

Nelinearni model prostornih konstrukcija s primjenom na potresnu otpornost

Boris Trogrlić, Ante Mihanović

Ključne riječi

prostorna konstrukcija, nelinearni model, okvirna konstrukcija, potresna otpornost, geometrijska nelinearnost, materijalna nelinearnost, opterećenje

Key words

space structure, nonlinear model, frame structure, seismic resistance, geometric nonlinearity, material nonlinearity, load

Mots clés

structure spatiale, modèle non-linéaire, structure-cadre, résistance sismique, non-linéarité géométrique, non-linéarité matérielle

Ключевые слова

пространственная конструкция, нелинейная модель, рамная конструкция, сейсмостойкость, геометрическая нелинейность, материальная нелинейность, нагрузка

Schlüsselworte

räumliche Konstruktion, unlineares Modell, Rahmenkonstruktion, seismische Widerstandsfähigkeit, geometrische Unlinearität, materielle Unlinearität, Belastung

B. Trogrlić, A. Mihanović

Izvorni znanstveni rad

Nelinearni model prostornih konstrukcija s primjenom na potresnu otpornost

Prikazan je materijalno i geometrijski nelinearan numerički model prostornih okvirnih konstrukcija. Geometrijska nelinearnost obuhvaća gubitak stabilnosti izvijanjem, uvrtanjem ili izbočenjem grednih elemenata, a materijalna nelinearnost prati naponsko-deformacijsko stanje svakog presjeka modelom distribuirane plastifikacije. Opterećenje se povećava do sloma, a moguće ga je nanositi u dvije faze, što je praktično za odvojenu simulaciju vertikalnog i horizontalnog djelovanja.

B. Trogrlić, A. Mihanović

Original scientific paper

Nonlinear model of space structures and its application on seismic resistance

Materially and geometrically nonlinear numerical model of space frame structures is presented. The geometrical nonlinearity covers loss of stability through buckling, screwing or protrusion of girder elements, and the material nonlinearity follows the stress-strain state of each section through the model of distributed plasticization. The load is increased until failure, and can be applied in two phases, which is practical for separate simulation of vertical and horizontal action.

B. Trogrlić, A. Mihanović

Ouvrage scientifique original

Modèle non-linéaire des structures spatiales et son application sur la résistance sismique

Le modèle numérique des structures spatiales, non-linéaire de point de vue matériel et géométrique, est présenté. La non-linéarité matérielle concerne la perte de stabilité par flambage, vissage et protubérance, tandis que la non-linéarité matérielle suit l'état de contrainte-déformation de chaque section par le modèle de plastification distribuée. La charge est augmentée jusqu'à rupture, et peut être appliquée en deux phases, ce qui est pratique pour la simulation séparée de l'action verticale et horizontale.

Б. Трогрлич, А. Миханович

Оригинальная научная работа

Нелинейная модель пространственных конструкций применительно к сейсмостойкости

Приведена материально и геометрически нелинейная цифровая модель пространственных рамных конструкций. Геометрическая нелинейность охватывает потерю стабильности при изгибании, скручивании или выпучивании балочных элементов. Материальная нелинейность отражает напряженно-деформационное состояние каждого сечения посредством модели дистрибутивной пластификации. Нагрузка увеличивается до слом, причем нагружение может производиться в два этапа, что является практичным при раздельной симуляции вертикального и горизонтального воздействий.

B. Trogrlić, A. Mihanović

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Unlineares Modell räumlicher Konstruktionen mit Anwendung für seismische Widerstandsfähigkeit

Dargestellt ist ein materiell und geometrisch unlineares numerisches Modell von räumlichen Rahmenkonstruktionen. Die geometrische Unlinearität umfasst den Verlust der Stabilität durch Knickung, Drillung oder Beulung der Balkenelemente. Materielle Unlinearität folgt den Zustand der Spannung und Verformung jedes Querschnitts durch das Modell der distribuierten Plastifikation. Die Belastung steigert sich bis zum Bruch, aber es ist möglich sie in zwei Phasen anzulegen was für die separierte Simulation der vertikalen und horizontalen Einwirkung praktisch ist.

Autori: Doc. dr. sc. **Boris Trogrlić**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Ante Mihanović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split

1 Uvod

Izlaže se skraćeni prikaz nelinearnoga numeričkog modela prostornih konstrukcija za trenutačna statička i nazovistatička djelovanja. Model obuhvaća materijalnu nelinearnost i geometrijsku nelinearnost malih pomaka. Pretpostavlja se nanošenje opterećenja postupno, odnosno u koracima. Geometrijska nelinearnost malih pomaka sama po sebi uključuje kontrolu stabilnosti sustava za svaku razinu opterećenja. Osnovna pretpostavka jest model nelinearnog opterećenja gravitacijskog tipa. Numerička primjena teorije malih pomaka temelji se na Lagrange-ovoj potpunoj formulaciji.

Materijalna je nelinearnost u model ugrađena s isticanjem na linijske konstrukcije. Ona obuhvaća nelinearnu vezu naprežanje-deformacija uključivo plastifikaciju i slom u materijalu. Istodobno uzimanje u obzir geometrijske i materijalne nelinearnosti u prostornim modelima može dati vrijedne spoznaje o konstruktorskoj naravi sustava koji se analizira. Činjenica da su presjeci linijskih elemenata vrlo složenih oblika ili čak kompozitni, numeričko istraživanje zadaće utjecaja materijalne nelinearnosti čini iznimno složenom.

Posljednjih desetljeća prošlog stoljeća objavljen je veliki broj radova, kao npr. [1-10], na temu modeliranja okvira s uzimanjem u obzir materijalne i geometrijske nelinearnosti odvojeno ili istovremeno. Objavljeni radovi u posljednjem desetljeću opisuju materijalno i geometrijski nelinearne modele prostornih okvira pri dvoosnom savijanju s uzdužnom silom i gušćom mrežom konačnih elemenata (KE) s obzirom na stupanj plastifikacije [11, 12]. Analizirano je i nelinearno ponašanje greda pod kombiniranim djelovanjem uzdužne sile, dvoosnog savijanja i uvrtnja [13, 14].

Od materijalno i geometrijski nelinearnih modela razvijenih u Hrvatskoj valja spomenuti modele ravninskih okvira sadržane u radovima i računalnom programu RAVNEL [15] i model prostornih okvira sadržan u radovima i računalnom programu NELIN [16].

U inženjerskoj su praksi dosta zastupljeni armiranobetonski ili čelični prostorni okviri, pa će se u nastavku opis materijalne i geometrijske nelinearnost odnositi na njih.

Ovaj rad prikazuje materijalno nelinearni numerički model prostornih linijskih konstrukcija i uključivo materijalnu nelinearnost kompozitnih poprečnih presjeka. Model uključuje nelinearne efekte materijalne i geometrijske nelinearnosti izazvane gubitkom stabilnosti izvijanjem, uvrtnjem ili gubitkom bočne stabilnosti grednih elemenata. Materijalna se nelinearnost ogleda u praćenju stanja naprežanja i deformacija svakog presjeka, te postplastičnom ponašanju presjeka (pojava plastičnog zglo-

ba). Posebnost modela je u opisivanju krutosti na uvrtnje kompozitnog presjeka u uvjetima spriječenog izobličenja, po modelu usporednog tijela.

Opći numerički postupak jest inkrementalno-iterativni pri čemu se opterećenje povećava od nultog pa sve do sloma koji nastaje ili zbog premašaja nosivosti presjeka i/ili gubitka stabilnosti elemenata okvira. Moguće je nanošenje opterećenja u dvije faze, što je posebno praktično za simulaciju odvojenog djelovanja vertikalnog (vlastita težina, stalno opterećenje) i horizontalnog opterećenja (vjetar, potres).

Ukomponirana je mogućnost stupnjevitog nanošenja opterećenja, najprije jedno a potom drugo opterećenje, što omogućuje primjenu statički nelinearne analize nazvane metodom postupnog guranja u skladu s normom EN 1998-1.

Globalni prostorni linijski sustav diskretiziran je pravocrtnim štapnim elementima. Zahtjevi točnosti rješenja diktiraju duljine KE-a što je obrazloženo u nastavku. Svaki je element karakteriziran svojim poprečnim presjekom konstantnim po duljini. Nelinearnost cijelog KE-a diktirana je svojstvima tog presjeka. Presjek je diskretiziran trokutnim i kvadrilateralnim dijelovima, a KE pripadajućim vlaknima. Nelinearno ponašanje materijala uvjetuju jednoosna svojstva vlakana. Presjek može biti heterogen i proizvoljnih oblika. Moguće je zasebno zadavati beton od armature u presjeku. Pretpostavlja se da nema klizanja na spoju armature i betona. Materijali mogu biti metali, beton, armirani beton, drvo i sl. U slučaju betona pukotine se tretiraju kao raspodijeljene po duljini. Načinom modeliranja serijom kratkih elemenata moguće je simulirati unaprijed zadana mjesta očekivanih diskretnih pukotina.

Zbog upotpunjavanja svojstava krutosti, a osobito uvrtnja, svaki se linijski KE modelira zasebno kao usporedno tijelo, koje se diskretizira kuboidnim (*brick*) KE-om, s bazom u kvadrilateralima diskretizacije poprečnog presjeka.

Globalni model može sadržavati ploče i ljuske, ali na razini linearno-elastičnog materijala i geometrijske nelinearnosti po teoriji malih pomaka.

Odziv modela prati se putanjom ravnoteže karakterističnog čvora. Slom sustava nastaje premašajem nosivosti do razine mehanizma i/ili gubitkom stabilnosti.

