Seismic Demands of Multistorey Reinforced Concrete Frames*, International Symposium of Macedonian Association of Structural Engineers, Vol. 1, BK/22, pp. 255-264, Ohrid, Macedonia, 2009.
  - Ćosić M.: *Anvelopa ciljnih pomeranja okvirnih sistema u interakciji sa tlom za uslove seizmičkog dejstva*, Teorijska i eksperimentalna istraživanja konstrukcija i njihova primena u građevinarstvu, I nacionalni simpozijum sa međunarodnim učesćem, str. D39-48, Niš, Srbija, 2010.
  - Ćosić M.: *Analiza ciljnog pomeranja 3D modela objekta i tla za uslove seizmičkog dejstva*, Istraživanja, projekti i realizacija u graditeljstvu, Međunarodni naučno-stručni skup povodom stogodišnjice rođenja akademika Prof. Branka Žeželja, str. 119-124, Beograd, Srbija, 2010.
  - Ćosić M.: *Inkrementalna, totalna i hibridna formulacija u adaptivnoj pushover analizi zgrada*, II Simpozijum studenata doktorskih studija iz oblasti građevinarstva, arhitekture i zaštite životne sredine, str. 275-282, Novi Sad, Srbija, 2010.
  - Ćosić M.: *Poboljšanje adaptivne FBA pushover analize primenom neelastičnog spektra odgovora u spektralnoj amplifikaciji seizmičkih sila*, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, II naučno-stručno savetovanje, str. 147-152, Divčibare, Srbija, 2010.
  - Ćosić M.: *About the Required Number and Size of Increments in Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*, Civil Engineering - Science and Practice, International Conference, pp. 1-6, Žabljak, Montenegro, 2010.
  - Ćosić M.: *Pushover Analysis of MDOF System with SSI Effects and According to*

*FEMA 440*, The 3<sup>rd</sup> Symposium for Geotechnics, Macedonian Associations for Geotechnics, pp. 1-8, Ohrid, Macedonia, 2010.

- Lađinović Đ., Folić R., Ćosić M.: *Procena ciljnog pomeranja za nelinearnu statičku analizu zgrada izloženih dejstvu zemljotresa*, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, II naučno-stručno savetovanje, str. 97-106, Divčibare, Srbija, 2010.
- Lađinović Đ., Folić R., Ćosić M.: *Comparative Analysis of Seismic Response of Regular and Irregular Multi-Storey Frame Buildings*, The 14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 116, pp. 1-8, Ohrid, Macedonia, 2010.

Naučno-istraživački radovi u pripremi i postupku publikovanja:

- Ćosić M., Brčić S.: *Pushover Surface and Target Displacement Envelope: 3D Performance-Based Seismic Response of Structures*.

## 1.9. ORIGINALNOST ISTRAŽIVANJA

Kratak prikaz najvažnijih originalnih ideja razvijenih, implementiranih i testiranih u ovoj disertaciji:

- razvoj metodologije zasnovane na determinističkom konceptu za analizu 2D i 3D modela okvirnih zgrada prema performansama i implementacija u objektno orijentisanu softversku aplikaciju *Nonlin Quake* sa korisničkim interfejsima,
- koncept prezentacije akcelorograma i spektara odgovora za analizu 3D modela okvirnih zgrada preko površi akcelorograma (GMRS - *ground motion record surface*), površi spektra odgovora ubrzanja (ARSS - *acceleration response spectra surface*) i površi spektra odgovora pomeranja (DRSS - *displacement response spectra surface*),
- definicija, generisanje, tipologija i procesiranje *pushover* krivih i površi,
- analiza ponašanja 3D modela okvirnih zgrada prema performansama za deterministički koncept preko NSPA i INDA (IDA) *pushover* površi,
- razvoj nove hibridne inkrementalne nelinearne statičke-dinamičke analize (HINSDA - *Hybrid Incremental Nonlinear Static-Dynamic Analysis*) za analizu zgrada primenom jednoaksijalnog bilinearnog elasto-plastičnog modela sa

- kinematičkim ojačanjem i omekšanjem,
- parametarska HINSDA analiza za ocenu performansi konstrukcija,
  - analiza odnosa zahtevani/realizovani kapacitet nosivosti i deformacija konstrukcija, a u skladu sa PBEE metodologijom,
  - unapređenje metode koeficijenata pomeranja uvođenjem iterativne procedure (IDCM - *Iterative Displacement Coefficient Method*),
  - skaliranje i kompatibilizacija akcelograma i spektara odgovora (*spectral matching*) za bidirekciono seizmičko dejstvo, a koji su komponente površi akcelograma i površi spektara odgovora, respektivno,
  - analiza performansnih nivoa i odnosa kapacitet/deformacija konstrukcije preko anvelope ciljnih pomeranja (TDE),
  - razvoj i implementacija koeficijenata površi duktilnosti u različitim varijacijama,
  - parametarska analiza novih razvijenih koeficijenata za ocenu performansi konstrukcija preko TDE anvelope,
  - koncept prezentacije globalnih i međuspratnih driftova zgrada za analizu performansi konstrukcija pri prostornom odgovoru,
  - razvoj metodološkog postupka baziran na NSPA analizi 2D i 3D modela zgrada sa iterativnom procedurom prema metodi programiranog ponašanja (CDM) sa poželjnim mehanizmom loma (NSPA-DMBD - *Nonlinear Static Pushover Analysis - Damage Mechanisms-Based Design*).

## 1.10. NAJZNAČAJNIJI NOVI TERMINI

Kratak prikaz najznačajnijih novih termina uvedeni u ovoj doktorskoj disertaciji:

- površ zapisa ubrzanja tla (*ground motion record surface*),
- površ spektra odgovora (*response spectra surface*),
- anvelope mere intenziteta (*intensity measure envelope*),
- *pushover* površ (*pushover surface*),
- koeficijent površi duktilnosti (*ductility area coefficient*),
- anvelope ciljnog pomeranja (*target displacement envelope*),
- površ globalnog drifta (*drift surface*),
- površ međuspratnog drifta (*interstorey drift surface*).



## 1.11. KRATAK PRIKAZ DOKTORSKE DISERTACIJE PO POGLAVLJIMA

### - UVOD

U prvom poglavlju je dat opis predmeta istraživanja doktorske disertacije, obrazloženje o potrebama istraživanja i kratak cilj istraživanja. Drugi deo poglavlja se odnosi na pregled dosadašnjih istraživanja iz aktuelne problematike PBEE metodologije, spisak publikovanih radova autora i pregled ključnih elemenata originalnosti istraživanja.

### - METODOLOGIJA ANALIZE OKVIRNIH ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA

U drugom poglavlju je prikazana opšta teorijska formulacija za analizu okvirnih zgrada prema performansama i osnove originalno razvijenog koncepta za analizu okvirnih zgrada prema performansama implementiranog u softversko rešenje *Nonlin Quake*. Prikazani su i objašnjeni dijagrami tokova NSPA, INDA, IDA i HINSDA analiza koje se sprovode prema *Nonlin Quake* i u saradnji sa drugim softverima.

### - PROCESIRANJE AKCELEROGRAMA I MODELIRANJE OKVIRNIH ZGRADA

U trećem poglavlju su prikazane procedure selekcije, formatiranja, konvertovanja i procesiranja realnih i veštačkih akceleroograma, a u konačnom obliku prezentovani su akceleroگرامi i spektri odgovora preko površi akceleroograma i površi spektara odgovora, respektivno. Takođe, razmatrani su i aspekti modeliranja višespratnih okvirnih zgrada za NSPA, INDA, IDA i HINSDA analize.

### - ANALIZA NELINEARNOG PONAŠANJA OKVIRNIH ZGRADA

U četvrtom poglavlju su razmatrani teorijski i numerički aspekti NSPA i INDA (IDA) analiza 2D i 3D modela zgrada. Za NSPA i INDA (IDA) *pushover* krive i površi definisani su opšti principi, definicija, generisanje, tipologija i procesiranje. Takođe, razvijen je i originalni hibridni koncept HINSDA za brzu analizu i procenu performansi 2D (3D) modela zgrada.

### - ANALIZA ODNOSA KAPACITET KONSTRUKCIJE/SEIZMIČKI ZAHTEV

U petom poglavlju prikazana je analiza odnosa zahtevani/realizovani kapacitet

nosivosti i deformacija konstrukcija, a u skladu sa PBEE metodologijom. Za NSPA analizu ciljnog pomeranja razvijena je iterativna metoda koeficijenata pomeranja. Takođe, prikazano je skaliranje i kompatibilizacija akceleroograma i spektara odgovora za bidirekciono seizmičko dejstvo, a koji su komponente površi akceleroograma i površi spektara odgovora, respektivno. Analiza performansnih nivoa i odnosa kapacitet/deformacija konstrukcije razmatrana je preko anvelopa ciljnih pomeranja (TDE), niza razvijenih odgovarajućih koeficijenata i površi globalnih i međuspratnih driftova. U drugom delu ovog poglavlja razvijena je metodologija bazirana na NSPA analizi 2D modela zgrada sa iterativnom procedurom prema metodi programiranog ponašanja (CDM) sa poželjnim mehanizmom loma (NSPA-DMBD).

- ZAVRŠNA RAZMATRANJA I ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA

U šestom poglavlju data su završna razmatranja i prezentovani zaključci istraživanja.

- LITERATURA

Dat je popis naučno-istraživačkih radova, knjiga i veb izvora na koje su oslanjane ideje razvijene i prezentovane u doktorskoj disertaciji.

# 2

## **2. METODOLOGIJA ANALIZE OKVIRNIH ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA**

### **2.1. UVODNE NAPOMENE**

Metodologija analize zgrada prema performansama za uslove dejstva zemljotresa (PBEE - *Performance-Based Earthquake Engineering*) je inicirana u poslednjih petnaestak godina prvo na determinističkom, a zatim i na probabilističkom nivou. PBEE metodologija se zasniva na multidisciplinarnom pristupu kroz računarsku mehaniku, numeričke metode, dinamiku konstrukcija, nelinearne analize, teoriju armiranobetonskih konstrukcija, teoriju plastičnosti, mehaniku loma, interakciju konstrukcija-tlo, zemljotresno inženjerstvo, inženjersku seizmologiju, primenu savremenih propisa za projektovanje konstrukcija, inženjersku statistiku i verovatnoću.

### **2.2. OPŠTA TEORIJSKA FORMULACIJA ZA ANALIZU ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA**

PBEE metodologija je multidisciplinarna oblast nauke o zemljotresnom inženjerstvu razvijena u cilju kompletne i kompleksne analize i procene stanja postojećih i novih zgrada za uslove dejstva zemljotresa. Kod postojećih zgrada moguće je sprovoditi procenu stanja kao neoštećenih zgrada ili kao zgrada koje imaju određeni stepen oštećenja. U slučaju novoprojektovanih zgrada moguće je još u fazi konceptualnog projektovanja razmatrati moguće mehanizme loma i oštećenja i procenjivati nivo štete za određeni nivo seizmičkog hazarda. Sve ove procedure za

procenu stanja zgrada prema PBEE metodologiji baziraju se na nelinearnim seizmičkim analizama, gde se problem razmatra kroz analizu hazarda (*hazard analysis*), analizu konstrukcije (*structural analysis*), analizu oštećenja (*damage analysis*) i analizu štete (*loss analysis*) [142], [169]. Analiza hazarda se predstavlja promenljivom mera intenziteta (*IM - intensity measure*), a kojim se kvantifikuje pomeranje tla, dok se analiza odgovora konstrukcije predstavlja parametrom inženjerskog zahteva (*EDP - engineering demand parameter*). Analiza oštećenja se predstavlja promenljivom mera oštećenja (*DM - damage measure*), a analiza štete promenljivom odluke o varijablama (*DV - decision variables*). Četiri generalizovane promenljive (*IM, EDP, DM i DV*) predstavljaju potreban i dovoljan uslov za evaluaciju seizmičkih performansi zgrade prema PBEE metodologiji, a koja je izvedena na osnovu teoreme potpune verovatnoće [53]:

$$\lambda[DV] = \int \int \int P[DV|DM] |dP[DM|EDP] |dP[EDP|IM] ||d\lambda[IM], \quad (2.1)$$

gde je  $\lambda[DV]$  godišnja frekvencija prekoračenja određene odluke o varijablama,  $P[DV/DM]$  uslovna verovatnoća prekoračenja odluke o varijablama  $DV$  za odgovarajuću meru oštećenja  $DM$ ,  $P[DM/EDP]$  uslovna verovatnoća prekoračenja mere oštećenja  $DM$  za odgovarajući parametar inženjerskog zahteva  $EDP$ ,  $P[EDP/IM]$  uslovna verovatnoća prekoračenja parametra inženjerskog zahteva  $EDP$  za odgovarajuću meru intenziteta  $IM$ ,  $|d\lambda[IM]|$  godišnja verovatnoća prekoračenja mere intenziteta  $IM$  na krivi seizmičkog hazarda. Efikasno rešenje ovako kompleksnog problema dobija se dekompozicijom (2.1) na četiri celine, jer bi u suprotnom promenljive bile međusobno zavisne. Mera intenziteta  $IM$  je promenljiva koja se može odrediti na osnovu zapisa ubrzanja tla, odnosno akcelerograma i dodatnim procesiranjem ili filtriranjem signala, a najznačajnije mere intenziteta su [157], [158]: trajanje jakog kretanja tla (*strong motion duration*), maksimalno ubrzanje tla (*peak ground acceleration*), maksimalna brzina tla (*peak ground velocity*), maksimalno pomeranje tla (*peak ground displacement*), Arias-ov intenzitet (*Arias intensity*), intenzitet brzine (*velocity intensity*), intenzitet pomeranja (*displacement intensity*), akumulirana apsolutna brzina (*cumulative absolute velocity*), akumulirano apsolutno pomeranje (*cumulative absolute displacement*), akumulirani apsolutni impuls (*cumulative absolute impulse*), kvadratni koren srednjeg kvadrata ubrzanja (*root mean square acceleration*), kvadratni koren srednjeg kvadrata brzine (*root mean square*

*velocity*), kvadratni koren srednjeg kvadrata pomeranja (*root mean square displacement*), karakterističan intenzitet (*characteristic intensity*), koeficijent odnosa brzina/ubrzanje (*velocity-acceleration frequency ratio*), koeficijent odnosa pomeranje/brzina (*displacement-velocity frequency ratio*), Fajfar-ov period (*Fajfar period*), pseudospektralna brzina (*pseudo-spectral velocity*), pseudospektralno ubrzanje (*pseudo-spectral acceleration*), Luco-ov prediktor prvog svojstvenog oblika (*Luco 1<sup>st</sup> mode predictor*), Cordova prediktor (*Cordova predictor*), efektivno maksimalno ubrzanje (*effective peak acceleration*), efektivna maksimalna brzina (*effective peak velocity*), efektivno maksimalno pomeranje (*effective peak displacement*), intenzitet odgovora ubrzanja (*acceleration response intensity*), intenzitet odgovora brzine (*velocity response intensity*), intenzitet odgovora pomeranja (*displacement response intensity*), Housner-ov intenzitet spektra odgovora (*response spectrum intensity by Housner*), prosečno spektralno ubrzanje (*average spectral acceleration*), prosečna spektralna brzina (*average spectral velocity*) i prosečno spektralno pomeranje (*average spectral displacement*). Parametar inženjerskog zahteva *EDP* je promenljiva koja je direktno vezna za konstruktivni sistem zgrade, a najznačajniji parametri inženjerskog zahteva su: koeficijent aksijalnog opterećenja (*axial load ratio*), pomeranje na granici tečenja (*yield displacement*), krivina na granici tečenja (*yield curvature*), energija za granicu tečenja (*yield energy*), maksimalno pomeranje (*maximum displacement*), otklon (*drift*), maksimalna krivina (*maximum curvature*), maksimalni momenat (*maximum moment*), maksimalna smičuća sila (*maximum shear force*), maksimalna dilatacija čelika (*maximum steel strain*), maksimalni napon u čeliku (*maximum steel stress*), maksimalna dilatacija betona (*maximum concrete strain*), maksimalni napon u betonu (*maximum concrete stress*), rezidualno pomeranje (*residual displacement*), indeks rezidualnog pomeranja (*residual displacement index*), histerezisna energija (*hysteretic energy*), normalizovana histerezisna energija (*normalized hysteretic energy*), maksimalna čvrstoća (*peak strength*), faktor spektra kapaciteta (*capacity spectrum factor*), USGS faktor (*USGS factor*), maksimalna raspoloživa duktilnost (*displacement ductility*), duktilnost za maksimalnu krivinu (*curvature ductility*) i plastična rotacija (*plastic rotation*). Mera oštećenja *DM* je promenljiva koja je u korelaciji sa oštećenjem zgrade, a najznačajnije mere oštećenja su: lokalno izvijanje (*local buckling*), pucanje betona (*concrete spalling*), stepen kolapsa (*degree of collapse*) i gubitak kapaciteta

nosivosti na gravitaciono opterećenje (*loss of gravity load capacity*). Odluka o varijablama  $DV$  je promenljiva koja je važna za investitora i vlasnika zgrade, a najznačajnije odluke o varijablama su: direktni gubitci (*direct loss*), indirektni gubitci (*indirect loss*), gubitak funkcije objekta (*down time/loss of function*), povređeni i poginuli (*injuries and fatalities*).

Uspostavljanje veze između mere intenziteta  $IM$  i parametra inženjerskog zahteva  $EDP$  sprovodi se preko modela seizmičkog zahteva (*demand model*), a koji se određuje primenom probabilističke analize seizmičkog zahteva (PSDA - *Probabilistic Seismic Demand Analysis*) i inkrementalne nelinearne dinamičke analize (INDA - *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*). Međutim, pre uspostavljanja veze  $EDP-IM$  potrebno je razmotriti  $IM$  promenljivu probabilističkom analizom seizmičkog hazarda (PSHA - *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) [158]:

$$P[IM > im, t = 1] \approx \lambda_{im}(im) = \sum_{i=1}^N v_i \iint_{m,r} P_{IM|M,R}(im|m_i, r_i) dP_{M,R}(m_i, r_i) dm_i dr_i, \quad (2.2)$$

gde je  $P[IM > im, t = 1]$  totalna verovatnoća da će  $IM$  biti veće od zadate  $im$  promenljive,  $M$  magnituda, a  $R$  udaljenost od mesta iniciranja propagacije seizmičkih talasa. U izrazu (2.2) razmatra se verovatnoća pojavljivanja različitih nivoa  $IM$  na određenoj lokaciji, odnosno godišnje učestalost da će  $IM$  biti veći od  $im$ , a što zapravo predstavlja krivu hazarda (*hazard curve*). U cilju praktičnijeg razmatranja krive hazarda i s obzirom da se, u najvećem broju slučajeva, razmatraju diskretne vrednosti u intervalu od 2%/50 do 50%/50, tada se kriva hazarda može da piše kao:

$$\lambda_{im}(im) = k_0(im)^{-k}, \quad (2.3)$$

odnosno u logaritamskom formatu:

$$\ln(\lambda_{im}(im)) = \ln(k_0) - k \ln(im). \quad (2.4)$$

Sada se na osnovu određenog  $IM$  iz PSHA analize i  $EDP$  iz PSDA, NDA ili čak preko nelinearne statičke *pushover* analize (NSPA - *Nonlinear Static Pushover Analysis*) uspostavlja korelacija  $EDP-IM$ , najčešće preko spektralnog ubrzanja za  $IM$  i globalnog ili međuspratnog drifta za  $EDP$ . Ova korelacija se uspostavlja primenom linearne:

$$\ln(EDP) = A + B \ln(IM), \quad (2.5)$$

ili stepene funkcije

$$EDP = a(IM)^b, \quad (2.6)$$

pri čemu se koeficijenti  $a$  i  $b$  određuju iz regresione analize. Model seizmičkog zahteva u PSDA analizi se može predstaviti i preko krivih povredljivosti (*fragility curve*) [158]:

$$P[EDP < edp^{LS} | IM = im] = \int_0^{edp^{LS}} \frac{1}{\sigma_{EDP|IM} \sqrt{2\pi edp}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(edp) - A - B \ln(im)}{\sigma_{EDP|IM}} \right)^2} dedp, \quad (2.7)$$

pri čemu se koeficijenti  $A$  i  $B$  određuju iz regresione analize, a  $\sigma$  je standardna devijacija. Alternativa prethodnom rešenju je da se model seizmičkog zahteva u PSDA analizi predstavi preko površi povredljivosti (*fragility surface*) [158]:

$$P[EDP < edp^{LS} | IM = im, X = x] = \Phi \left[ \frac{\ln(edp^{LS}) - \ln(EDP(im, x))}{\sigma} \right]. \quad (2.8)$$

Uspostavljanje veze između parametra inženjerskog zahteva  $EDP$  i mere oštećenja  $DM$  sprovodi se preko modela oštećenja (*damage model*), a koji se određuje primenom probablističke analize seizmičkog oštećenja (PSDamA - *Probabilistic Seismic Damage Analysis*), INDA ili NSPA analize [158]:

$$P[DM < dm^{LS} | IM = im] = \int_{edp} P_{DM|EDP}(dm^{LS} | edp) dP_{EDP|IM}(edp | im). \quad (2.9)$$

Proširenje PSDamA analize u oceni oštećenje zgrade može se izvršiti ukoliko se u razmatranje uvede hazard:

$$\lambda[DM] = \int P[DM > dm | EDP = edp] d\lambda_{EDP}(edp). \quad (2.10)$$

Uspostavljanje veze između mere oštećenja  $DM$  i odluke o varijablama  $DV$  sprovodi se preko modela gubitaka (*loss model*), a koji se određuje primenom probablističke analize seizmičkih gubitaka (PSLA - *Probabilistic Seismic Loss Analysis*), INDA ili NSPA analize:

$$P[DV < dv^{LS} | IM = im] = \int_{dm} P_{DV|DM}(dv^{LS} | dm) dP_{DM|IM}(dm | im). \quad (2.11)$$

Prema PBEE metodologiji nelinearan odgovor zgrade se prati u kapacitativnom domenu preko *pushover* krive, a razmatranje stanja konstrukcije se uspostavlja primenom performansnih nivoa (PL - *performance level*). Ovi performansni nivoi su različiti za vertikalne nosive elemente, a različiti za horizontalne elemente. Takođe, razlikuju se i za konstruktivne i nekonstruktivne elemente zgrade. Sa druge strane, oni su različiti i za kompletan model zgrade, tako prema propisima ATC 40 [10] i FEMA 356 [80] performansni nivoi glase:

- operacioni nivo (OL - *operational level*): konstrukcija je potpuno neoštećena nakon zemljotresa i ima identičnu nosivost i krutost kao i pre zemljotresa,
- trenutna useljivost (IO - *immediate occupancy*): konstrukcija ima identičnu nosivost i krutost kao i pre zemljotresa, a dozvoljava se pojava manjih prslina,

- bezbednost života (LS - *life safety*): moguća je redukcija krutosti na pojedinim spratovima, dozvoljava se oštećenje konstrukcije bez delimičnog ili totalnog rušenja konstrukcije koje može izazvati rizik po život ljudi,
- zaštita od rušenja (CP - *collapse prevention*): konstrukcija može imati malu rezidualnu nosivost i krutost i još uvek može da prihvati gravitaciono opterećenje kroz konstruktivno oštećenje koje je značajno i pri čemu je rizik od pada (rušenja) veoma veliki, zgrada je pred kolapsnim stanjem.

Prethodno je prezentovana PBEE metodologija koja je bazirana na probabilističkom konceptu, međutim egzistencija iste nije moguća bez determinističkog koncepta PBEE metodologije, dok suprotno ne važi. S obzirom da se istraživanje prikazano u ovoj disertaciji bazira na NSPA i INDA (IDA) analizama okvirnih zgrada, to razmatranje nelinearnog odgovora preko promenljivih *IM/EDP* pripada jednom delu kompleksne probabilističke PBEE metodologije.

### **2.3. KRATAK PRIKAZ RAZVIJENIH SOFTVERA ZA ANALIZU ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA**

U poslednjih dvadesetak godina razvoj softvera za analizu konstrukcija doživeo je ekspanziju, tako da postoje različita rešenja, ali se najveći broj tih softvera zasniva na metodi konačnih elemenata (FEM - *Finite Element Method*). Ove softverske aplikacije su namenjene proračunu, kako jednostavnih tako i kompleksnih numeričkim modela, gde je moguće primeniti širok spektar konačnih elemenata, moćne algoritme za diskretizaciju kompleksnih domena i široku lepezu analiza. Generalna podela softvera za analizu konstrukcija bi se mogla uspostaviti na softvere za svakodnevnu inženjersku praksu i softvere ekspertskeg tipa. Softveri projektovani za svakodnevnu inženjersku praksu namenjeni su širokoj populaciji inženjera i za veliki broj standardnih inženjerskih problema, a pouzdanost i robusnost ovih softvera se konstantno unapređuje. Softveri ekspertskeg tipa projektovani su, u najvećem broju slučajeva, za rešavanje kompleksnih, specifičnih i nestandardnih problema i zahtevaju angažovanje eksperata i/ili specijalista za poznavanje određene problematike. Oni mogu, ali i ne moraju, imati ugrađene module za svakodnevnu inženjersku praksu. Detaljnija podela softvera za analizu performansi konstrukcija bi bila na softvere za rešavanje:

- uobičajenih inženjerskih problema, ali i sa integrisanim modulima za rešavanje



- nelinearnih problema (NSPA i/ili NDA analiza): SAP 2000 [333], ETABS [265], PERFORM-3D [316], STAAD [353], MIDAS [294], *Autodesk Robot* [239], *AxisVM* [240], LUSAS [289], SOFiSTiK [350], STRAND [356], GT STRUDL [281], S-FRAME [343], FESPA [273],
- specijalizovanih nelinearnih problema: *SeismoStruct* [341], *ANSRuop* [234], NASAP [296], RUAUMOKO [332], STERA 3D [355], *PBEE toolbox* [314], DRAIN [257], IDARC [284], FEAP [268], ADAPTIC [231], FRAME 3D [274], CANNY [246], BEPTA [242], INSTRUCT [285], NEFCAD [299], STATIK-5P [354], *FEDEASLab* [269], *ZSoil* [367], *DBDsoft* [253], *PSResponse* [322], KARMA [287], EPETO [260], *Extreme Loading* [266], *Bridge PBEE* [244],
  - kompleksnih nelinearnih problema širokog spektra: ANSYS [235], ADINA [232], *MSC Nastran* [295], *Abaqus* [230], ATENA [238], *FEMtools* [271], DIANA [256],
  - kompleksnih numeričko-eksperimentalnih (hibridnih) simulacija: UI-SIMCOR [363], NISRAF [302], *Hercules* [283],
  - specijalizovanih nelinearnih problema SDOF sistema: BISPEC [243], NONLIN [303], USEE [365], SPO2IDA [351],
  - otvoreni kod (nelinearna analiza konstrukcija): *OpenSees* [310], ZEUS-NL [366], FRAME3DD [275], FERUM [272],
  - analiza seizmičkog hazarda, rizika, oštećenja, povredljivosti, pouzdanosti i štete: P-FAS [317], PACT [313], HAZUS-MH [282], GESI [277], ELER [259], *MAEviz* [291], RISKICG [329], *StrucLoss* [358], *PhimecaSoft* [318], SLAT [348], CAPRA [247], ST-RISK [357], RELACS [327], FRISK88M [276], *AllRisk* [233], GMPC [278], PSHC [321], THAZ [360], *EqHAZ* [261], REDARS [326], SEISAN [335], *Armagedom* [236], *CATmandu* [248], DBELA [254], EQRM [262], CEDIM [249], QLARM [323], *RiskScape* [330],
  - otvoreni kod (analiza seizmičkog hazarda i rizika): *OpenSHA* [311], *OpenQuake* [308], *OpenRisk* [309], *OpenSLAT* [312], SELENA-RISe [342],
  - selekcija, formatiranje, konvertovanje, skaliranje, kalkulacija, procesiranje, kompatibilizacija, filtriranje, generisanje i transformacija akcelorograma i spektara odgovora: *SeismoSignal* [338], *SeismoSpect* [340], *SeismoMatch* [337], *SeismoArtif* [336], PRISM [320], SIGVIEW [344], DEQAS-R [255],

*QuakeManager* [324], *RspMatchEDT* [331], *SIMQKE* [347], *REXEL* [328], *REXEL-DISP* [328], *EZ-FRISK* [267], *BELFAGOR* [241], *TARSCTHS* [359], *SIMULSIS* [346], *EQTools* [263], *LNEC-SPA* [288], *ISSARS* [286], *nSPECTRA* [306], *CSMIP-3DV* [252], *OriginPro* [307], *MATLAB* [292].

## **2.4. KONCEPT ANALIZE ZGRADA PREMA PERFORMANSAMA RAZVIJEN I IMPLEMENTIRAN U *Nonlin Quake***

### **2.4.1. OSNOVE KONCEPTA**

Metodologija analize okvirnih zgrada prema performansama, razvijena u ovom istraživanju, bazira se na savremenom konceptu PBEE metodologije, a implementirana je u originalno softversko rešenje *Nonlin Quake*. Performanse zgrada se utvrđuju primenom NSPA, NDA, INDA (IDA) i HINSDA analiza. Naziv softvera je kreiran kompozicijom delova reči *nonlinear* i *earthquake*. *Nonlin Quake* se sastoji iz niza modula, makroa i funkcija, a programiranje je izvršeno u programskom jeziku VB/VBA (*Visual Basic/Visual Basic for Application*) [103], [57]. Kompletan kod je smešten u VBA razvojni centar u *Excel* host okruženju u XLSB (*excel macro-enabled binary*) format, gde se informacije čuvaju u binarnom formatu radi lakšeg pristupa i uštede u memorijskom prostoru. Interakcija korisnik-sofver odvija se preko korisničkih formi (GUI - *graphic user interfaces*) sa velikim brojem integrisanih opcija, a čime je omogućen maksimalan komfor korisniku uz značajnu robusnost u slučaju pojave grešaka tokom proračuna. Takođe, postoji interakcija VBA sa host aplikacijom, odnosno ćelijama u kojima su smeštene određene funkcije i komandama *ActiveX Control*-a. Unos podataka i upravljanje funkcijama se sprovodi preko kontrola *Label*, *TextBox*, *ComboBox*, *CheckBox*, *OptionButton*, *Frame*, *ComandButton*, *MultiPage* i *Image*. *Nonlin Quake* se sastoji iz više nezavisnih programa (subprogrami), a koji su međusobno kompatibilni i komplementarni. Ukupan broj kodnih linija *Nonlin Quake*-a je veći od 30000, pri čemu su određeni delovi koda dodatno optimizovani. *Nonlin Quake* se sprovodi u interakciji sa softverima *SeismoMatch*, *SeismoStruct* (ili *SAP 2000*), *SPO2IDA* i *MATLAB* (ili *Graphis*), a koristi veštačke i akceleroگرامe prirodnih zemljotresa iz PEER GMDB baze zemljotresa. Metodološki postupak za NSPA, NDA, INDA (IDA) i HINSDA analize okvirnih zgrada prema performansama, a koji se

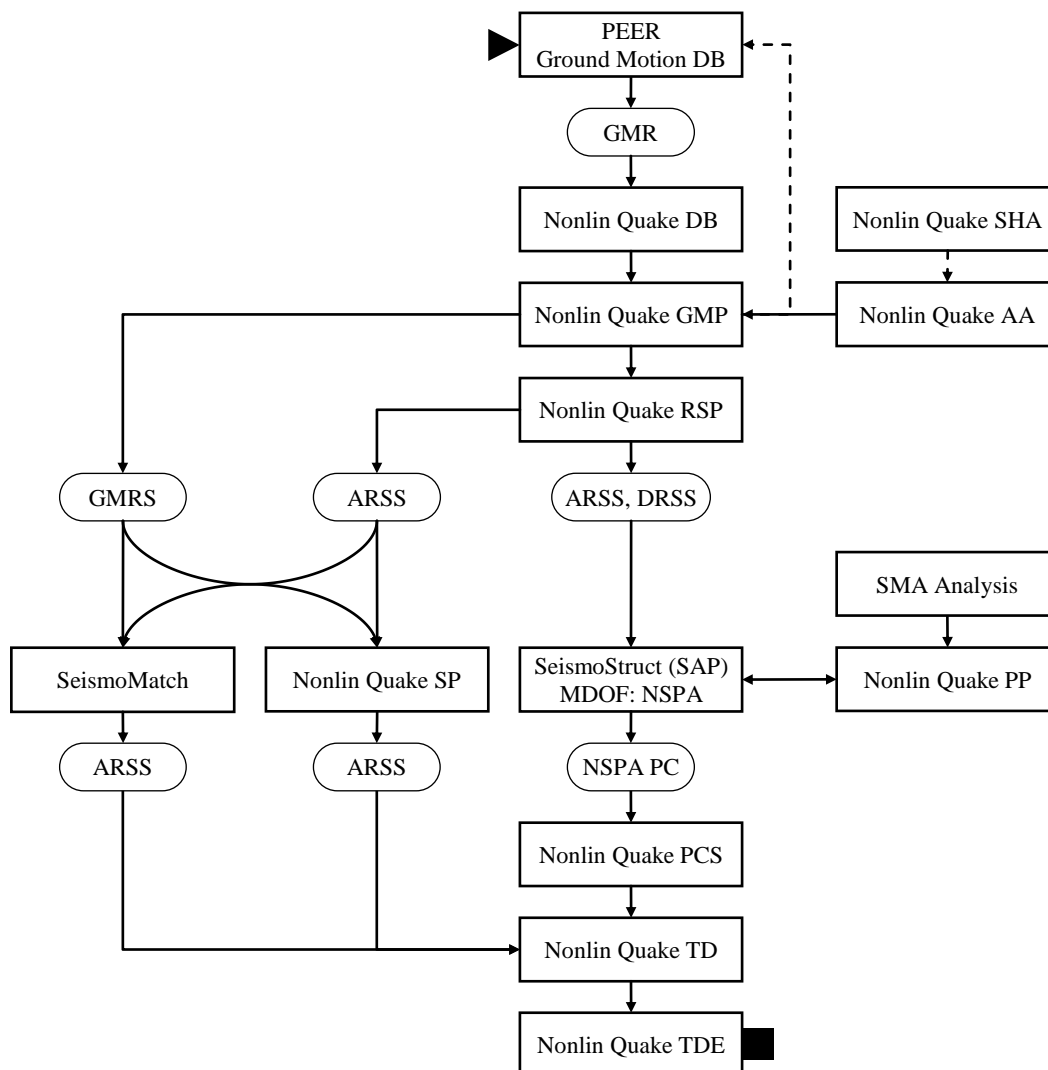
sprovodi u okviru ekspertskog sistema *Nonlin Quake*, sastoji se iz programa:

- *Nonlin Quake DB (DataBase)*,
- *Nonlin Quake GMP (Ground Motion Processing)*,
- *Nonlin Quake AA (Artificial Accelerogram)*,
- *Nonlin Quake SHA (Seismic Hazard Analysis)*,
- *Nonlin Quake RSP (Response Spectra Processing)*,
- *Nonlin Quake PP (Project Parameters)*,
- *Nonlin Quake PCS (Pushover Curve-Surface)*,
- *Nonlin Quake HINSDA (Hybrid Incremental Nonlinear Static-Dynamic Analysis)*,
- *Nonlin Quake TD (Target Displacement)*,
- *Nonlin Quake SP (Scaling Procedure)*,
- *Nonlin Quake TDE (Target Displacement Envelope)*.

U *Nonlin Quake*-u se performanse sistema razmatraju preko vremenskog i frekventnog domena za ulazni signal (akcelerogram ili spektar ogovora), a za izlazni signal (odgovor konstrukcije) preko vremenskog i kapacitativnog domena.

U zavisnosti od toga da li se analiza performansi sistema sprovodi primenom NSPA, INDA (NDA), IDA ili HINSDA analize, razvijena su četiri bitno različita toka proračuna *Nonlin Quake* ekspertskog sistema. Na slici 2.1 je prikazan dijagram toka NSPA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskog sistema *Nonlin Quake*. U prvom koraku se selektuju zemljotresi u PEER GMDB bazi, a zatim importuju u program *Nonlin Quake DB*, gde se sprovodi formatiranje akcelerograma (GMR - *ground motion record*). Nakon formatiranja isti se importuju u *Nonlin Quake GMP*, gde se sprovodi konvertovanje, kalkulacija i procesiranje GMR akcelerograma za različite uglove, a zatim generiše površ GMR akcelerograma (GMRS - *ground motion record surface*) u MATLAB-u (ili u *Graphis*-u). Ukoliko se procesiranjem u *Nonlin Quake GMP* utvrdi da selektovani akcelerogram nije adekvatan, tada se postupak selekcije zemljotresa u PEER GMDB bazi podataka ponavlja ili koriguje. Kao alternativa korišćenju akcelerograma realnih zemljotresa razvijen je program *Nonlin Quake AA*, gde postoji mogućnost generisanja nepotpunih i potpunih nestacionarnih veštačkih akcelerograma. U *Nonlin Quake AA* se za generisane veštačke akcelerograme sprovodi korekcija bazne linije, analiza u frekventnom domenu, filtriranje i skaliranje

akcelrograma.



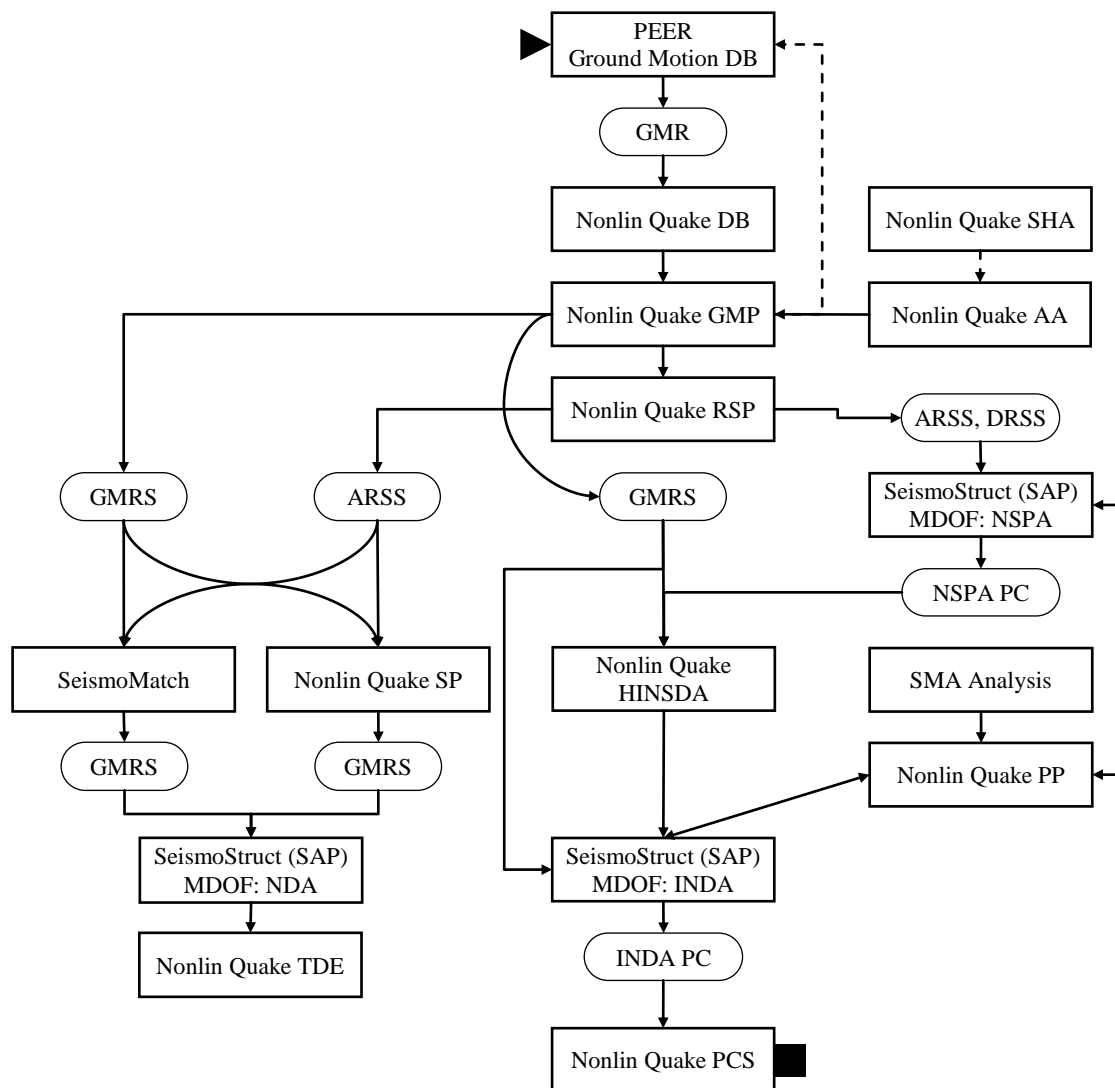
Slika 2.1 Dijagram toka NSPA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskog sistema  
*Nonlin Quake*

Ukoliko se generišu nepotpuni nestacionarni veštački akcelrogrami, oni se direktno importuju u *Nonlin Quake GMP*, a ukoliko se generišu potpuni nestacionarni akcelrogrami, tada se prethodno u *Nonlin Quake SHA* sprovodi analiza seizmičkog hazarda i analiza odgovarajućih relevantnih parametara. Dalje se GMRS akcelrogrami iz *Nonlin Quake GMP* importuju u *Nonlin Quake RSP*, gde se sprovodi procesiranje i generisanje spektara odgovora u formatima spektralno ubrzanje-period vibracija (ARS - *acceleration response spectra*) i spektralno pomeranje-period vibracija (DRS - *displacement response spectra*). Takođe, ovde je moguće sprovesti i skaliranje u

vremenskom domenu. S obzirom da se spektri odgovora generišu za različite uglove dejstva zemljotresa, u konačnoj formi se dobija površ spektra odgovora ubrzanja (ARSS - *acceleration response spectra surface*) i površ spektra odgovora pomeranja (DRSS - *displacement response spectra surface*). ARSS i DRSS spektri odgovora se zatim importuju u softver *SeismoStruct* (ili SAP 2000), gde se na 3D MDOF modelu konstrukcije sprovodi konvencionalna i/ili adaptivna NSPA analiza. Prethodno se model konstrukcije proračunava spektralno-modalnom analizom (SMA - *Spectral-Modal Analysis*) i dimenzioniše prema EC 2 i EC 8. U *Nonlin Quake PP* se generiše položaj armaturnih šipki i odgovarajuća pripadajuća površina armature po porečnim preseccima. Takođe, u *Nonlin Quake PP* se sprovodi rotacija konstrukcije u zavisnosti od ugla za koji se razmatra dejstvo zemljotresa. Nakon procesiranja NSPA analiza u *SeismoStruct*-u (ili SAP 2000) NSPA *pushover* krive se importuju u *Nonlin Quake PCS*, gde se sprovodi dodatna korekcija, regresione analize, kalkulacije i generisanje odgovarajuće NSPA *pushover* površi. Nakon korekcije *pushover* krivih iste se importuju u *Nonlin Quake TD* gde se sprovodi proračun nivoa ciljnog pomeranja. Sa druge strane, ARSS spektri odgovora se importuju u *Nonlin Quake TD*, gde se na osnovu ovih realnih spektara odgovora određuje odgovarajuće spektralno ubrzanje. Prethodno se ARSS spektri odgovora skaliraju prema postupku implementiranom u *Nonlin Quake SP*. Alternativa za skaliranje je da se GMRS akcelerogrami iz *Nonlin Quake GMP* i ARSS spektri odgovora iz *Nonlin Quake RSP* skaliraju u softveru *SeismoMatch*, kreirajući tako nove kompatibilne spektre odgovora prema spektru odgovora iz propisa. Zatim se skalirani ili kreirani kompatibilni ARSS spektri odgovora importuju u *Nonlin Quake TD*. Postupak određivanja nivoa ciljnog pomeranja se sprovodi posebno za svaki razmatrani ugao rotacije konstrukcije, odnosno dejstva zemljotresa. Nakon svih proračunatih nivoa ciljnih pomeranja sprovode se kalkulacije nad anvelopom ciljnog pomeranja u *Nonlin Quake TDE*. Ovde je razvijen niz parametara za ocenu performansi konstrukcije.

Na slici 2.2 je prikazan dijagram toka INDA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskeg sistema *Nonlin Quake*. U prvom koraku se selektuju zemljotresi u PEER GMDB bazi, a zatim importuju u program *Nonlin Quake DB*, gde se sprovodi formatiranje GMR. Nakon formatiranja isti se importuju u *Nonlin Quake GMP*, gde se sprovodi konvertovanje, kalkulacija i procesiranje GMR akcelerograma za

različite uglove, a zatim generiše GMRS površ u MATLAB-u (ili u *Graphis*-u). Ukoliko se procesiranjem u *Nonlin Quake GMP* utvrdi da selektovani akcelrogram nije adekvatan, tada se postupak selekcije zemljotresa u PEER GMDB bazi podataka ponavlja ili koriguje. Kao alternativa korišćenju akcelrograma realnih zemljotresa razvijen je program *Nonlin Quake AA*, gde postoji mogućnost generisanja nepotpunih i potpunih nestacionarnih veštačkih akcelrograma. U *Nonlin Quake AA* se za generisane veštačke akceleroگرامe sprovodi korekcija bazne linije, analiza u frekventnom domenu, filtriranje i skaliranje akcelrograma. Ukoliko se generišu nepotpuni nestacionarni veštački akceleroگرامi, oni se direktno importuju u *Nonlin Quake GMP*, a ukoliko se generišu potpuni nestacionarni akceleroگرامi, tada se prethodno u *Nonlin Quake SHA* sprovodi analiza seizmičkog hazarda i analiza odgovarajućih relevantnih parametara. Dalje se GMRS akceleroگرامi iz *Nonlin Quake GMP* i veštački akceleroگرامi iz *Nonlin Quake AA* importuju u *Nonlin Quake RSP* gde se sprovodi procesiranje i generisanje ARS i DRS spektara odgovora. S obzirom da se spektri odgovora generišu za različite uglove dejstva zemljotresa, u konačnoj formi se dobijaju ARSS i DRSS površi. ARSS i DRSS spektri odgovora se zatim importuju u softver *SeismoStruct* (ili SAP 2000), gde se na 3D MDOF modelu konstrukcije sprovodi NSPA analiza. Prethodno se model konstrukcije proračunava SMA analizom i dimenzioniše prema EC 2 i EC 8. U *Nonlin Quake PP* se generiše položaj armaturnih šipki i odgovarajuća pripadajuća površina armature po porečnim presecima. Takođe, u *Nonlin Quake PP* se sprovodi rotacija konstrukcije u zavisnosti od ugla za koji se razmatra dejstvo zemljotresa. Nakon procesiranja NSPA analiza u *SeismoStruct*-u (ili SAP 2000) *pushover* krive se importuju u *Nonlin Quake HINSDA*, gde se sprovodi bilinearizacija, odnosno odgovarajuća hibridna analiza u cilju predikcije faktora skaliranja akcelrograma i kolapsnog nivoa konstrukcije kod INDA analize. GMRS akceleroگرامi se iz *Nonlin Quake GMP* importuju u *Nonlin Quake HINSDA*, gde se sprovodi posebna procedura skaliranja. Na osnovu rezultata dobijenih u *Nonlin Quake HINSDA* odlučuje se o faktorima skaliranja akcelrograma za INDA analizu 3D MDOF modela konstrukcije u *SeismoStruct*-u (ili SAP 2000). Nakon procesiranja INDA analiza u *SeismoStruct*-u (ili SAP 2000) INDA *pushover* krive se importuju u *Nonlin Quake PCS*, gde se sprovodi dodatna korekcija, regresione analize, kalkulacije i generisanje odgovarajuće INDA *pushover* površi.



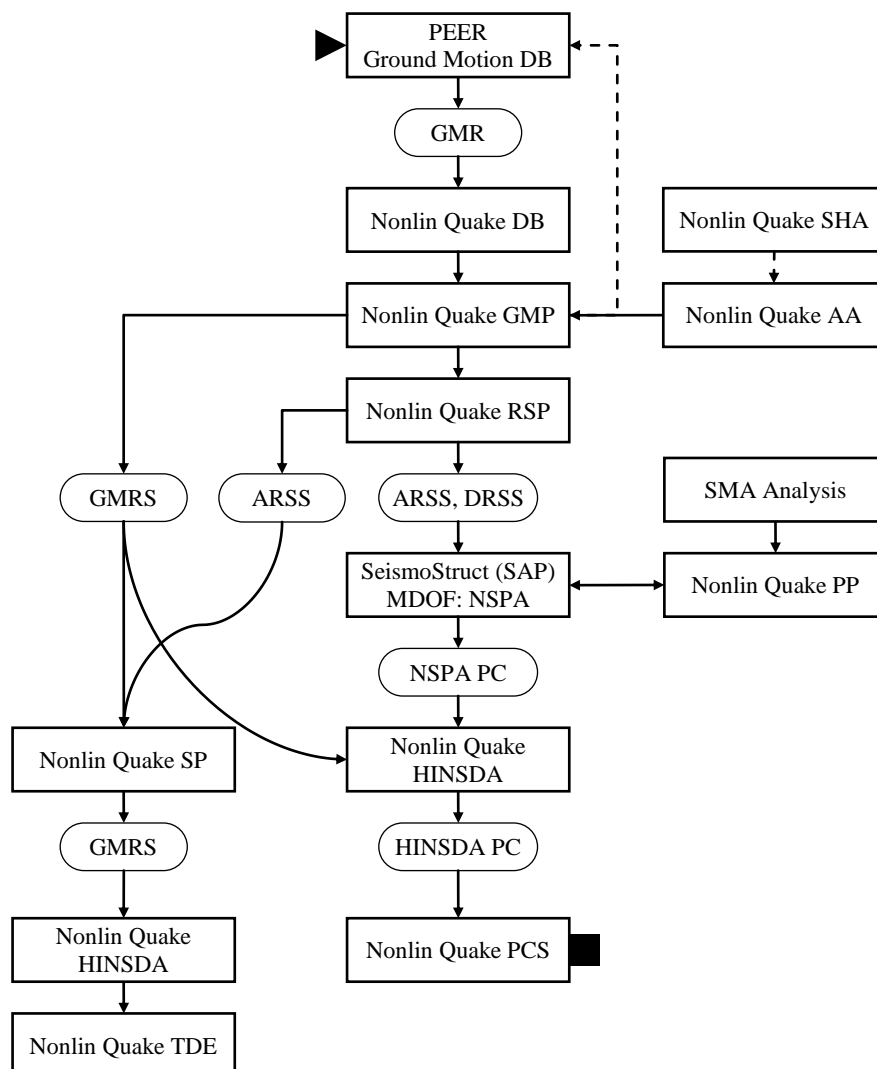
Slika 2.2 Dijagram toka INDA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskog sistema *Nonlin Quake*

Sa druge strane, GMRS akcelerogrami i ARSS spektri odgovora se importuju u *Nonlin Quake SP*, gde se sprovodi skaliranje akcelerograma. Alternativa za skaliranje je da se GMRS akcelerogrami i ARSS spektri odgovora skaliraju u softveru *SeismoMatch*, kreirajući tako nove kompatibilne spektre odgovora prema spektru odgovora iz propisa. Zatim se skalirani ili kreirani kompatibilni GMRS akcelerogrami importuju u *SeismoStruct* (ili SAP 2000), gde se sprovodi NDA analiza 3D MDOF modela konstrukcije za zahtevani nivo ciljnog pomeranja. Postupak određivanja nivoa ciljnog pomeranja se sprovodi posebno za svaki razmatrani ugao rotacije konstrukcije, odnosno dejstva zemljotresa. Nakon svih proračunatih nivoa ciljnih pomeranja sprovode se kalkulacije nad anvelopom ciljnog pomeranja u *Nonlin Quake TDE*.

Na slici 2.3 je prikazan dijagram toka HINSDA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskeg sistema *Nonlin Quake*. U prvom koraku se selektuju zemljotresi u PEER GMDB bazi, a zatim importuju u program *Nonlin Quake DB*, gde se sprovodi formatiranje GMR. Nakon formatiranja isti se importuju u *Nonlin Quake GMP*, gde se sprovodi konvertovanje, kalkulacija i procesiranje GMR akceleroograma za različite uglove, a zatim generiše GMRS površ u MATLAB-u (ili u *Graphis*-u). Ukoliko se procesiranjem u *Nonlin Quake GMP* utvrdi da selektovani akceleroogram nije adekvatan, tada se postupak selekcije zemljotresa u PEER GMDB bazi podataka ponavlja ili koriguje. Kao alternativa korišćenju akceleroograma realnih zemljotresa razvijen je program *Nonlin Quake AA*, gde postoji mogućnost generisanja nepotpunih i potpunih nestacionarnih veštačkih akceleroograma. U *Nonlin Quake AA* se za generisane veštačke akceleroograme sprovodi korekcija bazne linije, analiza u frekventnom domenu, filtriranje i skaliranje akceleroograma. Ukoliko se generišu nepotpuni nestacionarni veštački akceleroogrami, oni se direktno importuju u *Nonlin Quake GMP*, a ukoliko se generišu potpuni nestacionarni akceleroogrami, tada se prethodno u *Nonlin Quake SHA* sprovodi analiza seizmičkog hazarda i analiza odgovarajućih relevantnih parametara. Dalje se GMRS akceleroogrami iz *Nonlin Quake GMP* i veštački akceleroogrami iz *Nonlin Quake AA* importuju u *Nonlin Quake RSP* gde se sprovodi procesiranje i generisanje ARS i DRS spektara odgovora. S obzirom da se spektri odgovora generišu za različite uglove dejstva zemljotresa, u konačnoj formi se dobijaju ARSS i DRSS površi. ARSS i DRSS spektri odgovora se zatim importuju u softver *SeismoStruct* (ili SAP 2000), gde se na 3D MDOF modelu konstrukcije sprovodi NSPA analiza. Prethodno se model konstrukcije proračunava SMA analizom i dimenzioniše prema EC 2 i EC 8. U *Nonlin Quake PP* se generiše položaj armaturnih šipki i odgovarajuća pripadajuća površina armature po porečnim presecima. Takođe, u *Nonlin Quake PP* se sprovodi rotacija konstrukcije u zavisnosti od ugla za koji se razmatra dejstvo zemljotresa. Nakon procesiranja NSPA analiza u *SeismoStruct*-u (ili SAP 2000) *pushover* krive se importuju u *Nonlin Quake HINSDA*, gde se sprovodi bilinearizacija, odnosno odgovarajuća hibridna INDA analiza. GMRS akceleroogrami se iz *Nonlin Quake GMP* importuju u *Nonlin Quake HINSDA*, gde se sprovodi posebna procedura skaliranja. Nakon procesiranja hibridnih INDA analiza u *Nonlin Quake HINSDA* dobijene *pushover* krive se importuju u *Nonlin Quake PCS*, gde se sprovodi dodatna

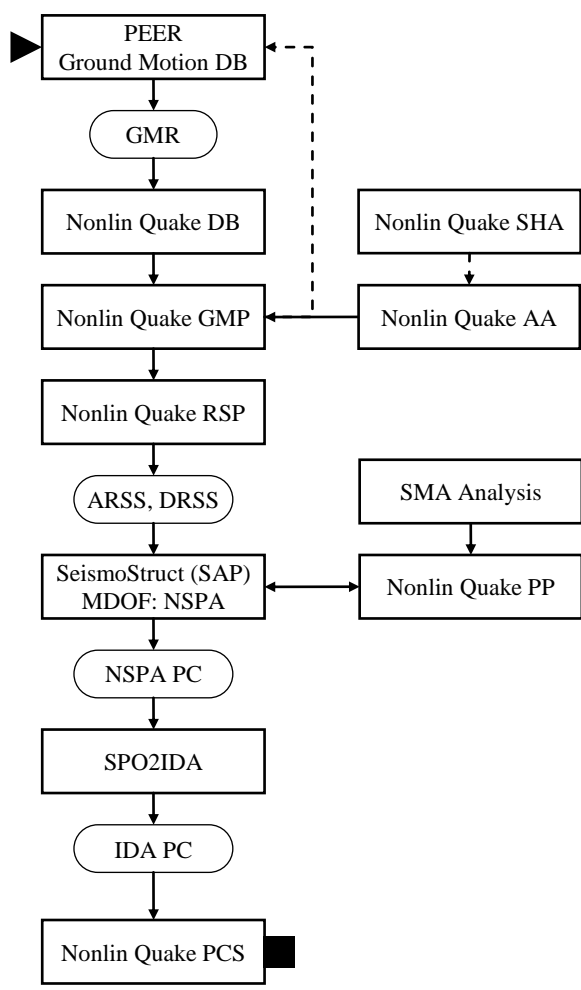


korekcija, regresione analize, kalkulacije i generisanje odgovarajuće HINSDA *pushover* površi. Sa druge strane, GMRS akceleroگرامи i ARSS spektri odgovora se importuju u *Nonlin Quake SP*, gde se sprovodi skaliranje akceleroگرامа. Zatim se skalirani kompatibilni GMRS akceleroگرامи importuju ponovo *Nonlin Quake HINSDA*, gde se sada sprovodi analiza za zahtevani nivo ciljnog pomeranja konstrukcije. Postupak određivanja nivoa ciljnog pomeranja se sprovodi posebno za svaki razmatrani ugao rotacije konstrukcije, odnosno dejstva zemljotresa. Nakon svih proračunatih nivoa ciljnih pomeranja sprovode se kalkulacije nad anvelopom ciljnog pomeranja u *Nonlin Quake TDE*.



Slika 2.3 Dijagram toka HINSDA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskog sistema *Nonlin Quake*

Na slici 2.4 je prikazan dijagram toka IDA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskog sistema *Nonlin Quake*. Proces selekcije i kreiranja odgovarajućih akceleroograma, odnosno ARSS i DRSS površi je identičan prethodnom postupku. Nakon procesiranja NSPA analiza u *SeismoStruct*-u (ili *SAP 2000*) *pushover* krive se importuju u softver *SPO2IDA*, gde se sprovodi odgovarajuća IDA analiza. Nakon procesiranja IDA analiza u *SPO2IDA* dobijene *pushover* krive se importuju u *Nonlin Quake* PCS, gde se sprovodi dodatna korekcija, regresione analize, kalkulacije i generisanje odgovarajuće IDA *pushover* površi.

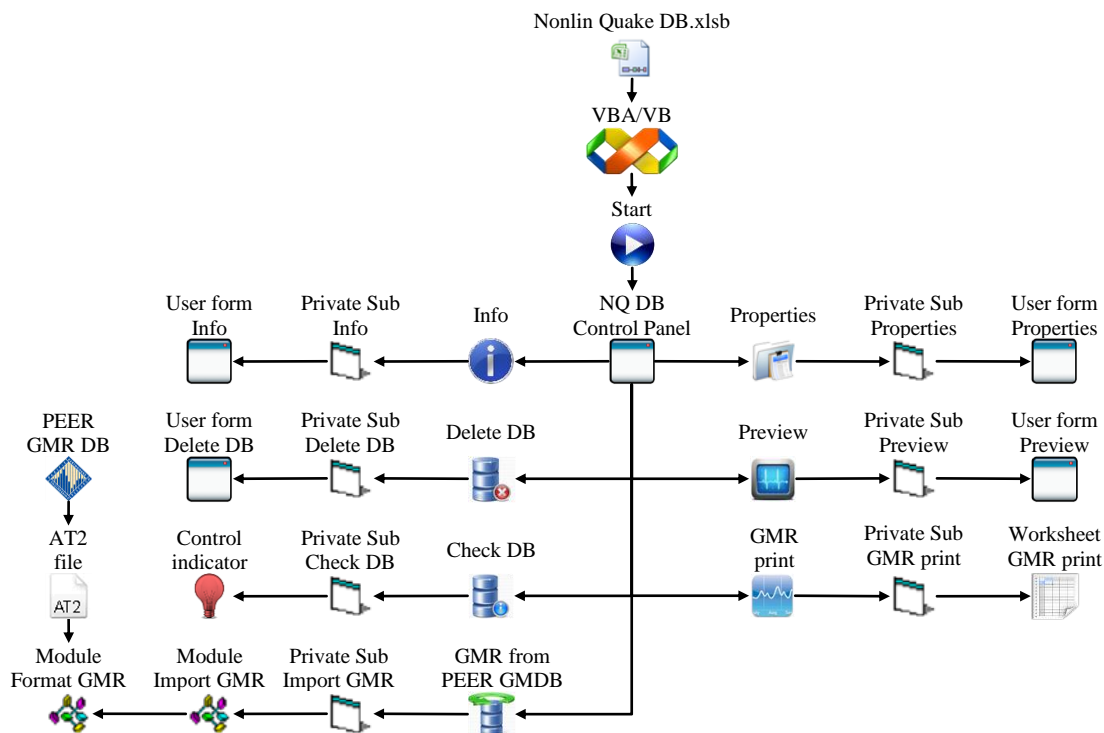


Slika 2.4 Dijagram toka IDA analize za ocenu performansi zgrada primenom ekspertskog sistema *Nonlin Quake*

U narednom delu ovog poglavlja dat je retrospektivni prikaz dijagrama tokova korisničkih formi, modula, procedura i interakcija sa drugim aplikacijama za sve *Nonlin Quake* programe.

## 2.4.2. Nonlin Quake DB

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake DB* je prikazan na slici 2.5.



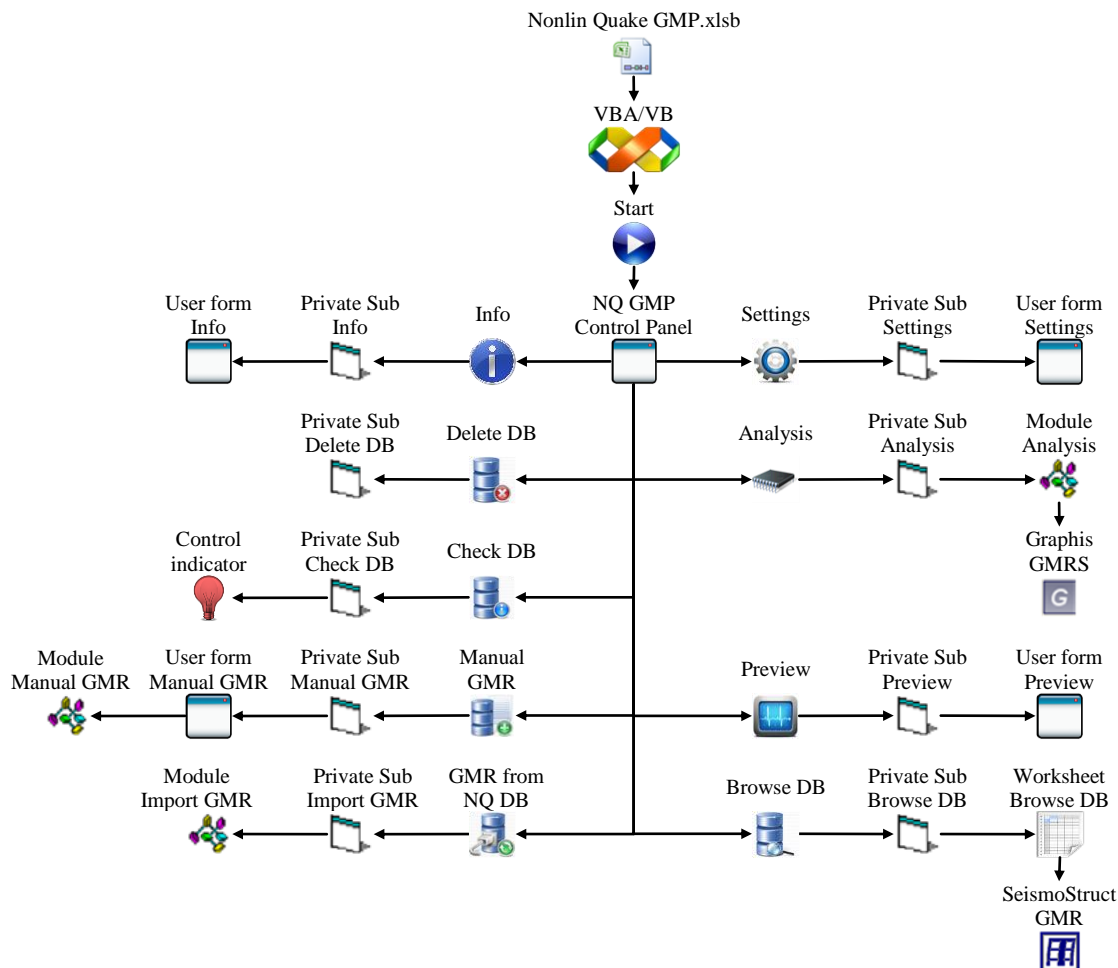
Slika 2.5 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake DB*

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake DB* su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake DB*,
- *Properties* - osnovne informacije o projektu,
- *Check DB* - provera baze podataka,
- *Delete DB* - brisanje baze podataka sa opcijama: originalni GMR, formatirani GMR i kompletne baze zemljotresa,
- *GMR from PEER GMDB* - importovanje akcelorograma iz PEER GMDB (8 zemljotresa sa po dve komponente, pri čemu se prvo importuje komponenta FP, pa tek onda FN),
- *Preview* - pregled formatiranih akcelorograma,
- *GMR print* - pregled pred štampu sa štampom akcelorograma i osnovnih parametara za svaku komponentu posebno.

### 2.4.3. Nonlin Quake GMP

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake GMP* je prikazan na slici 2.6.



Slika 2.6 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake GMP*

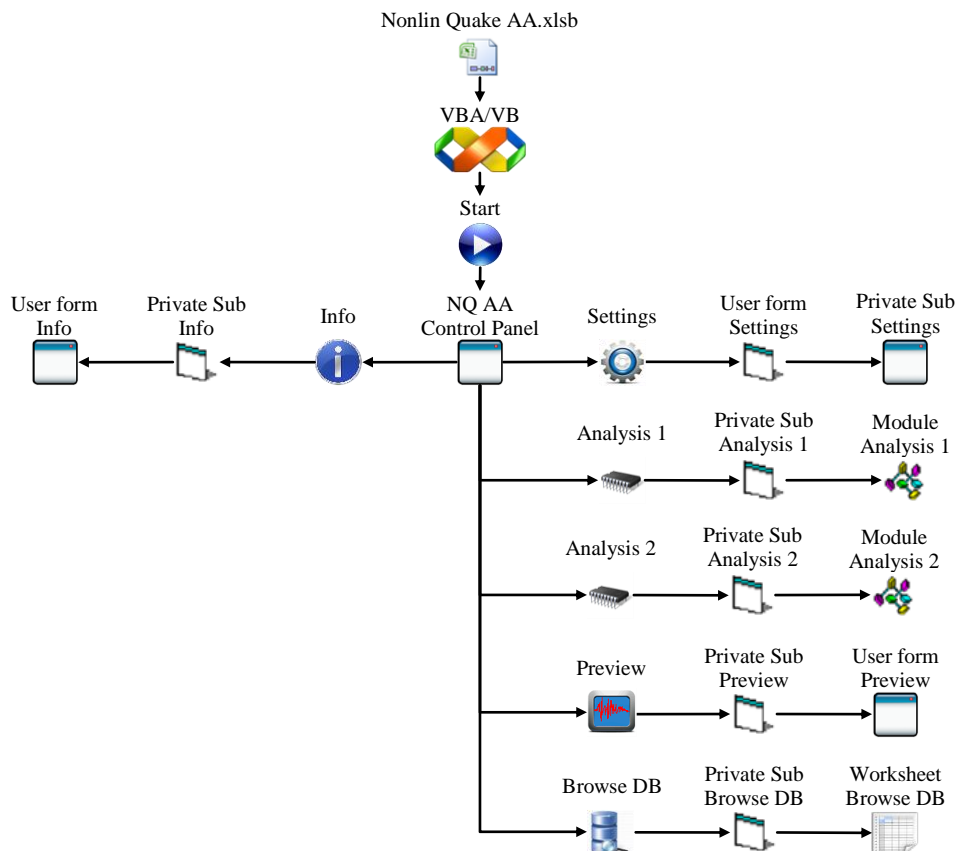
Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake GMP* su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake GMP*,
- *Check DB* - provera baze podataka,
- *Delete DB* - brisanje kompletne baze generisanih akceleroograma sa svim proračunatim parametrima,
- *GMR from Nonlin Quake DB* - importovanje akceleroograma iz *Nonlin Quake DB*,
- *Manual GMR* - nezavisno importovanje akceleroograma, pri čemu se u procesu importovanja zemljotresa sprovodi i generisanje akceleroograma za uglove  $\theta_i$  i

- konverzija generisanih akceleroograma u 3D koordinatni sistem,
- *Settings* - selekcija parametara za numeričku integraciju: AAM metoda i LAM metoda,
  - *Analysis* - procesiranje akceleroograma i analiza  $IM$  parametara,
  - *Preview* - pregled generisanih akceleroograma po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih proračunskih parametara,
  - *Browse DB* - pregled baze generisanih akceleroograma, konverzije generisanih akceleroograma u 3D koordinatni sistem i konvertovanih krivih  $I_a=f(t)$  u 3D koordinatni sistem.

#### 2.4.4. *Nonlin Quake AA*

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake AA* je prikazan na slici 2.7.



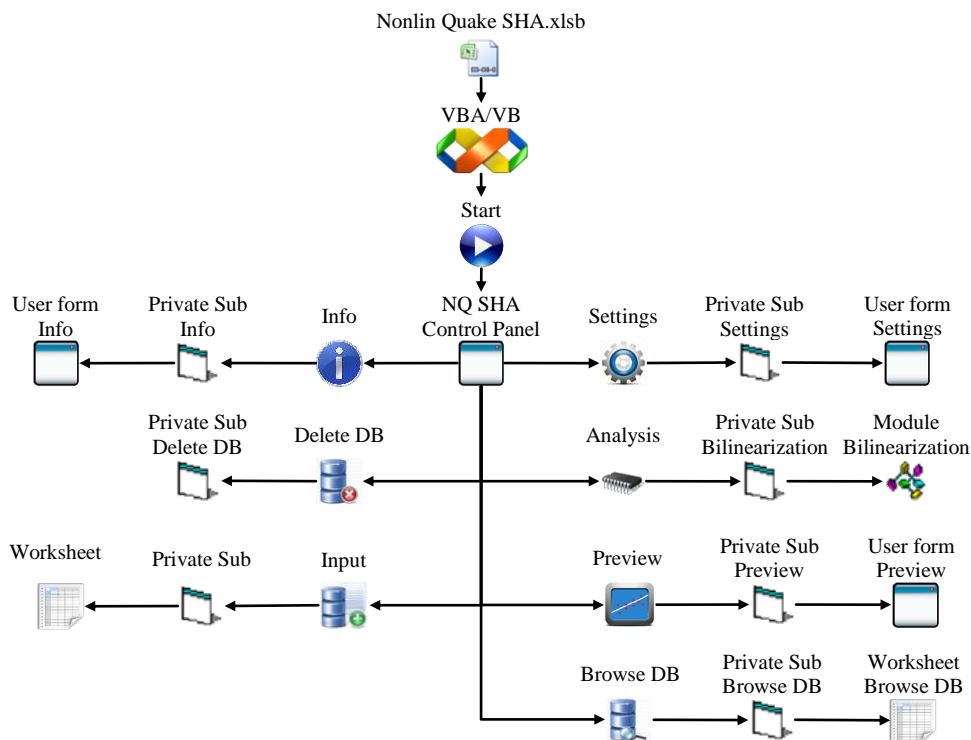
Slika 2.7 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake AA*

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake AA* su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake AA*,
- *Settings* - interfejs za unos parametara za generisanje veštačkog akcelograma i opcija za kompatibilizaciju,
- *Analysis 1* - generisanje nepotpunog nestacionarnog veštačkog akcelograma, korekcija bazne linije, filtriranje i generisanje spektra odgovora,
- *Analysis 2* - generisanje potpunog nestacionarnog veštačkog akcelograma, korekcija bazne linije, filtriranje i generisanje spektra odgovora,
- *Preview* - pregled generisanog veštačkog akcelograma i spektra odgovora,
- *Browse DB* - pregled baze generisanog veštačkog akcelograma i spektra odgovora.

#### 2.4.5. *Nonlin Quake SHA*

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake SHA* je prikazan na slici 2.8.



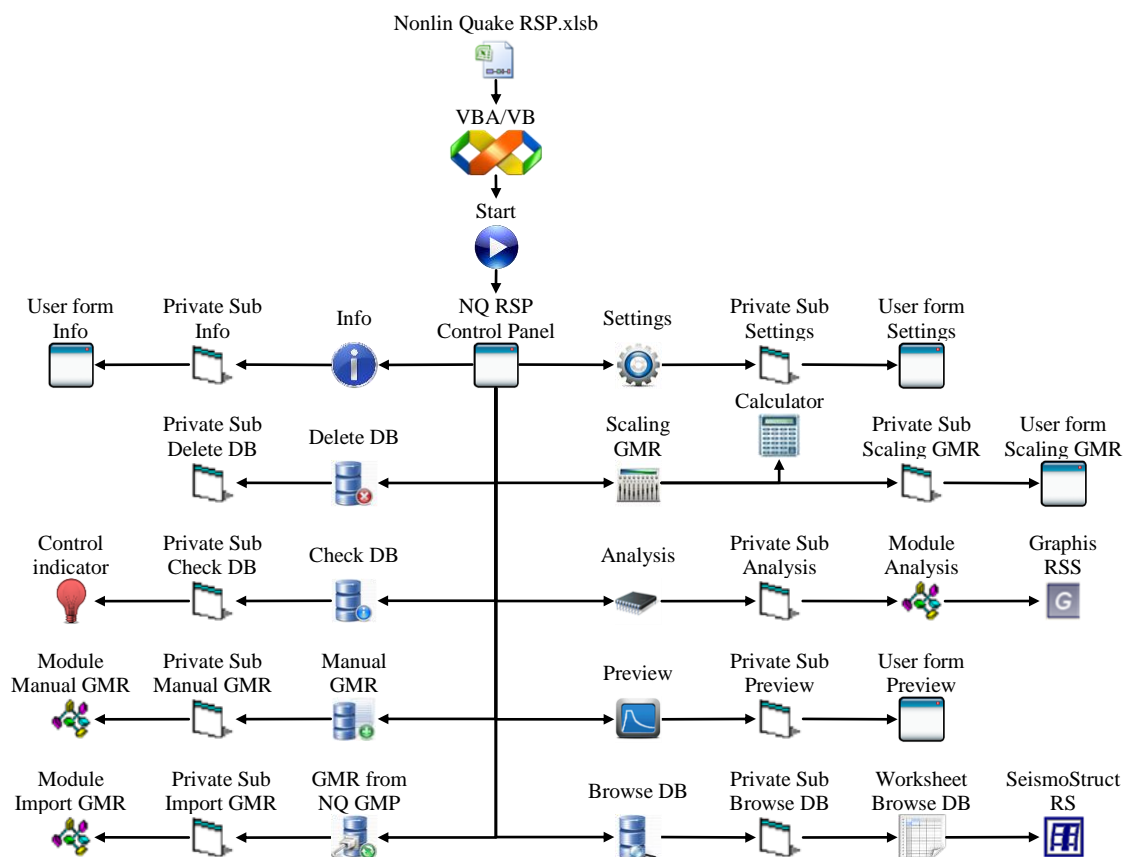
Slika 2.8 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake SHA*

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake* SHA su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake* SHA,
- *Delete DB* - brisanje kompletne baze podataka,
- *Input* - unos vrednosti relevantnih za proračun u bazu podataka,
- *Settings* - interfejs za unos parametara za analizu seizmičkog hazarda,
- *Analysis* - analiza seizmičkog hazarda i odgovarajućih parametara za *Nonlin Quake* AA,
- *Preview* - pregled proračunatih parametara analize seizmičkog hazarda,
- *Browse DB* - pregled baze iz analize seizmičkog hazarda i odgovarajućih parametara za *Nonlin Quake* AA.

#### 2.4.6. *Nonlin Quake* RSP

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* RSP je prikazan na slici 2.9.



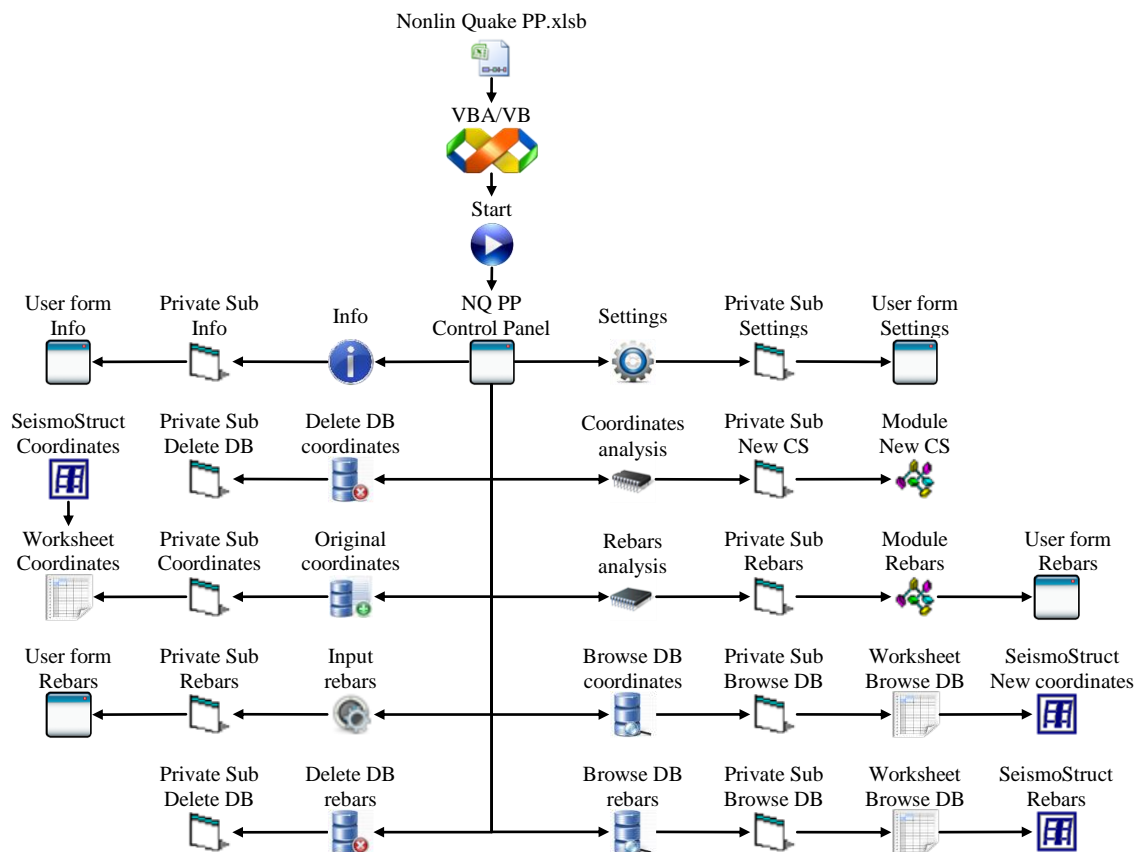
Slika 2.9 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* RSP

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake RSP* su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake RSP*,
- *Check DB* - provera baze podataka,
- *Delete DB* - brisanje kompletne baze generisanih spektara odgovora,
- *GMR from Nonlin Quake GMP* - importovanje akceleroograma iz NQ GMP,
- *Manual GMR* - nezavisno importovanje akceleroograma,
- *Settings* - interfejs za unos parametara za proračun spektara odgovora,
- *Scaling GMR* - individualno skaliranje akceleroograma,
- *Analysis* - proračun spektra odgovora ARS, VRS i DRS i 3D konverzija,
- *Preview* - pregled generisanih spektara odgovora po uglovima  $\theta_i$ ,
- *Browse DB* - pregled baze generisanih spektara odgovora i konverzije generisanih akceleroograma u 3D koordinatni sistem.

#### 2.4.7. *Nonlin Quake PP*

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake PP* je prikazan na slici 2.10.



Slika 2.10 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake PP*

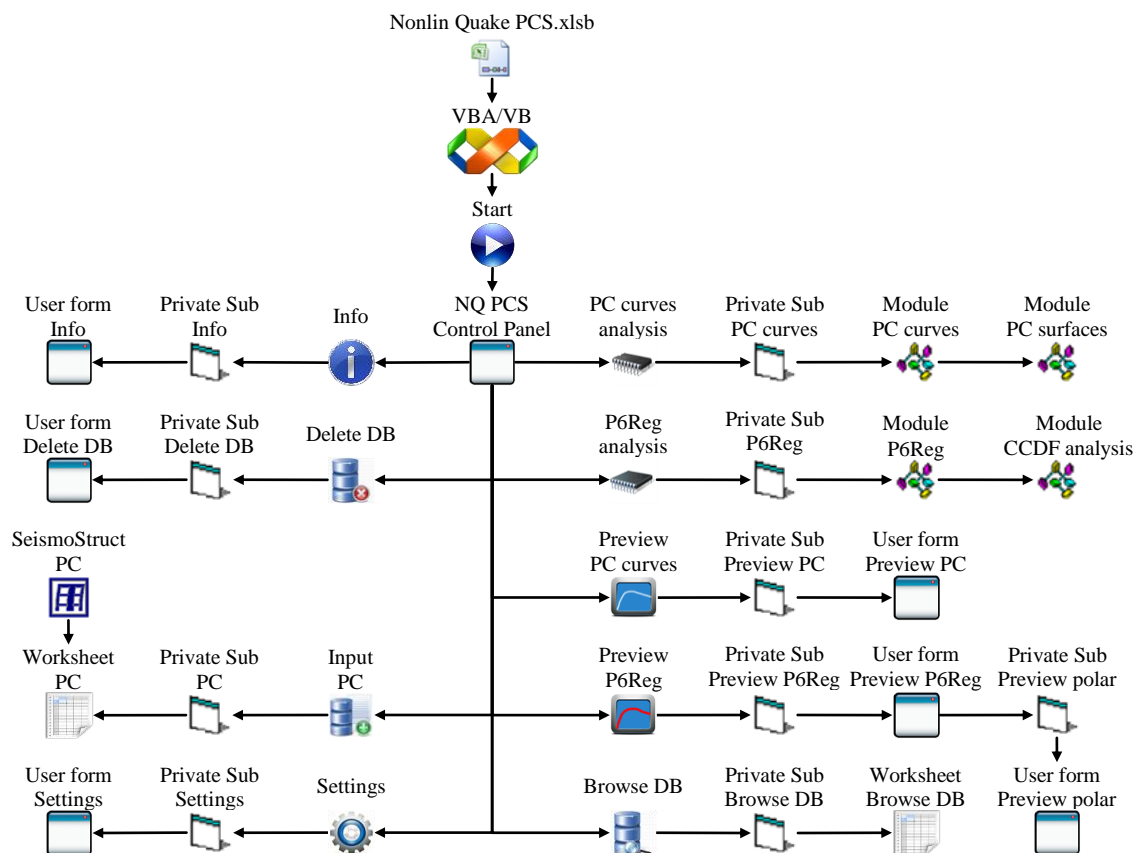


Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake* PP su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake* PP,
- *Original coordinates* - unos originalnih koordinata 3D modela zgrade,
- *Delete DB coordinates* - brisanje baze podataka koordinata,
- *Input rebars* - unos parametara za definisanje armaturnih šipki,
- *Delete rebars* - brisanje baze podataka armaturnih šipki,
- *Settings* - unos ugla rotacije i lociranje novog koordinatnog sistema,
- *Coordinates analysis* - analiza koordinata za ugao rotacije  $\theta_i$  3D modela zgrade,
- *Rebars analysis* - analiza armaturnih šipki,
- *Browse DB coordinates* - baze pregled generisanih koordinata,
- *Browse DB rebars*- pregled baze generisanih armaturnih šipki.

#### 2.4.8. *Nonlin Quake* PCS

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* PCS je prikazan na slici 2.11.



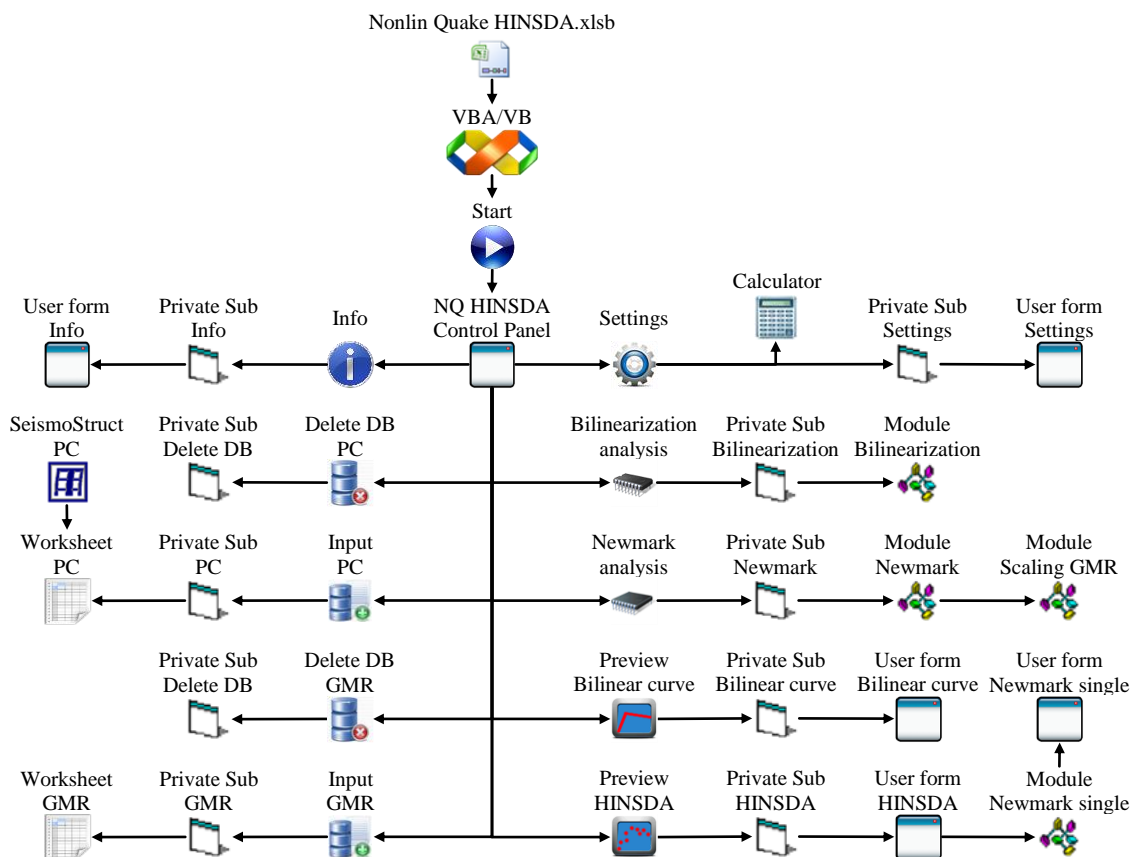
Slika 2.11 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* PCS

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake* PCS su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake* PCS,
- *Input PC* - import originalnih NSPA i INDA *pushover* krivih,
- *Delete DB* - brisanje baze podataka: originalne i korigovane PC krive,
- *Settings* - interfejs za unos parametara za korekciju diskretnih vrednosti *IM-DM*,
- *PC curves analysis* - proračun korigovanih diskretnih vrednosti *IM-DM*,
- *P6Reg analysis* - *P6Reg* analiza i proračun  $C_r$ ,  $C_s$ ,  $S_e$ ,  $\Delta E$ , *CCDF* i  $C_{r,Reg}$ ,
- *Preview PC curves* - pregled korigovanih NSPA i INDA *pushover* krivih po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih proračunatih parametara:  $DR_{max}$ ,  $(V/W)_{max}$  i  $E$ ,
- *Preview P6Reg* - pregled generisanih *P6Reg* krivih,  $C_r$ ,  $C_s$ ,  $S_e$ ,  $\Delta E$ , *CCDF* i  $C_{r,Reg}$ ,
- *Browse DB* - pregled baze generisanih 3D koordinata 3D *pushover* površi.

## 2.4.9. *Nonlin Quake* HINSDA

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* HINSDA je prikazan na slici 2.12.



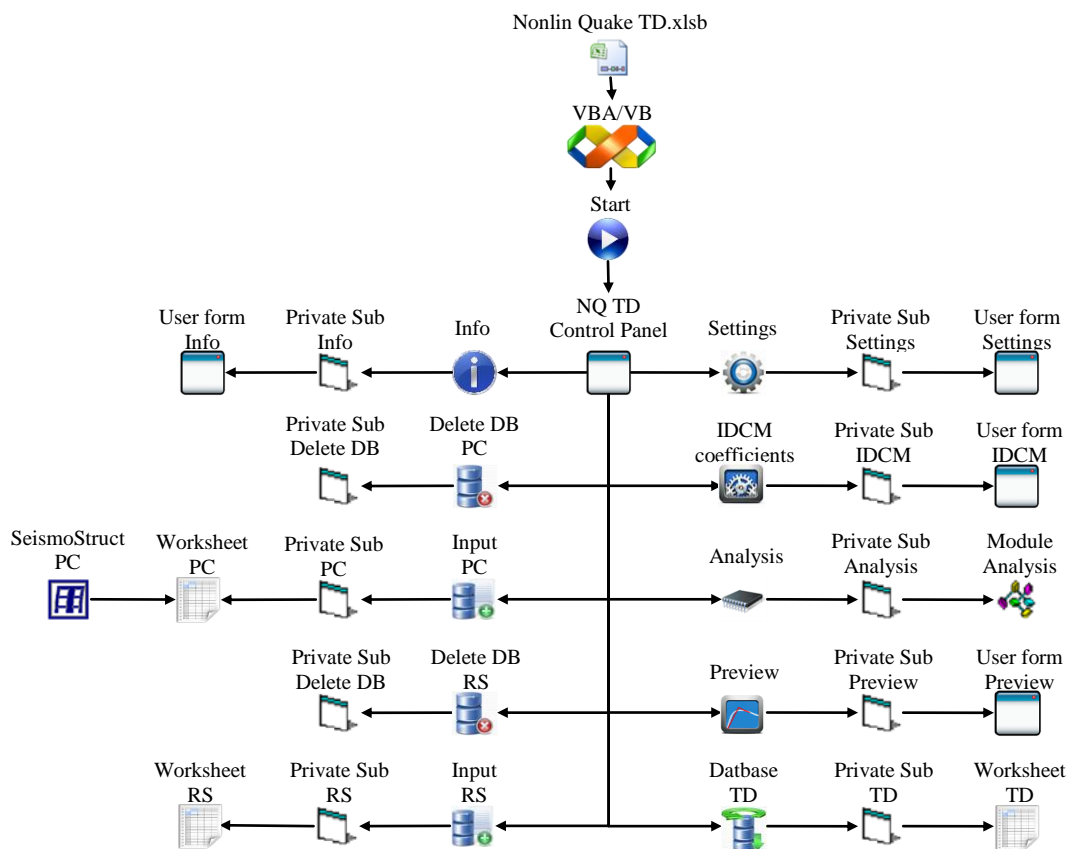
Slika 2.12 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* HINSDA

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake* HINSDA su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake* HINSDA,
- *Input PC* - import NSPA *pushover* krive,
- *Input GMR* - import akceleroograma,
- *Delete PC* - brisanje baze podataka NSPA *pushover* krivih,
- *Delete DB GMR* - brisanje baze podataka akceleroograma,
- *Settings* - interfejs za unos parametara HINSDA analize,
- *Bilinearization analysis* - proračun bilinearne krive i konstitutivnog modela,
- *Newmark Analysis* - nelinearna dinamička analiza SDOF sistema,
- *Preview Bilinear curve* - pregled bilinearne krive i konstitutivnog modela,
- *Preview HINSDA* - pregled proračuna HINSDA analize.

#### 2.4.10. *Nonlin Quake* TD

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* TD je prikazan na slici 2.13.



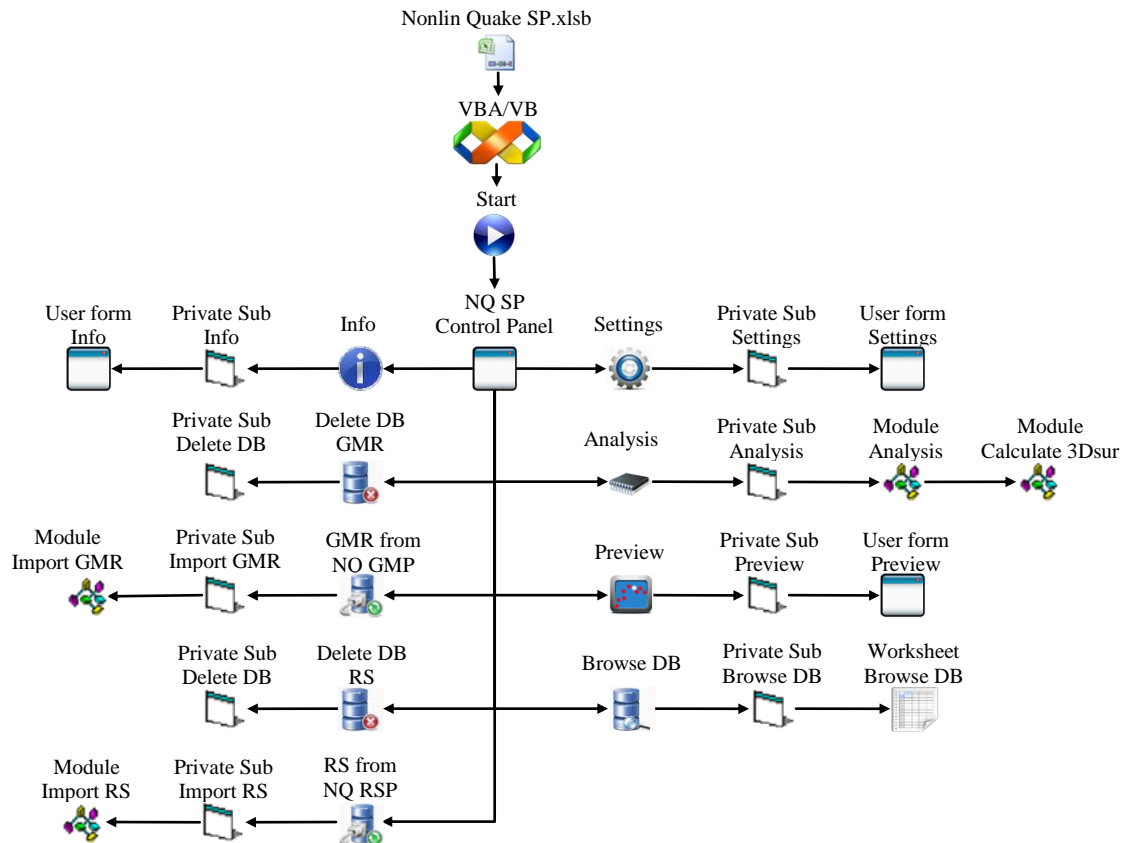
Slika 2.13 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* TD

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake* TD su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake* TD,
- *Input PC* - import NSPA *pushover* krive,
- *Input RS* - import spektra odgovora,
- *Delete DB PC* - brisanje baze podataka NSPA *pushover* krive,
- *Delete DB RS* - brisanje baze podataka spektra odgovora,
- *Settings* - interfejs za unos baznih parametara TD analize,
- *IDCM coefficients*- interfejs za unos parametara IDCM metode,
- *Analysis* - proračun prema IDCM metodi,
- *Preview* - pregled svih proračunatih koeficijenata i ciljnog pomeranja,
- *Database TD* - pregled ciljnih pomeranja u bazi podataka.

#### 2.4.11. *Nonlin Quake* SP

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* SP je prikazan na slici 2.14.



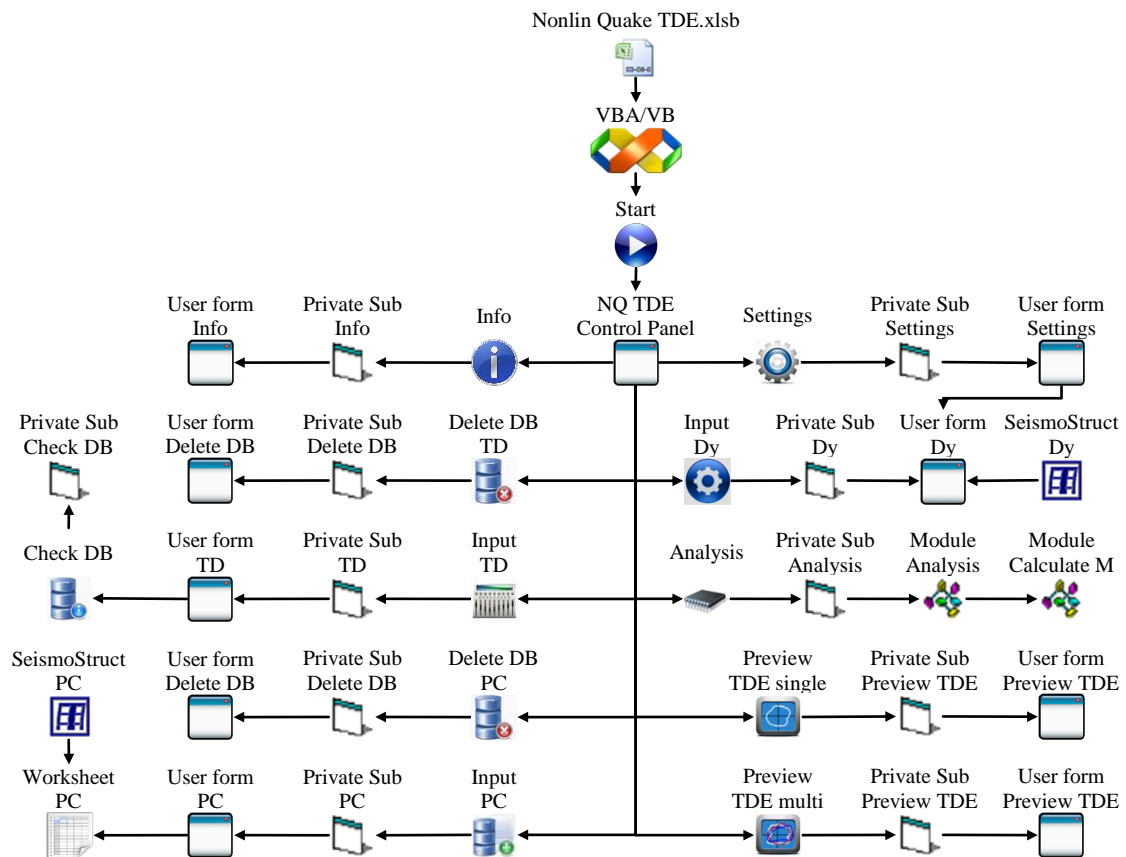
Slika 2.14 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake* SP

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake SP* su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake SP*,
- *GMR from Nonlin Quake GMP* - importovanje akceleroograma iz NQ GMP,
- *RS from Nonlin Quake RSP* - importovanje spektara odgovora iz NQ RSP,
- *Delete DB GMR* - brisanje baze podataka akceleroograma,
- *Delete DB RS* - brisanje baze podataka spektara odgovora,
- *Settings* - interfejs za unos parametara za skaliranje,
- *Analysis* - skaliranje akceleroograma i spektara odgovora,
- *Preview* - pregled parametara skaliranja,
- *Browse DB* - pregled baze skaliranih akceleroograma.

#### 2.4.12. *Nonlin Quake TDE*

Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake TDE* je prikazan na slici 2.15.



Slika 2.15 Dijagram toka korisničkih formi, modula i procedura *Nonlin Quake TDE*

Komande pod kojima se izvršavaju procedure u *Nonlin Quake* TDE su:

- *Info* - osnovne informacije o *Nonlin Quake* TDE,
- *Input TD* - unos ciljnih pomeranja po analizama,
- *Input PC* - importovanje *pushover* krivih,
- *Delete DB TD* - brisanje baze podataka ciljnih pomeranja,
- *Delete DB PC* - brisanje baze podataka *pushover* krivih,
- *Settings* - interfejs za unos parametara za proračun TDE anvelope,
- *Input  $D_y$*  - interfejs za unos parametara pomeranja na granici tečenja po analizama (opcija),
- *Analysis* - proračun TDE anvelopa,
- *Preview TDE single* - pregled TDE anvelopa i proračunatih parametara,
- *Preview TDE multi* - pregled svih TDE anvelopa i proračunatih parametara.

# 3

## **3. PROCESIRANJE AKCELEROGRAMA I MODELIRANJE OKVIRNIH ZGRADA**

### **3.1. UVODNE NAPOMENE**

U procesu analize nelinearnog ponašanja okvirnih zgrada prema performansama za uslove seizmičkog dejstva, prolazi se kroz tri bitno različite faze: predprocesiranje, procesiranje i postprocesiranje. U fazi predprocesiranja nelinearnih seizmičkih analiza sprovodi se procesiranje akceleroograma i kreiranje adekvatnih numeričkih modela zgrada. Postupak procesiranja akceleroograma obuhvata analizu, interpretaciju i prezentaciju akceleroograma kroz faze: selekcija, formatiranje, konvertovanje, skaliranje, kalkulacija, procesiranje, kompatibilizacija, normalizacija, filtriranje, generisanje i transformacija. Ove procedure se izvršavaju u vremenskom, frekventnom, frekventno-vremenskom i kapacitativnom domenu. U drugom delu predprocesiranja nelinearnih seizmičkih analiza sprovodi se kreiranje reprezentativnog numeričkog modela zgrade metodom konačnih elemenata (FEM - *Finite Element Method*). U zavisnosti od tipa numeričkog modela mogući su različiti nivoi nelinearnog odgovora sistema, s'tim što se mora uzeti u obzir razvoj geometrijske i materijalne nelinearnosti u analizi zgrada prema performansama.

### **3.2. SELEKCIJA AKCELEROGRAMA**

Metodološki postupak za analizu okvirnih zgrada prema performansama, a koji je prezentovan u ovom istraživanju, koristi akceleroگرامe realnih zemljotresa (GMR -

*ground motion record*) iz internet baza zemljotresa. U cilju iznalaženja optimalno najkvalitetnije internet baze zemljotresa izvršeno je obimno pretraživanje, pri čemu su u preliminarnoj listi izdvojene baze:

- CESMD - *Center for Engineering Strong Motion Data* [250],
- COSMOS - *Consortium of Organizations for Strong Motion Observation Systems* [251],
- ESD - *European Strong-Motion Database* [264],
- NCEDC - *Northern California Earthquake Data Center* [297],
- NGDC - *National Geophysical Data Center* [300],
- NIED - *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention* [301],
- NSL - *Nevada Seismological Laboratory* [304],
- NSMP - *United States National Strong-Motion Project* [305],
- PEER GMDB - *Pacific Earthquake Engineering Research Center - Ground Motion DataBase* [315],
- PNSN - *Pacific Northwest Seismic Network* [319],
- RAF - *Friuli Venezia Giulia Earthquake Data Center* [325],
- SCEC - *Southern California Earthquake Center* [334],
- SMA Network of Turkey - *National Strong Motion Observation Network* [349],
- SSMNet - *Swiss Strong Motion Network* [352].

Za referentnu bazu zemljotresa je izabrana PEER GMDB sa više od 3500 procesiranih komponenata iz 173 zemljotresa. U odnosu na ostale baze zemljotresa kod kojih su komponente zemljotresa procesirane za pravce sever-jug (NS - *north-south*) i istok-zapad (EW - *east-west*), kod PEER GMDB baze komponente zemljotresa su procesirane za komponentu upravno na pravac pružanja raseda (FN - *fault-normal*) i komponentu paralelno pravcu pružanja raseda (FP - *fault-parallel*) [48]. Svaka komponenta zemljotresa je prethodno procesirana primenom niskopropusnog (LPF - *low-pass filter*) i visokopropusnog (HPF - *high-pass filter*) Butterworth filtera. Procesiranje akceleroograma na ovakav način ima za cilj da eliminiše nepotrebne frekvencijske opsege, a da bitne propusti čime se delimično menja frekventni sastav zemljotresa, odnosno akceleroograma. Zatim je za određene komponente zemljotresa sprovedena korekcija bazne linije polinomskog tipa (*polynomial baseline correction*) [22].



Terminološki razmatrano ovakvi akcelerogrami preuzeti iz PEER GMDB baze pripadaju grupi originalnih neformatiranih neskalinanih akcelerograma (*unscaled ground motion accelerations*). Prvi korak u procesu selekcije zemljotresa prema PEER GMDB bazi je da se za sve analize koriste originalni neskalinani zapisi ubrzanja tla, a da se za određene numeričke analize oni dodatno procesiraju i skaliraju. Istraživanje u ovoj doktorskoj disertaciji sprovedeno je sa 8 zemljotresa klasifikovanih u 2 grupe po 4 zemljotresa: udaljeni (FFGM - *far field ground motion*) i u blizini raseda (NFGM - *near fault ground motion*).

Selekcija FFGM zemljotresa je izvršena usvajajući kriterijume:

- skala momentne magnitude (MMS - *moment magnitude scale*):  $6.5 < M_w < 7$ ,
- udaljenost od mesta iniciranja propagacije seizmičkih talasa:  $15\text{km} < R_{rup} < 40\text{km}$ ,
- brzina smičućih talasa u tlu za gornjih 30m dubine (kruta tla):  $183\text{m/s} < v_{s,30} < 366\text{m/s}$  (tlo tip D prema FEMA 273 [78] i C prema EC 8 [66]),
- ne uzimaju se u obzir zemljotresi impulsnog tipa,
- projektni seizmički hazard:  $T_r=475$  (500) godina i  $P_{10\%/50}$ .

Bazni parametri selektovanih FFGM zemljotresa su prikazani u tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Bazni parametri selektovanih FFGM zemljotresa

br.	ID	NGA	zemljotres	stanica	god.	$M_w$	D5-95 (s)	$R_{rup}$ (km)	$v_{s,30}$ (m/s)
1.	IV79	172	<i>Imperial Valley</i>	<i>El Centro Array #1</i>	1979	6.5	19.5 15.1	21.7	237.3
2.	LP89	737	<i>Loma Prieta</i>	<i>Agnews State Hospital</i>	1989	6.9	18.4 21.1	24.6	239.7
3.	NR94	953	<i>Northridge</i>	<i>Beverly Hills 14145</i>	1994	6.7	8.5 8.5	17.1	355.8
4.	SF71	68	<i>San Fernando</i>	LA <i>Hollywood Star</i>	1971	6.6	11.9 9.6	22.8	316.5

Selekcija NFGM zemljotresa je izvršena usvajajući kriterijume:

- skala MMS magnitude:  $M_w > 6$ ,
- udaljenost od mesta iniciranja propagacije seizmičkih talasa:  $R_{rup} < 15\text{km}$ ,
- brzina smičućih talasa u tlu za gornjih 30m dubine (kruta tla):  $183\text{m/s} < v_{s,30} < 366\text{m/s}$  (tlo tip D prema FEMA 273 [78] i C prema EC 8 [66]),
- uzimaju se u obzir i zemljotresi impulsnog tipa,
- odnos osnovnog perioda vibracija objekta  $T_e$  i impulsnog perioda zemljotresa  $T_p$ :  $0.35 \leq T_e/T_p \leq 3$ .

Period vibracija objekta se određuje prema:

$$\begin{aligned} T_e &= C_{t1} H^{\frac{3}{4}} \quad \text{prema FEMA273,} \\ T_e &= C_{t2} H^{\beta} \quad \text{prema FEMA356} \end{aligned} \quad (3.1)$$

gde je  $C_{t1}=0.03$ ,  $C_{t2}=0.018$ ,  $\beta=0.9$  za armiranobetonske okvirne sisteme,  $H$  visina objekta. Bazni parametri selektovanih NFGM zemljotresa su prikazani u tabeli 3.2. U selektovanoj NFGM grupi zemljotresa dva su impulsnog tipa sa  $T_p=1.4s$ , a preostala dva su klasični NFGM zemljotresi. Impulsni zemljotresi traju veoma kratko, a karakteriše ih jako impulsno kretanje tla pri čemu dolazi do iznenadnog i velikog unosa energije u konstrukciju. Ukoliko je  $T_e/T_p < 1$ , tada će maksimalna zahtevana spratna duktilnost zgrade biti veća u nižim spratovima [2]. U slučaju da je  $T_e/T_p > 1$ , maksimalna zahtevana spratna duktilnost zgrade će biti veća ka višim spratovima za zgrade veće krutosti, a u slučaju zgrade manje krutosti biće veće spratne duktilnosti kod nižih spratova.

Tabela 3.2 Bazni parametri selektovanih NFGM zemljotresa

br.	ID	NGA	zemljotres	stanica	god.	$M_w$	D5-95 (s)	$R_{rup}$ (km)	$v_{s,30}$ (m/s)	$T_p$ (s)
1.	KO95	1119	<i>Kobe</i>	<i>Takarazuka, Japan</i>	1995	6.9	5.1 3.4	0.3	312	1.4 -
2.	MH84	458	<i>Morgan Hill</i>	<i>Gilroy Array</i>	1984	6.2	12.8 16.4	11.5	221.8	-
3.	PS86	529	<i>Palm Springs</i>	<i>North Palm Springs</i>	1986	6.1	4.5 5.6	4	345.4	1.4 -
4.	PA66	31	<i>Parkfield</i>	<i>Cholame Shandon Arr.</i>	1966	6.2	13.1 10.6	12.9	256.8	-

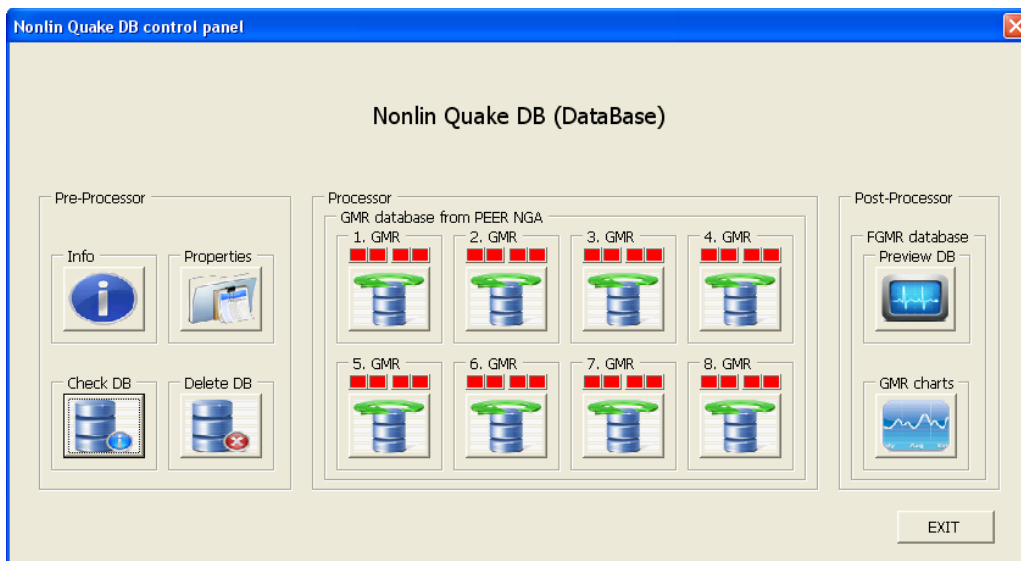
### 3.3. FORMATIRANJE AKCELEROGRAMA

Formatiranje je procedura transformacije oblika zapisa akceleroograma iz baze zemljotresa. Nakon sprovedene selekcija zemljotresa iz PEER GMDB baze zemljotresa isti se importuju u modul za formatiranje. U tu svrhu razvijen je program *Nonlin Quake DB (DataBase)* u okviru ekspertskog sistema *Nonlin Quake*, a čiji je kontrolni panel prikazan na slici 3.1. U *Nonlin Quake DB* se neskalirani akceleroگرامи formatiraju iz AT2 (*auto template*) u XLSB format (*excel binary*), a zatim generišu inkrementi vremena za svaki akceleroگرام pojedinačno:

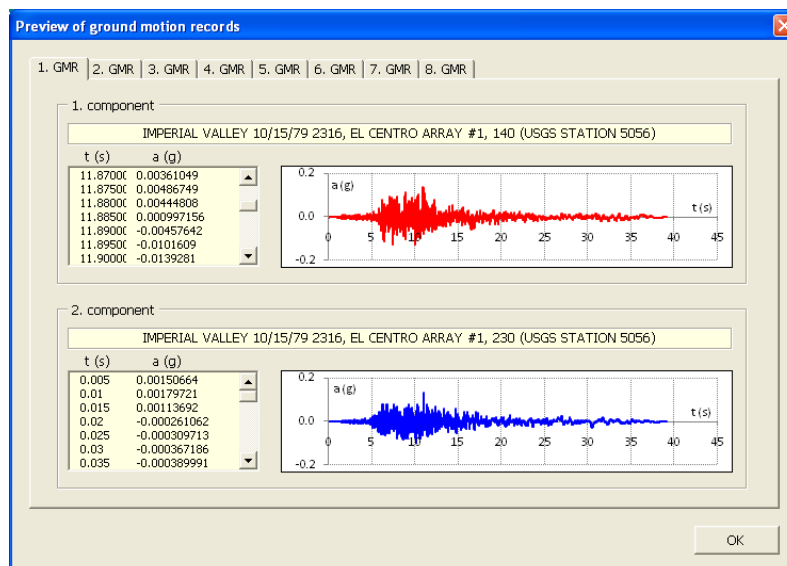
$$t_0 = 0, \quad t_{i+1} = t_i + \Delta t, \quad t_n = \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (3.2)$$

gde je  $t$  vreme. Broj različitih zemljotresa koji se razmatraju je 8 sa po 2 komponente,

tako da je ukupan broj akcelorograma 16. Procedura formatiranja se sprovodi konvertovanjem vrednosti iz više vrsta/više kolona sa horizontalnim poretkom u više vrsta/jednu kolonu sa vertikalnim poretkom. Konkretnije, konvertuje se pet nizova sa horizontalnim poretkom vrednosti u jedan niz sa vertikalnim poretkom vrednosti. Na slici 3.2 prikazan je interfejs za pregled baze podataka svih formatiranih akcelorograma sa komponentama.

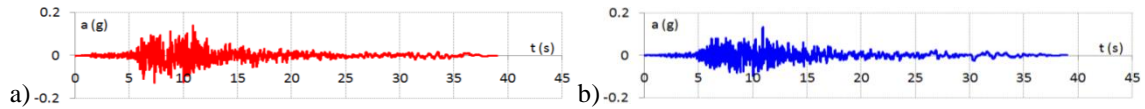


Slika 3.1 Kontrolni panel *Nonlin Quake DB*

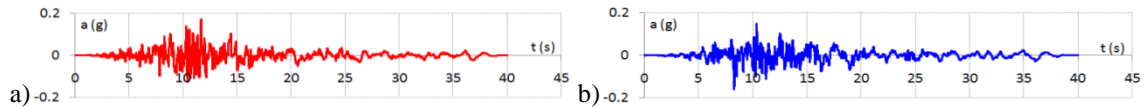


Slika 3.2 Pregled baze podataka svih formatiranih akcelorograma sa komponentama

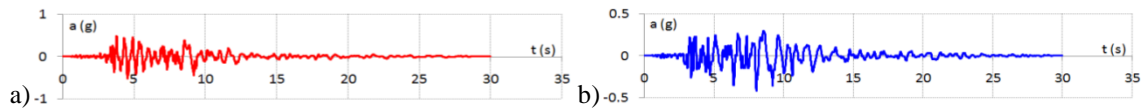
Na slikama 3.3÷3.10 su prikazani akcelorogrami preuzeti iz baze *Nonlin Quake DB* i to posebno za FP i posebno za FN komponentu.



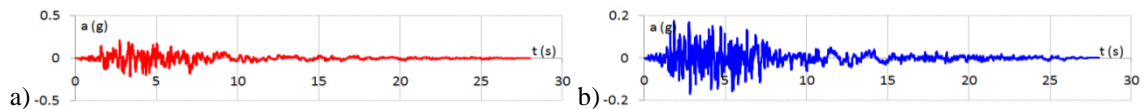
Slika 3.3 Neskahiran formatiran akceleroqram *Imperial Valley* IV79: a) 1. komponenta  $\angle 140^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 230^\circ$



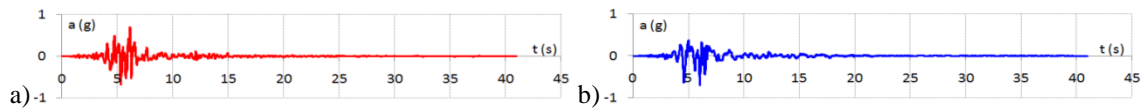
Slika 3.4 Neskahiran formatiran akceleroqram *Loma Prieta* LP89: a) 1. komponenta  $\angle 0^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 90^\circ$



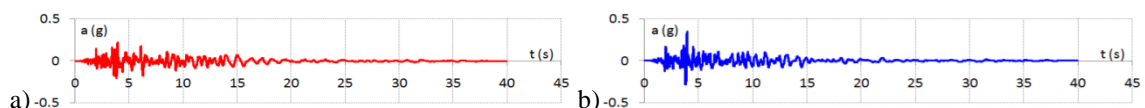
Slika 3.5 Neskahiran formatiran akceleroqram *Northridge* NR94: a) 1. komponenta  $\angle 279^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 9^\circ$



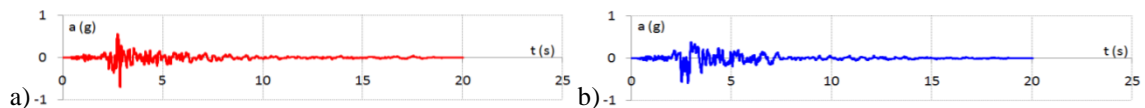
Slika 3.6 Neskahiran formatiran akceleroqram *San Fernando* SF71: a) 1. komponenta  $\angle 90^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 180^\circ$



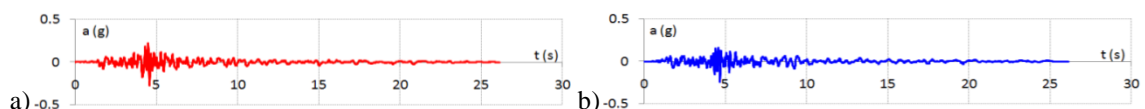
Slika 3.7 Neskahiran formatiran akceleroqram *Kobe* KO95: a) 1. komponenta  $\angle 0^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 90^\circ$



Slika 3.8 Neskahiran formatiran akceleroqram *Morgan Hill* MH84: a) 1. komponenta  $\angle 270^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 360^\circ$



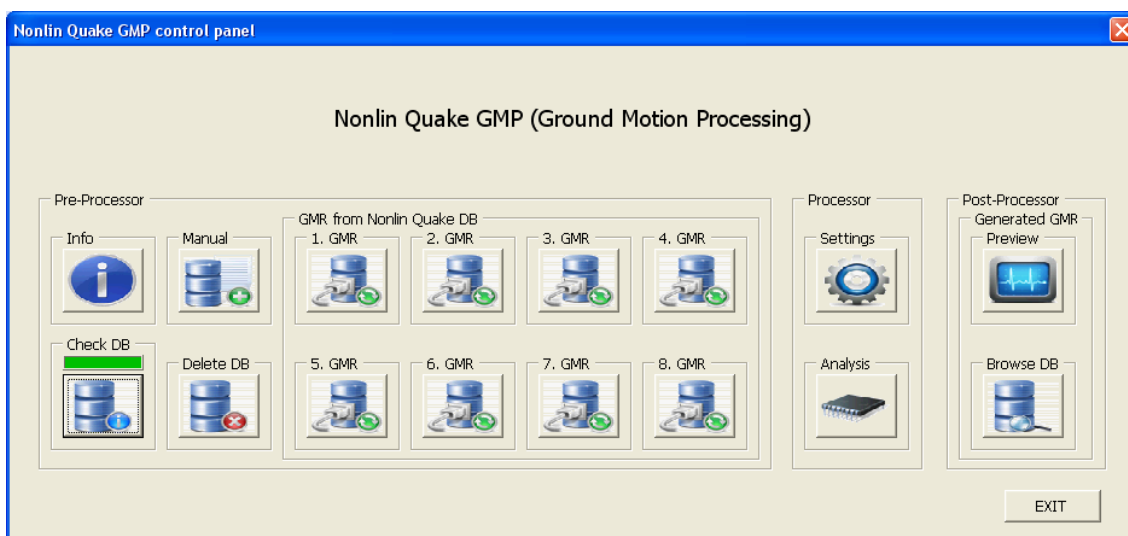
Slika 3.9 Neskahiran formatiran akceleroqram *Palm Springs* PS86: a) 1. komponenta  $\angle 210^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 300^\circ$



Slika 3.10 Neskahiran formatiran akceleroqram *Parkfield* PA66: a) 1. komponenta  $\angle 320^\circ$ , b) 2. komponenta  $\angle 50^\circ$

### 3.4. PROCESIRANJE AKCELEROGRAMA

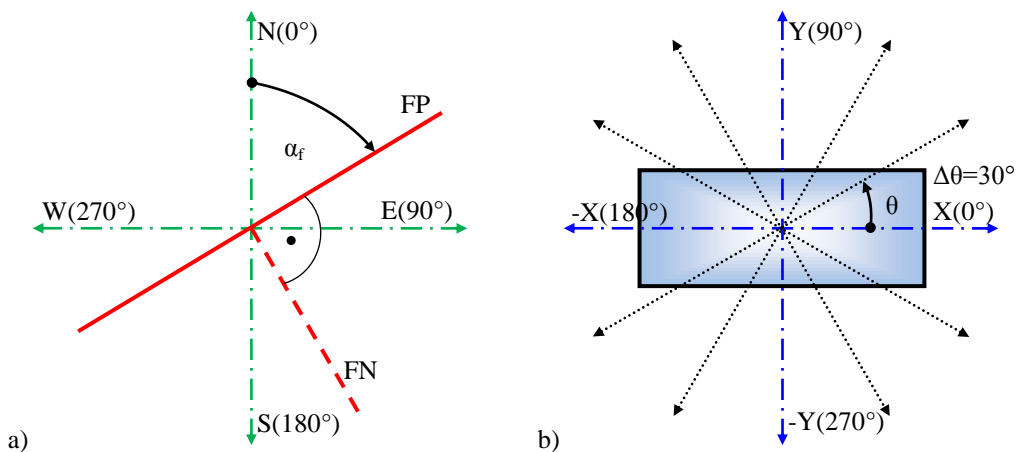
Nakon sprovedenog formatiranja akceleroograma u *Nonlin Quake DB* isti se importuju u *Nonlin Quake GMP (Ground Motion Processing)*, gde se sprovodi procesiranje akceleroograma za različite uglove  $\theta_i$ , a zatim generiše površ akceleroograma (GMRS - *ground motion record surface*). Kontrolni panel *Nonlin Quake GMP* je prikazan na slici 3.11.



Slika 3.11 Kontrolni panel *Nonlin Quake GMP*

Globalni koordinatni sistem, u kojem se razmatra položaj zgrade u osnovi za dejstvo zemljotresa, je definisan ortogonalnim osama, tako da horizontalnoj osi odgovara pravac istok-zapad E-W, a vertikalnoj osi odgovara pravac sever-jug N-S. Kod analize seizmičkog hazarda žarište ili izvor zemljotresa se može razmatrati diskretno, unutar raseda, površinsko pa i prostorno. Kao što je već prikazano akceleroگرامи preuzeti iz PEER GMDB baze zemljotresa su zabeleženi u pravcu pružanja raseda FP i upravno na pravac pružanja raseda FN. Na taj način svaki rased je definisan lokalnim koordinatnim sistemom sa pravcima FP i FN (slika 3.12.a). Kada se položaj raseda razmatra u globalnom koordinatnom sistemu, tada je ugao koji rased zaklapa sa vertikalnom N-S osom globalnog koordinatnog sistema ugao položaja raseda  $\alpha_f$  (*strike angle*) [154]. Ovaj ugao se definiše u smeru rotacije kazaljke na satu. Dakle, kod globalnog koordinatnog sistema (N-S i E-W) sa razmatranim osama raseda (FP i FN) smer rotacije je ekvivalentan smeru rotacije kazaljke na satu, a proračun ovog smera rotacije se sprovodi od vertikalne ose N-S. Orijentaciji sever odgovara  $N=0^\circ$ ,

istoku  $E=90^\circ$ , jugu  $S=180^\circ$  i zapadu  $W=270^\circ$ . Referentni koordinatni sistem, za koji se razmatra dejstvo zemljotresa u odnosu na položaj objekta, razlikuje se od prethodnog koordinatnog sistema. Kod ovog koordinatnog sistema smer rotacije je suprotan smeru rotacije kazaljke na satu sa početkom na horizontalnoj osi istok-zapad E-W, pri čemu orijentaciji istok odgovara  $E=0^\circ$ , sever  $N=90^\circ$ , zapad  $W=180^\circ$  i jugu  $S=270^\circ$ . Na slici 3.12.b je prikazana geometrija osnove zgrade kod koje se glavne ose poklapaju sa osama referentnog i globalnog koordinatnog sistema ( $X \equiv E-W$  i  $Y \equiv N-S$ ). Određivanje komponentata zemljotresa se sprovodi za inkrement ugla rotacije  $\Delta\theta=30^\circ$  u referentnom koordinatnom sistemu  $E-W=0^\circ$  i  $N-S=90^\circ$ .



Slika 3.12 a) orijentacija FP i FN komponentata raseda u odnosu na globalni koordinatni sistem N-S i E-W ose, b) geometrija osnove zgrade kod koje se glavne ose poklapaju sa referentnim i globalnim koordinatnim sistemom  $X \equiv E-W$ ,  $Y \equiv N-S$

U realnim uslovima česta je situacija da glavne ose zgrade nisu paralelne osama referentnog i globalnog koordinatnog sistema. Takođe, ukoliko se uzima u obzir razmatranje većeg broja raseda, tada njihovi lokalni koordinatni sistemi sa definisanim pravcima FP i FN nisu međusobno jednaki (slika 3.13). Dakle, u ovom slučaju uglovi položaja raseda  $\alpha_{f,i}$  se međusobno razlikuju i kao takvi su preuzimani iz PEER GMDB baze zemljotresa.

Postupak proračuna međukomponentata akceleroograma po uglovima sprovodi se preko rotacije komponentata FP i FN u referentni koordinatni sistem [18], [113]:

$$\begin{bmatrix} a_{FP}(t) \\ a_{FN}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{\theta}(t) \\ a_{\theta-90}(t) \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

gde je  $a_{FP}(t)$  akceleroگرام za FP pravac,  $a_{FN}(t)$  akceleroagram za FN pravac,  $a_{\theta}(t)$

akcelerogram za ugao rotacije  $\theta$ ,

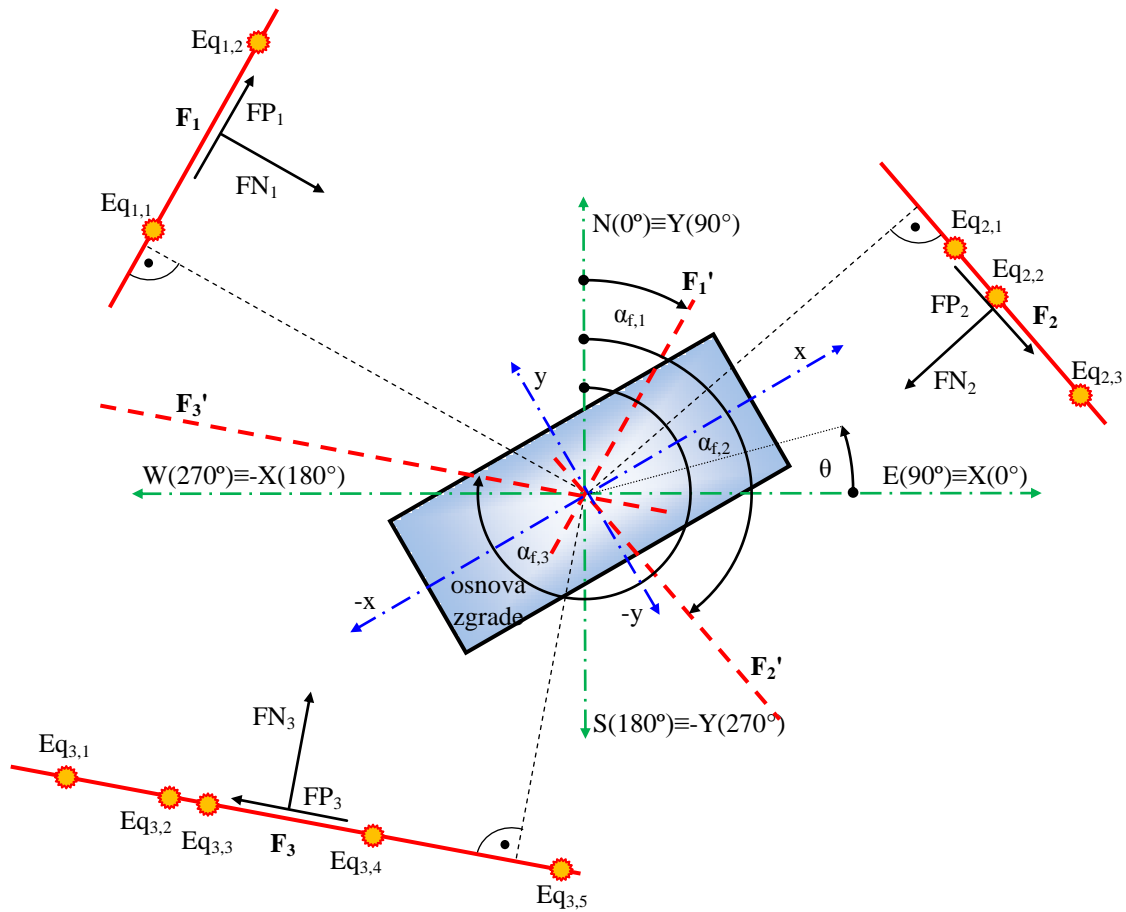
$$[a_{orig}(t)] = \begin{bmatrix} a_{FP}(t) \\ a_{FN}(t) \end{bmatrix}, \quad [a_{rot}(t)] = \begin{bmatrix} a_{\theta}(t) \\ a_{\theta-90}(t) \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

a matrica rotacije:

$$[R_{\theta}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

dok je ugao  $\theta_i$ :

$$\theta_i = (90^\circ - \alpha_f) + i\Delta\theta \quad \text{za } i = 0, \dots, 11. \quad (3.6)$$



Slika 3.13 Položaj glavnih osa zgrade u odnosu na globalni, referentni i lokalni koordinatni sistem raseda (FP i FN komponente)

Komponente  $a_{\theta}(t)$  i  $a_{\theta-90}(t)$  se određuju prema:

$$[a_{rot}(t)] = [R_{\theta}]^{-1} [a_{orig}(t)], \quad (3.7)$$

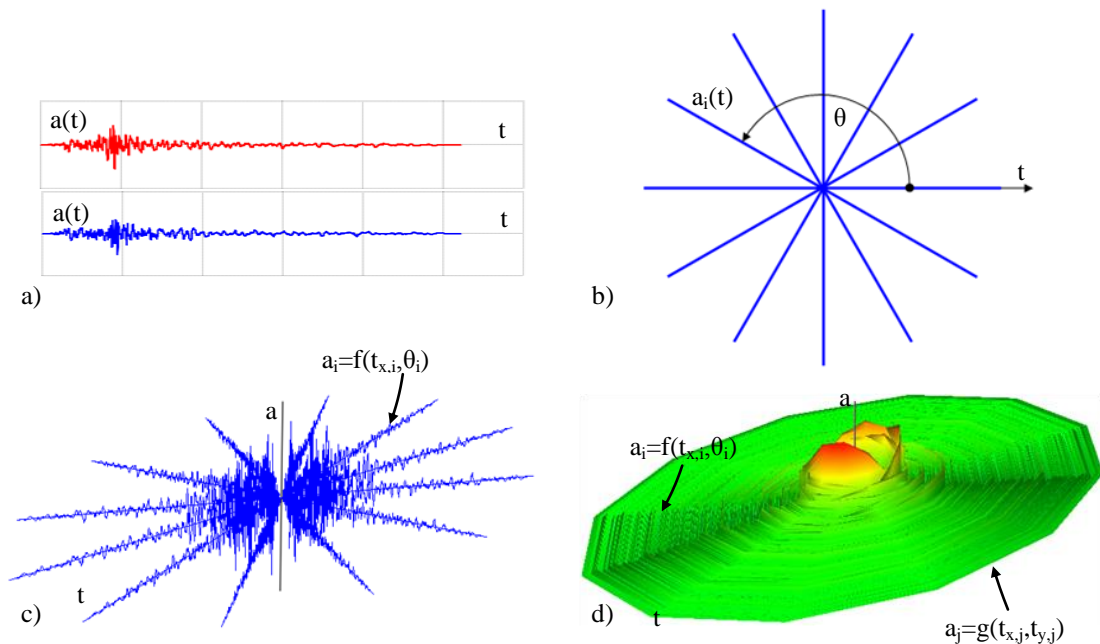
tako da se u konačnom obliku dobija:

$$\begin{bmatrix} a_{\theta}(t) \\ a_{\theta-90}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{FP}(t) \\ a_{FN}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Nakon proračuna akceleroograma za  $\theta_i$  uglove konstruiše se površ akceleroograma, tako što se prvo generišu  $a_\theta(t)$  akceleroogrami u ravanskom polarnom koordinatnom sistemu (slika 3.14.b). Radijalna koordinata je vreme  $t$  ( $t_r$ ), a ugaona koordinata je ugao  $\theta$ . Zatim se konstruišu akceleroogrami, nezavisno jedan od drugog, u prostornom cilindričnom koordinatnom sistemu (slika 3.14.c). Radijalna koordinata je takođe vreme  $t$  ( $t_r$ ), ugaona koordinata je ugao  $\theta$ , dok je vertikalna koordinata ubrzanje  $a_\theta(t)$ . Ovo ubrzanje je određeno projekcijama  $a_{FP}(t)$  i  $a_{FN}(t)$  na pravce ugla  $\theta_i$ . Konverzija u prostorni pravougli koordinatni sistem se sprovodi prema:

$$t_x = t \cos \theta, \quad t_y = t \sin \theta. \quad (3.9)$$

Koordinati  $\pm X$  prostornog pravouglonog koordinatnog sistema, odnosno pravcu E-W globalnog koordinatnog sistema odgovara vreme  $t_x$ , dok koordinati  $\pm Y$ , odnosno pravcu N-S globalnog koordinatnog sistema odgovara vreme  $t_y$ . Vertikalna koordinata je ubrzanje  $a_\theta(t)$ , takođe određena projekcijama  $a_{FP}(t)$  i  $a_{FN}(t)$  na pravce ugla  $\theta_i$ . Komponente akceleroograma su linearno interpolirane u radijalnom i u tangencijalnom pravcu, tako da se dobija prostorna rotaciona površ. Za potrebe istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji je korišćena površ akceleroograma definisana u cilindričnom koordinatnom sistemu, ali se zbog zahteva softvera za prezentaciju prostornih površi sprovodi konverzija u prostorni pravougli koordinatni sistem.



Slika 3.14 Dijagram toka generisanja površi akceleroograma GMRS: a) 2D ortogonalni koordinatni sistem  $a(t)=f(t)$ , b) 2D polarni koordinatni sistem  $t=f(\theta)$ , c) 3D cilindrični koordinatni sistem  $a(t)=f(t,\theta)$ , d) 3D ortogonalni koordinatni sistem  $a(t)=f(t_x,t_y)$



Definicija 3.1: Površ akcelerograma (GMRS - ground motion record surface)  $a=f(t_x, t_y)$  je linearno interpolirana asimetrična rotaciona površ generisana povezivanjem diskretnih vrednosti  $I_i(t_{r,i}, a_{z,i}, \theta_i)$  individualnih akcelerograma  $a_i=f(t_{r,i}, \theta_i)$  linearnim funkcijama  $a_j=g(t_{x,j}, t_{y,j})$  u tangencijalnom pravcu:

$$a = f(t_x, t_y) = \left[ \bigcup_{\theta_i=0}^{360^\circ} f(t_{r,i}, \theta_i) \right] \cup \left[ \bigcup_{j=0}^{t_{max}} g(t_{x,j}, t_{y,j}) \right], \quad (3.10)$$

pri čemu je:

$$I_i(t_{r,i}, a_{z,i}, \theta_i) \subset (a = f(t_x, t_y)), \quad t_{x,j}, t_{y,j} \in [0, t_{max}], \quad \theta_i \in [0, 360]. \quad (3.11)$$

Prvi proces selekcije zemljotresa je sproveden postavljanjem kriterijuma za selekciju u PEER GMDB bazi zemljotresa, dok se u daljem toku sprovodi analiza i selekcija generisanih akcelerograma u *Nonlin Quake GMP*. Procesiranje sa analizom generisanih akcelerograma se sprovodi tako što se određuju merodavni parametri akcelerograma. Za potrebe istraživanja u ovom doktoratu selektovani su najrelevantniji parametri kao mere intenziteta (*IM - intensity measure*). U određivanju relevantnih parametara u procesiranju akcelerograma polazi se od diferencijalne jednačine sistema sa jednim stepenom slobode (*SDOF - single degree of freedom*) [49]:

$$ma + cv + kd = -ma_g, \quad (3.12)$$

gde je  $m$  masa,  $a$  ubrzanje,  $c$  prigušenje,  $v$  brzina,  $k$  krutost,  $d$  pomeranje,  $ma$  inercijalna sila,  $cv$  sila prigušenja,  $kd$  elastična sila,  $ma_g$  aktivna (spoljašnja) sila, pri čemu su inicijalni uslovi:

$$d(t=0) = d_0 \quad \text{i} \quad v(t=0) = v_0, \quad (3.13)$$

gde je  $d_0$  inicijalno relativno pomeranje,  $v_0$  inicijalna relativna brzina. Rešavanje diferencijalne jednačine (3.12) sprovodi se primenom *Newmark*-ovog postupka korak po korak, pri čemu se jednačina kretanja posmatra u trenutku:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t, \quad (3.14)$$

dok se pomeranje i brzina izražavaju na sledeći način:

$$d_{i+1} = d_i + \Delta t v_i + \left[ (0.5 - \beta) \Delta t^2 \right] a_i + \left[ \beta \Delta t^2 \right] a_{i+1}, \quad (3.15)$$

$$v_{i+1} = v_i + \left[ (1 - \gamma) \Delta t \right] a_i + \left[ \gamma \Delta t \right] a_{i+1}. \quad (3.16)$$

Parametri  $\gamma$  i  $\beta$  se određuju tako da obezbede što veću numeričku tačnost i stabilnost, a što je obezbeđeno ukoliko se nalaze u intervalu:

$$\gamma \geq \frac{1}{2}, \quad \frac{1}{6} \leq \beta \leq \frac{1}{4}. \quad (3.17)$$

Rešavanje jednačina (3.15) i (3.16) se sprovodi inkrementalno za:

$$\Delta d_i = d_{i+1} - d_i, \quad \Delta v_i = v_{i+1} - v_i, \quad \Delta a_i = a_{i+1} - a_i, \quad (3.18)$$

tako da se preformulacijom dobija:

$$\Delta d_i = \Delta t v_i + \frac{\Delta t^2}{2} a_i + \beta \Delta t^2 \Delta a_i, \quad (3.19)$$

$$\Delta v_i = \Delta t a_i + \gamma \Delta t \Delta a_i, \quad (3.20)$$

odnosno za inkrement ubrzanja:

$$\Delta a_i = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta d_i - \frac{1}{\beta \Delta t} v_i - \frac{1}{2\beta} a_i. \quad (3.21)$$

Zamenom jednačine (3.21) u jednačinu (3.19) dobija se:

$$\Delta v_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta d_i - \frac{\gamma}{\beta} v_i + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) a_i. \quad (3.22)$$

Diferencijalna jednačina kretanja u inkrementalnoj formulaciji glasi:

$$m \Delta a_i + c \Delta v_i + k \Delta d_i = -m \Delta a_{g,i}, \quad (3.23)$$

a određuje se kao razlika iz dva uzastopna koraka vremena:

$$m a_i + c v_i + k d_i = -m a_{g,i}, \quad (3.24)$$

$$m a_{i+1} + c v_{i+1} + k d_{i+1} = -m a_{g,i+1}. \quad (3.25)$$

Zamenom jednačina (3.21) i (3.22) u (3.23) dobija se:

$$k^* \Delta d_i = \Delta p_i^*, \quad (3.26)$$

gde je:

$$k^* = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m, \quad (3.27)$$

$$\Delta p_i^* = m \Delta a_{g,i} + \left( \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c \right) v_i + \left[ \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] a_i. \quad (3.28)$$

Vrednosti  $k^*$  i  $\Delta p_i^*$  se određuju na osnovu karakteristika SDOF sistema  $m$ ,  $k$  i  $c$ , dok su  $\gamma$  i  $\beta$  koeficijenti numeričke integracije i za metodu prosečnog ubrzanja (AAM - *Average Acceleration Method*) glase:

$$\gamma = \frac{1}{2} \quad \text{i} \quad \beta = \frac{1}{4}, \quad (3.29)$$

dok za metodu linearnog ubrzanja (LAM - *Linear Acceleration Method*) glase:

$$\gamma = \frac{1}{2} \quad \text{i} \quad \beta = \frac{1}{6}. \quad (3.30)$$

Inkrementalno pomeranje se određuje iz izraza:

$$\Delta d_i = \frac{\Delta p_i^*}{k^*}, \quad (3.31)$$

i s obzirom da je  $\Delta d_i$  određeno,  $\Delta v_i$  i  $\Delta a_i$  se određuju iz (3.22) i (3.21), dok se  $d_{i+1}$ ,  $v_{i+1}$  i

$a_{i+1}$  određuju iz (3.35). *Newmark*-ov metod je stabilan ukoliko je:

$$\frac{\Delta t}{T} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}\sqrt{\gamma-2\beta}}. \quad (3.32)$$

Za AAM metodu uslov (3.32) postaje:

$$\frac{\Delta t}{T} < \infty, \quad (3.33)$$

a to znači da je AAM metoda stabilna za bilo koju vrednost  $\Delta t$ , dok za LAM metodu uslov (3.32) postaje:

$$\frac{\Delta t}{T} \leq 0.551. \quad (3.34)$$

Frekvencija sistema  $f$  je definisana količnikom:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (3.35)$$

dok se ugaona frekvencija  $\omega$  određuje prema:

$$\omega = 2\pi f. \quad (3.36)$$

Krutost  $k$  SDOF sistema se određuje u funkciji frekvencije  $f$  i mase  $m$  prema:

$$k = (2\pi f)^2 m, \quad (3.37)$$

dok je prigušenje  $c$  definisano kao:

$$c = 2\zeta\omega m, \quad (3.38)$$

gde je  $\zeta$  koeficijent relativnog prigušenja.

U dosadašnjim istraživanjima za analizu 2D modela okvirnih zgrada kao *IM* mera najviše je korišćeno  $S_a(T_1, 5\%)$ . Gotovo sva istraživanja INDA analiza su ograničena na 2D modele gde se uzima u obzir samo prvi svojstveni oblik, pa je kao *IM* mera i opravdano uzeti  $S_a(T_1, 5\%)$  [214]. Kod 3D modela zgrada gde participiraju i efekti torzije pitanje je koliko je ova *IM* mera relevantna ili je potrebno uzeti u obzir novu *IM* meru ili veći broj *IM* mera. *IM* parametri koji su relevantni za analizu akcelorograma i dodatne kriterijume selekcije u ovom istraživanju su:

- maksimalno ubrzanje GMR (*PGA* - *peak ground acceleration*):

$$PGA = \max|a(t)|, \quad (3.39)$$

- maksimalna brzina GMR (*PGV* - *peak ground velocity*):

$$PGV = \max|v(t)|, \quad (3.40)$$

- maksimalno pomeranje GMR (*PGD* - *peak ground displacement*):

$$PGD = \max|d(t)|, \quad (3.41)$$

- kvadratni koren srednjeg kvadrata ubrzanja ( $a_{RMS}$  - *root mean square*)

acceleration) [162]:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{595}} \int_0^t [a(t)]^2 dt}, \quad (3.42)$$

- kvadratni koren srednjeg kvadrata brzine ( $v_{RMS}$  - *root mean square velocity*):

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{595}} \int_0^t [v(t)]^2 dt}, \quad (3.43)$$

- kvadratni koren srednjeg kvadrata pomeranja ( $d_{RMS}$  - *root mean square displacement*):

$$d_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_{595}} \int_0^t [d(t)]^2 dt}, \quad (3.44)$$

- *Arias-ov* intenzitet ( $I_a$  - *Arias intensity*) [20]:

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^\infty [a(t)]^2 dt, \quad (3.45)$$

- karakterističan intenzitet ( $I_c$  - *characteristic intensity*):

$$I_c = a_{RMS}^2 \sqrt{t_{595}}, \quad (3.46)$$

- specifična gustina energije ( $SED$  - *specific energy density*):

$$SED = \int_0^t [v(t)]^2 dt, \quad (3.47)$$

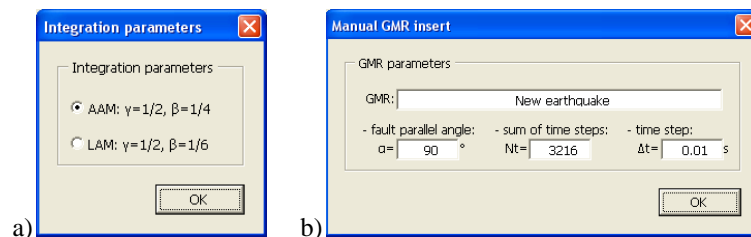
- akumulirana apsolutna brzina ( $CAV$  - *cumulative absolute velocity*) [46]:

$$CAV = \int_0^t |a(t)| dt. \quad (3.48)$$

U prethodnim izrazima figurira vreme trajanja značajnog dela zemljotresa (*significant duration*), a koje se određuje kao interval vremena koje odgovara akumuliranom *Arias-ovom* intenzitetu u rasponu od 5% do 95% [204]:

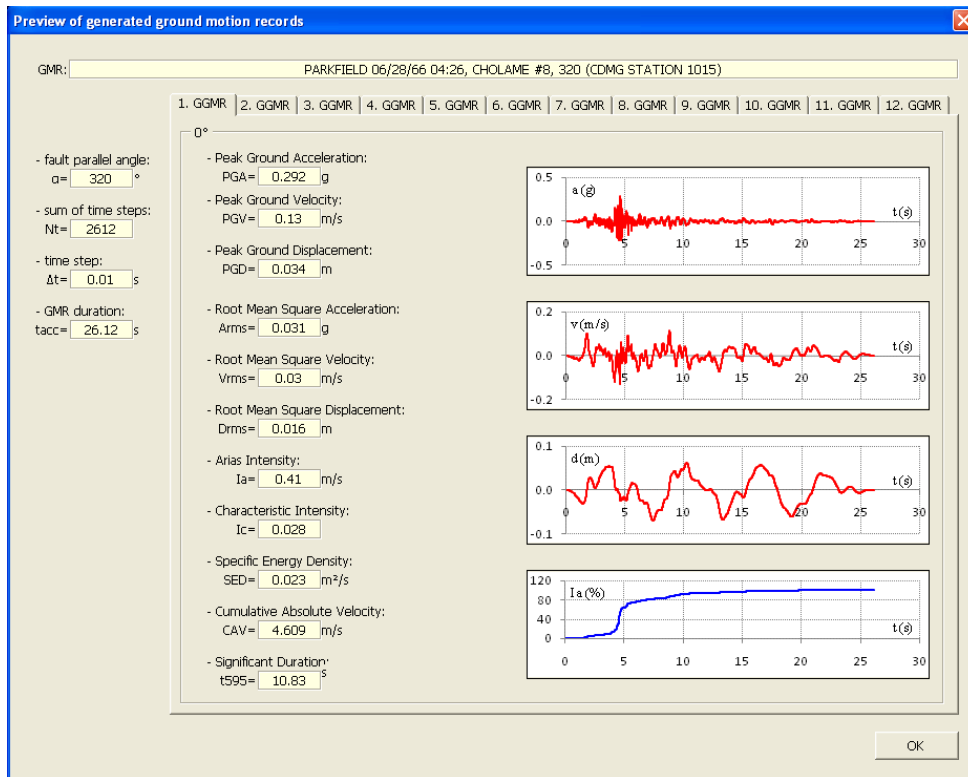
$$t_{595} = t(95\%I_a) - t(5\%I_a). \quad (3.49)$$

Na slici 3.15.a je prikazan interfejs za selekciju parametara, a na slici 3.15.b interfejs za opciju nezavisnog importovanja akceleroograma.



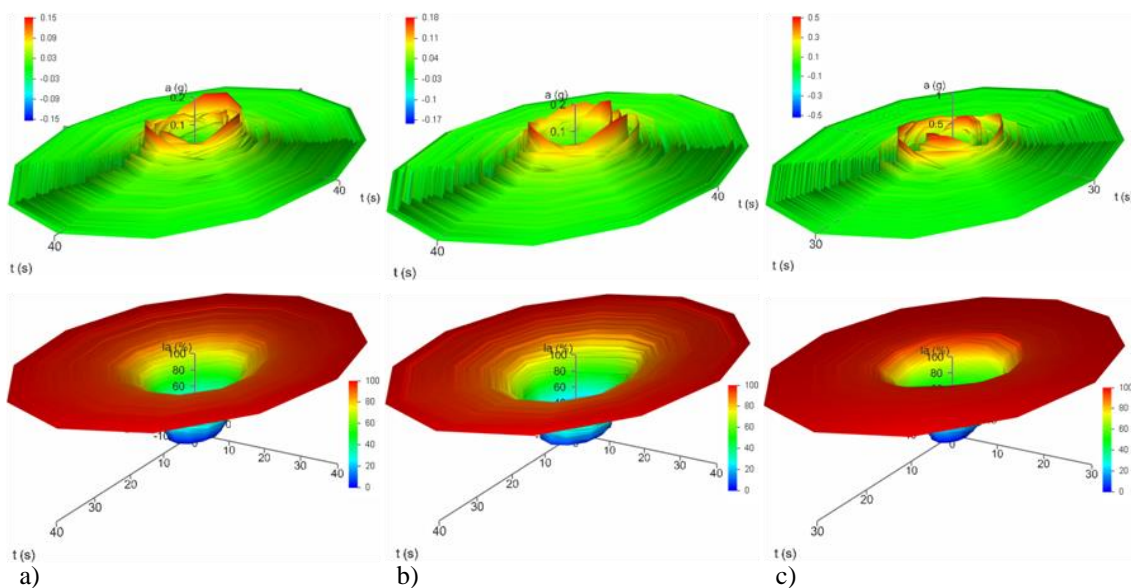
Slika 3.15 Interfejsi za: a) selekciju parametara, b) opciju nezavisnog importovanja akceleroograma

Na slici 3.16 je prikazan interfejs za pregled generisanih akceleroograma po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih parametara proračuna.

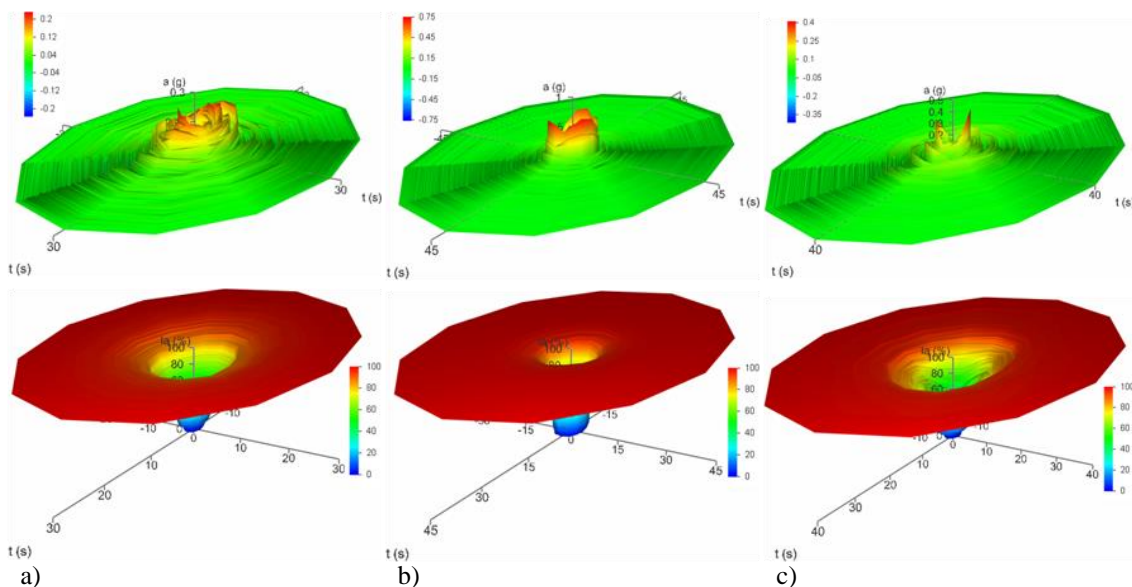


Slika 3.16 Pregled generisanih akceleroograma po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih parametara proračuna

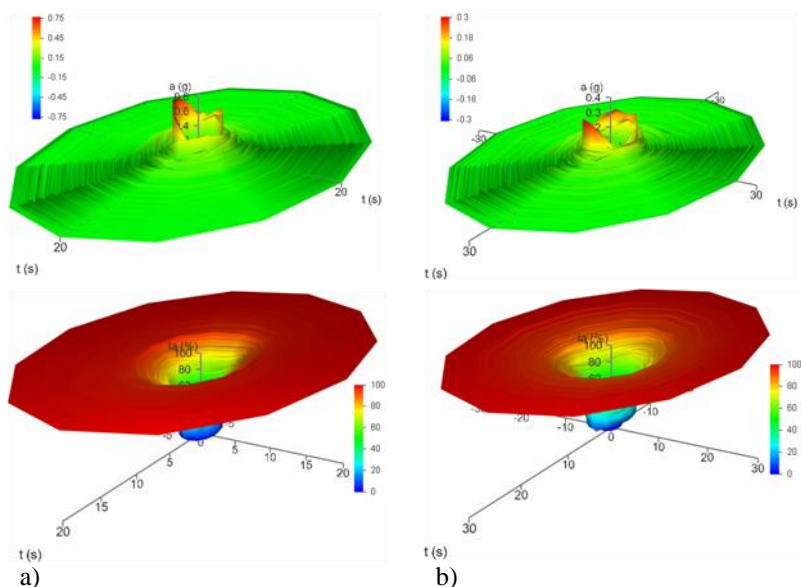
Generisane površi akceleroograma  $a=f(t_x, t_y)$  i Arias-ovog intenziteta  $I_a=f(t_x, t_y)$  prikazane su na slikama 3.17÷3.19.



Slika 3.17 Generisane GMRS  $a=f(t_x, t_y)$  i  $I_a=f(t_x, t_y)$  površi: a) Imperial Valley IV79, b) Loma Prieta LP89, c) Northridge NR94



Slika 3.18 Generisane GMRS  $a=f(t_x, t_y)$  i  $I_a=f(t_x, t_y)$  površi: a) *San Fernando SF71*, b) *Kobe KO95*, c) *Morgan Hill MH84*



Slika 3.19 Generisane GMRS  $a=f(t_x, t_y)$  i  $I_a=f(t_x, t_y)$  površi: a) *Palm Springs PS86*, b) *Parkfield PA66*

S obzirom da se pri procesiranju akcelerograma za uglove  $\theta_i$  određuje po jedan diskretan  $IM$  parametar, to se može uspostaviti veza između njih. Na osnovu izraza (3.6) i (3.8) za komponentu  $a_\theta(t)$  i inkrement ugla  $\Delta\theta=30^\circ$  dobija se:

$$\begin{aligned}
 a_{\theta,i=0}(t) &= a_{FP}(t)\cos(\alpha_f - 90^\circ) - a_{FN}(t)\sin(\alpha_f - 90^\circ) \\
 a_{\theta,i=1}(t) &= a_{FP}(t)\cos(\alpha_f - 60^\circ) - a_{FN}(t)\sin(\alpha_f - 60^\circ) \\
 &\quad \vdots \\
 a_{\theta,i=11}(t) &= a_{FP}(t)\cos(\alpha_f - 240^\circ) - a_{FN}(t)\sin(\alpha_f - 240^\circ)
 \end{aligned}
 \quad , \quad (3.50)$$

dok se za odgovarajuću komponentu  $a_{\theta-90}(t)$  dobija:

$$\begin{aligned} a_{\theta-90,i=0}(t) &= a_{FP}(t)\sin(\alpha_f - 90^\circ) + a_{FN}(t)\cos(\alpha_f - 90^\circ) \\ a_{\theta-90,i=1}(t) &= a_{FP}(t)\sin(\alpha_f - 60^\circ) + a_{FN}(t)\cos(\alpha_f - 60^\circ) \\ &\vdots \\ a_{\theta-90,i=11}(t) &= a_{FP}(t)\sin(\alpha_f - 240^\circ) + a_{FN}(t)\cos(\alpha_f - 240^\circ) \end{aligned} \quad (3.51)$$

S obzirom da je u opštem slučaju za ugao  $\alpha$  i  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \sin(\alpha - \beta) &= \sin\alpha\cos\beta - \cos\alpha\sin\beta \\ \cos(\alpha - \beta) &= \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta \end{aligned} \quad (3.52)$$

sledi da je:

$$\begin{aligned} a_{\theta,i=0}(t) &= -a_{\theta,i=6}(t) & a_{\theta-90,i=0}(t) &= -a_{\theta-90,i=6}(t) \\ a_{\theta,i=1}(t) &= -a_{\theta,i=7}(t) & a_{\theta-90,i=1}(t) &= -a_{\theta-90,i=7}(t) \\ &\vdots & &\vdots \\ a_{\theta,i=5}(t) &= -a_{\theta,i=11}(t) & a_{\theta-90,i=5}(t) &= -a_{\theta-90,i=11}(t) \end{aligned} \quad (3.53)$$

Posledica prethodno izvedenog stava je da i za  $IM$  parametre važi analogija:

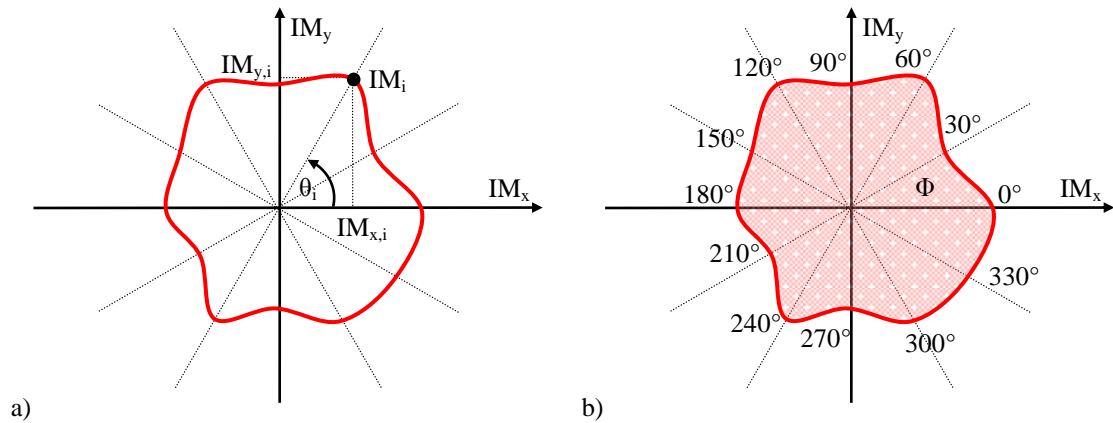
$$\begin{aligned} IM_{\theta,i=0}(t) &= -IM_{\theta,i=6}(t) \\ IM_{\theta,i=1}(t) &= -IM_{\theta,i=7}(t) \\ &\vdots \\ IM_{\theta,i=5}(t) &= -IM_{\theta,i=11}(t) \end{aligned} \quad (3.54)$$

a s obzirom da se određeni  $IM$  parametri proračunavaju za apsolutne diskretne vrednosti ubrzanja  $|a(t)|$ , brzine  $|v(t)|$  ili pomeranja  $|d(t)|$ , to se može napisati:

$$\begin{aligned} IM_{\theta,i=0}(t) &= IM_{\theta,i=6}(t) \\ IM_{\theta,i=1}(t) &= IM_{\theta,i=7}(t) \\ &\vdots \\ IM_{\theta,i=5}(t) &= IM_{\theta,i=11}(t) \end{aligned} \quad (3.55)$$

Definicija 3.2: *Anvelopa mere intenziteta (intensity measure envelope) je glatka interpolirana zatvorena kriva generisana povezivanjem diskretnih vrednosti mera intenziteta  $I_i(IM_{x,i}, IM_{y,i}, \theta_i)$  multikomponentalnih akcelorograma (slika 3.20.a). U cilju jednostavnije prezentacije i kalkulacije anvelopa mere intenziteta se formuliše kao zatvorena poligonalna linija koja ograničava domen  $\Phi$  (slika 3.20.b):*

$$\begin{aligned} \theta = 0^\circ \div 30^\circ : & \quad IM_y = \frac{IM_{y,30} - IM_{y,0}}{IM_{x,30} - IM_{x,0}} (IM_x - IM_{x,0}) + IM_{y,0} \\ & \quad \vdots \\ \theta = 330^\circ \div 360^\circ : & \quad IM_y = \frac{IM_{y,0} - IM_{y,330}}{IM_{x,0} - IM_{x,330}} (IM_x - IM_{x,330}) + IM_{y,330} \end{aligned} \quad (3.56)$$

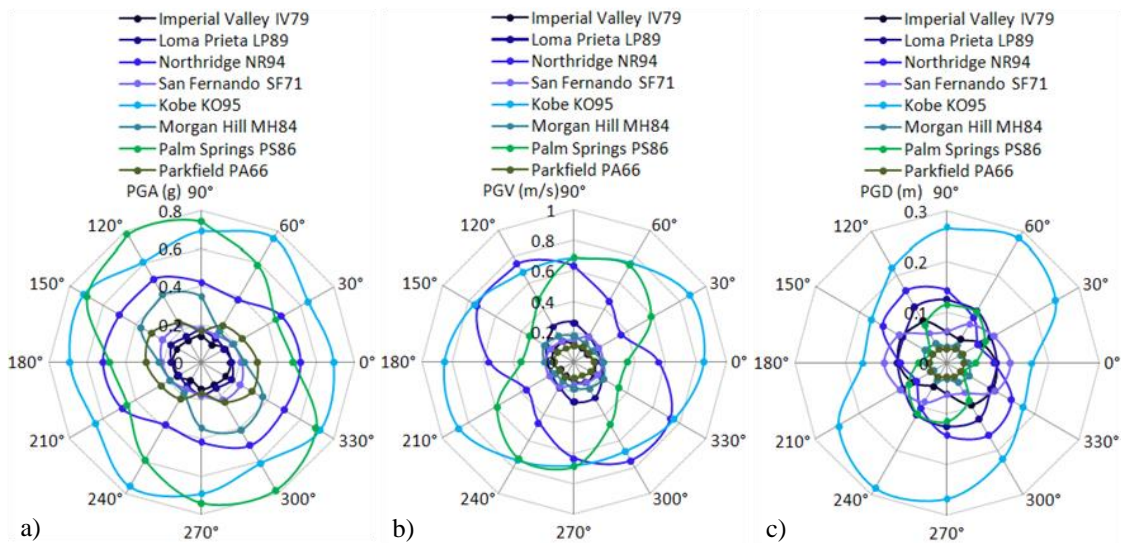


Slika 3.20 Anvelopa mere intenziteta: a) opšti model, b) domen  $\Phi$  koji ograničava anvelopa

Konstrukcija anvelope mere intenziteta se sprovodi analogno transformaciji koordinata kod površi akcelerograma za uglove  $\theta_i$ :

$$IM_{x,i} = IM_i \cos \theta_i, \quad IM_{y,i} = IM_i \sin \theta_i. \quad (3.57)$$

Na slikama 3.21 ÷ 3.23 su prikazane konstruisane anvelope mere intenziteta.



