



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Žygimantas Riauba

**RĖMINIŲ KONSTRUKCIJŲ JAUTRUMO ANTROSIOS EILĖS
EFEKTAMS BEI ANTROSIOS EILĖS POVEIKIUS
VERTINANČIŲ METODŲ TYRIMAS**

**STUDY OF SENSITIVITY OF FRAME STRUCTURES TO
SECOND ORDER EFFECTS AND ANALYSIS OF METHODS
EVALUATING THESE EFFECTS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vilnius, 2017

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir medinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 1
Data 2016 – 06 – 01

Statinių konstrukcijų studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Rėminių konstrukcijų jautrumo antrosios eilės efektams bei antrosios eilės poveikius vertinančių metodų tyrimas**

Autorius **Žygimantas Riauba**

Vadovas doc. dr. **Kęstutis Urbonas**

Kalba

lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami antrosios eilės poveikiai plieninėse rėminėse konstrukcijose. Išnagrinėjus LST EN 1993-1-1 buvo parengtas visuminės analizės atlikimo algoritmas, kuriame, priklausomai nuo nuokrypų ir analizės tipo, išskiriami metodai atsižvelgiantys į antrosios eilės poveikius. Remiantis šiuo algoritmu trims nagrinėjamų metodikų problematiką paryškinantiems rėmams atliekama visuminė (bendroji) analizė metodikomis, vertinančiomis antrosios eilės poveikius. Nustatomos šių metodų pritaikymo galimybės bei patikimumas atliekant kolonų skerspjūvių laikomosios galios patikrinimą, gautų įrąžų palyginimą bei pritaikymo paprastumą.

Taip pat nustatomas nagrinėjamų rėminių konstrukcijų jautrumas antrosios eilės poveikiams pagal LST EN 1993-1-1 bei AISC 360-16 metodikas. Nustatomas skaičiuojamasis (efektyvusis) kolonų ilgis remiantis analitinėmis STR ir NCCI metodikomis bei BEM klupumo analize. Nagrinėjami veiksniai darantys poveikį skaičiuojamajam ilgiui. Taip pat nagrinėjami bendrųjų P- Δ ir elemento P- δ nuokrypų pritaikymo ypatumai ir poveikis antrosios eilės įrąžoms.

Darbą sudaro įvadas, 4 pagrindiniai skyriai, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas ir priedai.

Darbo apimtis – 81 p. teksto be priedų, 48 iliustr., 22 lent., 23 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: visuminė analizė, antrosios eilės analizė, baigtinių elementų metodas, skaičiuojamasis kolonos ilgis, jautrumas antrosios eilės poveikiams.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Steel and Timber Structures

ISBN ISSN
Copies No. 1
Date 2016 – 06 – 01

Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis

Title: **Study of sensitivity of frame structures to second order effects and analysis of methods evaluating these effects**

Author **Žygimantas Riauba**

Academic supervisor Assoc Prof Dr **Kęstutis Urbonas**

Thesis language
lithuanian

Annotation

The focus of this Master's thesis has been on a second order effects in steel frames. Algorithm of structural (global) analysis has been prepared according to LST EN 1993-1-1. In this algorithm methods that take second order effects into account depending on imperfection and analysis type has been distinguished. According to this algorithm structural analysis has been carried out for three frames that expose drawbacks in analysed methods. Possibilities of application and reliability of these methods are explored by carrying out cross section check, comparison of second order internal forces and comparison of effectiveness of application.

Additionally check of sensitivity to second order effects are carried out for analysed frames according to LST EN 1993-1-1 and AISC 360-16 methodologies. Effective length of columns in analysed frames are calculated by STR and NCCI methodologies and FEM buckling analysis. Factors that influence effective length of a column are analysed. Also application of sway $P-\Delta$ and local bow $P-\delta$ imperfections and influence of these imperfections to second order effects are analysed.

Structure: introduction, 4 main chapters, conclusions and suggestions, references, appendixes.

Thesis consist of: 81 p. text without appendixes, 48 pictures, 22 tables, 23 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: structural analysis, second order analysis, finite element method, effective length of a column, sensitivity to second order effects.

TURINYS

IVADAS	12
1. RĖMINIŲ KONSTRUKCIJŲ ANALIZĖ	14
1.1. Neutralioji pusiausvyra	14
1.2. Gniuždomų elementų stabilumas	14
1.3. Rėminių konstrukcijų stabilumas	16
1.4. Skaičiuojamojo (efektyviojo) kolonos ilgio μ samprata	19
1.5. Antrosios eilės teorija	19
2. SKAIČIAVIMO METODIKOS	21
2.1. Rėminių konstrukcijų jautrumas antrosios eilės poveikiams	21
2.1.1. Pagal LST EN 1993-1-1	21
2.1.2. Pagal AISC 360-16	22
2.2. Visuminės analizė pagal Eurokodą 3	24
2.2.1. Visuminės (bendrosios) analizės algoritmas pagal LST EN 1993-1-1	24
2.2.2. 1 metodas – lygiavertės kolonos metodas	27
2.2.3. 2 metodas – visuminė analizė iš dalies atsižvelgiant į nuokrypas, o iš dalies – tikrinant atskirų elementų pastovumą	27
2.2.4. 3 metodas – antrosios eilės analizė pilnai įvertinant nuokrypas	29
2.3. Nuokrypų modeliavimas	29
2.3.1. Lygiavertė nuokrypa pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu (EHF) arba algoritme (3a)	30
2.3.2. Tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (EUGLI) arba algoritme (3b)	32
2.4. Baigtinių elementų metodas (BEM)	33
2.5. Skaičiuojamojo kolonos ilgio nustatymo metodikos	34
3. SKAIČIUOJAMOJO KOLONOS ILGIO NUSTATYMAS	38
3.1. Veiksniai, darantys poveikį skaičiuojamajam kolonos ilgiui	38
3.1.1. Netolygus rėmo kolonų apkrovimas	39
3.1.2. Sijos standumo poveikis esant išskirstytai apkrovai	42
3.1.3. Aukštų skaičius	44
3.1.4. Tarpatramių skaičius	45
3.2. Metodikų pritaikymo pavyzdžiai	47
3.2.1. Vogel (1985) daugiaaukštis standus rėmas	47
3.2.2. Atraminis rėmas pagal Maleck (2001)	49

3.2.3.	Webber (2015) rėmas su laisvąja kolona.....	50
3.2.4.	Daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001).....	51
4.	ANTROSIOS EILĖS POVEIKIAI	53
4.1.	Rėmų jautrumo antrosios eilės poveikiams nustatymas	53
4.1.1.	Pagal LST EN 1993-1-1 metodika	53
4.1.2.	Pagal AISC 360-16 metodika	56
4.2.	Nuokrypų pritaikymas	61
4.2.1.	Nuokrypos lygiavertėmis horizontaliomis jėgomis (EHF) skaičiavimas	61
4.2.2.	Tampriosios kritinio klupumo formos η_{cr} kaip vienintelės bendrosios ir vietinės nuokrypos (EUGLI) skaičiavimas	62
4.2.3.	Nuokrypų įvertinimo būdų palyginimas.....	64
4.3.	Antrosios eilės poveikius vertinančių metodikų palyginimas	67
4.3.1.	Vogel (1985) daugiaaukštis standus rėmas	67
4.3.2.	Daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001).....	71
4.3.3.	Atraminis rėmas pagal Maleck (2001)	74
	IŠVADOS IR SIŪLYMAI	77
	LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	80
	A PRIEDAS.....	82

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Pusiausvyros būsenos (Yoo, Lee 2011)	14
1.2 pav. Idealios kolonos bei kolonos su nuokrypomis elgsena (Ziemian 2010)	15
1.3 pav. Lanksčiai įtvirtinta, centriškai apkrauta kolona	15
1.4 pav. Eksperimentiniai realių elementų bandymų duomenys (pagal da Silva <i>et al.</i> 2016) .	16
1.5 pav. Suvaržytas rėmas (Yoo, Lee 2011)	17
1.6 pav. Nesuvaržytas rėmas (Yoo, Lee 2011)	18
1.7 pav. Rėmų klasifikacija (pagal da Silva <i>et al.</i> 2016).....	18
1.8 pav. Geometrinė skaičiuojamoji ilgio sąvokos interpretacija (Galambos, Surovek 2008)	19
1.9 pav. Antrosios eilės lenkimo momentai sukelti P- Δ ir P- δ poveikių (pagal Ziemian 2010)	20
2.1 pav. Visuminės analizės algoritmas	26
2.2 pav. Lygiaverčio pokrypio nuokrypos (Eurokodas 3 2005)	31
2.3 pav. Pradinių nuokrypų pakeitimas lygiavertėmis horizontaliomis jėgomis (Eurokodas 3 2005).....	31
2.4 pav. Modifikuotas Niutono – Rafsono prieaugio iteracinis metodas (Ziemian 2010).....	33
2.5 pav. Nomogramos skaičiuojamajam ilgiui gauti (NCCI 2005)	36
3.1 pav. Nagrinėjamas lankstu įtvirtintas tolygiai apkrautas (a) bei standus netolygiai apraustas (b) rėmai	39
3.2 pav. Klupumo forma ir atitinkantis ją skaičiuojamasis ilgis, gauti „SCIA Engineer“ programa	41
3.3 pav. Paslanki bei nepaslanki nagrinėjamų rėmų skaičiuojamosios schemas.....	42
3.4 pav. Pastovumo praradimo formos atitinkamai, kai $EI_s \ll EI_k$, $EI_s = EI_k$ bei $EI_s \gg EI_k$..	43
3.5 pav. Skaičiuojamojo ilgio priklausomybė nuo sijos įlinkio esant išskirstytai apkrovai	43
3.6 pav. Rėmo skaičiuojamoji schema bei pastovumo praradimo forma esant lankstams kaip kOLONŲ įtvirtinimo sąlygoms.....	44
3.7 pav. Nesuvaržytas trijų tarpatramių rėmas su pažymėta nagrinėjama kolona (pagal Markandu 2011)	45
3.8 pav. Rėmo stabilumo praradimo forma esant 4 tarpatramiams.....	45
3.9 pav. Rėmo stabilumo praradimo forma esant 6 tarpatramiams.....	45
3.10 pav. Skaičiuojamojo ilgio priklausomybė nuo tarpatramio ilgio bei aukšto aukščio santykio.....	46
3.11 pav. Vogel (1985) rėmo skaičiuojamoji schema.....	47

3.12 pav. Rėmo pastovumo praradimo forma bei skaičiuojamieji ilgiai gauti „SCIA Engineer“	48
3.13 pav. Atraminis rėmas (pagal Maleck 2001)	49
3.14 pav. Skaičiuojamieji ilgiai atitinkantys pirmą bei antrą pastovumo praradimo formas... ..	49
3.15 pav. Rėmų atitinkamai be laisvosios ir su laisvąja kolona skaičiuojamosios schemas	50
3.16 pav. Daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001).....	52
4.1 pav. Daugiaatramio vienaukščio rėmo pagal Maleck (2001) apkrovimo schema bei atitinkami horizontalūs poslinkiai gauti pirmosios eilės analize ir gauti α_{cr} koeficientai	53
4.2 pav. Daugiaaukščio standaus rėmo pagal Vogel (1985) apkrovimo schema bei atitinkami horizontalūs poslinkiai gauti pirmosios eilės analize	55
4.3 pav. Atraminio rėmo rėmo pagal Maleck (2001) apkrovimo schema bei ašinės jėgos gautos pirmosios eilės analize.....	56
4.4 pav. Daugiaatramio vienaukščio rėmo pagal Maleck (2001) apkrovimo schema, bei gauti B_1 ir B_2 koeficientai.....	57
4.5 pav. Koeficientai B_1 ir B_2 Vogel (1985) daugiaaukščiam standžiam rėmui	59
4.6 pav. Koeficientai B_1 ir B_2 atraminiam rėmui pagal Maleck (2001).....	60
4.7 pav. Nagrinėjamas standus rėmas	61
4.8 pav. Pradinės nuokrypos lygiavertėmis horizontaliosiomis jėgomis (EHF).....	62
4.9 pav. „SCIA Engineer“ gauta klupumo forma bei mazgų poslinkiai	63
4.10 pav. Tamprioji kritinio klupumo forma aprašyta ketvirtosios eilės polinomu „MS Excel“ programoje.....	63
4.11 pav. Antrosios eilės lenkimo momentai priklausomai nuo nuokrypos tipo	65
4.12 pav. Antrosios eilės lenkimo momentų pokytis priklausomai nuo nuokrypos tipo	66
4.13 pav. Vogel (1985) rėmo skaičiuojamoji schema bei antrosios eilės analize gautų deformacijų schema.....	68
4.14 pav. Kolonų K1, K2.1 ir K2.2 antrosios eilės lenkimo momentų skirtumas lyginant su pirmosios eilės rezultatais.....	69
4.15 pav. Daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001).....	72
4.16 pav. Kolonos K2 antrosios eilės lenkimo momentų skirtumas lyginant su pirmosios eilės rezultatais.....	72
4.17 pav. Atraminio rėmo pagal Maleck (2001) skaičiuojamoji schema bei antrosios eilės analize gauta deformacijų schemas	74
4.18 pav. Kolonų K2-K4 ir K1-K3 antrosios eilės lenkimo momentų skirtumas lyginant su pirmosios eilės rezultatais.....	75

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Skaičiuotinės elementų pradinio vietinio išlinkio e_0/L reikšmės (Eurokodas 3 2005)	31
2.2 lentelė. Skaičiuojamojo ilgio nustatymo metodikos	34
2.3 lentelė. Skaičiuojamojo ilgio koeficientai pagal STR (2005)	36
3.1 lentelė. Skaičiuojamasis kolonos ilgis esant netolygiam kolonų apkrovimui	41
3.2 lentelė. Skaičiuojamasis kolonų ilgis esant skirtingam aukštų skaičiui	44
3.3 lentelė. Skaičiuojamojo ilgio koeficientas priklausomai nuo tarpatramių skaičiaus	46
3.4 lentelė. Vogel (1985) daugiaaukščio standaus rėmo skaičiuojamieji ilgiai	48
3.5 lentelė. Atraminio rėmo pagal Maleck (2001) skaičiuojamieji kolonos ilgiai	50
3.6 lentelė. Webber (2015) rėmo su laisvąja kolona skaičiuojamojo ilgio rezultatai	51
3.7 lentelė. Daugiaatramio vienaukščio rėmo pagal Maleck (2001) skaičiuojamieji ilgiai	52
4.1 lentelė. Antrosios eilės lenkimo momentai gauti analize vertinančia $P-\Delta$ nuokrypas	64
4.2 lentelė. Antrosios eilės lenkimo momentai gauti analize vertinančia $P-\Delta$ bei $P-\delta$ nuokrypas	65
4.3 lentelė. Lenkimo momentai bei horizontalūs rėmo poslinkiai priklausomai nuo metodikos	68
4.4 lentelė. Kolonos K1 skerspjūvio laikomosios galios patikra	70
4.5 lentelė. Kolonos K2.1 skerspjūvio laikomosios galios patikra	70
4.6 lentelė. Kolonos K2.2 skerspjūvio laikomosios galios patikra	70
4.7 lentelė. Lenkimo momentai bei horizontalūs rėmo poslinkiai priklausomai nuo metodikos	72
4.8 lentelė. Kolonos K2 skerspjūvio laikomosios galios patikra	73
4.9 lentelė. Lenkimo momentai bei horizontalūs rėmo poslinkiai priklausomai nuo metodikos	75
4.10 lentelė. Kolonos K1 skerspjūvio laikomosios galios patikra	75
4.11 lentelė. Kolonos K2 skerspjūvio laikomosios galios patikra	76
A.1 lentelė. Kolonos K1 laikomoji galia	86

IVADAS

Tiriamoji problema

Plieninės konstrukcijos, lyginant su kitomis, yra liaunos, tai lemia, jog dažnai ne konstrukcijos stiprumas, o pastovumas yra lemiamas veiksnys projektuojant šią konstrukciją. Plieninių konstrukcijų liaunumas lemia ir tai, jog jos gali būti jautrios antrosios eilės poveikiams. Antrosios eilės poveikių analizė skiriasi nuo pirmosios tuo, kad vertinami jau deformuotos konstrukcijos poslinkiai bei įrąžos. LST EN 1993-1-1 nurodoma, jog į deformuotos geometrijos veiksnius (antrosios eilės veiksniai) turi būti atsižvelgiama, jeigu jie gerokai padidina įrąžas arba reikšmingai keičia konstrukcijos elgseną.

LST EN 1993-1-1 apibrėžiami trys metodai, kaip galima įvertinti antrosios eilės poveikius:

- 1) Abiem atvejais taikant vien visuminę analizę (tiek lokaliai, tiek globaliam lygyje);
- 2) Iš dalies taikant visuminę analizę, o iš dalies – tikrinant atskirų elementų pastovumą pagal 6.3 nuostatas;
- 3) Pagrindiniais (nesudėtingais) atvejais – tikrinant atskirus lygiaverčius elementus pagal 6.3 skyriaus nuostatas, kai remiamasi atitinkamais klumpamaisiais (skaičiuojamaisiais) ilgiais pagal bendrąją klumpumo formą.

Praktikoje dažniausia projektuojama pirmiausia atliekant pirmosios eilės visuminę analizę, po to analitinėmis išraiškomis tikrinama skerspjuvių laikomąją galia (trečiasis – lygiavertės kolonos metodas). Pastarasis projektavimo metodas yra pagrįstas aukštų ir plokštumų (rėmo, iš rėmo plokštumos) prielaidomis, o tai yra tam tikras konstrukcijų architektūros apribojimas. Metodika buvo sukurta supaprastinti skaičiavimą tipiniams statiniams, dar tais laikais, kai kompiuteriai nebuvo naudojami projektavimui. Tačiau ir iki šiol šis metodas yra itin populiarus, nors techninės galimybės leidžia atlikti detalesnę analizę (pirmas metodas arba tarpinis variantas – antras metodas). Lygiavertės kolonos metodo populiarumas bei antrosios eilės analizės progreso trūkumas taip pat atitolina BIM ateities viziją, kuomet viename konstrukcijos modelyje, atliekant analizę būtų įvertinamos visos stabilumo praradimo formos ir elementų sąveika. Po to iš šio modelio gaunami brėžiniai, taip apjungiant šiuo metu egzistuojantį skaičiavimo ir braižymo modelių suskirstymą bei komplikotą konvertavimą. Perėjus prie tokios sistemos būtų galima atsisakyti atskirų elementų projektavimo analitinėmis išraiškomis, kadangi visi poveikiai būtų vertinami pačioje analizėje.

Darbo aktualumas

Išnagrinėjus LST EN 1993-1-1 akivaizdu, kad normose paliekama daug laisvės pačiam projektuotojui nuspręsti koku būdu įvertinti antrosios eilės poveikius. Taip pat, minėtieji metodai nėra detalai paaiškinti, egzistuoja klaidų normose. Trūksta šių metodų pritaikymo ir nuokrypų modeliavimo patirties. Šios priežastys apsunkina antrosios eilės analizės pritaikymą, todėl ši nėra plačiai taikomi praktikoje, nors kai kuriais atvejais su ja galima gauti efektyvesnius ar saugesnius sprendinius. Todėl šiame darbe pasirenkama nagrinėti minėtųjų metodikų pritaikymo galimybes. Iš to gaunamas **darbo tikslas** - nustatyti metodus, kurie leidžia patikrinti konstrukcijos jautrumą antrosios eilės poveikiams, ir metodus, kurie šiuos poveikius įvertina pritaikymo galimybes bei patikimumą.

Tiriamasis objektas – antrosios eilės poveikiai plieninėse rėminėse konstrukcijose.

Siekiant darbo tikslo iškeliami šie uždaviniai:

- 1) Parengti visuminės rėmo analizės pagal LST EN 1993-1-1 algoritmą;
- 2) Išanalizuoti ir palyginti skaičiuojamojo kolonos ilgio nustatymo metodus bei veiksnius darančius poveikį šiam ilgiui;
- 3) Išnagrinėti ir palyginti metodus kurie leidžia patikrinti konstrukcijos jautrumą antrosios eilės efektams;
- 4) Išnagrinėti ir palyginti metodikas vertinančias antrosios eilės poveikius;

Darbo apribojimai

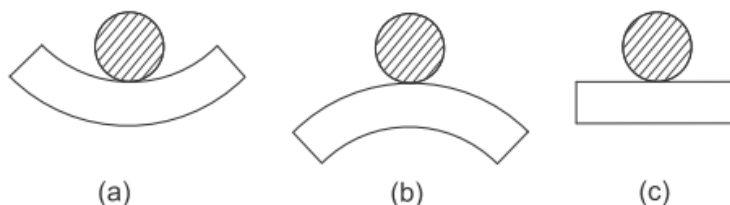
Šiame darbe nagrinėjama tik plieninių rėminių konstrukcijų analizė. Nors ryšiniai elementai dažnai yra neatsiejama rėminių konstrukcijų dalis, turinti didelį poveikį jų elgsenai, tačiau šiame darbe ryšiai nėra nagrinėjami. Rėmai su ryšiais priimami kaip visiškai nepaslankūs. Taip pat šiame darbe nenagrinėjamas mazgų standumo poveikis. Mazgai priimami tik idealiai lankstūs arba standūs. Nagrinėjama tik tampri antrosios eilės analizė (analizė, įvertinanti tik geometrinius netiesiškumus). Darbe koncentruojamasi ties metodikų lyginimu, pritaikymu ir patikimumu, tačiau tai yra labai plati tema, todėl dėl darbo apimties metodikos analizuojamos tik rėmo plokštumoje.

1. RĖMINIŲ KONSTRUKCIJŲ ANALIZĖ

Šiame skyriuje aprašomas rėminių konstrukcijų analizės teorinis pagrindas. Dėl plieninių konstrukcijų liaunumo ypatingas dėmesys skiriamas stabilumo problemai, skirtumams tarp atskirų elementų bei visos rėminės konstrukcijos pastovumo. Taip pat apžvelgiama skaičiuojamojo elemento ilgio samprata, rėminių konstrukcijų klasifikacija bei galiausiai - antrosios eilės analizė.

1.1. Neutralioji pusiausvyra

Gniuždomų elementų pastovumo sąvoką dažnai bandoma paaiškinti remiantis rutulio pusiausvyros pavyzdžiu (žr. 1.1 pav.). Remiantis pavyzdžiu galima apibūna tris pusiausvyros būsenas. Stabili pusiausvyra (a), kai apkrovos didinimas lemia atitinkamą, proporcingą elemento poslinkį, apkrovą pašalinus elementas grįžta į pradinę poziciją. Nestabili pusiausvyros būseną (b), kai elementas paveiktas bet kokio dydžio apkrova praranda pusiausvyrą ir panaikinus apkrovą į pradinę būseną nebegrįžta. Neutrali pusiausvyra (c), kai elementas paveiktas apkrovos pusiausvyrą praranda, bet pašalinus apkrovą suranda naują pusiausvyros poziciją. Pastaroji pusiausvyros forma vadinama neutraliąja pusiausvyra (Yoo, Lee 2011).



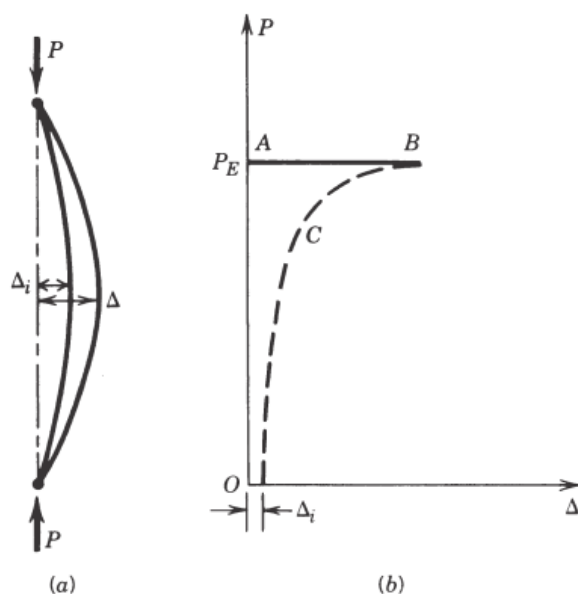
1.1 pav. Pusiausvyros būsenos (Yoo, Lee 2011)

Kolonos elgsena yra labai panaši į apžvelgtą rutulio elgseną. Kolona esant mažoms apkrovoms yra stabili, tačiau esant didelėms apkrovoms praranda pastovumą. Yra priimta, jog neutralioji pusiausvyra egzistuoja perėjimo iš stabilios pusiausvyros į nestabilią metu. Tokiu atveju apkrova, kurios metu kolona, dar esanti nepakitusios geometrijos, tampa nestabili, yra ta pati apkrova, kuriai esant įmanoma neutralioji pusiausvyra. Ši apkrova yra vadinama kritine.

1.2. Gniuždomų elementų stabilumas

Gniuždomų elementų pastovumo praradimas gali būti dviejų tipų. Esant idealiai, tampriai elgsenai pastovumas prarandama staigiai (1.2 pav. išskirta linijomis OAB), šis tipas dar gali būti vadinamas pastovumo bifurkacija. Kitas tipas pasireiškia tuomet, kai pastovumas palaipsniui dėl nuokrypų ar netiesinių elemento savybių prarandamas dar iki pasiekiant kritinės jėgos reikšmę (1.2 pav. kreivė C). Pirmu atveju visiškai idealus elementas didinant apkrovą

deformuojasi tik išilgine kryptimi, tačiau kai elemente pasiekama kritinė apkrova, jame pasireiškia staigios lenkimo deformacijos (Ziemian 2010).



1.2 pav. Idealios kolonos bei kolonos su nuokrypomis elgsena (Ziemian 2010)

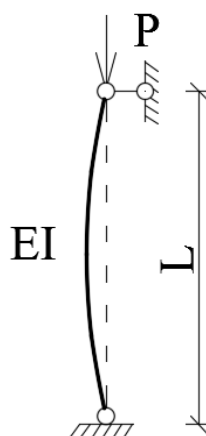
Statinių konstrukcijų moksle stabilumui apibūdinti iki šiol naudojama Eulerio dar XVIII amžiuje išvesta kritinės jėgos (1.1) lygtis, parodanti lanksčiai įtvirtintos kolonos teorinę klumpamąją galią. Eulerio kolona, esant pirmajai klumpumo formai, idealiems lankstams kaip įtvirtinimo sąlygoms bei centriškam apkrovimui, pavaizduota 1.3 pav. Taip pat šią jėgą gerai apibūdina 1.1 poskyryje pateiktas rutulio pastovumo pavyzdys.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}; \quad (1.1)$$

čia

EI - elemento standis;

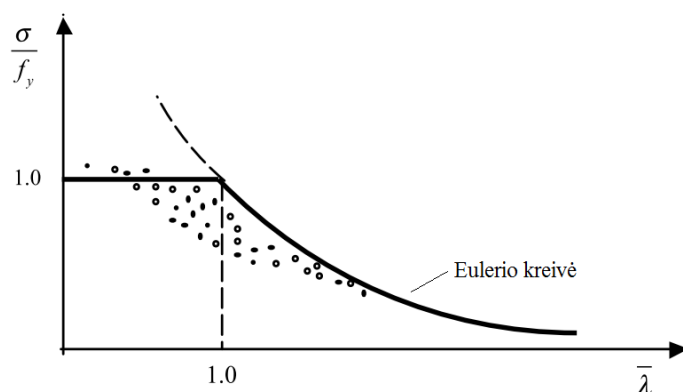
L - elemento ilgis.



1.3 pav. Lanksčiai įtvirtinta, centriškai apkrauta kolona

Minėtos teorijos bei Eulerio kritinės jėgos formulė galioja tik idealaus elemento atveju, laikantis įvairių prielaidų, tačiau realiose konstrukcijose yra geometrinių ir medžiagos netiesiškumų, nuokrypų, liekamųjų įtempių, kurie keičia tikrąją elemento elgseną.

Elementams, kurie sudaryti iš atskirų liaunų dalių, pavyzdžiui, liaunos dvitėjinio skerspjuvio lentynos ar sienelės, viso elemento, apkrauto išilgai, pastovumą gali riboti atskiri skerspjuvio elementai. Tokiu atveju pasireiškia vietinis nepastovumas. Šį reiškinį nagrinėja plokščių stabilumo teorija, kuri šiame darbe nėra apžvelgiama.



1.4 pav. Eksperimentiniai realių elementų bandymų duomenys (pagal da Silva *et al.* 2016)

Reali kolonos elgsena 1.4 pav. lyginama su teorine. Trumpos, mažo liaunio kolonos pasiekia takumo įtempius ir juos viršija, kadangi nespėja pasireikšti tamprusis klupumas. Liaunų kolonų maksimali laikomoji galia beveik sutampa su teorine Eulerio kritine jėga, kadangi pastovumas prarandamas dar esant tampriai būsenai. Didžiausias skirtumas tarp teorinės ir realios laikomosios galios yra vidutinio liaunio kolonose, tai lemia liekamieji įtempiai bei nuokrypos, kurie pastebimai didina antrosios eilės poveikius (da Silva *et al.* 2016).