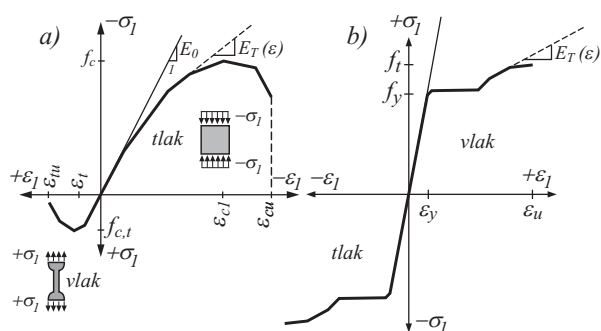
2 Opis modela

2.1 Modeli materijala

Globalni model pretpostavlja više različitih tipova materijala. Svaki numerički model pojedinog materijala zasniva se na jednoosnim svojstvima. Složeni jednoosni

dijagrami ponašanja $\sigma-\varepsilon$ pojedinog materijala aproksimiraju se poligonalnim prikazom. Postoji numeričko ograničenje poligonalnog prikaza u tome što ishodišna sekanta u tlaku ili vlaklu ne može presijecati poligon u više od jedne točke.

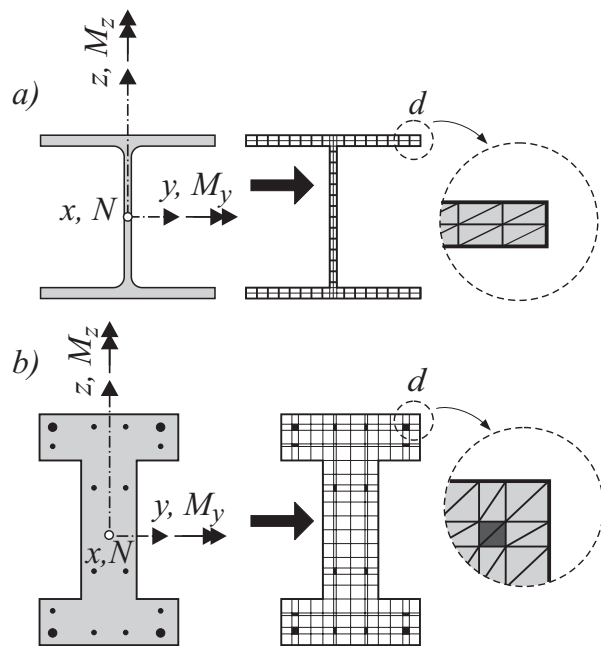
S obzirom na najveću zastupljenost betona i čelika kao materijala, daljnji opis modela materijala odnosi se upravo na njih. Tipičan numerički model betona prikazan je na slici 1.a. Budući da se u ovome radu $\sigma-\varepsilon$ dijagram zadaje poligonalno, moguće je opisati i očvršćenje armaturnog čelika. Tipičan model armaturnog čelika prikazan je na slici 1.b.



Slika 1. Numerički modeli: a) betona; b) armature

2.2 Modeli presjeka

Presjek je definiran geometrijskim oblikom i vrstom materijala. Modelirati se mogu homogeni i kompozitni presjeci. Diskretizacija presjeka obavlja se KE-om trokutnog i pravokutnog oblika (slika 2.).



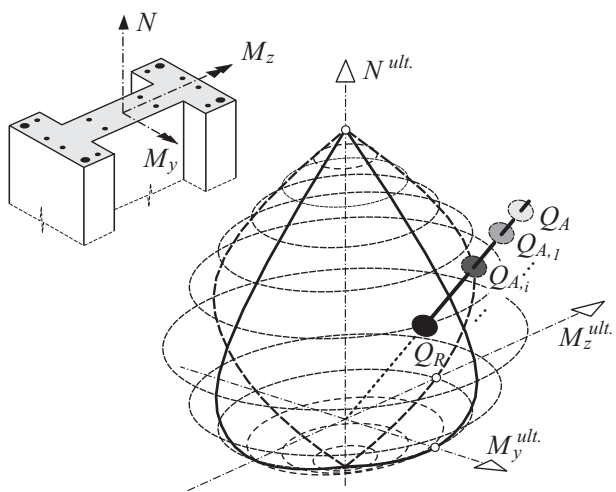
Slika 2. Diskretizacija poprečnog presjeka: a) homogeni; b) kompozitni

Svaki KE presjeka u načelu je zaseban materijal, a okomito na ravninu presjeka funkcionira kao vlakance. Sva vlakanca su međusobno priljubljena na dodiru, odnosno nema klizanja među vlakancima. Deformacijsko stanje uzdužnog deformiranja vlakanca presjeka zadovoljava Bernoullijevu hipotezu.

U samom numeričkom postupku uravnoteženje presjeka uspostavlja se njemu pridruženim iterativnim postupkom. U samom postupku uravnoteženja pojedina su vlakanca materijala u nelinearnom području pa je u iterativni postupak uključena Newtonova metoda rješenja nelinearnog sustava.

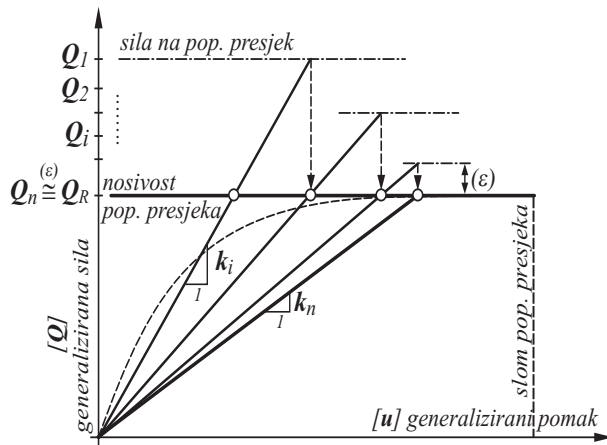
Pojedina vlakanca dolaze u nelinearne zone, zone plastifikacije ili zone sloma. Po tom načelu u presjeku se mogu simulirati blaga nelinearnost, djelomična plastifikacija, ali i potpuna plastifikacija presjeka, zasnovana na jednoosnim svojstvima materijala.

Potpuna plastifikacija presjeka numerički se tretira na dvije razine. Prva razina je provjera jesu li rezne sile danog inkrementalno-iterativnog koraka premašile plastičnu nosivost presjeka. Ispitivanje se obavlja tzv. modelom radijalne plastičnosti. Ukratko, provjerava se udaljenost vrha vektora napadnih sila, N , M_y i M_z od probodišta tog radijvektora na plohi nosivosti presjeka (slika 3.). Detalji opisa mogu se vidjeti u [17].



Slika 3. Redukcija krutosti presjeka pri plastifikaciji

U drugoj se razini numeričkog tretmana iz omjera duljine radijvektora napadnih sila i radij vektora nosivosti reduciraju krutosti cjelokupnog presjeka, kako bi KE štapa čiji je presjek predstavnik u idućem iterativnom koraku poprimio rezne sile upravo na granici plohe nosivosti (slika 4.). Bliskost granici nosivosti plohe ograničena je granicama numeričke točnosti (ε) koja se zadaje kao ulazni podatak za svaki konkretni numerički primjer.



Slika 4. Redukcija krutosti presjeka pri plastifikaciji

reda, a za savijanje kao L'Hermiteovi polinomi četvrtog reda. Povezivanje savijanja i posmika u zajedničku zadaću dovodi do pojave sparenih baznih funkcija [18].

Primjenom tehnike KE-a slijedi izraz za matricu osnovne statičke krutosti:

gdje su:

$A_x, A_y, A_z, I_x, I_y, I_z$, slijedom;

ploštine presjeka izložene uzdužnom deformiranju, posmičnom deformiranju po osi y, posmičnom deformiranju po osi z, moment tromosti uvrtnjem, osni moment tromosti oko osi y i osni moment tromosti oko osi z.

$$\mathbf{k} = \begin{pmatrix} \frac{EA_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3(1+\tau_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2(1+\tau_y)} & 0 & -\frac{12EI_z}{l^3(1+\tau_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2(1+\tau_y)} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3(1+\tau_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2(1+\tau_z)} & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{l^3(1+\tau_z)} & 0 & -\frac{6EI_y}{l^2(1+\tau_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GI_x}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\tau_z)EI_y}{l(1+\tau_z)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2(1+\tau_z)} & 0 & \frac{(2+\tau_z)EI_y}{l(1+\tau_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\tau_y)EI_z}{l(1+\tau_y)} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2(1+\tau_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2+\tau_y)EI_z}{l(1+\tau_y)} \\ \frac{EA_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{l^3(1+\tau_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_z}{l^2(1+\tau_y)} & 0 & \frac{12EI_z}{l^3(1+\tau_y)} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2(1+\tau_y)} \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3(1+\tau_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2(1+\tau_z)} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{l^3(1+\tau_z)} & 0 & \frac{6EI_y}{l^2(1+\tau_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GI_x}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\tau_z)EI_y}{l(1+\tau_z)} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{l^2(1+\tau_z)} & 0 & \frac{(2+\tau_z)EI_y}{l(1+\tau_z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(4+\tau_y)EI_z}{l(1+\tau_y)} & 0 & -\frac{6EI_z}{l^2(1+\tau_y)} & 0 & 0 & 0 & \frac{(2+\tau_y)EI_z}{l(1+\tau_y)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

2.3 Model štapnog KE-a

Štapni je KE pravocrtan. Dvočvorni je sa po šest stupnjeva slobode u svakom čvoru. Štap je konstantnog poprečnog presjeka. Nelinearnost je istovjetna po svim presjecima. U numeričkom smislu integracija stanja, kako je prethodno navedeno, provodi se u dvije Gaussove točke. Nelinearnost se uspostavlja na bazi srednjih vrijednosti reznih sila u dvije Gaussove točke. Uvođenje dviju različitih nelinearnosti za isti štap, svaka za svoju Gaussovu točku, usporava ili potpuno onemogućuje konvergenciju rješenja već pri malim razinama nelinearnosti.