Slika 3.21 Anvelope mere intenziteta: a)  $PGA$ , b)  $PGV$ , c)  $PGD$

S obzirom da se u razmatranju problema  $IM$  parametara prešlo sa jedne diskretne vrednosti na veći broj diskretnih vrednosti, to je za domen  $\Phi$  koji ograničava anvelopa mere intenziteta uveden novi koeficijent. Koeficijent raspoložive površi  $IM$  parametra  $C_{IM}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom mere intenziteta  $IM$  i anvelopom maksimalne vrednosti za datu  $IM$  meru:

$$C_{IM} = \frac{A_{IM}}{A_{IM,max}}, \quad (3.58)$$



gde je  $A_{IM}$  površina oblasti ograničena anvelopom mere intenziteta  $IM$ , a određuje se primenom zatvorenog krivolinijskog integrala prema *Green*-ovoj formuli [192]:

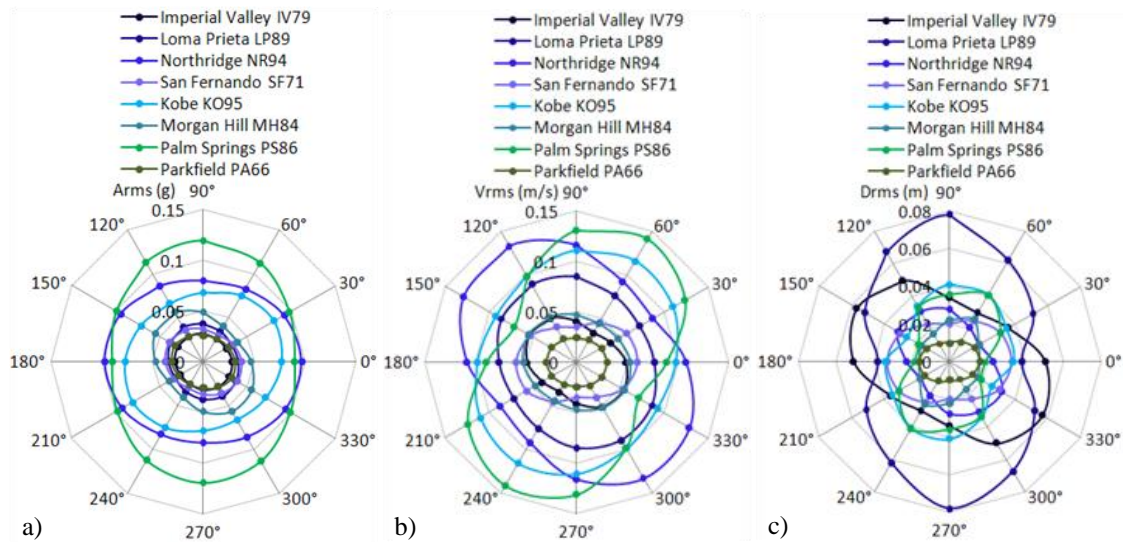
$$\oint dA = \frac{1}{2} \oint (x dy - y dx), \quad (3.59)$$

odnosno za diskretne vrednosti  $IM_i$  važi:

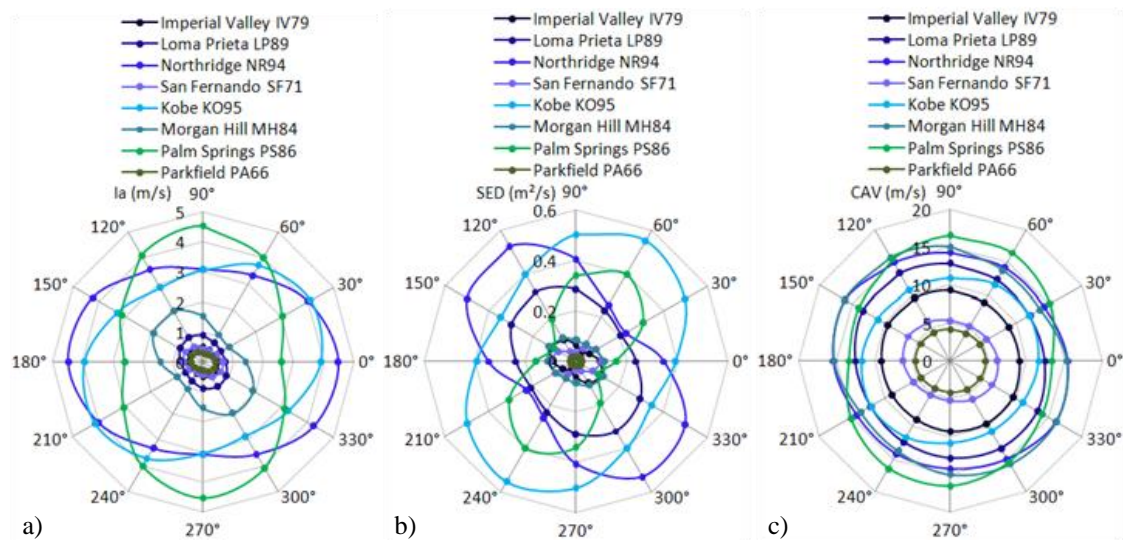
$$A_{IM} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (IM_{x,i} IM_{y,i+1} - IM_{x,i+1} IM_{y,i}), \quad (3.60)$$

dok je  $A_{IM,max}$  površina oblasti ograničena anvelopom maksimalne vrednosti za datu  $IM$  meru:

$$A_{IM,max} = IM_{max}^2 \pi. \quad (3.61)$$



Slika 3.22 Anvelope mere intenziteta: a)  $a_{RMS}$ , b)  $v_{RMS}$ , c)  $d_{RMS}$



Slika 3.23 Anvelope mere intenziteta: a)  $I_a$ , b)  $SED$ , c)  $CAV$

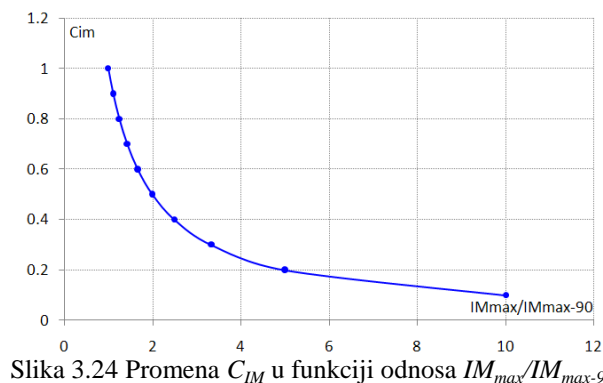
Vrednost supremuma koeficijenta raspoložive površi  $IM$  parametra  $C_{IM}$  je uvek manja od 1. Na osnovu izvedenog izraza (3.58) mogu se definisati izrazi za koeficijente konkretnih  $IM$  parametara, a koji su za potrebe ovog istraživanja razmatrani:  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $a_{RMS}$ ,  $v_{RMS}$ ,  $d_{RMS}$ ,  $I_a$ ,  $SED$  i  $CAV$ . U tabeli 3.3 su prikazani proračunati koeficijenti  $C_{IM}$  za  $IM$  parametre u funkciji tipa zemljotresa.

Tabela 3.3 Proračunati koeficijenti  $C_{IM}$  za  $IM$  parametre u funkciji tipa zemljotresa

FF GMR zemljotresi									
zemljotres	$C_{IM}$ (PGA)	$C_{IM}$ (PGV)	$C_{IM}$ (PGD)	$C_{IM}$ ( $A_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $V_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $D_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $I_a$ )	$C_{IM}$ ( $SED$ )	$C_{IM}$ ( $CAV$ )
<i>Imperial Valley</i>	0.78	0.68	0.60	0.87	0.66	0.56	0.78	0.49	0.90
<i>Loma Prieta</i>	0.73	0.61	0.74	0.79	0.79	0.54	0.70	0.66	0.87
<i>Northridge</i>	0.78	0.60	0.53	0.80	0.67	0.62	0.68	0.51	0.82
<i>San Fernando</i>	0.70	0.80	0.55	0.76	0.63	0.65	0.62	0.45	0.78
NF GMR zemljotresi									
zemljotres	$C_{IM}$ (PGA)	$C_{IM}$ (PGV)	$C_{IM}$ (PGD)	$C_{IM}$ ( $A_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $V_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $D_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $I_a$ )	$C_{IM}$ ( $SED$ )	$C_{IM}$ ( $CAV$ )
<i>Kobe</i>	0.79	0.73	0.62	0.79	0.78	0.71	0.69	0.64	0.85
<i>Morgan Hill</i>	0.49	0.63	0.60	0.70	0.78	0.53	0.56	0.64	0.83
<i>Palm Springs</i>	0.63	0.52	0.53	0.75	0.59	0.52	0.60	0.41	0.81
<i>Parkfield</i>	0.62	0.74	0.76	0.77	0.78	0.64	0.67	0.69	0.87

Procena vrednosti  $C_{IM}$  koeficijenta za  $IM$  je izvršena iz odnosa površi elipse i kruga za  $IM_{max}$  i  $IM_{max-90}$  (slika 3.24):

$$C_{IM} = \frac{IM_{max} IM_{max-90} \pi}{IM_{max}^2 \pi}. \quad (3.62)$$



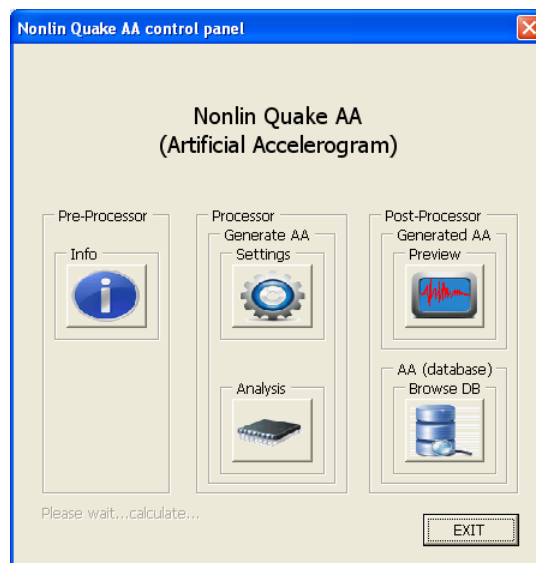
Na osnovu izvedenog koeficijenta  $C_{IM}$  prema izrazu (3.62) može se brzo i efikasno

analizirati uticaj dve ortogonalne komponente akceleroograma. Dovoljno je samo da se odrede mere intenziteta  $IM_{max}$  i  $IM_{max-90}$  za ortogonalne komponente akceleroograma i preko koeficijenta  $C_{IM}$  se može uspostaviti uticaj  $IM_{max-90}$  mere na  $IM_{max}$  meru. Ukoliko je vrednost  $IM_{max-90}$  mere bliža  $IM_{max}$  meri, tada koeficijent  $C_{IM}$  teži vrednosti 1.

### 3.5. GENERISANJE AKCELEROGRAMA

#### 3.5.1. NEPOTPUNI NESTACIONARNI VEŠTAČKI AKCELEROGRAMI

Kao alternativa korišćenju realnih akceleroograma koji se preuzimaju iz PBEE GMDB baze zemljotresa, razvijen je program *Nonlin Quake AA* (*Artificial Accelerogram*). U *Nonlin Quake AA* se generišu veštački akceleroگرامi kao nepotpuni i potpuni nestacionarni signal u vremenskom domenu. Kontrolni panel *Nonlin Quake AA* je prikazan na slici 3.25.



Slika 3.25 Kontrolni panel *Nonlin Quake AA*

Procedura generisanja nepotpunih nestacionarnih veštačkih akceleroograma u *Nonlin Quake AA* sprovodi se superpozicijom sinusoida [95]:

$$a(t) = I(t) \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (3.63)$$

gde je  $a(t)$  ubrzanje za vreme  $t$ ,  $I(t)$  anvelopa amplituda generisanog akceleroograma,  $A_i$  amplituda,  $\omega_i$  ugaona frekvencija,  $\varphi_i$  fazni ugao  $i$ -te sinusoide koji se generiše funkcijom slučajnog broja u intervalu  $0 \div 2\pi$  sa ravnomerno raspodeljenom verovatnoćom. Amplituda  $A_i$  je u korelaciji sa funkcijom spektralne gustine snage kretanja tla  $G(\omega)$

(power spectral density):

$$A_i = \sqrt{2G(\omega_i)\Delta\omega}, \quad (3.64)$$

$$G(\omega_i) = \frac{\left(1 + 4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega_i}{\omega_g}\right)^2\right) G_0}{\left(1 - \left(\frac{\omega_i}{\omega_g}\right)^2\right)^2 + 4\zeta_g^2 \left(\frac{\omega_i}{\omega_g}\right)^2}, \quad (3.65)$$

gde je  $\zeta_g$  koeficijent relativnog prigušenja lokalnog tla,  $\omega_g$  ugaona frekvencija lokalnog tla,  $G_0$  spektralna gustina snage idealno belog šuma. Izraz (3.65) poznat je kao *Kanai-Tajimi*-jeva funkcija kod koje su za tipična čvrsta tla  $\zeta_g=0.6$  i  $\omega_g=4\pi$  rad/s. Anvelopa amplituda generisanog akceleroograma određuje se kao trapezna (slika 3.26):

$$I(t) = \begin{cases} t/t_{s1} \\ 1 \\ (t_{acc} - t)/(t_{acc} - t_{s2}) \end{cases}, \quad (3.66)$$

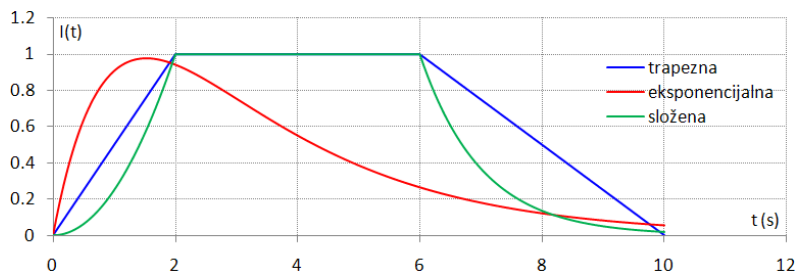
eksponencijalna:

$$I(t) = a_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (3.67)$$

ili kao model složene anvelope:

$$I(t) = \begin{cases} (t/t_{s1})^2 \\ 1 \\ e^{-\alpha(t-t_{s2})} \end{cases}, \quad (3.68)$$

gde je  $t_{s1}$  vreme iniciranja stacionarnog dela akceleroograma,  $t_{s2}$  vreme finalizacije stacionarnog dela akceleroograma, vreme trajanja akceleroograma  $t_{acc}$ .



Slika 3.26 Normalizovane anvelope amplituda akceleroograma

Nakon generisanja veštačkog akceleroograma postoji mogućnost korekcije bazne linije (BLC - *base line correction*) primenom polinoma drugog *P2Reg* ili četvrtog stepena *P4Reg*. Korekcija bazne linije se sprovodi regresionom analizom polinomskog

karaktera [191]:

$$a(t)_{Reg} = a_1 + a_2 t_{Reg} + a_3 t_{Reg}^2 + a_4 t_{Reg}^3 + a_5 t_{Reg}^4, \quad (3.69)$$

gde je  $a(t)_{Reg}$  ubrzanje za  $t$  korak vremena određeno prema regresionoj analizi,  $a_1, \dots, a_5$  nepoznati koeficijenti, a određuju se primenom metode najmanjih kvadrata i matrice algebre. Generalna formula za regresiju po metodi najmanjih kvadrata glasi:

$$\sum_{i=1}^n (a(t)_{Reg,i} - f(t_i, a_1, \dots, a_n)) \frac{\partial}{\partial a_i} f(t_i, a_1, \dots, a_n) = 0, \quad (3.70)$$

pri čemu se druga polovina izraza (3.70) može napisati kao:

$$\frac{\partial}{\partial a_i} f(t_i, a_1, \dots, a_n) = \frac{\partial}{\partial a_i} [a_1 g_1 + a_2 g_2 + \dots + a_n g_n] = g_i(t_i), \quad (3.71)$$

tako da se dobija:

$$\sum_{i=1}^n [a(t)_{Reg,i} - a_i g_i(t_i)] g_i(t_i) = 0, \quad (3.72)$$

dok u matricnoj formi prethodni izraz glasi:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n g_1(t_i)g_1(t_i) & \dots & \sum_{i=1}^n g_1(t_i)g_n(t_i) \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n g_n(t_i)g_1(t_i) & \dots & \sum_{i=1}^n g_n(t_i)g_n(t_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a(t)_{Reg,i} g_1(t_i) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n a(t)_{Reg,i} g_n(t_i) \end{bmatrix}. \quad (3.73)$$

Rešenjem matricne forme (3.73) dobija se:

$$f(t_i, a_1, \dots, a_5) = a_1 g_1(t) + a_2 g_2(t) + \dots + a_5 g_5(t), \quad (3.74)$$

gde je:

$$g_1(t) = 1, \quad g_2(t) = t, \quad g_3(t) = t^2, \dots, g_5(t) = t^4. \quad (3.75)$$

Konačno, određivanje nepoznatih koeficijenta za regresiju sprovodi se prema:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n 1 & \sum_{i=1}^n t_i & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 \\ \sum_{i=1}^n t_i & \sum_{i=1}^n t_i^2 & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^4 & \sum_{i=1}^n t_i^5 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n t_i^3 & \sum_{i=1}^n t_i^4 & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^6 & \sum_{i=1}^n t_i^7 \\ \sum_{i=1}^n t_i^4 & \sum_{i=1}^n t_i^5 & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n t_i^7 & \sum_{i=1}^n t_i^8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n a(t)_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n a(t)_i t_i^4 \end{bmatrix}. \quad (3.76)$$

Korekcija generisanog veštačkog akcelorograma se sprovodi prema:

$$a(t)_{BLC} = a(t) - a(t)_{Reg}, \quad (3.77)$$

gde je  $a(t)_{BLC}$  ubrzanje za  $t$  korak vremena određeno korekcijom bazne linije.

Nakon korekcije bazne linije postoji mogućnost filtriranja akcelorograma visokopropusnim filterom (*high-pass filter*), s obzirom da kod ovako generisanih veštačkih akcelorograma u ukupnom frekventnom sadržaju znatan uticaj imaju niske frekvencije. Filtriranje akcelorograma se sprovodi prema proceduri filtriranja signala, pri čemu se akcelorogram tretira kao diskretni digitalni signal. Procedura filtriranja se sastoji iz nekoliko koraka, a polazi se od diskretne *Fourier*-ove transformacije (DFT - *Discrete Fourier Transformation*), tako da se akcelorogram iz vremenskog domena transformiše u frekventan domen. U opštem slučaju, ukoliko je dat konačan diskretni niz od  $N$  elemenata  $\{x_n\}$ , tada je diskretna *Fourier*-ova transformacija data kao novi niz  $\{X_k\}$  [193]:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i \frac{2\pi kn}{N}} \quad \text{za } k = 0, \dots, N-1. \quad (3.78)$$

Izraz za visokopropusni *Butterworth*-ov filter glasi (slika 3.27):

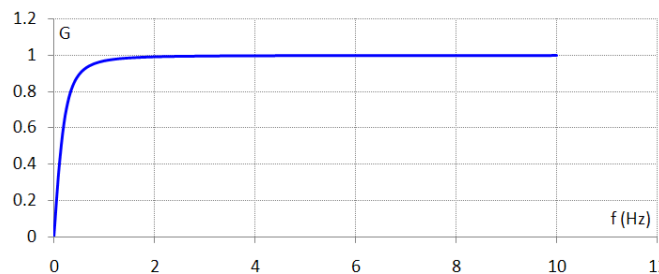
$$G = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{cutoff}}{f}\right)^{2n}}}, \quad (3.79)$$

gde je  $G$  odnos magnituda ulaznog i izlaznog sinala,  $f_{cutoff}$  frekvencija do koje se filtrira signal,  $n$  red filtera, dok se frekvencija  $f$  određuje prema:

$$f = \Delta f \sum_i f_i, \quad \Delta f = \frac{1}{T}, \quad T = \frac{N}{f_{sam}}, \quad (3.80)$$

gde je  $f_{sam}$  frekvencija smplovanja:

$$f_{sam} = \frac{1}{t_1 - t_0}. \quad (3.81)$$



Slika 3.27 Normalizovani visokopropusni *Butterworth*-ov filter za  $f_{cutoff}=0.25\text{Hz}$  ( $T_{max}=4\text{s}$ ) i  $n=1$

Filtrirana diskretna *Fourier*-ova transformacija  $X_{k,fil}$  se dobija kompozicijom proizvoda funkcije visokopropusnog filtera i realnog i imaginarnog dela diskretne *Fourier*-ove

transformacije:

$$X_{k,fil} = G(Re(X_k), Im(X_k)). \quad (3.82)$$

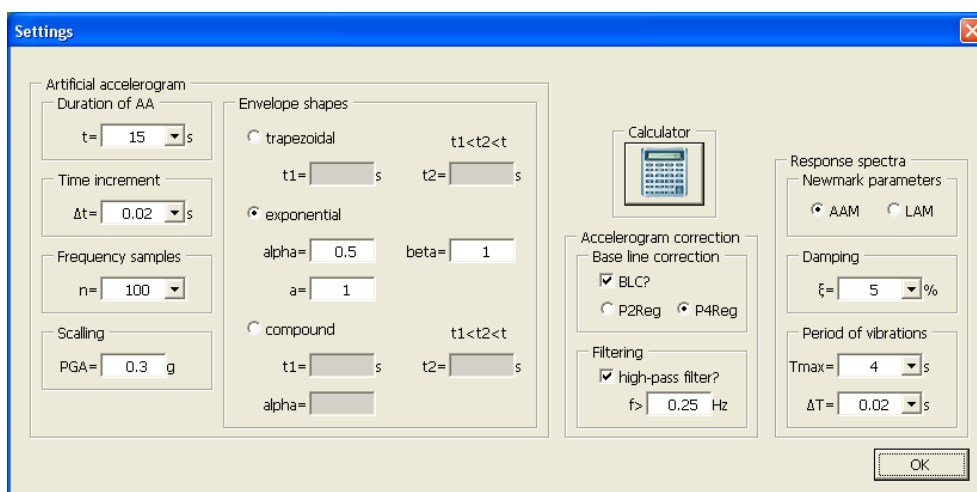
Konačno, filtriran akceleroگرام se dobija iz inverzne diskretne *Fourier*-ove transformacije (IDFT - *Inverse Discrete Fourier Transformation*):

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i \frac{2\pi kn}{N}} \quad \text{za } n = 0, \dots, N-1. \quad (3.83)$$

Nakon generisanja akcelerograma sprovodi se procedura skaliranja prema:

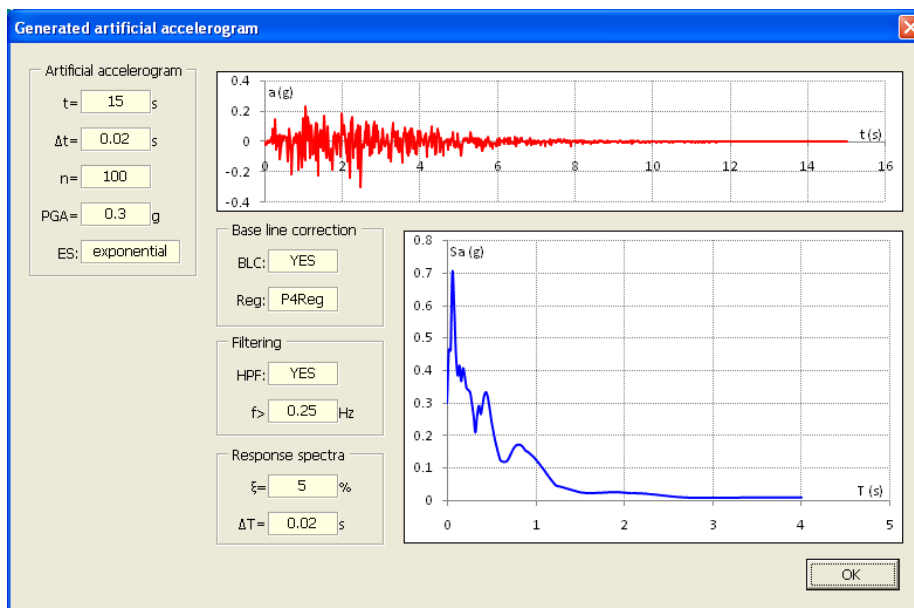
$$F_s = \frac{PGA_s}{PGA}, \quad a_s(t) = F_s a(t), \quad (3.84)$$

gde je  $F_s$  faktor skaliranja,  $PGA_s$  skalirano maksimalno ubrzanje tla,  $a_s(t)$  skalirano ubrzanje za  $t$  korak vremena,  $a(t)$  ubrzanje za  $t$  korak vremena. Nakon generisanja, korekcije bazne linije, filtriranja i skaliranja akcelerograma, sprovodi se generisanje spektra odgovora prema izrazima (3.12)÷(3.38) za  $T \in [0, T_{max}]$ , pri čemu se za konstrukcije zgrada obično usvaja da je  $T_{max}=4s$ . Veštački akceleroگرامi generisani prema prethodno opisanoj proceduri su stacionarni u vremenu u pogledu frekventnog sastava, a nestacionarni u pogledu amplituda kretanja, tako da su u generalnom smislu nepotpuni nestacionarni veštački akceleroagrami. Na slici 3.28 je prikazan interfejs za definisanje parametara za generisanje nepotpunih nestacionarnih veštačkih akceleroagrama.



Slika 3.28 Interfejs za definisanje parametara za generisanje nepotpunih nestacionarnih veštačkih akceleroagrama

Na slici 3.29 je prikazan interfejs za pregled generisanog nepotpunog nestacionarnog veštačkog akceleroagrama, spektra odgovora i svih relevantnih parametara proračuna.



Slika 3.29 Pregled generisanog nepotpunog nestacionarnog veštačkog akceleroograma, spektra odgovora i svih relevantnih parametara proračuna

### 3.5.2. POTPUNI NESTACIONARNI VEŠTAČKI AKCELEROGRAMI

U odnosu na prethodno prikazanu proceduru generisanja veštačkih akceleroograma, potpuni nestacionarni veštački akceleroگرامi su nestacionarni u vremenu u pogledu frekventnog sastava i nestacionarni u pogledu amplituda kretanja. U *Nonlin Quake AA* se atenuacija pomeranja tla predstavlja izrazom [195]:

$$f(Y) = a + f_1(M) + f_2(R_{epi}) + f_3(S) + \varepsilon_Y, \quad (3.85)$$

$$f(Y) = \log Y, \quad f_1(M) = bM, \quad f_2(R) = c \log(R_{epi}^2 + h_e^2)^{\frac{1}{2}} + d_a R, \quad (3.86)$$

gde je  $Y$  parametar kretanja tla,  $f_1(M)$  funkcija magnitude,  $f_2(R_{epi})$  funkcija epicentralnog rastojanja,  $f_3(S)$  funkcija kojom se uzimaju u obzir geološke karakteristike tla,  $\varepsilon_Y$  parametar kojim se uzima u obzir nepouzdanost  $Y$  parametra,  $h_e$  dubina žarišta,  $d_a$  koeficijent neelastičnosti atenuacije. Izraz (3.85) u konačnoj formi glasi:

$$\log_{10}(Y) = a + bM + c \log_{10}(R_{epi}^2 + h_e^2)^{\frac{1}{2}} + e_1 S_1 + e_2 S_2 \pm \sigma, \quad (3.87)$$

gde je  $\sigma$  standardna devijacija,  $S_1$  i  $S_2$  koeficijenti klase tla, a čije su vrednosti:

$$\begin{aligned} S_1 = 0 \quad S_2 = 0 & \quad \text{kruta tla} \\ S_1 = 1 \quad S_2 = 0 & \quad \text{za } h \leq 20\text{m.} \\ S_1 = 0 \quad S_2 = 1 & \quad h > 20\text{m} \end{aligned} \quad (3.88)$$

Na osnovu izraza (3.87) određuje se Arias-ov intenzitet  $I_a$ ,  $PGA$ ,  $PGV$  i vreme jakog kretanja tla  $t_{smd}$ . Odgovarajuća vremena koja su bitna kod generisanja akceleroograma su:



$$t_1 = \frac{R}{7}, \quad t_2 = t_1 + 0.5t_{smd}, \quad t_3 = t_1 + 2.5t_{smd}, \quad t_{const} = t_2 + 0.5t_{smd}, \quad (3.89)$$

$$t_{tot} = 1.3t_3, \quad t_4 = t_{tot} - t_2 + 0.5t_{smd}. \quad (3.90)$$

Uvođenje nestacionarnosti po vremenu i frekvenciji sprovodi se preko fizičkog spektra (*physical spectrum*), a koji se sastoji iz niza funkcija spektralne gustine snage kretanja tla:

$$PS_{app}(t, f) = \frac{P_a(t)}{f\sqrt{2\pi\delta}} e^{-\frac{(\ln f - \ln \beta(t))^2}{2\delta^2}}, \quad (3.91)$$

gde se  $P_a(t)$ ,  $\beta(t)$  i  $\delta$  određuje prema:

$$P_a(t) = \lambda_0(t), \quad \ln \beta(t) = \ln F_c(t) - \frac{\delta^2}{2}, \quad \delta = \sqrt{\ln \left( 1 + \frac{F_b^2(t)}{F_c^2(t)} \right)}, \quad (3.92)$$

$$F_c(t) = \frac{\lambda_1(t)}{\lambda_0(t)}, \quad F_b(t) = \sqrt{\frac{\lambda_2(t)}{\lambda_0(t)} - F_c^2(t)}, \quad \lambda_i(t) = \int f^i PS(t, f) df. \quad (3.93)$$

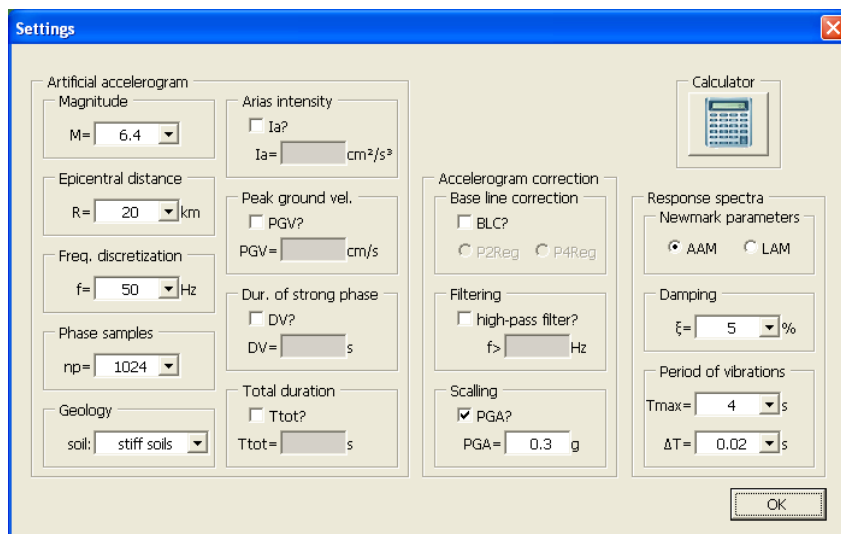
Ukoliko se za određivanje  $P_a(t)$  primeni funkcija log-normalne raspodele, tada je:

$$P_a(t) = \frac{I_a}{t\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\ln(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \mu = \ln(t_2) + \sigma^2, \quad \sigma = 0.4 \ln \left( \frac{t_3}{t_2} \right). \quad (3.94)$$

Veštački akcelrogram se sada može generisati sumiranjem *Fourier*-ovih redova:

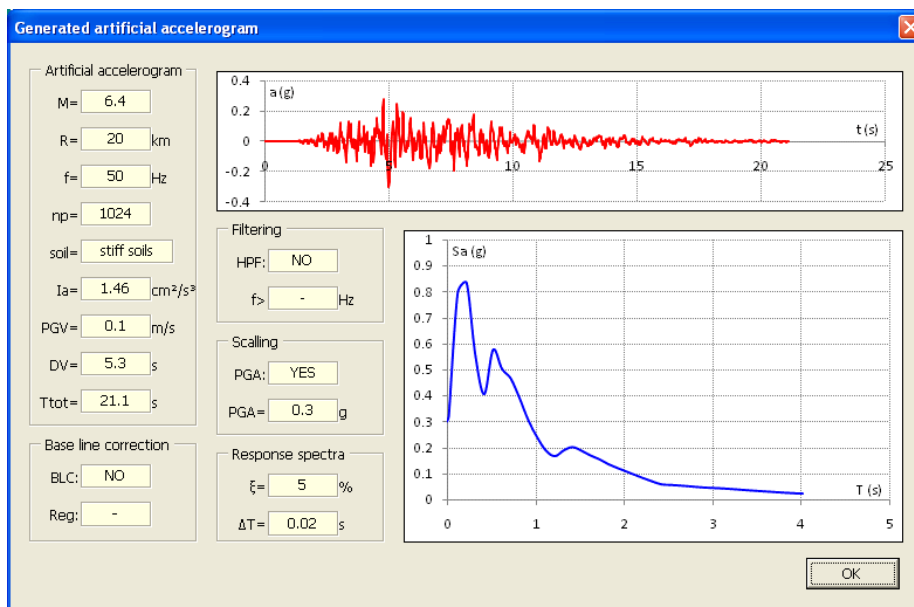
$$a(t) = 2 \sum_{i=1}^N C_i(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_i), \quad C_i(t) = \sqrt{2\pi f_0 PS(f_i, t)}. \quad (3.95)$$

Na slici 3.30 je prikazan interfejs za definisanje parametara za generisanje potpunih nestacionarnih veštačkih akcelrograma.



Slika 3.30 Interfejs za definisanje parametara za generisanje potpunih nestacionarnih veštačkih akcelrograma

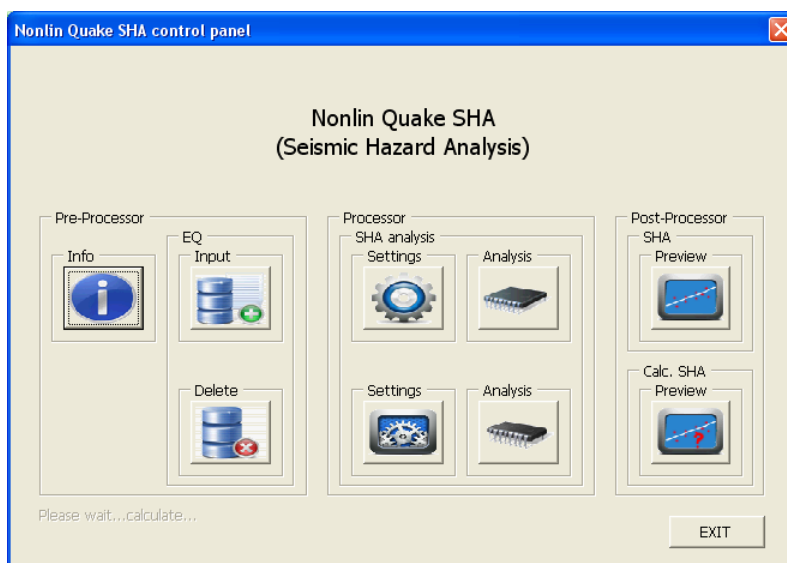
Na slici 3.31 je prikazan interfejs za pregled generisanog potpunog nestacionarnog veštačkog akcelrograma, spektra odgovora i svih relevantnih parametara proračuna.



Slika 3.31 Pregled generisanog potpunog nestacionarnog veštačkog akcelrograma, spektra odgovora i svih relevantnih parametara proračuna

### 3.5.3. ANALIZA SEIZMIČKOG HAZARDA

U cilju dobijanja relevantnih parametara za proračun potpunih nestacionarnih veštačkih akcelrograma, razvijen je program *Nonlin Quake SHA (Seismic Hazard Analysis)*. Kontrolni panel *Nonlin Quake SHA* je prikazan na slici 3.32.



Slika 3.32 Kontrolni panel *Nonlin Quake SHA*

U *Nonlin Quake* SHA se sprovodi probablistička analiza seizmičkog hazarda (PSHA - *Probabilistic Seismic Hazard Analysis*) i parcijalna deterministička analiza seizmičkog hazarda (DSHA - *Deterministic Seismic Hazard Analysis*). Veza između magnitude zemljotresa  $M$  i učestalosti njihovog pojavljivanja određuje se preko *Gutenberg-Richter*-ove relacije [101], [77]:

$$\log N = a - bM \quad \text{odnosno} \quad N = 10^{a-bM}, \quad (3.96)$$

gde je  $N$  broj zemljotresa sa magnitudom  $M$  ili većom,  $a$  i  $b$  konstante koje se menjaju u zavisnosti od područja i vremenskog intervala. Prethodno prezentovana *Gutenberg-Richter*-ova relacija može se prikazati preko kumulativnog broja dogođenih zemljotresa  $N/N_{tot}$ :

$$N = N_{tot} 10^{-bM} \quad \text{gde je} \quad N_{tot} = 10^a, \quad (3.97)$$

$$N / N_{tot} = 10^{-bM}. \quad (3.98)$$

Koeficijent  $b$  se određuje u funkciji broja zemljotresa koji se razmatraju i nalazi se u granicama  $0.5 \div 1.5$ . Modifikovana verzija *Gutenberg-Richter*-ove relacije (*bounded Gutenberg-Richter relation*) uzima u obzir granične vrednosti magnituda  $M_{min}$  i  $M_{max}$  [163], [175]:

$$N = e^{\alpha - \beta M_{min}} \frac{e^{-\beta(M - M_{min})} - e^{-\beta(M_{max} - M_{min})}}{1 - e^{-\beta(M_{max} - M_{min})}}, \quad (3.99)$$

gde je:

$$\alpha = a \ln 10, \quad \beta = b \ln 10, \quad M_{min} \leq M \leq M_{max}. \quad (3.100)$$

U narednom koraku se određuju atenuacijske krive za *PGA* koristeći, između ostalog, nekoliko postojećih relacija [63]:

$$PGA = c_1 e^{c_2 M} (R + c_3)^{-c_4}, \quad R = \sqrt{R_{epi}^2 + h_e^2}, \quad (3.101)$$

$$PGA = \alpha e^{\beta M} R^{-\gamma}, \quad (3.102)$$

$$PGA = b_1 e^{b_2 M} (R + 25)^{-b_3}, \quad (3.103)$$

$$PGA = a 10^{bM} (R + 25)^{-c}, \quad (3.104)$$

$$PGA = \lambda 10^{\alpha M} R^\beta, \quad (3.105)$$

$$PGA = 10^{a_1 + a_2 M - 2 \log(R + 25)}, \quad (3.106)$$

$$PGA = 10^{\alpha M - \beta \log(\Delta + 10) + \gamma T + \delta}, \quad (3.107)$$

$$PGA = 10^{\alpha + \beta M - \log r + bR}, \quad (3.108)$$

$$PGA = a e^{bM} (R + c_1 e^{c_2 M})^{-d}, \quad (3.109)$$

$$PGA = \frac{a_1}{\sqrt{T_G}} 10^{a_2 M - P \log_{10} R + Q}, \quad (3.110)$$

$$PGA = c e^{\alpha M} R^{-\beta}, \quad (3.111)$$

$$PGA = 10^{\alpha M - \log(R + c10^{\alpha M}) - bR + d}, \quad (3.112)$$

$$PGA = 10^{\alpha + \beta M - \bar{c} \log(R + e^{\beta M}) + F\varphi + EbR}, \quad (3.113)$$

$$PGA = e^{a_1 + a_2 M + a_3 \ln \sqrt{R^2 + (a_4 e^{\alpha M})^2} + (a_6 + a_7 \ln R + a_8 M)F + (a_9 + a_{10} \ln R)S_S + (a_{11} + a_{12} \ln R)S_H + f_A(D)}. \quad (3.114)$$

Poisson-ova distribucija slučajnih nezavisnih promenljivih u korigovanom obliku glasi [172]:

$$P(X = k) = \frac{e^{-nt} (nt)^k}{k!}, \quad (3.115)$$

gde je  $P$  verovatnoća pojave  $X$  događanja,  $n$  godišnji broj događaja,  $t$  period osmatranja,  $k$  ukupan broj događaja,  $1/n$  povratni period događanja. Verovatnoća dešavanja jednog događaja je:

$$P(X \geq x) = 1 - e^{-nt(x)}. \quad (3.116)$$

Proračun krive seizmičkog hazarda u probabilističkom formatu sprovodi se preko izraza (2.2), dok se određivanje spektralnog ubrzanja provodi prema [21]:

$$\ln S_a = b_1 + b_2(M - 6) + b_3(M - 6)^2 + b_5 \ln R + b_v \ln \frac{v_{s,30}}{v_A}. \quad (3.117)$$

Pored prethodno prikazane PSHA analize u *Nonlin Quake* SHA postoji mogućnost i određivanja *Gutenberg-Richter*-ove relacije za predefinisane parametre iz baze podataka. Takođe, postoji mogućnost i sprovođenja SHA analize za određenu lokaciju, pri čemu se računa na to da je veća verovatnoća da su za datu lokaciju zabeleženi najjači zemljotresi, a ne svi mogući zemljotresi. Na osnovu ovakvo definisanog principa najoptimalnije je primeniti raspodelu po metodi ekstremnih vrednosti (EVT - *Extreme Value Theory*) i to *Gumbel*-ovu raspodelu III tipa [225]:

$$P(M) = e^{-\left(\frac{M_{max} - M}{M_{max} - v_M}\right)^{\frac{1}{\lambda_M}}}, \quad (3.118)$$

gde je  $M$  magnituda,  $P(M)$  verovatnoća da je  $M$  godišnji maksimum,  $M_{max}$  gornja granica magnitude,  $v_M$  modalna vrednost magnitude,  $\lambda_M$  recipročna vrednost zakrivljenosti krive raspodele. Transformacijom izraza (3.118) veličina magnitude se određuje prema:

$$M = M_{max} - (M_{max} - v_M) \ln^{\lambda_M} P(M)^{-1}. \quad (3.119)$$

Povratni period  $R(M)$  (*return period*) za verovatnoću određenu prema (3.118) određuje se iz [5]:

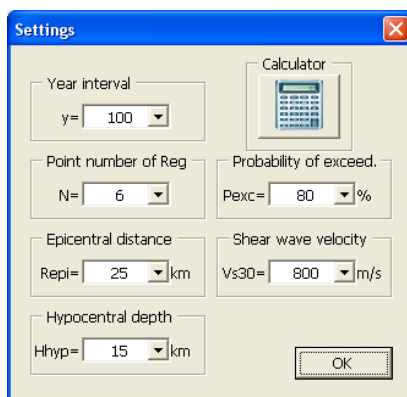
$$R(M) = \frac{1}{1 - P(M)}, \quad (3.120)$$

dok je verovatnoća da se zemljotres sa povratnim periodom  $R(M)$  godina dogodi u

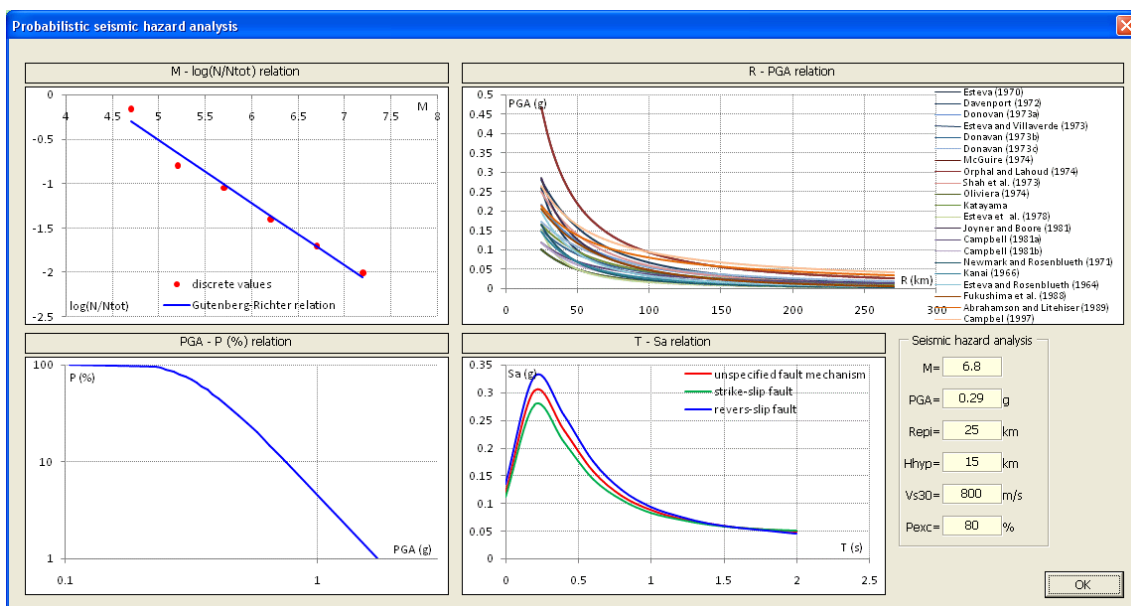
intervalu od  $T$  godina  $P(T)$ :

$$P(T) = 1 - \left( 1 - \frac{1}{R(M)} \right)^T \quad (3.121)$$

Na slici 3.33 je prikazan interfejs za definisanje parametara za PSHA analizu, dok je na slici 3.34 prikazan interfejs za pregled *Gutenberg-Richter*-ove relacije, kriva atenuacije, generisane krive seizmičkog hazarda i svih relevantnih parametara proračuna.

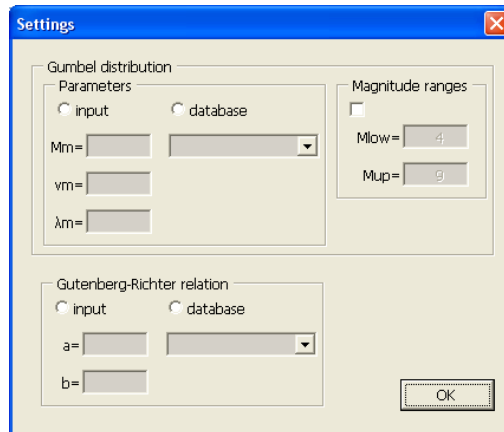


Slika 3.33 Interfejs za definisanje parametara za PSHA analizu

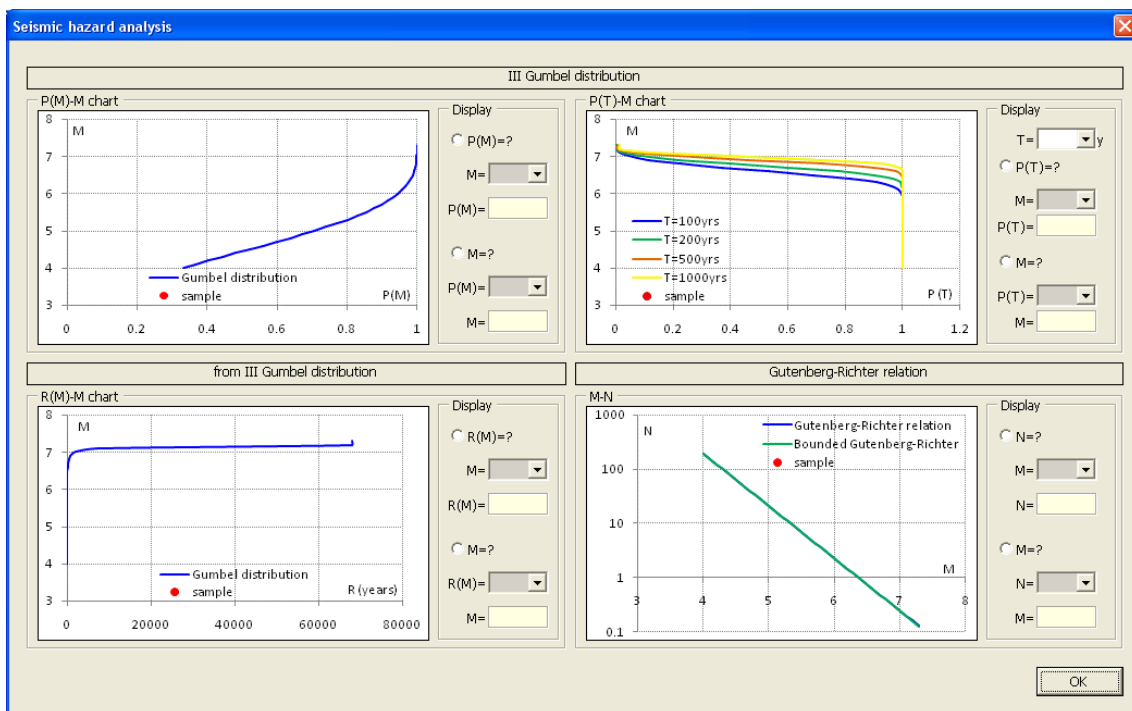


Slika 3.34 Pregled *Gutenberg-Richter*-ove relacije, kriva atenuacije, generisane krive seizmičkog hazarda i svih relevantnih parametara proračuna

Na slici 3.35 je prikazan interfejs za definisanje parametara za SHA analizu, dok je na slici 3.36 prikazan interfejs za pregled *Gumbel*-ove raspodele III tipa, *Gutenberg-Richter*-ove relacije i svih relevantnih parametara proračuna.



Slika 3.35 Interfejs za definisanje parametara za SHA analizu

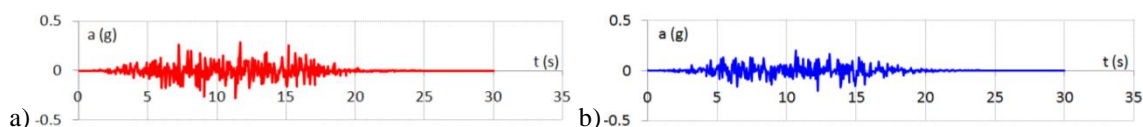


Slika 3.36 Pregled proračuna za *Gumbel*-ovu raspodelu III tipa, *Gutenberg-Richter*-ovu relaciju i svih relevantnih parametara proračuna

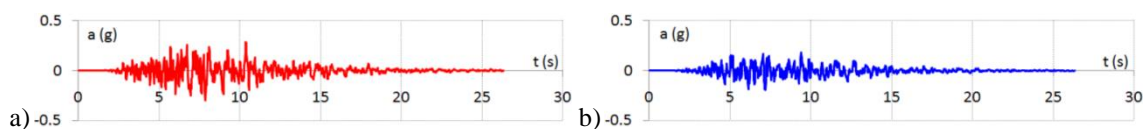
### 3.5.4. GENERISANI VEŠTAČKI AKCELEROGRAMI

Na osnovu prethodno definisanih procedura, u ovom podpoglavlju, generisani su nepotpuni i potpuni nestacionarni veštački akceleroگرامи u *Nonlin Quake AA*, a koristeći rešenja dobijena iz *Nonlin Quake SHA* za potpune nestacionarne veštačke akceleroگرامе. Kod nepotpunih nestacionarnih veštačkih akceleroگرامа korišćen je model složene anvelope za  $t_{s1}=6s$ ,  $t_{s2}=16s$  i  $\alpha=0.5$ , dok je vreme trajanja akceleroگرامа  $t_{acc}=30s$ , a čime je obezbeđeno da minimalno vreme trajanja stacionarnog dela

akcelerograma bude 10s. Kod potpunih nestacionarnih veštačkih akcelerograma korišćeni su parametri  $M=6.8$  i  $R=25\text{km}$ . Nakon generisanja veštačkih akcelerograma sprovedeni su *P4Reg* korekcija bazne linije i filtriranje visokopropusnim filterom za  $f_{cutoff}=0.25\text{Hz}$ . Akcelerogrami su semplovani na interval vremena  $\Delta t=0.01\text{s}$ , tako da je frekvencija semplovanja  $f_{sam}=100\text{Hz}$ . Na slici 3.37 su prikazani generisani nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogrami, dok su na slici 3.38 prikazani generisani potpuni nestacionarni veštački akcelerogrami.

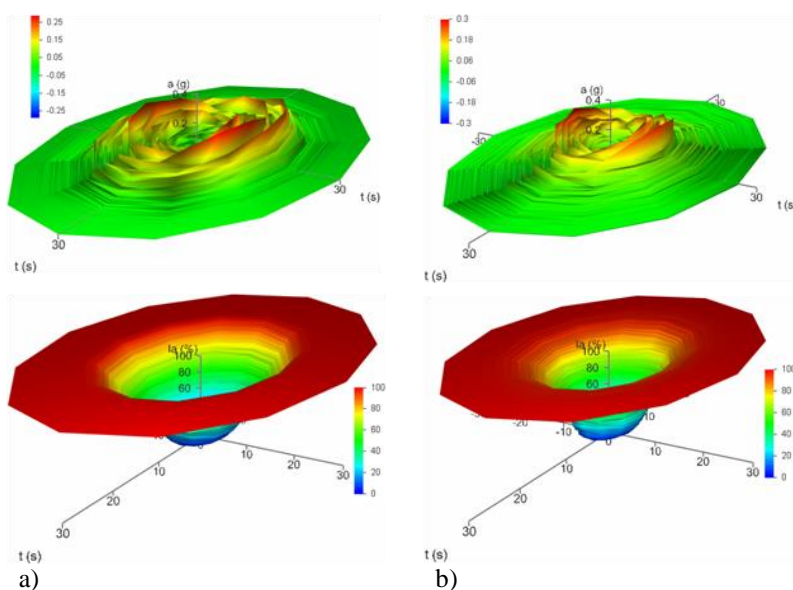


Slika 3.37 Nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogrami: a) 1. komponenta, b) 2. komponenta

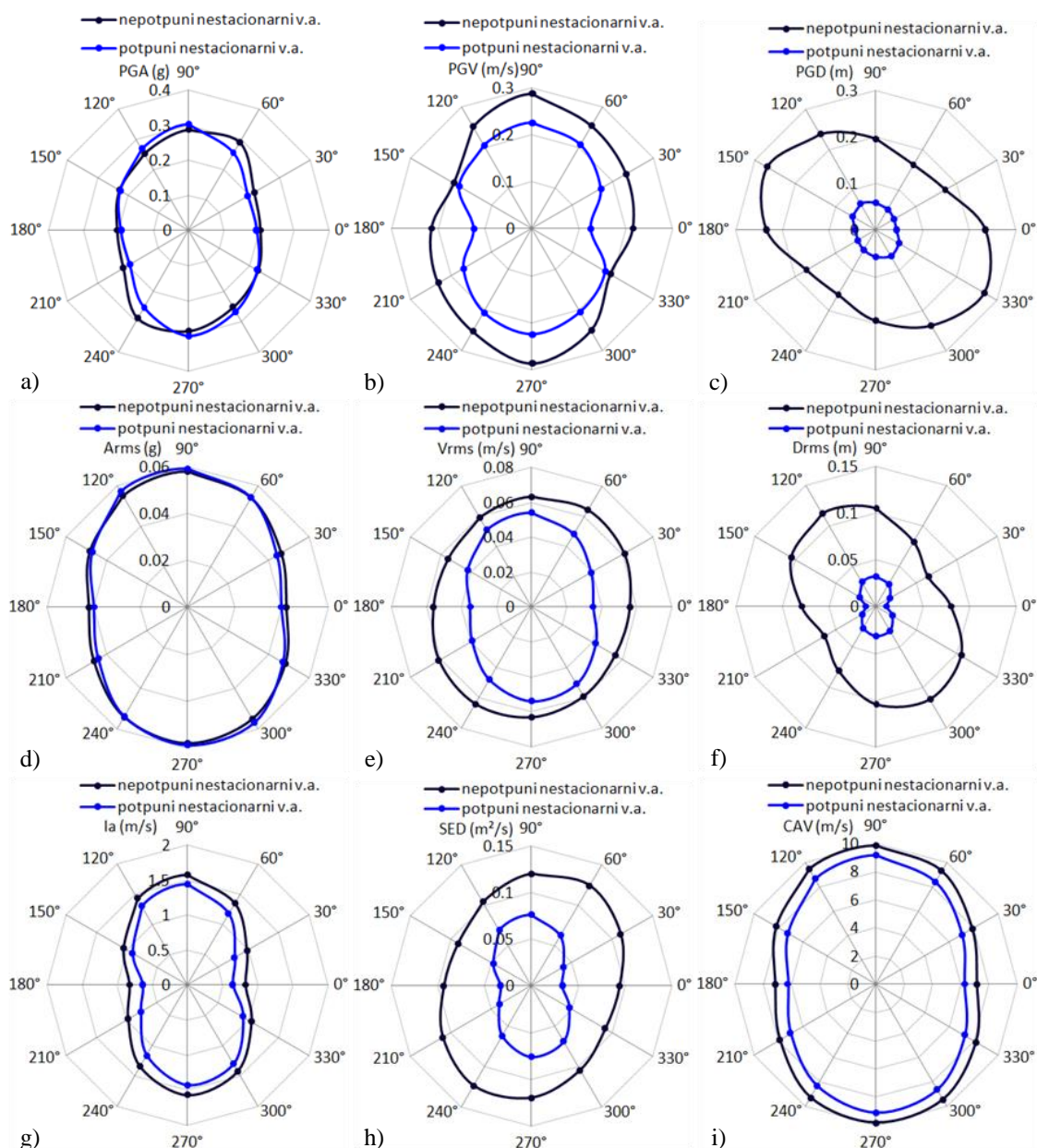


Slika 3.38 Potpuni nestacionarni veštački akcelerogrami: a) 1. komponenta, b) 2. komponenta

Nakon generisanja veštačkih akcelerograma sprovedena su procesiranja u *Nonlin Quake GMP*. Generisane površi akcelerograma  $a=f(t_x, t_y)$  i Arias-ovog intenziteta  $I_a=f(t_x, t_y)$  prikazane su na slici 3.39, dok su na slici 3.40 prikazane konstruisane anvelope mere intenziteta veštačkih akcelerograma.



Slika 3.39 Generisane GMRS  $a=f(t_x, t_y)$  i  $I_a=f(t_x, t_y)$  površi: a) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, b) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



Slika 3.40 Anvelope mere intenziteta veštačkih akcelograma: a)  $PGA$ , b)  $PGV$ , c)  $PGD$ , d)  $a_{RMS}$ , e)  $v_{RMS}$ , f)  $d_{RMS}$ , g)  $I_a$ , h)  $SED$ , i)  $CAV$

U tabeli 3.4 su prikazani proračunati koeficijenti  $C_{IM}$  za  $IM$  parametre u funkciji tipa veštačkog akcelograma.

Tabela 3.4 Proračunati koeficijenti  $C_{IM}$  za  $IM$  parametre u funkciji tipa veštačkog akcelograma

veštački akcelogrami									
akceleroqram	$C_{IM}$ ( $PGA$ )	$C_{IM}$ ( $PGV$ )	$C_{IM}$ ( $PGD$ )	$C_{IM}$ ( $A_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $V_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $D_{RMS}$ )	$C_{IM}$ ( $I_a$ )	$C_{IM}$ ( $SED$ )	$C_{IM}$ ( $CAV$ )
n.n.v.a.	0.69	0.66	0.60	0.73	0.83	0.62	0.57	0.72	0.74
p.n.v.a.	0.61	0.65	0.65	0.70	0.67	0.51	0.52	0.51	0.70

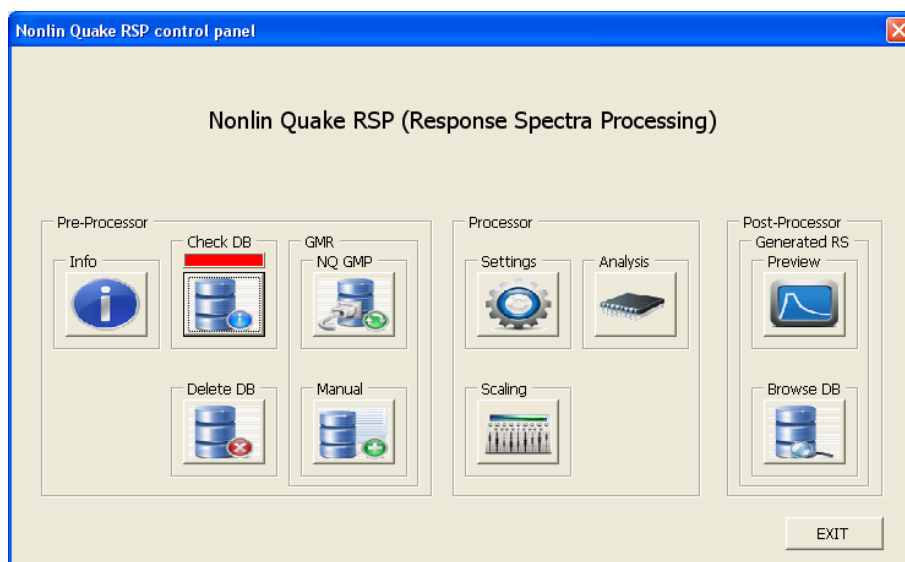


### 3.6. PROCESIRANJE SPEKTARA ODGOVORA

Nakon generisanja akceleroograma u *Nonlin Quake GMP* isti se importuju u *Nonlin Quake RSP (Response Spectra Processing)*, gde se sprovodi generisanje spektara odgovora za različite uglove  $\theta_i$  u formatu:

- $S_a-T$  - spektralno ubrzanje-period vibracija (ARS - *acceleration response spectra*),
- $S_v-T$  - spektralna brzina-period vibracija (VRS - *velocity response spectra*),
- $S_d-T$  - spektralno pomeranje-period vibracija (DRS - *displacement response spectra*),

a zatim se generišu površi spektara odgovora (RSS - *response spectra surface*). Kontrolni panel *Nonlin Quake RSP* je prikazan na slici 3.41.



Slika 3.41 Kontrolni panel *Nonlin Quake RSP*

Procedura generisanja spektara odgovora se sprovodi prema izrazima (3.12)÷(3.38) za  $T \in [0, T_{max}]$ , pri čemu se za konstrukcije zgrada obično usvaja da je  $T_{max}=4s$ . U slučaju NSPA analiza zgrada može se pojaviti problem u proceni kolapsnog stanja, s obzirom da se u inkrementalnim proračunskim situacijama sukcesivno sprovodi korekcija spektralnog ubrzanja  $S_a$ , odnosno spektralnog pomeranja  $S_d$ . Dakle, pri izraženom nelinearnom ponašanju sistema u predkolapsnom i kolapsnom domenu period vibracija  $T_n$  sistema se znatno povećava u odnosu na inicijalni period vibracija  $T_e$  [39]. Realno, ne treba imati potrebu za većim periodom vibracija  $T_{max}$ , s obzirom da

se razmatra kolapsno stanje, to se konstrukcija izlaže dejstvu zemljotresa znatno većeg intenziteta nego što se koriste u klasičnim proračunskim situacijama.

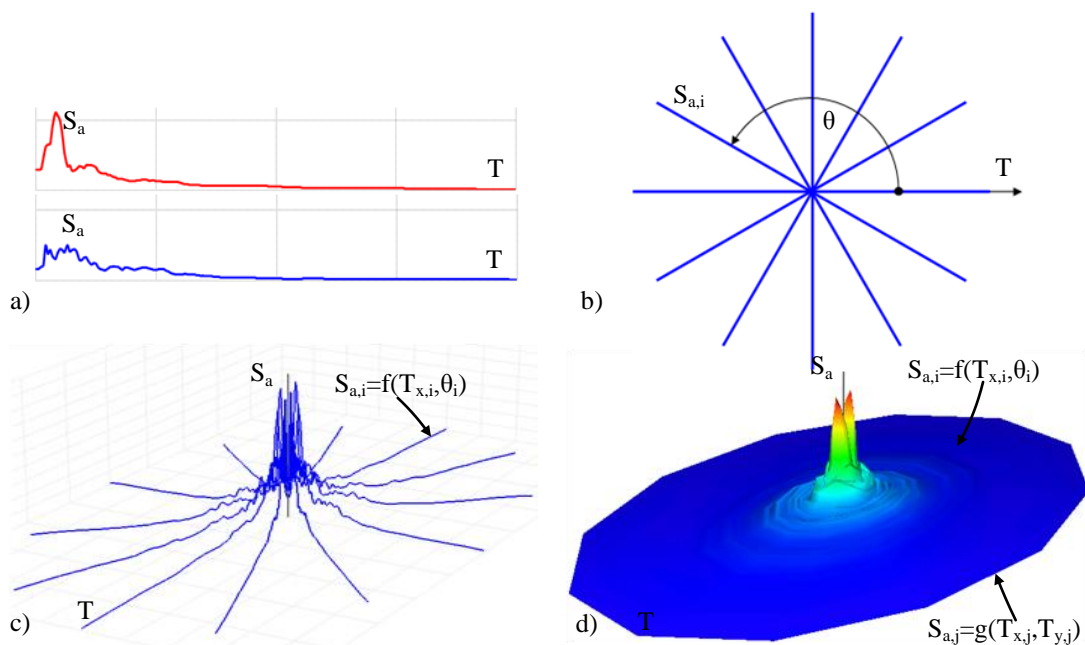
NSPA analize prema silama (FBA - *Force-Based Analysis*) i pomeranju (DBA - *Displacement-Based Analysis*) 3D modela zgrada se sprovode primenom ARS i DRS spektara odgovora, odnosno za razvijene površi spektara odgovora:

- površ spektra odgovora ubrzanja (ARSS - *acceleration response spectra surface*),
- površ spektra odgovora pomeranja (DRSS - *displacement response spectra surface*).

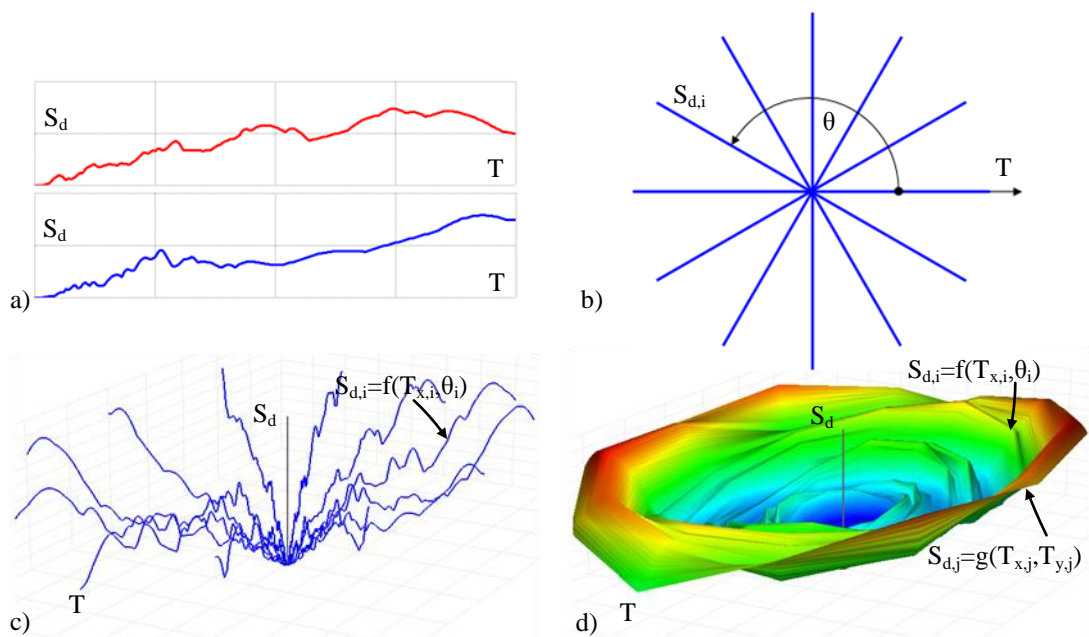
Konstrukcija površi spektra odgovora se sprovodi tako što se prvo generišu spektri odgovora  $S_{\theta}(T)$  u ravanskom polarnom koordinatnom sistemu za uglove  $\theta_i$ . Zatim se svakom spektru odgovora  $S_{\theta}(T)$  dodeljuje vertikalna koordinata ( $S_a$  ili  $S_d$ ) u prostornom cilindričnom koordinatnom sistemu, a nakon toga se sprovodi konverzija u prostorni pravougli koordinatni sistem (slike 3.42 i 3.43):

$$T_x = T_r \cos \theta, \quad T_y = T_r \sin \theta, \quad T_r = \sqrt{T_x^2 + T_y^2}, \quad (3.122)$$

gde je  $T_x$ ,  $T_y$  period vibracija u ortogonalnom koordinatnom sistemu,  $T_r$  radijalna koordinata perioda vibracija.



Slika 3.42 Dijagram toka generisanja površi spektra odgovora ubrzanja ARSS: a) 2D ortogonalni koordinatni sistem  $S_a(T)=f(T)$ , b) 2D polarni koordinatni sistem  $T=f(\theta)$ , c) 3D cilindrični koordinatni sistem  $S_a(T)=f(T,\theta)$ , d) 3D ortogonalni koordinatni sistem  $S_a(T)=f(T_x,T_y)$



Slika 3.43 Dijagram toka generisanja površi spektra odgovora pomeranja DRSS: a) 2D ortogonalni koordinatni sistem  $S_d(T)=f(T)$ , b) 2D polarni koordinatni sistem  $T=f(\theta)$ , c) 3D cilindrični koordinatni sistem  $S_d(T)=f(T,\theta)$ , d) 3D ortogonalni koordinatni sistem  $S_d(T)=f(T_x, T_y)$

Definicija 3.3: Površ spektra odgovora ubrzanja (ARSS - acceleration response spectra surface)  $S_a=f(T_x, T_y)$  je linearno interpolirana asimetrična rotaciona površ generisana povezivanjem diskretnih vrednosti  $I_{a,i}(T_{r,i}, S_{a,z,i}, \theta_i)$  individualnih spektara odgovora  $S_{a,i}=f(T_{r,i}, \theta_i)$  linearnim funkcijama  $S_{a,j}=g(T_{x,j}, T_{y,j})$  u tangencijalnom pravcu:

$$S_a = f(T_x, T_y) = \left[ \bigcup_{\theta_i=0}^{360^\circ} f(T_{r,i}, \theta_i) \right] \cup \left[ \bigcup_{j=0}^{T_{max}} g(T_{x,j}, T_{y,j}) \right], \quad (3.123)$$

pri čemu je:

$$I_{a,i}(T_{r,i}, S_{a,z,i}, \theta_i) \subset S_a = f(T_x, T_y), \quad T_{x,j}, T_{y,j} \in [0, T_{max}], \quad \theta_i \in [0, 360^\circ]. \quad (3.124)$$

Definicija 3.4: Površ spektra odgovora pomeranja (DRSS - displacement response spectra surface)  $S_d=f(T_x, T_y)$  je linearno interpolirana asimetrična rotaciona površ generisana povezivanjem diskretnih vrednosti  $I_{d,i}(T_{r,i}, S_{d,z,i}, \theta_i)$  individualnih spektara odgovora  $S_{d,i}=f(T_{r,i}, \theta_i)$  linearnim funkcijama  $S_{d,j}=g(T_{x,j}, T_{y,j})$  u tangencijalnom pravcu:

$$S_d = f(T_x, T_y) = \left[ \bigcup_{\theta_i=0}^{360^\circ} f(T_{r,i}, \theta_i) \right] \cup \left[ \bigcup_{j=0}^{T_{max}} g(T_{x,j}, T_{y,j}) \right], \quad (3.125)$$

pri čemu je:

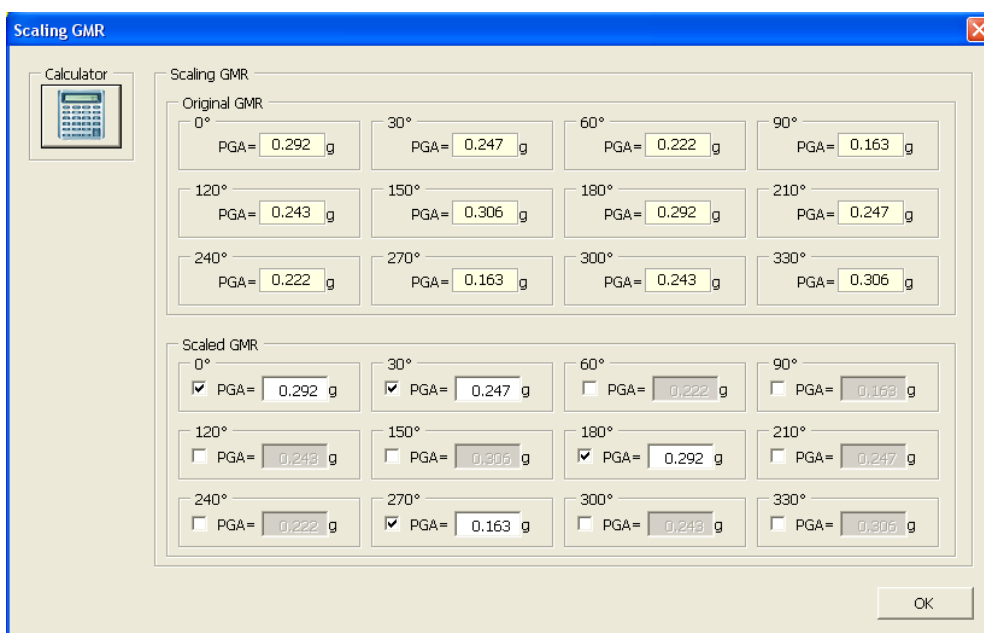
$$I_{d,i}(T_{r,i}, S_{d,z,i}, \theta_i) \subset S_d = f(T_x, T_y), \quad T_{x,j}, T_{y,j} \in [0, T_{max}], \quad \theta_i \in [0, 360^\circ]. \quad (3.126)$$

Analogno generisanom broju akcelorograma za inkrement ugla  $\Delta\theta=30^\circ$  dobija se

identičan broj i ARS i DRS spektara odgovora. Na slici 3.44 je prikazan interfejs za skaliranje akceleroograma prema  $PGA$  po uglovima  $\theta_i$ :

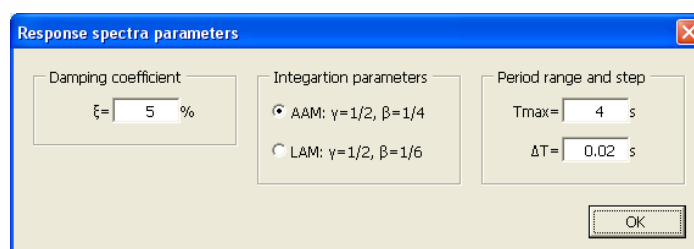
$$F_{s,i} = \frac{PGA_{s,i}}{PGA_i}, \quad a_{s,i}(t) = F_{s,i} a_i(t). \quad (3.127)$$

gde je  $F_{s,i}$  faktor skaliranja  $i$ -tog akceleroograma,  $PGA_{s,i}$  skalirano maksimalno ubrzanje tla za  $i$ -ti akceleroogram,  $a_{s,i}(t)$  skalirano ubrzanje za  $t$  korak vremena  $i$ -tog akceleroograma,  $a_i(t)$  ubrzanje za  $t$  korak vremena  $i$ -tog akceleroograma.

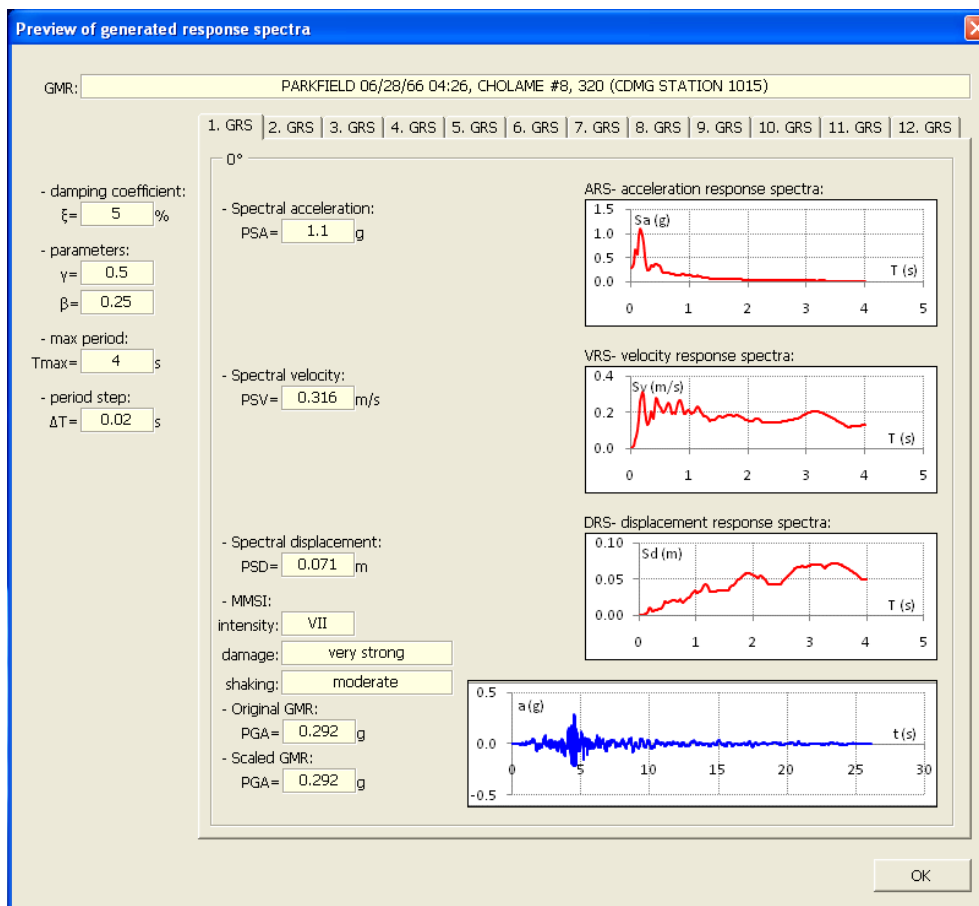


Slika 3.44 Interfejs za skaliranje akceleroograma prema  $PGA$  po uglovima  $\theta_i$

Na slici 3.45 je prikazan interfejs za unos parametara za proračun spektara odgovora, dok je na slici 3.46 prikazan interfejs za pregled generisanih spektara odgovora po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih parametara proračuna, pri čemu je korelacija za  $PGA$  i intenzitet zemljotresa uspostavljena prema modifikovanoj *Mercalli*-evoj skali (*MMIS - modified Mercalli intensity scale*) [221].

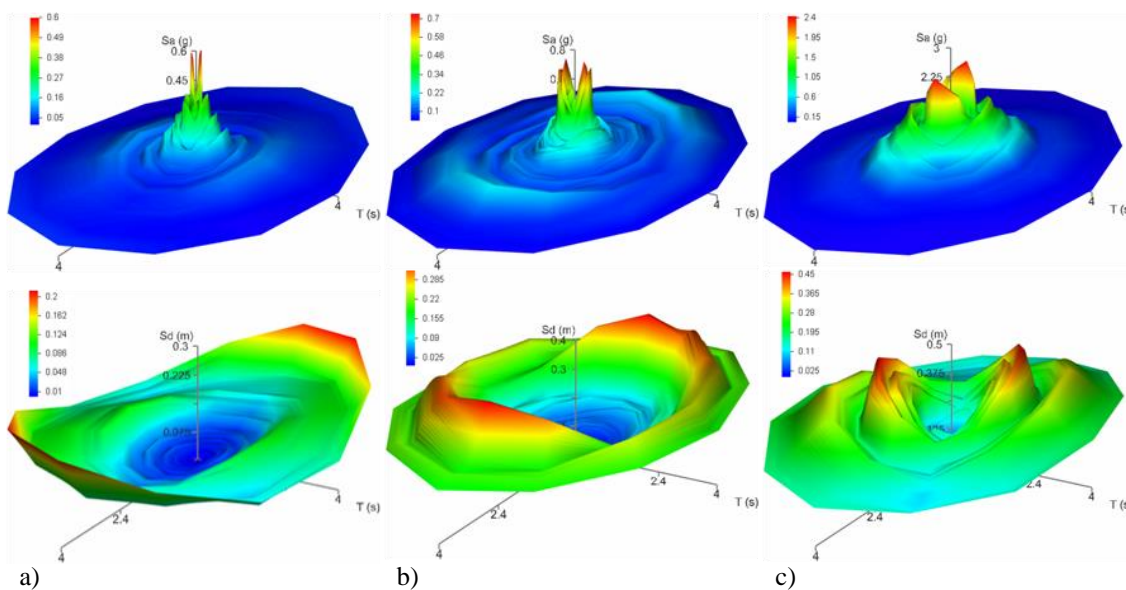


Slika 3.45 Interfejs za unos parametara za proračun spektara odgovora

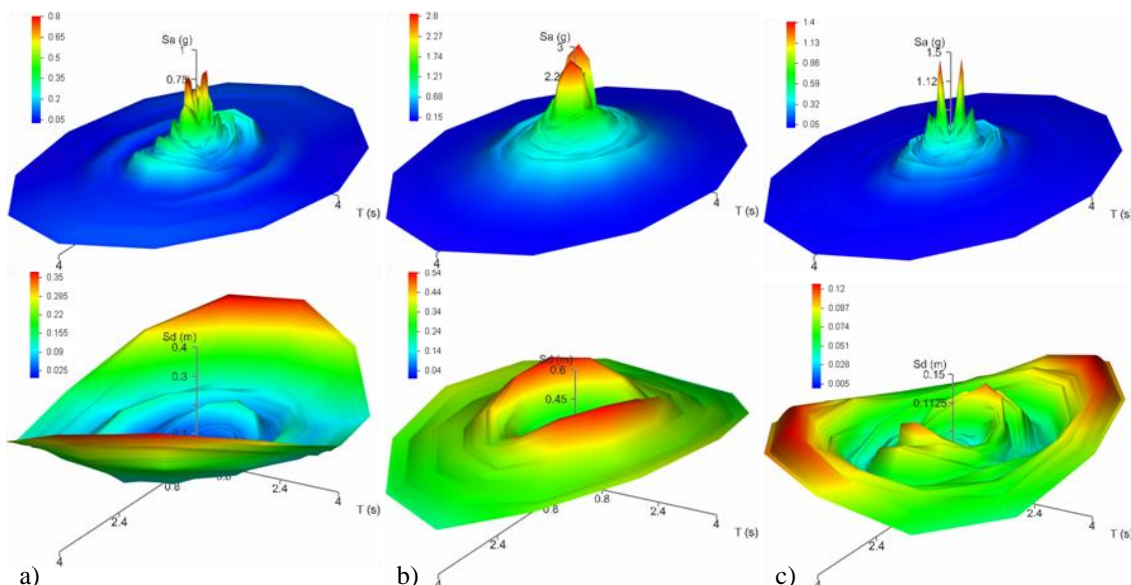


Slika 3.46 Pregled generisanih spektara odgovora po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih parametara proračuna

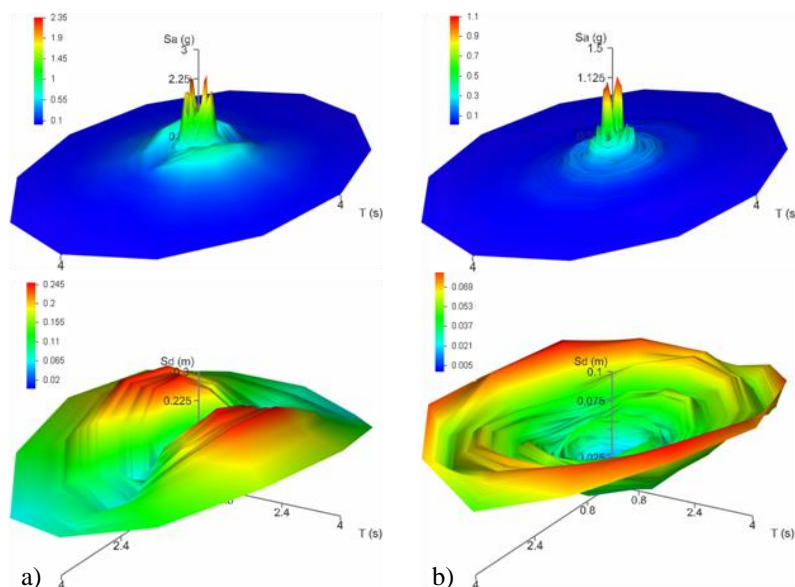
Generisane površi spektara odgovora ARSS  $S_a=f(T_x, T_y)$  i DRSS  $S_d=f(T_x, T_y)$  za FFGM i NFGM zemljotrese prikazane su na slikama 3.47÷3.49.



Slika 3.47 Generisane ARSS  $S_a=f(T_x, T_y)$  i DRSS  $S_d=f(T_x, T_y)$  površi: a) *Imperial Valley* IV79, b) *Loma Prieta* LP89, c) *Northridge* NR94

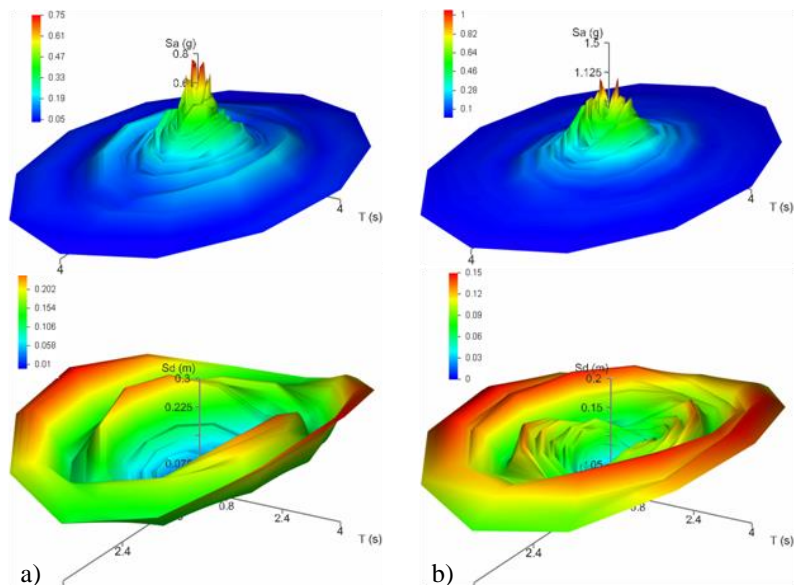


Slika 3.48 Generisane ARSS  $S_a=f(T_x, T_y)$  i DRSS  $S_d=f(T_x, T_y)$  površi: a) *San Fernando SF71*, b) *Kobe KO95*, c) *Morgan Hill MH84*

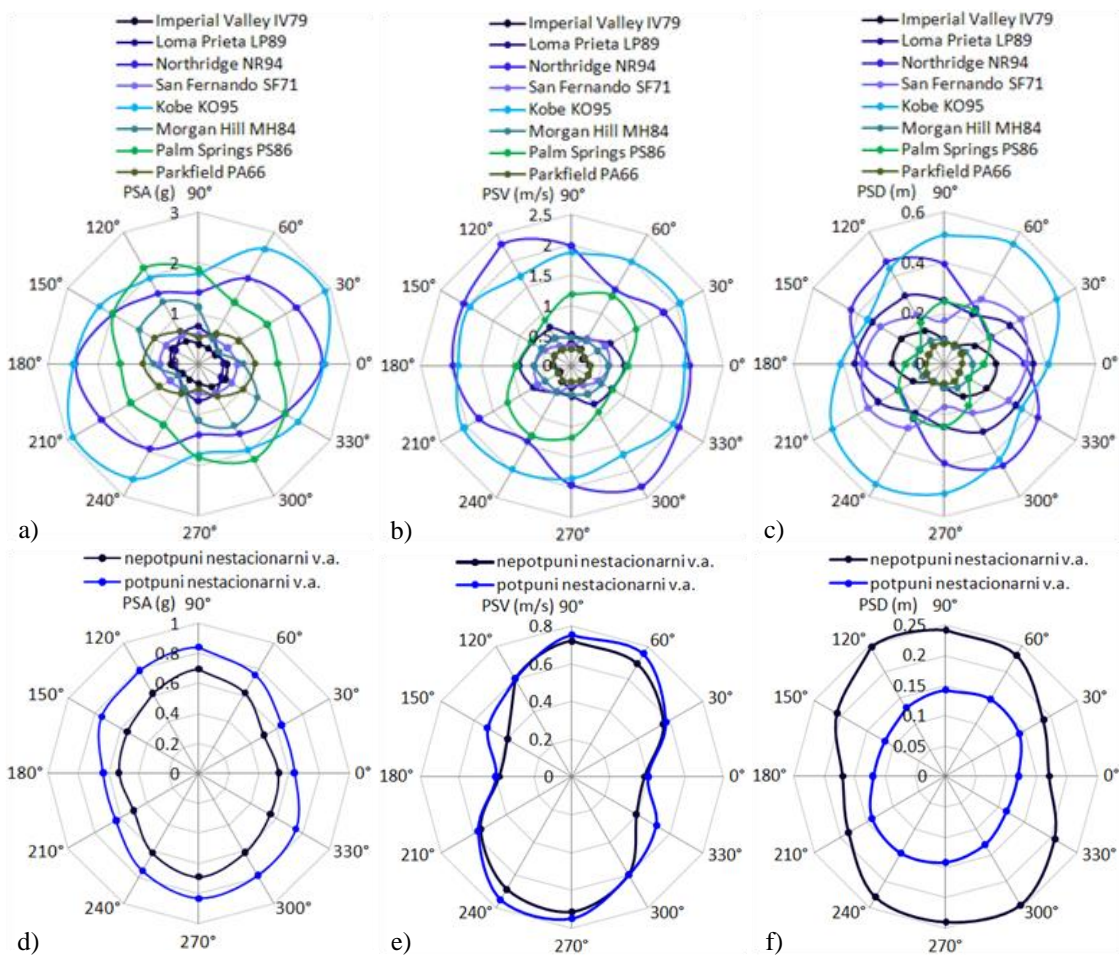


Slika 3.49 Generisane ARSS  $S_a=f(T_x, T_y)$  i DRSS  $S_d=f(T_x, T_y)$  površi: a) *Palm Springs PS86*, b) *Parkfield PA66*

Generisane površi spektra odgovora ARSS  $S_a=f(T_x, T_y)$  i DRSS  $S_d=f(T_x, T_y)$  za nepotpuni i potpuni nestacionarni veštački akcelorogram prikazane su na slici 3.50, dok su na slici 3.51 prikazane konstruisane anvelope mere intenziteta realnih i veštačkih akcelorograma. Ove anvelope mere intenziteta su funkcija spektra odgovora, odnosno površi spektra odgovora: maksimalno spektralno ubrzanje (PSA - *peak spectral acceleration*), maksimalna spektralna brzina (PSV - *peak spectral velocity*) i maksimalno spektralno pomeranje (PSD - *peak spectral displacement*).



Slika 3.50 Generisane ARSS  $S_a=f(T_x, T_y)$  i DRSS  $S_d=f(T_x, T_y)$  površi: a) nepotpuni nestacionarni veštački akcelrogram, b) potpuni nestacionarni veštački akcelrogram



Slika 3.51 Anvelope mere intenziteta realnih: a) PSA, b) PSV, c) PSD i veštačkih akcelrograma: d) PSA, e) PSV, f) PSD

U tabeli 3.5 su prikazani proračunati koeficijenti  $C_{IM}$  za  $IM$  parametre u funkciji tipa akcelorograma.

Tabela 3.5 Proračunati koeficijenti  $C_{IM}$  za  $IM$  parametre u funkciji tipa akcelorograma

	FF GMR zemljotresi				NF GMR zemljotresi				veštački akcelorogrami	
	<i>Imperial Valley</i>	<i>Loma Prieta</i>	<i>Northridge</i>	<i>San Fernando</i>	<i>Kobe</i>	<i>Morgan Hill</i>	<i>Palm Springs</i>	<i>Parkfield</i>	n.n.v.a	p.n.v.a.
$C_{IM}$ (PSA)	0.58	0.60	0.61	0.74	0.63	0.48	0.62	0.55	0.69	0.74
$C_{IM}$ (PSV)	0.67	0.60	0.66	0.59	0.81	0.73	0.60	0.74	0.59	0.62
$C_{IM}$ (PSD)	0.50	0.67	0.54	0.61	0.69	0.77	0.60	0.77	0.72	0.78

### 3.7. MODELIRANJE OKVIRNIH ZGRADA

#### 3.7.1. KONCEPT MODELIRANJA OKVIRNIH ZGRADA

Modeliranje se definiše skupom logičkih aktivnosti u cilju stvaranja idealizovane i pojednostavljene reprezentacije ponašanja zgrada na uticaje spoljašnjeg dejstva. U zavisnosti od nivoa pristupa problemu dobijaju se manje ili više složeniji modeli. U inicijalnim istraživanjima modeli zgrada su razmatrani uzimajući u obzir uticaje ispune i tavanica na prostorne deformacije sistema. S obzirom da su za procesiranje nelinearnih statičkih i dinamičkih analiza potrebni znatni hardverski resursi, izvršena je optimizacija u procesu modeliranja zgrada. Za izbor optimalnog numeričkog modela razmatrane su faze predprocesiranja i procesiranja prema kriterijumu:

$$f\left(Q_{NM}, \sum_{NM=1}^n n_{NM}, \sum_{NSA=1}^n n_{NSA}, \sum_{\theta=1}^n n_{\theta}, \sum_{e=1}^n n_e\right) \Rightarrow \sum_{NSA=1}^n t_{NSA=1} + \sum_{NSA=1}^n m_{NSA=1}, \quad (3.128)$$

gde je  $Q_{NM}$  kvalitet numeričkog modela,  $n_{NM}$  broj numeričkog modela,  $n_{NSA}$  broj nelinearne statičke ili dinamičke seizmičke analize (NSA - *Nonlinear Seismic Analysis*),  $n_{\theta}$  broj ugla za koji se razmatra dejstvo zemljotresa,  $n_e$  broj zemljotresa,  $t_{NSA=1}$  vreme potrebno za procesiranje jedne NSA analize,  $m_{NSA=1}$  količina podataka dobijenih iz procesiranja jedne NSA analize. Kvalitet numeričkog modela  $Q_{NM}$  je definisan aproksimacijom, diskretizacijom, volumenom, modelom ponašanja okvirnih zgrada i ostalim parametrima relevantnim u procesu kreiranja numeričkog modela:



$$Q_{NM} = f(a_{NM}, d_{NM}, s_{NM}, b_{NM}, o_{NM}), \quad (3.129)$$

gde je  $a_{NM}$  aproksimacija numeričkog modela (izbor tipa konačnog elementa),  $d_{NM}$  diskretizacija numeričkog modela (izbor veličine i potrebnog broja konačnih elemenata),  $s_{NM}$  volumen numeričkog modela (spratnost i broj polja),  $b_{NM}$  model ponašanja okvirne zgrade (fleksioni i smičući),  $o_{NM}$  ostali parametri relevantni u procesu kreiranja numeričkog modela (konturni uslovi, opterećenje, mase, prigušenje, performansi kriterijumi...).

Inicijalni numerički model okvirne zgrade je kreiran od konačnih elemenata za grede, stubove, ispunu i tavanice, a predstavlja nivo kvaliteta  $Q_{NM,0}$ . U narednom koraku u postupku numeričkog modeliranja eliminisani su elementi ispune, a koji su prethodno modelirani kao elementi veze (*link elements*) sa mogućnošću razvoja nelinearnih deformacija. Kvalitet numeričkog modela bez elemenata ispune  $Q_{NM,1}$  je u određenoj meri redukovan, dok su vreme procesiranja  $t_{NSA,1}$  i količina podataka dobijeni iz procesiranja  $m_{NSA,1}$  znatnije redukovani:

$$Q_{NM,1} \approx Q_{NM,0}, \quad t_{NSA,1} \ll t_{NSA,0}, \quad m_{NSA,1} \ll m_{NSA,0}, \quad (3.130)$$

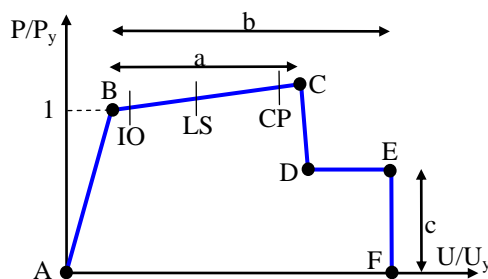
gde je  $Q_{NM,1}$  kvalitet numeričkog modela bez elemenata ispune,  $Q_{NM,0}$  kvalitet inicijalnog numeričkog modela,  $t_{NSA,1}$  vreme procesiranja modela bez elemenata ispune,  $t_{NSA,0}$  vreme procesiranja inicijalnog numeričkog modela,  $m_{NSA,1}$  količina podataka dobijenih iz procesiranja modela bez elemenata ispune,  $m_{NSA,0}$  količina podataka dobijenih iz procesiranja inicijalnog numeričkog modela.

Procedura modeliranja okvirnih zgrada odvija se kroz faze matematičkog, numeričkog i računarskog modeliranja. Istraživanje u ovoj doktorskoj disertaciji bazirano je na primeni linijskih konačnih elemenata za kompletne 3D modele zgrada. Prema FEMA 356 [80] armiranobetonske okvirne zgrade se definišu kao geometrijske konstruktivne celine primarno sastavljene iz horizontalnih komponenata greda, vertikalnih komponenata stubova i čvorova koji povezuju horizontalne i vertikalne komponente. Ovi elementi prihvataju sve lateralne horizontalne seizmičke sile. Razvoj materijalne nelinearnosti sprovodi primenom plastičnih zglobova (*plastic hinge*) u zonama potencijalnih plastifikacija poprečnih preseka i propagacijom neelastičnih deformacija duž štapova primenom vlaknastih (*fibre*) modela. Nelinearne numeričke analize 3D modela zgrada sprovedene su uzimajući u obzir razvoj plastifikacije preko plastičnih zglobova, dok su nelinearne numeričke analize 2D modela okvirnih sistema i

modela za preliminarne analize sprovedene uzimajući u obzir propagaciju neelastičnih deformacija duž štapova. Uzengije ostaju zatvorene tokom razvoja plastičnih deformacija sistema.

### 3.7.2. MODEL SA PLASTIČNIM ZGLOBOVIMA

S obzirom da se za numeričko modeliranje primenjuju linijski konačni elementi implementirani u softver SAP 2000 v14 [333], to se štapovi diskretizuju na veći broj konačnih elemenata, dok se na krajevima štapova apliciraju plastični zglobovi u kojima se omogućava razvoj nelinearnih deformacija. Na slici 3.52 je prikazan normalizovan oblik krive sila-deformacija, pri čemu se na sličnom principu zasniva konstrukcija krive moment-rotacija [80]. Parametri  $a$  i  $b$  su deformacije koje se javljaju nakon tečenja, dok parametar  $c$  predstavlja rezidualnu nosivost. Da bi se definisala kriva plastične deformacije potrebno je poznavati referentne parametre u kojima nastupaju promene plastičnih deformacija, kao što su  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$ , i  $F$ , a takođe i međustanja  $IO$ ,  $LS$  i  $CP$ . Parametar  $A$  predstavlja inicijalno stanje (*initial state*), dok je parametar  $B$  granica tečenja (*yielding*). Plastične deformacije su izražene prekoračenjem parametra  $B$ , sve do parametra  $C$  koji predstavlja granični kapacitet (*ultimate capacity*). Prema FEMA 356 [80] nagib prave od parametra  $B$  do parametra  $C$  uzima se između 0 i 10% vrednosti inicijalne krutosti. Rezidualna otpornost (*residual strength*) je definisana parametrom  $D$ , a totalni kolaps (*total failure*) se dostiže pri vrednosti parametra  $E$ . Ukoliko se stanje plastičnog zgloba nađe u datoj situaciji nastupa gubitak preostale rezidualne nosivosti prelaskom u krajnje stanje  $F$  (*final state*).

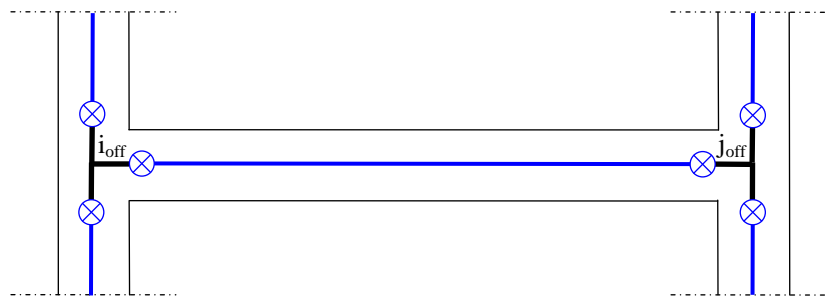


Slika 3.52 Normalizovani oblik krive sila-deformacija u plastičnom zglobu [80]

Međustanja: trenutna useljivost ( $IO$  - *immediate occupancy*), bezbednost života ( $LS$  - *life safety*) i zaštita od rušenja ( $CP$  - *collapse prevention*) se koriste u analizi seizmičkih

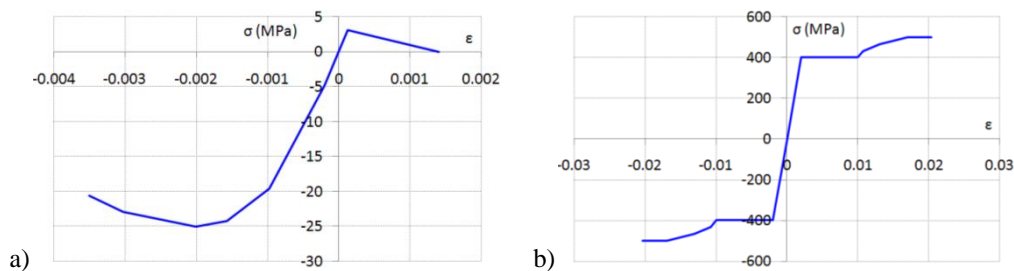
performansi konstrukcije. Propisi FEMA 356 [80] definišu ove uslove posebno za grede, a posebno za stubove. Za grede se uzima u obzir razvoj nelinearnih deformacija koje zavise od momenta u plastičnim zglobovima, dok se kod stubova uzima u obzir plastifikacija pri interakciji momenta savijanja i normalne sile.

Veza greda-stub se modelira uvođenjem krutih krajeva štapa, a numerički se uvodi preko faktora krutosti krajeva štapa  $R$  (*rigid end factor*) [56]. U ovom slučaju plastični zglobovi se pomeraju od krajeva štapa za vrednost dužina krutih krajeva štapa  $i_{off}$  i  $j_{off}$  (slika 3.53). Vrednost faktora krutosti krajeva štapa je u granicama  $0 \leq R \leq 1$ . Ukoliko je  $R=0$  uzima se u obzir idealna dužina štapa, a ukoliko je  $R=1$  podrazumeva se da su krajevi štapa potpuno kruti.



Slika 3.53 Lokacija plastičnih zglobova i krutih krajeva štapa

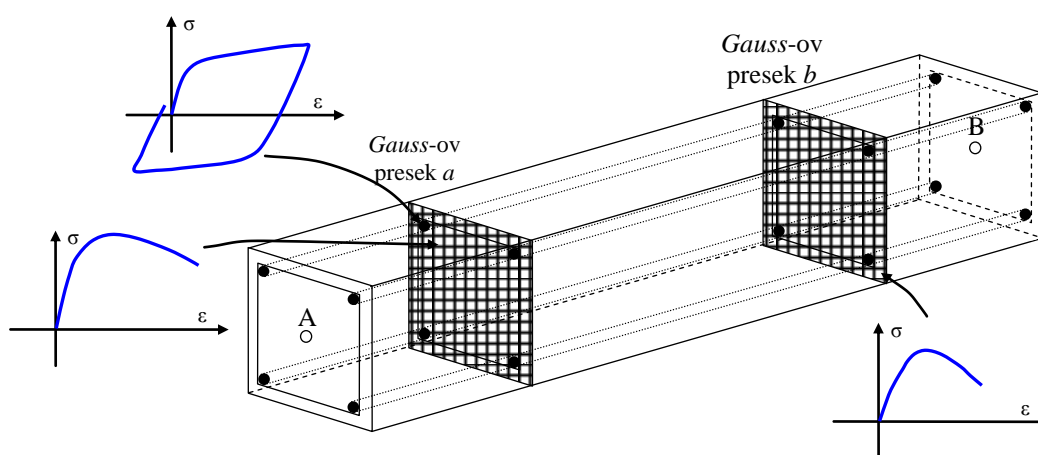
Konstitutivni model ponašanja betona prikazan je na slici 3.54.a, a odgovarajući relevantni parametri betona klase čvrstoće C25/30 prema EC 2 [65] su: modul elastičnosti  $E_c=31\text{GPa}$ , *Poisson*-ov koeficijent  $\nu_c=0.2$ , čvrstoća betona pri pritisku  $f_c=25\text{MPa}$ , odgovarajuća dilatacija za čvrstoću betona pri pritisku  $\varepsilon_c=2\text{‰}$  i maksimalna dilatacija  $\varepsilon_{c,max}=3,5\text{‰}$ . Konstitutivni model ponašanja čelične armature prikazan je na slici 3.54.b, a odgovarajući relevantni parametri armature prema EC 2 [65] su: modul elastičnosti  $E_s=210\text{GPa}$ , *Poisson*-ov koeficijent  $\nu_s=0.3$ , napon na granici tečenja  $\sigma_{s,y}=400\text{MPa}$ , maksimalni napon  $\sigma_{s,ult}=500\text{MPa}$  i dilatacija pri iniciranju zone kinematičkog ojačanja  $\varepsilon_{s,h}=10\text{‰}$ .



Slika 3.54 Konstitutivni modeli ponašanja: a) betona, b) čelične armature

### 3.7.3. MODEL SA VLAKNIMA

Za numeričko opisivanje 2D modela okvirne zgrade u ovoj disertaciji koriste se vlaknasti (*fibre*) linijski konačni elementi, kod kojih se uzimaju u obzir propagacije neelastičnih deformacija duž elementa. Naponsko-deformacijsko stanje na nivou poprečnog preseka određuje se integracijom nelinearnog jednoaksijalnog naponsko-deformacijskog stanja svakog pojedinačnog vlakna, na koje je poprečni presek podeljen (slika 3.55) [200].

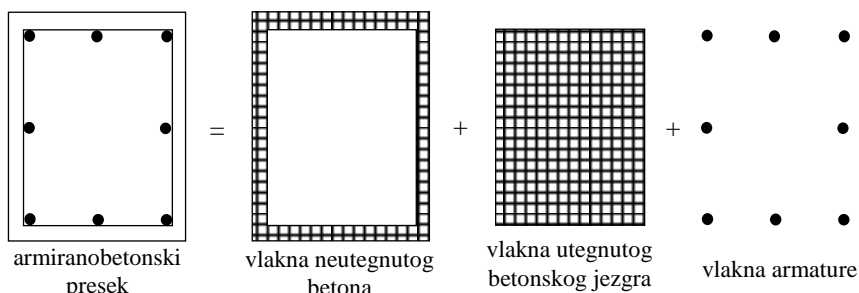


Slika 3.55 Model štapa sa vlaknima [200]

Proračun naponsko-deformacijskog stanja primenom vlakana ima određene prednosti:

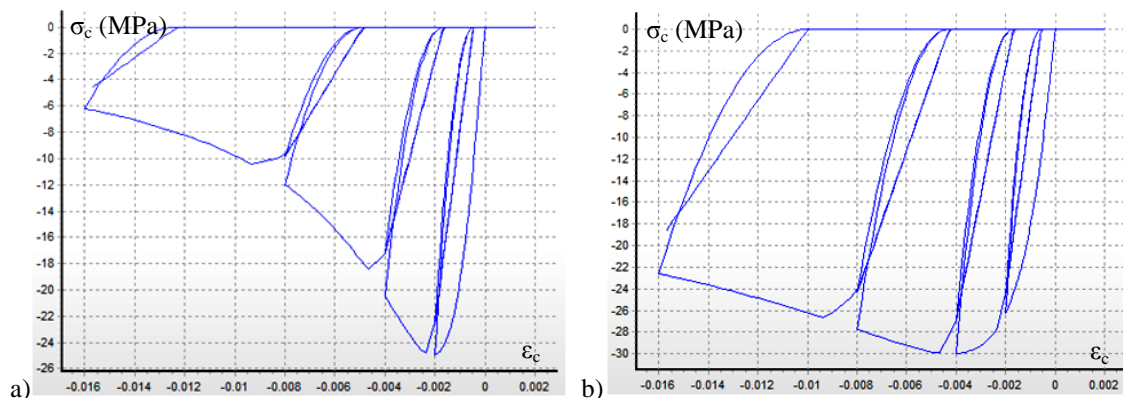
- nema potrebe za prethodnom analizom  $M-\kappa$  (momenat savijanja-krivina),
- nema potrebe za uvođenjem histerezisnog ponašanja, s obzirom da je isto implicitno definisano preko konstitutivnih modela ponašanja materijala,
- direktno određivanje interakcije  $M-N$  (momenat savijanja-aksijalna sila),
- jednostavna prezentacija biaksijalnog opterećenja i interakcija između fleksione krutosti za ortogonalne pravce.

Idealan broj vlakana dovoljan da garantuje pravilan razvoj naponsko-deformacijskog stanja zavisi od oblika preseka, rasporeda armature, modela ponašanja materijala i stepena nelinearnosti. Na osnovu parametarskih istraživanja utvrđeno je da se visok stepen tačnosti razvoja materijalne nelinearnosti postiže za 200÷400 vlakana, čak i za izraženo nelinearno ponašanje. Armiranobetonski poprečni presek podeljen je na tri oblasti (slika 3.56): vlakna neutegnutog betona (*unconfined concrete fibres*), vlakna utegnutog betonskog jezgra (*confined concrete fibres*) i vlakna armature (*steel fibres*).



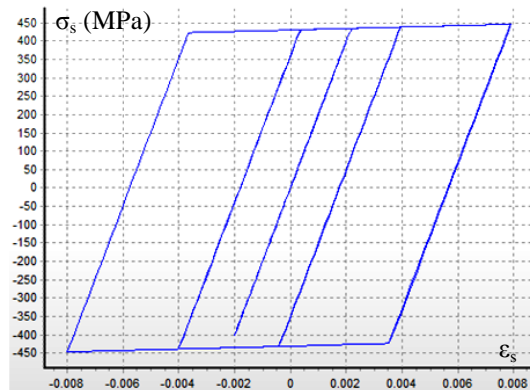
Slika 3.56 Različiti domeni poprečnog preseka armiranog betona modelirani vlaknima [200]

Konstitutivni model ponašanja za neutegnut i utegnut domen betona je nelinearan utegnut model betona (NL-CCC - *nonlinear constant confinement concrete model*) prema Mander-u [161], a implementiran je u softver *SeismoStruct* 5.0.5 [341] (slika 3.57). Parametri konstitutivnog modela ponašanja betona identični su kao kod modela sa plastičnim zglobovima, pri čemu je za faktor odnosa utegnutog i neutegnutog napona pritiska u betonu (*confinement factor*) iskorišćen globalni koeficijent  $k_c=1.2$  koji nije u funkciji efektivnog bočnog napona pritiska  $\sigma_2$ . Realna vrednost čvrstoće betona pri pritisku  $f_{c,calc}=30\text{MPa}$  za utegnuti beton je veća od nominalne vrednosti  $f_c=25\text{MPa}$ , s obzirom da je ista multiplikovana sa  $k_c$ .



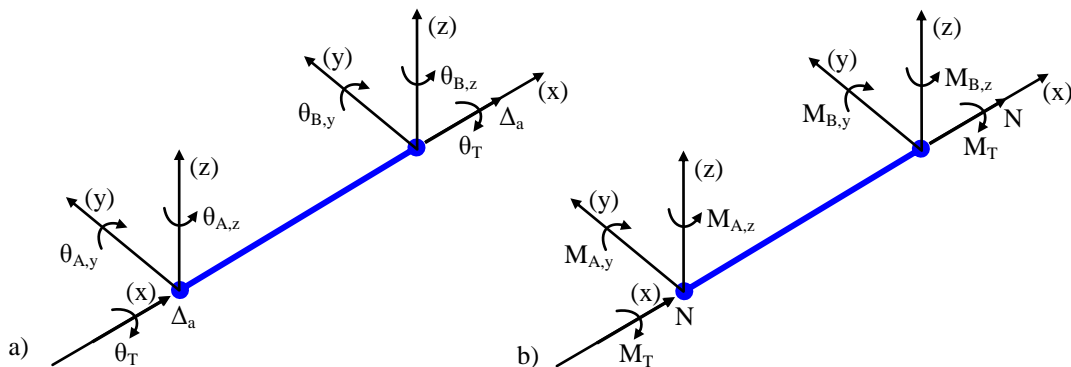
Slika 3.57 Konstitutivni modeli ponašanja: a) neutegnutog, b) utegnutog betona [200]

Konstitutivni model ponašanja čelične armature je bilinearni sa kinematičkim ojačanjem u zoni nelinearnih deformacija (BL-KSH - *bi-linear model with kinematic strain hardening*) (slika 3.58) [203]. Parametri konstitutivnog modela ponašanja čelika gotovo da su identični kao kod modela sa plastičnim zglobovima, pri čemu je napon na granici tečenja  $\sigma_{s,y}=435\text{MPa}$  i faktor odnosa postelastične krutosti  $E_{s,p}$  i inicijalne elastične krutosti  $E_s$  (*strain hardening parameter*)  $\alpha_s=0.01$ .



Slika 3.58 Konstitutivni model ponašanja čelične armature [200]

Tip konačnog elementa kojim se modelira štap, a koji uzima u obzir razvoj materijalne nelinearnosti, je pomeranjem definisan neelastični gredni element (INFRM-DB - *inelastic displacement-based frame element*) [111]. Ovakav konačni element ima šest stepeni slobode  $\theta_{A,y}$ ,  $\theta_{A,z}$ ,  $\theta_{B,y}$ ,  $\theta_{B,z}$ ,  $\Delta_a$ ,  $\theta_T$  (slika 3.59.a), dok su odgovarajuće unutrašnje sile i momenti  $M_{A,y}$ ,  $M_{A,z}$ ,  $M_{B,y}$ ,  $M_{B,z}$ ,  $N$ ,  $M_T$  (slika 3.59.b). Geometrijska nelinearnost se uvodi primenom efekata velikih pomeranja i rotacija (*large displacement and rotation*) i preko  $P-\Delta$  efekata [54]. Uslovi ravnoteže i kompatibilnosti se uspostavljaju na deformisanoj konfiguraciji primenom korotacione formulacije (*co-rotational formulation*) [76].



Slika 3.59 a) stepeni slobode, b) odgovarajuće unutrašnje sile [200]

### 3.7.4. NUMERIČKI MODELI ZGRADA

U procesu modeliranja okvirnih zgrada korišćen je linijski konačni element, tako da je opšti 3D model zgrade formiran uvažavajući kriterijume:

- sva pomeranja se odvijaju u *Descartes*-ovom koordinatnom sistemu:

$$U_x \in x, U_y \in y, U_z \in z, \angle(xy, yz, xz) = 90^\circ, x, y, z \in \mathfrak{R}^3, \quad (3.131)$$

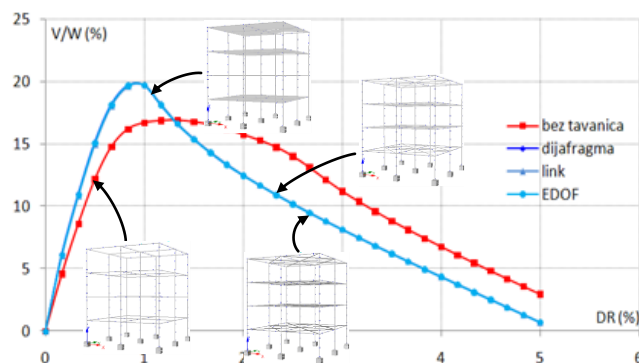
- plastifikacija se odvija preko plastičnih zglobova,
- diskretizacija štapa je izvršena usvajajući princip da su konačni elementi različitih dužina  $L_{FE}$ , pri čemu je:

$$L_{FE} = \min \begin{cases} L_{FE} = (0.5 \div 1) \text{m} \\ N_{FE, \min} = 5 \Rightarrow L_{FE} = \frac{L}{5} \end{cases}, \quad (3.132)$$

- spoj stub-greda se uvodi preko krutih krajeva štapa za model sa plastičnim zglobovima,
- eliminisani su efekti egzistencije ispune,
- efekti egzistencije tavanica modelirani su primenom linearno-elastičnih elemenata veze (*link element*) raspoređenih u "X", pri čemu su anulirane mase, a definisana samo aksijalna krutost,
- sprečena su pomeranja i rotacije kod oslonaca (uklještenje),

gde je  $N_{FE, \min}$  minimalan broj konačnih elemenata na koje treba diskretizovati jedan štap.

Efekti egzistencije tavanica u preliminarnim istraživanjima razmatrani su primenom krutih dijafragma (*rigid diaphragm*), elemenata veze (*rigid link elements*) i ekvivalencijom stepeni slobode (EDOF - *equal degrees of freedom*) na 3D 4-spratnom okvirnom modelu zgrade (slika 3.60).



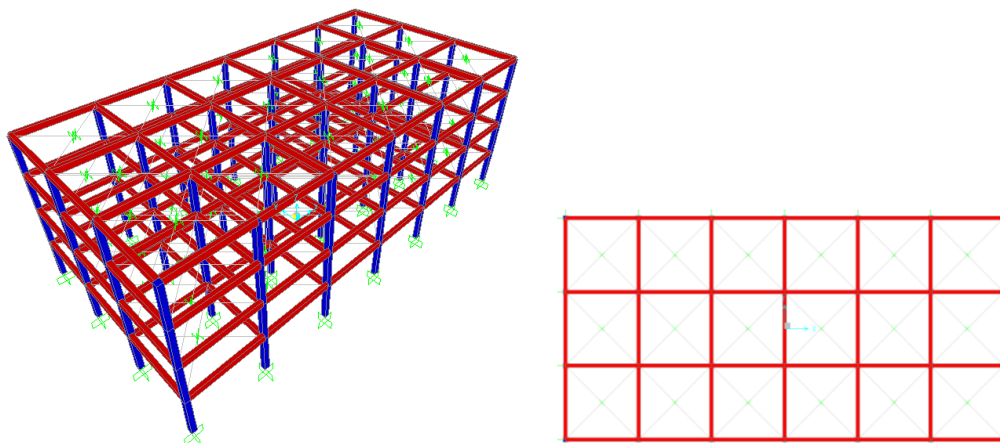
Slika 3.60 Efekti modeliranja tavanica kod 3D 4-spratnog okvirnog modela zgrade

Efekti uvođenja krutih dijafragma i elemenata veze izvršeni su primenjujući principe penalnih funkcija (*penalty functions*) i *Lagrange*-ovih multiplikatora (*Lagrange multipliers*) prema [187], [222]. Preliminarnim istraživanjem na 3D modelu zgrade, a za NSPA analizu utvrđeno je da se primenom krutih dijafragma, elemenata veze i

ekvivalencijom stepeni slobode postiže isti odgovor sistema prezentovan preko NSPA *pushover* krivih. Sa druge strane, vreme procesiranja NSPA analiza predstavlja manje zahtevan problem, dok je kod NDA i INDA analiza to obiman i složen problem zajedno sa količinom podataka iz procesiranja koju treba obraditi. Međutim, kod NSPA analiza 3D modela sa tavanicama modeliranim kao krute dijafragme broj iteracija se znatno povećao, a shodno tome i vreme procesiranja se udvostručilo, tako da izbor elemenata veze za modeliranje tavanica predstavlja najoptimalnije rešenje.

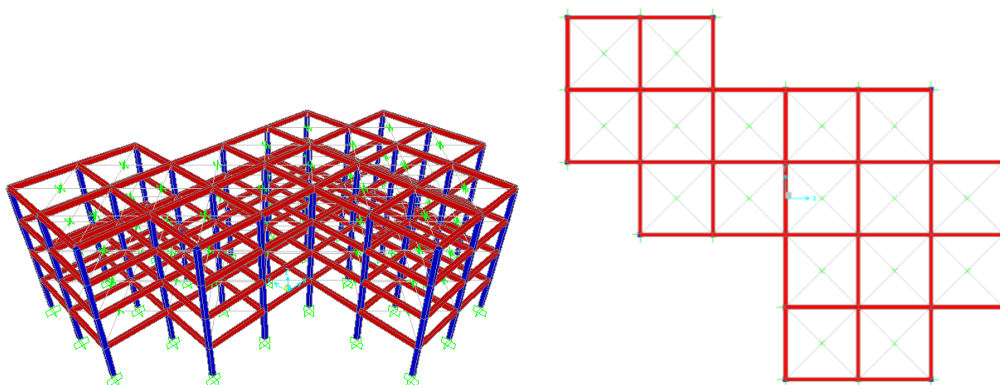
Razmatrajući modele zgrada sa aspekta geometrije, principa prihvatanja i prenošenja permanentnog i seizmičkog opterećenja gredama i stubovima (MRF - *moment resisting frame*), izdvajaju se četiri bitno različita modela:

- 4x6x3 bisimetričan u osnovi, regularan po visini, bez diskontinuiteta krutosti, dominantno smičuće ponašanje i torziono neosetljiv  $C_M=C_R$  (slika 3.61),



Slika 3.61 4x6x3 3D model i osnova okvirne zgrade

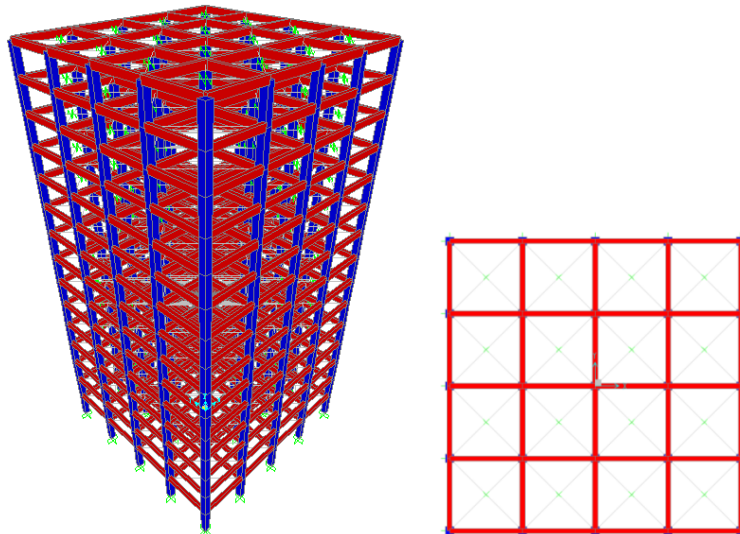
- 4x6x5-13 asimetričan u osnovi, regularan po visini, bez diskontinuiteta krutosti, dominantno smičuće ponašanje i torziono osetljiv  $C_M \neq C_R$  (slika 3.62),



Slika 3.62 4x6x5-13 3D model i osnova okvirne zgrade

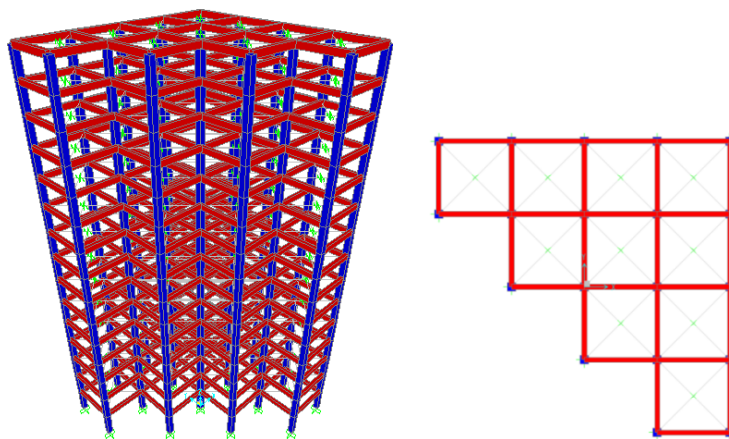


- 15x4x4 polisimetričan u osnovi, regularan po visini, bez diskontinuiteta krutosti, dominantno fleksiono ponašanje i torziona neosetljiv  $C_M=C_R$  (slika 3.63),



Slika 3.63 15x4x4 3D model i osnova okvirne zgrade

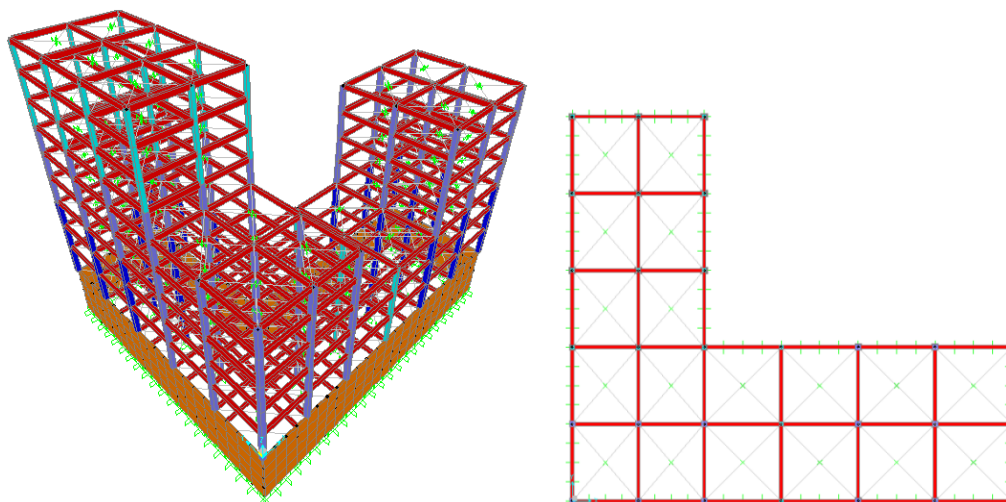
- 15x4x4-6 monosimetričan u osnovi, regularan po visini, bez diskontinuiteta krutosti, dominantno fleksiono ponašanje i torziona osjetljiv  $C_M \neq C_R$  (slika 3.64), gdje je  $C_M$  centar masa,  $C_R$  centar krutosti.



Slika 3.64 15x4x4-6 3D model i osnova okvirne zgrade

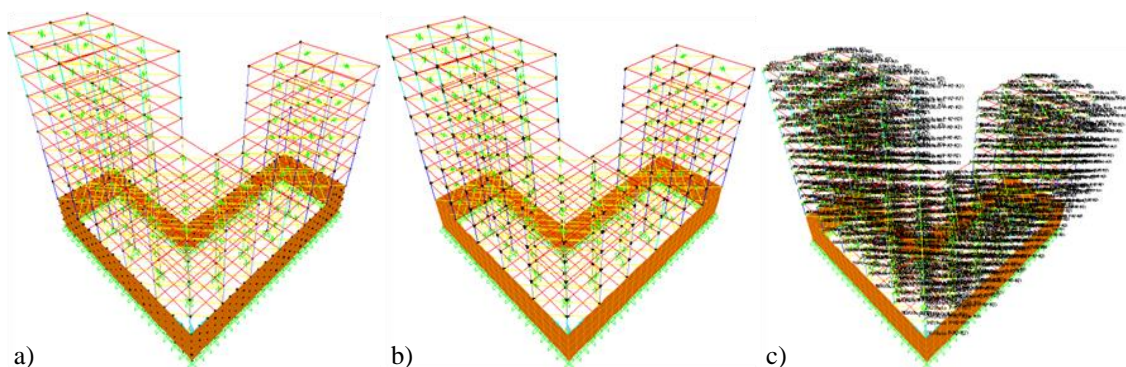
Dimenzije polja ova četiri modela okvirnih zgrada su 6x6m, dok je spratna visina 3.3m. Takođe, razmatran je i 9x6x5-12 3D model okvirne zgrade (dobijen od Prof. Brčića, dimenzionisan prema SRP propisima) asimetričan u osnovi, neregularan po visini i torziona osjetljiv (slika 3.65). Zgrada ima 9 spratova u jednom delu, dok u drugim delovima ima 7, 5 i 3 sprata i 2 podzemne etaže. Prvi broj u numeraciji modela zgrada

označava broj spratova, drugi broj polja u osnovi u  $x$  pravcu, treći broj polja u osnovi u  $y$  pravcu, a četvrti broj redukovanih polja u osnovi.



Slika 3.65 9x6x5-12 3D model i osnova okvirne zgrade

Reprezentativan primer principa modeliranja 3D modela zgrada prikazan je za numerički model zgrade 9x6x5-12. Na slici 3.66.a su prikazani čvorovi 3D modela, dok su na slici 3.66.b prikazane zone krutih elemenata, a na slici 3.66.c raspored plastičnih zglobova na sistemu. U tabeli 3.6 su prikazani parametri numeričkih 3D modela okvirnih zgrada.



Slika 3.66 9x6x5-12 3D model okvirne zgrade: a) čvorovi, b) zone krutih elemenata, c) plastični zglobovi

Tabela 3.6 Parametri numeričkih 3D modela okvirnih zgrada

model	broj konačnih elemenata	broj plastičnih zglobova	broj elemenata veze	broj jednačina ravnoteže
4x6x3	2944	584	144	672
4x6x5-13	2972	592	136	696
15x4x4	9825	1950	480	2250
15x4x4-6	7035	1410	300	1710
9x6x5-12	5914	1174	300	28386

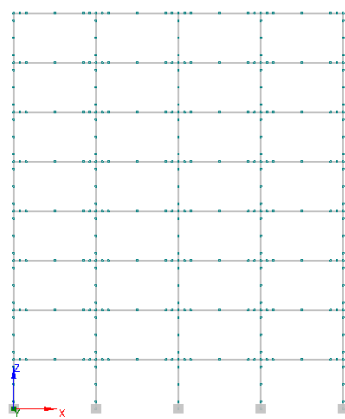
U procesu modeliranja okvira korišćen je linijski konačni element, tako da je opšti 2D model formiran uvažavajući kriterijume:

- sva pomeranja se odvijaju u *Descartes*-ovom koordinatnom sistemu:

$$U_x \in x, \quad U_y \in y, \quad \angle xy = 90^\circ, \quad x, y \in \mathfrak{R}^2, \quad (3.133)$$

- plastifikacija se odvija propagacijom neelastičnih defomacija preko vlakana,
- štapovi su podeljeni na elemente čije su procentualne dužine 15%-35%-35%-15%,
- u zonama izraženih nelinearnih defomacija izvršeno je progušćenje broja konačnih elemenata,
- eliminisani su efekti egzistencije ispune,
- sprečena su pomeranja i rotacije kod oslonaca (uklještenje).

Na slici 3.67 je prikazan 8x4 2D model okvira.



Slika 3.67 8x4 2D model okvira

### 3.8. PRELIMINARNA ANALIZA

Metode za analizu okvirnih zgrada prema propisima za projektovanje objekata u uslovima seizmičkog dejstva, a koje se zasnivaju na linearnom ponašanju materijala prilikom određivanja presečnih sila, zahtevaju da se na nivou modeliranja konstrukcije pretpostave dimenzije poprečnih preseka štapova (greda i stubova). Zatim se u postupku dimenzionisanja, za idealizovane dijagrame naponskog stanja betona i čelika, određuje količina i raspored armature po poprečnim presecima, a nakon toga u iteracijama koriguju preliminarne dimenzije poprečnih preseka i armature. Metode za analizu okvirnih zgrada prema performansama, a koje se zasnivaju na materijalno nelinearnom ponašanju betona i čelika, zahtevaju poznavanje dimenzija poprečnih preseka štapova,

količinu i raspored armature po poprečnim presecima pre procesiranja. Dakle, u fazi predprocesiranja se određuju dimenzije poprečnih preseka štapova, količina i raspored armature primenom metoda za analizu zgrada prema propisima za projektovanje objekata u uslovima seizmičkog dejstva.

Preliminarne analize 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela okvirnih zgrada su sprovedene primenom linearne statičke analize u softveru SAP 2000 v14 [333], dok su seizmičke sile određene spektralno-modalnom analizom prema EC 8 [66]. Ključni parametri koji participiraju u preliminarnoj spektralno-modalnoj analizi su (tabela 3.7):  $P_{NCR,10\%/50}$  referentna verovatnoća prekoračenja jednom u 50 godina referentnog seizmičkog dejstva za zahtev da se objekat ne sruši,  $T_{NCR}=475g$  (500g) referentni povratni period referentnog seizmičkog dejstva za zahtev da se objekat ne sruši,  $a_g=0.3g$  projektno ubrzanje tla, tip tla C, klasa značaja zgrade II,  $\gamma_I=1$  faktor značaja, klasa duktilnosti DCH i faktor ponašanja:

$$q = q_0 k_w, \quad (3.134)$$

gde je  $q_0$  osnovna vrednost faktora ponašanja zavisna od tipa konstrukcijskog sistema,  $k_w$  faktor koji uzima u obzir preovlađujuću vrstu loma konstrukcijskih sistema.

Tabela 3.7 Pregled selektovanih parametara za spektralno-modalnu analizu

model	$q_c$	$\alpha_u/\alpha_I$	$q_0$	$k_w$	$q$
4x6x3	4.5	1.3	5.85	1	5.85
4x6x5-13	4.5	1.15	5.40	1	5.20
15x4x4	4.5	1.3	5.85	1	5.85
15x4x4-6	4.5	1.15	5.40	1	5.20
9x6x5-12	4.5	1.04	4.68	1	4.68

Dodatne specifičnosti spektralno-modalne analize prema EC 8 [66]:

- mase za modalnu analizu su određene iz ukupnog stalnog i promenljivog opterećenja, koje je multiplicirano koeficijentima kombinacije  $\Psi_E=0.3$  za poslednji sprat i  $\Psi_E=0.15$  za ostale spratove,
- minimalan broj svojstvenih oblika koji je uzet pri prostornoj analizi zgrada:

$$k_{so} \geq 3\sqrt{n}, \quad T_k \leq 0.2s, \quad (3.135)$$

gde je  $k_{so}$  broj svojstvenih oblika koji se uzima u analizi,  $n$  broj spratova,  $T_k$  period vibracija  $k$ -tog svojstvenog oblika,

- zbir efektivnih modalnih masa za razmatrane svojstvene oblike vibracija iznosi najmanje 90% od ukupne mase konstrukcije,
- uzimaju se u obzir  $P$ - $\Delta$  efekti.

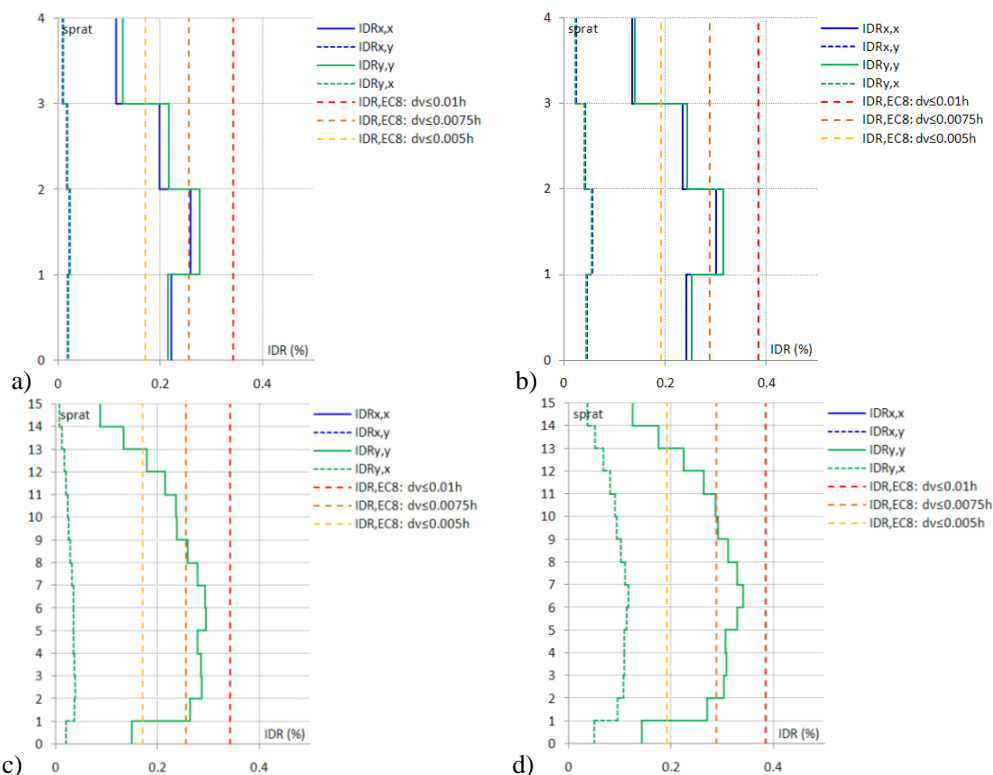
Dimenzionisanje je provedeno prema EC 2 [65] uvažavajući opšta i posebna pravila za betonske zgrade definisana prema EC 8 [66]. Ograničenje relativnog spratnog pomeranja sprovedeno je prema:

$$d_r v \leq (0.005 \div 0.01) h, \quad (3.136)$$

gde je  $h$  visina sprata,  $v$  faktor redukcije kojim se uzima u obzir niži povratni period seizmičkog događaja koji se odnosi na granično stanje upotrebljivosti ( $v=0.5$ ),  $d_r$  proračunsko međuspratno relativno horizontalno pomeranje, izračunato kao razlika između osrednjenih horizontalnih pomeranja  $d_s$  na vrhu i na dnu posmatranog sprata, pri čemu je  $d_s$ :

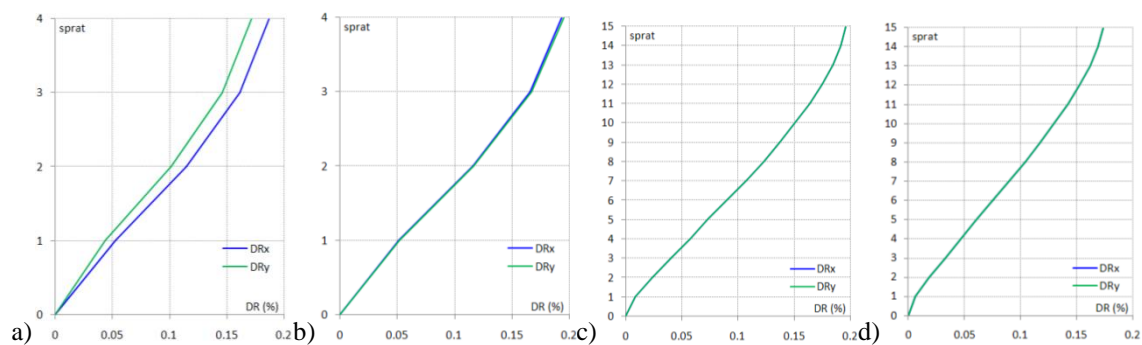
$$d_s = q_d d_e, \quad (3.137)$$

gde je  $d_s$  pomeranje tačke konstrukcijskog sistema usled projektnog seizmičkog dejstva,  $q_d$  faktor ponašanja za pomeranja (može se usvojiti da je jednak  $q$ ),  $d_e$  pomeranje iste tačke konstrukcijskog sistema koje je određeno prema linearnoj analizi zasnovanoj na projektnom spektru odgovora. Na slici 3.68 su prikazani međuspratni driftovi  $IDR$  4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela okvirmih zgrada i granične vrednosti pomeranja prema izrazu (3.136) u funkciji međuspratnog drifta  $IDR_{EC8}$  za X i Y pravce.



Slika 3.68 Međuspratni driftovi 3D modela okvirmih zgrada: a) 4x6x3, b) 4x6x5-13, c) 15x4x4, d) 15x4x4-6

Maksimalne vrednosti međuspratnih driftova, kod svih 3D modela okvirnih zgrada, su manje od vrednosti međuspratnog drifta  $IDR_{EC8}$ . Na slici 3.69 su prikazani globalni driftovi  $DR$  4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela okvirnih zgrada, a čije su maksimalne vrednosti manje od 0.2%.



Slika 3.69 Globalni driftovi 3D modela okvirnih zgrada: a) 4x6x3, b) 4x6x5-13, c) 15x4x4, d) 15x4x4-6

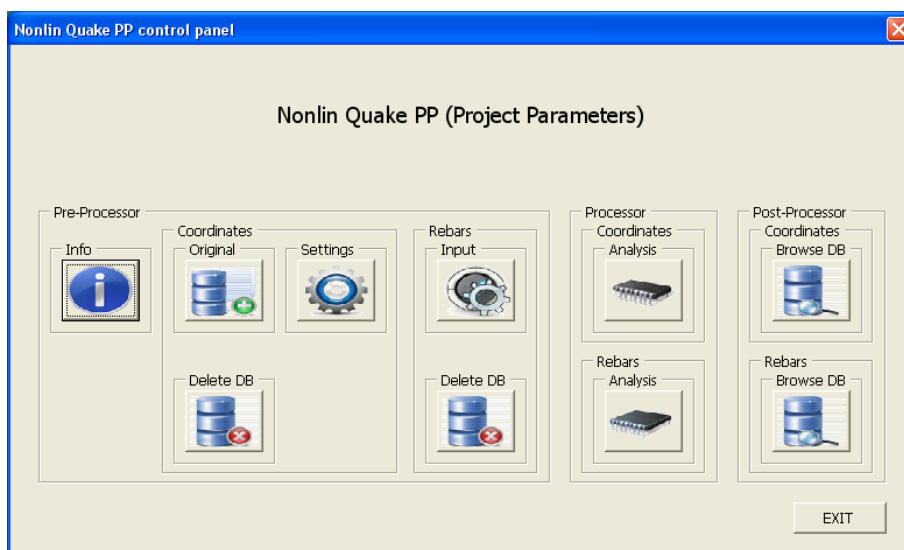
U *Prilogu C* su prikazane usvojene armature i poprečni preseci štapova okvirnih zgrada. Modeliranje armature kod stubova se sprovodi tako što se armatura vodi konstantno duž celog štapa, dok se kod greda posebno postavljaju armaturne šipke duž sredine raspona, a posebno na krajevima. Armatura  $A_1$  se postavlja u donju zonu poprečnog preseka grede, dok se armatura  $A_2$  postavlja u gornju zonu poprečnog preseka grede. Modeliranje poprečne armature (uzengija) sprovodi se direktno preko konstitutivnog numeričkog modela, tako da se ne zahteva dodatna intervencija u smislu postavljanja ove armature. Na taj način obezbeđena je lokalna duktilnost, kvantitet i efekat progušćenja uzengija, i sprečeno je otvaranje istih u zoni veze greda-stub za histerezisno ciklično ponašanje.

Modeliranje armaturnih šipki na nivou poprečnog preseka zahteva određivanje koordinata položaja i površine poprečnog preseka svake šipke pojedinačno, a što predstavlja obiman posao, s obzirom na veliki broj različitih poprečnih preseka. U cilju efikasnijeg modeliranja i manipulacije armaturnim šipkama razvijen je program *Nonlin Quake PP (Project Parameters)*, a čiji je kontrolni panel prikazan na slici 3.70. U *Nonlin Quake PP* se sprovodi generisanje koordinata položaja i površine poprečnog preseka svake šipke pojedinačno za grede i stubove, a takođe se sprovodi i rotacija koordinata svih čvorova 3D modela zgrade. Generalno razmatrajući, propagacija seizmičkih talasa u tlu je stohastičkog karaktera, a u stanicama se beleže akceleracije za dva ortogonalna pravca i to komponente FN i FP, a zatim se sprovodi proračun prema

*Nonlin Quake* GMP za uglove  $\theta_i$ . Procesiranje NSPA, NDA, INDA (IDA) i HINSDA analiza se sprovodi tako što se prethodno izvrši rotacija objekta za ugao  $\theta_i$  u *Nonlin Quake* PP, kako bi se razmatrao razvoj nelinearnih deformacija za komponentu zemljotresa pod uglom  $\theta_i$ :

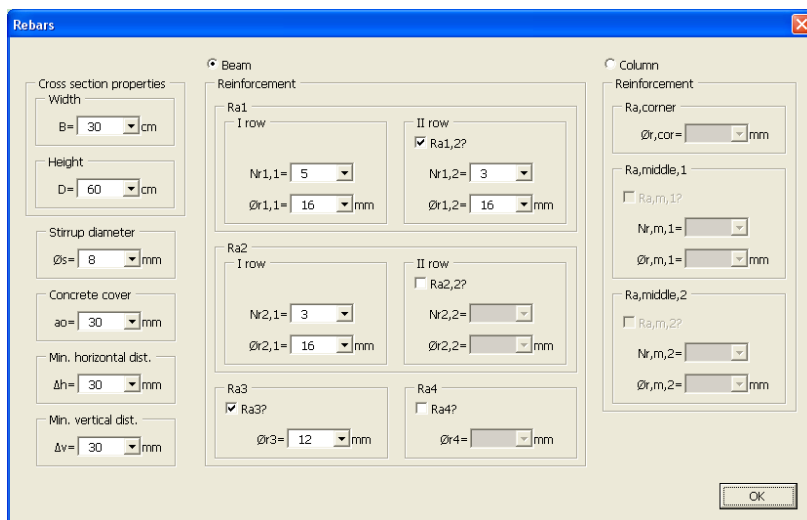
$$x_c = x_{new} + x_{old}, \quad y_c = y_{new} + y_{old}, \quad R_c = \sqrt{(x_c - x_1)^2 + (y_c - y_1)^2}, \quad (3.138)$$

$$X_c = x_c + R_c \cos \beta_c, \quad Y_c = y_c + R_c \sin \beta_c, \quad \beta_c = \theta_i + \arcsin \left( \frac{y_c - y_1}{R_c} \right). \quad (3.139)$$

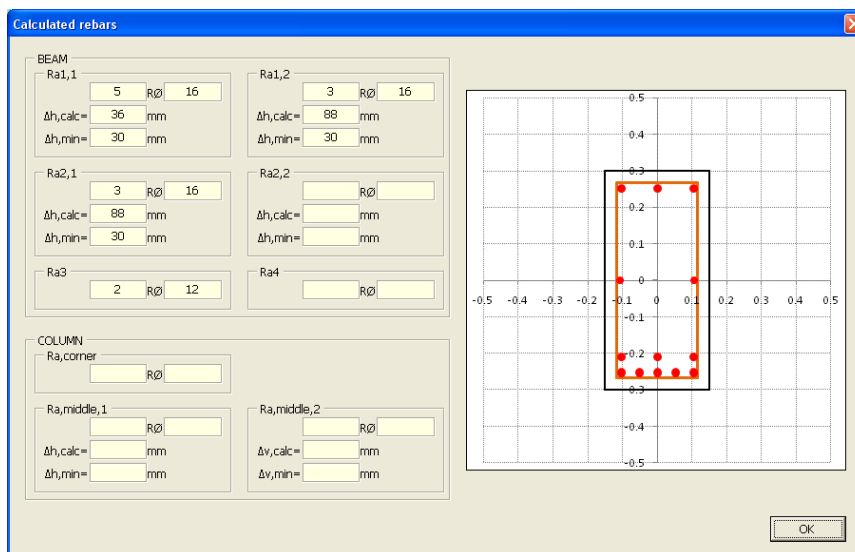


Slika 3.70 Kontrolni panel *Nonlin Quake* PP

Na slici 3.71 je prikazan interfejs za unos parametara za definisanje preseka i armaturnih šipki greda i stubova, dok je na slici 3.72 prikazan interfejs sa generisanim koordinatama položaja i površinama poprečnih preseka armaturnih šipki.

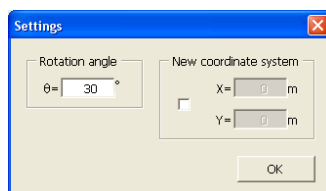


Slika 3.71 Interfejs za unos parametara za definisanje preseka i armaturnih šipki greda i stubova



Slika 3.72 Pregled generisanih koordinata položaja i površina poprečnih preseka armaturnih šipki

Na slici 3.73 je prikazan interfejs za unos parametara za proračun novih koordinata čvorova zgrade na osnovu ugla rotacije  $\theta_i$  i translacije lokalnog koordinatnog sistema zgrade u *Nonlin Quake PP*. Generisanje NSPA, INDA (IDA) i HINSDA *pushover* površi i anvelopa ciljnih pomeranja moguće je jedino razmatranjem objekta izloženog dejstvu komponenta zemljotresa pod različitim uglovima  $\theta_i$  u odnosu na N-S i E-W pravce.



Slika 3.73 Interfejs za unos parametara za proračun novih koordinata čvorova zgrade



# 4

## 4. ANALIZA NELINEARNOG PONAŠANJA OKVIRNIH ZGRADA

### 4.1. UVODNE NAPOMENE

U prethodnom poglavlju prezentovani su aspekti numeričkog modeliranja 3D modela okvirnih zgrada izloženih dejstvu zemljotresa, a takođe razvijen je i potpuno nov koncept prezentacije akceleroograma i spektara odgovora u 3D koordinatnom sistemu. Ovako prezentovani akceleroogrami i spektri odgovora prethodno su prošli faze: selekcije, formatiranja, konvertovanja, skaliranja, kalkulacije, procesiranja, filtriranja, generisanja i transformacije. Odgovor zgrade (BR - *building response*) za uslove dejstva zemljotresa, odnosno na osnovu prethodno pripremljenih i obrađenih akceleroograma, razmatra se u opštem nelinearanom domenu. U odnosu na klasičan tretman i prezentaciju odgovora zgrade na ravanskim okvirnim modelima, uvedeno je poboljšanje preko razmatranja odgovora u 3D koordinatnom sistemu.

### 4.2. NSPA ANALIZA

#### 4.2.1. TEORIJSKI ASPEKTI NSPA ANALIZE

Nelinearna statička seizmička analiza (NSPA - *Nonlinear Static Pushover Analysis*) se sprovodi na realnom 3D matematičkom modelu okvirne zgrade (MDOF - *multi-degree of freedom*), pri čemu se jednačine ravnoteže sistema određuju primenom inkrementalno-iterativne formulacije. Primena inkrementalnog koncepta u nelinearnoj

analizi se svodi na [139]:

- aproksimaciju celokupnog opterećenja podelom na dovoljan broj delova (inkremenata) opterećenja manjeg intenziteta koji se na sistem apliciraju sukcesivnim redosledom,
- aproksimaciju ukupnog nelinearnog ponašanja sistema sukcesivnom zamenom sistema, odnosno inkrementalnim ravnotežnim konfiguracijama i rešavanjem jednačina problema za inkrementalno opterećenje,
- dobijanje konačnog rešenja kao zbir inkrementalnih rešenja.

Po metodi konačnih elemenata (FEM - *Finite Element Method*) nelinearan statički problem se formuliše sistemom nelinearnih algebarskih jednačina oblika [16], [55]:

$$[K]\{u\} + \{F\} = 0, \quad (4.1)$$

odnosno:

$$\{P\} + \{F\} = 0, \quad (4.2)$$

gde je  $[K]$  matrica krutosti FEM modela,  $\{u\}$  vektor generalisanih pomeranja FEM modela,  $\{F\}$  vektor spoljašnjih generalisanih uticaja (opterećenja) FEM modela,  $\{P\}$  vektor unutrašnjih generalisanih sila FEM modela. Dosledna primena inkrementalnog koncepta u nelinearnoj analizi može da se opiše kao linearizacija u inkrementima, a rešenje kao zbir inkrementalnih linearnih rešenja. Jednačine problema (4.1) umesto za ukupno opterećenje rešavaju se za niz posebnih inkrementalnih opterećenja. U okviru svakog inkrementa pretpostavlja se da je sistem jednačina linearan. Na taj način rešenje nelinearnog problema se dobija kao zbir niza linearnih (inkrementalnih) rešenja. Opterećenje se deli na niz inkremenata, a u okviru svakog inkrementa sprovodi se iteracija, kako bi se izbalansiralo rezidualno opterećenje. Za dovoljno malu veličinu inkrementa rešenje konvergira ka tačnom rešenju. Jednačine (4.1) i (4.2) sada se transformišu u oblik:

$$[K_t]\{\Delta u\} + \lambda\{F\} = 0, \quad (4.3)$$

odnosno:

$$\{P\} + \lambda\{F\} = 0, \quad (4.4)$$

gde je  $[K_t]$  tangenta matrica krutosti FEM modela,  $\lambda$  parametar inkrementalnog opterećenja (odnos inkrementalnog i punog opterećenja). Diferenciranjem izraza (4.4) po promenljivoj  $\lambda$  dobija se:

$$\frac{d\{P\}}{d\{u\}} \frac{d\{u\}}{d\lambda} + \{F\} = [K_t] \frac{d\{u\}}{d\lambda} + \{F\} = 0, \quad (4.5)$$

odnosno:

$$\frac{d\{u\}}{d\lambda} = -[K_t]^{-1} \{F\}, \quad (4.6)$$

pri čemu je tangenta matrica krutosti modela:

$$[K_t] = \frac{d\{P\}}{d\{u\}}. \quad (4.7)$$

U skladu sa konceptom inkrementalnog rešenja je:

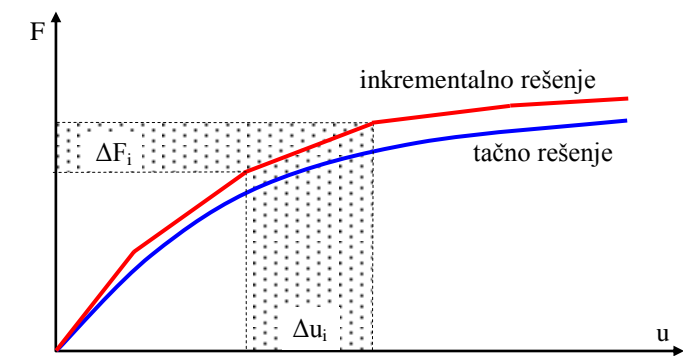
$$\{\Delta u\}_i = -[K_t]^{-1} \Delta \lambda_i \{F\} = -[K_t]^{-1} \{\Delta F\}_i, \quad (4.8)$$

$$\{\Delta u\}_i = \{u\}_{i+1} - \{u\}_i, \quad (4.9)$$

$$\Delta \lambda_i = \lambda_{i+1} - \lambda_i, \quad (4.10)$$

$$\{\Delta F\}_i = \{F\}_{i+1} - \{F\}_i = \Delta \lambda_i \{F\}. \quad (4.11)$$

Za početni inkrement su pomeranja  $\{u\}_{0=0}$  tako da je tangenta matrica krutosti  $[K_t]$  jednaka matrici krutosti koja ne zavisi od pomeranja, pa se zbog toga može smatrati kao poznata (inicijalna matrica krutosti). Iz izraza (4.8), (4.9), (4.10) i (4.11) se određuju inkrementi vektora pomeranja za inkremente opterećenja i tangenta matricu krutosti modela, koja se formuliše za referentno stanje na početku inkrementa. Na slici 4.1 je dat prikaz suštine inkrementalnog postupka.



Slika 4.1 Odstupanje inkrementalnog rešenja od tačnog [16], [55]

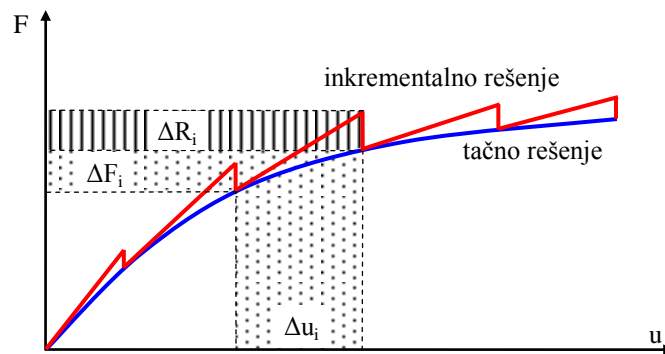
Opšti  $i$ -ti korak inkrementalnog postupka obuhvata:

- formiranje tangente matrice krutosti  $[K_t]_i$  numeričkog modela,
- određivanje inkremenata vektora opterećenja  $\{\Delta F\}_i$  numeričkog modela,
- određivanje inkremenata vektora generalisanih pomeranja  $\{\Delta u\}_i$ , rešavanjem sistema linearnih algebarskih jednačina za  $[K_t]_i$  i  $\{\Delta F\}_i$ ,
- određivanje inkremenata uticaja u konačnom elementu (deformacije, naponi, sile

u preseccima),

- određivanje ukupne vrednosti generalisanih pomeranja inkrementalnim (kumulativnim) sabiranjem, tj. ravnotežnog stanja koje je referentno za sledeći inkrement.

Razlog za pojavu greške čistog inkrementalnog rešenja je sprovedena linearizacija u okviru inkrementa, odnosno odstupanje tangente linearne aproksimacije modela od stvarnog ponašanja sistema. Tačnost aproksimacije može da se poveća ako se smanji veličina inkrementa, ali je to povezano sa smanjenjem efikasnosti analize. Veličina greške može da se odredi iz uslova ravnoteže na kraju inkrementa. Kao posledica linearizacije, javljaju se neuravnotežena (rezidualna) opterećenja koja su mera odstupanja inkrementalnog rešenja od tačnog. Ukoliko se ta rezidualna opterećenja dodaju na spoljašnja u narednom inkrementu, greška se može smanjiti (slika 4.2).



Slika 4.2 Smanjenje greške inkrementalnog rešenja [16], [55]

Vektor rezidualnog opterećenja  $\{R\}_i$  može se prikazati kao odstupanje od ravnoteže:

$$\{\Delta R\}_i = \{\Delta F\}_i - [K_t]_{i+1} \{\Delta u\}_i. \quad (4.12)$$

Korekcija greške postiže se dodavanjem rezidualnog opterećenja na spoljašnje opterećenje u narednom inkrementu:

$$\{\Delta F\}_{i+1}^R = \{\Delta F\}_{i+1} + \{\Delta R\}_i. \quad (4.13)$$

U čisto inkrementalnom postupku sa korekcijom rezidualno opterećenje se dodaje na spoljašnje opterećenje u narednom inkrementu, čime se greška smanjuje, ali ne eliminiše. Primena čisto iterativne metode u nelinearnoj analizi je alternativni koncept u osnovi predviđen za realizaciju sa celokupnim opterećenjem. Najbolji rezultati se postižu ako se kombinuje inkrementalni i iterativni postupak. U prvoj iteraciji pojavljuju se rezidualna opterećenja zbog neispunjavanja uslova ravnoteže. Ako se naredne iteracije realizuju samo sa rezidualnim opterećenjima, uz korekciju tangentne matrice

krutosti, postupak može da konvergira uz minimiziranje rezidualnog opterećenja.

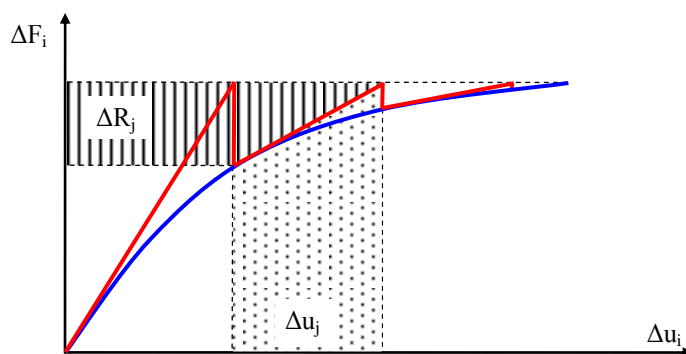
Pri formulisanju iterativne metode polazi se od izraza za razvoj u *Taylor*-ov red vektora rezidualnih sila u okolini pomeranja  $\{u\}_j$ :

$$\{R\}_{j+1} = \{R\}_j + \frac{d\{R\}_j}{d\{u\}_j} \{\Delta u\}_j. \quad (4.14)$$

Iz uslova da rezidualno opterećenje ispunjava uslove ravnoteže  $\{R\}_{j+1}=0$ , dobija se:

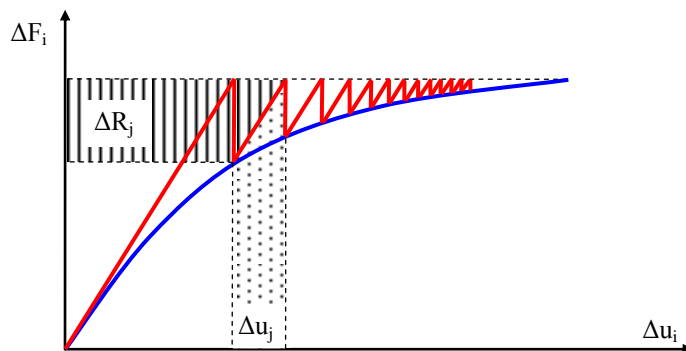
$$\{\Delta u\}_j = -[K_t]^{-1} \{R\}_j. \quad (4.15)$$

Poslednja dva izraza predstavljaju osnovu *Newton-Raphson*-ove iterativne metode (NR - *Newton-Raphson method*) (slika 4.3).



Slika 4.3 Standardna *Newton-Raphson*-ova iterativna metoda (NR) [16], [55]

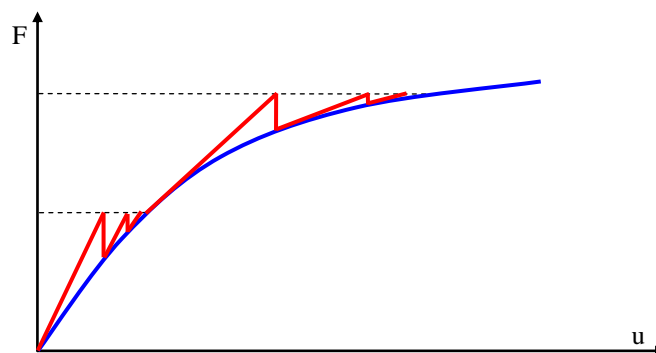
Glavni nedostatak *Newton-Raphson*-ove iterativne metode je potreba formiranja tangentne matrice krutosti u svakoj iteraciji. Usvajanjem konstantne matrice krutosti u okviru inkrementa dobija se modifikovana iterativna metoda (mNR - *modified Newton-Raphson method*) (slika 4.4). Konvergencija te metode je sporija u odnosu na standardni *Newton-Raphson*-ov iterativni postupak.



Slika 4.4 Modifikovana *Newton-Raphson*-ova iterativna metoda (mNR) [16], [55]

Pomoću inkrementalnih metoda se dobija potpuni uvid u tok promene zavisnosti

opterećenje-pomeranje, odnosno uvid u razvoj naponsko-deformacijskog stanja u zavisnosti od prirasta opterećenja. Međutim, inkrementalne metode zahtevaju veći utrošak vremena proračuna od iterativnih metoda. Takođe, nije uvek lako pogoditi veličinu inkrementa opterećenja sa kojim se dobija dobra aproksimacija. Iterativne metode su lakše za primenu od inkrementalnih i brže dovode do rešenja ukoliko se ne radi o velikom broju slučajeva opterećenja. Međutim, ove metode nisu uvek pouzdane, naročito ako se radi o problemima materijalne nelinearnosti. Mešovite metode predstavljaju kombinaciju inkrementalnih i iterativnih metoda. Sa ovim metodama se najefikasnije rešavaju nelinearni problemi. Opterećenje se deli na niz inkrementata, a u okviru svakog inkrementa sprovodi se iteracija, kako bi se izbalansiralo rezidualno opterećenje. Mešovitim metodama se kombinuju dobre strane inkrementalnih i iterativnih metoda, a minimiziraju njihovi nedostaci. Na slici 4.5 prikazan je način rešavanja nelinearnih problema po mešovitoj inkrementalno-iterativnoj metodi.



Slika 4.5 Inkrementalno-iterativna metoda [16], [55]

Varijante primene *Newton-Raphson*-ovog iterativnog postupka razlikuju se samo po pitanju korekcije tangentne matrice krutosti sistema. Ako se za parametre koji definišu kriterijum inkrementalno-iterativnog postupka usvoji da je  $n_s$  broj korekcija matrice krutosti po iteracijama, a  $n_{it}$  broj iteracija po jednom inkrementu, moguće je razlikovati nekoliko tipova inkrementalno-iterativnih postupaka:

- $n_s = n_{it}$  - matrica krutosti se koriguje u svakoj iteraciji (NR),
- $n_s = 1$  - matrica krutosti se koriguje samo u prvoj iteraciji inkrementa (mNR),
- $1 < n_s < n_{it}$  - matrica krutosti se koriguje  $n_s$  puta u svakom inkrementu (NRmNR).

Izbor iterativne metode zavisi od zahteva za obezbeđenjem određene brzine konvergencije. Postupci zasnovani na tangentnoj aproksimaciji imaju relativno brzu konvergenciju. Njihova nepovoljna osobina je nužnost formiranja tangentne matrice

krutosti sistema i rešavanje odgovarajućeg sistema jednačina u svakoj iteraciji. Definisanjem broja inkremenata utiče se na tačnost, a u nekim slučajevima i na mogućnost dobijanja rešenja. Suviše mali broj inkremenata može da bude uzrok divergentnog ponašanja, a nepotrebno veliki broj inkremenata ugrožava numeričku efikasnost rešenja. Definisanjem maksimalnog broja iteracija određuje se broj korekcija rezidualnog opterećenja u svakom inkrementu. Veliki broj korekcija povećava tačnost, ali i vreme trajanja analize. Ta opcija predstavlja izbor između NR i mNR procedure.