Remiantis eksperimentiniais bei skaitiniais bandymais (ECCS 1976), kurių rezultatus atspinti 1.4 pav. pažymėti taškai, buvo sukurtos penkios Euronormose naudojamos klupumo kreivės. Šios kreivės yra šiame darbe apžvelgiamo lygiavertės kolonos metodo tikrinant atskirų elementų stabilumą pagrindas.

1.3. Rėminių konstrukcijų stabilumas

Aprašytoje teorijoje kolona nagrinėjama atskirai nuo visos konstrukcijos – rėmo. Tai lemia papildomus netikslumus, kadangi gretimų kolonų, sijų, mazgų standumas turi įtakos atskirtų kolonų klupumui. Taip pat įtakos turi ir aukštu bei tarpatramių skaičius, ryšiai.

Rėmų stabilumą apibūdinti galima remiantis C. Yoo ir S. Lee (2011) standaus rėmo pavyzdžio išaiškinimu. Pirmiausia galima atkreipti dėmesį į rėmą su standžia sija (žr. 1.5 pav. (a)). Akivaizdu, jog visiškai standi sija esant standžiam mazgui varžo viršutinį kolonos mazgo pasisukimą. Tai reiškia, jog kritinė kolonos apkrova priklauso ne tik nuo pačios kolonos

standumo, bet ir nuo sijos. Kai rėmas deformuojasi esant visiškai standžiai sijai, ši visuomet išlieka tiesi. Suvaržyto rėmo atveju (a), kai sija visiškai standi, kolonos deformuojasi lyg būtų standžiai įtvirtintos abiejuose galuose. Tokiu atveju kolonos kritinė jėga yra keturis kartus didesnė už gautą Eulerio formulė (1.1) lanksčiai kolonai. Šiam atvejui priešingas yra labai mažo standumo sija (b). Tokiu atveju kolonos elgsena yra panaši į kolonos prie kurios sija yra pritvirtinta lankstu ir kritinė jėga yra du kartus didesnė už lanksčio Eulerio kolonos.

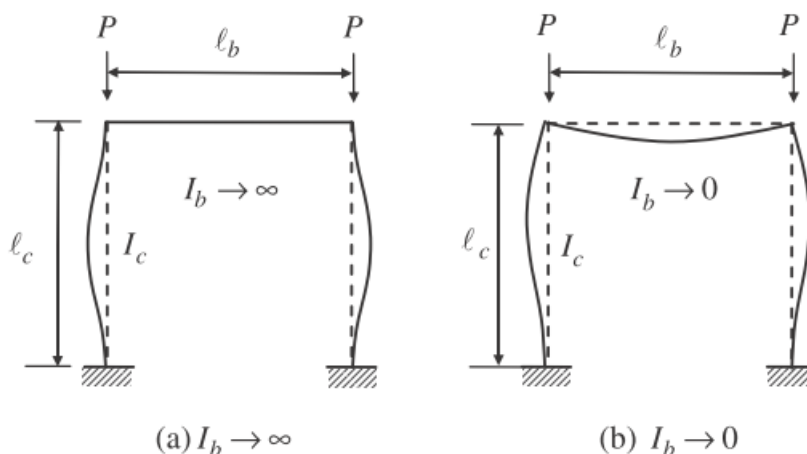
Realioje suvaržytoje rėminėje konstrukcijoje sijos standumas visuomet bus tarp minėtų ribų. Tokiu atveju kritinė kolonos jėga priklausomai nuo sijos ir mazgų standumo:

$$4P_E > P_{cr} > 2P_E; \quad (1.2)$$

čia

P_{cr} - kritinė kolonos jėga;

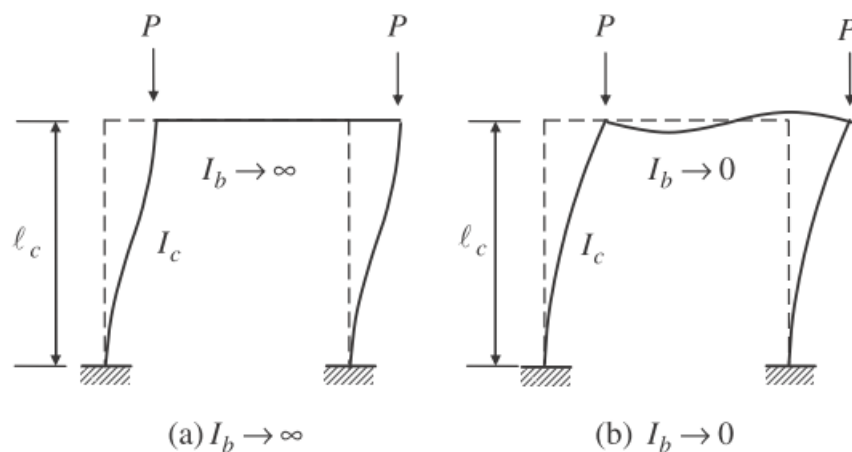
P_E - kritinė lanksčiai įtvirtintos tos pačios kolonos jėga.



1.5 pav. Suvaržytas rėmas (Yoo, Lee 2011)

Remiantis ta pačia logika galima paaiškinti ir nesuvaržytojo rėmo stabilumą (žr. 1.6 pav). Standžios sijos atveju (a) kolonos viršutinis mazgas gali pasislinkti horizontaliai, tačiau negali suktis. Tuomet kritinė kolonos jėga yra tokia pati kaip ir lanksčiai kolonai. Mažo standumo sijos atveju (b) mazgas gali suktis. Tuomet kritinė kolonos jėga sudaro ketvirtadalį lanksčios kolonos kritinės jėgos.

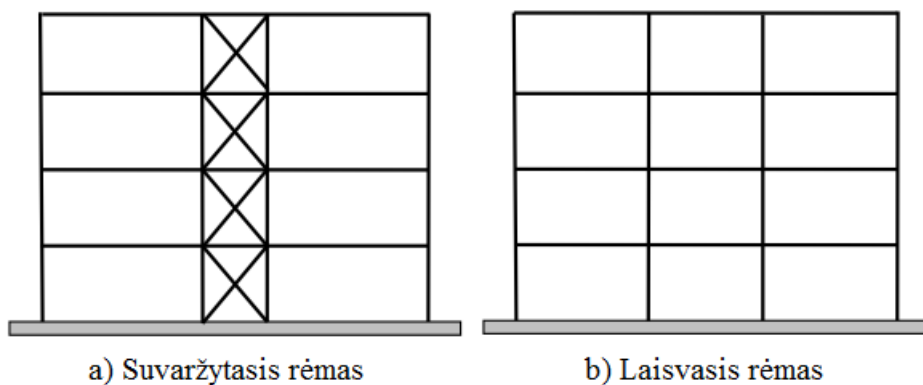
$$P_E > P_{cr} > 0,25P_E. \quad (1.3)$$



1.6 pav. Nesuvaržytas rėmas (Yoo, Lee 2011)

Nagrinėtas rėmo pavyzdys leidžia daryti išvadą, jog nesuvaržytam portaliniam rėmui visuomet pirmiausia pasireikš laisvoji pastovumo praradimo forma.

Aptartas rėmo pavyzdys remiasi idealizuota rėminių konstrukcijų klasifikacija į nesuvaržytus horizontalių poslinkių (sway) arba suvaržytus (non-sway). Ši klasifikacija yra pagrindas kai kurių kolonos skaičiuojamojo aukščio nustatymo metodų.



1.7 pav. Rėmų klasifikacija (pagal da Silva *et al.* 2016)

Ar rėmą galima laikyti suvaržytu priklauso nuo ryšinės sistemos efektyvumo. Ar šis sistema yra efektyvi literatūroje dažnai yra priimta laikyti, jeigu laikomasis sąlygos (da Silva *et al.* 2016):

$$S_{br} \geq 5S_{unbr} ; \quad (1.4)$$

čia

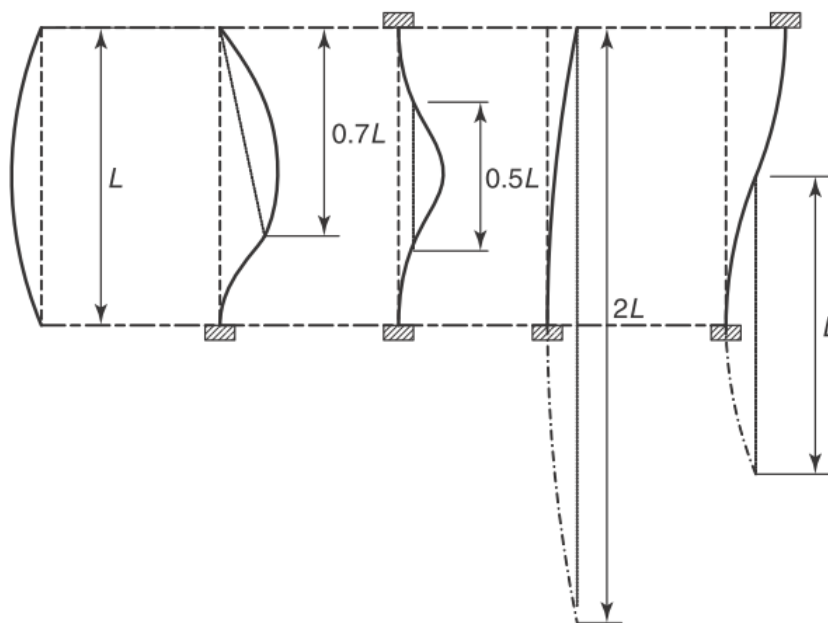
S_{br} - konstrukcijos su ryšiais šoninis standis;

S_{unbr} - konstrukcijos be ryšių šoninis standis.

Paprastai suvaržyti rėmai nėra jautrūs antrosios eilės poveikiams. Šiame darbe rėmo suvaržymas ir ryšinės sistemos nėra nagrinėjamos, todėl rėmai priimami idealiai suvaržyti arba laisvi.

1.4. Skaičiuojamojo (efektyviojo) kolonos ilgio μ samprata

Praeitame poskyryje buvo nustatyta, jog kolonos kritinė jėga priklauso nuo gretimų elementų standumo. Realiai kolonai suidealizuoti dažnai naudojamas skaičiuojamasis (efektyvusis) kolonos ilgis, kurio koncepciją supaprastintai galima apibūdinti kaip metodą skirtą matematiškai supaprastinti nagrinėjamą koloną ir jos sąveiką su likusiais rėmo elementais į koloną, kurios kritinė apkrova būtų ekvivalenti dviem lankstai įtvirtinai Eulerio kolonai.

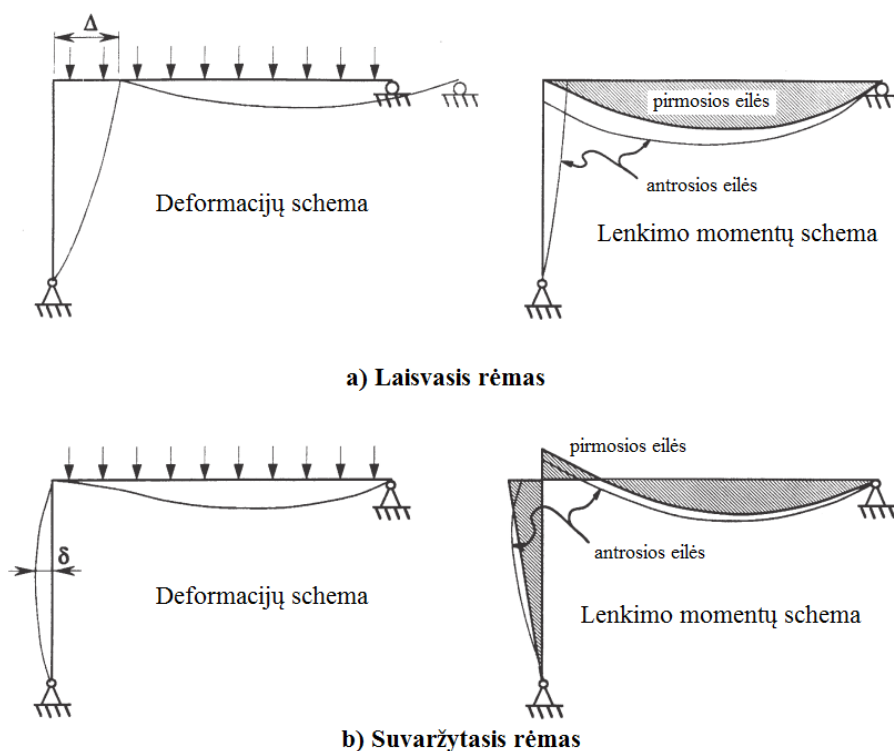


1.8 pav. Geometrinė skaičiuojamoji ilgio sąvokos interpretacija (Galambos, Surovek 2008)

Geometrinė skaičiuojamoji ilgio sąvokos interpretacija penkioms klasikinėms situacijoms yra pateikta 1.8 pav. Iš šios interpretacijos skaičiuojamasis ilgis nustatomas tarp kolonos išlinkio taškų. Ši interpretacija kartais klaidingai suprantama, kai priimama, jog skaičiuojamasis ilgis yra atstumas tarp taškų, kur lenkimo momentai yra lygus nuliui (Galambos, Surovek 2008).

1.5. Antrosios eilės teorija

Klasikinė Eulerio teorija numato, kad konstrukcija nesideformuoja horizontaliai iki pasiekama kritinė jėga. Tačiau, kaip buvo minėta ankstesniuose poskyriuose, priklausomai nuo kolonos liaunio, didelės įtakos kolonos laikomajai galiai turi liekamieji įtempiai bei nuokrypos, kurie lemia, kad konstrukcija palaipsniui deformuojasi horizontaliai dar iki pasiekiant kritinę apkrovą. Ši deformacija lemia papildomų antrosios eilės momentų susidarymą, kurie mažina konstrukcijos laikomąją galią dar labiau. Antrosios eilės globalūs (rėmo) ir lokalūs (elemento) poveikiai įvairioje literatūroje dažnai skirstomi į P- Δ (rėmui) ir P- δ (elementui). P- δ efektai pasireiškia išilgai elemento, o P- Δ elementų galuose (žr. 1.9 pav).



1.9 pav. Antrosios eilės lenkimo momentai sukelti P- Δ ir P- δ poveikių (pagal Ziemian 2010)

Antrosios eilės poveikius P- Δ ir P- δ nesunku apibūdinti remiantis (Ziemian 2010) rėmo pavyzdžio išaiškinimu. 1.9 paveiksle pagrindinis antrosios eilės reikalavimas yra užtikrinti deformuotos konstrukcijos įrąžų pusiausvyrą. Pavyzdyje pateiktame 1.9 a) pav., matyti, jog lenkimo momentai, gauti pirmosios eilės analize, atitinka lanksčiai atremtos sijos atvejį, tačiau kai įvertinamos antrosios eilės deformacijos dėl P- Δ poveikių, lenkimo momentai padidėja ir, kad būtų galima užtikrinti momentų pusiausvyrą, šie atsiranda ir kolonoje.

Remiantis rėmu pateiktu 1.9 b) paveiksle, nesunku paaiškinti P- δ poveikius. Kadangi rėmas yra suvaržytas ir šoninės deformacijos negalimos antrosios eilės momentai atsiranda dėl elementų išlinkių δ . Antrosios eilės momentai šiuo atveju yra lygūs kolonos apkrovai P padaugintai iš išlinkio δ ir kartu tai paaiškina šio poveikio trumpinio P- δ kilmę. Kadangi išlinkio kryptis sutampa su esamo lenkimo momento kryptimi kolonoje, šis dar labiau padidėja, tačiau dėl įrąžų pusiausvyros sumažėja sijoje. Taip pat svarbu paminėti, kad tokiu atveju pasikeičia didžiausio lenkimo momento vieta kolonoje.

Apibendrinant pateiktą pavyzdį galima teigti, jog antrosios eilės momentų pasiskirstymas ne visuomet sutampa su pirmosios eilės. Tai reiškia, jog negalioja superpozicijos principas ir ne visuomet galima taikyti apytikslius antrosios eilės poveikius vertinančius metodus pagrįstus pirmosios eilės momentų didinimu. Taip pat svarbu pastebėti tai, jog 1.9 paveiksle nagrinėtas pavyzdys, priklausomai nuo suvaržymo, labai išryškina P- Δ ar P- δ poveikius, tačiau realiose konstrukcijose dažniausia pasireiškia abu šie poveikiai ir reikia patikrinti ar yra saugu nevertinti vieno ar kito poveikio.

2. SKAIČIAVIMO METODIKOS

Šiame skyriuje nagrinėjama visuminė rėmo analizė pagal Eurokodą 3 bei sudaromas jos atlikimo algoritmas. Pagal šį algoritmą išskiriamos ir paaiškinamos antrosios eilės poveikius įvertinančios metodikos. Taip pat šiame skyriuje aprašomi galimi konstrukcijų nuokrypų tipai, metodai skaičiuojamajam kolonos ilgiui gauti bei veiksniai darantys poveikį šiam ilgiui.

2.1. Rėminių konstrukcijų jautrumas antrosios eilės poveikiams

Šiame poskyryje aprašomos dviejuose skirtingose normose LST EN 1993-1-1 bei AISC 360-16 pateiktos metodikos pagal kurias galima nustatyti konstrukcijos jautrumą antrosios eilės poveikiams.

2.1.1. Pagal LST EN 1993-1-1

Konstrukcijos jautrumui antrosios eilės poveikiams nustatymo metodų pagrindas dažniausia yra tamprioji kritinė jėga F_{cr} , kuri turi daug privalumų (da Silva *et al.* 2016):

- Parodo konstrukcijos jautrumą antrosios eilės poveikiams per, taip pat ir atskirų apkrovų kombinacijų;
- Apskaičiuojama kur kas lengviau, nei antrosios eilės analizė;
- Naudojama daugelyje apytikslių metodų, kurie vertina antrosios eilės poveikius, tačiau esant $\alpha_{cr} \geq 3$;

Jautrumas antrosios eilės poveikiams pagal LST EN 1993-1-1 yra nustatomas remiantis tampriąja kritine jėga F_{cr} bei koeficientu α_{cr} . Norint rasti šiuos koeficientus gali būti naudojami skaitiniai iteraciniai metodai, naudojant komercinius projektavimo programų paketus. Pagal normas α_{cr} , tai koeficientas kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad esant bendrajam nepastovumui, pasireikštų tamprusis nepastovumas ir bendru atveju šis koeficientas lygus:

$$\alpha_{cr} = F_{cr} / F_{Ed} \geq 10; \quad (2.1)$$

čia

F_{Ed} – skaičiuotinė apkrova;

F_{cr} – tamprioji kritinė klupumo apkrova pasireiškiant bendrajam nepastovumui, nustatoma naudojant tamprųjų standį.

Jei sąlyga tenkinama, vadinasi konstrukcija nėra jautri antrosios eilės poveikiams. Tačiau jei ji netenkinama konstrukcija yra jautri šiems poveikiams ir juos reikia tikrinti atsižvelgiant į konstrukcijos nuokrypas.

Laikantis tam tikrų sąlygų α_{cr} gali būti apskaičiuotas pagal supaprastintą formulę, pateiktą normose, kurios pradinę formą gavo M. R. Hornas (Horne 1975):

$$\alpha_{cr} = \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{h}{\delta_{H,Ed}}; \quad (2.2)$$

čia

H_{Ed} – horizontalioji skaičiuotinė visuminė apkrova tenkanti aukštui, įskaitant aukšto šlytį;

V_{Ed} – vertikalioji skaičiuotinė visuminė apkrova, kurią perduoda aukštas;

$\delta_{H,Ed}$ – aukšto viršaus horizontalusis poslinkis aukšto apačios atžvilgiu, kai rėmas yra veikiamas horizontaliųjų apkrovų (pvz., vėjo) ir fiktyvių horizontaliųjų apkrovų, veikiančių kiekvieno aukšto perdangos lygyje;

h – aukšto aukštis.

Sąlygos formulės (2.2) panaudojimui:

- Rėmai turi būti su nedideliu stogo nuolydžiu, t.y. nedidesniu kaip 1:2 arba 26° laipsniai.
- Rėmo sijų ar gegninių sijų ašinis gniuždymas turi būti nežymus. Jei nėra tikslesnė informacijos, gniuždymas laikomas reikšmingu, jei:

$$\lambda \geq 0,3 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}; \quad (2.3)$$

čia

N_{Ed} – gniuždomosios jėgos skaičiuotinė reikšmė;

λ – sijų ar gegninių sijų, įtvirtintų lankstais, sąlyginis liaunis rėmo plokštumoje.

2.1.2. Pagal AISC 360-16

Jungtinių Amerikos Valstijų plieninių konstrukcijų projektavimo normose AISC 360-16 vienas iš visuminės analizės metodikų taikymo apribojimų yra koeficientų B_1 ir B_2 ribinės reikšmės. Šie koeficientai kartu yra ir pagrindas visuminės analizės metodikos antrosios eilės poveikius vertinančios per pirmosios eilės analizę gautų įrašų didinimą (LST EN 1993-1-1 atitiktumu yra metodas parašytas 5.2.2(5)B pastaboje (žr. 2.1 pav. metodą 2a)). Jei laikančiuose konstrukcijos elementuose $B_1 > 1,2$, turėtų būti atliekama pilna antrosios eilės analizė, vertinanti nuokrypas, jei $B_1 \leq 1,2$ galima apytikslė analizė pagrįsta pirmąja eile. Pagal šias normas vienas iš pagrindinių efektyviojo kolonos ilgio (pagal LST EN 1993-1-1 lygiavertės kolonos) metodo pritaikymo apribojimų yra antrosios eilės horizontalaus poslinkio santykis su gautu pirmosios

eilės analize, kuris neturi viršyti 1,5. Šis santykis gali būti priimamas lygus koeficiento B_2 reikšmei. Tokiu atveju kai $B_2 > 1,5$ turi būti atliekama antrosios eilės analizė. Verta pastebėti, jog per koeficientą B_2 įvertinama laisvųjų (horizontalių poveikių neperimančių) kolonų poveikis rėmų standumui.

Koeficientas B_1 apskaičiuojamas pagal:

$$B_1 = \frac{C_m}{1 - \frac{\alpha \cdot (P_{nt} + P_{lt})}{P_{e1}}} \geq 1; \quad (2.4)$$

čia

$\alpha = 1$, kai taikomas dalinių saugos koeficientų projektavimo metodas;

$C_m = 0,6 - 0,4 \cdot \frac{M_1}{M_2}$ - koeficientas, konservatyviai gali būti priimama lygus vienetui;

M_1 ir M_2 - atitinkamai mažesnis ir didesnis lenkimo momentai elemento galuose nesuvaržyto rėmo atveju. M_1 / M_2 santykyje turi būti vertinami lenkimo momentų ženklai.

P_{e1} - tamprioji kritinio klumpo jėga gauna pagal Eulerio formulę (1.1), skaičiuojamąją kolonos ilgį priimant nepaslankaus rėmo atvejui;

P_{nt} - suvaržyto nuo horizontalių poslinkių rėmo ašinė jėga gaunama atliekant pirmosios eilės analizę;

P_{lt} - ašinė jėga kolonoje sukelia tik horizontalių poveikių.

Koeficientas B_2 apskaičiuojamas pagal:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\alpha \cdot P_{story}}{P_{e.story}}} ; \quad (2.5)$$

čia

$P_{e.story} = R_M \cdot \frac{H \cdot L}{\Delta_H}$ - aukšto tamprioji kritinė klumpo jėga;

$R_M = 1 - 0,15 \cdot \frac{P_{mf}}{P_{story}}$ - koeficientas, netiesiogiai įvertinantis laisvųjų (horizontalių poveikių

neperimančių) kolonų poveikis rėmų standumui.

P_{story} - bendra visų aukšto kolonų ašinė jėga;

P_{mf} - Ašinė jėga tik aukšto kolonose, perimančiose horizontalius poveikius;

H - visuminė horizontalioji apkrova, įskaitant aukštų šlytį;

L - aukšto aukštis;

Δ_H - horizontalusis aukšto viršaus poslinkis aukšto apačios atžvilgiu.

2.2. Visuminės analizė pagal Eurokodą 3

Šiame poskyryje paruošiamas visuminės analizės pagal Eurokodą 3 algoritmas, pagal kurį išskiriami antrosios eilės poveikius įvertinantys metodai.

2.2.1. Visuminės (bendrosios) analizės algoritmas pagal LST EN 1993-1-1

Visuminė analizė gali būti pagrįsta pirmosios arba antrosios eilės teorija, plastine arba tampria analize. Plastinę analizę, kaip ir pirmosios eilės analizę, galima naudoti tik tam tikrais atvejais. Tampri antrosios eilės analizė leidžiama visais atvejais. Atsižvelgiant į rėmo ir visuminės analizės tipą, normos apibrėžia tris pagrindinius metodus, kaip galima įvertinti antrosios eilės poveikius bei nuokrypas (žr. 2.1 pav.):

- 1) Pagrindiniais, nesudėtingais atvejais – tikrinant atskirų elementų stabilumą. Klumpamasis ilgis priimamas pagal bendrąją klumpumo formą;
- 2) Iš dalies taikant visuminę analizę, o iš dalies – tikrinant atskirų elementų pastovumą;
- 3) Taikoma išsami antrosios eilės analizė (tiek lokaliame, tiek globaliame lygyje modeliuojamos nuokrypos).

Paaiškinti šiuos metodus padeda literatūroje dažnai aprašomi globalūs (rėmo) ir lokalūs (elemento) efektai, kurie yra skirstomi į P- Δ (rėmui) ir P- δ (elementui) (Da Silva *et al.* 2016). P- δ efektai pasireiškia išilgai elemento, o P- Δ elementų galuose. Pirmas metodas yra pats moderniausias ir kartu sudėtingiausias, kadangi globaliame lygyje modeliuojami geometriniai ir medžiagos netiesiškumai kartu su nuokrypomis, o tai yra sudėtinga ir imlu laikui, todėl šis metodas nėra populiarus projektuojant pastatus. Antras metodas P- δ efektus bei lokalias elementų nuokrypas vertina per atskirų elementų stabilumą, o P- Δ efektus bei globalias nuokrypas - per visuminę analizę. Trečias metodas apytiksliai atsižvelgia į abu P- Δ ir P- δ efektus tikrinant atskirus lygiaverčius elementus pagal EC3 6.3 nuostatas, tačiau skaičiuojant pagal jį reikia tiksliai įvertinti klumpumo formas bei skaičiuojamuosius elementų ilgius, todėl taikomas tik paprastoms konstrukcijoms, kai kolonos skaičiuojamasis ilgis yra nesunkiai nustatomas.

Remiantis LST EN 1993-1-1, (Chantrain, Schleich 1997) ir (Boissonnade 2006) sudaromas visuminės analizės atlikimo algoritmas, kuris pateikiamas 2.1 paveiksle.

Tampriosios visuminės analizės pagal LST EN 1993-1-1 (5.4.2) prielaidos:

- Nepriklausomai nuo įtempių dydžio, medžiagos deformacijų ir įtempių savybės turi būti tiesinės;
- Vidinės jėgos ir momentus galima apskaičiuoti naudojantis tampria visumine analize, net jei skerspjuvio laikomoji galia yra pagrįsta jo plastine laikomąja galia;

- Tamprioji visuminė analizė gali būti taikoma ir skerspjūviams, kurių laikomąją galią riboja vietinis klupumas.