2.3.1 Modeliranje na razini osnovne statičke zadaće

Bazne funkcije za uzdužno i posmično deformiranje i uvrtnje usvojene su kao L'Hermiteovi polinomi drugog

Bezdimenzijski su koeficijenti:

$$\tau_y = 12EI_z / GA_y l^2 \quad (2)$$

$$\tau_z = 12EI_y / GA_z l^2 \quad (3)$$

U ovoj zadaći da ako su opterećenja diskretne sile i momenti ili na KE raspodijeljena, konstantna, linearna i parabolična opterećenja, rješenja za sile u čvorovima i pomaci čvorova egzaktni su uz pretpostavku da je egzaktno zadan moment tromosti na uvrtnje.

2.3.2 Modeliranje geometrijske nelinearnosti malih pomaka

Uspostava ravnoteže na malim pomacima donosi utjecaj geometrijske nelinearnosti odnosno *efekte gubitka stabilnosti*. Model uzima u obzir stabilnost pri savijanju,

bočnu stabilnost, stabilnost uvrtačjem i svaku njihovu kombinaciju.

Kao bazne funkcije uporabljene su prethodno opisane. Naravno da sada rješenja više nisu egzaktna već samo približna. Primjena tehnike KE-a donosi matricu geometrijske krutosti malih pomaka sljedećeg oblika:

$$\mathbf{k}_g^e = - \begin{bmatrix}
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 N \frac{6}{5l} & 0 & N \frac{z_0}{2l} & 0 & \frac{N}{10} & 0 & -N \frac{6}{5l} & 0 & N \frac{z_0}{2l} & 0 & \frac{N}{10} \\
 & N \frac{6}{5l} & N \frac{y_0}{2l} & \frac{N}{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & -N \frac{6}{5l} & N \frac{y_0}{2l} & \frac{N}{10} & 0 \\
 & & \frac{1}{3} \tilde{m}_{y,z} + \frac{Nr_0^2}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & -N \frac{z_0}{2l} & -N \frac{y_0}{2l} & \frac{1}{6} \tilde{m}_{y,z} - \frac{Nr_0^2}{l} & 0 & 0 \\
 & & & N \frac{2l}{15} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{N}{10} & 0 & -\frac{Nl}{30} & 0 \\
 & & & & N \frac{2l}{15} & 0 & -\frac{N}{10} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{Nl}{30} \\
 \hline
 & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 & & & & & N \frac{6}{5l} & 0 & N \frac{z_0}{2l} & 0 & -\frac{N}{10} & & \\
 & & & & & & N \frac{6}{5l} & N \frac{y_0}{2l} & -\frac{N}{10} & 0 & & \\
 & & & & & & & \frac{1}{3} \tilde{m}_{y,z} + \frac{Nr_0^2}{l} & 0 & 0 & & \\
 & & & & & & & & N \frac{2l}{15} & 0 & & \\
 & & & & & & & & & N \frac{2l}{15} & & \\
 & & & & & & & & & & N \frac{2l}{15} & \\
 \end{bmatrix} \quad (4)$$

gdje je $\tilde{m}_{y,z} = l \left(\frac{M_y^2}{EI_z} + \frac{M_z^2}{EI_y} \right)$;

M_y, M_z - momenti savijanja oko lokalne y , odnosno z osi;
 N - uzdužna sila; y_0, z_0 - koordinate posmičnog težišta presjeka; r_0 - polarni radijus [17].

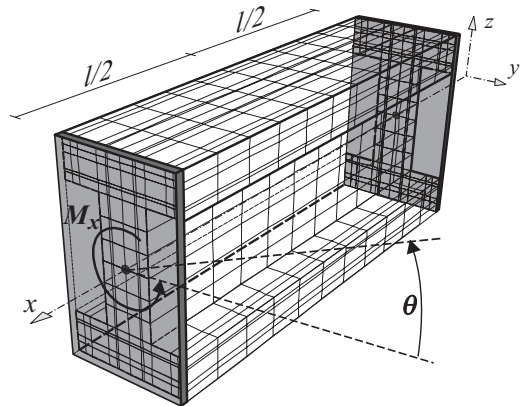
2.3.3 Modeliranje prostornog štapnog KE-a pomoću usporednog tijela

Kod prostornih linijskih konstrukcija znatan postaje utjecaj krutosti na uvrtačje. Kako bi se dobro simulirao taj utjecaj, štapni KE proglašava se lokalnim tijelom koje je diskretizirano kuboidnim elementima (3D). Svaki čvor ima šest stupnjeva slobode. Pojednostavljeni modeliraju kuboidnih elemenata i izboru baznih funkcija mogu se vidjeti u literaturi [18]. Vlakanca koja izlaze iz presjeka uzduž KE-a podijeljena su na više dijelova, a mrežu nad presjekom predstavlja ona ista uporabljena za uspostavu ravnoteže (slika 5.). Tako formirano usporedno tijelo s jedne je strane upeto te su mu spriječeni svi pomaci. Na drugoj strani mu je dodana tanka, u ravnini presjeka, apsolutno kruta ploča. Na ploču se aplicira jedinični kut rotacije, a kao rezultat dobiva se svojstvo torzijske kru-

tosti. Ovako definirano svojstvo torzijske krutosti samo po sebi uključuje utjecaj izobličenja.

Rezultati analize usporednog tijela pokazuju i normalna naprežanja koja su posljedica uvrtačja. Trenutačno je stanje modela takvo da se ne superponiraju ova naprežanja, pa tako i nelinearnih svojstava materijala s

onima izravno dobivenih od uzdužnih sila i momenata savijanja.



Slika 5. Diskretizacija usporednog tijela i zadavanje rubnih uvjeta

2.4 Globalni model

U globalnom numeričkom modelu, na razini prvog inkrementa i prvog iterativnog koraka, slažu se ukupne matrice krutosti, osnovne i geometrijske, na razini nultog opterećenja.

Potom slijedi zadavanje opterećenja silama na razini jednog inkrementa. Ravnoteža je opisana relacijom

$$\left[\mathbf{K}_o^{1,1} + \mathbf{K}_g^{1,1}(\mathbf{u}^{0,1}) \right] \mathbf{u}^{1,1} = \mathbf{F}^1 \quad (5)$$

gdje je:

$\mathbf{K}_o^{1,1}$ - osnovna krutost sustava za prvi inkrement i prvu iteraciju

$\mathbf{K}_g^{1,1}$ - geometrijska krutost sustava za prvi inkrement i prvu iteraciju, a na bazi sila iz nultog inkrementa

$\mathbf{u}^{1,1}$ - pomaci nakon prvog inkrementa i prve iteracije

\mathbf{F}^1 - čvorne sile prvog inkrementa.

Nakon toga teče druga iteracija prvog inkrementa u kojoj se uključuje materijalna i geometrijska nelinearnost. Iteracijama se zahtijeva postizanje zadane točnosti sustava za promatrani inkrement opterećenja. Potom rastu inkrementi opterećenja do tražene razine ili do sloma odnosno gubitka stabilnosti prema izrazu:

$$\left[\mathbf{K}_o^{n,t} + \mathbf{K}_g^{n,t}(\mathbf{u}^{n-1,t}) \right] \mathbf{u}^{n,t} = \mathbf{F}^n \quad (6)$$

Točnost unutar inkrementa uvjetovana je normom pomaka

$$\|\mathbf{u}\| = \sqrt{\sum \mathbf{u}_i^2} \leq \varepsilon \quad (7)$$

gdje je ε zadana točnost norme pomaka.

Globalni model ima mogućnosti zadavanja dvaju ili više opterećenja koja nastupaju jedno iza drugoga. Ovaj je pristup prikladan za provođenje nelinearne analize po metodi postupnog guranja uvedene u Eurokodu 8.

Premda su u ovome izlaganju primarni linijski sustavi, globalni model ima ugrađene četveročvorne KE ljsuke sa po šest stupnjeva slobode u čvoru, te se mogu analizirati ravninska stanja, ploče i ljsuke, pri čemu numerički model plošnih KE-a ima samo linearno elastičan materijal. Model uključuje geometrijsku nelinearnost malih pomaka. Prikladan opis numeričkog modela ljsuke dan je u literaturi [19].

2.5 Točnost rješenja

Zbog moguće pojave znatne materijalne i geometrijske nelinearnosti, matematička ocjena točnosti rješenja nije uvijek moguća. Međutim moguća je inženjerska procjena točnosti rješenja koja daje ovaj model. Među ostalim, pogreške rješenja uvjetovane su materijalnom nelinearnosti, geometrijskom nelinearnosti ili jednom i drugom istodobno.

Materijalna nelinearnost uvjetuje pogreške zbog sljedećih razloga

- konačne duljine KE-a i u vezi s tim opisa materijalne nelinearnosti uzduž nosivih elemenata sustava, pri čemu je promjena kontinuirana, a diskretizacija KE unosi diskontinuitet, zbog čega KE veće duljine lošije opisuju stvarno stanje
- ograničenja u točnosti uravnoteženja presjeka nastale zbog konačnog broja elemenata ploštine poprečnog presjeka i poligonalnog opisa jednoosnog stanja
- veličine inkremenata opterećenja, jer broj inkremenata mora biti razumno konačan i
- numeričke ocjene pada krutosti kada nastupi potpuna plastifikacija presjeka.