Pojave graničnih stanja (pojava prslina, lom betona, u pritisnutoj zoni, lom armature, pojava plastičnih zglobova, gubitak stabilnosti) kontinualni su efekti koji se, zbog suštine inkrementalnog postupka, tretiraju kao trenutni. Standardni iterativni postupci u tim slučajevima pokazuju osobine divergencije, čak i za male veličine inkrementa. U ovakvim situacijama moguća je pojava divergencije usled pada krutosti i pri malom priraštaju lateralnog seizmičkog opterećenja. Tada se za određivanje graničnog opterećenja koriste inkrementi pomeranja, odnosno kontrola inkrementalnog priraštaja pomeranja. Ovakvi sistemi koji se odlikuju redukcijom krutosti sa povećanjem opterećenja poznati su kao sistemi koji omekšavaju (*softening system*).

Prethodno izloženi postupak nelinearne analize implementiran je u softveru *SeismoStruct* [339] i SAP 2000 [333], gde se, u slučaju NSPA analiza MDOF sistema, prvo sprovodi analiza za uticaje vertikalnog opterećenja, a zatim koristi matrica krutosti na kraju date analize za analizu lateralnih seizmičkih sila. Na taj način se uzima u obzir analiza sistema u realnim uslovima rada, gde se prvo odvija deformacija okvira za uticaje vertikalnog opterećenja, a zatim na deformisan sistem apliciraju lateralne seizmičke sile. Takođe, i u fazi proračuna FEM modela za uticaje lateralnih seizmičkih sila na sistemu je aplicirano vertikalno opterećenje, a čime su i deformacije u inkrementalnim konfiguracijama sistema rezultat uticaja vertikalnih i horizontalnih sila.

Primenom prethodno izložene inkrementalno-iterativne procedure lateralne seizmičke sile se postepeno povećavaju uz konstantno praćenje odgovora konstrukcije, pa je to postupak kontrole inkrementalnog priraštaja opterećenja (*load control*). Sa druge strane, ukoliko se kontrola sprovodi prema pomeranju govori se o postupku kontrole inkrementalnog priraštaja pomeranja (*response control*). Ukoliko se pođe od jednačina (4.1) i uvodeći vektor rezidualnih sila u analizu, sistem nelinearnih algebarskih jednačina se može formulisati u obliku [228]:

$$\{R\}_{i+1} = \{F\}_{i+1} - \{P\} = 0. \quad (4.16)$$

U analizi inkrementalnog priraštaja pomeranja problem (4.16) se može formulirati kao rešenje jednačine:

$$\{R\}_{i+1} \equiv \lambda_{i+1} \{F\}_0 - \{P\} = 0, \quad (4.17)$$

gde je:

$$\lambda_{i+1} = \lambda_i + \Delta\lambda_i. \quad (4.18)$$

Sada je potrebno uzeti u obzir i dodatnu jednačinu da bi se dobilo rešenje sistema. Prema [55] kontrola priraštaja pomeranja se izvršava zahtevajući da je u svakom inkrementu:

$$\{\Delta u\}_i^T \{\Delta u\}_i = \Delta l^2, \quad (4.19)$$

gde je  $\Delta l$  unapred definisana dužina u prostoru  $i+1$  dimenzija. Za  $i$ -tu iteraciju generalno rešenje se dobija iz:

$$\begin{aligned} \{R\}_{i+1}^i &= \lambda_{i+1}^i \{F\}_0 - \{P\}_{i+1}^i \\ \{R\}_{i+1}^{i+1} &\approx \{R\}_{i+1}^i + d\lambda_{i+1}^i \{F\}_0 - [K_t]^i d\{u\}_i^i, \end{aligned} \quad (4.20)$$

dok se rešenje za inkrementalnu situaciju za pomeranje  $u$  dobija iz:

$$\begin{aligned} d\{u\}_i^i &= ([K_t]^i)^{-1} (\{R\}_{i+1}^i + d\lambda_i^i \{F\}_0), \\ d\{\tilde{u}\}_i^i &= d\{\bar{u}\}_i^i + d\lambda_i^i d\{\hat{u}\}_i^i, \end{aligned} \quad (4.21)$$

pri čemu je:

$$\begin{aligned} d\{\bar{u}\}_i^i &= ([K_t]^i)^{-1} \{R\}_{i+1}^i \\ d\{\hat{u}\}_i^i &= ([K_t]^i)^{-1} \{F\}_0. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Uzimajući u obzir (4.19) dobija se:

$$(\{\Delta u\}_i^{i-1} + d\{u\}_i^i)^T (\{\Delta u\}_i^{i-1} + d\{u\}_i^i) = \Delta l^2. \quad (4.23)$$

Substitucijom (4.21) u (4.23) kvadratna jednačina postaje upotrebljiva za postizanje rešenja preostale nepoznate  $d\lambda_i^i$ .

#### 4.2.2. NSPA *PUSHOVER* KRIVA: DEFINICIJA I TIPOLOGIJA

Generalno razmatrajući odgovor NSPA analize predstavlja se, u kapacitativnom domenu  $CD_{NSPA}$ , skupom diskretnih uređenih parova inženjerskog parametra zahteva  $EDP_{f,i}$  za odgovarajuće inkremente inženjerskog parametra zahteva  $EDP_{d,i}$  (*engineering demand parameter*):

$$CD_{NSPA} = \bigcup_{i=1}^n \langle EDP_{d,i}, EDP_{f,i} \rangle, \quad (4.24)$$

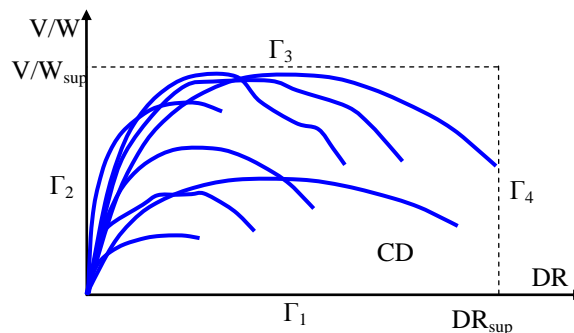
dok odgovarajuća NSA *pushover* kriva (PC - *pushover curve*) predstavlja interpolirane



diskretne uređene parove  $\langle EDP_{d,i}, EDP_{f,i} \rangle$ . Kapacitativan domen je definisan granicama  $\Gamma_i$  (slika 4.6):

$$CD: \begin{cases} \Gamma_1 : DR \in [0, +\infty) \wedge V/W = 0 \\ \Gamma_2 : DR = 0 \wedge V/W \in [0, +\infty) \\ \Gamma_3 : DR \in [0, +\infty) \wedge V/W = (V/W)_{sup} \\ \Gamma_4 : DR = DR_{sup} \wedge V/W \in [0, +\infty) \end{cases}, \quad (4.25)$$

gde je  $\Gamma_1$  globalni drift u oznaci  $DR$  (donja granica ili abscisa),  $\Gamma_2$  relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $V/W$  (leva granica ili ordinata),  $\Gamma_3$  gornja granica za supremum  $(V/W)_{sup}$ ,  $\Gamma_4$  desna granica za supremum  $DR_{sup}$ .



Slika 4.6 Opšti modeli odgovora zgrada u kapacitativnom domenu za jedan pravac

U slučaju odgovora NSPA analize u kapacitativnom domenu  $CD_{NSPA}$ , za inženjerski parametar zahteva  $EDP_f$  selektuje se relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $(V/W)$ , dok se za inženjerski parametar zahteva  $EDP_d$  selektuje globalni drift  $DR$ , tako da se za skup diskretnih uređenih parova  $DR_i$  i  $(V/W)_i$  može pisati:

$$CD_{NSPA} = \bigcup_{i=1}^n \langle DR_i, (V/W)_i \rangle, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+, \quad (4.26)$$

gde je  $V$  ukupna smičuća sila u osnovi objekta (*base shear force*),  $W$  ukupna težina objekta,  $DR$  globalni drift (*global drift*):

$$DR = \frac{D}{H}, \quad (4.27)$$

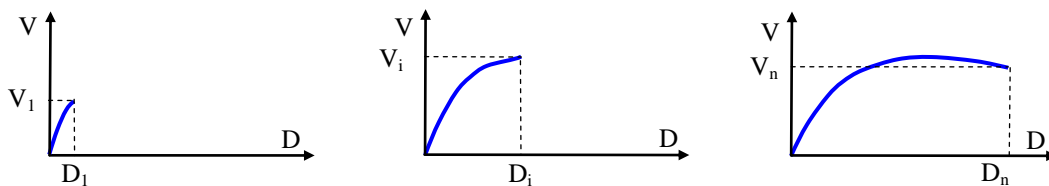
pri čemu je  $D$  horizontalno pomeranje najvišeg čvora (*top displacement*) u centru krutosti,  $H$  visina objekta. Model okvirne zgrade se izlaže dejstvu lateralnog seizmičkog opterećenja, a odgovor sistema se prati preko promene pomeranja najvišeg čvora zgrade. Inkrementalno-iterativna procedura se izvršava sve dok se ne dostigne unapred definisani nivo horizontalnog pomeranja  $D_{max}$  ili dok ne nastupi kolaps konstrukcije (slika 4.7). S obzirom da se odgovor sistema prema NSPA analizi, u kapacitativnom

domenu, razmatra u inkrementalnim ( $i$ ) proračunskim situacijama, tada se za pomeranje kontrolnog čvora sistema u inkrementalnoj situaciji  $D^{(i)}$  može pisati:

$$D^{(i)} = D^{(i-1)} + \Delta D^{(i)}, \quad (4.28)$$

dok se za odgovarajuću ukupnu smičuću silu u osnovi objekta u inkrementalnoj situaciji  $V^{(i)}$  može pisati:

$$V^{(i)} = V^{(i-1)} + \Delta V^{(i)}. \quad (4.29)$$



Slika 4.7 Inkrementalni razvoj nelinearnih deformacija

Ukupno pomeranje sistema  $D$  određuje se iz pomeranja na granici tečenja  $D_y$  i iz inkrementalnih nelinearnih situacija:

$$D = D_y + \sum_{i=1}^n \Delta D^{(i)}, \quad (4.30)$$

a odgovarajuća ukupna smičuća sila u osnovi objekta  $V$  se određuje iz ukupne smičuće sile u osnovi objekta na granici tečenja  $V_y$  i iz inkrementalnih nelinearnih situacija:

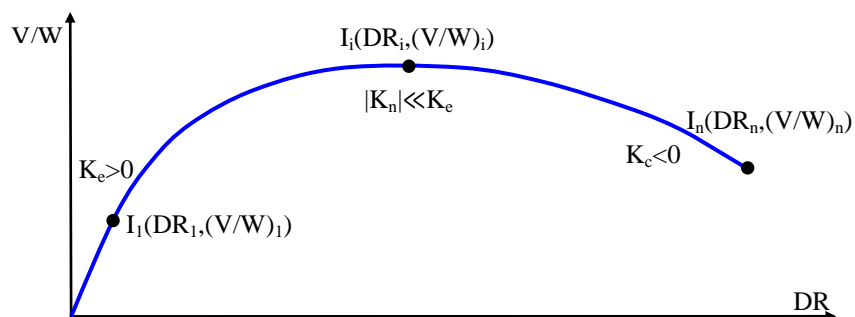
$$V = V_y + \sum_{i=1}^n \Delta V^{(i)}. \quad (4.31)$$

Definicija 4.1: *NSPA pushover kriva 3D modela zgrade  $V/W=f(DR)_\theta$  je spline-om interpolirana kriva generisana povezivanjem diskretnih vrednosti iz inkrementalnih situacija  $I_i(DR_i, (V/W)_i)$  NSPA analiza za  $\theta_i$  ugao (slika 4.8):*

$$V/W = f(DR)_\theta, \quad (4.32)$$

pri čemu je:

$$I_i(DR_i, (V/W)_i) \in (V/W) = f(DR)_\theta, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.33)$$



Slika 4.8 NSPA pushover kriva  $V/W=f(DR)_\theta$

Reprezentativan primer NSPA *pushover* krive, za model okvirne zgrade prikazan na slici 4.8, karakterišu tri bitno različita domena: linearno-elastično ponašanje za koje je elastična krutost sistema  $K_e > 0$ , nelinearno ponašanje za koje je nelinearna krutost sistema  $|K_n| \ll K_e$  i kolaps koji karakteriše negativna krutost sistema  $K_c < 0$  i redukcija nosivosti. Tipologija NSPA *pushover* krivih, uvedena u ovom istraživanju, bazira se na analizi nelinearnog odgovora 3D okvirnih modela zgrada i na bazi odgovora određenog broja 2D višespratnih okvira [39], s obzirom da isti participiraju kao konstruktivne celine okvirnih zgrada. Kriterijumi na osnovu kojih je izvršena tipizacija NSPA *pushover* krivih su: globalna duktilnost  $\mu$ , globalni driftovi za performansne nivoe armiranobetonskih okvirnih sistema (*structural performance levels*) i egzistencija linearnog (L - *linear*), nelinearnog (N - *nonlinear*) i kolapsnog (C - *collapse*) subdomena:

$$L = [0, DR_y \pm \varepsilon_1], \quad N = [DR_y \pm \varepsilon_1, DR_c \pm \varepsilon_2], \quad C = [DR_c \pm \varepsilon_2, DR_{max}]. \quad (4.34)$$

U Izrazu (4.34)  $DR_y$  je globalni drift za nivo granice tečenja,  $DR_c$  globalni drift za nivo iniciranja kolapsnog subdomena,  $DR_{max}$  globalni drift za nivo maksimalnih deformacija i  $\varepsilon_i$  su faktori korekcije za granične kriterijume. Globalni driftovi za performansne nivoe armiranobetonskih okvirnih sistema su:  $DR_{IO}$  trenutna useljivost (IO - *immediate occupancy*),  $DR_{LS}$  zaštita života (LS - *life safety*) i  $DR_{CP}$  zaštita od rušenja (CP - *collapse prevention*). Veliki broj numeričkih testova sprovedenih na okvirnim sistemima ukazuje na varijaciju u odgovoru pri nelinearnom ponašanju sistema, a prezentovano preko NSPA *pushover* krivih [39]. Generalna podela okvirnih zgrada prema nelinearnom odgovoru je na zgrade visoke duktilnosti (DCH - *high class ductility*), srednje duktilnosti (DCM - *medium class ductility*) i niske duktilnosti (DCL - *low class ductility*) [66].

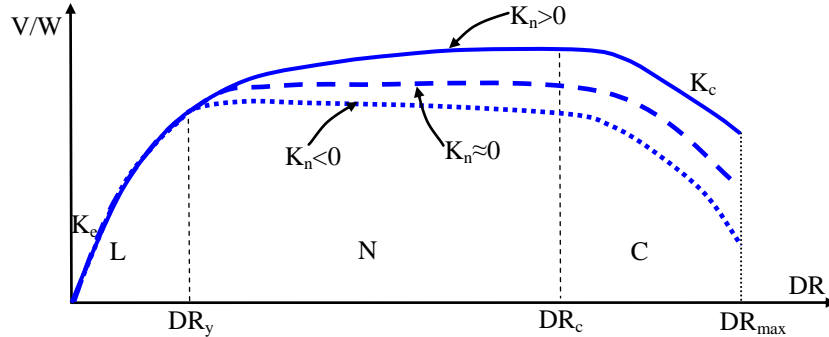
Prvi slučaj nelinearnog odgovora karakteriše visoka duktilnost DCH na osnovu čega su izvedeni stavovi (slika 4.9) [36]:

$$\exists L, \exists N, \exists C, \quad K_e > 0, \quad |K_n| < K_e, \quad K_c < 0, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.35)$$

Izražen N domen ukazuje na povoljno duktilno ponašanje zgrada, s obzirom na mogućnost znatne disipacije histerezisne energije i plastifikaciju sistema povoljnim mehanizmima loma (*ductile behavior*), gde su moguće varijante krutosti sistema  $K_n$ :

- $K_n > 0$  (karakteristično za odgovor sistema kada se ne uzimaju u obzir  $P-\Delta$  efekti):

$$\mu_{IO} \approx 1 \geq \frac{K_n > 0}{DR_{IO=0.5\%} H} \frac{D}{D_y}, \quad \mu_{LS} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{LS=1.5\%} H}{D_y}, \quad \mu_{CP} = \frac{D_c}{D_y} \geq \frac{K_n \ll K_e}{DR_{CP=2.5\%} H} \frac{D}{D_y}, \quad (4.36)$$



Slika 4.9 Odgovori sistema sa duktilnim DCH ponašanjem  $\exists L$ ,  $\exists N$  i  $\exists C$

- $K_n \approx 0$  (karakteristično za odgovor sistema kada se uzimaju u obzir statički  $P$ - $\Delta$  efekti):

$$\mu_{IO} \approx 1 \geq \frac{K_n \approx 0}{DR_{IO=0.5\%} H} \frac{D}{D_y}, \quad \mu_{LS} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{LS=1.5\%} H}{D_y}, \quad \mu_{CP} = \frac{D_c}{D_y} \geq \frac{DR_{CP=2.5\%} H}{D_y}, \quad (4.37)$$

- $K_n < 0$  (karakteristično za odgovor sistema kada se uzimaju u obzir statički i dinamički  $P$ - $\Delta$  efekti):

$$\mu_{IO} \approx 1 \geq \frac{K_n < 0}{DR_{IO=0.5\%} H} \frac{D}{D_y}, \quad \mu_{LS} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{LS=1.5\%} H}{D_y}, \quad \mu_{CP} = \frac{D_c}{D_y} \geq \frac{|K_n| \ll K_e}{DR_{CP=2.5\%} H} \frac{D}{D_y}, \quad (4.38)$$

gde je  $\mu_{IO}$  duktilnost za performansni nivo IO,  $\mu_{LS}$  duktilnost za performansni nivo LS,  $\mu_{CP}$  duktilnost za performansni nivo CP,  $D_c$  deformacija sistema na granici iniciranja kolapsa. Razmatranje nastanka kolapsa sistema je kompleksan problem i zahteva višekriterijumsku i višeparametarsku analizu, međutim može se konstatovati da ukoliko je  $K_n > 0$ , tada kolaps konstrukcije nastupa u C domenu. Ukoliko je  $K_n \approx 0$ , tada kolaps može nastupiti i u N i u C domenu, a zavisi od nivoa  $DR_{CP}$ , a ako je  $K_n < 0$  tada je iniciranje kolapsa funkcija stepena redukcije nosivosti sistema i  $DR_{CP}$ , pri čemu će sa velikom verovatnoćom nastupiti u N domenu.

Drugi slučaj nelinearnog odgovora karakteriše DCM i DCH duktilnost pri čemu nema jasno izraženog C domena (slika 4.10):

$$\exists L, \exists N, \quad K_e > 0, \quad |K_n| < K_e, \quad K_c = 0, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.39)$$

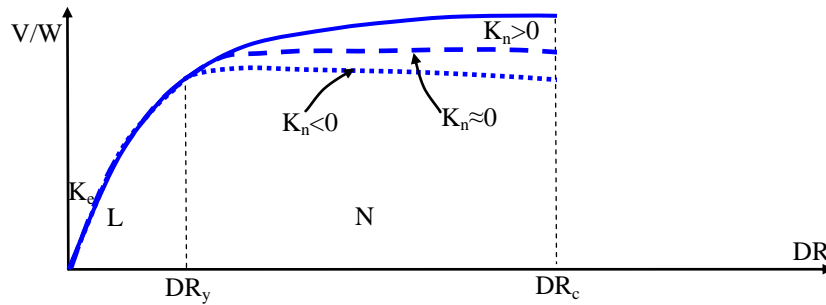
Ovakav odgovor sistema karakteriše egzistencija L i N domena, a sa druge strane,

ovakav odgovor sistema može biti i problem numeričkog rešenja, jer je za okvirne sisteme zgrada potreban veliki broj inkremenata i iteracija, a takođe potrebno je i poštiti kriterijume tolerancije za rezidualno (neizbalansirano) opterećenje. Moguće varijante krutosti sistema  $K_n$  su:

-  $K_n > 0$  (karakteristično za odgovor sistema kada se ne uzimaju u obzir  $P-\Delta$  efekti):

$$\mu_{IO} \approx 1 \geq \frac{DR_{IO=0.5\%}H}{D_y}, \quad \mu_{LS} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{LS=1.5\%}H}{D_y}, \quad \mu_{CP} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{CP=2.5\%}H}{D_y}, \quad (4.40)$$

za  $K_n \ll K_e$



Slika 4.10 Odgovori sistema sa duktilnim DCM i DCH ponašanjem  $\exists L, \exists N$  i  $\nexists C$

-  $K_n \approx 0$  (karakteristično za odgovor sistema kada se uzimaju u obzir statički  $P-\Delta$  efekti):

$$\mu_{IO} \approx 1 \geq \frac{DR_{IO=0.5\%}H}{D_y}, \quad \mu_{LS} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{LS=1.5\%}H}{D_y}, \quad \mu_{CP} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{CP=2.5\%}H}{D_y}, \quad (4.41)$$

za  $K_n \approx 0$

-  $K_n < 0$  (karakteristično za odgovor sistema kada se uzimaju u obzir statički i dinamički  $P-\Delta$  efekti):

$$\mu_{IO} \approx 1 \geq \frac{DR_{IO=0.5\%}H}{D_y}, \quad \mu_{LS} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{LS=1.5\%}H}{D_y}, \quad \mu_{CP} = \frac{D}{D_y} \geq \frac{DR_{CP=2.5\%}H}{D_y}, \quad (4.42)$$

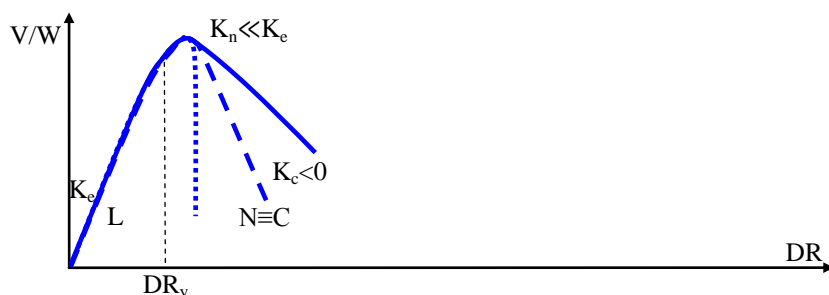
za  $|K_n| \ll K_e$

Treći slučaj nelinearnog odgovora karakteriše nizak nivo duktilnosti ili neduktilno ponašanje (*brittle behavior*), pri čemu nema jasno izraženog N i C domena (slika 4.11):

$$\exists L, \exists N \equiv C, \quad K_e > 0, \quad K_n < 0, \quad K_c < 0, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.43)$$

Moguće varijante duktilnosti sistema su:

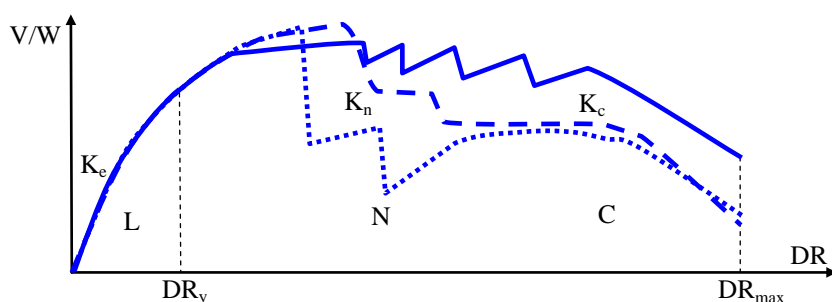
$$\mu_{IO} \approx 1 \geq \frac{DR_{IO=0.5\%}H}{D_y}, \quad \mu_{LS} = \frac{DR_{LS}H}{D_y}, \quad \mu_{CP} = \frac{DR_{CP}H}{D_y}. \quad (4.44)$$



Slika 4.11 Odstavak sistema sa niskim nivoom duktilnosti  $\exists L$ ,  $\exists N$  (ili  $\nexists N$ ),  $\exists C$  (ili  $\nexists C$ )

Prethodno su prezentovani generalizovani modeli nelinearnog ponašanja, međutim u određenim situacijama odgovor sistema može pripadati prelaznoj kategoriji. Karakterističan primer je nelinearnog odgovora sistema sa naglom promenom  $K_n$  u N domenu (*saw-tooth shape*) (slika 4.12) [110]:

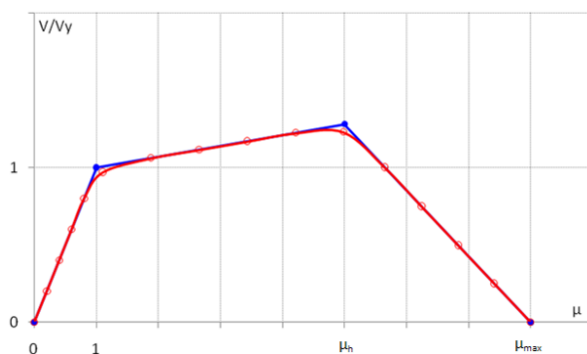
$$N: K_n > 0, K_n \approx 0, K_n < 0. \quad (4.45)$$



Slika 4.12 Odstavak sistema sa duktilnim ponašanjem  $\exists L$ ,  $\exists N$ ,  $\exists C$  i promenljivim  $K_n$

Sistem se generalno ponaša duktilno, dok je promena krutosti u N domenu frekventna. Rekonstrukcija NSPA *pushover* krive se može rešiti primenom kompatibilne krive kapaciteta (*HAZUS-compatible capacity curve*).

Klasifikacija tipova NSPA *pushover* krivih izvedena je na osnovu prethodno prikazanih osobina krutosti sistema i analizom varijacije parametara:  $\mu$  duktilnosti,  $\mu_h$  duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja i  $\alpha$  koeficijenta odnosa krutosti u nelinearnom i linearnom domenu (slika 4.13). Sve NSPA *pushover* krive su prvo konstruisane kao poligonalne linije na osnovu kojih su duž segmenata izabrane diskretne međuvrednosti, a zatim je sprovedena interpolacija splajnovima. Dodatno je sprovedeno filtriranje diskretnih vrednosti za  $\mu=1$  i  $\mu_h$ . U tabeli 4.1 su prikazane generisane NSPA *pushover* krive, pri čemu je na abscisi vrednost  $\mu$ , a na ordinati normalizovana vrednost  $V/V_y$ . Razmatrane su *pushover* krive u funkciji varijacije parametara  $\alpha > 0$ ,  $\alpha \approx 0$ ,  $\alpha < 0$  i duktilnosti  $\mu = \mu_h$  i  $\mu > \mu_h$ .



Slika 4.13. Interpolirana NSPA *pushover* kriva sa filtriranjem diskretnih vrednosti za  $\mu=1$  i  $\mu_h$

Tabela 4.1 Generisane NSPA *pushover* krive u funkciji varijacije parametra  $\mu$ ,  $\mu_h$  i  $\alpha$

	$\alpha > 0$	$\alpha \approx 0$	$\alpha < 0$
$\mu = \mu_h$			
$\mu > \mu_h$			

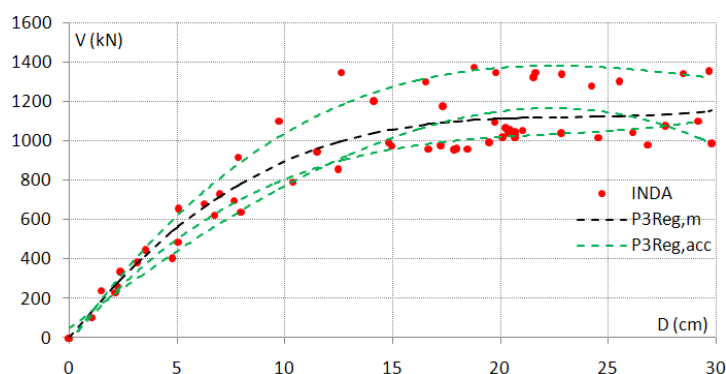
#### 4.2.3. KONVENCIONALNA I ADAPTIVNA NSPA ANALIZA

Lateralno seizmičko opterećenje može imati konstantan karakter u toku inkrementalne kalkulacije, pa se za datu analizu koristi termin konvencionalna (NSCPA - *Nonlinear Static Conventional Pushover Analysis*), dok se za analizu sa korigovanim lateralnim seizmičkim opterećenjem koristi termin adaptivna (NSAPA - *Nonlinear Static Adaptive Pushover Analysis*). Postupak proračuna okvirnih zgrada za konvencionalnu NSPA analizu sprovodi se prema proceduri izloženoj u podpoglavlju *Teorijski aspekti NSPA analize*, dok se raspodela lateralnog opterećenja određuje primenom nekoliko razvijenih opcija. Modeliranjem seizmičkog opterećenja kao ravnomerne raspodele lateralnog opterećenja po visini zgrade (*uniform load*), implicira da se u odgovoru sistema dobije gornja granica smičućih sila po gotovo svim inkrementalnim koracima. Primena ekvivalentne raspodele lateralnih seizmičkih sila, a koja se koristi za analizu kod 2D modela okvirnih sistema, moguća je i u slučaju 3D okvirnih zgrada, ukoliko su dominantni uticaji prvog, odnosno drugog svojstvenog oblika u nelinearnom odgovoru. Bolja opcija je primena parabolične raspodele lateralnih seizmičkih sila ili efektivne modalne superpozicije (EMS - *effective modal*

*superposition*). Mogućnost primene parabolične raspodele lateralnog seizmičkog opterećenja po visini objekta za analizu nelinearnog odgovora razmatrana je na primeru 8x4 2D modela okvira. Prvo je sprovedena konvencionalna NSPA analiza za ravnomernu raspodelu lateralnog seizmičkog opterećenja, a potom INDA analize za tri zemljotresa. Zatim je za svaki zemljotres pojedinačno razvijena regresiona kriva nelinearnog odgovora  $P3Reg,acc$  primenom polinoma trećeg stepena (slika 4.14):

$$V = a_1 D^3 + a_2 D^2 + a_3 D + a_4, \quad (4.46)$$

a nakon toga razvijena je regresiona kriva nelinearnog odgovora za sve zemljotrese  $P3Reg,m$ .



Slika 4.14 Regresione krive zemljotresa  $P3Reg,acc$  i zajednička regresiona kriva  $P3Reg,m$  8x4 2D modela okvira

Za oblik optimalne lateralne raspodele seizmičkog opterećenja pretpostavljena je parabola:

$$y = a_1 x^2 + a_2 x + c, \quad (4.47)$$

pri čemu se za određivanje nepoznatih parametara postavljaju uslovi u osnovi, polovini i na najvišoj tački objekta, tako da se za parabolično lateralno seizmičko opterećenje dobija:

$$y = \frac{4(0.5-p)}{H^2} x^2 + \frac{1-4(0.5-p)}{H} x, \quad (4.48)$$

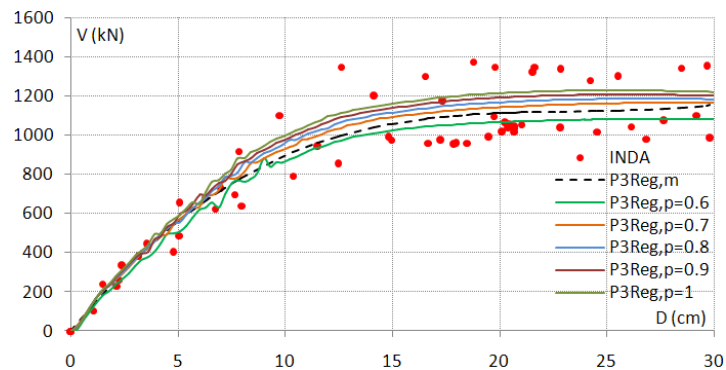
gde je  $p$  parametar parabole za:

$$p = \{0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}. \quad (4.49)$$

Generisane NSPA *pushover* krive nelinearnih odgovora 8x4 okvira za vrednosti parametra  $p$  prikazane su na slici 4.15. Može se konstatovati da se najbolja saglasnost sa  $P3Reg,m$  krivom postiže za vrednosti parametra  $p=0.6$  i  $p=0.7$ . Na ovom primeru je pokazano da se primenom nestandardne raspodele za lateralno seizmičko opterećenje

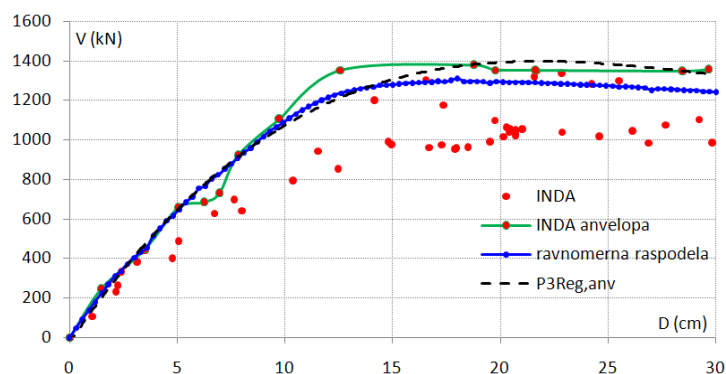


može postići da odgovor konstrukcije bude na veoma kvalitetnom nivou i bez primene adaptivnih NSPA analiza. Sa druge strane, postavlja se pitanje šta je sa pikovima iznad  $P3Reg,m$  odnosno  $P3Reg,p=0.6$  i  $P3Reg,p=0.7$  krive? Ukoliko se model okvirne zgrade ne proračunava i na ove vrednosti pojaviće se dodatna povećanja napona u betonu i armaturi. Rešenje problema moguće je pronaći u upotrebi ravnomerne raspodele lateralnog seizmičkog opterećenja.



Slika 4.15 Generisane NSPA *pushover* krive nelinearnih odgovora 8x4 okvira za vrednosti parametra  $p$

Alternativa za određivanje merodavne maksimalne ukupne smičuće sile u osnovi objekta, po inkrementalnim situacijama, je konstrukcija anvelope maksimalnih pikova diskretnih vrednosti INDA analiza. INDA anvelopa je konstruisana iterativno filtriranjem i interpolacijom pikova diskretnih vrednosti maksimalne ukupne smičuće sile u osnovi objekta (slika 4.16). Takođe, razvijena je i  $P3Reg,anv$  regresiona kriva samo za ove pikove.

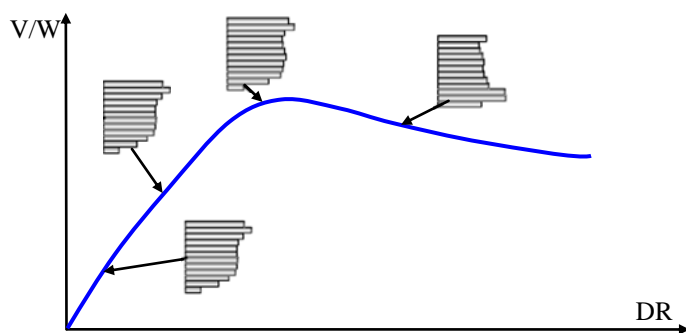


Slika 4.16 Odnos razvijene INDA anvelope,  $P3Reg,anv$  regresione krive i *pushover* krive za konvencionalnu NSPA analizu

Odstupanje *pushover* krive konvencionalne NSPA analize ravnomerne raspodele lateralnog seizmičkog opterećenja dovoljno dobro kompezuje grešku regresione

$P3Reg,anv$  i INDA anvelope. Konstatacija je da se primenom *pushover* krive za ravnomernu raspodelu lateralnog seizmičkog opterećenja postiže dosta dobro pokrivanje INDA anvelope. Ukoliko se primenjuje statistička analiza diskretnih vrednosti INDA analiza većeg broja zemljotresa, tada je potrebno razmatranje sprovoditi i u odnosu na  $P3Reg,m$  krivu.

Konvencionalnom NSPA analizom se, u određenim slučajevima, ne mogu obuhvatiti pojedini efekti, kao što je progresivna degradacija krutosti tipična za konstrukcije izložene dejstvu zemljotresa. U ovom slučaju javlja se potreba za redistribucijom lateralnog seizmičkog opterećenja, s obzirom da se konstantnim lateralnim seizmičkim opterećenjem ignoriše ovaj efekat. Rezultujuće promene u modalnim karakteristikama konstrukcije i odgovarajuće varijacije u amplifikaciji dinamičkog odgovora se ne uzimaju u obzir, a takođe uticaj viših svojstvenih oblika može biti značajan. Adaptivnom NSPA analizom se koriguje lateralno opterećenje u toku analize u skladu sa svojstvenim oblikom i faktorima participacije, a za svaki korak inkrementalne situacije (slika 4.17) [184]. Ovaj metod je potpuno multimodalan i uzima u obzir omekšanje sistema i modifikaciju inercijalnih sila usled spektralne amplifikacije koja se uvodi preko spektra odgovora. U elastičnom domenu modalna raspodela lateralnih sila aproksimativno reprezentuje uticaj inercijalnih sila, dok se u neelastičnom domenu uticaj lateralnih sila aproksimira ravnomernom raspodelom po visini zgrade.



Slika 4.17 Korekcija lateralnog seizmičkog opterećenja u fazama inkrementalnog priraštaja [184]

Postupak proračuna okvirnih zgrada za adaptivnu NSPA analizu sprovodi se prema proceduri izloženoj u podpoglavlju *Teorijski aspekti NSPA analize*, analogno konvencionalnoj NSPA analizi, uz dodatan spektar procedura za proračun lateralnog opterećenja. Jedno od ključnih pitanja je izbor strategije za korekciju i generisanje lateralnih seizmičkih sila nelinearne analize 3D modela okvirne zgrade. Uobičajen

pristup u formulisanju uslova ravnoteže u inkrementalnom obliku je primena totalne *Lagrange*-ove formulacije (*total Lagrange formulation*) ili korigovane *Lagrange*-ove formulacije (*update Lagrange formulation*) [202]. Formulisanje uslova ravnoteže primenom korigovane *Lagrange*-ove formulacije odvija se kroz tri ključne konfiguracije: početne ili startne (S - *start*), tekuće ili trenutne (C - *current*) i naredne ili sledeće (N - *next*). Korigovana formulacija koristi tekuću C konfiguraciju za referentnu, dok totalna formulacija koristi početnu S konfiguraciju za referentnu. Optimalan broj korekcija matrice krutosti sistema po iteracijama je u granicama  $50\%n_{it}<n_s<70\%n_{it}$ , omogućavajući optimalan balans između skraćanja vremena proračuna i stabilnosti rešenja. Optimalan broj iteracija je  $n_{it}=20$ , dok se u slučaju ekstremnog nivoa geometrijske i/ili materijalne nelinearnosti ovaj broj može povećati. Ovi kriterijumi za adaptivnu NSPA analizu su generalno strožiji u odnosu na konvencionalnu NSPA analizu. Proračun adaptivne NSPA analize sprovodi se u četiri faze [6], [7]:

- definisanje vektora nominalnog opterećenja (*nominal load vector*)  $P_0$ ,
- proračun faktora opterećenja (*load factor*)  $\lambda$ ,
- proračun vektora normalizovanog skaliranja (*normalized scaling vector*)  $\bar{F}$ ,
- korekcija vektora apliciranih sila/pomeranja (*force/displacement vector*)  $P_i$ .

Prvi korak se određuje samo jednom na početku analize, dok se preostale tri faze proračunavaju za svako ravnotežno stanje adaptivne NSPA analize. U adaptivnoj NSPA analizi moguće je sprovesti inkrementalnu proceduru kontrolom opterećenja ili pomeranja. Kontrola opterećenja odgovara slučaju kada je faktor opterećenja  $\lambda$  direktno kontrolisan algoritmom nelinearne statičke analize, kao što je slučaj kod proračuna prema silama (FBA - *Force-Based Adaptive*). Drugačije rečeno, FBA analiza koristi faktor opterećenja  $\lambda$  za skaliranje vektora apliciranih sila do dostizanja maksimalnog kapaciteta konstrukcije. Kod konvencionalne NSPA analize vektor nominalnog opterećenja  $P_0$  se definiše na početku analize i njegova vrednost je konstantana tokom proračuna. U adaptivnoj NSPA analizi oblik vektora opterećenja  $P$  se konstantno koriguje za svaki korak analize zadržavajući konstantnu vrednost vektora nominalnog opterećenja  $P_0$ , variranjem faktora opterećenja  $\lambda$  od nula do jedan. Vektor opterećenja  $P$  za bilo koji korak analize dobija se kao proizvod faktora opterećenja  $\lambda$  i vektora nominalnog opterećenja  $P_0$ :

$$P = \lambda P_0 . \quad (4.50)$$

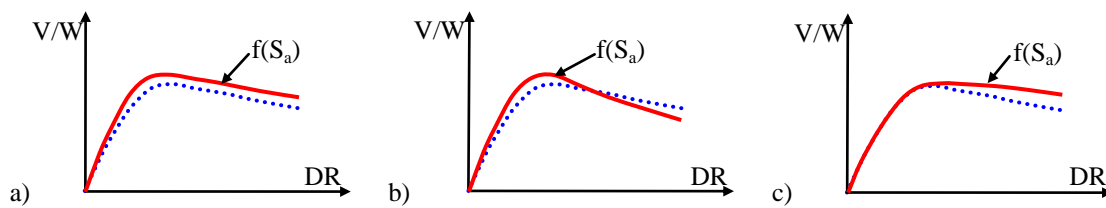
Vektor normalizovanog skaliranja  $\bar{F}$  se koristi za definisanje oblika raspodele vektora opterećenja po spratovima za svaki korak analize, a proračunava se na početku svakog inkrementa opterećenja. Pre toga se izvršava analiza svojstvenih vrednosti za koju se koristi korigovano stanje krutosti sistema. Nakon proračuna svojstvenih oblika i faktora participacije određuju se modalne spratne sile prema:

$$F_{ij} = \Gamma_j \Phi_{ij} m_i, \quad (4.51)$$

gde je  $i$  sprat,  $j$  svojstveni oblik,  $\Gamma_j$  faktor participacije za  $j$ -ti svojstveni oblik,  $\Phi_{ij}$  vrednost normalizovanog svojstvenog oblika za  $i$ -ti sprat i  $j$ -ti svojstveni oblik,  $m_i$  masa  $i$ -tog sprata. S obzirom da se koristi spektralna amplifikacija za odgovarajući period vibracija  $j$ -tog svojstvenog oblika, izraz (4.51) sada glasi [100], [174]:

$$F_{ij} = \Gamma_j \Phi_{ij} m_i S_{a,j}, \quad (4.52)$$

gde je  $S_{a,j}$  ordinata (ubrzanje) spektra odgovora za  $j$ -ti svojstveni oblik. Modalne spratne sile su multiplicirane sa  $S_a$  kako bi se uzeli u obzir efekti spektra odgovora na analizu ponašanja okvirnih zgrada. Efekat spektralne amplifikacije u adaptivnoj NSPA analizi prikazan je na slici 4.18 za nekoliko mogućih varijanti.



Slika 4.18 Efekat spektralne amplifikacije  $f(S_a)$  u adaptivnoj NSPA analizi

Raspodele lateralnih sila od svakog svojstvenog oblika se kombinuju primenom principa kvadratni koren sume kvadrata (SRSS - *square root of sum squares*):

$$F_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n F_{ij}^2}, \quad (4.53)$$

ili primenom kompletne kvadratne kombinacije (CQC - *complete quadratic combination*):

$$F_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (F_{ij} \rho_{jk} F_{ik})}, \quad (4.54)$$

pri čemu se viskozno prigušenje uzima u obzir preko:

$$\rho_{jk} = \frac{8\zeta^2(1+r)r^{1.5}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta^2 r(1+r)^2}, \quad r = \frac{\omega_k}{\omega_j}, \quad (4.55)$$

ili se određuje za uticaj samo jednog (I) svojstvenog oblika. S obzirom da su samo relativne vrednosti spratnih sila  $F_i$  od interesa za definisanje vektora normalizovanog

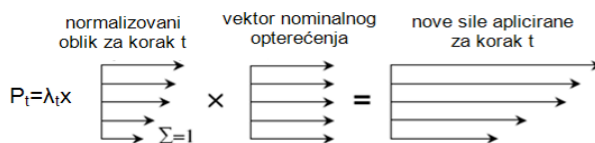
skaliranja  $\bar{F}$  koji definiše oblik, a ne veličinu opterećenja, sile dobijene izrazima (4.53) ili (4.54) se normalizuju u odnosu na ukupnu vrednost prema:

$$\bar{F}_i = \frac{F_i}{\sum F_i}. \quad (4.56)$$

Primenom SRSS i CQC pravila za kombinaciju modalnih sila ne mora se uvek postići adekvatan oblik vektora opterećenja  $P$  koji trenutno reprezentuju karakteristike dinamičkog odgovora sistema za dati nivo deformacija. U određenim situacijama, kada se u konstrukciji prekorači maksimalna vrednost nosivosti i počinje postnelinearno ponašanje sistema, može se javiti negativna vrednost na dijagonali matrice krutosti sistema  $K_t$ , a što prouzrokuje negativne vrednosti perioda vibracija. U ovom slučaju potrebno je samo korigovati veličinu vektora opterećenja lateralnih sila, a ne i njegovu promenu u skladu sa promenom svojstvenih vrednosti. Dakle, adaptivna NSPA analiza u ovakvim situacijama postaje konvencionalna NSPA sa konstantnom raspodelom vektora opterećenja lateralnih sila. Takođe, ukoliko se u postnelinearnom području ponašanja pojavi akumulacija oštećenja u određenom spratu, u adaptivnoj NSPA-FBA analizi generiše se izuzetno visoka vrednost koncentrisanog opterećenja za dati sprat, a što prouzrokuje nerealno velike vrednosti lokalnog drifta. I u ovakvoj situaciji potrebno je primeniti konstantnu raspodelu vektora opterećenja lateralnih sila.

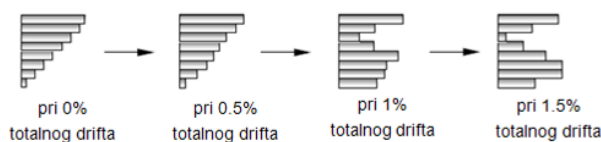
Kada je određen vektor normalizovanog skaliranja  $\bar{F}$ , faktor opterećenja  $\lambda$  ili inkrement faktora opterećenja  $i$  ukoliko je poznata vrednost inicijalnog vektora nominalnog opterećenja  $P_0$ , za dati proračunski korak, vektor apliciranih sila se koriguje primenom totalne (TU), inkrementalne (IU) ili hibridne korekcije (HU). Primenom TU korekcije za  $t$  korak analize vektor opterećenja  $P_t$  se dobija potpunom substitucijom postojećeg izbalansiranog opterećenja (vektor opterećenja iz prethodnog koraka analize) novim vektorom opterećenja. Ovaj vektor opterećenja se proračunava kao proizvod tekućeg totalnog faktora opterećenja  $\lambda_t$ , tekućeg vektora normalizovanog modalnog skaliranja  $\bar{F}_t$  i vektora nominalnog opterećenja  $P_0$  (slika 4.19):

$$P_t = \lambda_t \bar{F}_t P_0. \quad (4.57)$$



Slika 4.19 Grafička prezentacija proračuna vektora sila primenom TU korekcije [7]

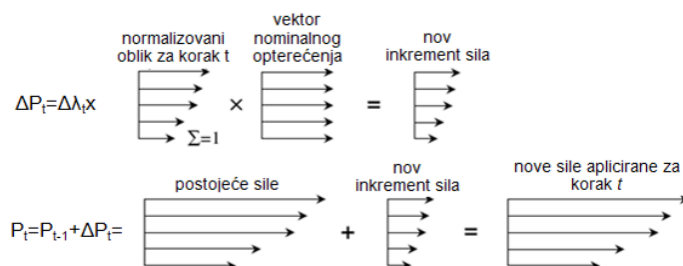
Problem kod ove analize se može pojaviti u tome da se u početku analiza odvija sa rasporedom lateralnih sila koje odgovaraju prvom svojstvenom obliku, da bi se završila sa raspodelom koja odgovara drugom ili trećem svojstvenom obliku. Ovakva situacija je posledica primene principa TU korekcije. Sa druge strane, može se pojaviti i problem izrazito neravnomerne raspodele lateralnih sila u postnelinearnom području prikazan na slici 4.20. Za ovakav primer je karakteristična povećana koncentracija lateralnih sila u određenom području, dok je u drugom znatno redukovana vrednost. Ovakva greška se ispravlja tako što se na datom spratu na kojem postoji redukcija aplicirane sile, sve spratne sile proporcionalno povećavaju tako da za bilo koji dati sprat sile su najmanje jednake vrednosti prethodnog koraka analize.



Slika 4.20 Totalno korigovani vektor sila pri različitim nivoima deformacija [7]

IU korekcijom za  $t$  korak analize vektor opterećenja  $P_t$  se dobija dodavanjem novog inkrementa vektora opterećenja na vektor opterećenja prethodnog koraka  $P_{t-1}$  (postojeće izbalansirano opterećenje). Ovaj vektor opterećenja se proračunava kao proizvod tekućeg inkrementa faktora opterećenja  $\Delta\lambda_t$ , tekućeg vektora normalizovanog skaliranja  $\bar{F}$  i vektora nominalnog opterećenja  $P_0$  (slika 4.21):

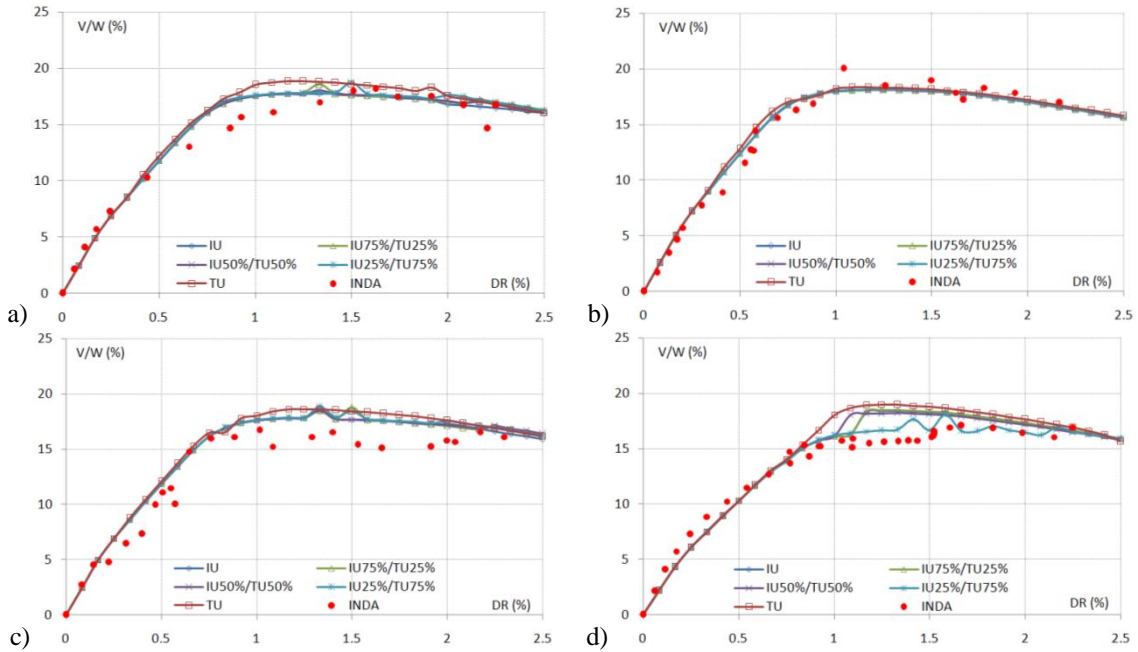
$$P_t = P_{t-1} + \Delta\lambda_t \bar{F}_t P_0. \quad (4.58)$$



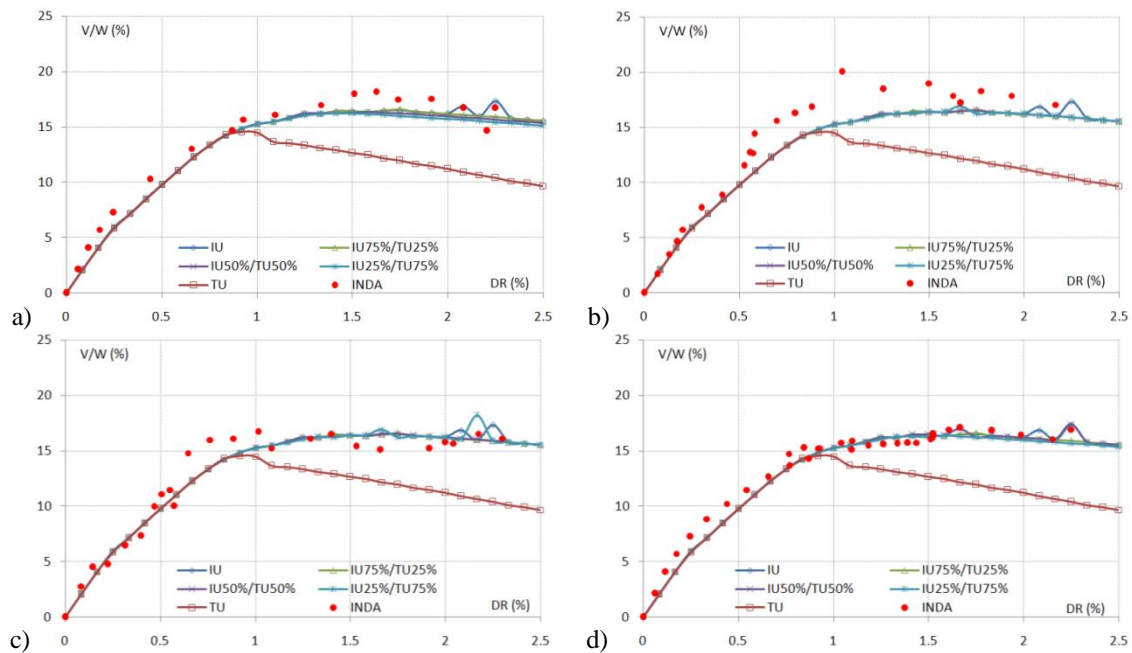
Slika 4.21 Grafička prezentacija proračuna vektora sila primenom IU korekcije [7]

HU korekcijom se kombinuju prethodno izložene dve korekcije, tako što se za  $t$  korak analize vektor opterećenja  $P_t$  dobija delimičnom zamenom vektora opterećenja prethodnog koraka  $P_{t-1}$  (postojeće izbalansirano opterećenje) novim vektorom opterećenja i delimičnim dodavanjem novog inkrementa vektora opterećenja.

TU, IU i HU korekcije su razmatrane na 8x4 2D modelu okvira [38]. Parametarskom analizom je obuhvaćen uticaj četiri različita tipa zemljotresa. Odstupanja vrednosti dobijenih adaptivnim NSPA analizama upoređena su sa rezultatima INDA analize. Prvo su sprovedene analize za NSAPA-FBA sa IU, TU i HU korekcijama primenom CQC pravila (slika 4.22) i uzimanjem u obzir samo uticaj prvog svojstvenog oblika (*I mode*) (slika 4.23).



Slika 4.22 NSAPA-FBA-CQC *pushover* krive i diskretne vrednosti INDA analize [38]



Slika 4.23 NSAPA-FBA-I mode *pushover* krive i diskretne vrednosti INDA analize [38]

HU korekcija je razmatrana sa IU25%/TU75%, IU50%/TU50% i IU75%/TU25%, dok su INDA analize sprovedene skaliranjem akceleroograma zemljotresa od vrednosti  $PGA=0.1$  do  $PGA=1g$  pri inkrementalnom priraštaju  $\Delta PGA=0.05g$  da bi se što bolje opisao odgovor sistema preko diskretnih vrednosti.

Prethodno opisana procedura (FBA) zasniva se na proračunu prema silama, dok je procedura zasnovana na pomeranju (DBA - *Displacement-Based Adaptive*) pouzdanija, a sastoji se iz četiri faze proračuna [8], [167], [185]:

- definisanje vektora nominalnog opterećenja  $P_0$ ,
- proračun faktora opterećenja  $\lambda$ ,
- proračun vektora normalizovanog skaliranja  $\bar{F}$ ,
- korekcija vektora apliciranih sila/pomeranja  $P_t$ .

Prve dve faze proračuna su identične kao kod FBA analize, pri čemu se vektor opterećenja sastoji iz pomeranja  $D$ , a ne sila  $P$ . Uzimajući u obzir da je  $D_0$  nominalni vektor dobija se:

$$D = \lambda D_0. \quad (4.59)$$

Raspodela lateralnih pomeranja po spratovima se dobija direktno iz vektora svojstvenih vrednosti, za  $i$ -ti sprat i  $j$ -ti svojstveni oblik prema:

$$U_{ij} = \Gamma_j \Phi_{ij} S_{d,j}, \quad (4.60)$$

gde je  $i$  sprat,  $j$  svojstveni oblik,  $\Gamma_j$  faktor participacije za  $j$ -ti svojstveni oblik,  $\Phi_{ij}$  vrednost normalizovanog svojstvenog oblika za  $i$ -ti sprat i  $j$ -ti svojstveni oblik,  $S_{d,j}$  apscisa (pomeranje) spektra odgovora za  $j$ -ti svojstveni oblik. Merodavna spratna pomeranja  $U_i$  se proračunavaju iz:

$$U_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n U_{ij}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\Gamma_j \phi_{ij})^2}, \quad (4.61)$$

dok se vektor normalizovanog skaliranja  $\bar{U}$  dobija prema:

$$\bar{U}_i = \frac{U_i}{U_{i,max}}. \quad (4.62)$$

gde je  $U_{i,max}$  maksimalno spratno pomeranje. Vektor normalizovanog skaliranja  $\bar{U}$  se koristi za definisanje oblika vektora opterećenja (ili inkrementa vektora opterećenja) za svaki korak analize i proračunava se na početku inkrementa opterećenja. Maksimalno pomeranje pojedinačnog sprata  $U_{i,max}$  je jednako razlici pomeranja tog sprata i tla, a omogućuje uvid u trenutni nivo oštećenja zgrade u uslovima zemljotresnog dejstva. Ovakvo pomeranje se zove još i relativno spratno pomeranje. U slučaju da se primenjuje



skaliranje prema međuspratnom driftu (*interstorey drift-based scaling*), tada se pomeranje za  $i$ -ti sprat  $U_i$  određuje sumiranjem modalnih kombinacija međuspratnih driftova od prvog  $\Delta_1$  do  $i$ -tog  $\Delta_i$  sprata:

$$U_i = \sum_{k=1}^i \Delta_k, \quad (4.63)$$

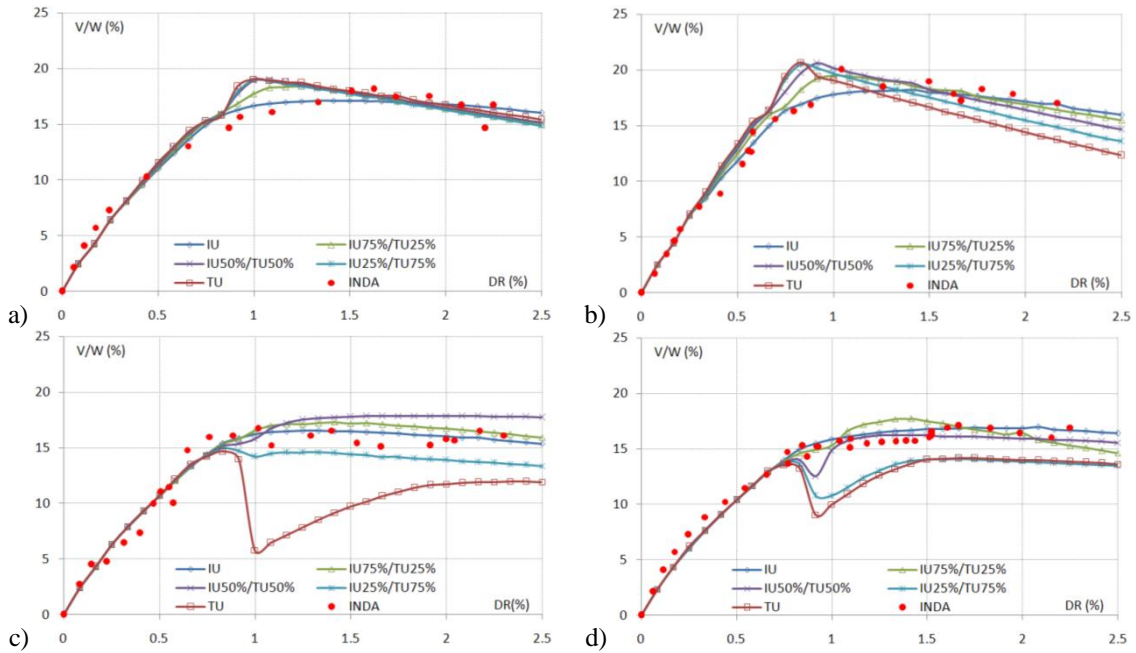
gde je:

$$\Delta_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n \Delta_{ij}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n [\Gamma(\varphi_{i,j} - \varphi_{i-1,j})]^2}. \quad (4.64)$$

Vektor apliciranog pomeranja  $D_t$  za  $t$  korak analize se može odrediti primenjujući inkrementalnu korekciju:

$$D_t = D_{t-1} + \Delta \lambda_t \bar{U}_t D_0. \quad (4.65)$$

Istraživanja su sprovedena i za NSAPA-DBA analize sa IU, TU i HU korekcijama primenom CQC pravila (slika 4.24) i uzimajući u obzir samo uticaj prvog svojstvenog oblika (slika 4.25).

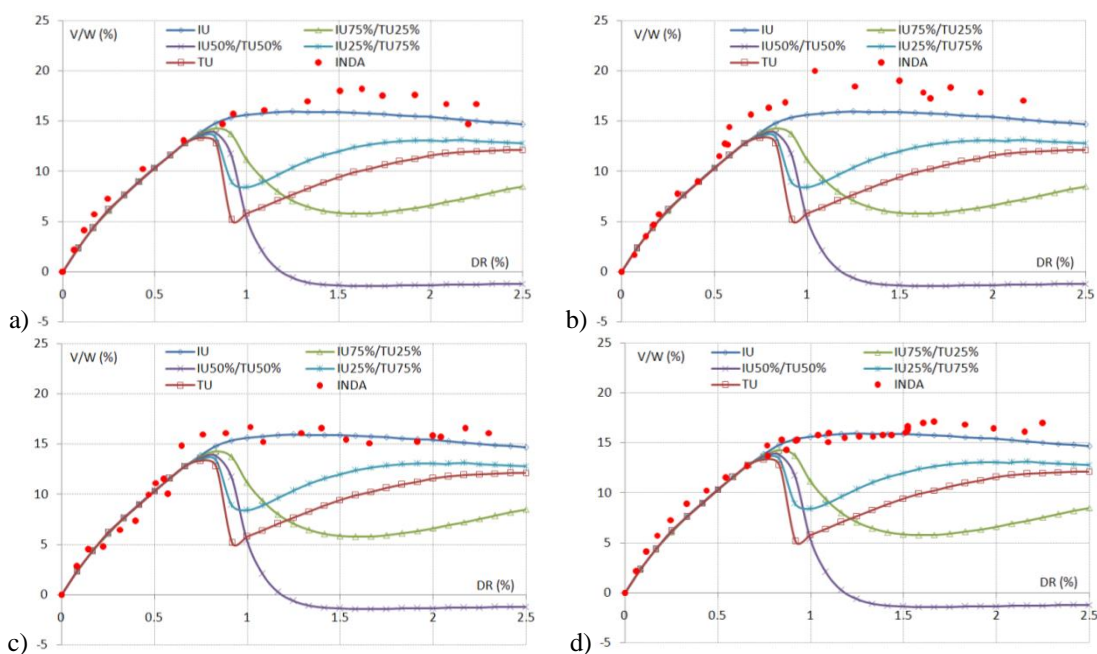


Slika 4.24 NSAPA-DBA-CQC *pushover* krive i diskretne vrednosti INDA analize [38]

Najkvalitetnija rešenja se dobijaju primenom NSAPA-DBA analize uzimajući u obzir i uticaj viših svojstvenih oblika za generisanje lateralnih seizmičkih sila [38]. Za sprovođenje ove analize takođe je potrebno izeti u obzir IU korekciju sa klasičnom NR metodom, gde se sprovodi korekcija matrice krutosti za  $n_s = n_{it}$ . Mogući izbor strategije za korekciju i generisanje lateralnih seizmičkih sila NSAPA analiza, uzimajući u obzir aspekte formulisanja uslova ravnoteže u inkrementalnom obliku i aspekte

inkrementalne, totalne i hibridne korekcije lateralnih sila su:

$$\begin{aligned}
 & \text{NR + IU,} & [K_t] \neq \text{const,} & n_s = n_{it}, & P \neq \text{const} \\
 & \text{NR + TU,} & [K_t] \neq \text{const,} & n_s = n_{it}, & P \approx \text{const} \\
 & \text{NR + HU,} & [K_t] \neq \text{const,} & n_s = n_{it}, & P \neq \text{const} \\
 & \text{mNR+ IU,} & [K_t] = \text{const,} & n_s = 0, & P \neq \text{const} \\
 & \text{mNR+ TU,} & [K_t] = \text{const,} & n_s = 0, & P \approx \text{const} \\
 & \text{mNR+ HU,} & [K_t] = \text{const,} & n_s = 0, & P \neq \text{const} \\
 & \text{NRmNR+ IU,} & [K_t] \neq \text{const,} & 0 < n_s < n_{it}, & P \neq \text{const} \\
 & \text{NRmNR+ TU,} & [K_t] \neq \text{const,} & 0 < n_s < n_{it}, & P \approx \text{const} \\
 & \text{NRmNR+ HU,} & [K_t] \neq \text{const,} & 0 < n_s < n_{it}, & P \neq \text{const}
 \end{aligned} \tag{4.66}$$

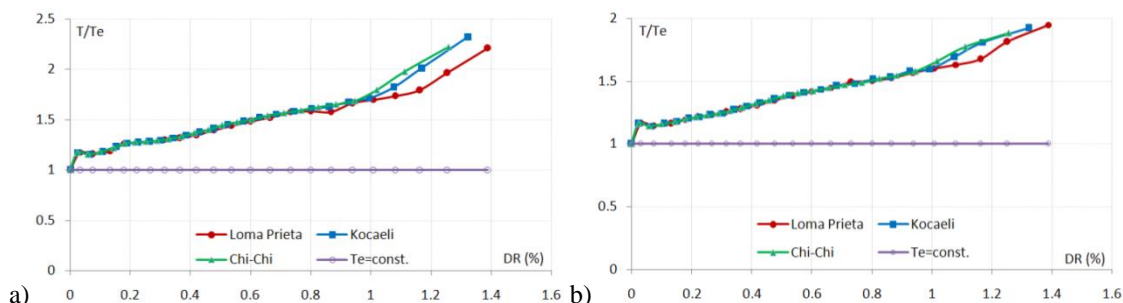


Slika 4.25 NSAPA-DBA-I mode *pushover* krive i diskretne vrednosti INDA analize [38]

Primena algoritama za HU korekciju moguća je ukoliko se u domenu linearno elastičnog ponašanja sistema primeni TU ili HU korekcija sa mNR ili NRmNR metodom, a u domenu nelinearnog ponašanja IU korekcija. Na taj način redukuje se vreme proračuna, a zadržava nivo kvaliteta dobijenih rezultata. Ovakav tip HU korekcije moguće je kombinovati sa korekcijom na nivou inkrementa, tako da se u prvih nekoliko iteracija primeni IU korekcija, a zatim TU korekcija.

Adaptivnom NSPA analizom dobija se uvid u promenu perioda vibracija zgrada u fazama inkrementalnog priraštaja deformacija. Promena perioda vibracija je posledica redukcije krutosti preseka štapova na mestima razvoja nelinearnih deformacija. Pri

svakom inkrementalnom apliciranju opterećenja koriguje se matrica krutosti sistema  $[K_t]$ , a zatim se ista koristi za analizu vibracija sistema. Za  $8 \times 4$  2D okvir prikazane su promene perioda vibracija za tri različita zemljotresa na slici 4.26, gde su takođe prikazane konstantne vrednosti perioda vibracija  $T_e$  za matricu krutosti  $[K_e]$  elastičnog modela [39]. Vrednosti perioda vibracija su normalizovane u odnosu na 1. Inicijalni periodi vibracija okvirnog sistema za adaptivnu NSAPA analizu jednaki su periodima vibracija konvencionalne NSCPA analize. Razvojem nelinearnih deformacija period vibracija  $T_n$  se povećava, tako da pri driftu  $DR=1.2\%$  postaje  $T_n=2T_e$  za I svojstveni oblik i  $T_n=1.75T_e$  za II svojstveni oblik.



Slika 4.26 Promena perioda vibracija određena NSAPA analizom za: a) I svojstveni oblik, b) II svojstveni oblik [39]

Lateralno seizmičko opterećenje za adaptivnu NSAPA analizu definisano je preko sila i preko pomeranja jednako podeljeno po visini zgrade, a za dva ortogonalna pravca. Raspodela ovih sila ili pomeranja se u toku NSAPA analize koriguje prema prethodno prezentovanoj proceduri. Broj svih svojstvenih oblika koji značajno doprinose globalnom odgovoru zgrade određen je preko zbira efektivnih modalnih masa, a čija vrednost iznosi 90% od ukupne mase zgrade [66].

## 4.3. INDA ANALIZA

### 4.3.1. TEORIJSKI ASPEKTI INDA ANALIZE

Inkrementalna nelinearna dinamička analiza (INDA - *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*) je parametarska analiza kojom se razmatraju performanse zgrade za uslove dejstva zemljotresa sukcesivnim skaliranjem akcelerograma kod nelinearne dinamičke analize (NDA - *Nonlinear Dynamic Analysis*) [210]. U odnosu na NDA analizu, gde se odgovor zgrade razmatra u vremenskom ili frekventnom domenu, kod

INDA analize se odgovor razmatra ili na nivou kapaciteta konstrukcije  $EDP_d-EDP_f$  ili preko  $EDP-IM$  ( $IM$  - *intensity measure*), pri čemu se ovaj odnos može predstaviti preko većeg broja parametara. U dosadašnjim istraživanjima INDA analize se u glavnom sprovode na 2D modelima okvirnih zgrada [212], [213], [211]. Kompleksnost istraživanja se povećava uzimajući u obzir analizu odgovora zgrada sa torzionim uticajima, tako da se razmatranjem zemljotresa preko bidirekcionog seizmičkog dejstva (*bi-directional seismic ground motion*) sa rotacijom ortogonalnih komponenti postiže adekvatno rešenje. Logično je da se ovakvom prezentacijom zemljotresa preko multikomponentalnih akcelorograma povećava broj INDA analiza i vreme potrebno za njihovo procesiranje.

U postupku određivanja ubrzanja, brzine i pomeranja okvirne zgrade za uslove dejstva zemljotresa posmatraju se diferencijalne jednačine kretanja:

$$[M]\{a\} + [C]\{v\} + [K]\{d\} = \{Q\}. \quad (4.67)$$

Rešavanje jednačina (4.67) se sprovodi numeričkom integracijom korak po korak (*step by step*) Hilber-Hughes-Taylor-ovim (HHT) postupkom u modifikovanom obliku [112], [27]:

$$[M]\{a\}_{i+1} + (1+\alpha)[C]\{v\}_{i+1} - \alpha[C]\{v\}_i + (1+\alpha)[K]\{d\}_{i+1} - \alpha[K]\{d\}_i = \{Q\}_{i+\alpha}, \quad (4.68)$$

a za trenutak vremena:

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t, \quad (4.69)$$

gde je  $[M]$  matrica masa,  $\{a\}$  vektor ubrzanja,  $[C]$  matrica prigušenja,  $\{v\}$  vektor brzine,  $[K]$  matrica krutosti,  $\{d\}$  vektor pomeranja,  $\{Q\}$  vektor spoljašnjih generalisanih sila.

Vektori pomeranja i brzine izražavaju se prema:

$$\{d\}_{i+1} = \{d\}_i + \Delta t\{v\}_i + \frac{\Delta t^2}{2}[(1-2\beta)\{a\}_i + 2\beta\{a\}_{i+1}], \quad (4.70)$$

$$\{v\}_{i+1} = \{v\}_i + \Delta t[(1-\gamma)\{a\}_i + \gamma\{a\}_{i+1}], \quad (4.71)$$

dok za vektor spoljašnjih generalisanih sila važi:

$$\{Q\}_{i+\alpha} = \{Q\}(t_{i+\alpha}), \quad (4.72)$$

gde je:

$$t_{i+\alpha} = (1+\alpha)t_{i+1} - \alpha t_i = t_{i+1} + \alpha \Delta t. \quad (4.73)$$

HHT postupak postaje bezuslovno stabilan ukoliko su parametri  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  izabrani u skladu sa relacijama:

$$\alpha \in \left[-\frac{1}{3}, 0\right], \quad \beta = \frac{1}{4}(1-\alpha)^2, \quad \gamma = \frac{1}{2} - \alpha. \quad (4.74)$$

Vektori brzine  $\{v\}_{i+1}$  i ubrzanja  $\{a\}_{i+1}$  u trenutku  $t_{i+1}$  se izražavaju preko vektora

pomeranja na kraju intervala  $\{d\}_{i+1}$ :

$$\{v\}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (\{d\}_{i+1} - \{d\}_i) - \left( \frac{\gamma}{\beta} - 1 \right) \{v\}_i - \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \{a\}_i, \quad (4.75)$$

$$\{a\}_{i+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t^2} (\{d\}_{i+1} - \{d\}_i) - \frac{1}{\beta \Delta t} \{v\}_i - \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{a\}_i. \quad (4.76)$$

Unošenjem ovih izraza u jednačinu (4.68) dobija se ekvivalentna jednačina ravnoteže:

$$[K]^* \{d\}_{i+1} = \{Q\}_{i+\alpha}^*, \quad (4.77)$$

gde je:

$$[K]^* = (1 + \alpha)[K] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M] + (1 + \alpha) \frac{\gamma}{\beta \Delta t} [C], \quad (4.78)$$

$$\begin{aligned} \{Q\}_{i+\alpha}^* = & \{Q\}_{i+\alpha} + [M] \left[ \frac{1}{\beta \Delta t^2} \{d\}_i + \frac{1}{\beta \Delta t} \{v\}_i + \left( \frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{a\}_i \right] + \\ & + [C] \left\{ (1 + \alpha) \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \{d\}_i + \left[ (1 + \alpha) \frac{\gamma}{\beta} - 1 \right] \{v\}_i + \Delta t (1 + \alpha) \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) \{a\}_i \right\} + \\ & + \alpha [K] \{d\}_i. \end{aligned} \quad (4.79)$$

Ukoliko se vrednosti parametara  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $\gamma$  usvoje da su:

$$\alpha = -\frac{1}{3}, \quad \beta = \frac{4}{9}, \quad \gamma = \frac{5}{6}, \quad (4.80)$$

tada su efektivna matrica krutosti i vektor efektivnog opterećenja:

$$[K]^* = \frac{2}{3} [K] + \frac{9}{4 \Delta t^2} [M] + \frac{5}{4 \Delta t} [C], \quad (4.81)$$

$$\begin{aligned} \{Q\}_{i+\alpha}^* = & \{Q\}_{i+\alpha} + [M] \left( \frac{9}{4 \Delta t^2} \{d\}_i + \frac{9}{4 \Delta t} \{v\}_i + \frac{1}{8} \{a\}_i \right) + \\ & + [C] \left( \frac{5}{4 \Delta t} \{d\}_i + \frac{1}{4} \{v\}_i - \frac{1}{24} \Delta t \{a\}_i \right) - \frac{1}{3} [K] \{d\}_i, \end{aligned} \quad (4.82)$$

gde je:

$$t_{i+\alpha} = t_{i+1} - \frac{1}{3} \Delta t = t_i + \frac{2}{3} \Delta t, \quad (4.83)$$

odnosno:

$$\{Q\}_{i+\alpha} = \{Q\} \left( t_i + \frac{2}{3} \Delta t \right). \quad (4.84)$$

Sa određenim pomeranjima na kraju posmatranog intervala vremena rešavanjem jednačina (4.77), brzine i ubrzanja na kraju intervala vremena se dobijaju prema izrazima:

$$\{v\}_{i+1} = \frac{15}{8 \Delta t} (\{d\}_{i+1} - \{d\}_i) - \frac{7}{8} \{v\}_i + \frac{1}{16} \Delta t \{a\}_i, \quad (4.85)$$

$$\{a\}_{i+1} = \frac{9}{4\Delta t^2} (\{d\}_{i+1} - \{d\}_i) - \frac{9}{4\Delta t} \{v\}_i - \frac{1}{8} \{a\}_i. \quad (4.86)$$

Pre započinjanja algoritma korak po korak, potrebno je da se početno ubrzanje sistema odredi iz diferencijalne jednačine kretanja prema:

$$\{a\}_0 = [M]^{-1} (\{Q\}_0 - [C]\{v\}_0 - [K]\{d\}_0). \quad (4.87)$$

Korekcija matrice krutosti sistema sprovodi se posle svakog apliciranog koraka vremena, a prema prethodno prezentovanoj *Newton-Raphson*-ovoj metodi. Primenom NDA analize sa HHT postupkom i NR metodom za proračun 3D modela zgrada dobijaju se najpouzdanija rešenja za procenu nelinearnog odgovora sistema.

Procedura skaliranja NDA analiza sprovodi se direktnim skaliranjem originalnih formatiranih neskalinanih akceleroograma. Prvo se izvršava skaliranje na određenu početnu vrednost, tako da je odgovor konstrukcije za dati skalirani nivo zemljotresa u linearno-elastičnom domenu. Ovo se postiže tako što se akceleroogram skalira na dovoljno malu vrednost ubrzanja:

$$PGA_{s,0} = F_{s,INDA} PGA_o = 0.005g, \quad (4.88)$$

gde je  $PGA_o$  maksimalno ubrzanje originalnog formatiranog neskalinanog akceleroograma,  $F_{s,INDA}$  faktor skaliranja INDA analize,  $PGA_{s,0}$  maksimalno ubrzanje skaliranog akceleroograma na početnu minimalnu vrednost ubrzanja. U istraživanju [209] za *IM* meru je selektovano 5% spektralno ubrzanje za prvi svojstveni oblik  $S_a(T_1, 5\%)$ , ali, kao što je već prethodno objašnjeno kod 3D modela zgrada, za *IM* meru je relevantnije izabrati *PGA*. Skaliranje se nastavlja tako što se sukcesivno povećava  $PGA_{s,i}$ :

$$PGA_{s,i} = PGA_{s,i-1} + 0.1 + 0.05(i-1) \quad \text{za } i = 1, \dots, n, \quad (4.89)$$

a kada se uoči da je razlika u odgovoru konstrukcije za dve uzastopne vrednosti skaliranja bez velike promene, tada se povećava faktor skaliranja. U slučaju da je razlika u odgovoru konstrukcije za dve uzastopne vrednosti skaliranja značajna, tada se redukuje faktor skaliranja. Takođe, pretraživanje poslednje vrednosti se sprovodi sukcesivno skalirajući akceleroogram u nazad. Ukoliko se NDA analizom za  $PGA_{s,i}$  dobije da je maksimalna vrednost drifta:

$$DR_{max} \rightarrow +\infty, \quad (4.90)$$

tada se skaliranje sprovodi prema:

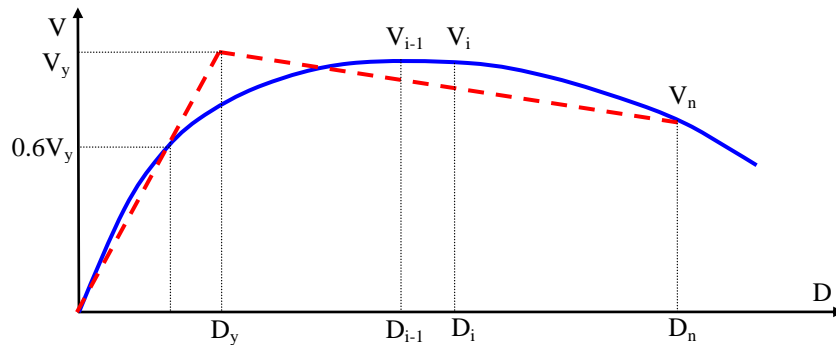
$$PGA_{s,i+1} = PGA_{s,i-1} + \frac{(PGA_{s,i} - PGA_{s,i-1})}{3}, \quad (4.91)$$

dok za faktore skaliranja važi:

$$F_{s,INDA,1} < F_{s,INDA,i} < F_{s,INDA,n} \quad (4.92)$$

Pored određivanja faktora skaliranja potrebno je odrediti i broj NDA analiza u okviru jedne INDA analize. Postupak razvijen u radu [30] za određivanje potrebnog broja NDA analiza zasniva se na primeni razvijene NSPA *pushover* krive, a za koju se prethodno utvrde granice linearnog i nelinearnog domena i nivoa maksimalnih deformacija sistema. Konstrukcija bilinearne krive sprovodi se kako bi se odredila granica maksimalnih raspoloživih deformacija sistema pri čemu se usvaja da je sila na granici tečenja  $0.6V_y$  (slika 4.27) [78]. Postupak određivanja merodavnih parametara se zasniva na izjednačavanju energija deformacija NSPA *pushover* krive i bilinearnog elastoplastičnog modela ponašanja. Površina ispod NSPA *pushover* krive se određuje na osnovu sume površina pojedinačnih trapeza koji se dobijaju iz dve uzastopne diskretne vrednosti pomeranja  $D_{i-1}$  i  $D_i$ , a površina bilinearne krive je jednaka sumi površine trougla i trapeza:

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (V_i + V_{i-1})(D_i - D_{i-1}) = \frac{1}{2} (V_y D_y + (V_y + V_n)(D_n - D_y)) \quad (4.93)$$



Slika 4.27 Bilinearizacija NSPA *pushover* krive

Kao nepoznate se pojavljuju  $V_n$  i  $D_n$ , pa se dalja procedura sprovodi iterativno, a nakon sređivanja prethodnog izraza konačno se dobija:

$$D_n = D_{max} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (V_i + V_{i-1})(D_i - D_{i-1}) \right] - V_y D_y}{V_y + V_n} + D_y \quad (4.94)$$

U linearnom domenu se može koristiti manji broj NDA analiza, s obzirom da se sistem linearno-elastično ponaša, dok je u nelinearnom domenu potreban veći broj NDA analiza. Ukoliko se primeni veći broj NDA analiza u okviru jedne INDA analize dobija se veći broj diskretnih vrednosti odgovora sistema, a na osnovu kojih se kasnije može

sprovesti regresiona analiza uz minimalna odstupanja. Dakle, na osnovu ovih konstatacija razmatrana je solucija sa jednakim  $\Delta DR_L = \Delta DR_N$  i različitim  $\Delta DR_L \neq \Delta DR_N$ , gde je  $\Delta DR_L$  razlika drifta za dve uzastopne NDA analize u linearnom domenu,  $\Delta DR_N$  razlika drifta za dve uzastopne NDA analize u nelinearnom domenu.

Za slučaj da se primenjuju iste vrednosti  $\Delta DR_L = \Delta DR_N$ , tada je  $\Delta DR_N$  iz nelinearnog domena merodavno za analizu. Ovakav uslov je postavljen, jer je potreban strožiji kriterijum za ograničenje deformacija sistema pri nelinearnom ponašanju, nego pri linearnom. Potreban broj NDA analiza za nelinearan domen je  $n_{NDA,N} > 1$ , dok i za linearan domen važi  $n_{NDA,L} > 1$ . Takođe, potreban je veći broj NDA analiza u nelinearnom domenu u odnosu na linearni  $n_{NDA,N} > n_{NDA,L}$  usled razvoja većih nelinearnih deformacija, s obzirom da se teži duktilnom ponašanju. Ukupan potreban broj NDA analiza sada se može odrediti iz uslova odnosa  $D_n$  i međuspratnog drifta  $IDR$  (*interstorey drift*):

$$n_{L=N}^{potr} = \frac{D_n}{\Delta DR_N} = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (V_i + V_{i-1})(D_i - D_{i-1}) \right] - V_y D_y}{V_y + V_n} + D_y \cdot IDR_{EC8}, \quad (4.95)$$

pri čemu se  $IDR_{EC8}$  određuje prema EC 8 [66] za objekte koji poseduju nenoseće elemente od krtih materijala koji su vezani za konstrukciju:

$$IDR_{EC8} \leq \frac{0.005h}{v}, \quad (4.96)$$

gde je  $h$  visina sprata,  $v$  faktor redukcije kojim se uzima u obzir niži povratni period seizmičkog događaja koji se odnosi na granično stanje upotrebljivosti, a može takođe da zavisi od kategorije značaja objekta:

$$\begin{aligned} v &= 0.4 \text{ za kategoriju I i II} \\ v &= 0.5 \text{ za kategoriju III i IV} \end{aligned} \quad (4.97)$$

Za slučaj da se primenjuju različite veličine za  $\Delta DR_L \neq \Delta DR_N$  u linearnom domenu je potrebna minimalno jedna NDA analiza,  $n_{NDA,L} = 1$ , dok je u nelinearnom domenu potreban veći broj NDA analiza,  $n_{NDA,N} > 1$ . Uslov koji takođe mora biti ispunjen za  $\Delta DR_L \neq \Delta DR_N$  je odnos  $\Delta DR_L > \Delta DR_N$ . Ovakav uslov je postavljen jer se za samo jednu NDA analizu u linearnom domenu može javiti znatna deformacija sistema. Ukupan potreban broj NDA analiza sada se može odrediti iz uslova odnosa  $D_n$  i međuspratnog drifta  $IDR$ :



$${}_{potr}n_{L \neq N} = 1 + \frac{D_n - 0.6 \cdot D_y}{\Delta DR_N} = 1 + \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (V_i + V_{i-1})(D_i - D_{i-1}) \right] - V_y D_y}{V_y + V_n} + 0.4 D_y}{IDR_{EC8}}. \quad (4.98)$$

Maksimalna vrednost  $IDR_{max}$  drifta može se odrediti preko lokalnih parametara seizmičkog odgovora: kapaciteta plastične rotacije  $\theta_{pu}$  i indeksa oštećenja  $DI$  [120]. Relacije između  $IDR_{max}$  sa jedne strane i  $\theta_{pu}$  i  $DI$  sa druge strane su uspostavljene pomoću NDA analiza 4, 6, 8 i 12-spratnih armiranobetonskih okvira projektovanih prema EC 8. Maksimalne vrednosti za  $IDR_{max}$  i kapacitet plastične rotacije  $\theta_{pu}$  za stanje kolapsa  $DI=1$  prikazane su u tabeli 4.2. Potreban broj inkremenata se određuje tako da bude u funkciji  $IDR_{EC8}$  kao maksimalna vrednost i u funkciji  $IDR_{max}$  kao minimalna vrednost:

$$n_{L=N} f(IDR_{EC8}) \triangleright_{potr} n_{L=N} > n_{L=N} f(IDR_{max}), \quad (4.99)$$

$$n_{L \neq N} f(IDR_{EC8}) \triangleright_{potr} n_{L \neq N} > n_{L \neq N} f(IDR_{max}). \quad (4.100)$$

Tabela 4.2 Maksimalne vrednosti  $IDR_{max}$  i  $\theta_{pu}$  za stanje kolapsa  $DI=1$

spratnost	$IDR_{max}$ (%)	$\theta_{pu}$ (%)
4	3.98	5.68
6	4.53	6.82
8	4.05	7.32
12	4.31	6.97

### 4.3.2. INDA PUSHOVER KRIVA: DEFINICIJA

Na osnovu procesiranja NDA analiza odgovor konstrukcije se razmatra preko diskretnih vrednosti iz svake NDA analize ( $EDP_d-EDP_f$  ili preko  $EDP-IM$ ). Merodavne vrednosti iz ovako dobijenih NDA analiza su maksimalne vrednosti driftova  $DR$  za odgovarajuće relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $V/W$ . Povezivanjem diskretnih vrednosti iz NDA analiza konstruiše se INDA *pushover* kriva.

Definicija 4.2: INDA *pushover* kriva 3D modela zgrade  $V/W=f(DR)_\theta$  je spline-om interpolirana kriva generisana povezivanjem diskretnih vrednosti iz inkrementalnih situacija  $I_i(DR_i, (V/W)_i)$  INDA analiza za  $\theta_i$  ugao (slika 4.28):

$$V/W = f(DR)_\theta, \quad (4.101)$$

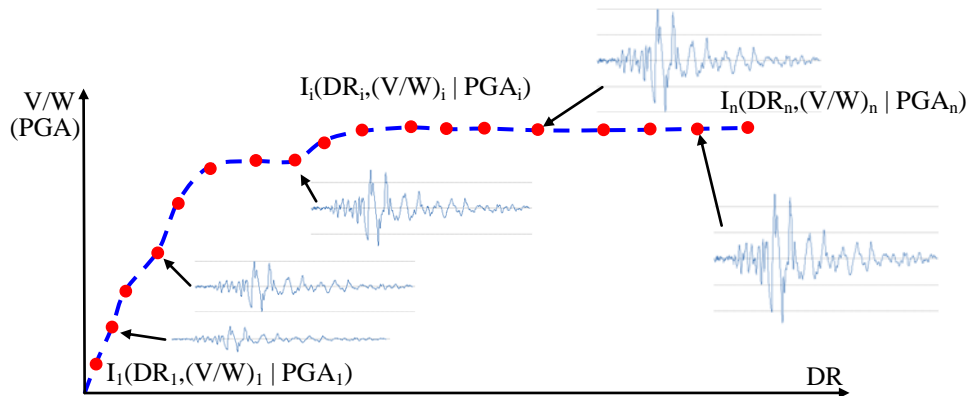
pri čemu je:

$$I_i(DR_i, (V/W)_i) \subset (V/W) = f(DR)_\theta, \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.102)$$

Reprezentativan primer INDA *pushover* krive karakterišu tri bitno različita domena:

- linearno-elastično ponašanje za koje je elastična krutost sistema  $K_e > 0$ ,
- nelinearno ponašanje za koje je nelinearna krutost sistema  $/K_n \ll K_e$ ,
- kolaps koji karakteriše negativna krutost sistema  $K_c < 0$ .

U cilju bolje predikcije i analize kolapsnog stanja za *IM* mere je selektovano *PGA*. U ovom slučaju potrebno je 3D model zgrade skalirati na nešto veći nivo drifta, pri čemu se deo *INDA pushover* krive u domenu kolapsa asmptotski približava horizontali.



Slika 4.28 INDA *pushover* kriva  $V/W=f(DR)_\theta$  sa diskretnim vrednostima iz NDA analiza

Kod NDA analiza 3D modela okvirnih zgrada se uzima u obzir simultano dejstvo zemljotresa za dva ortogonalna pravca. U ovom slučaju prvi akceleroграм zemljotresa  $a_\theta(t)$  je skaliran na 100% *PGA*, dok je drugi akceleroграм zemljotresa  $a_{\theta_0}(t)$  skaliran na 30% *PGA*. Dodatno se sprovodi skaliranje u okviru jedne *INDA* analize faktorima skaliranja za NDA analize, pri čemu je odnos 100%/30% konstantan tokom svih NDA analiza. Čvor za monitoring diskretnih vrednosti iz NDA analiza (*DPN - dynamic pushover node*) je, u najvećem broju slučajeva, najviši čvor objekta u centru mase, dok je čvor u odnosu na koji se sprovodi analiza relativnog pomeranja najniži čvor u osnovi objekta.

## 4.4. NSPA I INDA *PUSHOVER* POVRŠI

### 4.4.1. NSPA *PUSHOVER* POVRŠ: DEFINICIJA I GENERISANJE

Model okvirne zgrade se izlaže dejstvu lateralnog seizmičkog opterećenja čija je raspodela konstantna za konvencionalnu NSPA analizu (*NSCPA*) u toku inkrementalnih proračunskih situacija. U slučaju adaptivne NSPA analize (*NSAPA*) raspodela lateralnog seizmičkog opterećenja je promenljiva u toku inkrementalnih proračunskih

situacija. NSCPA i NSAPA analize se sprovode za različite vrednosti ugla  $\theta_i$  kojim je definisan pravac zemljotresa u intervalu  $\theta=[0,360^\circ]$ , po jedan slučaj opterećenja za svaki inkrement priraštaja ugla  $\Delta\theta$ . Odgovor 3D modela zgrada u kapacitativnom domenu prema NSPA analizi, a prezentovan primenom NSPA *pushover* krivih za uglove  $\theta_i$  je, u opštem slučaju, definisan granicama  $\Gamma_i$  (slika 4.29) [44]:

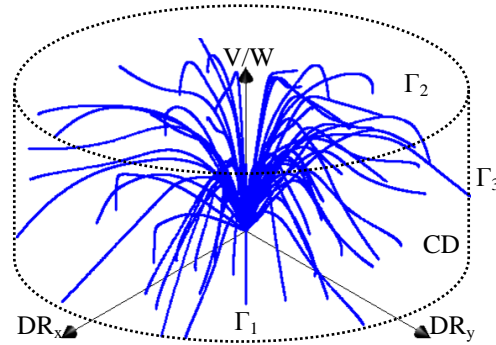
$$CD : \begin{cases} \Gamma_1 : (DR_{x,i}, DR_{y,i}) \in [0, +\infty) \wedge V/W = 0 \\ \Gamma_2 : (DR_{x,i}, DR_{y,i}) \in [0, +\infty) \wedge V/W = (V/W)_{sup} , \\ \Gamma_3 : (DR_{x,i}, DR_{y,i}) = DR_{sup} \wedge V/W \in [0, +\infty) \end{cases} \quad (4.103)$$

gde je  $\Gamma_1$  donja granična  $DR_x$ - $DR_y$  ravan (baza) za  $V/W=0$ ,  $\Gamma_2$  gornja granična  $DR_x$ - $DR_y$  ravan (baza) za supremum  $(V/W)_{sup}$ ,  $\Gamma_3$  granična površ za  $DR_{x, sup}$  i  $DR_{y, sup}$  (omotač). U slučaju odgovora NSPA analize zgrada u kapacitativnom domenu  $CD_{NSPA}$  za skup diskretnih uređenih parova  $DR_i$  i  $(V/W)_i$  se može pisati:

$$CD_{NSPA} = \bigcup_{i=1}^n \langle DR_{x,i}, DR_{y,i}, (V/W)_i \rangle, \quad \forall (DR_{x,i}, DR_{y,i}, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+, \quad (4.104)$$

dok odgovarajuća NSPA *pushover* kriva predstavlja interpolirane diskretne uređene parove  $\langle DR_{x,i}, DR_{y,i}, (V/W)_i \rangle$ :

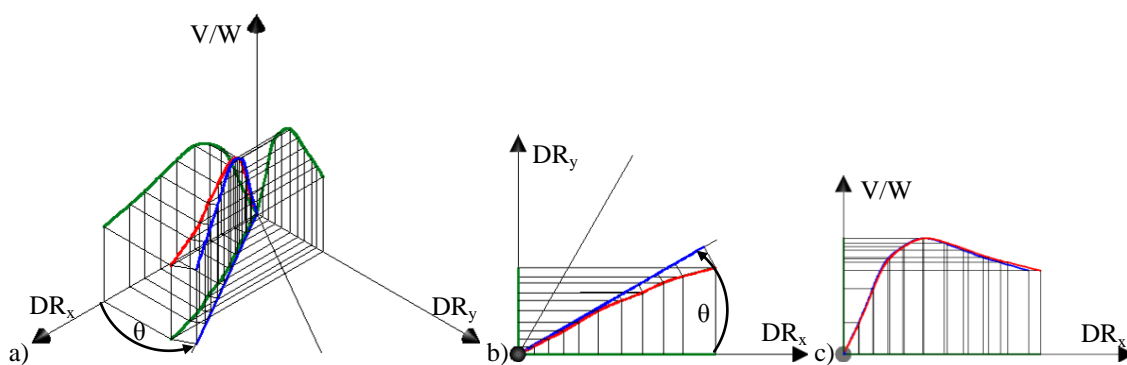
$$V/W = f(DR)_\theta = f(DR_x, DR_y). \quad (4.105)$$



Slika 4.29 Odgovor 3D modela zgrada u kapacitativnom domenu

Odgovor konstrukcije se predstavlja preko NSPA *pushover* krivih  $V/W=f(DR)_\theta$  za uglove  $\theta_i$ , tako da se za 3D model zgrade generiše NSPA *pushover* površ (PS - *pushover surface*). Razmatranje performansnih nivoa 3D modela zgrade primenom NSPA *pushover* površi sprovodi se analogno razmatranju kod NSPA *pushover* krivih. Rerezent  $EDP_f$  parametra je relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $V/W$ , a  $EDP_d$  parametra globalni drift  $DR$ . Postupak procene performansi 3D modela zgrada razvojem NSPA *pushover* krivih po uglovima  $\theta_i$  sprovodi se iz razloga, što se javljaju problemi kod konstrukcija koje su torziono osetljive, neregularne u osnovi i po

visini, sa većim stepenom diskontinuiteta krutosti i pri čemu se posebno favorizuju kompleksne forme prema zahtevima moderne arhitekture. Pitanje glavnih pravaca kod kompleksnih formi zgrada je diskutabilno, pa se u cilju analize performansi sistema sprovode analize za veći broj pravaca, kako bi se proverili svi bitni parametri sistema. U fazama proračuna zgrade razmatraju se svi stepeni slobode sistema, ali se monitoring odgovora sistema prati i prezentuje za odgovarajući pravac (ugao  $\theta_i$ ) i predstavlja NSPA *pushover* krivom. Integracijom ovako određenih NSPA *pushover* krivih  $V/W=f(DR)_\theta$  po uglovima  $\theta_i$  generiše se NSPA *pushover* površ 3D modela zgrade. Konstrukcija NSPA *pushover* krive  $V/W=f(DR)_\theta$  za ugao  $\theta$  se sprovodi iz projekcije NSPA *pushover* krive sistema za bidirekciono seizmičko dejstvo na vertikalnu ravan  $DR_\theta$ - $V/W$  za ugao  $\theta$  (slika 4.30.a). Ortogonalne projekcije NSPA *pushover* krive za ugao  $\theta$  prikazane su na slikama 4.30.b i 4.30.c za  $DR_x$ - $DR_y$  ravan i  $DR_x$ - $V/W$  ravan, respektivno.



Slika 4.30 NSPA *Pushover* kriva u 3D koordinatnom sistemu za bidirekciono seizmičko dejstvo za ugao  $\theta$ : a) projekcija na ortogonalne ravni  $DR_x$ - $V/W$ ,  $DR_y$ - $V/W$ ,  $DR_x$ - $DR_y$  i za ugao  $\theta$ , b)  $DR_x$ - $DR_y$  ravan, c)  $DR_x$ - $V/W$  ravan [44]

Definicija 4.3: NSPA *pushover* površ (*pushover surface*) 3D modela zgrade  $V/W=f(DR_x, DR_y)$  je glatka interpolirana asimetrična rotaciona površ generisana povezivanjem diskretnih vrednosti iz inkrementalnih situacija  $I_i\langle DR_{r,i}, (V/W)_i, \theta_i \rangle$  individualnih NSPA *pushover* krivih  $(V/W)_i=f(DR_{r,i}, \theta_i)$  splajnovima u tangencijalnom pravcu  $(V/W)_j=g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ :

$$V/W = f(DR_x, DR_y) = \left[ \bigcup_{\theta_i=0}^{360^\circ} f(DR_{r,i}, \theta_i) \right] \cup \left[ \bigcup_{j=0}^{DR_{max}} g(DR_{x,j}, DR_{y,j}) \right], \quad (4.106)$$

pri čemu je:

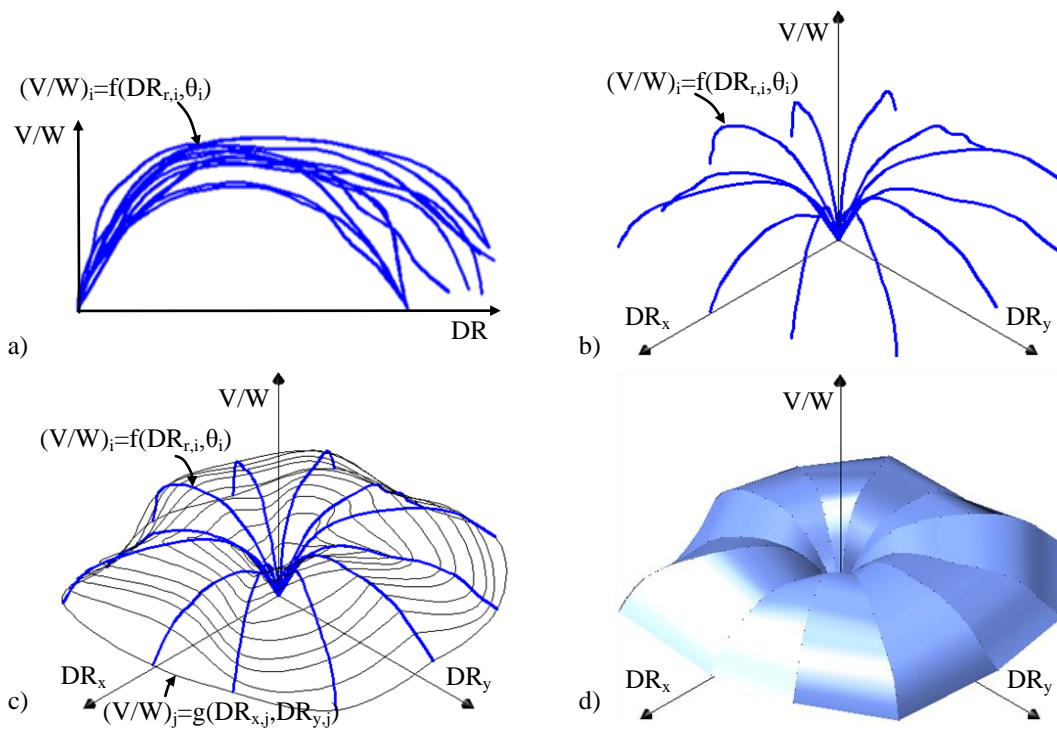
$$I_i\langle DR_{r,i}, (V/W)_i, \theta_i \rangle \subset [V/W = f(DR_x, DR_y)], \quad (4.107)$$

$$DR_{x,j}, DR_{y,j} \in [0, DR_{max}], \quad \theta_i \in [0, 360], \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.108)$$

Na slici 4.31.a su prikazane NSPA *pushover* krive generisane po uglovima  $\theta_i$  (2D ortogonalni koordinatni sistem), dok su na slici 4.31.b prikazane NSPA *pushover* krive u izometriji (3D ortogonalni koordinatni sistem) generisane transformacijom:

$$DR_x = DR_r \cos \theta, \quad DR_y = DR_r \sin \theta, \quad DR_r = \sqrt{DR_x^2 + DR_y^2}. \quad (4.109)$$

3D mrežni model NSPA *pushover* krivih (*wireframe model*) povezanih splajnovima u tangencijalnom pravcu prikazan je na slici 4.31.c, dok je na slici 4.31.d prikazana renderovana 3D NSPA *pushover* površ.



Slika 4.31 Dijagram toka generisanja NSPA *pushover* površi: a) NSPA *pushover* krive generisane za uglove  $\theta$  (2D ortogonalni koordinatni sistem), b) NSPA *pushover* krive u izometriji (3D ortogonalni k.s.), c) 3D mrežni model NSPA *pushover* krivih, d) renderovana 3D NSPA *pushover* površ

Prezentovana NSPA *pushover* površ predstavlja opšti slučaj NSPA *pushover* površi za 3D model asimetrične neregularne zgrade i za analizirane uglove  $\theta_i$ . Ortogonalne projekcije date NSPA *pushover* površi prikazane su na slici 4.32 za  $DR_x$ - $V/W$  i  $DR_x$ - $DR_y$  ravan. Splajnovi u tangencijalnom pravcu  $(V/W)_j = g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$  povezuju diskretne vrednosti iz inkrementalnih situacija  $I_i(DR_{r,i}, (V/W)_i, \theta_i)$  NSPA analiza pa, u opštem slučaju, nisu na ekvidistantnom odstojanju (slika 4.32.a). Sa druge strane ovi splajnovi, u opštem slučaju, nisu ni koncentrični krugovi (slika 4.32.b).

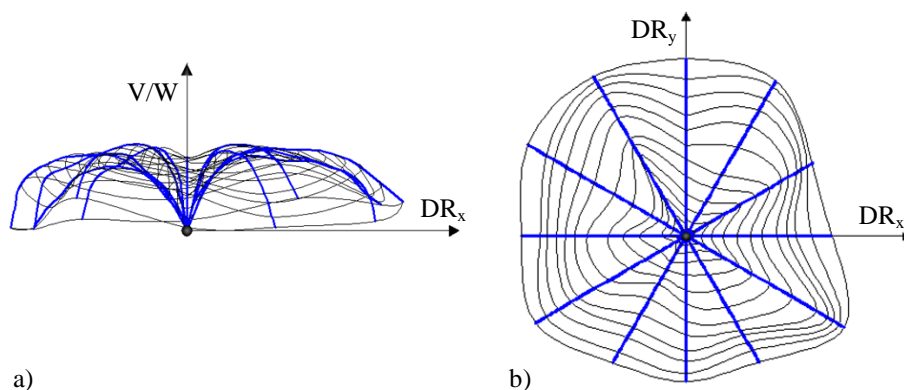
Analogija u geometrijskoj identifikaciji i matematičkoj prezentaciji NSPA

*pushover* površi uspostavljena je sa polutorusnom površi kod koje je veći radijus torusa ekvivalentan manjem radijusu torusa  $a$  (*horn torus*) (slika 4.33.a) [99]. Parametarske jednačine ovako generisane polutorusne površi glase:

$$x = (a + a\cos v)\cos u, \quad y = (a + a\cos v)\sin u, \quad z = a\sin v, \quad (4.110)$$

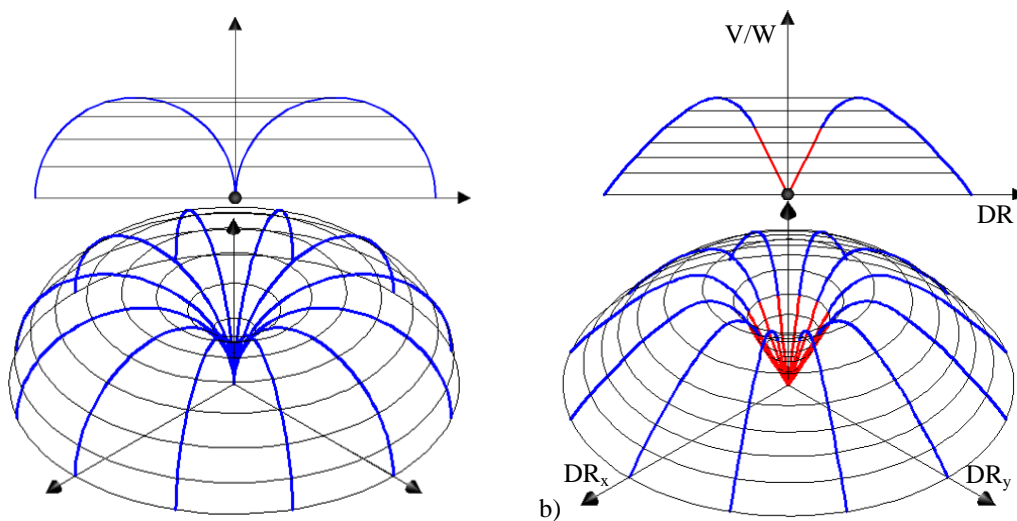
gde je centralni deo levkasta površ za koju važi:

$$x = u\cos v, \quad y = u\sin v, \quad z = alnu. \quad (4.111)$$



Slika 4.32 Ortogonalne projekcije za opšti slučaj NSA *pushover* površi: a)  $DR_x$ - $V/W$ , b)  $DR_x$ - $DR_y$  ravan

NSA *pushover* površ je složena asimetrična površ koja se sastoji iz centralne površi i rotacione poligonarne površi, tako da svojim geometrijom asocira na polutorusnu površ, dok se u prirodi asocijacija može uspostaviti sa vulkanskim kraterom.



Slika 4.33 Analogija u geometrijskoj identifikaciji i matematičkoj prezentaciji NSA *pushover* površi: a) polutorusna površ sa  $R=a$  (*horn torus*), b) složena rotaciona NSA *pushover* površ generisana iz konusne i poligonarne površi

Ukoliko se uzme u obzir da je do nivoa iniciranja granice tečenja zavisnost sila-

pomeranje linearna, tada je centralni deo NSPA *pushover* površi konusna površ za koju važi parametarska jednačina:

$$x = \frac{h_c - u}{h_c} a \cos \theta, \quad y = \frac{h_c - u}{h_c} a \sin \theta, \quad z = u, \quad (4.112)$$

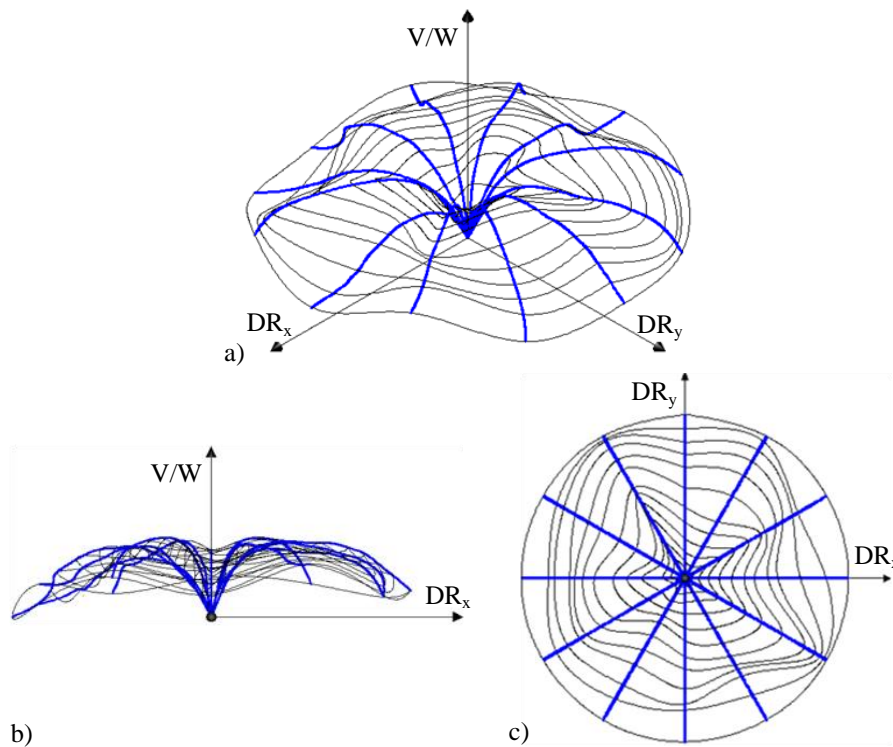
gde je  $h_c$  visina konusne površi (slika 4.33.b). Na složenost NSPA *pushover* površi ukazuje i promenljivost *Gauss*-ove krivine u zavisnosti od razmatranog poddomena diskretnog modela NSPA *pushover* površi.

Ukoliko se primeni adaptivna NSAPA-DBA analiza sa identičnim maksimalnim realizovanim pomeranjima po svim NSPA *pushover* krivama:

$$DR_{\theta_{1,max}} = DR_{\theta_{2,max}} = \dots = DR_{\theta_i,max} = \dots = DR_{\theta_n,max}, \quad (4.113)$$

tada NSPA *pushover* površ ima izgled kao na slici 4.34. Splajn u tangencijalnom pravcu za maksimalana realizovana pomeranja u ortogonalnoj projekciji  $DR_x$ - $DR_y$  je krug (slika 4.34.c), dok unutrašnji splajnovi u tangencijalnom pravcu ne moraju biti koncentrični krugovi. U odnosu na identična maksimalna realizovana pomeranja po svim NSPA *pushover* krivama, odgovarajuće vrednosti relativnih ukupnih smičućih sila u osnovi objekta  $V/W$  nisu identične (slika 4.34.b):

$$(V/W)_{\theta_{1,max}} \neq (V/W)_{\theta_{2,max}} \neq \dots \neq (V/W)_{\theta_i,max} \neq \dots \neq (V/W)_{\theta_n,max}. \quad (4.114)$$



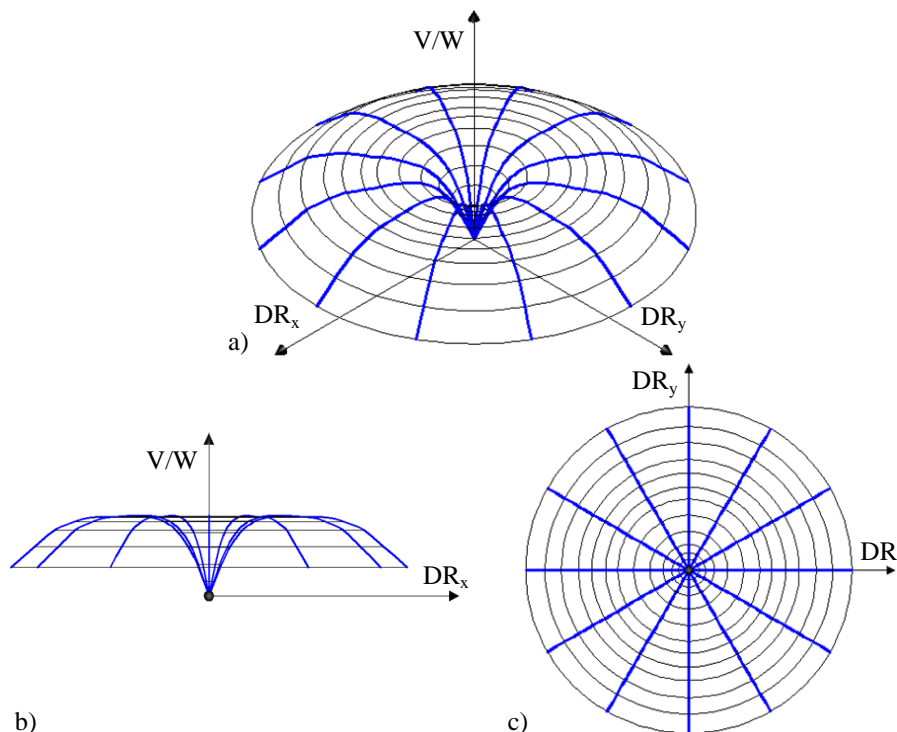
Slika 4.34 NSPA *pushover* površ za slučaj da su maksimalna realizovana pomeranja identična po svim NSPA *pushover* krivama: a) izometrija, b)  $DR_x$ - $V/W$ , c)  $DR_x$ - $DR_y$  ravan

Specijalni slučaj NSPA *pushover* površi se javlja u slučaju kada se NSPA analize sprovedu na rotaciono simetričnom objektu i po krutosti i pa raspodeli masa, a takođe kada su obe komponente akceleroograma identične. U tom slučaju sve NSPA *pushover* krive su identične, a splajnovi u tangencijalnom pravcu su koncentrični krugovi sa centrom u vertikalnoj osi (slika 4.35):

$$(V/W)_{\theta_{1,max}} = (V/W)_{\theta_{2,max}} = \dots = (V/W)_{\theta_i,max} = \dots = (V/W)_{\theta_n,max}, \quad (4.115)$$

tako da su ti splajnovi izokrive. Posledica ovog pravila je da su svi splajnovi u tangencijalnom pravcu paralelni:

$$(V/W)_{j=1} = g(DR_{x,j=1}, DR_{y,j=1}) \parallel \dots \parallel (V/W)_{j=n} = g(DR_{x,j=n}, DR_{y,j=n}). \quad (4.116)$$

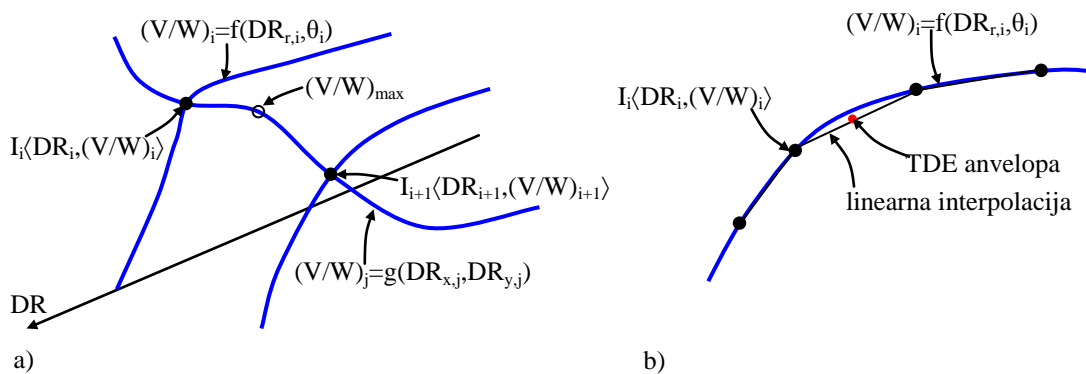


Slika 4.35 Specijalni slučaj NSPA *pushover* površi, pri čemu su sve NSPA *pushover* krive identične, a splajnovi u tangencijalnom pravcu su koncentrični krugovi sa centrom u vertikalnoj osi: a) izometrija, b)  $DR_x$ - $V/W$ , c)  $DR_x$ - $DR_y$  ravan

U definiciji 4.3 NSPA *pushover* površ je prezentovana kao glatka interpolirana asimetrična rotaciona površ za koju se dakle, primenjuje određeni postupak interpolacije u cilju prezentacije površi u prostoru. To podrazumeva da se primenjuje interpolacija splajnovima, a koja je posebno pogodna za diskretne vrednosti koje se dobijaju iz NSPA i INDA analiza. Međutim, s obzirom da se problem razmatra u tri dimenzije, tada je pogodnija primena NURBS krivih (*non-uniform rational basis spline*) za generisanje



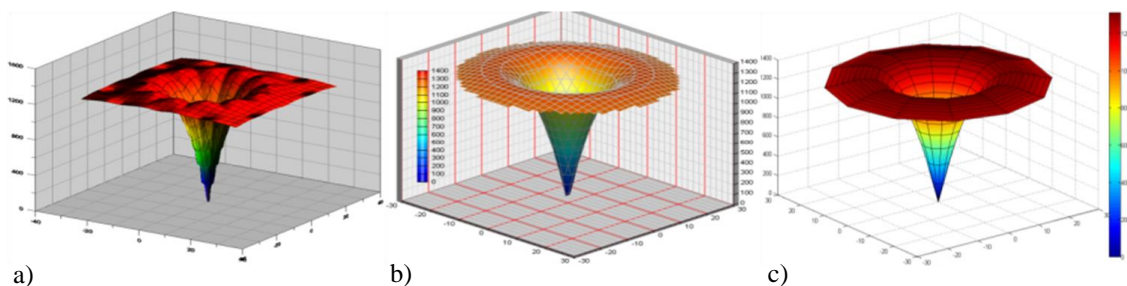
površi [183]. NURBS krive su definisane kontrolnim čvorovima i vektorom čvora. U opštem slučaju NURBS krive i površi su generalizacija B-splajnova i *Bezier*-ovih krivih i površi. Kontrolni čvorovi definišu oblik površi, u konkretnom slučaju NSPA i INDA površi, dok vektor čvora određuje gde i kako površ dodiruje kontrolne čvorove. Problem koji se može pojaviti kod primene NURBS površi je što se za određene kontrolne čvorove, a koji su diskretne vrednosti NSPA *pushover* analiza  $I_i\langle DR_{r,i}, (V/W)_i, \theta_i \rangle$ , mogu dobiti isuviše velika odstupanja u interpolaciji. Kod interpolacije u tangencijalnom pravcu pojedini splajnovi mogu stvoriti lažne maksimume ili minimume za dve diskretne vrednosti između dve susedne NSPA *pushover* krive (slika 4.36.a). Minimiziranje prethodnog problema postiže se smanjenjem broja inkrementa priraštaja ugla  $\Delta\theta$ . Sa druge, strane moguće je da se određeni delovi anvelope ciljnog pomeranja nalaze ispod NSPA *pushover* površi (slika 4.36.b).



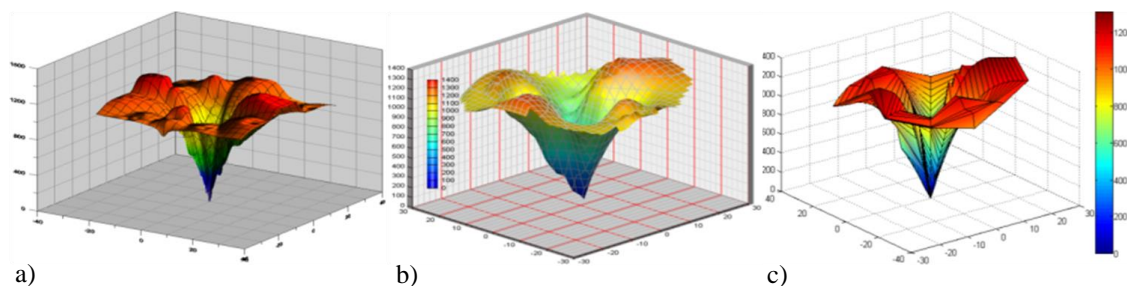
Slika 4.36 a) lažni maksimum kod interpolacije NSPA *pushover* površi u tangencijalnom pravcu, b) određeni delovi anvelope ciljnog pomeranja se nalaze ispod NSPA *pushover* krive, odnosno površi

Veliki broj softverskih rešenja primenjuje interpolaciju površi za određene matematičke funkcije i mapiranje, dok samo manji broj ima mogućnost prezentacije površi u prostoru za diskretne vrednosti. U cilju preliminarne verifikacije softverskih rešenja i analiza prethodno izloženog problema, izvršena je komparacija NSPA *pushover* površi generisane u *Grapher* 8.3.523 [279], *Simplex Numerica* 9.0.2.5 [345] i *MATLAB* 7.1.0.246 [292]. U prvom primeru je razmatran specijalni slučaj rotaciono simetrične NSPA *pushover* površi (slika 4.37), dok je drugom primeru razmatran opšti slučaj NSPA *pushover* površi (slika 4.38). Komparacijom ove tri softverske aplikacije utvrđeno je da se najbolje rešenje dobija primenom *MATLAB*-a, jer su diskretne vrednosti linearno interpolirane i direktno povezane u prostornom koordinatnom

sistemu. Problem koji se pojavljivao kod ostala dva softvera je odstupanje od realistične prezentacije NSPA *pushover* površi, tako što se u određenim slučajevima diskretne vrednosti ne povezuju direktno interpolacionim funkcijama. Za potrebe ovog istraživanja primenjena je linearna interpolacija za prezentaciju svih NSPA *pushover* površi primenom softvera *Graphis* 2.9.33 [280] i *MATLAB* [292]. NSPA *pushover* površi generisane u *MATLAB*-u identične su sa NSPA *pushover* površima generisanim u *Graphis*-u, pri čemu se u *MATLAB*-u primenjuje diskretizacija površi četvorouglovima, dok se u *Graphis*-u primenjuje diskretizacija površi trouglovima.



Slika 4.37 Specijalni slučaj rotaciono simetrične NSPA *pushover* površi generisane u: a) *Grapher*, b) *Simplex Numerica*, c) *MATLAB*



Slika 4.38 Opšti slučaj NSPA *pushover* površi generisane u: a) *Grapher*, b) *Simplex Numerica*, c) *MATLAB*

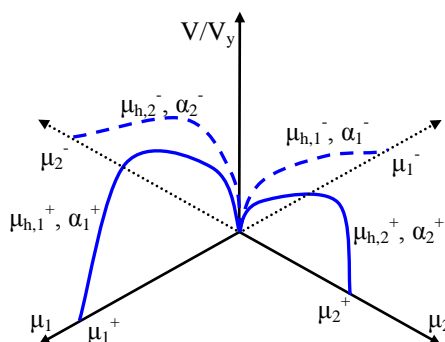
#### 4.4.2. TIPOLOGIJA NSPA *PUSHOVER* POVRŠI

Tipološka analiza NSPA *pushover* površi znatno je kompleksnija u odnosu na tipologiju NSPA *pushover* krivih, s obzirom da u jednoj NSPA *pushover* površi participira više NSPA *pushover* krivih. Generalno, tipologija se može izvršiti u cilju podele na dve bitno različite grupe: sa konstantnim znakom krutosti u nelinearnom domenu  $K_n$  za sve NSPA *pushover* krive i sa različitim znakom krutosti u nelinearnom domenu  $K_n$  za NSPA *pushover* krive. Kod grupe sa konstantnim znakom  $K_n$  moguće je:

- $K_n > 0$  za sve NSPA *pushover* krive,

- $K_n \approx 0$  za sve NSPA *pushover* krive,
- $K_n < 0$  za sve NSPA *pushover* krive uz značajno učešće  $P-\Delta$  efekata.

Kod grupe sa različitim znakom  $K_n$  za NSPA *pushover* krive moguća je situacija da određene NSPA *pushover* krive imaju  $K_n > 0$ , a određene NSPA *pushover* krive imaju  $K_n < 0$ . Ovakav odgovor sistema je posledica znatne razlike u krutosti zgrade za dva ortogonalna pravca, a ukoliko se uzme u obzir ispitivanje egzistencije linearnog, nelinearnog i kolapsnog domena, tada postoji veliki broj varijacija NSPA *pushover* površi. Generalizacija u tipologiji NSPA *pushover* površi izvedena je u funkciji varijacije  $\mu$ ,  $\mu_h$  i  $\alpha$  parametara za jedan i dva glavna pravca (slika 4.39). Na ordinati je prikazana normalizovana vrednost ukupne smičuće sile  $V/V_y$  (odnos ukupne smičuće sile prema ukupnoj smičućoj sili na granici tečenja).



Slika 4.39 Generalizacija u tipologiji NSPA *pushover* površi u funkciji varijacije parametara  $\mu$ ,  $\mu_h$  i  $\alpha$  [44]

U slučaju varijacije  $\mu$ ,  $\mu_h$  i  $\alpha$  parametara kod NSPA *pushover* površi samo za jedan glavni pravac, razmatrani su slučajevi:

- identične vrednosti parametara po smerovima jednog (svih) pravca  $\mu_1^+ = \mu_1^-$ ,
- različite vrednosti parametara po smerovima jednog pravca  $\mu_1^+ \neq \mu_1^-$ .

U tabeli 4.3 su prikazani generički modeli NSPA *pushover* površi u funkciji varijacije parametra  $\alpha > 0$ ,  $\alpha \approx 0$ ,  $\alpha < 0$  i duktilnost  $\mu = \mu_h$  i  $\mu > \mu_h$  za jedan glavni pravac. U slučaju varijacije parametara  $\alpha > 0$ ,  $\alpha \approx 0$ ,  $\alpha < 0$  i duktilnost  $\mu = \mu_h$  i  $\mu > \mu_h$  kod NSPA *pushover* površi za dva glavna pravca razmatrani su slučajevi:

- identične vrednosti parametara po smerovima jednog pravca  $\mu_1^+ = \mu_1^-$  i  $\mu_2^+ = \mu_2^-$ ,
- različite vrednosti parametara po smerovima jednog pravca  $\mu_1^+ \neq \mu_1^-$  i  $\mu_2^+ \neq \mu_2^-$ .

U tabeli 4.4 su prikazane generisane NSPA *pushover* površi u funkciji varijacije parametra  $\mu$ ,  $\mu_h$  i  $\alpha$  za dva glavna pravca.

Tabela 4.3 Generisane NSPA *pushover* površi u funkciji varijacije parametara  $\mu$ ,  $\mu_h$  i  $\alpha$  za jedan glavni pravac [44]

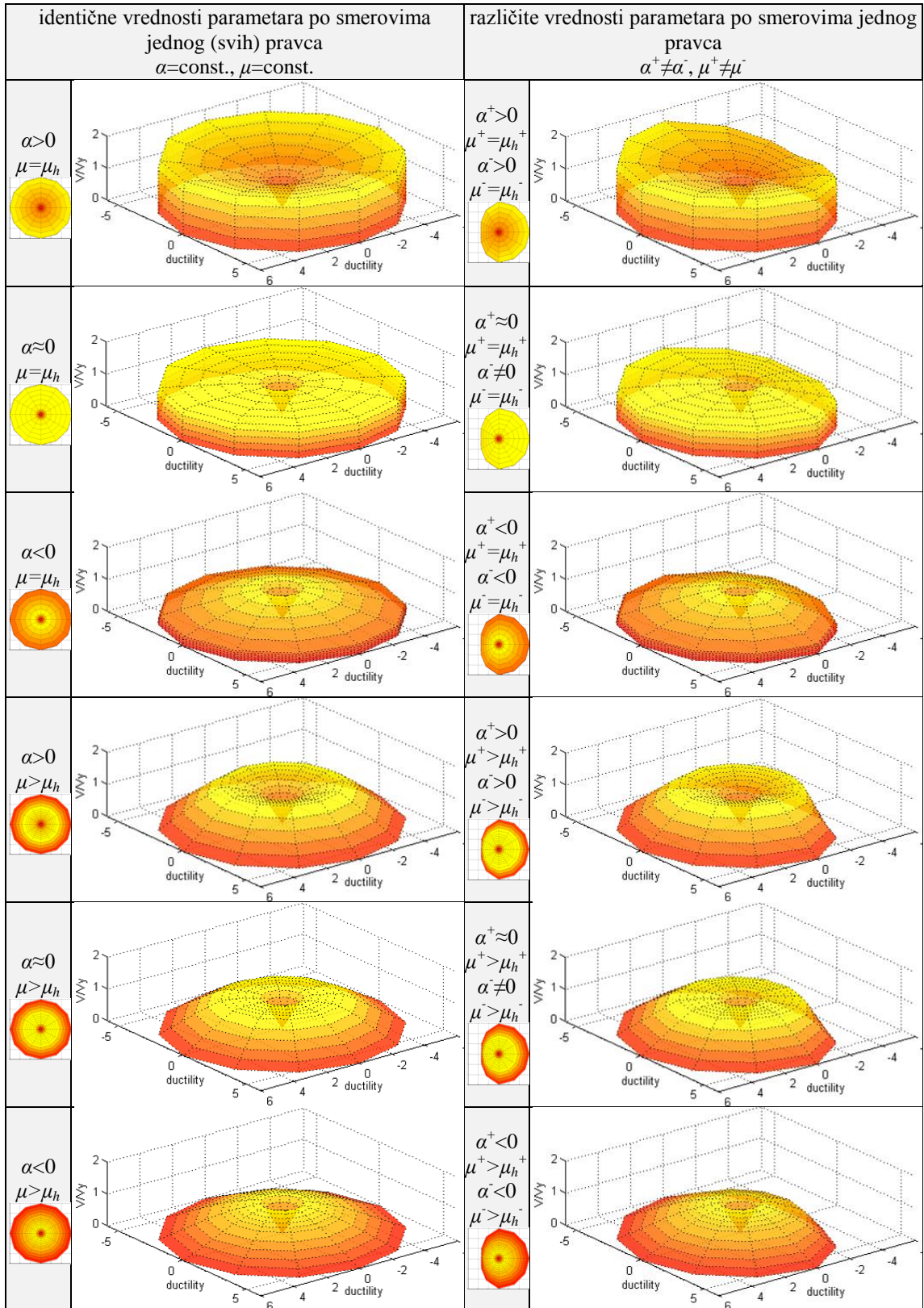
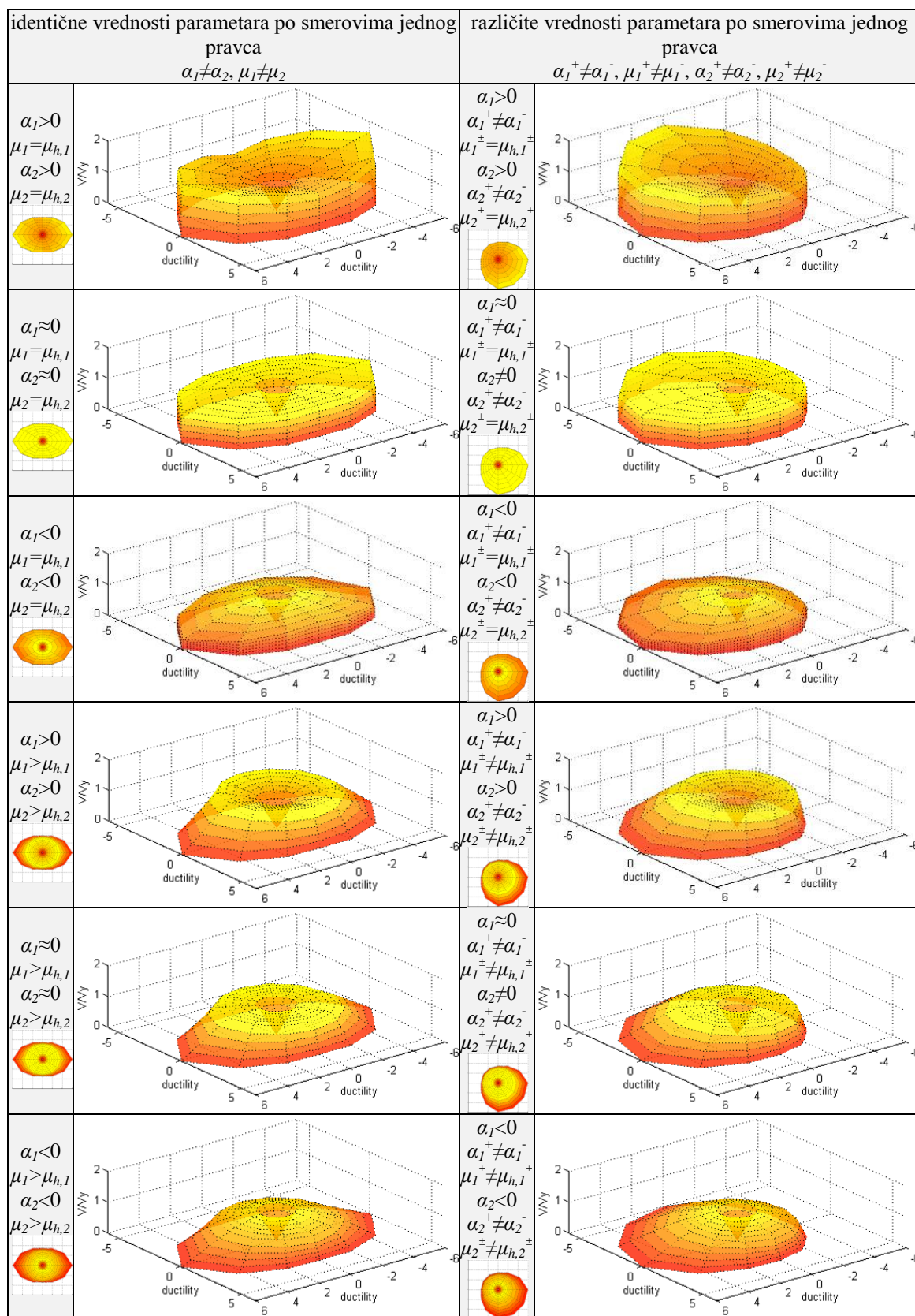


Tabela 4.4 Generisane NSPA *pushover* površi u funkciji varijacije parametara  $\mu$ ,  $\mu_h$  i  $\alpha$  za dva glavna pravca [44]



Komparacijom generisanih NSPA *pushover* površi prikazanih u tabelama 4.3 i 4.4 mogu da se identifikuju četiri bitno različite grupe ovih površi. U prvu grupu spadaju NSPA *pushover* površi rotaciono polisimetrične u osnovi (leva strana tabele 4.3), gde su sve NSPA *pushover* krive identične, a splajnovi u tangencijalnom pravcu su koncentrični krugovi sa centrom u vertikalnoj osi [44]:

$$(V/V_y)_{\theta 1, \max} = (V/V_y)_{\theta 2, \max} = \dots = (V/V_y)_{\theta i, \max} = \dots = (V/V_y)_{\theta n, \max}, \quad (4.117)$$

$$\mu_x^2 + \mu_y^2 = \mu_{\max}^2, \quad (4.118)$$

$$\mu_y = \pm \sqrt{\mu_{\max}^2 - \mu_x^2}, \quad \mu_x \in [-\mu_{\max}, \mu_{\max}], \quad (4.119)$$

gde je  $\mu_{\max}$  maksimalna realizovana duktilnost. Posledica ovog pravila je da su svi splajnovi u tangencijalnom pravcu paralelni:

$$(V/V_y)_{j=1} = g(\mu_{x,j=1}, \mu_{y,j=1}) \parallel \dots \parallel (V/V_y)_{j=n} = g(\mu_{x,j=n}, \mu_{y,j=n}). \quad (4.120)$$

U drugu grupu spadaju NSPA *pushover* površi koje su monosimetrične u osnovi (desna strana tabele 4.3) i za koje se linija u osnovi može da prikaže kao zatvorena ovalna kriva [109]. Izraz za zatvorenu ovalnu krivu je dodatno korigovan i prilagođen za potrebe ovog istraživanja, tako da glasi:

$$(\mu_x^2 + p_o^2 \mu_y^2)^2 = (\mu_{x,\max} + |\mu_{x,\min}|) \mu_x^2 + 2(\mu_{x,\max} + |\mu_{x,\min}|) p_o^2 \mu_x \mu_y^2, \quad (4.121)$$

$$\mu_y = \pm \frac{\sqrt{\mu_x (\mu_{x,\max} + |\mu_{x,\min}| - \mu_x) + \sqrt{(\mu_{x,\max} + |\mu_{x,\min}|)(\mu_{x,\max} + |\mu_{x,\min}| - \mu_x)}}}{p_o}$$

$$\mu_x \in [\mu_{x,\min}, \mu_{x,\max}], \quad (4.122)$$

gde je  $\mu_{x,\max}$  maksimalna realizovana duktilnost za  $x$  pravac,  $\mu_{x,\min}$  minimalna realizovana duktilnost za  $x$  pravac,  $p_o$  parametar ovalne krive. U treću grupu spadaju NSPA *pushover* površi koje su bisimetrične u osnovi (leva strana tabele 4.4) i za koje se linija u osnovi može da prikaže kao superelipsa [109]. Izraz za superelipsu je dodatno korigovan i prilagođen za potrebe ovog istraživanja, tako da glasi:

$$\left( \frac{\mu_x}{\mu_{x,\max}} \right)^{n_{se}} + \left( \frac{\mu_y}{\mu_{y,\max}} \right)^{n_{se}} = 1, \quad (4.123)$$

$$\mu_y = \pm \mu_{y,\max} \sqrt[n_{se}]{1 - \left( \frac{\mu_x}{\mu_{x,\max}} \right)^{n_{se}}}, \quad \mu_x \in [-\mu_{x,\max}, \mu_{x,\max}], \quad (4.124)$$

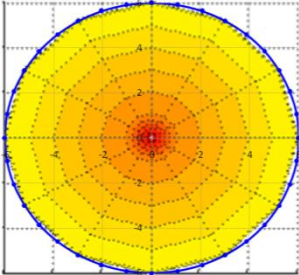
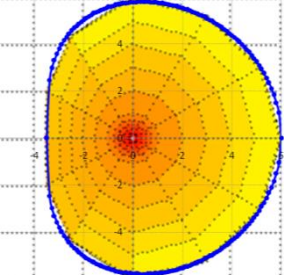
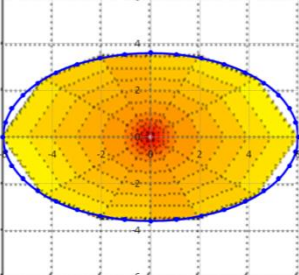
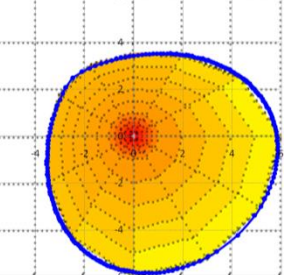
gde je  $\mu_{y,\max}$  maksimalna realizovana duktilnost za  $y$  pravac,  $n_{se}$  parametar superelipse. U četvrtu grupu spadaju NSPA *pushover* površi koje su asimetrične ili monosimetrične u osnovi (desna strana tabele 4.4) i za koje se linija u osnovi može da prikaže takođe

kao zatvorena ovalna kriva. U odnosu na izraz (4.122) dodatno je sprovedena korekcija, tako da sada ovaj izraz glasi:

$$\mu_{x,r} = \mu_{x0} + \mu_x \cos(\varphi_o) - \mu_y \sin(\varphi_o), \quad \mu_{y,r} = \mu_{y0} + \mu_x \sin(\varphi_o) + \mu_y \cos(\varphi_o), \quad (4.125)$$

gde su  $\mu_x$  i  $\mu_y$  duktilnosti prema izrazu (4.122),  $\mu_{x,0}$  i  $\mu_{y,0}$  duktilnosti za centar zatvorene ovalne krive,  $\varphi_o$  ugao rotacije zatvorene ovalne krive. U tabeli 4.5 su prikazana četiri karakteristična tipa NSPA *pushover* površi i konstruisane odgovarajuće krive u osnovi.

Tabela 4.5 Četiri karakteristična tipa NSPA *pushover* površi i konstruisane odgovarajuće krive u osnovi

$\mu_{max}=6$		$\mu_{x,max}=6$ $\mu_{x,min}=-3.5$ $p_o=1.3$	
$\mu_{x,max}=6$ $\mu_{y,min}=-3.5$ $n_{se}=2$		$\mu_{x,max}=6$ $\mu_{x,min}=-3.5$ $p_o=1.65$ $\mu_{x0}=1.75$ $\mu_{y0}=-1.75$ $\varphi_o=135^\circ$	

#### 4.4.3. KOEFICIJENT POVRŠI DUKTILNOSTI

U odnosu na klasičan pristup gde se koristi koeficijent duktilnosti  $\mu$  za procenu nelinearnog odgovora zgrade za jedan razmatrani pravac, uveden je novi koeficijent površi duktilnosti (*ductility area coefficient*)  $M_\mu$  za procenu nelinearnog odgovora 3D modela zgrada. Analogno koeficijentu duktilnosti i njegovoj oznaci  $\mu$ , za koeficijent površi duktilnosti usvojeno je veliko grčko slovo  $M_\mu$ , s obzirom da se prešlo iz jednodimenzionalnog u dvodimenzionalno razmatranje problema. U opštem slučaju koeficijent površi duktilnosti  $M_\mu$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene maksimalno realizovanim pomeranjima  $A_{d,max}$  i oblasti ograničene pomeranjima na granici tečenja  $A_{d,y}$ :

$$M_\mu = \frac{A_{d,max}}{A_{d,y}}. \quad (4.126)$$

Površni  $A_{d,max}$  i  $A_{d,y}$  se određuje primenom zatvorenog krivolinijskog integrala prema

Green-ovoj formuli [192]:

$$\oint dA = \frac{1}{2} \oint (x dy - y dx), \quad (4.127)$$

odnosno za diskretne vrednosti važi:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |D_{x,i} D_{y,i+1} - D_{x,i+1} D_{y,i}|, \quad (4.128)$$

tako da su površi  $A_{d,max}$  i  $A_{d,y}$ :

$$A_{d,max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (D_{max,x,i} D_{max,y,i+1} - D_{max,x,i+1} D_{max,y,i}), \quad (4.129)$$

$$A_{d,y} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (D_{Y,x,i} D_{Y,y,i+1} - D_{Y,x,i+1} D_{Y,y,i}). \quad (4.130)$$

Izraz (4.126) u konačnoj formi glasi:

$$M_{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^n (D_{max,x,i} D_{max,y,i+1} - D_{max,x,i+1} D_{max,y,i})}{\sum_{i=1}^n (D_{Y,x,i} D_{Y,y,i+1} - D_{Y,x,i+1} D_{Y,y,i})}. \quad (4.131)$$

Izraz (4.131) se može primeniti za određivanje koeficijenta površi duktilnosti za različite nivoe maksimalno ralizovanih pomeranja, odnosno za sve oblike kriva ralizovanih duktilnosti u osnovi, od kojih su neke prikazane u tabeli 4.5. Korelacija koeficijenta duktilnosti  $\mu$  i koeficijenta površi duktilnosti  $M_{\mu}$  je uspostavljena primenom funkcije slučajnog izbora (*random* funkcije) maksimalno ralizovanih pomeranja i koeficijenata duktilnosti po uglovima  $\theta_i$ :

$$D_i = \text{rand}[100D_{inf}, 100D_{sup}] \cdot 0.01, \quad (4.132)$$

$$\mu_i = \text{rand}[100\mu_{inf}, 100\mu_{sup}] \cdot 0.01, \dots, i = 1, \dots, 12, \quad (4.133)$$

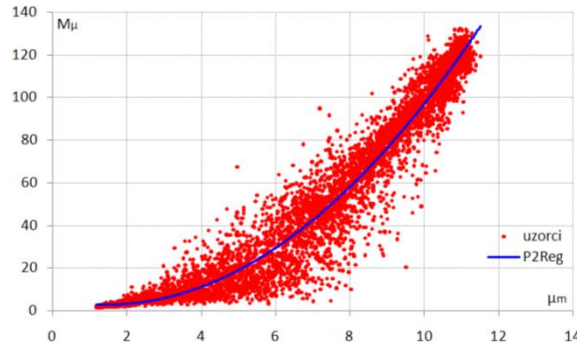
pri čemu je gornja granica maksimalno ralizovanih pomeranja  $D=120\text{cm}$ , gornja granica koeficijenta duktilnosti  $\mu=12$ . Zatim su koeficijenti površi duktilnosti  $M_{\mu}$  određeni kroz više od 6500 iteracija prema izrazima (4.131)÷(4.133), s'tim što je u svakoj iteraciji zadržavano po dve maksimalne i minimalne vrednosti za pomeranje (slika 4.40). Primenom regresione analize, za polinom drugog stepena *P2Reg*, određena je zavisnost:

$$M_{\mu} = 1.294\mu_m^2 - 3.787\mu_m + 5.428, \quad \mu_m = \sum_{i=1}^{12} \mu_i / 12, \quad (4.134)$$

gde je  $\mu_m$  srednja vrednost koeficijenta duktilnosti. Klase koeficijenta površi duktilnosti  $M_{\mu}$  su određene analogno klasama koeficijenta duktilnosti  $\mu$  prema FEMA 273 [78]:

$$\begin{array}{lll} \mu_m < 2 & : & M_{\mu} < 3 \quad \text{niska} \\ 2 \leq \mu_m \leq 4 & : & 3 \leq M_{\mu} \leq 11 \quad \text{srednja} \\ \mu_m > 4 & : & M_{\mu} > 11 \quad \text{visoka} \end{array} \quad (4.135)$$





Slika 4.40 Koeficijenti površi duktilnosti  $M_\mu$  određeni prema izrazima (4.131)÷(4.134)

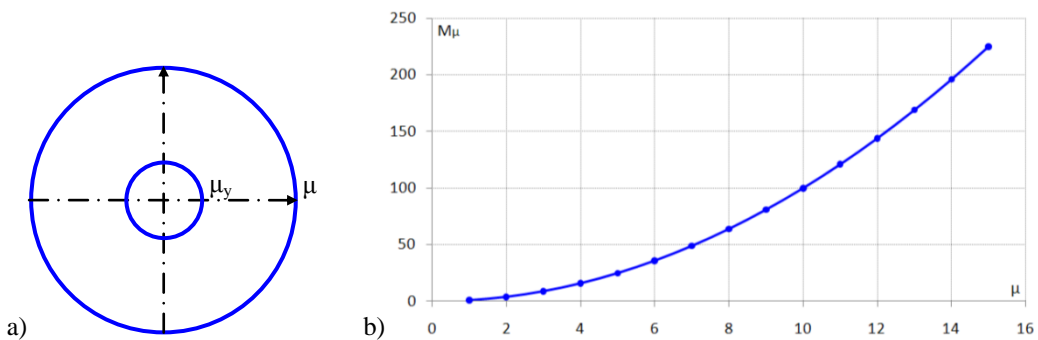
U slučaju da su vrednosti maksimalno realizovanih duktilnosti identične (krug), koeficijent površi duktilnosti  $M_\mu$  se određuje prema (slika 4.41.a):

$$M_\mu = \frac{A_{d,max}}{A_{d,Y}} = \frac{D_{max}^2 \pi}{D_Y^2 \pi} = \mu^2, \quad \mu_Y = 1, \quad (4.136)$$

pri čemu su klase koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu$  određene analogno klasama koeficijenta duktilnosti  $\mu$  prema FEMA 273 [78]:

$$\begin{aligned} \mu < 2 & : M_\mu < 4 & \text{niska} \\ 2 \leq \mu \leq 4 & : 4 \leq M_\mu \leq 16 & \text{srednja} \\ \mu > 4 & : M_\mu > 16 & \text{visoka} \end{aligned} \quad (4.137)$$

Promena koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu$  u funkciji maksimalno realizovanog koeficijenta duktilnosti  $\mu$  je prikazana na slici 4.41.b.

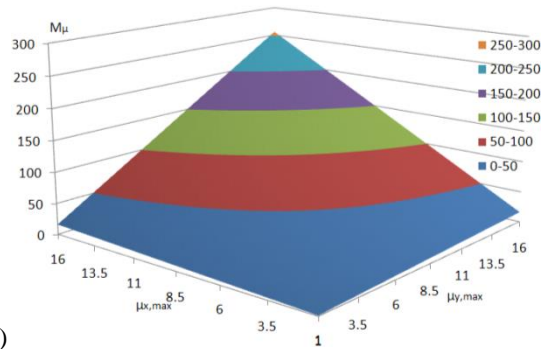
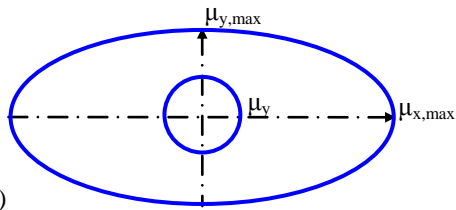


Slika 4.41 a) identične vrednosti maksimalno realizovanih koeficijenata duktilnosti, b) promena koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu$  u funkciji koeficijenta duktilnosti  $\mu$

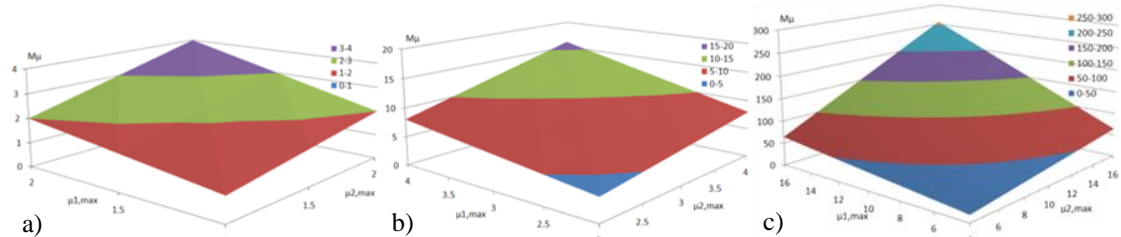
U slučaju da su vrednosti maksimalno realizovanih koeficijenata duktilnosti različite za dva glavna pravca (elipsa), koeficijent površi duktilnosti  $M_\mu$  se određuje prema (slika 4.42):

$$M_\mu = \frac{A_{d,max}}{A_{d,Y}} = \frac{D_{max,x} D_{max,y} \pi}{D_{Y,x} D_{Y,y} \pi} = \mu_{x,max} \mu_{y,max}, \quad (4.138)$$

pri čemu je  $\mu_{x,max} \neq \mu_{y,max}$ , dok su klase koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu$  određene analogno vrednostima koeficijenta duktilnosti  $\mu$  prema FEMA 273 [78], s'tim što se za koeficijent duktilnost koristi srednja vrednost  $\mu_{x,max}$  i  $\mu_{y,max}$  (slika 4.43).



Slika 4.42 a) različite vrednosti maksimalno realizovanih koeficijenata duktilnosti dva glavna pravca, b) promena koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu$  u funkciji  $\mu_{x,max} \neq \mu_{y,max}$



Slika 4.43 Vrednosti maksimalno realizovanih koeficijenata površi duktilnosti  $M_\mu$  za: a) nisku, b) srednju, c) visoku klasu duktilnosti

#### 4.4.4. INDA *PUSHOVER* POVRŠ: DEFINICIJA I GENERISANJE

Model okvirne zgrade se izlaže dejstvu zemljotresa preko komponentata akcelorograma za različite vrednosti ugla  $\theta_i$ , a koje su predstavljene primenom površi akcelorograma GMRS. U slučaju odgovora INDA analize u kapacitativnom domenu  $CD_{INDA}$ , za meru intenziteta  $IM$  se selektuje maksimalno ubrzanje tla  $PGA$  ili spektralno ubrzanje za prvi svojstveni oblik pri nivou prigušenja od 5%  $S_d(T_1, 5\%)$ , dok se za inženjerski parametar zahteva  $EDP$  selektuje globalni drift  $DR$  ili maksimalni međuspratni drift  $IDR_{max}$ . Za potrebe ovog istraživanja kod INDA analize za  $IM$  parametar je selektovano  $PGA$ , a za  $EDP$  parametar je selektovano  $DR$ , tako da se za skup diskretnih uređenih parova  $DR_i$  i  $PGA_i$  može pisati:

$$CD_{INDA} = \bigcup_{i=1}^n \langle IDR_{max,i}, PGA_i \rangle, \quad \forall (DR_i, PGA_i) \in \mathfrak{R}^+, \quad (4.139)$$

dok odgovarajuća INDA *pushover* kriva predstavlja interpolirane diskretne uređene

parove  $\langle DR_i, PGA_i \rangle$ :

$$PGA = f(DR). \quad (4.140)$$

S obzirom da se odgovor sistema prema INDA analizi, u kapacitativnom domenu, razmatra skaliranjem akcelorograma od inicijalnog ( $i$ ) do finalnog ( $i=n$ ) faktora skaliranja, tada se za pomeranje kontrolnog čvora  $i$ -tog faktora skaliranja  $D^{(i)}$  može pisati:

$$D^{(i)} = D^{(i-1)} + \Delta D^{(i)}, \quad (4.141)$$

dok je odgovarajuće maksimalno ubrzanje tla pri  $i$ -tom faktoru skaliranja  $PGA^{(i)}$ :

$$PGA^{(i)} = PGA^{(i-1)} + \Delta PGA^{(i)}. \quad (4.142)$$

Ukupno pomeranje sistema  $D$  određuje se iz pomeranja na granici tečenja  $D_y$  i iz pomeranja inkremenata faktora skaliranja:

$$D = D_y + \sum_{i=1}^n \Delta D^{(i)}, \quad (4.143)$$

a odgovarajuće maksimalno ubrzanje tla se određuje iz maksimalno ubrzanje tla na granici tečenja  $PGA_y$  i iz inkremenata faktora skaliranja:

$$PGA = PGA_y + \sum_{i=1}^n \Delta PGA^{(i)}. \quad (4.144)$$

Relativna vrednost međuspratnog pomeranja je međuspratni drift  $IDR_{max}$ :

$$IDR_{max} = \frac{D_i - D_{i-1}}{h_i - h_{i-1}}, \quad (4.145)$$

gde je  $D_i - D_{i-1}$  pomeranje  $i$ -tog sprata,  $h_i - h_{i-1}$  visina  $i$ -tog sprata. U fazama proračuna zgrade razmatraju se svi stepeni slobode sistema, ali se monitoring odgovora sistema prati i prezentuje za odgovarajući pravac (ugao  $\theta_i$ ) i predstavlja INDA *pushover* krivom. Integracijom ovako određenih INDA *pushover* krivih  $PGA = f(DR)_\theta$  po uglovima  $\theta_i$  generiše se INDA *pushover* površ 3D modela zgrade. Razmatranje performansnih nivoa 3D modela zgrade primenom INDA *pushover* površi sprovodi se analogno razmatranju kod NSPA *pushover* površi.

Definicija 4.4: INDA *pushover* površ (*pushover surface*) 3D modela zgrade  $PGA = f(DR_x, DR_y)$  je glatka interpolirana asimetrična rotaciona površ generisana povezivanjem diskretnih vrednosti  $I_i \langle DR_{r,i}, PGA_i, \theta_i \rangle$  individualnih NDA *pushover* krivih  $PGA_i = f(DR_{r,i}, \theta_i)$  splajnovima u tangencijalnom pravcu  $PGA_j = g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$ :

$$PGA = f(DR_x, DR_y) = \left[ \bigcup_{\theta_i=0}^{360^\circ} f(DR_{r,i}, \theta_i) \right] \cup \left[ \bigcup_{j=0}^{IDR_{max}} g(DR_{x,j}, DR_{y,j}) \right], \quad (4.146)$$

pri čemu je:

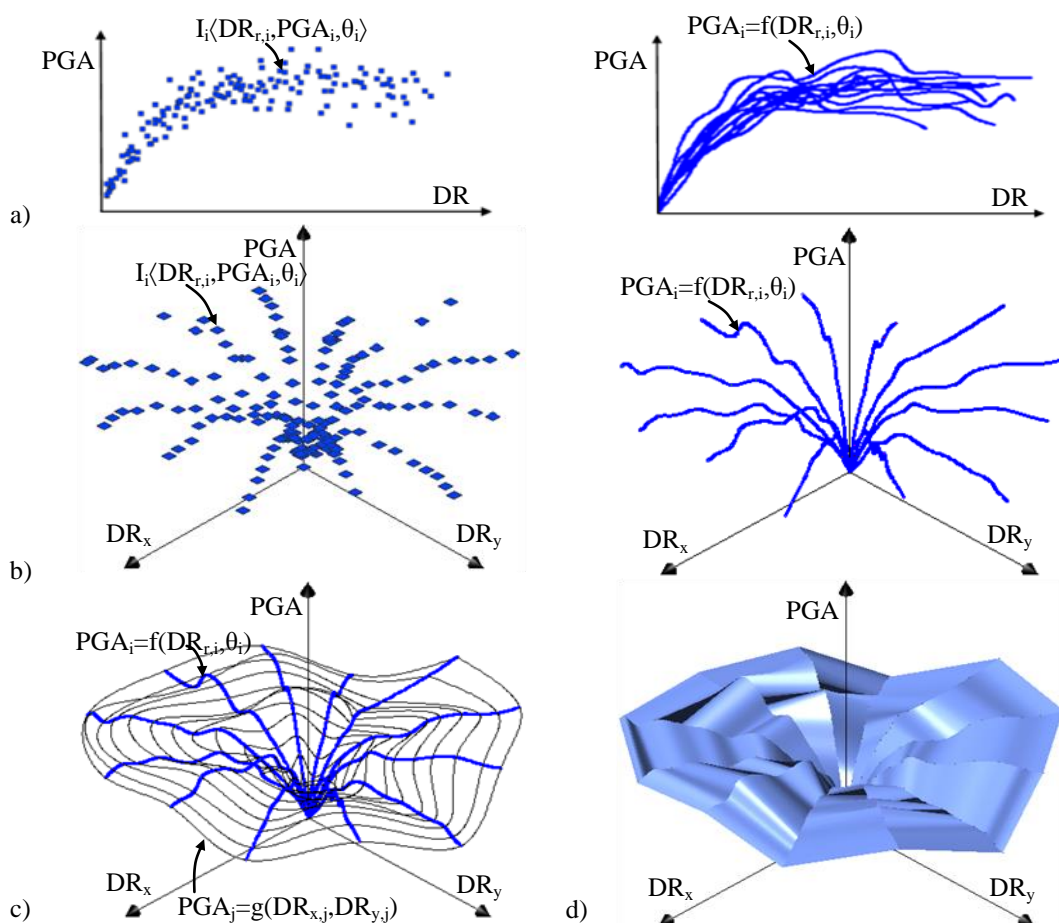
$$I_i \langle DR_{r,i}, PGA_i, \theta_i \rangle \subset [PGA = f(DR_x, DR_y)], \quad (4.147)$$

$$DR_{x,j}, DR_{y,j} \in [0, DR_{max}], \quad \theta_i \in [0, 360], \quad \forall (DR_i, PGA_i) \in \mathfrak{R}^+. \quad (4.148)$$

Na slici 4.44.a su prikazane diskretne vrednosti odgovora NDA analiza i odgovarajuće INDA *pushover* krive generisane za uglove  $\theta_i$ , dok su na slici 4.44.b prikazane diskretne vrednosti odgovora NDA analiza i odgovarajuće INDA *pushover* krive u izometriji generisane transformacijom:

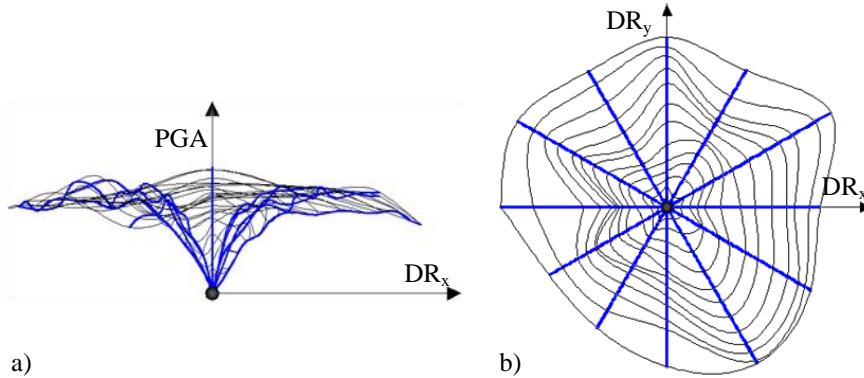
$$DR_x = DR_r \cos \theta, \quad DR_y = DR_r \sin \theta, \quad DR_r = \sqrt{DR_x^2 + DR_y^2}. \quad (4.149)$$

3D mrežni model INDA *pushover* krivih povezanih splajnovima u tangencijalnom pravcu prikazan je na slici 4.44.c, dok je na slici 4.44.d prikazana renderovana 3D INDA *pushover* površ.



Slika 4.44 Dijagram toka generisanja INDA *pushover* površi: a) diskretne vrednosti odgovora NDA analiza i odgovarajuće INDA *pushover* krive generisane za uglove  $\theta_i$  (2D ortogonalni koordinatni sistem), b) diskretne vrednosti odgovora NDA analiza i odgovarajuće INDA *pushover* krive u izometriji (3D ortogonalni koordinatni sistem), c) 3D mrežni model INDA *pushover* krivih, d) renderovana 3D INDA *pushover* površ

Ortogonalne projekcije date INDA *pushover* površi prikazane su na slici 4.45 za  $DR_x$ - $PGA$  i  $DR_x$ - $DR_y$  ravan. Splajnovi u tangencijalnom pravcu  $PGA_j = g(DR_{x,j}, DR_{y,j})$  povezuju diskretne vrednosti  $I_i(DR_{r,i}, PGA_i, \theta_i)$  iz NDA analiza pa, u opštem slučaju, nisu na ekvidistantnom odstojanju (slika 4.45.a). Sa druge strane ovi splajnovi, u opštem slučaju, nisu ni koncentrični krugovi (slika 4.45.b).