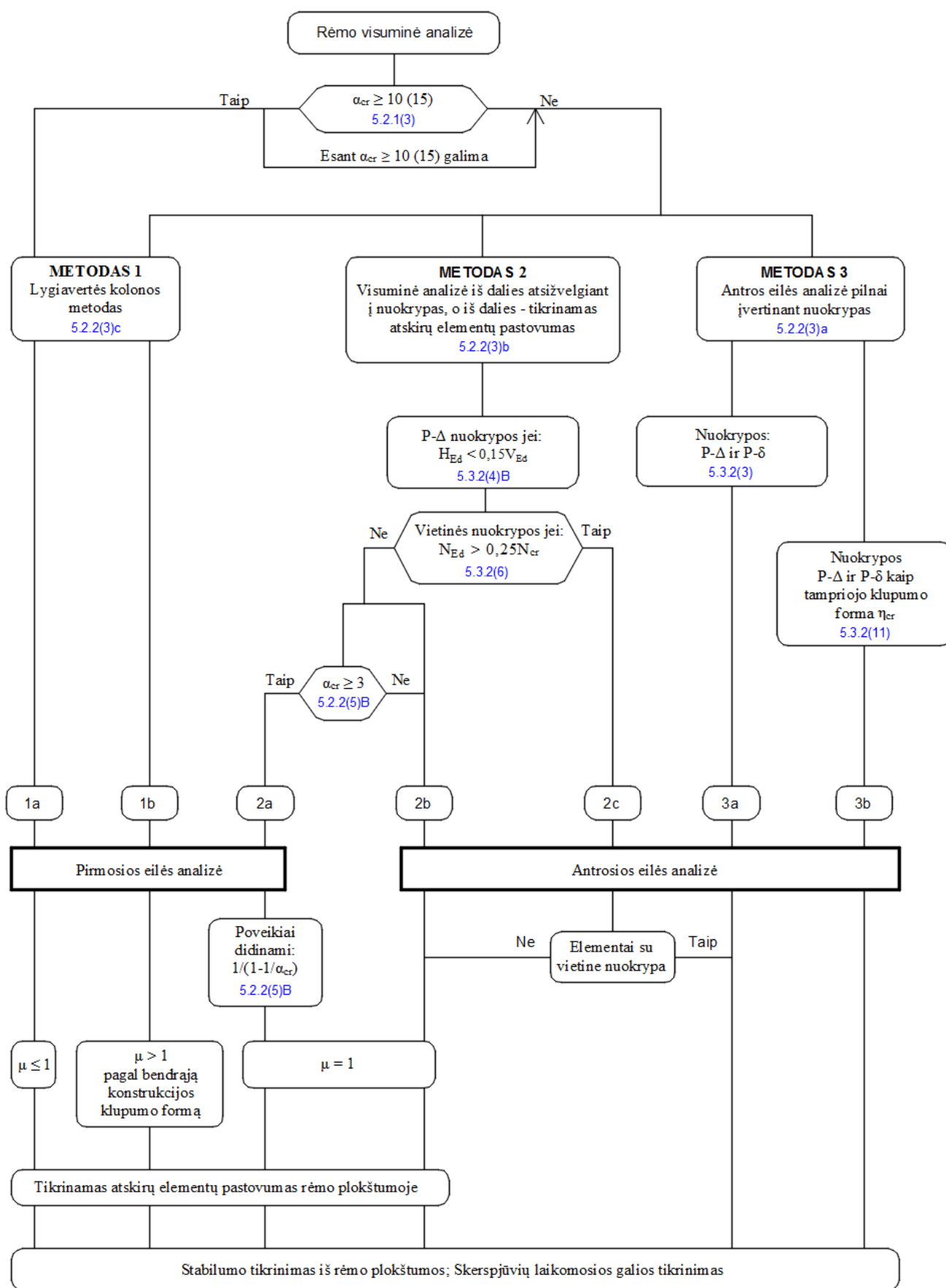
Plastinė analizė galima, tik jei laikomasi šių sąlygų LST EN 1993-1-1 (5.4.1(3)):

- Konstrukcijos sukamoji galia tikrosiose plastinių lankstų vietose yra pakankama, tiek elementuose, tiek mazguose;
- Elemento skerspjūviai turi būti viensimetriai arba dvisimetriai tais atvejais, kai plastinis lankstas susidaro elemente ir simetrijos plokštuma yra lanksto sukimosi plokštumoje;
- Jei plastinis lankstas susidaro mazguose, mazgas turi būti pakankamo stiprio, kad užtikrintų, jog lankstas išliks elemente, arba turi turėti pakankamam posūkiui reikalingą plastinę laikomąją galią.

Plastinės visuminės analizės pagal LST EN 1993-1-1 (5.4.3) prielaidos:

- Plastinė visuminė analizė gali būti taikoma tokiu atveju, kai elementų sukamoji geba yra pakankama. Lenkiamieji momentai turi turėti galimybę persiskirstyti;
- Plastinė elgsena turi būti modeliuojama vienu iš šių metodų:
 - 1) taikant tamprią-plastiškąją analizę, kai skerspjūviuose arba mazguose susidaro plastiniai lankstai;
 - 2) taikant plastinę netiesinę analizę bei dalinį elementų plastiškumą plastinėse zonose;
 - 3) nepaisant tamprios lankstų elgsenos taikoma analizė pagal standųjį plastiškąjį modelį.

Ši analizė gali būti taikoma, jei nebūtina atsižvelgti į deformuotą geometriją (antrosios eilės poveikius). Tokiu atveju mazgai klasifikuojami tik pagal stiprį.



2.1 pav. Visuminės analizės algoritmas

2.2.2. 1 metodas – lygiavertės kolonos metodas

Šis metodas pagrįstas pirmosios eilės analize, jis įvertina antrosios eilės poveikius per atitinkamus skaičiuojamuosius (klumpamuosius) ilgius pagal bendrąją konstrukcijos klupumo formą. Bendrasis rėmo bei atskirų elementų stabilumas užtikrinamas atliekant kolonų stabilumo patikrinimą naudojant klupumo kreives, kurios įvertina elemento nuokrypas. Tačiau ypač kalbant apie P-Δ efektus, kadangi kolonos skaičiuojamojo ilgio reikšmės turi būti grindžiamos bendrąja rėmo klupumo forma, šis metodas reikalauja tikslios klupumo formos bei atitinkamo skaičiuojamojo ilgio koeficiento μ nustatymo, o tai riboja šio metodo pritaikomumą sudėtingesnėse, netipinėse konstrukcijose.

Šis metodas remiasi dviem konservatyviomis prielaidomis (Da Silva *et al.* 2016):

- Visos kolonos aukšte klumpa vienu metu;
- Visuminė rėmo kritinė apkrova atitinka silpniausio aukšto kritinę apkrovą.

Lygiavertės kolonos metodas normose apibrėžtas Eurokodo 5.2.2(8) pastraipoje: Jei rėmo pastovumas vertinamas taikant lygiavertės kolonos metodą pagal 6.3 nuostatas, klumpamojo ilgio reikšmės turi būti grindžiamos bendrąja rėmo klupumo forma, atsižvelgiant į elementų ir mazgų standumą, plastinių lankstų buvimą ir gniuždomųjų jėgų veikiant skaičiuotinėms apkrovoms pasiskirstymą. Šiuo atveju laikomajai galiai tikrinti taikomos vidinės jėgos apskaičiuojamos pagal pirmosios eilės teoriją nepaisant nuokrypų.

2.2.3. 2 metodas – visuminė analizė iš dalies atsižvelgiant į nuokrypas, o iš dalies – tikrinant atskirų elementų pastovumą

Šis metodas P-δ efektus bei lokalias elementų nuokrypas vertina per atskirų elementų stabilumą, o P-Δ efektus bei globalias nuokrypas per visuminę analizę. Metodas gali būti atliekamas priimant tiek tamprią, tiek plastinę analizę. Priklausomai nuo analizės tipo bei nuokrypų įvertinimo galima šį metodą padalinti į kelias skirtingas metodikas.

Apytikslis metodas pagrįstas pirmosios eilės analize bei įrašų didinimu (2a) taikomas rėmams, kuriems būdinga pirmoji laisvojo klupumo forma. Šio metodo pagrindas yra koeficientas α_{cr} bei tampri, tiesinė analizė. Metodo esmė yra horizontaliasias bei lygiavertes apkrovas $V_{Ed\theta}$ dėl nuokrypų didinti koeficientu:

$$\frac{1}{1 - 1/\alpha_{cr}}, 3 \leq \alpha_{cr} < 10. \quad (2.6)$$

Gavus antrosios eilės įrašas reikia atlikti rėmo pastovumą patikrą tiek plokštumoje, tiek iš plokštumos, kadangi ši analizė to neįvertina. Stabilumo skaičiavimams kaip efektyvusis priimamas geometrinis kolonos ilgis. Taip pat taikant tamprią, tiesinę analizę turi būti įvertinami

rėmo nuokrypų sukelti poveikiai. Daugiaaukščių rėmų antrosios eilės kampinio pokrypio poveikiai gali būti skaičiuojami šiuo, metodu jeigu laikomasi (2.6) formulės pritaikymo sąlygų bei visuose aukštuose panašiai pasiskirsčiusios:

- vertikalios apkrovos;
- horizontalios apkrovos;
- rėmo standžio reikšmės, turint omenyje aukštuose veikiančias skersines jėgas.

Metodo taikymo eilės tvarka (Da Silva *et al.* 2016):

- 1) Atliekama pirmosios eilės analizė su pridėtomis horizontaliomis atramomis kiekviename aukšte, gaunamos jų reakcijos;
- 2) Atliekama dar viena pirmosios eilės analizė, šį kartą be horizontalių atramų, vertinant tik horizontalius poveikius priimamus kaip prieš tai gautas reakcijas;
- 3) Sujungus abiejų analizių rezultatus gaunamos antrosios eilės įrašos, kurios naudojamos tolesnėje analizėje. Šios įrašos, tai yra lenkimo momentai M , skersinės jėgos V , ašinės jėgos N bei poslinkiai d , gali būti apskaičiuojami pagal šias lygtis:

$$d_{ap}^{II} = d_{NS}^I + \frac{1}{1 - 1/\alpha_{cr}} \cdot d_s^I; \quad (2.7)$$

$$M_{ap}^{II} = M_{NS}^I + \frac{1}{1 - 1/\alpha_{cr}} \cdot M_s^I; \quad (2.8)$$

$$V_{ap}^{II} = V_{NS}^I + \frac{1}{1 - 1/\alpha_{cr}} \cdot V_s^I; \quad (2.9)$$

$$N_{ap}^{II} = N_{NS}^I + \frac{1}{1 - 1/\alpha_{cr}} \cdot N_s^I; \quad (2.10)$$

čia

$d_{ap}^{II}, M_{ap}^{II}, V_{ap}^{II}, N_{ap}^{II}$ – antrosios eilės įrašos bei poslinkiai;

$d_{NS}^I, M_{NS}^I, V_{NS}^I, N_{NS}^I$ – horizontalių atramų reakcijos bei poslinkiai;

$d_s^I, M_s^I, V_s^I, N_s^I$ – įrašos gautos naudojant horizontalias reakcijas kaip poveikius.

Antrosios eilės analizė įvertinant tik bendrąsias P-Δ nuokrypas (2b). Šiuo atveju atliekama antrosios eilės analizė, tačiau atliekant ją įvertinamos tik bendrosios P-Δ nuokrypas, o neįtrauktos į analizę elemento nuokrypos įvertinamos atliekant atskirų elementų stabilumo patikrinimą. Taip šiuo metodu sujungiami antrosios eilės analizės ir lygiavertės kolonos metodo privalumai bei išvengiama sudėtingos analizės modeliuojant visas nuokrypas. Kitas šio metodo privalumas yra tas, jog atliekant atskirų elementų stabilumo patikrinimą sistemos ilgiu gali būti

priimamas geometrinis kolonos ilgis, ir tai leidžia paprasčiau atlikti visuminę analizę konstrukcijose, kur skaičiuojamasis ilgis nėra akivaizdus.

Bendrųjų pastato rėmo posvyrio nuokrypų galima nepaisyti, jei:

$$H_{Ed} \geq 0,15 \cdot V_{Ed} . \quad (2.11)$$

Pradinius išlinkius vertinti reikia jei tenkinamos šios sąlygos pagal LST EN 1993-1-1 (5.3.2(6)):

- viename elemento gale yra bent viena momentus perimanti jungtis;

$$\lambda \geq 0,5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} ; \quad (2.12)$$

- arba galima taikyti pertvarkytą (2.12) išraišką $N_{Ed} > 0,25 \cdot N_{cr}$; (2.13)

čia

N_{Ed} – gniuždomosios jėgos skaičiuotinė reikšmė;

λ – įtvirtinto lankstais elemento, plokštuminis sąlyginis liaunis.

2.2.4. 3 metodas – antrosios eilės analizė pilnai įvertinant nuokrypas

Šis metodas yra pats moderniausias iš aprašytų normose, kadangi jis ne tik tiesiogiai įvertina antrosios eilės poveikius, bet ir bendrąsias rėmo bei vietinės elemento nuokrypas. Taip bandoma priartėti prie kuo tikroviškesnės konstrukcijos elgsenos. Literatūroje ši analizė dažniausias vadinama GNIA (**G**eometrical **N**on-linear **A**nalysis with **I**mperfections) arba GMNIA jei įvertinamas ir medžiagos netiesiškumas. Paprastoms, standartinėms konstrukcijoms, šis metodas dėl darbo apimties nėra efektyvus. Vienas didžiausių šio metodo privalumų yra tas, jog jei analizė įvertina visas stabilumo praradimo formas, nereikia tikrinti stabilumo pagal LST EN 1993-1-1 6.3 skyrių. Tačiau svarbu pastebėti, jog dauguma šiuolaikinių baigtinių elementų programų strypiniams elementams nevertina sukimo, skersinio sukamojo klupumo. Tokiu atveju net įvertinus nuokrypas, papildomai reikia tikrinti stabilumą.

Naudojant šią metodiką normos leidžia nuokrypas modeliuoti keliais būdais:

- Lygiavertė nuokrypa pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu (3a);
- Tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (3b).

2.3. Nuokrypų modeliavimas

Šiame poskyryje aprašoma lygiavertė nuokrypa pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu (EHF) ir tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (EUGLI).

2.3.1. Lygiavertė nuokrypa pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu (EHF) arba algoritme (3a)

Kaip jau buvo minėta priklausomai nuo analizės metodo turi būti įvertinamos bendrosios rėmo (P-Δ) bei vietinės atskirų elementų (P-δ) nuokrypos. Pagal LST EN 1993-1-1 šios nuokrypos gali būti įvertinamos lygiaverčių geometrinių nuokrypų pavidalu, kurių reikšmės išreikštų galimus visų tipų nuokrypų poveikius, jei tie poveikiai nėra įtraukti į elementų projektavimo laikomosios galios formules. Lygiavertės geometrinės nuokrypos įvertina:

- gaminio standartuose apibūdintas elementų geometrinių matmenų nuokrypas;
- konstrukcijos nuokrypas dėl gamybos ir statybos;
- liekamuosius įtempius;
- stiprio pagal takumo ribą kaitą.

Nuokrypos turi būti įvertinamos forma ir kryptimi, kuri pati pavojingiausia konstrukcijai. Tačiau vienu metu reikia vertinti tik viena kryptimi. Atliekant rėmo analizę nesuvaržyto būvio klupdymui jautrių rėmų nuokrypų poveikis turi būti įvertinamas taikant lygiavertę nuokrypą pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu (Eurokodas 3 2005).

Bendrieji pradiniai pokrypiai (rėmo posvyriai) nustatomi pagal:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m; \quad (2.14)$$

čia

ϕ_0 – pagrindinė reikšmė: $\phi_0 = 1/200$;

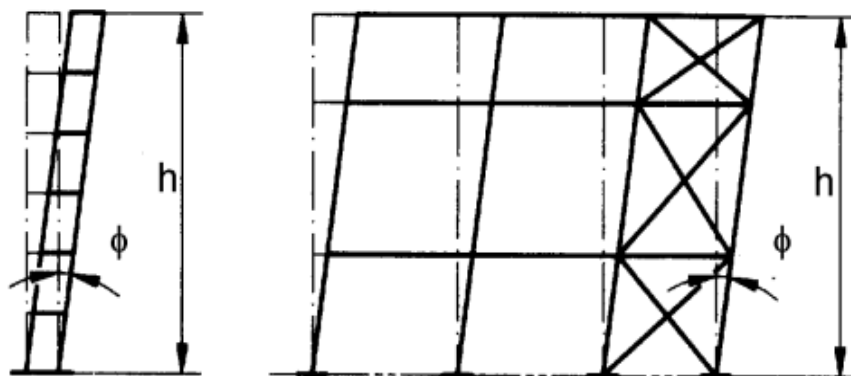
$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}$, bet $\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1$, 0 – kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas;

h – konstrukcijos aukštis metrais;

α_m – kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)};$$

m – kolonų skaičius eilėje, įskaitant tik kolonas, kurios laiko vertikaliąją apkrovą N_{Ed} , sudarančią ne mažiau kaip 50 % nagrinėjamoje vertikaliojoje plokštumoje kolonai tenkančios vidutinės reikšmės.



2.2 pav. Lygiaverčio pokrypio nuokrypos (Eurokodas 3 2005)

Santykiniai pradiniai lenkiamieji klūpdyimo veikiamų elementų vietiniai išlinkiai:

$$\frac{e_0}{L}; \quad (2.15)$$

čia

L – elemento ilgis;

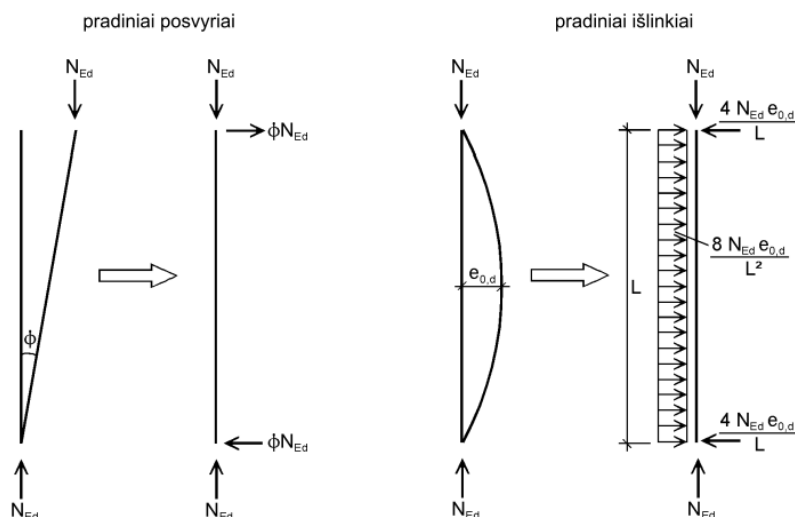
e_0 – pradinio šoninio posvyrio maksimali amplitudė.

Rekomenduojamas reikšmės priklausomai nuo klūpumo kreivės pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Skaičiuotinės elementų pradinio vietinio išlinkio e_0/L reikšmės (Eurokodas 3 2005)

Klūpumo kreivė	Analizė pagal tamprųjų modelį	Analizė pagal plastiškąjį modelį
	e_0/L	e_0/L
a_0	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Normose leidžiama tiek elemento tiek rėmo nuokrypas pakeisti lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemomis, taikomomis kiekvienai kolonai.



2.3 pav. Pradinių nuokrypų pakeitimas lygiavertėmis horizontaliomis jėgomis (Eurokodas 3 2005)

Lygiaverčių horizontalių jėgų sistemos pritaikymo sąlygos (Eurokodas 3 2005):

- Šie pradiniai posvyriai turi būti taikomi visomis galimomis horizontaliomis kryptimis, tačiau turi būti vertinami atskirai kiekviena kryptimi.
- Jei ši sistema taikoma daugiaaukščiams rėmams, šios jėgos turi veikti kiekvieno aukšto lygyje;
- Galimi sukamieji konstrukcijos poveikiai sukelti nesimetrinio posvyrio dviejose priešingose pusėse turi būti išnagrinėjami.

Jei taikoma antrosios eilės analizė, pagal kurią įvertinamas lenkimo veikiamo elemento skersinis sukamasis klupumas, nuokrypos gali būti išreiškiamos dydžiu $e_{0,d}$, kur $e_{0,d}$ yra nagrinėjamo profilio silpnosios ašies lygiavertis pradinis išlinkis (Eurokodas 3 2005).

2.3.2. Tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (EUGLI) arba algoritme (3b)

Alternatyva lygiavertei nuokrypai pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu yra konstrukcijos tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} , kuri gali būti taikoma kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa. Ši nuokrypa dažnai literatūroje vadinama EUGLI (Equivalent Unique Global and Local Imperfection). Šis nuokrypos tipas nėra tirtas labai plačiai. Būtų galima išskirti (Chladný, Stujberová 2013) darbą kuriame bandoma šią nuokrypą pritaikyti įvairiems, sudėtingiems rėmams bei (Brodniansky 2016) darbą kuriama nuokrypa pritaikoma kintamo skerspjuvio rėmams. Šios nuokrypos amplitudė gali būti apskaičiuojama pagal LST EN 1993-1-1 lygtį:

$$\eta_{init} = e_0 \cdot \frac{N_{cr}}{EI \cdot \eta_{cr,max}} \cdot \eta_{cr} = \frac{e_0}{\lambda^2} \cdot \frac{N_{Rk}}{EI \cdot \eta_{cr,max}} \cdot \eta_{cr}; \quad (2.16)$$

čia

$$e_0 = \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} \cdot \frac{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^{-2}}{1 - \chi \cdot \bar{\lambda}^{-2}}, \text{ kai } \bar{\lambda} > 0,2;$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} - \text{konstrukcijos sąlyginis liaunis};$$

α – nuokrypos koeficientas parenkamas pagal klupumo kreivę;

χ – klupumo koeficientas parenkamas pagal klupumo kreivę, priklauso nuo skerspjuvio;

$\alpha_{ult,k}$ – mažiausiosios jėgos daugiklis, atitinkantis ašinės jėgos konfigūraciją M_{Rk} elementuose ir skirtas charakteristinei didžiausią ašinių įtempį turinčio skerspjuvio ašinei galiai N_{Rk} pasiekti neatsižvelgiant į klupumą;

α_{cr} – mažiausiosios jėgos daugiklis, atitinkantis ašinės jėgos konfigūraciją N_{Ed} elementuose ir skirtas pasiekti tamprųjų kritinį klupumą;

M_{Rk} – kritinio skerspjūvio charakteristinė lenkiamoji galia, atitinkamai $M_{el,Rk}$ arba $M_{pl,Rk}$;

N_{Rk} – kritinio skerspjūvio charakteristinė ašinė gniuždomoji galia, t.y. $N_{pl,Rk}$;

$EI \cdot \eta_{cr,max}$ – η_{cr} kritiniame skerspjūvyje sukeltas lenkiamasis momentas;

η_{cr} – tampriojo kritinio klupumo forma.

2.4. Baigtinių elementų metodas (BEM)

Egzistuoja įvairių baigtinių elementų metodo variacijų, kuriomis galima įvertinti geometrinius netiesiškumus konstrukcijoje. Bendru atveju antrosios eilės analizę galima aprašyti R. Ziemiano (Ziemian 2010) išraiška:

$$\{dF\} - \{dR\} = [K] \cdot \{d\Delta\}; \quad (2.17)$$

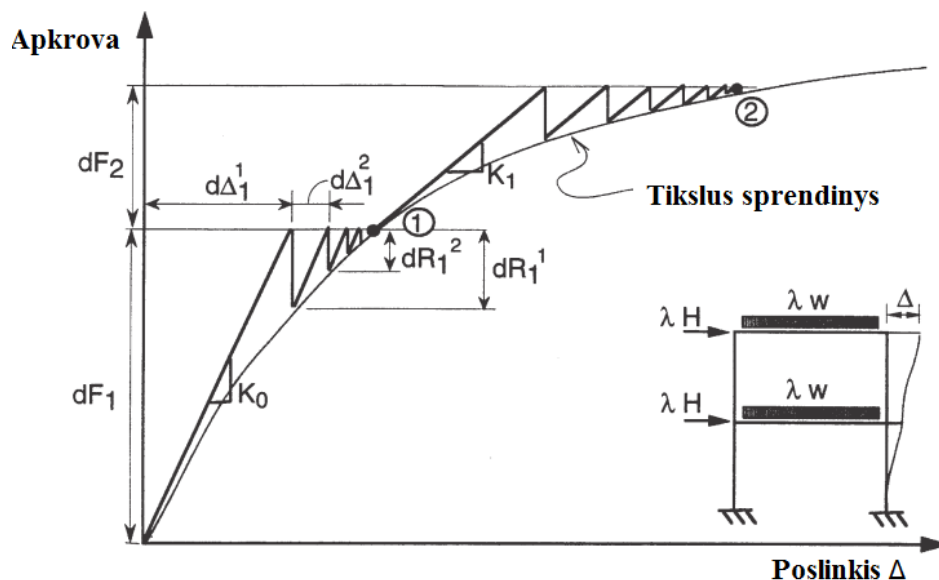
čia

$\{dF\}$ - apkrovos prieaugio vektorius;

$\{dR\}$ - nesubalansuotos jėgos vektorius, apskaičiuojamas kaip veikiančios vidinės jėgos ir apkrovos skirtumas;

$[K]$ - standumo matrica;

$\{d\Delta\}$ - mazgų poslinkio prieaugio vektorius.



2.4 pav. Modifikuotas Niutono – Rafsono prieaugio iteracinis metodas (Ziemian 2010)

Atliekant antrosios eilės analizę projektavimo programų paketais ir norint gauti tiksliai rezultatus reikia laikytis tam tikrų sąlygų (da Silva *et al.* 2016):

- Konstrukcijos modelis turėtų tiksliai atspindėti standžiąją konstrukcijos elgseną. Modeliuojant mazgus turėtų būti naudojamas pradinis standis;

- Elementų diskretizacija turi būti adekvati;
- Kritinė apkrova turi būti nustatoma kiekvienam apkrovimo variantui;
- Kadangi konstrukcija turi daugiau nei vieną klupumo formą, o šios gali būti reikšmingos antrosios eilės efektams, turi būti apskaičiuota daugiau viena kritinė apkrova bei klupumo forma.

Šiame darbe antrosios eilės analizės atlikimui naudojama programa „SCIA Engineer“. Konstrukcijos elementai pagal S. Markandu (2010) rekomendaciją sudalinami į 20 baigtinių elementų.

Kadangi šiame darbe yra detalai nagrinėjama pastovumo problema, svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad dauguma šiuolaikinių baigtinių elementų programų, kartu ir naudojama „SCIA Engineer“, strypiniuose baigtiniuose elementuose nevertina pastovumo praradimo pasireiškiant sukimui ar skersiniam sukamajam klupumui. Šių pastovumo praradimo formų įvertinimas nėra naujiena, kadangi tokius strypinius elementus, turinčius 14 laisvumo laipsnių, dar 1986 metais aprašė mokslininkas M. Attardas (Attard 1986). Tačiau naudojant šiuos elementus išauga kompiuterinių resursų sunaudojimas bei yra ir kitų problemų juos pritaikant, todėl jie vis dar nėra plačiai naudojami.

2.5. Skaičiuojamojo kolonos ilgio nustatymo metodikos

LST EN 1993-1-1 nėra apibrėžtas skaičiuojamojo kolonos ilgio nustatymas, taip inžinieriui paliekama tinkamų metodų paieška. Kadangi skaičiuojamojo kolonos ilgio principas yra gana detalai nagrinėjamas jau ne vieną dešimtmetį, egzistuoja daug metodų šio ilgio nustatymui, tačiau kuo daugiau įvertina pasirinktas metodas (žr. 2.2 lent.), tuo jis tampa sudėtingesniu ir tokiu atveju dingsta didžiausias lygiavertės kolonos metodo pranašumas – paprastumas pritaikant.

2.2 lentelė. Skaičiuojamojo ilgio nustatymo metodikos

Metodika įvertinama:	STR	EC3 - NCCI	BEM klupumo analizė
Netolygus apkrovimas	-/+	-/+	+
Gretimų elementų standumas (aukštų, tarpatrių skaičius)	-/+	-/+	+
Mazgų standumas	-	-/+	+

Efektyviausias būdas norint kuo tiksliau nustatyti skaičiuojamąjį kolonos ilgį yra pasinaudoti BEM klupumo analize, kadangi ji, priklausomai nuo pasirinktos programos, gali be didelių darbo sąnaudų įvertinti daugumą poveikių. Tačiau prieš naudojant šį metodą svarbu suprasti jo pritaikymo specifiką (pritaikymą žr. 3 skyriuje). Remiantis klupumo analize

gaunamas skaičiuojamasis ilgis pagal bendrąją klupumo formą. Tai reiškia, jog vieno elemento pastovumo praradimas gali lemti visų elementų skaičiuojamąjį ilgį. Skaičiuojamasis ilgis pagal BEM gaunamas iš A. Abreu ir C. Sousos (Abreu, Sousa 2009) lygties:

$$\mu_{BEM} = \sqrt{\frac{P_E}{P_{cr.BEM}}}; \quad (2.18)$$

čia

P_E - tamprioji kritinė jėga pagal (1.1) formulę lankstais įtvirtintai kolonai;

$P_{cr.BEM}$ - kritinė jėga gauta BEM klupumo analize.

NCCI SN008 (Euronormas papildanti, neprieštaraujanti dokumentacija, naudojama kartu su britų standartais) pateikia originaliai (Wood 1974) parašytą metodiką, kuri įvertina gretimų elementų standumą. Ši metodika gana universali ir lengvai papildoma, egzistuoja nemažai jos modifikacijų, kurios gali įvertinti mazgų standį, netolygų apkrovos pasiskirstymą per aukštus (Webber *et al.* 2015) ir t.t. Pagal šią metodiką skaičiuojamojo ilgio koeficientas gali būti gaunamas formulėmis arba nomogramomis:

$$\mu = \left(\frac{1 - 0,2 \cdot (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{1 - 0,8 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \right)^{0,5} - \text{kai rėmas paslankus}; \quad (2.19)$$

$$\mu = 0,5 + 0,14 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + 0,055 \cdot (\eta_1 + \eta_2)^2 - \text{kai rėmas nepaslankus}; \quad (2.20)$$

čia

$$\eta_1 = \frac{K_c + K_1}{K_c + K_1 + K_{11} + K_{12}};$$

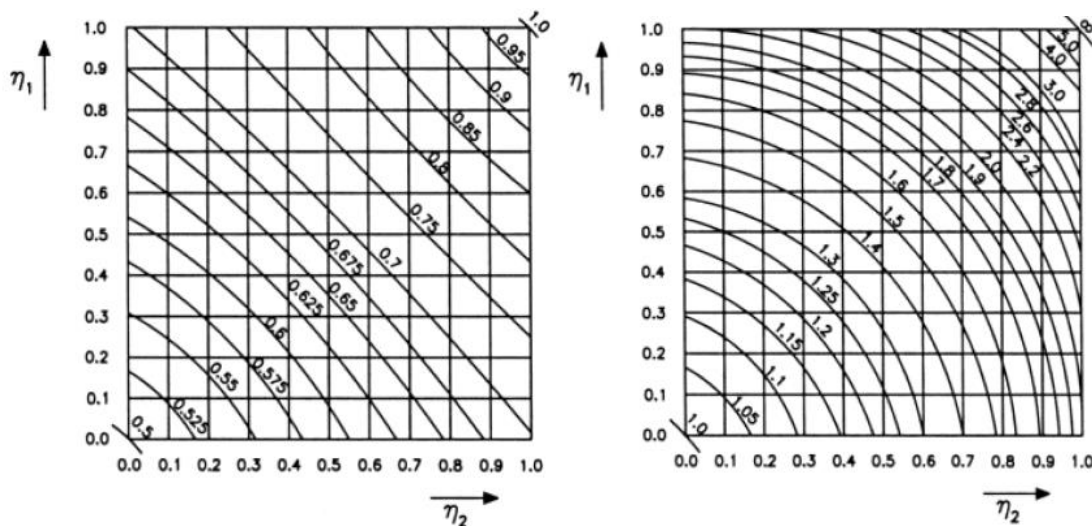
$$\eta_2 = \frac{K_c + K_2}{K_c + K_2 + K_{21} + K_{22}};$$

$$K_{ij} = \frac{a \cdot I_b}{L_b} - \text{gretimų elementų standumo koeficientas};$$

L_b – elemento ilgis;

a – koeficientas įvertinantis elemento įtvirtinimo sąlygas priešingoje pusėje;

I_b – lygiagrečiai rėmui esančio elemento skerspjūvio inercijos momentas.