Geometrijska nelinearnost uvjetuje pogreške zbog sljedećeg:

- konačne duljine KE-a, jer bazne funkcije dovode samo do približnog rješenja, gdje osobitu netočnost uvjetuje model gubitka bočne stabilnosti nosača i
- veličina inkremenata opterećenja jer kod velikih inkremenata nastaje veliki skok u članovima matrice geometrijske krutosti.

Ilustracija pogreške u zadaći bočne stabilnosti dana je u tablici 1., a preuzeta iz [20].

Na temelju prikazanog zaključuje se da svaki pravocrtni nosivi element mora biti diskretiziran s najmanje 6 KE-a. Slična se pojava zbiva kod modela gubitka stabilnosti uvrtnjem i izvijanjem, ali s nešto blažom pogreškom.

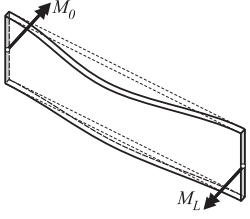
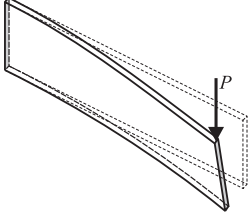
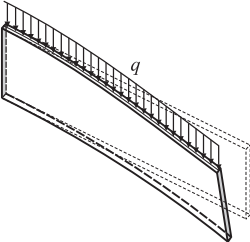
Iskustvo pokazuje da je potrebno:

- numerički model materijala, odnosno σ - ε dijagram opisati s najmanje 20 parova točaka
- poprečni presjek diskretizirati mrežom u rasteru od minimalno 10×10 elemenata
- štap (gredu ili stup) diskretizirati s minimalno 6 KE po štapu za opis bočne stabilnosti
- štap (gredu ili stup) diskretizirati s minimalno 2 KE po štapu za opis stabilnosti uvrtnjem i izvijanjem
- normu pomaka u iterativnom postupku odabrati ispod 2 %,
- ravnotežu presjeka zahtijevati na točnost od 1 % za homogene presjeke i 3 % za kompozitne presjeke te
- inkremente opterećenja odabrati ispod 5 % procijenjenoga slomnog opterećenja.

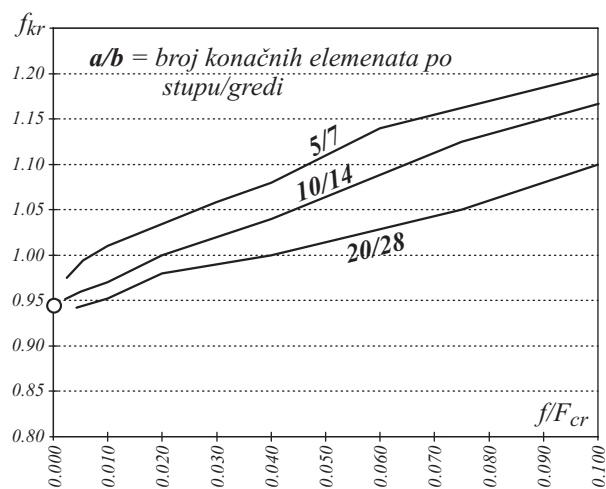
2.6 Ocjena točnosti ekstrapolacijom pogreške u pojedinim primjerima

Do ekstrapolacije pogreške može se doći višestrukim rješenjem istog primjera uz varijaciju odabranih parametara. Ako se kao karakteristična vrijednost usvoji

Tablica 1. Usporedba analitičkih rješenja i numeričkih rezultata za slučaj gubitka bočne stabilnosti

Gredni element i opterećenje	Veličina kritičnog momenta M_{kr} [kNm], kritične sile P_{kr} [kN] i kritičnog raspodijeljenog opterećenja q_{kr} [kN/m]					
	analitičko rješenje	1 KE	2 KE	3 KE	4 KE	6 KE
	1,747 ¹⁾	nema rješenja	1,930 (10,5 %)	1,830 (4,8 %)	1,793 (2,6 %)	1,782 (2,0 %)
	1,112 ²⁾	0,974 (-12,4%)	1,120 (0,8 %)	1,118 (0,5 %)	1,110 (0,2 %)	1,110 (0,2 %)
	1,786 ³⁾	0,980 (45,1 %)	1,460 (18,3 %)	1,640 (8,2 %)	1,700 (4,2 %)	1,748 (2,1 %)
$1) M_{kr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{GI_x EI_z}$; $2) P_{kr} = \frac{4.013}{L^2} \sqrt{GI_x EI_z}$; $3) q_{kr} = \frac{12.85}{L^2} \sqrt{GI_x EI_z}$						

neki konkretni pomak ili na primjer faktor slomnog opterećenja, tada se može varirati inkrement opterećenja i grafički prikazati ta relacija. Potom se može progustiti mreža KE-a i isti postupak ponoviti još nekoliko puta sa sve gušćom mrežom.



Slika 6. Ocjena točnosti kvantificiranjem pogreške

Rezultati se mogu prikazati poligonalnim grafovima i ako im je sjecište u približno istoj točki tada ta točka predstavlja rješenje uz pretpostavku da je broj inkrementa i KE-a po volji velik. Grafovi ujedno pokazuju i veličine pogrešaka u pojedinoj diskretizaciji.

Ako se sjecišta ekstrapoliranih grafova međusobno bitno razilaze, ali i od ordinatne osi, nije moguće potvrditi kako se radi o numerički valjanom rješenju.

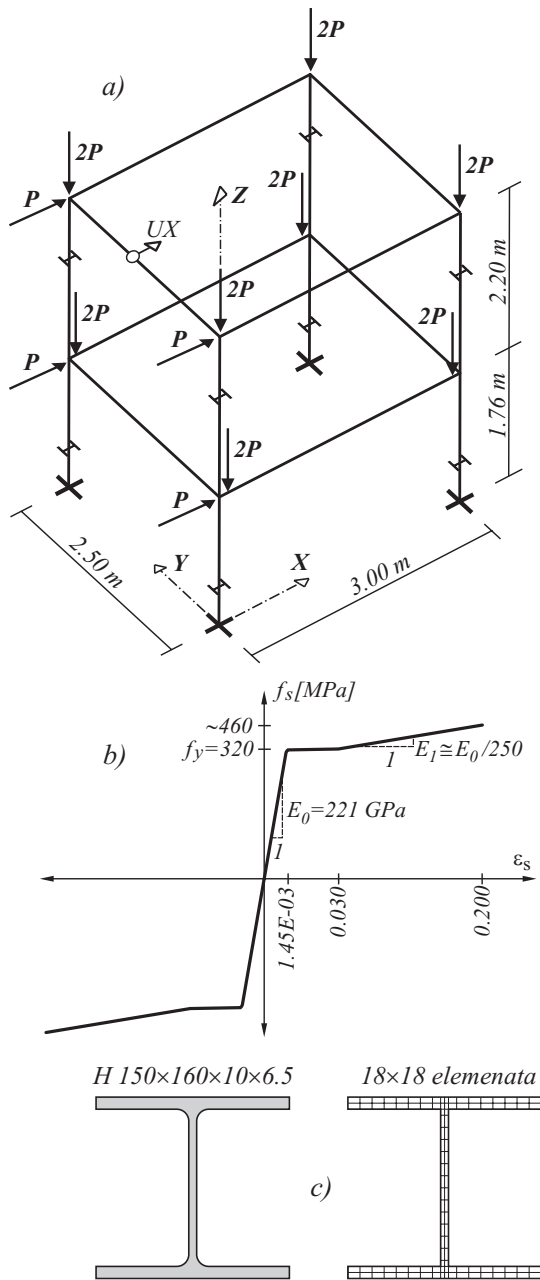
Na primjeru iz točke 2.7 ovog rada prikazana je ocjena točnosti kvantificiranjem pogreške uz varijaciju gustoće diskretizacije stupova i greda (slika 6.).

Na slici 6. uočljivo je kako se smanjenjem inkrementa opterećenja u limesu prema nuli (na ordinati) veličina faktora kritičnog opterećenja približava iznosu od 0,95 (na apscisi).

2.7 Usporedba s poznatim modelima

Usporedba ovdje prikazanoga numeričkog modela s primjerima iz literature načinjena je na dvoetažnom čeličnom prostornom okviru pri kombiniranom djelovanju vertikalnog i horizontalnog opterećenja. Geometrijski

oblik i položaj opterećenja prikazani su na slici 7.a. Naprezanje na granici popuštanja, Youngov modul i modul posmika iznose: $f_y = 320$ MPa, $E_0 = 221$ GPa and $G = 85$ GPa, a numerički model čelika prikazan je na slici 7.b. Svi elementi okvira (stupovi i grede) su od čeličnih profila H 150×160×10×6,5. Presjek je diskretiziran u ortogonalnoj mreži od 18×18 elemenata kako je prikazano na slici 7.c. Stupovi su diskretizirani s 5 konačnih elemenata, a grede sa 7 konačnih elemenata te je ukupan broj elemenata 96. Svi su konačni elementi sa po 6 stupnjeva slobode po čvoru.