Slika 4.45 Ortogonalne projekcije za opšti slučaj INDA *pushover* površi: a)  $DR_x$ - $PGA$ , b)  $DR_x$ - $DR_y$  ravan

Specijalni slučaj INDA *pushover* površi se javlja kada se INDA analize sprovedu na rotaciono simetričnom objektu i po krutosti i po raspodeli masa, a takođe kada su obe komponente zemljotresa identične  $a_\theta(t) = a_{\theta+90}(t)$ . U tom slučaju sve INDA *pushover* krive su identične, a splajnovi u tangencijalnom pravcu su koncentrični krugovi sa centrom u vertikalnoj osi (slika 4.46). Kod ovog specijalnog slučaja za splajn u tangencijalnom pravcu važi:

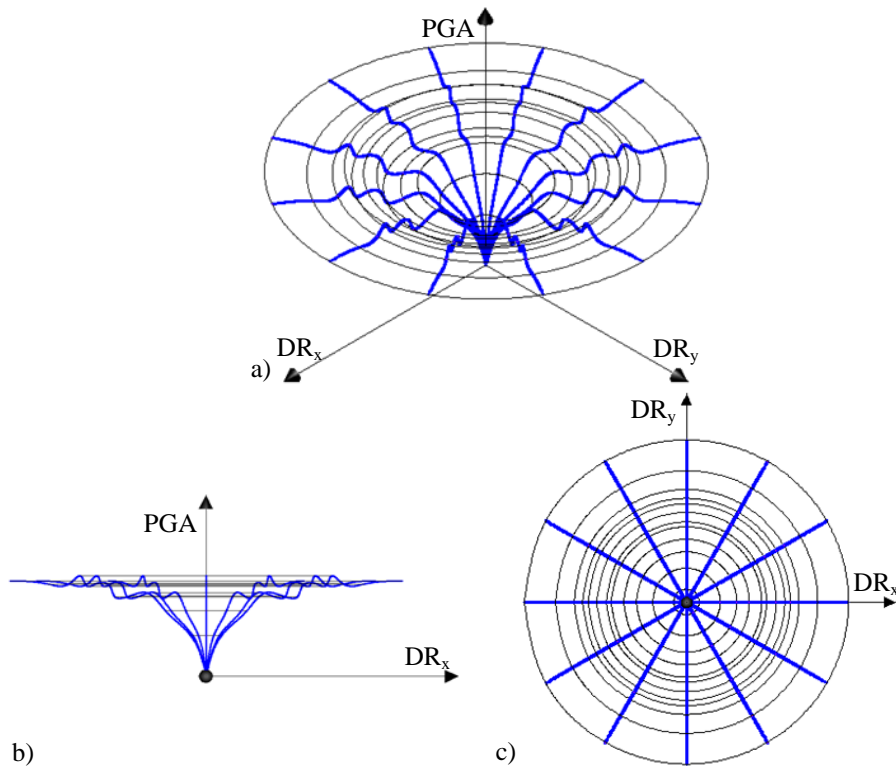
$$PGA_{\theta_1, max} = PGA_{\theta_2, max} = \dots = PGA_{\theta_i, max} = \dots = PGA_{\theta_n, max}, \quad (4.150)$$

tako da su ti splajnovi izokrive. Posledica ovog pravila je da su svi splajnovi u tangencijalnom pravcu paralelni:

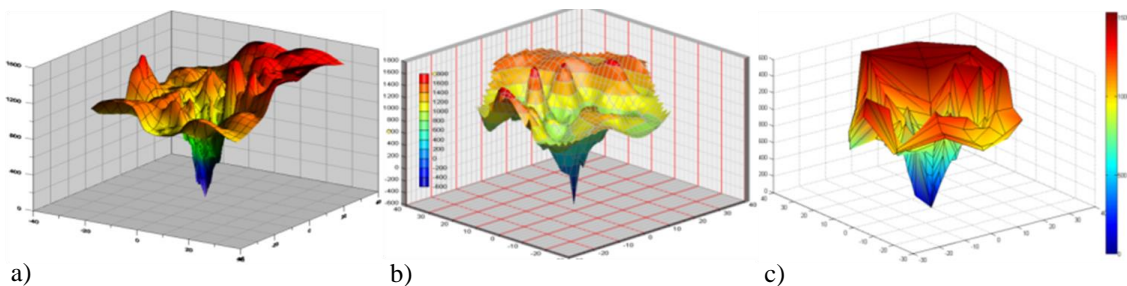
$$PGA_{j=1} = g(DR_{x,j=1}, DR_{y,j=1}) \parallel \dots \parallel PGA_{j=n} = g(DR_{x,j=n}, DR_{y,j=n}). \quad (4.151)$$

Problem koji se pojavljuje u prezentaciji INDA *pushover* površi odnosi se na razmatranje koje je izvršeno kod NSPA *pushover* površi. Analogno razmatranju koje je sprovedeno za NSPA *pushover* površi, na slici 4.47 je prikazana jedna INDA *pushover* površ generisana u *Grapher* 8.3.523 [279], *Simplex Numerica* 9.0.2.5 [345] i *MATLAB* 7.1.0.246 [292]. Komparacijom ove tri softverske aplikacije utvrđeno je da se najbolje rešenje dobija primenom *MATLAB*-a, jer su diskretne vrednosti linearno interpolirane i direktno povezane u prostornom koordinatnom sistemu. Problem koji se pojavljivao kod ostala dva softvera je odstupanje od realistične prezentacije INDA *pushover* površi, tako

što se u određenim slučajevima diskretne vrednosti ne povezuju direktno interpolacionim funkcijama.



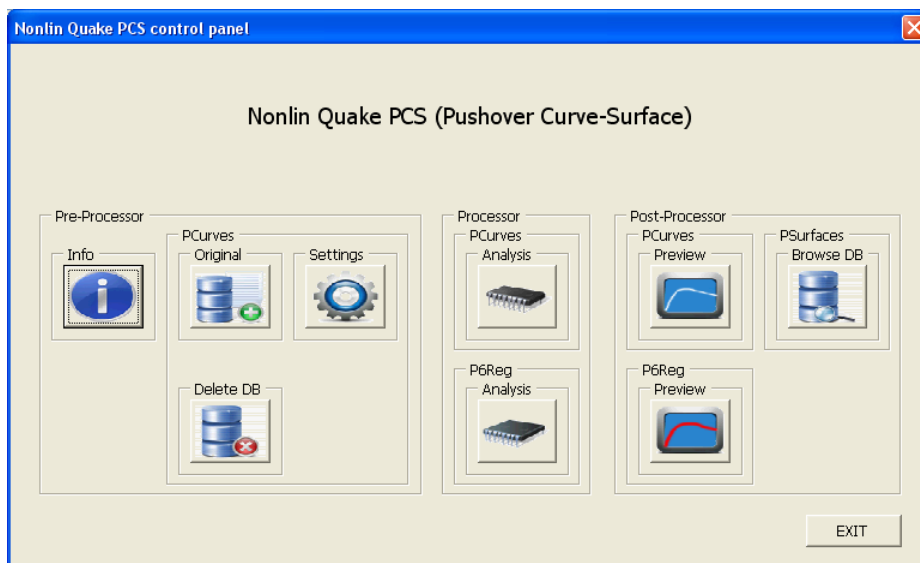
Slika 4.46 Specijalni slučaj INDA *pushover* površi, pri čemu su sve INDA *pushover* krive identične, a splajnovi u tangencijalnom pravcu su koncentrični krugovi sa centrom u vertikalnoj osi: a) izometrija, b)  $DR_x$ -PGA, c)  $DR_x$ - $DR_y$  ravan



Slika 4.47 Opšti slučaj INDA *pushover* površi generisane u: a) Grapher, b) Simplex Numerica, c) MATLAB

#### 4.4.5. PROCESIRANJE *PUSHOVER* KRIVIH I POVRŠI

Nakon procesiranja NSA analiza postoji mogućnost da se sprovedu korekcije i testovi komparacije *pushover* krivih u *Nonlin Quake PCS (Pushover Curve-Surface)*. Kontrolni panel *Nonlin Quake PCS* je prikazan na slici 4.48.



Slika 4.48 Kontrolni panel *Nonlin Quake PCS*

Procedura korekcije za sve diskretne vrednosti pomeranja  $D_i$  i ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $V_i$  određene proračunom NSA analiza sprovodi se prema:

$$D_0 = 0, \quad V_0 = 0, \quad (4.152)$$

$$\forall(D_i, V_i): |D_i, V_i|, \quad \text{tako da: } D \in [0, +\infty), \quad V \in [0, +\infty). \quad (4.153)$$

Zatim se sprovodi prevođenje diskretnih vrednosti  $D_i$  i  $V_i$  u relativne vrednosti:

$$DR_i = \frac{D_i}{H}(\%), \quad (V/W)_i = \frac{V_i}{W}(\%), \quad (4.154)$$

određuje krutost sistema  $K_i$  za sve uzastopne diskretne vrednosti:

$$K_i = \frac{V_{i+1} - V_i}{D_{i+1} - D_i}, \quad (4.155)$$

određuju maksimalne vrednosti drifta  $DR_{max}$  i ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $(V/W)_{max}$  i određuje energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija sistema za svaku analizu posebno:

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{((V/W)_{NA,i} + (V/W)_{NA,i-1})}{2} (DR_{NA,i} - DR_{NA,i-1}), \quad (4.156)$$

gde je  $(V/W)_{NA,i}$  diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize,  $DR_{NA,i}$  diskretna vrednost drifta nelinearne (NSPA ili INDA) analize. Sve kalkulacije u *Nonlin Quake PCS* se sprovode za NSCPA, NSAPA-FBA, NSAPA-DBA i INDA (IDA) analize i to za ugao  $\theta=[0,360^\circ]$ , pri čemu je  $\Delta\theta=30^\circ$ , tako da je ukupan broj razmatranih uglova 12. Takođe, određeni proračuni se odnose i na INDA (IDA) analizu sa selektovanim *EDP-IM* parametrima *DR-PGA* i kod koje je moguće izvršiti dodatno skaliranje *IM* parametra prema:

$$PGA_s = F_s PGA_o, \quad (4.157)$$

gde je  $PGA_s$  skalirano maksimalno ubrzanje tla,  $PGA_o$  maksimalno ubrzanje tla,  $F_s$  faktor skaliranja. Selekcija relevantnih  $EDP_d$ - $EDP_f$  parametara (odnosno  $IM$  mere) sprovedena je prema [11] za:

- NSCPA analizu:  $DR$  za  $EDP_d$  i  $V/W$  za  $EDP_f$ ,
- NSAPA-FBA analizu:  $DR$  za  $EDP_d$  i  $V/W$  za  $EDP_f$ ,
- NSAPA-DBA analizu:  $DR$  za  $EDP_d$  i  $V/W$  za  $EDP_f$ ,
- INDA (IDA) analizu:  $DR$  za  $EDP_d$  i  $V/W$  za  $EDP_f$ ,
- INDA (IDA) analizu:  $PGA$  za  $IM$  i  $DR$  za  $EDP_d$ .

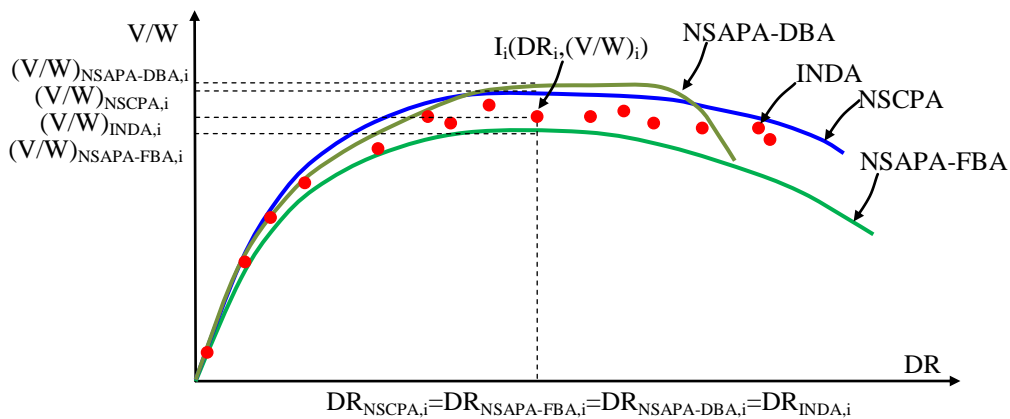
$DR$  i  $V/W$  su parametri konstrukcije i predstavljaju odnos kapaciteta nosivosti i deformacija konstrukcije ( $C_s/C_d$  - *base shear capacity/deformation capacity*), dok je  $PGA$  parametar  $IM$  mere i vezan je za maksimalno ubrzanje tla mereno preko akcelorograma, a koristi se kao reprezent u skaliranju NDA analiza za INDA analize.

Komparacija rezultata dobijenih primenom NSPA i INDA (IDA) analiza, a prezentovanih preko *pushover* krivih zasniva se na primeni statističke analize. U prvom koraku su razmatrane vrednosti drifta za sve analize i ustanovljena je razlika u diskretnim vrednostima driftova i različit broj diskretnih vrednosti driftova (slika 4.49):

$$\forall i: \begin{matrix} (DR_i, (V/W)_i)_{NSCPA} \\ (DR_i, (V/W)_i)_{NSAPA-FBA} \\ (DR_i, (V/W)_i)_{NSAPA-DBA} \\ (DR_i, (V/W)_i)_{INDA} \end{matrix}, \quad (4.158)$$

važi:

$$\begin{matrix} DR_{NSCPA,i} = DR_{NSAPA-FBA,i} = DR_{NSAPA-DBA,i} = DR_{INDA,i} \\ (V/W)_{NSCPA,i} \neq (V/W)_{NSAPA-FBA,i} \neq (V/W)_{NSAPA-DBA,i} \neq (V/W)_{INDA,i} \end{matrix}. \quad (4.159)$$



Slika 4.49 Nekompatibilnost diskretnih vrednosti driftova za primenjene analize



Sprovođenje komparacije i statističkih testova moguće je samo ukoliko je broj diskretnih vrednosti driftova i ukoliko su diskretne vrednosti driftova međusobno iste, pa je u tom cilju i primenjena regresiona analiza. U cilju kvalitetnije aproksimacije i prezentacije diskretnih *EDP* vrednosti primenjen je polinom šestog stepena *P6Reg*, pa je odgovarajuća regresiona analiza polinomskog karaktera [191]:

$$(V/W)_{Reg,i} = a_1 + a_2 DR_{Reg} + a_3 DR_{Reg}^2 + a_4 DR_{Reg}^3 + a_5 DR_{Reg}^4 + a_6 DR_{Reg}^5 + a_7 DR_{Reg}^6, \quad (4.160)$$

gde su  $a_1, \dots, a_7$  nepoznati koeficijenti, a određuju se primenom metode najmanjih kvadrata. Generalna formula za regresiju po metodi najmanjih kvadrata glasi:

$$\sum_{i=1}^n ((V/W)_{Reg,i} - f(DR_i, a_1, \dots, a_n)) \frac{\partial}{\partial a_i} f(DR_i, a_1, \dots, a_n) = 0, \quad (4.161)$$

pri čemu se druga polovina izraza (4.161) može napisati kao:

$$\frac{\partial}{\partial a_i} f(DR_i, a_1, \dots, a_n) = \frac{\partial}{\partial a_i} [a_1 g_1 + a_2 g_2 + \dots + a_n g_n] = g_i(DR_i), \quad (4.162)$$

tako da se dobija:

$$\sum_{i=1}^n [(V/W)_{Reg,i} - a_i g_i(DR_i)] g_i(DR_i) = 0, \quad (4.163)$$

Rešenjem (4.163) dobija se:

$$f(DR_i, a_1, \dots, a_7) = a_1 g_1(DR) + a_2 g_2(DR) + \dots + a_7 g_7(DR), \quad (4.164)$$

dok se određivanje nepoznatih koeficijenta za *P6Reg* regresiju sprovodi se prema:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n 1 & \sum_{i=1}^n DR_i & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n DR_i^5 & \sum_{i=1}^n DR_i^6 \\ \sum_{i=1}^n DR_i & \sum_{i=1}^n DR_i^2 & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n DR_i^6 & \sum_{i=1}^n DR_i^7 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^n DR_i^5 & \sum_{i=1}^n DR_i^6 & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n DR_i^{10} & \sum_{i=1}^n DR_i^{11} \\ \sum_{i=1}^n DR_i^6 & \sum_{i=1}^n DR_i^7 & \dots & \dots & \dots & \sum_{i=1}^n DR_i^{11} & \sum_{i=1}^n DR_i^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ \dots \\ a_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n (V/W)_i \\ \dots \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n (V/W)_i DR_i^6 \end{bmatrix}. \quad (4.165)$$

Maksimalni nivo drifta za *P6Reg* analizu  $DR_{Reg,max}$  se određuje tako što se prvo odrede maksimalni nivoi drifta za *NSPA* i *INDA* (*IDA*) analize:

$$\max(DR_{NSCPA,i}, DR_{NSAPA-FBA,i}, DR_{NSAPA-DBA,i}, DR_{INDA,i}), \quad \text{za } i=1, \dots, n, \quad (4.166)$$

a zatim minimalna vrednost ovih maksimalnih driftova:

$$DR_{Reg,max} = \min(DR_{NSCPA,max}, DR_{NSAPA-FBA,max}, DR_{NSAPA-DBA,max}, DR_{INDA,max}), \quad (4.167)$$

gde je  $DR_{NSCPA,i}$  diskretna vrednost drifta *NSCPA* analize,  $DR_{NSAPA-FBA,i}$  diskretna

vrednost drifta NSAPA-FBA analize,  $DR_{NSAPA-DBA,i}$  diskretna vrednost drifta NSAPA-DBA analize,  $DR_{Reg,max}$  maksimalna regresiona vrednost drifta,  $DR_{NSCPA,max}$  maksimalna vrednost drifta NSCPA analize,  $DR_{NSAPA-FBA,max}$  maksimalna vrednost drifta NSAPA-FBA analize,  $DR_{NSAPA-DBA,max}$  maksimalna vrednost drifta NSAPA-DBA analize,  $DR_{INDA,max}$  maksimalna vrednost drifta INDA analize. Evidentno je da broj diskretnih vrednosti *EDP*-a za pojedinačne nelinearne analize, u opštem slučaju, nije isti kao i za *P6Reg* analizu:

$$k \neq n, \quad \text{odnosno} \quad k > n, \quad (4.168)$$

gde je  $n$  ukupan broj diskretnih vrednosti NSPA ili INDA (IDA) analize,  $k$  ukupan broj diskretnih vrednosti *P6Reg* regresione analize, pri čemu je u preliminarnom istraživanju utvrđeno da se  $k$  može najpovoljnije odrediti prema:

$$k \geq \frac{DR_{Reg,max}}{0.05}. \quad (4.169)$$

Nakon sprovedenih *P6Reg* regresionih analiza sprovode se parametarske analize za komparaciju rezultata dobijenih primenom NSPA i INDA (IDA) analiza, a prezentovanih primenom *pushover* krivih:

- $C_r$  - koeficijent korelacije za upoređenje odstupanja *P6Reg* krive od *pushover* krive iz nelinearne analize (NA - *nonlinear analysis*) (NA/RegNA) [59]:

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^n ((V/W)_{NA,i} - (V/W)_{NA,m}) ((V/W)_{Reg,NA,i} - (V/W)_{Reg,NA,m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n ((V/W)_{NA,i} - (V/W)_{NA,m})^2 \sum_{i=1}^n ((V/W)_{Reg,NA,i} - (V/W)_{Reg,NA,m})^2}}, \quad (4.170)$$

gde se uporedna kvantitativno-kvalitativna verifikacija sprovodi prema:

$$\begin{aligned} 1 \geq C_r > 0.9 & \quad \text{vrlo jaka korelacija} \\ 0.9 \geq C_r > 0.7 & \quad \text{jaka korelacija} \\ 0.7 \geq C_r > 0.5 & \quad \text{slaba korelacija} \\ C_r \leq 0.5 & \quad \text{vrlo slaba korelacija} \end{aligned}, \quad (4.171)$$

- $C_v$  - kovarijansa za upoređenje odstupanja *P6Reg* krive od *pushover* krive iz nelinearne analize (NA/RegNA):

$$C_v = \frac{\sum_{i=1}^n ((V/W)_{NA,i} - (V/W)_{NA,m}) ((V/W)_{Reg,NA,i} - (V/W)_{Reg,NA,m})}{n}, \quad (4.172)$$

- $S_e$  - standardna greška regresije za upoređenje odstupanja *P6Reg* krive od *pushover* krive iz nelinearne analize (NA/RegNA):

$$S_e = \left( \frac{1}{n-2} \left[ \sum_{i=1}^n \left( (V/W)_{Reg,NA,i} - (V/W)_{Reg,NA,m} \right)^2 - \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (DR_{NA,i} - DR_{NA,m}) \left( (V/W)_{Reg,NA,i} - (V/W)_{Reg,NA,m} \right) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (DR_{NA,i} - DR_{NA,m})^2} \right] \right)^{1/2}, \quad (4.173)$$

- *CCDF* - faktor odstupanja NSPA *P6Reg* krive od INDA *P6Reg* krive (*CCDF - capacity curve discrepancy factor*) (RegNSPA/RegINDA) [178]:

$$CCDF = \frac{\sum_{i=1}^k \left| \frac{(V/W)_{Reg,NSPA,i} - (V/W)_{Reg,INDA,i}}{(V/W)_{Reg,INDA,i}} \right|}{k} (\%), \quad (4.174)$$

- $C_{r,Reg}$  - koeficijent korelacije za upoređenje odstupanja NSPA *P6Reg* krive od INDA *P6Reg* krive (RegNSPA/RegINDA):

$$C_{r,Reg} = \frac{\sum_{i=1}^k \left( (V/W)_{Reg,NSPA,i} - (V/W)_{Reg,NSPA,m} \right) \left( (V/W)_{Reg,INDA,i} - (V/W)_{Reg,INDA,m} \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^k \left( (V/W)_{Reg,NSPA,i} - (V/W)_{Reg,NSPA,m} \right)^2 \sum_{i=1}^k \left( (V/W)_{Reg,INDA,i} - (V/W)_{Reg,INDA,m} \right)^2}}, \quad (4.175)$$

- $\Delta E$  - mera odnosa relativnih vrednosti energija deformacije *pushover* krive NSPA analize i diskretnih vrednosti INDA analize (NSPA/INDA):

$$\Delta E = \left| \frac{E_{INDA} - E_{NSPA}}{E_{INDA}} \right| (\%)$$

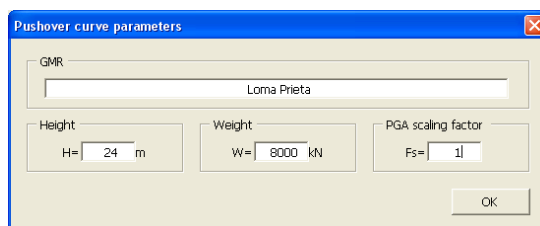
$$E_{INDA} = \sum_{i=1}^n \frac{\left( (V/W)_{INDA,i} + (V/W)_{INDA,i-1} \right)}{2} (DR_{INDA,i} - DR_{INDA,i-1}). \quad (4.176)$$

$$E_{NSPA} = \sum_{i=1}^n \frac{\left( (V/W)_{NSPA,i} + (V/W)_{NSPA,i-1} \right)}{2} (DR_{NSPA,i} - DR_{NSPA,i-1})$$

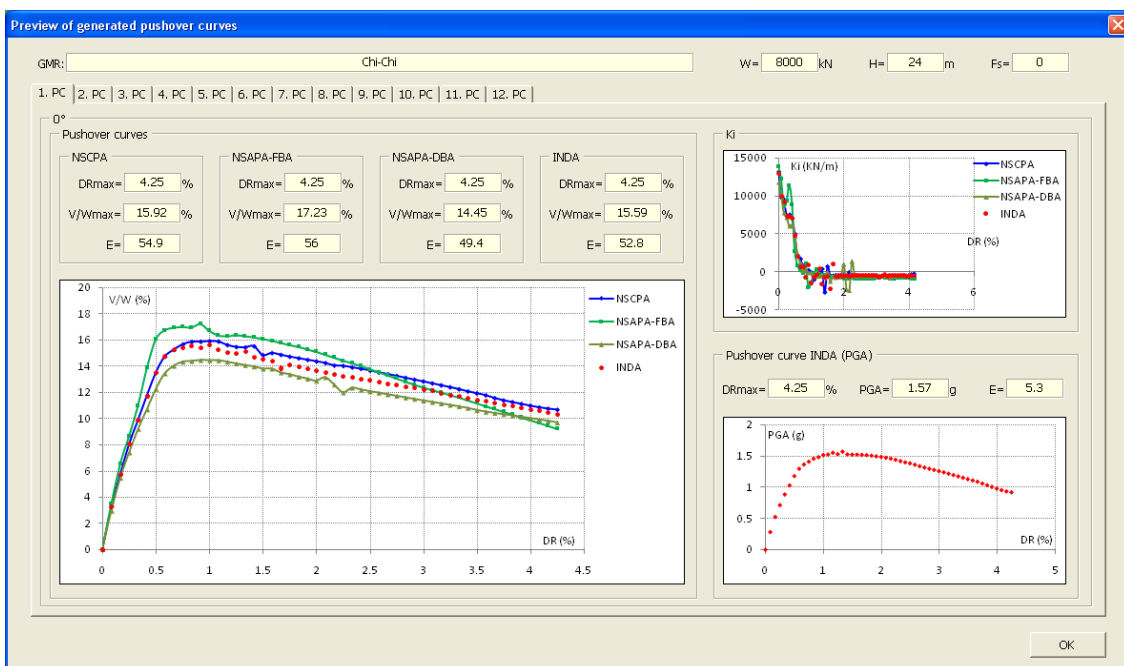
U izrazima (4.170)÷(4.176) promeljive su:  $(V/W)_{NA,m}$  srednja relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize,  $(V/W)_{Reg,NA,i}$  diskretna regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize,  $(V/W)_{Reg,NA,m}$  srednja regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta nelinearne (NSPA ili INDA) analize,  $(V/W)_{NSPA,i}$  diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSPA analize,  $(V/W)_{INDA,i}$  diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta INDA analize,  $(V/W)_{Reg,NSPA,i}$  diskretna regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSPA analize,  $(V/W)_{Reg,NSPA,m}$  srednja regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta NSPA analize,  $(V/W)_{Reg,INDA,i}$  diskretna regresiona

relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta INDA analize,  $(V/W)_{Reg,INDA,m}$  srednja regresiona relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta INDA analize,  $DR_{NA,m}$  srednja vrednost drifta nelinearne (NSPA ili INDA) analize,  $DR_{INDA,i}$  diskretna vrednost drifta INDA analize,  $DR_{NSPA,i}$  diskretna vrednost drifta NSPA analize,  $E_{INDA}$  energija elastoplastičnih deformacija realizovana primenom INDA analize, a prezentovana preko odnosa kapacitet nosivosti-deformacija i  $E_{NSPA}$  energija elastoplastičnih deformacija realizovana primenom NSPA analize, a prezentovana preko odnosa kapacitet nosivosti-deformacija.

Na slici 4.50 je prikazan interfejs za unos parametara za proračun nad *pushover* krivama. Pregled NSPA i INDA (IDA) *pushover* krivih po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih proračunatih parametara dat je na slici 4.51, dok je pregled NSPA i INDA (IDA) *pushover* krivih, generisanih *P6Reg* regresionih krivih po uglovima  $\theta_i$  i svih relevantnih proračunatih parametara:  $C_r$ ,  $C_s$ ,  $S_e$ ,  $\Delta E$ ,  $CCDF$  i  $C_{r,Reg}$  dat na slici 4.52.

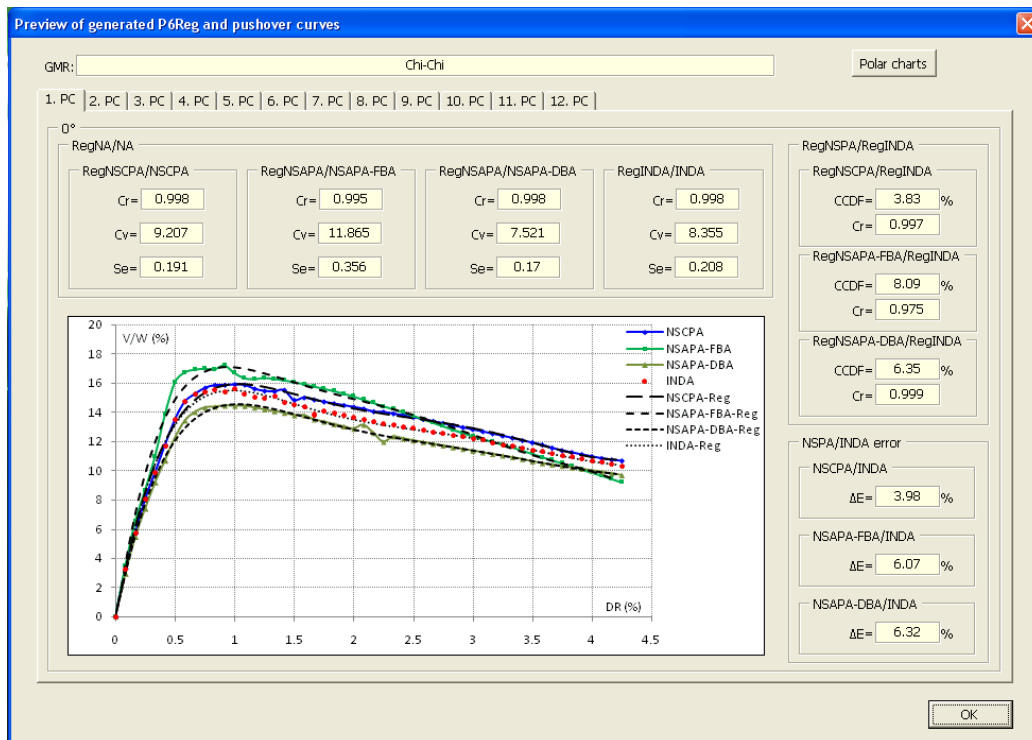


Slika 4.50 Interfejs za unos parametara za proračun nad *pushover* krivama

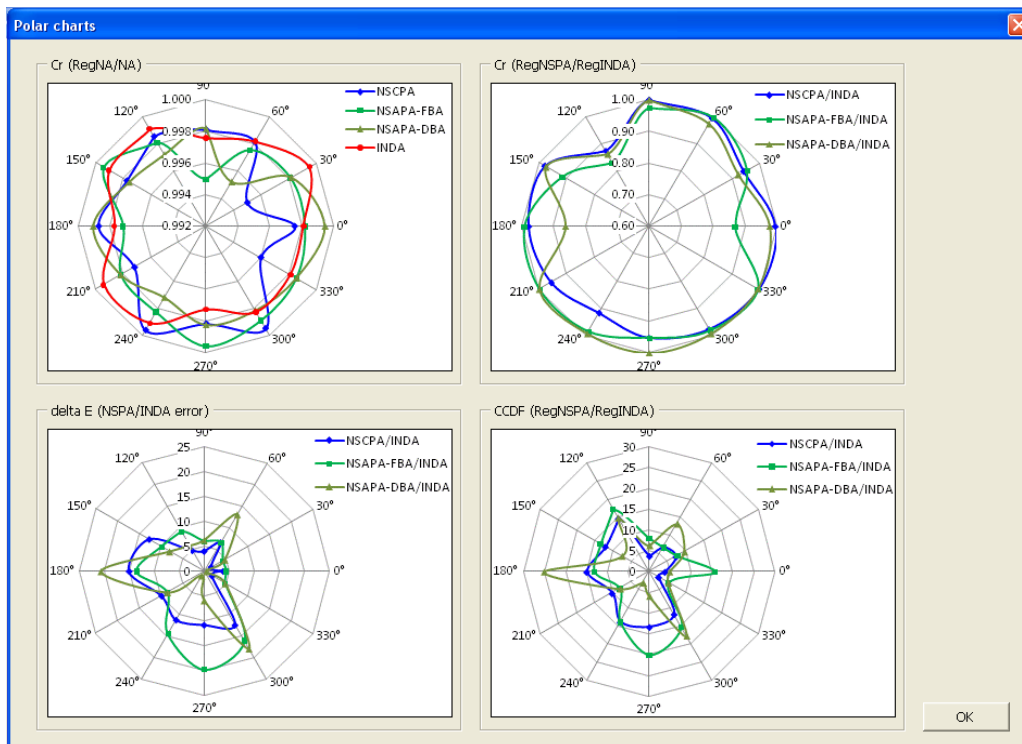


Slika 4.51 Pregled NSPA i INDA (IDA) *pushover* krivih po uglovima  $\theta_i$  i svih proračunatih parametara

Na slici 4.53 je dat pregled proračunatih parametara  $C_r$ ,  $C_{r,Reg}$ ,  $\Delta E$  i  $CCDF$  za sve uglove  $\theta_i$  u polarnom koordinatnom sistemu.



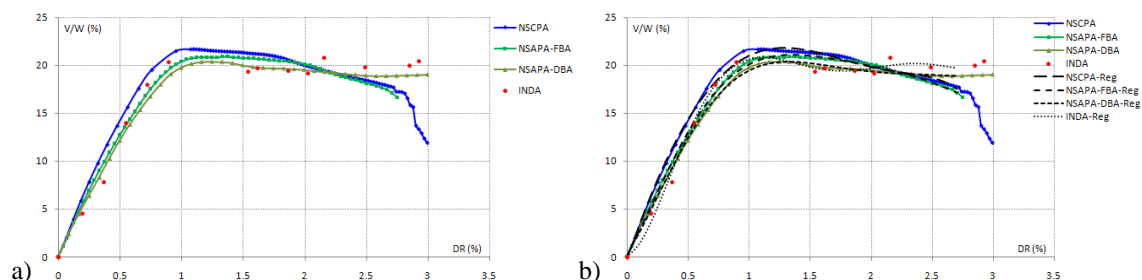
Slika 4.52 Pregled NSPA i INDA (IDA) pushover krivih, generisanih P6Reg regresionih krivih po uglovima  $\theta_i$  i svih proračunatih parametara:  $C_r$ ,  $C_s$ ,  $S_e$ ,  $\Delta E$ ,  $CCDF$  i  $C_{r,Reg}$



Slika 4.53 Pregled proračunatih parametara  $C_r$ ,  $C_{r,Reg}$ ,  $\Delta E$  i  $CCDF$  za sve uglove  $\theta_i$

#### 4.4.6. TESTIRANJE PROCESIRANJA *PUSHOVER* KRIVIH I POVRŠI

Procesiranje NSPA i INDA *pushover* krivih i površi primenom *Nonlin Quake* PCS izvršeno je za 8x4 2D model okvira za seizmičko dejstvo u ravni okvira i za SDOF model poprečnog preseka  $H=10\text{m}$ ,  $D_C=2.5\text{m}$ ,  $m=1000\text{t}$  za bidirekciono seizmičko dejstvo, a projektovan prema DBSD [189]. Za oba modela sprovedene su NSCPA, NSAPA-FBA, NSAPA-DBA i INDA analize za dejstvo zemljotresa *Loma Prieta* LP89. Na slici 4.54 prikazane su generisane NSCPA, NSAPA-FBA, NSAPA-DBA *pushover* krive, diskretne vrednosti za INDA analizu, RegNSCPA, RegNSAPA-FBA, RegNSAPA-DBA i RegINDA regresione krive. U slučaju 2D modela maksimalna vrednost drifta je limitirana na 3%, s obzirom da se za komparaciju krivih koristi minimalna vrednost svih krajnjih vrednosti driftova.



a) Slika 4.54 8x4 2D model okvira: a) generisane NSCPA, NSAPA-FBA i NSAPA-DBA *pushover* krive i diskretne vrednosti za INDA analizu, b) generisane NSCPA, NSAPA-FBA i NSAPA-DBA *pushover* krive, diskretne vrednosti za INDA analizu, RegNSCPA, RegNSAPA-FBA, RegNSAPA-DBA i RegINDA regresione krive

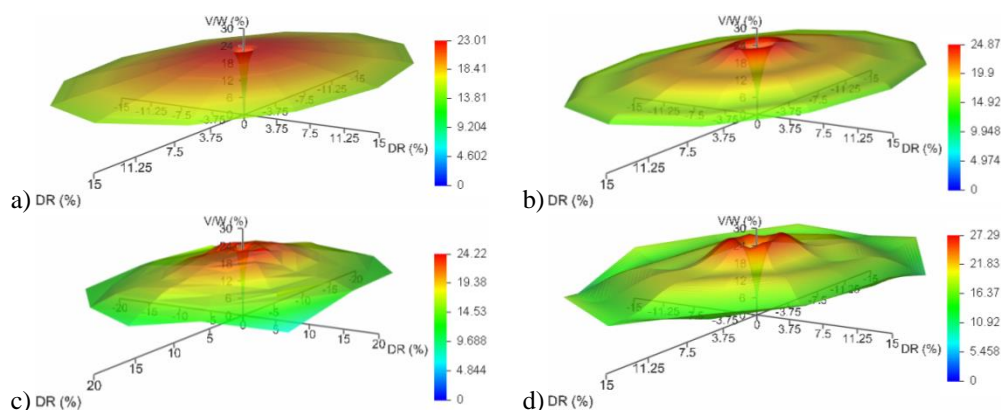
U tabeli 4.6 su prikazane proračunate vrednosti za  $C_r$ ,  $CCDF$  i  $\Delta E$  koeficijente 8x4 2D model okvira. Evidentna je izuzetno dobra aproksimacija *pushover* krivih regresionim krivama polinoma šestog stepena  $P6Reg$  uz veoma visoke vrednosti koeficijenta korelacije  $C_r$ . Primenom  $CCDF$  faktora najbolje se na kvalitativnom nivou mogu razmatrati odstupanja NSPA  $P6Reg$  krive od INDA  $P6Reg$  krive, tako da se u slučaju NSAPA-DBA analize dobijaju minimalna odstupanja, u odnosu na ostale analize. Sa druge strane, mera odnosa relativnih vrednosti energija deformacije  $\Delta E$  *pushover* krive NSPA analize i diskretnih vrednosti INDA analize je kvantitativna mera, a minimalne vrednosti se dobijaju takođe za NSAPA-DBA analizu.

U slučaju SDOF modela nelinearan odgovor je razmatran primenom *pushover* površi do nivoa drifta od 15%, s obzirom da je INDA analizama sprovedenim na ovom

modelu ukazano da se već pri ovom nivou drifta dostiže GI performansni nivo. Na slici 4.55 su prikazane generisane NSCPA, RegNSCPA, INDA i RegINDA *pushover* površi, pri čemu se može konstatovati bolja aproksimacija za NSCPA *pushover* površi, u odnosu na aproksimaciju INDA *pushover* površi. Kvalitetnija regresiona analiza INDA *pushover* površi postiže se dodavanjem još jedne diskretne vrednosti nakon dostizanja nivoa drifta od 15%.

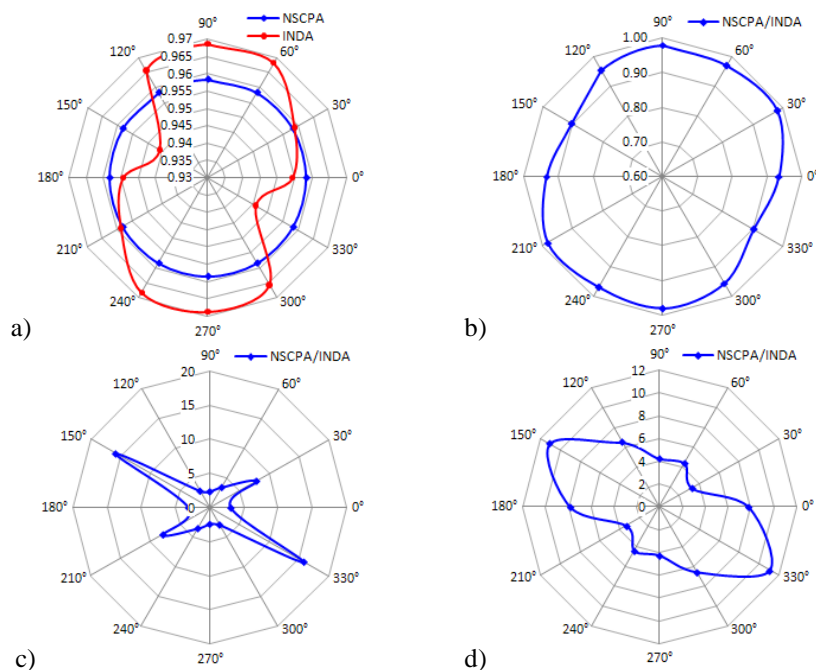
Tabela 4.6  $C_r$ ,  $CCDF$  i  $\Delta E$  koeficijenti 8x4 2D modela okvira

	RegNSCPA/ NSCPA	RegNSAPA-FBA/ NSAPA-FBA	RegNSAPA-DBA/ NSAPA-DBA	RegINDA/ INDA
$C_r$	0.997	0.999	1	0.997
	RegNSCPA/ RegINDA	RegNSAPA-FBA/ RegINDA	RegNSAPA-DBA/ RegINDA	
$CCDF$	16.32%	11.98%	9.87%	
	NSCPA/ INDA	NSAPA-FBA/ INDA	NSAPA-DBA/ INDA	
$\Delta E$	4.4%	6.75%	1.03%	



Slika 4.55 Generisana: a) NSCPA *pushover* površ, b) RegNSCPA *pushover* površ, c) INDA *pushover* površ, d) RegINDA *pushover* površ

Na slici 4.56 su prikazane generisane anvelope za  $C_r$  (RegNA/NA),  $C_{r,Reg}$  (RegNSCPA/RegINDA),  $\Delta E$  (NSCPA/INDA), i  $CCDF$  (RegNSCPA/RegINDA). Kao i kod prethodnog 2D modela, koeficijent korelacije  $C_r$  i u ovom slučaju je pokazao veoma visoke vrednosti. Sa druge strane,  $CCDF$  faktorom su dobijene niske vrednosti, osim u slučaju nezatnijeg povećanja za ugao  $\theta=150^\circ$ , odnosno  $\theta=330^\circ$ . Ovo je potvrđeno i kod mera odnosa relativnih vrednosti energija deformacije  $\Delta E$  (NSCPA/INDA).



Slika 4.56 Generisane anelove za: a)  $C_r$  (RegNA/NA), b)  $C_{r,Reg}$  (RegNSCPA/RegINDA), c)  $\Delta E$  (NSCPA/INDA), d)  $CCDF$  (RegNSCPA/RegINDA)

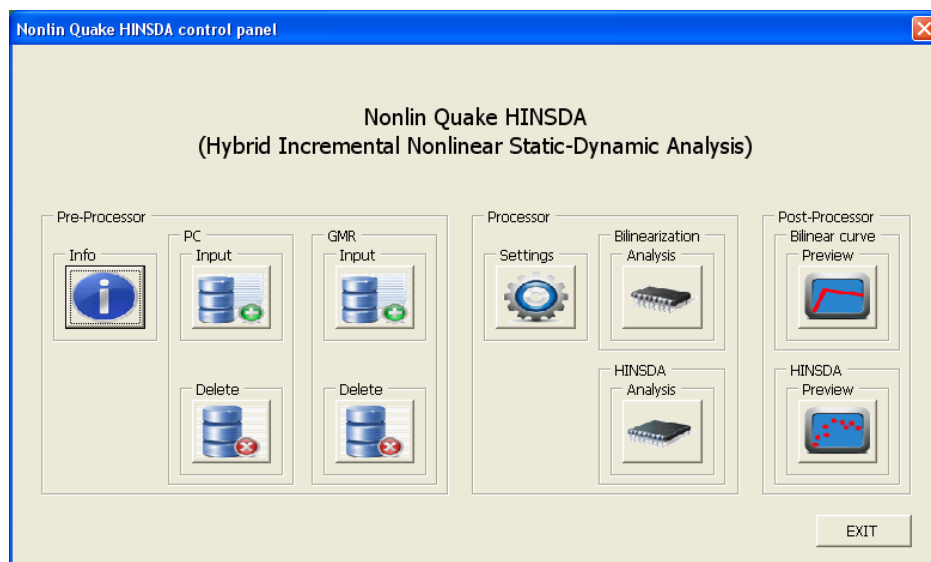
## 4.5. HINSDA ANALIZA

### 4.5.1. TEORIJSKI ASPEKTI HINSDA ANALIZE

Procesiranje INDA analiza 3D modela okvirnih zgrada zahteva znatne hardverske resurse i memorijski prostor za skladištenje dobijenih podataka. Uzimajući u obzir da su za dosadašnja procesiranja INDA analiza korišćeni 2D ravanski modeli zgrada, pojednostavljeni 2D ravanski modeli ili SDOF sistemi, prilikom skaliranja zemljotresa *step by step* postupkom potrebno je sprovesti 20, 30 i do 50 NDA analiza u okviru jedne INDA analize. Sa druge strane, procesiranje NSPA analiza znatno je brže, pri čemu se nelinearan odgovor okvirne zgrade može razmatrati u kapacitativnom domenu ( $DR-(V/W)$ ). U cilju predikcije rešenja koje se dobija iz INDA analiza 3D modela okvirnih zgrada sa mogućnošću razmatranja odgovora sistema, kako u kapacitativnom tako i u vremenskom domenu, a pri tome ne povećavajući znatnije vreme potrebno za procesiranje, razvijena je potpuno nova procedura. Ova procedura nazvana je hibridna nelinearna statička-dinamička analiza (HNSDA - *Hybrid Nonlinear Static-Dynamic Analysis*), s obzirom da koristi nelinearan odgovor MDOF modela zgrade iz NSPA analize za proračun na SDOF modelu primenom NDA analize. Ukoliko se nelinearan odgovor zgrade razmatra u kapacitativnom domenu, tada ova analiza

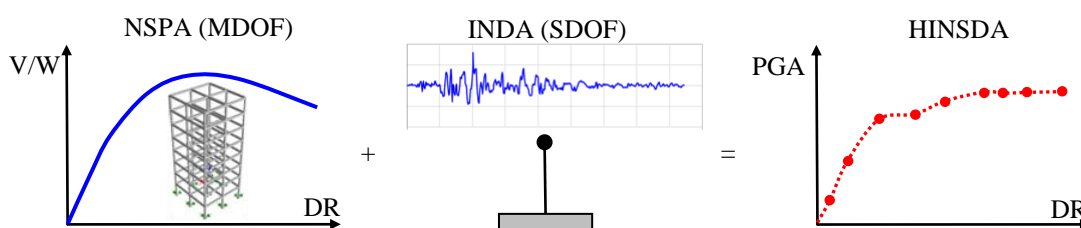


postaje hibridna inkrementalna nelinearna statička-dinamička analiza (HINSDA - *Hybrid Incremental Nonlinear Static-Dynamic Analysis*). HINSDA analiza je implementirana u *Nonlin Quake HINSDA*, čiji je kontrolni panel prikazan na slici 4.57.



Slika 4.57 Kontrolni panel *Nonlin Quake HINSDA*

HINSDA analiza se odvija kroz dve bitno različite faze. U prvoj fazi se sprovodi NSPA analiza na realnom 3D MDOF modelu okvirne zgrade, a zatim se za razvijenu NSPA *pushover* krivu sprovodi bilinearizacija u cilju formiranja konstitutivnog modela SDOF sistema (slika 4.58). Teorijska formulacija za NSPA analizu je izložena u prethodnim podglavljljima.

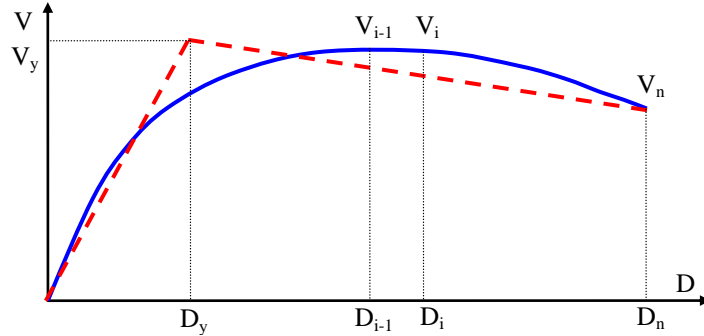


Slika 4.58 Osnove koncepta HINSDA analize

Procedura bilinearizacije se sprovodi prema postupku prezentovanom u podglavljlju 4.3.1, ali tako što se za maksimalno pomeranje usvaja  $D_n$  i odgovarajuće  $V_n$ , dok se  $D_y$  i odgovarajuće  $V_y$  određuju iterativno (slika 4.59). Procedura iteriranja se sprovodi i po pomeranju i po silama, a za domen:

$$0 < D_i < D_n, \quad 0 < V_i < V_{max} + \frac{\Delta V V_{max}}{100}, \quad (4.177)$$

gde je  $V_{max}$  maksimalna ukupna smičuća sila u osnovi objekta,  $\Delta V$  procentualno povećanje maksimalne ukupne smičuće sile u osnovi objekta.



Slika 4.59 Bilinearizacija NSPA *pushover* krive za HINSDA analizu

Uvođenjem procentualnog povećanja maksimalne ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $\Delta V$  omogućeno je da vrednost  $V_y$  bilinearizovane krive bude veća od  $V_{max}$ . Na taj način moguće je dobiti veći broj mogućih kombinacija i odrediti najoptimalnije rešenje. Takođe, ograničenje je postavljeno tako da  $V_y$  ne može biti manje od  $V_i$  i ispituje se za svaku iteraciju posebno:

$$V_y > V_i = f(D_i). \quad (4.178)$$

Energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija NSPA analize  $E_{NSPA}$  određuje se iz:

$$E_{NSPA} = \sum_{i=1}^n \frac{(V_i + V_{i-1})}{2} (D_i - D_{i-1}), \quad (4.179)$$

dok se energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija iz bilinearizacije  $E_B$  određuje prema:

$$E_B = \frac{1}{2} (V_y D_y + (V_y + V_n) (D_n - D_y)). \quad (4.180)$$

Na osnovu sprovedenih svih iteracija,  $D_y$  i  $V_y$  se određuju iz uslova:

$$\Delta E_{min} = \frac{|E_{NSPA} - E_B|}{E_{NSPA}} (\%), \quad (4.181)$$

gde je  $\Delta E_{min}$  minimalno procentualno odstupanje energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija NSPA analize i bilinearizacije.

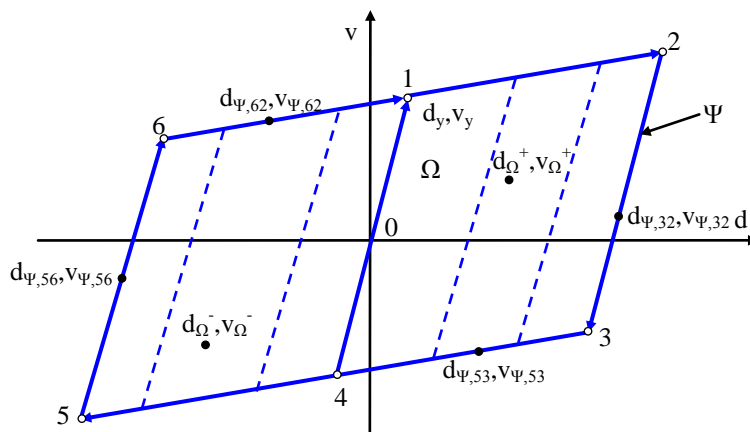
Konstitutivni model za procesiranje NDA analiza je generisana NSPA *pushover* kriva okvirne zgrade za izabrani pravac i u ugao  $\theta_i$ . S obzirom da se istraživanje sprovodi na 3D modelima okvirnih zgrada, to je generisana NSPA *pushover* površ u

opštem slučaju osnova za formiranje prostornog konstitutivnog modela. Sa druge strane, sve HINSDA analize se sprovode nezavisno po uglovima  $\theta_i$ , tako da se konstitutivni model ponašanja može tretirati kao jednoaksijalni. Usled alternativnog dejstva zemljotresa nelinearan odgovor zgrade dobijen NSPA analizom indukuje dve *pushover* krive, a radi simplifikacije problema izabran je simetričan konstitutivni model. U opštem slučaju NSPA *pushover* kriva može imati proizvoljan broj diskretnih vrednosti, tako da se može govoriti o multilinearnosti u elasto-plastičnom ponašanju. S obzirom da je težište na brzim nelinearnim analizama koje uključuju određeni stepen aproksimacije, to je za HINSDA analize usvojen bilinearni elasto-plastični model ponašanja. Konačno, konstitutivni model za HINSDA analizu izveden je objedinjujući sve prethodno definisane stavove i oslanjajući se na pravila i zakone koji se koriste u formulaciji elasto-plastičnih modela ponašanja. Dakle, konstitutivni model za HINSDA analizu je jednoaksijalni bilinearni elasto-plastični model sa kinematičkim ojačanjem i omekšanjem (UBEPKHS - *uniaxial bi-linear elastic-plastic with kinematic hardening and softening*). Razmatrane su tri varijante: sa konstantnom krutosti i nosivosti, sa konstantnom krutosti i promenljivom nosivosti i sa promenljivom krutosti i nosivosti.

Prvi UBEPKHS konstitutivni model sa konstantnom krutosti i nosivosti se generiše prema (slika 4.60):

- na osnovu sprovedene bilinearizacije određuju se koordinate čvorova 1 i 2, a koordinate ostalih čvorova se određuju prema:

$$\begin{aligned}
 3: \quad & d_3 = d_2 - 2d_y, & v_3 &= v_2 - 2v_y \\
 4: \quad & d_4 = -d_1 = -d_y, & v_4 &= -v_1 = -v_y, \\
 5: \quad & d_5 = -d_2, & v_5 &= -v_2 \\
 6: \quad & d_6 = -d_3, & v_6 &= -v_3
 \end{aligned}
 \tag{4.182}$$



Slika 4.60 UBEPKHS konstitutivni model sa konstantnom krutosti i nosivosti za HINSDA analizu

- domen  $\Omega$ :

$$\forall (d_\Omega, v_\Omega) \in \Omega: \quad k_\Omega = k_e = \frac{v_y}{d_y}, \quad (4.183)$$

$$d_\Omega^\pm, v_\Omega^+ : \quad \begin{aligned} d_5 + \frac{d_y}{v_y} (v_\Omega^+ - v_5) &< d_\Omega^\pm < d_3 + \frac{d_y}{v_y} (v_\Omega^+ - v_3) \\ 0 &\leq v_\Omega^+ < v_y + \frac{v_y - v_2}{d_y - d_2} (d_\Omega^\pm - d_y) \end{aligned}, \quad (4.184)$$

$$d_\Omega^\pm, v_\Omega^- : \quad \begin{aligned} d_5 + \frac{d_y}{v_y} (v_\Omega^- - v_5) &< d_\Omega^\pm < d_3 + \frac{d_y}{v_y} (v_\Omega^- - v_3) \\ 0 &> v_\Omega^- > -v_y + \frac{v_y + v_3}{d_y + d_3} (d_\Omega^\pm + d_y) \end{aligned}, \quad (4.185)$$

- kontura  $\Psi$ :

$$\forall (d_\Psi, v_\Psi) \in \Psi, \quad \Psi \notin \Omega: \quad (4.186)$$

$$d_\Psi^\pm, v_\Psi^+ : \quad \begin{aligned} d_6 &\leq d_\Psi^\pm \leq d_2 \\ v_\Psi^+ &= v_y + \frac{v_y - v_2}{d_y - d_2} (d_\Psi^\pm - d_y) \quad \wedge \quad k_{62} = \frac{v_2 - v_y}{d_2 - d_y}, \end{aligned} \quad (4.187)$$

$$d_\Psi^\pm, v_\Psi^- : \quad \begin{aligned} d_5 &\leq d_\Psi^\pm \leq d_3 \\ v_\Psi^- &= -v_y + \frac{v_y + v_3}{d_y + d_3} (d_\Psi^\pm + d_y) \quad \wedge \quad k_{53} = \frac{v_2 - v_y}{d_2 - d_y}, \end{aligned} \quad (4.188)$$

$$d_\Psi^+, v_\Psi^\pm : \quad \begin{aligned} d_\Psi^+ &= d_3 + \frac{d_y}{v_y} (v_\Psi^\pm - v_3) \quad \wedge \quad k_{32} = \frac{v_y}{d_y}, \\ v_3 &\leq v_\Psi^\pm \leq v_2 \end{aligned} \quad (4.189)$$

$$d_\Psi^-, v_\Psi^\pm : \quad \begin{aligned} d_\Psi^- &= d_5 + \frac{d_y}{v_y} (v_\Psi^\pm - v_5) \quad \wedge \quad k_{56} = \frac{v_y}{d_y}, \\ v_5 &\leq v_\Psi^\pm \leq v_6 \end{aligned} \quad (4.190)$$

Drugi UBEPKHS konstitutivni model sa konstantnom krutosti i promenljivom nosivosti se generiše prema (slika 4.61):

- na osnovu sprovedene bilinearizacije određuju se koordinate čvorova 1 i 2, a koordinate ostalih čvorova se određuju prema:

$$\begin{aligned} 3: \quad d_3 &= d_2 - 2d_y, & v_3 &= 0 \\ 4: \quad d_4 &= -d_1 = -d_y, & v_4 &= -v_1 = -v_y, \\ 5: \quad d_5 &= -d_2, & v_5 &= -v_2 \\ 6: \quad d_6 &= -d_3, & v_6 &= 0 \end{aligned} \quad (4.191)$$

- domen  $\Omega$ :

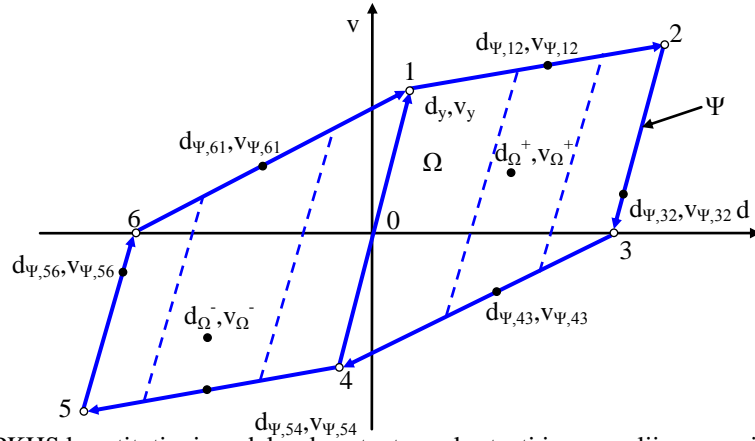
$$\forall (d_\Omega, v_\Omega) \in \Omega: \quad k_\Omega = k_e = \frac{v_y}{d_y}, \quad (4.192)$$

$$d_{\Omega}^{\pm}, v_{\Omega}^{\pm} : \quad \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^+ \leq d_{\Omega}^{\pm} < d_3 + \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^+ \quad \wedge \quad d_6 < d_{\Omega}^{\pm} \leq \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^+ \quad , \quad (4.193)$$

$$0 \leq v_{\Omega}^+ < v_y + \frac{v_y - v_2}{d_y - d_2} (d_{\Omega}^{\pm} - d_y) \quad \wedge \quad 0 \leq v_{\Omega}^+ < \frac{-v_y}{d_6 - d_y} (d_{\Omega}^{\pm} - d_6)$$

$$d_{\Omega}^{\pm}, v_{\Omega}^{\pm} : \quad d_5 + \frac{d_y}{v_y} (v_{\Omega}^- - v_5) < d_{\Omega}^{\pm} \leq \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^- \quad \wedge \quad \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^- \leq d_{\Omega}^{\pm} < d_3 \quad , \quad (4.194)$$

$$0 > v_{\Omega}^- > v_5 + \frac{v_5 + v_y}{d_5 + d_y} (d_{\Omega}^{\pm} - d_5) \quad \wedge \quad 0 < v_{\Omega}^+ < -v_y + \frac{-v_y}{d_3 - d_y} (d_{\Omega}^{\pm} + d_y)$$



Slika 4.61 UBEPKHS konstitutivni model sa konstantnom krutosti i promenljivom nosivosti za HINSDA analizu

- kontura  $\Psi$ :

$$\forall (d_{\Psi}, v_{\Psi}) \in \Psi, \quad \Psi \notin \Omega : \quad (4.195)$$

$$d_{\Psi,12}^+, v_{\Psi,12}^+ : \quad d_1 \leq d_{\Psi,12}^+ \leq d_2$$

$$v_{\Psi,12}^+ = v_y + \frac{v_y - v_2}{d_y - d_2} (d_{\Psi,12}^+ - d_y) \quad \wedge \quad k_{12} = \frac{v_2 - v_y}{d_2 - d_y}, \quad (4.196)$$

$$d_{\Psi,61}^{\pm}, v_{\Psi,61}^+ : \quad d_6 \leq d_{\Psi,61}^{\pm} \leq d_1$$

$$v_{\Psi,61}^+ = v_6 + \frac{-v_y}{d_6 - d_y} (d_{\Psi,61}^{\pm} - d_6) \quad \wedge \quad k_{61} = \frac{v_y}{d_y - d_6}, \quad (4.197)$$

$$d_{\Psi,54}^-, v_{\Psi,54}^- : \quad d_5 \leq d_{\Psi,54}^- \leq d_4$$

$$v_{\Psi,54}^- = v_5 + \frac{v_5 + v_y}{d_5 + d_y} (d_{\Psi,54}^- + d_y) \quad \wedge \quad k_{54} = \frac{v_5 + v_y}{d_5 + d_y}, \quad (4.198)$$

$$d_{\Psi,43}^{\pm}, v_{\Psi,43}^- : \quad d_4 \leq d_{\Psi,43}^{\pm} \leq d_3$$

$$v_{\Psi,43}^- = -v_y + \frac{-v_y}{d_3 + d_y} (d_{\Psi,43}^{\pm} + d_y) \quad \wedge \quad k_{43} = \frac{v_y}{d_3 + d_y}, \quad (4.199)$$

$$d_{\Psi,32}^+, v_{\Psi,32}^+ : \quad d_{\Psi,32}^+ = d_3 + \frac{d_y}{v_y} (v_{\Psi,32}^+ - v_3)$$

$$0 \leq v_{\Psi,32}^+ \leq v_2 \quad \wedge \quad k_{32} = \frac{v_y}{d_y}, \quad (4.200)$$

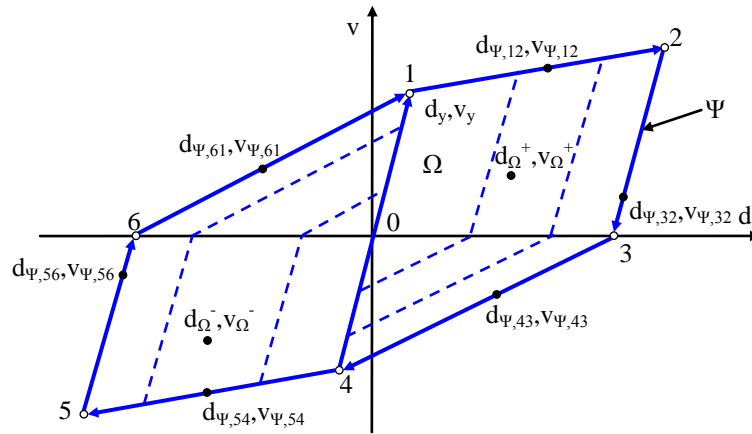
$$d_{\Psi,56}^-, v_{\Psi,56}^- : \quad d_{\Psi,56}^- = d_5 + \frac{d_y}{v_y} (v_{\Psi,56}^- - v_5) \quad \wedge \quad k_{56} = \frac{v_y}{d_y}. \quad (4.201)$$

$$v_5 \leq v_{\Psi,56}^- \leq 0$$

Treći UBEPKHS konstitutivni model sa promenljivom krutosti i nosivosti se generiše prema (slika 4.62):

- na osnovu sprovedene bilinearizacije određuju se koordinate čvorova 1 i 2, a koordinate ostalih čvorova se određuju prema:

$$\begin{aligned} 3: \quad d_3 &= d_2 - 2d_y, & v_3 &= 0 \\ 4: \quad d_4 &= -d_1 = -d_y, & v_4 &= -v_1 = -v_y, \\ 5: \quad d_5 &= -d_2, & v_5 &= -v_2 \\ 6: \quad d_6 &= -d_3, & v_6 &= 0 \end{aligned} \quad (4.202)$$



Slika 4.62 UBEPKHS konstitutivni model sa promenljivom krutosti i nosivosti za HINSDA analizu

- domen  $\Omega$ :

$$\forall (d_{\Omega}, v_{\Omega}) \in \Omega : \quad (4.203)$$

$$d_{\Omega}^+, v_{\Omega}^+ : \quad \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^+ \leq d_{\Omega}^+ < d_3 + \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^+ \quad \wedge \quad k_{\Omega} = \frac{v_y}{d_y}, \quad (4.204)$$

$$0 \leq v_{\Omega}^+ < v_y + \frac{v_y - v_2}{d_y - d_2} (d_{\Omega}^+ - d_y)$$

$$d_{\Omega}^{\pm}, v_{\Omega}^+ : \quad d_6 < d_{\Omega}^{\pm} \leq \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^+ \quad \wedge \quad k_{\Omega} = \frac{v_y}{d_y - d_6}, \quad (4.205)$$

$$0 \leq v_{\Omega}^+ < \frac{-v_y}{d_6 - d_y} (d_{\Omega}^{\pm} - d_6)$$

$$d_{\Omega}^-, v_{\Omega}^- : \quad d_5 + \frac{d_y}{v_y} (v_{\Omega}^- - v_5) < d_{\Omega}^- \leq \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^- \quad \wedge \quad k_{\Omega} = \frac{v_y}{d_y}, \quad (4.206)$$

$$0 > v_{\Omega}^- > v_5 + \frac{v_5 + v_y}{d_5 + d_y} (d_{\Omega}^- - d_5)$$

$$d_{\Omega}^{\pm}, v_{\Omega}^{-} : \quad \frac{d_y}{v_y} v_{\Omega}^{-} \leq d_{\Omega}^{\pm} < d_3 \quad \wedge \quad k_{\Omega} = \frac{v_y}{d_3 + d_y}, \quad (4.207)$$

$$0 < v_{\Omega}^{+} < -v_y + \frac{-v_y}{d_3 - d_y} (d_{\Omega}^{\pm} + d_y)$$

- kontura  $\Psi$ :

$$\forall (d_{\Psi}, v_{\Psi}) \in \Psi, \quad \Psi \notin \Omega : \quad (4.208)$$

$$d_{\Psi,12}^{+}, v_{\Psi,12}^{+} : \quad d_1 \leq d_{\Psi,12}^{+} \leq d_2 \quad \wedge \quad k_{12} = \frac{v_2 - v_y}{d_2 - d_y}, \quad (4.209)$$

$$v_{\Psi,12}^{+} = v_y + \frac{v_y - v_2}{d_y - d_2} (d_{\Psi,12}^{+} - d_y)$$

$$d_{\Psi,61}^{\pm}, v_{\Psi,61}^{+} : \quad d_6 \leq d_{\Psi,61}^{\pm} \leq d_1 \quad \wedge \quad k_{61} = \frac{v_y}{d_y - d_6}, \quad (4.210)$$

$$v_{\Psi,61}^{+} = v_6 + \frac{-v_y}{d_6 - d_y} (d_{\Psi,61}^{\pm} - d_6)$$

$$d_{\Psi,54}^{-}, v_{\Psi,54}^{-} : \quad d_5 \leq d_{\Psi,54}^{-} \leq d_4 \quad \wedge \quad k_{54} = \frac{v_5 + v_y}{d_5 + d_y}, \quad (4.211)$$

$$v_{\Psi,54}^{-} = v_5 + \frac{v_5 + v_y}{d_5 + d_y} (d_{\Psi,54}^{-} + d_y)$$

$$d_{\Psi,43}^{\pm}, v_{\Psi,43}^{-} : \quad d_4 \leq d_{\Psi,43}^{\pm} \leq d_3 \quad \wedge \quad k_{43} = \frac{v_y}{d_3 + d_y}, \quad (4.212)$$

$$v_{\Psi,43}^{-} = -v_y + \frac{-v_y}{d_3 + d_y} (d_{\Psi,43}^{\pm} + d_y)$$

$$d_{\Psi,32}^{+}, v_{\Psi,32}^{+} : \quad d_3 + \frac{d_y}{v_y} (v_{\Psi,32}^{+} - v_3) \quad \wedge \quad k_{32} = \frac{v_y}{d_y}, \quad (4.213)$$

$$0 \leq v_{\Psi,32}^{+} \leq v_2$$

$$d_{\Psi,56}^{-}, v_{\Psi,56}^{-} : \quad d_5 + \frac{d_y}{v_y} (v_{\Psi,56}^{-} - v_5) \quad \wedge \quad k_{56} = \frac{v_y}{d_y}, \quad (4.214)$$

$$v_5 \leq v_{\Psi,56}^{-} \leq 0$$

U drugoj fazi se sprovodi serija NDA analiza na SDOF sistemu sa generisanim konstitutivnom modelom ponašanja MDOF modela zgrade. Diferencijalna jednačina kretanja SDOF sistema za NDA analize u inkrementalnoj formulaciji glasi [49]:

$$m\Delta a_i + c\Delta v_i + k\Delta d_i = \Delta p_i, \quad (4.215)$$

a određuje se kao razlika iz dva uzastopna koraka vremena  $t_i$  i  $t_{i+1}$ :

$$m a_i + c v_i + k d_i = -m a_{g,i}, \quad (4.216)$$

$$m a_{i+1} + c v_{i+1} + k d_{i+1} = -m a_{g,i+1}, \quad (4.217)$$

pri čemu je inkrementalna sila:

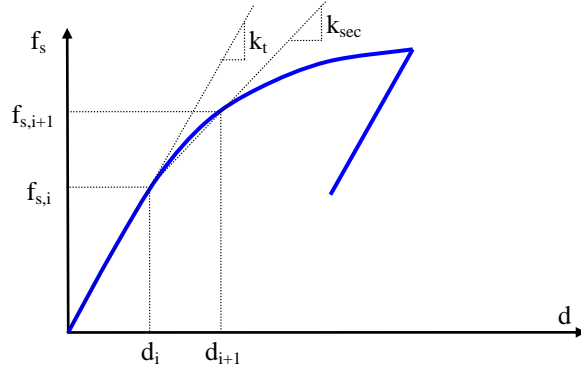
$$k\Delta d_i = k_{i,sec} \Delta d_i, \quad (4.218)$$

gde je  $k_{i,sec}$  sekantna krutost, a čije određivanje nije moguće, s obzirom da  $d_{i+1}$  nije poznato (slika 4.63). Ukoliko se u okviru dovoljno malog koraka vremena  $\Delta t$  sekantna krutost  $k_{i,sec}$  zameni tangentnom krutošću  $k_{i,t}$ , tada izraz (4.218) postaje:

$$\Delta f_{s,i} \approx k_{i,t} \Delta d_i. \quad (4.219)$$

Izostavljanjem indeksa  $t$  kod tangentne krutosti  $k_{i,t}$  u izrazu (4.219) i zamenom u izraz (4.215) dobija se:

$$m\Delta a_i + c\Delta v_i + k_i\Delta d_i = \Delta p_i. \quad (4.220)$$



Slika 4.63 Geometrijska prezentacija sekantne  $k_{i,sec}$  i tangentne  $k_{i,t}$  krutosti

Rešavanje jednačine (4.220) se sprovodi inkrementalno za:

$$\Delta d_i = d_{i+1} - d_i, \quad \Delta v_i = v_{i+1} - v_i, \quad \Delta a_i = a_{i+1} - a_i, \quad (4.221)$$

pri čemu je:

$$\Delta v_i = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} \Delta d_i - \frac{\gamma}{\beta} v_i + \Delta t \left( 1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) a_i, \quad (4.222)$$

$$\Delta a_i = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta d_i - \frac{1}{\beta \Delta t} v_i - \frac{1}{2\beta} a_i. \quad (4.223)$$

Za svaki korak analize se sprovodi korekcija prema:

$$k_i^* \Delta d_i = \Delta p_i^*, \quad (4.224)$$

gde je:

$$k_i^* = k_i + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m, \quad (4.225)$$

$$\Delta p_i^* = \Delta p_i + \left( \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c \right) v_i + \left[ \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left( \frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c \right] a_i. \quad (4.226)$$

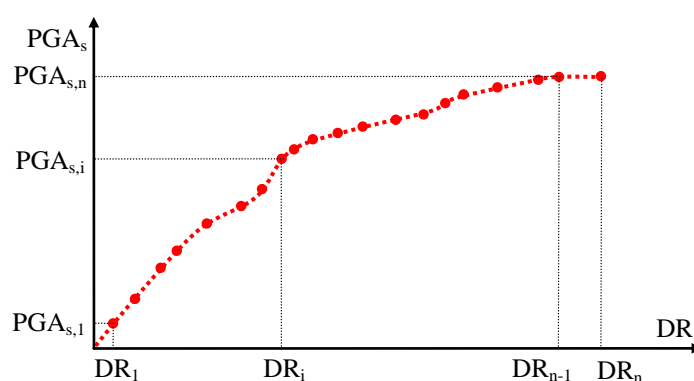
Procedura skaliranja akceleroograma sprovodi se tako što prvo akceleroogram skalira na inicijalnu vrednost:

$$PGA_{s,1} = F_{s,0} PGA_0, \quad (4.227)$$

gde je  $PGA_{s,1}$  maksimalno ubrzanje tla skalirano na inicijalnu vrednost,  $PGA_0$  maksimalno ubrzanje tla,  $F_{s,0}$  početni faktor skaliranja, a zatim se inkrementalno povećava faktor skaliranja za  $\Delta F_s$ . Poslednji faktor skaliranja  $F_{s,n}$  određuje se iz uslova

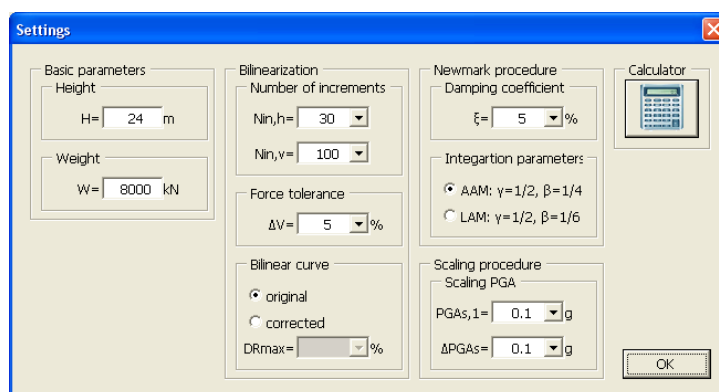


da je maksimalno pomeranje SDOF sistema HNSDA analize ekvivalentno maksimalnom pomeranju definisanom u konstitutivnom modelu. Povezivanjem diskretnih vrednosti maksimalnih pomeranja, odnosno driftova individualnih HNSDA analiza konstruiše se HNSDA kriva (slika 4.64). Procena iniciranja performansnog nivoa globalne nestabilnosti sistema (GI - *global instability*) može se uspostaviti pri dostizanju maksimalnog pomeranja definisanog u konstitutivnom modelu, a preko odgovora individualnih HNSDA analiza. Ovakva analogija je uspostavljena na osnovu indiciranja GI za  $S_d(T_1, 5\%) - IDR_{max}$  EDP-IM parametre idealizovanog petolinearnog elasto-plastičnog konstitutivnog modela [215]. Na taj način dobija se da je maksimalno  $PGA_{s,n}$  identično za dve poslednje vrednosti drifta  $DR_{n-1}$  i  $DR_n$ .



Slika 4.64 HNSDA kriva

Na slici 4.65 je prikazan interfejs za definisanje parametara za proračun HNSDA analize.



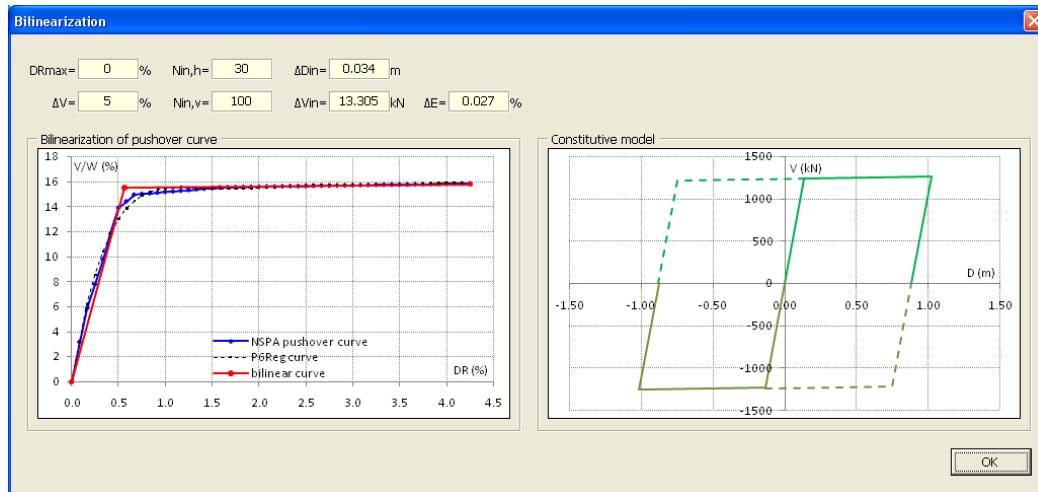
Slika 4.65 Interfejs za definisanje parametara HNSDA analize

Pregled proračunatih parametara i konstruisanih dijagrama prikazani su preko interfejsa:

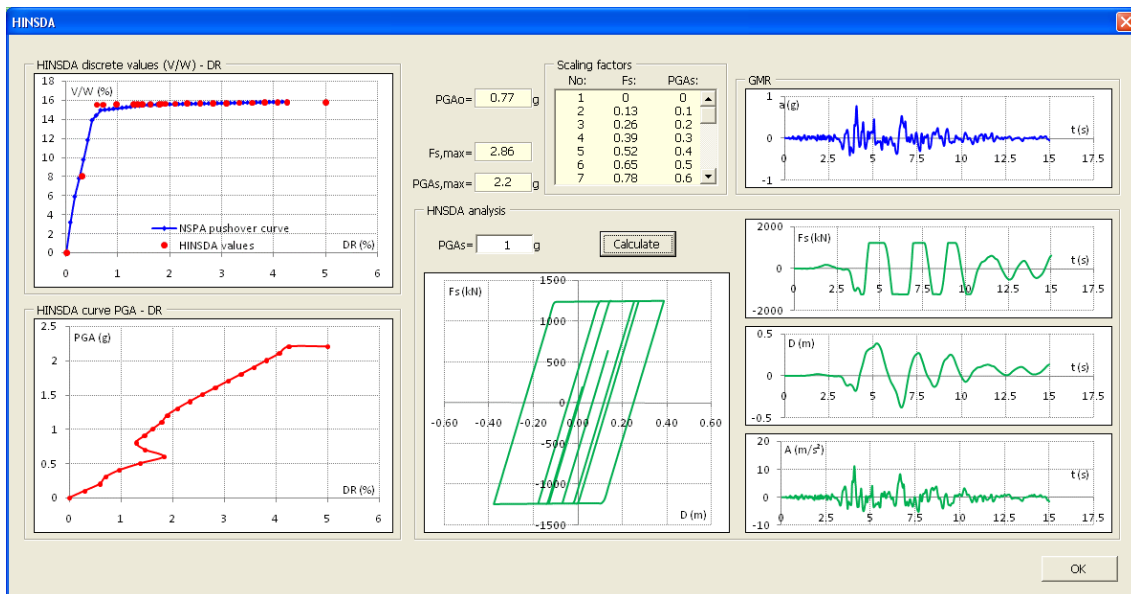
- pregled proračunate bilinearne krive i generisanog konstitutivnog modela (slika

4.66),

- pregled generisane HINSDA krive i HNSDA histerezisnog modela ponašanja za UBEPKHS konstitutivne modele (slika 4.67).



Slika 4.66 Pregled proračunate bilinearne krive i generisanog konstitutivnog modela

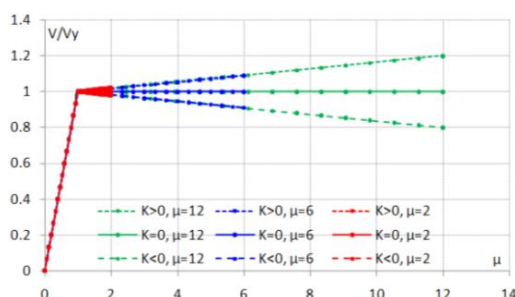


Slika 4.67 Pregled generisane HINSDA krive i HNSDA histerezisnog modela ponašanja za prvi UBEPKHS konstitutivni model

#### 4.5.2. TESTIRANJE HINSDA ANALIZE

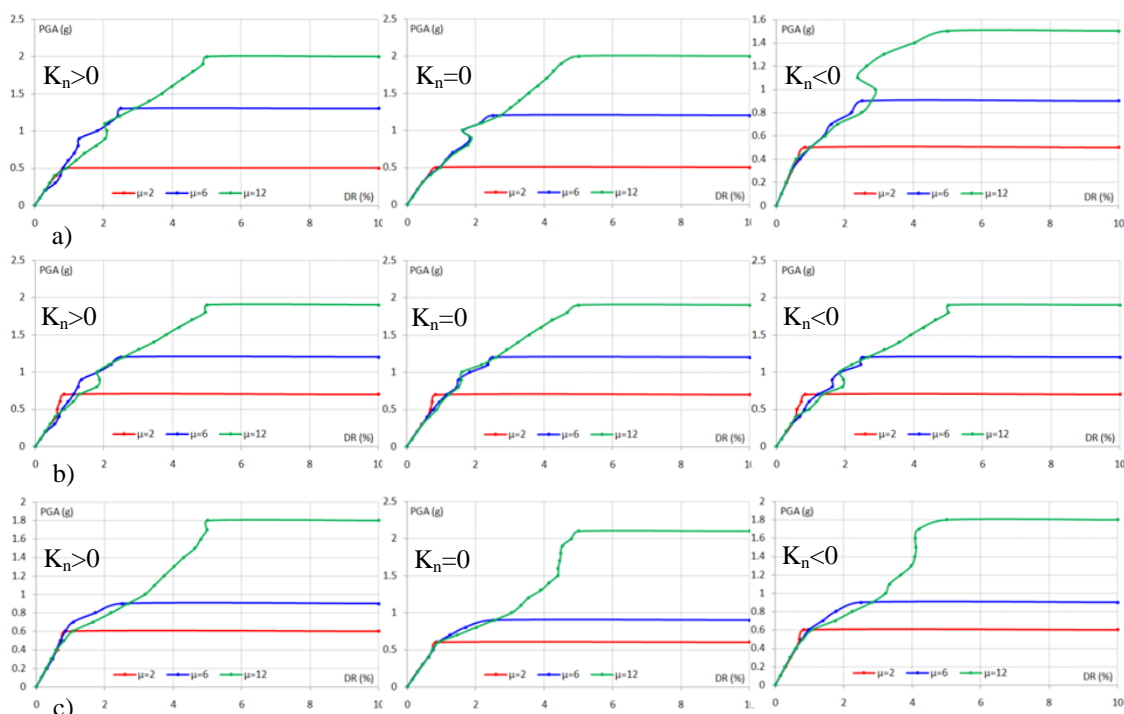
Testiranje razvijene HINSDA analize i implementirane u *Nonlin Quake* HINSDA sprovedeno u cilju analize performansi, verifikacije i komparacije dobijenih rešenja sa INDA rešenjima, a za akcelerogram *Loma Prieta* LP89. Analiza performansi

je sprovedena za sva tri UBEPKHS konstitutivna modela varijacijom krutosti  $K_n$  u N domenu ( $K_n > 0$ ,  $K_n = 0$ ,  $K_n < 0$ ), koeficijenta duktilnosti  $\mu \in (2, 6, 12)$  i za period vibracija  $T = 1.5s$  (slika 4.68).



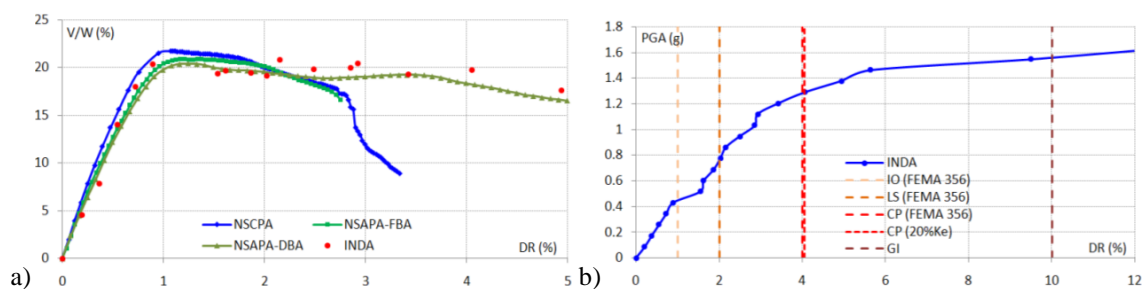
Slika 4.68 Normalizovani bilinearni konstitutivni model sa različitom krutosti u N domenu  $K_n > 0$ ,  $K_n = 0$  i  $K_n < 0$  i sa varijacijom koeficijenta duktilnosti  $\mu \in (2, 6, 12)$

Na slici 4.69 su prikazane generisane HINSDA krive sva tri UBEPKHS konstitutivna modela za varijaciju krutosti  $K_n$  u N domenu ( $K_n > 0$ ,  $K_n = 0$ ,  $K_n < 0$ ), koeficijenta duktilnosti  $\mu \in (2, 6, 12)$  i period vibracija  $T = 1.5s$ . Prvi UBEPKHS konstitutivni model je znatno osetljiviji na negativnu vrednost  $K_n$ , u odnosu na ostala dva UBEPKHS konstitutivna modela.



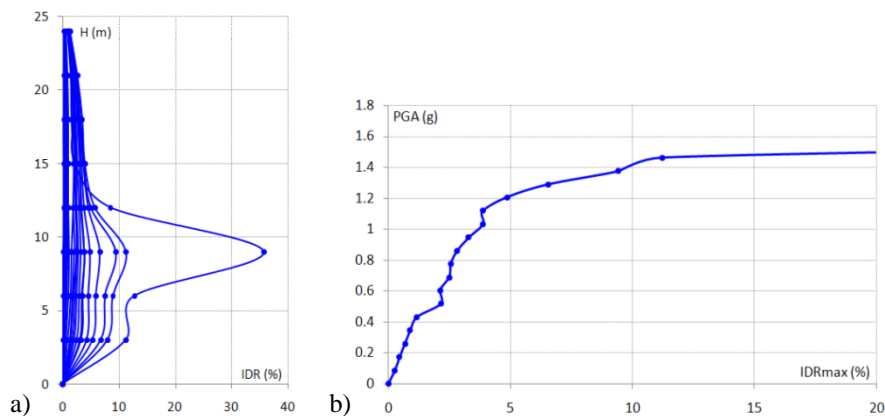
Slika 4.69 Generisane HINSDA krive za varijaciju krutosti  $K_n$  u N domenu ( $K_n > 0$ ,  $K_n = 0$ ,  $K_n < 0$ ), koeficijenta duktilnosti  $\mu \in (2, 6, 12)$  i period vibracija  $T = 1.5s$ : a) prvi, b) drugi, c) treći UBEPKHS konstitutivni model

U drugom delu istraživanja razmatran je 8x4 2D model okvira za seizmičko dejstvo u ravni okvira. Prvo su sprovedene NSCPA, NSAPA-FBA i NSAPA-DBA analize za dejstvo zemljotresa *Loma Prieta* LP89, a zatim su izvršene parametarske HINSDA analize. Primenom NSAPA-DBA analize realizovano je veće pomeranje u odnosu na pomeranje prema NSCPA i NSAPA-FBA analizama, a što je i potvrđeno komparacijom sa INDA diskretnim vrednostima (slika 4.70.a). Određivanje CP performansnog nivoa sprovodi se primenom pravila  $20\%K_e$  i prema FEMA 356 [80] pri čemu je merodavna manja vrednost. GI performansni nivo se određuje pri  $DR_{GI}=10\%$  ili kada vrednost PGA za dva uzastopna faktora skaliranja postane gotovo identična [210]. Prethodno utvrđeni performansni nivoi prikazani su za  $PGA-DR$  parametre, a za razvijenu INDA krivu (slika 4.70.b).



Slika 4.70 a) generisane NSCPA, NSAPA-FBA i NSAPA-DBA *pushover* krive i diskretne vrednosti za INDA analizu, b) generisana INDA kriva

Alternativa za prezentaciju nelinearnog odgovora iz INDA analiza je primena  $PGA-IDR_{max}$  parametara prema FEMA 440A [82]. Određivanje  $IDR_{max}$  se sprovodi tako što se sprovodi monitoring  $IDR$  driftova po inkrementalnim situacijama INDA analize, a zatim se iz svake inkrementalne situacije određuje maksimalni  $IDR$ . Na slici 4.71.a su prikazani  $IDR$  driftovi po inkrementalnim situacijama INDA analize, a na slici 4.71.b generisana INDA kriva za  $IDR_{max}$  driftove. Generalno se može konstatovati da su vrednosti driftova veće u slučaju primene  $PGA-IDR_{max}$  parametara, nego kod primene  $PGA-DR$  parametara. U slučaju primene  $PGA-IDR_{max}$  parametara GI performansni nivo dostiže se pri nešto većoj vrednosti od  $DR_{GI}=10\%$ . Za preliminarno istraživanje HINSDA analiza korišćeni su  $PGA-DR$  parametri, tako da su dalje analize sprovedene do CP performansnog nivoa od  $DR_{CP}=4\%$ . Maksimalno pomeranje za UBEPKHS konstitutivni model, a određeno iz NSPA analize, korigovano je prema vrednosti drifta  $DR_{CP}$  za CP performansni nivo.



Slika 4.71 a)  $IDR$  driftovi po inkrementalnim situacijama za INDA analizu, b) generisana INDA kriva za  $IDR_{max}$  driftove

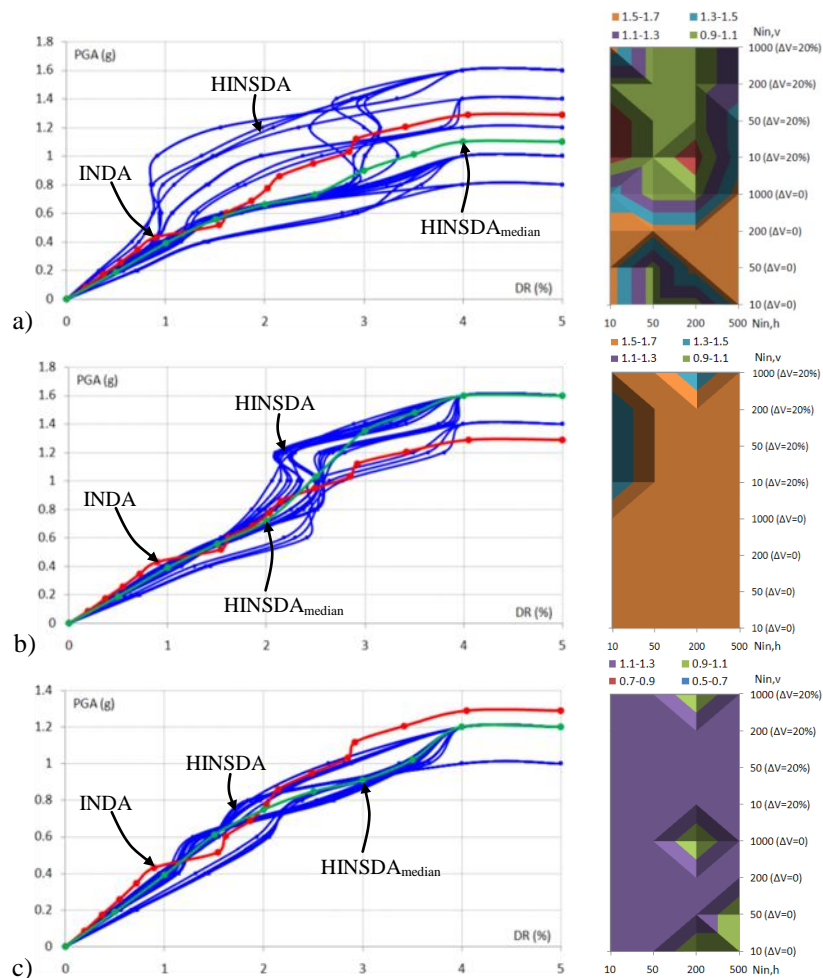
Parametarska analiza 8x4 2D modela okvira je sprovedena za:

$$\begin{aligned} N_{in,h} &\in (10,50,200,500) \\ N_{in,v} &\in (10,50,200,1000), \\ \Delta V &\in (0,20) \end{aligned} \quad (4.228)$$

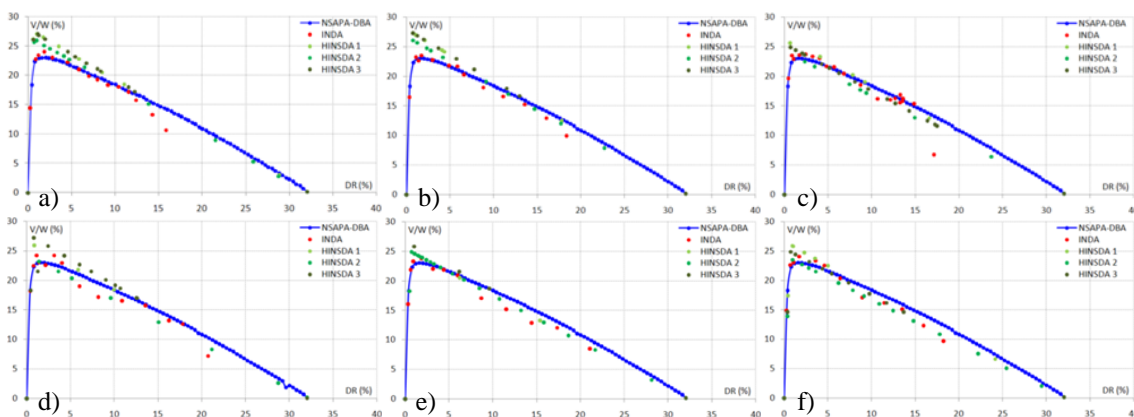
gde je  $N_{in,h}$  broj inkremenata za pomeranje kod bilinearizacije,  $N_{in,v}$  broj inkremenata za silu kod bilinearizacije,  $\Delta V$  faktor uvećanja sile kod bilinearizacije, tako da je ukupan broj HINSDA analiza 96 za sva tri UBEPKHS konstitutivna modela. Generisane HINSDA,  $HINSDA_{median}$  i INDA krive sva tri UBEPKHS konstitutivna modela prikazane su na slici 4.72 (levo). Najmanje odstupanje HINSDA krive od INDA krive dobija se primenom trećeg UBEPKHS konstitutivnog modela, dok se najveće odstupanje dobija primenom prvog UBEPKHS konstitutivnog modela. Diskretne vrednosti  $PGA$  za  $DR_{CP}=4\%$  sva tri UBEPKHS konstitutivna modela prikazane su na slici 4.72 (desno). INDA analizom za  $DR_{CP}=4\%$  dobijena je vrednost  $PGA_{CP}=1.3g$ . Optimalan broj inkremenata  $N_{in,h}$  i  $N_{in,v}$ , odnosno iteracija  $N_{it}$  za  $PGA_{CP}$ , utvrđen na osnovu parametarske HINSDA analize, je:

$$\begin{aligned} N_{in,h} &\in (10,50) \\ N_{in,v} &\in (50,200) \end{aligned} \Rightarrow 500 \leq \Sigma N_{it} \leq 10000. \quad (4.229)$$

U trećem delu istraživanja razmatran je SDOF model kružnog poprečnog preseka  $H=10m$ ,  $D_C=2.5m$ ,  $m=1000t$  za bidirekciono seizmičko dejstvo, a projektovan prema DBSD [189]. Na slici 4.73 su prikazane generisane NSAPA-DBA *pushover* krive, diskretne vrednosti za INDA i UBEPKHS konstitutivne modele, a za različite vrednosti uglova  $\theta_i$ .



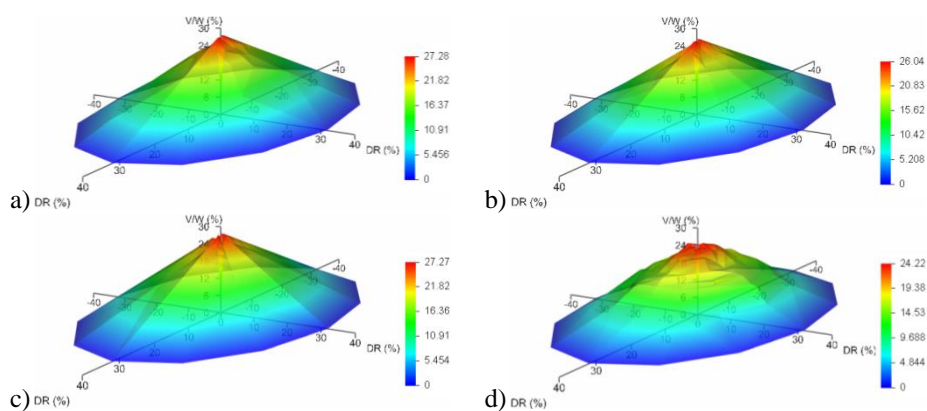
Slika 4.72 Generisane HINSDA, HINSDA<sub>median</sub> i INDA krive i parametarskom analizom određene diskretne vrednosti  $PGA$  za  $DR_{CP}=4\%$ : a) prvi, b) drugi, c) treći UBEPKHS konstitutivni model



Slika 4.73 Generisane NSAPA-DBA *pushover* krive, diskretne vrednosti za INDA i UBEPKHS konstitutivne modele: a)  $\theta=0^\circ$ , b)  $\theta=30^\circ$ , c)  $\theta=60^\circ$ , d)  $\theta=90^\circ$ , e)  $\theta=120^\circ$ , f)  $\theta=150^\circ$

S obzirom da je istraživanje izvršeno na SDOF sistemu za rotaciono simetričan poprečni presek, to je bilo potrebno proračunati samo INDA i HINSDA analize za  $\theta_i=0^\circ \div 180^\circ$ . Efekat spektralne amplifikacije u NSAPA analizi imao je minimalnog značaja, tako da

su NSAPA *pushover* krive gotovo identične za sve uglove  $\theta_i$ . Na slici 4.74 prikazane su generisane HINSDA i INDA *pushover* površi.

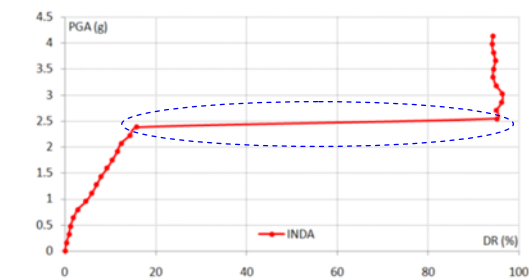


Slika 4.74 Generisana: a) HINSDA *pushover* površ za prvi UBEPKHS konstitutivni model, b) HINSDA *pushover* površ za drugi UBEPKHS konstitutivni model, c) HINSDA *pushover* površ za treći UBEPKHS konstitutivni model, d) INDA *pushover* površ

$V/W$  diskretne vrednosti realizovane primenom HINSDA analiza u delu  $DR=0\div5\%$  nešto su veće u odnosu na  $V/W$  diskretne vrednosti realizovane primenom INDA analiza. Ovakav slučaj je posledica primene bilinearizacije, jer je u velikom broju slučajeva sila na granici tečenja bilinearnog modela veća od maksimalno realizovane sile NSAPA analize. Primenom trećeg UBEPKHS konstitutivnog modela, implementiranog u *Nonlin Quake* HINSDA, dobijene su HINSDA krive koje su najkompatibilnije sa INDA krivama, razmatrajući po svim  $\theta_i$  uglovima. Razlika u broju diskretnih vrednosti koji su primenjeni kod INDA i HINSDA analize direktno je uticala na oblik i interpolaciju INDA i HINSDA krivih. U slučaju HINSDA analiza korišćen je veći broj diskretnih vrednosti sa manjom vrednošću inkrementa skaliranja  $\Delta PGA$ , dok je u slučaju INDA analiza primenjena veća vrednost inkrementa faktora skaliranja.

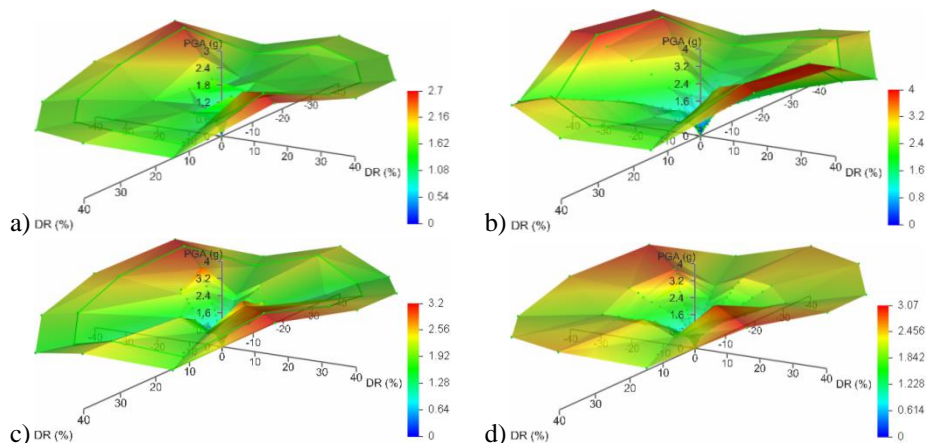
Određivanje veličine drifta za GI performansni nivo  $DR_{GI}$  sprovedeno je prema pravilu da za se dve uzastopne diskretne vrednosti pri minimalnom priraštaju  $PGA$  realizuje znatan priraštaj drifta. Na datom konkretnom primeru SDOF sistema, drift za GI performansni nivo se nalazi u granicama  $DR_{GI}=15\div20\%$ , odnosno za slučaj kada se INDA kriva asimptotski približava horizontali (slika 4.75). Maksimalna realizovana veličina drifta iz NSAPA analize je 32%, dok je na osnovu nelinearnog odgovora HINSDA i INDA analiza, kao što je prethodno utvrđeno, ova vrednost drifta u granicama 15 $\div$ 20%. Na taj način realan nelinearan odgovor SDOF sistema do dostizanja

GI performansnog nivoa je znatno kraći, u odnosu na nelinearan odgovor koji je realizovan primenom NSAPA analize.



Slika 4.75 Generisana INDA kriva za  $DR_{max}$  i  $\theta=0^\circ$

Na slici 4.76 prikazane su generisane HINSDA površi za sva tri UBEPKHS konstitutivna modela i INDA površ. Ispunjene uslova identičnosti HINSDA i INDA površi zapravo i nije moguće, jer su primenjene dve potpuno različite metode i što se kod HINSDA analize primenjuje bilinearizacija NSAPA *pushover* krive.

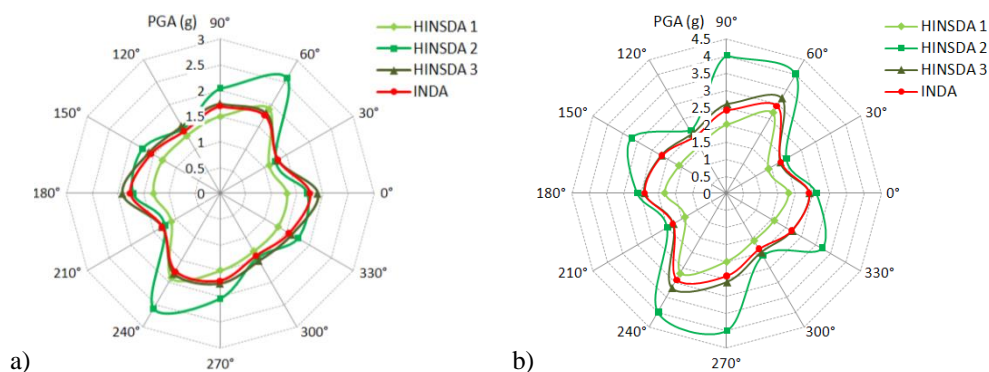


Slika 4.76 Generisana: a) HINSDA površ za prvi UBEPKHS konstitutivni model, b) HINSDA površ za drugi UBEPKHS konstitutivni model, c) HINSDA površ za treći UBEPKHS konstitutivni model, d) INDA površ

Najbolje poklapanje HINSDA i INDA krivih i površi postiže se primenom trećeg UBEPKHS konstitutivnog modela. Sa druge strane, moguće je analizirati nelinearan odgovor za dati  $IM$  parametar, a za sve razmatrane uglove  $\theta_i$  primenom odgovarajućih anvelopa. Na slici 4.77 prikazane su generisane anvelope  $PGA$  i to za  $DR=10\%$  i  $DR=32\%$ . Superiornost primene trećeg UBEPKHS konstitutivnog modela takođe je potvrđena komparacijom anvelopa  $PGA$ . Prikazanim testiranjem efekat primene HINSDA analize pokazao se u redukciji vremena potrebnog za procesiranja NDA i



INDA analiza i u mogućnosti određivanja  $PGA_{max}$ , s obzirom da direktnom primenom NSPA analiza ovo nije moguće.

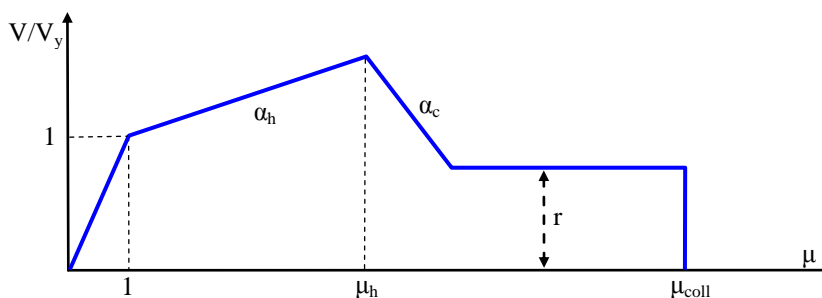


Slika 4.77 Generisane anvelope  $PGA$  za uglove  $\theta_i$ ; a)  $DR=10\%$ , b)  $DR=32\%$

## 4.6. IDA ANALIZA

### 4.6.1. TEORIJSKI ASPEKTI IDA ANALIZE

Procesiranje INDA analiza 3D modela okvirnih zgrada, kao što je već napomenuto, zahteva znatne hardverske resurse i memorijski prostor za skladištenje dobijenih podataka. U cilju dobijanja rešenja koja su znatno efikasnija, a pri tom uvode određeni stepen aproksimacije, razvijena je inkrementalna dinamička analiza (IDA - *Incremental Dynamic Analysis*) [210]. Ovakva IDA analiza je poznatija kao inkrementalna dinamička analiza koja se zasniva na rešenju NSPA analize, a kojom se može razmatrati nelinearan odgovor MDOF sistema u kapacitativnom domenu [215]. Ova analiza se zasniva na petolinearnom modelu obvojnice (*backbone curve*) i niza regresionih analiza kojim se uzima u obzir odgovor nelinearnog histerezisnog modela ponašanja (slika 4.78) [209].



Slika 4.78 Petolinearni model obvojnice [209]

Petolinearni model obvojnice se definiše preko pet parametara  $\alpha_h$ ,  $\mu_h$ ,  $\alpha_c$ ,  $r$ ,  $\mu_{coll}$ ,

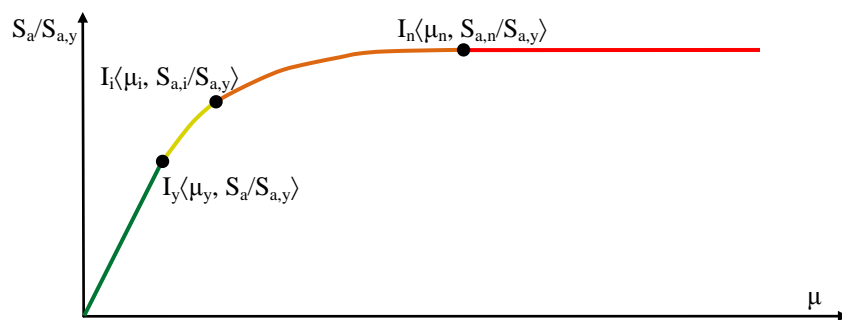
odnosno preko njihovih odgovarajućih poddomena:

- linearno-elastičan domen  $0 < \mu \leq 1$  i  $0 < V/V_y \leq 1$ ,
- domen ojačanja  $\alpha_h \in [0, 1)$ ,
- domen negativne krutosti  $\alpha_c \in [-\infty, 0)$ ,
- rezidualan plato  $\mu_r = \mu_h + (1 - r + (\mu_h - 1)\alpha_h)/|\alpha_c|$ ,  $r \in [0, 1)$ ,
- domen kolapsa  $\mu_{coll} \in [1, +\infty)$ .

Za potrebe istraživanja u ovoj doktorskoj disertaciji za *EDP* parametar je korišćen koeficijent duktilnosti  $\mu$ , a za *IM* meru relativna vrednost  $S_a/S_{a,y}$ , gde je  $S_{a,y}$  spektralno ubrzanje na granici tečenja. Dobijeni su diskretni uređeni parovi  $\langle \mu_i, S_{a,i}/S_{a,y} \rangle$  interpolirani splajnom, a u konačnoj formi je konstruisana IDA *pushover* kriva  $S_a/S_{a,y}(\mu)$ . Na slici 4.79 je prikazana IDA *pushover* kriva realizovana IDA analizom, gde se izdvajaju tri bitno različita domena:

- linearno-elastičan domen  $0 < \mu \leq 1$  i  $0 < S_a/S_{a,y} \leq 1$ ,
- nelinearan domen  $1 < \mu \leq \mu_{coll}$  i  $1 < S_a/S_{a,y} \leq S_{a,n}/S_{a,y}$ ,
- kolapsni domen  $\mu > \mu_{coll}$  i  $S_a/S_{a,y} = S_{a,n}/S_{a,y}$ ,

gde je  $\mu_{coll}$  koeficijent duktilnosti za kolapsno stanje. U linearno-elastičnom domenu IDA *pushover* kriva je idealno prava, s obzirom da je ovo posledica primene relativnih koordinata. Nelinearan domen karakteriše egzistencija pseudolinearnog dela i intervala omekšanja. U kolapsnom domenu se IDA *pushover* kriva asimptotski približavaju horizontali, s obzirom da se pri *i*-toj analizi i odgovoru sistema za  $\mu > \mu_{coll}$ , a u okviru jedne IDA analize, dobija izuzetno veliko pomeranje sistema.



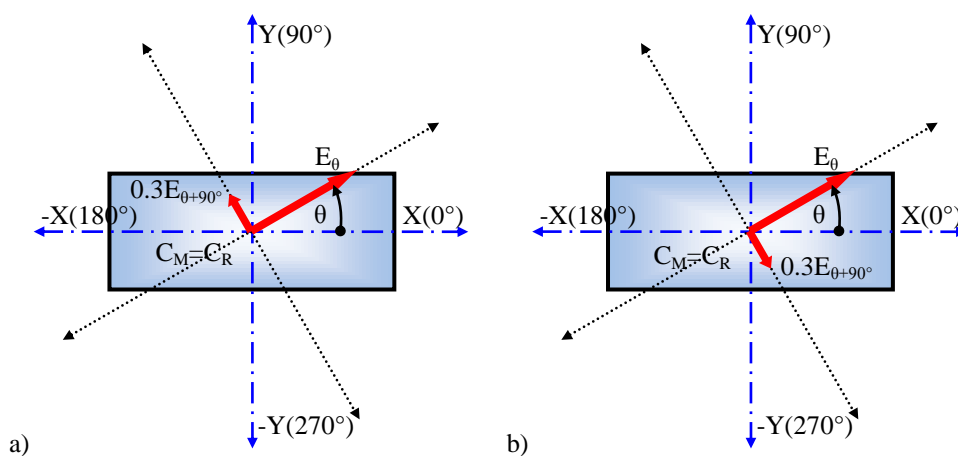
Slika 4.79 Identifikacija oblasti nelinearnog odgovora prema IDA analizi

Princip generisanja IDA *pushover* površi je identičan principu generisanja NSPA i INDA *pushover* površi.

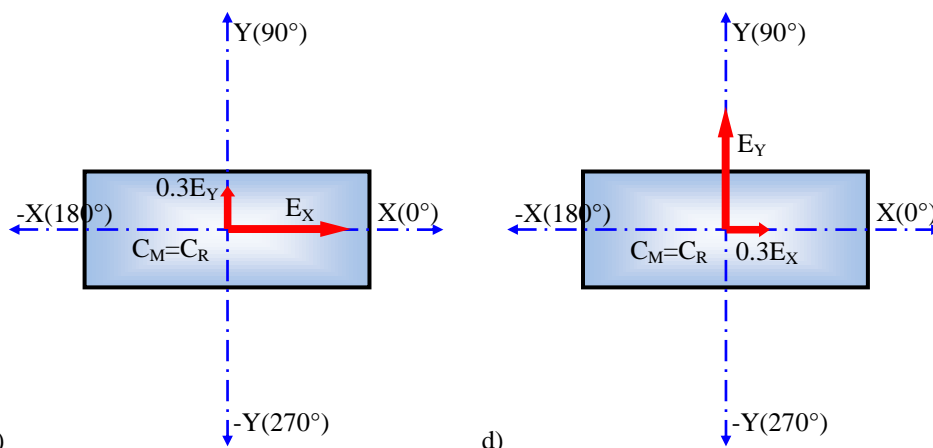
## 4.7. PROCESIRANJE *PUSHOVER* POVRŠI OKVIRNIH ZGRADA

### 4.7.1. NSPA *PUSHOVER* POVRŠI 3D MODELA ZGRADA

Procesiranje NSPA analiza 3D modela zgrada je sprovedeno modelirajući seizmičke sile prema raspodeli proporcionalna inercijalnoj sili u svakom čvoru prema *d'Alembert*-ovom principu (*acceleration load*) [56]. Ovakvo generisanje seizmičkih sila najpribližnije odgovara ravnomernoj raspodeli lateralnog seizmičkog opterećenja po visini konstrukcije, ali ne mora uvek da se realizuje ovakva raspodela. Kao što je već razmotreno u podpoglavlju 4.2.3, NSPA analizom sa ravnomernom raspodelom lateralnog seizmičkog opterećenja se postiže izuzetno dobro pokrivanje INDA diskretnih vrednosti. Seizmički uticaji usled kombinacije horizontalnih komponenti seizmičkog dejstva su određeni pravilom  $E_x+0.3E_y$  prema EC 8 [66]. S obzirom da se za NSPA analizu 3D modela zgrada razmatra prostorni odgovor za bilo koji ugao dejstva zemljotresa, to ova kombinacija postaje  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ . U prvom slučaju su razmatrani odgovori 3D modela zgrada rotirajući komponente seizmičkog dejstva  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  po uglovima  $\theta_i$  (za inkrement ugla rotacije  $\Delta\theta=30^{\circ}$ ), tako da se dobijaju maksimalna pomeranja za datu kombinaciju (slika 4.80.a). Zatim su razmatrani odgovori 3D modela zgrada rotirajući komponente seizmičkog dejstva  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  po uglovima  $\theta_i$  (slika 4.80.b). Dodatno istraživanje je sprovedeno za komponente seizmičkog dejstva  $E_X+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (slika 4.81.a) i  $E_Y+0.3E_X$  (slika 4.81.b) za X i Y pravce, s'tim što nisu rotirane komponente seizmičkog dejstva po uglovima  $\theta_i$ , ali je razmatran odgovor sistema po uglovima  $\theta_i$  (za inkrement ugla rotacije  $\Delta\theta=30^{\circ}$ ).



Slika 4.80 a) rotacija komponenta seizmičkog dejstva  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  po uglovima  $\theta_i$ , b) rotacija komponenta seizmičkog dejstva  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  po uglovima  $\theta_i$  (za inkrement ugla rotacije  $\Delta\theta=30^{\circ}$ )



Slika 4.81 a) seizmičko dejstvo  $E_X+0.3E_Y$ , d) seizmičko dejstvo  $E_Y+0.3E_X$  (ne uzima se u obzir rotacija komponenti seizmičkog dejstva po uglovima  $\theta_i$ , ali se razmatra odgovor sistema po uglovima  $\theta_i$ )

Čvor za koji se sprovodi monitoring pomeranja je čvor u centru masa  $C_M$  najvišeg sprata zgrade. Na prethodnim slikama se centar masa poklapa sa centrom krutosti  $C_R$ , a što je karakteristično za 4x6x3 i 15x4x4 3D modele zgrada (slike 3.61 i 3.63). U slučaju 4x6x5-13, 15x4x4-6 i 9x6x5-12 3D modela zgrada (slike 3.62, 3.64 i 3.65) centri masa i centri krutosti najviših spratova se ne poklapaju, pa su pre procesiranja proračunati položaji centara masa za koja se sprovode monitorinzi pomeranja.

Na slikama 4.82÷4.141 su prikazane krive i površi dobijene NSPA analizama 3D modela zgrada. U prvoj grupi su prikazane izopovrši u polarnom koordinatnom sistemu na kojima je predstavljen monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performansne nivoe B-IO, IO-LS, LS-CP i C-D. U drugoj grupi su, u polarnom koordinatnom sistemu, prikazane krive globalnog drifta na granici tečenja  $DR_y$ , maksimalnog globalnog drifta  $DR_{max}$ , relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift, duktilnosti na granici tečenja  $\mu_y$ , maksimalno realizovane duktilnosti  $\mu_{max}$  i globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  za IO, LS i CP performansne nivoe. Takođe, određene su srednje vrednosti koeficijenta duktilnosti  $\mu_m$  i koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu$  za svaki razmatran slučaj posebno. U trećoj grupi su, u prostornom koordinatnom sistemu, prikazane generisane NSPA *pushover* površi u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$  u izometriji. Takođe, prikazane su i ortogonalne projekcije NSPA *pushover* površi u  $DR_x$ - $DR_y$  ravni.

Razmatrajući realizovane izopovrši u polarnim koordinatama za monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama može se izdvojiti nekoliko bitnih

karakteristika:

- Centralni (beli) deo izopovrši sa spoljašnjom zatvorenom konturom se uočava kod svih izopovrši i karakterističan je za domen linearno elastičnog ponašanja zgrade, gde nema formiranih plastičnih zglobova (B-IO performansni nivo). Takođe, uočava se i na slikama gde je prikazan IO-LS performansni nivo.
- Izopovrši u polarnim koordinatama, na kojima je prikazan B-IO performansni nivo, imaju najveći stepen popunjenosti (najmanje bele površine), s obzirom da se prvo dostiže i kod svih modela zgrada je dostignut B-IO performansni nivo. Broj plastičnih zglobova za B-IO performansni nivo je najveći, ali se u narednim koracima redukuje, s obzirom da se javljaju novi performansni nivoi kako napreduje razvoj nelinearnih deformacija sistema. Ovo se može sagledati preko boja, gde tamnijoj boji odgovara veći broj plastičnih zglobova za odgovarajući korak nelinearnog odgovora sistema. Treba napomenuti da broj koraka nelinearnog odgovora nije jednak kod svih modela zgrada i nije jednak po svim razmatranim pravcima.
- U slučaju IO-LS performansnog nivoa broj plastičnih zglobova je, po svim koracima nelinearnog odgovora, manji u odnosu na broj plastičnih zglobova za B-IO performansni nivo, dok je u slučaju LS-CP performansnog nivoa broj plastičnih zglobova dodatno redukovan.
- U slučaju CP-C performansnog nivoa nije došlo do formiranja ni jednog plastičnog zgloba kod svih modela zgrada, a to znači da plastična stanja u preseccima stubova i greda u kojima se formirao LS-CP performansni nivo se, u najvećem broju slučajeva, tu i zadržavaju ili prelaze u C-D performansni nivo.
- Prelaz iz CP-C u C-D performansni nivo, prikazan na obvojnici nelinearnog modela ponašanja prema FEMA propisima, je zapravo prelaz iz domena ojačanja u domen znatne negativne krutosti. Tačka C je granični performansni nivo za koji se u toku NSPA analize dozvoljava određeni prag tolerancije redukcijom sile/momenta, u cilju postizanja konvergentnog rešenja i redukcije vremena proračuna.
- Performansni nivoi D-E i >E nisu dostignuti ni za jedan model zgrade, a što ukazuje na činjenicu da nije realizovan rezidualan nivo deformacija kod zgrada. Ovo može da ukazuje na činjenicu da se, pri znatnom nelinearnom ponašanju

zgrada ni u jednom preseku, gde je razvijen plastični zglob, ne može se računati na duktilnost znatno veću od zahtevane. Sa druge strane, kada bi se računalo na ovako veliku duktilnost koju obezbeđuje rezidualan nivo deformacija, tada bi nosivost plastifikovanog poprečnog preseka bila znatnije redukovana, nego što je to u slučaju do dostizanja CP-C, odnosno performansnog nivoa za čvor C.

- U većini slučajeva oblik konture centralnog (belog) dela izopovrši u polarnim koordinatama se može dovesti u korelaciju sa oblikom krive maksimalnih driftova  $DR_{max}$ . Ovo je posebno karakteristično za monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama IO-LS performansnog nivoa.

Razmatrajući realizovane krive u polarnim koordinatama za driftove, relativnu vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade i duktilnost može se izdvojiti nekoliko bitnih karakteristika:

- Kod svih modela zgrada su realizovani manji ili nešto veći maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  od globalnog drifta  $DR_{IO}$  za IO performansni nivo prema FEMA propisima. Ovo je povoljno, s obzirom da i za maksimalne vrednosti globalnih driftova  $DR_{max}$  nije prekoračen globalni drift  $DR_{LS}$  za LS performansni nivo (bezbednost života).
- Maksimalno realizovani driftovi zgrade treba da budu takvi da se omogući povoljno duktilno ponašanje, a ukoliko su ove vrednosti niske, tada zgradu može karakterisati krt lom, što nije povoljno za uslove dejstva zemljotresa.
- Za sve uglove, za koje je sproveden monitoring nelinearnih deformacija sistema, određeni su koeficijenti duktilnosti, a zatim je određena srednja vrednost koeficijenta duktilnosti  $\mu_m$  (tabela 4.7). S obzirom da su zgrade projektovane za visoku klasu duktilnosti DCH, to je NSPA analizama dobijeno da 15x4x4 i 9x6x5-12 3D modeli zgrada ispunjavaju ovaj kriterijum, pri čemu su srednje vrednosti koeficijenta duktilnosti veće od propisima zahtvenih duktilnosti ( $\mu_m > 4$ ) za sva seizmička dejstva (proračunske situacije). Razmatrani su, dakle, svi uglovi, a ne samo X i Y pravci (dva glavna pravca) koji se standardno razmatraju u linearnim i nelinearnim seizmičkim analizama.
- Ukoliko se uzmu u obzir  $E_x + 0.3E_y$  i  $E_x - 0.3E_y$  seizmička dejstva, gde se dobijaju ekstremne vrednosti pomeranja sistema, tada i 15x4x4-6 3D model zgrade pripada kategoriji DCH duktilnih zgrada.

- 9x6x5-12 3D model zgrade, projektovan prema SRP propisima, realizuje viši nivo duktilnosti, u odnosu na ostale zgrade projektovane prema EC propisima.

Tabela 4.7 Srednje vrednosti koeficijenta duktilnosti  $\mu_m$  i koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu$  za razmatrane 3D modele zgrada

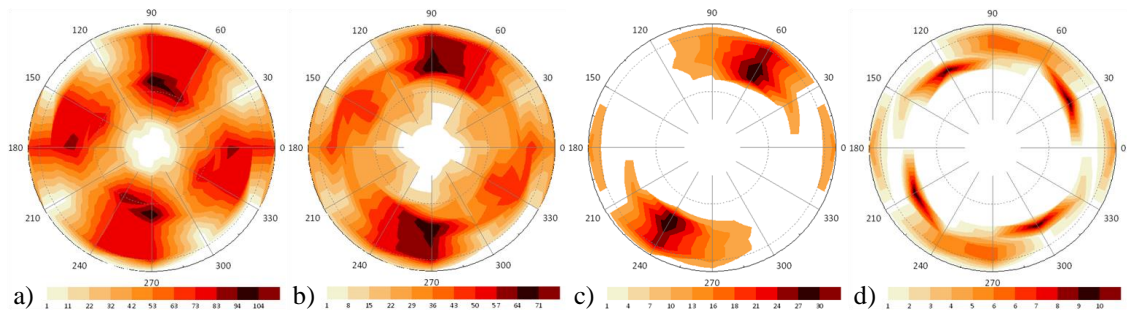
model	$E_{\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}}$		$E_{\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}}$		$E_x+0.3E_y$		$E_x-0.3E_y$	
	$\mu_m$	$M_\mu$	$\mu_m$	$M_\mu$	$\mu_m$	$M_\mu$	$\mu_m$	$M_\mu$
4x6x3	3.2	10.2	3.2	10.2	3.3	7.7	4.7	15.1
4x6x5-13	3.2	9.9	3.1	9.7	3.6	9.7	3.8	10.9
15x4x4	5.6	30.1	5.6	30.1	9.4	51.3	9.4	51.3
15x4x4-6	3.6	12.7	3.6	12.7	5.4	17.9	5.4	17.9
9x6x5-12	13.5	178.2	13.5	176.3	13.1	172.6	19.7	282.2

- Kada se razmatraju samo  $E_x+0.3E_y$  i  $E_x-0.3E_y$  seizmička dejstva, a što bi bilo kod standardnih seizmičkih analiza, dobijaju se veće vrednosti koeficijenta duktilnosti  $\mu_m$ , nego što je to slučaj kada se razmatraju  $E_{\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}}$  i  $E_{\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}}$  seizmička dejstva.
- Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade je karakteristično to da se za  $E_{\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}}$  i  $E_{\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}}$  seizmička dejstva realizuju iste srednje vrednosti koeficijenta duktilnosti  $\mu_m=13.5$ . Međutim, koeficijenti površi duktilnosti  $M_\mu$  nisu isti, već su  $M_\mu=178.2$  i  $M_\mu=176.3$  za  $E_{\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}}$  i  $E_{\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}}$  seizmičko dejstvo, respektivno.
- Kod 15x4x4-6 3D modela zgrade je za  $E_{\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}}$  i  $E_{\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}}$  seizmička dejstva dobijeno da na osnovu srednje vrednosti koeficijenta duktilnosti  $\mu_m=3.2$  zgrada pripada srednjoj klasi duktilnosti DCM ( $\mu_m<4$ ). Sa druge strane, na osnovu vrednosti koeficijenta površi duktilnosti  $M_\mu=12.7$  može se konstatovati da zgrada pripada visokoj klasi duktilnosti DCH, jer je prema izrazu (4.135) za visoku klasu duktilnosti  $M_\mu>11$ . S obzirom da se koeficijentom površi duktilnosti  $M_\mu$  meri odnos površina maksimalno realizovanih pomeranja i pomeranja na granici tečenja po uglovima  $\theta_i$ , to ovaj parametar ukazuje na viši nivo osetljivosti pri određivanju globalnog duktilnog ponašanja zgrade.
- Generalizovani zaključak bi mogao da glasi da se kod zgrada više spratnosti lakše realizuje viša klasa duktilnosti, a da se povećanjem neregularnosti u osnovi ova duktilnost smanjuje.

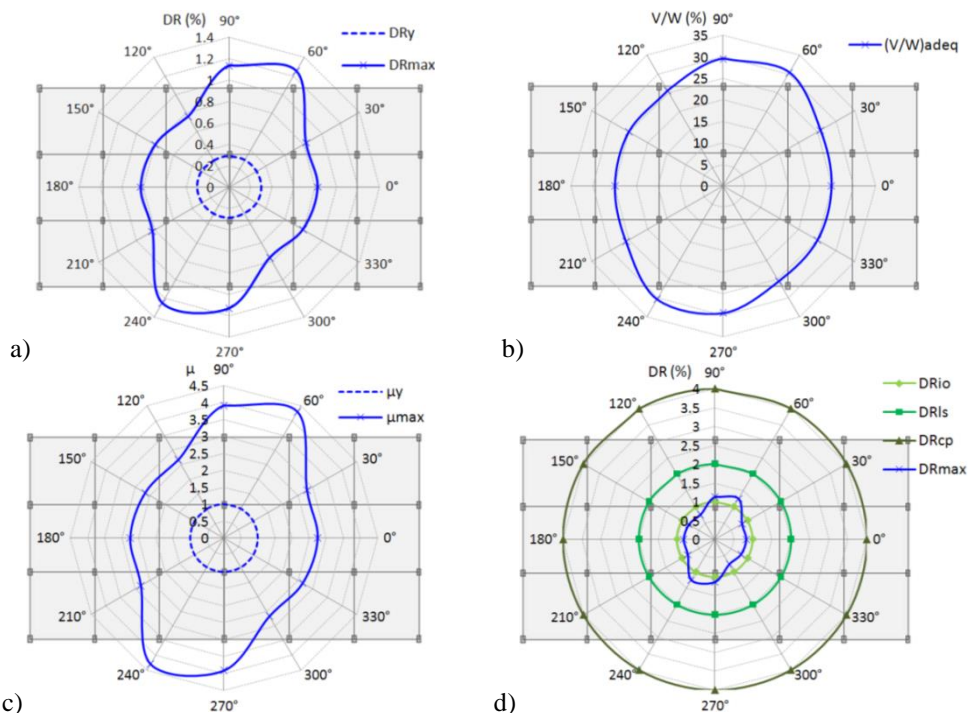
Razmatrajući realizovane NSPA *pushover* površi u prostornim koordinatama može se izdvojiti nekoliko bitnih karakteristika:

- Sve NSPA *pushover* površi su generisane linearnom interpolacijom diskretnih vrednosti. Krive maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$  su generisane splajn interpolacijom diskretnih vrednosti u polarnim koordinatama. Vizuelno odstupanje konturnih vrednosti ortogonalne projekcije ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan) NSPA *pushover* površi od krive maksimalnih globalnih driftova je posledica primenjenih interpolacija različitog karaktera. Maksimalni globalni driftovi po uglovima  $\theta_i$  su identični u oba grafička prikaza.
- Kod svih 3D modela zgrada krutost u nelinearnom domenu je gotovo horizontalna  $K_n \approx 0$  ili blago pozitivna, osim u pojedinim slučajevima, gde sa povećanjem nelinearnih deformacija krutost postaje negativna  $K_n < 0$ .
- Kada se razmatraju samo  $E_x + 0.3E_y$  i  $E_x - 0.3E_y$  seizmička dejstva, a što bi bilo kod standardnih seizmičkih analiza, tada se i dobijaju gotovo najveće vrednosti nelinearnih deformacija za pravac gde se uzima 100% seizmičko dejstvo, a najmanje vrednosti nelinearnih deformacija za pravac gde se uzima 30% seizmičko dejstvo. Za ova seizmička dejstva ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan) NSPA *pushover* površi ima elipsoidan oblik sa uklještenjem na mestu manjeg poluprečnika elipse.
- Kod 4x6x3 3D modela zgrade su realizovane maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile u intervalu od  $V/W = (25 \div 30)\%$ , dok su kod 4x6x5-13 3D modela zgrade ove relativne sile u intervalu od  $V/W = (30 \div 35)\%$ . Kod 15x4x4 3D modela zgrade su realizovane maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile u intervalu od  $V/W = (15 \div 18)\%$ , dok su kod 15x4x4-6 3D modela zgrade ove relativne sile u intervalu od  $V/W = (18 \div 25)\%$ . Na osnovu prethodne analize može se izvesti stav da se kod zgrada neregularnih u osnovi, nezavisno od spratnosti, realizuju veće ukupne smičuće sile. Treba uzeti u obzir da ove neregularne grade imaju i redukovani broj polja u osnovi, u odnosu na regularne zgrade, čime je smanjena masa po spratovima i izmenjena krutost.
- Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade su realizovane maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile u intervalu od  $V/W = (10 \div 12)\%$ . U ovom slučaju maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile znatno manje od rešenja dobijenih kod prethodnih modela zgrada, a što je direktna posledica proračuna seizmičkog dejstva prema SRP propisima.

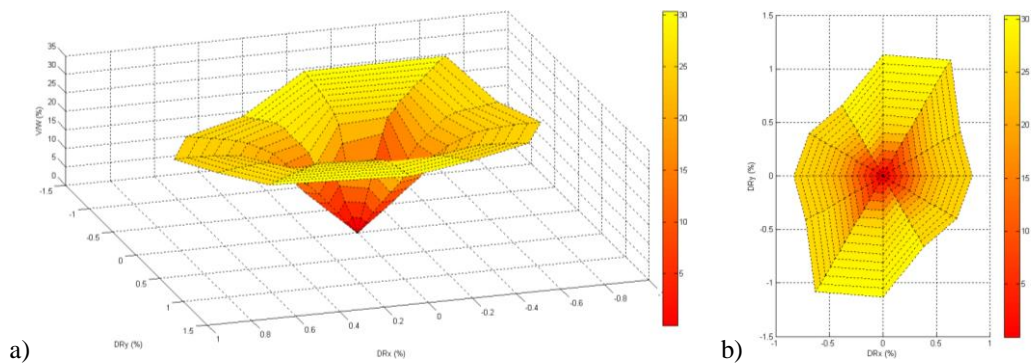




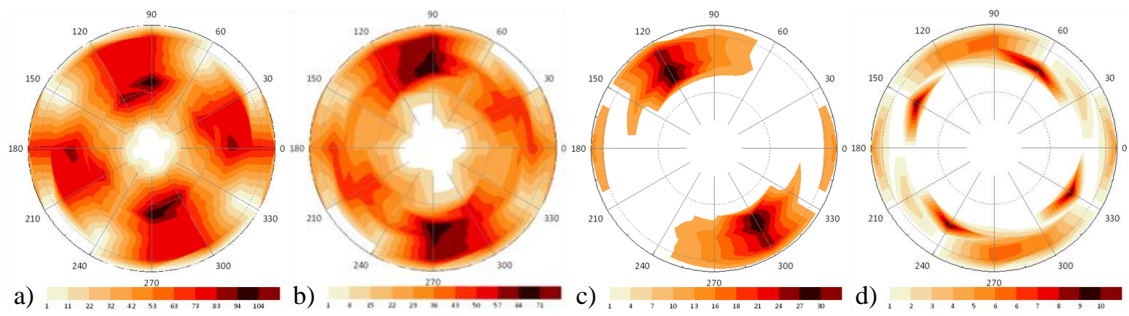
Slika 4.82 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



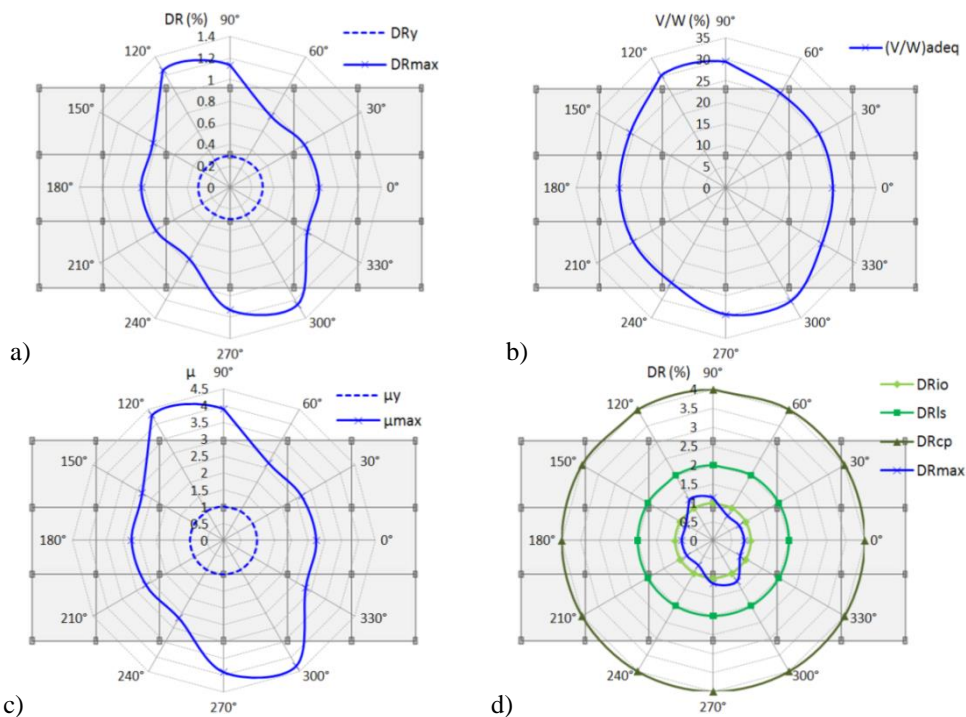
Slika 4.83 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=3.2$ ,  $M_{\mu}=10.2$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



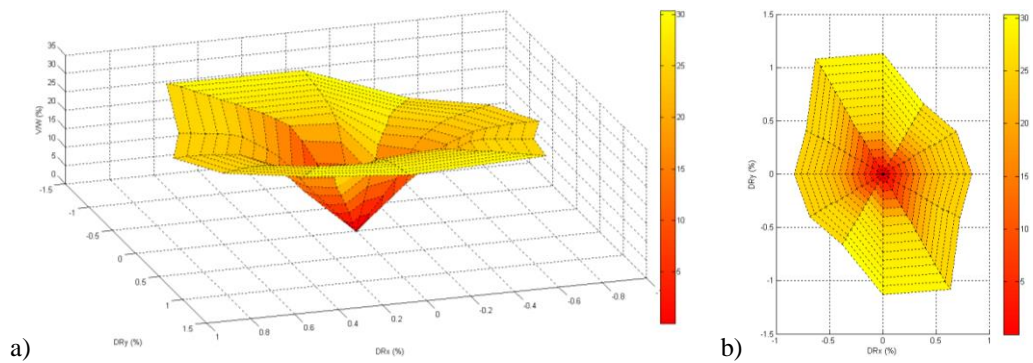
Slika 4.84 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



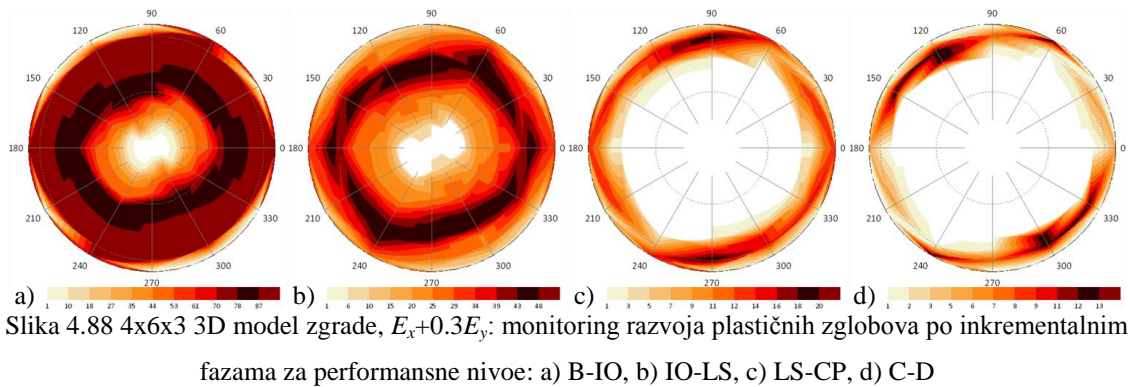
Slika 4.85 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



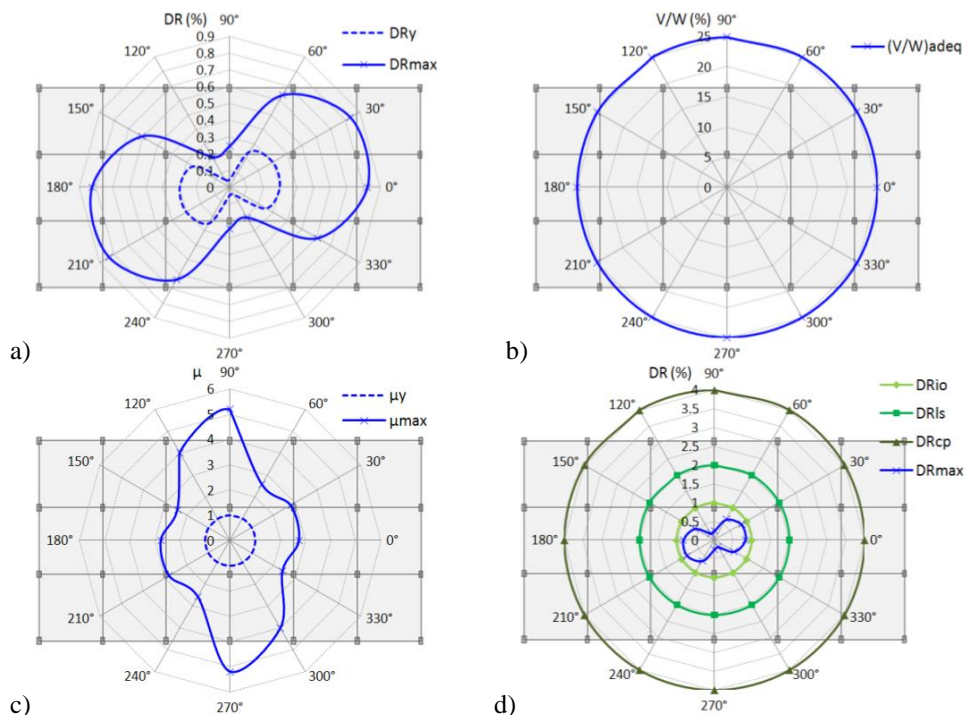
Slika 4.86 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=3.2$ ,  $M_{\mu}=10.2$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



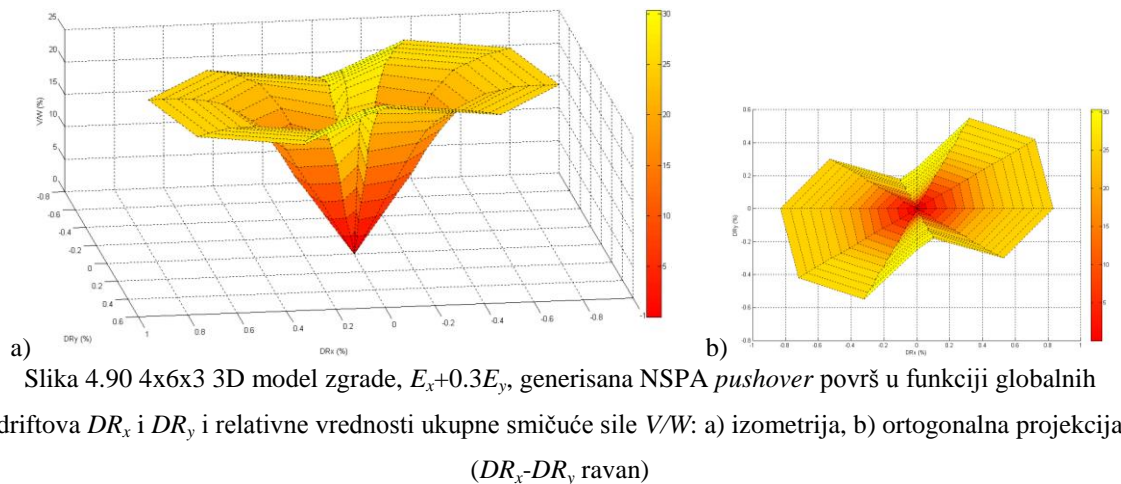
Slika 4.87 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



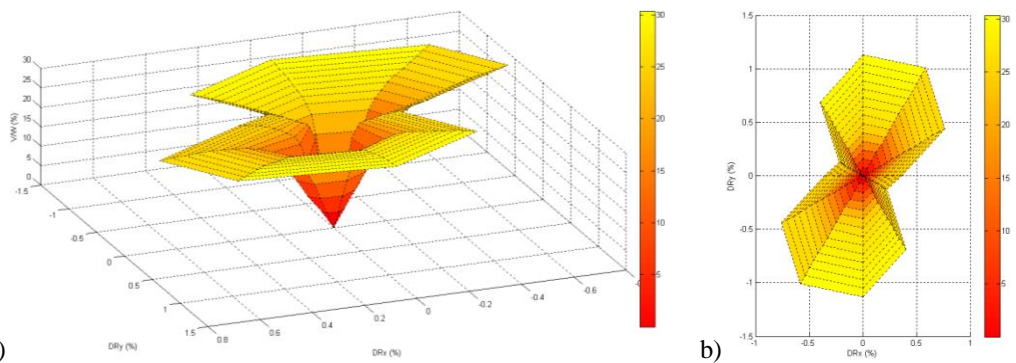
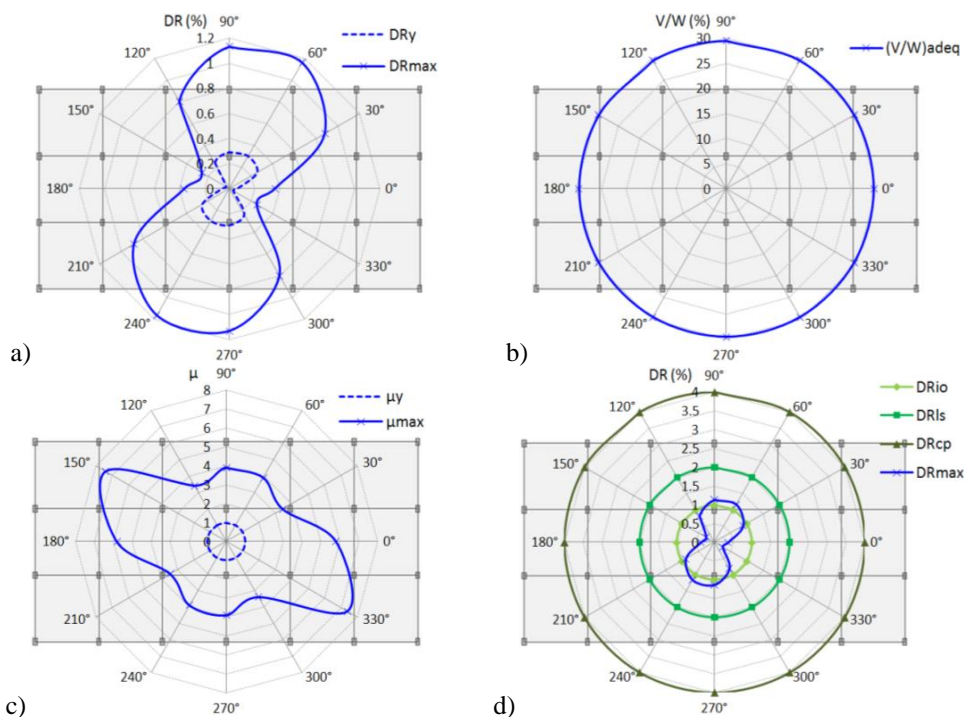
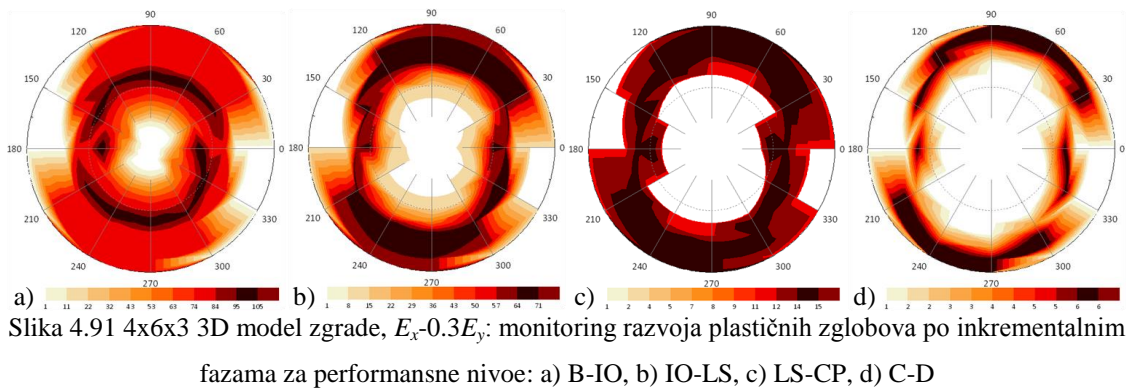
Slika 4.88 4x6x3 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D

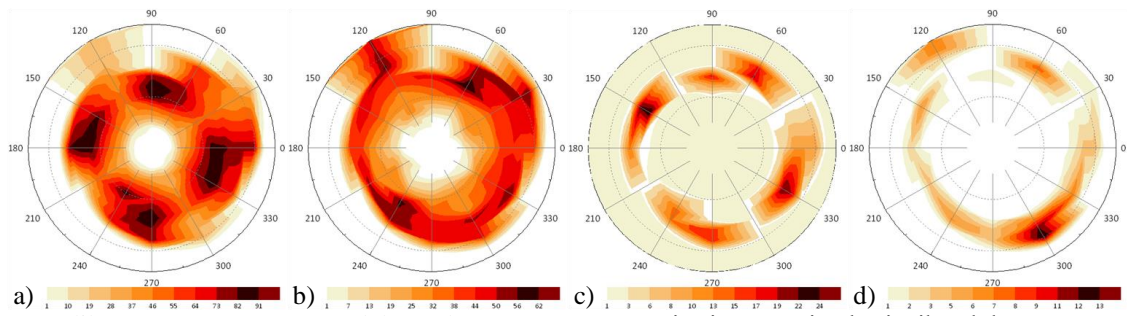


Slika 4.89 4x6x3 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ ,  $\mu_m=3.3$ ,  $M_\mu=7.7$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{Io}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$

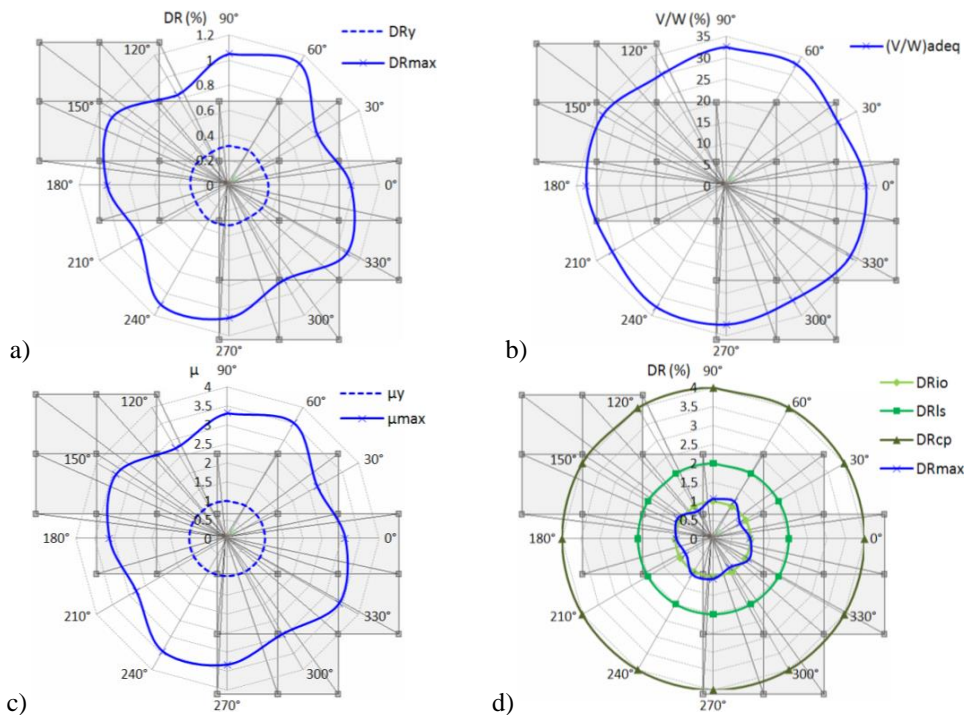


Slika 4.90 4x6x3 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)

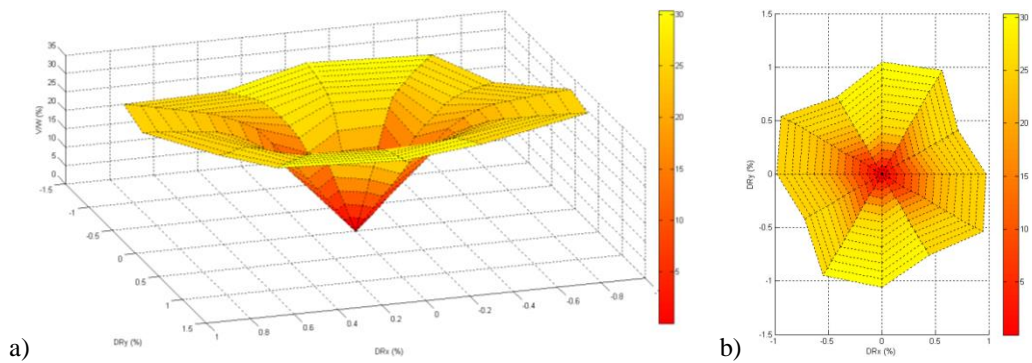




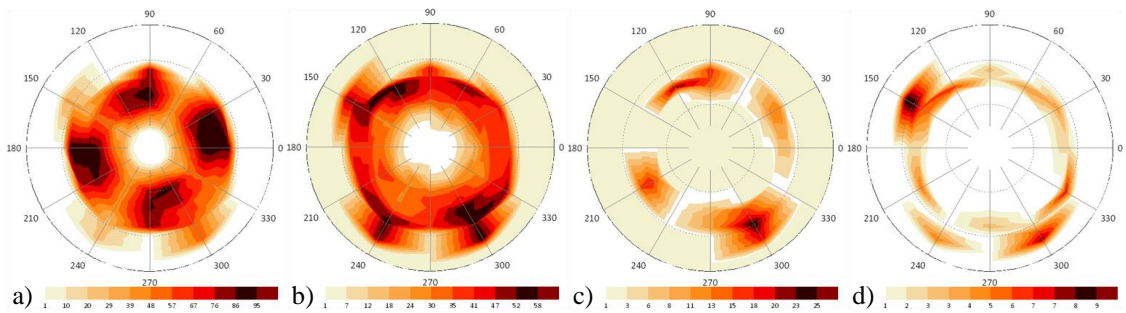
Slika 4.94 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



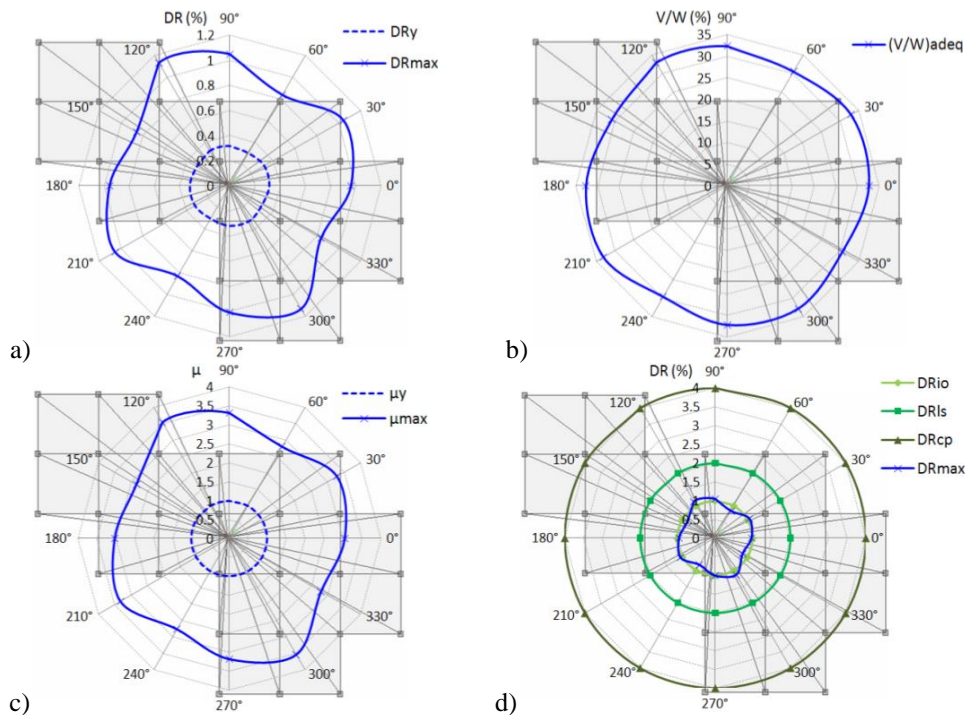
Slika 4.95 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=3.2$ ,  $M_{\mu}=9.9$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



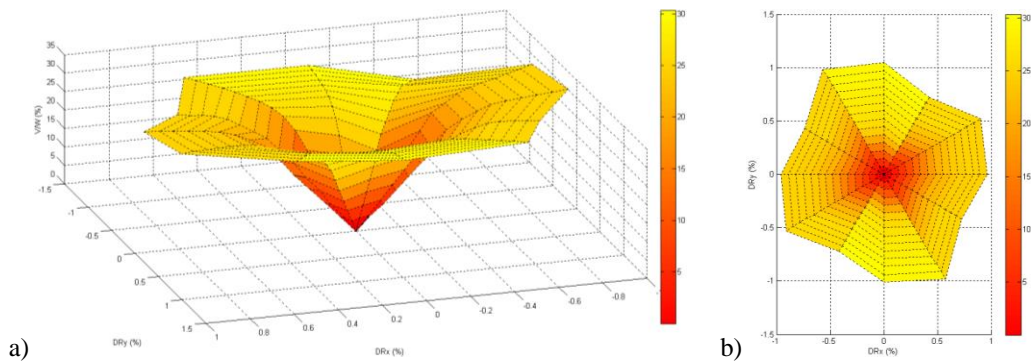
Slika 4.96 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan)



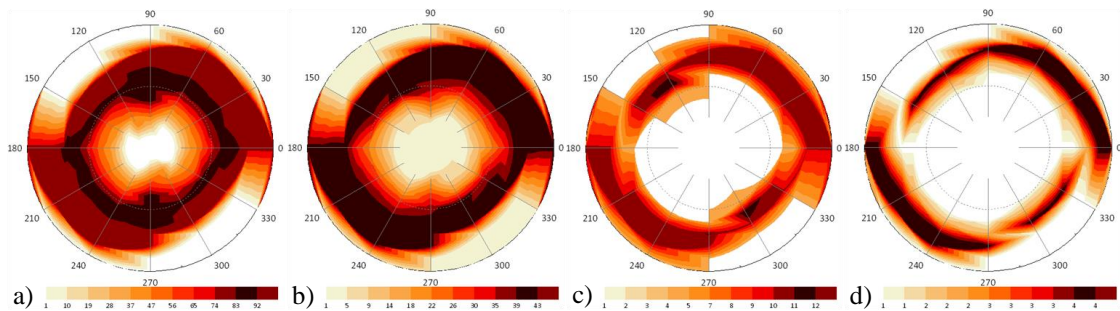
Slika 4.97 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



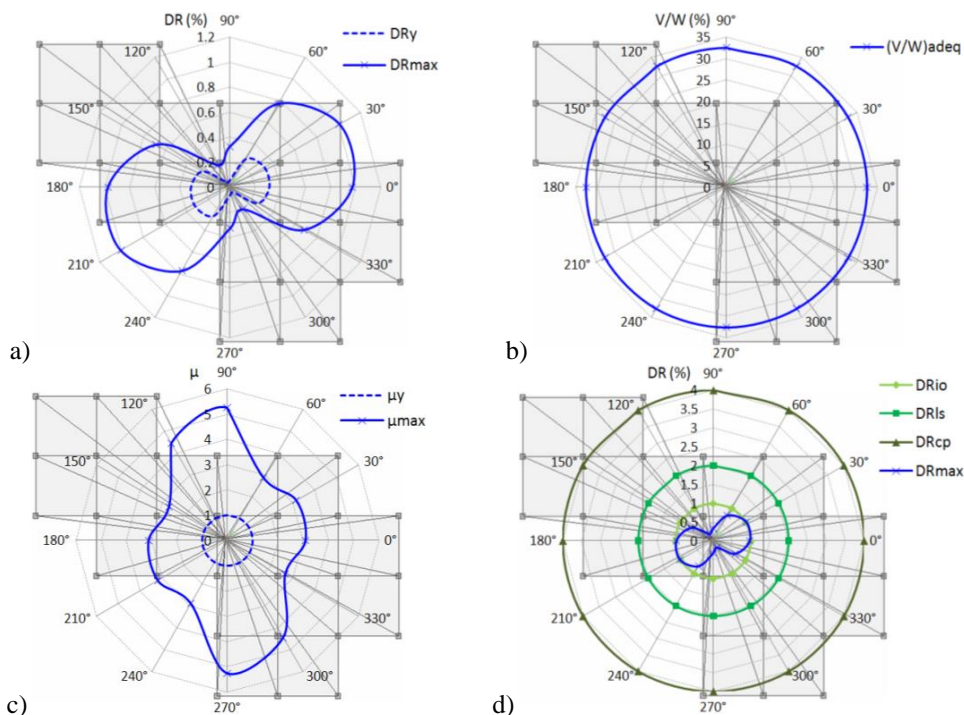
Slika 4.98 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=3.1$ ,  $M_{\mu}=9.7$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



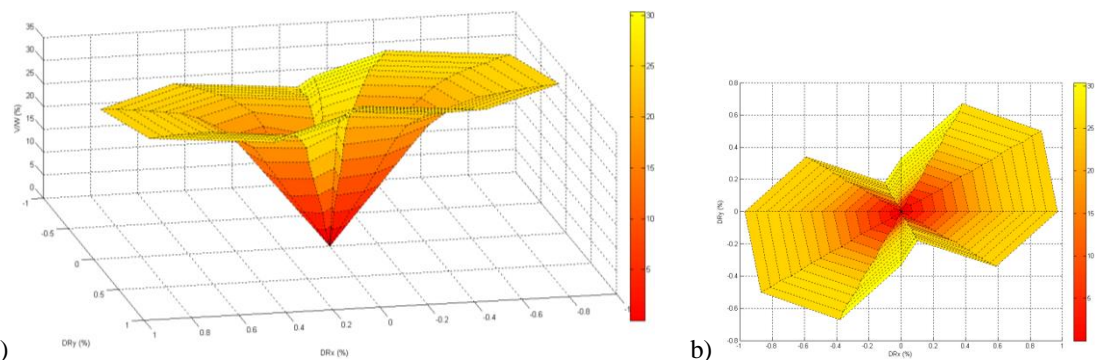
Slika 4.99 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan)



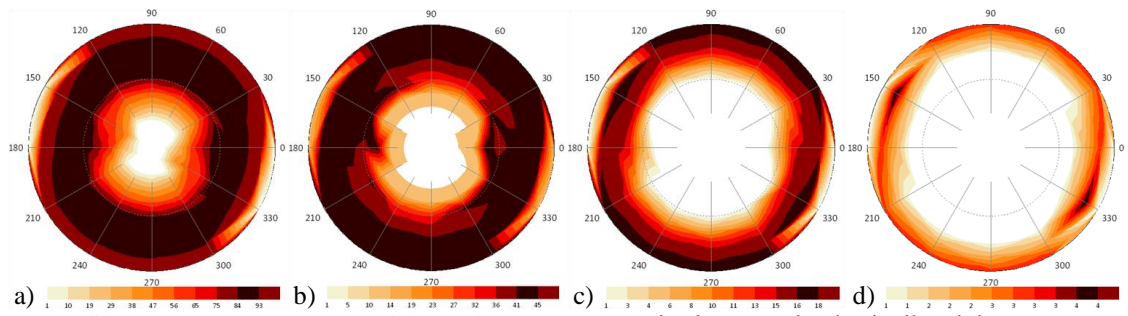
Slika 4.100 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



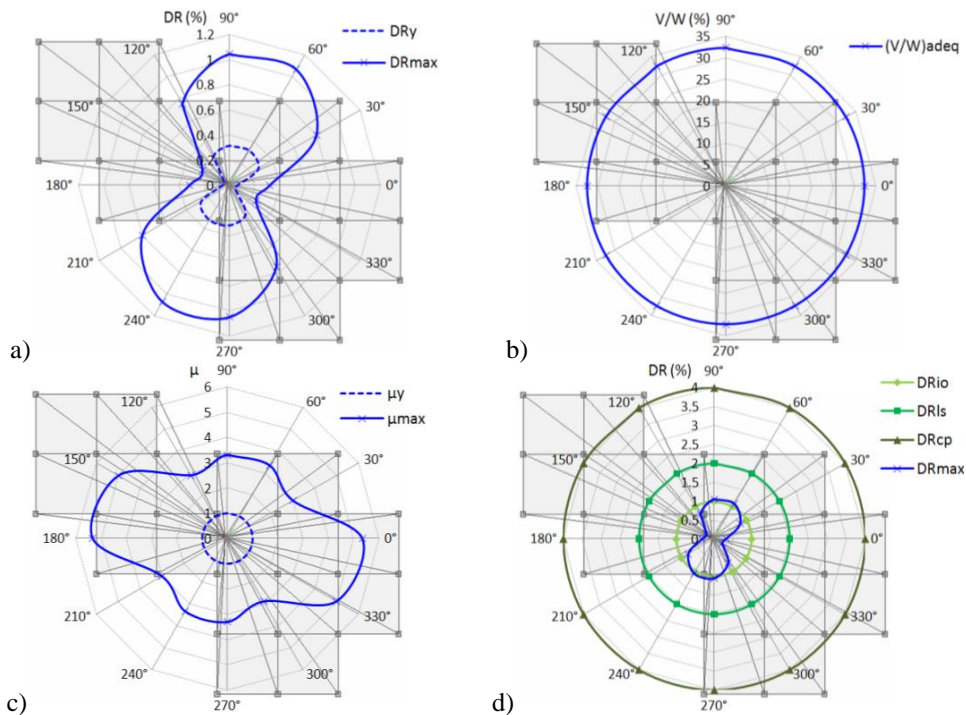
Slika 4.101 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ ,  $\mu_m=3.6$ ,  $M_\mu=9.7$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