2.5 pav. Nomogramos skaičiuojamajam ilgiui gauti (NCCI 2005)

Statybiniame techniniame reglamente (STR) pateikiama keletas metodikų. Pastoviojo skerspjūvio kolonų ir statramsčių skaičiuojamojo ilgio koeficientai pateikiami 3 priedo 6 lentelėje.

2.3 lentelė. Skaičiuojamojo ilgio koeficientai pagal STR (2005)

Įtvirtinimo schema ir apkrova							
μ	1,0	0,7	0,5	2,0	1,0	2,0	0,7

Sudėtingesniems atvejams STR XII skirsnyje pateikiama kita metodika. Remiantis šia metodika gali būti įvertinama aukštų ir tarpatramių skaičiaus įtaką, tačiau tik kai apkrova tolygi. Netolygus apkrovimas įvertinamas tik laisviesiems vienaukščiams rėmams, kurių kolonų viršuje yra įrengtas standusis perdangos diskas arba išilginiai ramsčiai. Kai kuriems atvejams skaičiuojamojo ilgio lygtys pateikiamos:

kai rėmo mazgai standūs ir rėmas paslankus:

$$\mu = \sqrt{\frac{n+0,56}{n+0,14}}; \quad (2.22)$$

kai pamato mazgas lankstas ir rėmas paslankus:

$$\mu = 2 \cdot \sqrt{1 + \frac{0,38}{n}}; \quad (2.23)$$

nelaisviesiems rėmams:

$$\mu = \sqrt{\frac{1+0,46 \cdot (p+n)+0,18 \cdot p \cdot n}{1+0,93 \cdot (p+n)+0,71 \cdot p \cdot n}}; \quad (2.24)$$

kai apkrova yra netolygi:

$$\mu_{c,eff} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N_{ci}}{N_c \cdot \sum I_{ci}}} > 0,7; \quad (2.25)$$

čia

$$p = \frac{I_{r,l} \cdot l_c}{l_r \cdot I_c} - \text{koeficientas, kai rėmas vienaaukštis;}$$

$$n = \frac{I_{r,u} \cdot l_c}{l_r \cdot I_c} - \text{koeficientas, kai rėmas vienaaukštis;}$$

$I_{r,u}, l_r$ - sijos inercijos momentas ir ilgis;

I_c, l_c - nagrinėjamos kolonos inercijos momentas ir ilgis;

N_c - nagrinėjamos kolonos skaičiuotinė įraža;

$\sum N_{c,i}$ ir $\sum I_{c,i}$ - visų nagrinėjamojo rėmo ir keturių gretutinių rėmų (po du iš kiekvienos pusės) kolonų skaičiuotinių įrašų ir inercijos momentų suma.

Netolygaus rėmo apkrovimo veiksniai nagrinėti papildomai remiamasi (Djalaly 1976; Abreu, Sousa 2009) metodika. Metodika vieno tarpatramio rėmui aprašoma:

$$\mu_A = \sqrt{1 + \frac{3 \cdot c}{7,5 + c}} \cdot \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{F_B}{F_A}\right)} - \text{kolonai A;} \quad (2.26)$$

$$\mu_B = \sqrt{1 + \frac{3 \cdot c}{7,5 + c}} \cdot \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{F_A}{F_B}\right)} - \text{kolonai B;} \quad (2.27)$$

čia

$$c = \frac{I_c \cdot l_b}{l_c \cdot I_B};$$

I_c, l_c - nagrinėjamos kolonos inercijos momentas ir ilgis;

I_b, l_b - sijos inercijos momentas ir ilgis;

F_A ir F_B - atitinkamai A ir B kolonų ašinės jėgos.

3. SKAIČIUOJAMOJO KOLONOS ILGIO NUSTATYMAS

Norint kuo tiksliau pritaikyti lygiavertės kolonos metodą bei 4-ajame skyriuje jį palyginti su antrosios eilės analize, šiame skyriuje yra nagrinėjami veiksniai turintys poveikį skaičiuojamajam kolonos ilgiui, kadangi nuo šio ženkliai priklauso lygiavertės kolonos metodu gauti rezultatai. Taip pat svarbu paminėti, jog yra gana sudėtinga nagrinėti konkrečius pavyzdžius skirtus išryškinti konkretiems veiksniams, kurie daro poveikį skaičiuojamajam ilgiui, todėl šiame skyriuje taip pat pateikiamos įvairios realios rėminės konstrukcijos, kuriose paryškinama skaičiuojamojo ilgio nustatymo metodikų problematika. Taip pat išskiriami ir bandomi paaiškinti veiksniai darantys poveikį rėmo skaičiuojamajam ilgiui. Tačiau kadangi šiame darbe nagrinėjamos tik antrosios eilės poveikius vertinančios metodikos, daugiau dėmesio skiriama paslankiems rėmams.

3.1. Veiksniai, darantys poveikį skaičiuojamajam kolonos ilgiui

Eulerio kolonos kritinės pastovumo praradimo lygtis (1.1) aptarta 1.2 poskyryje idealiam atveju yra daugelį dešimtmečių naudojama kolonų stabilumui tikrinti, kartu su skaičiuojamuoju kolonos ilgiu. Tačiau realiose rėminėse konstrukcijose kolonos bei sijos vienos su kitomis sąveikauja, egzistuoja apkrovos pasiskirstymas, o tai lemia paklaidas vertinant tik pavienes kolonas. Šiame poskyryje nagrinėjami veiksniai, darantys poveikį kolonų skaičiuojamajam ilgiui:

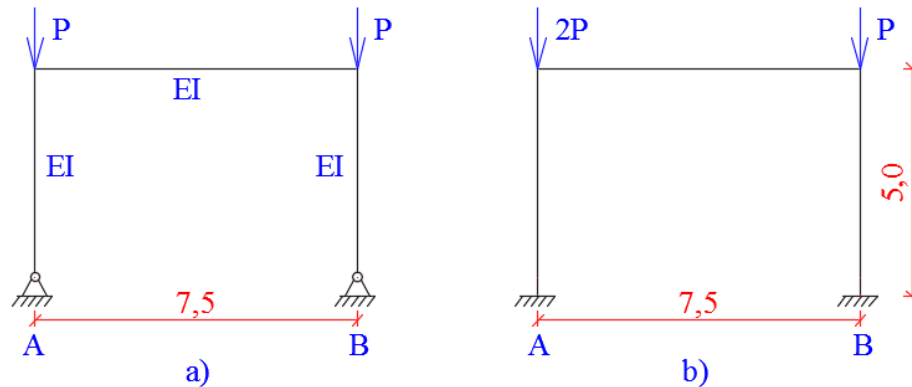
- netolygus apkrovimas;
- sijos standumo poveikis esant išskirstytai apkrovai;
- tarpatramių skaičius (kitų tarpatramio kolonų bei sijų poveikis);
- aukštų skaičius (kituose aukštuose esančių kolonų bei sijų poveikis).

Šiame poskyryje skaičiuojamasis ilgis pagal BEM klupumo analizę darant prielaidą, jog yra tiksliausias iš nagrinėjamų, yra priimamas kaip atskaitinis analitiniams metodams. Kadangi šiuo atveju skaičiuojamasis ilgis gaunamas pagal visos konstrukcijos pastovumo praradimo formą, įskaitant visų elementų standumą, standumo pasiskirstymą, apkrovimo netolygumą ir kitus veiksnius. Kad baigtinių elementų metodu būtų gaunami kuo tikslesni rezultatai atsižvelgiama į (da Silva *et al.* 2016) rekomendacijas (žr. 2.4 poskyrį). Konstrukcijos elementai pagal S. Markandu (2010) rekomendaciją sudalinami į 20 baigtinių elementų.

Pastovumo analizei naudojama baigtinių elementų programa „SCIA Engineer“ (toliau BEM). Mazgų standumo įtaka šiame darbe nenagrinėjama, darant prielaidą, jog mazgai yra visiškai standūs arba lankstūs.

3.1.1. Netolygus rėmo kolonų apkrovimas

Kaip buvo aptarta 2.5 poskyryje, netolygus rėmo kolonų apkrovimas turi įtakos jų skaičiuojamajam ilgiui, todėl atliekami skaičiavimai tikrinant metodikas, kurios šį poveikį vertina, kartu rezultatai palyginami su metodikomis kurios netolygaus apkrovimo nevertina. 3.1 pav. pateikiami keletas nagrinėjamų rėmų variantų pagal A. Abreu ir C. Sousos (Abreu, Sousa 2009). Atliktų skaičiavimų rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.



3.1 pav. Nagrinėjamas lankstu įtvirtintas tolygiai apkrautas (a) bei standus netolygiai apraustas (b) rėmai

Pagal STR metodiką skaičiuojamasis kolonos ilgis kai pamato mazgas standus ir rėmas paslankus nustatomas pagal (2.22) formulę:

$$\mu = \sqrt{\frac{n+0,56}{n+0,14}} = \sqrt{\frac{0,667+0,56}{0,667+0,14}} = 1,23.$$

Kai apkrova yra netolygi skaičiuojamasis ilgis nustatomas pagal (2.24) formulę:

$$\mu_{c,eff} = \mu \cdot \sqrt{\frac{I_c \cdot \sum N_{ci}}{N_c \cdot \sum I_{ci}}} = 1,23 \cdot \sqrt{\frac{5696 \cdot 1}{2 \cdot 5696}} = 0,87 > 0,7;$$

čia

$p = 50$ - kai kolonos ir pamato mazgas standus;

$$n = \frac{I_{r,u} \cdot l_c}{l_r \cdot I_c} = 0,667;$$

$l_r = 7,5$ m - HEB 200 sijos ilgis;

$I_c = I_{r,u} = 5696 \text{ cm}^4$ - HEB 200 sijos ir kolonos inercijos momentas;

$l_c = 5$ m – nagrinėjamos kolonos inercijos momentas ir ilgis;

$N_c = 2$ – nagrinėjamos kolonos skaičiuotinė įraža;

$\sum N_{c,i} = 1$ – visų nagrinėjamojo rėmo ir keturių gretutinių rėmų (po du iš kiekvienos pusės) kolonų skaičiuotinių įrašų suma;

$\sum I_{c,i} = 5696 \text{ cm}^4$ – visų nagrinėjamojo rėmo ir keturių gretutinių rėmų (po du iš kiekvienos pusės) kolonų inercijos momentų suma.

Kitiems rėmo atvejams skaičiavimai atliekami analogiškai ir rezultatai pateikiami 3.1 lentelėje.

Pagal H. Djalaly (1976) metodiką skaičiuojamasis kolonos A ilgis, kai pamato mazgas standus ir apkrovimas netolygus gaunamas pagal (2.26) lygtį:

$$\mu_A = \sqrt{1 + \frac{3 \cdot c}{7,5 + c}} \cdot \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{F_B}{F_A}\right)} = \sqrt{1 + \frac{3 \cdot 1,5}{7,5 + 1,5}} \cdot \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 1,06.$$

Kolonai B pagal 2.27 lygtį:

$$\mu_B = \sqrt{1 + \frac{3 \cdot c}{7,5 + c}} \cdot \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{F_A}{F_B}\right)} = \sqrt{1 + \frac{3 \cdot 1,5}{7,5 + 1,5}} \cdot \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{2}{1}\right)} = 1,5;$$

čia

$$c = \frac{I_c \cdot l_b}{l_c \cdot I_B} = \frac{5696 \cdot 5}{7,5 \cdot 5696} = 1,5;$$

$I_c = I_b = 5696 \text{ cm}^4$ – HEB 200 skerspjuvio sijos ir kolonos inercijos momentai;

$l_c = 5 \text{ m}$ – kolonos ilgis;

$l_b = 7,5 \text{ m}$ – sijos inercijos momentas ir ilgis;

F_A ir F_B – atitinkamai A ir B kolonų ašinės jėgos.

Kitiems rėmo atvejams skaičiavimai atliekami analogiškai ir rezultatai pateikiami 3.1. lentelėje.

Pagal NCCI metodikos (2.19) lygtį gaunamas skaičiuojamasis kolonos ilgis, kai pamato mazgas standus ir apkrovimas tolygus:

$$\begin{aligned} \mu &= \left(\frac{1 - 0,2 \cdot (\eta_1 + \eta_2) - 0,12 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2}{1 - 0,8 \cdot (\eta_1 + \eta_2) + 0,6 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} \right)^{0,5} = \\ &= \left(\frac{1 - 0,2 \cdot (0,5 + 0) - 0,12 \cdot 0,5 \cdot 0}{1 - 0,8 \cdot (0,5 + 0) + 0,6 \cdot 0,5 \cdot 0} \right)^{0,5} = 1,23; \end{aligned}$$

čia

$$\eta_1 = \frac{K_{c1}}{K_c + K_{12}} = \frac{0,0114}{0,0114 + 0,0114} = 0,5;$$

$\eta_2 = 0$ – kai kolonos ir pamato mazgas standus;

$K_{12} = 1,5 \cdot \frac{I_B}{L_B} = 1,5 \cdot \frac{5696}{7,5} = 0,0114$ – gretimų elementų standumo koeficientas;

$L_b = 5 \text{ m}$ – elemento ilgis;

$I_b = 5696 \text{ cm}^3$ – lygiagrečiai rėmui esančio elemento skerspjūvio inercijos momentas.

Kitiems rėmo atvejams skaičiavimai atliekami analogiškai ir rezultatai pateikiami 3.1. lentelėje.

Pagal BEM klupumo analizę ir lygtį (2.18) gaunamas skaičiuojamasis kolonos A ilgis, kai pamato mazgas lankstas ir apkrovimas netolygus:

$$\mu_A = \sqrt{\frac{N_E}{N_{A,cr}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210000000 \cdot 5,696 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 503,52 \cdot 5^2}} = 2,17.$$

Kolonos B skaičiuojamasis ilgis:

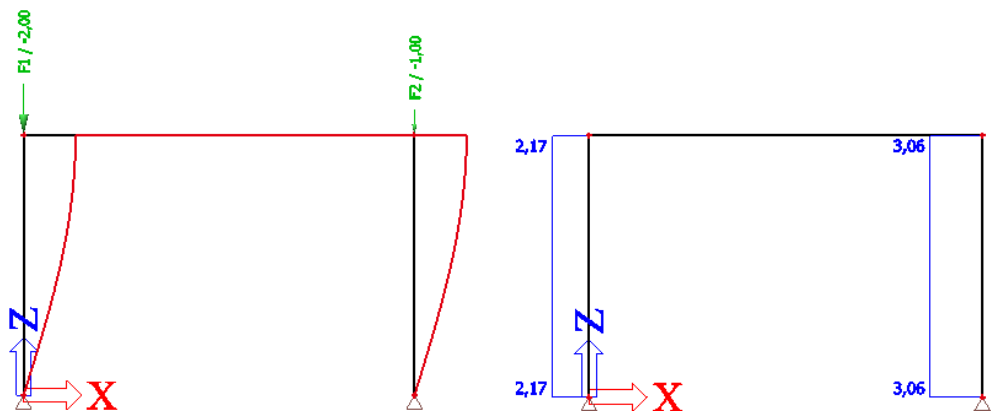
$$\mu_B = \sqrt{\frac{N_E}{N_{B,cr}}} = \frac{\pi^2 \cdot 210000000 \cdot 5,696 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 503,52 \cdot 5^2} = 3,06;$$

čia

N_A ir N_B - atitinkamai A ir B kolonų kritinės jėgos reikšmės, gaunamos iš BEM klupumo analizės pagal klumpamąją formą (žr 3.2 pav.);

N_E – kritinė Eulerio jėga lanksčiai kolonai.

Kitiems rėmo atvejams skaičiavimai atliekami analogiškai naudojant „SCIA Engineer“ ir rezultatai pateikiami 3.1. lentelėje.



3.2 pav. Klupumo forma ir atitinkantis ją skaičiuojamasis ilgis, gauti „SCIA Engineer“ programa

3.1 lentelė. Skaičiuojamasis kolonos ilgis esant netolygiam kolonų apkrovimui

Metodas	Rėmo kolona	Netolygi apkrova kai kolonos – pamato mazgas		Tolygi apkrova kai kolonos – pamato mazgas	
		lankstas	standus	lankstas	standus
BEM	A	2,17	1,07	2,50	1,24
	B	3,06	1,52		
Djalaly (1976) metodika	A	2,12	1,06	2,45	1,23
	B	3,00	1,50		
STR	A	1,77	0,87	2,51	1,23
	B	-	-		
NCCI	A ir B	-	-	2,53	1,23

NCCI metodika nevertina apkrovos pasiskirstymo ir šiuo atveju nagrinėjama tik metodikų palyginimo tikslais, kadangi praktikoje yra naudojama taip pat ir netolygiai apkrautomis konstrukcijoms. Esant tolygiai apkrovai ir paslankiam rėmui rezultatai sutampa su kitomis metodikomis (skirtumas nuo 8 % iki 14% priklausomai nuo mazgo tipo ir metodikos).

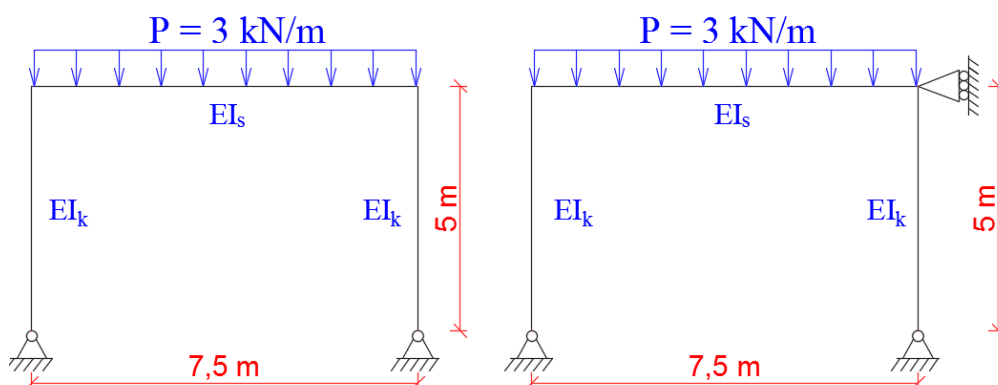
Statybos techniniame reglamente pateiktoje metodikoje gauti rezultatai sutampa su kitomis metodikomis esant tolygiai apkrovai, tačiau iš (2.24) lygties, pateiktos netolygiam apkrovimui, gaunami rezultatai esant paslankiam rėmui yra pastebimai mažiau konservatyvūs nei gauti H. Djalaly (1976) metodika (skirtumas 19,8 % esant lanksčiam mazgui bei 22 % standžiam) bei BEM (skirtumas 22,3 % bei 23 % atitinkamai) metodikose. STR pateikta lygtis netolygiam apkrovimui skirta tik labiausiai apkrautos kolonos (skaičiavimuose - kolona A) atvejui.

Esant tolygiai apkrovai, H. Djalaly (1976) metodikos rezultatai sutampa su kitų metodikomis, tačiau esant netolygiai apkrovai, kaip jau buvo pastebėta, gauti rezultatai yra mažiau konservatyvūs, lyginant su STR (19,8 %) bei sutampa su BEM klupumo analize.

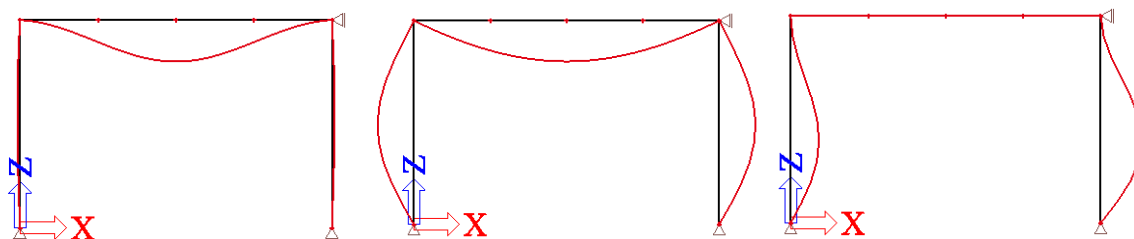
Visais rėmo atvejais, kai metodikos vertina tik tolygų apkrovimą, gautas skaičiuojamasis ilgis yra labiau konservatyvus, nei gautas metodais, vertinančiais netolygų apkrovimą labiausiai apkrautai kolonai (skirtumas priklausomai nuo metodikos ir mazgo tipo nuo 13 iki 43 %), tačiau mažiau apkrautai kolonai atvirkščiai – ne konservatyvus (atitinkamai nuo 21 iki 24 %).

3.1.2. Sijos standumo poveikis esant išskirstytai apkrovai

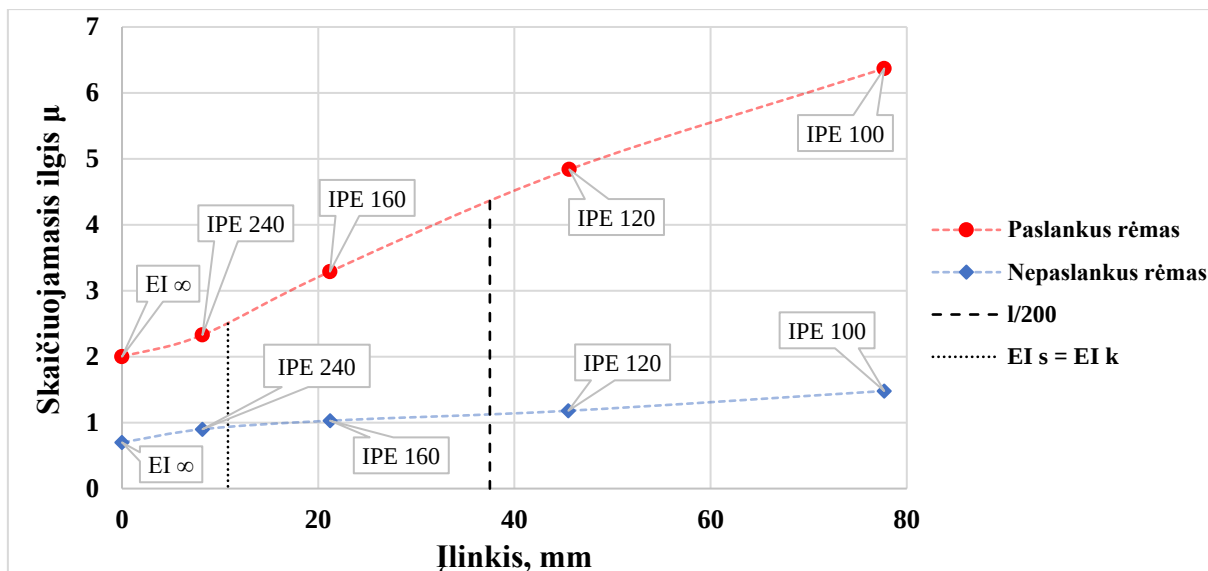
Visų rėmo elementų standumas turi poveikį kolonos skaičiuojamajam ilgiui, kadangi nuo elementų deformacijos priklauso mazgų pasisukimai, kurie savo ruožtu ir lemia skaičiuojamuosius ilgius. Tačiau daugelyje analitinių metodikų daroma prielaida, jog apkrovos veikia tik mazguose, tokiu atveju sijos turi poveikį skaičiuojamajam ilgiui, tik kaip ryšiniai elementai tarp kolonų, nors realybėje apkrovos dažniausia būna išskirstytos per sijos ilgį. Šiuo atveju sijos įlinkis nuo išskirstytos apkrovos taip pat lemia mazgų pasisukimą.



3.3 pav. Paslanki bei nepaslanki nagrinėjamų rėmų skaičiuojamosios schemas



3.4 pav. Pastovumo praradimo formas atitinkamai, kai $EI_s \ll EI_k$, $EI_s = EI_k$ bei $EI_s \gg EI_k$



3.5 pav. Skačiuojamojo ilgio priklausomybė nuo sijos įlinkio esant išskirstytai apkrovai

Iš grafike pateiktų rezultatų matyti, jog kuo didesnis sijos standumas, tuo labiau skaičiuojamasis ilgis artėja prie teorinio atvejo nevertinančio sijų standumo (paslankiam rėmui $\mu=2$, nepaslankiam $\mu=0,7$). Mažėjant sijos standumui gaunamas vis didesnis skaičiuojamasis ilgis. Taip yra todėl, jog esant mažesniui sijos standumui vyksta didesnės deformacijos, kurios savo ruožtu lemia didesnius mazgų pasisukimus. Šie pasisukimai dar labiau destabilizuoja koloną ir ji greičiau praranda pastovumą. Kaip matyti iš (2.18) lygties, mažesnė kritinė jėga esant tai pačiai veikiančiai apkrovai lemia didesnį skaičiuojamąjį ilgį.

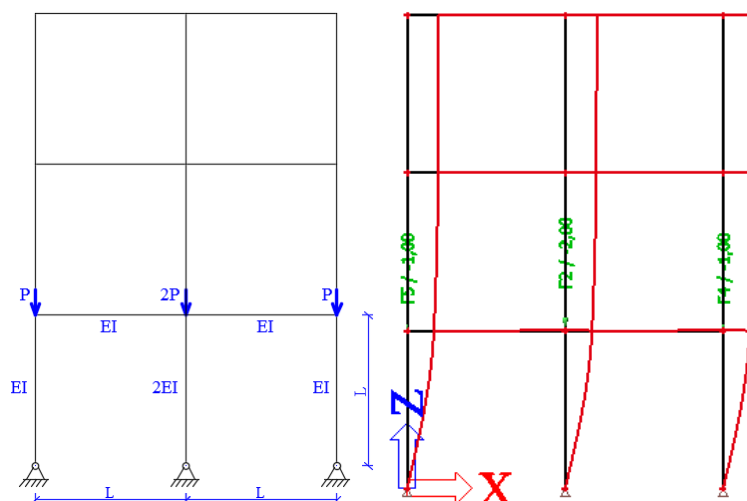
Tačiau svarbu atkreipti dėmesį į tai, jog esant mažo standumo sijoms (lyginant su kolonos standumu) jų deformacijos tampa tokios didelės, jog gali lemti pastovumo praradimą, t.y. sijos deformacijos (įlinkiai) tampa tokios didelės, jog programa fiksuoja, kad šios deformacijos, o ne kolonos poslinkiai lemia pastovumo praradimo formą (žr. 3.4 pav.). Tokiu atveju nebūtų tikslinga priimti skaičiuojamojo kolonos ilgio gauto tokiu būdu, kadangi kritinę jėga lemia sijos, o ne kolonos deformacijos. Tikslesniam šių rezultatų bei problemos interpretavimui reikalingi detalesnė analizė, tačiau dėl šio magistrinio darbo specifikos bei šios problemos sudėtingo, išskirstytos apkrovos poveikis detaliau nebus nagrinėjamas.

3.1.3. Aukštų skaičius

Šiame poskyryje tiriamas aukštų skaičiaus poveikis kolonų skaičiuojamajam ilgiui naudojant S. Markandu (2010) nagrinėtą rėmą. Skaičiavimai atliekami naudojantis BEM klupumo analize, taip pat rezultatams palyginti NCCI metodika, kuri vertina tik gretimų elementų standumo poveikį (t.y. įskatant ir aukštu žemiau ir aukščiau esančios kolonos poveikį).