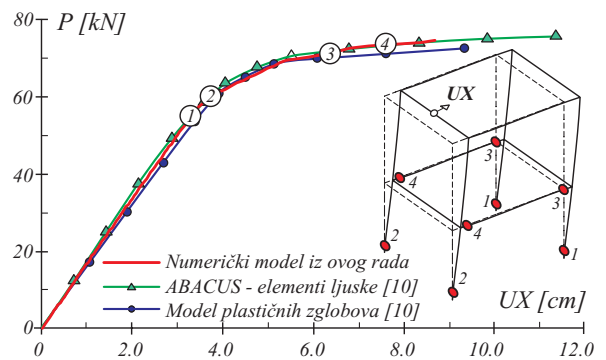


Slika 7. Okvir iz primjera 1.: (a) geometrijski podaci i opterećenje, (b) numerički model čelika, (c) diskretizacija poprečnog presjeka

Intenzitet koncentriranih sila (P i $2P$) istovremeno je povećavan od nultog iznosa sve do sloma, pri čemu je veličina inkrementa iznosila 1 % od slomnog opterećenja. Efekti uvrtnanja su beznačajni zbog simetrije u opterećenju, geometrijskom obliku i rubnim uvjetima.

Rezultati su uspoređeni s rezultatima dobivenim od Ngo-Huu i ostalih [21] koji su okvir analizirali: (i) prema modelu plastičnih zglobova i (ii) programom ABACUS uz diskretizaciju greda i stupova elementima ljuske te s uključenjem materijalne nelinearnosti po modelu plastičnih zona.

Putanja ravnoteže karakterističnog čvora na vrhu okvira i slijed nastanka plastičnih zglobova prikazani su na slici 8. Zbog kombiniranog djelovanja uzdužne tlačne sile i momenta savijanja prva plastifikacija presjeka se događa u podnožju stupova prvog kata na strani nasuprot djelovanju horizontalnih sila. Zatim se iz istih razloga plastificiraju stupovi na strani djelovanja horizontalnih sila, a potom i grede na spoju sa stupom. Sustav je u takvom stanju još uvijek kinematički stabilan, ali se zbog jako male krutosti pojavljuju veliki horizontalni pomaci stupova što progresivno povećava momente savijanja poradi velike ekscentričnosti vertikalnih sila ($2P$). Slom sustava nastaje pri $P \approx 75$ kN.



Slika 8. Putanja ravnoteže čvora na vrhu 2. etaže i slijed pojave plastičnih zglobova

Uočljivo je dobro slaganje putanje ravnoteže dobivene primjenom ovdje opisanog numeričkoga modela u usporedbi s putanjama ravnoteže objavljenim u literaturi [21].

U općem slučaju moguća je pojava izvjesnih neslaganja putanja ravnoteže, a u ovdje prikazanom modelu pogreške dolaze zbog gustoće globalne diskretizacije, gustoće diskretizacije poprečnog presjeka, veličine inkrementa opterećenja i gustoće opisa numeričkog modela materijala. Nadalje, dobro je poznato da na razini kritičnog opterećenja krutost sustava znatno pada, odnosno determinanta globalne matrice krutosti se približava nuli, te i malo povećanje intenziteta opterećenja prouzrokuje velike pomake čvorova okvira, što sve može rezul-

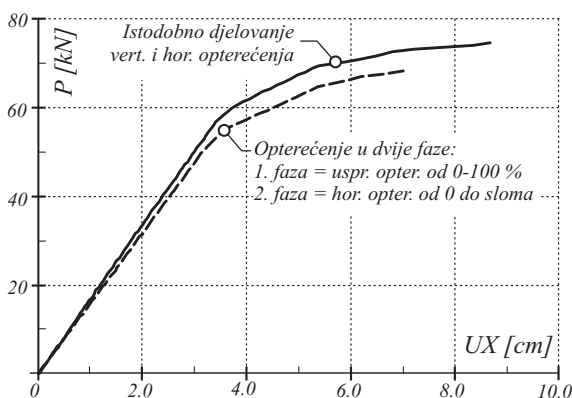
tirati većim razlikama u putanjama ravnoteže neposredno pred slom.

Istodobno inkrementalno povećanje vertikalnih i horizontalnih opterećenja od nultog pa do slomnog intenziteta na stvarnim konstrukcijama manje je vjerojatno. Najčešći je slučaj postupno povećavanje vertikalnog djelovanja (stalnog opterećenja) do punog intenziteta, nakon čega dolazi horizontalno djelovanje (vjetar, potres ili sl.).

Prostorni okvir iz prethodnog primjera izložen je stoga opterećenju u dvije faze, i to:

- u 1. fazi inkrementalno je povećavano vertikalno opterećenje od nultog iznosa do 100 % iznosa, odnosno do iznosa $2P = 150$ kN
- u 2. fazi inkrementalno je povećavano horizontalno opterećenje do sloma, pri čemu iznos vertikalnog opterećenja ostaje konstantan.

Usporedba putanja ravnoteže pri istodobnom inkrementalnom povećanju vertikalnih i horizontalnih sila s putanjom ravnoteže pri opterećivanju okvira u dvije faze prikazana je na slici 9.



Slika 9. Putanje ravnoteže za različiti slijed opterećivanja okvira

Pri opterećivanju u dvije faze dobivena putanja ravnoteže ukazuje na manju krutost sustava i manju vrijednost kritične sile u odnosu na istodobno inkrementalno povećanje vertikalnog i horizontalnog opterećenja. Nakon završetka 1. faze opterećenja u sustavu se pojavljuju unutarnje tlačne sile koje umanjuju krutost sustava, a osobito krutost na savijanje stupova, te pri postupnom povećanju horizontalnog opterećenja pomaci brže rastu i konačno izazivaju raniji slom sustava.

3 Primjena modela na nelinearni statički proračun potresnog djelovanja

Jedna od mogućih metoda dokaza potresne otpornosti betonskih konstrukcija prema Eurokodu 8 je i nelinearni statički proračun. Poseban slučaj je postupak postupnog

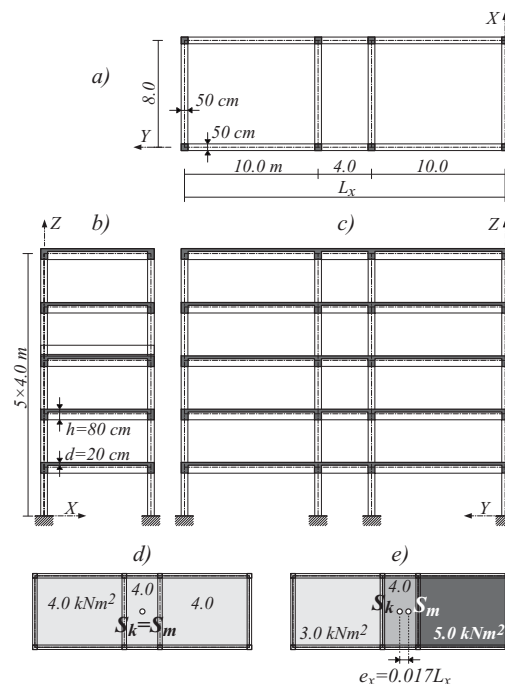
guranja. U tom se postupku predviđa nelinearna provjera nosive konstrukcije uz pretpostavku inkrementalnog nanošenja potresnog opterećenja kao statičkog, ali tek nakon što je na konstrukciju već postavljeno stalno opterećenje i potresu pripadni dio promjenjivog opterećenja. Potresno opterećenje nanosi se do faze stvaranja mehanizma sloma i/ili gubitka stabilnosti. Primjena nelinearnog proračuna uopće podrazumijeva da su unaprijed poznate dimenzije elemenata i svojstva materijala. Definišu se dva zasebna oblika potresnog opterećenja prema metodi N2 [22, 23]. Prvi put prema ubrzanju masa dobivenih iz prvog vlastitog vektora, a drugi put prema jednolikom ubrzanju za sve mase. Primjena postupka na primjeru višekatne zgrade od armiranobetonskih okvira prikazana je u [24].

U nastavku se izlaže slučaj sa silama na bazi ubrzanja iz prvog vlastitog vektora. Pokazano je da jednostavan način dokaza zadovoljava kriterij ciljanog pomaka. U tu je svrhu potrebno konstruirati putanju ravnoteže, odnosno krivulju nosivosti jednoga karakterističnog pomaka što numerički model izložen u ovom radu omogućava.

3.1 Primjeri

Primjer 1.: Krivulje nosivosti prostornog okvira

Prikazan je primjer armiranobetonske konstrukcije peterokatnog okvira (slika 10.). Dimenzije poprečnih presjeka stupova su 50×50 cm, greda $50 \times (60 + 20)$; debljina međukatnih armiranobetonskih ploča je 20 cm.

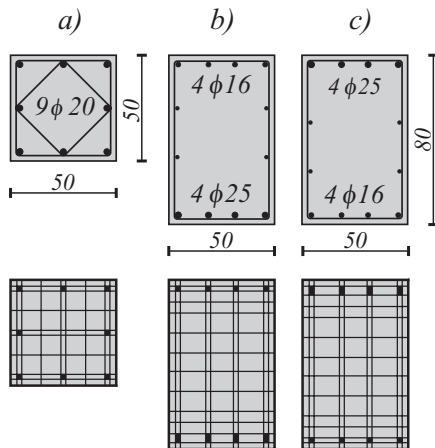


Slika 10. Okvir iz primjera 1.: a) tlocrt, b) poprečni presjek, c) uzdužni presjek i plošno opterećenje; d) simetrično opterećenje; e) nesimetrično opterećenje

Stupovi su od betona C40/50, a grede i ploče od betona C30/37. Svi presjeci su armirani čelikom B500 (numerički model na slici 12.b). Opterećenje vlastitom težinom određeno je dimenzijama elemenata i obujamskom masom armiranoga betona od $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$. Zadaju se dva slučaja djelovanja dodatnog opterećenja po međukatnim pločama:

- i) simetrično djelovanje po svim međukatnim pločama u iznosu od $4,0 \text{ kN/m}^2$ pri čemu se podudaraju središte masa i središte krutosti (slika 10.d) i
- ii) nesimetrično djelovanje iznosima od $3,0/4,0/5,0 \text{ kN/m}^2$ (slika 10.e) pri čemu se javlja blaga ekscentričnost u smjeru osi x od $e_x = 0,017 L_x$, kako je prikazano na slici 11.e.