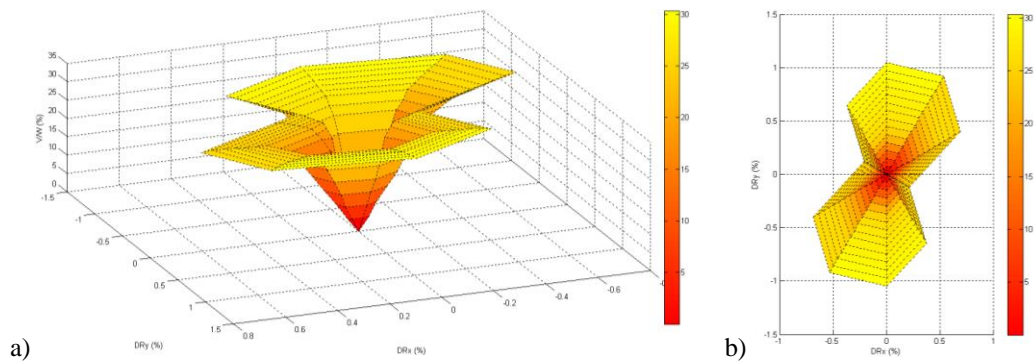
Slika 4.102 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



Slika 4.103 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x=0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D

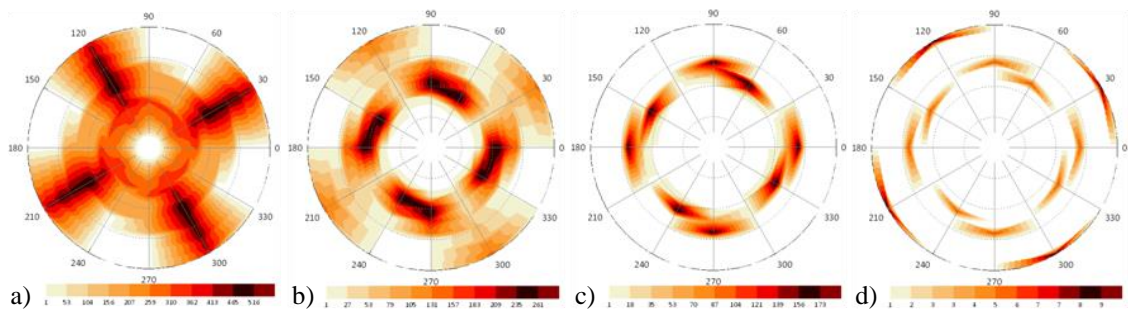


Slika 4.104 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x=0.3E_y$ ,  $\mu_m=3.8$ ,  $M_\mu=10.9$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$

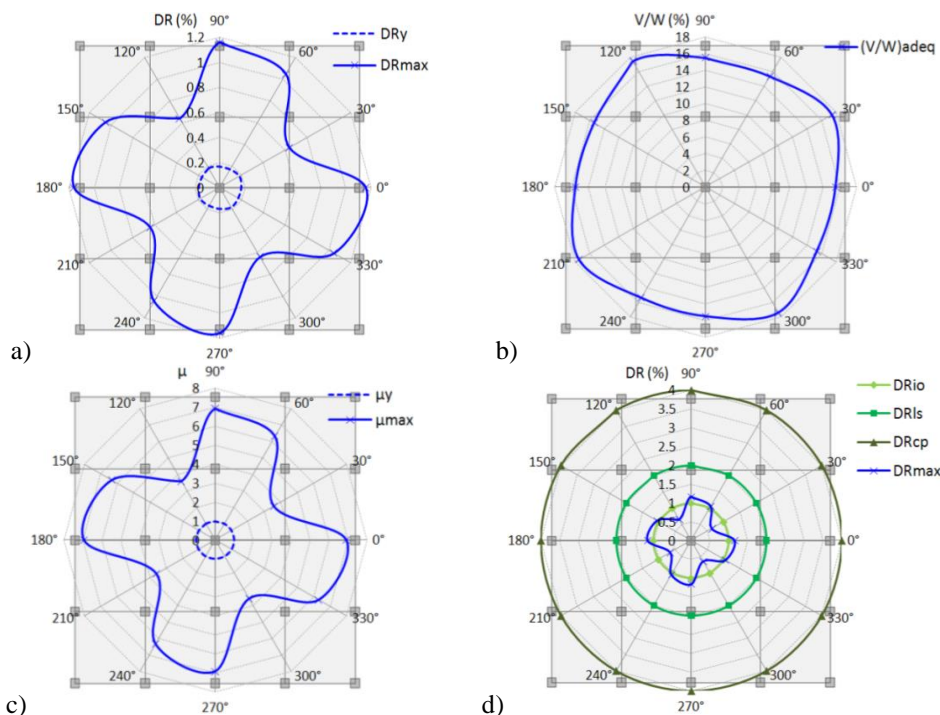


Slika 4.105 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x=0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)

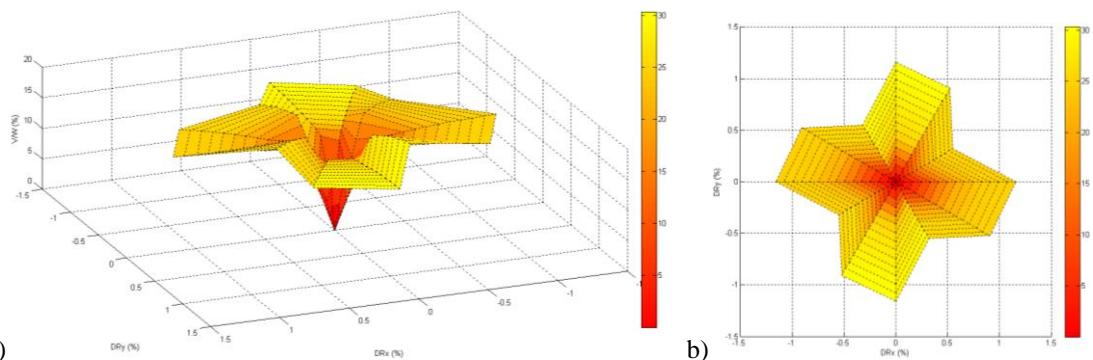




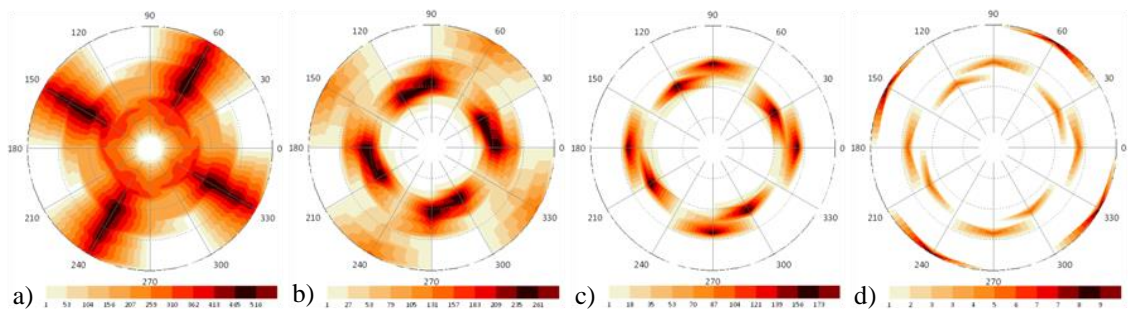
Slika 4.106 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



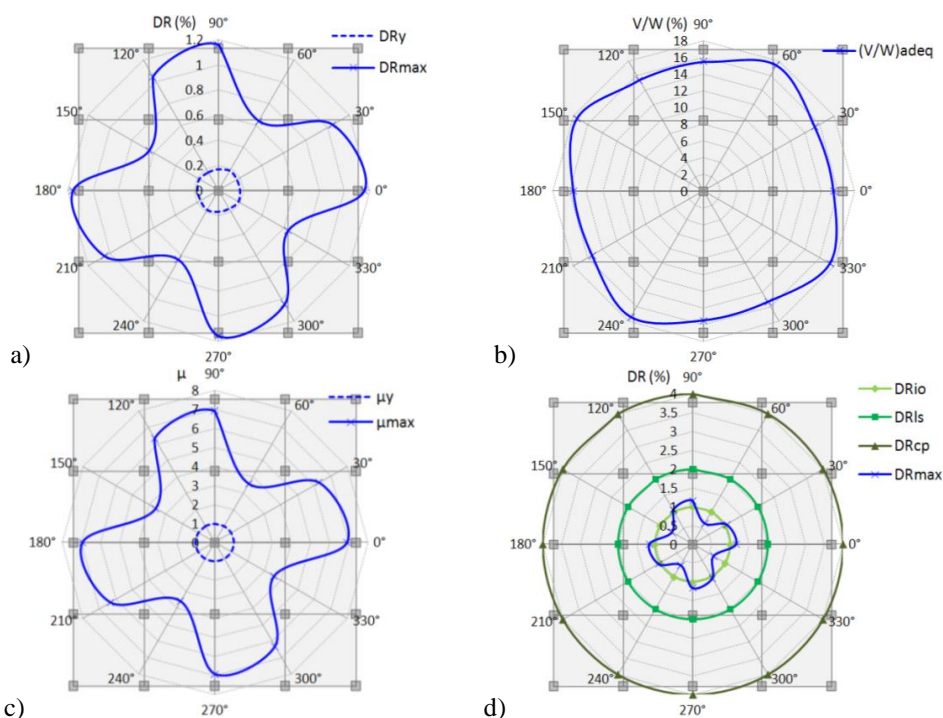
Slika 4.107 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=5.6$ ,  $M_{\mu}=30.1$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



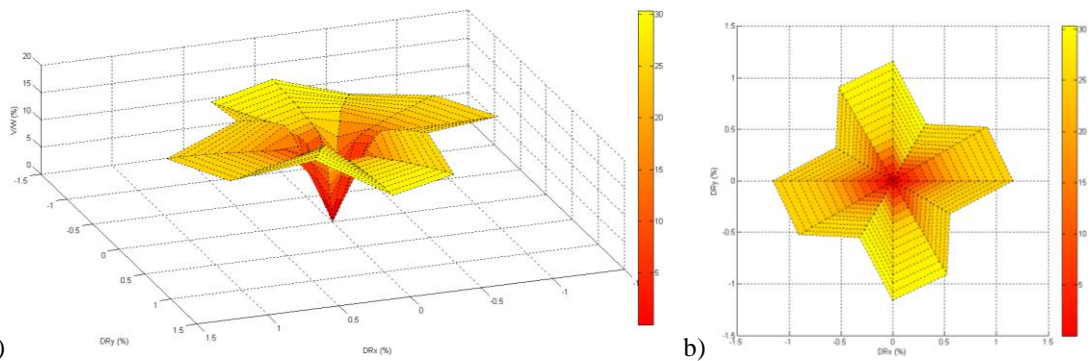
Slika 4.108 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



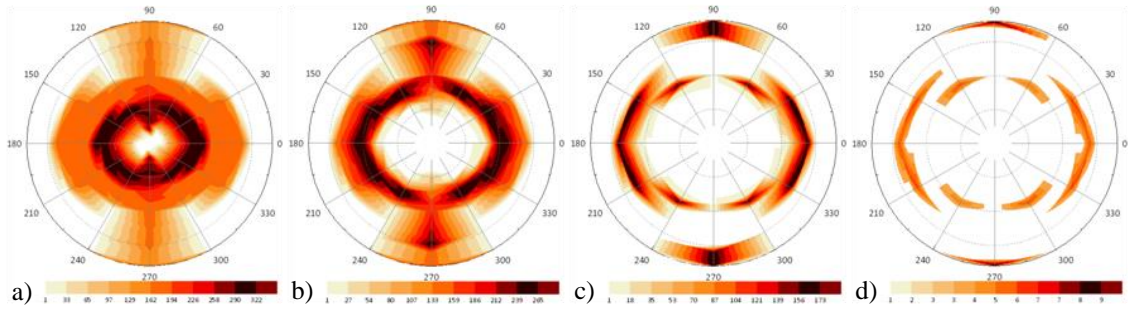
Slika 4.109 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



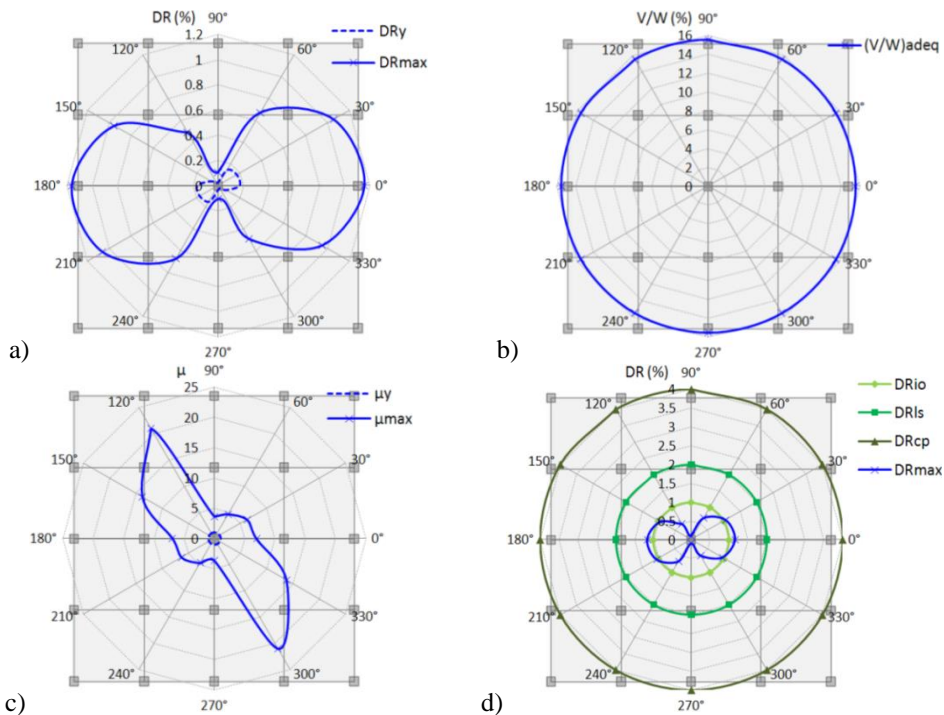
Slika 4.110 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=5.6$ ,  $M_{\mu}=30.1$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



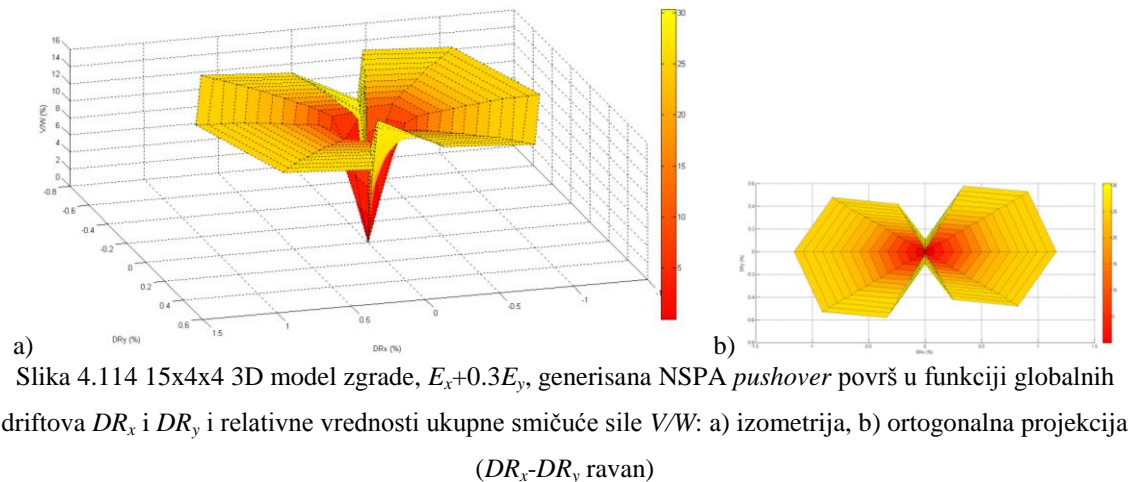
Slika 4.111 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan)



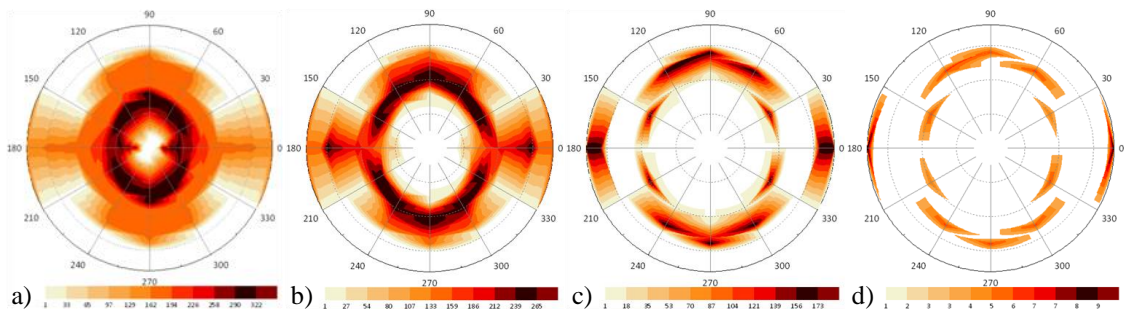
Slika 4.112 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



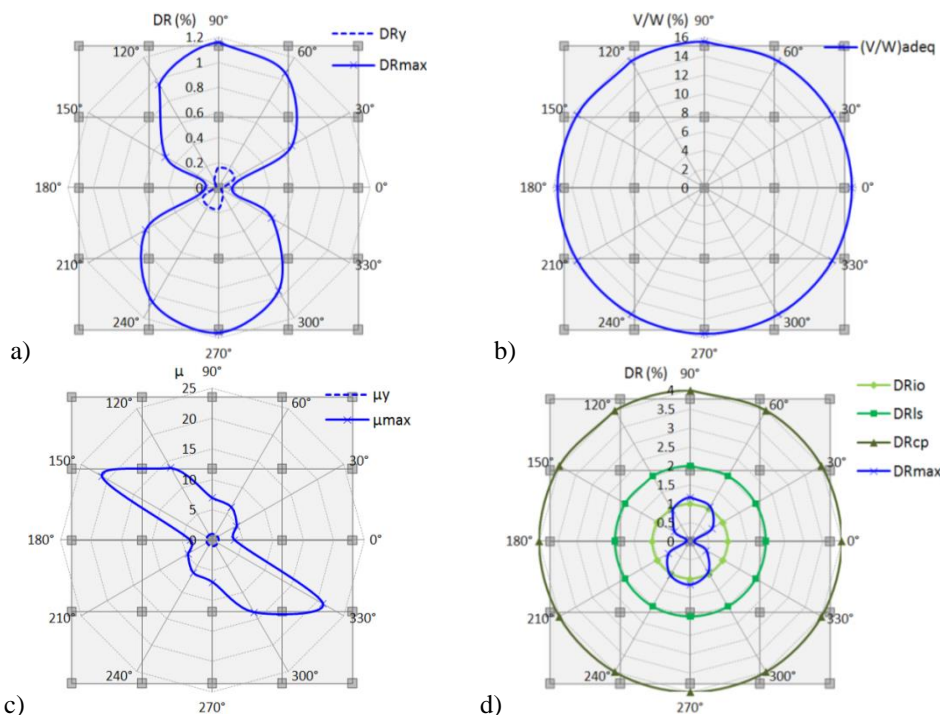
Slika 4.113 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ ,  $\mu_m=9.4$ ,  $M_\mu=51.3$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



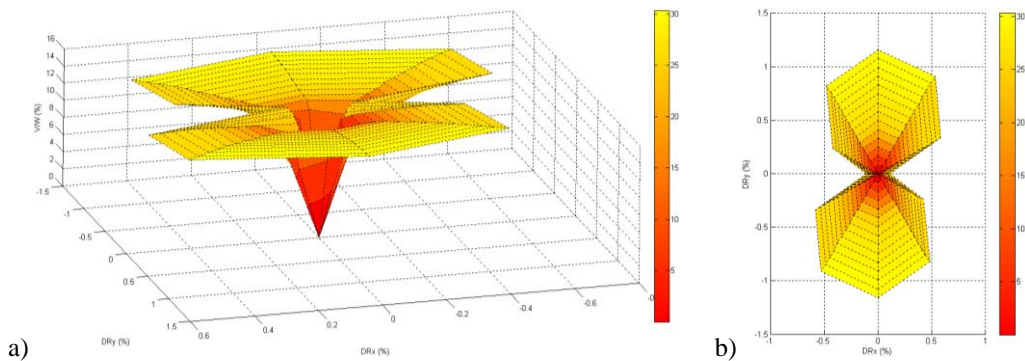
Slika 4.114 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



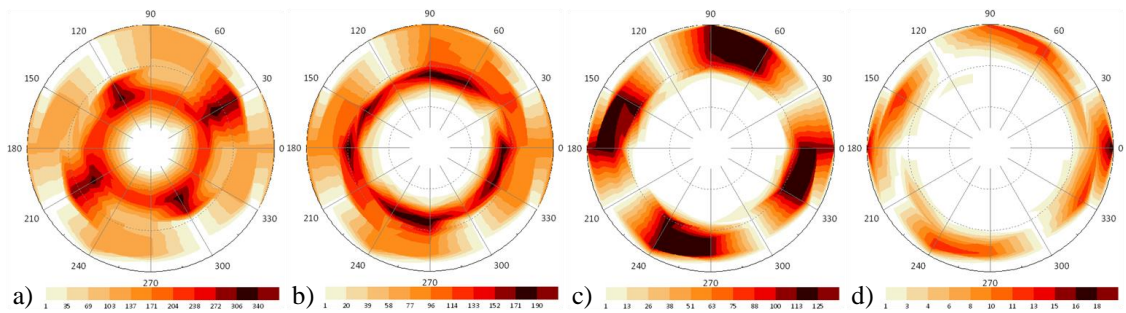
Slika 4.115 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



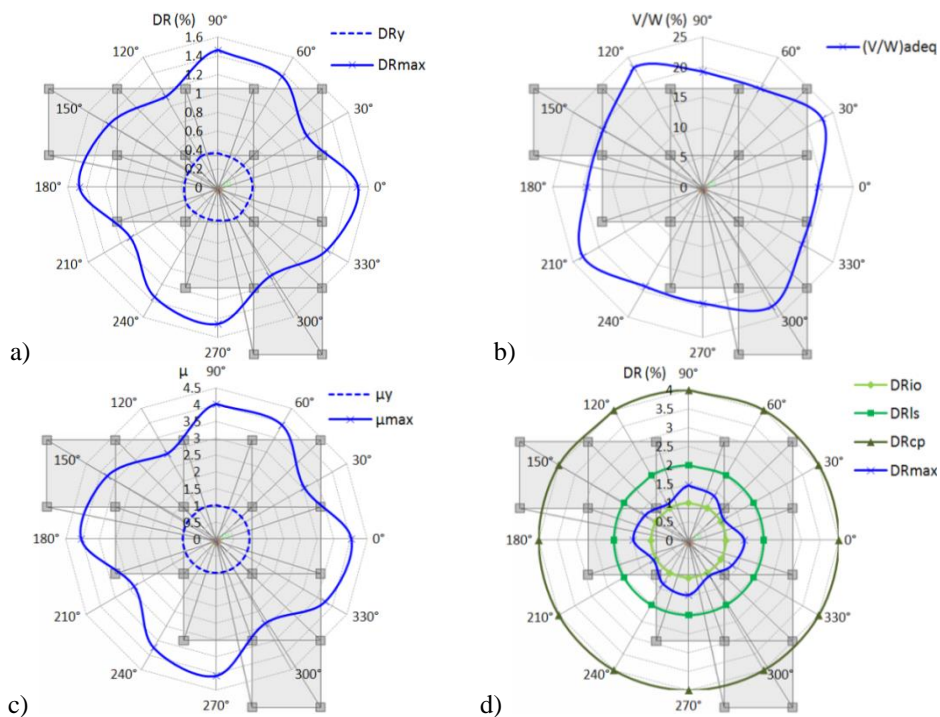
Slika 4.116 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ ,  $\mu_m=9.4$ ,  $M_\mu=51.3$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{10}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



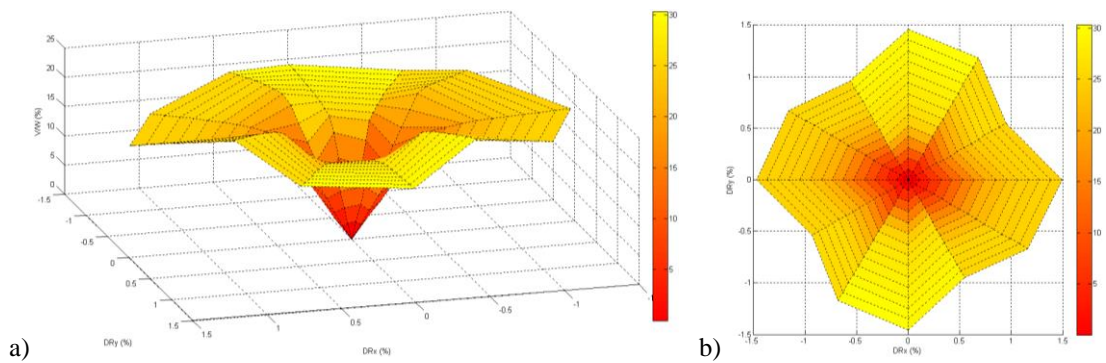
Slika 4.117 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



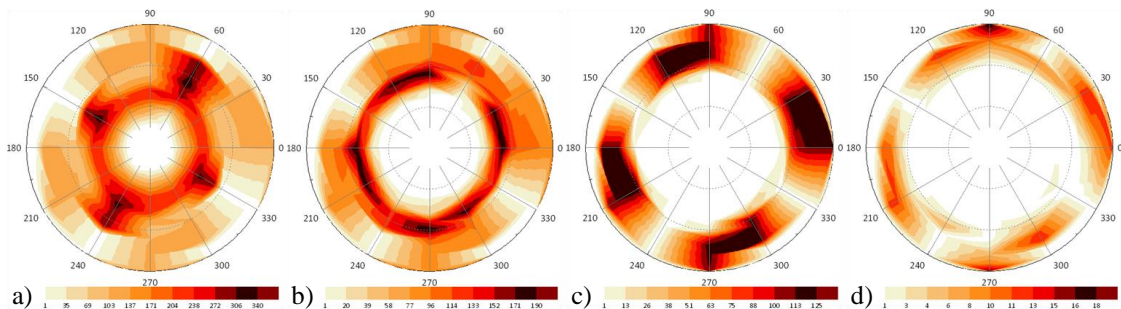
Slika 4.118 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



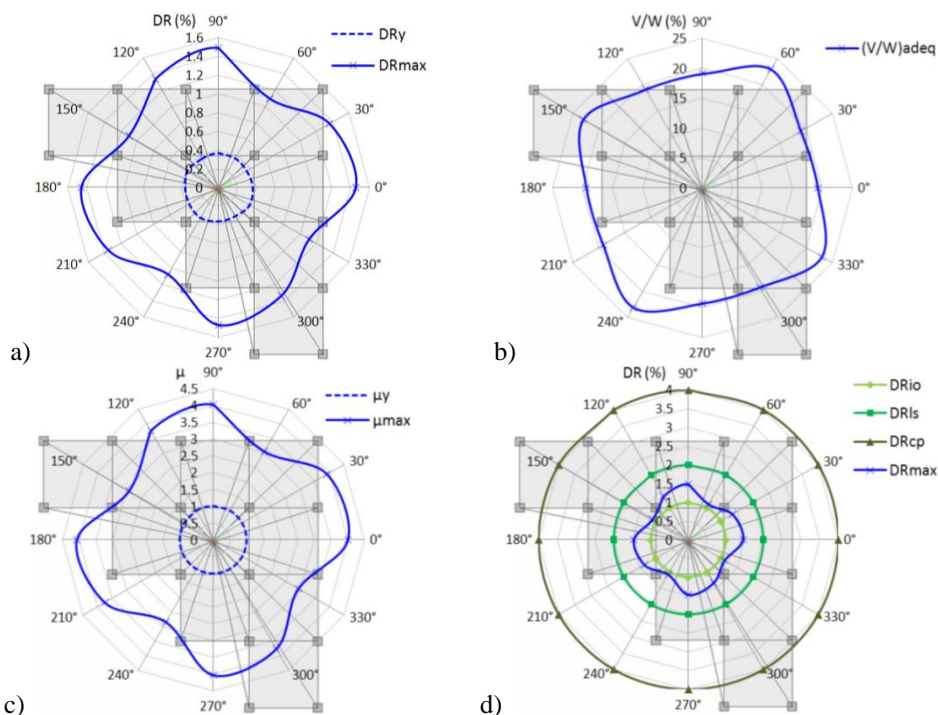
Slika 4.119 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=3.6$ ,  $M_{\mu}=12.7$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



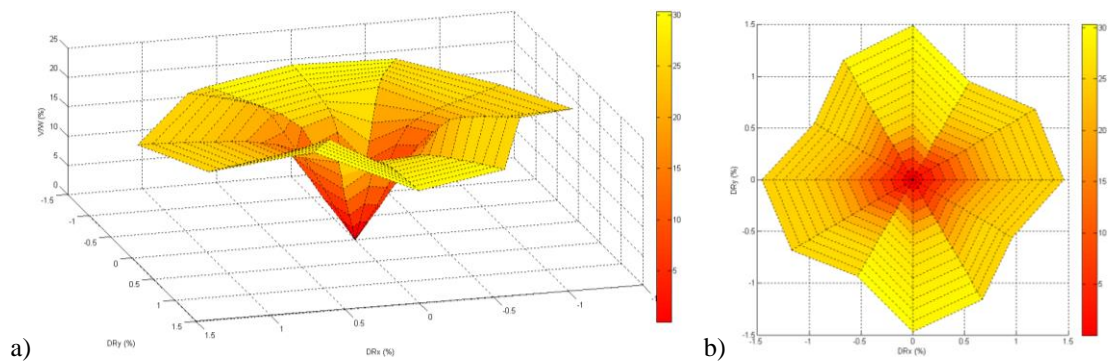
Slika 4.120 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA pushover površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan)



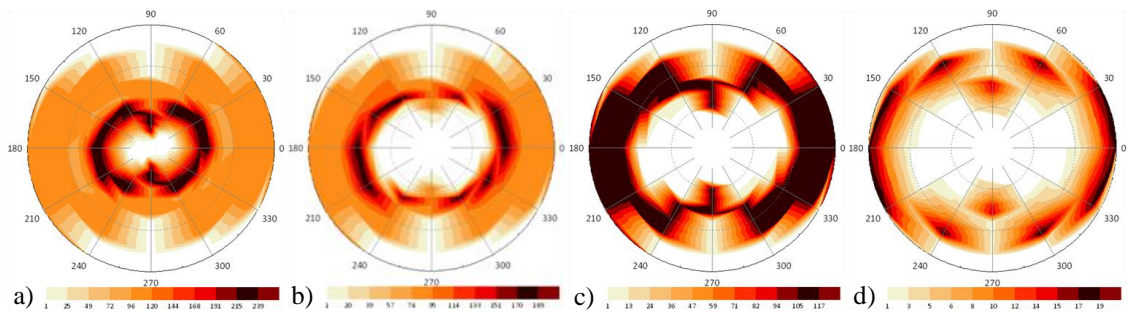
Slika 4.121 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



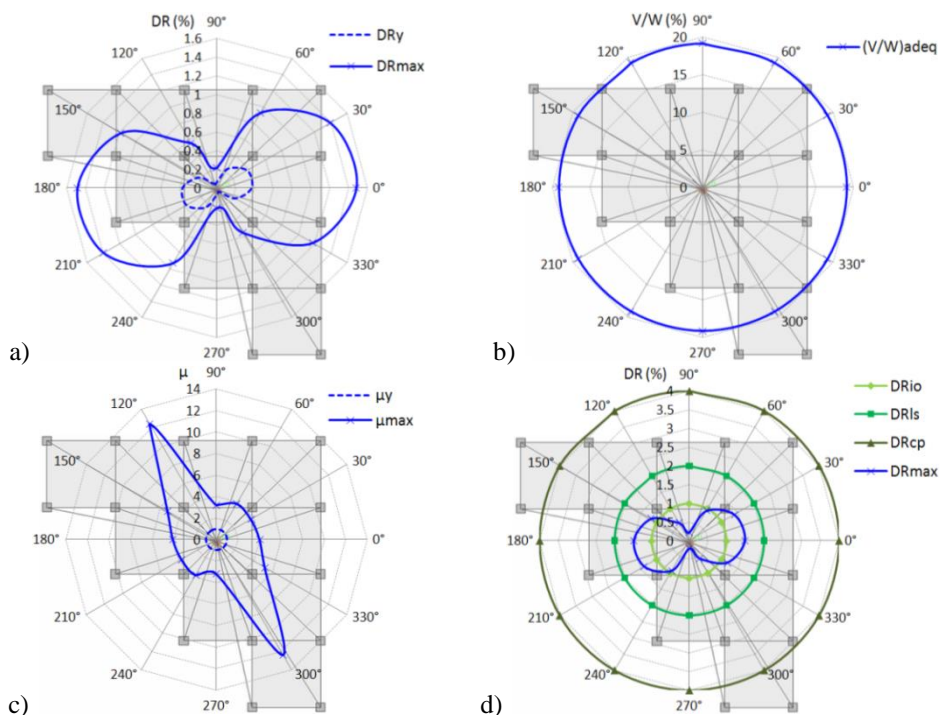
Slika 4.122 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=3.6$ ,  $M_{\mu}=12.7$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



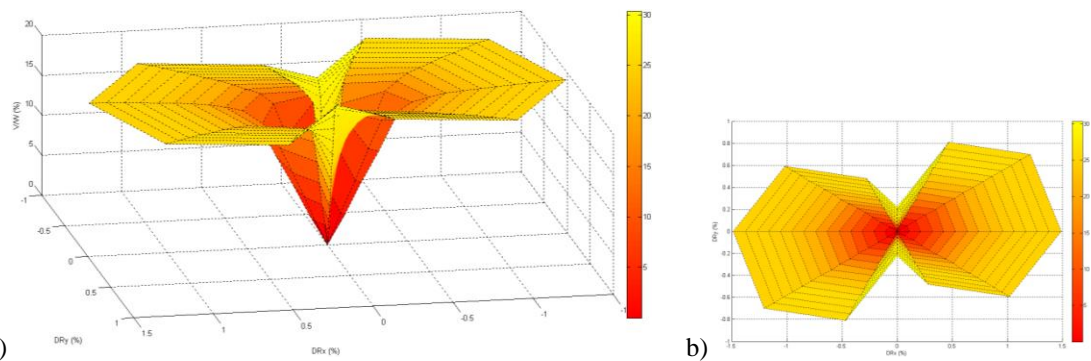
Slika 4.123 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA pushover površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan)



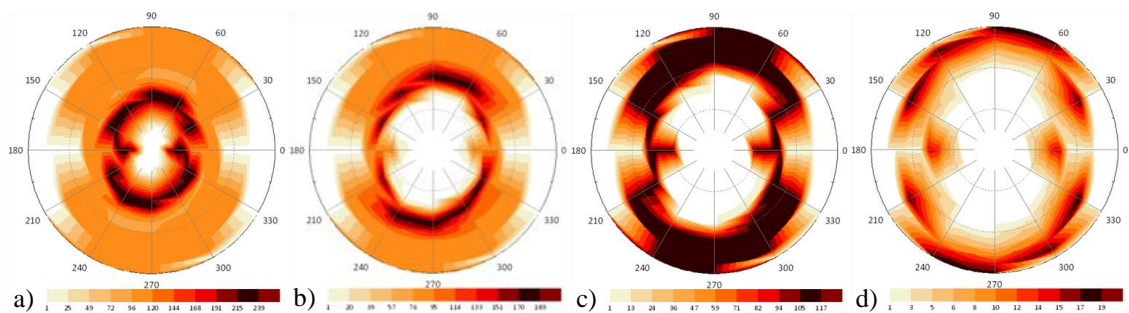
Slika 4.124 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



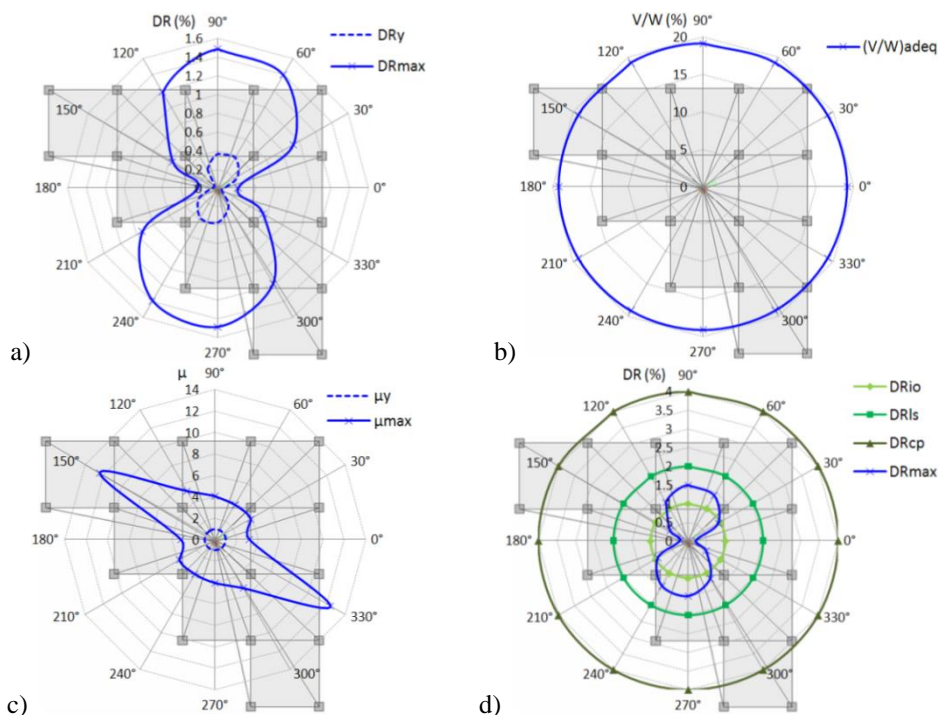
Slika 4.125 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ ,  $\mu_m=5.4$ ,  $M_\mu=17.9$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



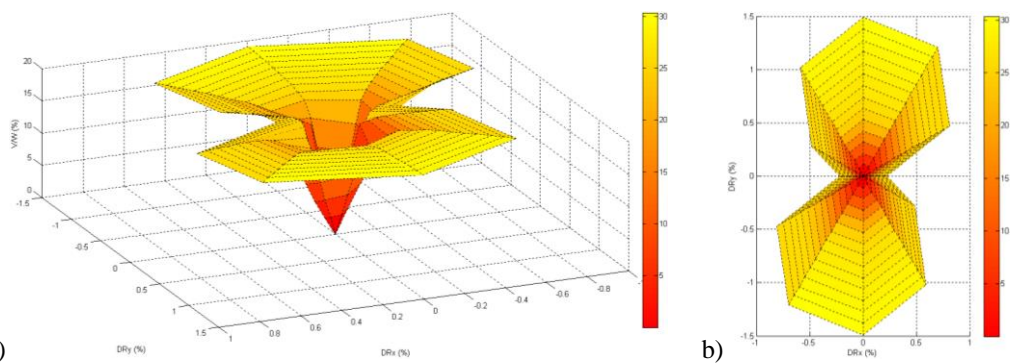
Slika 4.126 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



Slika 4.127 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x=0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D

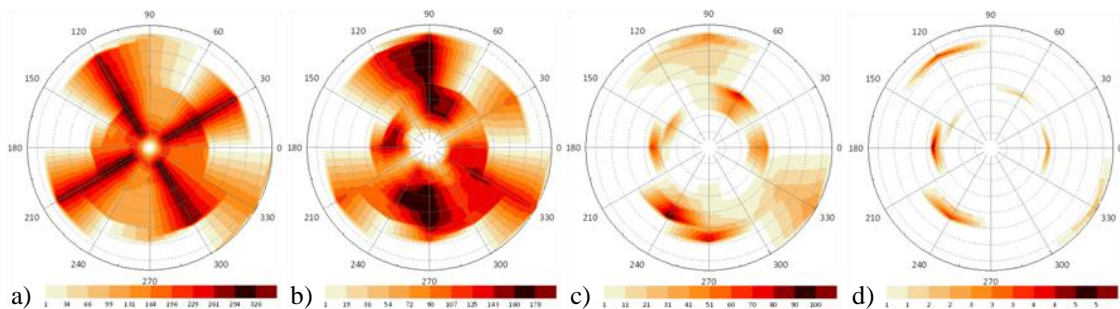


Slika 4.128 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x=0.3E_y$ ,  $\mu_m=5.4$ ,  $M_\mu=17.9$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$

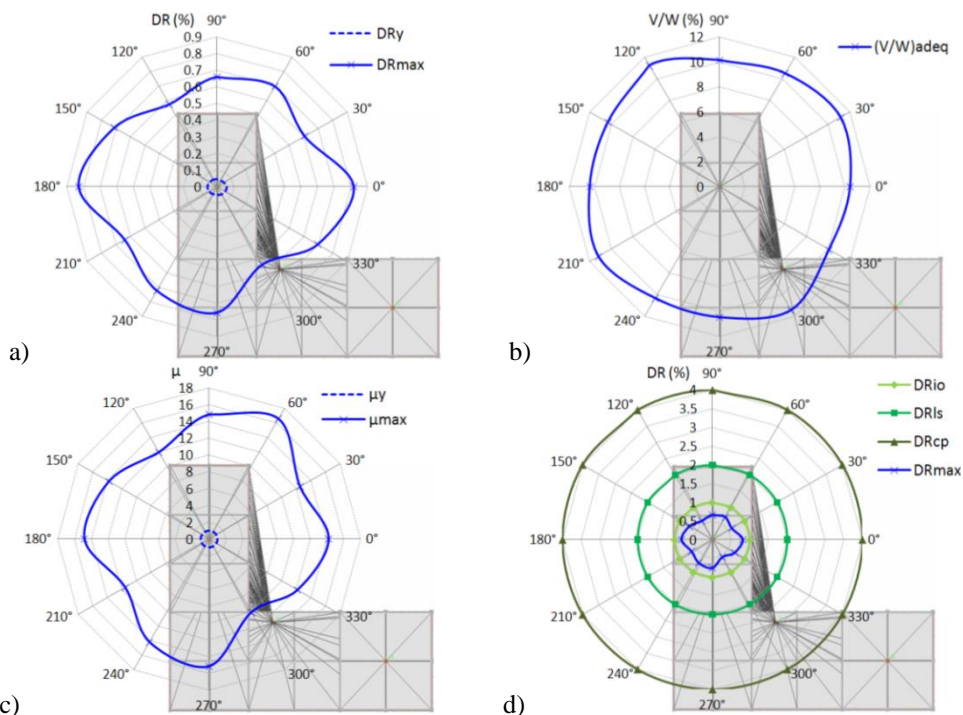


Slika 4.129 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x=0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)

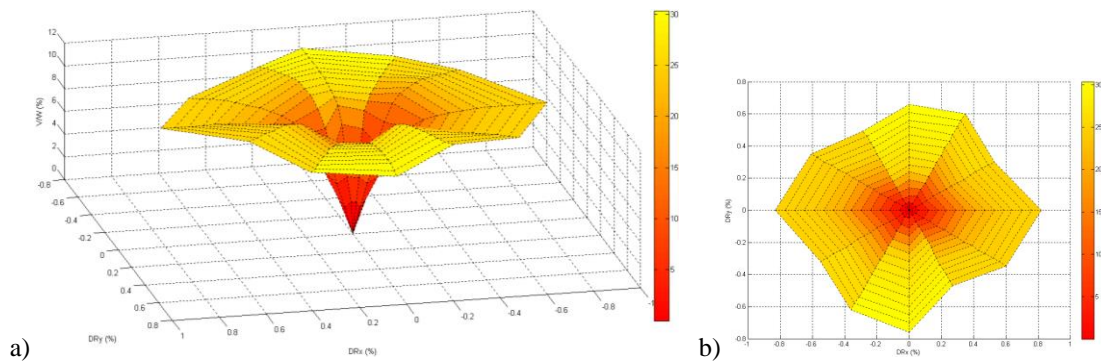




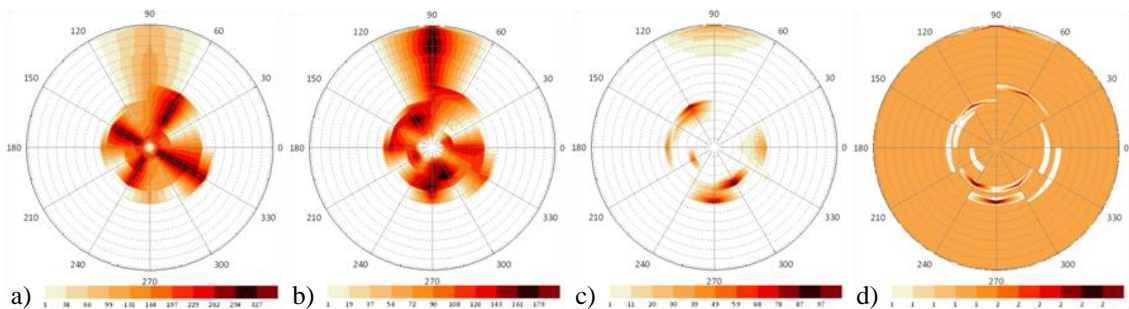
a) b) c) d)  
 Slika 4.130 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



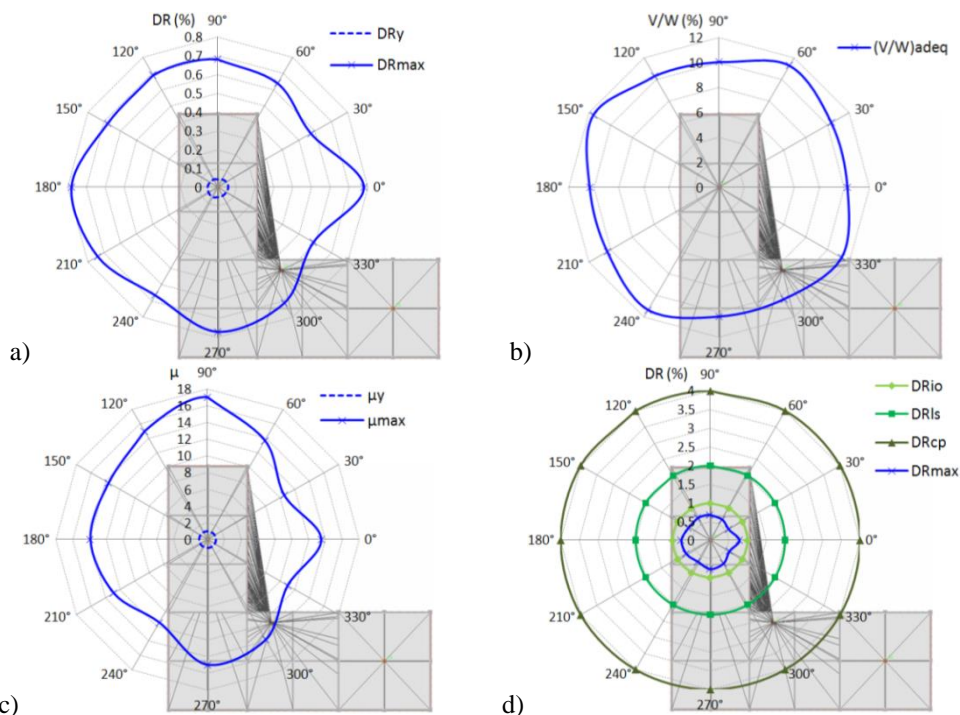
a) b) c) d)  
 Slika 4.131 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=13.5$ ,  $M_{\mu}=178.2$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



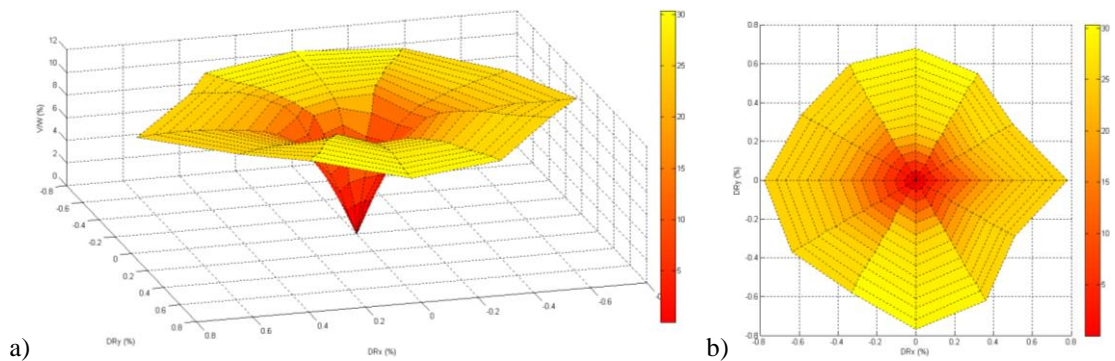
a) b)  
 Slika 4.132 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA pushover površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan)



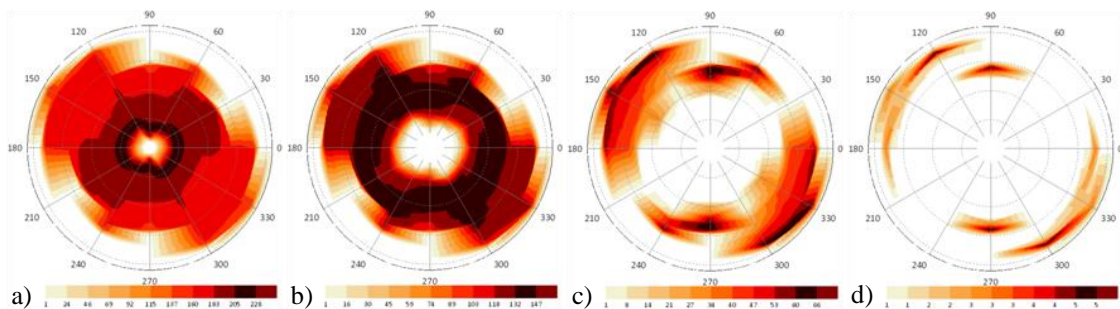
a) b) c) d)  
 Slika 4.133 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



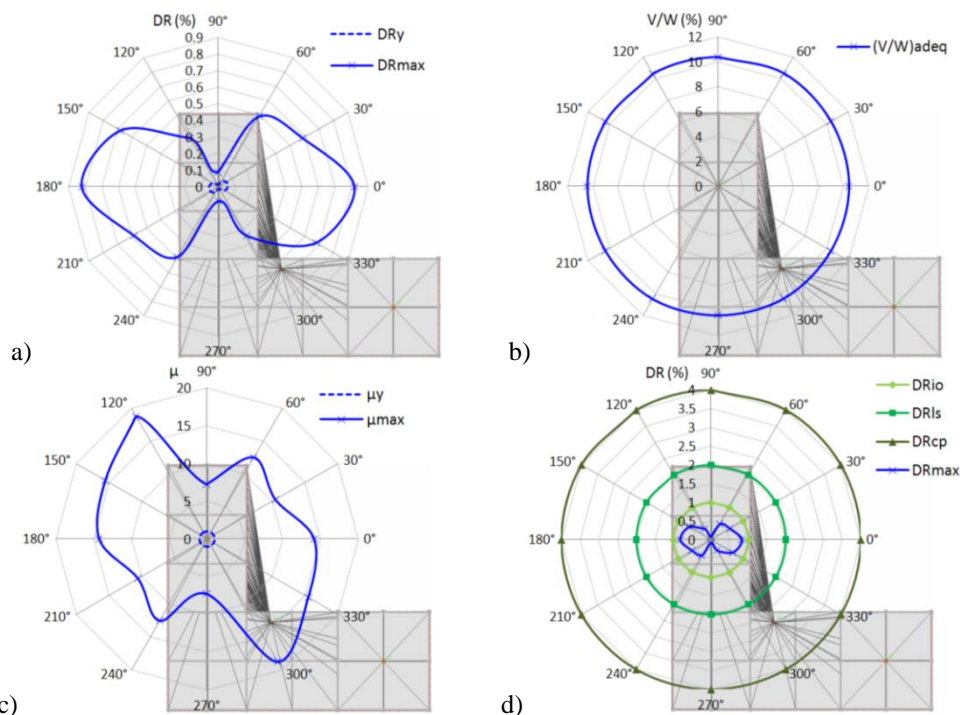
a) b) c) d)  
 Slika 4.134 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ ,  $\mu_m=13.5$ ,  $M_{\mu}=176.3$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



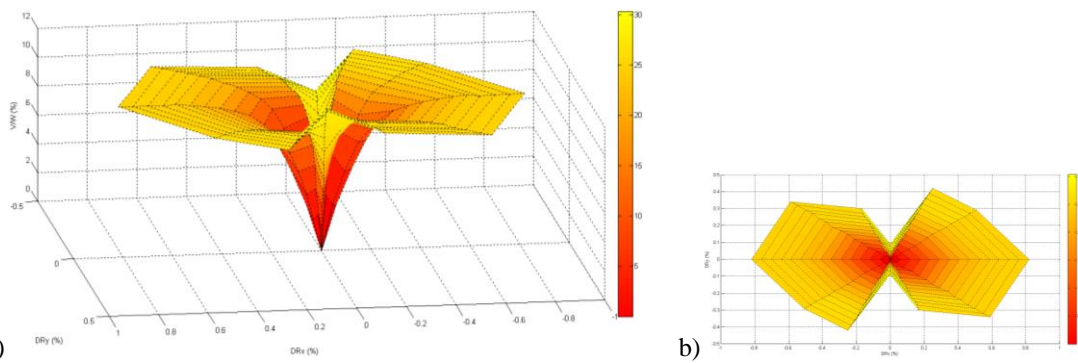
a) b)  
 Slika 4.135 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}=0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ , generisana NSPA pushover površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x$ - $DR_y$  ravan)



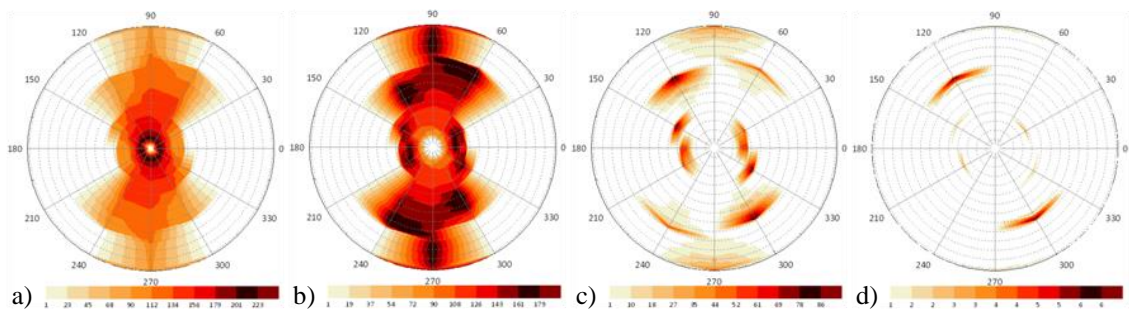
Slika 4.136 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



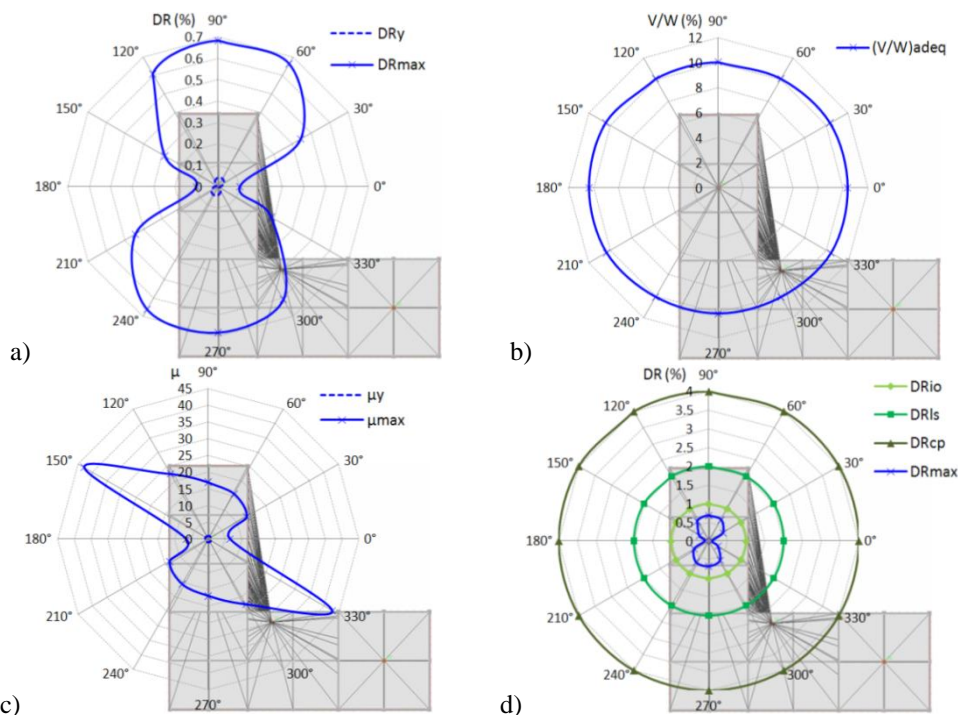
Slika 4.137 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ ,  $\mu_m=13.1$ ,  $M_\mu=172.6$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



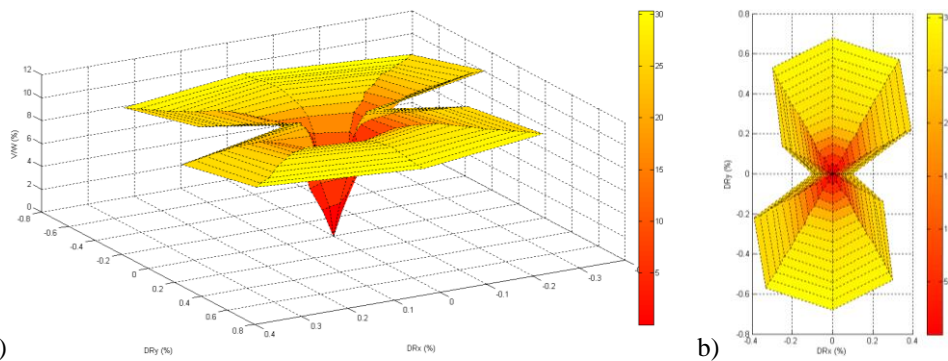
Slika 4.138 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)



Slika 4.139 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ : monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama za performanske nivoe: a) B-IO, b) IO-LS, c) LS-CP, d) C-D



Slika 4.140 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ ,  $\mu_m=19.7$ ,  $M_\mu=282.2$ : a) globalni driftovi  $DR_y$  i  $DR_{max}$ , b) relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , c) duktilnosti  $\mu_y$  i  $\mu_{max}$ , d) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$



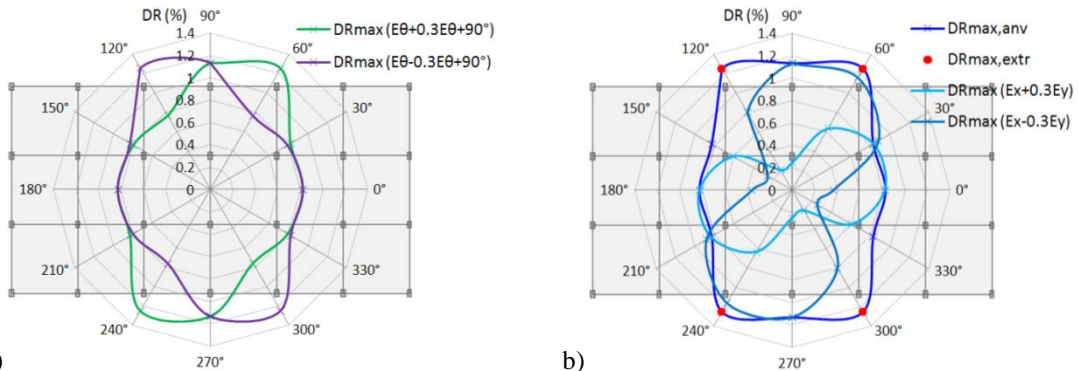
Slika 4.141 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ , generisana NSPA *pushover* površ u funkciji globalnih driftova  $DR_x$  i  $DR_y$  i relativne vrednosti ukupne smičuće sile  $V/W$ : a) izometrija, b) ortogonalna projekcija ( $DR_x-DR_y$  ravan)

Na slikama 4.142÷4.146 su prikazani maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$ , anvelope maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,avn}$  i ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$ . Za analizu maksimalnih globalnih driftova korišćena su rešenja dobijena razmatranjem  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  i  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  seizmičkih dejstava. Anvelope maksimalnih globalnih driftova su određene prema  $DR_{max,avn}=\max(DR_{max})$  za interval  $\theta=[0,360^{\circ}]$ , dok su ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$  određene izdvajajući četiri maksimalne vrednosti iz anvelope maksimalnih globalnih driftova.

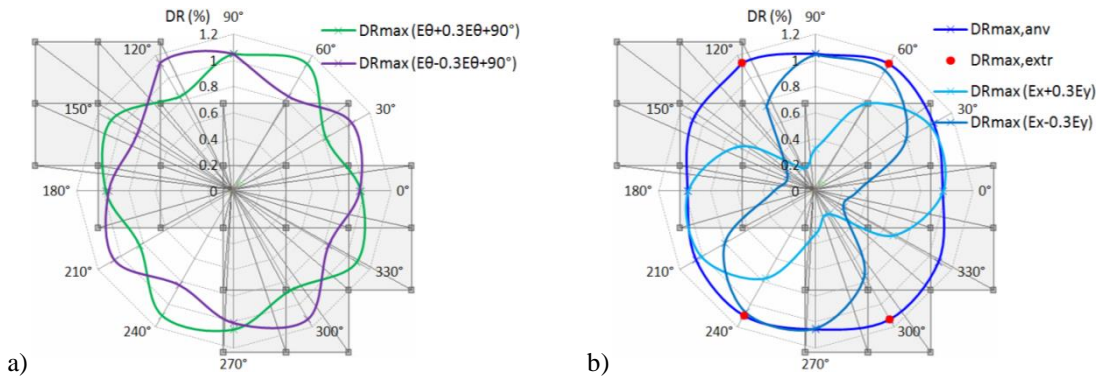
Razmatrajući realizovane anvelope maksimalnih globalnih driftova u polarnim koordinatama može se izdvojiti nekoliko bitnih karakteristika:

- Maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$ , dobijeni za  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  i  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  seizmička dejstava, treba da su manji ili jednaki anvelopi maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,avn}$ . Razlika koja se može dobiti u prezentaciji rešenja  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  i  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  u odnosu na  $E_x+0.3E_y$  i  $E_x-0.3E_y$  seizmička dejstva je posledica primenjene splajn interpolacije. Sa druge strane, određene diskretne vrednosti mogu da neznatno odstupaju, a što je posledica konvergencije rešenja nelinearne analize (veliki broj faktora utiče, kao što je broj iteracija i inkremenata, plastifikacija u zglobovima i dr.).
- Kod 4x6x3 3D modela zgrade, za bidirekciono seizmičko dejstvo, dobijene su ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$  za uglove  $\theta=(60^{\circ},120^{\circ},240^{\circ},300^{\circ})$ , dok bi se u praktičnim inženjerskim linearnim seizmičkim analizama ovakve zgrade razmatrali driftovi za uglove  $\theta=0^{\circ}$  i  $\theta=90^{\circ}$ .
- Slično prethodnoj konstataciji i kod 4x6x5-13 3D modela zgrade su, za bidirekciono seizmičko dejstvo, dobijene ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$  za uglove  $\theta=(60^{\circ},120^{\circ},240^{\circ},300^{\circ})$ . U ovom slučaju zgrada je i asimetrična u osnovi i torziono osetljiva.
- Kod 15x4x4 3D modela zgrade, za bidirekciono seizmičko dejstvo, dobijene su ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$  za uglove  $\theta=(0^{\circ},90^{\circ},180^{\circ},270^{\circ})$ , a što se i moglo očekivati s obzirom da je zgrada polisimetrična u osnovi, regularna po visini i torziono neosetljiva.
- Slično prethodnoj konstataciji i kod 15x4x4-6 3D modela zgrade su, za bidirekciono seizmičko dejstvo, dobijene ekstremne vrednosti maksimalnih

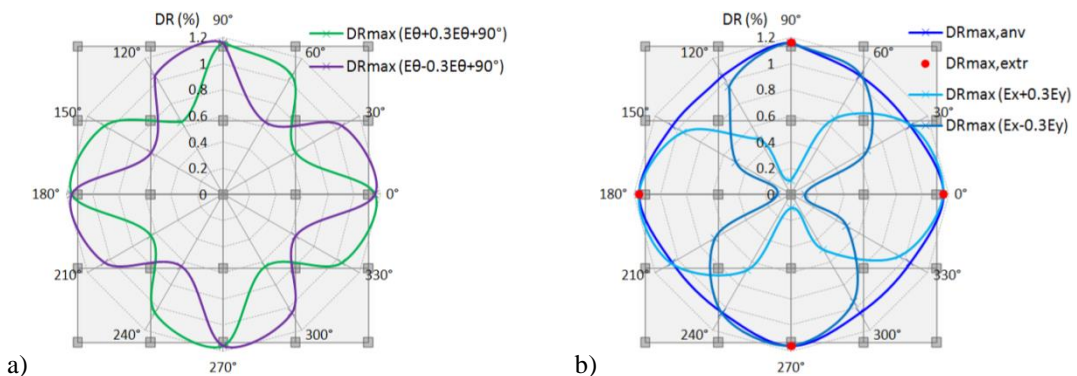
globalnih driftova  $DR_{max,extr}$  za uglove  $\theta=(0^\circ,90^\circ,180^\circ,270^\circ)$ . U ovom slučaju zgrada je i monosimetrična u osnovi i torziono osetljiva.



a) maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}$  i  $E_\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}$ ,  
 b) anvelopa maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,anv}$ , ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$ , maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_x+0.3E_y$  i  $E_x-0.3E_y$



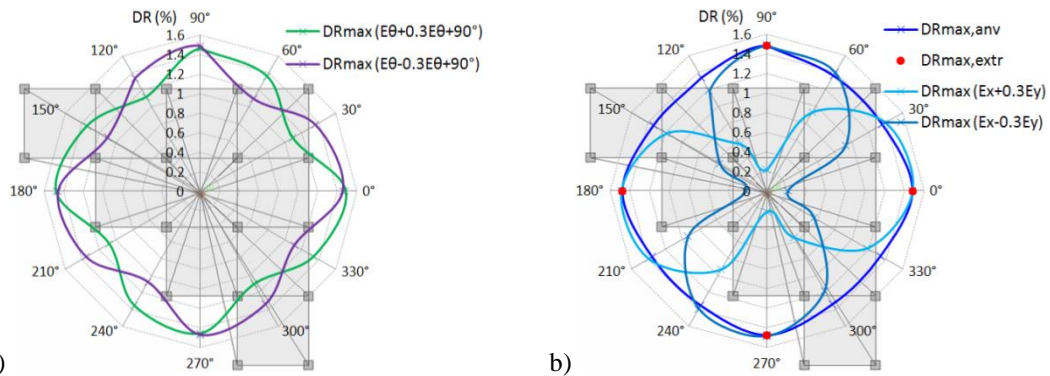
a) maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}$  i  $E_\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}$ , b) anvelopa maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,anv}$ , ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$ , maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_x+0.3E_y$  i  $E_x-0.3E_y$



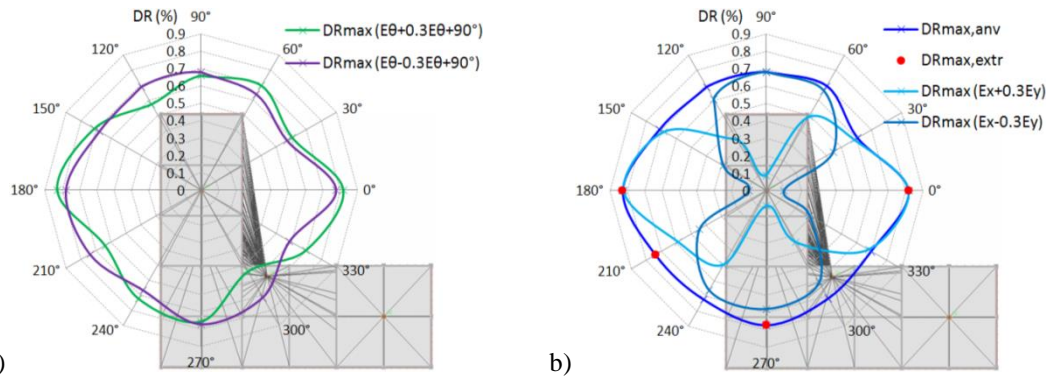
a) maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}$  i  $E_\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}$ , b) anvelopa maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,anv}$ , ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$ , maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_x+0.3E_y$  i  $E_x-0.3E_y$

- Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade, za bidirekciono seizmičko dejstvo, dobijene su ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$  za uglove  $\theta=(0^\circ,180^\circ,210^\circ,270^\circ)$ , pri čemu je zgrada asimetrična u osnovi, neregularna po visini i torziono osetljiva. U ovom slučaju je kod provere globalnih driftova potrebno uzeti u obzir ne samo uobičajene pravce (X i Y), već i ugao  $\theta=210^\circ$ .

Potrebno je napomenuti da su globalni driftovi i anvelope maksimalnih globalnih driftova dobijeni za pomeranja centra mase pri bidirekcionom seizmičkom dejstvu.



a) Slika 4.145 15x4x4-6 3D model zgrade: a) maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^\circ}$  i  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^\circ}$ , b) anvelopa maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,anv}$ , ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$ , maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_x+0.3E_y$  i  $E_x-0.3E_y$



a) Slika 4.146 9x6x5-12 3D model zgrade: a) maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^\circ}$  i  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^\circ}$ , b) anvelopa maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,anv}$ , ekstremne vrednosti maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max,extr}$ , maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  za  $E_x+0.3E_y$  i  $E_x-0.3E_y$

#### 4.7.2. IDA PUSHOVER POVRŠI 3D MODELA ZGRADA

Na osnovu rezultata (*pushover krivih*) dobijenih procesiranjem NSPA analiza sprovedena su procesiranja IDA analiza primenom softvera SPO2IDA. Na slikama 4.147÷4.166 su prikazane krive i površi dobijene IDA analizama 3D modela zgrada. Razmatrane su IDA *pushover* krive za 16%, 50% i 84% fraktilne vrednosti. U prvoj

grupi su, u polarnom koordinatnom sistemu, prikazane krive duktilnosti na granici tečenja  $\mu_y$ , duktilnosti za kolapsno stanje  $\mu_{coll}$ , ekstremne vrednosti duktilnosti  $\mu_{extr}$ , relativne vrednosti spektralnog ubrzanja  $S_d/S_{a,y}$  i odgovarajuće 16%, 50% i 84% fraktilne vrednosti. Duktilnost za kolapsno stanje  $\mu_{coll}$  je ekvivalentna maksimalno realizovanoj duktilnosti  $\mu_{max}$  kod NSPA analize. U drugoj grupi su, u prostornom koordinatnom sistemu, prikazane generisane IDA *pushover* površi za 50% fraktilne vrednosti u funkciji duktilnosti  $\mu_x$  i  $\mu_y$  i relativnog spektralnog ubrzanja  $S_d/S_{a,y}$ .

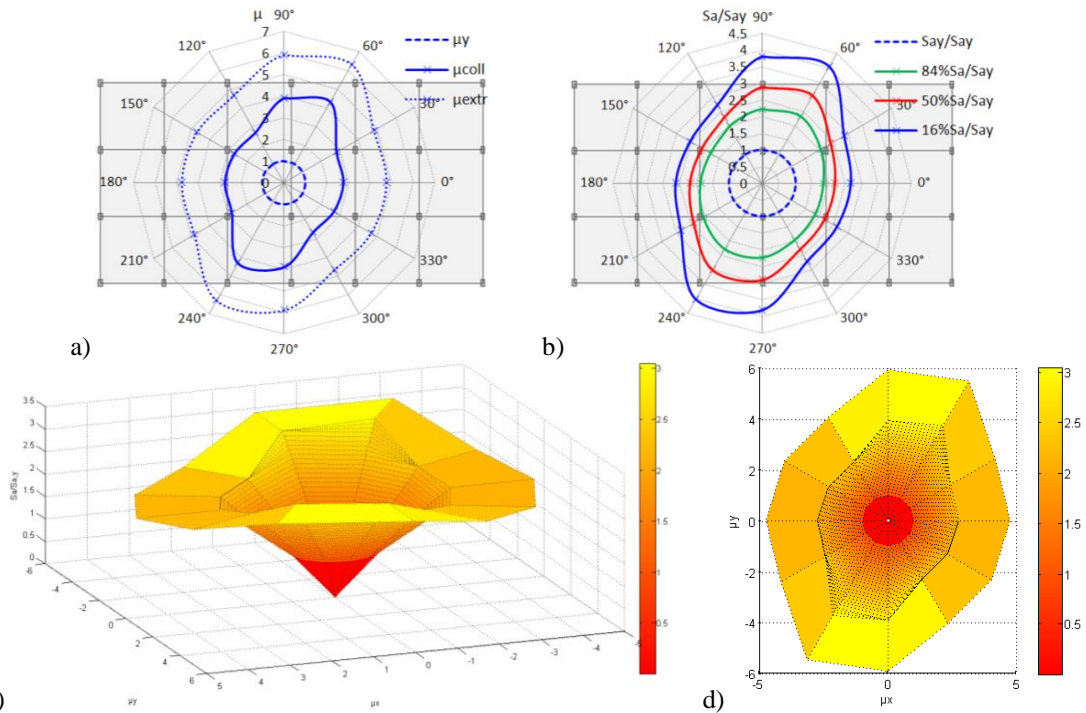
Razmatrajući realizovane krive duktilnosti i relativnog spektralnog ubrzanja u polarnim koordinatama i IDA *pushover* površi u prostornim koordinatama može se izdvojiti nekoliko bitnih karakteristika:

- Krive relativnog spektralnog ubrzanja  $S_d/S_{a,y}$  su gotovo geometrijski identične krivama duktilnosti  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$  za  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  i  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  seizmička dejstava kod velikog broja razmatranih modela zgrada. Na mestima (po uglovima) gde su realizovane veće vrednosti duktilnosti realizovane su i veće relativne vrednosti spektralnog ubrzanja  $S_d/S_{a,y}$ .
- U odnosu na krive relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  određene NSPA analizama koje su kružnog ili približno kružnog oblika, krive relativnog spektralnog ubrzanja  $S_d/S_{a,y}$  određene IDA analizama su elipsoidnog oblika ili složenije forme.
- Za sve razmatrane slučajeve seizmičkog dejstva i 3D modele zgrada određene su srednje vrednosti relativnog spektralnog ubrzanja  $S_d/S_{a,y}$  (tabela 4.8). Najviše vrednosti su dobijene za 9x6x5-12 3D model zgrade projektovan prema SRP propisima, dok su nešto niže vrednosti dobijene za 15x4x4 3D model zgrade projektovan prema EC propisima.

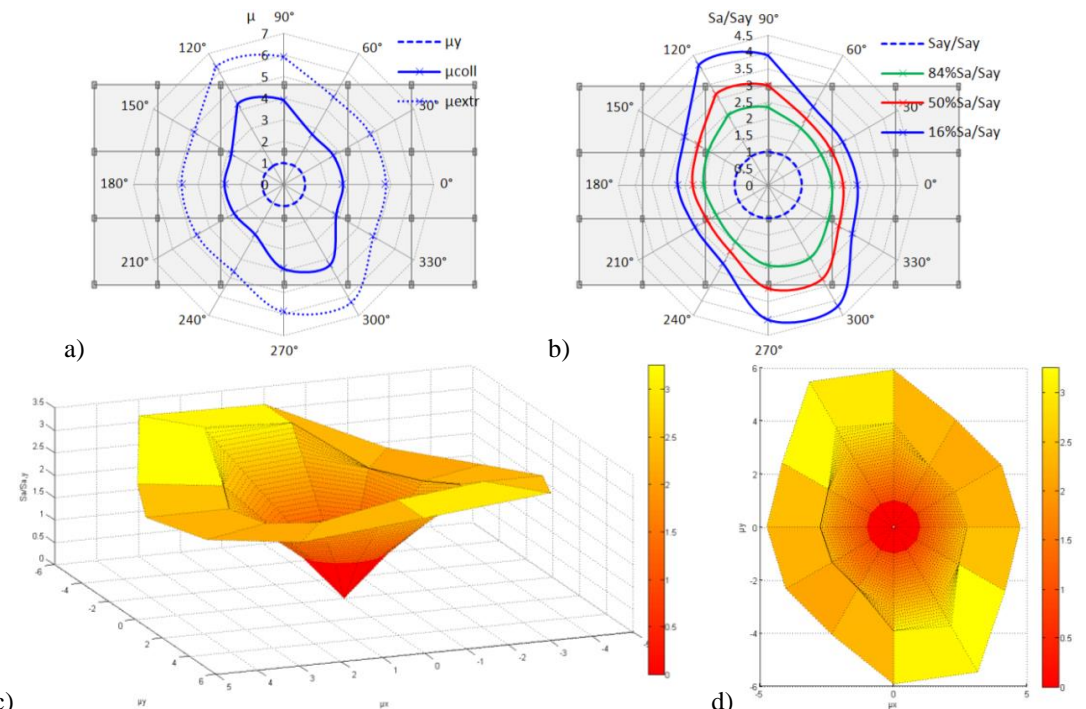
Tabela 4.8 Srednje vrednosti relativnog spektralnog ubrzanja  $S_d/S_{a,y}$  za razmatrane 3D modele zgrada

model	$E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$			$E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$			$E_x+0.3E_y$			$E_x-0.3E_y$		
	84% $S_d/S_{a,y}$	50% $S_d/S_{a,y}$	14% $S_d/S_{a,y}$	84% $S_d/S_{a,y}$	50% $S_d/S_{a,y}$	14% $S_d/S_{a,y}$	84% $S_d/S_{a,y}$	50% $S_d/S_{a,y}$	14% $S_d/S_{a,y}$	84% $S_d/S_{a,y}$	50% $S_d/S_{a,y}$	14% $S_d/S_{a,y}$
4x6x3	2.04	2.49	3.10	2.11	2.57	3.17	1.92	2.28	2.75	2.29	2.96	3.89
4x6x5-13	1.98	2.39	2.91	1.99	2.38	2.90	1.86	2.23	2.72	1.97	2.40	2.97
15x4x4	2.95	4.05	5.76	2.93	4.04	5.77	3.56	5.21	7.94	3.46	4.94	7.28
15x4x4-6	2.27	2.92	3.99	2.27	2.91	3.99	2.54	3.42	4.87	2.55	3.43	4.86
9x6x5-12	3.23	4.37	6.11	3.05	4.10	5.69	3.78	5.06	6.99	3.57	5.02	7.29

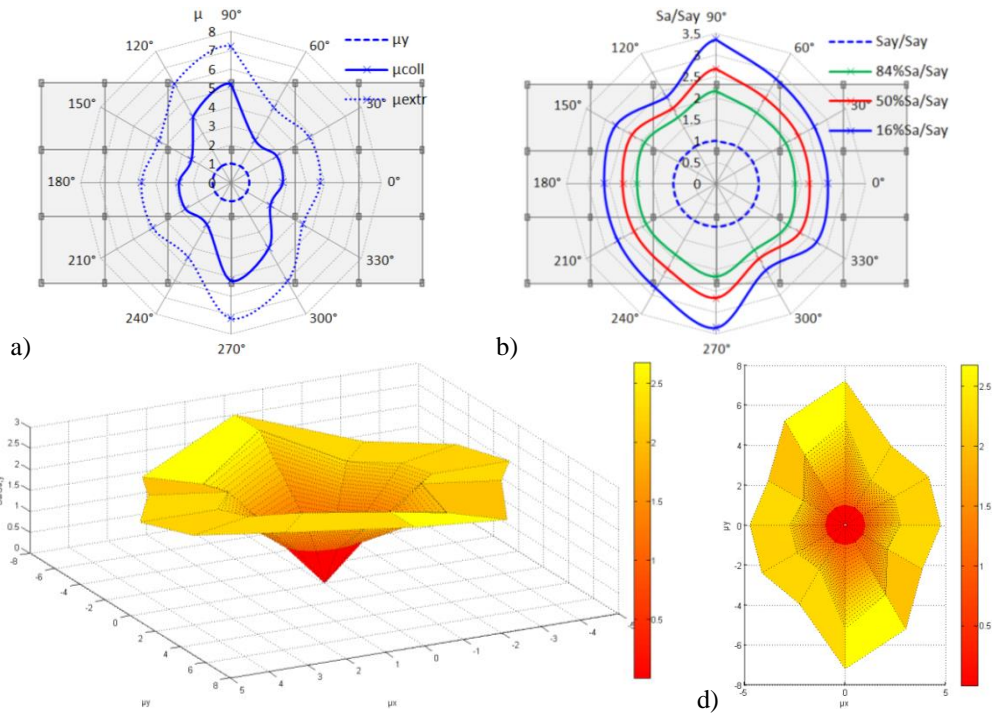




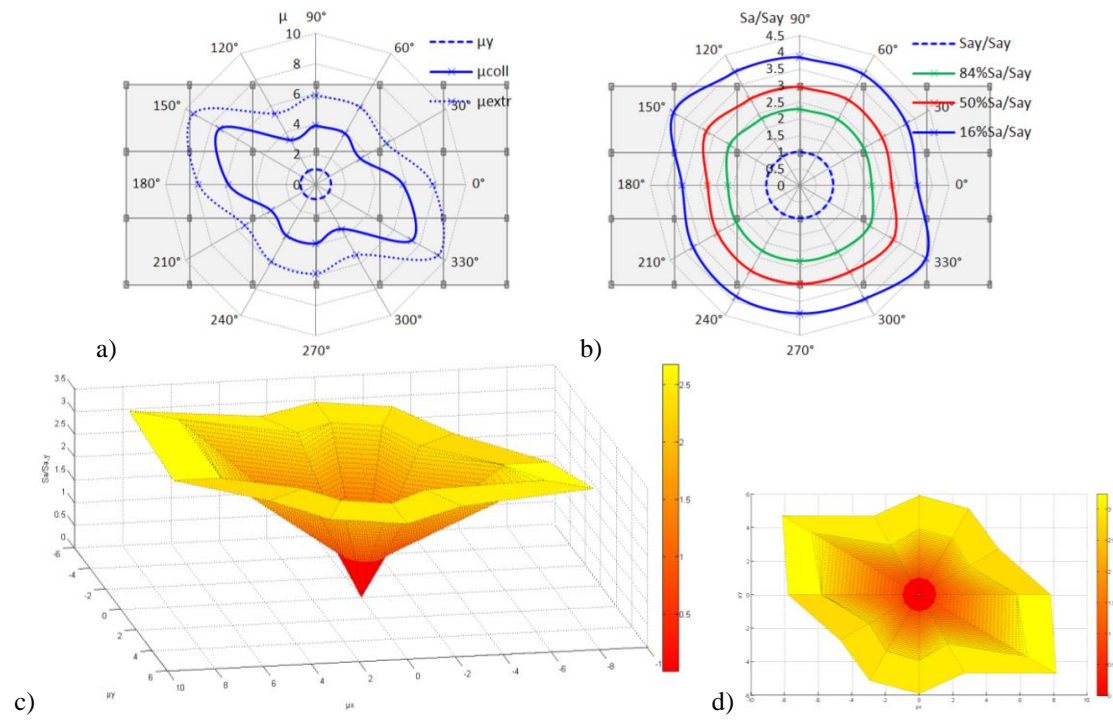
c) Slika 4.147 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90}$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)



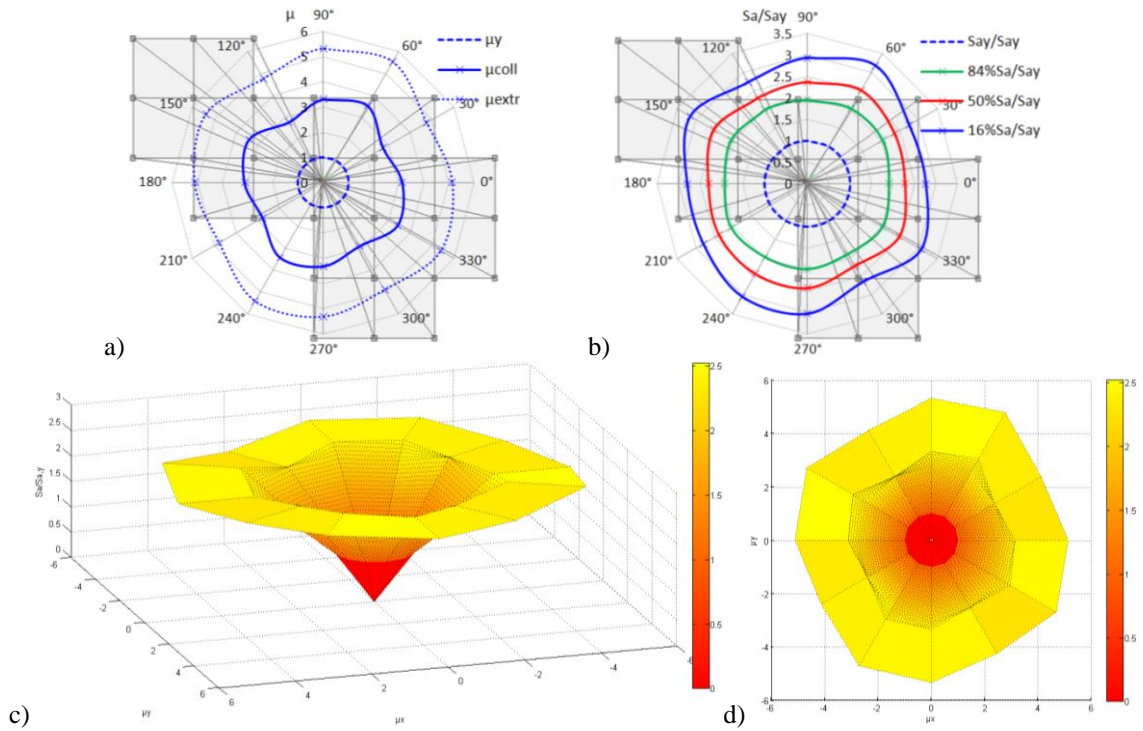
c) Slika 4.148 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90}$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)



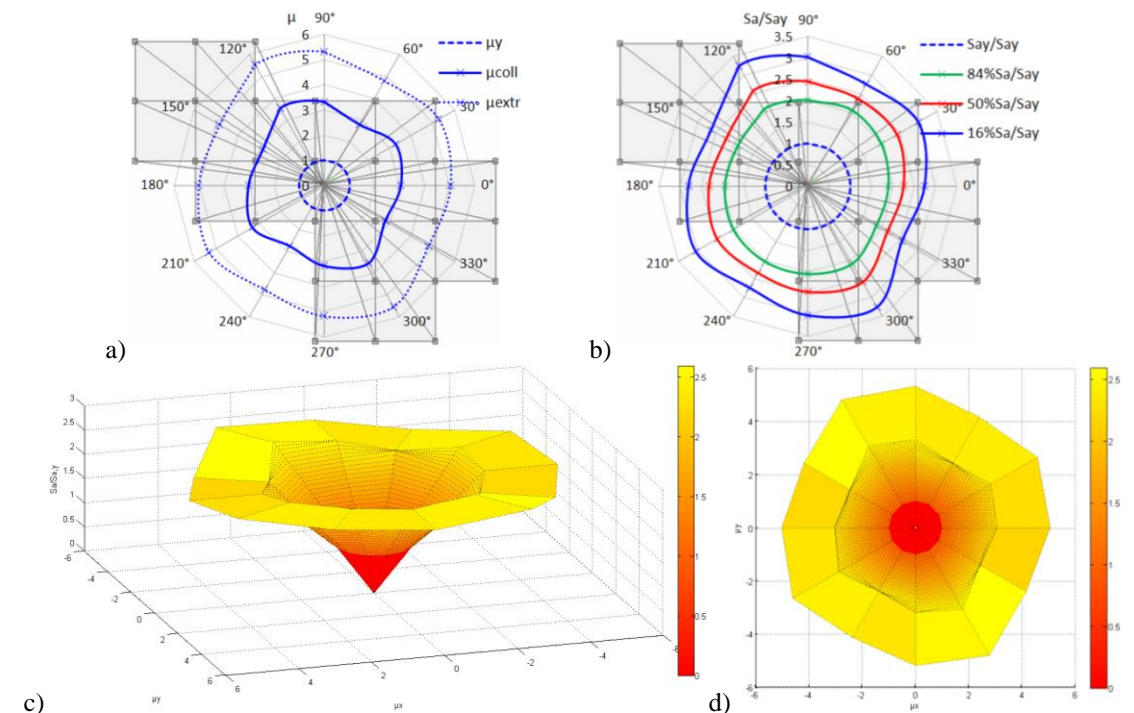
Slika 4.149 4x6x3 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x-\mu_y$  ravan)



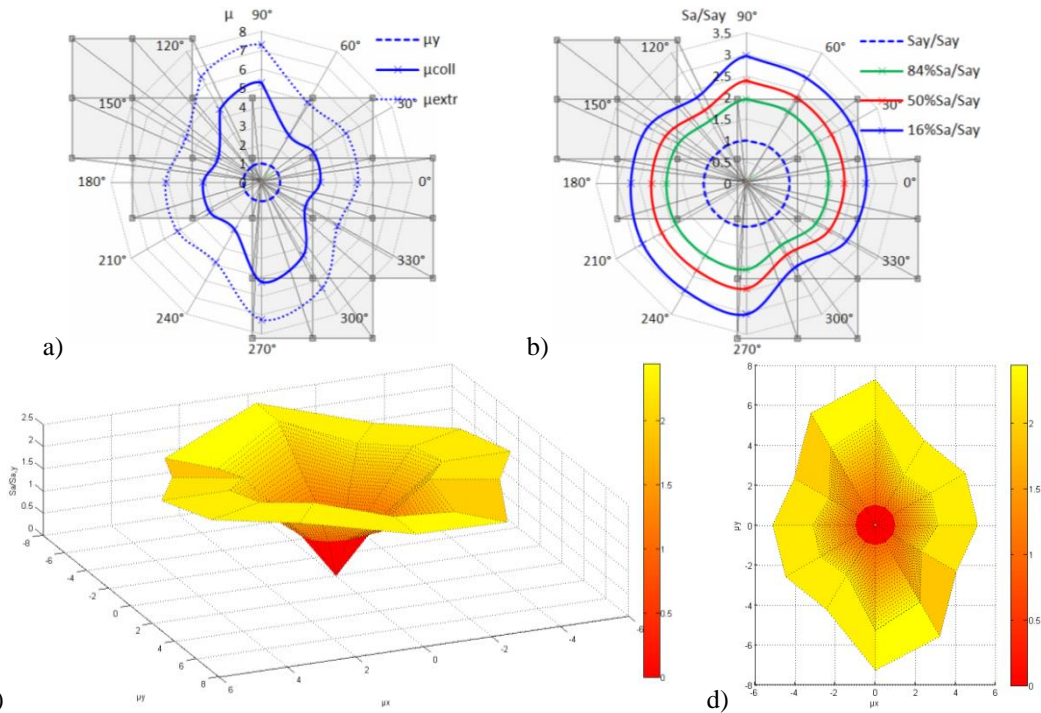
Slika 4.150 4x6x3 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x-\mu_y$  ravan)



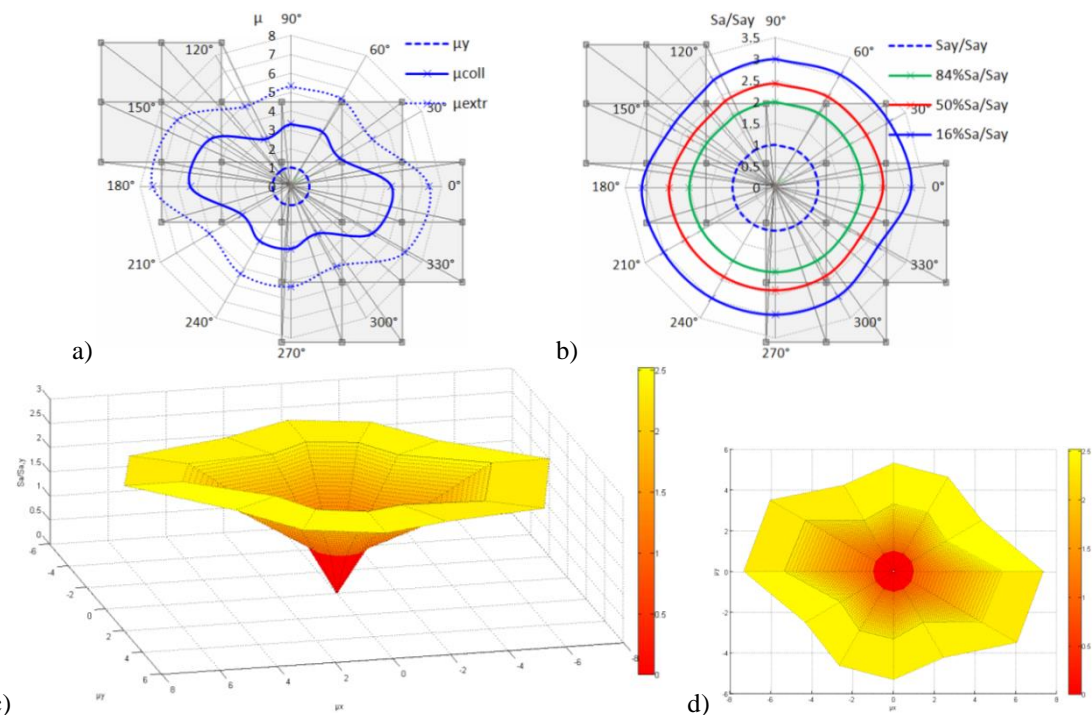
c) Slika 4.151 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)



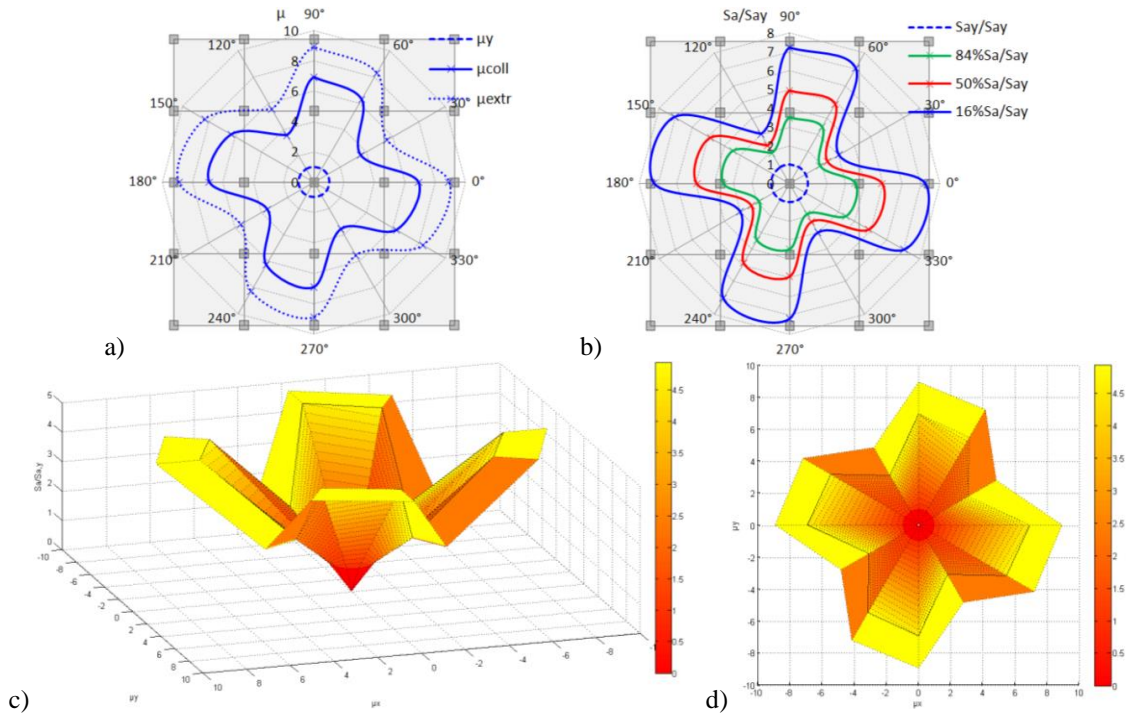
c) Slika 4.152 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}-0.3E_{\theta+90^{\circ}}$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)



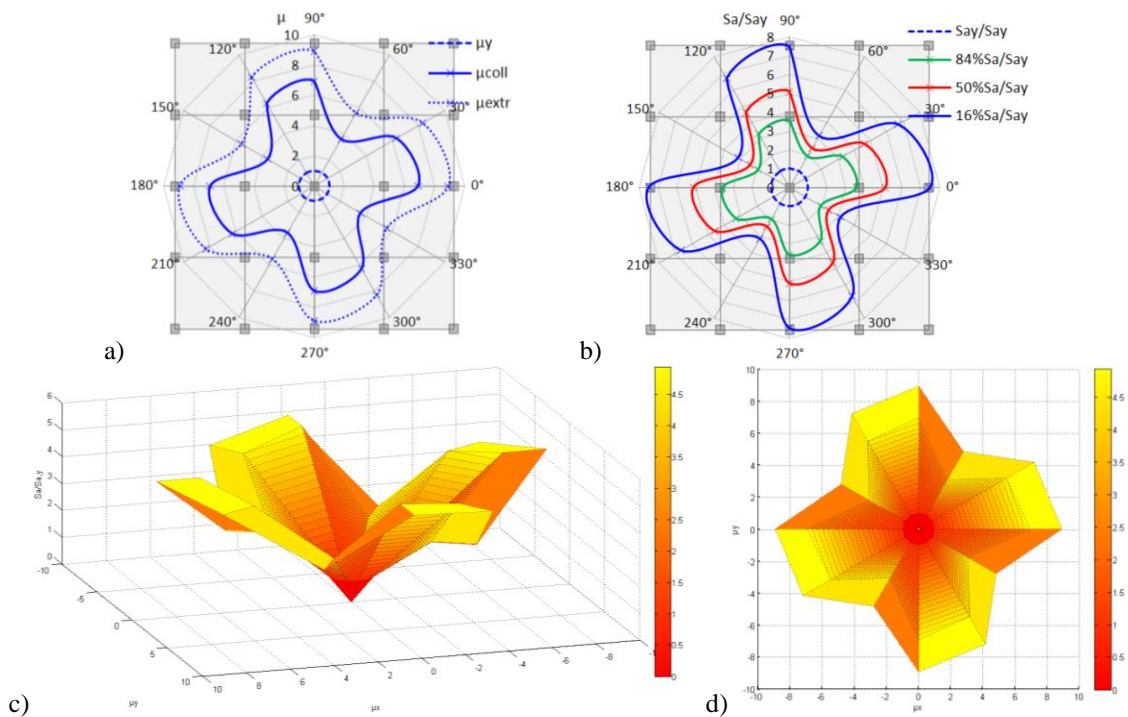
c) Slika 4.153 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x-\mu_y$  ravan)



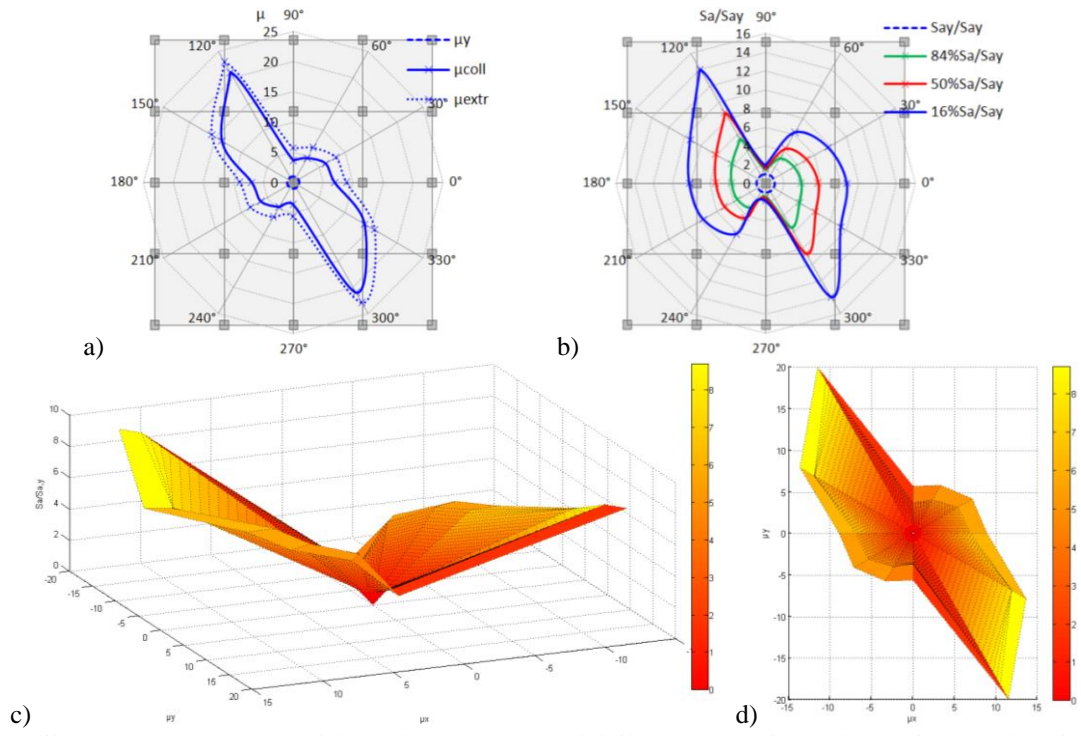
c) Slika 4.154 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x-\mu_y$  ravan)



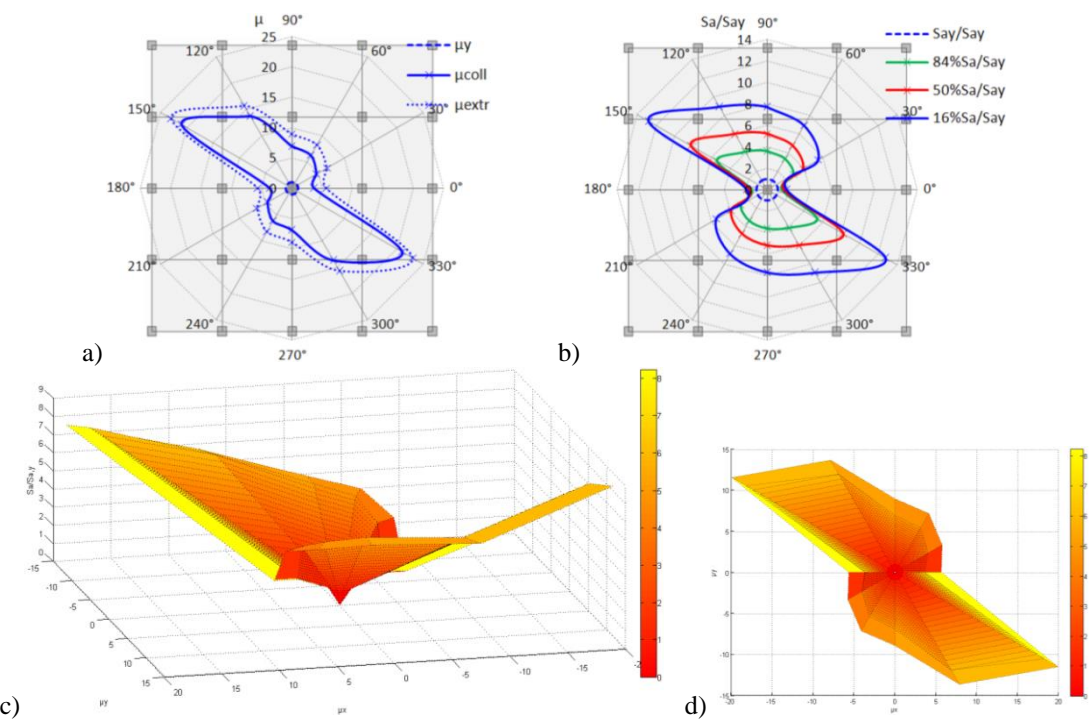
c) Slika 4.155 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}}$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)



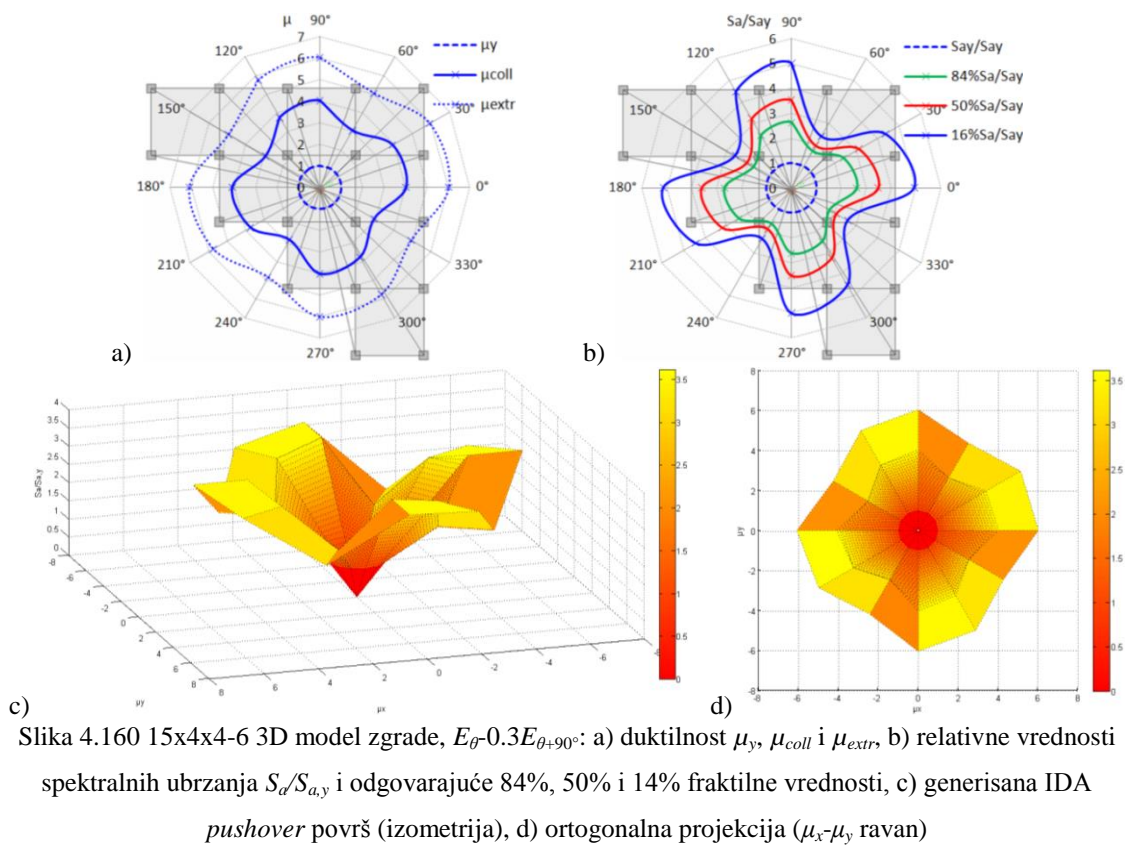
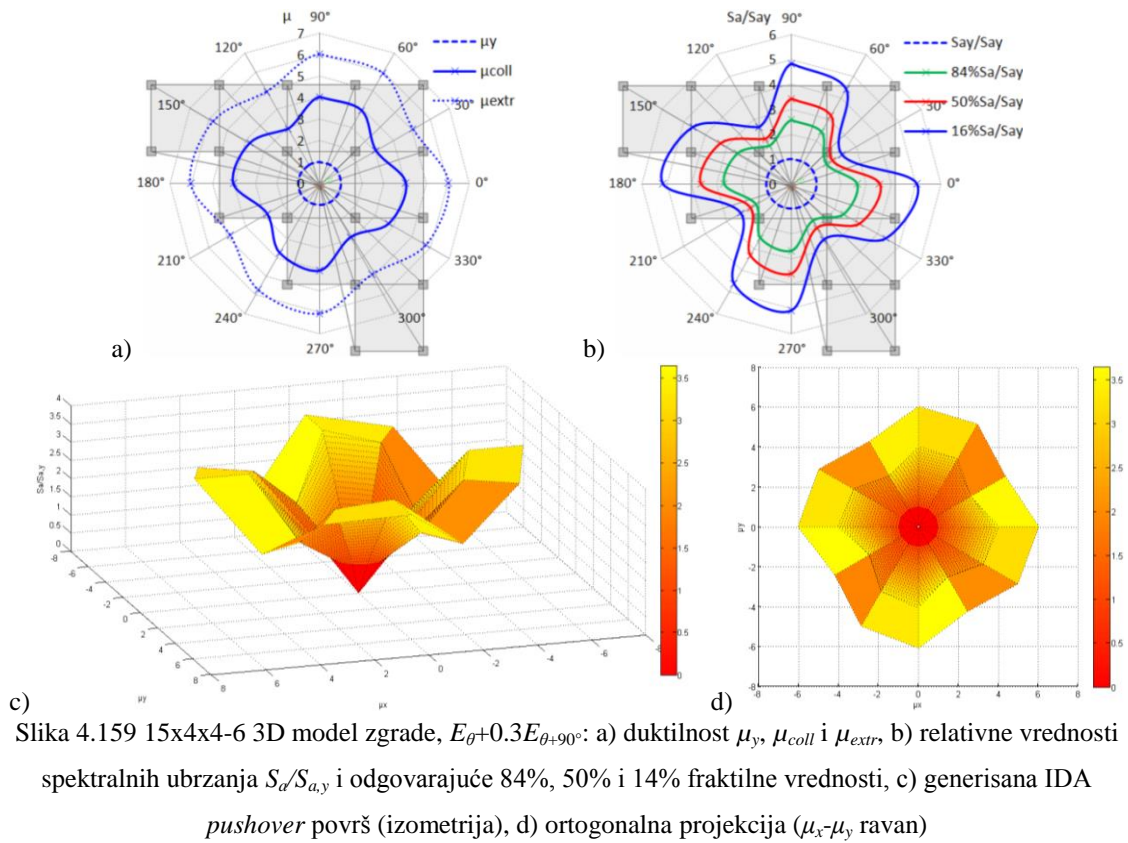
c) Slika 4.156 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}}$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)

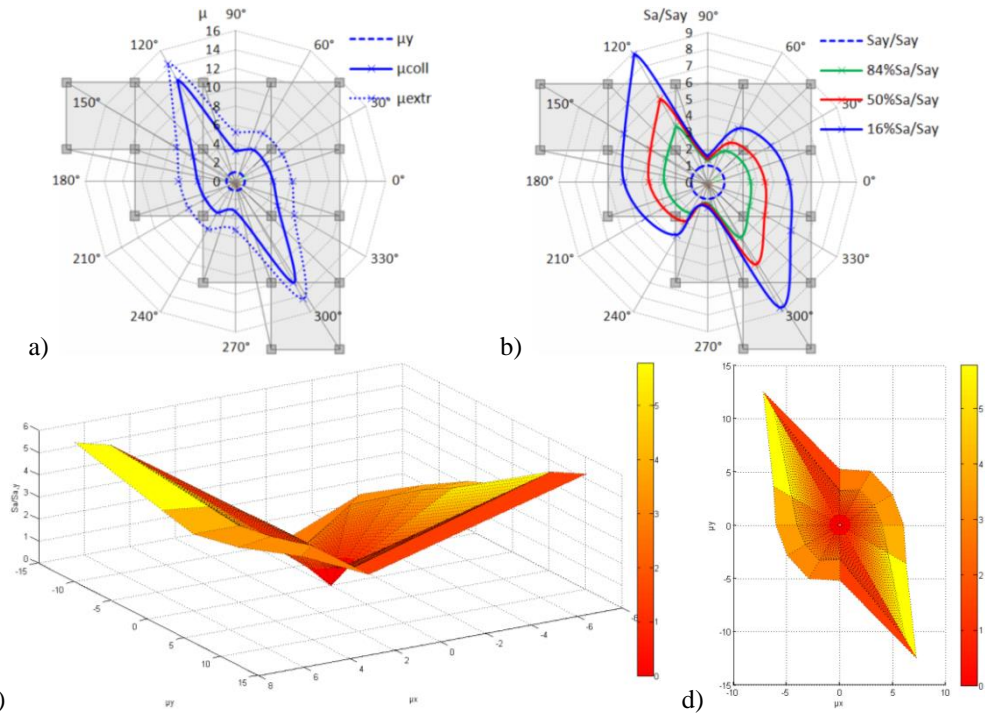


c) Slika 4.157 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)

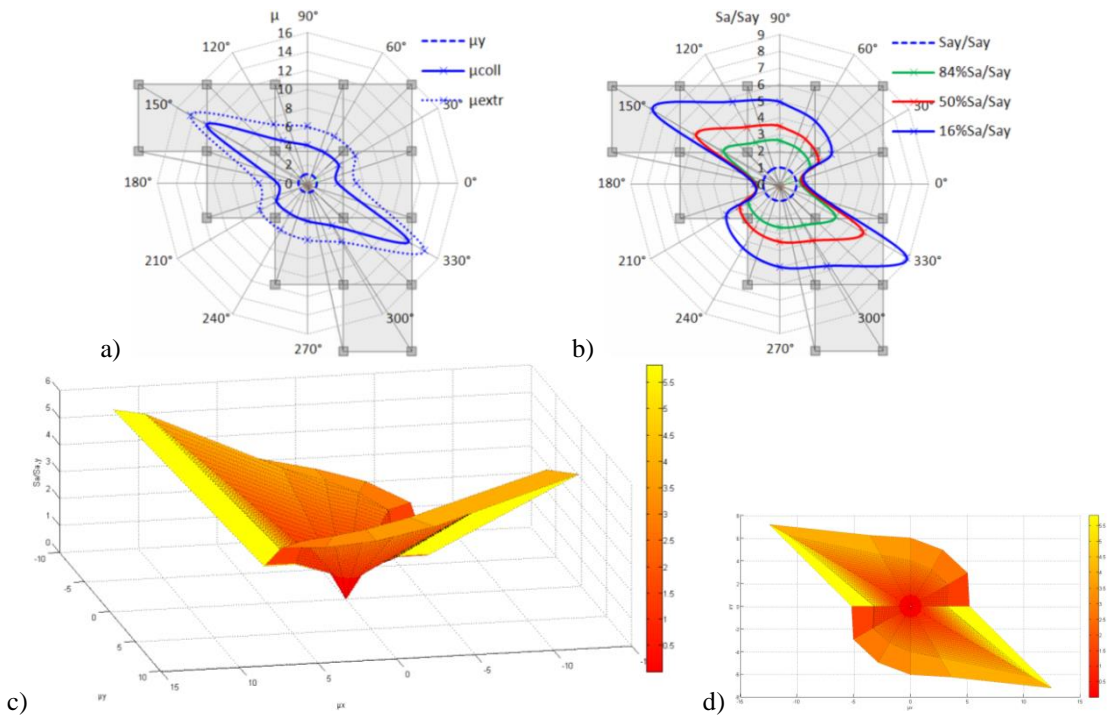


c) Slika 4.158 15x4x4 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x$ - $\mu_y$  ravan)



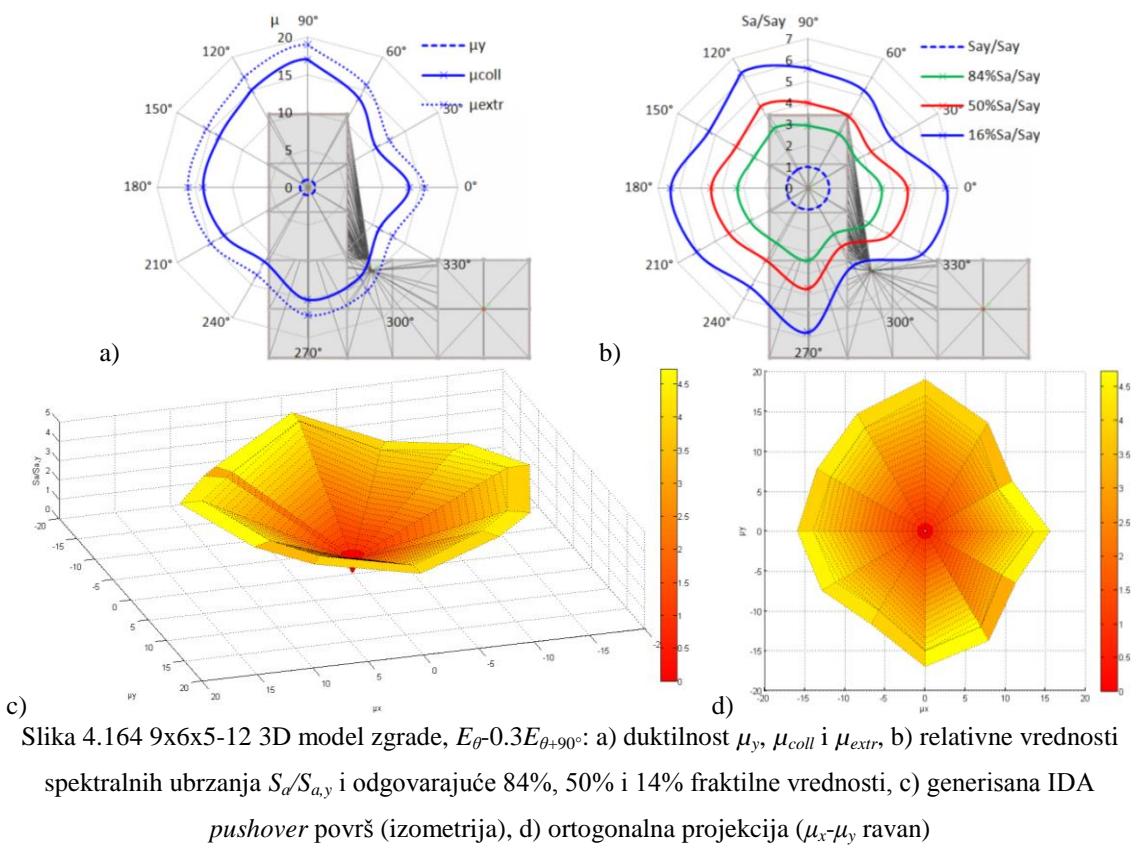
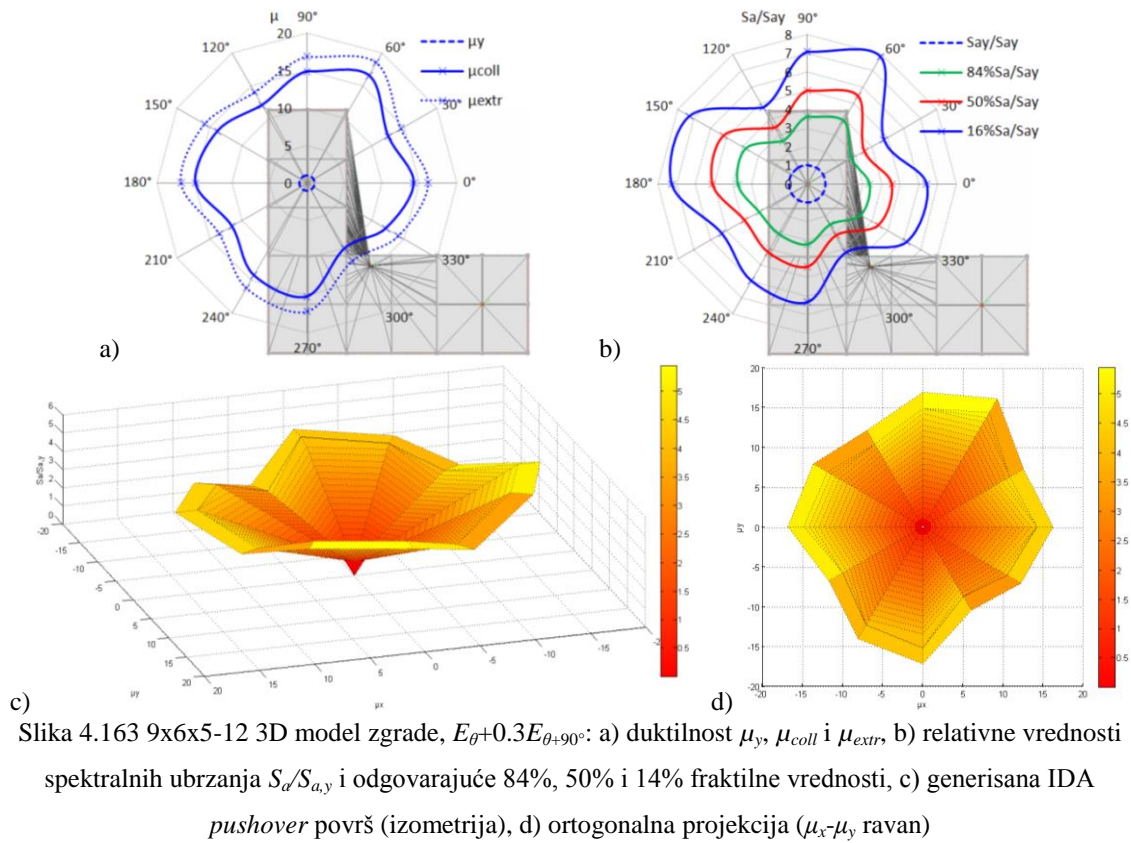


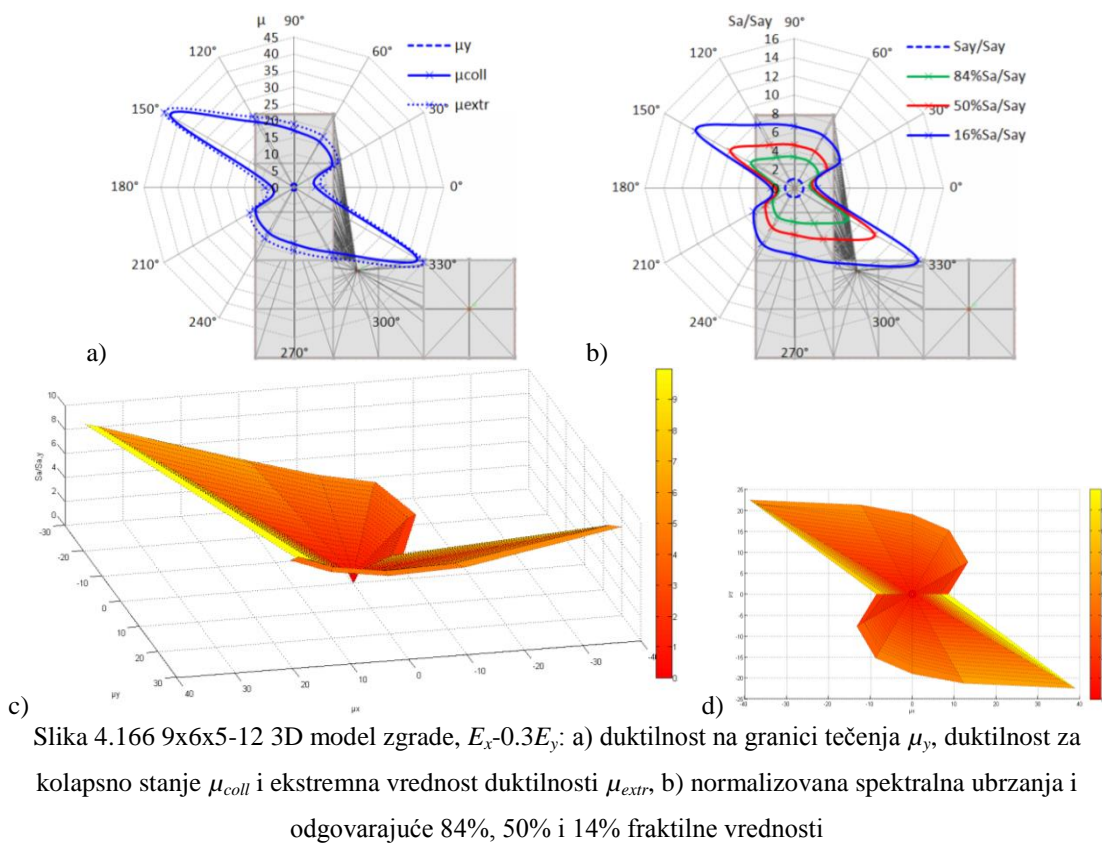
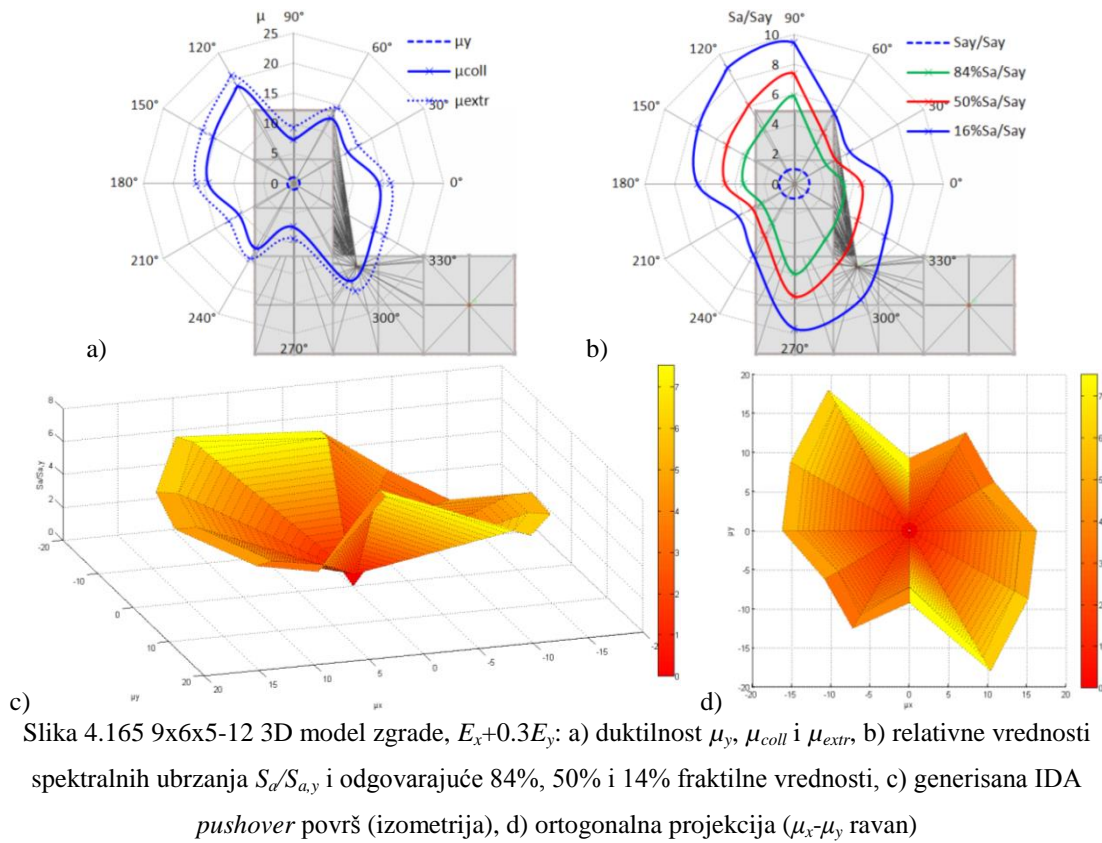
c) Slika 4.161 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x+0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x-\mu_y$  ravan)



c) Slika 4.162 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_x-0.3E_y$ : a) duktilnost  $\mu_y$ ,  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$ , b) relativne vrednosti spektralnih ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  i odgovarajuće 84%, 50% i 14% fraktilne vrednosti, c) generisana IDA pushover površ (izometrija), d) ortogonalna projekcija ( $\mu_x-\mu_y$  ravan)







# 5

## **5. ANALIZA ODNOSA KAPACITET KONSTRUKCIJE/SEIZMIČKI ZAHTEV**

### **5.1. UVODNE NAPOMENE**

U prethodnom poglavlju postavljena je teorijska formulacija i izvršeno obimno numeričko istraživanje na 3D modelima okvirnih zgrada izloženih dejstvu zemljotresa. Odgovor zgrade (BR - *building response*) je razmatran u linearanom L, nelinearanom N i kolapsnom domenu C. Ovakva prezentacija odgovora zgrade predstavlja spektar mogućeg ponašanja, od linearnog odgovora za nizak nivo *PGA*, preko nelinearnog odgovora za značajan nivo *PGA*, pa sve do kolapsnog stanja pri veoma visokom nivou *PGA*. Egzistencija sva tri L, N i C domena se postavlja bazni, potreban i dovoljan uslov. Sa duge strane, pred konstrukciju se postavlja seizmički zahtev (SD - *seismic demand*) kao nivo seizmičkog hazarda koji ona treba da ispuni prema seizmičkim propisima. Razmatranje odnosa BR/SD u ovom poglavlju je sprovedeno prema determinističkom pristupu.

### **5.2. ODNOS REALIZOVANI/ZAHTEVANI KAPACITET OKVIRNIH ZGRADA**

U odnosu na linearnu statičku analizu (LSA - *Linear Static Analysis*), linearnu dinamičku analizu (LDA - *Linear Dynamic Analysis*) i nelinearnu dinamičku analizu (NDA - *Nonlinear Dynamic Analysis*) zgrada za uslove seizmičkog dejstva, gde se koristi jedan matematički model, kod nelinearne statičke analize (NSA - *nonlinear static*

*analysis*) se koriste dva matematička modela, u opštem slučaju. Prvi matematički model za NSA analizu, odnosno NSPA analizu, je sistem sa više stepeni slobode MDOF za koji je razmatrana teorijska formulacija i sprovedeno numeričko istraživanje u prethodnom poglavlju. 3D MDOF modelom se realizuje kapacitet nosivosti i deformacija zgrade, odnosno BR odgovor zgrade koji u opštem slučaju predstavlja skup diskretnih vrednosti odgovora iz proračunskih inkrementalnih situacija:

$$\bigcup_{i=1}^n I_i(DR_i, (V/W)_i), \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+, \quad (5.1)$$

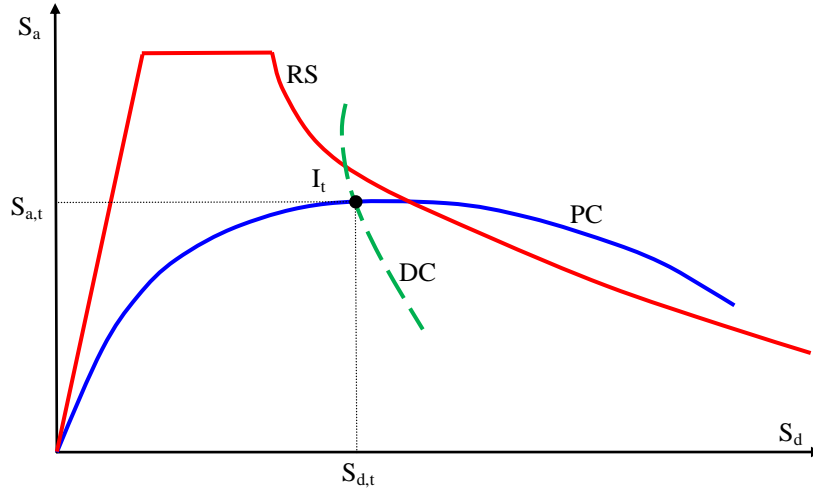
gde je  $I_i(DR_i, (V/W)_i)$  diskretna vrednost odgovora iz proračunske inkrementalne situacije,  $DR_i$  diskretna vrednost globalnog drifta,  $(V/W)_i$  diskretna relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade. Drugi matematički model za NSPA analizu je sistem sa jednim stepenom slobode SDOF, a koristi se za analizu ciljnog pomeraja (TD - *target displacement*). Ciljno pomeranje je definisano seizmičkim zahtevom SD i u opštem slučaju predstavlja jednu diskretnu vrednost:

$$\exists I_t(DR_t, (V/W)_t), \quad (DR_t, (V/W)_t) \in \mathfrak{R}^+, \quad (5.2)$$

gde je  $I_t(DR_t, (V/W)_t)$  diskretna vrednost odgovora za nivo ciljnog pomeranja,  $DR_t$  globalni drift za nivo ciljnog pomeranja,  $(V/W)_t$  relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta za nivo ciljnog pomeranja.

Kod određenih analiza ciljnog pomeranja, kao što je metoda spektra kapaciteta (CSM - *Capacity Spectrum Method*), moguće je realizovati dva preseka krive zahteva (DC - *demand curve*) i NSPA *pushover* krive. U ovom slučaju potrebno je doneti odluku o realnom i imaginarnom nivou ciljnog pomeranja. Sa druge strane, kod CSM metode u proračunu nivoa ciljnog pomeranja potrebno je posebno sprovesti analize za SDOF model, a zatim izvršiti konvertovanje sa SDOF na MDOF sistem. Za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji primenjena je metoda koeficijenata pomeranja (DCM - *Displacement Coefficient Method*) prema FEMA 356 [80] uz dodatna implementirana poboljšanja. Primenom DCM metode direktno se bilinearizuje NSPA *pushover* kriva i određuje nivo ciljnog pomeranja. S obzirom da se primenom CSM metode može grafički sagledati odnos BR/SD, to je i za analizu i teorijsku formulaciju performansi razmatranje izvršeno preko krive zahteva. Kriva zahteva se konstruiše iterativnim postupkom, a u određenim istraživanjima nosi termin *locus of performance points* LPP [117], dok kod NDA analiza nosi termin *locus of inelastic response* LIR [118]. Na slici 5.1 je prikazan elastični spektar odgovora (RS - *response spectra*), *pushover* kriva PC i

kriva zahteva DC u formatu spektralno ubrzanje-spektralno pomeranje (ADRS - *Acceleration Displacement Response Spectrum*) [102].



Slika 5.1 Elastični spektralni odgovor RS, *pushover* kriva PC i kriva zahteva DC u formatu spektralno ubrzanje-spektralno pomeranje ADRS

U cilju razmatranja mogućih odnosa BR/SD, ali ne razmatranja ovog problema CSM već DCM metodom, prezentacija problema je prikazana u formatu  $DR-(V/W)$ . Podrazumeva se da je prethodno DC kriva konvertovana iz ADRS formata u  $DR-(V/W)$  format. Takođe, ciljno pomeranje TD se tretira kao jedinstveno i realno rešenje određeno iz preseka *pushover* krive PC i krive zahteva DC:

$$\exists!TD: TD = PC \cap DC. \quad (5.3)$$

U procesu određivanja odnosa BR/SD i procene performansi sistema, diskretne vrednosti PC i DC krivih razmatraće se kao skupovi uređenih parova:

$$S_{PC} = \bigcup_{i=1}^n I_i \langle DR_i, (V/W)_i \rangle, \quad S_{DC} = \bigcup_{j=1}^m I_j \langle DR_j, (V/W)_j \rangle, \quad (5.4)$$

gde je  $S_{PC}$  skup uređenih parova diskretnih vrednosti  $DR_i, (V/W)_i$ ,  $S_{DC}$  skup uređenih parova diskretnih vrednosti  $DR_j, (V/W)_j$ . Ciljno pomeranje se sada određuje iz preseka skupova uređenih parova  $S_{PC}$  i  $S_{DC}$ :

$$S_{TD} = S_{PC} \cap S_{DC} = I_t \langle DR_t, (V/W)_t \rangle, \quad (5.5)$$

gde je  $S_{TD}$  skup uređenog para diskretne vrednosti  $DR_t, (V/W)_t$ . U procesu analize relacija koje se mogu uspostaviti nad skupovima uređenih parova  $S_{PC}$  i  $S_{DC}$ , polazi se od stava o egzistenciji i minimalnom broju  $(n, m)$  uređenih parova:

$$\exists S_{PC}: \quad \forall (DR_i, (V/W)_i) \in \mathfrak{R}^+, \quad n \geq 2, \quad (5.6)$$

$$\exists S_{DC}: \quad \forall (DR_j, (V/W)_j) \in \mathfrak{R}^+, \quad m \geq 2. \quad (5.7)$$

Takođe u slučaju skupa uređenih parova  $S_{PC}$  važi stav da samo jedan (prvi) uređeni par mora imati vrednosti:

$$S_{PC}: DR_{i=1} \approx 0 \wedge (V/W)_{i=1} \approx 0. \quad (5.8)$$

Konačno, relacije nad skupovima uređenih parova  $S_{PC}$  i  $S_{DC}$  mogu se uspostaviti prema egzistenciji  $S_{TD}$ :

- postoji jedan ili više preseka  $S_{PC}$  i  $S_{DC}$ :

$$\exists S_{TD} = S_{PC} \cap S_{DC} = \bigcup_{k=1}^l I_k \langle DR_k, (V/W)_k \rangle, \quad (5.9)$$

- postoji tačno jedan presek  $S_{PC}$  i  $S_{DC}$ :

$$\exists S_{TD} = S_{PC} \cap S_{DC} = \exists! I_t \langle DR_t, (V/W)_t \rangle, \quad (5.10)$$

- ne postoji presek  $S_{PC}$  i  $S_{DC}$ :

$$S_{TD} = S_{PC} \cap S_{DC} = \emptyset. \quad (5.11)$$

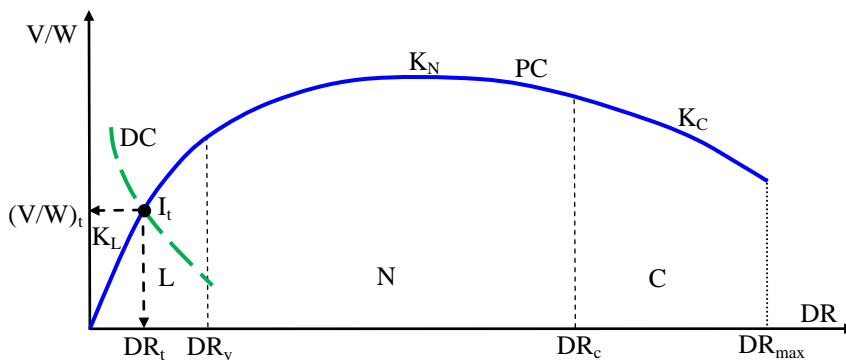
Za analizu performansi 3D modela okvirnih zgrada od interesa je razmatranje varijante kada postoji tačno jedan presek  $S_{PC}$  i  $S_{DC}$  i kada ovaj presek nije moguće realizovati. Određivanje odnosa BR/SD za različite nivoe ciljnog pomeranja, a preko performansi sistema sprovedeno je za nivo deformacija  $D$ , krutost sistema  $K$  i duktilnost  $\mu$ . U prvom slučaju prikazan je model odnosa BR/SD kod koga je nivo ciljnog pomeranja u elastičnoj oblasti i za koji važi (slika 5.2):

$$\exists S_{TD} = \exists! I_t \langle DR_t, (V/W)_t \rangle, \quad \forall (DR_t, (V/W)_t) \in \mathfrak{R}^+ \quad (5.12)$$

$$0 < DR_t \leq DR_y, \quad 0 < (V/W)_t \leq (V/W)_y, \quad K = K_L,$$

$$\mu_t \leq \mu_{=1}, \quad \mu_t = DR_t / DR_y, \quad sup = DR_y, \quad inf = 0, \quad (5.13)$$

gde je  $DR_y$  globalni drift za nivo granice tečenja,  $(V/W)_y$  relativna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta za nivo granice tečenja,  $K_L$  krutost u linearnom domenu,  $\mu_t$  realizovana duktilnost za nivo ciljnog pomeranja,  $sup$  supremum,  $inf$  infimum.

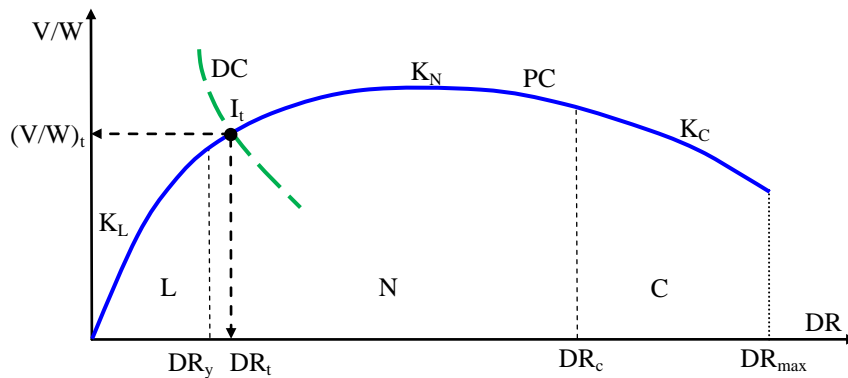


Slika 5.2 Analiza odnosa BR/SD za  $0 < DR_t \leq DR_y$

U drugom slučaju model odnosa BR/SD je nešto povoljniji u odnosu na prethodni, ali je u ovom slučaju duktilnost  $\mu_t$  manja od minimalno potrebne prema propisima  $\mu_{CODE,min}$  (slika 5.3):

$$\begin{aligned} \exists S_{TD} = \exists I_t \langle DR_t, (V/W)_t \rangle, \quad \forall (DR_t, (V/W)_t) \in \mathfrak{R}^+ \\ DR_y < DR_t < \mu_{CODE,min} DR_y, \quad (V/W)_y < (V/W)_t < (V/W)_{\mu_{CODE,min}}, \quad K = K_N \\ \mu_{=1} < \mu_t < \mu_{CODE,min}, \quad \mu_t = DR_t / DR_y, \quad \mu_{CODE,min} \approx 2, \quad (5.14) \\ sup = \mu_{CODE,min} DR_y, \quad inf = DR_y \end{aligned}$$

gde je  $K_N$  krutost u nelinearnom domenu.

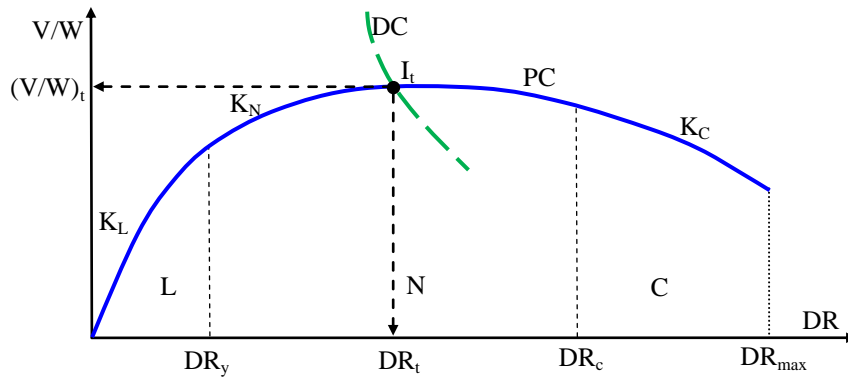


Slika 5.3 Analiza odnosa BR/SD za  $DR_y < DR_t < \mu_{CODE,min} DR_y$

U trećem slučaju model odnosa BR/SD je najpovoljniji jer je, između ostalog, i duktilnost  $\mu_t$  u granicama optimalno potrebne (slika 5.4):

$$\begin{aligned} \exists S_{TD} = \exists I_t \langle DR_t, (V/W)_t \rangle, \quad \forall (DR_t, (V/W)_t) \in \mathfrak{R}^+ \\ \mu_{CODE,min} DR_y \leq DR_t \leq DR_c, \quad (V/W)_{\mu_{CODE,min}} \leq (V/W)_t \leq (V/W)_C, \quad K = K_N \\ \mu_{CODE,min} \leq \mu_t \leq DR_c / DR_y, \quad \mu_t = DR_t / DR_y \leq \mu_{CODE,max}, \quad \mu_{CODE,min} \approx 2, \quad (5.15) \\ sup = DR_c, \quad inf = \mu_{CODE,min} DR_y \end{aligned}$$

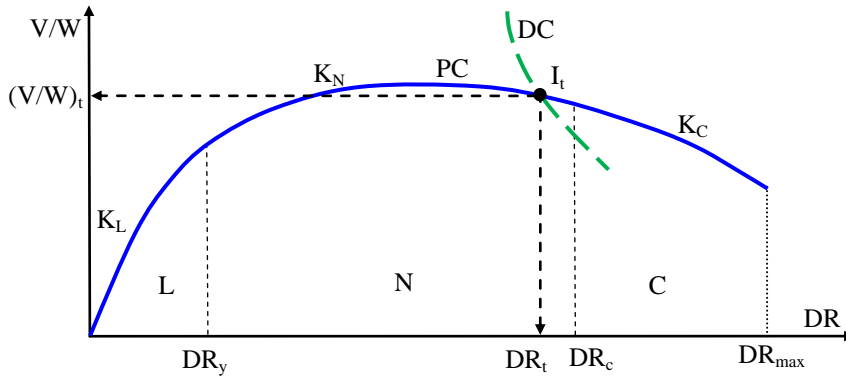
gde je  $DR_c$  globalni drift za nivo iniciranja kolapsnog domena.



Slika 5.4 Analiza odnosa BR/SD za  $DR_y \leq DR_t \leq DR_c$

U četvrtom slučaju model odnosa BR/SD je delimično povoljan, zbog prevelike realizovane duktilnosti  $\mu_t$ , odnosno prevelikog realizovanog drifta  $DR_t$  koji može biti i veći od drifta LS performansnog nivoa (slika 5.5):

$$\begin{aligned} \exists S_{TD} = \exists! I_t \langle DR_t, (V/W)_t \rangle, & \quad \forall (DR_t, (V/W)_t) \in \mathfrak{R}^+ \\ \mu_{CODE,max} DR_y < DR_t \leq DR_C, & \quad (V/W)_{\mu_{CODE,max}} < (V/W)_t \leq (V/W)_C, \quad K = K_N \\ \mu_{CODE,max} < \mu_t < DR_C / DR_y, & \quad \mu_t = DR_t / DR_y \\ sup = DR_C, & \quad inf = \mu_{CODE,max} DR_y \end{aligned} \quad (5.16)$$

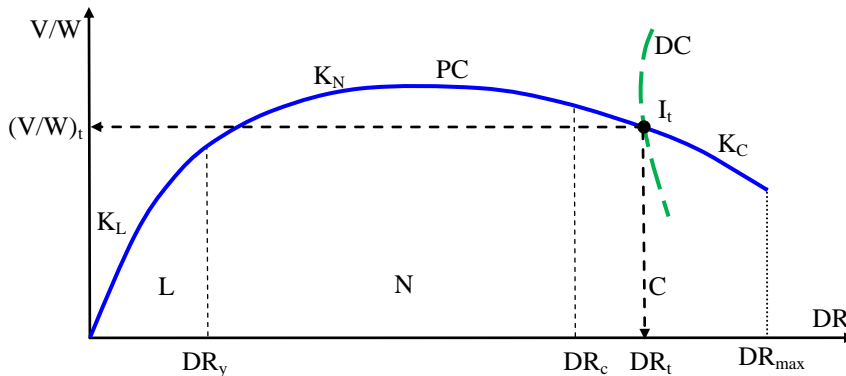


Slika 5.5 Analiza odnosa BR/SD za  $DR_y \leq DR_t \leq DR_C$

U petom slučaju model odnosa BR/SD je nepovoljan zbog prevelike realizovane duktilnosti  $\mu_t$  i dobijenog nivoa ciljnog pomeranja u predkolapsnoj, odnosno kolapsnoj oblasti (slika 5.6):

$$\begin{aligned} \exists S_{TD} = \exists! I_t \langle DR_t, (V/W)_t \rangle, & \quad \forall (DR_t, (V/W)_t) \in \mathfrak{R}^+ \\ DR_C < DR_t \leq DR_{max}, & \quad (V/W)_C > (V/W)_t \geq (V/W)_{max}, \quad K = K_C \\ \mu_C < \mu_t \leq \mu_{max}, & \quad \mu_t = DR_t / DR_y, & \quad \mu_{max} = DR_{max} / DR_y, & \quad (5.17) \\ sup = DR_{max}, & \quad inf = DR_C \end{aligned}$$

gde je  $\mu_{max}$  maksimalna raspoloživa duktilnost.

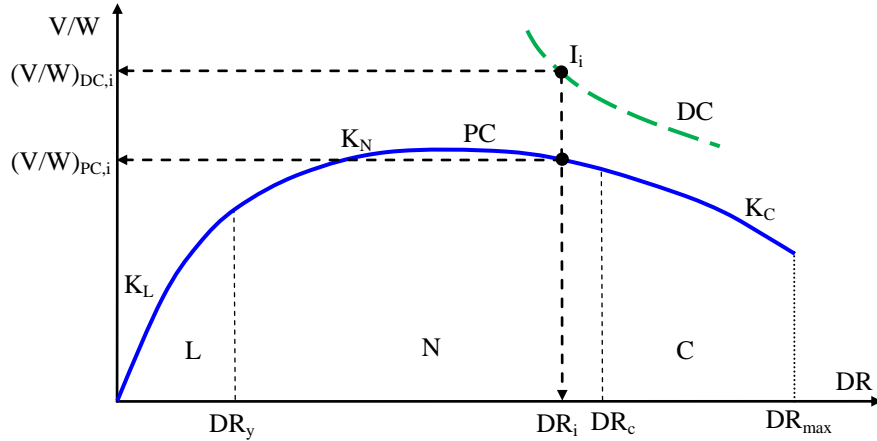


Slika 5.6 Analiza odnosa BR/SD za  $DR_C < DR_t \leq DR_{max}$



U šestom slučaju model odnosa BR/SD je takav da nije moguće odrediti nivo ciljnog pomeranja  $\bar{A}DR_t$ , pošto ne postoji presek *pushover* krive i krive zahteva (slika 5.7):

$$\begin{aligned} S_{TD} = S_{PC} \cap S_{DC} = \emptyset, \quad \forall DR_{PC,i} : (V/W)_{DC,i} > (V/W)_{PC,i} \\ DR_t = 0, \quad (V/W)_t = 0, \quad \mu_t = 0 \end{aligned} \quad (5.18)$$



Slika 5.7 Analiza odnosa BR/SD kada  $\bar{A}DR_t$

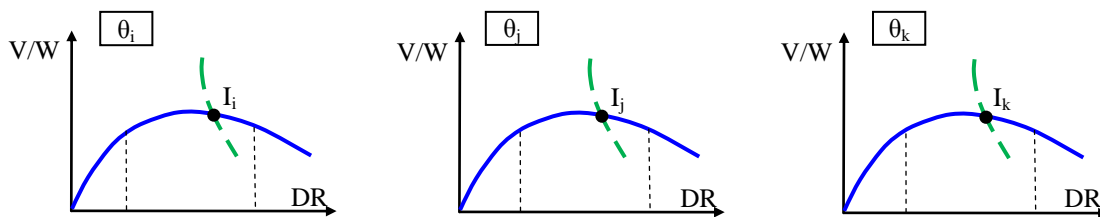
Prethodna razmatranja su sprovedena za različite modele odnosa BR/SD jedne *pushover* krive i jednog nivoa seizmičkog zahteva za ugao  $\theta_i$ . U odnosu na ovakav jednodimenzionalni tretman problema, razmatranje na nivou 3D modela zgrada, a koja su uvedena u ovoj disertaciji preko *pushover* površi, pripadaju dvodimenzionalnom tretmanu problema, jer se odnos BR/SD analizira u ravni. Kod jednodimenzionalnog tretmana postoji samo jedna diskretna vrednost nivoa ciljnog pomeranja  $I_t\langle DR_b, (V/W)_t \rangle$ , dok u slučaju dvodimenzionalnog tretmana za svaki ugao  $\theta_i$  postoji po jedna diskretna vrednost nivoa ciljnog pomeranja  $I_t\langle DR_b, (V/W)_t \rangle$ :

$$\theta_i = 0^\circ \div 360^\circ, \quad \Delta\theta = 30^\circ, \quad S_{TD,\theta} = \bigcup_{i=1}^n I_t\langle DR_b, (V/W)_t \rangle, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \quad (5.19)$$

gde je  $S_{TD,\theta}$  skup uređenih parova diskretnih vrednosti  $I_t\langle DR_b, (V/W)_t \rangle$  po uglovima  $\theta_i$ . U procesu razmatranja mogućih odnosa BR/SD po svim *pushover* krivama polazi se od stavova o egzistenciji ciljnih pomeranja i generalizacije domena H u kojem se ista nalaze, pri čemu H može biti L, N ili C domen:

- postoje sva ciljna pomeranja, identična su i sva pripadaju istom domenu H (specijalan slučaj rotaciono simetrične *pushover* površi) (slika 5.8):

$$\begin{aligned} \exists I_{t,i}\langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle : \quad i = 1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \\ DR_{t,i} = DR_{t,j} = DR_{t,k}, \quad I_{t,i}, I_{t,j}, I_{t,k} \in H \end{aligned} \quad (5.20)$$

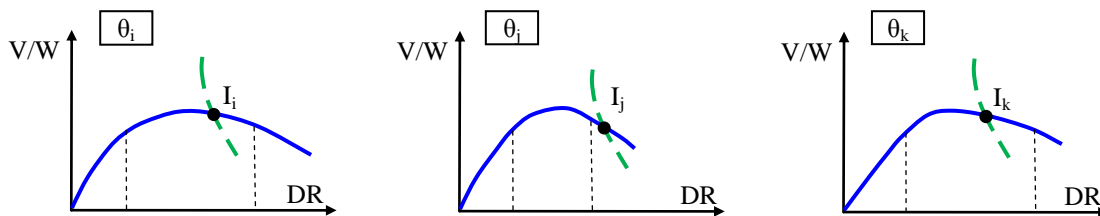


Slika 5.8 Postoje sva ciljna pomeranja, identična su i sva pripadaju istom domenu

- postoje sva ciljna pomeranja, identična su i ne pripadaju sva istom domenu H (pushover krive su različite, ali se realizuju isti nivoi ciljnog pomeranja) (slika 5.9):

$$\exists I_{t,i} \langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle: i=1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \quad (5.21)$$

$$DR_{t,i} = DR_{t,j} = DR_{t,k}, \quad I_{t,i} \in H_1, \quad I_{t,j} \in H_2, \quad H_1 \neq H_2$$

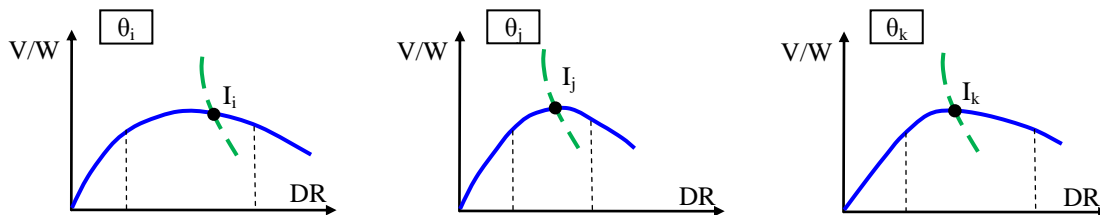


Slika 5.9 Postoje sva ciljna pomeranja, identična su i ne pripadaju sva istom domenu

- postoje sva ciljna pomeranja, nisu identična i sva pripadaju istom domenu (slika 5.10):

$$\exists I_{t,i} \langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle: i=1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \quad (5.22)$$

$$DR_{t,i} \neq DR_{t,j} \neq DR_{t,k}, \quad I_{t,i}, I_{t,j}, I_{t,k} \in H$$

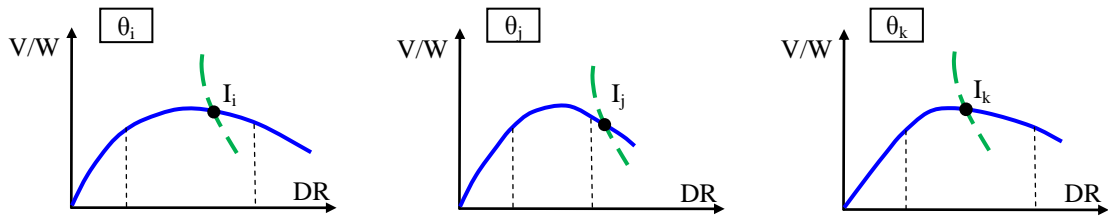


Slika 5.10 Postoje sva ciljna pomeranja, nisu identična i sva pripadaju istom domenu

- postoje sva ciljna pomeranja, nisu identična i ne pripadaju sva istom domenu (slika 5.11):

$$\exists I_{t,i} \langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle: i=1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \quad (5.23)$$

$$DR_{t,i} \neq DR_{t,j} \neq DR_{t,k}, \quad I_{t,i} \in H_1, \quad I_{t,j} \in H_2, \quad H_1 \neq H_2$$

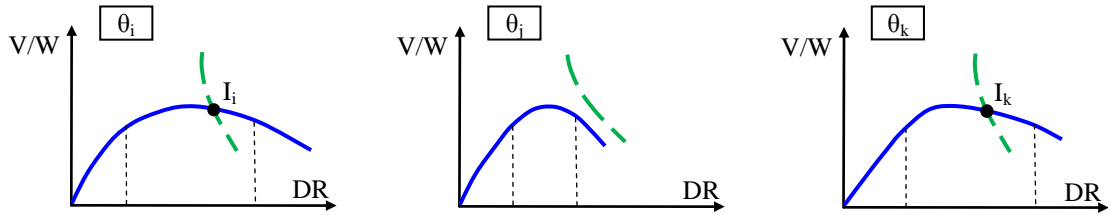


Slika 5.11 Postoje sva ciljna pomeranja, nisu identična i ne pripadaju sva istom domenu

- ne postoje sva ciljna pomeranja (određena ciljna pomeranja nije moguće realizovati), a ona koja postoje identična su i pripadaju istom domenu (slika 5.12):

$$\exists I_{t,i} \langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle, \quad I_{t,j} = 0: \quad i = 1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \quad (5.24)$$

$$DR_{t,i} = DR_{t,k}, \quad I_{t,i}, I_{t,k} \in H$$

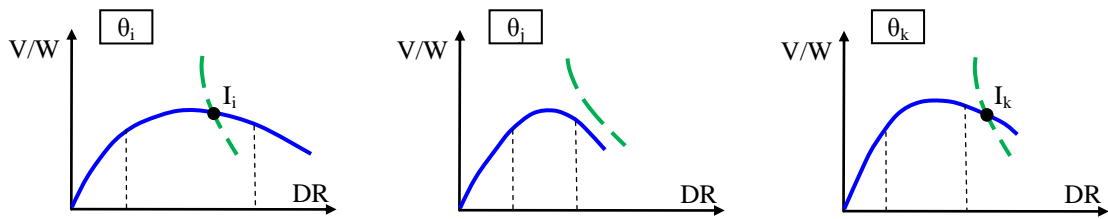


Slika 5.12 Ne postoje sva ciljna pomeranja, a ona koja postoje identična su i pripadaju istom domenu

- ne postoje sva ciljna pomeranja, a ona koja postoje identična su i ne pripadaju istom domenu (slika 5.13):

$$\exists I_{t,i} \langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle, \quad I_{t,j} = 0: \quad i = 1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \quad (5.25)$$

$$DR_{t,i} = DR_{t,k}, \quad I_{t,i} \in H_1, \quad I_{t,k} \in H_2, \quad H_1 \neq H_2$$



Slika 5.13 Ne postoje sva ciljna pomeranja, a ona koja postoje identična su i ne pripadaju istom domenu

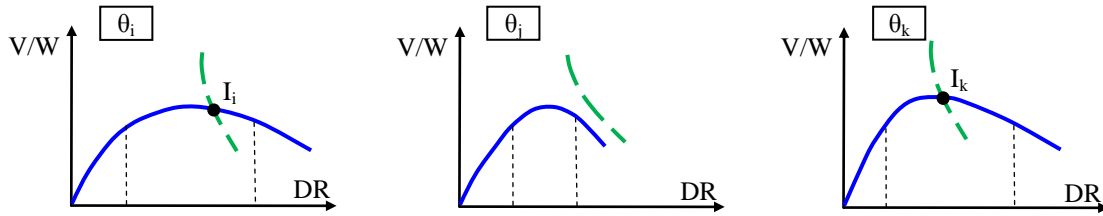
- ne postoje sva ciljna pomeranja, a ona koja postoje nisu identična i pripadaju istom domenu (slika 5.14):

$$\exists I_{t,i} \langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle, \quad I_{t,j} = 0: \quad i = 1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta}, \quad (5.26)$$

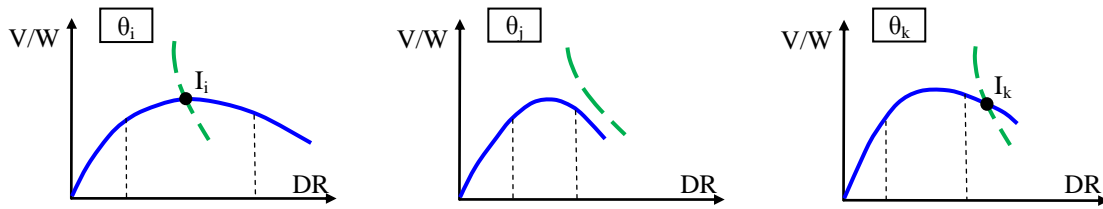
$$DR_{t,i} \neq DR_{t,k}, \quad I_{t,i}, I_{t,k} \in H$$

- ne postoje sva ciljna pomeranja, a ona koja postoje nisu identična i ne pripadaju sva istom domenu (slika 5.15):

$$\begin{aligned} \exists I_{t,i} \langle DR_{t,i}, (V/W)_{t,i} \rangle, \quad I_{t,j} = 0: \quad i=1, \dots, n, \quad n = \frac{360}{\Delta\theta} \\ DR_{t,i} \neq DR_{t,k}, \quad I_{t,i} \in H_1, \quad I_{t,k} \in H_2, \quad H_1 \neq H_2 \end{aligned} \quad (5.27)$$



Slika 5.14 Ne postoje sva ciljna pomeranja, a ona koja postoje nisu identična i pripadaju istom domenu



Slika 5.15 Ne postoje sva ciljna pomeranja, a ona koja postoje nisu identična i ne pripadaju istom domenu

### 5.3. NSPA ANALIZA CILJNOG POMERANJA

#### 5.3.1. TEORIJSKI ASPEKTI NSPA ANALIZE CILJNOG POMERANJA

Nakon generisanja *pushover* krivih iz NSPA analiza, sprovode se analize ciljnih pomeranja za svaki ugao  $\theta_i$  posebno. Za inkrement ugla  $\Delta\theta=30^\circ$  sprovodi se dvanaest analiza ciljnih pomeranja. Objedinjavanjem NSPA analize i analize ciljnog pomeranja TD nastala je NSPA-TD analiza (NSPA-TD - *Nonlinear Static Pushover Analysis - target displacement*), a koja predstavlja dve različite faze proračuna nivoa ciljnog pomeranja, s'tim što NSPA analiza može biti nezavisna, dok analiza ciljnog pomeranja ne može biti nezavisna.