3.2 lentelė. Skaičiuojamasis kolonų ilgis esant skirtingam aukštų skaičiui

Pamato – kolonos mazgas	Metodas	Skaičiuojamasis ilgis μ priklausomai nuo aukštų skaičius		
		1	2	3
Lankstas	BEM	2,35	2,30	2,30
	NCCI	2,36	2,68	2,68
Standus	BEM	0,89	0,82	0,82
	NCCI	1,16	1,26	1,26

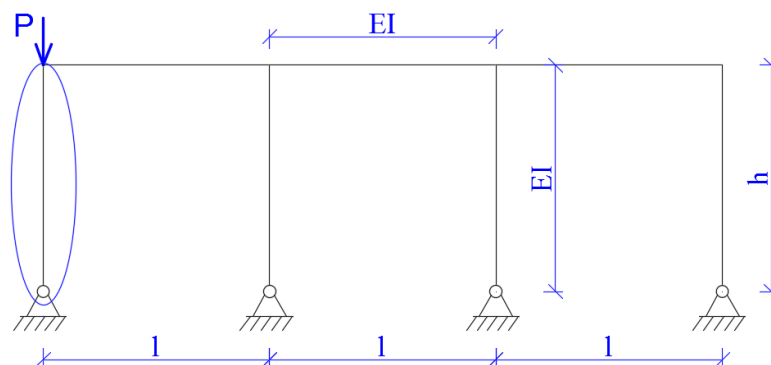


3.6 pav. Rėmo skaičiuojamoji schema bei pastovumo praradimo forma esant lankstams kaip kolonų įtvirtinimo sąlygoms

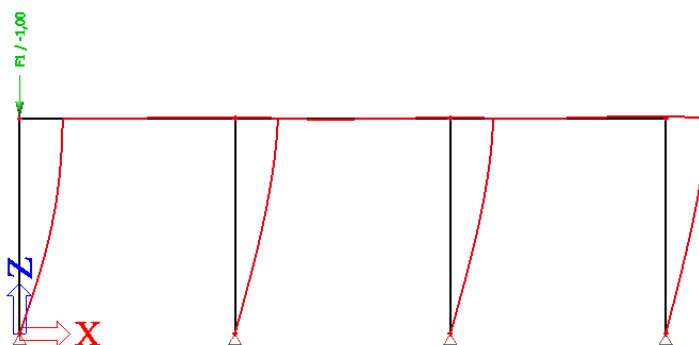
Iš BEM analize gautų rezultatų matyti, jog poveikį skaičiuojamajam ilgiui turi tik greta esantis aukštas. NCCI metodika šiuo atveju turėtų būti pakankamai patikima, kadangi vertina aukštu žemiau ir aukščiau esančių kolonų standumą. Tačiau ši metodika remiasi prielaida, jog kiekviena kolona yra apkrauta vienodu santykiu N/N_{cr} , o tai lemia rezultatų nesutapimą šiame rėmo modelyje, esant daugiau nei vienam aukštui, kadangi visuose aukštuose kolonos yra tos pačios, o apkrautas tik apatinis aukštas.

3.1.4. Tarpatramių skaičius

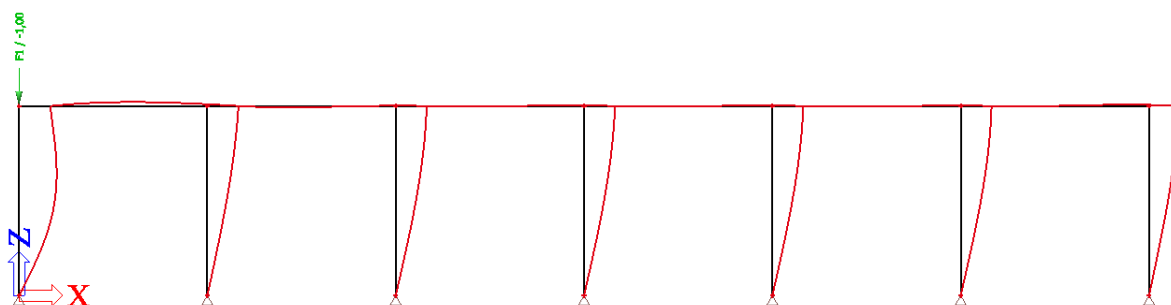
Šiame skyrelyje nustatomas skaičiuojamasis kolonos ilgis rėmams, turintiems nuo vieno iki šešių tarpatramių, naudojant BEM klupumo analizę bei STR (2.24) lygtį taikomą paslankiems rėmams bei netolygiai apkrovai. Nagrinėjamuose nesuvaržytuose rėmuose apkraunama kraštinė kolona ir nustatomas jos skaičiuojamojo ilgio koeficientas. 3.7 paveiksle pateikiamas nagrinėjamas rėmo variantas. Kolonų ir sijų mazgai – standūs, kolonų ir pamato – lankstai. Kolonos ir sijos nagrinėjamame rėme turi vienodus parametrus. Gretimų kolonų suvaržymo įtaka šiuo atveju pasireiškia tik esant laisviesiems rėmams. Rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje. Be atliktų skaičiavimų kartu pateikiami ir S. Markandu (2011) rezultatai, gauti „Robot“ programos klupumo analize. Taip pat atliekami skaičiavimai nustatyti kiek skaičiuojamąjį ilgį lemia rėmo aukščio ir tarpatramio dydžio santykis esant skirtingam tarpatramių skaičiui.



3.7 pav. Nesuvaržytas trijų tarpatramių rėmas su pažymėta nagrinėjama kolona (pagal Markandu 2011)



3.8 pav. Rėmo stabilumo praradimo forma esant 4 tarpatramiams



3.9 pav. Rėmo stabilumo praradimo forma esant 6 tarpatramiams

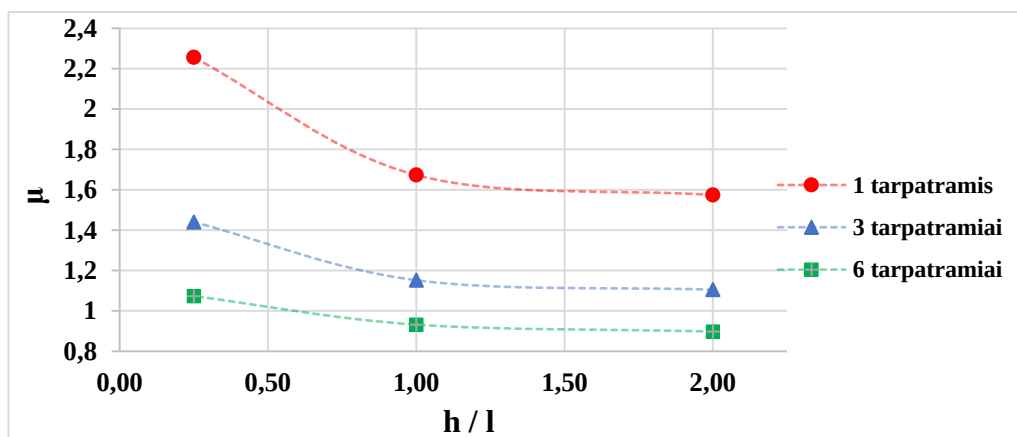
3.3 lentelė. Skaičiuojamojo ilgio koeficientas priklauso nuo tarpatramių skaičiaus

Metodai	Skaičiuojamasis ilgis μ priklauso nuo tarpatramių skaičiaus					
	1	2	3	4	5	6
BEM pagal Markandu (2011)	1,658	1,326	1,142	1,030	0,960	0,916
BEM	1,673	1,336	1,152	1,041	0,973	0,932
STR	2,216	1,567	1,280	1,108	0,991	0,905
NCCI	2,366					

Iš rezultatų galima pastebėti, jog tarpatramių skaičius turi žymų poveikį skaičiuojamajam kolonos ilgiui, kuris kinta nuo 2,216 iki 0,905 priklauso nuo metodikos ir tarpatramių skaičiaus. Taip yra todėl, jog dėl papildomų tarpatramių standinimo poveikio reikalinga vis didesnė kritinė jėga rėmo pastovumo praradimui.

Taip pat iš rezultatų matyti, jog esant nagrinėjam elementų standumui, rėmai su 4 ar mažiau tarpatramių, praranda stabilumą išklupus visoms kolonomis vienu metu ($\mu > 1$), tačiau esant 5 ar daugiau tarpatramių pirmiau pasireiškia atskiros kolonos stabilumo praradimas ($\mu < 1$).

Rezultatai gauti pagal BEM klupumo analizę sutampa su S. Markandu (2011) gautais, tačiau pastebimai skiriasi nuo STR rezultatų. To priežastis gali būti labai supaprastinta, analitinė, STR pateikta formulė (2.24), kurią pritaikant pastebėti žymūs skirtumai su kitais metodais ir 3.1.1 poskyryje. NCCI gauti rezultatai yra patys konservatyviausi, tačiau šis metodas nevertina netolygaus apkrovimo ir tarpatramių skaičiaus.



3.10 pav. Skaičiuojamojo ilgio priklausomybė nuo tarpatramio ilgio bei aukšto aukščio santykio

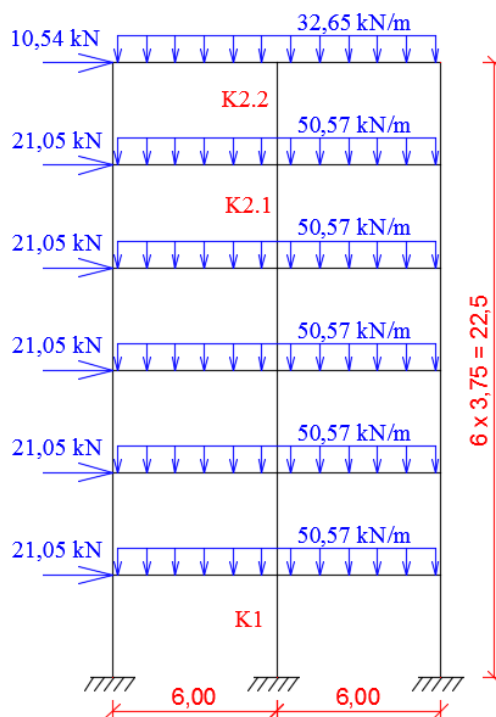
Iš 3.10 paveiksle pateiktų rezultatų matyti, jog kuo tarpatramis yra didesnis palyginti su rėmo aukščiu, tuo gauta kritinė kolonos apkrova yra mažesnė (skaičiuojamasis ilgis didesnis). Taip yra dėl to, jog rėmo sijos didėjant jų ilgiui lengviau deformuojasi ir perduoda mažiau apkrovos kitoms rėmo kolonomis. Su didesniu tarpatramių skaičiumi šis efektas pasireiškia ne taip pastebimai, kadangi daugiau elementų perima apkrovą.

3.2. Metodikų pritaikymo pavyzdžiai

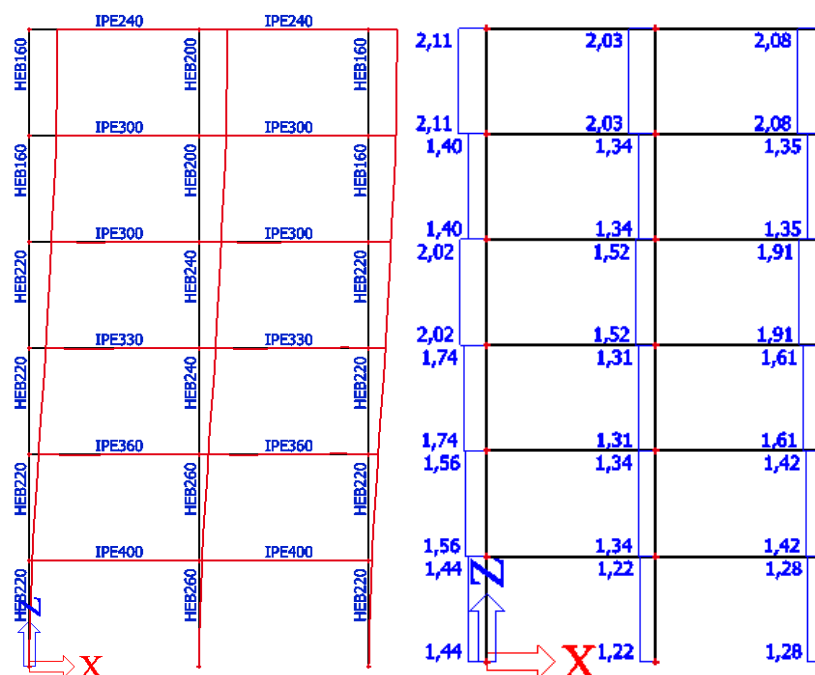
Šiame poskyryje pateikiami įvairių rėminių konstrukcijų, kartu ir problematiškų skaičiuojamojo kolonos ilgio nustatymo atžvilgiu pavyzdžiai. Kai kurie rėmai pasirinkti, kadangi bus naudojami 4 skyriaus metodikų palyginimui, kurį atliekant skaičiuojamieji ilgiai bus reikalingi pritaikant lygiavertės kolonos metodą. Pastovumo analizei naudojama baigtinių elementų programa „SCIA Engineer“.

3.2.1. Vogel (1985) daugiaaukštis standus rėmas

Pateikiamas originaliai U. Vogelio (Vogel 1985) nagrinėtas 6 aukštų rėmas. Šis rėmas dažnai naudojamas baigtinių elementų programoms kalibruoti bei kitiems tyrimams. Rėmui autorė A. Maleck (2001) savo darbe gavo skaičiuojamuosius ilgius apatinėms rėmo kolonoms naudojant AISC metodiką. Šiame skyrelyje rėmui gaunami skaičiuojamieji ilgiai STR, NCCI ir BEM metodais bei pateikiami kartu su A. Maleck (2001) gautais 3.4 lentelėje. Antrosios eilės poveikiams bus tikrinamo vidurinės rėmo kolonos K1, K2.1 ir K2.2, todėl skaičiuojamieji ilgiai pagal minėtas metodikas apskaičiuojami tik šioms kolonoms.



3.11 pav. Vogel (1985) rėmo skaičiuojamoji schema



3.12 pav. Rėmo pastovumo praradimo forma bei skaičiuojamieji ilgiai gauti „SCIA Engineer“

3.4 lentelė. Vogel (1985) daugiaaukščio standaus rėmo skaičiuojamieji ilgiai

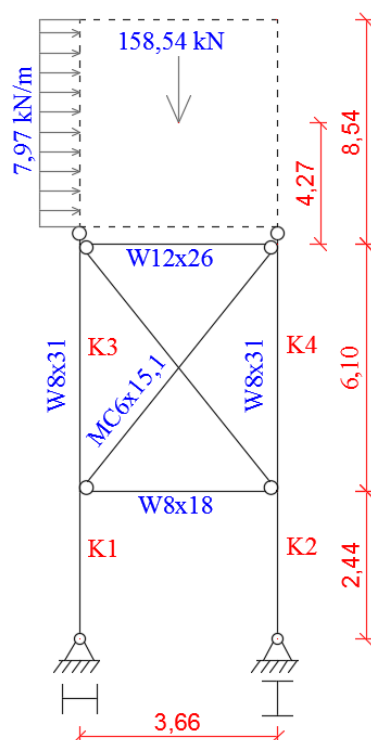
Metodikos	Skaičiuojamasis kolonos ilgis μ		
	K1	K2.1	K2.2
Maleck (2001) pagal AISC	1,16	-	-
BEM	1,18	1,34	2,03
NCCI	1,17	1,44	1,38
STR	1,14	1,25	1,31

Kolonai K1 skaičiuojamieji ilgiai gauti visomis metodikos skiriasi neženkliai. Konservartyviausi rezultatai gaunami „SCIA Engineer“, t.y. $\mu = 1,18$, mažiausiai konservatyvūs rezultatai yra STR - $\mu = 1,14$, tačiau skirtumas tarp jų yra tik 3,4 %. To priežastis yra ta, jog ši kolona gauna didžiausią apkrovą ir pagal ją buvo parenkamas skerspjūvis. Šiuo atveju laikomasi analitinių metodikų prielaidų, kitaip nei nagrinėjant kolonas K2.1 bei K2.2.

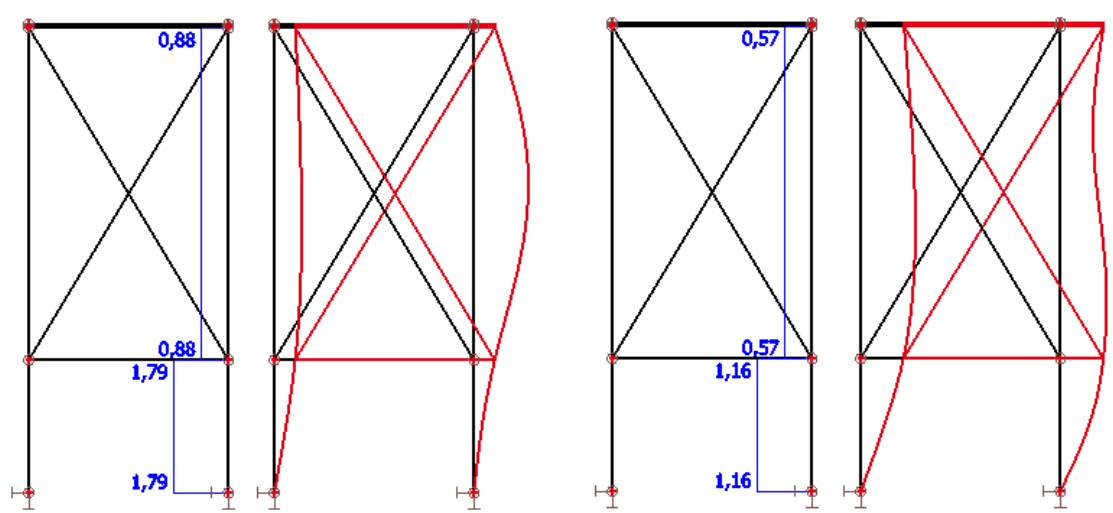
Kolonų K2.1 ir K2.2 skaičiuojamieji ilgiai gauti BEM pastebimai skiriasi vienas nuo kito kaip ir kitais atvejais, kuomet tas pats skerspjūvis naudojamas keliuose aukštuose, tačiau yra apkrautas skirtinga apkrova per aukštus. Taip yra todėl, jog šis metodas vertina ašinių jėgų pasiskirstymą. Kad kolonos K2.1 ir K2.2 prarastų pastovumą vienu metu (esant bendrai viso rėmo klupumo formai), jų kritinės ir veikiančios apkrovų santykis turi būti vienodas, kad tai pasiekti esant vienodiems skerspjūviams, pagal BEM gaunami pastebimai skirtingi skaičiuojamieji ilgiai. STR bei NCCI metodikos šio veiksnio nevertina (pažeidžiamos prielaidos), todėl pagal jas gaunami panašūs skaičiuojamieji ilgiai šioms kolonom. Svarbu atkreipti dėmesį, jog pagal LST EN 1993-1-1 5.2.2(8) pastabą nustatant skaičiuojamojo (klumpamojo) ilgio reikšmes reikia atsižvelgti į gniuždomųjų jėgų pasiskirstymą, o tai reiškia, jog tik BEM pastovumo analizė šiuo atveju yra tinkama skaičiuojamajam ilgiui nustatyti.

3.2.2. Atraminis rėmas pagal Maleck (2001)

Nagrinėjamas A. Maleck (2001) atraminis rėmas yra tinkamas daugelio analitinių skaičiuojamojo ilgio metodikų pritaikymo problematikos pavyzdys. Rėmą sudaro dvi vientisos kolonos, kurių vieną yra tempiama, kita gniuždoma. Dėl šios priežasties nagrinėjama tik pastaroji, kurią skaičiuojamojo ilgio nustatymui galima sudalinti į dvi dalis atitinkamai K2 ir K4. Rėmas yra paslankus, kolonos ir pamato bei kolonos ir sijų mazgai – lankstai. Apkrova perduodama rėmui per du lankstus esančius rėmo kolonų viršuje. Skaičiuojamieji kolonų ilgiai šiam rėmui skaičiuojami naudojant BEM klupumo analizę bei NCCI metodiką. Rezultatai pateikiami 3.5 lentelėje bei 3.14 paveikslėlyje.



3.13 pav. Atraminis rėmas (pagal Maleck 2001)



3.14 pav. Skaičiuojamieji ilgiai atitinkantys pirmą bei antrą pastovumo praradimo formas

3.5 lentelė. Atraminio rėmo pagal Maleck (2001) skaičiuojamieji kolonos ilgiai

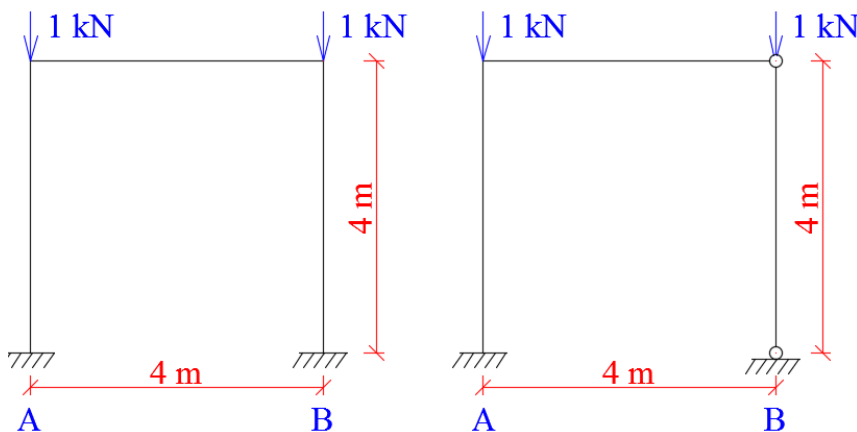
„Metodikos	Skačiuojamasis kolonos ilgis μ	
	K2	K4
BEM (Maleck 2001)	1,11	0,53
BEM pagal pirmą formą	1,79	0,88
BEM pagal antrą formą	1,16	0,57
NCCI nepaslankiu atveju	1,00	1,00
NCCI paslankiu atveju	∞	∞

Naudojant „SCIA Engineer“ BEM klupumo analizę gaunami skaičiuojamieji ilgiai sutampa su A. Maleck (2001) gautais, tačiau tik jei priimama, jog pastovumas prarandamas pagal antrąją klupumo formą. Pagal pirmąją klupumo formą gaunamas didesnis skaičiuojamasis ilgis. Šie rezultatai įrodo metodinėje dalyje išsakytą teiginį, jog norint pasitelkti klupumo analizę reikia atitinkamos patirties rezultatams interpretuoti.

NCCI metodikoje naudojamos nomogramos šiam rėmui nepritaikomos, kadangi visiems mazgams, esant lankstams, gaunamas skaičiuojamasis ilgis paslankaus rėmo atveju yra begalybė. Darant prielaidą, jog rėmas yra suvaržytas iš nepaslankaus rėmo nomogramos, skaičiuojamasis ilgis gaunamas lygus vienetui, tačiau akivaizdu, jog šiuo atveju metodika nėra tiksli. Dėl šių priežasčių metodikų palyginime, atliekamame 4 skyriuje bus naudojami BEM gauti rezultatai.

3.2.3. Webber (2015) rėmas su laisvąja kolona

Šiame skyrelyje pateikiamas A. Webberio (Webber 2015) rėmo pavyzdys išryškinantis daugelio analitinių metodikų trūkumą. Visi elementai rėmuose parenkami HEB 200 skerspjūvio, tarpatramis bei rėmo aukštis 4 m. Nagrinėjami du rėmai, vienas visiškai standus, kitas su viena kolona įtvirtinta lanksčiai abiejuose mazguose. Apkrovos pridedamos mazguose.



3.15 pav. Rėmų atitinkamai be laisvosios ir su laisvąja kolona skaičiuojamosios schemas

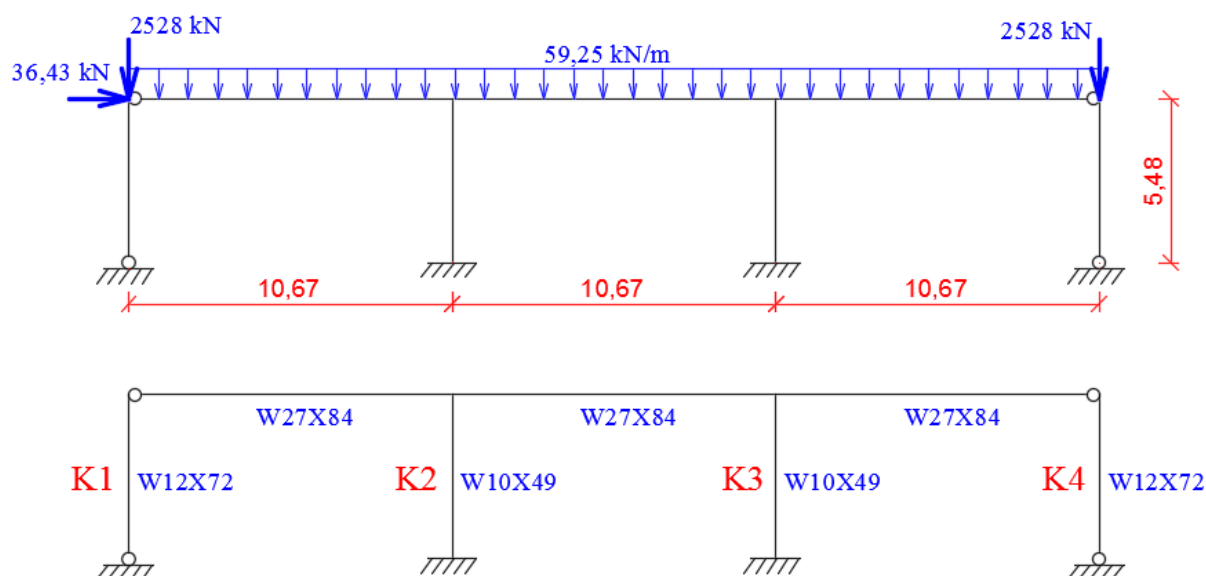
3.6 lentelė. Webber (2015) rėmo su laisvąja kolona skaičiuojamojo ilgio rezultatai

Rėmo tipas	Metodas	Skaičiuojamasis ilgis μ	
		Kolona A	Kolona B
Rėmas su laisvąja kolona	BEM	1,78	1,78
	NCCI	1,16	∞
Rėmas be laisvosios kolonos	BEM	1,19	1,19
	NCCI	1,16	1,16

Rėmui be laisvosios kolonos abiejų naudojamų metodų rezultatai sutampa. Abiems kolonomis skaičiuojamasis ilgis yra gaunamas vienodas, kadangi šios yra įdentiškos. Tačiau NCCI metodikos trūkumai pasireiškia esant vienai iš kolonų įtvirtintai lanksčiai abiejuose mazguose. Tokios kolonos skaičiuojamasis ilgis nevertinant rėmo poveikio idealiu atveju yra $\mu = 1$ (ideali Eulerio kolona). Bet nagrinėjamo rėmo atveju standžiai įtvirtinta kolona A stabilizuoja koloną B, kadangi yra nagrinėjamas paslankus rėmas. Akivaizdu, jog kolona B lemia stabilumo praradimą bei kartu ir skaičiuojamąjį ilgį, kurio ribos yra $\mu = 1$ kolonos A bei sijos standumams artėjant prie begalybės bei $\mu = \infty$, kai kolonos A standumas artėja prie nulio. Nagrinėjant rėmą su laisvąja kolona skirtumas tarp skaičiuojamojo ilgio, gauto pagal BEM ir NCCI yra 35% kolonai A į nesaugiąją priimant NCCI metodiką, kadangi ši nevertina laisvosios kolonos B. Pastarajai kolonai pritaikyti NCCI metodikos yra neįmanoma, kadangi abu mazgai yra lankstai, o rėmas paslankus, tačiau jei būtų daroma prielaida, jog rėmas yra nepaslankus, tada skaičiuojamasis ilgis būtų $\mu = 1$, o tai, šiuo konkrečiu atveju, būtų akivaizdžiai klaidinga.

3.2.4. Daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001)

Šiame skyrelyje nagrinėjamas amerikiečių autorės A. Maleck (2001) analizuotas rėmas. Šis rėmas, tai tipinis industrinis rėmas, apkrautas didelėmis, vertikaliomis apkrovomis, reprezentuojančiomis įvairius mechanizmus esančius ant stogo. Rėmo skaičiuojamoji schema pavaizduota 3.16 pav. yra trijų tarpatramių, dėl skaičiavimo paprastumo autorės parengta taip, jog atspindėtų 11-os tarpatramių rėmą. Dėl didelių vertikalių apkrovų ir tokio tipo rėmo konstrukcijos (dvi standžios kolonos perima visus horizontalias apkrovas), vidurinės kolonos yra jautrios $P-\Delta$ poveikiams. Rezultatai pateikiami 3.7 lentelėje.



3.16 pav. Daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001)

3.7 lentelė. Daugiaatramio vienaukščio rėmo pagal Maleck (2001) skaičiuojamieji ilgiai

Metodikos	Skaičiuojamasis ilgis μ	
	K1	K2
Maleck (2001) pagal AISC	-	2,30
BEM	1,62	2,17
NCCI	∞	1,02
STR	-	1,02

BEM klupumo analize, kolonai K2, gautas skaičiuojamasis ilgis neženkiai skiriasi nuo gauto A. Maleck (2001) pagal ASIC, tačiau šių metodų rezultatai ženkliai skiriasi nuo NCCI bei STR, kuriais gautas skaičiuojamasis ilgis sutampa ir yra 1,02. Šiuo atveju skirtumas yra daugiau nei dvigubas. Skirtumą lemia taip pat ir (Webber 2015) rėmo modelyje pasireiškusi analitinių metodikų problema, kai standi kolona prilaiko gretimą lanksčiai įtvirtiną koloną, kurios poveikio NCCI bei STR metodikos nevertina.