Presjeci su armirani i diskretizirani u ortogonalnoj mreži kako je prikazano na slici 11.



Slika 11. Diskretizacija poprečnih presjeka: a) stupovi, b) grede u polju; c) grede pri stupu

Model betona u tlaku uzet je prema izrazu iz EN 1992-1-1 [24]

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad (8)$$

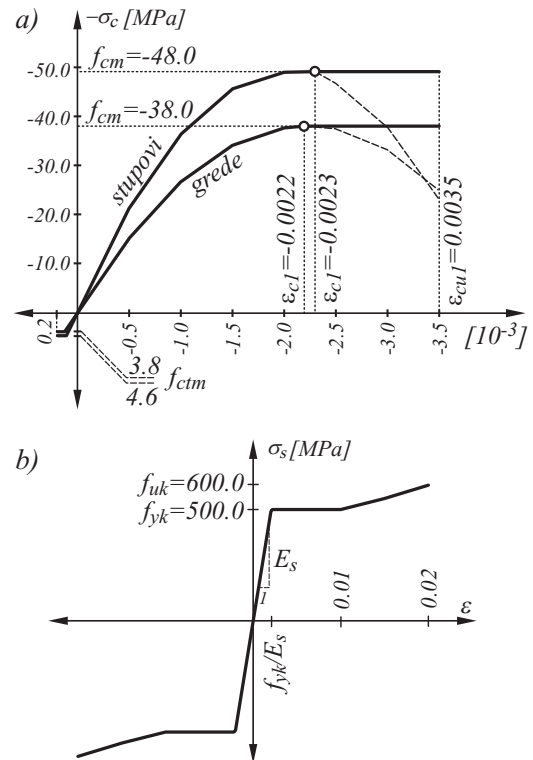
gdje je:

$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)}$; $\eta = \epsilon_c / \epsilon_{c1}$; $k = 1,05 E_{cm} \times \epsilon_{c1} / f_{cm}$, a u vlačnom području je linearan do čvrstoće $f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$, odnosno $3,5 \text{ MPa}$ (slika 12.a).

Dinamički proračun za zadani sustav, sve promatrano na razini početnih modula materijala, daje vrijednosti perioda prvoga vlastitog vektora $T_{1,sim} = 1,062 \text{ s}$ za simetričan sustav i $T_{1,nes} = 1,057 \text{ s}$ za nesimetričan sustav.

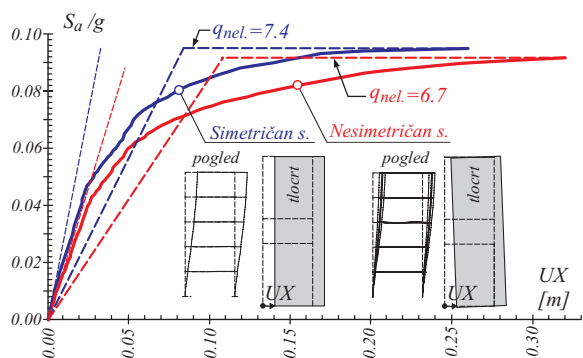
Ukupna horizontalna potresna sila raspodijeljena je prema ordinatama prvih vlastitih vektora simetričnog i nesimetričnog sustava u smjeru globalne osi X . Odzivi mo-

delu prate se na putanjama ravnoteže karakterističnog čvora. Na apscisi se prati pomak vrha okvira u smjeru globalne osi X , pri monotono rastućem intenzitetu horizontalne potresne sile izražene normaliziranim spektralnim ubrzanjem (S_d/g). U svakom od prvih vektora sadržana je ukupna oscilirajuća masa cijelog modela. Model se u inkrementalnom postupku u prvoj fazi opterećuje do punog iznosa vertikalnog opterećenja, a zatim započinje postupno guranje horizontalnog opterećenja od potresa – sve do sloma modela.



Slika 12. Numerički modeli: a) betona; b) armature

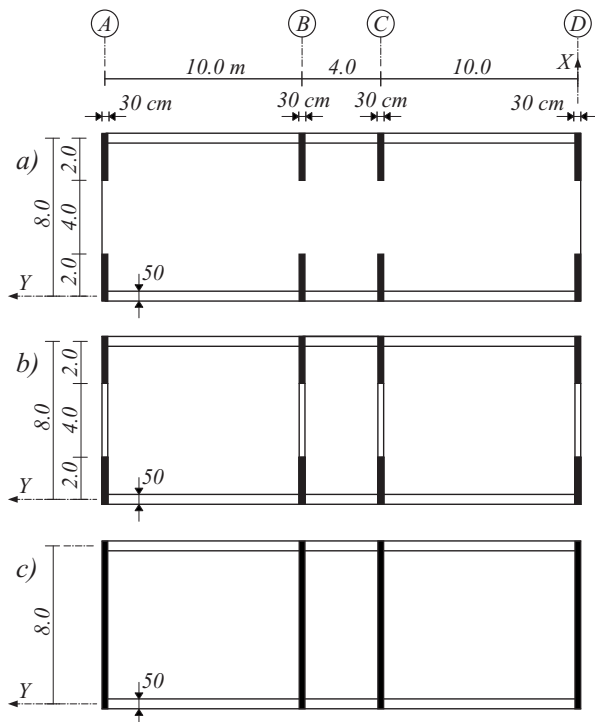
Simetrično opterećen okvir ima nosivost do iznosa horizontalne sile potresa koja odgovara ubrzanju od $0,095g$, a nesimetrično opterećen okvir gubi nosivost pri djelovanju od $0,090g$ (slika 13.), ali uz znatno veće pomake, uz istu razinu djelovanja potresa. Vrijedno je zapaziti kako je ekscentričnost od samo $1,7 \%$ (minimalna slučajna ekscentričnost po Eurokodu 8 iznosi 5%) izazvala pad nosivosti za više od 5% . Nadalje, iz krivulje nosivosti može se izlučiti koliki je faktor ponašanja q cjelovite konstrukcije, uz uzimanje u obzir svih nelinearnih učinaka. On je zapravo omjer slomnog pomaka prema onom na granici elastičnosti. S obzirom da se radi o numeričkom pokusu, slomni je pomak relativno nesigurna veličina, ali ipak na strani sigurnosti, tako da i ovako iskazan faktor ponašanja treba shvatiti uvjetno. Zbog toga su na crtežima označeni sa q_{nel} te za simetrični okvir q_{nel} iznosi $7,4$, a nesimetrični $6,7$.



Slika 13. Krivulje nosivosti vrha okvira za simetričan i nesimetričan raspored masa

Primjer 2.: Krivulje nosivosti zidnih sustava

Radi usporedbe ponašanja okvira i zidnih sustava u zadaci potresne otpornosti, prostorni okvir iz prethodnog primjera uspoređuje se s ponašanjem triju tipova zidnih sustava: od nepovezanih zidova (slika 14.a i 15.a), zidova povezanih s krutim prečkama (slike 14.b i 15.b) i pojedinačnih zidova (slike 14.c i 15.c). Prate se odzivi sustava za djelovanje potresa u poprečnom smjeru (smjeru globalne osi X).



Slika 14. Tlocrtni raspored i dimenzije zidova

Vertikalno se djelovanje na zidne sustave sastoji od vlastite težine elemenata konstrukcije i plošnog opterećenja po svim međukratnim pločama u iznosu od 4,0 kN/m².

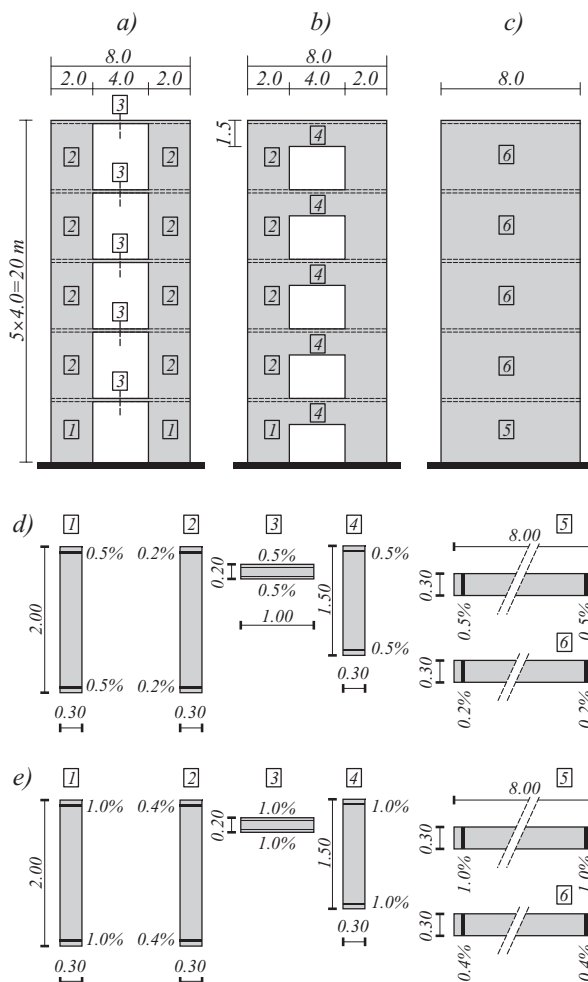
Veličina ukupne horizontalne sile potresa određena je prema normaliziranom spektralnom ubrzanju (S_g/g) i ukupnoj težini modela.