Procedura za određivanje nivoa ciljnog pomeranja sprovodi se prema metodi koeficijenta pomeranja (DCM - *Displacement Coefficient Method*) FEMA 356 [80], a uz određene korekcije i poboljšanja implementirana je u program *Nonlin Quake TD (Target Displacement)*. DCM metoda se sprovodi multiplikacijom određenih koeficijenta, dok je korekcija sprovedena tako da se nivo ciljnog pomeranja određuje iterativnom procedurom sa subiteracijama (IDCM - *Iterative Displacement Coefficient Method*) [43]. Kontrolni panel *Nonlin Quake TD* je prikazan na slici 5.16. Iniciranje procedure za određivanje nivoa ciljnog pomeranja u *Nonlin Quake TD* sprovodi se

korekcijom diskretnih vrednosti *pushover* krive dobijenih na osnovu NSPA analize:

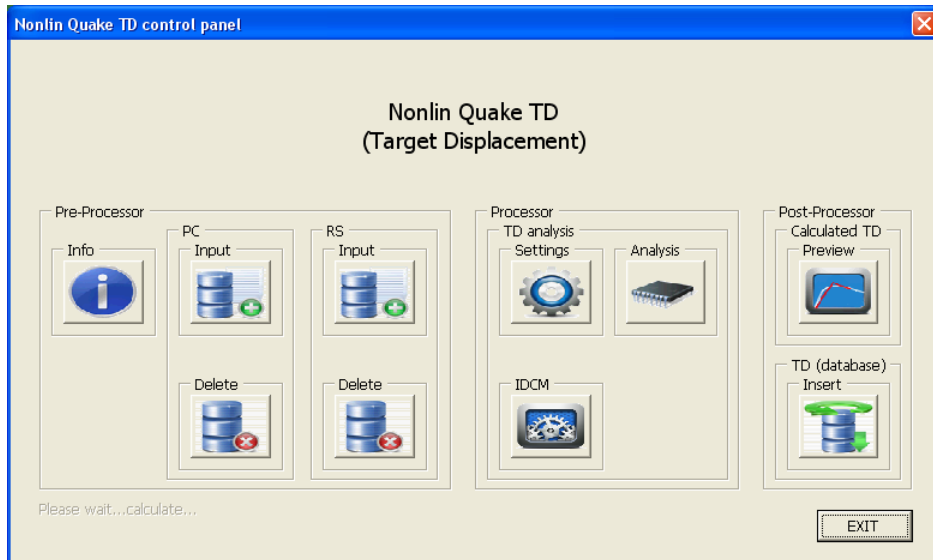
$$D_0 = 0, \quad V_0 = 0, \quad D_i \rightarrow |D_i|, \quad V_i \rightarrow |V_i|, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5.28)$$

Postupak prevođenja u apsolutne vrednosti se sprovodi, s obzirom da se u velikom broju slučajeva kao rezultat numeričkog rešenja dobijaju negativne vrednosti za  $V_i$ . Inicijalna elastična krutost objekta  $K_e$  se određuje prema:

$$K_e = \frac{V_1}{D_1}, \quad (5.29)$$

gde je  $V_1$  ukupna smičuća sila u osnovi objekta za prvu diskretnu vrednost,  $D_1$  pomeranje objekta za prvu diskretnu vrednost, a zatim se sprovodi transformacija iz apsolutnih u relativne vrednosti:

$$DR_i = \frac{D_i}{H}, \quad (V/W)_i = \frac{V_i}{W}. \quad (5.30)$$



Slika 5.16 Kontrolni panel *Nonlin Quake TD*

Odlučivanje o znaku nelinearne krutosti MDOF sistema  $K_{n,PC}$  sprovodi se tako što se prvo sprovodi proračun tangentne krutosti sistema  $K_{t,i}$  za dve uzastopne diskretne vrednosti *pushover* krive:

$$K_{t,i} = \frac{V_i - V_{i-1}}{D_i - D_{i-1}}, \quad (5.31)$$

sa opcijama selekcije domena:

$$DR_{IO,min} \leq DR_i \leq DR_{LS,max} \quad \text{odnosno} \quad DR_{IO,min} \leq DR_i \leq DR_{CP,max}, \quad (5.32)$$

kao i:

$$\frac{DR_{IO,max} + DR_{IO,min}}{2} \leq DR_i \leq \frac{DR_{LS,max} + DR_{LS,min}}{2}, \quad (5.33)$$

odnosno:

$$\frac{DR_{IO,max} + DR_{IO,min}}{2} \leq DR_i \leq \frac{DR_{CP,max} + DR_{CP,min}}{2}, \quad (5.34)$$

pri čemu su globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$  za armiranobetonske okvirne sisteme (SPL - *structural performance levels*) prema SEAOC [199] i FEMA 356 [80]:

$$\begin{aligned} DR_{IO,min} \leq 0.5\% \quad DR_{IO,max} \leq 1\% \quad D_{IO} = DR_{IO}H \quad P_{50\%/50} \\ DR_{LS,min} \leq 1\% \quad , \quad DR_{LS,max} \leq 2\% \quad , \quad D_{LS} = DR_{LS}H \quad \text{za} \quad P_{10\%/50} \quad , \quad (5.35) \\ DR_{CP,min} \leq 2\% \quad DR_{CP,max} \leq 4\% \quad D_{CP} = DR_{CP}H \quad P_{2\%/50} \end{aligned}$$

dok se odgovarajuće ukupne smičuće sile u osnovi objekta za IO, LS i CP performansne nivoe određuju iz preseka *pushover* krive i driftova  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$  i  $DR_{CP}$ :

$$\begin{aligned} V_{IO} = PC \cap D_{IO} \quad (V/W)_{IO} = V_{IO}/W \\ V_{LS} = PC \cap D_{LS} \quad , \quad (V/W)_{LS} = V_{LS}/W \quad . \quad (5.36) \\ V_{CP} = PC \cap D_{CP} \quad (V/W)_{CP} = V_{CP}/W \end{aligned}$$

Nakon selekcije domena i ispitivanja  $K_{t,i}$  određuju se težinski koeficijenti prema:

$$C_{w,i} = \tau \frac{D_i - D_{i-1}}{D_{P,max} - D_{P,min}} (\%), \quad \tau = \begin{cases} + & \text{za } K_{t,i} > 0 \\ - & \text{za } K_{t,i} < 0 \end{cases}, \quad (5.37)$$

gde je  $D_{P,max}$  maksimalna vrednost za selektovani domen prema (5.31)÷(5.34),  $D_{P,min}$  minimalna vrednost za selektovani domen prema (5.31)÷(5.34), a zatim se sprovodi sumiranje svih koeficijenata:

$$C_w = \sum_{i=1}^n C_{w,i}, \quad (5.38)$$

Odluka o znaku  $K_{n,PC}$  se donosi na osnovu pozitivne ili negativne vrednosti  $C_w$ . U određenim situacijama  $K_{t,i}$  može značajno da menja znak u nelinearnom domenu, od pozitivne, preko nulte, pa sve do negativne. Sa druge strane, razlika pomeranja dve uzastopne diskretne vrednosti *pushover* krive može biti veoma značajna, tako da opšta procena znaka nelinearne krutosti može biti komplikovana. Ovo je posebno značajno pri prelasku iz linearnog u nelinearni domen i u domenu predkolapsnog stanja. U istraživanjima [186], [151], [39] koja su sprovedena sa linijskim konačnim elementima za modeliranje ramovskih konstrukcija, a primenom softvera *SeismoStruct* [341], prikazane su *pushover* krive dobijene primenom NSPA analiza bez frekventne promene krutosti u nelinearnom domenu. Domeni (5.31)÷(5.34) su selektovani iz razloga što se od konstrukcije očekuje da razvije nelinearno ponašanje čije je maksimalno pomeranje

veće od LS performansnog nivoa. Ukoliko se ne realizuje maksimalno pomeranje veće od LS performansnog nivoa, razmatranje se sprovodi za niža realizovana pomeranja, s'tim što je u tom slučaju broj diskretnih vrednosti manji.

Određivanje nivoa ciljnog pomeranja  $D_t$  prema DCM metodi FEMA 356 [80] sprovodi se multipliciranjem koeficijenata:

$$D_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} g, \quad (5.39)$$

gde je  $C_0$  modifikacioni koeficijent kojim se konvertuje spektralno pomeranje ekvivalentnog SDOF sistema u pomeranje najvišeg čvora MDOF sistema, a koji se proračunava primenom faktora participacije prvog svojstvenog oblika  $\Gamma_1$  na nivou kontrolnog čvora ili prema tabeli 5.1. Minimalna vrednost koeficijenta  $C_0$  je 1. Značajan uticaj na vrednost ovog koeficijenta ima i tip raspodele lateralnog seizmičkog opterećenja. Prema FEMA 356 [80] definisane su vrednosti samo za ekvivalentnu (*triangular load pattern*) i ravnomernu (*uniform load pattern*) lateralnu raspodelu seizmičkih sila za zgrade čije je ponašanje dominantno smicanjem (SRF - *shear resisting frame*). Za zgrade čije je ponašanje dominantno fleksiono (MRF - *moment resisting frame*) koeficijent  $C_0$  nije zavisao od tipa lateralne raspodele seizmičkih sila.

Tabela 5.1 Vrednosti modifikacionog koeficijenta  $C_0$  [80]

br. spratova $N_{st}$	RC SRF		RC MRF
	ekvivalentna raspodela	ravnomerna raspodela	bilo koja raspodela
1	1	1	1
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

$C_1$  je modifikacioni koeficijent koji predstavlja odnos očekivanog maksimalnog nelinearnog pomeranja sa pomeranjem linearno-elastičnog odgovora, a određuje se prema:

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{za } T_{eff} \geq T_s \\ 1 + \frac{(R-1)T_s}{T_{eff}} & \text{za } T_{eff} < T_s \\ \frac{T_{eff}}{R} & \end{cases} \quad (5.40)$$

Minimalna vrednost koeficijenta  $C_1$  je 1, dok su dodatna ograničenja uvedena kao  $f(T_e, T_s)$ :

$$C_1 = \begin{cases} 1.5 & \text{za } T_e < 0.1s \\ 1.5 - \frac{0.5(T_e - 0.1)}{T_s - 0.1} & \text{za } 0.1s \leq T_e < T_s \\ 1 & \text{za } T_e \geq T_s \end{cases} \quad (5.41)$$

$C_2$  je modifikacioni koeficijent koji predstavlja efekat uštinuća histerezisne petlje, degradaciju krutosti i opadanje nosivosti pri maksimalnom nivou pomeranja (tabela 5.2). Vrednosti ovog koeficijenta su u funkciji performansnog stanja konstrukcije IO, LS ili CP, tipa konstruktivnog sistema i veličine inicijalnog elastičnog perioda vibracija  $T_e \leq 0.1s$  i  $T_e \geq T_s$ .

Tabela 5.2 Vrednosti modifikacionog koeficijenta  $C_2$  [80]

performansni nivo	$T_e \leq 0.1s$	$T_e \geq T_s$
IO	1	1
LS	1.3	1.1
CP	1.5	1.2

$C_3$  je modifikacioni koeficijent kojim se uvodi povećanje pomeranja usled dinamičkih  $P-\Delta$  efekata, pri čemu se uzima da je vrednost  $C_3=1$  za pozitivnu krutost u nelinearnoj zoni ponašanja  $K_{n,PC} > 0$ , dok se za negativnu krutost u nelinearnoj zoni ponašanja  $K_{n,PC} < 0$  određuje prema:

$$C_3 = 1 + \frac{|\alpha_{BC}|(R-1)^2}{T_{eff}} \quad (5.42)$$

Stepen povećanja pomeranja izazvan dinamičkim  $P-\Delta$  efektima zavisi od koeficijenta  $\alpha_{BC}$ , efektivnog perioda vibracija sistema  $T_{eff}$ , odnosa histerezisnog ponašanja opterećenje-deformacija za svaki sprat, frekventnih karakteristika zemljotresa i vremena trajanja jakog dela zemljotresa. Minimalna vrednost koeficijenta  $C_3$  je 1, dok su dodatna ograničenja uvedena u funkciji koeficijenta stabilnosti  $C_s$ :

$$C_3 = \begin{cases} 1 & \text{za } C_s < 0.1 \\ 1 + 5(C_s - 0.1) & \text{za } 0.1 \leq C_s < 0.2 \\ 1 + 5(C_s - 0.1) & \text{za } 0.2 \leq C_s < 0.33 \end{cases} \quad (5.43)$$

Spektralno ubrzanje  $S_a$  se određuje iz spektra odgovora RS za  $T_{eff}$  i koeficijent prigušenja  $\beta$  sistema  $S_a = f(T_{eff}, \zeta)$ :

$$S_a = RS \cap T_{eff} \quad (5.44)$$

Efektivan period vibracija  $T_{eff}$  se određuje prema:

$$T_{eff} = T_e \sqrt{\frac{K_e}{K_{eff}}} \quad (5.45)$$



dok je koeficijent odnosa elastične nosivosti i nosivosti na granici tečenja  $R$ :

$$R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m. \quad (5.46)$$

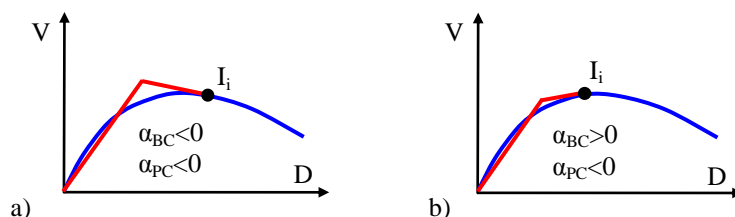
$T_S$  je karakterističan period vibracija na spektru odgovora pri prelasku iz domena konstantnog ubrzanja u domen konstantnih brzina. Ova vrednost se određuje uzimajući u obzir spektar odgovora generisan za realan akcelerogram zemljotresa, pri čemu treba biti ispunjen uslov:

$$T_0 < T_S < 1s \quad \text{gde je} \quad T_0 = 0.2T_S. \quad (5.47)$$

Parametar  $\alpha_{BC}$  predstavlja odnos krutosti u nelinearnoj zoni ponašanja  $K_{n,BC}$ , određena postupkom bilinearizacije, prema efektivnoj krutosti  $K_{eff}$ :

$$\alpha_{BC} = \frac{K_{n,BC}}{K_{eff}}. \quad (5.48)$$

U *Nonlin Quake* TD postoji mogućnost da se iteracijama odredi  $\alpha_{BC}$ , pri čemu se znak može razlikovati od  $\alpha_{PC}$  ili da se kroz iteracije odredi najpovoljniji slučaj za isti znak kao kod  $\alpha_{PC}$  (slika 5.17).



Slika 5.17 a)  $\alpha_{BC} < 0$ ,  $\alpha_{PC} < 0$ , b)  $\alpha_{BC} > 0$ ,  $\alpha_{PC} < 0$  [43]

Takođe, u *Nonlin Quake* TD postoji mogućnost da se izvrši unos inicijalnog elastičnog perioda vibracija  $T_e$  ili da se odredi prema:

$$T_e = \frac{1}{(\sqrt{K_e/m})/2\pi}. \quad (5.49)$$

Definisanje efektivne krutosti  $K_{eff}$  u *Nonlin Quake* TD moguće je sprovesti na više načina. Prva mogućnost je da se  $K_{eff}$  odredi preko efektivnog pomeranja  $D_{eff}$ , tako što se još u fazi predprocesiranja NSPA analiza definišu performansni kriterijumi na nivou preseka, odnosno na nivou konstitutivnog modela materijala, a zatim se u fazi postprocesiranja odlučuje o nivou efektivnog pomeranja  $D_{eff}$ . Ovi kriterijumi se postavljaju za ponašanje konstitutivnog modela materijala, posebno za neutegnutu zonu betona, utegnutu zonu betona i čeličnu armaturu. U toku procesiranja se sprovodi monitoring dilatacija betona i čelika, a zatim se određuje kada je dostignuto merodavno

stanje u kojem se pojavljuju inicijalne prsline u betonu (monitoring preko ograničene dilatacije), pre pojave napona tečenja u šipkama armature. Ukupna smičuća sila u osnovi objekta za nivo efektivnog pomeranja  $V_{eff}$  se određuje prema:

$$V_{eff} = PC \cap D_{eff}, \quad (5.50)$$

dok se efektivna krutost određuje prema:

$$K_{eff} = \frac{V_{eff}}{D_{eff}}. \quad (5.51)$$

Druga mogućnost je da vrednost efektivne krutosti  $K_{eff}$  bude ekvivalentana inicijalnoj elastičnoj krutosti  $K_e$ :

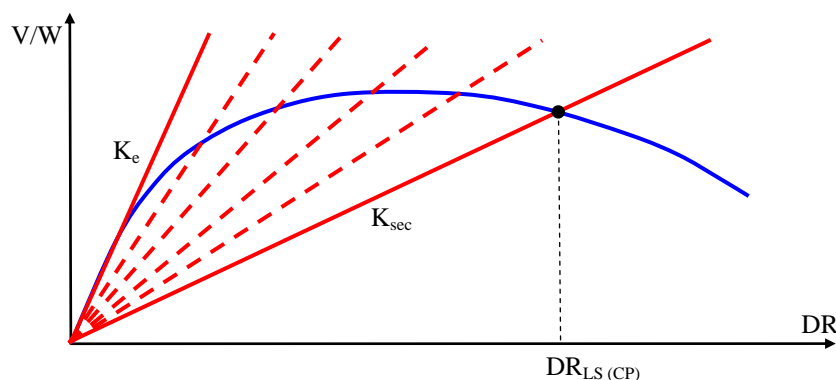
$$K_{eff} = K_e. \quad (5.52)$$

Treća mogućnost je da se efektivna krutost  $K_{eff}$  proračuna kao redukovana inicijalna elastična krutost za vrednost redukcije  $\Delta K$ :

$$K_{eff} = K_e - K_e \Delta K. \quad (5.53)$$

Domen mogućih vrednosti efektivne krutosti  $K_{eff}$ , u opštem slučaju, je od inicijalne elastične krutosti  $K_e$  do sekantne krutosti  $K_{sec}$  (slika 5.18):

$$K_{eff} \in [K_e, K_{sec}]. \quad (5.54)$$



Slika 5.18 Domen mogućih vrednosti za  $K_{eff}$

Koeficijent efektivne mase  $C_m$  je funkcija visine objekta i tipa konstruktivnog sistema, pri čemu je za RC MRF sistem:

$$C_m = \begin{cases} 1 & \text{za } N_{st} = 1 \div 2 \\ 0.9 & \text{za } N_{st} > 3 \end{cases}, \quad (5.55)$$

s tim što se mogu uvesti dodatna ograničenja:

$$C_m = \begin{cases} 0.9 & \text{za } T_e < 1 \text{ s} \\ 1 & \text{za } T_e \geq 1 \text{ s} \end{cases}. \quad (5.56)$$

Dostizanje nivoa ciljnog pomeranja  $D_t$ , a proračunato prema prethodno

izloženim koeficijentima, očekuje se u granicama:

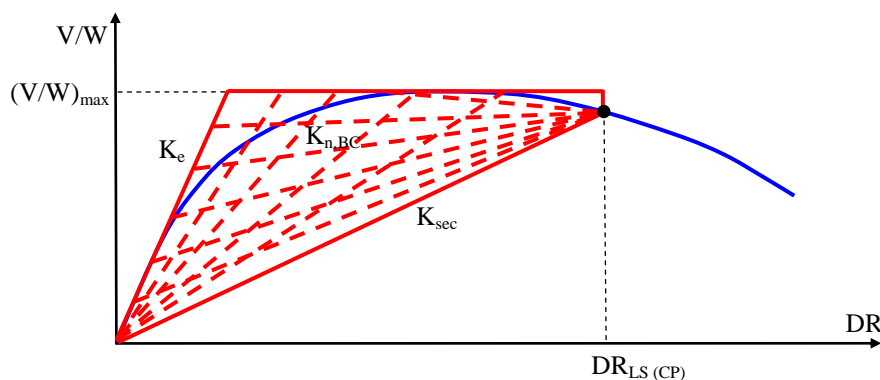
$$D_{IO} \leq D_i \leq D_{LS}, \quad (5.57)$$

a čime je moguće obezbediti povoljno duktilno ponašanje sistema, dok se u izuzetnim slučajevima nivo ciljnog pomeranja može nalaziti u granicama:

$$D_{IO} \leq D_i \leq D_{CP}. \quad (5.58)$$

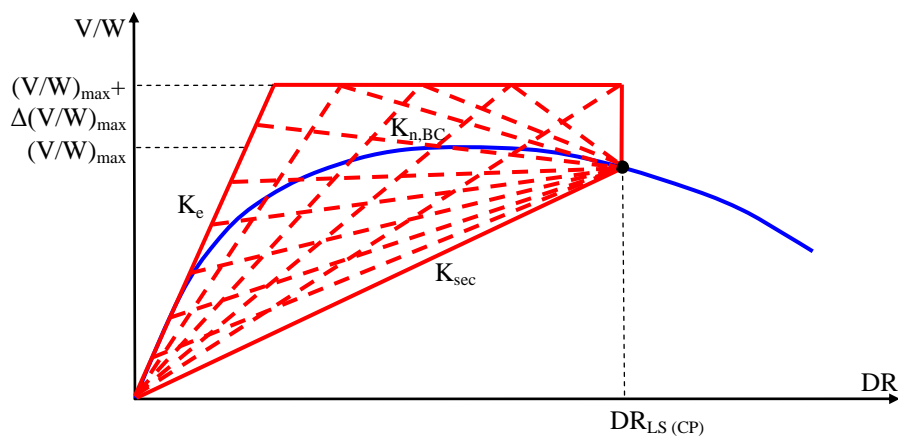
Neispunjenje uslova (5.57) znači da konstrukcija nije sposobna da razvije minimalno potrebno duktilno ponašanje i čiji je odgovor nepovoljan.

Domen mogućih vrednosti za  $K_{n,BC}$  bilinearne krive (BC - *bilinear curve*) u *Nonlin Quake* TD, definisan je granicama (5.54) i preko maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $(V/W)_{max}$  (slika 5.19).



Slika 5.19 Domen mogućih vrednosti  $K_{n,BC}$  za  $(V/W)_{max}$

Takođe, postoji mogućnost povećanja maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $(V/W)_{max}$  za vrednost  $\Delta(V/W)_{max}$  (slika 5.20). Alternativa je uvedena, s obzirom da se u slučaju NSPA *pushover* krive sa  $K_{n,PC} < 0$  mogu javiti problemi kod bilinearizacije.



Slika 5.20 Domen mogućih vrednosti  $K_{n,BC}$  za  $(V/W)_{max} + \Delta(V/W)_{max}$  [43]

Određivanje ciljnog pomeranja prema (5.39) zahteva poznavanje svih modifikacionih koeficijenata, ali kao što se vidi iz prethodnih izraza direktno je moguće odrediti samo  $C_0$  i  $C_2$ , dok u određenim situacijama  $C_1$  i  $C_3$  može biti nepoznato, osim ukoliko se uvedu određena pojednostavljena kao u [362]. Ova pojednostavljena podrazumevaju da su vrednosti  $C_1$  i  $C_3$  jednake 1. U ovim koeficijentima kao nepoznate se javljaju  $R$  i  $\alpha_{BC}$ , dok se u  $R$  javlja nepoznato  $V_{y,BC}$  (sila na granici tečenja za bilinearni sistem), a  $\alpha$  zavisi od  $D_{y,BC}$  (pomeranje na granici tečenja za bilinearni sistem) i  $V_{y,BC}$ . Generalno razmatrajući, proces određivanja ciljnog pomeranja MDOF sistema se zasniva na bilinearizaciji SDOF sistemom, uz dodatna poboljšanja nelinearnog ponašanja SDOF kao MDOF sistema. Preporuke FEMA 356 [80] su da se izvrši balansiranje površine ispod NSPA *pushover* krive i bilinearne krive, ali se ne objašnjava kako treba izvršiti ovo balansiranje. Rešenje koje je primenjeno u *Nonlin Quake* TD se zasniva na principu jednakosti energije elasto-plastičnih deformacija realizovanih NSPA analizom, a prezentovane preko odnosa kapacitet nosivosti-deformacija  $E_{NSPA}$  i energije realizovanih elasto-plastičnih deformacija iz bilinearizacije  $E_B$ . Energija elastoplastičnih deformacija realizovana primenom NSPA analize  $E_{NSPA}$  određuje se preko površine čija je kontura poligonalna linija (*pushover* kriva), vertikalna na mestu ciljnog pomeranja  $D_t$  i abscisa. Termin poligon za bilinearni sistem u potpunosti odgovara, jer se sastoji iz dve prave, dok je za MDOF sistem na prvi pogled termin matematički nekorektno formulisan. S obzirom da se *pushover* kriva za MDOF sistem generiše povezujući diskretne vrednosti iz inkrementalnih situacija NSPA analize, realan oblik *pushover* krive je takođe poligon. Grafička prezentacija ostavlja utisak glatke krive zbog velikog broja diskretnih vrednosti koje su na bliskom rastojanju, ali se u ovakvim situacijama dodatno primenjuje interpolacija splajnom. Procedura bilinearizacije prikazana je u prethodnom poglavlju, s'tim što je u programu *Nonlin Quake* TD izvršena dodatna korekcija. Minimalno procentualno odstupanje energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija NSPA analize i bilinearizacije  $\Delta E_{min}$  određuje se prema (slika 5.21):

$$\Delta E_{min} = \frac{|E_{NSPA} - E_B|}{E_{NSPA}} (\%). \quad (5.59)$$

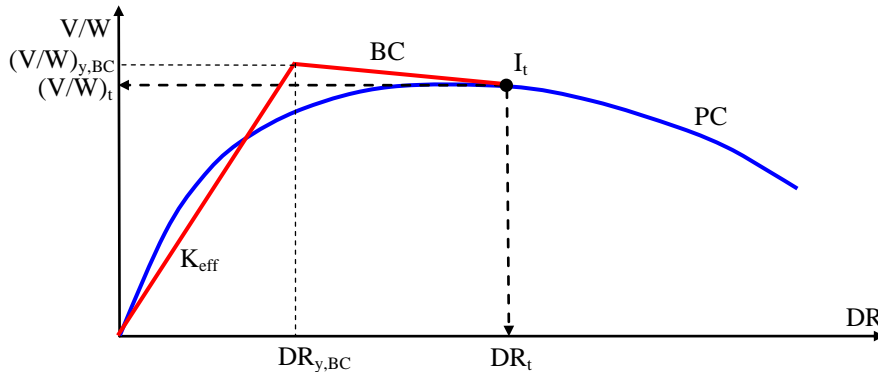
Energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija NSPA analize  $E_{NSPA}$  određuje se prema:

$$E_{NSPA} = \left[ \sum_{i=1}^{t-1} \frac{(V_i + V_{i-1})}{2} (D_i - D_{i-1}) \right] + \frac{(V_t + V_{t-1})}{2} (D_t - D_{t-1}), \quad (5.60)$$

dok se energija realizovanih elasto-plastičnih deformacija iz bilinearizacije  $E_B$  određuje prema:

$$E_B = 0.5(V_{y,BC}D_{y,BC} + (V_{y,BC} + V_t)(D_t - D_{y,BC})), \quad (5.61)$$

gde je  $V_t$  ukupna smičuća sila u osnovi objekta za nivo ciljnog pomeranja.

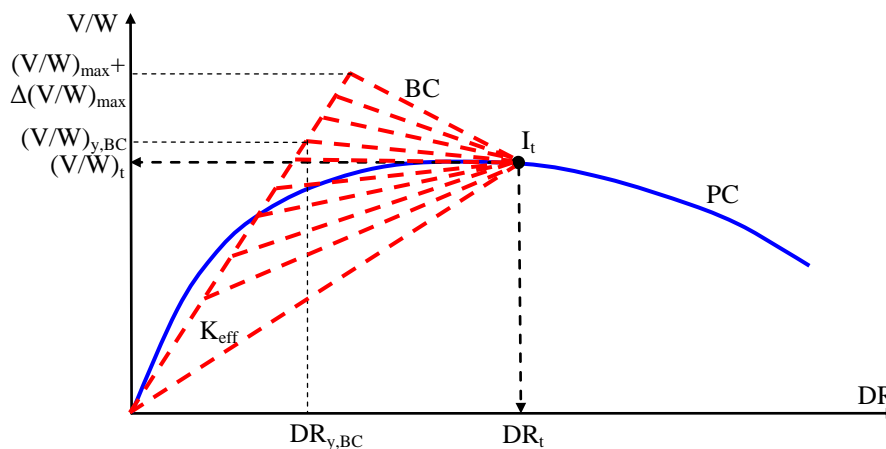


Slika 5.21 Bilinearizacija NSPA pushover krive [43]

Poboljšana DCM metoda, odnosno nova razvijena IDCM metoda implementirana u *Nonlin Quake* TD, bazira se na dvostrukim iteracijama. U prvoj fazi IDCM metode sprovodi se iterativna procedura za  $D_{y,BC}$  i  $V_{y,BC}$  u intervalu (slika 5.22):

$$D_{y,BC} \in [D_1, D_{max}], \quad V_{y,BC} \in [V_1, V_{max} + \Delta V_{max}], \quad (5.62)$$

gde je  $D_{max}$  maksimalna vrednost pomeranja objekta,  $V_{max}$  maksimalna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta,  $\Delta V_{max}$  povećanje maksimalne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta.



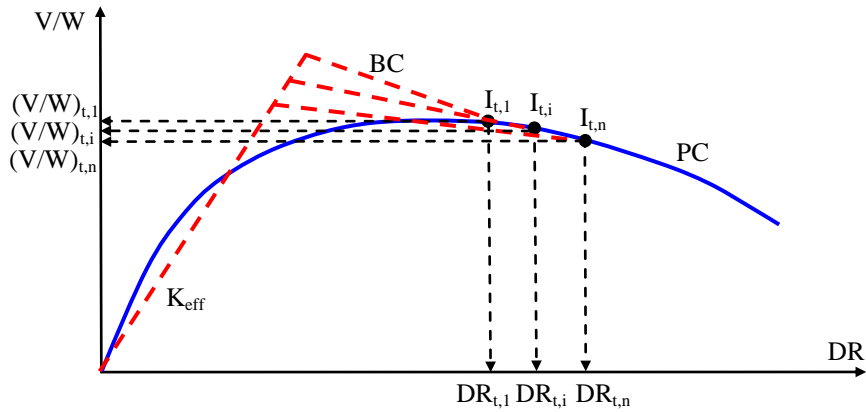
Slika 5.22 Određivanje  $D_{y,BC}$  i  $V_{y,BC}$  primenom iteracija [43]

U ovoj fazi iteracija koeficijenti  $C_1$  i  $C_3$  se izjednačavaju sa 1, dok se u narednoj fazi subiteracija  $C_1$  i  $C_3$  određuju prema izrazima (5.40) i (5.43). U drugoj fazi se sprovodi subiterativna procedura za  $D_t$  i  $V_t$  na osnovu prethodno određenih  $D_{y,BC}$  i  $V_{y,BC}$  prema kriterijumu (5.59) (slika 5.23). Procedura sprovođenja iteracija i subiteracija sprovodi se u nekoliko koraka, pri čemu se prvo određuje maksimalna vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta iz NSPA analize:

$$V_{max} = [V_0, V_n]_{max}, \quad (V/W)_{max} = \frac{V_{max}}{W}, \quad (5.63)$$

i adekvatno pomeranje  $D_{adeq}$ :

$$D_{adeq} = PC \cap V_{max}, \quad DR_{adeq} = \frac{D_{adeq}}{H}. \quad (5.64)$$



Slika 5.23 Određivanje  $D_t$  i  $V_t$  primenom subiteracija [43]

Zatim se određuje maksimalna vrednost ukupne smičuće sile za bilinearni model  $V_{max,BC}$ :

$$V_{max,BC} = V_{max} + \frac{\Delta V_{max} V_{max}}{100}, \quad (V/W)_{max,BC} = \frac{V_{max,BC}}{W}, \quad (5.65)$$

i adekvatno pomeranje  $D_{adeq,BC}$ :

$$D_{adeq,BC} = \frac{V_{max,BC}}{K_{eff}}, \quad DR_{adeq,BC} = \frac{D_{adeq,BC}}{H}. \quad (5.66)$$

Povećanje maksimalne vrednosti ukupne smičuće sile je iz razloga što sila na granici tečenja bilinearnog sistema  $V_{y,BC}$  može biti znatno veća od maksimalne sile dobijene NSPA analizom  $V_{y,PC}$ . Ovo je gotovo obavezan slučaj kod NSPA *pushover* krivih sa negativnom krutošću u nelinearnom domenu  $K_{n,PC} < 0$ . Veličina inkrementa pomeranja se određuje iz razlike adekvatnog pomeranja  $D_{adeq,BC}$  za  $V_{max,BC}$  i početnog pomeranja  $D_0$  prema:

$$\Delta D = \frac{D_{adeq,BC} - D_0}{N_{it}}, \quad (5.67)$$

dok se inkrement sile određuje iz:

$$\Delta V = \frac{V_{max,BC} - V_0}{N_{it}}, \quad (5.68)$$

gde je  $\Delta D$  inkrement pomeranja,  $\Delta V$  inkrement sile,  $N_{it}$  broj iteracija. Nulta i prva iteracija, pomeranja na granici tečenja bilinearnog sistema, se proračunavaju prema:

$$D_{y,BC}^{(1,0)} = D_0, \quad D_{y,BC}^{(1,1)} = D_0 + \Delta D, \quad (5.69)$$

a sile prema:

$$V_{y,BC}^{(1,0)} = V_0, \quad V_{y,BC}^{(1,1)} = V_0 + \Delta V. \quad (5.70)$$

Prvi indeks u  $D_{y,BC}^{(i,i)}$  i  $V_{y,BC}^{(i,i)}$  se odnosi na broj iteracije prve iterativne procedure (glavni iterativni postupak), a drugi indeks na broj iteracije druge iterativne procedure (subiteracije). Kao što je već objašnjeno, u prvom postupku sa subiteracijama se za modifikacione koeficijente  $C_1$  i  $C_3$  uzimaju jedinične vrednosti:

$$C_1 = C_1^{(1)} = 1, \quad C_3 = C_3^{(1)} = 1. \quad (5.71)$$

Ciljno pomeranje se za prvi postupak sa iteracijama određuje kao:

$$D_t^{(1)} = C_0 C_2 \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} g, \quad (5.72)$$

a globalni drift:

$$DR_t^{(1)} = \frac{D_t^{(1)}}{H}, \quad (5.73)$$

dok se vrednost ukupne smičuće sile za prvi postupak sa iteracijama određuje prema:

$$V_t^{(1)} = PC \cap D_t^{(1)}, \quad (5.74)$$

a relativna vrednost ukupne smičuće sile iz:

$$(V/W)_t^{(1)} = \frac{V_t^{(1)}}{W}. \quad (5.75)$$

Određivanje energije deformacije  $E_B^{(1,1)}$  realizovane preko bilinearne krive sprovodi se prema:

$$E_B^{(1,1)} = 0.5 \left( V_{y,BC}^{(1,1)} D_{y,BC}^{(1,1)} + \left( V_{y,BC}^{(1,1)} + V_t^{(1)} \right) \left( D_t^{(1)} - D_{y,BC}^{(1,1)} \right) \right), \quad (5.76)$$

dok se određivanje energije deformacije  $E_{NSPA}^{(1,1)}$  dobijene iz NSPA analize sprovodi prema:

$$E_{NSPA}^{(1)} = \left[ \sum_{i=1}^{t-1} \frac{(V_i + V_{i-1})}{2} (D_i - D_{i-1}) \right] + \frac{(V_t^{(1)} + V_{t-1})}{2} (D_t^{(1)} - D_{t-1}), \quad (5.77)$$

a razlika energija deformacija  $\Delta E^{(1,1)}$  prema:

$$\Delta E^{(1,1)} = \frac{|E_{NSPA}^{(1)} - E_B^{(1,1)}|}{E_{NSPA}^{(1)}} (\%). \quad (5.78)$$

Naredne iteracije za pomeranje i silu na granici tečenja se nastavljaju dodavanjem inkrementa pomeranja i opterećenja na prethodne vrednosti:

$$D_{y,BC}^{(1,i)} = D_{y,BC}^{(1,i-1)} + \Delta D, \quad V_{y,BC}^{(1,i)} = V_{y,BC}^{(1,i-1)} + \Delta D, \quad (5.79)$$

sve dok se ne ispuni uslov da je poslednja iteracija  $i_{\Delta D}^{(i=n)}$  i  $i_{\Delta V}^{(i=n)}$ . Energija realizovana NSPA analizom je konstantna i ne proračunava se po iteracijama prvog iterativnog postupka, a energija realizovana bilinearnim modelom se određuje iterativno:

$$E_B^{(1,i)} = 0.5(V_{y,BC}^{(1,i)} D_{y,BC}^{(1,i)} + (V_{y,BC}^{(1,i)} + V_t^{(1)}) (D_t^{(1)} - D_{y,BC}^{(1,i)})), \quad (5.80)$$

dok je razlika energija po iteracijama:

$$\Delta E^{(1,i)} = \frac{|E_{NSPA}^{(1)} - E_B^{(1,i)}|}{E_{NSPA}^{(1)}} (\%). \quad (5.81)$$

Određivanje merodavnog ciljnog pomeranja za prvi postupak sa iteracijama sprovodi se tako što se prvo odredi minimalna vrednost razlika energija iz svih iteracija:

$$\Delta E_{min}^{(1)} = [\Delta E^{(1,1)}, \Delta E^{(1,n)}]_{min}, \quad (5.82)$$

a ostale vrednosti se uzimaju iz baze podataka proračunatih iteracija (DBget):

$$D_{y,BC}^{(1)} = \text{DBGet}(D_{y,BC}, \Delta E, f(\Delta E_{min}^{(1)})), \quad DR_{y,BC}^{(1)} = \frac{D_{y,BC}^{(1)}}{H}, \quad (5.83)$$

$$V_{y,BC}^{(1)} = \text{DBGet}(V_{y,BC}, \Delta E, f(\Delta E_{min}^{(1)})), \quad (V/W)_{y,BC}^{(1)} = \frac{V_{y,BC}^{(1)}}{W}, \quad (5.84)$$

$$E_B^{(1)} = \text{DBget}(E_B, \Delta E, f(\Delta E_{min}^{(1)})). \quad (5.85)$$

U opštem slučaju se može napisati da se  $D_{y,BC}$  i  $V_{y,BC}$  nalaze u domenu koji je ograničen presekom krivih:

$$(D_{y,BC}, V_{y,BC}) = f(K_{eff} \cap V_{max}) \cap (K_{eff} \cap PC). \quad (5.86)$$

Nakon završenog prvog postupka sa iteracijama, dalje se nastavlja proračun sa subiteracijama kod kojih se sada proračunavaju koeficijenti  $C_1$  i  $C_3$ . Koeficijent  $R^{(i)}$  se određuje prema:

$$R^{(i)} = \frac{S_a}{V_{y,BC}^{(i-1)}/W} C_m, \quad (5.87)$$

dok se koeficijent  $C_1^{(i)}$  određuje prema izrazima (5.40) i (5.41), a koeficijent  $C_3^{(i)}$  prema izrazima (5.42) i (5.43). Na osnovu prethodno određenih koeficijenata nivo ciljnog pomeranja se proračunava prema izrazu:



$$D_t^{(i)} = C_0^{(i)} C_1^{(i)} C_2^{(i)} C_3^{(i)} S_a \frac{T_{eff}^2}{4\pi^2} g. \quad (5.88)$$

Određivanje energije deformacije realizovane preko bilinearne krive za ostale iteracije se sprovodi se prema:

$$E_B^{(i,1)} = 0.5(V_{y,BC}^{(i,1)} D_{y,BC}^{(i,1)} + (V_{y,BC}^{(i,1)} + V_t^{(i)})(D_t^{(i)} - D_{y,BC}^{(i,1)})), \quad (5.89)$$

dok se određivanje energije deformacije dobijene iz NSPA analize za ostale iteracije sprovodi prema:

$$E_{NSPA}^{(i)} = \left[ \sum_{i=1}^{t-1} \frac{(V_i + V_{i-1})}{2} (D_i - D_{i-1}) \right] + \frac{(V_t^{(i)} + V_{t-1})}{2} (D_t^{(i)} - D_{t-1}), \quad (5.90)$$

a razlika energija po iteracijama se sada proračunava kao:

$$\Delta E^{(i,i)} = \frac{|E_{NSPA}^{(i)} - E_B^{(i,i)}|}{E_{NSPA}^{(i)}} (\%). \quad (5.91)$$

Vrednosti pomeranja i sile na granici tečenja bilinearnog sistema uzimaju se iz baze podataka proračunatih iteracija prema:

$$D_{y,BC}^{(i)} = \text{DBGet}(D_{y,BC}, \Delta E, f(\Delta E_{min}^{(i)})), \quad DR_{y,BC}^{(i)} = \frac{D_{y,BC}^{(i)}}{H}, \quad (5.92)$$

$$V_{y,BC}^{(i)} = \text{DBGet}(V_{y,BC}, \Delta E, f(\Delta E_{min}^{(i)})), \quad (V/W)_{y,BC}^{(i)} = \frac{V_{y,BC}^{(i)}}{W}. \quad (5.93)$$

Konačne vrednosti modifikacionih koeficijena i nivoa ciljnog pomeranja dobijaju se na kraju svih sprovedenih iteracija za iterativnu i subiterativnu proceduru. Postupak sa iteracijama zahteva znatno veći broj iteracija u odnosu na postupak sa subiteracijama.

Određivanje realizovane duktilnosti za nivo ciljnog pomeranja  $\mu_t$  i maksimalne raspoložive duktilnosti sistema  $\mu_{max}$  moguće je direktnim unosom u *Nonlin Quake* TD pomeranja na granici tečenja sistema  $D_{y,PC}$  NSPA analize:

$$DR_{y,PC} = \frac{D_{y,PC}}{H}, \quad (5.94)$$

$$V_{y,PC} = \text{PC} \cap D_{y,PC}, \quad (V/W)_{y,PC} = \frac{V_{y,PC}}{W}, \quad (5.95)$$

ili preko  $K_{eff}$ :

$$D_{y,PC} = \text{PC} \cap K_{eff} \quad \text{za} \quad K_{eff} \neq K_e, \quad (5.96)$$

$$V_{y,PC} = K_{eff} D_{y,PC}, \quad (5.97)$$

ili proračunom pomeranja na granici tečenja sistema  $D_{y,PC}$  prema [189]:

$$D_{y,PC} = DR_y H_{eff}, \quad DR_y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_b}{h_b}. \quad (5.98)$$

Efektivna visina  $H_{eff}$  se proračunava prema izrazu:

$$H_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}, \quad (5.99)$$

a projektno pomeranje  $i$ -tog sprata  $\Delta_i$ :

$$\Delta_i = \delta_i \left( \frac{\Delta_c}{\delta_c} \right), \quad (5.100)$$

pri čemu važi:

$$\begin{aligned} n \leq 4: & \quad \delta_i = \frac{H_i}{H} \\ n > 4: & \quad \delta_i = \frac{4}{3} \left( \frac{H_i}{H} \right) \left( 1 - \frac{H_i}{4H} \right), \end{aligned} \quad (5.101)$$

dok za regularne okvirne sisteme važi:

$$H_{eff} = 0.7H, \quad (5.102)$$

gde je  $\varepsilon_y$  dilatacija čelika na granici tečenja,  $L_b$  dužina grede računajući od osnih rastojanja stubova,  $h_b$  visina grede,  $m_i$  masa  $i$ -tog sprata,  $H_i$  visina  $i$ -tog sprata. Maksimalno pomeranje  $D_{max}$  i odgovarajuća ukupna smičuća sila  $V_{adeq}$  određuju se prema:

$$D_{max} = [D_0, D_n]_{max}, \quad DR_{max} = \frac{D_{max}}{H}, \quad (5.103)$$

$$V_{adeq} = PC \cap D_{max}, \quad (V/W)_{adeq} = \frac{V_{adeq}}{W}, \quad (5.104)$$

tako da je realizovana duktilnost  $\mu_t$  za nivo ciljnog pomeranja:

$$\mu_t = \frac{D_t}{D_y}, \quad (5.105)$$

a maksimalna raspoloživa duktilnosti sistema  $\mu_{max}$ :

$$\mu_{max} = \frac{D_{max}}{D_y}. \quad (5.106)$$

Takođe, bitni parametri za procenu seizmičkih performansi sistema su:

- sekantna krutost za nivo ciljnog pomeranja  $K_{t,sec}$ :

$$K_{t,sec} = \frac{V_t}{D_t}, \quad (5.107)$$

- sekantan period vibracija za nivo ciljnog pomeranja  $T_{t,sec}$ :

$$T_{t,sec} = T_e \sqrt{\frac{K_e}{K_{t,sec}}}, \quad (5.108)$$

- optimalan period vibracija  $T_{e,opt}$  prema FEMA 356 [80]:

$$T_{e,opt} = 0.018(3.28H)^{0.9}, \quad (5.109)$$

- minimalno potrebno pomeranje da bi se realizovalo povoljno duktilno ponašanje sistema  $D_{d,min}$ :

$$D_{d,min} = 1.5D_t, \quad DR_{d,min} = \frac{D_{d,min}}{H}, \quad (5.110)$$

- indeks oštećenja (konceptualni) za nivo ciljnog pomeranja  $DI_t$  [188]:

$$DI_t = \frac{D_t - D_{y,PC}}{D_{max} - D_{y,PC}}. \quad (5.111)$$

Procedura određivanja očekivanog globalnog  $DR_{t,exp}$  i međuspratnog drifta  $IDR_{t,exp}$  sprovodi se primenom modifikovane beta raspodele [220]:

$$DR_{t,exp} = \frac{DR_{min} + 4DR_t + DR_{max}}{6}, \quad IDR_{t,exp} = \frac{IDR_{min} + 4IDR_t + IDR_{max}}{6}, \quad (5.112)$$

gde se  $DR_{min}$  i  $IDR_{min}$  odnosi na minimalni globalni drift, odnosno međuspratni drift, a  $DR_{max}$  i  $IDR_{max}$  na maksimalni globalni drift, odnosno međuspratni drift u okviru dva uzastopna performansna nivoa:

$$DR_{min} < DR_t \leq DR_{max}, \quad IDR_{min} < IDR_{t,m} \leq IDR_{max}. \quad (5.113)$$

$IDR_{t,m}$  je prosečna vrednost međuspratnog drifta, a određuje se preko globalnog drifta:

$$IDR_{t,m} = \left( \frac{D_t}{H} \right) / N_{st}. \quad (5.114)$$

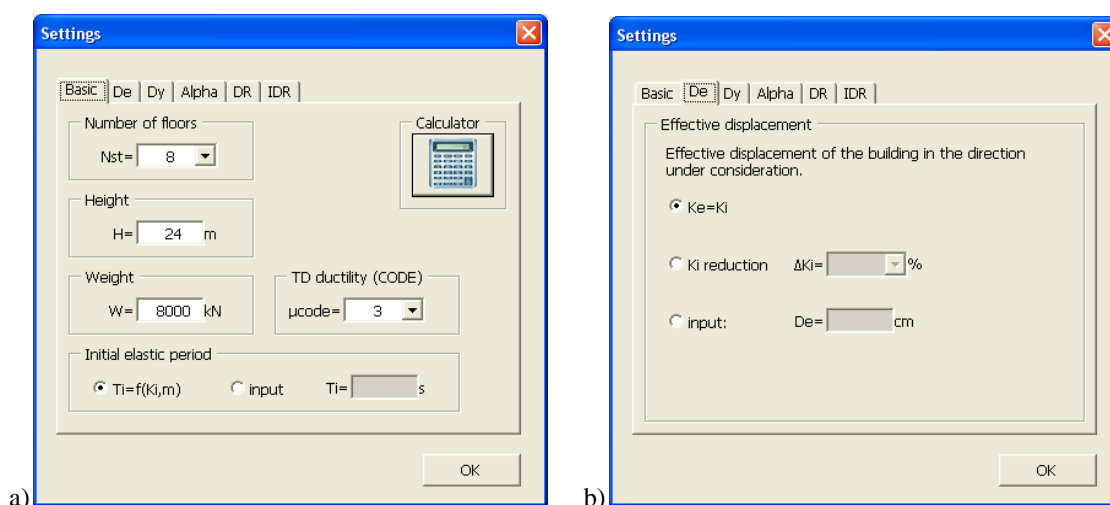
Određivanje minimalnih i maksimalnih vrednosti globalnih i međuspratnih driftova sprovodi se tako što se prvo odredi kom performansnom nivou pripada ciljno pomeranje. U slučaju globalnog drifta, minimalne i maksimalne vrednosti su prikazane u (5.35), dok za međuspratne driftove važi [64]:

$$\begin{aligned} IDR_{IO,min} &\leq 0.2\% & IDR_{IO,max} &\leq 0.5\% & P_{50\%/50} \\ IDR_{LS,min} &\leq 0.5\%, & IDR_{LS,max} &\leq 1.5\%, & \text{za } P_{10\%/50} \\ IDR_{CP,min} &\leq 1.5\% & IDR_{CP,max} &\leq 3\% & P_{2\%/50} \end{aligned} \quad (5.115)$$

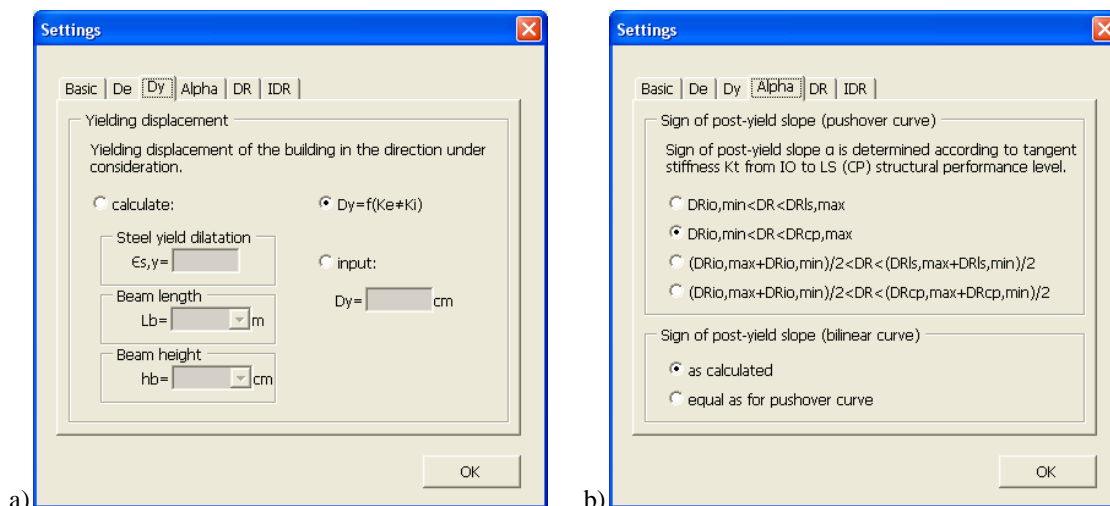
Na osnovu prethodno razvijene IDCM metode može se konstatovati da se nivo ciljnog pomeranja određuje dvostrukom iterativnom procedurom. Prva iterativna procedura se sprovodi simultano po silama i po pomeranju inkrementalnim priraštajem od nultih početnih do maksimalnih vrednosti. Druga iterativna procedura se sprovodi korekcijom dobijenog rešenja za nivo ciljnog pomeranja po *pushover* krivi. Kod dvostrukog iterativnog algoritma se prvo sprovodi prva iterativna procedura po svim iteracijama, a zatim se iteriraju vrijednosti prema drugoj iterativnoj proceduri za jednu iteraciju. Kontinuitet algoritma se uspostavlja sukcesivnim sprovođenjem prethodno

opisanog toka procedura. Unos nepoznatih vrednosti i selekcija opcija u *Nonlin Quake* TD izvršava se preko korisničkih interfejsa:

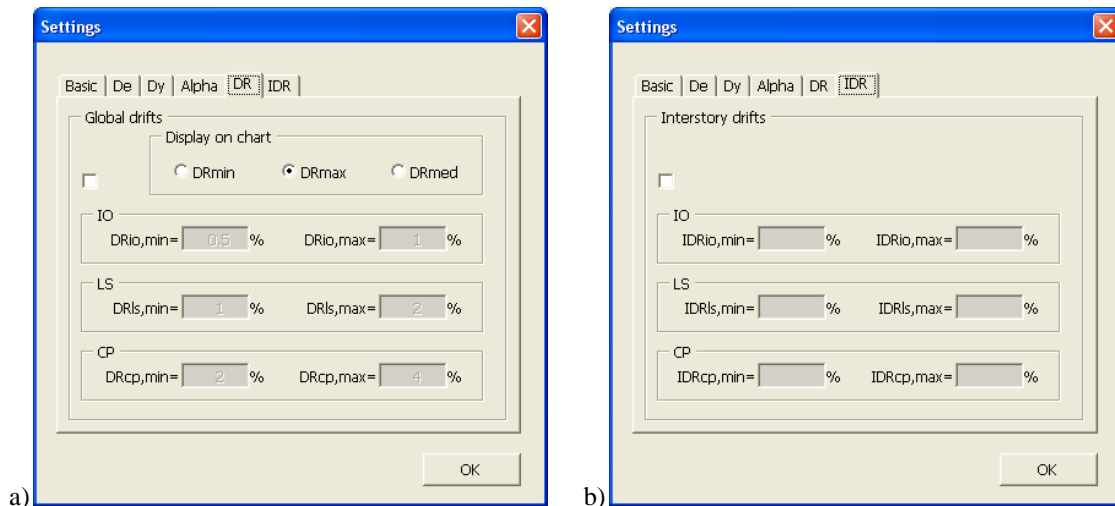
- interfejsi za definisanje osnovnih parametara  $N_{st}$ ,  $H$ ,  $W$ ,  $T_e$  i efektivnog pomeranja  $D_{eff}$  (slika 5.24),
- interfejsi za definisanje pomeranja na granici tečenja  $D_y$ , odnos krutosti u nelinearnoj zoni ponašanja prema efektivnoj krutosti za realan odgovor zgrade  $\alpha_{PC}$  i bilinearni model  $\alpha_{BC}$  (slika 5.25),
- interfejsi za definisanje performansnih nivoa globalnog drifta  $DR$  i međuspratnog drifta  $IDR$  (slika 5.26).



Slika 5.24 Interfejsi za definisanje: a) osnovnih parametara  $N_{st}$ ,  $H$ ,  $W$ ,  $T_e$ , b) efektivnog pomeranja  $D_{eff}$



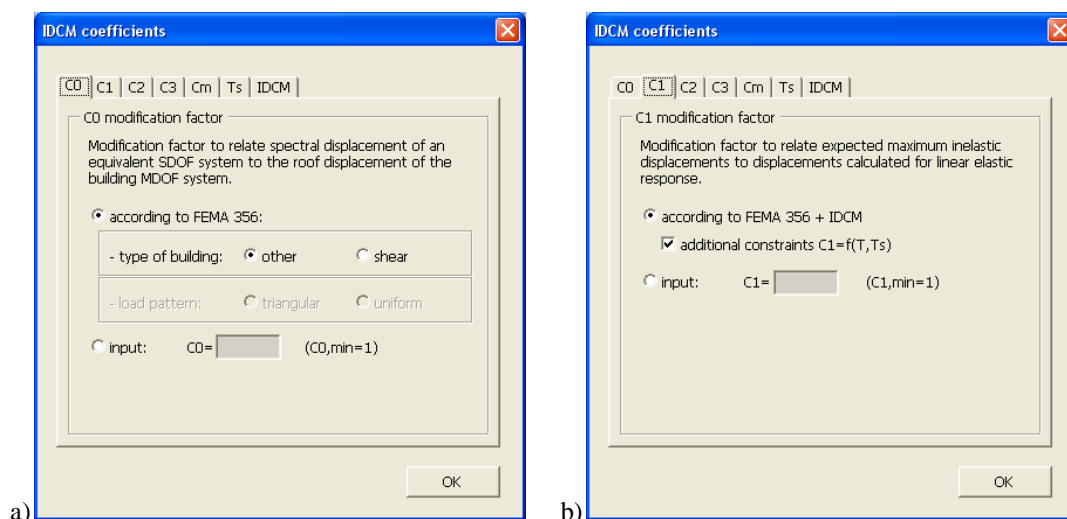
Slika 5.25 Interfejsi za definisanje: a) pomeranje na granici tečenja  $D_y$ , b) odnos krutosti u nelinearnoj zoni ponašanja prema efektivnoj krutosti za realan odgovor zgrade  $\alpha_{PC}$  i bilinearni model  $\alpha_{BC}$



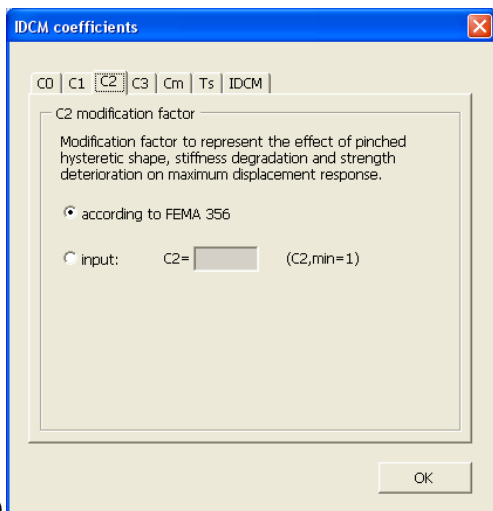
Slika 5.26 Interfejsi za definisanje performansnih nivoa: a) globalni drift  $DR$ , b) međuspratni drift  $IDR$

U drugu grupu parametara koji se unose pripadaju modifikacioni koeficijenti i parametri iteracija:

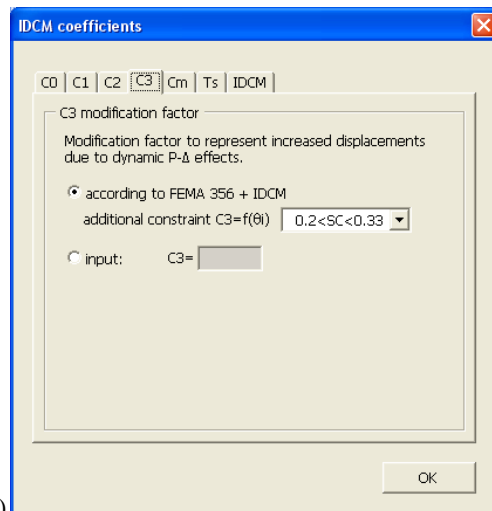
- interfejsi za definisanje koeficijenata  $C_0$  i  $C_1$  (slika 5.27),
- interfejsi za definisanje koeficijenata  $C_2$  i  $C_3$  (slika 5.28),
- interfejsi za definisanje koeficijenta  $C_m$  i karakterističnog perioda vibracija na spektru odgovora  $T_S$  (slika 5.29),
- interfejs za definisanje parametara IDCM metode: broja iteracija  $N_{it}$ , broja subiteracija  $N_{it,sub}$  i dodatne maksimalne ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $\Delta V_{max}$  (slika 5.30).



Slika 5.27 Interfejsi za definisanje koeficijenata: a)  $C_0$ , b)  $C_1$

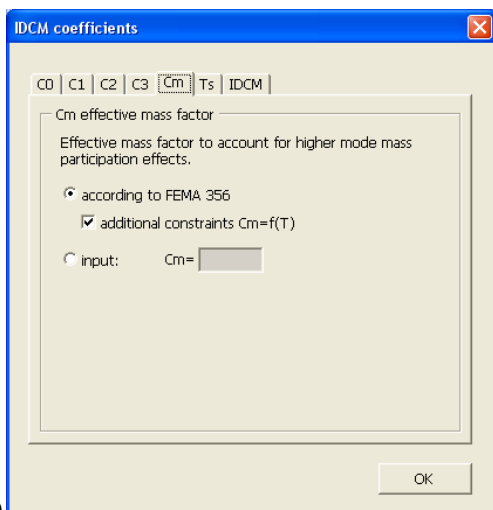


a)

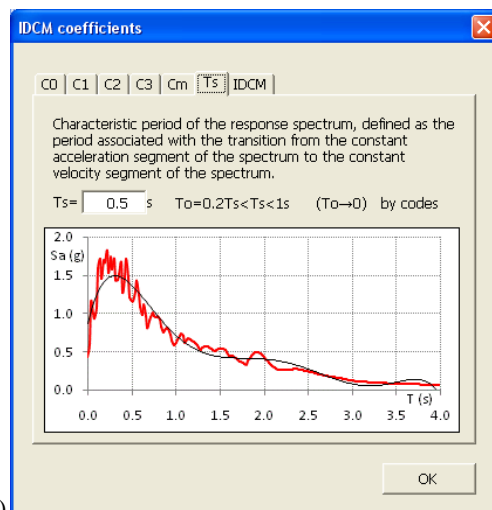


b)

Slika 5.28 Interfejsi za definisanje koeficijenta: a)  $C_2$ , b)  $C_3$

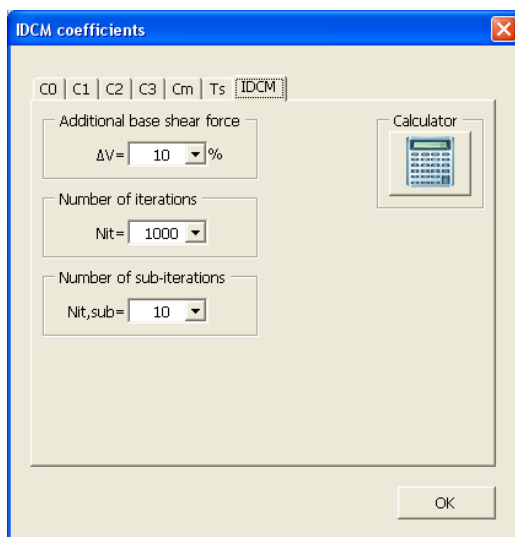


a)



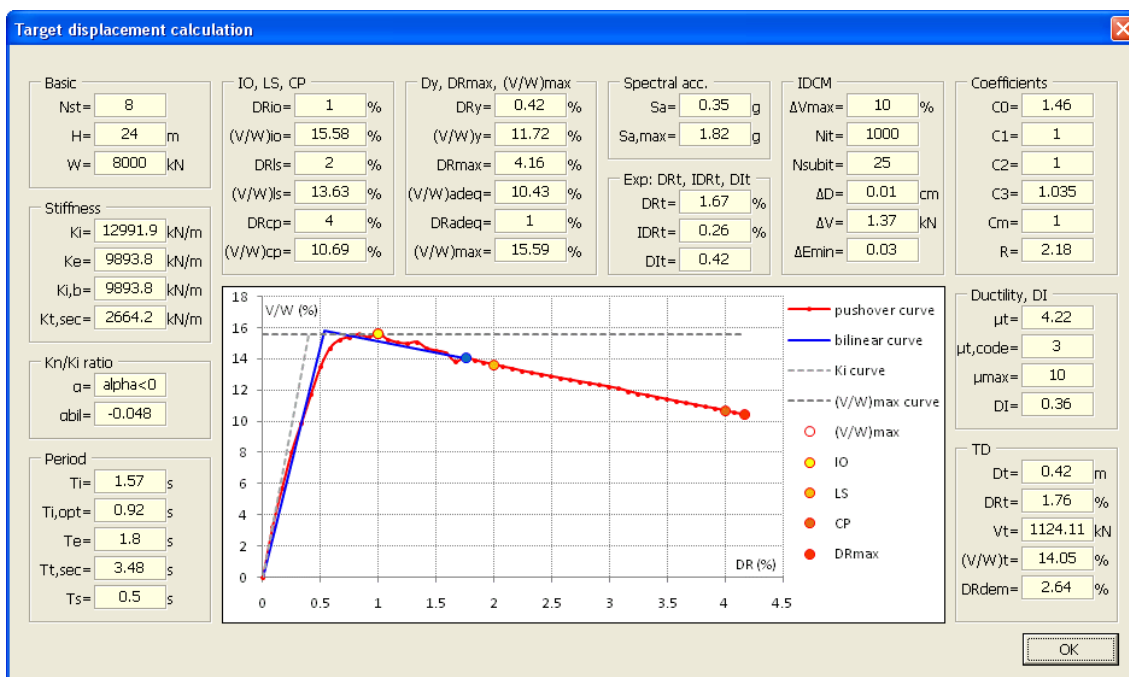
b)

Slika 5.29 Interfejsi za definisanje koeficijenta: a)  $C_m$ , b) karakterističnog perioda vibracija  $T_S$

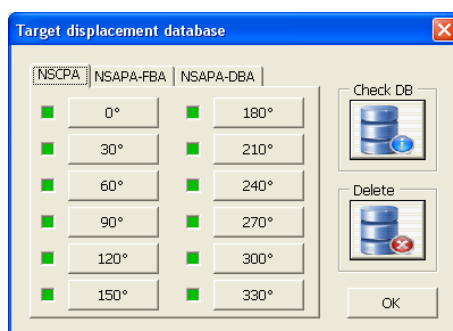


Slika 5.30 Interfejs za definisanje parametara IDCM metode  $N_{it}$ ,  $N_{it,sub}$  i  $\Delta V_{max}$

Na slici 5.31 su prikazani svi proračunati parametri IDCM metode i određen nivo ciljnog pomeranja, dok je na slici 5.32 prikazan interfejs baze podataka ciljnih pomeranja po uglovima  $\theta_i$  i NSPA analizama.



Slika 5.31 Pregled svih proračunatih parametara kod određivanja nivoa ciljnog pomeranja



Slika 5.32 Interfejs baze podataka ciljnih pomeranja po uglovima  $\theta_i$  i NSPA analizama

### 5.3.2. TESTIRANJE NSPA ANALIZE CILJNOG POMERANJA

Testiranje razvijene IDCM metode i implementirane u *Nonlin Quake TD* za analizu ciljnog pomeranja sprovedeno je u cilju analize performansi, verifikacije i komparacije dobijenih rešenja sa NDA rešenjima. Prvo su razmatrane vrednosti koeficijenta  $C_3$  za 30 NSPA *pushover* krivih sa  $K_n < 0$ , a koje su sortirane u dve grupe. U prvu grupu spadaju NSPA *pushover* krive generisane za različite vrednosti inicijalne elastične krutosti  $K_e$ , nosivosti i duktilnosti  $\mu$  (slika 5.33.a):

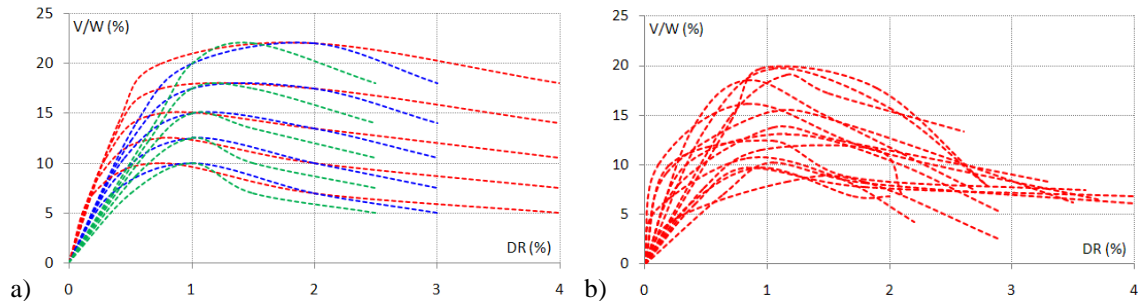
$$\begin{aligned}
DR_y &= 0.2 + 0.05i & i &= 0,1,\dots,10 \\
DR_{max} &= 0.5i(DR_{IO,max} + DR_{IO,min}) & i &= 1,1.333 \\
DR_{LS} &= DR_{LS,max} - i & i &= 0,1,1.5
\end{aligned} \tag{5.116}$$

$$\begin{aligned}
DR_{CP} &= DR_{CP,max} - i & i &= 0,1,1.5 \\
(V/W)_y &= 0.7(V/W)_{max} & & \\
(V/W)_{max} &= 10 + 2.5j & j &= 0,1,\dots,4 \\
(V/W)_{LS} &= 6 + 4j & j &= 0,1,\dots,4 \\
(V/W)_{CP} &= 3 + 4j & j &= 0,1,\dots,4
\end{aligned} \tag{5.117}$$

dok u drugu grupu spadaju NSPA *pushover* krive generisane primenom *random* funkcije uz uvažavanje granica za L, N i C domen (slika 5.33.b):

$$\begin{aligned}
DR_y &= 0.1 + 0.6rand() \\
DR_{max} &= 0.7(DR_{IO,max} + DR_{IO,min})(0.8 + 0.3rand()) \\
DR_{LS} &= 1.5 + 0.5rand()
\end{aligned} \tag{5.118}$$

$$\begin{aligned}
DR_{CP} &= 2 + 2rand() \\
(V/W)_y &= (0.05 + 0.3rand())(V/W)_{max} \\
(V/W)_{max} &= 7.5 + 12.5rand() \\
(V/W)_{LS} &= (V/W)_{max} - 0.3rand()(V/W)_{max} \\
(V/W)_{CP} &= (V/W)_{max} - (0.3 + 0.4rand())(V/W)_{max}
\end{aligned} \tag{5.119}$$



Slika 5.33 Generisane NSPA *pushover* krive: a) standardizovani modeli odgovora, b) *random* funkcija odgovora [43]

Koeficijentom  $C_3$  se uvode uticaji dinamičkih  $P-A$  efekata, a s obzirom da su isti značajni kod NSPA *pushover* krivih sa  $K_n < 0$  to je i istraživanje sprovedeno za ove tipove krivih. IDCM metodom su određene vrednosti koeficijenta  $C_3$  za prethodno definisane NSPA *pushover* krive i to za ukupno 180 IDCM analiza (slika 5.34). Zatim je sprovedena serija nelinearnih regresionih analiza sa različitim tipovima funkcija. Najoptimalnije rešenje je postignuto sa eksponencijalnom funkcijom, s obzirom da je realizovana najveća vrednost koeficijenta korelacije. Koeficijent korelacije  $r^2$  je određen prema [59]:



$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{3,i} - C_{3,m})(C_{3,Reg,i} - C_{3,Reg,m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_{3,i} - C_{3,m})^2 \sum_{i=1}^n (C_{3,Reg,i} - C_{3,Reg,m})^2}}, \quad (5.120)$$

dok je standardna devijacija određena iz:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{3,i} - C_{3,m})^2}{n-1}}, \quad (5.121)$$

gde je  $C_{3,i}$  diskretna vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata prema IDCM metodi,  $C_{3,m}$  srednja vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata prema IDCM metodi,  $C_{3,Reg,i}$  diskretna vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata regresionom analizom,  $C_{3,Reg,m}$  srednja vrednost modifikacionog koeficijenta proračunata regresionom analizom. Primenom regresione analize za eksponencijalnu funkciju izveden je izraz za koeficijent  $C_3$  u funkciji spektralnog ubrzanja  $S_a$ , tako da je za standardizovani model odgovora NSPA *pushover* krive dobijeno:

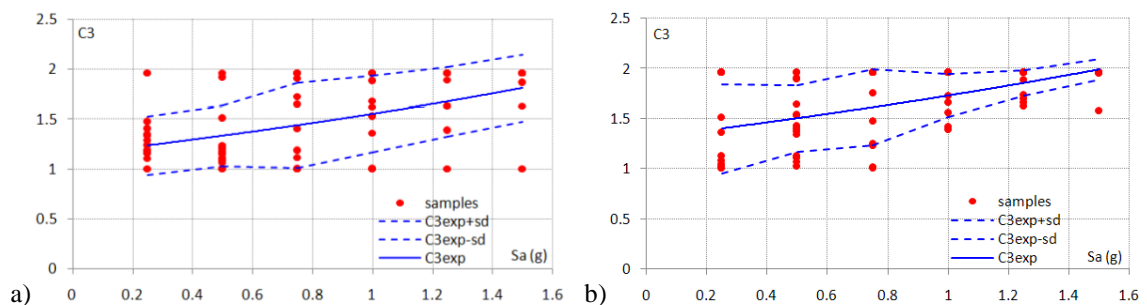
$$C_3 = 1.146e^{0.304S_a}, \quad (5.122)$$

dok je za *random* funkciju odgovora NSPA *pushover* krive dobijeno:

$$C_3 = 1.304e^{0.282S_a}. \quad (5.123)$$

Konačno, za sve modele NSPA *pushover* krivih izveden je izraz za koeficijent  $C_3$ , a koji glasi:

$$C_3 = 1.222e^{0.293S_a}. \quad (5.124)$$



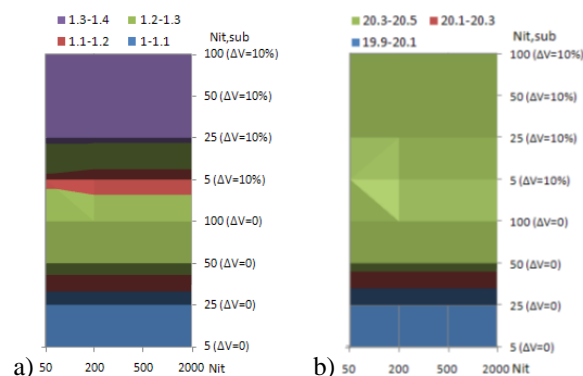
Slika 5.34 Proračunate vrednosti koeficijenta  $C_3$  primenom *Nonlin Quake* TD za NSPA *pushover* krive: a) standardizovane modele odgovora, b) *random* funkciju odgovora [43]

U odnosu na [168] gde je za istraživanje primenjen bilinearni elastoplastični sistem, za potrebe ovog istraživanja je primenjeno 30 NSPA *pushover* krivih realnih i simuliranih odgovora zgrade kao MDOF sistema, tako da se sa izrazi (5.122)÷(5.124) mogu koristiti direktno u praktične svrhe.

U drugom delu istraživanja razmatran je 8x4 2D model okvira, kod koga je za IDCM metodu sprovedena parametarska analiza (40 analiza) broja iteracija  $N_{it}$  broja iteracija  $N_{it,sub}$  i dodatne maksimalne ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $\Delta V_{max}$ :

$$\begin{aligned} N_{it} &\in (50, 200, 500, 2000) \\ N_{it,sub} &\in (5, 25, 50, 100) \quad . \\ \Delta V_{max} &\in (0, 10) \end{aligned} \quad (5.125)$$

Određivanje preliminarnog broja iteracija prvog iterativnog postupka  $N_{it}$  moguće je sprovesti i razmatrajući vrednost ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $V$ . Ukoliko se usvoji da je minimalan inkrement priraštaja sile  $m$ , tada je potreban broj iteracija  $N_{it}$  jednak  $V/m$ . Takođe, određivanje broja iteracija prvog iterativnog postupka  $N_{it}$  moguće je sprovesti i razmatrajući vrednost maksimalnog pomeranja objekta  $D_{max}$ . Ukoliko se usvoji da je minimalan inkrement priraštaja pomeranja  $n$ , tada je potreban broj iteracija  $N_{it}$  jednak  $D_{max}/n$ . Obimnim istraživanjem pokazalo se da je merodavniji kriterijum kada se  $N_{it}$  određuje iz odnosa  $V/m$ . Analogiju u određivanju preliminarnog broja iteracija prvog iterativnog postupka  $N_{it}$  nije moguće primeniti i za drugi iterativni postupak  $N_{it,sub}$ . U ovom slučaju parametarska analiza i empirijski pristup su bili pouzdanije rešenje. Ukupno je sprovedeno 32 IDCM analize ciljnog pomeranja. Prethodno je NDA analizom određen nivo ciljnog pomeranja okvira  $DR_{t,NDA}=1.39\%$  i  $(V/W)_{t,NDA}\approx 20\%$  za zemljotres *Loma Prieta* LP89. Na slici 5.35.a su prikazane proračunate vrednosti globalnog drifta za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$ , dok su na slici 5.35.b prikazane proračunate relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta za nivo ciljnog pomeranja  $(V/W)_t$  prema IDCM metodi.



Slika 5.35 Parametarska analiza za varijabilno  $N_{it}$ ,  $N_{it,sub}$ ,  $\Delta V_{max}$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$  [43]

Domen optimalnog broja iteracija  $N_{it}$  i  $N_{it,sub}$  je utvrđen komparacijom globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,IDCM}$  i  $DR_{t,NDA}$ , i odgovarajuće relativne vrednosti

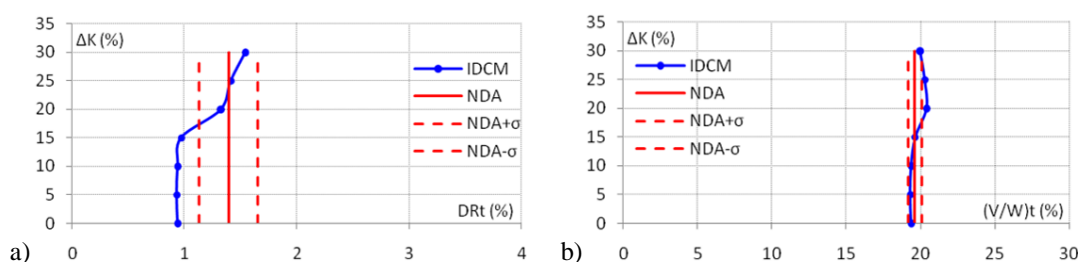
ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $(V/W)_{t,IDCM}$  i  $(V/W)_{t,NDA}$  parametarske IDCM metode i NDA analize:

$$\begin{aligned} N_{it} &\in (50, 2000) \\ N_{it,sub} &\in (25, 100) \end{aligned} \Rightarrow 1250 \leq \Sigma N_{it} \leq 20000. \quad (5.126)$$

Drugi parametar koji značajno utiče na nivo ciljnog pomeranja je vrednost redukcije inicijalne elastične krutosti  $\Delta K$ , a preko koga se određuje  $K_{eff}$  (slika 5.36). Parametarska IDCM metoda je sprovedena za vrednosti  $\Delta K$ :

$$\Delta K = (0; 5; 10; 15; 20; 25; 30)\%, \quad (5.127)$$

a kao merodavan, razmatran je nivo ciljnog pomeranja prema NDA analizi.

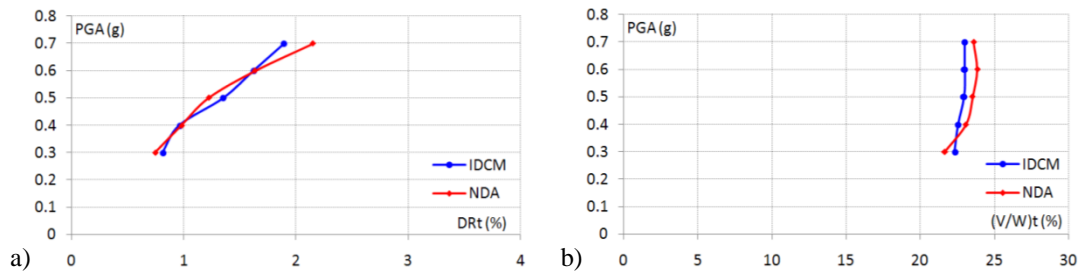


Slika 5.36 Parametarska analiza za varijabilno  $\Delta K$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$  [43]

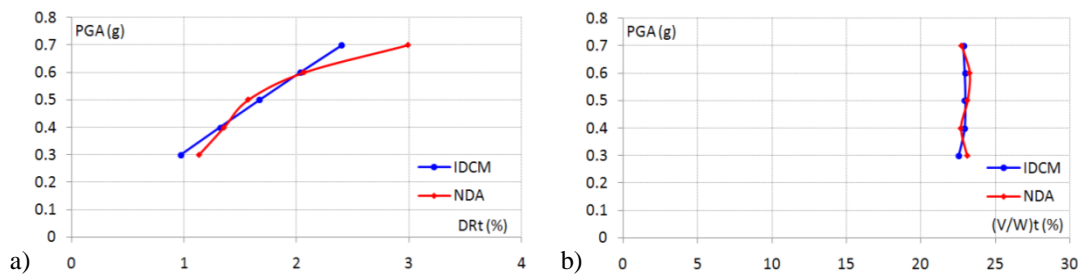
Generalna konstatacija je da je kod NSPA *pushover* krivih sa  $K_n < 0$  preporučljivo koristiti procentualno povećanje maksimalne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta  $\Delta V_{max}$ , a takođe je preporučljivo uvesti razliku između inicijalne i efektivne krutosti  $K_e \neq K_{eff}$  u određivanju nivoa ciljnog pomeranja. U određenim istraživanjima se usvaja  $K_{eff} = K_e$ , dok se u postupku bilinearizacije mogu očekivati manji nivoi ciljnog pomeranja.

U trećem delu istraživanja razmatran je SDOF model kod koga je za IDCM metodu takođe sprovedena parametarska analiza direktno skalirajući po *PGA*. Analize su sprovedene za *Loma Prieta* LP89 dvokomponentalni akcelrogram za koji su generisane međukomponente akcelograma za inkrementalni priraštaj ugla od  $\Delta\theta = 30^\circ$ . Analogno broju međukomponenti akcelograma generisan je i isti broj *pushover* krivih iz NSPA analiza i određena su ciljna pomeranja iz IDCM metode. Na slikama 5.37÷5.42 su prikazani fragmenti NSPA i NDA *pushover* krivih generisani kao nivoi ciljnih pomeranja i realizovani parametarskom analizom. U slučaju NDA analize fragmenti su delovi INDA *pushover* krive (INDA - *Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*), dok u slučaju NSPA analize fragmenti su delovi NSPA *pushover* krive za nivo skaliranja  $PGA = 0.3 \div 0.7g$ . Ukupno je sprovedeno 60 IDCM i NDA analiza.

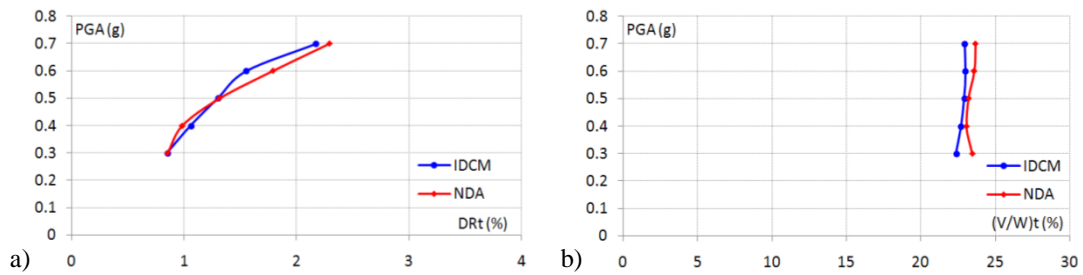
Evidentno je veoma zadovoljavajuće slaganje vrednosti driftova realizovanih prema IDCM i NDA analizi, pri gotovo svim nivoima ciljnih pomeranja  $DR_t$ . Takođe, minimalna su odstupanja relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta realizovana IDCM metodom, u odnosu na rešenja dobijena NDA metodom pri nivoima ciljnih pomeranja  $(V/W)_t$ .



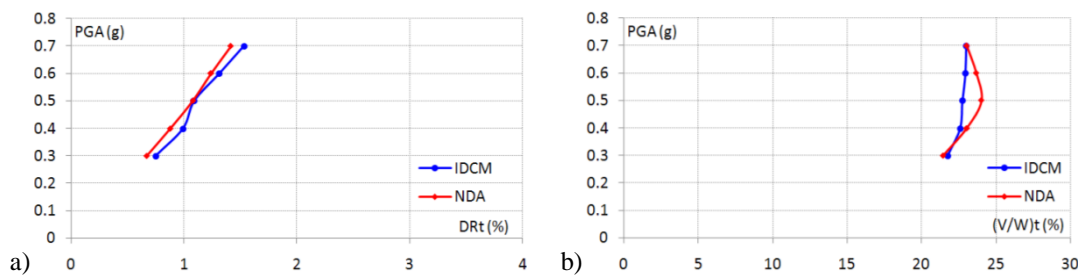
Slika 5.37 Fragmenti *pushover* krivih za nivoe ciljnih pomeranja pri  $\theta=0^\circ$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$ , [43]



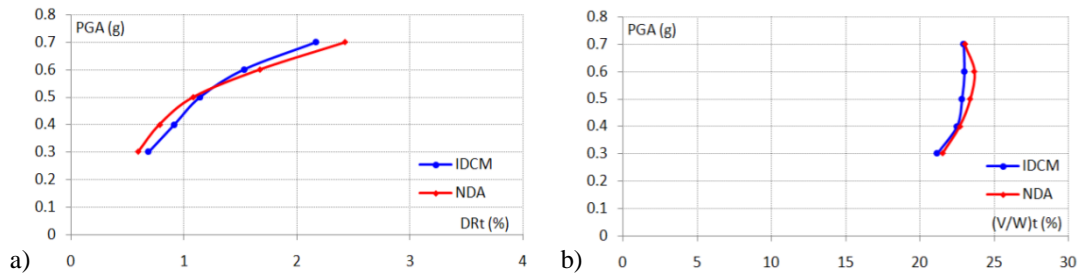
Slika 5.38 Fragmenti *pushover* krivih za nivoe ciljnih pomeranja pri  $\theta=30^\circ$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$ , [43]



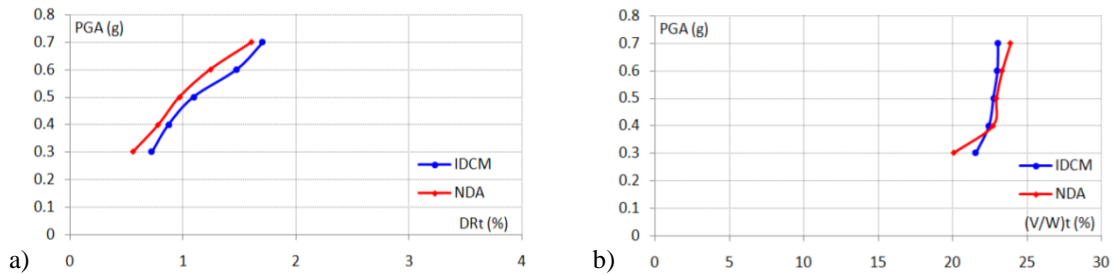
Slika 5.39 Fragmenti *pushover* krivih za nivoe ciljnih pomeranja pri  $\theta=60^\circ$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$ , [43]



Slika 5.40 Fragmenti *pushover* krivih za nivoe ciljnih pomeranja pri  $\theta=90^\circ$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$ , [43]



Slika 5.41 Fragmenti *pushover* krivih za nivoe ciljnih pomeranja pri  $\theta=120^\circ$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$ , [43]



Slika 5.42 Fragmenti *pushover* krivih za nivoe ciljnih pomeranja pri  $\theta=150^\circ$ : a)  $DR_t$ , b)  $(V/W)_t$ , [43]

## 5.4. NDA ANALIZA CILJNOG POMERANJA

### 5.4.1. TEORIJSKI ASPEKTI NDA ANALIZE CILJNOG POMERANJA

Procedura sprovođenja NDA analize prezentovana je u prethodnom poglavlju, s'tim što je ovde uveden termin NDA-TD analiza ciljnog pomeranja po analogiji sa NSPA-TD analizom za projektni nivo seizmičkog dejstva. S obzirom na izuzetno veliko vreme potrebno za procesiranje NDA i INDA analiza 3D modela okvirnih zgrada, to se matematička formulacija prikazana u ovom podpoglavlju koristi za NSPA-TD analizu. Ključni aspekt kod NDA-TD analize je skaliranje akcelograma. Za potrebe istraživanja u ovoj disertaciji skaliranje akcelograma se sprovodi na dva načina: preko spektra odgovora i kompatibilizacijom. Procedura skaliranja akcelograma preko spektra odgovora implementirana je u program *Nonlin Quake SP (Scaling Procedure)*. Kontrolni panel *Nonlin Quake SP* je prikazan na slici 5.43.

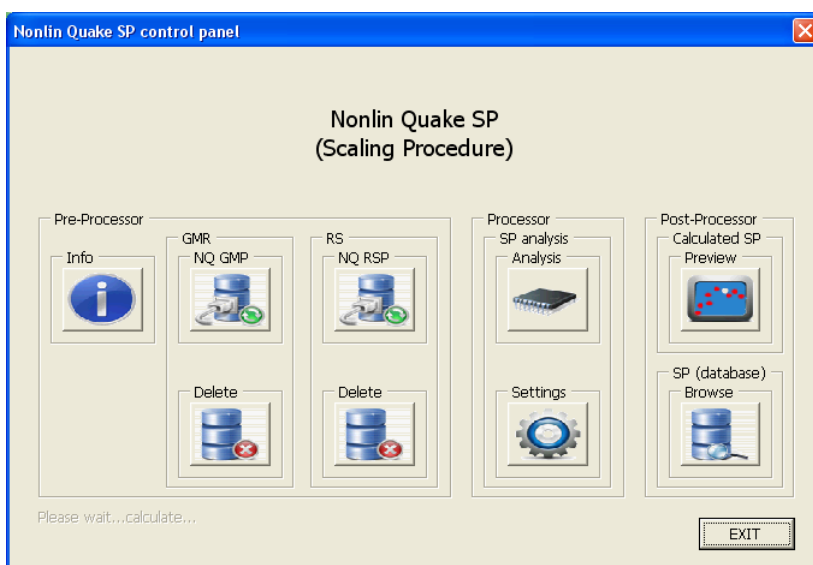
Iniciranje procedure za skaliranje akcelograma u *Nonlin Quake SP* sprovodi se selekcijom tipa skaliranja: prema projektnom ubrzanju tla  $a_g$  ili primenom metode najmanjih kvadrata (LSM - *least square method*). U slučaju da se primenjuje skaliranje na projektno ubrzanje tla  $a_g$ , faktor skaliranja  $F_s$  se određuje prema:

$$F_s = \frac{a_g}{PGA_0}, \quad (5.128)$$

dok se primena metode najmanjih kvadrata bazira se na minimiziranju razlike između skaliranog spektra odgovora i ciljnog (ili projektnog) spektra odgovora [68]:

$$|\Delta| = \int_{T_A}^{T_B} [F_s S_{a,us}(T) - S_{a,d}(T)]^2 dT, \quad (5.129)$$

gde je  $S_{a,us}(T)$  spektralno ubrzanje razmatranog (neskaliranog) akcelerograma u funkciji perioda vibracija  $T$ ,  $S_{a,d}(T)$  spektralno ubrzanje ciljnog (projektog) spektra odgovora u funkciji od  $T$ ,  $T_A$  donja vrednost perioda vibracija,  $T_B$  gornja vrednost perioda vibracija.



Slika 5.43 Kontrolni panel *Nonlin Quake SP*

Određivanje faktora skaliranja  $F_s$  sprovedeno je minimiziranjem razlike definisane u prethodnom izrazu:

$$\min |\Delta| \Rightarrow \frac{d|\Delta|}{dF_s} = 0 \Rightarrow F_s = \frac{\sum_{T_A}^{T_B} (S_{a,us}(T) S_{a,d}(T))}{\sum_{T_A}^{T_B} (S_{a,us}(T))^2}. \quad (5.130)$$

U *Nonlin Quake SP* elastičan spektar odgovora moguće je konstruisati prema EC 8 [66], FEMA 356 [80] i FEMA 750P [87]. Konstrukcija horizontalnog elastičnog EC 8 [66] spektra odgovora se sprovodi prema:

$$S_e(T) = a_g S \left[ 1 + \frac{T}{T_0} (2.5\eta - 1) \right] \quad \text{za} \quad 0 \leq T \leq T_0, \quad (5.131)$$

$$S_e(T) = 2.5 a_g \eta S \quad \text{za} \quad T_0 \leq T \leq T_s, \quad (5.132)$$

$$S_e(T) = 2.5 a_g \eta S \frac{T_s}{T} \quad \text{za} \quad T_s \leq T \leq T_D, \quad (5.133)$$

$$S_e(T) = 2.5a_g \eta S \frac{T_S T_D}{T^2} \quad \text{za} \quad T_D \leq T \leq 4s, \quad (5.134)$$

gde je  $S_e(T)$  spektralno ubrzanje elastičnog spektra odgovora u funkciji od  $T$ ,  $T_0$  donja granica perioda u oblasti sa konstantnim spektralnim ubrzanjem,  $T_S$  gornja granica perioda u oblasti sa konstantnim spektralnim ubrzanjem,  $T_D$  vrednost perioda koja definiše početak oblasti spektra sa konstantnim odgovorom pomeranja u spektru,  $S$  faktor tla,  $\eta$  faktor korekcije prigušenja sa referentnom vrednošću  $\eta=1$  za viskozno prigušenje od 5%:

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \zeta}} \geq 0.55. \quad (5.135)$$

Vrednosti  $S$ ,  $T_0$ ,  $T_S$  i  $T_D$  za dva tipa elastična spektra odgovora date su u tabeli 5.3.

Tabela 5.3 Vrednosti parametara koji opisuju preporučeni tipovi 1 i 2 elastičnog spektra odgovora [66]

kategorija tla	1				2			
	$S$	$T_0$ (s)	$T_S$ (s)	$T_D$ (s)	$S$	$T_0$ (s)	$T_S$ (s)	$T_D$ (s)
A	1	0.15	0.4	2	1	0.05	0.25	1.2
B	1.2	0.15	0.5	2	1.35	0.05	0.25	1.2
C	1.15	0.2	0.6	2	1.5	0.1	0.25	1.2
D	1.35	0.2	0.8	2	1.8	0.1	0.3	1.2
E	1.4	0.15	0.5	2	1.6	0.05	0.25	1.2

Konstrukcija horizontalnog elastičnog FEMA 356 [80] spektra odgovora se sprovodi prema:

$$S_e(T) = S_{XS} \left[ 0.4 + \frac{T}{T_S} \left( \frac{5}{B_S} - 2 \right) \right] \quad \text{za} \quad 0 \leq T \leq T_0, \quad (5.136)$$

$$S_e(T) = \frac{S_{XS}}{B_S} \quad \text{za} \quad T_0 \leq T \leq T_S, \quad (5.137)$$

$$S_e(T) = \frac{S_{X1}}{B_1 T} \quad \text{za} \quad T_S \leq T, \quad (5.138)$$

gde je:

$$T_S = \frac{S_{X1} B_S}{S_{XS} B_1}, \quad T_0 = 0.2 T_S, \quad S_{XS} = F_a S_S, \quad S_{X1} = F_v S_1. \quad (5.139)$$

Koeficijenti  $F_a$  i  $F_v$  se određuju prema tabeli 5.4, a  $B_S$  i  $B_1$  prema tabeli 5.5.

Konstrukcija horizontalnog elastičnog FEMA 750P [87] spektra odgovora se sprovodi prema:

$$S_e(T) = S_{DS} \left[ 0.4 + 0.6 \frac{T}{T_0} \right] \quad \text{za} \quad 0 \leq T \leq T_0, \quad (5.140)$$

$$S_e(T) = S_{DS} \quad \text{za} \quad T_0 \leq T \leq T_S, \quad (5.141)$$

$$S_e(T) = \frac{S_{D1}}{T} \quad \text{za} \quad T_S \leq T \leq T_L, \quad (5.142)$$

$$S_e(T) = \frac{S_{D1}T_L}{T^2} \quad \text{za} \quad T_L \leq T, \quad (5.143)$$

gde je:

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}, \quad T_0 = 0.2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}}, \quad (5.144)$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}, \quad S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}, \quad S_{MS} = F_a S_S, \quad S_{M1} = F_v S_1. \quad (5.145)$$

Koeficijenti  $F_a$  i  $F_v$  se određuju prema tabeli 5.4.

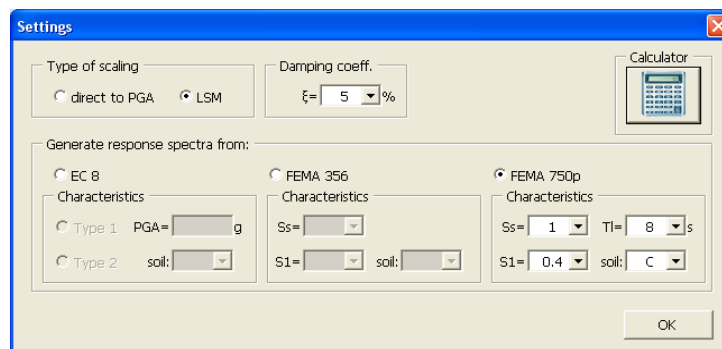
Tabela 5.4 Vrednosti koeficijenata  $F_a$  i  $F_v$  prema [80]

kategorija tla	$F_a$					$F_v$				
	$S_S \leq 0.25$	$S_S = 0.5$	$S_S = 0.75$	$S_S = 1$	$S_S \geq 1.25$	$S_I \leq 0.1$	$S_I = 0.2$	$S_I = 0.3$	$S_I = 0.4$	$S_I \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
C	1.2	1.2	1.1	1	1	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1	2.4	2	1.8	1.6	1.5
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4

Tabela 5.5 Vrednosti koeficijenata  $B_S$  i  $B_I$  prema [80]

$\zeta$	$B_S$	$B_I$
5	1	1
10	1.3	1.2
15	1.55	1.35
20	1.8	1.5
25	2.05	1.6
30	2.3	1.7

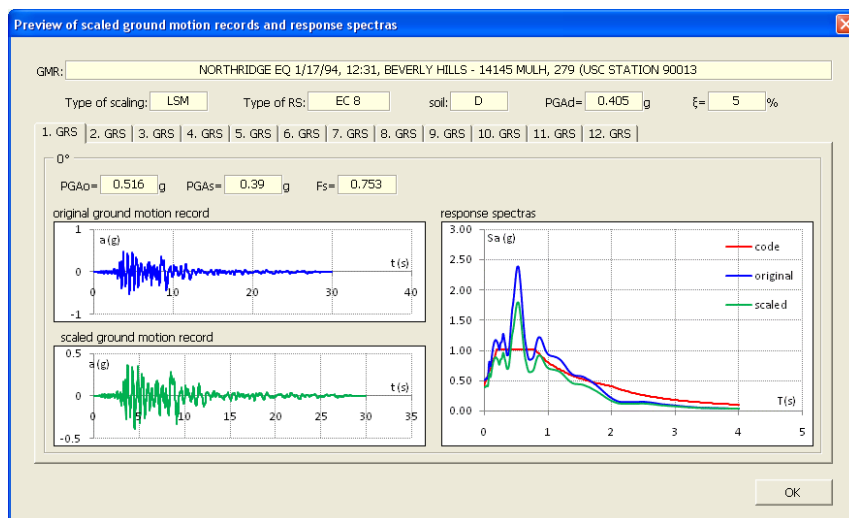
Unos nepoznatih vrednosti i selekcija opcija u *Nonlin Quake SP* izvršava se preko korisničkog interfejsa prikazanog na slici 5.44.



Slika 5.44 Interfejs za unos parametara za skaliranje akcelerograma



Na slici 5.45 su prikazani svi proračunati koeficijenti i dat je prikaz skaliranih akceleroograma i spektara odgovora.



Slika 5.45 Pregled skaliranih akceleroograma i spektara odgovora

Druga procedura koja se koristi za skaliranje akceleroograma u ovom istraživanju je kompatibilizacija, a implementirana je u softver *SeismoMatch* 1.3.0 [337]. Kompatibilizacija je procedura kreiranja kompatibilnog akceleroograma na osnovu realnog akceleroograma, a prema ciljnom (projektom) spektru odgovora. Ovaj postupak je poznat kao *spectral matching*, gde se na osnovu spektra odgovora za realan zemljotres i ciljnog spektra odgovora generiše kompatibilan zemljotres, tako da se za određeni interval perioda vibracija dobije najbolje poklapanje [104]. Postupak je iterativan i zasniva se na primeni teorije talasića (*wavelet theory*). U prvom koraku se na osnovu realnog akceleroograma konstruiše spektar odgovora za dati nivo prigušenja, a zatim se komparira vrednost svake diskretne vrednosti spektra odgovora sa amplitudama ciljnog (projektom) spektra odgovora i određuje nivo neusklađenosti (*mismatch*). Nakon prethodno sprovedenih postupaka sprovodi se dodavanje talasića akceleroogramu sa odgovarajućim amplitudama, tako da se pik svakog odgovora poklopi sa odgovarajućom ciljnom amplitudom. Jedan talasić se koristi u pronalaženju jednog kompatibilnog SDOF odgovora. Amplituda svakog talasića koji se koristi za kompatibilizaciju određena je na osnovu rešenja sistema jednačina:

$$[C]_m \{b\} = \{r\}, \quad (5.146)$$

gde je  $[C]_m$  kvadratna matrica sa elementima koji predstavljaju amplitude svakog pojedinačnog odgovora SDOF sistema u vremenu  $t_i$  gde odgovor treba da se usklađuje,

{ $b$ } vektor koji predstavlja faktore skaliranja talasića, a koji se koriste za usklađivanje, { $r$ } vektor potrebnog usklađivanja, a koji predstavlja razliku maksimalnog odgovora SDOF sistema realnog akceleroograma i amplitude prema ciljnom spektru odgovora. Amplituda funkcije talasića  $A_{adj}(t)$ , kojom se sprovodi usklađivanje u vremenu  $t_i$ , određena je na osnovu sume amplituda talasića u datom vremenu  $a_j(t)$  multiplicirane odgovarajućim faktorima skaliranja talasića  $b_j$ :

$$A_{adj}(t) = \sum_{j=1}^{N_w} b_j a_j(t), \quad (5.147)$$

gde je  $N_w$  ukupan broj talasića. Kompatibilni akceleroogram predstavlja sumu diskretnih vrednosti akceleracija realnog akceleroograma i funkcije usklađivanja, dok se za funkciju talasića koristi poboljšani kosinusni talasić:

$$a_j(t) = \cos[\omega'_j(t - t_j + \Delta t_j)] e^{[-|t - t_j + \Delta t_j| \psi_j]} + [c_1(t - t_j + \Delta t_j) + c_2] e^{[-|t - t_j + \Delta t_j| 5\psi_j]}, \quad (5.148)$$

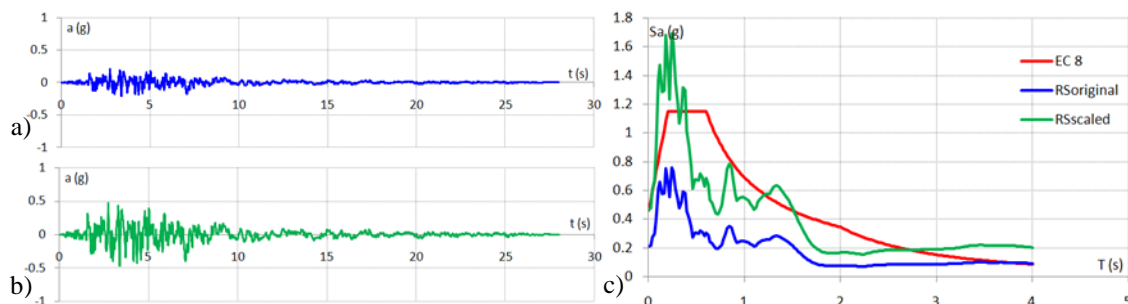
gde je:

$$\Delta t_j = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - \beta_j}}{\beta_j}\right)}{\omega'_j}, \quad \psi(f) = \begin{cases} z_1 & \text{za } f_j < f_1 \\ z_1 + (z_2 - z_1) \frac{(f - f_1)}{(f_2 - f_1)} & \text{za } f_1 < f_j < f_2. \\ z_2 & \text{za } f_j > f_2 \end{cases} \quad (5.149)$$

Prema EC 8 [66] interval perioda vibracija koji je potrebno uzeti u obzir je od  $0.2T$  do  $2T$ , dok je prema FEMA 356 [80] i FEMA 750P [87] ovaj interval od  $0.2T$  do  $1.5T$ . Ukoliko se analizira maksimalni odgovor konstrukcije potrebno je uzeti minimalno 3 akceleroograma, a ukoliko se zahteva prosečan odgovor konstrukcije potrebno je uzeti minimalno 7 akceleroograma.

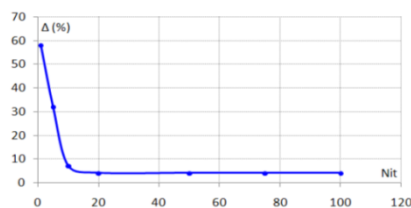
#### 5.4.2. TESTIRANJE PROCEDURA ZA SKALIRANJE AKCELEROGRAMA

Testiranje procedura za skaliranje akceleroograma sprovedeno je u cilju verifikacije dobijenih rešenja za LSM metodu implementiranu u *Nonlin Quake SP* i kompatibilizaciju prema *SeismoMatch 1.3.0* [337]. Testiranje obe metode je sprovedeno za zemljotres *San Fernando* (SF71,  $PGA_{us}=0.21g$ ). Elastični spektar odgovora je određen prema EC 8 za  $a_g=0.4g$  i tip tla C. U slučaju LSM metode implementirane u *Nonlin Quake SP* dobijen je faktor skaliranja  $F_s=2.226$ . Na slici 5.46 je prikazan originalni nescalirani akceleroogram, skalirani akceleroogram i spektri odgovora za nescalirani, skalirani i elastični spektar odgovora prema EC 8.



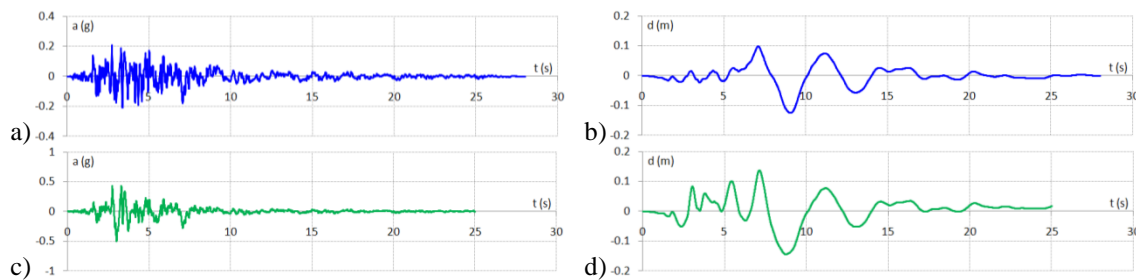
Slika 5.46 *San Fernando* zemljotres: a) originalni akcelerogram  $PGA_{us}=0.21g$ , b) skalirani akcelerogram, c) spektri odgovora za neskalirani, skalirani i elastični spektar odgovora prema EC 8

U slučaju procedure kompatibilizacije izložene u prethodnoj matematičkoj formulaciji, a implementirane u *SeismoMatch* 1.3.0, razmatran je interval perioda vibracija od 0.05s do 2s. Broj iteracija je inkrementalano povećavan od 1 iteracije do 50 iteracija. U određenim proračunskim situacijama pojavljivao se problem konvergencije rešenja, dok je za krajnji konstruisan kompatibilan akcelerogram postignuta konvergencija uz grešku fitovanja od 4.1% (slika 5.47). Problem divergencije rešenja pojavljivao se kod manjeg broja iteracija i kada je redukovano broj talasića.

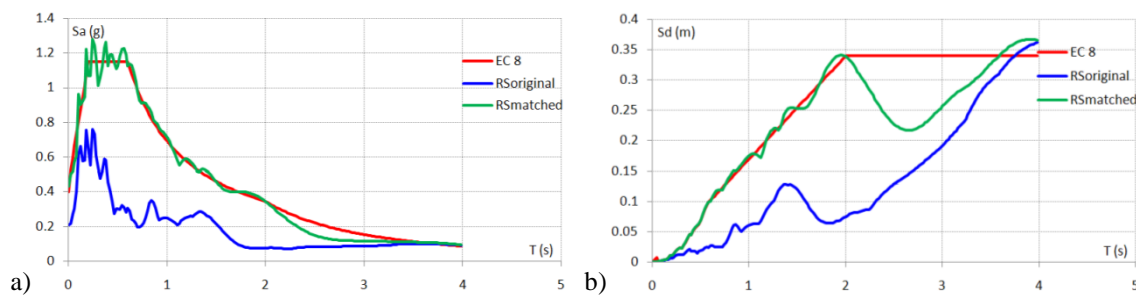


Slika 5.47 Promena broja iteracija  $N_{it}$  u zavisnosti od greške fitovanja

Na slici 5.48 su prikazani originalni neskalirani akcelerogram  $PGA_{us}=0.21g$ , odgovarajuće pomeranje originalnog zemljotresa, akcelerogram kompatibilnog zemljotresa i odgovarajuće pomeranje kompatibilnog zemljotresa, dok su na slici 5.49 prikazani spektri odgovora  $S_a-T$  i  $S_d-T$  originalnog i kompatibilnog akcelerograma i spektar odgovora određen prema EC 8.



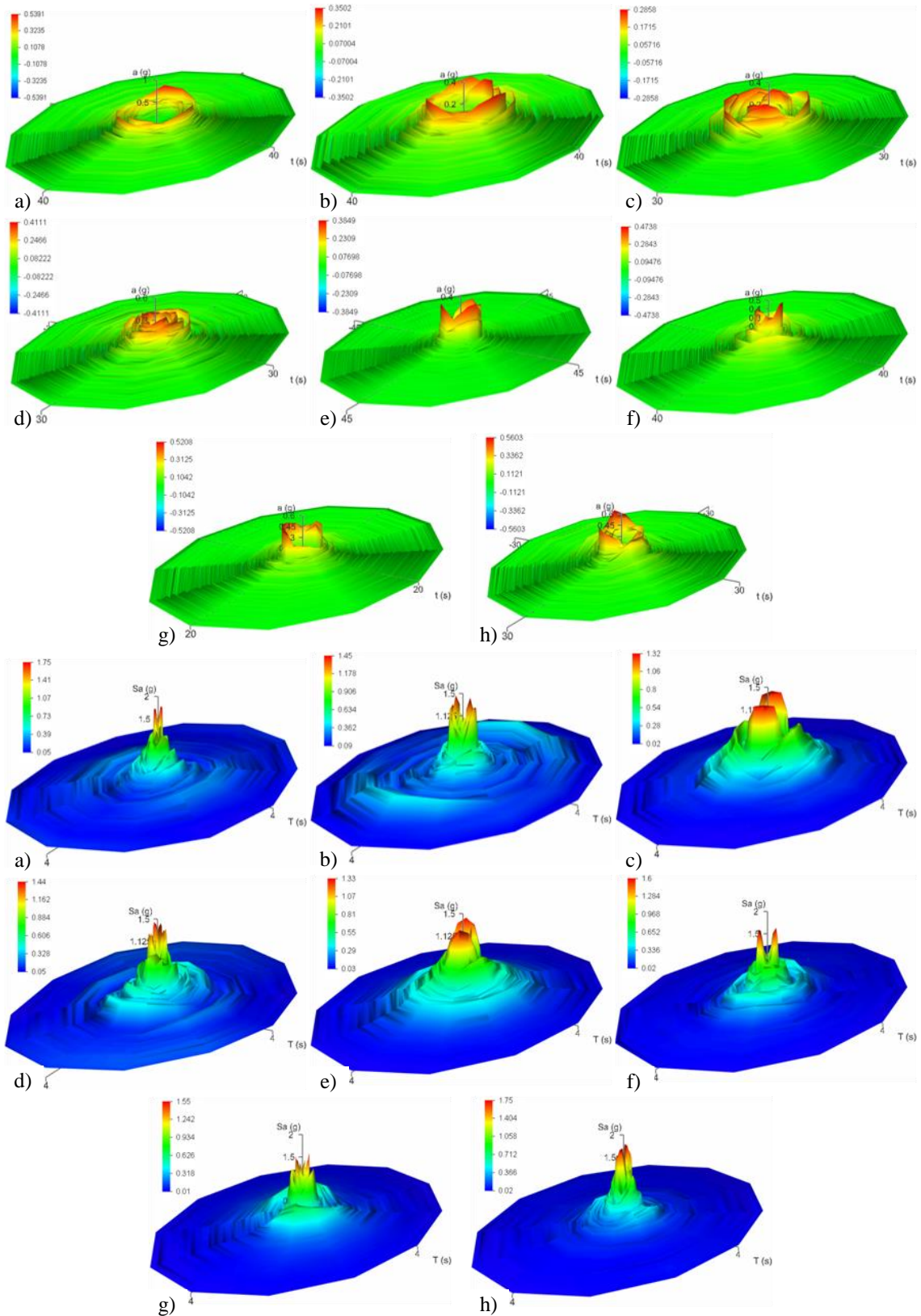
Slika 5.48 *San Fernando* zemljotres: a) originalni akcelerogram  $PGA_{us}=0.21g$ , b) odgovarajuće pomeranje originalnog zemljotresa, c) akcelerogram kompatibilnog zemljotresa, d) odgovarajuće pomeranje kompatibilnog zemljotresa



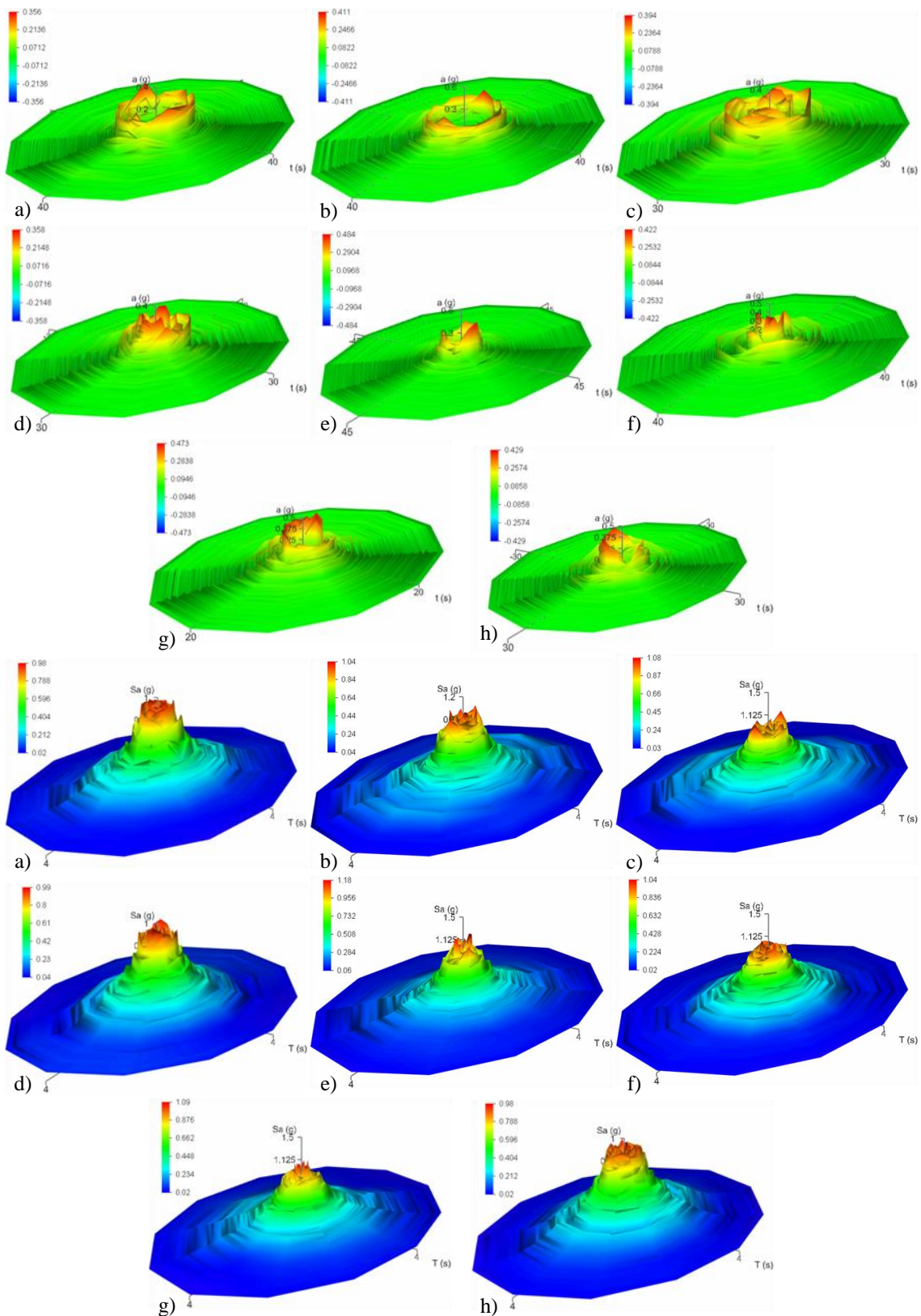
Slika 5.49 Spektri odgovora prema propisima za originalni i kompatibilni akcelerogram: a)  $S_a-T$ , b)  $S_d-T$

### 5.4.3. SKALIRANI I KOMPATIBILNI AKCELEROGRAMI I SPEKTRI ODGOVORA PREMA FEMA 750P

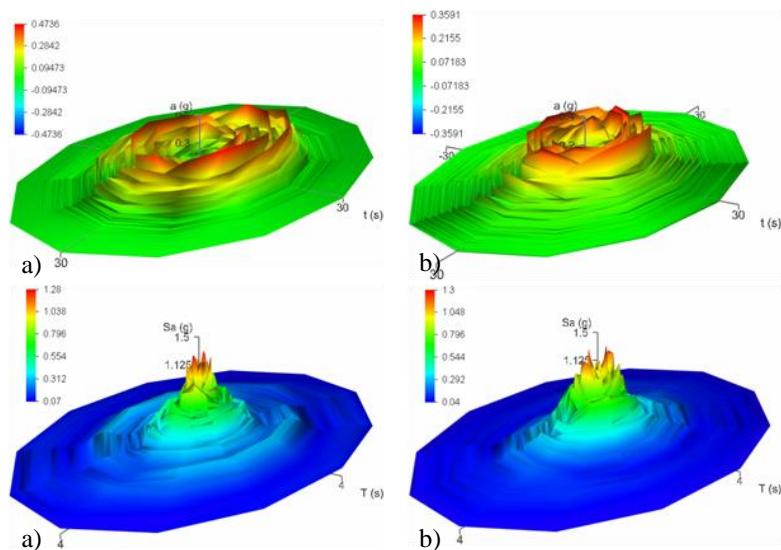
Skaliranje i kompatibilizacija akcelerograma i spektara odgovora sprovedeni su prema FEMA 750P [87] elastičnom spektru odgovora. Kod LSM metode korišćeno je  $S_S=1.25$ ,  $S_I=0.5$ ,  $T_L=8s$  i C tip tla, pri čemu je skaliranje sprovedeno za kompletan domen perioda vibracija. Kod kompatibilizacije je razmatranje takođe sprovedeno za kompletan domen perioda vibracija. Ovo je urađeno s obzirom da se numeričke analize sprovode na pet različitih modela zgrada sa različitim vrednostima perioda vibracija. U tom smislu bi za svaki model zgrade bilo neophodno skalirati i kompatibilizovati akcelerograme posebno, pa je u cilju redukcije obimnog broja akcelerograma i numeričkih analiza sprovedena kompatibilizacija za kompletan domen perioda vibracija. Ukupno je korišćeno 30 iteracija za kompatibilizaciju. Ovaj broj ima veliki značaj, s obzirom da se njegovim povećanjem znatno utiče na frekventan sadržaj akcelerograma. Na slikama 5.50 i 5.51 su prikazane skalirane i kompatibilizovane FF i NF GMRS i ARSS površi prirodnih zemljotresa, dok su na slikama 5.52 i 5.53 prikazane skalirane i kompatibilizovane FF i NF GMRS i ARSS nepotpunog nestacionarnog i potpunog nestacionarnog veštačkog akcelerograma. Razlika u strukturi i formi generisanih spektara odgovora direktna je posledica primenjenog postupka skaliranja, odnosno kompatibilizacije. Površni spektara odgovora generisane primenom postupka kompatibilizacije imaju domen konstantnih ubrzanja veći, u odnosu na površni spektara odgovora generisane skaliranjem LSM metodom. Sa druge strane, s obzirom da je kompatibilizacija izvršena u odnosu na elastičan spektar odgovora prema propisima, to generisane površni spektara odgovora imaju određeni stepen rotacione simetrije oko vertikalne ose  $S_a$ .



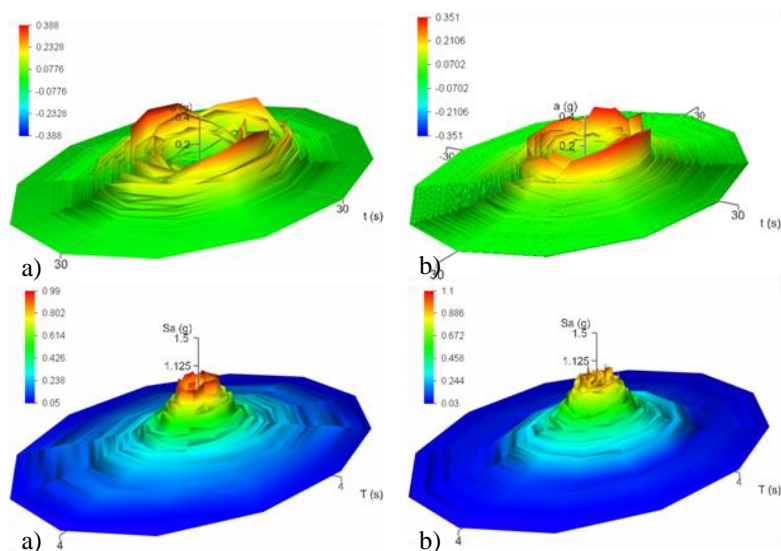
Slika 5.50 Skalirane FF i NF GMRS i ARSS površi: a) *Imperial Valley* IV79, b) *Loma Prieta* LP89, c) *Northridge* NR94, d) *San Fernando* SF71, e) *Kobe* KO95, f) *Morgan Hill* MH84, g) *Palm Springs* PS86, h) *Parkfield* PA66



Slika 5.51 Kompatibilizovane FF i NF GMRS i ARSS površi: a) *Imperial Valley IV79*, b) *Loma Prieta LP89*, c) *Northridge NR94*, d) *San Fernando SF71*, e) *Kobe KO95*, f) *Morgan Hill MH84*, g) *Palm Springs PS86*, h) *Parkfield PA66*



Slika 5.52 Skalirane FF i NF GMRS i ARSS površi: a) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, b) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



Slika 5.53 Kompatibilizovane FF i NF GMRS i ARSS površi: a) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, b) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram

## 5.5. ANVELOPA CILJNOG POMERANJA

### 5.5.1. DEFINICIJA I GENERISANJE

Proračuni nivoa ciljnog pomeranja 3D modela okvirne zgrade NSA analizama, a prezentovani u prethodnim poglavljima, sprovode se za svaki ugao  $\theta_i$  posebno. Ovako određene diskretne vrednosti ciljnog pomeranja međusobno se konektuju interpolacijom, tako da se konačno generiše zatvorena kriva u prostoru, a za koju je u

ovom istraživanju uveden termin anvelopa ciljnog pomeranja (TDE - *target displacement envelope*). Anvelopa ciljnog pomeranja predstavlja maksimalni projektni nivo pomeranja 3D modela konstrukcije po uglovima  $\theta_i$  za koji se razmatra uticaj zemljotresa. Dakle, nije reč o maksimalno mogućem pomeranju konstrukcije, već o maksimalnom zahtevanom nivou nelinearnog pomeranja za skalirani i odabrani tip zemljotresa. Prvi termin pomeranja se definiše kao maksimalni raspoloživi nivo pomeranja objekta  $D_{max}$ , dok se drugi termin definiše kao zahtevani nivo pomeranja  $D_t$ . U opštem slučaju nivo ciljnog pomeranja  $\langle DR_{t,r,i}, (V/W)_{t,i}, \theta_i \rangle$  se realizuje na osnovu preseka *pushover* krive  $(V/W)=f(DR)_\theta$  i krive zahteva  $(V/W)=h(DR)_\theta$ :

$$\langle DR_{t,r,i}, (V/W)_{t,i}, \theta_i \rangle = [(V/W) = f(DR)_\theta] \cap [(V/W) = h(DR)_\theta]. \quad (5.150)$$

Definicija 5.1: *NSPA (NDA) anvelopa ciljnog pomeranja (target displacement envelope) 3D modela zgrade  $(V/W)_t=f(DR_{t,x}, DR_{t,y})$  je glatka interpolirana zatvorena kriva generisana povezivanjem diskretnih vrednosti ciljnih pomeranja  $I_t(DR_{t,r,i}, (V/W)_{t,i}, \theta_i)$  NSPA (NDA) analiza individualnih pushover krivih  $(V/W)_i=f(DR_{t,i}, \theta_i)$ :*

$$(V/W)_t = f(DR_{t,x}, DR_{t,y}) = \bigcup_{\theta_i=0}^{360^\circ} \langle DR_{t,r,i}, \theta_i \rangle, \quad (5.151)$$

pri čemu je:

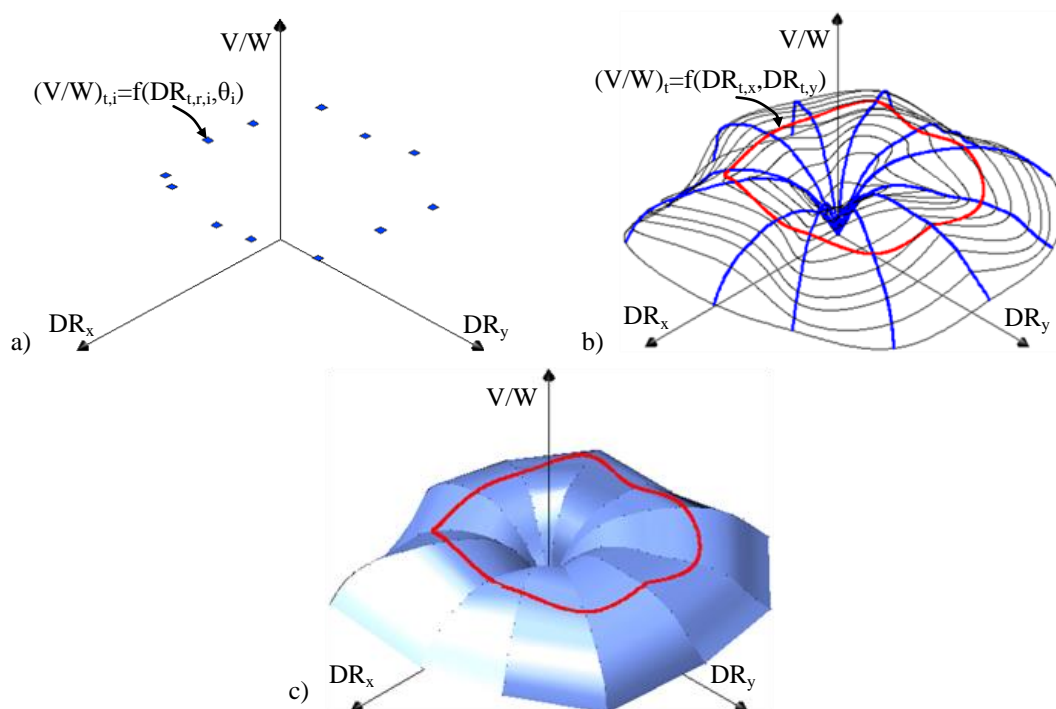
$$I_t \langle DR_{t,r,i}, (V/W)_{t,i}, \theta_i \rangle \subset [(V/W)_t = f(DR_{t,x}, DR_{t,y})], \quad (5.152)$$

$$\theta_i \in [0, 360], \quad \forall (DR_{t,i}, (V/W)_{t,i}) \in \mathfrak{R}^+. \quad (5.153)$$

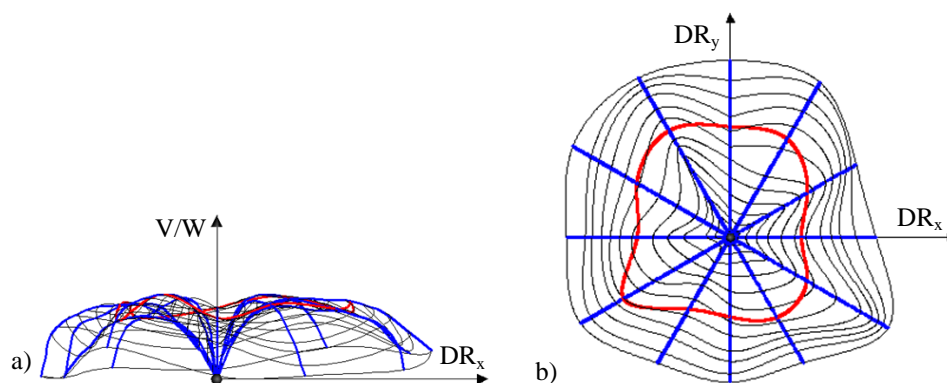
Na slici 5.54.a prikazane su diskretne vrednosti ciljnih pomeranja po uglovima  $\theta_i$  u prostornim koordinatnom sistemu, dok je na slici 5.54.b prikazana anvelopa ciljnog pomeranja 3D modela zgrade i mrežni modeli *pushover* krivih. Konačno, na slici 5.54.c je prikazana anvelopa ciljnog pomeranja 3D modela zgrade i renderovane *pushover* površi. Prezentovana anvelopa ciljnog pomeranja predstavlja opšti slučaj anvelope za 3D model asimetrične, neregularne okvirne zgrade i za analizirane komponente zemljotresa. U odnosu na 3D prezentaciju anvelope ciljnog pomeranja prikladnije je da se ista prezentuje u  $DR_x$ - $DR_y$  ravnini i da se sve potrebne analize sprovedu za ovu ravan. Ortogonalna projekcije anvelope ciljnog pomeranja prikazana je na slici 5.55.a za  $DR_x$ - $V/W$  ravan, dok je na slici 5.55.b prikazana ortogonalna projekcija anvelope ciljnog pomeranja za  $DR_x$ - $DR_y$  ravan. Splajn u tangencijalnom pravcu povezuje diskretne vrednosti iz inkrementalnih situacija  $I_t \langle DR_{t,r,i}, (V/W)_{t,i}, \theta_i \rangle$  NSA analiza, pa u opštem slučaju nije na ekvidistantnom odstojanju u odnosu na splajnovu *pushover* površi (slika



5.55.a). Sa druge strane, anvelopa ciljnog pomeranja, u opštem slučaju, nije ni krug (slika 5.55.b).



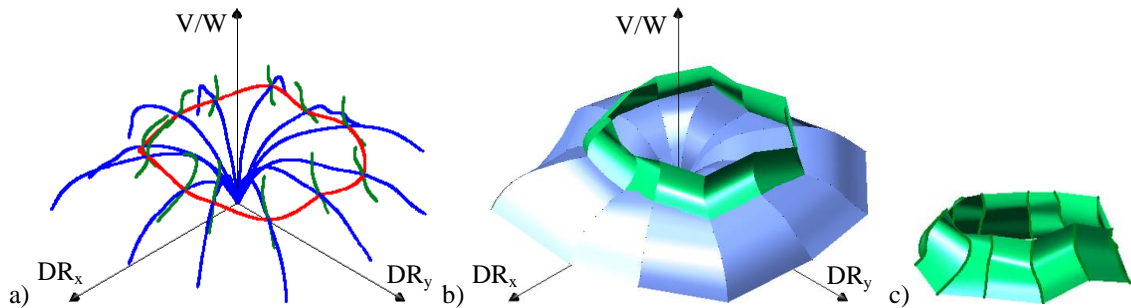
Slika 5.54 Dijagram toka generisanja anvelope ciljnog pomeranja: a) diskretne vrednosti ciljnih pomeranja po uglovima  $\theta_i$ , b) anvelopa ciljnog pomeranja i 3D mrežni modeli *pushover* krivih, c) anvelopa ciljnog pomeranja i 3D renderovana *pushover* površ



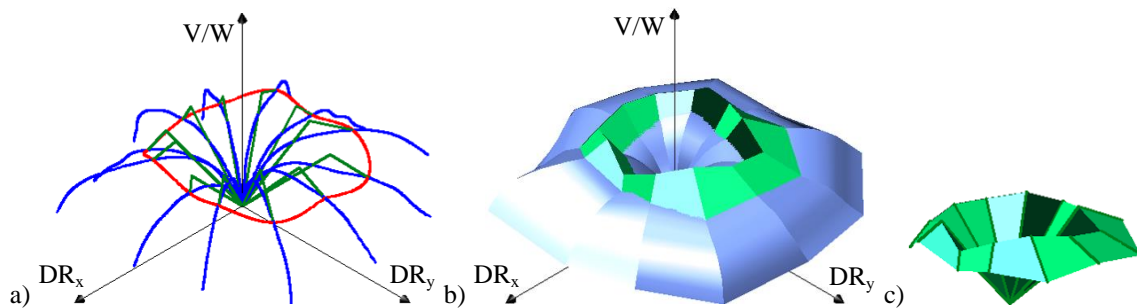
Slika 5.55 Ortogonalne projekcije anvelope ciljnog pomeranja opšti slučaj: a)  $DR_x$ - $V/W$  ravan, b)  $DR_x$ - $DR_y$  ravan

Na slici 5.56.a je prikazan postupak dobijanja anvelope ciljnog pomeranja iz preseka *pushover* krivih i krivih zahteva, dok je na slici 5.57.a prikazan postupak dobijanja anvelope ciljnog pomeranja iz preseka *pushover* krivih i krivih bilinearizacije. Na slikama 5.56.b i 5.57.b su prikazane *pushover* površi i površi generisane iz krivih

zahteva (površ zahteva), odnosno krivih bilinearizacije (bilinearna poligonalna površ), dok je na slikama 5.56.c i 5.57.c prikazana izdvojena površ zahteva i bilinearna poligonalna površ.



Slika 5.56. Postupak dobijanja anvelope ciljnog pomeranja iz preseka *pushover* krivih i krivih zahteva: a) *pushover* krive, krive zahteva i anvelopa ciljnog pomeranja, b) *pushover* površ i površ zahteva, c) površ zahteva



Slika 5.57. Postupak dobijanja anvelope ciljnog pomeranja iz preseka *pushover* krivih i krivih bilinearizacije: a) *pushover* krive, bilinearne krive i anvelopa ciljnog pomeranja, b) *pushover* površ i bilinearna poligonalna površ, c) bilinearna poligonalna površ

Tipološka analiza anvelope ciljnog pomeranja je sprovedena prema obliku anvelope i to:

- sa različitim vrednostima driftova:

$$DR_{t,\theta 1} \neq DR_{t,\theta 2} \neq \dots \neq DR_{t,\theta i} \neq \dots \neq DR_{t,\theta n}, \quad (5.154)$$

- sa jednakim vrednostima driftova, gde je anvelopa ciljnog pomeranja krug:

$$DR_{t,\theta 1} = DR_{t,\theta 2} = \dots = DR_{t,\theta i} = \dots = DR_{t,\theta n}, \quad (5.155)$$

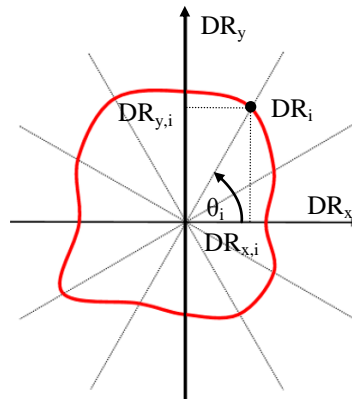
$$DR_{t,x}^2 + DR_{t,y}^2 = 1. \quad (5.156)$$

Model anvelope ciljnog pomeranja sa različitim vrednostima driftova predstavlja opšto slučaj i kao takav je u teorijskoj formulaciji problema razmatran. U definiciji 5.1 anvelopa ciljnog pomeranja je prezentovana interpolacionim splajnom, ali se za matematičku analizu problema koristi linearna interpolacija, tako da je anvelopa ciljnog pomeranja zatvorena poligonalna linija:

$$\begin{aligned}
0^\circ \div 30^\circ : \quad DR_y &= \frac{DR_{y,30} - DR_{y,0}}{DR_{x,30} - DR_{x,0}} (DR_x - DR_{x,0}) + DR_{y,0} \\
&\vdots \\
330^\circ \div 360^\circ : \quad DR_y &= \frac{DR_{y,0} - DR_{y,330}}{DR_{x,0} - DR_{x,330}} (DR_x - DR_{x,330}) + DR_{y,330}
\end{aligned} \quad (5.157)$$

Konstrukcija anvelope ciljnog pomeranja se sprovodi analogno transformaciji koordinata kod *pushover* površi za uglove  $\theta_i$  (slika 5.58):

$$DR_{x,i} = DR_i \cos\theta_i, \quad DR_{y,i} = DR_i \sin\theta_i. \quad (5.158)$$



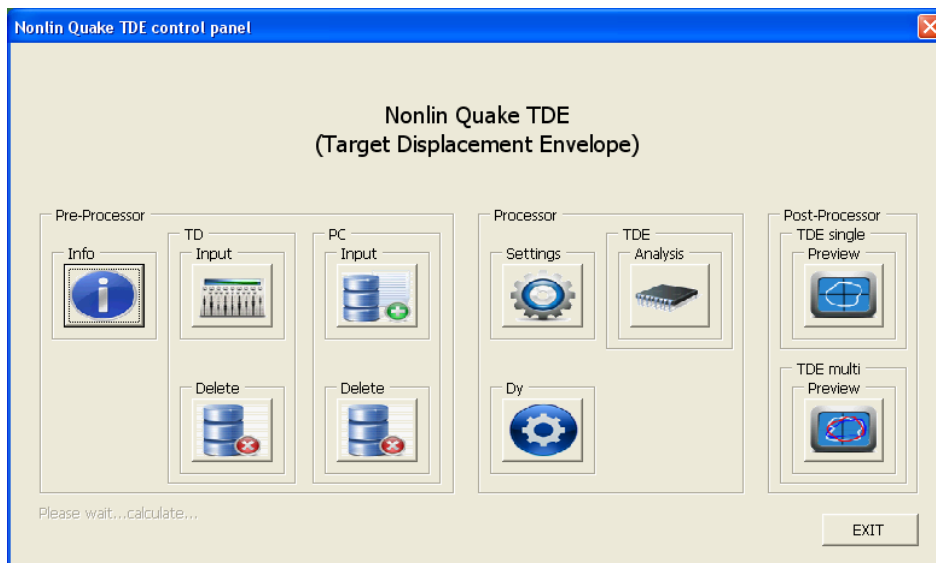
Slika 5.58 Transformacija koordinata anvelope ciljnih pomeranja

### 5.5.2. PROCESIRANJE ANVELOPE CILJNOG POMERANJA

U cilju razmatranja stanja generisanih anvelopa ciljnog pomeranja i relevantnih parametara koji se određuju iz ovih anvelopa 3D modela zgrada, razvijen je program *Nonlin Quake TDE (Target Displacement Envelope)*. Kontrolni panel *Nonlin Quake TDE* je prikazan na slici 5.59. U odnosu na klasičan pristup gde se koriste koeficijenti jednodimenzionalnog karaktera za procenu nelinearnog odgovora, kao što je duktilnost  $\mu$  za razmatrani pravac, uvedeni su novi koeficijenti dvodimenzionalnog karaktera kojim se može razmatrati nelinearan odgovor 3D modela zgrade:

- 1.  $M_\mu$  - koeficijent (raspoložive) površi duktilnosti,
- 2.  $M_{d,t/d,Y}$  - koeficijent realizovane površi duktilnosti,
- 3.  $M_{d,x/d,Y}$  - koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $x$  osu,
- 4.  $M_{d,y/d,Y}$  - koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $y$  osu,
- 5.  $M_{d,t/IO}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom IO performansnog nivoa,
- 6.  $M_{d,t/LS}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog

- pomeranja i oblasti ograničene anvelopom LS performansnog nivoa,
- 7.  $M_{d,t/CP}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom CP performansnog nivoa,
  - 8.  $M_{d,t,max/d,t}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja,
  - 9.  $M_{d,t,min/d,t}$  - koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja,
  - 10.  $C_{d,t,max/code}$  - koeficijent koji je u funkciji minimalne potrebne površi duktilnosti za nivo ciljnog pomeranja prema propisima,
  - 11.  $\mu_{d,max/d,Y}^m$  - koeficijent prosečne raspoložive duktilnost po uglovima  $\theta_i$  za sve zemljotrese,
  - 12.  $\mu_{d,t/d,Y}^m$  - koeficijent prosečne realizovane duktilnosti po uglovima  $\theta_i$  za sve zemljotrese.



Slika 5.59 Kontrolni panel *Nonlin Quake TDE*

1. Koeficijent (raspoložive) površi duktilnosti  $M_\mu$  je razmatran u prethodnom poglavlju i definisan je izrazom (4.126). Koeficijent raspoložive površi duktilnosti za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_\mu^{max}$  glasi:

$$M_\mu^{max} = \frac{A_{d,max}^{max}}{A_{d,Y}^{max}}, \quad (5.159)$$

gde je  $A_{d,max}^{max}$  površina oblasti ograničena anvelopom maksimalno realizovanog pomeranja svih zemljotresa:

$$A_{d,max}^{max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (D_{max,x,i}^{max} D_{max,y,i+1}^{max} - D_{max,x,i+1}^{max} D_{max,y,i}^{max}), \quad (5.160)$$

dok je  $A_{d,Y}^{max}$  površina oblasti ograničena anvelopom granice tečenja svih zemljotresa:

$$A_{d,Y}^{max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (D_{Y,x,i}^{max} D_{Y,y,i+1}^{max} - D_{Y,x,i+1}^{max} D_{Y,y,i}^{max}). \quad (5.161)$$

Procena vrednosti koeficijenta raspoložive površi duktilnosti za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{\mu}^{max}$  izvršena je prema:

$$M_{\mu}^{max} = \frac{A_{d,max}^{max}}{A_{d,Y}^{max}} = \frac{D_{max}^{2,max} \pi}{D_Y^{2,max} \pi} = \frac{(\mu_m D_Y^{max})^2 \pi}{D_Y^{2,max} \pi} = \mu_m^2, \quad (5.162)$$

pri čemu su optimalne vrednosti za  $M_{d,max/d,Y}^{max}$  usvojene analogno koeficijentu duktilnosti prema FEMA 273 [78]:

$$\begin{aligned} \mu_m < 2 & : & M_{\mu}^{max} < 4 & \text{niska} \\ 2 \leq \mu_m \leq 4 & : & 4 \leq M_{\mu}^{max} \leq 16 & \text{srednja.} \\ \mu_m > 4 & : & M_{\mu}^{max} > 16 & \text{visoka} \end{aligned} \quad (5.163)$$

2. Koeficijent realizovane površi duktilnosti  $M_{d,t/d,Y}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom granice tečenja:

$$M_{d,t/d,Y} = \frac{A_{d,t}}{A_{d,Y}}, \quad (5.164)$$

gde je  $A_{d,t}$  površina oblasti ograničena anvelopom ciljnog pomeranja:

$$A_{d,t} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (D_{t,x,i} D_{t,y,i+1} - D_{t,x,i+1} D_{t,y,i}). \quad (5.165)$$

Koeficijent realizovane površi duktilnosti za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,t/d,Y}^{max}$  glasi:

$$M_{d,t/d,Y}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{d,Y}^{max}}, \quad (5.166)$$

gde je  $A_{d,t}^{max}$  površina oblasti ograničena anvelopom ciljnog pomeranja svih zemljotresa:

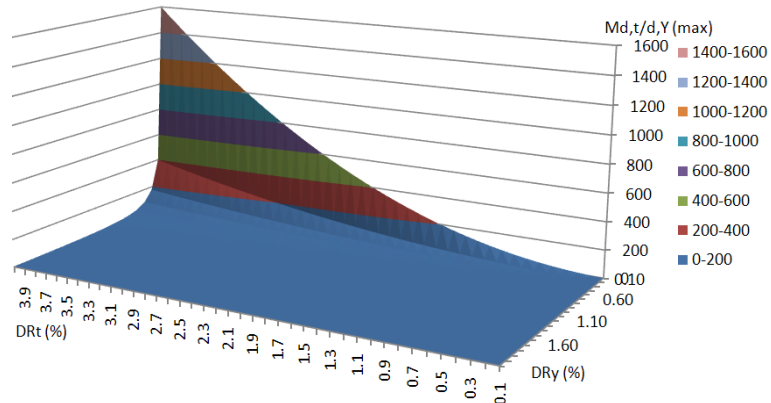
$$A_{d,t}^{max} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (D_{t,x,i}^{max} D_{t,y,i+1}^{max} - D_{t,x,i+1}^{max} D_{t,y,i}^{max}). \quad (5.167)$$

Procena vrednosti koeficijenta realizovane površi duktilnosti za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,t/d,Y}^{max}$  izvršena je prema (slika 5.60):

$$M_{d,t/d,Y}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{d,Y}^{max}} = \frac{D_t^{max,2} \pi}{D_Y^{max,2} \pi} = \frac{(DR_t^{max} H)^2 \pi}{(DR_Y^{max} H)^2 \pi} = \left( \frac{DR_t^{max}}{DR_Y^{max}} \right)^2, \quad (5.168)$$

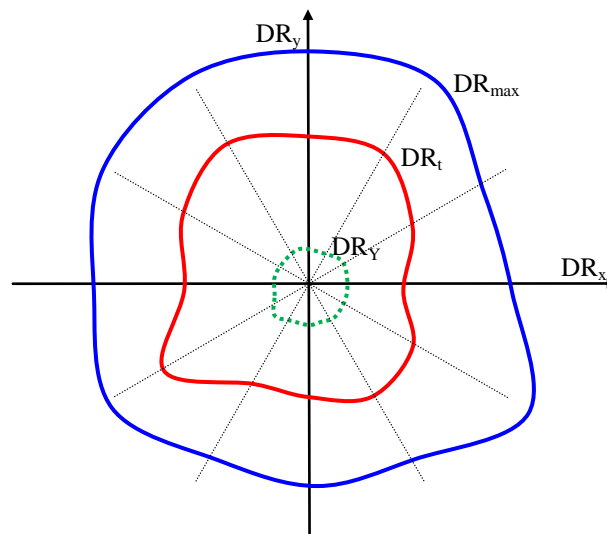
uz uslov da je:

$$M_{d,t/d,Y} < M_{d,max/d,Y}, \quad M_{d,t/d,Y}^{max} < M_{d,max/d,Y}^{max}. \quad (5.169)$$



Slika 5.60 Promena  $M_{d,t/d,Y}^{max}$  u funkciji driftova  $DR_t$  i  $DR_Y$

Na slici 5.61 je prikazan odnos anvelope ciljnog pomeranja, anvelope granice tečenja i anvelope maksimalnog realizovanog pomeranja.



Slika 5.61 Odnos anvelope ciljnog pomeranja za  $DR_t$ , anvelope granice tečenja za  $DR_Y$  i anvelope maksimalnog realizovanog pomeranja za  $DR_{max}$

3. Koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $x$  osu  $M_{d,x/d,Y}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene idealizovanom anvelopom pomeranja za  $x$  osu i oblasti ograničene anvelopom granice tečenja:

$$M_{d,x/d,Y} = \frac{0.5(A_{d,x}^+ + A_{d,x}^-)}{A_{d,Y}}, \quad (5.170)$$

gde je  $A_{d,x}$  površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za  $x$  osu:

$$A_{d,x}^\pm = \pm D_x^2 \pi. \quad (5.171)$$

Koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $x$  osu za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,x/d,Y}^{max}$  glasi:

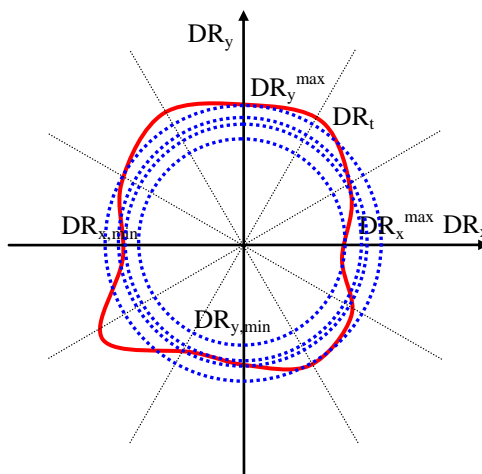
$$M_{d,x/d,Y}^{max} = \frac{A_{d,x}^{max}}{A_{d,Y}^{max}}, \quad (5.172)$$

gde je  $A_{d,x}^{max}$  površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za  $x$  osu svih zemljotresa:

$$A_{d,x}^{max} = \pm D_x^{max,2} \pi. \quad (5.173)$$

Procena vrednosti koeficijenta odgovarajuće površi duktilnosti za  $x$  osu za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,x/d,Y}^{max}$  izvršena je prema (slika 5.62):

$$M_{d,x/d,Y}^{max} = \frac{A_{d,x}^{max}}{A_{d,Y}^{max}} = \frac{D_x^{max,2} \pi}{D_Y^{max,2} \pi} = \frac{(DR_x^{max} H)^2 \pi}{(DR_Y^{max} H)^2 \pi} = \left( \frac{DR_x^{max}}{DR_Y^{max}} \right)^2. \quad (5.174)$$



Slika 5.62 Odnos anvelope ciljnog pomeranja za  $DR_y$  i odgovarajućih anvelopa za  $DR_x^{max}$ ,  $DR_x^{min}$ ,  $DR_y^{max}$ ,  $DR_y^{min}$

4. Koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $y$  osu  $M_{d,y/d,Y}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene idealizovanom anvelopom pomeranja za  $y$  osu i oblasti ograničene anvelopom granice tečenja:

$$M_{d,y/d,Y} = \frac{0.5(A_{d,y}^+ + A_{d,y}^-)}{A_{d,Y}}, \quad (5.175)$$

gde je  $A_{d,y}$  površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za  $y$  osu:

$$A_{d,y}^{\pm} = \pm D_y^2 \pi. \quad (5.176)$$

Koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za y osu za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,y/d,Y}^{max}$  glasi:

$$M_{d,y/d,Y}^{max} = \frac{A_{d,y}^{max}}{A_{d,Y}^{max}}, \quad (5.177)$$

gde je  $A_{d,y}^{max}$  površina oblasti ograničena idealizovanom anvelopom pomeranja za y osu svih zemljotresa:

$$A_{d,y}^{max} = \pm D_y^{2,max} \pi. \quad (5.178)$$

Procena vrednosti koeficijenta odgovarajuće površi duktilnosti za y osu za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,y/d,Y}^{max}$  izvršena je prema:

$$M_{d,y/d,Y}^{max} = \frac{A_{d,y}^{max}}{A_{d,Y}^{max}} = \frac{D_y^{2,max} \pi}{D_Y^{2,max} \pi} = \frac{(DR_y^{max} H)^2 \pi}{(DR_Y^{max} H)^2 \pi} = \left( \frac{DR_y^{max}}{DR_Y^{max}} \right)^2. \quad (5.179)$$

5. Koeficijent  $M_{d,t/IO}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom IO performansnog nivoa:

$$M_{d,t/IO} = \frac{A_{d,t}}{A_{IO}}, \quad (5.180)$$

gde je  $A_{IO}$  površina oblasti ograničena anvelopom IO performansnog nivoa:

$$A_{IO} = D_{IO}^2 \pi. \quad (5.181)$$

Koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom IO performansnog nivoa za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,t/IO}^{max}$  glasi:

$$M_{d,t/IO}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{IO}^{max}}. \quad (5.182)$$

Procena vrednosti koeficijenta  $M_{d,t/IO}^{max}$  za sve zemljotrese koji se razmatraju izvršena je prema:

$$M_{d,t/IO}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{IO}^{max}} = \frac{D_t^{2,max} \pi}{D_{IO}^2 \pi} = \frac{(DR_t^{max} H)^2 \pi}{(DR_{IO} H)^2 \pi} = \left( \frac{DR_t^{max}}{DR_{IO}} \right)^2. \quad (5.183)$$

6. Koeficijent  $M_{d,t/LS}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom LS performansnog nivoa:

$$M_{d,t/LS} = \frac{A_{d,t}}{A_{LS}}, \quad (5.184)$$

gde je  $A_{LS}$  površina oblasti ograničena anvelopom LS performansnog nivoa:



$$A_{LS} = D_{LS}^2 \pi . \quad (5.185)$$

Koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom LS performansnog nivoa za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,t/LS}^{max}$  glasi:

$$M_{d,t/LS}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{LS}} . \quad (5.186)$$

Procena vrednosti koeficijenta  $M_{d,t/LS}^{max}$  za sve zemljotrese koji se razmatraju izvršena je prema:

$$M_{d,t/LS}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{LS}} = \frac{D_t^{2,max} \pi}{D_{LS}^2 \pi} = \frac{(DR_t^{max} H)^2 \pi}{(DR_{LS} H)^2 \pi} = \left( \frac{DR_t^{max}}{DR_{LS}} \right)^2 . \quad (5.187)$$

7. Koeficijent  $M_{d,t/CP}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom CP performansnog nivoa:

$$M_{d,t/CP} = \frac{A_{d,t}}{A_{CP}} , \quad (5.188)$$

gde je  $A_{CP}$  površina oblasti ograničena anvelopom CP performansnog nivoa:

$$A_{CP} = D_{CP}^2 \pi . \quad (5.189)$$

Koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom CP performansnog nivoa za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,t/CP}^{max}$  glasi:

$$M_{d,t/CP}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{CP}} . \quad (5.190)$$

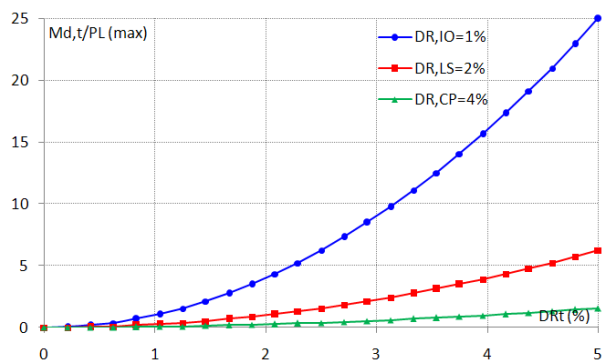
Procena vrednosti koeficijenta  $M_{d,t/CP}^{max}$  za sve zemljotrese koji se razmatraju izvršena je prema:

$$M_{d,t/CP}^{max} = \frac{A_{d,t}^{max}}{A_{CP}} = \frac{D_t^{2,max} \pi}{D_{CP}^2 \pi} = \frac{(DR_t^{max} H)^2 \pi}{(DR_{CP} H)^2 \pi} = \left( \frac{DR_t^{max}}{DR_{CP}} \right)^2 . \quad (5.191)$$

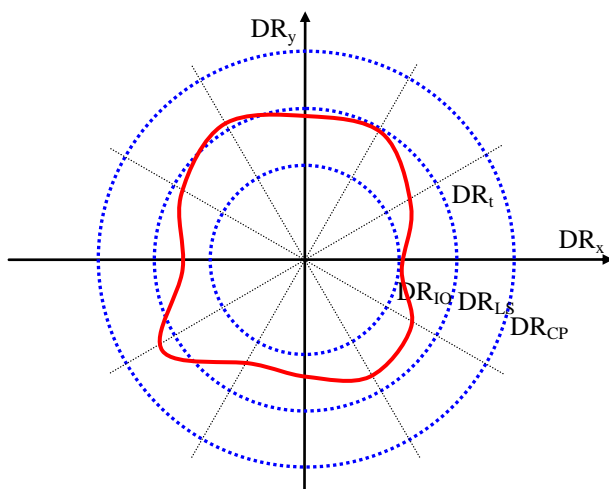
Prethodno izvedeni koeficijenti  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$ ,  $M_{d,t/CP}$ ,  $M_{d,t/IO}^{max}$ ,  $M_{d,t/LS}^{max}$  i  $M_{d,t/CP}^{max}$  važe ukoliko je ispunjen uslov:

$$M_{d,t/IO} < M_{d,t/LS} < M_{d,t/CP} , \quad M_{d,t/IO}^{max} < M_{d,t/LS}^{max} < M_{d,t/CP}^{max} . \quad (5.192)$$

Na slici 5.63 prikazana je promena  $M_{d,t/PL}^{max}$  (PL - performance level) u funkciji drifta za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$ , dok je na slici 5.64 prikazan odnos anvelope ciljnog pomeranja za  $D_t$  i anvelope za IO, LS i CP performansne nivoe.



Slika 5.63 Promena  $M_{d,t/PL}^{max}$  u funkciji drifta za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$



Slika 5.64 Odnos anvelope ciljnog pomeranja za  $DR_t$  i anvelopa za IO, LS i CP performanske nivoe

8. Koficijent  $M_{d,t,maxd/d,t}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja:

$$M_{d,t,maxd/d,t} = \frac{A_{d,t,maxd}}{A_{d,t}}, \quad (5.193)$$

gde je  $A_{d,t,maxd}$  površina oblasti ograničena anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja:

$$A_{d,t,maxd} = D_{t,maxd}^2 \pi. \quad (5.194)$$

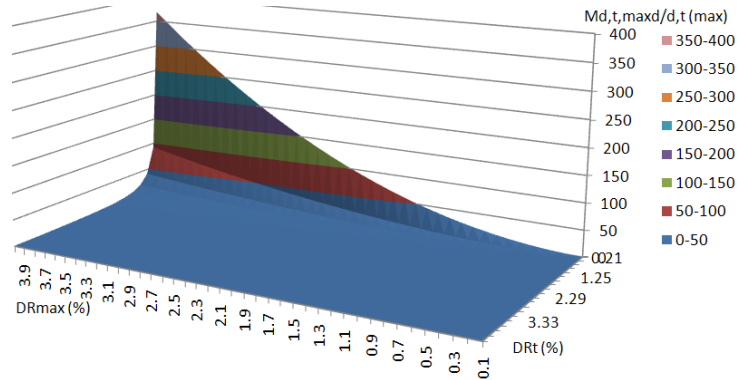
Koficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,t,maxd/d,t}^{max}$  glasi:

$$M_{d,t,maxd/d,t}^{max} = \frac{A_{d,t,maxd}^{max}}{A_{d,t}^{max}}, \quad (5.195)$$

gde je  $A_{d,t,maxd}^{max}$  površina oblasti ograničena anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja svih zemljotresa:

$$A_{d,t,maxd}^{max} = D_{t,maxd}^{2,max} \pi. \quad (5.196)$$

Na slici 5.65 je prikazana promena  $M_{d,t,maxd/d,t}^{max}$  u funkciji drifta za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  i drifta za maksimalno raspoloživo pomeranje  $DR_{max}$ .



Slika 5.65 Promena  $M_{d,t,maxd/d,t}^{max}$  u funkciji drifta za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  i drifta za maksimalno raspoloživo pomeranje  $DR_{max}$

9. Koeficijent  $M_{d,t,min/d,t}$  predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja:

$$M_{d,t,min/d,t} = \frac{A_{d,t,min d}}{A_{d,t}}, \quad (5.197)$$

gde je  $A_{d,t,min d}$  površina oblasti ograničena anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja:

$$A_{d,t,min d} = D_{t,min d}^2 \pi. \quad (5.198)$$

Koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja za sve zemljotrese koji se razmatraju  $M_{d,t,min/d,t}^{min}$  glasi:

$$M_{d,t,min d/d,t}^{min} = \frac{A_{d,t,min d}^{min}}{A_{d,t}^{max}}, \quad (5.199)$$

gde je  $A_{d,t,min d}^{min}$  površina oblasti ograničena anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja svih zemljotresa:

$$A_{d,t,min d}^{min} = D_{t,min d}^{2,min} \pi. \quad (5.200)$$

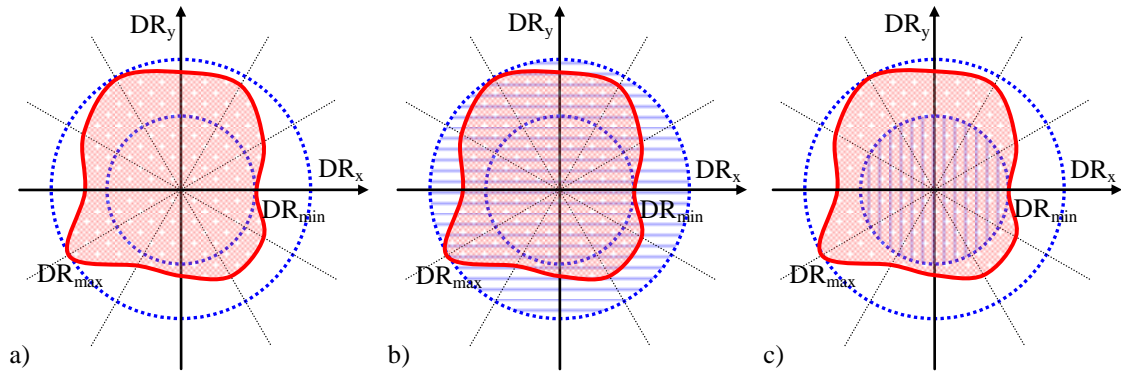
Na slici 5.66 su prikazane analiza odnosa anvelope ciljnog pomeranja, anvelope maksimalnog ciljnog pomeranja i anvelope minimalnog ciljnog pomeranja.

10. Koeficijent  $C_{d,t,max/code}$  koji je u funkciji minimalne potrebne površi duktilnosti za nivo ciljnog pomeranja prema propisima, određuje se prema:

$$C_{d,t,max/code} = \frac{\mu_{d,t}^{max} A_{d,t,code}}{\mu_{d,t,code} A_{d,t}^{max}}, \quad (5.201)$$

gde je:

$$A_{d,t,code} = D_{t,code}^2 \pi = (\mu_{d,t,code} D_{Y,code})^2 \pi. \quad (5.202)$$

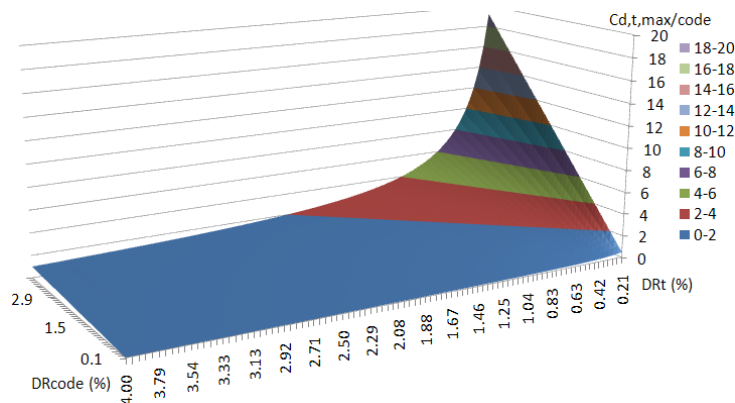


Slika 5.66 Analiza odnosa anvelope ciljnog pomeranja, anvelope maksimalnog ciljnog pomeranja i anvelope minimalnog ciljnog pomeranja

Procena koeficijenta  $C_{d,t,max/code}$  za maksimalno ciljno pomeranje svih zemljotresa dobija se transformacijom (slika 5.67):

$$C_{d,t,max/code} = \frac{\mu_{d,t}^{max} A_{d,t,code}}{\mu_{d,t,code} A_{d,t}^{max}} = \frac{(D_t^{max} / D_Y^{max}) D_{t,code}^2 \pi}{\mu_{d,t,code} A_{d,t}^{max}} = \frac{DR_t^{max} DR_{t,code} H^2 \pi}{A_{d,t}^{max}}. \quad (5.203)$$

Odnos drifta i površi prikazan je na slici 5.68.