Lankstais įtvirtintai kolonai K1, esant laisvojo rėmo atvejui NCCI bei STR metodikos nepritaikomos.

4. ANTROSIOS EILĖS POVEIKIAI

Šiame skyriuje nustatomas rėminių konstrukcijų jautrumas antrosios eilės poveikiams LST EN 1993-1-1 bei AISC metodikomis. Apskaičiuojamos nuokrypos nagrinėjamos rėminėms konstrukcijoms, palyginami nuokrypų pritaikymo būdai. Galiausiai atliekamas antrosios eilės poveikius vertinančių metodikų palyginimas.

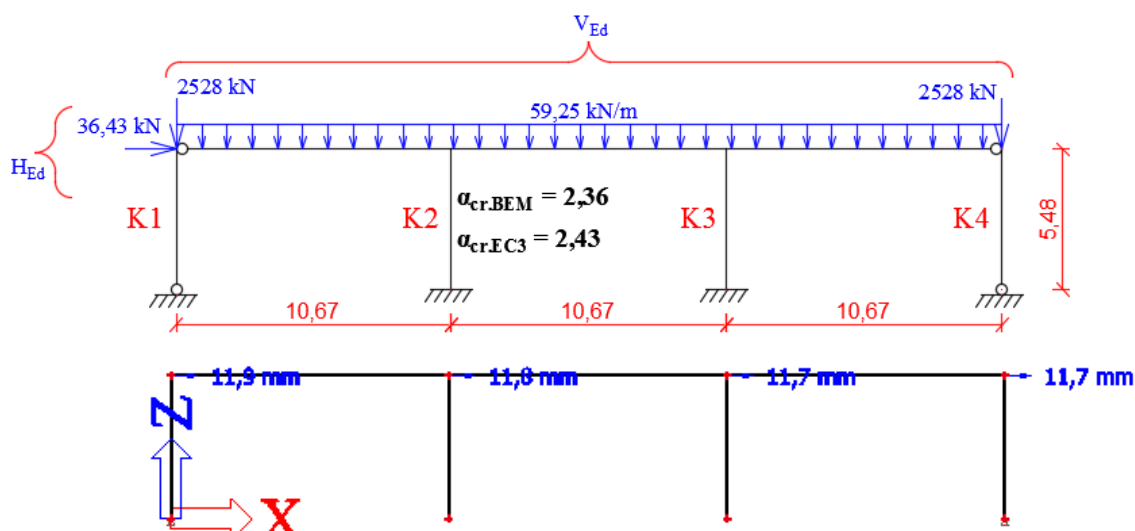
4.1. Rėmų jautrumo antrosios eilės poveikiams nustatymas

Šiame poskyryje nustatoma nagrinėjamų konstrukcijų jautrumas antrosios eilės poveikiams LST EN 1993-1-1 bei AISC metodikomis.

4.1.1. Pagal LST EN 1993-1-1 metodika

Jautrumas antrosios eilės poveikiams pagal LST EN 1993-1-1 yra nustatomas tampriosios kritinės F_{cr} bei veikiančios F_{Ed} jėgų santykio pagrindu, išreiškiamu per koeficientą α_{cr} . Šiame skyrelyje koeficientas α_{cr} pagal normas apskaičiuojamas pasinaudojant 2.1.1 skyrelyje aprašyta lygtimi (2.2), kurios rezultatai iš pastovumo analizės gaunami „SCIA Engineer“ programa bei (2.18) lygtimi.

Pirmas nagrinėjamas daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal A. Maleck (2001) pavaizduotas kartu su gautais rezultatais 4.1 pav. α_{cr} skaičiavimai pateikiami žemiau.



4.1 pav. Daugiaatramio vienaukščio rėmo pagal Maleck (2001) apkrovimo schema bei atitinkami horizontalūs poslinkiai gauti pirmosios eilės analize ir gauti α_{cr} koeficientai

Analitine lygtimi (2.2) gautas koeficientas $\alpha_{cr} = 2,43$. Šie rezultatai neženkliai skiriasi nuo gautų klupumo analize ($\alpha_{cr} = 2,36$). Pagal rezultatus gautus tiek analitine lygtimi, tiek BEM analize rėmas laikomas jautriu antrosios eilės poveikiams, todėl šie poveikiai turėtų būti pilnai įvertinti. α_{cr} pagal (2.2) lygtį apskaičiuojamas:

$$\alpha_{cr,EC3} = \frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{h}{\delta_{H,Ed}} = \frac{36,43}{6952,59} \cdot \frac{5,48}{0,0118} = 2,43;$$

čia

$$H_{Ed} = 36,43 \text{ kN};$$

$$V_{Ed} = 59,25 \cdot 10,67 \cdot 3 + 2528 \cdot 2 = 6952,59 \text{ kN};$$

$$\delta_{H,Ed} = 0,0117 \text{ m};$$

$$h = 5,48 \text{ m}.$$

Rėmo nuolydžio sąlyga yra tenkinama, kadangi rėmo sijos yra horizontalios.

Rėmo sijų ašinio gniuždymo sąlyga:

$$\lambda \geq 0,3 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}};$$

$$0,416 \geq 0,344 - \text{sąlyga tenkinama};$$

čia

$$0,3 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}} = 0,3 \cdot \sqrt{\frac{0,0159 \cdot 235000}{2844,10}} = 0,344;$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,0159 \cdot 235000}{21596,57}} = 0,416 - \text{liaunis};$$

$$N_{Ed} = 2528 + 59,25 \cdot 10,67 \cdot 0,5 = 2844,10 \text{ kN} - \text{gniuždomosios jėgos skaičiuotinė reikšmė};$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2} = \frac{3,14^2 \cdot 210000000 \cdot 1,18 \cdot 10^{-3}}{10,67^2} = 21596,57 \text{ kN} - \text{kritinė jėga};$$

$$A = 0,0159 \text{ m}^2 - \text{sijos plotas};$$

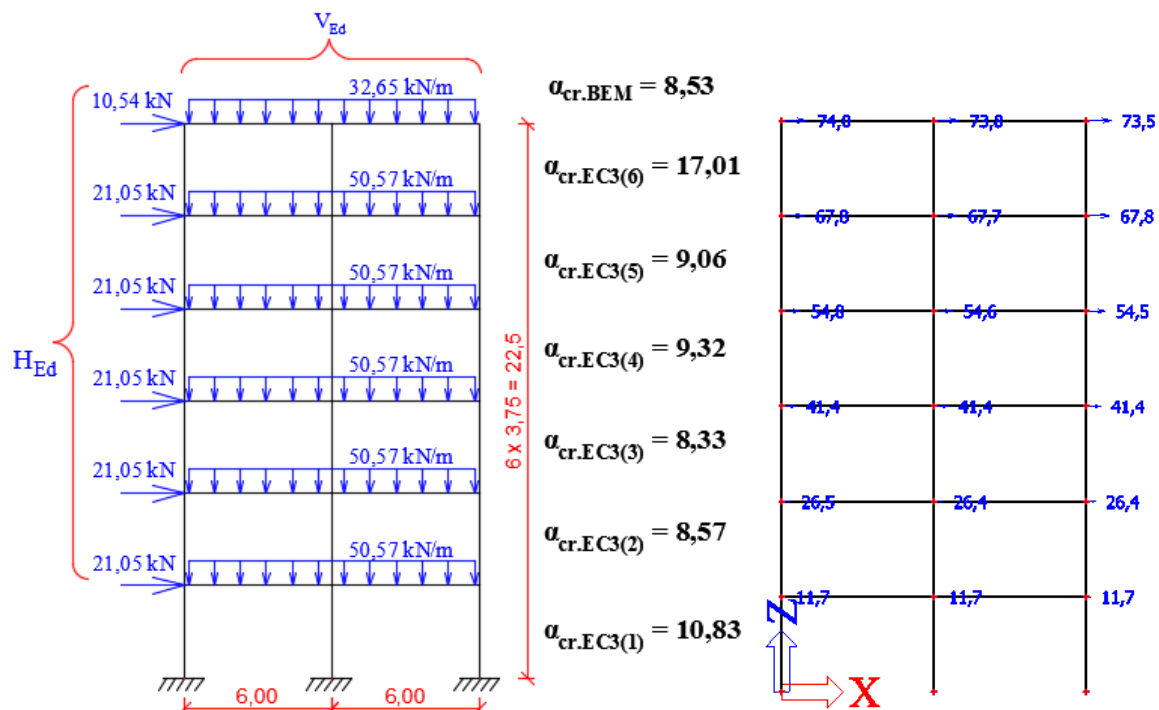
$$f_y = 235 \text{ MPa} - \text{S235 plieno takumo riba};$$

$$L = 10,67 \text{ m} - \text{sijos ilgis};$$

$$E = 2,1 \cdot 10^8 \text{ kPa} - \text{plieno tamprumo modulis};$$

$$I_y = 1,1869 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4 - \text{skerspjūvio inercijos momentas}.$$

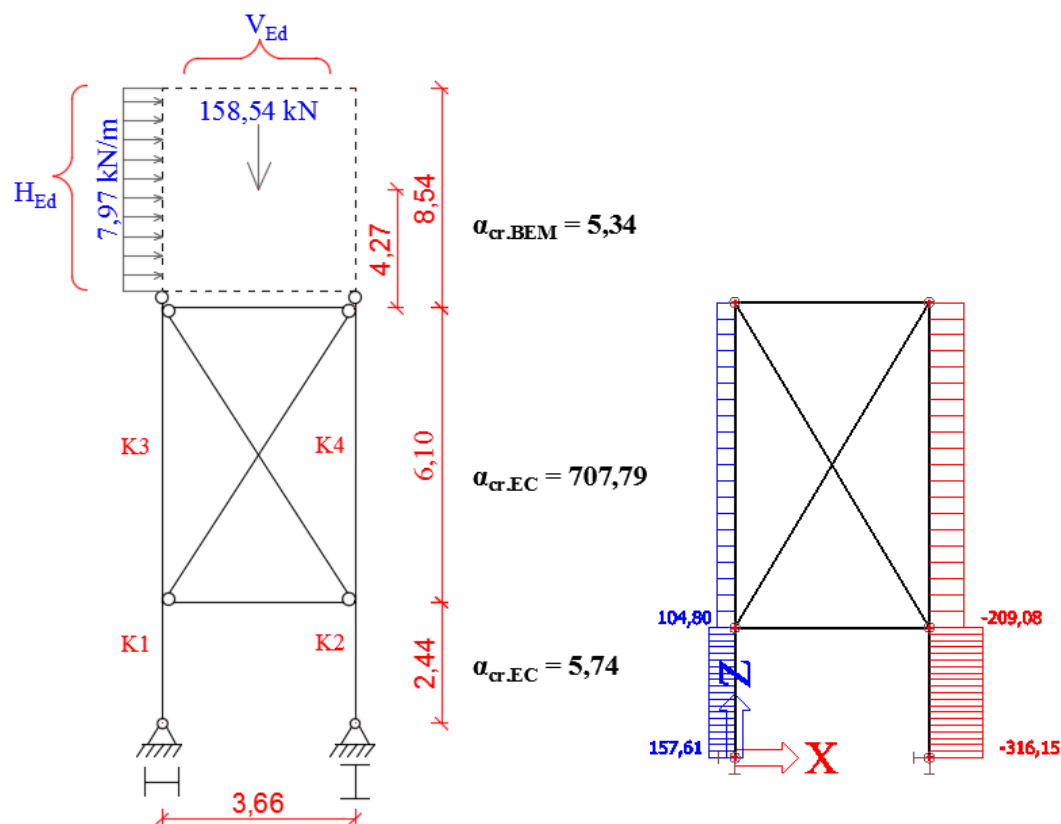
Daugiaaukščiam standžiam rėmui pagal U. Vogel (1985) koeficientas α_{cr} pritaikant lygtis (2.1) ir (2.2) apskaičiuojamas analogiškai daugiaatramiam vienaukščiam rėmui (žr. 4.1 pav.) ir rezultatai pateikiami 4.2 pav.



4.2 pav. Daugiaaukščio standaus rėmo pagal Vogel (1985) apkrovimo schema bei atitinkami horizontalūs poslinkiai gauti pirmosios eilės analize

Analitinės (2.2) lygties rezultatai daugiaaukščiam standžiam rėmui, priklausomai nuo aukšto, kinta nuo 8,33 iki 17,01. Šie rezultatai neženkliai skiriasi nuo gautų, klupumo analize ($\alpha_{cr} = 8,53$) jei lyginama pagal kritiškiausią aukštą. Pagal šiuos rezultatus rėmas laikomas jautriu antrosios eilės poveikiams, todėl šie poveikiai turėtų būti įvertinti.

Kitas nagrinėjamas rėmas, tai atraminiam rėmas pagal A. Maleck (2001). Šiam rėmui koeficientas α_{cr} pritaikant lygtis (2.1) ir (2.2) apskaičiuojamas analogiškai daugiaatramiam vienaukščiam rėmui (žr. 4.1 pav.) ir rezultatai pateikiami 4.3 pav.



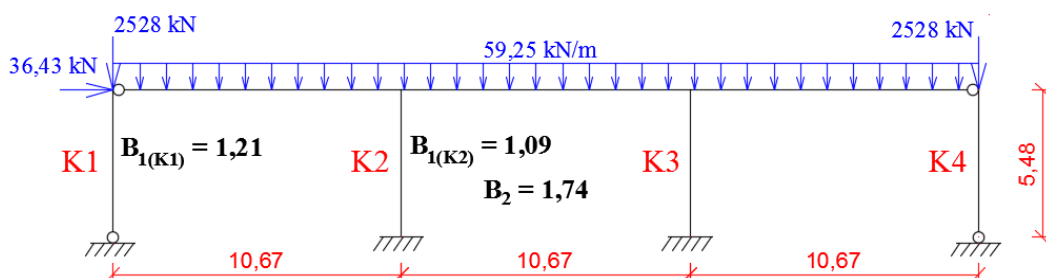
4.3 pav. Atraminio rėmo rėmo pagal Maleck (2001) apkrovimo schema bei ašinės jėgos gautos pirmosios eilės analize

Analitinės LST EN 1993-1-1 (5.2) lygties (šiam darbe (5.2) lygtis) rezultatai atraminiam rėmui, priklausomai ar šis vertinamas vieno, ar dviejų aukštų bei priklausomai nuo jėgų interpretacijos (dėl didelės horizontalios jėgos kolona A yra tempiama, o kolona B gniuždoma) gautos koeficiento α_{cr} reikšmės skiriasi ženkliai. 4.3 pav. pateikiami rezultatai gauti (2.2) lygtimi šį rėmą vertinant kaip dviaukštį bei kaip vertikalią apkrovą perduodama aukšto $V_{Ed} = 316,15$ kN. Pagal gautus rezultatus, tiek analitine lygtimi, tiek BEM analize rėmas laikomas jautriu antrosios eilės poveikiams, todėl šie poveikiai turėtų būti įvertinti.

4.1.2. Pagal AISC 360-16 metodika

Jautrumas antrosios eilės poveikiams pagal AISC 360-16 kaip aprašyta 2.1.2 skyrelyje yra nustatomas pagal koeficientus B_1 ir B_2 . Jei laikančiuose konstrukcijos elementuose $B_1 > 1,2$, turėtų būti atliekama pilna antrosios eilės analizė vertinanti nuokrypas, jei $B_1 \leq 1,2$ galima apytikslė analizė. Kai koeficientas $B_2 > 1,5$ turi būti atliekama antrosios eilės analizė, o kai $B_2 \leq 1,5$ gali būti naudojamas efektyviojo ilgio (pagal Eurokodą 3 lygiavertės kolonos) metodas.

Pirmas nagrinėjamas daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal A. Maleck (2001) pavaizduotas 4.4 pav. su kolonas atitinkančiomis koeficientų B_1 ir B_2 reikšmėmis.



4.4 pav. Daugiaatramio vienaukščio rėmo pagal Maleck (2001) apkrovimo schema, bei gauti B_1 ir B_2 koeficientai

Pasinaudojant lygtimis (2.4) bei (2.5) buvo apskaičiuoti koeficientai B_1 ir B_2 . Iš gautų rezultatų pateiktą 4.4 pav. matyti, jog laisvoji kolona K1 turi didelį poveikį viso rėmo standumui ir kadangi $B_{1,K1} = 1,21 > 1,20$, vadinasi turi būti atliekama pilna antrosios eilės analizė. Gautas koeficientas $B_2 = 1,74 > 1,5$, vadinasi pagal šį koeficientą apytikslis antrosios eilės poveikių įvertinimas nėra galimas ir yra reikalinga atlikti pilną antrosios eilės analizę vertinant nuokrypas. Šie rezultatai sutampa su gautais pagal Eurokodą 3, kadangi pagal pastarąjį irgi reikalinga atlikti tikslesnę antrosios eilės analizę.

Kolonai K1, koeficientas $B_{1,K1}$ apskaičiuojamas pagal (2.4) lygtį:

$$B_{1,K1} = \frac{C_m}{1 - \frac{\alpha \cdot (P_{nt} + P_{lt})}{P_{e1}}} = \frac{1}{1 - \frac{1 \cdot (2844,10 - 1,58)}{16705,84}} = 1,21 \geq 1;$$

čia

$\alpha = 1$, kai taikomas dalinių saugos koeficientų projektavimo metodas;

$C_m = 1$ - koeficientas, konservatyviai priimamas lygus vienetui;

$$P_{e1} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2} = \frac{3,14^2 \cdot 210000000 \cdot 2,485 \cdot 10^{-4}}{5,48^2} = 16705,84 \text{ kN} - \text{tamprioji kritinio klupumo jėga};$$

$P_{nt} = 59,25 \cdot 10,67 \cdot 0,5 + 2528 = 2844,10 \text{ kN}$ - suvaržyto nuo horizontalių poslinkių rėmo nagrinėjamos kolonos ašinė jėga gaunama atliekant pirmosios eilės analizę;

$P_{lt} = -1,58 \text{ kN}$ - ašinė jėga kolonoje sukelia tik horizontalių poveikių;

$L = 5,48 \text{ m}$ – kolonos aukštis;

$E = 2,1 \cdot 10^8 \text{ kPa}$ – plieno tamprumo modulis;

$I_y = 2,485 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$ – W12x72 skerspjūvio inercijos momentas.

Kolonai K₂, koeficientas B_{1.K2} apskaičiuojamas analogiškai:

$$B_{1.K2} = \frac{C_m}{1 - \frac{\alpha \cdot (P_{nt} + P_{lt})}{P_{e1}}} = \frac{1}{1 - \frac{1 \cdot (632,20 - 4,58)}{7610,07}} = 1,09 \geq 1;$$

čia

$\alpha = 1$, kai taikomas dalinių saugos koeficientų projektavimo metodas;

$C_m = 1$ - koeficientas, konservatyviai priimamas lygus vienetui;

$$P_{e1} = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2} = \frac{3,14^2 \cdot 210000000 \cdot 2,485 \cdot 10^{-4}}{5,48^2} = 16705,84 \text{ kN};$$

$$P_{nt} = 59,25 \cdot 10,67 = 632,20 \text{ kN};$$

$P_{lt} = -4,58 \text{ kN}$ - ašinė jėga kolonoje sukeliama tik horizontalių poveikių;

$L = 5,48 \text{ m}$ – kolonos aukštis;

$E = 2,1 \cdot 10^8 \text{ kPa}$ – plieno tamprumo modulis;

$I_y = 1,132 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$ – W10x49 skerspjūvio inercijos momentas.

Visam rėmo aukštui koeficientas B₂ apskaičiuojamas pagal (2.5) lygtį:

$$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\alpha \cdot P_{story}}{P_{e.story}}} = \frac{1}{1 - \frac{1 \cdot 6952,59}{16336,40}} = 1,74;$$

čia

$$P_{e.story} = R_M \cdot \frac{H \cdot L}{\Delta_H} = 0,973 \cdot \frac{36,43 \cdot 5,486}{0,0119} = 16336,40 \text{ kN} - \text{visų aukšto kolonų ašinė jėga};$$

$$R_M = 1 - 0,15 \cdot \frac{P_{mf}}{P_{story}} = 1 - 0,15 \cdot \frac{1264,40}{6952,60} = 0,973 - \text{koeficientas įvertinantis elementų išlinkių P-δ}$$

poveikį rėmo standumui;

$$P_{story} = 59,25 \cdot 10,67 \cdot 3 + 2528 \cdot 2 = 6952,59 \text{ kN} - \text{bendra visų aukšto kolonų ašinė jėga};$$

$P_{mf} = 59,25 \cdot 10,67 \cdot 2 = 1264,40 \text{ kN}$ - Ašinė jėga tik aukšto kolonose perimančiose horizontalius poveikius;

$H = 36,43 \text{ kN}$ - visuminė horizontalioji apkrova įskaitant aukštų šlytį;

$L = 5,49 \text{ kN}$ - aukšto aukštis;

$\Delta_H = 0,0119 \text{ m}$ - horizontalusis aukšto viršaus poslinkis aukšto apačios atžvilgiu.

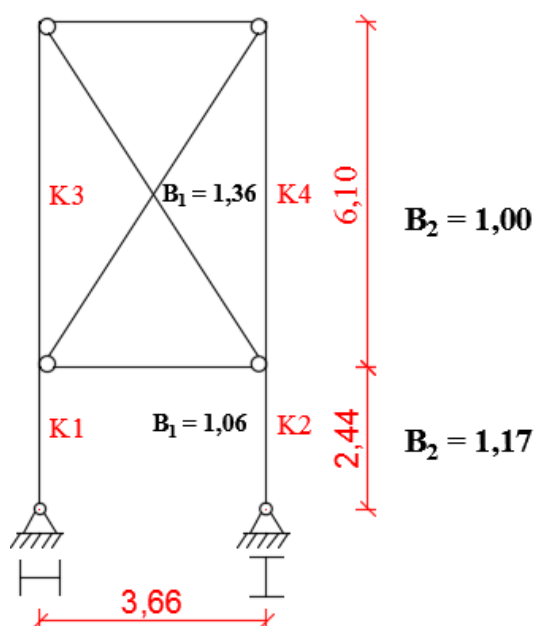
Daugiaaukščiam standžiam rėmui pagal A. Maleck (2001) ir U. Vogelį (Vogel 1985) koeficientai B_1 ir B_2 apskaičiuojami pritaikant (2.4) bei (2.5) lygtis analogiškai daugiaatramiam vienaukščiam rėmui (žr. 4.4 pav.) ir rezultatai pateikiami 4.5 pav.

$B_1 = 1,02$	$B_1 = 1,03$	$B_1 = 1,03$	$B_2 = 1,07$
$B_1 = 1,07$	$B_1 = 1,07$	$B_1 = 1,07$	$B_2 = 1,15$
$B_1 = 1,03$	$B_1 = 1,06$	$B_1 = 1,04$	$B_2 = 1,14$
$B_1 = 1,04$	$B_1 = 1,08$	$B_1 = 1,05$	$B_2 = 1,16$
$B_1 = 1,05$	$B_1 = 1,07$	$B_1 = 1,07$	$B_2 = 1,16$
$B_1 = 1,06$	$B_1 = 1,09$	$B_1 = 1,08$	$B_2 = 1,12$

6.00 6.00
 $6 \times 3,75 = 22,5$

4.5 pav. Koeficientai B_1 ir B_2 Vogel (1985) daugiaaukščiam standžiam rėmui

Gautos koeficientų B_1 ir B_2 reikšmės priklausomai nuo aukšto ir kolonos šiam rėmui skiriasi neženkliai. Skirtumas tarp mažiausios (1,02) ir didžiausios (1,09) koeficiento B_1 reikšmės yra 6,6 %, o koeficiento B_2 reikšmės skiriasi iki 8,6 %. Skirtumus lemia veikiančios ir kritinės apkrovų skirtumai aukštuose bei kolonose, kadangi to pačio skerspjūvio kolonos yra keliuose aukštuose, nors yra apkrautos skirtingomis apkrovomis. Nei vienoje kolonoje ar aukšte neviršijamos ribinės reikšmės, koeficientui $B_1 - 1,20$, o koeficientui $B_2 - 1,5$. Tai reiškia, jog pagal AISC šiam rėmui leidžiama naudoti tiek efektyviojo ilgio, tiek apytiksliai antrosios eilės poveikius vertinantį metodą didinant pirmosios eilės analize gautas įrašas. Šie rezultatai sutampa su gautais pagal Euronormas, kadangi pagal pastarąsias taip pat leidžiama taikyti apytikslę metodiką.



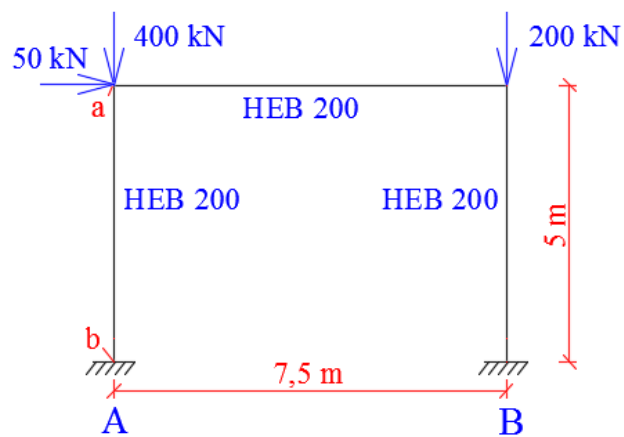
4.6 pav. Koeficientai B_1 ir B_2 atraminiam rėmui pagal Maleck (2001)

Ši konstrukcija koeficientams apskaičiuoti, kaip ir Euronormų atveju buvo dalinama į du aukštus. Antrojo aukšto koeficiento B_2 reikšmė yra 1,00, o tai reiškia, jog šis aukštas yra visiškai nejautrus antrosios eilės P- Δ poveikiams. Šie rezultatai sutampa su gautais pagal Eurokodą. Tokie rezultatai yra racionalūs, kadangi antrasis aukštas yra suvaržytas ryšių. Pirmajam aukštui gautas koeficientas $B_2 = 1,17$ ir neviršija ribinės 1,50 reikšmės, vadinasi galima naudoti efektyviojo ilgio metodą. Koeficiento B_1 reikšmė viršija ribinę 1,20 antrojo aukšto kolonai K4, tai reiškia, jog pagal AISC dėl galimo vietinių P- δ deformacijų poveikio visam rėmui rekomenduojama atlikti detalesnę antrosios eilės analizę. Vietinių poveikių Eurokodo 3 metodika nevertina.

4.2. Nuokrypų pritaikymas

Priklausomai nuo atliekamos antrosios eilės analizės tipo turi būti įvertinamos nuokrypos. Nuokrypos skirstomos į bendrąsias P-Δ ir elemento P-δ. Nuokrypų tipai plačiau aprašyti 2.3 poskyryje. Šiame skyrelyje tiriamas nuokrypų pritaikomumas, palyginami skirtingi būdai jų įvertinimui. Nuokrypos pritaikomos 3.1.1 skyrelyje nagrinėtam Abreu ir Sousa (2009) standžiam rėmui. Su pasirinktomis nuokrypomis atliekama antrosios eilės analizė ir gauti rezultatai pateikiami 4.1 ir 4.2 lentelėse bei 4.11 ir 4.12 paveikslėliuose. Nagrinėjami šie nuokrypų įvertinimo būdai:

- Nuokrypų modeliavimas keičiant mazgų koordinates (konstrukcijos geometriją) naudojant „SCIA Engineer“ automatinį nuokrypų generavimą (SCIA);
- Pradinių nuokrypų pakeitimas lygiavertėmis horizontaliomis jėgomis (EHF);
- Tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (EUGLI).



4.7 pav. Nagrinėjamas standus rėmas

4.2.1. Nuokrypos lygiavertėmis horizontaliomis jėgomis (EHF) skaičiavimas

Bendrieji pradiniai pokrypiai (rėmo posvyriai) nustatomi pagal formulę:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = \frac{1}{200} \cdot 0,894 \cdot 0,866 = 0,00387;$$

čia

$\phi_0 = 1/200$ - pagrindinė nuokrypos reikšmė;

$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{5}} = 0,894$ - kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas;

$h = 5$ m – konstrukcijos aukštis metrais;

$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0,866$ - kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas;

$m = 2$ – kolonų skaičius eilėje.