Veličine perioda prvih vlastitih vektora sustava zidova proračunanih na razini početnih modula materijala prikazane su u tablici 2.

Tablica 2. Podaci o sustavima zidova

	Nepovezani zidovi (slika 15.a)	Povezani zidovi (slika 15.b)	Samostalni zidovi (slika 15.c)
Periodi 1. vlastitih vektora	$T_1 = 0,69$ s	$T_1 = 0,26$ s	$T_1 = 0,20$ s

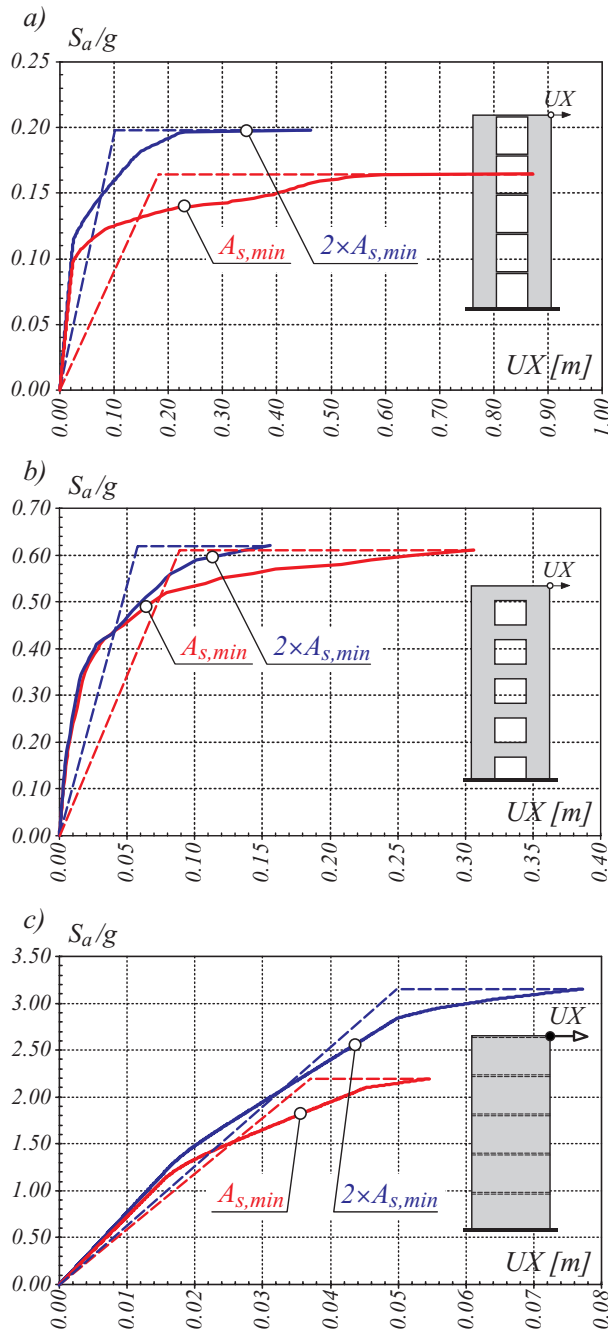
Dimenzije poprečnih presjeka i armiranje zidova prikazani su na slici 15. Svaki zid analizira se za armiranje presjeka minimalnom armaturom (slika 15.d) i dvostrukim iznosom minimalne armature (slika 15.e).



Slika 15. Armatura zidova: a) nepovezani zidovi, b) povezani zidovi, c) samostalni zidovi, d) armiranje minimalnom armaturom, e) armiranje dvostrukim iznosom minimalne armature

Svaki od pojedinih tipova zida opterećuje se u inkrementalnom postupku vertikalnim opterećenjem od nultog intenziteta do punog, a horizontalno opterećenje od potresa povećava se od nultog intenziteta do gubitka nosivosti zida koji je određen nultom krutosti na putanji ravnoteže.

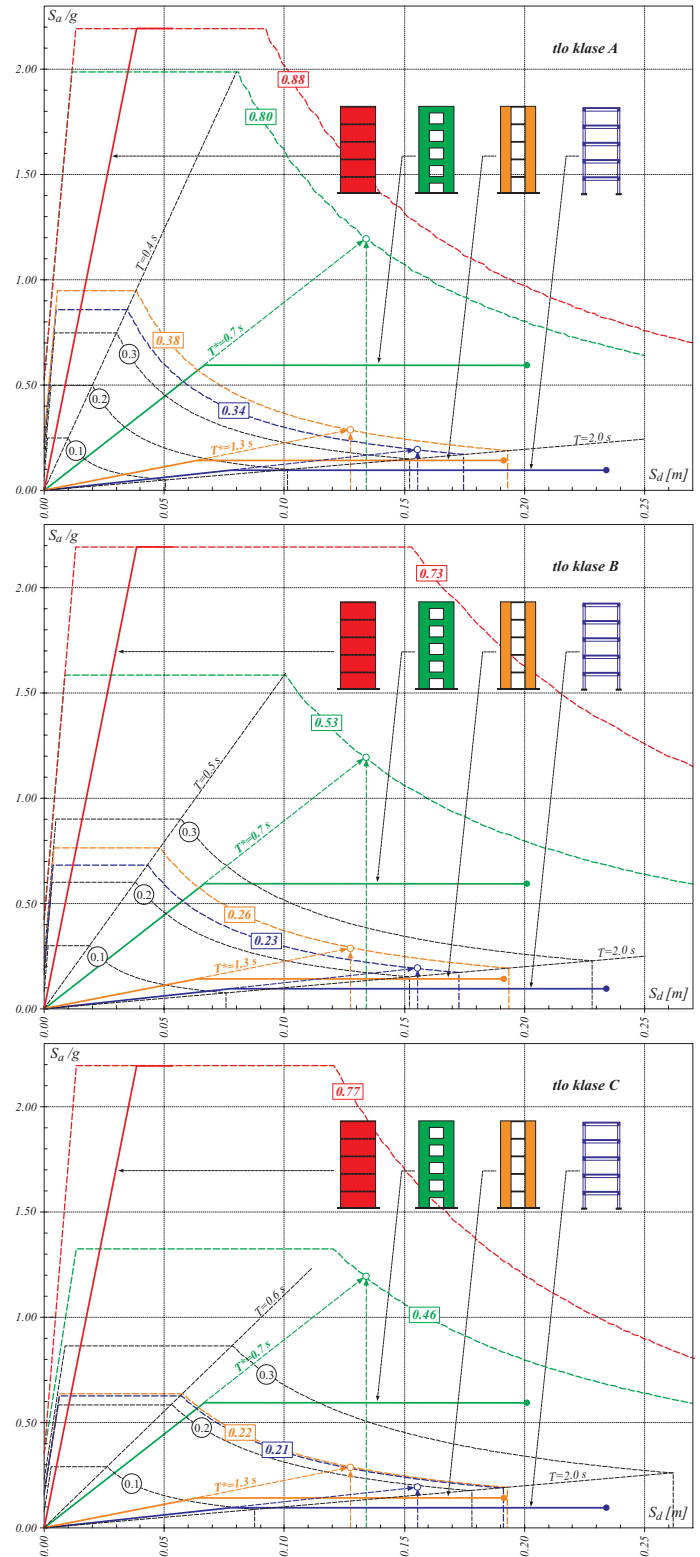
U nastavku su prikazani odzivi pojedinih tipova zidova posredstvom krivulje nosivosti (slika 16.).



Slika 16. Krivulja nosivosti zidova: a) nepovezani zidovi, b) povezani zidovi, c) samostalni zidovi

3.2 Nosivost sustava postupkom ciljanog pomaka

Sukladno Eurokodu 8, dokazivanje veličine ciljanog pomaka odvija se svođenjem višestupnjavnog sustava (VS)



Slika 17. Nosivost sustava postupkom ciljanih pomaka

na ekvivalentni jednostupnjevni sustav (JS). Postupak svođenja detaljno je prikazan u EN 1998-1: 2004, Prilog B [26]. Grafički prikaz procedure odvija se u formatu spektralno ubrzanje - spektralni pomak u kojem se prikazuje krivulja nosivosti ekvivalentnog JS. Kao pokazni primjer u ovom radu prati se VS simetričnog okvira iz primjera 1. i njegovo svođenje na JS za slučaj ubrzanja triju razreda temeljnog tla (A, B i C), kao što je prikazano na slici 17. Redukcija krivulje nosivosti VS na ekvivalentni JS ovisi o čvoru VS koji se odabere za referentni. Eurocode 8 u slučaju konstrukcija zgrada preporučuje čvor konstrukcije krova u kojem se nalazi vertikalna središta masa konstrukcije. U ovom slučaju to je točka u kojoj je već prethodno konstruirana krivulja nosivosti.

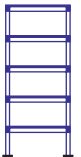



Za nastavak postupka mjerodavna je elasto-plastična krivulja nosivosti u kojoj je dan vlastiti period T^* . Za srednje krute i mekane sustave $T^* > T_C$ vrijedi ograničenje da najveći pomak, u ovom je slučaju to i kontrolni pomak, ne može biti veći od trostrukog pomaka na granici elastičnosti. Ovime je ograničen i ciljani pomak na dvije trećine kontrolnog pomaka.

U sjecištu pravca T^* i ordinate ciljanog pomaka, za konkretni odabrani razred temeljnog tla može se provući odgovarajući dijagram spektralno ubrzanje-spektralni pomak. Ishodište tog dijagrama pokazuje koje ubrzanje temeljnog tla promatrani sustav zadovoljava.