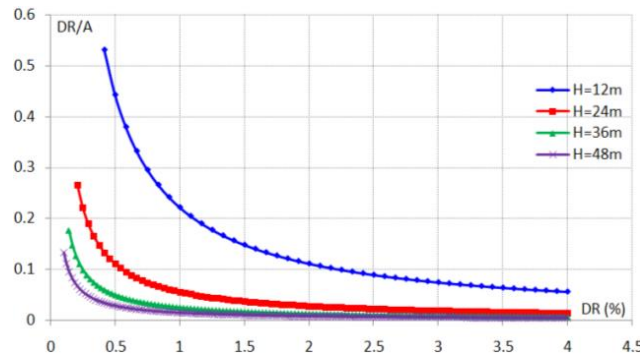
Slika 5.67 Promena  $C_{d,t,max/code}$  u funkciji drifta za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  i drifta  $DR_{code}$

11. Koeficijent  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  predstavlja raspoloživu duktilnost za diskretnu vrednost po uglovima  $\theta_i$ :

$$\mu_{d,max/d,Y}^i = \frac{D_{d,max}^i}{D_Y^i}, \quad (5.204)$$

dok prosečna raspoloživa duktilnost po uglovima  $\theta_i$  za sve zemljotrese glasi:

$$\mu_{d,max/d,Y}^m = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{d,max/d,Y}^{i,j}}{nm} . \quad (5.205)$$



Slika 5.68 Promena  $DR/A$  u funkciji drifta  $DR$

12. Koeficijent  $\mu_{d,t/d,Y}^i$  predstavlja realizovanu duktilnost za diskretnu vrednost po uglovima  $\theta_i$ :

$$\mu_{d,t/d,Y}^i = \frac{D_{d,t}^i}{D_Y^i} , \quad (5.206)$$

dok prosečna realizovana duktilnost po uglovima  $\theta_i$  za sve zemljotrese glasi:

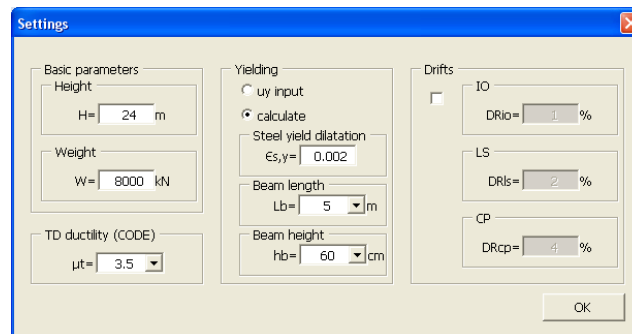
$$\mu_{d,t/d,Y}^m = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{d,t/d,Y}^{i,j}}{nm} . \quad (5.207)$$

Unos nepoznatih vrednosti i selekcija opcija u *Nonlin Quake* TDE izvršava se preko korisničkih interfejsa za definisanje osnovnih parametara (slika 5.69) i za unos vrednosti pomeranja na granici tečenja i ciljnih pomeranja (slika 5.70). Ukoliko se proračun pomeranja na nivou tečenja sprovodi prema [189], tada je:

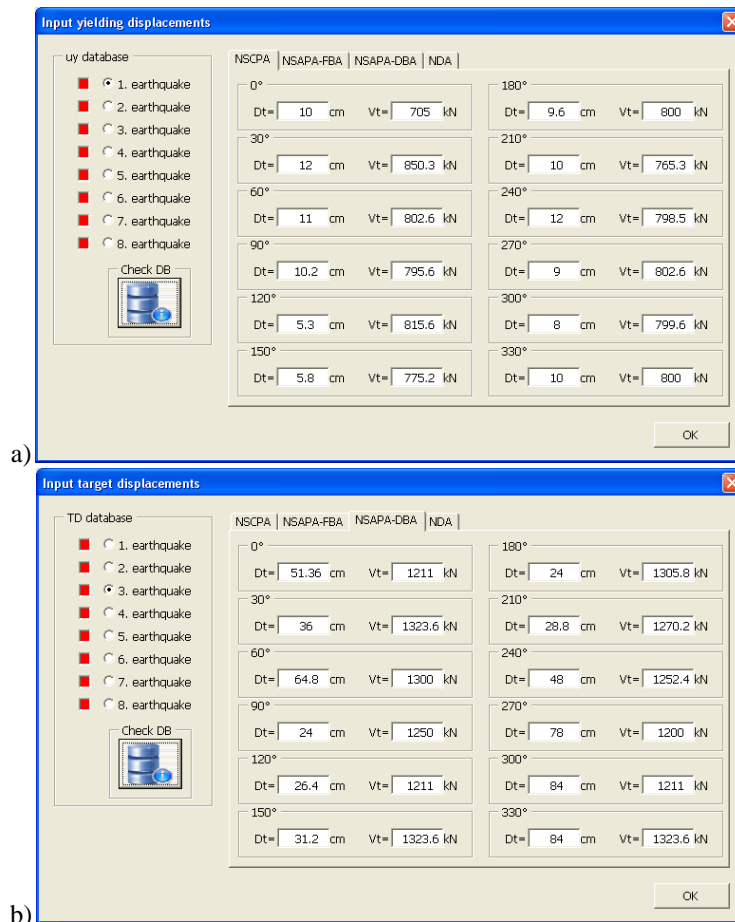
$$A_{d,Y} = D_{y,PC}^2 \pi , \quad (5.208)$$

gde je:

$$D_{y,PC} = DR_y H_{eff} , \quad DR_y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_b}{h_b} . \quad (5.209)$$

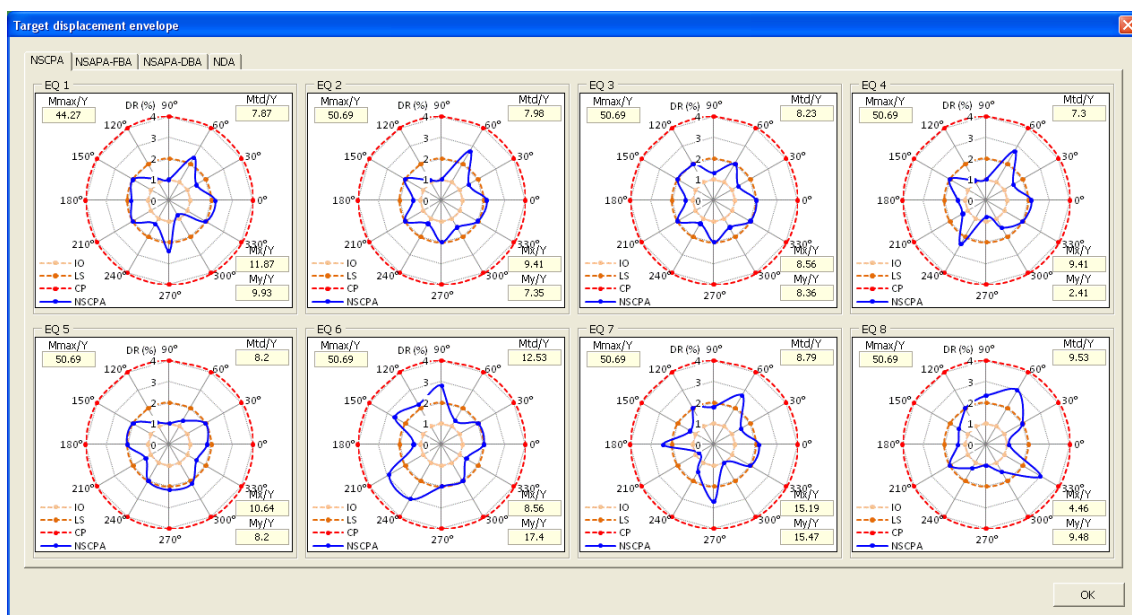


Slika 5.69 Interfejs za unos parametara za analizu anvelopa ciljnih pomeranja



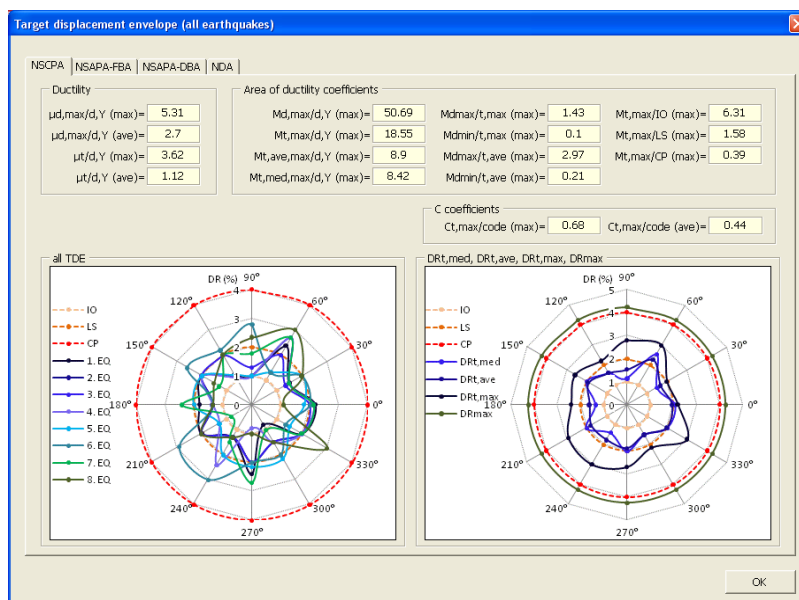
Slika 5.70 Interfejs za unos vrednosti: a) pomeranja na granici tečenja, b) ciljnih pomeranja

Interfejs za pregled generisanih anvelopa ciljnih pomeranja po zemljotresima i analizama prikazan je na slici 5.71.



Slika 5.71 Interfejs za pregled generisanih anvelopa ciljnih pomeranja po zemljotresima i analizama

Na slici 5.72 prikazani su svi proračunati koeficijenti (196 koeficijenata) i dat je prikaz anvelope za sve zemljotrese. Takođe, preko ovih interfejsa moguće je pregledati proračun svih koeficijenata za različite tipove analiza.



Slika 5.72 Interfejs za pregled generisanih anvelopa ciljnog pomeranja i svih proračunatih koeficijenata

## 5.6. PROCESIRANJE ANVELOPA CILJNOG POMERANJA, GLOBALNIH I MEĐUSPRATNIH DRIFTOVA OKVIRNIH ZGRADA

Procesiranje anvelopa ciljnog pomeranja sprovedeno je rotirajući komponente seizmičkog dejstva  $E_{\theta} + 0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  po uglovima  $\theta_i$  (za inkrement ugla rotacije  $\Delta\theta=30^{\circ}$ ), tako da se dobijaju maksimalna pomeranja za datu kombinaciju. Ovakvo istraživanje predstavlja nastavak istraživanja prikazanom u prethodnom poglavlju 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4, 15x4x4-6 i 9x6x5-12 3D modela zgrada (slike 3.61÷3.65), ali su naknadno sprovedene iste analize do nivoa ciljnih pomeranja radi utvrđivanja odgovarajućih globalnih  $DR_t$  i međuspratnih driftova  $IDR_t$ . Sve analize su sprovedene skalirajući akceleroگرامe prema metodi najmanjih kvadrata i kompatibilizacijom.

Na slikama 5.73÷5.112 su prikazane anvelope, proračunati koeficijenti i površi driftova 3D modela zgrada. U prvoj grupi su prikazane anvelope ciljnog pomeranja u polarnom koordinatnom sistemu za svaki zemljotres pojedinačno: *Imperial Valley* IV79, *Loma Prieta* LP89, *Northridge* NR94, *San Fernando* SF71, *Kobe* KO95, *Morgan Hill* MH84, *Palm Springs* PS86 i *Parkfield* PA66, nepotpuni i potpuni nestacionarni veštački

akcelerogram. Za svaki ugao  $\theta_i$  su određeni globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$ , maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , i globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  za IO, LS i CP performansne nivoe. U cilju kvalitetnije vizuelne prezentacije polarnih dijagrama vrednosti globalnog drifta  $DR_{LS}$  za LS performansni nivo su izjednačene sa globalnim driftom  $DR_{CP}$  za CP performansni nivo. Ovo je urađeno s obzirom da su svi realizovani globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  nisu bili veći od 2%. Preciznije analizirano globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja su manji od 1% ili nešto veći do 1.5%, osim kod 9x6x5-12 3D modela zgrade gde su manji od 1%. Dodatno su prikazane anvelope ciljnog pomeranja: za sve zemljotrese, srednju vrednost globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,ave}$ , medijanu globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,med}$  i maksimalnu vrednost globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,max}$ . Posebno su prikazane relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ . U drugoj grupi su prikazani proračunati koeficijenti  $\mu_{d,max/d,Y}^i$ ,  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ ,  $M_\mu$ ,  $M_{d,t/d,Y}$ ,  $M_{d,x/d,Y}$ ,  $M_{d,y/d,Y}$ ,  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$ ,  $M_{d,t/CP}$ ,  $M_{d,t,max/d,t}$ ,  $M_{d,t,min/d,t}$  i  $C_{d,t,max/code}$ . U trećoj grupi su prikazane površi globalnih (*drift surface*) i međuspratnih driftova (*interstorey drift surface*) za nivo ciljnog pomeranja i za nivo maksimalnog pomeranja. Ove površi su generisane identično principu generisanja *pushover* površi. Globalni i međuspratni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  i  $IDR_t$  su određeni pojedinačnim izdvajanjem pomeranja svih čvorova po svim spratovima za nivoe ciljnih pomeranja, dok su maksimalni globalni i međuspratni driftovi  $DR_{max}$  i  $IDR_{max}$  određeni pojedinačnim izdvajanjem pomeranja svih čvorova po svim spratovima za nivoe maksimalnih pomeranja.

Razmatrajući realizovane anvelope ciljnog pomeranja u polarnim koordinatama može se izdvojiti nekoliko bitnih karakteristika:

- Kod 4x6x3 3D modela zgrade veliki broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  jednak je maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Ovo se događa gotovo kod svih zemljotresa (i za skaliranje i za kompatibilizaciju), tako da se maksimalne vrednosti globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,max}$  izjednačavaju sa maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Srednje vrednosti i medijane globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,ave}$  i  $DR_{t,med}$  su međusobno gotovo identične, ali su manje od maksimalnih vrednosti globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,max}$  u



intervalu  $\theta=(60^\circ\div 120^\circ)$ , odnosno u intervalu  $\theta=(240^\circ\div 300^\circ)$ . Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su nešto niže od relativnih vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  u intervalu  $\theta=(60^\circ\div 120^\circ)$ , odnosno u intervalu  $\theta=(240^\circ\div 300^\circ)$ . U ostalim intervalima ugla  $\theta_i$  ove vrednosti su međusobno jednake, a što ukazuje na činjenicu da je nelinearna krutost pozitivna (u prvom slučaju) ili približno jednaka nuli (u drugom slučaju).

- Kod 4x6x5-13 3D modela zgrade manji broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  je jednak maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ , razmatrajući pojedinačno zemljotrese i to kod skaliranja akceleroograma metodom najmanjih kvadrata. Pri kompatibilizaciji akceleroograma znatno veći broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  je jednak maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ , razmatrajući pojedinačno zemljotrese. Međutim, i pri skaliranju i pri kompatibilizaciji kod svih zemljotresa maksimalne vrednosti globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,max}$  izjednačavaju se sa maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Srednje vrednosti i medijane globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,ave}$  i  $DR_{t,med}$  su manje od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$  kod skaliranja akceleroograma, dok su kod kompatibilizacije akceleroograma ovi driftovi gotovo jednaki. Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su jednake relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  pri  $\theta=(30^\circ,120^\circ,210^\circ,300^\circ)$ . Ovo je posebno izraženo za slučaj kompatibilizacije akceleroograma, pri čemu se i ostale relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  izjednačavaju relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ .
- Kod 15x4x4 3D modela zgrade su globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  jednaki maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$  (i za skaliranje i za kompatibilizaciju) u samo četiri vrednosti ugla  $\theta=(30^\circ,120^\circ,210^\circ,300^\circ)$ . Ovo je znatno povoljnija situacija, u odnosu na globalne driftove prethodnih modela zgrada, s obzirom da postoji izvesna rezerva u nelinearnom pomeranju sistema

do dostizanja kolapsnog stanja. Ova rezerva je najveća u slučaju *Parkfield* PA66 zemljotresa, dok je nešto niža u slučaju *Morgan Hill* MH84 zemljotresa čiji su akceleroگرامi skalirani prema metodi najmanjih kvadrata. Srednje vrednosti i medijane globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,ave}$  i  $DR_{t,med}$  su znatno manje od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$  kod skaliranja akceleroگرامa, dok su kod kompatibilizacije akceleroگرامa ovi driftovi, u velikom broju slučajeva, gotovo jednaki. Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su bliže relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  pri kompatibilizaciji akceleroگرامa, dok su za slučaj skaliranja akceleroگرامa ova odstupanja su znatno veća. Specijalna situacija se pojavljuje pri skaliranju akceleroگرامa *Morgan Hill* MH84 zemljotresa, pošto su relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  znatno niže, u odnosu na rešenja dobijena za ostale zemljotrese.

- Kod 15x4x4-6 3D modela zgrade globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  izjednačavaju se sa maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$  pri skaliranju *Loma Prieta* LP89 zemljotresa i nepotpunog nestacionarnog veštačkog akceleroگرامa, ali samo u određenim vrednostima ugla  $\theta_i$ . U svim ostalim slučajevima i pri kompatibilizaciji akceleroگرامa globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  su znatno niži od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$ . Ova činjenica ukazuje na postojanje rezerve u nelinearnom pomeranju sistema do dostizanja kolapsnog stanja. Srednje vrednosti i medijane globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,ave}$  i  $DR_{t,med}$  su znatno manje od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$ , i pri skaliranju i pri kompatibilizaciji akceleroگرامa. Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  znatnije odstupaju od relativnih vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , i pri skaliranju i kompatibilizaciji akceleroگرامa. Ove vrednosti su dosta niže u velikom broju slučajeva, a što ukazuje da je nelinearna krutost pozitivna.
- Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade, pri skaliranju akceleroگرامa metodom najmanjih kvadrata, veliki broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  jednak je maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Sa druge

strane, u slučaju *Imperial Valley IV79*, *Loma Prieta LP89*, *Parkfield PA66* zemljotresa i potpunog nestacionarnog veštačkog akcelrograma svi globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  su manji od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$ . Nešto je blaža varijanta u slučaju kompatibilizacije akcelrograma, tako da su samo kod četiri vrednosti ugla  $\theta_i$  globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  jednaki maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Srednje vrednosti i medijane globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,ave}$  i  $DR_{t,med}$  su znatno manje od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$ , pri skaliranju akcelrograma, dok su pri kompatibilizaciji akcelrograma ove vrednosti bliže maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su bliže relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  pri kompatibilizaciji akcelrograma, dok su za slučaj skaliranja akcelrograma ova odstupanja veća. U određenim slučajevima relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su i veće od relativnih vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , a što ukazuje na činjenicu da nelinearna krutost postaje negativna nakon dostizanja nivoa ciljnog pomeranja.

- Pri kompatibilizaciji akcelrograma se dobijaju uravnoteženija (ujednačenija) rešenja u pogledu globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$ , nego što je to slučaj kod skaliranja akcelrograma metodom najmanjih kvadrata. Ovo je direktna posledica razlike u metodologijama koje su primenjene kod procesiranja akcelrograma, s obzirom da se kompatibilizacijom realizuju manja odstupanja između spektralnih ubrzanja, čak i kod različitih tipova zemljotresa.

Razmatrajući proračunate koeficijente  $\mu_{d,max/d,Y}^i$ ,  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ ,  $M_\mu$ ,  $M_{d,t/d,Y}$ ,  $M_{d,x/d,Y}$ ,  $M_{d,y/d,Y}$ ,  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$ ,  $M_{d,t/CP}$ ,  $M_{d,t,maxd/d,t}$ ,  $M_{d,t,min/d,t}$  i  $C_{d,t,max/code}$  može se izdvojiti nekoliko bitnih karakteristika:

- Koeficijenti prosečne raspoložive duktilnosti  $\mu_{d,max/d,Y}$  kod 4x6x3, 4x6x5-13 i 15x4x4-6 3D modela zgrada su u intervalu (2÷4), a što ukazuje na srednje duktilno ponašanje. U slučaju 15x4x4 i 9x6x5-12 3D modela zgrada ovaj koeficijent je veći od 4, a što ukazuje na visoko duktilno ponašanje.
- Koeficijenti prosečne realizovane (zahtevane) duktilnosti  $\mu_{d,t/d,Y}$  kod 4x6x3 i

4x6x5-13 3D modela zgrada su u intervalu (2÷4), a što ukazuje na srednje duktilno ponašanje do nivoa ciljnog pomeranja. U slučaju 15x4x4 3D modela zgrade ovaj koeficijent je, u određenim situacijama i niži od 2, dok je u nekim i veći od 2, ali manji od 4, a što ukazuje na nisko do srednje duktilno ponašanje. Ovo je posebno indikativno kod skaliranja akceleroograma, dok je kod kompatibilizacije akceleroograma realizovana prosečna zahtevana duktilnost. Kod 15x4x4-6 3D modela zgrade su, i za slučaj skaliranja i kompatibilizacije akceleroograma, dobijene niže do srednje duktilnosti za realizovane nivoe ciljnih pomeranja. U odnosu na sve prethodne zgrade, kod 9x6x5-12 3D modela zgrade je dobijena visoka duktilnost za realizovane nivoe ciljnih pomeranja.

- U tabeli 5.6 su prikazane maksimalne i minimalne vrednosti proračunatih koeficijenata 3D modela zgrada primenjujući skaliranje akceleroograma metodom najmanjih kvadrata i kompatibilizacijom.

Tabela 5.6 Maksimalne i minimalne vrednosti proračunatih koeficijenata 3D modela zgrada

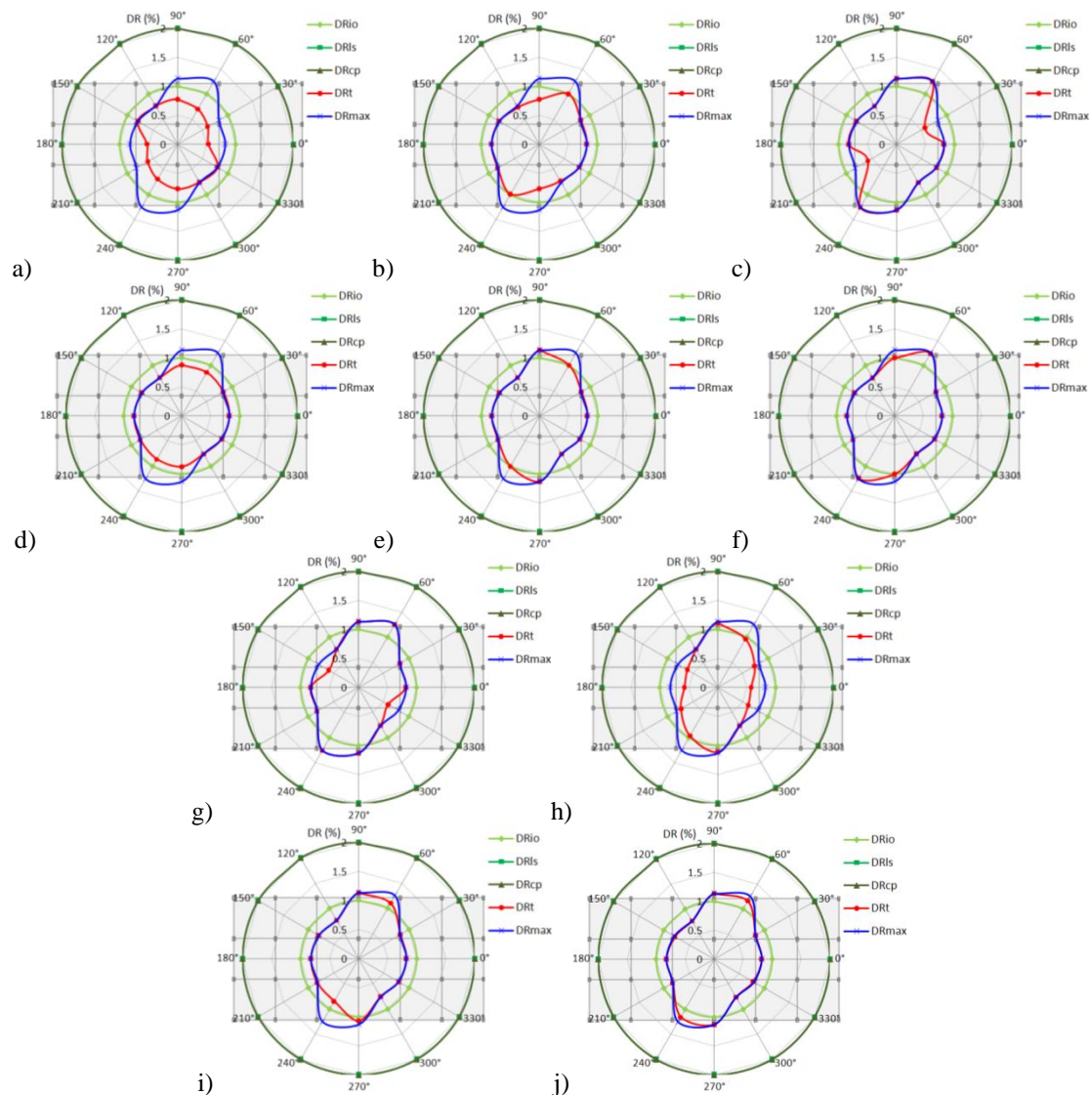
	$\mu_{d,max/d,t,y}$	$\mu_{d,t,d,y}$	$M_{d,t,d,y}$	$M_{d,x,d,y}$	$M_{d,y,d,y}$	$M_{d,t/O}$	$M_{d,t/LS}$	$M_{d,t/CP}$	$M_{d,t,max/d,t}$	$M_{d,t,min/d,t}$	$C_{d,t,max/code}$
skaliranje akceleroograma metodom najmanjih kvadrata											
max											
4x6x3	3.19	3.12	9.79	8.31	15.68	0.80	0.20	0.20	2.09	0.89	0.76
4x6x5-13	3.15	3.11	9.65	10.28	12.00	0.89	0.22	0.22	1.79	0.84	0.86
15x4x4	5.61	3.70	12.23	48.43	48.43	0.38	0.10	0.10	2.46	0.96	1.34
15x4x4-6	3.59	2.96	8.96	17.29	16.82	1.14	0.28	0.28	2.40	0.78	2.37
9x6x5-12	13.49	12.6	154.5	269.7	200.2	0.39	0.10	0.10	2.42	0.72	0.39
min											
4x6x3	3.19	2.36	5.60	8.31	15.68	0.46	0.11	0.11	1.19	0.45	0.49
4x6x5-13	3.15	2.16	4.70	10.28	12.00	0.44	0.11	0.11	1.32	0.42	0.57
15x4x4	5.61	1.61	2.58	48.43	48.43	0.07	0.02	0.02	1.15	0.22	0.50
15x4x4-6	3.59	0.75	0.57	17.29	16.82	0.07	0.02	0.02	1.24	0.33	0.53
9x6x5-12	13.49	5.87	33.6	269.7	200.2	0.08	0.02	0.02	1.28	0.27	0.19
kompatibilizacija akceleroograma											
max											
4x6x3	3.19	3.15	10.00	8.31	15.68	0.82	0.20	0.20	1.77	0.86	0.60
4x6x5-13	3.15	3.15	9.91	10.28	12.00	0.92	0.23	0.23	1.48	0.77	0.61
15x4x4	5.61	3.55	12.61	48.43	48.43	0.35	0.09	0.09	1.43	0.93	0.65
15x4x4-6	3.59	2.15	4.64	17.29	16.82	0.59	0.15	0.18	2.14	0.89	2.01
9x6x5-12	13.49	11.72	134.7	269.7	200.2	0.34	0.08	0.08	1.58	0.75	0.25
min											
4x6x3	3.19	2.86	8.19	8.31	15.68	0.67	0.17	0.17	1.48	0.70	0.51
4x6x5-13	3.15	2.93	8.59	10.28	12.00	0.80	0.20	0.20	1.26	0.72	0.57
15x4x4	5.61	3.18	10.09	48.43	48.43	0.28	0.07	0.07	1.14	0.77	0.57
15x4x4-6	3.59	0.97	0.95	17.29	16.82	0.12	0.03	0.03	1.30	0.22	0.82
9x6x5-12	13.49	10.51	107.7	269.7	200.2	0.27	0.07	0.07	1.28	0.61	0.18

- Koeficijent (raspoložive) površi duktilnosti  $M_{\mu}$  je već razmatran u prethodnom poglavlju. Koeficijenti realizovane (zahtevane) površi duktilnosti  $M_{d,t/d,Y}$  kod 4x6x3 i 4x6x5-13 3D modela zgrada su u intervalu (3÷11), a što odgovara srednjem duktilnom ponašanju. U slučaju 15x4x4 3D modela zgrade dobijena je niska, srednja i visoka zahtevana duktilnost pri skaliranju akceleroograma, dok je pri kompatibilizaciji akceleroograma dobijena srednja i visoka zahtevana duktilnost. Takođe, kod 15x4x4-6 3D modela zgrade dobijena je niska do srednja zahtevana duktilnost, a slučaju 9x6x5-12 3D modela zgrade dobijena je visoka duktilnost merena preko koeficijenta  $M_{d,t/d,Y}$ .
- Koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $x$  osu  $M_{d,x/d,Y}$  kod 4x6x3 i 4x6x5-13 3D modela zgrada ukazuje na srednje duktilno ponašanje, dok kod 15x4x4, 15x4x4-6 i 9x6x5-12 3D modela zgrada ukazuje na visoko duktilno ponašanje. Sa druge strane, koeficijent odgovarajuće površi duktilnosti za  $y$  osu  $M_{d,y/d,Y}$  kod svih 3D modela zgrada ukazuje na visoko duktilno ponašanje.
- Koeficijenti odnosa površina oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja i oblasti ograničenih anvelopama IO, LS i CP performansnih nivoa treba da su  $M_{d,t/CP} < M_{d,t/LS} < M_{d,t/IO}$ . Takođe, treba da je ispunjen uslov  $M_{d,t/CP} < 1$ . Istraživanjem je utvrđeno da su kod svih 3D modela zgrada koeficijenti  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$  znatno manji od 1 (do 0.25). Povoljna rešenja se mogu smatrati kada je  $M_{d,t/LS} < 1$ , a što bi značilo da pri zahtevanom duktilnom ponašanju zgrade nije prekoračen LS performansni nivo. Istraživanjem je to i potvrđeno. Koeficijent  $M_{d,t/IO}$  je manji od 1, osim u jednom slučaju kod 15x4x4-6 3D modela zgrade.
- Koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom maksimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja  $M_{d,t,max/d,t}$ , kod svih 3D modela zgrada, je veći od 1. Koeficijent odnosa površina oblasti ograničene anvelopom minimalnog ciljnog pomeranja i oblasti ograničene anvelopom ciljnog pomeranja  $M_{d,t,min/d,t}$ , kod svih 3D modela zgrada, je manji od 1. Što je vrednost koeficijenta  $M_{d,t,max/d,t}$  veća od 1 i što je vrednost koeficijenta  $M_{d,t,min/d,t}$  manja od 1, to je oblik anvelope ciljnog pomeranja elipsoidniji. Sa druge strane, što se više vrednosti ovih koeficijenata približavaju 1, to oblik anvelope ciljnog pomeranja teži krugu.
- Koeficijent koji je u funkciji minimalne potrebne površi duktilnosti za nivo

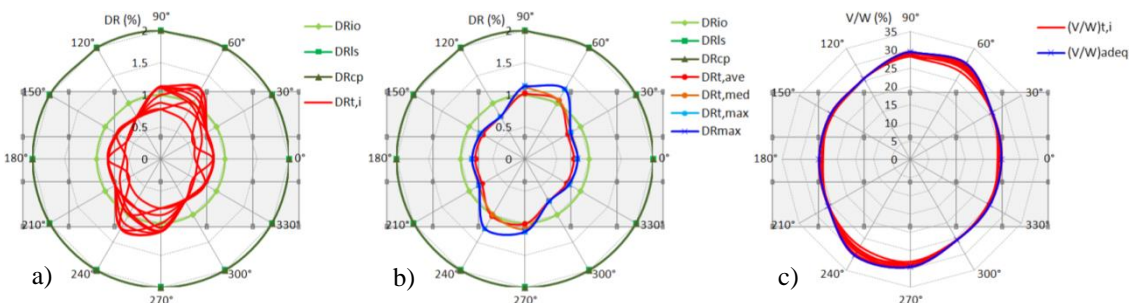
ciljnog pomeranja prema propisima  $C_{d,t,max/code}$  treba da je manji od 1. Kod 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 9x6x5-12 3D modela zgrada je i dobijen ovaj koeficijent manji od 1. Međutim kod 15x4x4-6 3D modela zgrada su dobijene i veće i manje vrednosti  $C_{d,t,max/code}$  od 1. Prilikom proračuna, u *Nonlin Quake TDE*, uzeto je u obzir da je minimalna zahtevana duktilnost  $\mu_{min}=2$  za nivo ciljnog pomeranja. Ova vrednost minimalne duktilnosti je mogla biti i smanjena, tako da bi vrednosti koeficijenta  $C_{d,t,max/code}$  postala manja od 1.

Razmatrajući prikazane površi globalnih i međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja i za nivo maksimalnog pomeranja može se izdvojiti nekoliko bitnih karakteristika:

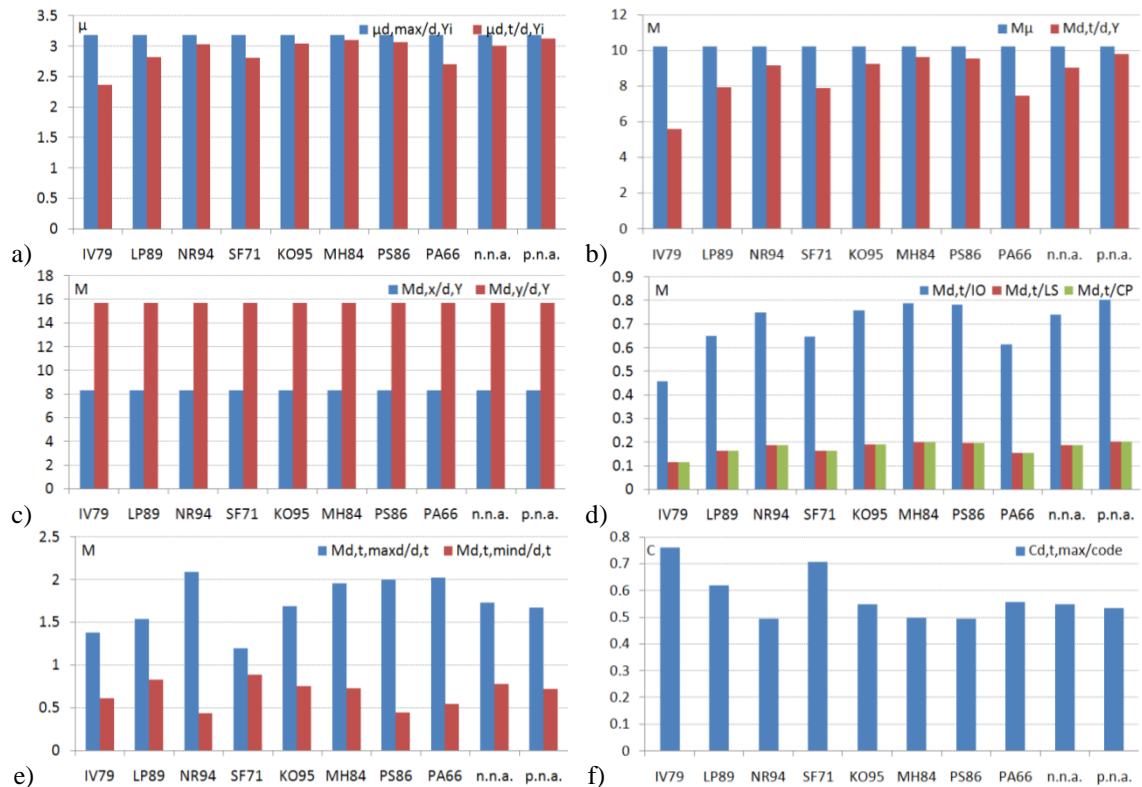
- Kod svih 3D modela zgrada, i za skaliranje i za kompatibilizaciju akcelerograma, dobijeni su najveće vrednosti globalnih driftova i za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  i za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$  u najvišim spratovima. Maksimalne vrednosti globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja iznose nešto više od 1% (maksimalno  $\approx 1.5\%$ ) kod 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modele zgrada, dok u slučaju 9x6x5-12 3D modela zgrade ovi driftovi su manji od 1%. Ukoliko se uzme u obzir da je globalni drift za IO performansni nivo  $DR_{IO}=1\%$ , a za LS performansni nivo  $DR_{LS}=2\%$ , tada se može konstatovati da je i dobijena maksimalna vrednost globalnog drifta za nivo ciljnog pomeranja od 1.5% u zadovoljavajućim granicama.
- Kod 4x6x3 i 4x6x5-13 3D modela objekata dobijeni su najveći međuspratni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$  u nižim spratovima, dok se ka višim spratovima njihove vrednosti smanjuju. Kod 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela zgrada dobijeni su najveći međuspratni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$  od drugog do sedmog sprata, dok se ka višim spratovima njihove vrednosti smanjuju. U prizemlju se, takođe znatnije redukuju  $IDR_t$  vrednosti. Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade dobijeni su najveći međuspratni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$  od prizemlja do četvrtog sprata, dok se kod viših spratova ove vrednosti smanjuju. Kod dve podzemene etaže ovog objekta međuspratni driftovi su značajno redukovani. S obzirom da međuspratni driftovi ukazuju na povredljivost ispune po spratovima, to se vizuelnom prezentacijom njihovih površi može ukazati na potencijalna mesta oštećenja.



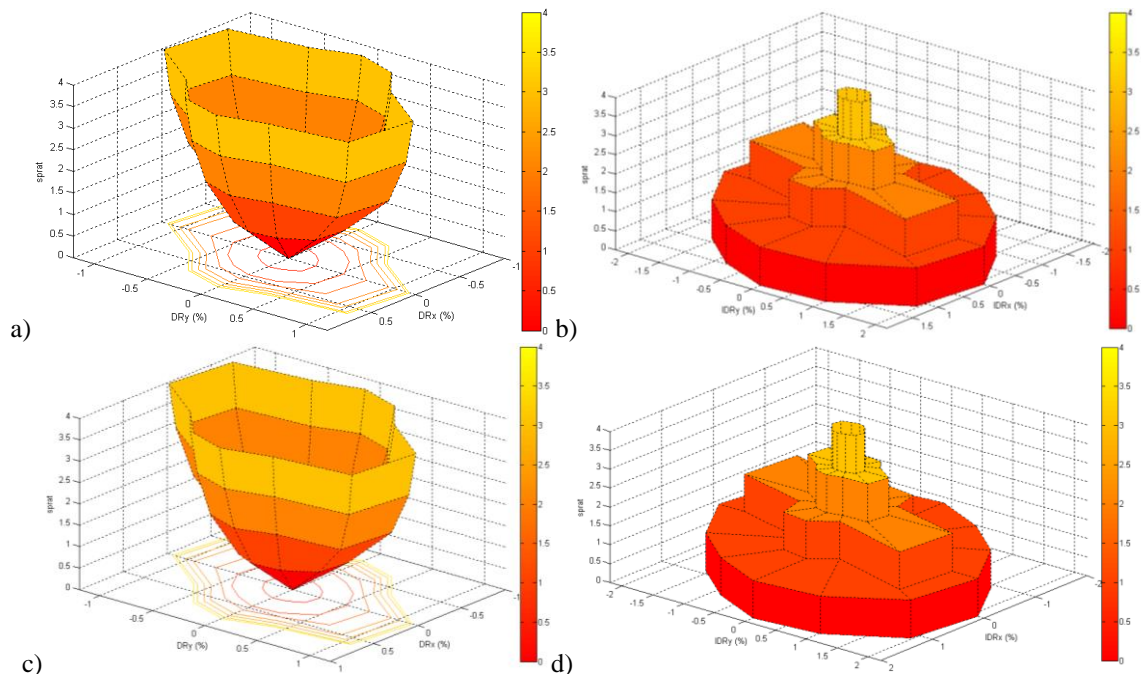
Slika 5.73 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



Slika 5.74 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$

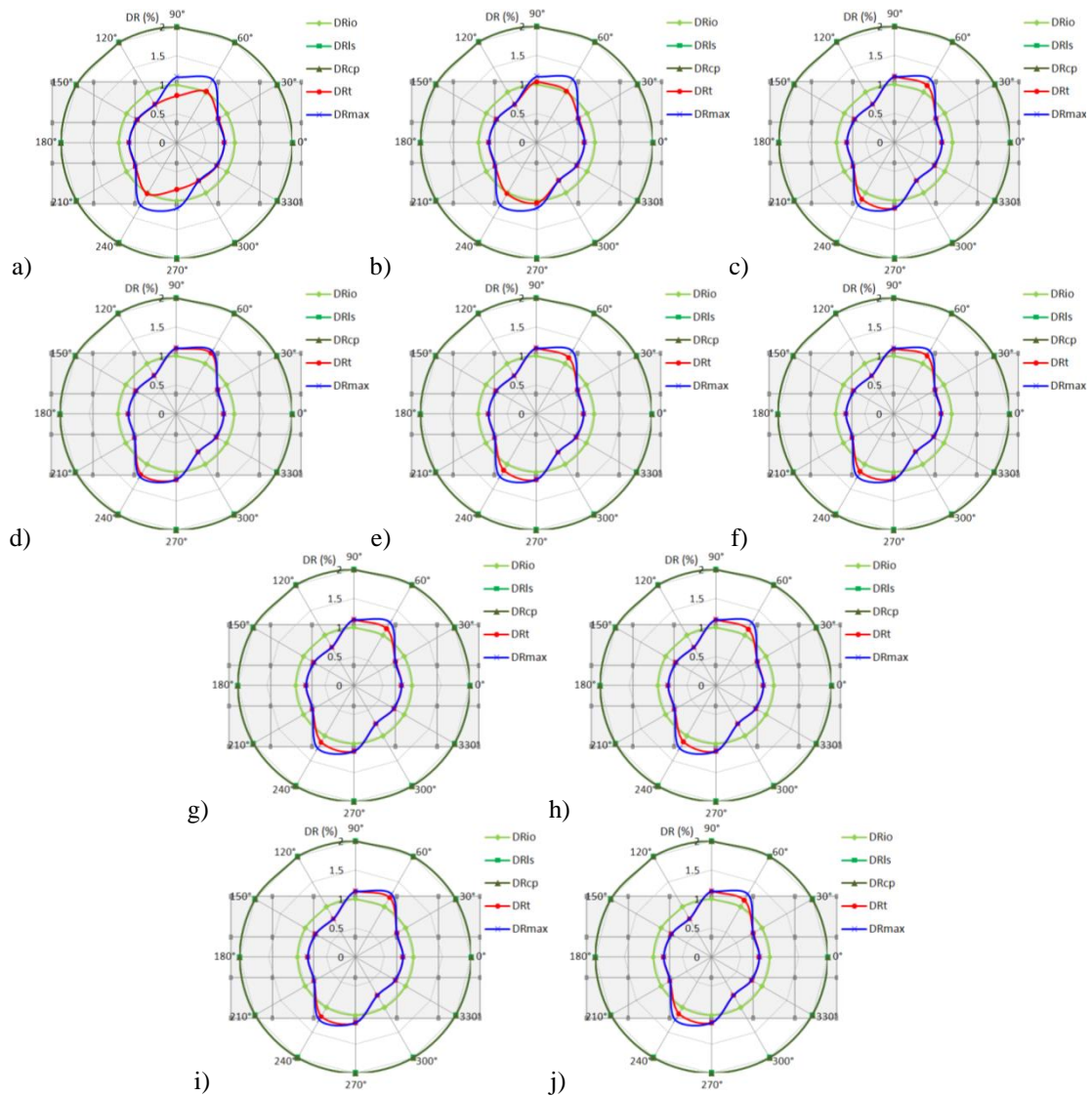


Slika 5.75 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}$  i  $\mu_{d,t/d,Y}$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$

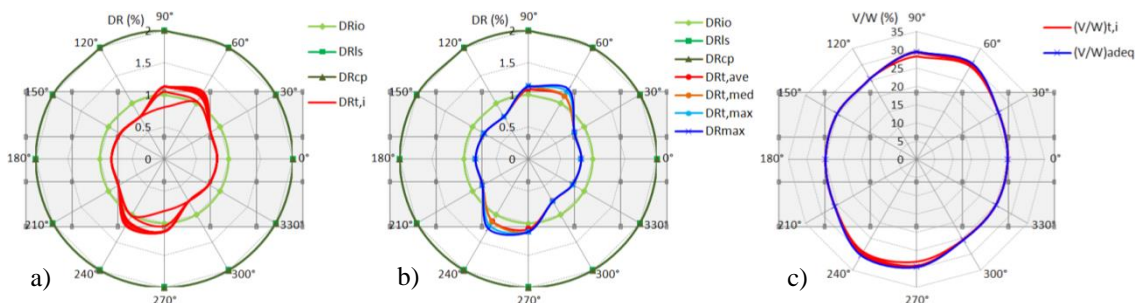


Slika 5.76 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_c$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_c$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$

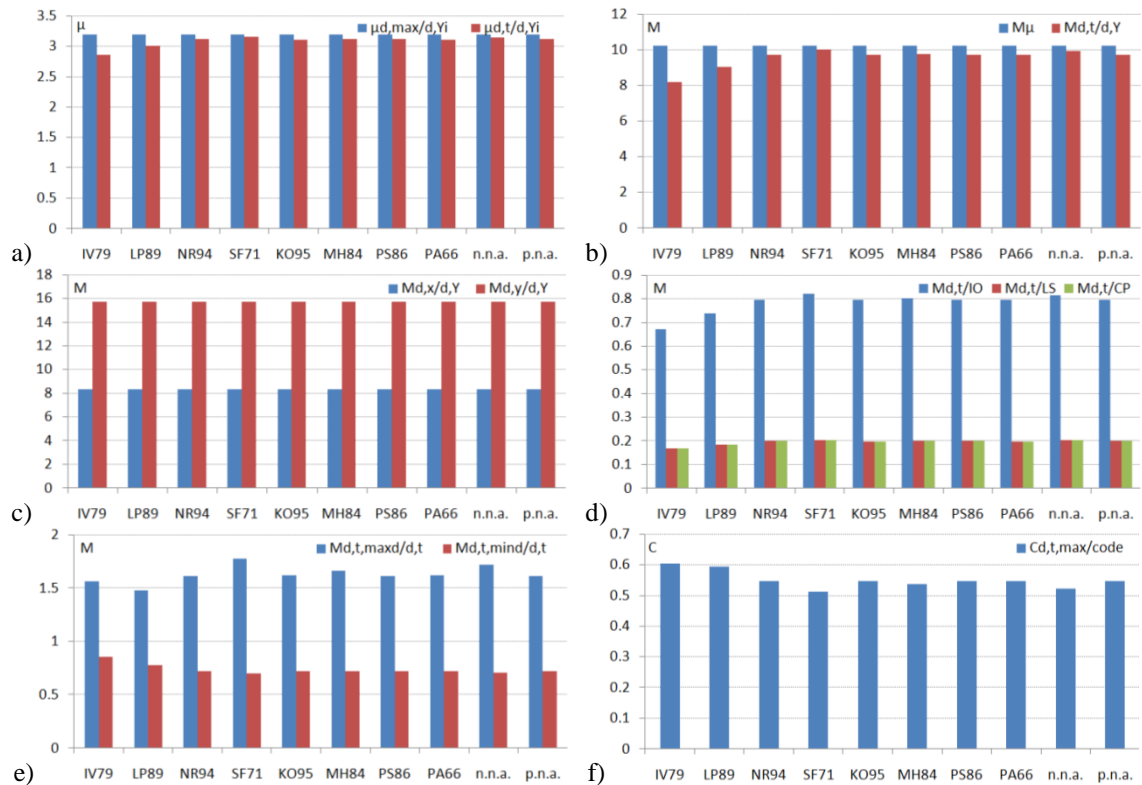




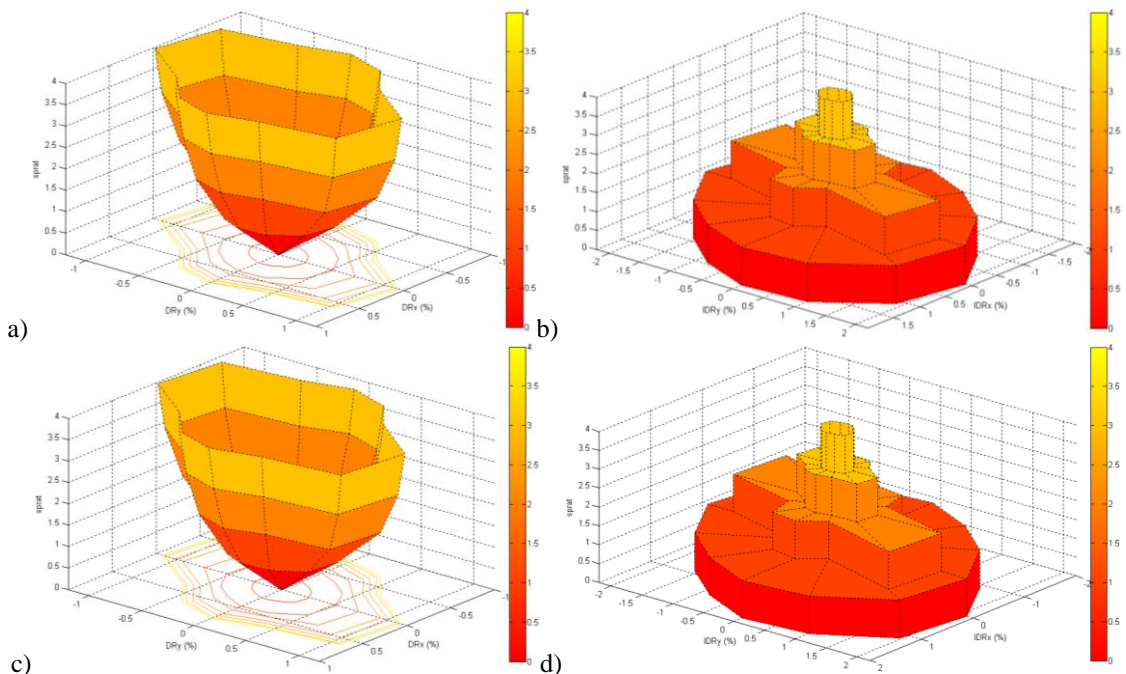
Slika 5.77 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



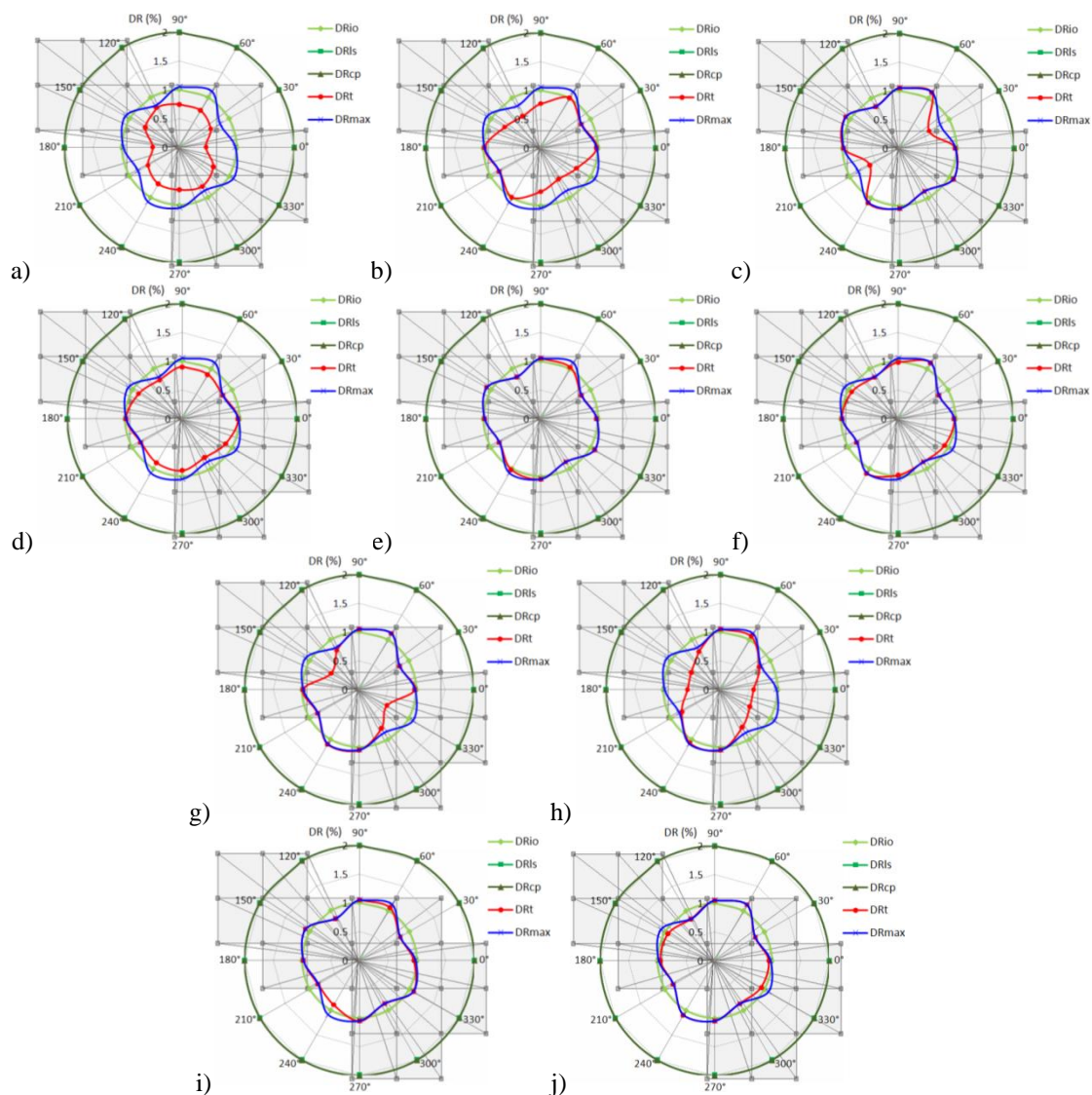
Slika 5.78 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$



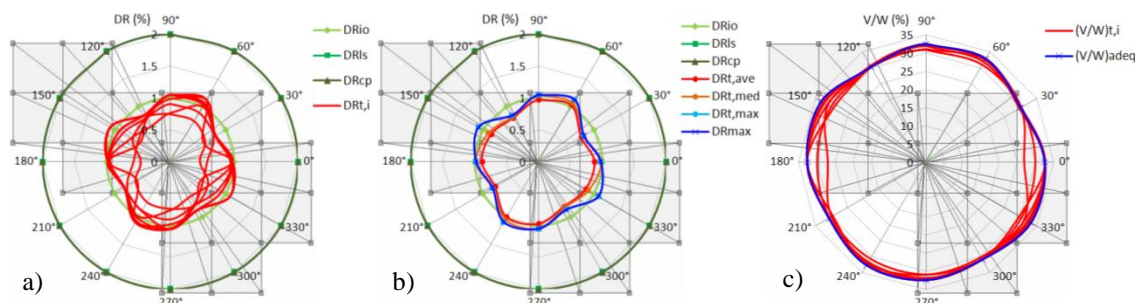
Slika 5.79 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibil. akcelerogrami), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$



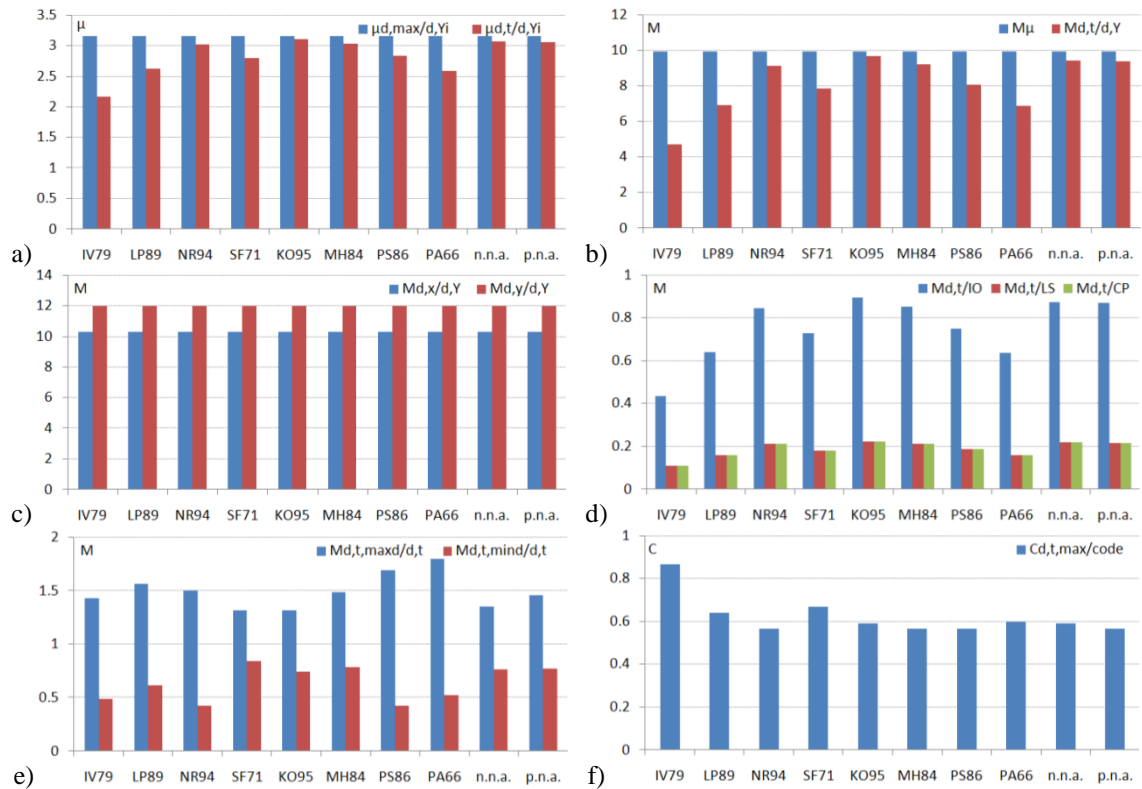
Slika 5.80 4x6x3 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_r$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_r$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$  d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$



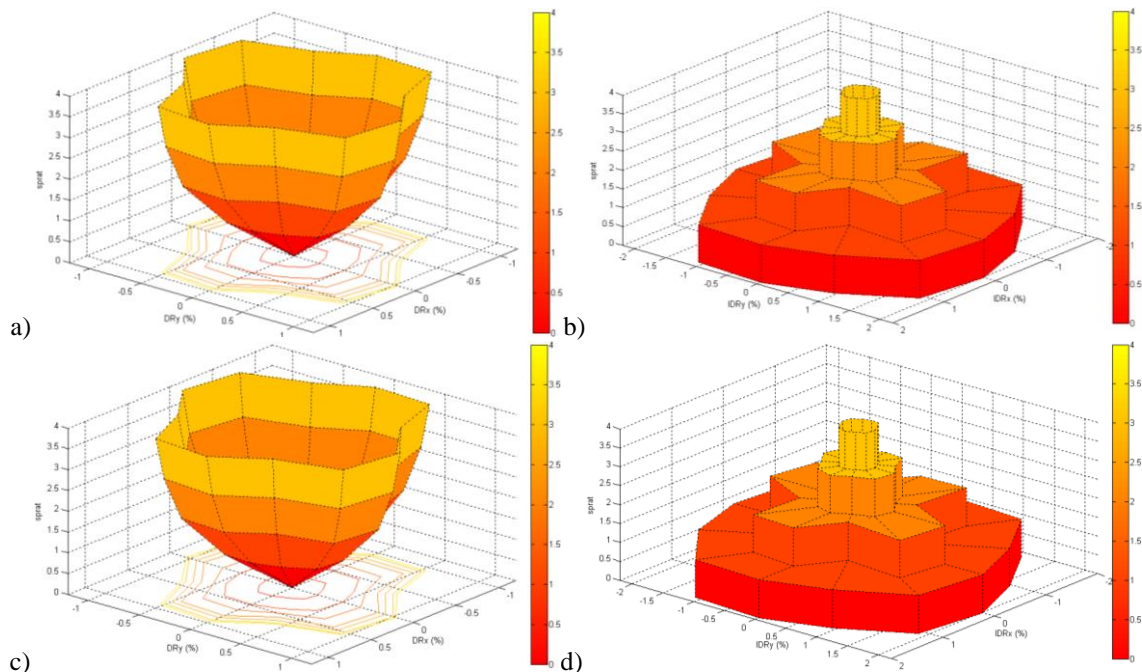
Slika 5.81 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



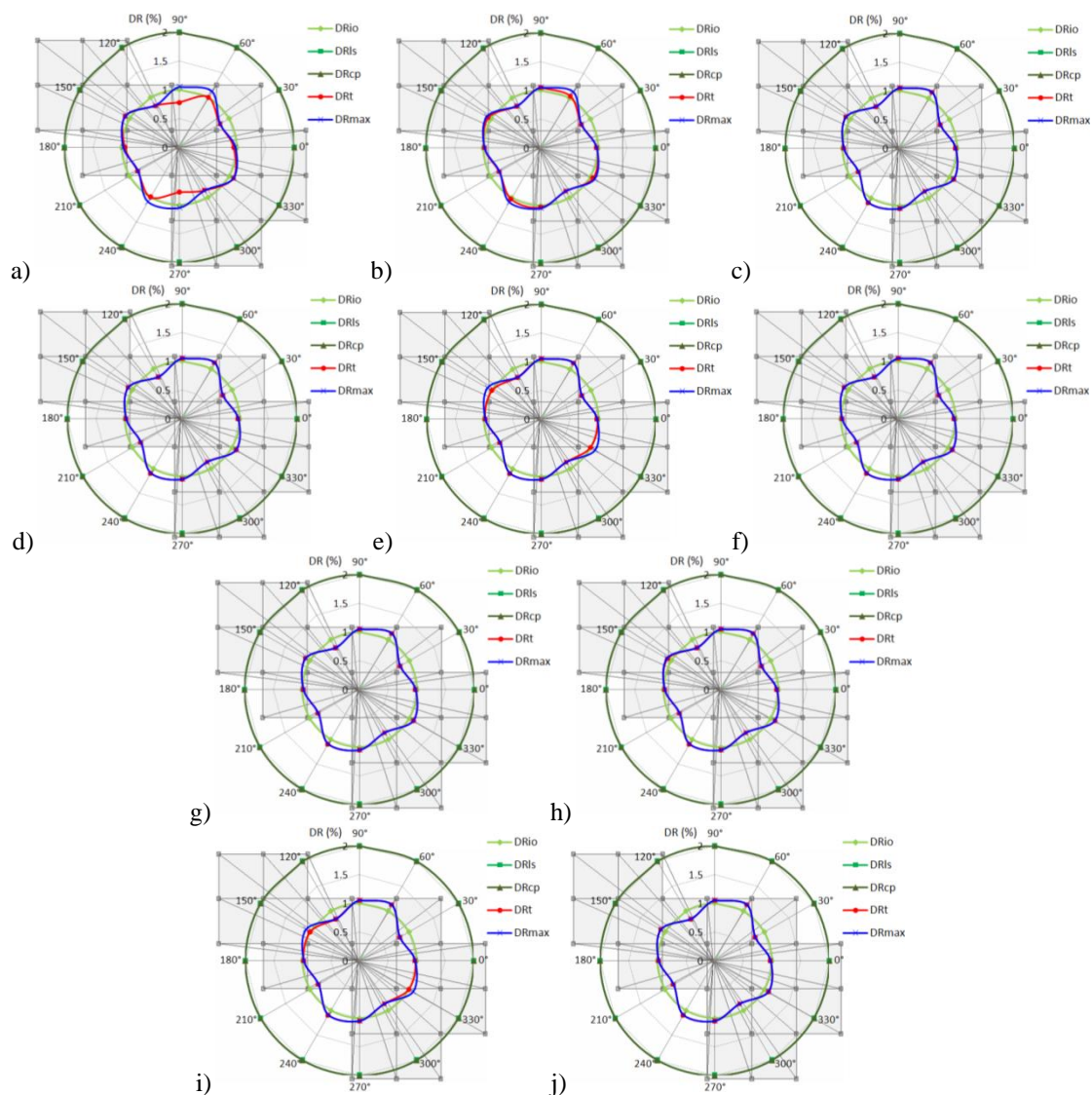
Slika 5.82 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$



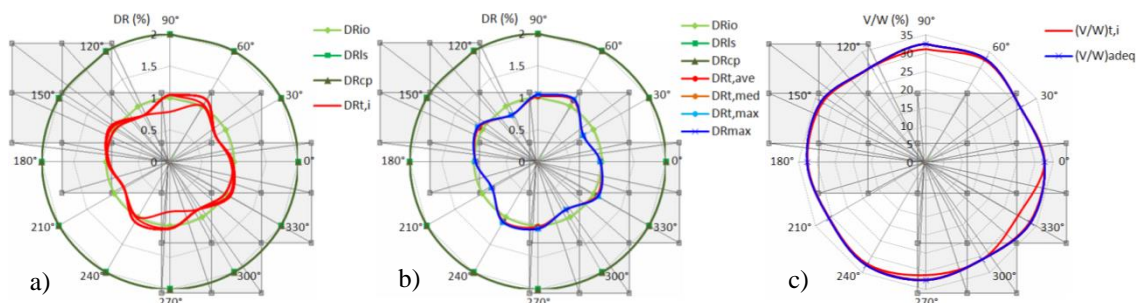
Slika 5.83 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$



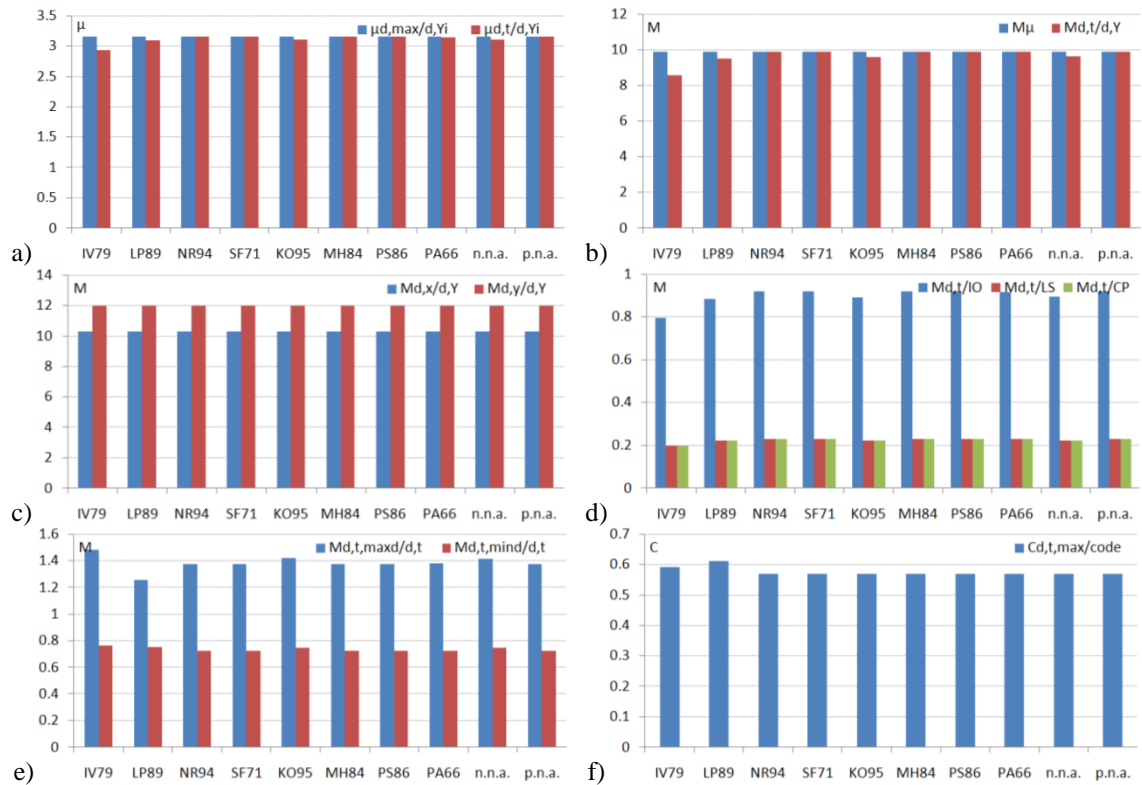
Slika 5.84 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_r$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_r$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$



Slika 5.85 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram

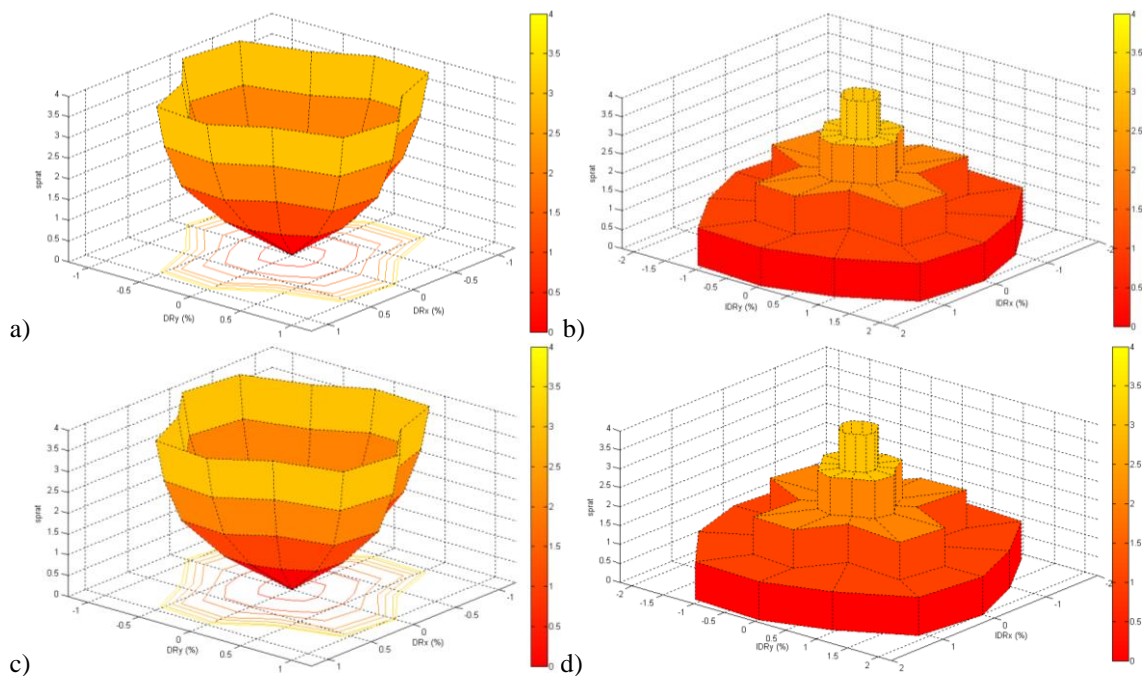


Slika 5.86 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$

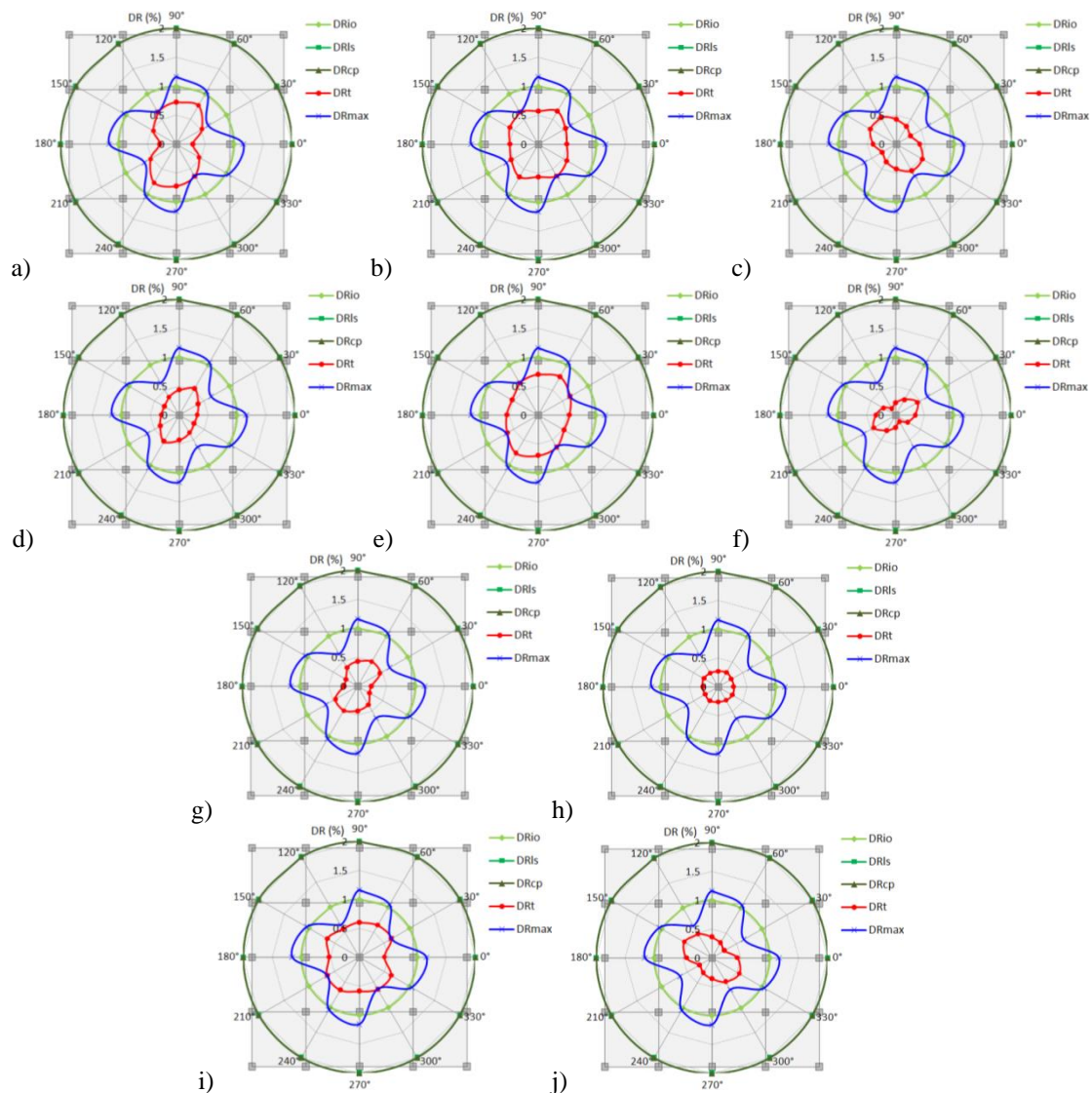


Slika 5.87 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akceleroگرامи), koeficijenti: a)

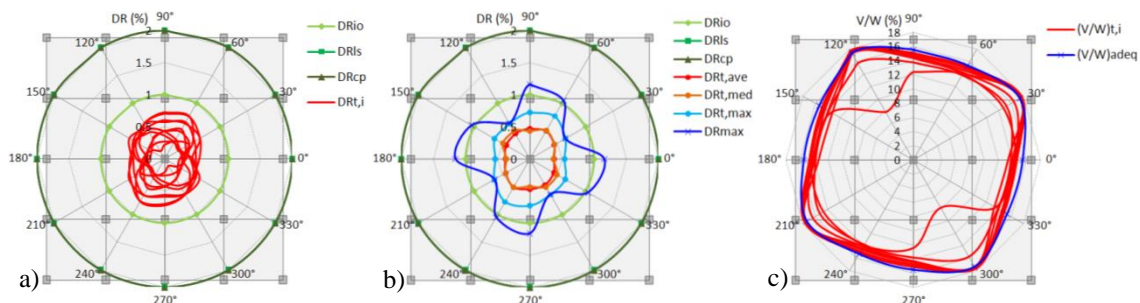
$\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$



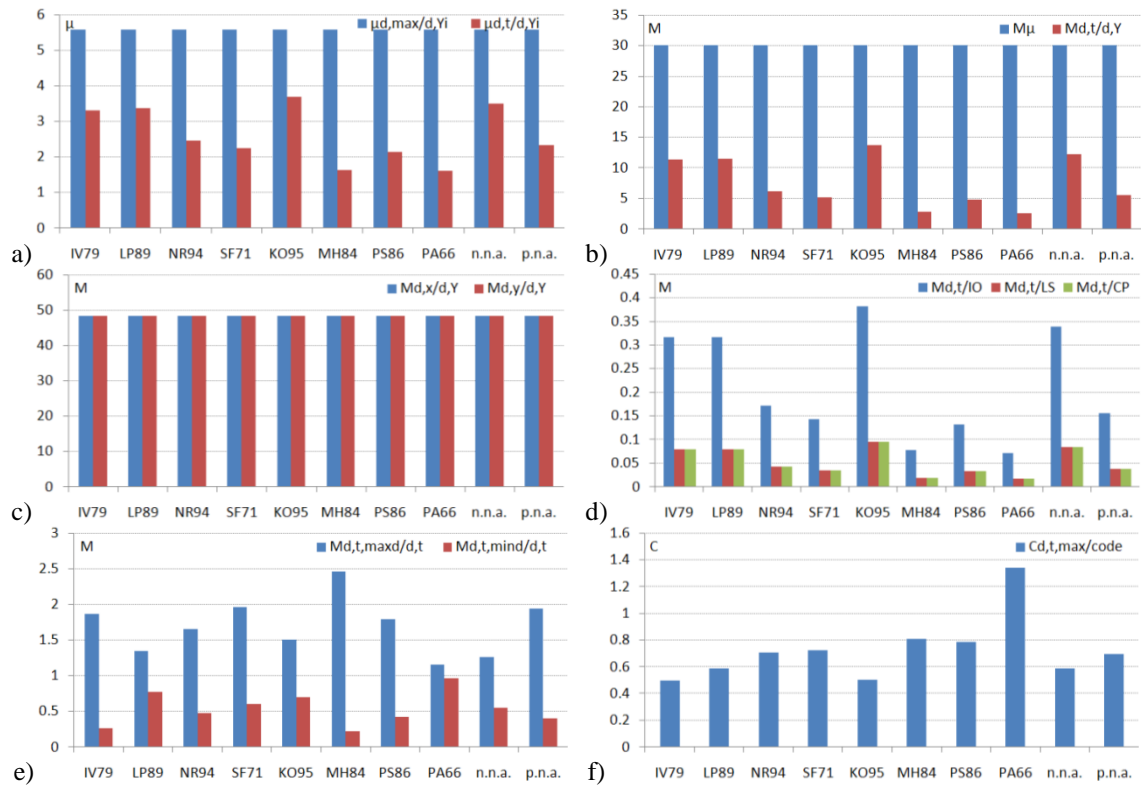
Slika 5.88 4x6x5-13 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akceleroگرامи): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$



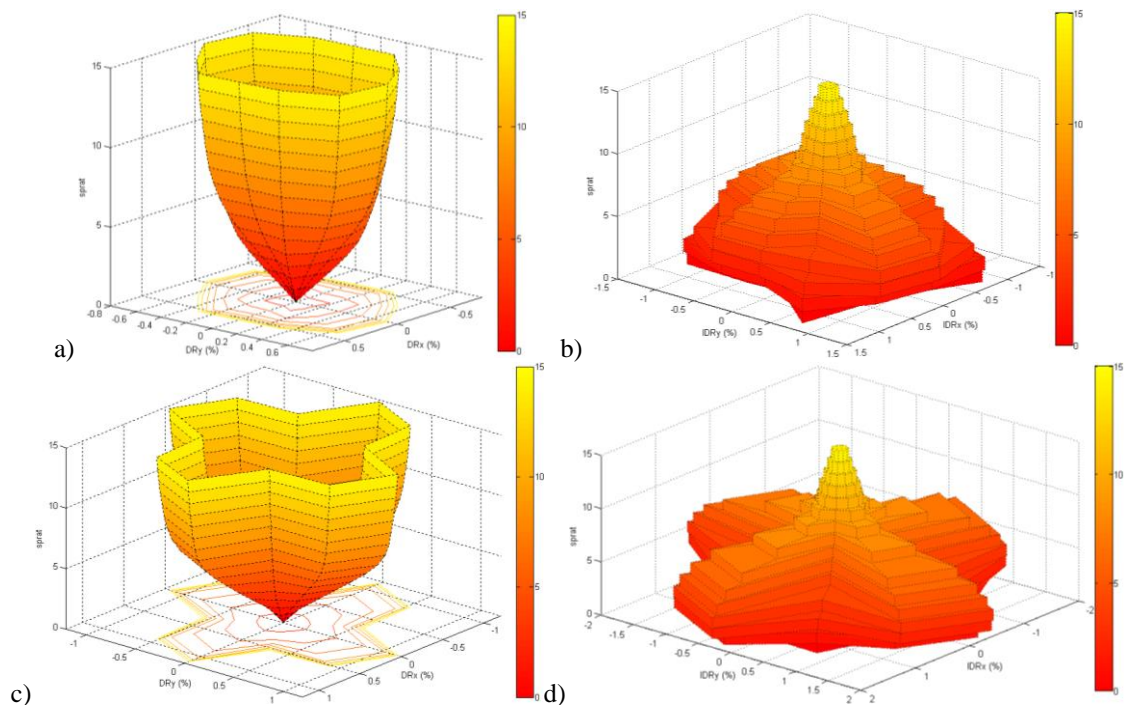
Slika 5.89 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



Slika 5.90 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$

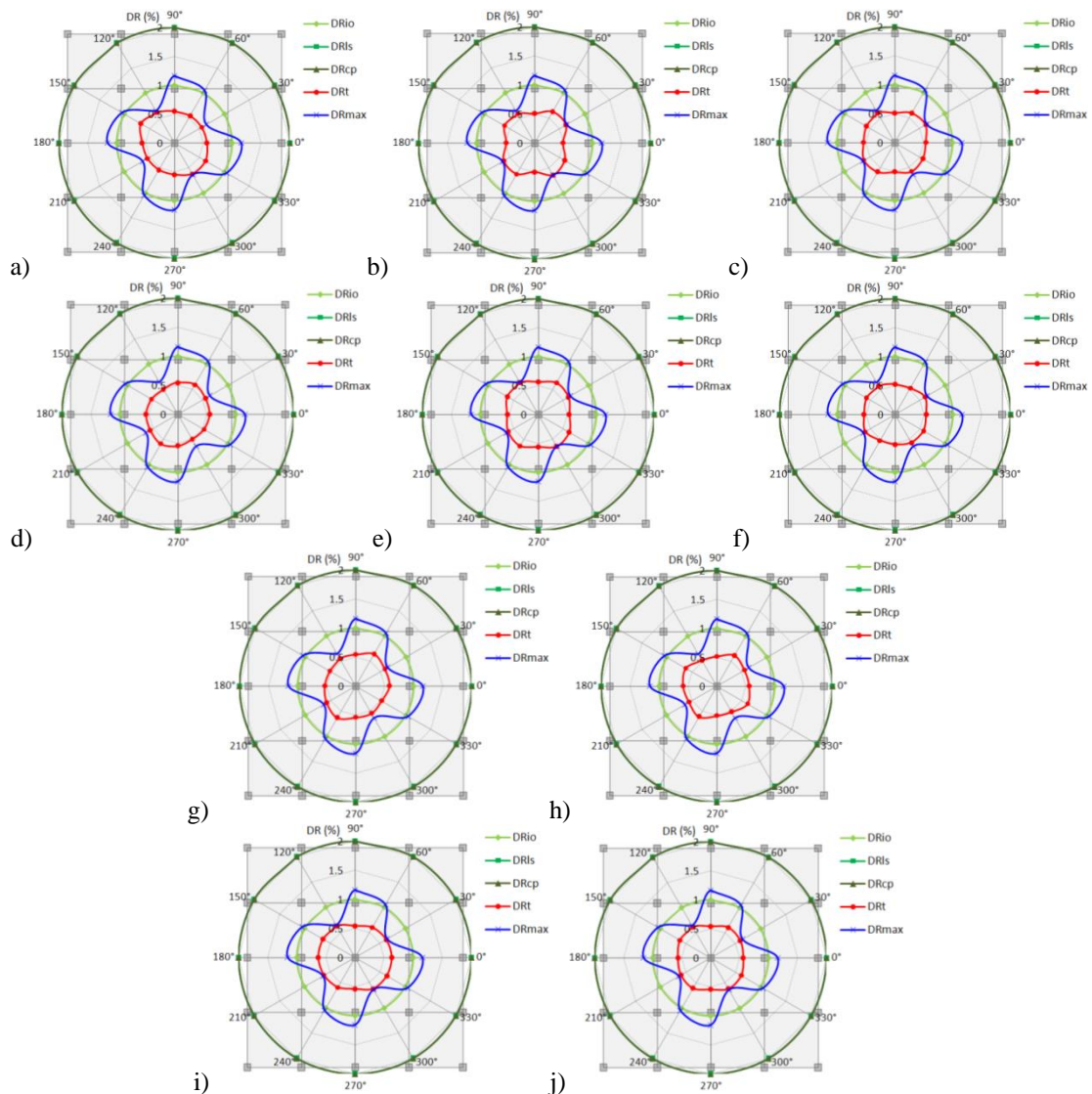


Slika 5.91 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,maxd/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$

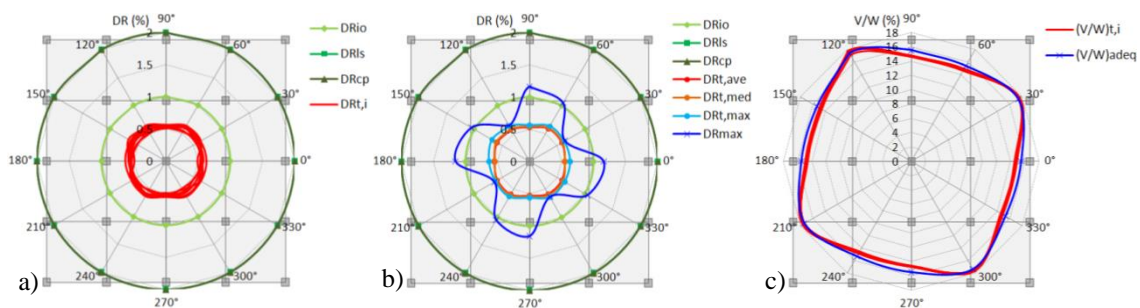


Slika 5.92 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$

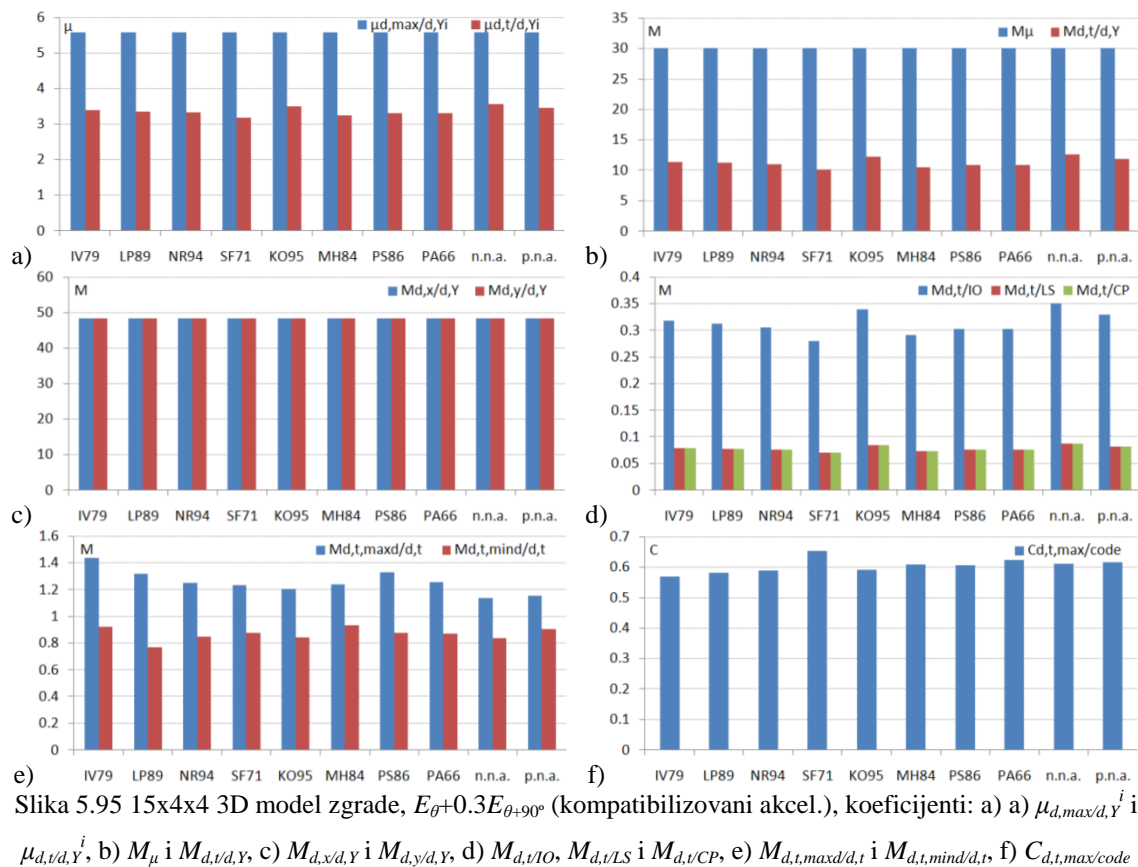




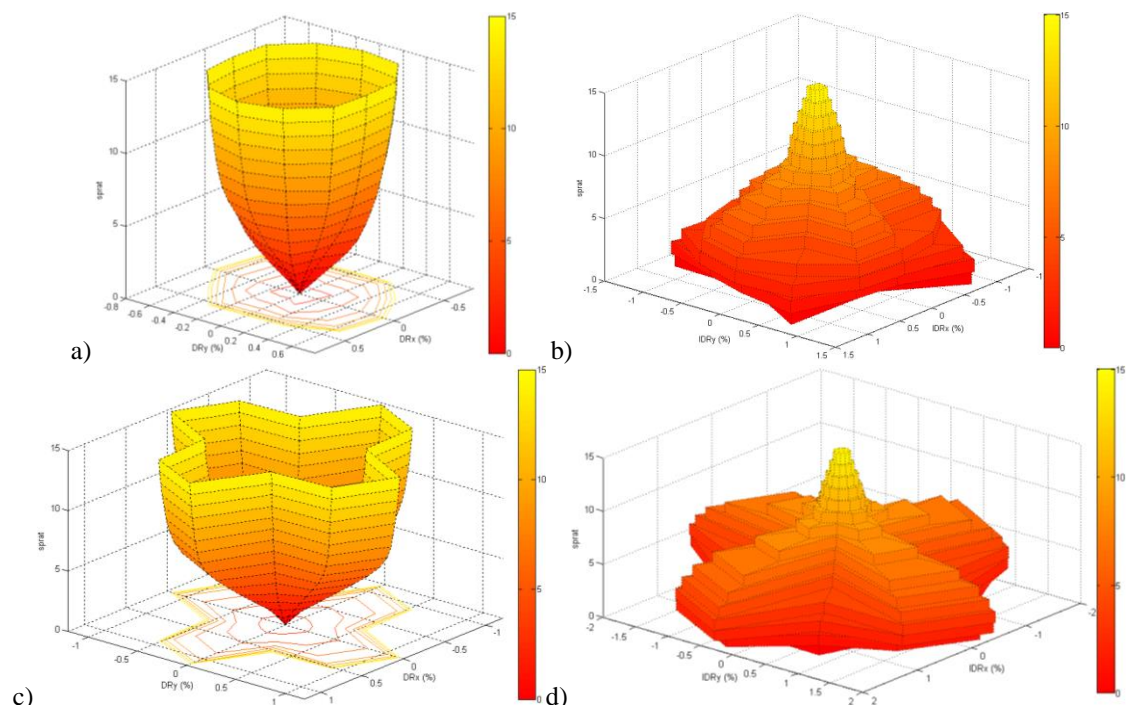
Slika 5.93 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



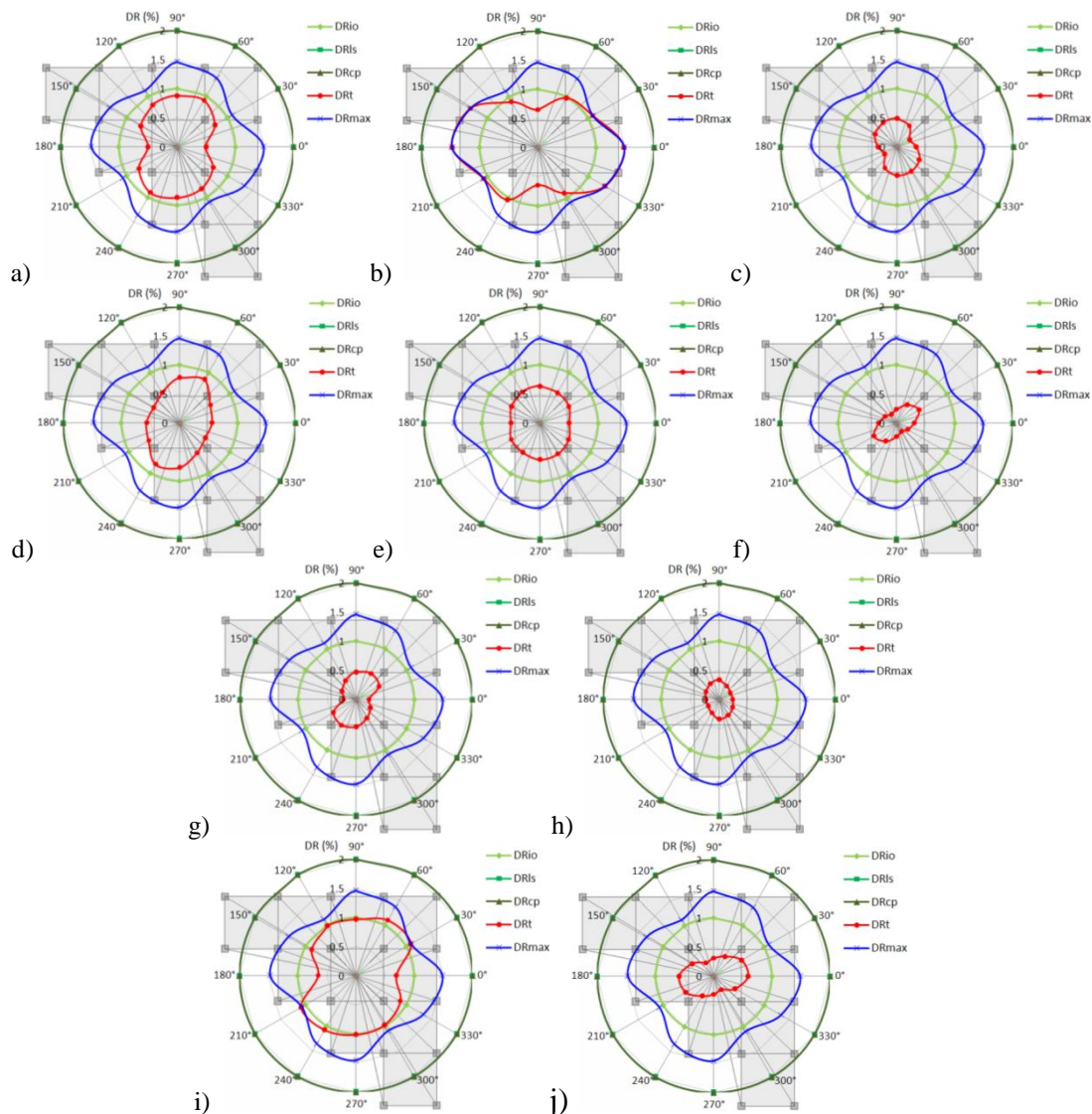
Slika 5.94 15x4x4 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_i$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$



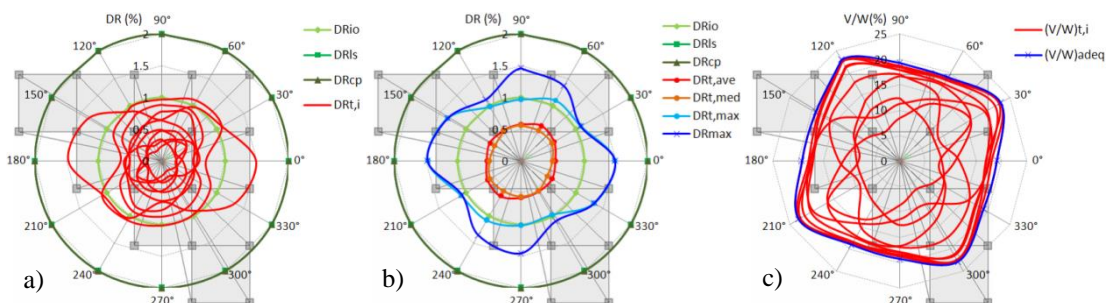
Slika 5.95 15x4x4 3D model zgrade,  $E_\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}$  (kompatibilizovani akcel.), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_\mu$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$



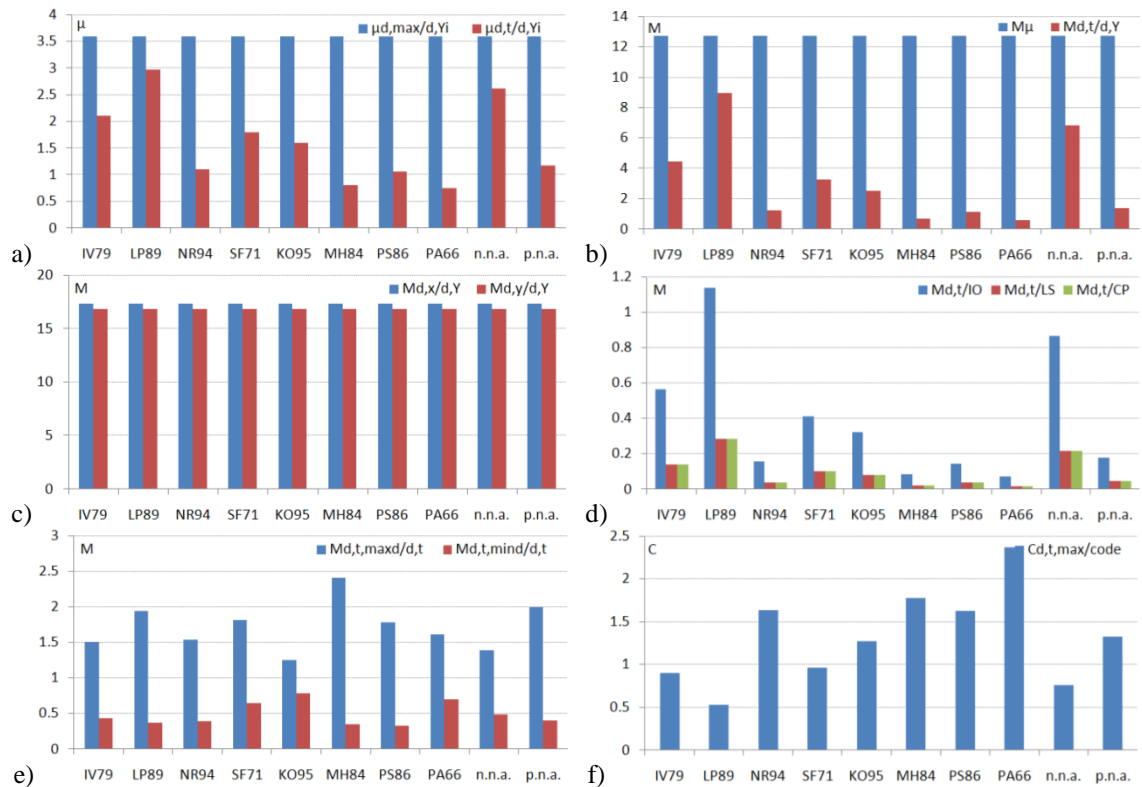
Slika 5.96 15x4x4 3D model zgrade,  $E_\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$



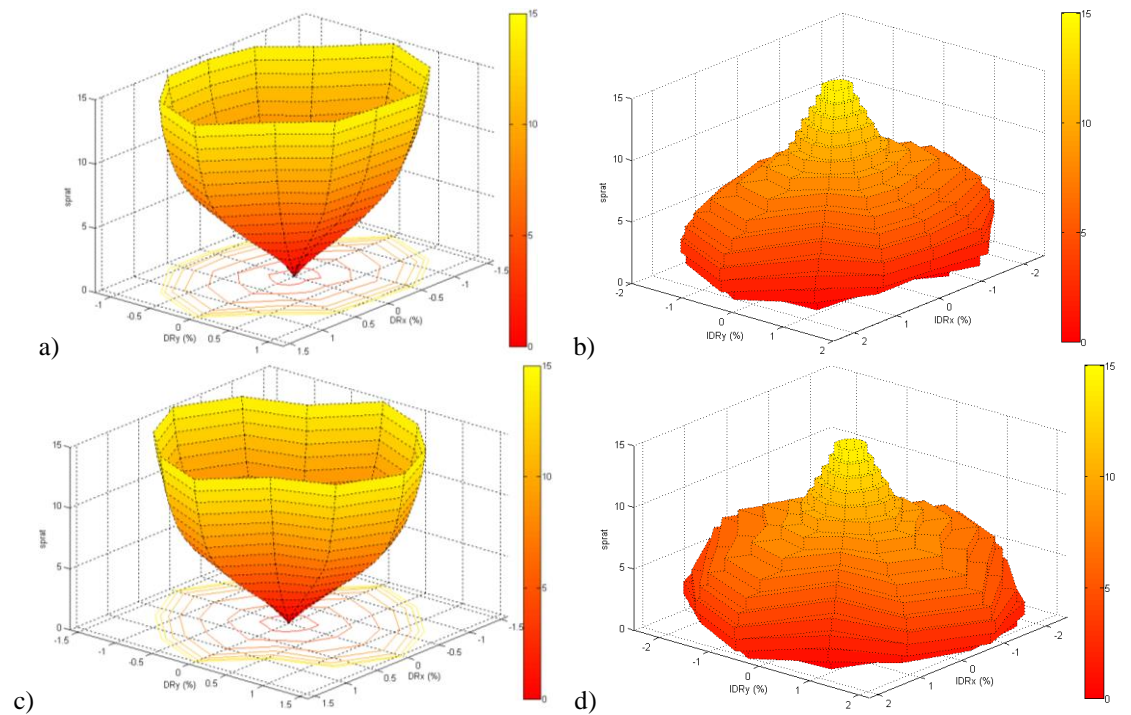
Slika 5.97 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelorogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpuni nestacionarni veštački akcelorogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelorogram



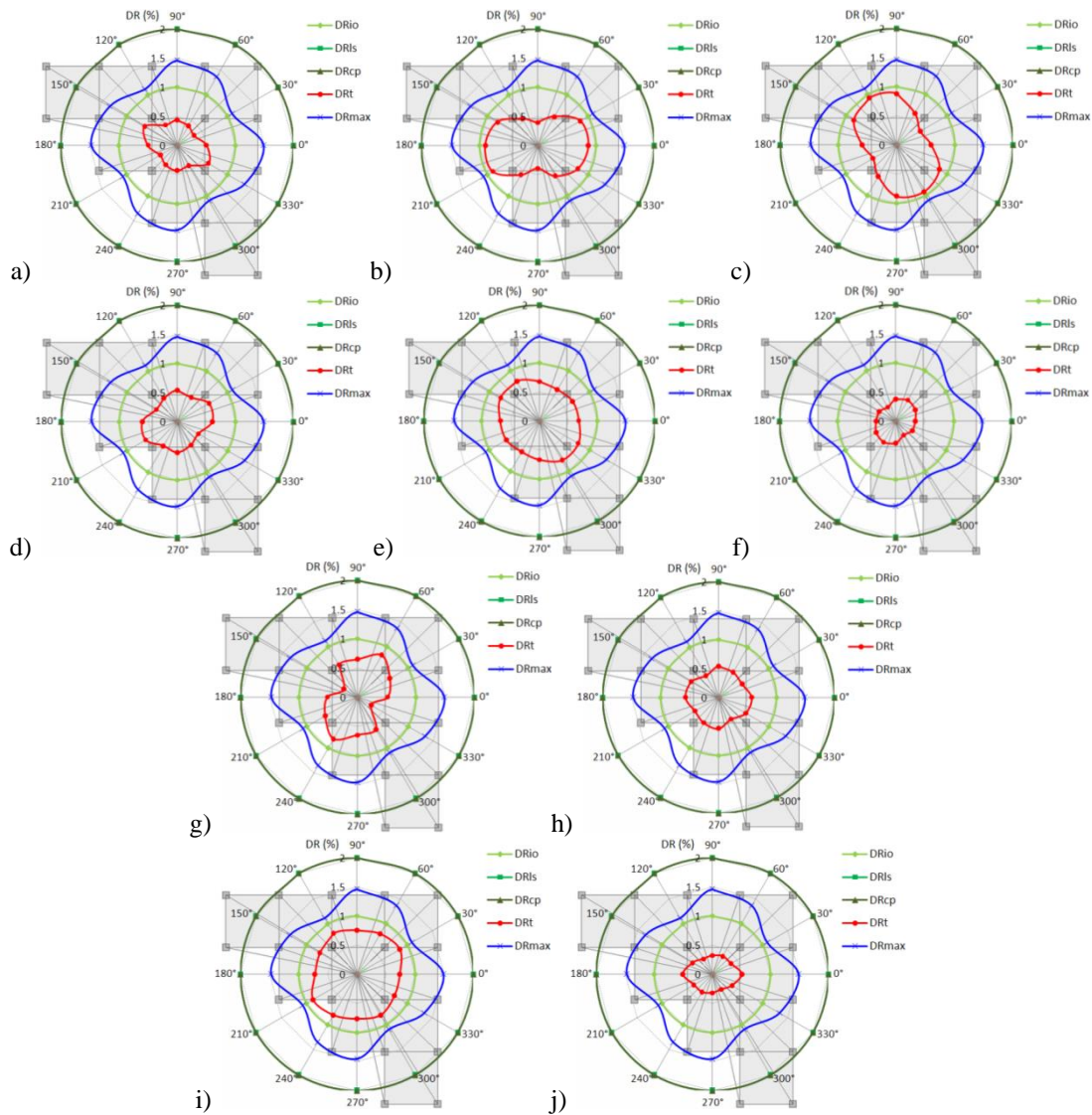
Slika 5.98 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelorogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$



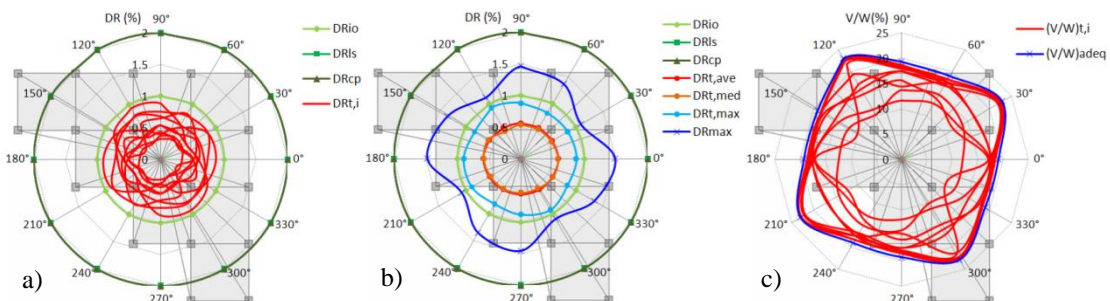
Slika 5.99 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$



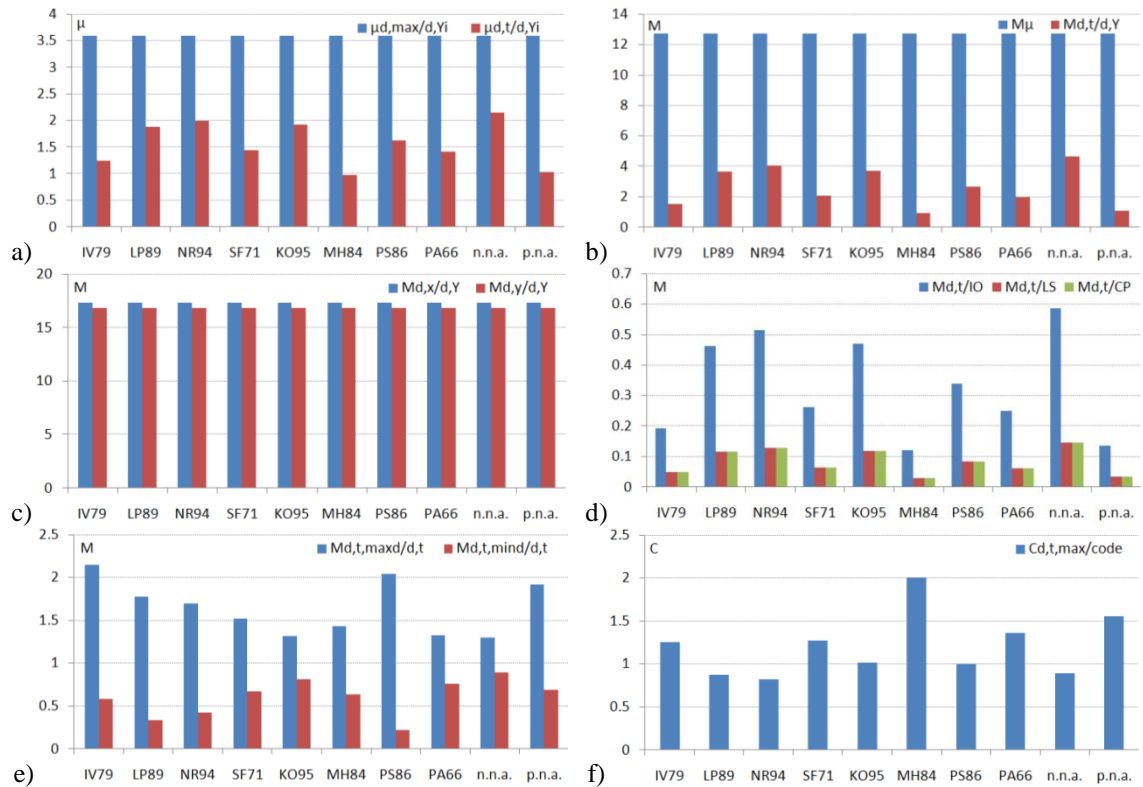
Slika 5.100 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_r$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_r$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$



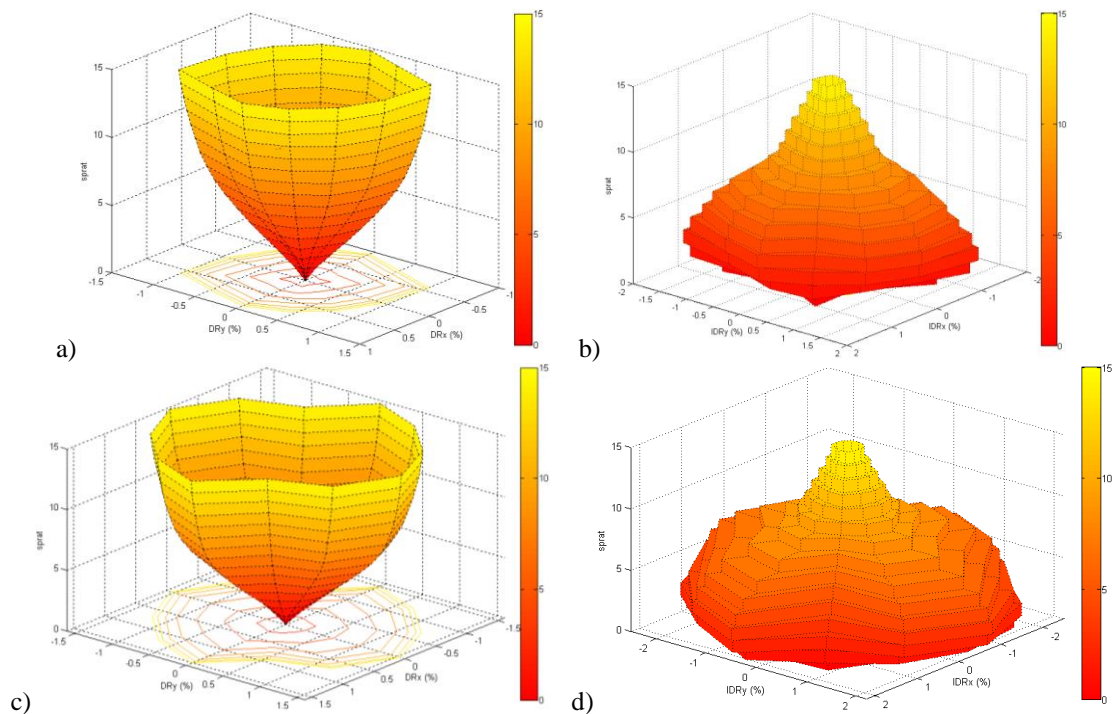
Slika 5.101 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



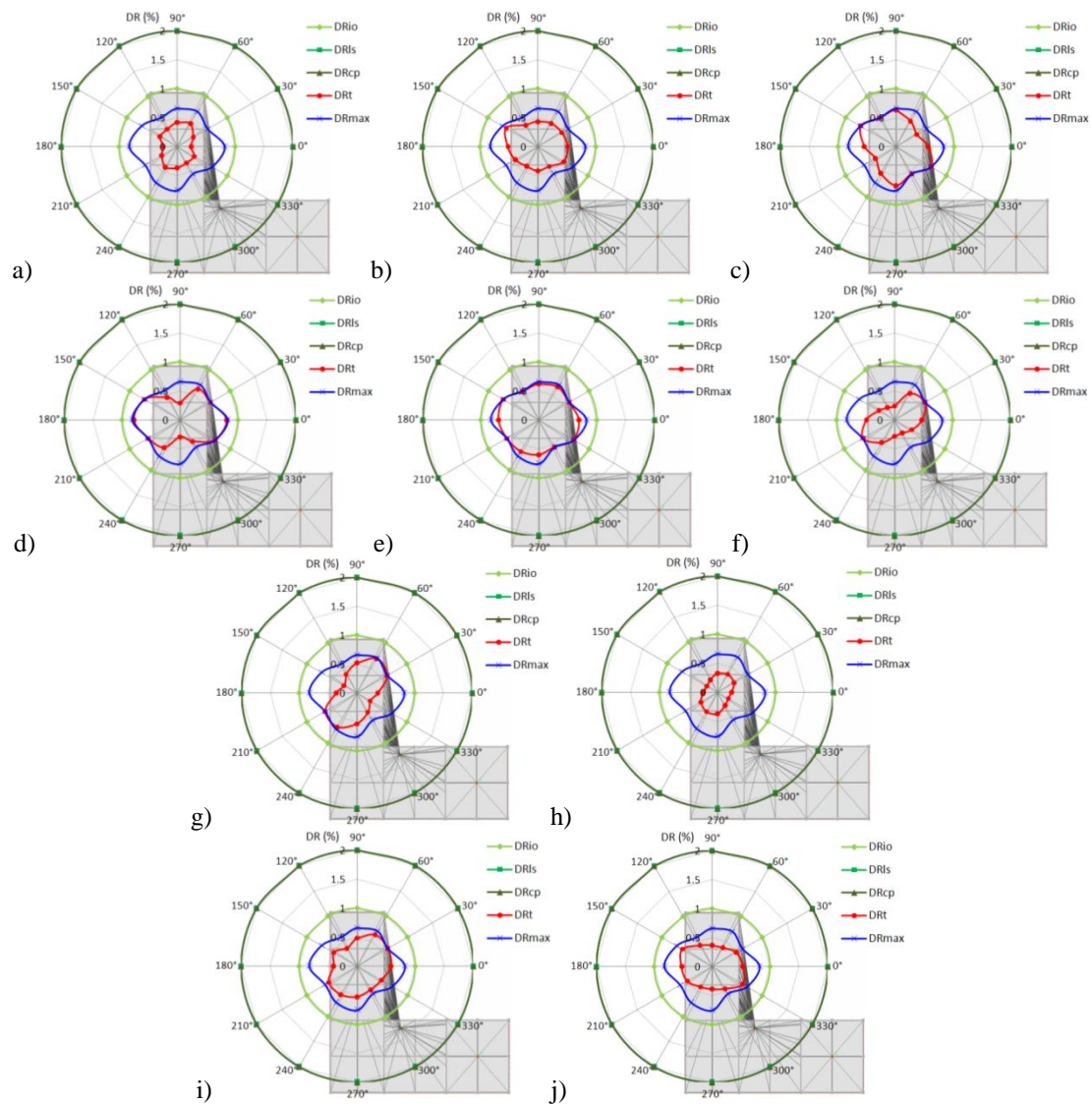
Slika 5.102 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$



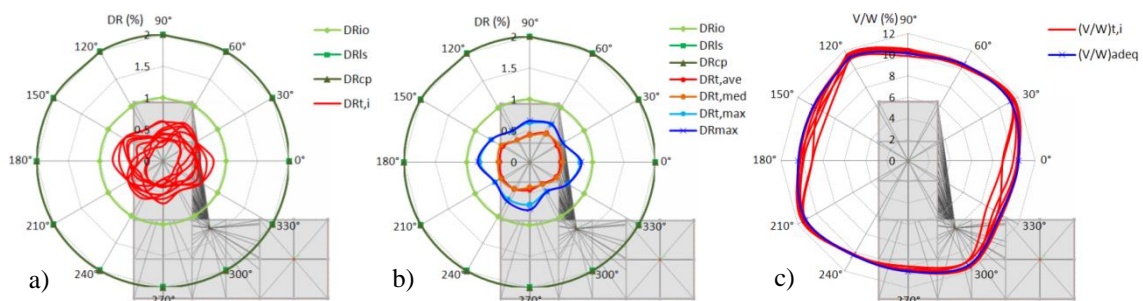
Slika 5.103 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcel.), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$



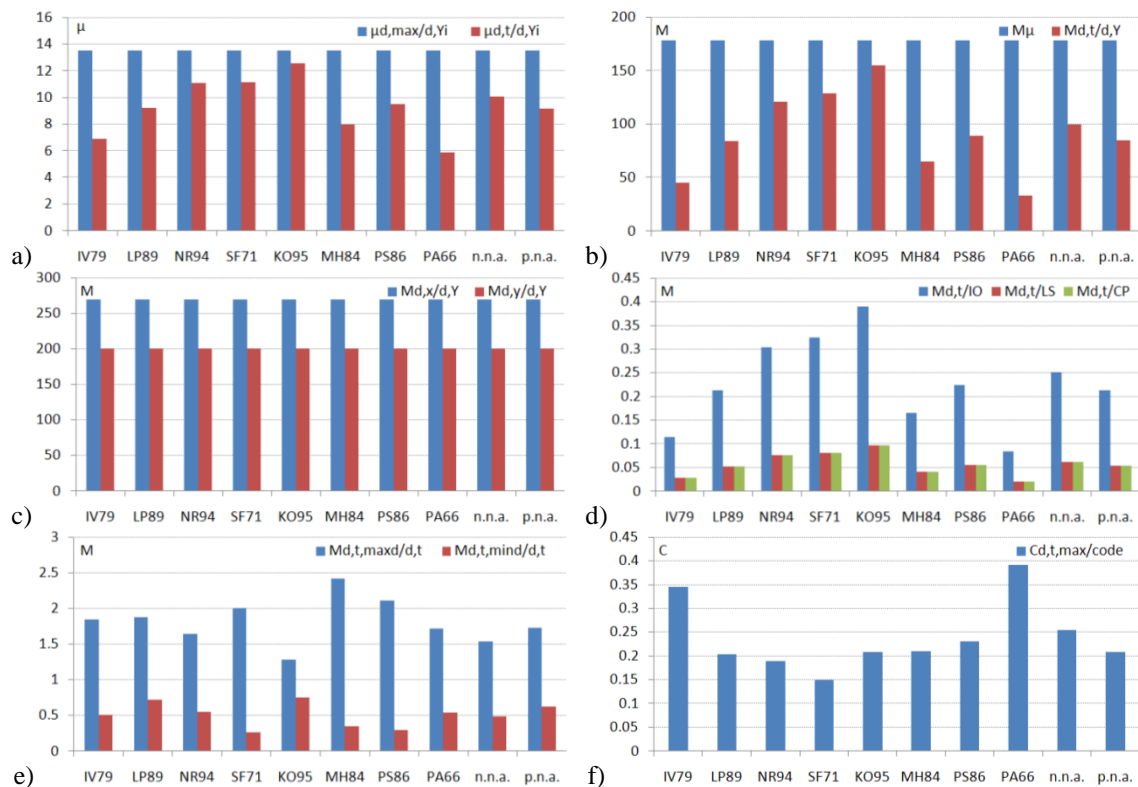
Slika 5.104 15x4x4-6 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$



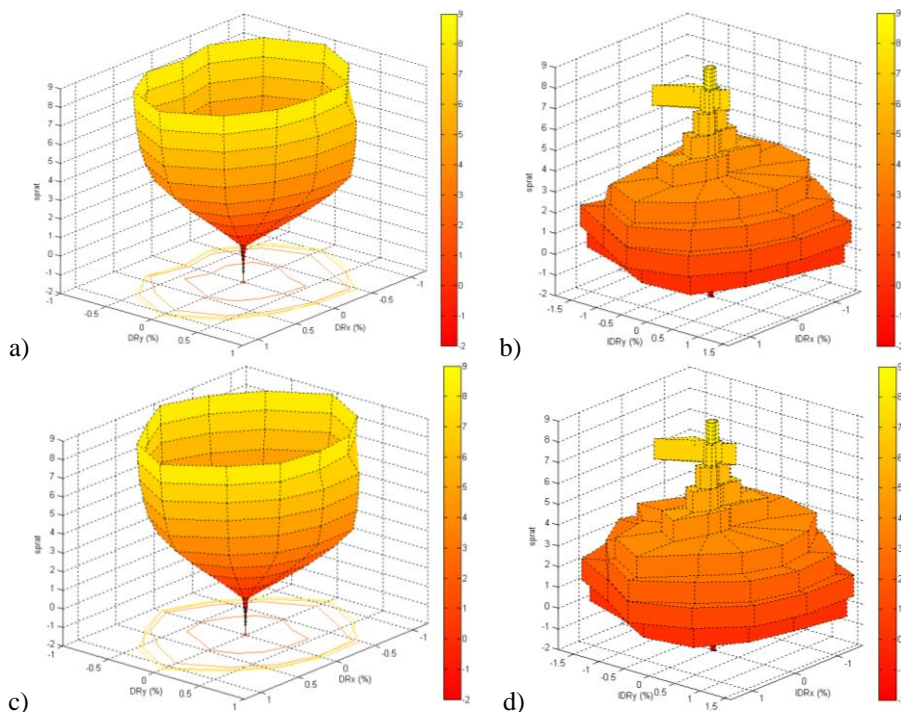
Slika 5.105 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



Slika 5.106 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$

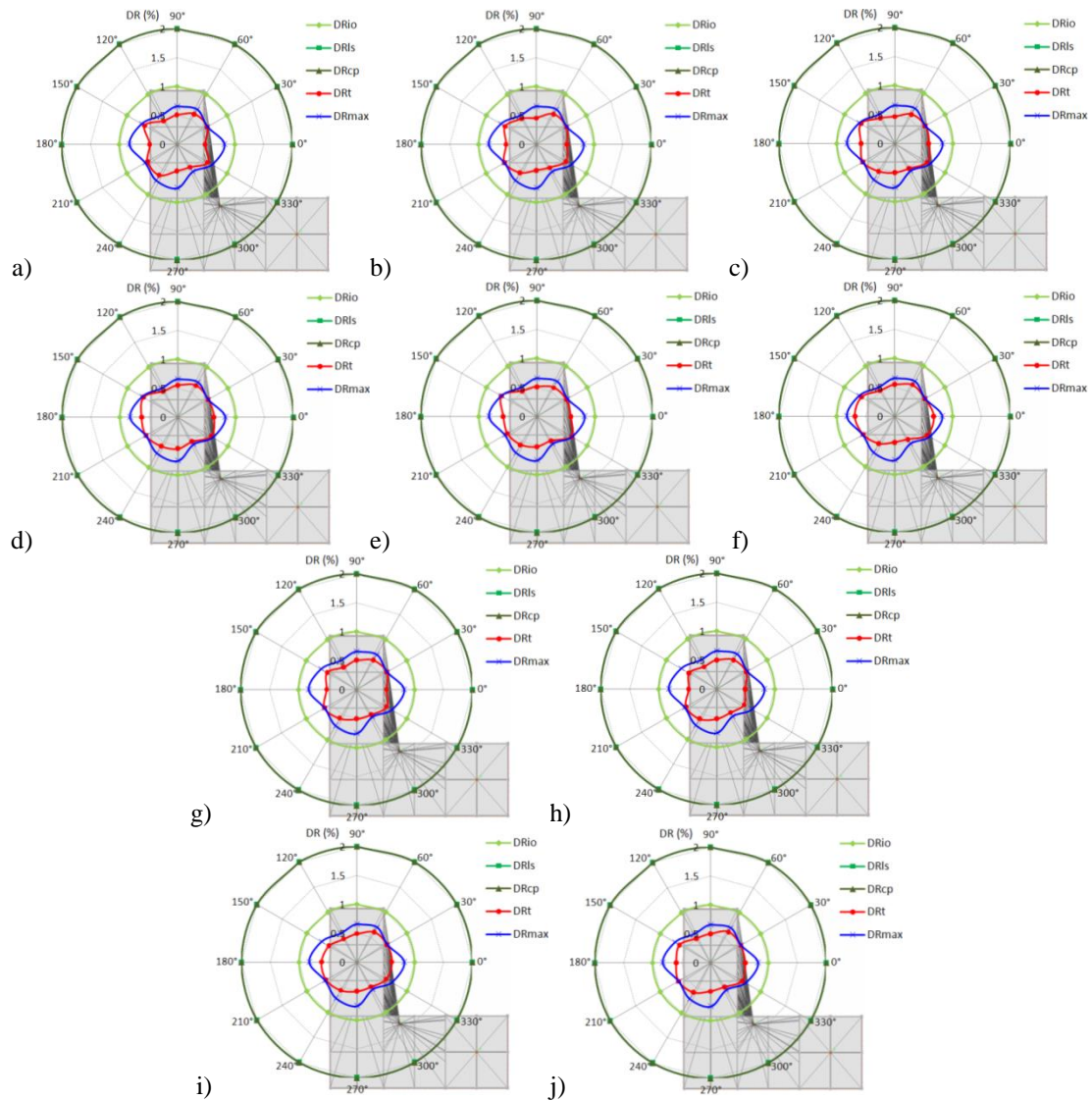


Slika 5.107 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$

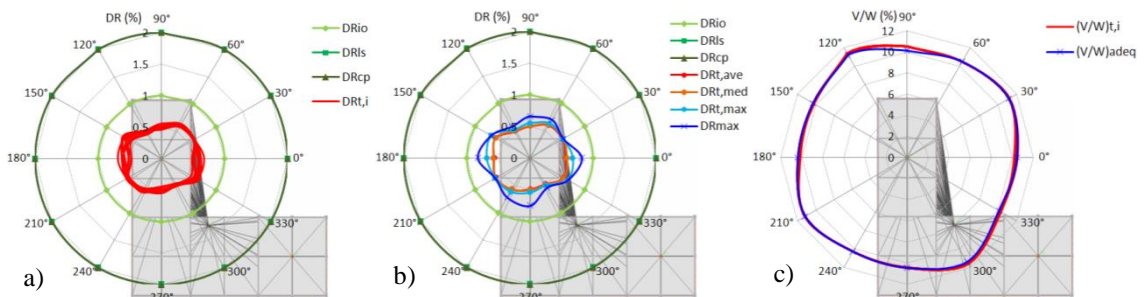


Slika 5.108 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (skalirani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_r$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_r$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$

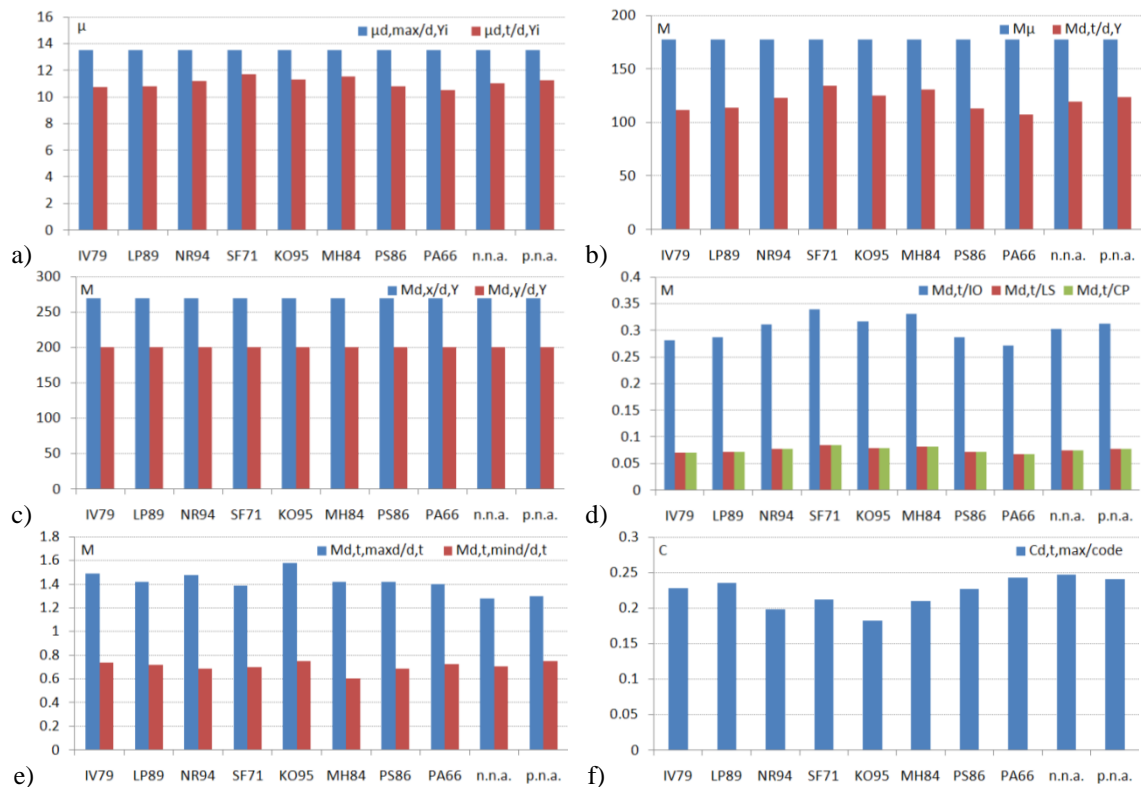




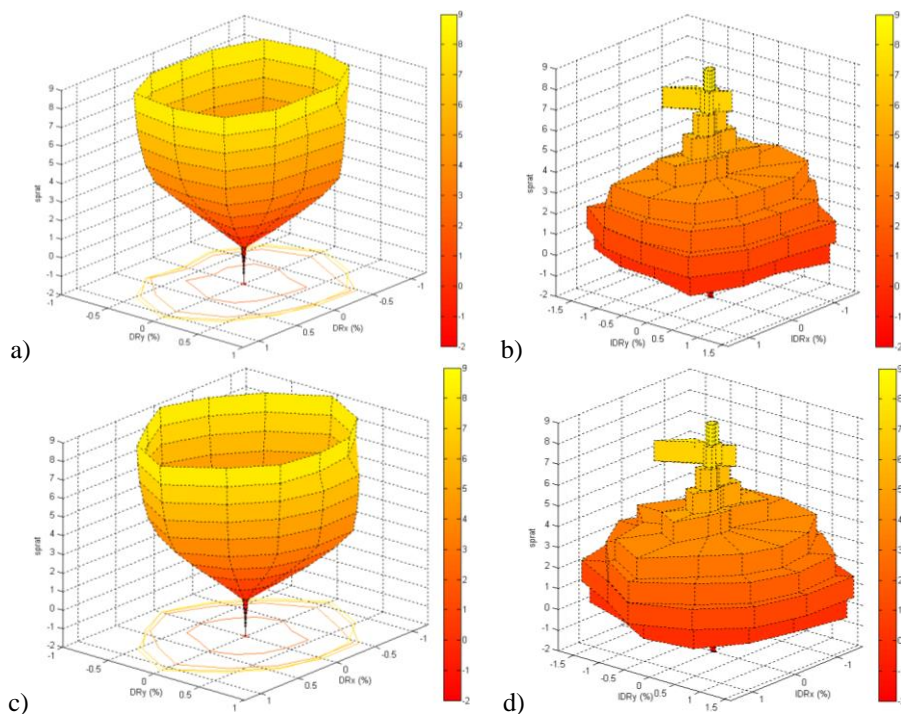
Slika 5.109 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami), globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_t$  i  $DR_{max}$ : a) IV79, b) LP89, c) NR94, d) SF71, e) KO95, f) MH84, g) PS86, h) PA66, i) nepotpuni nestacionarni veštački akcelerogram, j) potpuni nestacionarni veštački akcelerogram



Slika 5.110 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$  i  $DR_t$  za ciljna pomeranja, b) globalni driftovi  $DR_{IO}$ ,  $DR_{LS}$ ,  $DR_{CP}$ ,  $DR_{t,ave}$ ,  $DR_{t,med}$ ,  $DR_{t,max}$  i  $DR_{max}$ , c) relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  i  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$



Slika 5.111 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcel.), koeficijenti: a)  $\mu_{d,max/d,Y}^i$  i  $\mu_{d,t/d,Y}^i$ , b)  $M_{\mu}$  i  $M_{d,t/d,Y}$ , c)  $M_{d,x/d,Y}$  i  $M_{d,y/d,Y}$ , d)  $M_{d,t/IO}$ ,  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$ , e)  $M_{d,t,max/d,t}$  i  $M_{d,t,min/d,t}$ , f)  $C_{d,t,max/code}$



Slika 5.112 9x6x5-12 3D model zgrade,  $E_{\theta}+0.3E_{\theta+90^{\circ}}$  (kompatibilizovani akcelerogrami): a) površ globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_r$ , b) površ međuspratnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_r$ , c) površ globalnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$ , d) površ međuspratnih driftova za nivo maksimalnog pomeranja  $IDR_{max}$

## **5.7. KONCEPT METODE PROGRAMIRANOG PONAŠANJA U NELINEARNOJ ANALIZI OKVIRNIH ZGRADA**

### **5.7.1. TEORIJSKI ASPEKTI METODE PROGRAMIRANOG PONAŠANJA ZA NSPA ANALIZU**

Primena uobičajenih inženjerskih metoda za proračun konstrukcija izloženih dejstvu zemljotresa daje dobre rezultate u praksi, ali postoji niz pitanja na koje nije moguće dati odgovor, kao što je pitanje razvoja mehanizama loma, realan nivo deformacija, procena veličina seizmičkih sila u fazi razvoja materijalne nelinearnosti i dr. Na ova pitanja je moguće dati odgovor jedino primenom nelinearnih analiza. S obzirom da bi primena INDA analize za razmatranje ponašanja konstrukcije u domenu kapacitet nosivosti/deformacija bila obimna i kompleksna za praktične svrhe, to je primena NSPA analize gotovo idealna. Koncept metode programiranog ponašanja (CDM - *Capacity Design Method*) u NSPA analizi okvirnih zgrada razvijen je u cilju razmatranja inkrementalnog razvoja mehanizama loma, inspekcije i korekcije armiranobetonskih preseka. CDM je metoda projektovanja u kome se biraju elementi konstrukcijskog sistema koji se na odgovarajući način projektuju i oblikuju za disipaciju energije pri velikim deformacijama, dok su ostali konstrukcijski elementi obezbeđeni sa dovoljnom nosivošću, tako da može da se ostvari izabrani način disipacije energije [66]. Ideja je da se već na nivou razvoja materijalne i geometrijske nelinearnosti razmatraju mehanizmi loma zgrade i odlučuje o korekciji dimenzija poprečnih preseka i armature. Povezivanjem NSPA analize, metode programiranog ponašanja i koncepta projektovanja konstrukcija prema mehanizmima loma (DMBD - *Damage Mechanisms-Based Design*) razvijena je nova metoda. S obzirom da je kod koncepta projektovanja konstrukcija prema mehanizmima loma inkorporirana CDM metoda, to je naslov nove metode formulisan kao "*nelinearna statička seizmička analiza zasnovana na principu projektovanja zgrada prema mehanizmima loma*" (NSPA-DMBD - *Nonlinear Static Pushover Analysis - Damage Mechanisms-Based Design*) [45].

U slučaju dejstva zemljotresa, a u zavisnosti od njegove jačine, pojedini delovi konstrukcije prelaze u nelinearno područje rada materijala. Sa druge strane, višespratne okvirne zgrade su višestruko statički neodređeni i kinematički stabilni sistemi, a što im omogućava određene povoljnosti u odnosu na statički određene sisteme. Primenom NSPA analize moguće je odabrati mesta potencijalnih plastifikacija sistema, čime se

stvaraju uslovi da se na sistemu formira poželjni mehanizam loma. Na taj način se kontrolisanim razvojem nelinearnih deformacija na sistemu sprečava da isti dođe u stanje potpunog kolapsa. Postupak formiranja mehanizma loma za  $n$  puta statički neodređen sistem zasniva se na primeni procedure tipa korak po korak (*step by step analysis*), dok se za pojedinačno stanje sistema koristi termin korak (*step*) analize. U proizvoljnom  $i$ -tom koraku analize sistema koji je  $m$  puta statički neodređen ( $m < n$ ) nastupa preraspodela statičkih uticaja usled razvoja nelinearnih deformacija u određenim presecima. Naponsko-deformacijsko stanje u preseku nije određeno konačnom vrednošću, već se analizira u inkrementalnim situacijama, usled čega preseki na konstrukciji dostižu različita naponsko-deformaciona stanja. Ukoliko se razvoj nelinearnih deformacija ograniči samo na lokalna mesta plastifikacije, tada je reč o aspektima formiranja plastičnih zona, odnosno plastičnih zglobova. Pri formiranju većeg broja plastičnih zglobova ponašanje sistema se znatno menja u odnosu na početno stanje, tako da se mogu uspostaviti zakonitosti na osnovu kojih sistem postepeno prelazi u mehanizam. Raspored plastičnih zglobova i naponsko-deformacijsko stanje u svakom plastičnom zglobu definiše moguće mehanizme loma sistema, a sa druge strane mehanizam loma zavisi od geometrijskih karakteristika sistema i položaja opterećenja. S obzirom da se razmatra apliciranje opterećenja u inkrementima, to se može uzeti u obzir i promena mehanizma loma sistema u toku NSPA analiza. Generalna diferencijacija mehanizama loma okvirnih zgrada je na spratne, gredne i zglobne kao osnovni mehanizmi loma, dok se kao složeniji identifikuju kombinovani mehanizmi loma [208]. Broj mogućih kombinovanih mehanizama loma kod višespratnih okvirnih zgrada može biti znatan, pa je potrebno voditi računa da rad unutrašnjih sila bude što manji, a rad spoljašnjih sila što veći [229]. U uslovima dejstva zemljotresa veoma su poželjni kombinovani bočno-gredni mehanizmi loma. Da bi se oni ostvarili potrebno je projektovati okvir sa jakim stubovima i slabim gredama (*strong column-weak beam*). Prednost ovakvog mehanizma loma je što kod njega neće doći do formiranja plastičnih zglobova u stubovima, osim na mestima uklještenja. Prethodno su prezentovani mogući mehanizmi loma sistema, dok u određenom sistemu neće uvek biti poželjno formiranje različitih mehanizama loma, pogotovo ne u stubovima. Na osnovu ovakvih polaznih pretpostavki razvijena je metoda programiranog ponašanja [181]. Glavna ideja ove metode je da se unapred izaberu elementi, odnosno načini neelastičnog deformisanja

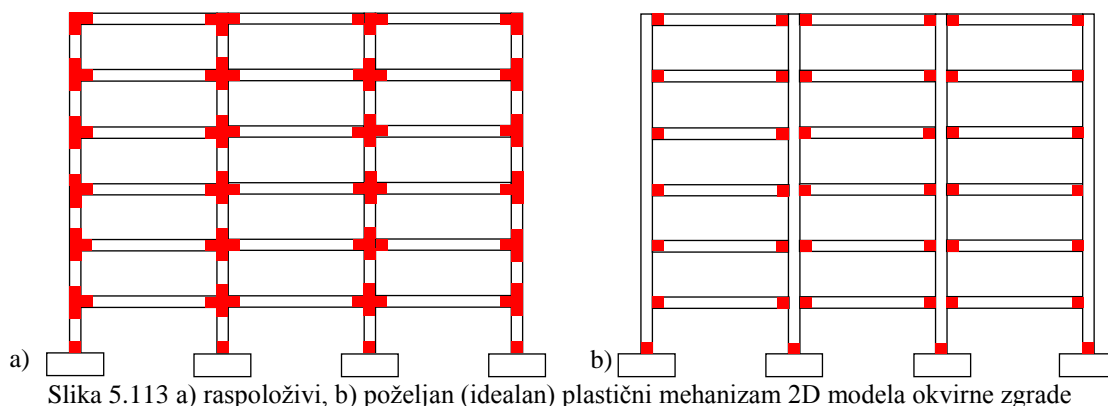
koji mogu formirati mehanizme sa velikom sposobnošću absorpcije energije i ne ugrožavaju vertikalnu nosivost konstrukcije. Ti elementi se namerno dimenzionišu tako da se prvi plastificiraju, a istovremeno su detalji njihovog izvođenja takvi da omogućavaju što veću disipaciju energije. Ostalim elementima obezbeđuje se dovoljno velika nosivost, tako da se mogu programirani mehanizmi absorpcije u potpunosti prihvatiti. Kod višespratnih okvirnih zgrada zone spojeva greda-stub, odnosno krajevi greda i stubova su mesta gde se razvijaju plastične deformacije i na ova mesta treba računati u analizi mehanizama loma. Za gredne elemente je dominantna plastifikacija usled momenata savijanja, dok se kod stubova odvija plastifikacija pri interakciji momenta savijanja i normalne sile. Sa druge strane, da bi se realizovala plastifikacija u određenoj zoni potrebno je obezbediti da elementi za prijem transverzalnih sila spreče izvijanje plastificiranih pritisnutih armaturnih šipki [5]. Razmatranje koncepta CDM metode moguće je sprovesti na nivou odnosa nosivosti "jačih" i "slabijih" elemenata. Stubovi su "jači" elementi (računska nosivost  $f_j$ ), a čije bi rušenje moglo ugroziti globalnu stabilnost okvirnih zgrada. Grede su, za razliku od stubova, "slabiji" elementi (računska nosivost  $f_s$ ) kod kojih redukcija nosivosti u manjoj meri može ugroziti globalnu stabilnost okvirnih zgrada i za koje je moguće obezbediti dovoljan duktilitet. Usled različitih faktora kao što su: konzervativnost projektovanja, standardne dimenzije, minimalni zahtevi o armaturi i rezerve u materijalu, stvarna nosivost "slabijeg" elementa  $\Phi f_s$  obično je mnogo veća od računске  $\Phi > 1$ . Sa druge strane, postoji određena mogućnost da je stvarna nosivost "jačeg" elementa manja od računске. CDM metodom moguće je obezbediti da, nezavisno od jačine zemljotresa, sila u neduktilnim elementima ne bude veća od unapred propisane sile  $\Phi f_s$ , jer "slabije" duktilni elementi rade kao osigurači. Zone plastičnih deformacija, odnosno plastični zglobovi, su "osigurači" konstrukcije od preopterećenja elastičnih zona, ali sa kontrolisanim ponašanjem. Osim obezbeđenja zahtevane duktilnosti plastičnih zglobova, pouzdan mehanizam podrazumeva i sledeće [3]:

- da se plastični zglobovi formiraju u željenim presecima, a ne u nekim drugim nekontrolisano,
- da ostali, na zglobove priključeni delovi konstrukcije, a od kojih se očekuje da se ponašaju elastično, mogu da izdrže najveće uticaje koji se mogu javiti u plastičnim zglobovima pri pomeranjima usled dejstva zemljotresa.

Primenjujući koncept CDM metode za analizu višespratnih okvirnih zgrada, idealan plastični mehanizam bio bi da se razviju nelinearne plastične deformacije na krajevima greda i samo na krajevima stubova na mestima uklještenja (slika 5.113). Na taj način se disipacija seizmičke energije sprovodi preko grednog mehanizma, jer je u slučaju spratnog mehanizma mnogo teže obezbediti zahtevani kapacitet rotacije. Obezbeđenje razvoja grednog mehanizma loma sistema kod okvirnih zgrada poštujući principe CDM metode, a prema EC 8 [66] moguće je ukoliko je odnos momenata savijanja u svakom čvoru:

$$\sum M_{Rc} \geq 1.3 \sum M_{Rb} , \quad (5.210)$$

gde je  $\sum M_{Rc}$  zbir proračunskih vrednosti momenata nosivosti stubova vezanih u čvoru,  $\sum M_{Rb}$  zbir proračunskih vrednosti momenata nosivosti greda vezanih u čvoru.

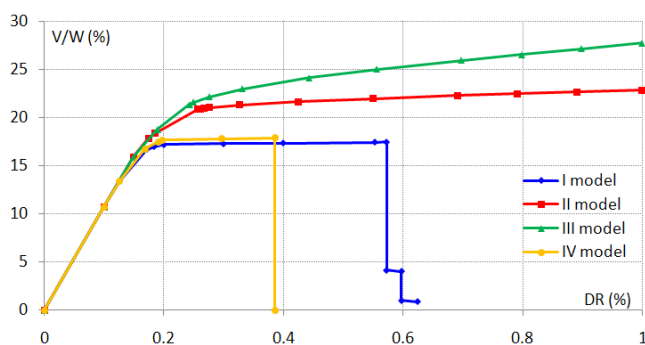


Preliminarno istraživanje na 2D okvirnim modelima sprovedeno je u cilju prezentacije i razmatranja problema CDM metode NSPA analizom. Kao reprezentativni usvojen je 10x4 armiranobetonski okvirni model sa različitim mogućnostima razvoja mehanizma loma [33]:

- I - plastični zglobovi postavljeni na krajevima svih štapova (180 plastičnih zglobova) za simulaciju opšteg mehanizma loma,
- II - plastični zglobovi postavljeni na krajevima greda i na krajevima stubova na mestima uklještenja (85 plastičnih zglobova) za simulaciju optimalnog mehanizma loma,
- III - plastični zglobovi postavljeni na krajevima greda (80 plastičnih zglobova) za simulaciju "jakih" stubova i "slabih" greda (*strong column-weak beam failure*),

- IV - plastični zglobovi postavljeni na krajevima stubova (100 plastičnih zglobova) za simulaciju "jakih" greda i "slabih" stubova (*strong beam-weak column failure*).

Za prethodno definisane numeričke modele izvršene su NSPA analize kontrolom inkrementalnog prirašta pomeranja, a zatim su razvijene NSPA *pushover* krive (slika 5.114). Generalno, najlošija situacija se dobija za model IV, s obzirom da je kod istog dozvoljeno samo formiranje plastičnih zglobova na stubovima i gde je realizovan najniži nivo duktilnosti, dok je nosivost gotovo identična kao i za model I. Analizirajući nosivost, krutost i duktilnost dosta bolje rešenje je dobijeno za modele II i III, u odnosu na model I i IV.

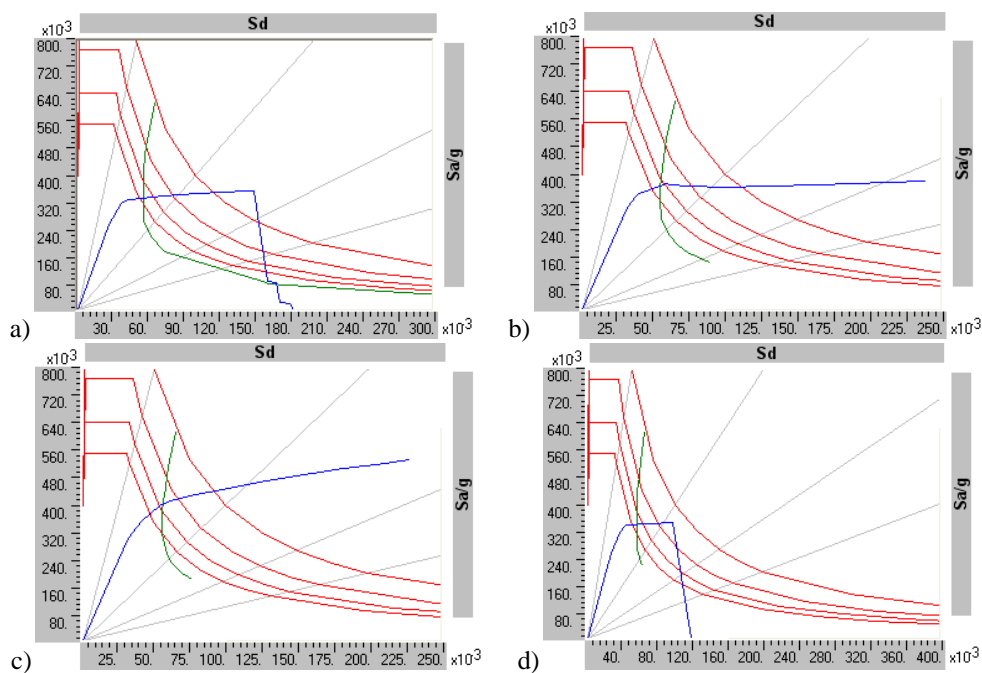


Slika 5.114 Razvijene NSPA *pushover* krive za razmatrane modele [33]

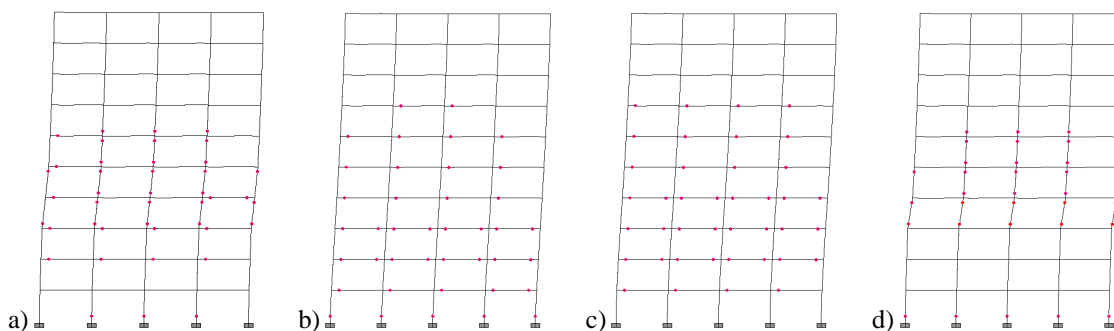
Kod modela II, sa plastičnim zglobovima postavljenim po CDM metodi, realizuje se veća nosivost u nelinearnom domenu, krutost je pozitivna i duktilnost je znatno uvećana, gotovo dvostruko, komparirajući sa modelom I. Ukoliko se dozvoli samo formiranje plastičnih zglobova na gredama, kao što je to kod modela III, tada je moguće postići i najveću nosivost u nelinearnom domenu. Sa druge strane, razvoj mehanizma loma kod ovakvog modela ne bi bio dovoljno iscrpljen, s obzirom da je moguće dozvoliti i dodatno formiranje plastičnih zglobova na krajevima stubova na mestima uklještenja, a da se ne ugrozi globalna stabilnost sistema. Takođe, moguće je učiniti korak dalje, a to je da se od pretpostavljenog rasporeda plastičnih zglobova na sistemu pri unapred izabranim driftovima dozvoli sub-mehanizam plastifikacije, a da se pri daljem nanošenju lateralnog opterećenja sistem dovodi u pretpostavljeni mehanizam plastifikacije. Na ovaj način se može dozvoliti formiranje plastičnih zglobova na dominantnom broju greda, pa tek onda na krajevima stubova na mestima uklještenja.

U narednom koraku su primenom CSM metode, prema ATC 40 [10], određeni nivoi

ciljnih pomeranja. Prethodno su *pushover* krive konvertovane u ADRS format, gde su takođe prikazane krive zahteva, spektri odgovora i prave u radialnim pravcima za različite nivoe perioda vibracija. Na slici 5.115 su prikazane sve ove krive za modele I, II, III i IV respektivno, dok su na slici 5.116 prikazani formirani plastični zglobovi na modelima I, II, III i IV pri nivou drifta 0.4%, respektivno.



Slika 5.115 *Pushover* krive, krive zahteva, spektri odgovora i radialne linije za različite nivoe perioda vibracija u ADRS formatu: a) I, b) II, c) III, d) IV model [33]

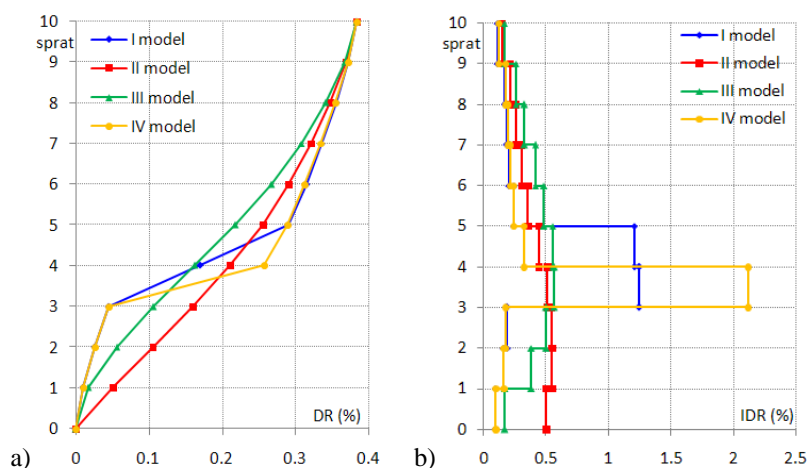


Slika 5.116 Formirani plastični zglobovi pri nivou drifta  $DR=0.4\%$ : a) I, b) II, c) III, d) IV model [33]

Upoređujući nivoe ciljnih pomeranja može se konstatovati gotovo identičnost, ali je razlika u ukupnim smičućim silama u osnovi objekta značajna. Modeli mehanizama I i IV imaju znatno manje vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi objekta, dok su za modele mehanizama II i III ove vrednosti znatno veće, a što ukazuje da su modeli znatno krući pa navlače na sebe veće seizmičke sile. Veće seizmičke sile znače i



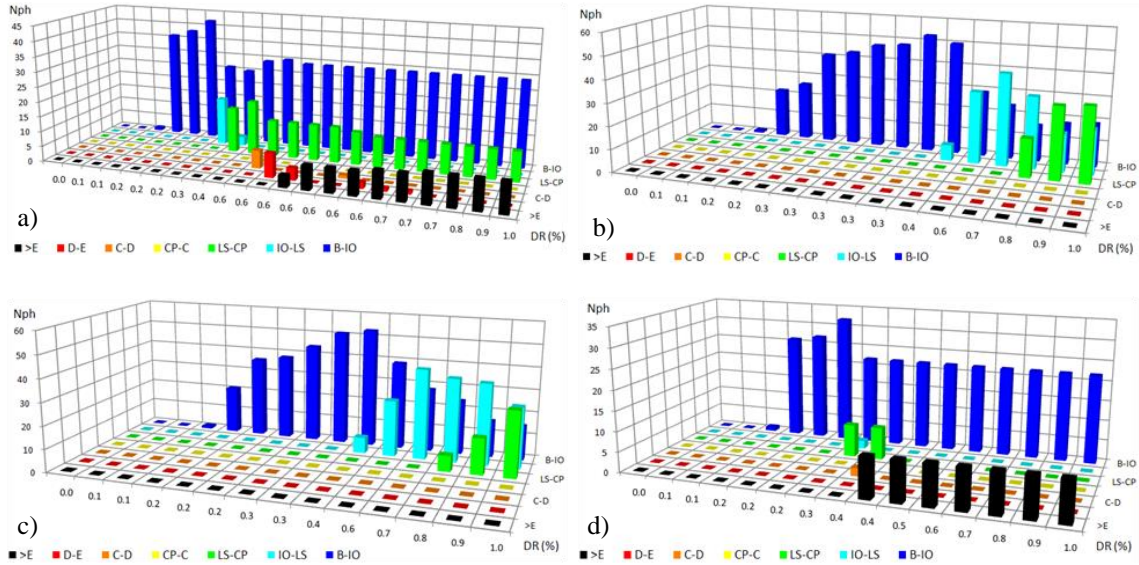
potrebne veće poprečne preseke, odnosno korekciju potrebne armature. Povećanje ukupnih smičućih sila u osnovi objekta za model mehanizma II u odnosu na model mehanizma I iznosi do 15%. Kod modela mehanizama loma II i III karakteristično je formiranje plastičnih zglobova u srednjim i nižim spratovima, dok je kod I i IV modela karakteristično formiranje plastičnih zglobova u srednjim spratovima. Analogno razvoju plastičnih zglobova kod I i IV modela i međuspratni driftovi su dosta izraženi u srednjim spratovima, a što ukazuje na razvoj znatnih nelinearnih deformacija koje su stvorene kombinovanim, odnosno spratnim mehanizmima loma (slika 5.117.b). Skok u vrednosti globalnih driftova od trećeg do petog sprata takođe ukazuje na nepoželjne mehanizme loma koji se javljaju kod I i IV modela (slika 5.117.a).



Slika 5.117 Dijagrami: a) globalnih driftova  $DR$ , b) međuspratnih driftova  $IDR$  za razmatrane modele [33]

Nakon svake inkrementalne situacije, pri različitim nivoima drifta, moguće je analizirati broj formiranih plastičnih zglobova  $N_{ph}$  za međuperformansna stanja B-IO, IO-LS, LS-CP, CP-C, C-D, D-E i >E, a prema FEMA 356 [80]. Dominantno stanje plastičnih deformacija u plastičnim zglobovima je B-IO, a zatim sledi IO-LS i LS-CP, s tim što se kod modela mehanizma loma I i IV formiraju i plastični zglobovi za performansna stanja D-E i >E do maksimalne vrednosti globalnog drifta od 1% (slika 5.118). Formiranje plastičnih zglobova kod I i IV modela mehanizma loma, za performansna stanja D-E i >E, ukazuje na redukciju nosivosti već pri znatno nižim vrednostima maksimalno realizovanog globalnog drifta konstrukcije. Primenom CDM metode sa kontrolisanim mehanizmom loma, kod modela II, izbegava se prerani lom na pojedinim delovima greda i stubova, a time i prerani kolaps konstrukcije. Istraživanje prikazano u ovom primeru daje preliminarnu ocenu prednosti CDM metode u NSPA analizi

okvirnih zgrada i to za slučaj modeliranja razvoja materijalne nelinearnosti preko plastičnih zglobova.



Slika 5.118 Broj i raspodela formiranih plastičnih zglobova pri različitim nivoima drifta 10x4 2D modela okvira, a u funkciji performansnih stanja za model: a) I, b) II, c) III, d) IV

## 5.7.2. PERFORMANSE OKVIRNIH ZGRADA PREMA NSPA-DMBD METODI

Matematička formulacija problema NSPA-DMBD metode [45] zasniva se na primeni principa virtualnog rada i kinematičke metode, gde se razmatra balans rada spoljašnjeg opterećenja i rada unutrašnjih elemenata za disipaciju energije. U opštem slučaju rad spoljašnjeg opterećenja se predstavlja kao rad zapreminskih  $F$  i površinskih sila  $p$  pri virtuelnom pomeranju [196]:

$$A_e = \int_V F \delta u dV + \int_S p \delta u dS. \quad (5.211)$$

Izraz (5.211), za slučaj da je sistem formiran od štapova, može da se piše u obliku:

$$A_e = \int_S (p_t \xi + p_n \eta) ds + \sum_i P_i \delta_i + \sum_i M_i \beta_i, \quad (5.212)$$

gde su  $p_t$  i  $p_n$  komponente kontinualnog opterećenja u pravcu tangente i normale,  $\xi$  i  $\eta$  odgovarajuća virtuelna pomeranja u pravcu tangente i normale,  $P_i$  i  $M_i$  koncentrisane sile i momenti savijanja,  $\delta_i$  i  $\beta_i$  odgovarajuće virtuelno pomeranje i rotacija. S obzirom da se analiza sistema svodi na dejstvo lateralnih koncentrisanih seizmičkih sila, a razmatra se virtuelno pomeranje u horizontalnom pravcu usled dejstva ovih sila, to rad spoljašnjih sila na pomeranju (5.212) postaje:

$$A_e = \sum_i P_i \delta_i . \quad (5.213)$$

U opštem slučaju virtuelni rad unutrašnjih elemenata za disipaciju energije se predstavlja kao rad napona  $\sigma$  pri virtuelnim dilatacijama  $\delta\varepsilon$ :

$$A_i = \int_V \sigma \delta\varepsilon dV , \quad (5.214)$$

dok se izraz (5.214), za slučaj da je sistem formiran od elemenata štapova, može pisati u obliku:

$$A_i = \int_S (N\varepsilon + M\kappa + T\gamma) dS , \quad (5.215)$$

odnosno po jedinici dužine štapa:

$$A_i = N\varepsilon + M\kappa + T\gamma , \quad (5.216)$$

gde je  $N$  normalna sila,  $M$  momenat savijanja,  $T$  transverzalna sila,  $\kappa$  krivina,  $\gamma$  klizanje.

U slučaju da se razmatranje sprovodi na sistemu sa razvojem koncentrisanih plastičnih deformacija (plastični zglobovi), tada se za virtuelni rad spoljašnjih horizontalnih koncentrisanih seizmičkih sila  $P_i$  na pomeranju  $\Delta_i$  može pisati:

$$A_e = \sum_{i=1}^n P_i \Delta_i = P_1 \Delta_1 + \dots + P_i \Delta_i + \dots + P_n \Delta_n , \quad (5.217)$$

gde je:

$$\Delta_i = ih_i \theta , \quad tg\theta \approx \theta , \quad i = 1, \dots, n , \quad (5.218)$$

$ih_i$  položaj (ordinata) horizontalne koncentrisane seizmičke sile  $P_i$ ,  $\theta$  rotacija stuba na mestu uklještenja. Rad unutrašnjih sila na rotaciji, a koje potiču od plastifikacije u stubovima je:

$$A_{i,c} = \sum_{i=1}^n M_{c,i} \theta_i = M_{c,1} \theta_1 + \dots + M_{c,i} \theta_i + \dots + M_{c,n} \theta_n , \quad (5.219)$$

dok je rad unutrašnjih sila na rotaciji, a koje potiču od plastifikacije u gredama:

$$A_{i,b} = \sum_{i=1}^n M_{b,i} \varphi_i = M_{b,1} \varphi_1 + \dots + M_{b,i} \varphi_i + \dots + M_{b,n} \varphi_n . \quad (5.220)$$

Ukupni rad spoljašnjih i unutrašnjih sila na virtualnim pomeranjima glasi (slika 5.119):

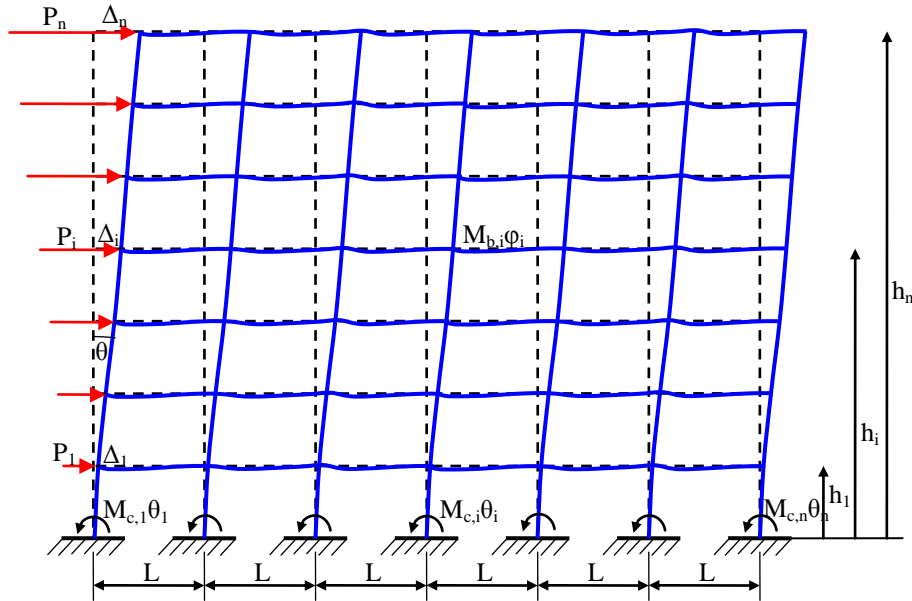
$$\theta_{i=1}^j \sum_{i=1}^j P_i h_i = \sum_{i=1}^k M_{c,i} \theta_i + \sum_{i=1}^l M_{b,i} \varphi_i , \quad (5.221)$$

gde je  $j$  broj spratova kod 2D okvirnog modela zgrade,  $k$  broj uklještenja,  $l$  dvostruki broj greda (na svakoj gredi se formiraju dva plastična zgloba). U slučaju da su svi spratovi iste visine, tada izraz (5.221) postaje:

$$h \theta_{i=1}^j \sum_{i=1}^j i P_i = \sum_{i=1}^k M_{c,i} \theta_i + \sum_{i=1}^l M_{b,i} \varphi_i . \quad (5.222)$$

Izraz (5.221) je izveden za opšti slučaj razvoja plastičnih zglobova stubova i greda

različitih poprečnih preseka i različite količine i rasporeda armature.