Elemento išlinkio maksimali amplitudė pagal kreivę b:

$$e_0 = \frac{L}{250} = \frac{5000}{250} = 20 \text{ mm};$$

čia

$L = 5000 \text{ mm}$ – elemento ilgis;

Pradiniai posvyriai pakeičiami lygiavertėmis horizontaliosiomis jėgomis:

$$\phi \cdot N_{Ed.A} = 0,00387 \cdot 400 = 1,549 \text{ kN} - \text{kolonai A};$$

$$\phi \cdot N_{Ed.B} = 0,00387 \cdot 200 = 0,775 \text{ kN} - \text{kolonai B}.$$

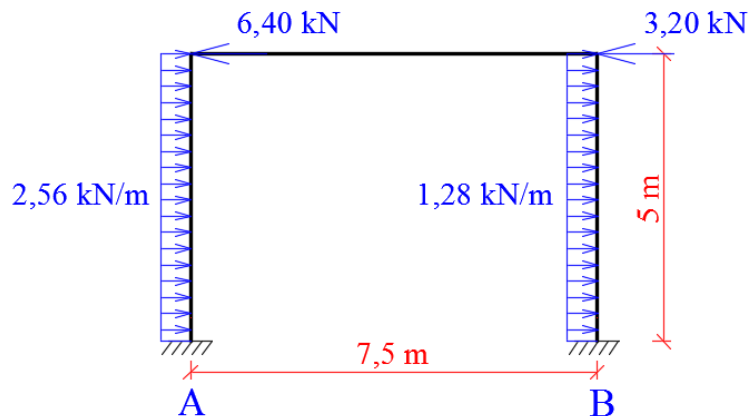
Elemento išlinkiai pakeičiami lygiavertėmis horizontaliosiomis jėgomis:

$$\frac{4 \cdot N_{Ed.A} \cdot e_0}{L} = \frac{4 \cdot 400 \cdot 20}{5000} = 6,40 \text{ kN} - \text{kolonai A};$$

$$\frac{8 \cdot N_{Ed.A} \cdot e_0}{L^2} = \frac{8 \cdot 400 \cdot 20}{5000^2} = 2,56 \text{ kN/m} - \text{kolonai A};$$

$$\frac{4 \cdot N_{Ed.B} \cdot e_0}{L} = \frac{4 \cdot 200 \cdot 20}{5000} = 3,20 \text{ kN} - \text{kolonai B};$$

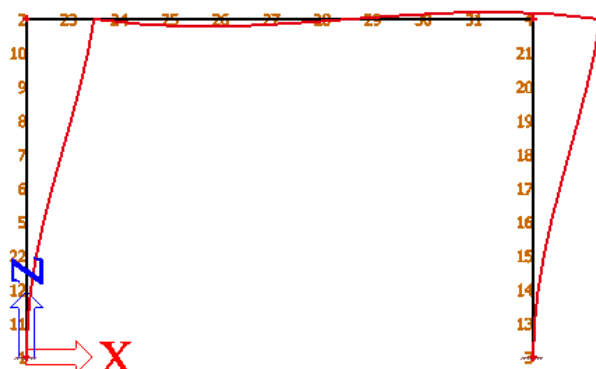
$$\frac{8 \cdot N_{Ed.B} \cdot e_0}{L^2} = \frac{8 \cdot 200 \cdot 20}{5000^2} = 1,28 \text{ kN/m} - \text{kolonai B}.$$



4.8 pav. Pradinės nuokrypos lygiavertėmis horizontaliosiomis jėgomis (EHF)

4.2.2. Tampriosios kritinio klupumo formos η_{cr} kaip vienintelės bendrosios ir vietinės nuokrypos (EUGLI) skaičiavimas

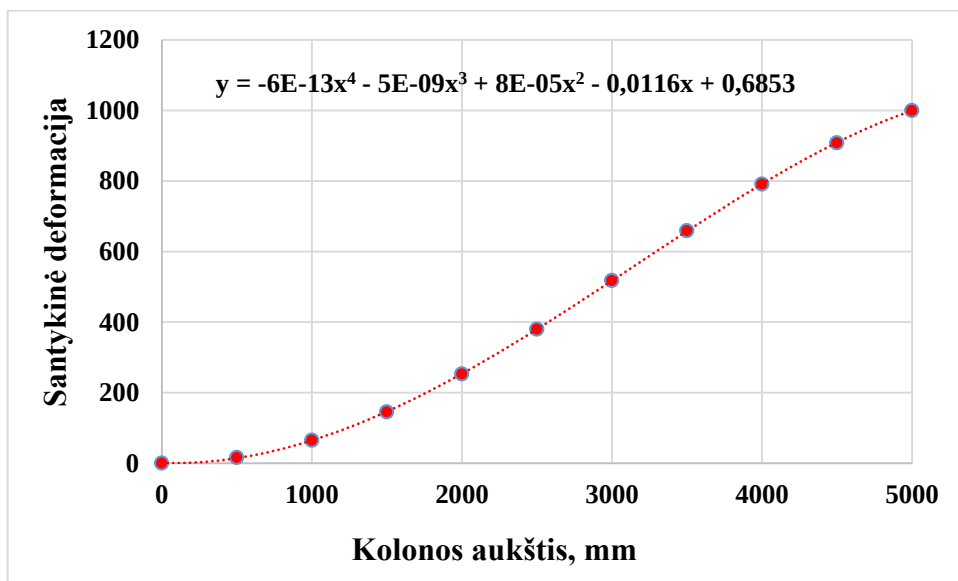
Šiame skyrelyje randama tamprojo kritinio klupumo formos η_{cr} kaip nuokrypos amplitudė. Pasinaudojus šia nuokrypos amplitude atliekama antrosios eilės analizė ir rezultatai pateikiami 4.2.3 skyrelyje.



Node of mesh	Case	Ux [mm]	Uz [mm]	Fiy [mrad]
1	S1/1 - 10,20	0,0	0,0	0,0
11	S1/1 - 10,20	15,9	0,1	64,9
12	S1/1 - 10,20	65,1	0,2	128,8
22	S1/1 - 10,20	145,6	0,3	186,1
5	S1/1 - 10,20	252,8	0,5	232,2
6	S1/1 - 10,20	380,0	0,6	263,2
7	S1/1 - 10,20	518,5	0,7	276,4
8	S1/1 - 10,20	659,0	0,8	270,7
9	S1/1 - 10,20	791,8	0,9	246,7
10	S1/1 - 10,20	908,0	1,0	206,3
2	S1/1 - 10,20	1000,0	1,1	153,0

4.9 pav. „SCIA Engineer“ gauta klumpumo forma bei mazgų poslinkiai

Norint aprašyti tampriojo kritinio klumpumo formos η_{cr} atliekama polinomo regresija „MS Excel“ programa.



4.10 pav. Tamprioji kritinio klumpumo forma aprašyta ketvirtosios eilės polinomu „MS Excel“ programoje

Randama klumpumo formą aprašančio ketvirtojo laipsnio polinomo antroji išvestinė:

$$\eta_{cr} = -6 \cdot 10^{-13} \cdot x^4 - 5 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 + 8 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 - 0,0116 \cdot x + 0,6853;$$

$$\eta_{cr}' = -2,4 \cdot 10^{-12} \cdot x^3 - 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 - 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot x - 0,0116;$$

$$\eta_{cr}'' = -7,2 \cdot 10^{-12} \cdot x^2 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot x - 1,6 \cdot 10^{-4}.$$

Konstrukcijos sąlyginis liaunis:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} = \sqrt{\frac{N_{Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1835}{4080}} = 0,67;$$

čia

$N_{cr} = 4080$ kN – tamprioji kritinė jėga;

$N_{Rk} = f_y \cdot A = 235 \cdot 7,808 = 1834,88$ kN - kritinio skerspjuvio charakteristinė ašinė gniuždomoji galia;

$f_y = 235$ MPa – takumo įtempiai;

$A = 7,808 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ – HEB200 skerspjūvio plotas;

Klupumo koeficientas:

$$\chi = \frac{1}{0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda + 0,2) + \lambda^2) + \sqrt{(0,5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - 0,2) + \lambda^2))^2 - \lambda^2}} =$$

$$= \frac{1}{0,5 \cdot (1 + 0,24 \cdot (0,67 + 0,2) + 0,67^2) + \sqrt{(0,5 \cdot (1 + 0,24 \cdot (0,67 - 0,2) + 0,67^2))^2 - 0,67^2}} = 0,846$$

čia

$\alpha = 0,24$ – nuokrypos koeficientas pagal klupumo kreivę b;

$$e_0 = \alpha \cdot (\lambda - 0,2) \cdot \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}} = 0,24 \cdot (0,67 - 0,2) \cdot \frac{150,98}{1835,88} = 9,29 \text{ mm} - \text{koeficientas};$$

$$M_{Rk} = f_y \cdot W_{pl} = 235000 \cdot 6,425 \cdot 10^{-4} = 150,98 \text{ kN}\cdot\text{m};$$

$W_{pl} = 6,425 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ – HEB200 skerspjūvio atsparumo momentas.

Apskaičiuojama nuokrypos amplitudė:

$$\eta_{init} = e_0 \cdot \frac{N_{cr}}{EI \cdot \eta_{cr, \max}''} \cdot \eta_{cr} = e_0 \cdot \frac{N_{cr}}{EI \cdot |-7,2 \cdot 10^{-12} \cdot x^2 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot x - 1,6 \cdot 10^{-4}|} \cdot \eta_{cr} =$$

$$= 9,29 \cdot \frac{4,08 \cdot 10^6}{2,1 \cdot 10^5 \cdot 5,696 \cdot 10^7 \cdot |-7,2 \cdot 10^{-12} \cdot 5000^2 - 3 \cdot 10^{-8} \cdot 5000 - 1,6 \cdot 10^{-4}|} \cdot 1000 = 18,64 \text{ mm};$$

čia

$x = 5000 \text{ mm}$ – didžiausi poslinkiai yra ties kolonos viršumi;

$\eta_{cr} = 1000$ – santykinė deformacija ties kolonos viršumi

$I_y = 5,696 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$ – HEB200 skerspjūvio inercijos momentas.

4.2.3. Nuokrypų įvertinimo būdų palyginimas

Su pasirinktomis nuokrypomis buvo atlikta antrosios eilės analizė ir gauti rezultatai pateikti 4.1 ir 4.2 lentelėse bei 4.11 ir 4.12 paveikslėliuose.

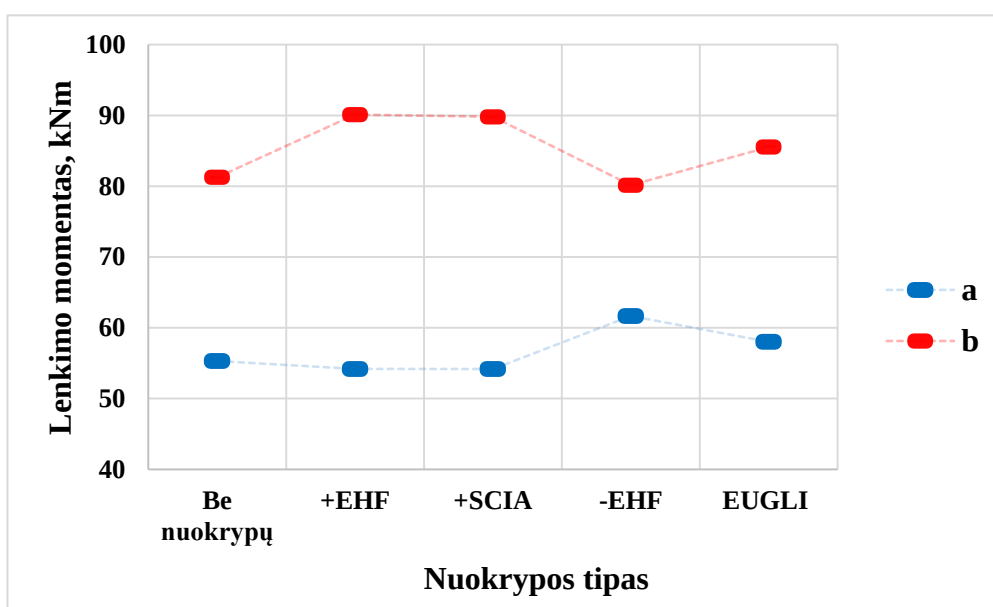
4.1 lentelė. Antrosios eilės lenkimo momentai gauti analize vertinančia P-Δ nuokrypas

	Kolonos A skerspjūvis	Metodikos		
		be nuokrypų	EHF	SCIA
Antrosios eilės lenkimo momentas M, kNm (skirtumas nuo rėmo be nuokrypų, %)	a	55,31	57,92 (4,7)	57,87 (4,6)
	b	81,27	85,13 (4,8)	85,06 (4,6)

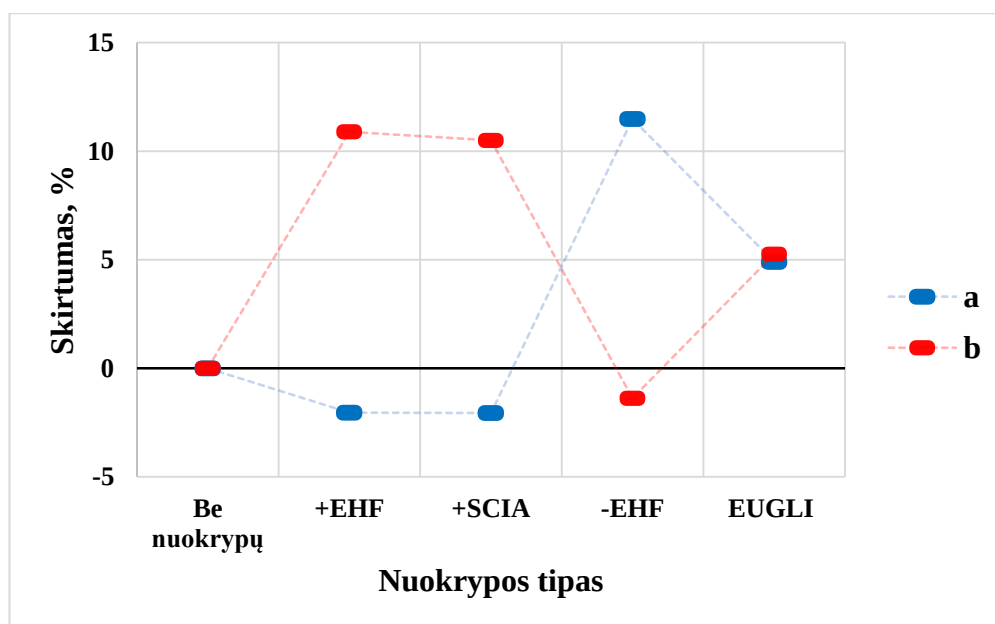
Atlikus analizę, vertinančią P- Δ nuokrypas pridėtas veikiančios horizontalios jėgos kryptimi, buvo gauti rezultatai pateikti 4.1 lentelėje. Iš šių rezultatų akivaizdu, jog tiek nuokrypos lygiavertėmis horizontaliomis jėgomis (EHF), tiek nuokrypos automatiškai sumodeliuotos keičiant geometriją (SCIA) duoda tokius pat rezultatus. Dėl rezultatų vienodumo antrosios eilės poveikius vertinančių metodikų palyginime bendrosios nuokrypos bus modeliuojamos automatiškai naudojant programą „SCIA Engineer“.

4.2 lentelė. Antrosios eilės lenkimo momentai gauti analize vertinančia P- Δ bei P- δ nuokrypas

	Kolonos A skerspjūvis	Metodikos				
		be nuokrypų	+EHF	SCIA	-EHF	EUGLI
Antrosios eilės lenkimo momentas M, kNm (skirtumas nuo rėmo be nuokrypų, %)	a	55,31	54,18 (-2,0)	54,17 (-2,0)	61,66 (11,5)	58,02 (4,9)
	b	81,27	90,12 (10,9)	89,80 (10,5)	80,15 (-1,4)	85,54 (5,3)



4.11 pav. Antrosios eilės lenkimo momentai priklausomai nuo nuokrypos tipo



4.12 pav. Antrosios eilės lenkimo momentų pokytis priklausomai nuo nuokrypos tipo

Buvo atlikta analizė vertinanti P- Δ nuokrypas, pridėtas veikiančios horizontalios jėgos kryptimi, bei P- δ nuokrypas lygiavertėmis horizontaliomis jėgomis, pridėtas veikiančios horizontalios jėgos (+EHF) bei priešinga krypti (-EHF). „SCIA Engineer“ elemento išlinkius pridėda automatiškai ir kryptį parenka labiausia kritiniam atvejui, kuris šiuo atveju yra pagal programą, veikiančios horizontalios jėgos kryptimi. Svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad įvedant elemento išlinkius standaus rėmo atveju, momentai padidėja tame elemento gale kur deformuoto elemento forma sutampa su išlinkio nuokrypos forma, tačiau sumažėja kitame gale kur formos yra priešingos. Todėl, norint gauti didžiausius lenkimo momentus abiejuose elemento galuose, reikia išlinkius pridėti atitinkamomis kryptimis. Iš to galima padaryti išvadą, jog naudojant „SCIA Engineer“ automatinį elemento išlinkių modeliavimą, reikia visada atkreipti dėmesį ar nagrinėjamame skerspjūvyje nuokrypos pridėtos reikiama kryptimi.

Taip pat buvo nagrinėjama tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (EUGLI). Iš šio vieno atvejo sudėtinga daryti konkrečias išvadas apie šį nuokrypos modeliavimo būdą. Sunku pasakyti ar jis yra netikslus, ar kiti nuokrypų modeliavimo būdai yra pernelyg konservatyvus šiam atvejui, kadangi rezultatai lyginant su kitais metodais skiriasi gana ženkliai. Tačiau iš šių rezultatų galima padaryti keletą svarbių išvadų. Grafikuose 4.11 bei 4.12 matyti, jog antrosios eilės lenkimo momentai pritaikant šią nuokrypą, kitaip nei taikant elemento išlinkius proporcingai padidėjo abiejuose elemento galuose. Tokius rezultatus buvo galima nuspėti, kadangi ši nuokrypa yra gaunamos iš klupumo formos, kuri sutampa su antrosios eilės analizės deformuota rėmo schema, taip tik padidindama deformacijas.

Svarbu pastebėti, jog naudojant šį nuokrypų modeliavimo būdą, bet kokie pokyčiai geometrijoje ar apkrovose gali turėti didelį poveikį klupumo formai ir tuo pačiu nuokrypai.

4.3. Antrosios eilės poveikius vertinančių metodikų palyginimas

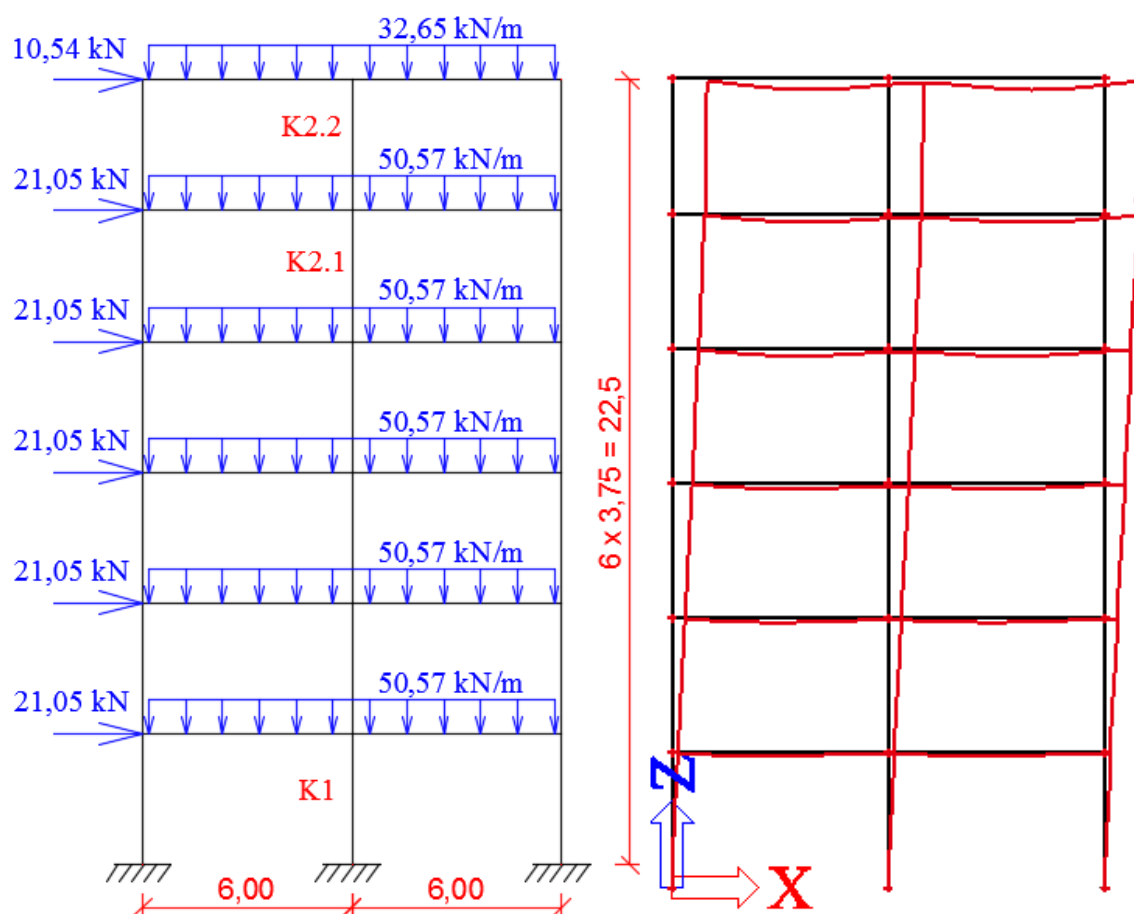
Kiekviename šio poskyrio skyrelyje pateikiamas trumpas nagrinėjamo rėmo aprašymas, poslinkiai bei lenkimo momentai pasirinktų kolonų skerspjūviams. Atliekamas šių skerspjūvių laikomosios galios išnaudojimo patikrinimas bei kartu pateikiama rezultatų analizė. Šiame darbe netikrinama skerspjūvių laikomoji galia iš rėmo plokštumos.

Naudojamos metodikos pagal visuminės analizės algoritmą (žr. 2.1 pav.):

- 1b – lygiavertės kolonos metodas į antrosios eilės poveikius atsižvelgiant per nesuvaržytos sistemos skaičiuojamuosius ilgius;
- 2a – apytikslis metodas pagrįstas pirmosios eilės analize bei įrašų didinimu koeficientu $1/(1-1/\alpha_{cr})$;
- 2b – antrosios eilės analizė vertinant tik bendrąsias rėmo nuokrypas ($P-\Delta$);
- 3a – antrosios eilės analizė vertinant bendrąsias rėmo ($P-\Delta$) bei vietines elemento ($P-\delta$) nuokrypas kaip išlinkius;
- 3b – antrosios eilės analizė kaip vienintelę ir bendrąją nuokrypą priimant tampriojo klupumo formą η_{cr} .

4.3.1. Vogel (1985) daugiaaukštis standus rėmas

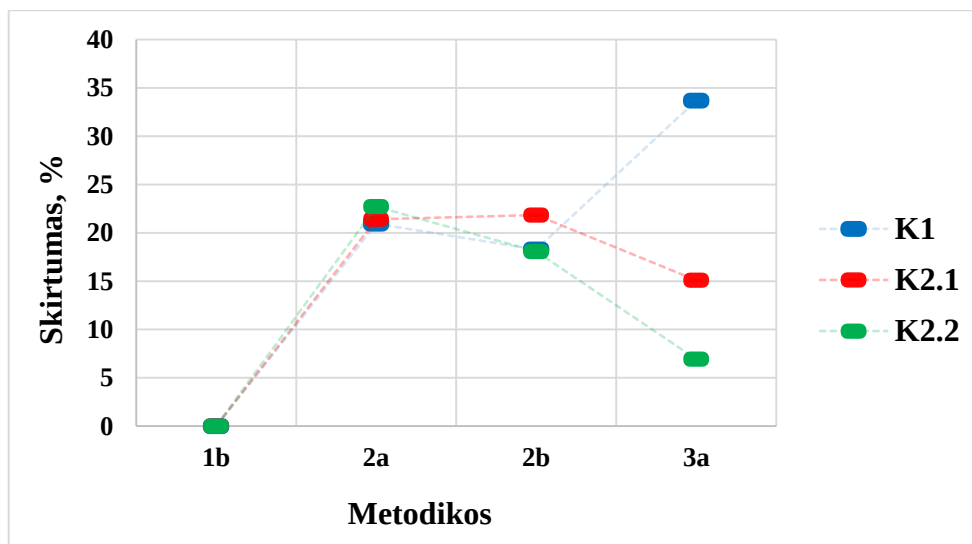
Antrosios eilės poveikiams nagrinėjamas originaliai U. Vogelio (Vogel 1985) tirtas bei A. Maleck (2001) nagrinėtas ir 3.2.1 skyrelyje detaliau aprašytas rėmas. Kadangi priklausomai nuo metodikos yra gauti skirtingi skaičiuojamieji ilgiai nagrinėjamoms kolonom (žr. 3.2.1), todėl atliekant skerspjūvių patikrinimą, priklausomai nuo šių ilgių, papildomai pateikiami labiausiai ir mažiausiai konservatyvūs skerspjūvio išnaudojimo koeficientai. Rėmo $\alpha_{cr} = 8,53$, todėl pagal normas šis rėmas yra jautrus antrosios eilės poveikiams, tačiau kadangi $\alpha_{cr} \geq 3$ galimi ir apytiksliai metodai šiems poveikiams įvertinti (metodas 2a). Šiame rėmui netaikomas 3b metodas, dėl nuokrypos pritaikymo sudėtingumo viso rėmo lygmenyje (žr. 4.2 poskyrį). Laikomosios galios nustatymo pavyzdys kolonai K1 pateikiamas A priede. Kitoms kolonom skaičiavimai atliekami analogiškai ir rezultatai pateikiami 4.3 lentelėje.



4.13 pav. Vogel (1985) rėmo skaičiuojamoji schema bei antrosios eilės analize gautų deformacijų schema

4.3 lentelė. Lenkimo momentai bei horizontalūs rėmo poslinkiai priklausomai nuo metodikos

	Kolona	Metodikos				
		1b	2a	2b	3a	Maleck (2001)
Lenkimo momentas M, kNm (skirtumas nuo 1-os eilės, %)	K1	121,09	146,45 (20,9)	143,22 (18,3)	161,89 (33,7)	133,00 (-9,8)
	K2.1	34,24	41,57 (21,4)	41,72 (21,8)	39,41 (15,1)	-
	K2.2	11,40	13,99 (22,7)	13,46 (18,1)	12,19 (6,9)	-
Poslinkis ties kolonos viršumi Δ, mm (skirtumas nuo 1-os eilės, %)	K1	11,7	14,1 (20,5)	14,1 (20,5)	14,1 (20,5)	
	K2.1	67,7	82,8 (22,3)	82,9 (22,5)	82,4 (21,7)	-
	K2.2	73,8	89,4 (21,1)	90,1 (22,1)	89,4 (21,1)	-



4.14 pav. Kolonų K1, K2.1 ir K2.2 antrosios eilės lenkimo momentų skirtumas lyginant su pirmosios eilės rezultatais

Kaip ir buvo galima nuspėti atliekant antrosios eilės analizę lenkimo momentai bei horizontalūs poslinkiai didėja lyginant su pirmosios eilės analize (metodas 1b), tačiau ne visais atvejais. Iš 4.14 pav. bei 4.3 lentelėje pateiktų rezultatų galima išskirti kelias vietas, kur rezultatai neatitinka prognozės. Atliekant antrosios eilės analizę su (P- Δ) bei (P- δ) nuokrypomos (metodas 3a) kolonai K1 antrosios eilės momentai, kaip galima numatyti, didėja lyginant su metodais nevertinančiais nuokrypų (skirtumas iki 25,2 %), tačiau kolonom K2.1 bei K2.2 momentai sumažėja ir yra žemesni nei metodo 2b atveju (vertinamos tik P- Δ nuokrypos). 4.14 pav. bei 4.3 lentelėje pateikiamos tik maksimalios kolonos įrąžos viename elemento gale, tačiau metodo 3a atveju įrąžos padidėja kitame elemento gale, tačiau nors ir padidėjusios, jos yra vis tiek mažesnės nei pateiktos. Toks rezultatas gaunamas todėl, kad įvedant elemento išlinkius, momentai padidėja gale kur lenkimo kryptis yra priešinga išlinkio kryptčiai, tačiau sumažėja ten kur kryptys sutampa. Programoje „SCIA Engineer“ elemento išlinkių kryptis pasirenkama automatiškai. Tą galima laikyti programos trūkumu. Kadangi, kad gauti didžiausias įrąžas abiejuose galuose reikia pridėti elemento išlinkius dviem skirtingomis kryptimis, o tai nėra įmanoma šioje programoje, jei naudojamas automatinis nuokrypų modeliavimas.

Šis programos trūkumas kartu paaiškina ir horizontalių poslinkių nežymų sumažėjimą lyginant su metodu 2b. Kartu su gautais rezultatais pateikiami A. Maleck (2001) rezultatai kolonai K1. Pastariesiems skaičiavimams buvo naudojama antrosios eilės analizė be nuokrypų, todėl racionalu, jog autorės rezultatai yra tarp pirmosios eilės analize gautų (1b) bei antrosios eilės analize vertinančių nuokrypų rezultatų.