Slično se provodi dokaz za krute sustave sa $T^* < T_C$.

Na slici 17. prikazani su rezultati provedenog postupka za četiri promatrana sustava i tri razreda temeljnog tla A, B i C. U uokvirenim pravokutnicima prikazane su vrijednosti a_{gr} koje zadovoljava pojedini sustav. Izvadak rezultata prikazan je u tablici 3.

Tablica 3. Sažeti podaci o nosivosti sustava

Klasa tla	Sustav			
				
A	0,34	0,38	0,80	0,88
B	0,23	0,26	0,53	0,73
C	0,21	0,22	0,46	0,77

Praktična primjena metode krivulje nosivosti i ciljanog pomaka dovodi do kontradiktornih zahtjeva. Velika je duktilnost poželjna zbog znatne redukcije potresnih sila, a istodobno velika duktilnost znači veliku deformabilnost sustava i velike relativne pomake unutar pojedinih

katova. U stvarnom potresnom događaju veliki pomaci katova znače veliku materijalnu štetu završnih radova i opreme većine zgrada. Stoga u vrednovanju kvalitete rješenja potresne otpornosti treba svakako imati na umu ovaj bitni zahtjev - ograničenje oštećenja za promatranu razinu potresnog ubrzanja.

U promatranim primjerima deformabilnost okvirnog sustava i sustava dvaju samostalnih zidova na temeljnom tlu razreda A iznosi oko 0,75 % ili 3 cm po katu visine 4,0 m. S gledišta očuvanja imovine takvi su pomaci teško prihvatljivi.

Materijalno ulaganje u potresnu zaštitu mora biti na razini očuvanja građevine od štete nastale odgovarajućim potresnim djelovanjem. Ako je stanje suprotno, primijenjena potresna otpornost je neprimjerena ili, jednostavnije rečeno, odabrani konstrukcijski sustav nije prihvatljiv. Aktualno stanje potresne otpornosti zgrada prema Eurokodu 8 i nacionalnim seizmološkim podacima uvelike mijenja stečene navike u kreaciji konstrukcija jer su pojedini sustavi jednostavno neracionalni. Toga moraju biti svjesni inženjeri konstruktori što, naravno, neće biti dovoljno ako se s istim kriterijima ne budu služili i arhitekti, a to upućuje na nužnost timskog rada u ranim počecima projektiranja svake zgrade.

4 Zaključci

Predstavljen je originalni numerički model za statički materijalno i geometrijski nelinearni proračun prostornih konstrukcija s naglaskom na linijske konstrukcije.

Moguće je zadavanje širokog spektra vrsta materijala i oblika homogenih i kompozitnih presjeka linijskih elemenata čije se pojedinačno mehaničko ponašanje opisuje zadavanjem proizvoljnog jednoosnog σ - ε dijagrama i u tlačnom i u vlačnom području.

Posebnost modela sastoji se u originalnom pristupu utvrđivanju krutosti presjeka i elemenata pri uvrtnju sa spriječenim izobličenjem i bez njega, uvođenjem tehnike usporednog tijela.

Opisan je jednostavan numerički postupak ocjene točnosti nelinearne analize na konkretnom zadatku uspostavljen na temelju serije proračuna uz varijaciju gustoće diskretizacije elemenata.

Prikazana je mogućnost modela za različiti slijed nanošenja opterećenja i razlika u rješenjima u slučaju istodobnosti i zastopnosti dvaju opterećenja (stalnog i djelovanja vjetra ili potresa).

Pokazana je primjena modela na statički nelinearne metode proračuna uvedene europskom normom Eurokod 8 u dokazima potresne otpornosti konstrukcija. Predstavljeni nelinearni numerički model prostornih konstrukcija

predstavlja snažan alat za parametarske analize i vrednovanja međusobno usporedivih konstrukcija u potresnim uvjetima.

Usporedba rezultata statičkog nelinearnog proračuna i postupka ciljanog pomaka sukladno Eurokodu 8 na četiri različita konstrukcijska sustava zgrade istih gabarita i masa pokazuje vidne razlike u vrednovanju konstrukcijskih sustava. S gledišta smanjenja potresnih sila pre

poručljivi su deformabilni i time duktilni sustavi, dok su sa gledišta smanjenih pomaka i deformacija uz veće potresne sile preporučljivi kruti sustavi. Pravu inženjersku mjeru mogu dati samo analize potrebnog ulaganja u potresnu zaštitu. Pod ulaganjem se podrazumijeva ulaganje u konstrukcijski sustav, ali i ulaganja u otklanjanje oštećenja koja bi nakon djelovanja trebalo ukloniti. Ovo navodi na potrebu razvoja teorije potresnog rizika kao discipline i to za konkretne uvjete građenja u Hrvatskoj.

ZAHVALA

Istraživanje prikazano u ovome radu je provedeno u sklopu znanstvenog projekta *Modeliranje granične nosivosti i stabilnosti konstrukcija pri velikim pomacima* koje je financiralo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa Republike Hrvatske. Autori se zahvaljuju na potpori.

LITERATURA

- [1] Ngo, D.; Scordelis, A.C.: *Finite element analysis for reinforced concrete beams*, ACI Journal 64 (1967), 152-163.
- [2] Wood, R.D.; Zienkiewicz, O.C.: *Geometrically nonlinear finite element analysis of beams, frames, arches and axisymmetric shells*: Computers & Structures, 7 (1977) 6, 725-735.
- [3] Argyris, J.H.; Dunne, P.C.; Scharpf, D.W.: *On large displacement-small strain analysis of structures with rotational degrees of freedom*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 14 (1978) 3, 401-451.
- [4] Argyris, J.H.; Hilpert, O.; Malejannakis, G.A.; Scharpf, D.W.: *On the geometrical stiffness of a beam in space-a consistent V.W. approach*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 20 (1979) 1, 105-131.
- [5] Bathe, K.-J.; Bolourchi, S.: *Large displacement analysis of three-dimensional beam structures*, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 14 (1979) 7, 961-986.
- [6] Orbison, J.G.; McGuire, W.; Abel, J.F.: *Yield surface applications in nonlinear steel frame analysis*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 33 (1982) 1-3, 557-573.
- [7] Scordelis, A.C.: *Computer models for nonlinear analysis of reinforced and prestressed concrete structures*, Journal of the Prestressed Concrete Institute, 29 (1984) 6, 116-135.
- [8] El-Metwally, S.E.: *Nonlinear analysis of reinforced concrete frames*, Ph.D. Thesis, Purdue University, SAD, 1986.
- [9] Chan, Siu Lai: *Geometric and material non-linear analysis of beam-columns and frames using the minimum residual displacement method*, International Journal for Numerical Methods in Engineering 26 (1988) 12, 2657-2669.
- [10] Mang, H.A.; Meschke, G.: *Nonlinear finite element analysis of reinforced and prestressed concrete structures*, Engineering Structures, 13 (1991) 2, 211-26.
- [11] Izzuddin, B.A.: *Conceptual issues in geometrically nonlinear analysis of 3D framed structures*, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 191 (2001) 8-10, 1029-1053.
- [12] Izzuddin, B.A.; D. Lloyd, Smith: *Efficient nonlinear analysis of elasto-plastic 3d r/c frames using adaptive techniques*, Computers and Structures 78 (2000) 4, 549-573.
- [13] Cocchi, G.M.; Volpi, M.: *Inelastic analysis of reinforced concrete beams subjected to combined torsion, flexural and axial loads*, Computers and Structures, 61 (1996) 3, 479-494.
- [14] Valipour, H.R.; Foster, S.J.: *Nonlinear reinforced concrete frame element with torsion*, Engineering Structures, 32 (2010) 4, 988-1002.
- [15] Mihanović, A.; Schönauer, M.: *Numerički model stabilnosti okvirnih konstrukcija s materijalnom i geometrijskom nelinearnošću*, Inženjersko modeliranje, 4 (1991) 1-4, 27-33.
- [16] Ožbolt, J.; Dvornik, J.: *Computer program for nonlinear analysis of combined space frame and cable structures on a microcomputer*, International Conference on Computer Applications in Concrete, Singapore, 1986.
- [17] Trogrlić B.; Mihanović A.: *The comparative body model in material and geometric nonlinear analysis of space R/C frames*, Engineering Computations 25 (2008) 2, 155-171.
- [18] Trogrlić, B.: *Nelinearni numerički model stabilnosti i nosivosti prostornih armirano betonskih linijskih konstrukcija*, disertacija, Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet, Split, 2003.
- [19] Akmađić, V.: *Model velikih pomaka u analizi plošnih i linijskih konstrukcija*, Disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Mostaru, Mostar, 2008.
- [20] Mihanović, A.; Marović, P.; Dvornik, J.: *Nelinearni proračuni armiranobetonskih konstrukcija*, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Zagreb, 1993.
- [21] Ngo-Huu, C.; Kim, S.E.; Oh, J.R.: *Nonlinear analysis of space steel frames using fiber plastic hinge concept*, Engineering Structures 29 (2007) 4, 649-657.
- [22] Fajfar, P.: *A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design*, Earthquake Spectra, 16 (2000), 3, 573-592.
- [23] Fajfar, P.: *Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics 28 (1999), 979-993.
- [24] Mitrović, S.; Čaušević, M.: *Nelinearni statički seizmički proračuni konstrukcija*, Građevinar 61 (2009) 6, 521-531.
- [25] Eurocode 2 - Design of concrete structures - Part 1.1: General rules and rules for buildings, CEN, Brussels, 2004.
- [26] Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - EN 1998-1: 2004, CEN, Brussels, 2004.