Slika 5.119 Model višespratne MRF okvirne zgrade sa plastifikacijom štapova prema NSPA-DMBD metodi [45]

U slučaju da se razmatranje sprovodi na sistemu sa propagacijom plastičnih deformacija duž štapova i kroz inkrementalne situacije ( $i$ ), a primenom inkrementalno-iterativne procedure, tada se za rad spoljašnjih horizontalnih koncentrisanih seizmičkih sila  $P_i$  na pomeranju  $\Delta_i$  može pisati:

$$A_e = \sum_{i=1}^n P_i^{(i)} \Delta_i^{(i)} = P_1^{(i)} \Delta_1^{(i)} + \dots + P_i^{(i)} \Delta_i^{(i)} + \dots + P_n^{(i)} \Delta_n^{(i)}, \quad (5.223)$$

gde je:

$$\Delta_i^{(i)} = i h_i^{(i)} \theta^{(i)}. \quad (5.224)$$

Rad unutrašnjih sila koje potiču od plastifikacije u stubovima je:

$$A_{i,c} = \sum_{i=1}^m \int (N_c^{(i)} \varepsilon_c^{(i)} + M_c^{(i)} \kappa_c^{(i)} + T_c^{(i)} \gamma_c^{(i)}) dS, \quad (5.225)$$

dok je rad unutrašnjih sila koje potiču od plastifikacije u gredama:

$$A_{i,b} = \sum_{i=1}^n \int (N_b^{(i)} \varepsilon_b^{(i)} + M_b^{(i)} \kappa_b^{(i)} + T_b^{(i)} \gamma_b^{(i)}) dS, \quad (5.226)$$

gde je  $m$  broj stubova,  $n$  broj greda zgrade. Ukupni rad spoljašnjih i unutrašnjih sila na virtualnim pomeranjima, sada glasi:

$$\sum_{i=1}^j P_i^{(i)} i h_i^{(i)} \theta_{i=1}^{(i)} = \sum_{i=1}^m \int (N_c^{(i)} \varepsilon_c^{(i)} + M_c^{(i)} \kappa_c^{(i)} + T_c^{(i)} \gamma_c^{(i)}) dS + \sum_{i=1}^n \int (N_b^{(i)} \varepsilon_b^{(i)} + M_b^{(i)} \kappa_b^{(i)} + T_b^{(i)} \gamma_b^{(i)}) dS \quad (5.227)$$

S obzirom da se razmatranje odgovora sistema sprovodi u inkrementalnim ravnotežnim

situacijama, a za materijalno-nelinearni konstitutivni model ponašanja betona i armaturnog čelika, to se normalne sile, momenti savijanja i transverzalne sile mogu izraziti kao:

$$N_{c,i}^{(i)} = \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} dF_c, \quad M_{c,i}^{(i)} = \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} z_{c,i}^{(i)} dF_c, \quad T_{c,i}^{(i)} = \int_{F_c^{(i)}} \tau_{c,i}^{(i)} dF_c, \quad (5.228)$$

$$N_{b,i}^{(i)} = \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} dF_b, \quad M_{b,i}^{(i)} = \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b, \quad T_{b,i}^{(i)} = \int_{F_b^{(i)}} \tau_{b,i}^{(i)} dF_b, \quad (5.229)$$

gde je  $\tau$  smičući napon. Zamenom izraza (5.228) i (5.229) u (5.227) dobija se izraz za spoljašnji i unutrašnji rad:

$$\sum_{i=1}^j P_i^{(i)} i h_i^{(i)} \theta_{i=1}^{(i)} = \left[ \sum_{i=1}^m \int_S \left( \varepsilon_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} dF_c + \kappa_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} z_{c,i}^{(i)} dF_c + \gamma_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \tau_{c,i}^{(i)} dF_c \right) dS \right] + \left[ \sum_{i=1}^n \int_S \left( \varepsilon_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} dF_b + \kappa_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b + \gamma_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \tau_{b,i}^{(i)} dF_b \right) dS \right]. \quad (5.230)$$

Izveden izraz (5.23) važi u slučaju primene nelinearne statičke konvencionalne *pushover* analize (NSCPA - *Nonlinear Static Conventional Pushover Analysis*), s obzirom da se horizontalne seizmičke sile  $P_i$  ne koriguju u toku analize, već imaju samo inkrementalni priraštaj od 0 do 100%. Postupak izvođenja izraza (5.230) za nelinearnu statičku adaptivnu *pushover* analizu (NSAPA - *Nonlinear Static Adaptive Pushover Analysis*), svodi se na uvođenje korekcije horizontalnih seizmičkih sila po inkrementalnim situacijama [7]:

$$P_i = \sqrt{\sum_{q=1}^n (\Gamma_q \Phi_{i,q} m_i S_{a,q})^2}, \quad (5.231)$$

gde je  $q$  svojstveni oblik,  $\Gamma_q$  faktor participacije za  $q$ -ti svojstveni oblik,  $\Phi_{i,q}$  vrednost normalizovanog svojstvenog oblika za  $i$ -ti sprat i  $q$ -ti svojstveni oblik,  $m_i$  masa  $i$ -tog sprata,  $S_{a,q}$  ordinata (ubrzanje) spektra odgovora za  $q$ -ti svojstveni oblik. Zamenom (5.231) u (5.230) dobija se izraz za spoljašnji i unutrašnji rad kod NSAPA analize:

$$\sum_{i=1}^j i h_i^{(i)} \theta_{i=1}^{(i)} \sqrt{\sum_{q=1}^n (\Gamma_q^{(i)} \Phi_{i,q}^{(i)} m_i^{(i)} S_{a,q}^{(i)})^2} = \left[ \sum_{i=1}^m \int_S \left( \varepsilon_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} dF_c + \kappa_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} z_{c,i}^{(i)} dF_c + \gamma_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \tau_{c,i}^{(i)} dF_c \right) dS \right] + \left[ \sum_{i=1}^n \int_S \left( \varepsilon_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} dF_b + \kappa_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b + \gamma_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \tau_{b,i}^{(i)} dF_b \right) dS \right]. \quad (5.232)$$

Prvi specijalni slučaj dobija se, ukoliko se uzme u obzir da je kod stubova uticaj transverzalnih sila na plastifikaciju mali, a da je kod greda uticaj normalnihi i transverzalnih sila na plastifikaciju mali, tada izraz (5.232) postaje:

$$\sum_{i=1}^j ih_i^{(i)} \theta_{i=1}^{(i)} \sqrt{\sum_{q=1}^n \left( \Gamma_q^{(i)} \Phi_{i,q}^{(i)} m_i^{(i)} S_{a,q}^{(i)} \right)^2} = \left[ \sum_{i=1}^m \int \left( \varepsilon_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} dF_c + \kappa_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} z_{c,i}^{(i)} dF_c \right) dS \right] + \left[ \sum_{i=1}^n \int \left( \kappa_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b \right) dS \right]. \quad (5.233)$$

Drugi specijalni slučaj dobije se, ukoliko se uzme u obzir da se do određenog nivoa drifta  $DR_a$  prvo omogućava plastifikacija u gredama, a tek po dostizanju datog nivoa drifta omogućava se i plastifikacija u stubovima na mestima uklještenja:

$$0 < DR \leq DR_a \quad (i) = (a):$$

$$\sum_{i=1}^j ih_i^{(i)} \theta_{i=1}^{(i)} \sqrt{\sum_{q=1}^n \left( \Gamma_q^{(i)} \Phi_{i,q}^{(i)} m_i^{(i)} S_{a,q}^{(i)} \right)^2} = \sum_{i=1}^m \int \left( \varepsilon_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} dF_b + \kappa_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b + \gamma_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \tau_{b,i}^{(i)} dF_b \right) dS, \quad (5.234)$$

$$DR > DR_a \quad (i) > (a):$$

$$\sum_{i>a}^j ih_i^{(i)} \theta_{i>a}^{(i)} \sqrt{\sum_{q=1}^n \left( \Gamma_q^{(i)} \Phi_{i,q}^{(i)} m_i^{(i)} S_{a,q}^{(i)} \right)^2} = \left[ \sum_{i>a}^m \int \left( \varepsilon_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} dF_c + \kappa_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} z_{c,i}^{(i)} dF_c + \gamma_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \tau_{c,i}^{(i)} dF_c \right) dS \right] + \left[ \sum_{i>a}^n \int \left( \varepsilon_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} dF_b + \kappa_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b + \gamma_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \tau_{b,i}^{(i)} dF_b \right) dS \right]. \quad (5.235)$$

Primenom ovakvog postupka značajnije se kontroliše razvoj mehanizma loma sistema, a čime se omogućava viši nivo bezbednosti zgrade za uslove dejstva zemljotresa.

Kombinacijom prvog i drugog specijalnog slučaja dobija se:

$$0 < DR \leq DR_a \quad (i) = (a):$$

$$\sum_{i=1}^j ih_i^{(i)} \theta_{i=1}^{(i)} \sqrt{\sum_{q=1}^n \left( \Gamma_q^{(i)} \Phi_{i,q}^{(i)} m_i^{(i)} S_{a,q}^{(i)} \right)^2} = \sum_{i=1}^n \int \left( \varepsilon_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} dF_b + \kappa_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b \right) dS, \quad (5.236)$$

$$DR > DR_a \quad (i) > (a):$$

$$\sum_{i>a}^j ih_i^{(i)} \theta_{i>a}^{(i)} \sqrt{\sum_{q=1}^n \left( \Gamma_q^{(i)} \Phi_{i,q}^{(i)} m_i^{(i)} S_{a,q}^{(i)} \right)^2} = \left[ \sum_{i>a}^m \int \left( \varepsilon_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} dF_c + \kappa_c^{(i)} \int_{F_c^{(i)}} \sigma_{c,i}^{(i)} z_{c,i}^{(i)} dF_c \right) dS \right] + \left[ \sum_{i>a}^n \int \left( \kappa_b^{(i)} \int_{F_b^{(i)}} \sigma_{b,i}^{(i)} z_{b,i}^{(i)} dF_b \right) dS \right]. \quad (5.237)$$

Armiranobetonski stubovi i grede se modeliraju primenom vlaknastih linijskih konačnih elemenata, a diskretizacija na nivou poprečnog preseka se sprovodi u tri oblasti: vlakna neutegnuto betona, vlakna utegnuto betonskog jezgra i vlakna armature. Izraz (5.232) analizira se nakon svake inkrementalne situacije za svaki

poprečni presek, odnosno vlakno, dok se ne dostigne granična dilatacija čelične armature  $\varepsilon_{s,u}$  u samo jednom vlaknu stuba ili grede:

$$\varepsilon_{s,i}^{(i)} < \varepsilon_{s,u}, \quad (5.238)$$

$$\varepsilon_{s,i}^{(i)} = \frac{\sigma_{s,i}^{(i)}}{E_{s,i}}, \quad \varepsilon_{s,u} = \frac{\sigma_{s,adeq}}{E_{s,adeq}}, \quad (5.239)$$

ili dok se ne dostigne granična dilatacija pritiska betona  $\varepsilon_{c,u}$  u samo jednom vlaknu stuba ili grede:

$$\varepsilon_{c,i}^{(i)} < \varepsilon_{c,u}, \quad (2.240)$$

$$\varepsilon_{c,i}^{(i)} = \frac{\sigma_{c,i}^{(i)}}{E_{c,i}}, \quad \varepsilon_{c,u} = \frac{\sigma_{c,adeq}}{E_{c,adeq}}, \quad (2.241)$$

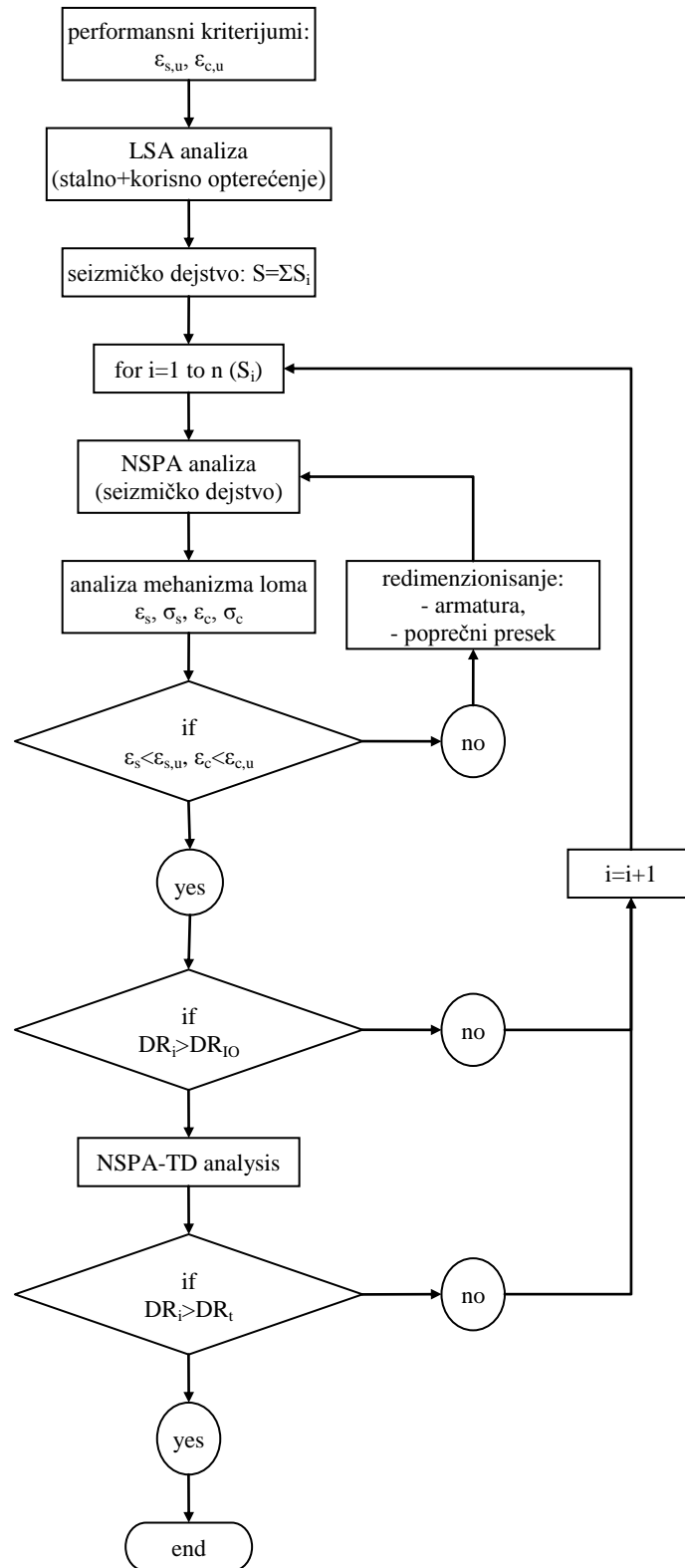
gde je  $E$  modul elastičnosti. Kada se dogodi situacija da je prekoračena granična dilatacija:

$$\varepsilon_{s,i}^{(i)} \geq \varepsilon_{s,u} \quad \text{ili} \quad \varepsilon_{c,i}^{(i)} \geq \varepsilon_{c,u}, \quad (2.242)$$

sprovodi se proračun poprečnog preseka u kojem je dostignuta granična dilatacija i određuje nova količina i raspored armature, a zatim se ponavlja postupak proračuna NSPA analize zgrade. S obzirom da se postupak analize mehanizma loma sistema po NSPA-DMBD metodi sprovodi iterativno, a dimenzionisanje proverava nakon dostignute granične dilatacije, to je uveden termin iterativno-interaktivno dimenzionisanje (IID - *Iterative-Interactive Design*).

Generalno razmatrajući, mehanizam loma sistema moguće je pratiti preko: globalne duktilnosti zgrade, globalnog drifta, međuspratnih driftova, lokalne duktilnosti štapova, relacije momenat-krivina za poprečne preseke i preko dilatacija. U odnosu na makro aspekt razmatranja mehanizma loma sistema preko globalne duktilnosti ili globalnih driftova, NSPA-DMBD metoda je razvijena na principu da se razvoj mehanizma loma sistema prati na nivou mikro aspekta, odnosno preko dilatacija. Dijagram toka razvijene NSPA-DMBD metode prikazan je na slici 5.120. U fazi predprocesiranja se definiše poželjan (optimalan) mehanizam loma sistema i kriterijumi za indiciranje dostignutih performansnih stanja na nivou materijala, a za granične dilatacije armature i granične dilatacije utegnutog betona. Zatim se sprovodi proračun LSA analizom za vertikalno gravitaciono opterećenje, čime se simulira ponašanje objekta u realnim uslovima. Nakon sprovedene LSA analize seizmičko opterećenje se podeli na  $n$  delova i za svaki deo se sprovodi proračun inkrementalno. Matrica krutosti sistema iz LSA analize koristi se kao inicijalna matrica krutosti NSPA analize. Pošto se izvrši prva NSPA analiza za

$S_{i=1}$  seizmičke uticaje, analizira se stanje mehanizma loma sistema.

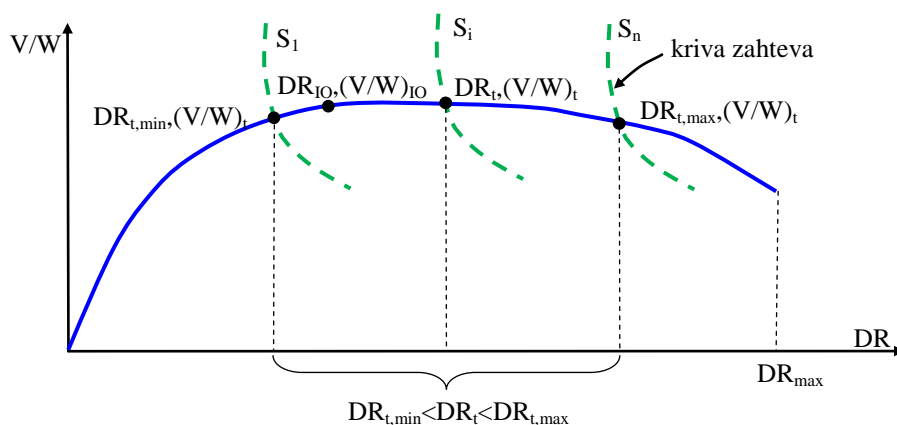


Slika 5.120 Dijagram toka NSPA-DMBD metode [45]

Ukoliko se seizmičko opterećenje podeli na veliki broj delova, moguće je da za prvu



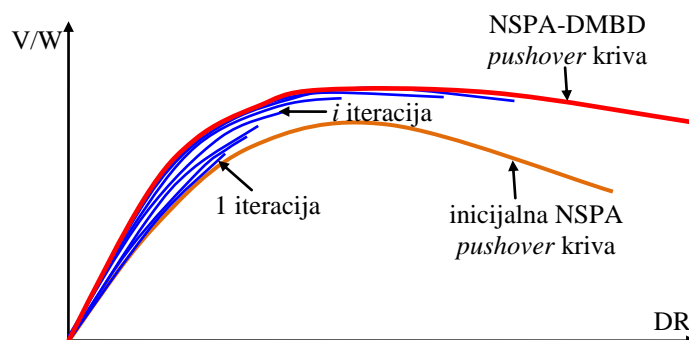
$S_{i=1}$  NSPA analizu mehanizam loma i ne bude razvijen, s obzirom da nije iniciran razvoj nelinearnih deformacija u štapovima. U ovoj fazi se dakle, ispituje mehanizam loma sistema preko dilatacija armature i betona. Ukoliko se potvrdi da se NSPA analizom za  $S_i$  razvio nepovoljan mehanizam loma, utvrđuje se nivo dilatacija za svako vlakno, odnosno presek posebno. Zatim se prelazi na korekciju armature redimenzionisanjem ukoliko su prekoračene granične dilatacije, a u suprotnom se prelazi na ispitivanje kriterijuma odnosa drifta za trenutno proračunsko stanje  $DR_i$  i drifta za IO performansni nivo  $DR_{IO}$ . Ako se pokaže da je  $DR_i > DR_{IO}$ , tada se sprovodi analiza ciljnog pomeranja, dok se u suprotnom prelazi na nov inkrement seizmičkog opterećenja  $i+1$  i prethodno opisana procedura ispitivanja kriterijuma i proračuna se ponavlja. Uslov  $DR_i > DR_{IO}$  je postavljen u da bi se obezbedio razvoj mehanizma loma prema CDM metodi ulaskom u IO performansno nivo. Nakon sprovedene NSPA-TD analize, sprovodi se ispitivanje kriterijuma odnosa drifta za trenutno proračunsko stanje  $DR_i$  i drifta za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$ . Ispunjenjem ovog kriterijuma NSPA-DMBD metoda se završava, dok se u suprotnom prelazi na nov inkrement seizmičkog opterećenja  $i+1$  i prethodno opisana procedura ispitivanja kriterijuma i proračuna se ponavlja. U zavisnosti od odnosa seizmički zahtev/kapacitet konstrukcije, nivo ciljnog pomeranja se može nalaziti u domenu  $DR_{t,min} < DR_t < DR_{t,max}$  (slika 5.121). Ukoliko je  $DR_t \approx DR_{t,min}$ , tada je potrebno sprovesti manji broj iteracija po NSPA-DMBD metodi, a ukoliko je  $DR_t \approx DR_{t,max}$ , tada je potrebno sprovesti znatno veći broj iteracija po NSPA-DMBD metodi.



Slika 5.121 Određivanje domena nivoa ciljnog pomeranja  $DR_{t,min} < DR_t < DR_{t,max}$  u cilju predikcije količine iteracija po NSPA-DMBD metodi

Na slici 5.122 je prikazana inicijalna NSPA *pushover* kriva, *pushover* krive za faze iteracija NSPA-DMBD metode i finalna NSPA-DMBD *pushover* kriva. NSPA

*pushover* krive za faze iteracija su prikazane za slučaj da je dostignuta granična dilatacija  $\varepsilon_{s,u}$  ili  $\varepsilon_{c,u}$ .



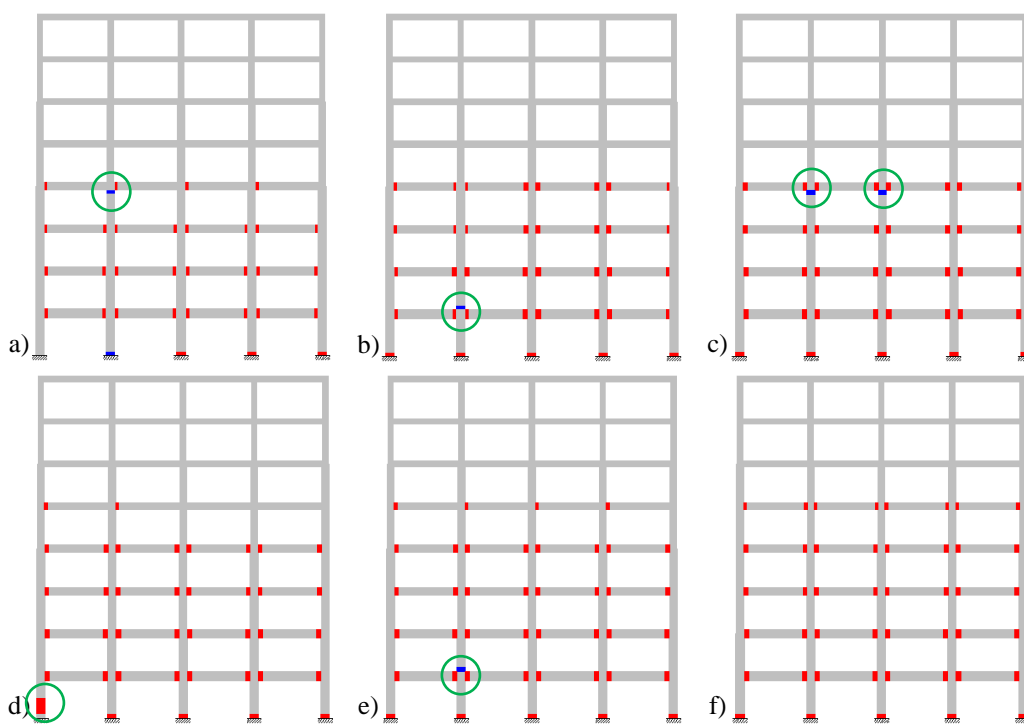
Slika 5.122 Inicijalna NSPA *pushover* kriva, *pushover* krive za faze iteracija NSPA-DMBD metode i finalna NSPA-DMBD *pushover* kriva

Procesiranje NSPA-DMBD metode sprovedeno je na 8x4 2D modelu okvira za koji je prethodno sprovedena NSPA analiza primenom *SeismoStruct* softvera i razvijena odgovarajuća *pushover* kriva. Performansni kriterijumi su postavljeni pre sprovođenja NSPA-DMBD metode za granične dilatacije:

- armature  $\varepsilon_{s,u}=10\%$  za bilinearni konstitutivni materijalni model sa kinematičkim ojačanjem u zoni nelinearnih deformacija,
- utegnuto betona  $\varepsilon_{c,u}=3.5\%$  za nelinearan konstitutivni materijalni model.

Ukupan broj sprovedenih iteracija u okviru NSPA-DMBD metode je devet, s obzirom da se pri poslednjoj iteraciji nije realizovao nepovoljan mehanizam loma čak i pri maksimalnoj vrednosti globalnog drifta od  $DR_{max}=3.3\%$ . Indiciranje razvoja nepovoljnog mehanizma loma, prema NSPA metodi, uočeno je pri nivou drifta  $DR=1.55\%$  prekoračenjem graničnih dilatacija u betonu za stub četvrtog sprata (slika 5.123.a). U narednom koraku je izvršena korekcija armature u stubovima trećeg i četvrtog sprata, a zatim sprovedena nova iteracija u okviru NSPA metode. Za ovako sprovedenu analizu identifikovan je nepovoljan mehanizam loma pri nivou drifta  $DR=2.22\%$  prekoračenjem graničnih dilatacija u betonu drugog sprata (slika 5.123.b). Za treću iteraciju u okviru NSPA-DMBD metode nepovoljan mehanizam loma, pri nivou drifta  $DR=2.22\%$ , je ostvaren prekoračenjem graničnih dilatacija u betonu za stubove četvrtog sprata (slika 5.123.c), dok je za petu iteraciju u okviru NSPA-DMBD metode nepovoljan mehanizam loma, pri nivou drifta  $DR=2.55\%$ , ostvaren prekoračenjem graničnih dilatacija u armaturi za stubove prvog sprata (slika 5.123.d).

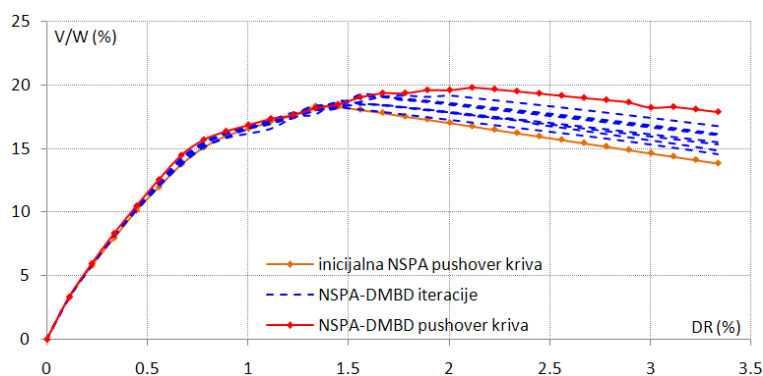
Kod sedme iteracije NSPA-DMBD metode nepovoljan mehanizam loma je, pri nivou drifta  $DR=2.77\%$ , ostvaren prekoračenjem graničnih dilatacija u betonu za stub drugog sprata (slika 5.123.e). Generalno se može konstatovati povećanje nivoa drifta po NSPA-DMBD metodi uz smanjenje nivoa oštećenja i rizika od kolapsa, a što je posledica korekcije mehanizma loma sistema, od nepovoljnog ka optimalnom.



Slika 5.123 Iteracije NSPA-DMBD metode: a) inicijalna NSPA analiza ( $DR=1.55\%$ ), b) prva ( $DR=2.22\%$ ), c) treća ( $DR=2.22\%$ ), d) peta ( $DR=2.55\%$ ), e) sedma ( $DR=2.77\%$ ), f) deveta (finalna) [45]

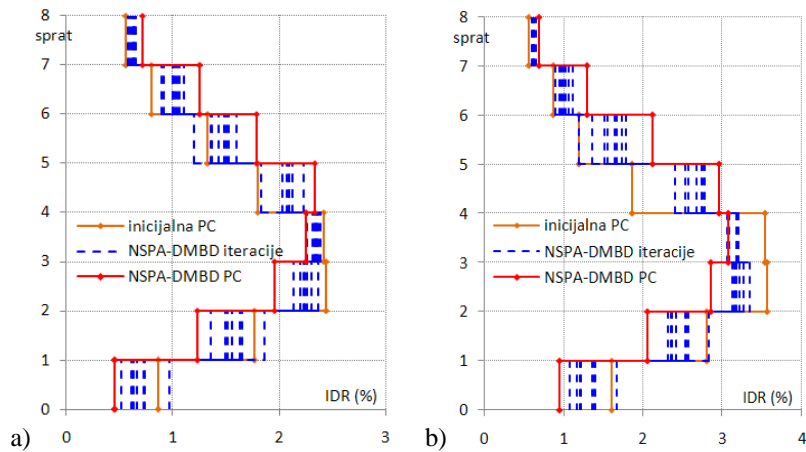
Mesta razvoja mehanizma loma na nivou štapova su u najvećem broju slučajeva lokalizovana na spoju greda-stub, dok je samo na manjem broju analiza identifikovan razvoj graničnih dilatacija van ove zone, kao što je peta iteracija NSPA-DMBD metode. Od ukupno devet sprovedenih iteracija u okviru NSPA-DMBD metode kod četiri su identifikovana prekoračenja graničnih dilatacija u armaturi, dok su za preostale analize bile merodavna prekoračenja graničnih dilatacija u betonu. Prilikom proračuna okvirnih armiranobetonskih zgrada, a primenom standardizovanih propisa za dimenzionisanje armiranobetonskih preseka, teži se razvoju loma dostizanjem graničnih dilatacija po armaturi. Na taj način se u armiranobetonskim elementima obezbeđuje povoljno duktilno ponašanje. Primenom razvijene NSPA-DMBD metode i istraživanjem na modelu okvirne zgrade ukazano je da je čak kod inicijalne NSPA analize indikator

nepovoljnog mehanizma loma bio preko graničnih dilatacija betona. Generisane NSPA *pushover* krive za sve analize prikazane su na slici 5.124. Uticaj korekcije mehanizma loma sistema primenom NSPA-DMBD metode nema većeg značaja na globalnom nivou do vrednosti drifta  $DR=1.5\%$ , gde se dobijaju gotovo identična rešenja kao i za inicijalnu *pushover* krivu. Daljim povećanjem nivoa drifta i ulaskom u domen izraženog nelinearnog ponašanja ova razlika postaje sve značajnija, tako da razvoj i karakter optimalnog mehanizma loma dobija na značaju. Kod inicijalne NSPA *pushover* krive krutost u nelinearnom domenu konstantno se redukuje, dok se kod NSPA-DMBD *pushover* krive krutost u nelinearnom domenu povećava kako se povećava broj iteracija.

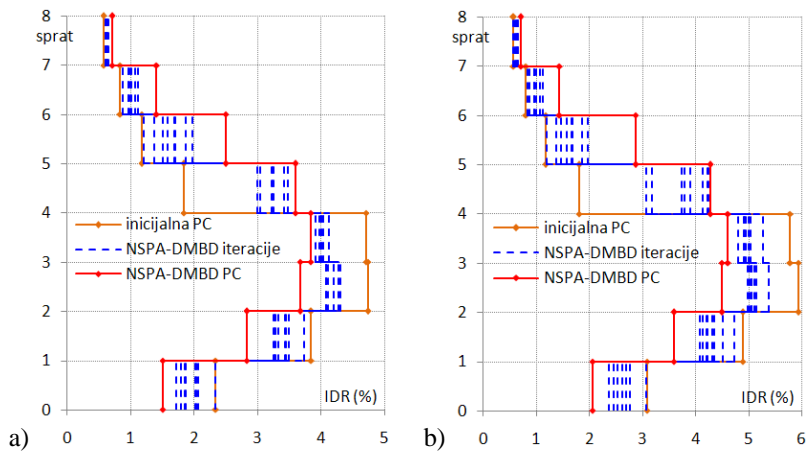


Slika 5.124 Inicijalna NSPA *pushover* kriva, *pushover* krive za iteracije NSPA-DMBD metode i finalna NSPA-DMBD *pushover* kriva [45]

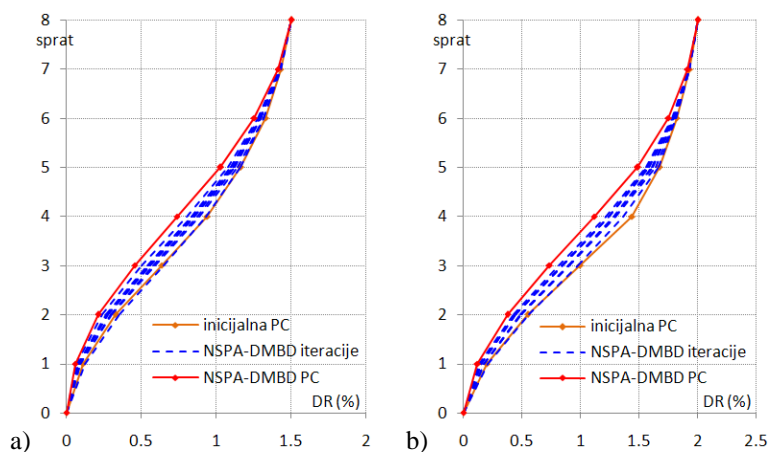
Na slikama 5.125 i 5.126 su prikazani međuspratni driftovi prema NSPA-DMBD metodi za četiri nivoa maksimalnih driftova:  $DR_{max}=1.5\%$ ,  $DR_{max}=2\%$ ,  $DR_{max}=2.5\%$  i  $DR_{max}=3\%$ . Evidentno je da se povećanjem broja iteracija prema NSPA-DMBD metodi maksimalna vrednost međuspratnog drifta smanjuje, pri svim nivoima razmatranih maksimalnih driftova  $DR_{max}$ . Kod nižih spratova vrednosti međuspratnih driftova se redukuju, dok se kod viših spratova povećavaju uravnotežujući na taj način odgovor konstrukcije prema NSPA-DMBD metodi. Na slikama 5.127 i 5.128 su prikazani globalni driftovi prema NSPA-DMBD metodi za četiri nivoa maksimalnih driftova:  $DR_{max}=1.5\%$ ,  $DR_{max}=2\%$ ,  $DR_{max}=2.5\%$  i  $DR_{max}=3\%$ . Evidentna je redukcija driftova po svim spratovima za finalnu iteraciju NSPA-DMBD metode. Konstrukcija može sa povoljnijim stepenom oštećenja, odnosno sa stepenom oštećenja koji je u fazi proračuna kontrolisan, prihvatiti veće seizmičke sile koje se mogu očekivati usled dejstva snažnijih zemljotresa, u odnosu na one za koje je ista projektovana.



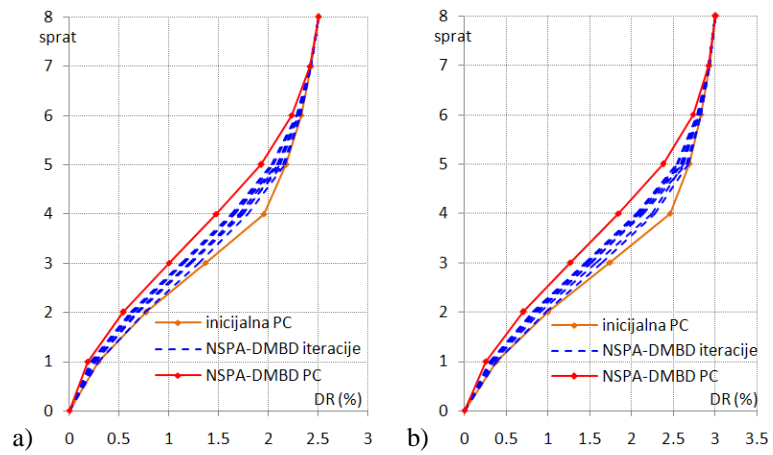
Slika 5.125 Dijagrami međuspratnih driftova  $IDR$  prema NSPA-DMBD metodi za: a)  $DR_{max}=1.5\%$ , b)  $DR_{max}=2\%$  [45]



Slika 5.126 Dijagrami međuspratnih driftova  $IDR$  prema NSPA-DMBD metodi za: a)  $DR_{max}=2.5\%$ , b)  $DR_{max}=3\%$  [45]



Slika 5.127 Dijagrami globalnih driftova  $DR$  prema NSPA-DMBD metodi za: a)  $DR_{max}=1.5\%$ , b)  $DR_{max}=2\%$  [45]



Slika 5.128 Dijagrami globalnih driftova  $DR$  prema NSPA-DMBD metodi za: a)  $DR_{max}=2.5\%$ , b)  $DR_{max}=3\%$  [45]

# 6

## **6. ZAVRŠNA RAZMATRANJA I ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA**

### **6.1. ZAVRŠNA RAZMATRANJA**

Koncept analize konstrukcija prema PBEE metodologiji, razvijen na dosadašnjem nivou, postavlja težište na analizama: hazarda, konstrukcije, oštećenja i štete. S obzirom da su ove četiri vrste analiza međusobno zavisne i sukcesivno se izvršavaju, to je rešenje svake naredne analize zavisno od prethodne. U tom smislu je i kvalitet rešenja svake analize u funkciji kvaliteta dobijenog rešenja prethodne analize. U poslednjih nekoliko godina težište istraživanja PBEE metodologije se pomera ka analizi oštećenja, odnosno ka analizi štete. Sa druge strane, povećanje kvaliteta dobijenih rešenja iz analiza konstrukcija još uvek je moguće, posebno kod 3D modela zgrada, pa i kod dekomponovanih ili individualnih 2D modela. Postoji niz problema na koje tek treba dati odgovore, a i postojeća rešenja dodatno unaprediti i dopuniti. Istraživanje prikazano u ovoj disertaciji bazira se na poboljšanju metoda analize 2D i 3D modela zgrada, a analizirajući njihove performanse u domenu kapaciteta nosivosti i deformacija. Na taj način se povećanjem kvaliteta dobijenih rešenja za performanse zgrada ostavlja prostor za dalje povećanje kvaliteta rešenja kod analize oštećenja i štete. S obzirom da se u metodologiji prikazanoj u disertaciji znatno povećava broj nelinearnih seizmičkih analiza, to je i kvantitet ovih analiza (od nekoliko hiljada) imao dodatnu ulogu u donošenju krajnjih zaključaka. Istraživanja ovakvog tipa se sprovode u laboratorijama za numerička istraživanja, gde se primenjuje tehnika paralelnog

procesiranja podržana značajnim hardverskim resursima velikih kapaciteta. Međutim, i ako je opšte pravilo da kvantitet ne može zameniti kvalitet, to je sa aspekta statističke obrade podataka makar ispunjen potreban, pa i dovoljan uslov u pogledu kvantiteta analiza za generalizaciju i konkretizaciju dobijenih rešenja.

## **6.2. ZAKLJUČCI ISTRAŽIVANJA**

Na osnovu razvijenih originalnih ideja, a uvažavajući postojeću metodologiju za analizu konstrukcija prema performansama i na osnovu sprovedenih obimnih numeričkih analiza, testova i parametara izvođenje zaključaka je sprovedeno kroz četiri različite celine:

- istraživanja na polju akceleroograma i spektara odgovora,
- istraživanja na polju nelinearnog odgovora 2D modela okvirnih sistema koji participiraju u konstruktivnom sistemu okvirnih zgrada (dekomponovani ili tretirani kao nezavisne celine),
- istraživanja na polju nelinearnog odgovora 3D modela okvirnih zgrada,
- istraživanja na polju odnosa kapacitet konstrukcije/seizmički zahtev 2D i 3D modela okvirnih zgrada.

### **6.2.1. ISTRAŽIVANJA NA POLJU AKCELEROGRAMA I SPEKTARA ODGOVORA**

Istraživanja na polju akceleroograma i spektara odgovora se mogu formulirati kroz zaključke:

- Originalno razvijena površ akceleroograma (*ground motion record surface*) omogućava prezentaciju akceleroograma kroz komponente koje se mogu koristiti za analizu 3D modela zgrada. Sa druge strane, prezentacija površi akceleroograma daje uvid u trodimenzionalni prikaz u cilindričnom ili ortogonalnom koordinatnom sistemu. Jednostavnost u generisanju komponenta akceleroograma i transformacija istih u površ akceleroograma ukazuje na dodatnu pragmatičnost razvijene metodologije. Aspekti nepragmatičnosti su zapravo ti što se povećava fizički obim posla kod ovakve analize. Međutim, dosadašnje metode za analizu 3D modela zgrada se baziraju na primeni akceleroograma za



samo dva ortogonalna pravca. S obzirom da se kod PBEE metodologije uzimaju u obzir aspekti analize seizmičkog hazarda na znatno višem nivou, nego što se to radi u praktičnim proračunima kod analiza zgrada, to prezentacija površi akceleroograma i korišćenje iste u analizi zgrada dodatno ima opravdanja. Kroz ovakvu prezentaciju površi akceleroograma je moguće istraživati i uticaj komponente akceleroograma upravno na pravac pružanja raseda i komponente paralelno pravcu pružanja raseda.

- Razvijena je i površi *Arias*-ovog intenziteta. Geometrijskom analizom može se pokazati da je ova površ približno rotaciono simetrična površ, a što ukazuje da je uticaj razlike među komponentama akceleroograma minimalan kada je u pitanju vrednost *Arias*-ovog intenziteta. Ukoliko je centralni konični deo ove površi manji (uži), to se veća vrednost *Arias*-ovog intenziteta ranije dostiže, a ukoliko je ovaj centralni deo površi veći (širi), to se veća vrednost *Arias*-ovog intenziteta kasnije dostiže. Najuži centralni deo površi *Arias*-ovog intenziteta dobijen je za *Kobe* zemljotres.
- Analizom površi akceleroograma, odnosno komponenta akceleroograma pokazano je da je akceleroogram  $a_{\theta}(t)$  za ugao  $\theta$  identičan akceleroogramu sa negativnim predznakom  $-a_{\theta+180}(t)$  za ugao  $\theta+180^{\circ}$ . Posledica ovako izvedenog stava je da za mere intenziteta *IM* važi ista analogija (radijalna simetrija). S obzirom da se određene *IM* mere proračunavaju za apsolutne diskretne vrednosti, to one postaju identične za uglove  $\theta$  i  $\theta+180^{\circ}$ . Ovo je i dokazano na praktičnim primerima akceleroograma.
- Razvijen je i analiziran koeficijent raspoložive površi *IM* mera  $C_{IM}$ , a koji predstavlja odnos površina oblasti ograničene anvelopom mere intenziteta *IM* i anvelopom maksimalne vrednosti za datu *IM* meru. Prezentacija *IM* mera je izvršena primenom anvelope mere intenziteta. S obzirom da je maksimalna moguća vrednost koeficijenta raspoložive površi *IM* mera  $C_{IM}=1$ , to vrednosti bliže jedinici ukazuju na veću jednakost među *IM* merama (kružni oblik anvelope *IM* parametara). Sa druge strane, manje vrednosti ukazuju na postojanje jednog izraženog glavnog pravca *IM* mere i jednog ortogonalnog sporednog pravca *IM* mere (elipsoidni oblik anvelope *IM* mere).
- Istraživanjem su razmatrani i veštački akceleroگرامи. Problem koji se generalno

pojavljuje kod generisanja nepotpunih nestacionarnih veštačkih akceleroograma je pojava velikog broja pikova akceleracija, odnosno većeg broja jakog kretanja tla. Međutim, u preliminarnim analizama su detaljno razmatrani svi parametri koji učestvuju u generisanju ovih akceleroograma, tako da je u krajnjoj formi, u pogledu prethodno opisanih aspekata, generisan zadovoljavajući akceleroogram. Kod generisanja potpunih nestacionarnih veštačkih akceleroograma nije bilo većih problema, jer je i sam razvijen algoritam, sa opcijama za selekciju većeg broja parametara za generisanje, omogućio optimalno generisanje. Visokopropusnim filterom je eliminisan nepotreban frekventni opseg, a zadržan frekventan opseg koji odgovara periodu vibracija do 4s.

- Originalno razvijena površ spektra odgovora ubrzanja (*acceleration response spectra surface*) i površ spektra odgovora pomeranja (*displacement response spectra surface*) omogućava prezentaciju spektara odgovora kroz komponente koje se mogu koristiti za analizu 3D modela zgrada. Takođe, kao i kod površi akceleroograma razmatran je i koeficijent raspoložive površi *IM* mere  $C_{IM}$ . Prethodno su *IM* mere prikazane primenom anvelope mere intenziteta. Analogno dokazu o postojanju radijalne simetrije kod *IM* mera akceleroograma i u slučaju *IM* mera spektara odgovora može se tvrditi o postojanju radijalne simetrije.
- Istraživanjem su razmatrani aspekti skaliranja i kompatibilizacije akceleroograma i njihov uticaj na formu površi spektra odgovora. Utvrđeno je da površi spektara odgovora generisane kompatibilizacijom imaju domen konstantnih ubrzanja veći, u odnosu na površi spektara odgovora generisane skaliranjem po metodi najmanjih kvadrata. Sa druge strane, s obzirom da je kompatibilizacija izvršena u odnosu na elastičan spektar dogovora prema propisima, to generisane površi spektara odgovora imaju određeni stepen rotacione simetrije oko vertikalne ose spektralnog ubrzanja  $S_a$ .

### **6.2.2. ISTRAŽIVANJA NA POLJU NELINEARNOG ODGOVORA 2D MODELA OKVIRNIH SISTEMA**

Istraživanja na polju nelinearnog odgovora 2D modela okvirnih sistema koji participiraju u konstruktivnom sistemu okvirnih zgrada (dekomponovani ili tretirani kao nezavisne celine) se mogu formulisati kroz zaključke:

- Na osnovu iskustva autora u dosadašnjim istraživanjima publikovanim kroz magistarsku tezu i naučne radove definisani su opšti modeli *pushover* krivih koji su poslužili kao podloga za dalja razmatranja u doktorskoj disertaciji. Prvi model *pushover* krive karakteriše visoko duktilno ponašanje zgrada, s obzirom na mogućnost znatne disipacije histerezisne energije i plastifikaciju sistema povoljnim mehanizmima loma, a pri čemu su moguće varijante sa pozitivnom ili negativnom nelinearnom krutosti sistema. Ovaj model karakteriše egzistencija linearnog, nelinearnog i kolapsnog domena. Drugi model *pushover* krive karakteriše visoko ili srednje duktilno ponašanje zgrada, pri čemu nema jasno izraženog kolapsnog domena. Ovo može biti i problem numeričkog rešenja, jer je za okvirne sisteme zgrada potreban veliki broj inkremenata i iteracija. Treći slučaj nelinearnog odgovora karakteriše nizak nivo duktilnosti ili neduktilno ponašanje, pri čemu nema jasno izraženog nelinearnog i kolapsnog domena. Takođe, identifikovan je i definisan model *pushover* krive koji pripada prelaznoj kategoriji, a karakteriše ga nelinearan odgovor sistema sa naglom promenom nelinearne krutosti. U odnosu na prethodno definisane bazne modele *pushover* krivih, sprovedena je klasifikacija varijacijom duktilnosti, duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja i koeficijenta odnosa krutosti u nelinearnom i linearnom domenu. Na osnovu ova tri parametra generisan je set *pushover* krivih, a koje predstavljaju tipološke modele *pushover* krivih kod okvirnih 2D i 3D modela zgrada.
- Istraživanje tipa raspodele lateralnog seizmičkog opterećenja kod NSPA *pushover* analize sprovedeno je razmatranjem rešenja dobijenih iz INDA analiza zemljotresa. Dosadašnja istraživanja, u najvećem broju slučajeva, se baziraju na modeliranju seizmičkog opterećenja kao ravnomerne raspodele lateralnog opterećenja po visini zgrade ili primenom ekvivalentne raspodele lateralnih seizmičkih sila i kod 2D i kod 3D okvirnih sistema zgrada. Da bi se utvrdilo merodavnije rešenje koje se dobija iz ove dve raspodele seizmičkih sila, prvo su sprovedene regresione analize za diskretna rešenja INDA analiza. Zatim je predložena parabolična raspodela kao alternativa ravnomernoj i ekvivalentnoj. Prednost ovakve raspodele je dokazana upoređujući sa rešenjem dobijenim iz regresione analize za grupu zemljotresa, odnosno diskretne vrednosti INDA

analiza. Ovakav tip raspodele se koristi kod konvencionalne NSPA analize, a koja je znatno brža od adaptivne NSPA analize. Sa druge strane, u cilju određivanja merodavne maksimalne ukupne smičuće sile u osnovi objekta po inkrementalnim situacijama, konstruisana je anvelopa maksimalnih pikova diskretnih vrednosti INDA analiza. Konstatacija je da se primenom *pushover* krive za ravnomernu raspodelu lateralnog seizmičkog opterećenja postiže dosta dobro pokrivanje INDA anvelope.

- Istraživanje uticaja TU (*total updating*), IU (*incremental updating*) i HU (*hybrid updating*) korekcije je razmatrano na 8x4 2D modelu okvira. Najkvalitetnija rešenja se dobijaju primenom NSAPA-DBA analize uzimajući u obzir i uticaj viših svojstvenih oblika za generisanje lateralnih seizmičkih sila. Za sprovođenje ove analize takođe je potrebno izeti u obzir IU korekciju sa klasičnom NR metodom. Primena algoritama za HU korekciju moguća je ukoliko se u domenu linearno elastičnog ponašanja sistema primeni TU ili HU korekcija sa mNR ili NRmNR metodom, a u domenu nelinearnog ponašanja IU korekcija. Na taj način redukuje se vreme proračuna, a zadržava nivo kvaliteta dobijenih rezultata.
- U cilju određivanja potrebnog broja broja NDA analiza u okviru jedne INDA analize, razvijena je metoda koja se bazira na rešenju dobijenom iz NSPA analize. Na taj način je moguće napraviti predikciju potrebnog broja NDA analiza kako bi se redukcijom broja NDA analiza redukovalo i vreme za ukupno procesiranje INDA analize.
- Na osnovu procesiranja NSPA i INDA analiza 2D 8x4 modela okvirnog sistema najbolje rešnje je dobijeno za NSPA-DBA analizu, u odnosu na INDA analizu. Primenjene regresione analize sa polinomom šestog stepena pokazale su se dobro, jer su ovi polinomi mogli dobro da aproksimiraju *pushover* krive NSPA analiza i diskretne vrednosti INDA analize. Ovo je utvrđeno na osnovu koeficijenta korelacije i mere odnosa relativnih vrednosti energija deformacije *pushover* krive NSPA analize i diskretnih vrednosti INDA analize.
- U cilju predikcije rešenja koje se dobija iz INDA analiza 2D i 3D modela okvirnih zgrada sa mogućnošću razmatranja odgovora sistema u kapacitativnom domenu, a pri tome ne povećavajući znatnije vreme potrebno za procesiranje, razvijena je hibridna inkrementalna nelinearna statička-dinamička analiza

(HINSDA - *Hybrid Incremental Nonlinear Static-Dynamic Analysis*). Istraživanjem sprovedenim na 2D modelu okvirnog sistema pokazano je da su vrednosti driftova veće u slučaju primene  $PGA-IDR_{max}$  parametara, nego kod primene  $PGA-DR$  parametara. Najmanje odstupanje HINSDA krive od INDA krive dobija se primenom trećeg UBEPKHS konstitutivnog modela, dok se najveće odstupanje dobija primenom prvog UBEPKHS konstitutivnog modela. Parametarskom analizom je utvrđeno da je potrebno uzeti u veći broj inkremenata za silu kod bilinearizacije  $N_{in,v}$ , odnosu na broj inkremenata za pomeranje kod bilinearizacije  $N_{in,h}$ .

### 6.2.3. ISTRAŽIVANJA NA POLJU NELINEARNOG ODGOVORA 3D MODELA OKVIRNIH ZGRADA

Istraživanja na polju nelinearnog odgovora 3D modela okvirnih zgrada se mogu formulisati kroz zaključke:

- Efekti egzistencije tavanica u preliminarnim istraživanjima razmatrani su primenom krutih dijafragmi, elemenata veze i ekvivalencijom stepeni slobode na 3D 4-spratnom okvirnom modelu zgrade. Preliminarnim istraživanjem na 3D modelu zgrade, a za NSPA analizu utvrđeno je da se primenom krutih dijafragmi, elemenata veze i ekvivalencijom stepeni slobode postiže isti odgovor sistema prezentovan preko NSPA *pushover* krivih. Sa druge strane, vreme procesiranja NSPA analiza predstavlja manje zahtevan problem, dok je kod NDA i INDA analiza to obiman i složen problem zajedno sa količinom podataka iz procesiranja koju treba obraditi. Međutim, kod NSPA analiza 3D modela sa tavanicama modeliranim kao krute dijafragme broj iteracija se znatno povećao, a shodno tome i vreme procesiranja se udvostručilo, tako da izbor elemenata veze za modeliranje tavanica predstavlja najoptimalnije rešenje.
- Originalno razvijena *pushover* površ (*pushover surface*) omogućava prezentaciju nelinearnog odgovora 3D modela zgrada. S obzirom da se dosadašnja istraživanja baziraju na *pushover* krivama, to je ovakav koncept prezentacije prvi put predstavljen u ovoj doktorskoj disertaciji. Prednosti u prezentaciji nelinearnog odgovora 3D modela zgrada primenom *pushover* površi su: jasna geometrijska prezentacija kroz detaljan prikaz kompletnog nelinearnog odgovora

po svim uglovima i mogućnost da se primene dalja matematička razmatranja. Istraživanjem je prikazan opšti model *pushover* površi i na neki specifični modeli *pushover* površi, kao što je rotaciono simetrična *pushover* površ i *pushover* površ za slučaj da su maksimalna realizovana pomeranja identična po svim NSPA *pushover* krivama. Sa aspekta generisanja i prezentacije *pushover* površi dokazane su prednosti korišćenja linearne interpolacije, u odnosu na NURBS splajнове, posebno što se kod prezentacije *pushover* površi može prikazati i anvelopa ciljnog pomeranja.

- Tipologija NSPA *pushover* površi je sprovedena u funkciji varijacije duktilnosti, duktilnosti u zoni ojačanja/omekšanja i koeficijenta odnosa krutosti u nelinearnom i linearnom domenu za jedan i dva glavna pravaca. Takođe, razmatrane su i situacije sa identičnim vrednostima duktilnosti po smerovima jednog (svih) pravca i različitim vrednostima parametara po smerovima jednog (svih) pravca. Generisani modeli *pushover* krivih predstavljaju opšte modele okvirnih 3D modela zgrada. Centralni deo *pushover* površi je u svim slučajevima koničan, odnosno konus ili konoid, dok je deo koji pripada nelinearnom domenu poligonalna rotaciono simetrična ili rotaciono asimetrična površ. Generalno razmatrajući identifikovane su četiri grupe *pushover* površi: rotaciono polisimetrične u osnovi, monosimetrične u osnovi, bisimetrične u osnovi i asimetrične u osnovi.
- Na osnovu uvedenog novog koeficijenta površi duktilnosti (*ductility area coefficient*)  $M_\mu$  moguće je razmatrati nelinearan odgovor 3D modela zgrada uzimajući u obzir duktilnost za sve pravce, odnosno uglove dejstva zemljotresa. Parametarskom analizom i korelacijom sa koeficijentom duktilnosti određene su klase koeficijenta površi duktilnosti. Regresionom analizom i koeficijentom korelacije utvrđeno je da se veza između koeficijenta duktilnosti i koeficijenta površi duktilnosti uspostavlja primenom stepene funkcije. Na osnovu klasa koeficijenta površi duktilnosti analizirane su, između ostalog, performanse 3D modela zgrada.
- U odnosu na NSPA *pushover* površ, istraživanjem je pokazano da INDA (IDA) *pushover* površ ima drugačiji oblik, s obzirom da je primenjena druga mera intenziteta  $IM$  i inženjerski parametar zahteva  $EDP$ . U domenu nelinearnog

ponašanja, odnosno u domenu kolapsa INDA *pushover* krive se asimptotski približavaju horizontali, tako da celokupna INDA *pushover* površ postaje gotovo horizontalna površ. Ovo je posledica toga što u kolapsnom domenu razlika u vrednostima driftova za dve uzastopne NDA analize postaje izuzetno velika.

- Razmatrajući realizovane izopovršni u polarnim koordinatama za monitoring razvoja plastičnih zglobova po inkrementalnim fazama utvrđeno je da je kod svih modela zgrada dostignut B-IO performansni nivo. Takođe, broj plastičnih zglobova za B-IO performansni nivo je najveći, ali se u narednim koracima redukuje, s obzirom da se javljaju novi performansni nivoi kako napreduje razvoj nelinearnih deformacija sistema. U slučaju IO-LS performansnog nivoa broj plastičnih zglobova je manji, u odnosu na B-IO performansni nivo, dok je u slučaju LS-CP performansnog nivoa broj plastičnih zglobova dodatno redukovan. Kod CP-C performansnog nivoa nije došlo do formiranja ni jednog plastičnog zgloba kod svih modela zgrada, a to znači da plastična stanja u presecima stubova i greda u kojima se formirao LS-CP performansni nivo se, u najvećem broju slučajeva, tu i zadržavaju ili prelaze u C-D performansni nivo. Performansni nivoi D-E i >E nisu dostignuti ni za jedan model zgrade, a što ukazuje na činjenicu da nije realizovan rezidualan nivo deformacija kod zgrada. Ovo može da ukazuje na činjenicu da se, pri znatnom nelinearnom ponašanju zgrada ni u jednom preseku, gde je razvijen plastični zglob, ne može se računati na duktilnost znatno veću od zahtevane. Sa druge strane, kada bi se računalo na ovako veliku duktilnost koju obezbeđuje rezidualan nivo deformacija, tada bi nosivost plastifikovanog poprečnog preseka bila znatnije redukovana, nego što je to u slučaju do dostizanja CP-C, odnosno performansnog nivoa za čvor C.
- Razmatrajući realizovane krive u polarnim koordinatama za driftove, relativnu vrednost ukupne smičuće sile u osnovi zgrade i duktilnost utvrđeno je da su kod svih modela zgrada realizovani manji ili nešto veći maksimalni globalni driftovi  $DR_{max}$  od globalnog drifta  $DR_{IO}$ , za IO performansni nivo prema FEMA propisima. Ovo je povoljno, s obzirom da i za maksimalne vrednosti globalnih driftova  $DR_{max}$  nije prekoračen globalni drift  $DR_{LS}$  za LS performansni nivo. S obzirom da su zgrade projektovane za visoku klasu duktilnosti DCH, to je NSPA analizama dobijeno da 15x4x4 i 9x6x5-12 3D modeli zgrada ispunjavaju ovaj

kriterijum, pri čemu su srednje vrednosti koeficijenta duktilnosti veće od propisima zahtevanih duktilnosti ( $\mu_m > 4$ ) za sva seizmička dejstva (proračunske situacije). Razmatrani su, dakle, svi uglovi, a ne samo X i Y pravci (dva glavna pravca) koji se standardno razmatraju u linearnim i nelinearnim seizmičkim analizama. Ukoliko se uzmu u obzir  $E_x + 0.3E_y$  i  $E_x - 0.3E_y$  seizmička dejstva, gde se dobijaju ekstremne vrednosti pomeranja sistema, tada i 15x4x4-6 3D model zgrade pripada kategoriji DCH duktilnih zgrada. 9x6x5-12 3D model zgrade, projektovan prema SRP propisima, realizuje viši nivo duktilnosti, u odnosu na ostale zgrade projektovane prema EC propisima. Kod 15x4x4-6 3D modela zgrade je za  $E_{\theta} + 0.3E_{\theta+90^\circ}$  i  $E_{\theta} - 0.3E_{\theta+90^\circ}$  seizmička dejstva dobijeno da na osnovu srednje vrednosti koeficijenta duktilnosti  $\mu_m = 3.2$  zgrada pripada srednjoj klasi duktilnosti DCM ( $\mu_m < 4$ ). Sa druge strane, na osnovu vrednosti koeficijenta površi duktilnosti  $M_{\mu} = 12.7$  može se konstatovati da zgrada pripada visokoj klasi duktilnosti DCH, jer je za visoku klasu duktilnosti  $M_{\mu} > 11$ . S obzirom da se koeficijentom površi duktilnosti  $M_{\mu}$  meri odnos površina maksimalno realizovanih pomeranja i pomeranja na granici tečenja po uglovima  $\theta_i$ , to ovaj parametar ukazuje na viši nivo osetljivosti pri određivanju globalnog duktilnog ponašanja zgrade. Generalizovani zaključak bi mogao da glasi da se kod zgrada veće spratnosti lakše realizuje viša klasa duktilnosti, a da se povećanjem neregularnosti u osnovi ova duktilnost smanjuje.

- Razmatrajući realizovane NSPA *pushover* površi u prostornim koordinatama utvrđeno je da je kod svih 3D modela zgrada krutost u nelinearnom domenu gotovo horizontalna  $K_n \approx 0$  ili blago pozitivna, osim u pojedinim slučajevima, gde sa povećanjem nelinearnih deformacija krutost postaje negativna  $K_n < 0$ . Kada se razmatraju samo  $E_x + 0.3E_y$  i  $E_x - 0.3E_y$  seizmička dejstva, a što bi bilo kod standardnih seizmičkih analiza, tada se i dobijaju gotovo najveće vrednosti nelinearnih deformacija za pravac gde se uzima 100% seizmičko dejstvo, a najmanje vrednosti nelinearnih deformacija za pravac gde se uzima 30% seizmičko dejstvo. Za ova seizmička dejstva ortogonalna projekcija ( $DR_x - DR_y$  ravan) NSPA *pushover* površi ima elipsoidan oblik sa uklještenjem na mestu manjeg poluprečnika elipse. Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade su realizovane znatno manje maksimalne relativne vrednosti ukupne smičuće sile u odnosu na



relativne vrednosti ukupne smičuće sile kod 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela zgrada, a što je direktna posledica proračuna seizmičkog dejstva prema SRP propisima.

- Razmatrajući realizovane krive duktilnosti i relativnog spektralnog ubrzanja u polarnim koordinatama i IDA *pushover* površi u prostornim koordinatama utvrđeno je da su krive relativnog spektralnog ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  gotovo geometrijski identične krivama duktilnosti  $\mu_{coll}$  i  $\mu_{extr}$  za  $E_{\theta+0.3E_{\theta+90^\circ}}$  i  $E_{\theta-0.3E_{\theta+90^\circ}}$  seizmička dejstava. Ovo je slučaj kod velikog broja razmatranih modela zgrada. Na mestima (po uglovima) gde su realizovane veće vrednosti duktilnosti realizovane su i veće relativne vrednosti spektralnog ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$ . U odnosu na krive relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  određene NSPA analizama koje su kružnog ili približno kružnog oblika, krive relativnog spektralnog ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  određene IDA analizama su elipsoidnog oblika ili složenije forme. Najviše vrednosti relativnog spektralnog ubrzanja  $S_a/S_{a,y}$  su dobijene kod 9x6x5-12 3D modela zgrade projektovana prema SRP propisima, dok su nešto niže vrednosti dobijene za 15x4x4 3D model zgrade projektovana prema EC propisima.

#### **6.2.4. ISTRAŽIVANJA NA POLJU ODNOSA KAPACITET KONSTRUKCIJE/SEIZMIČKI ZAHTEV 2D I 3D MODELA OKVIRNIH ZGRADA**

Istraživanja na polju odnosa kapacitet konstrukcije/seizmički zahtev 2D i 3D modela okvirnih zgrada se mogu formulisati kroz zaključke:

- Definisani su opšti modeli odnosa *pushover* kriva i kriva zahteva (BR/SD) koji su poslužili kao podloga za dalja razmatranja ciljnih pomeranja u doktorskoj disertaciji. U prvom slučaju razmatran je model odnosa BR/SD kod koga je nivo ciljnog pomeranja u elastičnoj oblasti. U drugom slučaju model odnosa BR/SD je nešto povoljniji u odnosu na prethodni, ali je u ovom slučaju zahtevana duktilnost manja od minimalno potrebne prema propisima. U trećem slučaju model odnosa BR/SD je najpovoljniji jer je, između ostalog, i zahtevana duktilnost u granicama optimalno potrebne. U četvrtom slučaju model odnosa BR/SD je delimično povoljan, zbog prevelike realizovane zahtevane duktilnosti,

odnosno prevelikog realizovanog zahtevanog drifta koji može biti i veći od drifta LS performansnog nivoa. U petom slučaju model odnosa BR/SD je nepovoljan zbog prevelike realizovane zahtevane duktilnosti i dobijenog nivoa ciljnog pomeranja u predkolapsnoj, odnosno kolapsnoj oblasti. Uzimajući u obzir prethodno definisane opšte modele BR/SD odnosa definisani su međusobni odnosi po svim *pushover* krivama, polazeći od stavova o egzistenciji ciljnih pomeranja i generalizaciji L, N i C domena u kojem se ista nalaze. Opšti zaključak bi bio da je najpovoljnije rešenje ukoliko bi se ciljna pomeranja po svim uglovima  $\theta_i$  nalazila u istom (nelinearnom) domenu, pri čemu bi globalni driftovi bili manji od globalnog drifta za LS performansni nivo.

- Na osnovu razvijene iterativne metode koeficijenta pomeranja (IDCM - *Iterative Displacement Coefficient Method*) i sprovedenih numeričkih testova na *pushover* krivama standardizovanih modela odgovora i *random* funkcija odgovora, utvrđeno je da se postiže veoma zadovoljavajuće slaganje vrednosti driftova realizovanih prema IDCM i NDA analizi. Takođe, minimalna su odstupanja relativne vrednosti ukupne smičuće sile u osnovi objekta realizovana IDCM metodom, u odnosu na rešenja dobijena NDA metodom pri nivoima ciljnih pomeranja  $(V/W)_t$ .
- Kod 4x6x3 3D modela zgrade veliki broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  jednak je maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Ovo se događa gotovo kod svih zemljotresa (i za skaliranje i za kompatibilizaciju), tako da se maksimalne vrednosti globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,max}$  izjednačavaju sa maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su nešto niže od relativnih vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  u intervalu  $\theta=(60^\circ\div 120^\circ)$ , odnosno u intervalu  $\theta=(240^\circ\div 300^\circ)$ .
- Kod 4x6x5-13 3D modela zgrade manji broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  je jednak maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ , razmatrajući pojedinačno zemljotrese i to kod skaliranja akceleroograma metodom najmanjih kvadrata. Pri kompatibilizaciji akceleroograma znatno veći broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  je jednak

maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ , razmatrajući pojedinačno zemljotrese. Međutim, i pri skaliranju i pri kompatibilizaciji kod svih zemljotresa maksimalne vrednosti globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_{t,max}$  izjednačavaju sa maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su jednake relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  pri  $\theta=(30^\circ,120^\circ,210^\circ,300^\circ)$ . Ovo je posebno izraženo za slučaj kompatibilizacije akcelrograma, pri čemu se i ostale relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  izjednačavaju sa relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ .

- Kod 15x4x4 3D modela zgrade su globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  jednaki maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$  (i za skaliranje i za kompatibilizaciju) u samo četiri vrednosti ugla  $\theta=(30^\circ,120^\circ,210^\circ,300^\circ)$ . Ovo je znatno povoljnija situacija, u odnosu na globalne driftove prethodnih modela zgrada, s obzirom da postoji izvesna rezerva u nelinearnom pomeranju sistema do dostizanja kolapsnog stanja. Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su bliže relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  pri kompatibilizaciji akcelrograma, dok su za slučaj skaliranja akcelrograma ova odstupanja su znatno veća.
- Kod 15x4x4-6 3D modela zgrade globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  izjednačavaju se sa maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$  pri skaliranju *Loma Prieta* LP89 zemljotresa i nepotpunog nestacionarnog veštačkog akcelrograma, ali samo u određenim vrednostima ugla  $\theta_i$ . U svim ostalim slučajevima i pri kompatibilizaciji akcelrograma globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  su znatno niži od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$ . Ova činjenica ukazuje na postojanje rezerve u nelinearnom pomeranju sistema do dostizanja kolapsnog stanja. Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  znatnije odstupaju od relativnih vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , i pri skaliranju i pri kompatibilizaciji akcelrograma. Ove

vrednosti su dosta niže u velikom broju slučajeva, a što ukazuje da je nelinearna krutost pozitivna.

- Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade, pri skaliranju akceleroograma metodom najmanjih kvadrata, veliki broj globalnih driftova za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  po uglovima  $\theta_i$  jednak je maksimalnim globalnim driftovima  $DR_{max}$ . Sa druge strane, u slučaju *Imperial Valley IV79*, *Loma Prieta LP89*, *Parkfield PA66* zemljotresa i potpunog nestacionarnog veštačkog akceleroograma svi globalni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  su manji od maksimalnih globalnih driftova  $DR_{max}$ . Relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su bliže relativnim vrednostima ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$  pri kompatibilizaciji akceleroograma, dok su za slučaj skaliranja akceleroograma ova odstupanja veća. U određenim slučajevima relativne vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade za ciljna pomeranja  $(V/W)_t$  su i veće od relativnih vrednosti ukupnih smičućih sila u osnovi zgrade  $(V/W)_{adeq}$  za maksimalni globalni drift  $DR_{max}$ , a što ukazuje na činjenicu da nelinearna krutost postaje negativna nakon dostizanja nivoa ciljnog pomeranja.
- Originalno razvijena anvelopa ciljnog pomeranja (*target displacement envelope*) omogućava prezentaciju maksimalnog projektnog nivoa pomeranja 3D modela zgrade po uglovima  $\theta_i$  i proračun odgovarajućih koeficijenta za ocenu performansi zgrada. Koeficijenti prosečne zahtevane duktilnosti  $\mu_{d,v/d,y}$  kod 4x6x3 i 4x6x5-13 3D modela zgrada su u intervalu (2÷4), a što ukazuje na srednje duktilno ponašanje do nivoa ciljnog pomeranja. U slučaju 15x4x4 3D modela zgrade ovaj koeficijent je, u određenim situacijama i niži od 2, dok je u nekim i veći od 2, ali manji od 4, a što ukazuje na nisko do srednje duktilno ponašanje. Ovo je posebno indikativno kod skaliranja akceleroograma, dok je kod kompatibilizacije akceleroograma realizovana prosečna zahtevana duktilnost. Kod 15x4x4-6 3D modela zgrade su, i za slučaj skaliranja i kompatibilizacije akceleroograma, dobijene niže do srednje duktilnosti za realizovane nivoe ciljnih pomeranja. U odnosu na sve prethodne zgrade, kod 9x6x5-12 3D modela zgrade je dobijena visoka duktilnost za realizovane nivoe ciljnih pomeranja.
- Koeficijenti realizovane (zahtevane) površi duktilnosti  $M_{d,v/d,y}$  kod 4x6x3 i

4x6x5-13 3D modela zgrada su u intervalu (3÷11), a što odgovara srednjem duktilnom ponašanju. U slučaju 15x4x4 3D modela zgrade dobijena je niska, srednja i visoka zahtevana duktilnost pri skaliranju akceleroograma, dok je pri kompatibilizaciji akceleroograma dobijena srednja i visoka zahtevana duktilnost. Takođe, kod 15x4x4-6 3D modela zgrade dobijena je niska do srednja zahtevana duktilnost, a slučaju 9x6x5-12 3D modela zgrade dobijena je visoka duktilnost merena preko koeficijenta  $M_{d,t/d,y}$ .

- Istraživanjem je utvrđeno da su kod svih 3D modela zgrada koeficijenti  $M_{d,t/LS}$  i  $M_{d,t/CP}$  znatno manji od 1 (do 0.25). Povoljna rešenja se mogu smatrati kada je  $M_{d,t/LS} < 1$ , a što bi značilo da pri zahtevanom duktilnom ponašanju zgrade nije prekoračen LS performansni nivo. Istraživanjem je to i potvrđeno.
- Kod svih 3D modela zgrada, i za skaliranje i za kompatibilizaciju akceleroograma, dobijene su najveće vrednosti globalnih driftova i za nivo ciljnog pomeranja  $DR_t$  i za nivo maksimalnog pomeranja  $DR_{max}$  u najvišim spratovima. Ukoliko se uzme u obzir da je globalni drift za IO performansni nivo  $DR_{IO}=1\%$ , a za LS performansni nivo  $DR_{LS}=2\%$ , tada se može konstatovati da je i maksimalna dobijena vrednost globalnog drifta za nivo ciljnog pomeranja od 1.5% u zadovoljavajućim granicama. Kod 4x6x3 i 4x6x5-13 3D modela objekata dobijeni su najveći međuspratni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$  u nižim spratovima, dok se ka višim spratovima njihove vrednosti smanjuju. Kod 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela zgrada dobijeni su najveći međuspratni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$  od drugog do sedmog sprata, dok se ka višim spratovima njihove vrednosti smanjuju. Kod 9x6x5-12 3D modela zgrade dobijeni su najveće međuspratni driftovi za nivo ciljnog pomeranja  $IDR_t$  od prizemlja do četvrtog sprata, dok se kod viših spratova njihove vrednosti smanjuju.
- Primenom razvijene nelinearne statičke seizmičke analize zasnovane na principu projektovanja zgrada prema mehanizmima loma (NSPA-DMBD - *Nonlinear Static Pushover Analysis - Damage Mechanisms-Based Design*) i istraživanjem na modelu okvirne zgrade ukazano je da je čak kod inicijalne NSPA analize indikator nepovoljnog mehanizma loma bio preko graničnih dilatacija betona. Povećanjem broja iteracija prema NSPA-DMBD metodi maksimalna vrednost

međuspratnog drifta se smanjuje, pri svim nivoima razmatranih maksimalnih driftova  $DR_{max}$ . Kod nižih spratova vrednosti međuspratnih driftova se redukuju, dok se kod viših spratova povećavaju uravnotežujući na taj način odgovor konstrukcije prema NSPA-DMBD metodi.

### 6.3. PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Pravci daljih istraživanja bi bili ka dodatnom unapređenju metodologije koja je formulisana u doktorskoj disertaciji kroz:

- Uključiti veći broj zemljotresa u razmatranje nelinearnog odgovora 3D modela zgrada prezentovanog preko grupe *pushover* površi. Na osnovu određenih ciljnih pomeranja za grupu zemljotresa i *pushover* površi dobio bi se toroidni prostor seizmičkog zahteva (domen seizmičkog zahteva/odgovora). Za toroidni prostor bi se razvili novi koeficijenti kojim bi se određivale performanse sistema, a jedan od njih bi se zasnivao na metrici volumena toroidnog polja seizmičkog zahteva.
- Za veći broj zemljotresa bi se odredile anvelope ciljnih pomeranja uzimajući u obzir ekstremne minimalne i maksimalne vrednosti, u kojem slučaju bi se dobila površ ciljnog pomeranja. Za površ ciljnog pomeranja bi se razvili novi koeficijenti kojim bi se određivale performanse sistema, a jedan od njih bi se zasnivao na metrici površine površi ciljnog pomeranja.
- Kod HINSDA analize bi se unapredio i dodatno razvio multilinearni histerezisni konstitutivni model koji bi bolje opisivao nelinearno ponašanje okvirnih sistema zgrada.
- S obzirom da je u doktoratu prikazana analiza hazarda, analiza konstrukcija i delimično analiza oštećenja prema performansama, to bi se dalji razvoj metodologije i istraživanje nastavilo kod analize oštećenja i štete. U ovom slučaju bi se razvile površi povredljivosti (*fragility surface*) i površi pouzdanosti (*reliability surface*) 3D modela zgrada.
- Dodatno bi se analize 3D modela zgrada prema performansama razmatrale u probabilističkom formatu (PPBEE - *Probabilistic Performance-Based Earthquake Engineering*).

# LITERATURA

## BIBLIOGRAFSKA GRAĐA

1. Akkar S., Miranda E.: *Statistical Evaluation of Approximate Methods for Estimating Maximum Deformation Demands on Existing Structures*, Journal of Structural Engineering, Vol. 131, No. 1, pp. 160-172, 2005.
2. Alavi B., Krawinkler H.: *Effects of Near Fault Ground Motions on Frame Structures*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 138, 301p, Stanford, USA, 2001.
3. Alendar V.: *Projektovanje seizmički otpornih armiranobetonskih konstrukcija kroz primere, Deo A - Osnovi teorije i uvod u propise*, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 74str, Beograd, Srbija, 2004.
4. Ambrisi A., Stefano M., Viti S.: *Seismic Performance of Irregular 3D RC Frames*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 116, pp. 1-7, Beijing, China, 2008.
5. Aničić D., Fajfar P., Petrović B., Szavits-Nossan A., Tomažević M.: *Zemljotresno inženjerstvo - visokogradnja*, Građevinska knjiga, 642str, Beograd, Srbija, 1990.
6. Antoniou S., Rovithakis A., Pinho R.: *Development and Verification of a Fully Adaptive Pushover Procedure*, The 12th European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 822, pp. 1-10, London, UK, 2002.
7. Antoniou S., Pinho R.: *Advantages and Limitations of Adaptive and Non-Adaptive Force-Based Pushover Procedures*, Journal of Earthquake

- Engineering, Imperial College Press, Vol. 8, No. 4, pp. 497-522, 2004.
8. Antoniou S., Pinho R.: *Development and Verification of a Displacement-Based Adaptive Pushover Procedure*, Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press, Vol. 8, No. 5, pp. 643-661, 2004.
  9. Aschheim M., Tjhin T., Inel M.: *The Scaled Non-Linear Dynamic Procedure: A Practical Technique for Overcoming Limitations of the Non-Linear Static Procedure*, ISET Journal of Earthquake Technology, Vol. 41, No. 1, pp. 127-140, 2004.
  10. ATC 40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Vol. 1, Applied Technology Council, 346p, Redwood City, USA, 1996.
  11. ATC 58, *Engineering Demand Parameters For Structural Framing Systems*, Phase 2, Task 2.2, Applied Technology Council, 20p, Redwood City, USA, 2004.
  12. Avanaki M., Estekanchi H.: *Collapse Analysis by Endurance Time Method*, International Journal of Optimization in Civil Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 287-299, 2012.
  13. Bagchi A.: *Evaluation of the Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings*, PhD Dissertation, Carleton University, 284p, Ottawa, Canada, 2001.
  14. Barros R., Almeida R.: *Pushover Analysis of Asymmetric Three-Dimensional Frames*, Journal of Civil Engineering and Management, Vol. 11, No. 1, pp. 3-12, 2005.
  15. Baros D., Anagnostopoulos S.: *An Overview of Pushover Procedures for the Analysis of Buildings Susceptible to Torsional Behavior*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 195, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
  16. Bathe K.: *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, 1037p, Upper Saddle River, USA, 1996.
  17. Bento R., Pinho R. (editors): *Nonlinear Static Methods for Design/Assessment of 3D Structures*, 184p, Lisbon, Portugal, 2008.
  18. Beyer K., Bommer J.: *Selection and Scaling of Real Accelerograms for Bi-Directional Loading: A Review of Current Practice and Code Provisions*, Journal of Earthquake Engineering, Taylor & Francis, Vol. 11, pp. 13-45, 2007.



19. Biddah A., Heidebrecht A., Naumoski N.: *Use of Pushover Test to Evaluate Damage of Reinforced Concrete Frame Structures Subjected to Strong Seismic Ground Motions*, Proceedings of 7<sup>th</sup> Canadian Conference on Earthquake Engineering, Montreal, Canada, 1995.
20. Bommer J., Martinez-Pereira A.: *The Effective Duration of Earthquake Strong Motion*, Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press, Vol. 3, No. 2, pp. 127-172, 1999.
21. Boore D., Joyner W., Fumal T.: *Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary Recent Work*, Seismological Research Letters, Vol. 68, No. 1, pp. 128-156, 1997.
22. Boore D., Bommer J.: *Processing of Strong-Motion Accelerograms: Needs, Options and Consequences*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier, Vol. 25, pp. 93-115, 2005.
23. Bozorgnia Y., Bertero V. (editors): *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, Taylor & Francis, 1268p, New York, USA, 2006.
24. Bracci J., Kunnath S., Reinhorn A.: *Seismic Performance and Retrofit Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 1, 1997.
25. Bradley B., Dhakal R., Mander J.: *Dependency of Building Fragility to Source Mechanisms of Records Selected for Incremental Dynamic Analysis*, University of Canterbury, pp. 1-6, Christchurch, New Zealand, 2006.
26. Bradley B., Dhakal R., Mander J.: *Experimental Multi-Level Seismic Performance Assessment of RC Frame Building Designed for Damage Avoidance*, International Conference on Civil Engineering in the New Millennium: Opportunities and Challenges, pp. 1-10, Kolkata, India, 2007.
27. Brčić S.: *Dinamika diskretnih sistema (odabrana poglavlja)*, Studentski kulturni centar, 288str, Beograd, Srbija, 1998.
28. Ćosić M., Lađinović Đ.: *Nelinearna statička konvencionalna i modifikovana pushover metoda*, INDIS, X nacionalni i IV međunarodni naučni simpozijum, str. 267-274, Novi Sad, Srbija, 2006.

29. Ćosić M.: *Model interakcije višespratni okvir-poluprostor tla za pushover analizu*, XXIV kongres i simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u oblasti materijala i konstrukcija, str. 187-192, Divčibare, Srbija, 2008.
30. Ćosić M.: *About the Required Capacity of Nonlinear Deformations of the SDOF System with the Pushover Analysis*, The 2<sup>nd</sup> International Congress of Serbian Society of Mechanics, pp. D-06:1-9, Palić, Serbia, 2009.
31. Ćosić M.: *Analiza interakcije konstrukcija - tlo nelinearnom statičkom seizmičkom metodom*, Geotehnički aspekti građevinarstva, III naučno-stručno savetovanje, str. 137-142, Zlatibor, Srbija, 2009.
32. Ćosić M.: *Global Stability Analysis of the System Failure Critical Mechanism*, The 2<sup>nd</sup> International Congress of Serbian Society of Mechanics, pp. D-05:1-11, Palić, Serbia, 2009.
33. Ćosić M.: *Metoda programiranog ponašanja u nelinearnoj analizi okvirnih konstrukcija zgrada*, Nauka+Praksa, Vol. 12, Br. 2, str. 4-7, 2009.
34. Ćosić M.: *About the Required Number and Size of Increments in Incremental Nonlinear Dynamic Analysis*, Civil Engineering - Science and Practice, International Conference, pp. 1-6, Žabljak, Montenegro, 2010.
35. Ćosić M.: *Analiza ciljnog pomeranja 3D modela objekta i tla za uslove seizmičkog dejstva*, Istraživanja, projekti i realizacija u graditeljstvu, Međunarodni naučno-stručni skup povodom stogodišnjice rođenja akademika Prof. Branka Žeželja, str. 119-124, Beograd, Srbija, 2010.
36. Ćosić M.: *Analiza odnosa zahteva i odgovora sistema za procenu performansi u uslovima seizmičkog dejstva*, Zbornik radova Građevinsko-arhitektonskog fakulteta, Br. 25, str. 41-48, 2010.
37. Ćosić M.: *Anvelopa ciljnih pomeranja okvirnih sistema u interakciji sa tlom za uslove seizmičkog dejstva*, Teorijska i eksperimentalna istraživanja konstrukcija i njihova primena u građevinarstvu, I nacionalni simpozijum sa međunarodnim učešćem, str. D39-48, Niš, Srbija, 2010.
38. Ćosić M.: *Inkrementalna, totalna i hibridna formulacija u adaptivnoj pushover analizi zgrada*, II Simpozijum studenata doktorskih studija iz oblasti građevinarstva, arhitekture i zaštite životne sredine, str. 275-282, Novi Sad,

- Srbija, 2010.
39. Ćosić M.: *Nelinearna statička seizmička analiza višespratnih okvira*, Magistarska teza, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 230str, Novi Sad, Srbija, 2010.
  40. Ćosić M.: *Poboljšanje adaptivne FBA pushover analize primenom neelastičnog spektra odgovora u spektralnoj amplifikaciji seizmičkih sila*, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, II naučno-stručno savetovanje, str. 147-152, Divčibare, Srbija, 2010.
  41. Ćosić M.: *Pushover Analysis of MDOF System with SSI Effects and According to FEMA 440*, The 3<sup>rd</sup> Symposium for Geotechnics, Macedonian Associations for Geotechnics, pp. 1-8, Ohrid, Macedonia, 2010.
  42. Ćosić M., Brčić S.: *Metodologija pripreme i obrade akcelerograma za linearne i nelinearne seizmičke analize konstrukcija*, Časopis Izgradnja, Vol. 66, No. 11-12, str. 511-526, 2012.
  43. Ćosić M., Brčić S.: *Iterative Displacement Coefficient Method: Mathematical Formulation and Numerical Tests*, Građevinar, Journal of the Croatian Association of Civil Engineers, Vol. 65, No. 3, pp. 199-211, 2013.
  44. Ćosić M., Brčić S.: *Typology of NSPA Pushover Curves and Surfaces for 3D Performance-Based Seismic Response of Structures*, Building Materials and Structures, Vol. 56, Iss. 4, pp. 19-38, 2013.
  45. Ćosić M., Brčić S.: *The Development of Controlled Damage Mechanisms-Based Design Method for Nonlinear Static Pushover Analysis*, Facta Universitatis, 2014. (prihvaćeno za publikovanje)
  46. Campbell K., Bozorgnia Y.: *A Ground Motion Prediction Equation for the Horizontal Component of Cumulative Absolute Velocity (CAV) Based on the PEER-NGA Strong Motion Database*, Earthquake Spectra, Vol. 26, No. 3, pp. 635-650, 2010.
  47. Chandrasekaran S., Nunziante L., Serino G., Carannante F.: *Seismic Design Aids for Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures*, Taylor & Francis, 268p, New York, USA, 2010.
  48. Chiou B., Darragh R., Gregor N., Silva W.: *NGA Project Strong-Motion Database*, Earthquake Spectra, Vol. 24, No. 1, pp. 23-44, 2008.

49. Chopra A.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 794p, Upper Saddle River, USA, 1995.
50. Chopra A., Goel R.: *A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimating Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2001/03, 87p, Berkeley, USA, 2001.
51. Chopra A., Goel R.: *A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Un-Symmetric-Plan Buildings*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, No. 8, pp. 903-927, 2004.
52. Christopoulos C., Pampanin S., Priestley N.: *Performance-Based Seismic Response of Frame Structures Including Residual Deformations. Part I: Single-Degree of Freedom Systems*, Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press, Vol. 7, No. 1, pp. 97-118, 2003.
53. Cornell A., Krawinkler H.: *Progress and Challenges in Seismic Performance Assessment*, PEER Center News, Vol. 3, No. 2, pp. 1-4, Berkeley, USA, 2000.
54. Correia A., Virtuoso F.: *Nonlinear Analysis of Space Frames*, III European Conference on Computational Mechanics, Solids, Structures and Coupled Problems in Engineering, Lisbon, Portugal, 2006.
55. Crisfield M.: *Non-Linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, Vol. 2: *Essentials*, John Wiley & Sons, 345p, New York, USA, 2000.
56. *CSI Analysis Reference Manual*, Computers and Structures Inc., 490p, Berkeley, USA, 2009.
57. Davis G.: *VBA 6 - Detaljan izvornik*, Kompjuter biblioteka, 550str, Čačak, Srbija, 2002.
58. Deierlein G., Krawinkler H., Cornell C.: *A Framework for Performance-Based Earthquake Engineering*, The 7<sup>th</sup> Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 140, pp. 1-8, Christchurch, New Zealand, 2003.
59. Devore J.: *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, Brooks/Cole, 776p, Boston, USA, 2010.
60. Dolce M., Ponzo F.: *Non-Linear Seismic Response of EC8 Designed RC Building Structures*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 357-373, 2002.

61. Dolšek M.: *The Influence of Epistemic Uncertainty on the Seismic Performance Assessment of Buildings*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 92, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
62. Dong P., Carr A., Moss P.: *Earthquake Scaling for Inelastic Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Ductile Framed Structures*, New Zealand Society of Earthquake Engineering Conference, Paper No. 16, pp. 1-11, Rotorua, New Zealand, 2004.
63. Douglas J.: *Ground Motion Prediction Equations 1964-2010*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2011/102, 455p, Berkeley, USA, 2011.
64. Elnashai A., Sarno L.: *Fundamentals of Earthquake Engineering*, John Wiley & Sons, 374p, New York, USA, 2008.
65. *Eurocode 2, Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, 224p, Brussels, Belgium, 2003.
66. *Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings*, European Committee for Standardization, 229p, Brussels, Belgium, 2004.
67. Faella G.: *Evaluation of the R/C Structures Seismic Response by Means of Nonlinear Static Pushover Analysis*, The 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1146, pp. 1-8, Auckland, New Zealand, 1996.
68. Fahjan Y., Ozdemir Z., Keypour H.: *Procedures for Real Earthquake Time Histories Scaling and Application to Fit Iranian Design Spectra*, The 5<sup>th</sup> Iranian Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Paper No. 164, pp. 1-8, Tehran, Iran, 2007.
69. Fajfar P., Fischinger M.: *Non-Linear Seismic Analysis of RC Buildings: Implications of a Case Study*, European Earthquake Engineering, 1987.
70. Fajfar P., Krawinkler H. (editors): *Nonlinear Seismic Analysis and Design of Reinforced Concrete Buildings*, Workshop on Nonlinear Seismic Analysis of Reinforced Concrete Buildings, 369p, Bled, Slovenia, 1992.
71. Fajfar P.: *A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design*, Earthquake Spectra, Vol. 16, No. 3, pp. 573-592, 2000.

72. Fajfar P., Krawinkler H. (editors): *Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation*, Proceedings of an International Workshop, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2004/05, 531p, Bled, Slovenia, 2004.
73. Fardis M., Negro P. (editors): *Seismic Performance Assessment and Rehabilitation of Existing Buildings*, An Event to Honor the Memory of Prof. Jean Donea, 304p, Ispra, Italy, 2005.
74. Fardis M. (editor): *Advances in Performance-Based Earthquake Engineering*, Springer, 486p, New York, USA, 2010.
75. Farrow K., Kurama Y.: *Capacity-Demand Index Relationships for Performance-Based Seismic Design*, Structural Engineering Research Report, University of Notre Dame, 291p, Notre Dame, USA, 2001.
76. Fellipa C.: *Nonlinear Finite Element Methods*, University of Colorado, 483p, Boulder, USA, 2007.
77. Felzer K.: *Calculating California Seismicity Rates, Appendix I in The Uniform California Earthquake Rupture Forecast*, U.S. Geological Survey, California Geological Survey, Report 2007-1437I and Special Report 203I, 42p, 2008.
78. FEMA 273, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of the Buildings*, Building Seismic Safety Council, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, 435p, Washington D. C., USA, 1997.
79. FEMA 274, *NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of the Buildings*, Building Seismic Safety Council, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, 498p, Washington D. C., USA, 1997.
80. FEMA 356, *Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, American Society of Civil Engineers, Federal Emergency Management Agency, 519p, Washington D. C., USA, 2000.
81. FEMA 440, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, Applied Technology Council (ATC-55 Project), Federal Emergency Management Agency, 392p, Washington D. C., USA, 2005.
82. FEMA 440A, *Effects of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response*, Applied Technology Council, Federal Emergency Management

- Agency, 312p, Washington D. C., USA, 2009.
83. FEMA 450, *NEHRP Recommended Provisions and Commentary for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, 693p, Washington D. C., USA, 2003.
  84. FEMA 451, *NEHRP Recommended Provisions: Design Examples*, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, 860p, Washington D. C., USA, 2006.
  85. FEMA 451B, *Structural Analysis for Performance Based Earthquake Engineering: Training and Instructional Materials*, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, 2097p, Washington D. C., USA, 2007.
  86. FEMA 695P, *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, 421p, Washington D. C., USA 2009.
  87. FEMA 750P, *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, 388p, Washington D. C., USA, 2009.
  88. FEMA 749P, *Earthquake-Resistant Design Concept: An Introduction to the NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Others Structures*, Building Seismic Safety Council, Federal Emergency Management Agency, 110p, Washington D. C., USA, 2010.
  89. FEMA P-58-1, *Seismic Performance Assessment of Buildings, Methodology*, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, 319p, Washington D. C., USA, 2012.
  90. FEMA P-58-2, *Seismic Performance Assessment of Buildings, Implementation Guide*, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, 365p, Washington D. C., USA, 2012.
  91. FEMA P-58-3, *Seismic Performance Assessment of Buildings, Supporting Electronic Materials and Background Documentation*, Applied Technology Council, Federal Emergency Management Agency, Washington D. C., USA, 2012.

92. FIB, *Probabilistic Performance-Based Seismic Design*, The International Federation for Structural Concrete, Report No. 68, 118p, Lausanne, Switzerland, 2012.
93. Fragiadakis M., Vamvatsikos D., Ascheim M.: *Applicability of Nonlinear Static Procedures to RC Moment Resistant Frames*, Structures Congress, pp. 1-11, Las Vegas, USA, 2011.
94. Fragiadakis M., Vamvatsikos D., Ascheim M.: *Application of Nonlinear Static Procedures for Seismic Assessment of Regular RC Moment Frame Buildings*, Earthquake Spectra, Online (in-press), 2013.
95. Gasparini D., Vanmarcke E.: *Simulated Earthquake Motions Compatible with Prescribed Response Spectra*, Massachusetts Institute of Technology, 100p, Boston, USA, 1976.
96. Goel R., Chopra A.: *Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analyses: SAC Buildings*, Earthquake Spectra, Vol. 20, No. 1, pp. 225-254, 2004.
97. Goel R., Chopra A.: *Role of Higher-Mode Pushover Analyses in Seismic Analysis of Buildings*, Earthquake Spectra, Vol. 21, No. 4, pp. 1027-1041, 2005.
98. Goulet C., Haselton C., Mitrani-Reiser J., Beck J., Deierlein G., Porter K., Stewart J.: *Evaluation of the Seismic Performance of a Code-Conforming Reinforced-Concrete Frame Building: From Seismic Hazard to Collapse Safety and Economic Losses*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 36, No. 13, pp. 1973-1997, 2007.
99. Gray A., Abbena E., Salamon S.: *Modern Differential Geometry of Curves and Surfaces with Mathematica*, CRC Press, 984p, USA, 2006.
100. Gupta B., Kunnath S.: *Adaptive Spectra-Based Pushover Procedure for Seismic Evaluation of Structures*, Earthquake Spectra, Vol. 16, No. 2, pp. 367-391, 2000.
101. Gutenberg B., Richter C.: *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, Princeton University Press, 273p, Princeton, USA, 1954.
102. Guyader A., Iwan W.: *User Guide for AutoCSM: Automated Capacity Spectrum Method of Analysis*, California Institute of Technology, Report No. EERL 2004-05, 31p, Pasadena, USA, 2004.
103. Halvorson M.: *Visual Basic 6.0 - Korak po korak (za profesionalce)*, CET, 551str, Beograd, Srbija, 1998.



104. Hancock J., Watson-Lamprey J., Abrahamson N., Bommer J., Markatis A., McCoy E., Mendis R.: *An Improved Method of Matching Response Spectra of Recorded Earthquake Ground Motion Using Wavelets*, Journal of Earthquake Engineering, Imperial College Press, Vol. 10, No. 1, pp. 67-89, 2006.
105. Han S., Kwon O., Lee L.: *Evaluation of the Seismic Performance of a Three-Storey Ordinary Moment-Resisting Concrete Frame*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 33, No. 6, pp. 669-685, 2004.
106. Han S., Chopra A.: *Approximate Incremental Dynamic Analysis Using the Modal Pushover Analysis Procedure*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 35, No. 15, pp. 1853-1873, 2006.
107. Haselton C., Deierlein G.: *Assessing Seismic Collapse Safety of Modern Reinforced Concrete Moment-Frame Buildings*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 156, 313p, Stanford, USA, 2007.
108. Haselton C.: *Evaluation of Ground Motion Selection and Modification Methods: Predicting Median Inter-Storey Drift Response of Buildings*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report 2009/01, 288p, Berkeley, USA, 2009.
109. Hazewinkel M. (Ed.): *Encyclopedia of Mathematics*, Vol 1-10, Springer, 1987-1994.
110. HAZUS-MH MR1, *Advanced Engineering Building Module, Multi-Hazard Loss Estimation Methodology*, Federal Emergency Management Agency, 119p, Washington D. C., USA, 2003.
111. Hellesland J., Scordelis A.: *Analysis of RC Bridge Columns Under Imposed Deformations*, IABSE Colloquium, pp. 545-559, Delft, Holland, 1981.
112. Hilber H., Hughes T., Taylor R.: *Improved Numerical Dissipation for Time Integration Algorithms in Structural Dynamics*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 5, No. 3, pp. 283-292, 1977.
113. Hu J., Xie L.: *Directivity of Near-Fault Ground Motion Generated by Thrust-Fault Earthquake: A Case Study of the 1999 Mw7.6 Chi-Chi Earthquake*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 33, pp. 1-6, Beijing, China, 2008.
114. Ibarra L., Krawinkler H.: *Global Collapse of Frame Structures under Seismic*

- Excitations*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report 2005/06, 324p, Berkeley, USA, 2005.
115. Iervolino I., Cornell A.: *Record Selection for Nonlinear Seismic Analysis of Structures*, *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 3, pp. 685-713, 2005.
  116. Iervolino I., Manfredi G.: *A Review of Ground Motion Record Selection Strategies for Dynamic Structural Analysis*, *Modern Testing Techniques of Mechanical and Structural Systems*, Springer, Vol. 502, pp. 131-163, 2008.
  117. Iwan W.: *Implications of Near-Fault Ground Motion for Structural Design*, The 1<sup>st</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Report 1999/10, 367p, Maui, USA, 1999.
  118. Iwan W., Huang C., Guyader A.: *Important Features of the Response of Inelastic Structures to Near-Field Ground Motion*, The 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1740, pp. 1-8, Auckland, New Zealand, 2000.
  119. Janković S.: *Pouzdanost seizmičkih analiza*, *Građevinski materijali i konstrukcije*, Vol. 47, No. 3-4, str. 3-12, 2004.
  120. Janković S.: *Određivanje kapaciteta relativnog spratnog pomeranja AB ramova pomoću lokalnih parametara seizmičkog odgovora*, Internacionalni naučno-stručni skup, Građevinarstvo - nauka i praksa, str. 395-400, Žabljak, Crna Gora, 2008.
  121. Janković S., Stojadinović B.: *Determining Inter-Storey Drift Capacity of R/C Frame Building*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 417, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
  122. Jeong S., Elnashai A.: *Analytical Assessment of an Irregular RC Full Scale 3D Test Structure*, Mid America Earthquake Center, 141p, Urbana, USA, 2004.
  123. Jeong S., Mwafy A., Elnashai A.: *Probabilistic Seismic Performance Assessment of Code-Compliant Multi-Story RC Buildings*, *Engineering Structures*, Vol. 34, pp. 527-537, 2012.
  124. Kabeyasawa T., Moehle J. (editors): *The 1<sup>st</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, Pacific Earthquake Engineering Research Center,

- University of California Berkeley, Report 1999/10, 380p, Maui, Hawaii, 1999.
125. Kabeyasawa T., Moehle J. (editors): *The 2<sup>nd</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2000/10, 431p, Sapporo, Japan, 2000.
  126. Kabeyasawa T., Moehle J. (editors): *The 3<sup>rd</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2002/02, 443p, Seattle, Washington, 2001.
  127. Kabeyasawa T., Moehle J. (editors): *The 4<sup>th</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2002/21, 372p, Toba, Japan, 2002.
  128. Kabeyasawa T., Moehle J. (editors): *The 5<sup>th</sup> U.S. - Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2003/11, 418p, Hakone, Japan, 2003.
  129. Kabeyasawa T., Moehle J. (editors): *The 2<sup>nd</sup> NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures*, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, 299p, Kobe, Japan, 2006.
  130. Kalkan E., Kunnath S.: *Method of Modal Combinations for Pushover Analysis of Buildings*, The 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2713, pp. 1-15, Vancouver, Canada, 2004.
  131. Kalkan E., Kunnath S.: *Adaptive Modal Combination Procedure for Nonlinear Static Analysis of Building Structures*, Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 11, pp. 1721-1732, 2006.
  132. Kalkan E.: *Prediction of Seismic Demands in Building Structures*, PhD Dissertation, University of California, 256p, Davis, USA, 2006.
  133. Kalkan E., Kunnath S.: *Assessment of Current Nonlinear Static Procedures for Seismic Evaluation of Buildings*, Engineering Structures, Vol. 29, No. 3, pp.

- 305-316, 2007.
134. Kalkan E., Kwong N.: *Evaluation of Fault-Normal / Fault Parallel Directions Rotated Ground Motions for Response History Analysis of an Instrumented Building*, U.S. Geological Survey, Report 1058, 30p, Reston, USA, 2012.
  135. Kalkan E., Chopra A.: *Evaluation of Modal Pushover-Based Scaling of One Component of Ground Motion: Tall Buildings*, Earthquake Spectra, Online, pp. 1-25, 2013.
  136. Kalkan E., Kwong N.: *Pros and Cons of Rotating Ground Motion Records to Fault-Normal / Parallel Directions for Response History Analysis of Buildings*, Journal of Structural Engineering, Journal of Structural Engineering, ASCE, Online, pp. 1-30, 2013.
  137. Kappos A., Panagopoulos G.: *Performance-Based Seismic Design of 3D R/C Buildings Using Inelastic Static and Dynamic Analysis Procedures*, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 444, Vol. 41, No. 1, pp. 141-158, 2004.
  138. Kazantzi A., Vamvatsikos D.: *A Study on the Correlation Between Dissipated Hysteretic Energy and Seismic Performance*, The 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 595, pp. 1-10, Lisbon, Portugal, 2012.
  139. Kovačević D.: *MKE modeliranje u analizi konstrukcija*, Građevinska knjiga, 336str, Beograd, Srbija, 2006.
  140. Krawinkler H.: *A Few Basic Concepts for Performance Based Seismic Design*, The 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1133, pp. 1-8, Acapulco, Mexico, 1996.
  141. Krawinkler H., Seneviratna G.: *Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performances Evaluation*, Engineering Structures, Vol. 20, No. 4, pp. 452-464, 1998.
  142. Krawinkler H.: *Challenges and Progress in Performance-Based Earthquake Engineering*, International Seminar on Seismic Engineering for Tomorrow - In Honor of Professor Hiroshi Akiyama, pp. 1-10, Tokyo, Japan, 1999.
  143. Kunnath S., Kalkan E.: *Evaluation of Seismic Deformation Demands Using Non-Linear Procedures in Multi-Storey Steel and Concrete Moment Frames*, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 445, Vol. 41, No. 1, pp.

- 159-181, 2004.
144. Lađinović Đ.: *Višekriterijumska analiza seizmičke otpornosti konstrukcija armiranobetonskih zgrada*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, 260str, Novi Sad, Srbija, 2002.
  145. Lađinović Đ.: *Non-Linear Analysis of Multi-Storey Building Structures by Using Equivalent SDOF Model*, Bulletin for Applied Mathematics, pp. 51-64, 2003.
  146. Lađinović Đ., Čosić M.: *Pushover analiza višespratnih armiranobetonskih okvira*, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, I naučno-stručno savetovanje, str. 113-120, Soko Banja, Srbija, 2008.
  147. Lađinović Đ., Čosić M.: *Seizmička analiza okvirnih konstrukcija primenom nelinearne statičke metode*, XXIV kongres i simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u oblasti materijala i konstrukcija, str. 215-222, Divčibare, Srbija, 2008.
  148. Lađinović Đ.: *Nonlinear Seismic Analysis of Asymmetric in Plan Buildings*, Facta Universitatis, Vol. 6, No. 1, pp. 25-35, 2008.
  149. Lađinović Đ., Folić R., Čosić M.: *Comparative Analysis of Seismic Demands of Regular Multi-Story Concrete Frames*, Banja Luka Earthquake - 40 years of Construction Experience, International Conference on Earthquake Engineering, pp. 129-144, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, 2009.
  150. Lađinović Đ., Folić R., Čosić M.: *Target Displacement Analysis of Seismic Demands of Multistorey Reinforced Concrete Frames*, International Symposium of Macedonian Association of Structural Engineers, Vol. 1, BK/22, pp. 255-264, Ohrid, Macedonia, 2009.
  151. Lađinović Đ., Folić R., Čosić M.: *Comparative Analysis of Seismic Response of Regular and Irregular Multi-Storey Frame Buildings*, The 14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 116, pp. 1-8, Ohrid, Macedonia, 2010.
  152. Lađinović Đ., Folić R., Čosić M.: *Procena ciljnog pomeranja za nelinearnu statičku analizu zgrada izloženih dejstvu zemljotresa*, Zemljotresno inženjerstvo i inženjerska seizmologija, II naučno-stručno savetovanje, str. 97-106, Divčibare, Srbija, 2010.
  153. Lawson R., Vance V., Krawinkler H.: *Nonlinear Static Pushover Analysis -*

- Why, When, and How?*, The 5<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, USA, 1994.
154. Lee W., Kanamori H., Jennings P., Kisslinger C.: *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*, Part A, Academic Press, 994p, Orlando, USA, 2002.
  155. Lin Y., Miranda E.: *Non-Iterative Capacity Spectrum Method Based on Equivalent Linearization for Estimating Inelastic Deformation Demands of Buildings*, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, Vol. 21, No. 2, pp. 113-119, 2004.
  156. Llera J., Vasquez J., Chopra A., Almazan J.: *A Macro-Element Model of Inelastic Building Analysis*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, No. 12, pp. 1725-1757, 2000.
  157. Mackie K., Stojadinović B.: *Seismic Demands for Performance-Based Design of Bridges*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2003/16, 166p, Berkeley, USA, 2003.
  158. Mackie K., Stojadinović B.: *Fragility Basis for California Highway Overpass Bridge Seismic Decision Making*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2005/12, 239p, Berkeley, USA, 2005.
  159. Magliulo G., Maddaloni G., Cosenza E.: *Comparison Between Non-Linear Dynamic Analysis Performed According to EC8 and Elastic and Non-Linear Static Analyses*, Engineering Structures, Vol. 29, No. 11, pp. 2893-2900, 2007.
  160. Makarios T.: *Optimum Definition of Equivalent Non-Linear SDF System in Pushover Procedure of Multi-Storey R/C Frames*, Engineering Structures, Vol. 27, No. 5, pp. 814-825, 2005.
  161. Mander J., Priestley M., Park R.: *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.
  162. Manitakis C., Taflampas I., Spyrakos C.: *Identification of Near-Fault Earthquake Record Characteristics*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 85, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
  163. McGuire R., Arabasz W.: *An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard*

- Analysis*, Geotechnical and Environmental Geophysics, edited by Ward S., Society of Exploration Geophysicist, pp. 333–353, 1990.
164. Medina R.: *Storey Shear Strength Patterns for the Performance-Based Seismic Design of Regular Frames*, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 442, Vol. 41, No. 1, pp. 101-125, 2004.
  165. Memari A., Rafiee S., Motlagh A., Scanlon A.: *Comparative Evaluation of Seismic Assessment Methodologies Applied to a 32-Storey Reinforced Concrete Office Building*, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 31-44, 2001.
  166. Menjivar M.: *3D Pushover of Irregular Reinforced Concrete Buildings*, MSc Thesis, European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Rose School, 72p, Pavia, Italy, 2003.
  167. Menjivar M.: *A Review of Existing Pushover Methods for 2-D Reinforced Concrete Buildings*, PhD Dissertation, European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Rose School, 50p, Pavia, Italy, 2004.
  168. Miranda E., Akkar S.: *Dynamic Instability of Simple Structural Systems*, Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 12, pp. 1722-1726, 2003.
  169. Moehle J., Krawinkler H.: *A Framework Methodology for Performance-Based Earthquake Engineering*, The 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 679, pp. 1-13, Vancouver, Canada, 2004.
  170. Moehle J., Kabeyasawa T. (editors): *The 1<sup>st</sup> NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2005/10, 429p, Berkeley, USA, 2005.
  171. Moghadam A., Tso W.: *3-D Pushover Analysis for Damage Assessment of Buildings*, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 23-31, 2000.
  172. Moharir N., Gaur V.: *Hypothesis for Earthquake Occurrences*, Journal of Earth System Science, Vol. 92, No. 3, pp. 261-281, 1983.
  173. Mollaioli F., Mura A., Decanini L.: *Assessment of the Deformation Demand in Multi-Storey Frames*, Journal of Seismology and Earthquake Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 203-219, 2007.

174. Mwafy A., Elnashai A.: *Static Pushover Versus Dynamic Collapse Analysis of RC Buildings*, Engineering Structures, Vol. 23, No. 5, pp. 407-424, 2001.
175. Myo Y., Htwe M., Wenbin S.: *Gutenberg-Richter Recurrence Law to Seismicity Analysis of Southern Segment of the Sagaing Fault and Its Associate Components*, World Academy of Science, Engineering and Technology 50, pp. 1026-1029, 2009.
176. Nassar A., Krawinkler H.: *Seismic Demands for SDOF and MDOF Systems*, Stanford University, Report No. 95, 220p, Stanford, USA, 1991.
177. Pampanin S., Christopoulos C., Priestley N.: *Performance-Based Seismic Response of Frame Structures Including Residual Deformations. Part II: Multi-Degree of Freedom Systems*, Journal of Earthquake Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 119-147, 2003.
178. Papanikolaou V., Elnashai A., Pareja J.: *Limits of Applicability of Conventional and Adaptive Pushover Analysis for Seismic Response Assessment*, Mid America Earthquake Center, 92p, Urbana, USA, 2005.
179. Paret T., Sasaki K., Elibeck D., Freeman S.: *Approximate Inelastic Procedures to Identify Failure Mechanism From Higher Mode Effects*, The 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper 966, pp. 1-8, Auckland, New Zealand, 1996.
180. Park K.: *Lateral Load Pattern for the Conceptual Seismic Design of Moment-Resisting Frame Structures*, PhD Dissertation, University of Maryland, 218p, College Park, USA, 2007.
181. Paulay T., Priestley M.: *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, 744p, New York, USA, 1992.
182. Pecker A. (editor): *Advanced Earthquake Engineering Analysis*, Springer, 214p, New York, USA, 2007.
183. Piegl L., Tiller W.: *The NURBS Book*, Springer, 646p, New York, USA, 1996.
184. Pinho R., Antoniou S., Casarotti C., Lopez M.: *A Displacement-Based Adaptive Pushover for Assessment of Buildings and Bridges*, NATO International Workshop on Advances in Earthquake Engineering for Urban Risk Reduction, pp. 1-16, Istanbul, Turkey, 2005.
185. Pinho R., Antoniou S., Pietra D.: *A Displacement-Based Adaptive Pushover for*



- Seismic Assessment of Steel and Reinforced Concrete Buildings*, The 8th U.S. National Conference in Earthquake Engineering, Paper No. 1701, pp. 1-10, San Francisco, USA, 2006.
186. Pinho R., Bento R., Bhatt C.: *Assessing the 3D Irregular Spear Building with Nonlinear Static Procedures*, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 158, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
  187. Pinho R., Bhatt C., Antoniou S., Bento R.: *Modeling of the Horizontal Slab of a 3D Irregular Building for Nonlinear Static Assessment*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 159, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
  188. Powel G., Allahabadi R.: *Seismic Damage Prediction Deterministic Methods: Concepts and Procedures*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, No. 5, pp. 719-734, 1988.
  189. Priestley M., Calvi G., Kowalsky M.: *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, 720p, Pavia, Italy, 2007.
  190. Ramirez C., Miranda E.: *Building-Specific Loss Estimation Methods and Tools for Simplified Performance-Based Earthquake Engineering*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 171, 370p, Stanford, USA, 2009.
  191. Rawlings J., Pantula S., Dickey D.: *Applied Regression Analysis: A Research Tool*, Springer, 658p, New York, USA, 1998.
  192. Riley K., Hobson M., Bence S.: *Mathematical Methods for Physics and Engineering*, Cambridge University Press, 1233p, Cambridge, UK, 2002.
  193. Rorabugh C.: *Notes on Digital Signal Processing - Practical Recipes for Design, Analysis and Implementation*, Prentice Hall, 278p, New York, USA, 2011.
  194. Ruiz-Garcia J., Miranda E.: *Performance-Based Assessment of Existing Structures Accounting for Residual Displacements*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 153, 444p, Stanford, USA, 2005.
  195. Sabetta F., Pugliese A.: *Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, No. 2, pp. 337-352, 1996.

196. Sadd H. M.: *Elasticity: Theory, Applications and Numerics*, Elsevier, New York, USA, 480p, 2005.
197. Sarvghad-Moghadam A.: *Seismic Torsional Response of Asymmetrical Multi-Storey Frame Buildings*, PhD Dissertation, McMaster University, 241p, Hamilton, Canada, 1998.
198. Satyarno I.: *Adaptive Pushover Analysis for the Seismic Assessment of Older Reinforced Concrete Buildings*, PhD Dissertation, University of Canterbury, 310p, Christchurch, New Zealand, 2000.
199. SEAOC *Blue book: Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, Report prepared by Structural Engineers Association of California, 440p, Sacramento, USA, 1999.
200. *SeismoStruct 5.0.5*, User Manual (SeismoStruct Help), 2010.
201. Seneviratna G., Krawinkler H.: *Evaluation of Inelastic MDOF Effects for Seismic Design*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 120, 191p, Stanford, USA, 1997.
202. Shabana A.: *Computational Continuum Mechanics*, Cambridge University Press, 335p, Cambridge, UK, 2008.
203. Simo J., Hughes T.: *Computational Inelasticity*, Springer-Verlag, 392p, New York, USA, 1998.
204. Snaebjornsson J., Sigbjornsson R.: *The Duration Characteristics of Earthquake Ground Motions*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 102, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
205. Spacone E., Martino R., Kingsley G.: *Nonlinear Pushover Analysis of Reinforced Concrete Structures*, Report, Colorado Advanced Software Institute, 117p, Boulder, USA, 1999.
206. Tagel-Din H., Meguro K.: *Analysis of Small Scale RC Building Subjected to Shaking Table Tests Using Applied Element Method*, The 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 464, pp. 1-8, Auckland, New Zealand, 2000.
207. TBI, *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California Berkeley, Report 2010/05, 104p, Berkeley, USA, 2010.

208. Tomičić I.: *Modeliranje seizmički otpornih armiranobetonskih okvira*, Građevinar, Vol. 55, No. 8, pp. 449-455, 2003.
209. Vamvatsikos D.: *Seismic Performance, Capacity and Reliability of Structures as Seen Through Incremental Dynamic Analysis*, PhD Dissertation, Stanford University, 152p, Stanford, USA, 2002.
210. Vamvatsikos D., Cornell A.: *Incremental Dynamic Analysis*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, No. 3, pp. 491-514, 2002.
211. Vamvatsikos D., Cornell A.: *The Incremental Dynamic Analysis and Its Application to Performance-Based Earthquake Engineering*, The 12<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 479, pp. 1-10, London, UK, 2002.
212. Vamvatsikos D., Jalayer F., Cornell A.: *Application of Incremental Dynamic Analysis to an RC Structure*, FIB Symposium on Concrete Structures in Seismic Regions, pp. 1-12, Athens, Greece, 2003.
213. Vamvatsikos D., Cornell A.: *Applied Incremental Dynamic Analysis*, Earthquake Spectra, Vol. 20, No. 2, pp. 523-553, 2004.
214. Vamvatsikos D., Cornell A.: *Developing Efficient Scalar and Vector Intensity Measures for IDA Capacity Estimation by Incorporating Elastic Spectral Shape Information*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, No. 13, pp. 1573-1600, 2005.
215. Vamvatsikos D., Cornell A.: *Direct Estimation of Seismic Demand and Capacity of Multi-Degree-of-Freedom Systems through Incremental Dynamic Analysis of Single Degree of Freedom Approximation*, Journal of Structural Engineering, Vol. 131, No. 4, pp. 589-599, 2005.
216. Vamvatsikos D.: *Performing Incremental Dynamic Analysis in Parallel Using Computer Clusters*, The 1<sup>st</sup> International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 1-12, Rethymno, Greece, 2007.
217. Vamvatsikos D., Ascheim M., Comratin C.: *A Targeted Nonlinear Dynamic Procedure to Evaluate the Seismic Performance of Structures*, COMPDYN Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 1-9, Corfu, Greece, 2011.

218. Vejdani-Noghreiyani H., Shooshtari A.: *Comparison of Exact IDA and Approximate MPA-Based IDA for Reinforced Concrete Frames*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 7, pp. 1-8, Beijing, China, 2008.
219. Villaverde R.: *Methods to Assess the Seismic Collapse Capacity of Building Structures: State of the Art*, Journal of Structural Engineering, Vol. 133, No. 1, pp. 57-66, 2007.
220. Vose D.: *Risk Analysis: A Quantitative Guide*, John Wiley & Sons, 729p, New York, USA, 2008.
221. Wald D., Quitoriano V., Heaton T., Kanamori H.: *Relationships Between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity and Modified Mercalli Intensity in California*, Earthquake Spectra, Vol. 15, No. 3, pp. 557-564, 1999.
222. Wilson E.: *Static and Dynamic Analysis of Structures: A Physical Approach with Emphasis on Earthquake Engineering*, Computers and Structures, 423p, Berkeley, USA, 2002.
223. Yasrebina Y., Poursharifi M.: *Investigation the 3D Pushover Analysis of Unsymmetrical Concrete Structures*, The 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1987, pp. 1-9, Lisbon, Portugal, 2012.
224. Yazgan U.: *The Use of Post-Earthquake Residual Displacements as a Performance Indicator in Seismic Assessment*, PhD Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, 244p, Zurich, Switzerland, 2010.
225. Yegulalp T., Kuo J.: *Statistical Prediction of the Occurrence of Maximum Magnitude Earthquakes*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 64, No. 2, pp. 393-414, 1974.
226. Zaghlool B.: *Behavior of Three-Dimensional Concrete Structures Under Concurrent Orthogonal Seismic Excitations*, PhD Dissertation, University of Canterbury, 332p, Christchurch, New Zealand, 2007.
227. Zareian F., Krawinkler H.: *Simplified Performance Based Earthquake Engineering*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Report No. 169, 330p, Stanford, USA, 2009.
228. Zienkiewicz O., Taylor R.: *The Finite Element Method*, Vol. 2: *Solid Mechanics*, Butterworth-Heinemann, 463p, Oxford, UK, 2000.

229. Zurovac J.: *Konstruisanje armiranobetonskih zgrada*, Naučna knjiga, 168str, Beograd, Srbija, 1988.

## WEB IZVORI

230. *Abaqus*  
URL: <http://www.3ds.com>
231. ADAPTIC  
URL: <http://www3.imperial.ac.uk>
232. ADINA  
URL: <http://www.adina.com>
233. *AllRisk*  
URL: <http://www.riskeng.org>
234. ANSRuop  
URL: <http://www.ansruop.net>
235. ANSYS  
URL: <http://www.ansys.com>
236. *Armagedom*  
URL: <http://www.trandfonline.com>
237. ATC - *Applied Technology Council*  
URL: <http://www.atcouncil.org>
238. ATENA  
URL: <http://www.cervenka.cz>
239. *Autodesk Robot*  
URL: <http://www.autodesk.com>
240. *AxisVM*  
URL: <http://axisvm.eu>
241. BELFAGOR  
URL: <http://sites.google.com/site/prinstessa>
242. BEPTA  
URL: <http://www.ctbuh.org>
243. BISPEC  
URL: <http://eqsols.sharepoint.com>

244. *Bridge PBEE*  
URL: <http://peer.berkeley.edu>
245. Caltech - *California Institute of Technology*  
URL: <http://www.caltech.edu>
246. CANNY  
URL: <http://members.shaw.ca/CannyNAS>
247. CAPRA  
URL: <http://www.ecapra.org>
248. CATmandu  
URL: <http://www.karma2go.com>
249. CEDIM  
URL: <http://www.cedim.de>
250. CESMD - *Center for Engineering Strong Motion Data*  
URL: <http://strongmotioncenter.org>
251. COSMOS - *Consortium of Organizations for Strong Motion Observation Systems*  
URL: <http://www.cosmos-eq.org>
252. CSMIP-3DV  
URL: <http://www.consrv.ca.gov>
253. DBDsoft  
URL: <http://www.glaviobono.net>
254. DBELA  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613002071>
255. DEQAS-R  
URL: <http://chl.erd.c.usace.army.mil/deqas>
256. DIANA  
URL: <http://www.tnodiana.com>
257. DRAIN  
URL: <http://nisee.berkeley.edu>
258. EERI - *Earthquake Engineering Research Institute*  
URL: <http://www.eeri.org>
259. ELER

- URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr>
260. EPETO  
URL: <http://www.seismicevaluation.org>
261. EqHAZ  
URL: <http://www.seismotoolbox.ca>
262. EQRM  
URL: <http://gcmd.nasa.gov>
263. EQTools  
URL: <http://www.vt.edu>
264. ESD - *European Strong-Motion Database*  
URL: <http://www.isesd.hi.is>
265. ETABS  
URL: <http://www.csiamerica.com/etabs2013>
266. *Extreme Loading*  
URL: <http://www.extremeloading.com>
267. EZ-FRISK  
URL: <http://www.ez-frisk.com>
268. FEAP  
URL: <http://www.ce.berkeley.edu>
269. FEDEASLab  
URL: <http://fedeeslab.berkeley.edu>
270. FEMA - *Federal Emergency Management Agency*  
URL: <http://www.fema.gov>
271. FEMtools  
URL: <http://www.femtools.com>
272. FERUM  
URL: <http://www.ce.berkeley.edu>
273. FESPA  
URL: <http://www.lhlogismiki.gr>
274. FRAME 3D  
URL: <http://3d.forum8.co.jp>
275. FRAME3DD

- URL: <http://frame3dd.sourceforge.net>
276. FRISK88M  
URL: <http://www.riskeng.com>
277. GESI  
URL: <http://www.geohaz.org>
278. GMPC  
URL: <http://earthquake.usgs.gov>
279. *Grapher*  
URL: <http://www.rockware.com>
280. *Graphis*  
URL: <http://www.kylebank.com>
281. GT STRUDL  
URL: <http://www.gtstrudl.gatech.edu>
282. HAZUS-MH  
URL: <http://www.fema.gov>
283. *Hercules*  
URL: <http://quake.ce.cmu.edu>
284. IDARC  
URL: <http://civil.eng.buffalo.edu>
285. INSTRUCT  
URL: <http://www.fhwa.dot.gov>
286. ISSARS  
URL: <http://www.asextos.net>
287. KARMA  
URL: <http://www.karma2go.com>
288. LNEC-SPA  
URL: <http://www-ext.lnec.pt>
289. LUSAS  
URL: <http://www.lusas.com>
290. MAE - *Mid-America Earthquake Center*  
URL: <http://mae.cee.illinois.edu>
291. MAEviz



- URL: <http://mae.cee.illinois.edu>
292. MATLAB  
URL: <http://www.mathworks.com>
293. MCEER - *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*  
URL: <http://mceer.buffalo.edu>
294. MIDAS  
URL: <http://www.midasuser.com>
295. MSC Nastran  
URL: <http://www.mscsoftware.com>
296. NASAP  
URL: <http://peer.berkeley.edu>
297. NCEDC - *Northern California Earthquake Data Center*  
URL: <http://www.ncedc.org>
298. NEES - *Network for Earthquake Engineering Simulations*  
URL: <http://nees.org>
299. NEFCAD  
URL: <http://www.cosminchiorean.com>
300. NGDC - *National Geophysical Data Center*  
URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/hazard>
301. NIED - *National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*  
URL: <http://www.k-net.bosai.go.jp>
302. NISRAF  
URL: <http://www.ideals.illinois.edu>
303. NONLIN  
URL: <http://nisee.berkeley.edu>
304. NSL - *Nevada Seismological Laboratory*  
URL: <http://www.seismo.unr.edu>
305. NSMP - *United States National Strong-Motion Project*  
URL: <http://nsmp.wr.usgs.gov>
306. nSPECTRA  
URL: <http://civil.eng.buffalo.edu>
307. *OriginPro*

- URL: <http://www.originlac.com>
308. *OpenQuake*  
URL: <http://www.globalquakemodel.org>
309. *OpenRisk*  
URL: <http://www.risk-agera.org>
310. *OpenSees*  
URL: <http://opensees.berkeley.edu>
311. *OpenSHA*  
URL: <http://www.opensha.org>
312. *OpenSLAT*  
URL: <http://sites.google.com/site/brendonabradley>
313. PACT  
URL: <http://atcouncil.org>
314. PBEE *toolbox*  
URL: <http://ice4risk.slo-projekt.info>
315. PEER GMDB - *Pacific Earthquake Engineering Research Center - Ground Motion DataBase*  
URL: <http://peer.berkeley.edu>
316. PERFORM-3D  
URL: <http://www.csiamerica.com/perform3d>
317. P-FAS  
URL: <http://mae.cee.illinois.edu>
318. *PhimecaSoft*  
URL: <http://www.phimeca.com>
319. PNSN - *Pacific Northwest Seismic Network*  
URL: <http://www.pnsn.org>
320. PRISM  
URL: <http://www.sem.inha.ac.kr/prism>
321. PSHC  
URL: <http://earthquake.usgs.gov>
322. *PSResponse*  
URL: <http://www.ubc.ca>

323. QLARM  
URL: <http://www.wapmerr.org>
324. *QuakeManager*  
URL: <http://eqsols.sharepoint.com>
325. RAF - *Friuli Venezia Giulia Earthquake Data Center*  
URL: <http://www.dst.units.it>
326. REDARS  
URL: <http://mceer.buffalo.edu>
327. RELACS  
URL: <http://www.riskeng.com>
328. REXEL  
URL: <http://www.reluis.it>
329. RISKICG  
URL: <http://rua.ua.es>
330. *RiskScape*  
URL: <http://riskscape.niwa.co.nz>
331. *RspMatch*EDT  
URL: <http://www.geomotions.com>
332. RUAUMOKO  
URL: <http://www.ruaumoko.co.nz>
333. SAP 2000  
URL: <http://www.csiamerica.com/sap2000>
334. SCEC - *Southern California Earthquake Center*  
URL: <http://www.data.scec.org>
335. SEISAN  
URL: <http://www.uib.no>
336. *SeismoArtif*  
URL: <http://www.seismosoft.com/en/SeismoArtif.aspx>
337. *SeismoMatch*  
URL: <http://www.seismosoft.com/en/SeismoMatch.aspx>
338. *SeismoSignal*  
URL: <http://www.seismosoft.com/en/SeismoSignal.aspx>

339. *SeismoSoft*  
URL: <http://www.seismosoft.com>
340. *SeismoSpect*  
URL: <http://www.seismosoft.com/en/SeismoSpect.aspx>
341. *SeismoStruct*  
URL: <http://www.seismosoft.com/en/SeismoStruct.aspx>
342. SELENA-RISe  
URL: <http://selena.sourceforge.net>
343. S-FRAME  
URL: <http://www.s-frame.com>
344. SIGVIEW  
URL: <http://www.sigview.com>
345. *Simplex Numerica*  
URL: <http://www.simplexnumerica.com>
346. SIMULSIS  
URL: <http://w3.ualg.pt>
347. SIMQKE  
URL: <http://nisee.berkeley.edu>
348. SLAT  
URL: <http://sites.google.com/site/brendonabradley>
349. SMA Network of Turkey - *National Strong Motion Observation Network*  
URL: <http://angora.deprem.gov.tr>
350. SOFiSTiK  
URL: <http://www.sofistik.com>
351. SPO2IDA  
URL: <http://users.utua.gr/divamva>
352. SSMNet - *Swiss Strong Motion Network*  
URL: <http://seispc2.ethz.ch>
353. STAAD  
URL: <http://bentley.com>
354. STATIK-5P  
URL: <http://cubushellas.gr>

355. STERA 3D  
URL: <http://iisee.kenken.go.jp>
356. STRAND  
URL: <http://www.strand7.com>
357. ST-RISK  
URL: <http://www.st-risk.com>
358. *StrucLoss*  
URL: <http://anibal.gyte.edu.tr>
359. TARSC THS  
URL: <http://civil.eng.buffalo.edu>
360. THAZ  
URL: <http://www.lettisci.com>
361. *The John A. Blume Earthquake Engineering Center*  
URL: <http://blume.stanford.edu>
362. Tony Yang  
URL: [http://peer.berkeley.edu/~yang/ATC55\\_website/CM/CM\\_procedure.pdf](http://peer.berkeley.edu/~yang/ATC55_website/CM/CM_procedure.pdf)
363. UI-SIMCOR  
URL: <http://mae.cee.illinois.edu>
364. U.S. *Geological Survey*  
URL: <http://www.usgs.gov>
365. USEE  
URL: <http://mae.cee.illinois.edu>
366. ZEUS-NL  
URL: <http://mae.cee.illinois.edu>
367. *ZSoil*  
URL: <http://www.zsoil.com>



# PRILOG A

## MERE INTENZITETA AKCELEROGRAMA

Tabela A.1 Pregled proračunatih mera intenziteta FFGM akceleroograma

$\theta$	PGA (g)	PGV (m/s)	PGD (m)	$A_{RMS}$ (g)	$V_{RMS}$ (m/s)	$D_{RMS}$ (m)	$I_a$ (m/s)	$I_c$	SED (m <sup>2</sup> /s)	CAV (m/s)	$T_{595}$ (s)
<i>Imperial Valley IV79</i>											
0°	0.153	0.138	0.096	0.028	0.049	0.051	0.491	0.029	0.095	9.173	16.065
30°	0.146	0.105	0.078	0.026	0.039	0.036	0.437	0.026	0.060	8.962	19.135
60°	0.109	0.108	0.053	0.026	0.034	0.030	0.434	0.026	0.046	8.975	20.275
90°	0.139	0.123	0.061	0.028	0.041	0.034	0.486	0.029	0.066	9.313	17.895
120°	0.134	0.155	0.095	0.029	0.051	0.050	0.540	0.031	0.100	9.555	15.680
150°	0.147	0.153	0.103	0.029	0.054	0.057	0.543	0.031	0.115	9.558	14.705
180°	0.153	0.138	0.096	0.028	0.049	0.051	0.491	0.029	0.095	9.173	16.065
210°	0.146	0.105	0.078	0.026	0.039	0.036	0.437	0.026	0.060	8.962	19.135
240°	0.109	0.108	0.053	0.026	0.034	0.030	0.434	0.026	0.046	8.975	20.275
270°	0.139	0.123	0.061	0.028	0.041	0.034	0.486	0.029	0.066	9.313	17.895
300°	0.134	0.155	0.095	0.029	0.051	0.050	0.540	0.031	0.100	9.555	15.680
330°	0.147	0.153	0.103	0.029	0.054	0.057	0.543	0.031	0.115	9.558	14.705
<i>Loma Prieta LP89</i>											
0°	0.159	0.176	0.098	0.034	0.077	0.038	0.749	0.040	0.239	12.508	21.175
30°	0.139	0.171	0.100	0.032	0.072	0.051	0.675	0.036	0.207	12.096	21.150
60°	0.146	0.192	0.118	0.034	0.076	0.062	0.743	0.040	0.231	12.384	19.605
90°	0.172	0.259	0.125	0.037	0.085	0.078	0.885	0.045	0.287	12.874	18.430
120°	0.157	0.270	0.127	0.039	0.089	0.067	0.958	0.049	0.319	13.378	18.140
150°	0.182	0.214	0.100	0.037	0.086	0.052	0.890	0.045	0.295	13.324	18.720
180°	0.159	0.176	0.098	0.034	0.077	0.038	0.749	0.040	0.239	12.508	21.175
210°	0.139	0.171	0.100	0.032	0.072	0.051	0.675	0.036	0.207	12.096	21.150
240°	0.146	0.192	0.118	0.034	0.076	0.062	0.743	0.040	0.231	12.384	19.605
270°	0.172	0.259	0.125	0.037	0.085	0.078	0.885	0.045	0.287	12.874	18.430
300°	0.157	0.270	0.127	0.039	0.089	0.067	0.958	0.049	0.319	13.378	18.140
330°	0.182	0.214	0.100	0.037	0.086	0.052	0.890	0.045	0.295	13.324	18.720
<i>Northridge NR94</i>											
0°	0.520	0.560	0.093	0.097	0.108	0.023	4.490	0.165	0.348	15.530	8.010
30°	0.485	0.364	0.071	0.092	0.087	0.018	4.023	0.153	0.227	14.346	7.050
60°	0.382	0.462	0.103	0.083	0.092	0.021	3.317	0.131	0.256	14.227	8.610
90°	0.423	0.632	0.143	0.080	0.116	0.028	3.080	0.124	0.407	14.266	9.460
120°	0.507	0.749	0.164	0.086	0.133	0.031	3.547	0.138	0.528	14.957	9.780
150°	0.500	0.737	0.147	0.094	0.129	0.032	4.253	0.158	0.499	16.125	8.540
180°	0.520	0.560	0.093	0.097	0.108	0.023	4.490	0.165	0.348	15.530	8.010
210°	0.485	0.364	0.071	0.092	0.087	0.018	4.023	0.153	0.227	14.346	7.050
240°	0.382	0.462	0.103	0.083	0.092	0.021	3.317	0.131	0.256	14.227	8.610
270°	0.423	0.632	0.143	0.080	0.116	0.028	3.080	0.124	0.407	14.266	9.460
300°	0.507	0.749	0.164	0.086	0.133	0.031	3.547	0.138	0.528	14.957	9.780
330°	0.500	0.737	0.147	0.094	0.129	0.032	4.253	0.158	0.499	16.125	8.540
<i>San Fernando SF71</i>											
0°	0.210	0.189	0.124	0.038	0.060	0.033	0.650	0.039	0.102	6.231	10.650
30°	0.187	0.187	0.106	0.034	0.057	0.031	0.515	0.033	0.092	5.612	11.590
60°	0.164	0.192	0.089	0.030	0.045	0.025	0.413	0.027	0.058	5.184	12.030
90°	0.174	0.148	0.063	0.032	0.035	0.020	0.447	0.030	0.034	5.264	11.250
120°	0.229	0.160	0.068	0.036	0.040	0.023	0.582	0.036	0.044	5.857	10.400
150°	0.235	0.178	0.110	0.039	0.053	0.030	0.684	0.041	0.078	6.400	9.480
180°	0.210	0.189	0.124	0.038	0.060	0.033	0.650	0.039	0.102	6.231	10.650
210°	0.187	0.187	0.106	0.034	0.057	0.031	0.515	0.033	0.092	5.612	11.590
240°	0.164	0.192	0.089	0.030	0.045	0.025	0.413	0.027	0.058	5.184	12.030
270°	0.174	0.148	0.063	0.032	0.035	0.020	0.447	0.030	0.034	5.264	11.250
300°	0.229	0.160	0.068	0.036	0.040	0.023	0.582	0.036	0.044	5.857	10.400
330°	0.235	0.178	0.110	0.039	0.053	0.030	0.684	0.041	0.078	6.400	9.480

Tabela A.2 Pregled proračunatih mera intenziteta NFGM akcelorograma

$\theta$	$PGA$ (g)	$PGV$ (m/s)	$PGD$ (m)	$A_{RMS}$ (g)	$V_{RMS}$ (m/s)	$D_{RMS}$ (m)	$I_a$ (m/s)	$I_c$	$SED$ (m <sup>2</sup> /s)	$CAV$ (m/s)	$T_{595}$ (s)
<i>Kobe KO95</i>											
0°	0.694	0.853	0.168	0.077	0.098	0.034	3.935	0.137	0.394	11.690	3.690
30°	0.647	0.876	0.247	0.080	0.110	0.035	4.135	0.145	0.497	12.069	3.370
60°	0.757	0.749	0.284	0.075	0.116	0.041	3.721	0.131	0.551	11.687	4.140
90°	0.693	0.683	0.267	0.068	0.111	0.041	3.070	0.113	0.502	10.914	4.680
120°	0.615	0.679	0.218	0.066	0.099	0.034	2.852	0.109	0.399	10.842	5.060
150°	0.719	0.759	0.173	0.071	0.092	0.026	3.285	0.121	0.345	11.079	4.740
180°	0.694	0.853	0.168	0.077	0.098	0.034	3.935	0.137	0.394	11.690	3.690
210°	0.647	0.876	0.247	0.080	0.110	0.035	4.135	0.145	0.497	12.069	3.370
240°	0.757	0.749	0.284	0.075	0.116	0.041	3.721	0.131	0.551	11.687	4.140
270°	0.693	0.683	0.267	0.068	0.111	0.041	3.070	0.113	0.502	10.914	4.680
300°	0.615	0.679	0.218	0.066	0.099	0.034	2.852	0.109	0.399	10.842	5.060
330°	0.719	0.759	0.173	0.071	0.092	0.026	3.285	0.121	0.345	11.079	4.740
<i>Morgan Hill MH84</i>											
0°	0.224	0.193	0.043	0.047	0.053	0.016	1.427	0.064	0.111	15.337	13.155
30°	0.189	0.143	0.031	0.039	0.047	0.018	0.992	0.049	0.090	13.681	15.255
60°	0.189	0.146	0.041	0.040	0.044	0.026	1.049	0.051	0.077	13.828	16.390
90°	0.348	0.174	0.032	0.049	0.047	0.022	1.541	0.069	0.086	15.090	12.545
120°	0.413	0.200	0.045	0.056	0.052	0.017	1.976	0.084	0.108	15.800	12.475
150°	0.368	0.223	0.051	0.055	0.055	0.017	1.919	0.082	0.121	16.111	12.650
180°	0.224	0.193	0.043	0.047	0.053	0.016	1.427	0.064	0.111	15.337	13.155
210°	0.189	0.143	0.031	0.039	0.047	0.018	0.992	0.049	0.090	13.681	15.255
240°	0.189	0.146	0.041	0.040	0.044	0.026	1.049	0.051	0.077	13.828	16.390
270°	0.348	0.174	0.032	0.049	0.047	0.022	1.541	0.069	0.086	15.090	12.545
300°	0.413	0.200	0.045	0.056	0.052	0.017	1.976	0.084	0.108	15.800	12.475
330°	0.368	0.223	0.051	0.055	0.055	0.017	1.919	0.082	0.121	16.111	12.650
<i>Palm Springs PS86</i>											
0°	0.484	0.350	0.057	0.090	0.089	0.019	2.617	0.121	0.157	13.443	5.915
30°	0.449	0.588	0.087	0.098	0.124	0.031	3.051	0.137	0.306	15.196	5.075
60°	0.594	0.732	0.115	0.112	0.141	0.041	4.012	0.168	0.399	16.393	4.580
90°	0.742	0.686	0.115	0.119	0.131	0.036	4.539	0.184	0.342	16.528	4.410
120°	0.778	0.475	0.086	0.113	0.098	0.033	4.106	0.170	0.193	15.438	4.400
150°	0.694	0.338	0.039	0.099	0.071	0.019	3.145	0.139	0.101	14.011	5.140
180°	0.484	0.350	0.057	0.090	0.089	0.019	2.617	0.121	0.157	13.443	5.915
210°	0.449	0.588	0.087	0.098	0.124	0.031	3.051	0.137	0.306	15.196	5.075
240°	0.594	0.732	0.115	0.112	0.141	0.041	4.012	0.168	0.399	16.393	4.580
270°	0.742	0.686	0.115	0.119	0.131	0.036	4.539	0.184	0.342	16.528	4.410
300°	0.778	0.475	0.086	0.113	0.098	0.033	4.106	0.170	0.193	15.438	4.400
330°	0.694	0.338	0.039	0.099	0.071	0.019	3.145	0.139	0.101	14.011	5.140
<i>Parkfield PA66</i>											
0°	0.292	0.130	0.034	0.031	0.030	0.016	0.410	0.028	0.023	4.609	10.830
30°	0.247	0.109	0.036	0.028	0.028	0.015	0.339	0.024	0.021	4.426	12.350
60°	0.222	0.113	0.032	0.026	0.025	0.012	0.277	0.021	0.017	4.192	13.660
90°	0.163	0.106	0.027	0.026	0.024	0.010	0.284	0.021	0.016	4.183	12.910
120°	0.243	0.102	0.031	0.029	0.026	0.011	0.355	0.025	0.018	4.371	11.020
150°	0.306	0.127	0.033	0.032	0.029	0.014	0.418	0.029	0.022	4.535	10.210
180°	0.292	0.130	0.034	0.031	0.030	0.016	0.410	0.028	0.023	4.609	10.830
210°	0.247	0.109	0.036	0.028	0.028	0.015	0.339	0.024	0.021	4.426	12.350
240°	0.222	0.113	0.032	0.026	0.025	0.012	0.277	0.021	0.017	4.192	13.660
270°	0.163	0.106	0.027	0.026	0.024	0.010	0.284	0.021	0.016	4.183	12.910
300°	0.243	0.102	0.031	0.029	0.026	0.011	0.355	0.025	0.018	4.371	11.020
330°	0.306	0.127	0.033	0.032	0.029	0.014	0.418	0.029	0.022	4.535	10.210



Tabela A.3 Pregled proračunatih mera intenziteta generisanih nepotpunih i potpunih nestacionarnih veštačkih akceleroograma

$\theta$	$PGA$ (g)	$PGV$ (m/s)	$PGD$ (m)	$A_{RMS}$ (g)	$V_{RMS}$ (m/s)	$D_{RMS}$ (m)	$I_a$ (m/s)	$I_c$	$SED$ (m <sup>2</sup> /s)	$CAV$ (m/s)	$T_{595}$ (s)
nepotpuni nestacionarni veštački akceleroogram											
0°	0.204	0.215	0.235	0.042	0.056	0.080	0.826	0.048	0.094	7.160	10.900
30°	0.215	0.232	0.172	0.046	0.061	0.064	0.975	0.054	0.110	7.882	11.150
60°	0.290	0.253	0.161	0.054	0.064	0.080	1.347	0.069	0.124	9.302	11.250
90°	0.287	0.287	0.195	0.058	0.063	0.105	1.571	0.077	0.120	9.841	11.350
120°	0.253	0.251	0.237	0.055	0.059	0.115	1.423	0.072	0.104	9.467	11.300
150°	0.228	0.193	0.269	0.048	0.055	0.105	1.050	0.057	0.091	8.191	11.500
180°	0.204	0.215	0.235	0.042	0.056	0.080	0.826	0.048	0.094	7.160	10.900
210°	0.215	0.232	0.172	0.046	0.061	0.064	0.975	0.054	0.110	7.882	11.150
240°	0.290	0.253	0.161	0.054	0.064	0.080	1.347	0.069	0.124	9.302	11.250
270°	0.287	0.287	0.195	0.058	0.063	0.105	1.571	0.077	0.120	9.841	11.350
300°	0.253	0.251	0.237	0.055	0.059	0.115	1.423	0.072	0.104	9.467	11.300
330°	0.228	0.193	0.269	0.048	0.055	0.105	1.050	0.057	0.091	8.191	11.500
potpuni nestacionarni veštački akceleroogram											
0°	0.193	0.125	0.044	0.040	0.035	0.011	0.644	0.041	0.033	6.235	9.600
30°	0.194	0.169	0.045	0.044	0.039	0.017	0.773	0.047	0.040	7.000	10.100
60°	0.254	0.206	0.051	0.054	0.048	0.027	1.166	0.064	0.062	8.365	10.280
90°	0.301	0.225	0.058	0.059	0.054	0.032	1.430	0.074	0.076	9.139	9.980
120°	0.267	0.205	0.065	0.057	0.051	0.030	1.301	0.069	0.069	8.644	9.960
150°	0.225	0.180	0.057	0.047	0.042	0.020	0.908	0.053	0.047	7.233	9.800
180°	0.193	0.125	0.044	0.040	0.035	0.011	0.644	0.041	0.033	6.235	9.600
210°	0.194	0.169	0.045	0.044	0.039	0.017	0.773	0.047	0.040	7.000	10.100
240°	0.254	0.206	0.051	0.054	0.048	0.027	1.166	0.064	0.062	8.365	10.280
270°	0.301	0.225	0.058	0.059	0.054	0.032	1.430	0.074	0.076	9.139	9.980
300°	0.267	0.205	0.065	0.057	0.051	0.030	1.301	0.069	0.069	8.644	9.960
330°	0.225	0.180	0.057	0.047	0.042	0.020	0.908	0.053	0.047	7.233	9.800

# PRILOG B

## MERE INTENZITETA SPEKTARA ODGOVORA

Tabela B.1 Pregled proračunatih mera intenziteta spektara odgovora  $F_s=1$ ,  $\zeta=5\%$ ,  $\gamma=1/2$ ,  $\beta=1/4$ ,  $\Delta T=0.02s$

$\theta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
<i>Imperial Valley IV79</i>												
PGA (g)	0.153	0.146	0.109	0.139	0.134	0.147	0.153	0.146	0.109	0.139	0.134	0.147
MMSI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI	VI
PSA (g)	0.548	0.370	0.355	0.391	0.513	0.599	0.548	0.370	0.355	0.391	0.513	0.599
PSV (m/s)	0.292	0.220	0.313	0.367	0.329	0.320	0.292	0.220	0.313	0.367	0.329	0.320
PSD (m)	0.205	0.142	0.083	0.095	0.150	0.196	0.205	0.142	0.083	0.095	0.150	0.196
<i>Loma Prieta LP89</i>												
PGA (g)	0.159	0.139	0.146	0.172	0.152	0.182	0.159	0.139	0.146	0.172	0.152	0.182
MMSI	VI	VI	VI	VI	VI	VII	VI	VI	VI	VI	VI	VII
PSA (g)	0.489	0.452	0.592	0.733	0.678	0.522	0.489	0.452	0.592	0.733	0.678	0.522
PSV (m/s)	0.866	0.724	0.509	0.504	0.724	0.765	0.866	0.724	0.509	0.504	0.724	0.765
PSD (m)	0.353	0.301	0.225	0.248	0.308	0.329	0.353	0.301	0.225	0.248	0.308	0.329
<i>Northridge NR94</i>												
PGA (g)	0.520	0.485	0.382	0.423	0.507	0.500	0.520	0.485	0.382	0.423	0.507	0.500
MMSI	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII	VIII
PSA (g)	2.443	2.231	1.948	1.415	1.612	1.973	2.443	2.231	1.948	1.415	1.612	1.973
PSV (m/s)	1.950	1.758	1.449	1.974	2.309	2.049	1.950	1.758	1.449	1.974	2.309	2.049
PSD (m)	0.317	0.210	0.248	0.394	0.463	0.426	0.317	0.210	0.248	0.394	0.463	0.426
<i>San Fernando SF71</i>												
PGA (g)	0.210	0.187	0.164	0.174	0.229	0.235	0.210	0.187	0.164	0.174	0.229	0.235
MMSI	VII	VII	VI	VI	VII	VII	VII	VII	VI	VI	VII	VII
PSA (g)	0.760	0.653	0.582	0.587	0.668	0.746	0.760	0.653	0.582	0.587	0.668	0.746
PSV (m/s)	0.621	0.640	0.510	0.330	0.377	0.510	0.621	0.640	0.510	0.330	0.377	0.510
PSD (m)	0.326	0.348	0.291	0.170	0.223	0.291	0.326	0.348	0.291	0.170	0.223	0.291
<i>Kobe KO95</i>												
PGA (g)	0.694	0.647	0.757	0.693	0.615	0.719	0.694	0.647	0.757	0.693	0.615	0.719
MMSI	IX	VIII	IX	IX	VIII	IX	IX	VIII	IX	IX	VIII	IX
PSA (g)	2.487	2.878	2.621	1.785	1.952	2.272	2.487	2.878	2.621	1.785	1.952	2.272
PSV (m/s)	1.867	2.063	1.979	1.863	1.700	1.935	1.867	2.063	1.979	1.863	1.700	1.935
PSD (m)	0.412	0.513	0.545	0.509	0.434	0.352	0.412	0.513	0.545	0.509	0.434	0.352
<i>Morgan Hill MH84</i>												
PGA (g)	0.224	0.189	0.189	0.348	0.413	0.368	0.224	0.189	0.189	0.348	0.413	0.368
MMSI	VII	VII	VII	VIII	VIII	VIII	VII	VII	VII	VIII	VIII	VIII
PSA (g)	0.885	0.466	0.571	1.126	1.416	1.342	0.885	0.466	0.571	1.126	1.416	1.342
PSV (m/s)	0.601	0.499	0.479	0.468	0.535	0.572	0.601	0.499	0.479	0.468	0.535	0.572
PSD (m)	0.112	0.096	0.080	0.094	0.106	0.112	0.112	0.096	0.080	0.094	0.106	0.112
<i>Palm Springs PS86</i>												
PGA (g)	0.484	0.449	0.594	0.742	0.778	0.694	0.484	0.449	0.594	0.742	0.778	0.694
MMSI	VIII	VIII	VIII	IX	IX	IX	VIII	VIII	VIII	IX	IX	IX
PSA (g)	1.558	1.551	1.402	1.862	2.187	1.962	1.558	1.551	1.402	1.862	2.187	1.962
PSV (m/s)	0.912	1.220	1.337	1.184	0.876	0.780	0.912	1.220	1.337	1.184	0.876	0.780
PSD (m)	0.155	0.206	0.241	0.246	0.190	0.113	0.155	0.206	0.241	0.246	0.190	0.113
<i>Parkfield PA66</i>												
PGA (g)	0.292	0.247	0.222	0.163	0.243	0.306	0.292	0.247	0.222	0.163	0.243	0.306
MMSI	VII	VII	VII	VI	VII	VII	VII	VII	VII	VI	VII	VII
PSA (g)	1.100	0.911	0.684	0.515	0.744	1.006	1.100	0.911	0.684	0.515	0.744	1.006
PSV (m/s)	0.316	0.251	0.284	0.264	0.295	0.329	0.316	0.251	0.284	0.264	0.295	0.329
PSD (m)	0.071	0.081	0.087	0.079	0.082	0.069	0.071	0.081	0.087	0.079	0.082	0.069

Tabela B.2 Pregled proračunatih mera intenziteta spektara odgovora nepotpunih i potpunih nestacionarnih veštačkih akceleroograma  $F_s=1$ ,  $\zeta=5\%$ ,  $\gamma=1/2$ ,  $\beta=1/4$ ,  $\Delta T=0.02s$

$\theta$	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
nepotpuni nestacionarni veštački akceleroogram												
<i>PGA</i> (g)	0.204	0.215	0.290	0.287	0.253	0.228	0.204	0.215	0.290	0.287	0.253	0.228
<i>MMSI</i>	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII
<i>PSA</i> (g)	0.531	0.501	0.615	0.689	0.612	0.550	0.531	0.501	0.615	0.689	0.612	0.550
<i>PSV</i> (m/s)	0.384	0.558	0.689	0.717	0.599	0.395	0.384	0.558	0.689	0.717	0.599	0.395
<i>PSD</i> (m)	0.170	0.185	0.231	0.241	0.246	0.207	0.170	0.185	0.231	0.241	0.246	0.207
potpuni nestacionarni veštački akceleroogram												
<i>PGA</i> (g)	0.193	0.194	0.254	0.301	0.267	0.225	0.193	0.194	0.254	0.301	0.267	0.225
<i>MMSI</i>	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII	VII
<i>PSA</i> (g)	0.635	0.635	0.751	0.835	0.786	0.744	0.635	0.635	0.751	0.835	0.786	0.744
<i>PSV</i> (m/s)	0.402	0.573	0.752	0.750	0.601	0.514	0.402	0.573	0.752	0.750	0.601	0.514
<i>PSD</i> (m)	0.119	0.140	0.147	0.142	0.130	0.116	0.119	0.140	0.147	0.142	0.130	0.116

# PRILOG C

## PRELIMINARNO DIMENZIONISANJE

Analiza opterećenja (4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modeli okvirnih zgrada):

1. sopstvena težina konstrukcije:  $g$ ,
2. dodatno stalno opterećenje:  $\Delta g=3\text{kN/m}^2$ ,
3. korisno opterećenje (EC 1, kategorija B):  $p=3\text{kN/m}^2$ ,
4. opterećenje snegom:  $s=1\text{kN/m}^2$ ,
5. seizmičko dejstvo prema EC 8: parametri su prikazani u podpoglavlju 3.8.

Kombinacije opterećenja za preliminarno dimenzionisanje:

- granično stanje nosivosti (stalne proračunske situacije):

1.  $1.35 \cdot DL + 1.5 \cdot LL$ ,
2.  $1.35 \cdot DL + 1.5 \cdot SL$ ,
3.  $1.35 \cdot DL + 1.5 \cdot LL + 1.5 \cdot 0.5 \cdot SL$ ,
4.  $1.35 \cdot DL + 1.5 \cdot SL + 1.5 \cdot 0.7 \cdot LL$ ,
5.  $1 \cdot DL + 1.5 \cdot LL$ ,
6.  $1 \cdot DL + 1.5 \cdot SL$ ,
7.  $1 \cdot DL + 1.5 \cdot LL + 1.5 \cdot 0.5 \cdot SL$ ,
8.  $1 \cdot DL + 1.5 \cdot SL + 1.5 \cdot 0.7 \cdot LL$ ,

- granično stanje nosivosti (seizmičke proračunske situacije):

9.  $1 \cdot DL + 1 \cdot EQX + 0.3EQY + 0.3 \cdot LL$ ,
10.  $1 \cdot DL + 1 \cdot EQX - 0.3EQY + 0.3 \cdot LL$ ,
11.  $1 \cdot DL - 1 \cdot EQX + 0.3EQY + 0.3 \cdot LL$ ,
12.  $1 \cdot DL - 1 \cdot EQX - 0.3EQY + 0.3 \cdot LL$ ,
13.  $1 \cdot DL + 1 \cdot EQY + 0.3EQX + 0.3 \cdot LL$ ,
14.  $1 \cdot DL + 1 \cdot EQY - 0.3EQX + 0.3 \cdot LL$ ,
15.  $1 \cdot DL - 1 \cdot EQY + 0.3EQX + 0.3 \cdot LL$ ,
16.  $1 \cdot DL - 1 \cdot EQY - 0.3EQX + 0.3 \cdot LL$ ,

- granično stanje upotrebljivosti (karakteristična kombinacija):

17.  $1 \cdot DL + 1 \cdot LL + 0.5 \cdot SL$ ,

- granično stanje upotrebljivosti (kvazi-stalna kombinacija):

18. 1·DL+0.3·LL.

Tabela C.1 Dimenzije i armatura poprečnih preseka 4x6x3, 4x6x5-13, 15x4x4 i 15x4x4-6 3D modela okvirnih zgrada

zgrada		4x6x3				4x6x5-13					
sprat	tip	dimenzije p. p.	armatura				dimenzije p. p.	armatura			
			krajevi		polovina			krajevi		polovina	
1-4	stub	40x50	4x4RØ19				45x45	4x6RØ19			
			4x6RØ19 (stubovi prizemlja)					4x7RØ19 (stubovi prizemlja)			
1-4	greda	30x60	A <sub>2</sub>	7RØ19	A <sub>2</sub>	2RØ19	30x60	A <sub>2</sub>	8RØ19	A <sub>2</sub>	2RØ19
			A <sub>1</sub>	5RØ19	A <sub>1</sub>	3RØ19		A <sub>1</sub>	6RØ19	A <sub>1</sub>	4RØ19
zgrada		15x4x4				15x4x4-6					
sprat	tip	dimenzije p. p.	armatura				dimenzije p. p.	armatura			
			krajevi		polovina			krajevi		polovina	
1-5	stub	75x75	4x5RØ22				80x80	4x7RØ22			
			4x7RØ25 (stubovi prizemlja)					4x9RØ25 (stubovi prizemlja)			
6-10	stub	70x70	4x4RØ22				75x75	4x4RØ22			
11-15	stub	65x65	4x3RØ22				70x70	4x4RØ22			
1-5	greda	35x70	A <sub>2</sub>	10RØ22	A <sub>2</sub>	3RØ22	40x70	A <sub>2</sub>	12RØ22	A <sub>2</sub>	4RØ22
			A <sub>1</sub>	8RØ22	A <sub>1</sub>	4RØ22		A <sub>1</sub>	10RØ22	A <sub>1</sub>	5RØ22
6-10	greda	35x65	A <sub>2</sub>	9RØ22	A <sub>2</sub>	3RØ22	35x65	A <sub>2</sub>	10RØ22	A <sub>2</sub>	3RØ22
			A <sub>1</sub>	7RØ22	A <sub>1</sub>	3RØ22		A <sub>1</sub>	8RØ22	A <sub>1</sub>	4RØ22
11-15	greda	35x60	A <sub>2</sub>	7RØ22	A <sub>2</sub>	2RØ22	35x60	A <sub>2</sub>	7RØ22	A <sub>2</sub>	2RØ22
			A <sub>1</sub>	5RØ22	A <sub>1</sub>	2RØ22		A <sub>1</sub>	5RØ22	A <sub>1</sub>	3RØ22

Analiza opterećenja (9x6x5-12 3D modela okvirne zgrade):

1. sopstvena težina konstrukcije:  $g$ ,
2. dodatno stalno opterećenje:  $\Delta g=3\text{kN/m}^2$ ,
3. korisno opterećenje:  $p=3\text{kN/m}^2$ ,
4. opterećenje snegom:  $s=1\text{kN/m}^2$ ,
5. seizmičko dejstvo prema SRP.

Tabela C.2 Dimenzije i armatura poprečnih preseka 9x6x5-12 3D modela okvirne zgrade

zgrada		9x6x5-12								
		deo 1-9				deo 1-7				
sprat	tip	dimenzije p. p.	armatura				sprat	dimenzije p. p.	armatura	
			krajevi		polovina				krajevi	polovina
1-3	stub	60x60	4x2RØ22				1-3	60x60	4x2RØ22	
4-6	stub	50x50	4x2RØ19				4-7	50x50	4x2RØ19	
7-9	stub	40x40	4x2RØ16				-	-	-	
		deo 1-5				deo 1-3				
1-5	stub	50x50	4x2RØ19				1-3	40x40	4x2RØ16	
svi spratovi	greda	30x60	A <sub>2</sub>	6RØ22	A <sub>2</sub>	2RØ22				
			A <sub>1</sub>	3RØ16	A <sub>1</sub>	6RØ16				

Tabela C.3 Periodi vibracija, težine i ukupne smičuće sile u osnovi 3D modela okvirnih zgrada

zgrada	$T_1$ (s)	$T_2$ (s)	$T_3$ (s)	W (t) (DL+0.15LL)	$V_{x,x}$ (kN)	$V_{x,y}$ (kN)	$V_{y,y}$ (kN)	$V_{y,x}$ (kN)
4x6x3	0.88	0.80	0.72	2577.9	3682.5	0	3966.7	0
4x6x5-13	0.82	0.81	0.73	2481.8	4299.6	32.6	4239.5	32.6
15x4x4	2.04	2.04	1.74	11077.9	9239.5	0	9239.5	0
15x4x4-6	2.09	2.06	1.80	7538.7	6225.3	628.5	6225.3	628.5

Tabela C.4 Centri masa i centri krutosti 3D modela okvirnih zgrada

zgrada	sprat	$CM_x$ (m)	$CM_y$ (m)	$CK_x$ (m)	$CK_y$ (m)	$e_x$ (m)	$e_y$ (m)
4x6x3	1-4	18	9	18	9	0	0
4x6x5-13	4	18.83	15.71	18.71	15.80	0.13	0.09
15x4x4	1-15	12	12	12	12	0	0
15x4x4-6	15	14.9	14.9	15.47	15.47	0.56	0.56

Tabela C.5 Dimenzije i armatura poprečnih preseka 8x4 2D modela okvira

zgrada		8x4				
sprat	tip	dimenzije p. p.	armatura			
			krajevi	polovina		
1-2	stub	40x60	2x5RØ19			
3-4	stub	40x55	2x3RØ19			
5-6	stub	40x50	2x3RØ19			
7-8	stub	40x40	2x3RØ19			
1-2	greda	30x60	$A_2$	7RØ19	$A_2$	3RØ19
			$A_1$	4RØ19	$A_1$	3RØ19
3-4	greda	30x55	$A_2$	7RØ19	$A_2$	3RØ19
			$A_1$	4RØ19	$A_1$	3RØ19
5-6	greda	30x45	$A_2$	7RØ19	$A_2$	3RØ19
			$A_1$	4RØ19	$A_1$	3RØ19
7-8	greda	30x40	$A_2$	6RØ19	$A_2$	2RØ19
			$A_1$	3RØ19	$A_1$	2RØ19

# PRILOG D

## HARDVERSKA OPREMA ZA SPROVOĐENJE EKSPERIMENTA

Hardverska oprema za sprovođenje numeričkog eksperimenta (procesiranje NSPA, NDA, INDA, IDA i HINSDA analiza) i obradu podataka (slika D.1):



Slika D.1 Hardverska oprema za sprovođenje numeričkog eksperimenta (procesiranje NSPA, NDA, INDA, IDA i HINSDA analiza) i obradu podataka

### 1. *desktop* računar:

- OS: *Microsoft Windows XP Professional*,
- CPU: *AMD Athlon(tm) XP 1800+*, 1.5GHz,
- RAM: *SD 512MB*,
- HDD: *Maxtor 5400rpm*, 80GB,
- GC: *GeForce FX 5200*, 128MB,

### 2. *laptop* računar:

- OS: *Microsoft Windows 7 Ultimate*,
- CPU: *AMD Turion(tm) 64 X2 Dual-Core RM-75*, 2.2GHz,  $L_1=2 \times 64\text{KB}$ ,  
 $L_2=2 \times 512\text{KB}$ ,
- RAM: *DDR2 800MHz*, 3GB,
- HDD: *SATA 5400rpm*, 320GB,
- GC: *ATI Radeon HD 4570*, 512MB,

3. *desktop računar:*

- OS: *Microsoft Windows XP Professional,*
- CPU: *AMD Athlon II X2 250, 3GHz, L<sub>1</sub>=2x128KB, L<sub>2</sub>=2x1024KB,*
- RAM: *DDR3, 4GB,*
- HDD: *WD Caviar Blue, 640GB,*
- GC: *ATI Radeon HD 5500, 1024MB,*

4. *eksterni HDD:*

- *Western Digital, 150GB,*
- *Transcend, 160GB,*

5. *UPS: Cyber Power DX 800E, 800VA, 480W.*



## **Biografija**

### **Mr Mladen Ćosić dipl.inž.građ.**

Mladen Ćosić je rođen 16.05.1978.godine u Loznici, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju opšteg smera. Na odsek za građevinarstvo Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu upisao se 1997.godine, gde je i diplomirao septembra 2004.godine. Diplomski rad pod naslovom *Proizvodno-poslovni objekat za proizvodnju voćnih sokova* odbranio je pod mentorstvom profesora dr Srđana Kisina iz oblasti metalnih konstrukcija. Nakon diplomiranja odslužio je civilni-vojni rok od decembra 2004.godine do januara 2006.godine u Bolnici Dr Milenko Marin u Loznici u tehničkoj službi i službi plana i analize. U periodu od januara do juna 2006.godine učestvovao je kao saradnik na projektu *Geotehnički uslovi izgradnje saobraćajnice na trasi bivše železničke pruge između Novog Sada i Petrovaradina*, a čiji su nosioci projekta bili profesor dr Milenko Vasić i profesor dr Mitar Đogo. Postdiplomske studije na odseku za građevinarstvo Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu upisao je oktobra 2004.godine, a sve ispite je položio do aprila 2007.godine. Magistarsku tezu pod naslovom *Nelinearna statička seizmička analiza višespratnih okvira* odbranio je pod mentorstvom profesora dr Đorđa Lađinovića iz oblasti teorije konstrukcija i zemljotresnog inženjerstva januara 2010.godine. U toku postdiplomskih studija maksimalno se posvetio naučnom istraživanju iz oblasti nelinearnih statičkih i dinamičkih seizmičkih analiza konstrukcija, proračuna prema PBEE metodologiji i zemljotresnom inženjerstvu. Doktorsku disertaciju pod naslovom *Nelinearna statička i dinamička seizmička analiza okvirnih zgrada prema performansama* prijavio je juna 2010.godine na Građevinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Istraživanje na doktorskoj disertaciji je sprovedeno pod mentorstvom profesora dr Stanka Brčića. Publikovao je sam i u koautorstvu 9 naučnih radova u međunarodnim časopisima (4 sa SCI liste), 4 naučna rada u domaćim časopisima, 13 naučnih radova na međunarodnim simpozijumima i 23 naučna rada na domaćim simpozijumima. Učestvovao je u izradi nekoliko stručnih projekata iz oblasti saradnje sa privredom. Govori i piše engleski jezik.







Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора \_\_\_\_\_ Мр Младен Ћосић дипл.грађ.инж.

Број индекса \_\_\_\_\_

Студијски програм \_\_\_\_\_

Наслов рада Нелинеарна статичка и динамичка сеизмичка анализа оквирних  
зграда према перформансама

Ментор Проф. др Станко Брчић дипл.грађ.инж.

Потписани/а \_\_\_\_\_ Мр Младен Ћосић дипл.грађ.инж.

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_ 1.12.2014.

Mladen Čosić



Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Нелинеарна статичка и динамичка сеизмичка анализа

оквирних зграда према перформансама

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство

2. Ауторство - некомерцијално

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима

5. Ауторство – без прераде

6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

**Потпис докторанда**

У Београду, \_\_\_\_\_ 1.12.2014.

  
\_\_\_\_\_

1. Ауторство - Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. Ауторство – некомерцијално. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. Ауторство - некомерцијално – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. Ауторство – без прераде. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. Ауторство - делити под истим условима. Дозвољавање умножавања, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.