4.4 lentelė. Kolonos K1 skerspjūvio laikomosios galios patikra

Laikomoji galia	EC3 skyrius	Tikrinama sąlyga	Išnaudojimo koeficientas priklausomai nuo metodikos			
			1b	2a	2b	3a
Skerspjūvio laikomoji galia	6.2.4	Gniuždymui	0,66	0,66	0,66	0,66
	6.2.5	Lenkimui	0,40	0,49	0,48	0,54
	6.2.6	Šlyčiai	0,11	0,13	0,12	0,18
	6.2.8-10	Lenkimui, šlyčiai ir ašinei jėgai	1,03	1,25	1,22	1,38
Klumpamoji galia	6.3.1	Gniuždymui	0,71-0,72 ($\mu = 1,14-1,18$)	0,70	0,70	-
	6.3.2	Lenkimui (LTB)	<i>Tikrinti nereikia (6.3.2.2(4))</i>			
	6.3.3	Gniuždymui ir lenkimui	1,02-1,03 ($\mu = 1,14-1,18$)	1,07	1,15	1,21
Liaunis			38,08-39,42	33,41		

4.5 lentelė. Kolonos K2.1 skerspjūvio laikomosios galios patikra

Laikomoji galia	EC3 skyrius	Tikrinama sąlyga	Išnaudojimo koeficientas priklausomai nuo metodikos			
			1b	2a	2b	3a
Skerspjūvio laikomoji galia	6.2.4	Gniuždymui	0,30	0,30	0,30	0,30
	6.2.5	Lenkimui	0,19	0,28	0,28	0,26
	6.2.6	Šlyčiai	0,05	0,06	0,06	0,06
	6.2.8-10	Lenkimui, šlyčiai ir ašinei jėgai	0,24	0,35	0,35	0,33
Klumpamoji galia	6.3.1	Gniuždymui	0,35-0,37 ($\mu = 1,25-1,44$)	0,33	0,33	-
	6.3.2	Lenkimui (LTB)	<i>Tikrinti nereikia (6.3.2.2(4))</i>			
	6.3.3	Gniuždymui ir lenkimui	0,54-0,56 ($\mu = 1,25-1,44$)	0,55	0,61	0,59
Liaunis			54,88-63,22	43,91		

4.6 lentelė. Kolonos K2.2 skerspjūvio laikomosios galios patikra

Laikomoji galia	EC3 skyrius	Tikrinama sąlyga	Išnaudojimo koeficientas priklausomai nuo metodikos			
			1b	2a	2b	3a
Skerspjūvio laikomoji galia	6.2.4	Gniuždymui	0,12	0,12	0,12	0,12
	6.2.5	Lenkimui	0,05	0,06	0,09	0,07
	6.2.6	Šlyčiai	0,02	0,02	0,02	0,01
	6.2.8-10	Lenkimui, šlyčiai ir ašinei jėgai	0,05	0,06	0,09	0,01
Klumpamoji galia	6.3.1	Gniuždymui	0,14-0,19 ($\mu = 1,31-2,03$)	6.3.1.2(4)		-
	6.3.2	Lenkimui (LTB)	Tikrinti nereikia (6.3.2.2(4))			
	6.3.3	Gniuždymui ir lenkimui	0,20-0,25 ($\mu = 1,31-2,03$)	0,19	0,21	0,20
Liaunis			57,52-89,13	43,91		

Kadangi yra atliekama antrosios analizė kuri nevertina sukimo efektų 3a metodas yra nepraktiškas, nes pagal šį metodą yra modeliujamos elemento P-δ nuokrypos, dėl kurių padidėja antrosios eilės įrašos. Tačiau, nors leidžiama neatlikti stabilumo gniuždymui patikros pagal normų 6.3.1 skyrelį, bet kadangi analizė kaip minėta nevertina sukimo, reikia tikrinti

normų 6.3.3 pastovumo sąlygas, lenkimo ir gniuždymo veikiamiems elementams į kurias įeina elemento nuokrypos. Tokiu atveju elemento nuokrypos įvertinamos du kartus ir tai lemia didesnes išnaudojimo koeficiento reikšmes taikant 6.3.3 sąlygą kolonai K1. Šiuo konkrečiu atveju tai nėra aktualu, nes kritinė sąlyga yra skerspjūvio patikros (6.2.9), o ne stabilumo, tačiau negalima atmesti ir galimų kitų variantų. Kolonomis K2.1 bei K2.2 taikant metodą 3a gaunamos mažesnės išnaudojimo koeficientų reikšmės, nei taikant metodą 2b (tik bendrosios nuokrypos $P-\Delta$). Taip yra, kadangi, kaip jau buvo minėta šiame skyrelyje, įvyksta įrąžų persiskirstymas įvedant elemento išlinkį. Dėl minėtų priežasčių tolesniuose skaičiavimuose 3a metodika netaikoma ir rezultatai neanalizuojami.

Taikant 1b metodą, nors esant dideliems skaičiuojamojo ilgio skirtumams (iki ~55 % kolonai B2.2) skerspjūvio patikros išnaudojimo koeficientų skirtumai metodui 1b palyginti ne tokie ženkliūs (iki ~25 % priklausomai nuo sąlygos ir kolonos). Projektuojant pagal STR gali būti aktualu ženkliai padidėjęs liaunis (iki 55 % ir atitinka skaičiuojamoji ilgio padidėjimą), tačiau nors padidėjimas ir į saugiąją pusę šiuo atveju tai nebūtinai yra prasminga, kadangi kolona K2.2 yra to paties skerspjūvio kaip K2.1, tačiau jai tenka mažesnės apkrovos, nes yra aukštu aukščiau. Nors kita vertus pagal LST EN 1993-1-1 5.2.2(8) pastabą nustatant skaičiuojamojo (klumpamojo) ilgio reikšmes, reikia atsižvelgti į gniuždomųjų jėgų pasiskirstymą. Tačiau reikia pažymėti, jog iš praktinės perspektyvos ši situacija nėra aktuali, kadangi būtent šiuo atveju (jei norima vieno skerspjūvio per du aukštus) būtų projektuojama aukštu žemiau esanti kolona, o aukštu aukčiau esančios to paties skerspjūvio kolonos laikomoji galia bus tuo labiau tenkinama dėl mažesnių apkrovų.

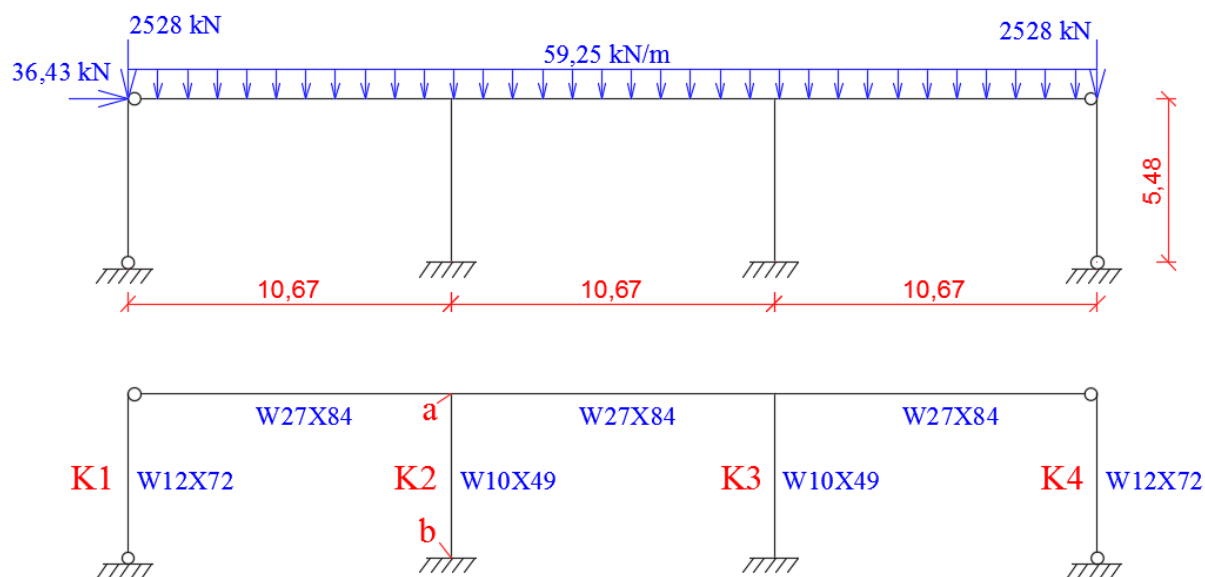
Apytiksliai metodu 2a gauti rezultatai ženkliai neišsiskiria nuo kitų metodikų. Galima laikyti, kad šis metodas yra tinkamas tokio tipo rėmams, kadangi rėme laikomasi metodo prielaidų.

Apibendrinant galima teigi, jog U. Vogelio (Vogel 1985) daugiaaukštis rėmas yra geras pavyzdys kuomet galima naudoti ir apytiksles metodus, kadangi konstrukcija yra tipinė ir laikomasi, tiek analitinių skaičiuojamojo ilgio gavimo, tiek apytikslės antrosios analizės prielaidų.

4.3.2. Daugiaaukštis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001)

Antrosios eilės poveikiams nagrinėjamas A. Maleck (2001) tirtas bei 3.2.4 skyrelyje detaliau aprašytas rėmas. Kadangi priklausomai nuo metodikos yra gauti skirtingi skaičiuojamieji ilgiai nagrinėjamai kolonai K2 (žr. 3.2.4), todėl atliekant skerspjūvių patikrinimą priklausomai nuo šių ilgių papildomai pateikiami labiausiai ir mažiausiai konservatyvūs skerspjūvio išnaudojimo koeficientai. Rėmo $\alpha_{cr} = 2,36 < 3$, todėl pagal normas

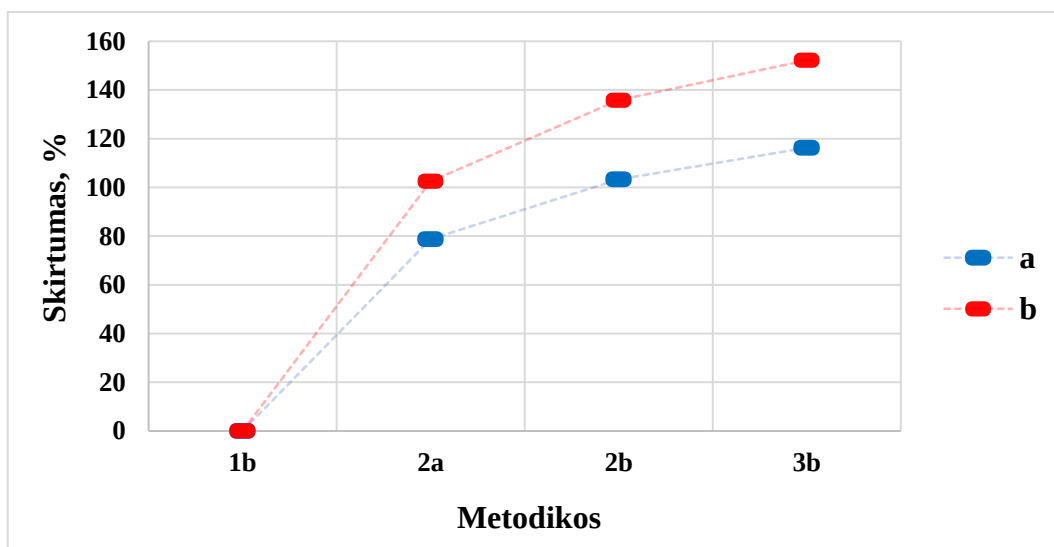
šis rėmas yra jautrus antrosios eilės poveikiams. Visuminei analizei pagal Eurokodą 3 leidžiami tik antrosios eilės analize pagrįsti metodai. Skerspjūvio patikrina 3a metodu neatliekama dėl 4.3.1 gautų išvadų. Laikomosios galios apskaičiavimo pavyzdys pateikiamas A priede. Kitoms kolonomis skaičiavimai atliekami analogiškai pavyzdžiui ir rezultatai pateikiami 4.8 lentelėje.



4.15 pav. Daugiaatramis vienaukštis rėmas pagal Maleck (2001)

4.7 lentelė. Lenkimo momentai bei horizontalūs rėmo poslinkiai priklausomai nuo metodikos

	Kolonos skerspjūvis	Metodikos				
		1b	2a	2b	3b	Maleck (2001)
Lenkimo momentas M, kNm (skirtumas nuo 1-os eilės, %)	a	86,00	153,74 (78,8)	174,85 (103,3)	185,99 (116,3)	106,00 (23,3)
	b	-68,88	-139,50 (102,5)	-162,41 (135,8)	-173,72 (152,2)	-
Poslinkis ties kolonos viršumi Δ, mm (skirtumas nuo 1-os eilės, %)	a	11,0	28,0 (154,6)	33,7 (206,4)	36,6 (232,7)	-



4.16 pav. Kolonos K2 antrosios eilės lenkimo momentų skirtumas lyginant su pirmosios eilės rezultatais

Atliekant antrosios eilės analizę lenkimo momentai bei horizontalūs poslinkiai kaip ir galima numatyti didėja lyginant su pirmosios eilės analize. Metodas 3b pritaikomas tik šiai rėminei konstrukcijai iš nagrinėjamų. Įrašos bei poslinkiai gauti šiuo metodu palyginti neženkliai skiriasi nuo kitų antrosios eilės analizės metodų, o tai leidžia teigti, jog šis metodas yra tinkamas analizei. Tačiau svarbu atkreipti dėmesį, jog apytikslio metodo 2a rezultatai skiriasi nuo antrosios eilės metodikomis gautų. Taip yra todėl, nes 2a metodika taikoma tik rėmams kurių $\alpha_{cr} \geq 3$, todėl šiuo atveju, kadangi $\alpha_{cr} = 2,36$ šio metodo taikyti pagal Eurokodą 3 negalima.

4.8 lentelė. Kolonos K2 skerspjūvio laikomosios galios patikra

Laikomoji galia	EC3 skyrius	Tikrinama sąlyga	Išnaudojimo koeficientas priklausomai nuo metodikos			
			1b	2a	2b	3b
Skerspjūvio laikomoji galia	6.2.4	Gniuždymui	0,32	0,31	0,31	0,31
	6.2.5	Lenkimui	0,37	0,66	0,75	0,80
	6.2.6	Šlyčiai	0,08	0,15	0,16	0,16
	6.2.8-10	Lenkimui, šlyčiai ir ašinei jėgai	0,48	0,86	0,97	1,07
Klumpamoji galia	6.3.1	Gniuždymui	0,53-0,68 ($\mu = 1,02-2,30$)	0,36	0,36	0,36
	6.3.2	Lenkimui (LTB)	Tikrinti nereikia (6.3.2.2(4))			
	6.3.3	Gniuždymui ir lenkimui	0,69-1,03 ($\mu = 1,02-2,30$)	0,93	1,14	1,19
Liaunis			50,69-114,31	49,70		

Šiame rėme pasireiškia 3.2.4 skyrelyje nagrinėtas laisvųjų lankstais įtvirtintų kolonų (K1 bei K4) poveikis momentus perimančiosioms kolonom (K2 bei K3). Šio poveikio nevertina analitinės skaičiuojamojo ilgio metodikos NCCI bei STR, kuriomis gaunamas $\mu = 1,02$. Priimant šį skaičiuojamąjį ilgį gauti skerspjūvio patikros rezultatai iki dviejų kartų skiriasi nuo antrosios eilės metodikomis gautų, o tai leidžia daryti akivaizdžią išvadą, kad nagrinėtos analitinės skaičiuojamojo ilgio metodikos šiam rėmui nėra tinkamos. Tačiau netgi priimant patį konservatyviausią skaičiuojamąjį ilgį $\mu = 2,30$, gauti išnaudojimo koeficientai yra mažesni už gautus antrosios eilės analizės metodais (iki 15 %).

Kaip buvo pastebėta šiame skyrelyje koeficientas $\alpha_{cr} < 3$, todėl 2a metodas pagal normas negalimas. Tai paaiškina, kodėl antrosios eilės momentai ir išnaudojimo koeficientai ženkliai skiriasi nuo antrosios eilės analizės metodais gautų. Šiuo atveju lemiamos 6.3.3 sąlygos išnaudojimo koeficientas yra 28 % mažesnis už gautą metodu 3b.

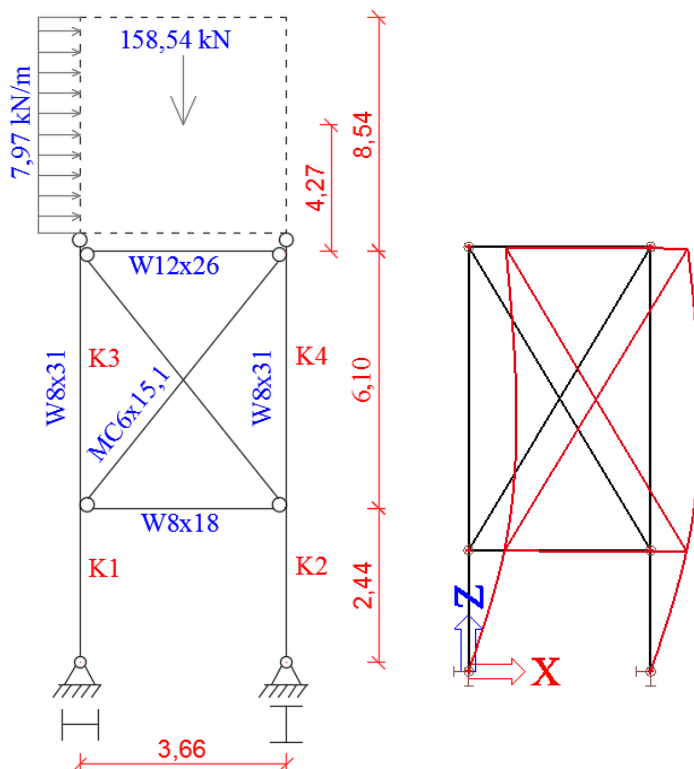
Išskirti galima metodą 3b, kuris, dėl nuokrypos pritaikymo sudėtingumo, pritaikomas tik šiai rėminei konstrukcijai iš nagrinėjamų. Įrašos bei poslinkiai gauti šiuo metodu palyginti neženkliai skiriasi nuo kitų antrosios eilės analizės metodų, o tai leidžia teigti, jog šis metodas yra tinkamas analizei. Metodikų 2b ir 3b ženkliai nesiskiria, tačiau 3b gaunami konservatyvesni

rezultatai, kadangi šiame metode vertinamos vietinės nuokrypos. Dėl šios priežasties metodui 3b galima taikyti 4.3.1 skyrelio išvadas taikomas metodui 3a. Kadangi naudojama antrosios eilės analizė nevertina deplanacijos pastovumo praradimo formų, metodai 3a ir 3b yra nepraktiški, nes du kartus vertinamos elemento nuokrypos (analizėje bei 6.3.3 lygtyje).

Apibendrinant galima teigti, jog norint saugiai suprojektuoti tokio tipo rėmą reikalinga antrosios eilės analizė, kadangi tiek lygiavertės kolonos metodu 1b, tiek apytiksliau metodu 2a gaunami netikslūs rezultatai.

4.3.3. Atraminis rėmas pagal Maleck (2001)

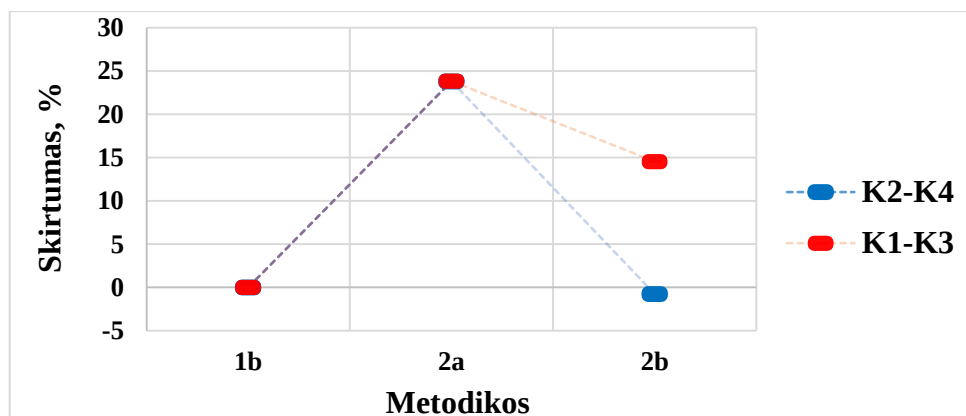
Nagrinėjamas atraminis rėmas pagal A. Maleck (2001). Rėmo $\alpha_{cr} = 5,34$, todėl pagal Eurokodą 3 šis rėmas yra jautrus antrosios eilės poveikiams, tačiau, kadangi $\alpha_{cr} \geq 3$ galimi ir apytikriai metodai šiems poveikiams įvertinti. Šiam rėmui netaikomi 3a ir 3b metodai (žr. 4.3.1 ir 4.3.2 skyelių išvadas). Laikomosios galios nustatymo pavyzdys pateikiamas A priede.



4.17 pav. Atraminio rėmo pagal Maleck (2001) skaičiuojamoji schema bei antrosios eilės analize gauta deformacijų schemas

4.9 lentelė. Lenkimo momentai bei horizontalūs rėmo poslinkiai priklausomai nuo metodikos

	Kolona	Metodikos			
		1b	2a	2b	Maleck (2001)
Lenkimo momentas M, kNm (skirtumas nuo 1-os eilės, %)	K2-K4	42,04	52,05 (23,8)	41,72 (-0,8)	40,45 (-3,78)
	K1-K3	122,60	151,82 (23,8)	140,43 (14,5)	142,36 (16,1)
Poslinkis ties kolonos viršumi Δ , mm (skirtumas nuo 1-os eilės, %)	K4	95,30	118,00 (23,8)	106,00 (11,2)	-



4.18 pav. Kolonų K2-K4 ir K1-K3 antrosios eilės lenkimo momentų skirtumas lyginant su pirmosios eilės rezultatais

Atliekant antrosios eilės analizę (metodas 2b) pastebimas įrašų persiskirstymas. Kolonoje K2-K4 lenkimo momentai išlieka tokie patys kaip pirmosios eilės analizės momentai, tačiau padidėja tempiamoje kolonoje K1-K3. Taip yra todėl, kad kolona K2-K4 lenkiama silpnąja ašimi, todėl kolona K1-K3 perimama daugiau poveikių esant didesnei apkrovai dėl antrosios eilės poveikių.

Metodikos 2a atveju atliekama pirmosios eilės analizė, todėl lenkimo momentai ir poslinkiai didėja proporcingai 1b metodo atvejui. Rėme apkrova pridėta ne aukštuose, taip pat aukštų suskirstymas nėra aiškus, o tai pažeidžia 2a metodikos taikymo prielaidas. Iš to galima daryti išvadą, kad šio metodo rezultatai neatspindi realios tokio tipo konstrukcijos elgsenos.

4.10 lentelė. Kolonos K1 skerspjūvio laikomosios galios patikra

Laikomoji galia	EC3 skyrius	Tikrinama sąlyga	Išnaudojimo koeficientas priklausomai nuo metodikos		
			1b	2a	2b
Skerspjūvio laikomoji galia	6.2.4	Tempimui	0,11	0,15	0,12
	6.2.5	Lenkimui	1,05	1,30	1,21
	6.2.6	Šlyčiai	0,21	0,26	0,25
	6.2.8-10	Lenkimui, šlyčiai ir ašinei jėgai	1,05	1,35	1,21
Klumpamoji galia	6.3.1	Gniuždymui	Kolona tempiama		
	6.3.2	Lenkimui			
	6.3.3	Gniuždymui ir lenkimui			

4.11 lentelė. Kolonos K2 skerspjūvio laikomosios galios patikra

Laikomoji galia	EC3 skyrius	Tikrinama sąlyga	Išnaudojimo koeficientas priklausomai nuo metodikos		
			1b	2a	2b
Skerspjūvio laikomoji galia	6.2.4	Gniuždymui	0,23	0,27	0,23
	6.2.5	Lenkimui	0,77	0,96	0,75
	6.2.6	Šlyčiai	0,03	0,03	0,02
	6.2.8-10	Lenkimui, šlyčiai ir ašinei jėgai	0,77	0,96	0,75
Klumpamoji galia	6.3.1	Gniuždymui	0,38 ($\mu = 1,79$)	0,32	0,28
	6.3.2	Lenkimui	<i>Tikrinti nereikia (6.3.2.2(4))</i>		
	6.3.3	Gniuždymui ir lenkimui	0,99 ($\mu = 1,79$)	0,98	0,96
Liaunis			85,04	47,62	

Rėmo $\alpha_{cr} = 5,34$, todėl pagal Eurokodą 3 leidžiama naudoti metodą 2a. Tačiau, kaip jau buvo minėta, šis metodas tinkamai neįvertina rėmo elgsenos, kadangi yra pažeidžiamos naudojimo prielaidos. Todėl gauti išnaudojimo koeficientai, lyginant su kitomis metodikomis, ženkliai skiriasi abiem kolonomis (iki 28 % priklausomai nuo sąlygos).

Metodikų 1b ir 2b rezultatai sutampa kolonai K2, nes sutampa gautos įrašos. Tačiau ženkliai skiriasi (iki 15,2 %) tempiamai kolonai K1, nes atliekant antrosios eilės analizę vyksta įrašų persiskirstymas ir lenkimo momentai ženkliai išauga šioje kolonoje.

Apibendrinant galima teigti, jog šiam rėmui su netipine apkrova ir aukštų suskirstymu geriau atlikti antrosios eilės analizę, nes pirmosios eilės analize pagrįstos metodikos tinkamai neįvertina rėmo elgsenos.

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

IŠVADOS

Atsižvelgiant į įvade iškeltus darbo uždavinius išvados pateikiamos punktais:

- 1) Šiame darbe buvo parengtas visuminės analizės pagal LST EN 1993-1-1 algoritmas, kuriame, priklausomai nuo nuokrypų ir analizės tipo, išskirti metodai, atsižvelgiantys į antrosios eilės poveikius. Pasinaudojant šiuo algoritmu buvo atliekama visuminė rėmo analizė.
- 2) Darbe nustatytas skaičiuojamasis kolonos ilgis nagrinėjamoms konstrukcijoms bei išnagrinėti veiksniai, darantys poveikį šiam ilgiui. Apibendrinant 3-ajame skyriuje pateiktas išvadas galima teigti, jog analitinėmis metodikomis gaunami tikslūs rezultatai tol, kol laikomasi jų pritaikymo prielaidų. Norint nustatyti, kokiais atvejais pažeidžiamos prielaidos buvo nagrinėjami veiksniai, darantys poveikį skaičiuojamajam kolonos ilgiui. Šie veiksniai – tai netolygus rėmo kolonų apkrovimas, lemiantis netolygų kritinės bei veikiančios jėgų santykį kolonose, sijos standumo poveikis esant išskirstytai apkrovai, tarpatramių bei aukštų skaičiai. Šių veiksnių poveikis ženkliai skiriasi, priklausomai nuo rėminės konstrukcijos tipo bei veiksnio pasireiškimo dydžio. Skaičiuojamiesiems ilgiams nustyti buvo naudojama „SCIA Engineer“ pastovumo analizė, NCCI bei STR analitinės metodikos.
- 3) Nustatytas nagrinėjamų rėminių konstrukcijų jautrumas antrosios eilės poveikiams pagal AISC 360-16 bei LST EN 1993-1-1 metodikas. Abiejose normose konstrukcijų jautrumą parodo koeficientai, kurie yra apytikslės antrosios eilės analizės pagrindas (Eurokode 3 – α_{cr} , AISC – B_1 ir B_2). Koeficientas B_2 savo esme yra labai panašus į α_{cr} , jie abu parodo P- Δ poveikius rėmo aukšte, tačiau koeficiente B_2 įvertinamas ir laisvųjų (horizontalių poveikių neperimančių) kolonų poveikis rėmų standumui. Taip pat AISC normose kartu naudojamas ir koeficientas B_1 , įvertinantis vietinių elemento deformacijų P- δ galimą poveikį visai konstrukcijai. Koeficiento B_1 atitikmens Eurokode nėra, todėl šiuo aspektu lyginti metodikas yra sunku. Tačiau tai leidžia teigti, jog šis koeficientas lemia AISC pranašumą prieš Eurokodą, jeigu normos yra lyginamos pagal poveikių įvertinimo tikslumą. Tačiau ar detalesni rezultatai yra verti įdėto papildomo darbo negalima užtikrintai teigti tik iš keleto nagrinėtų konstrukcijų.
- 4) Darbe buvo išnagrinėti ir palyginti metodai, vertinantys antrosios eilės poveikius. Pagrindiniai vertinimo kriterijai – skerspjūviu laikomosios galios išnaudojimo koeficientas bei antrosios eilės lenkimo momentų dydis priklausomai nuo metodikos. Taip pat buvo atsižvelgta į pritaikymo galimybes ir efektyvumą. 4-ajame skyriuje gautos išvados apibendrinamos kiekvienam iš metodų:

1b metodas – lygiavertės kolonos metodas. Iš antrosios eilės poveikius vertinančių metodikų palyginimo rezultatų bei nagrinėtos literatūros galima teigti, jog šio metodo didžiausias privalumas yra paprastumas pritaikant, tačiau sudėtingoms, netipinėms konstrukcijoms gali būti sudėtinga nustatyti skaičiuojamąjį kolonos ilgį, reikalingą šiam metodui, taip pat neįvertinant aptartų veiksnių, darančių poveikį skaičiuojamam ilgiui, gali būti pažeidžiamos metodikų prielaidos, o tai gali lemti nepatikimus rezultatus, taip pat ir į nesaugiąją pusę. Tokiais atvejais rekomenduojama atlikti antrosios eilės analizę.

2a metodas - apytikslė metodiką didinant pirmosios eilės analize gautas įrašas koeficientu. Ši metodika taikoma atvejais, kai laikomasi sąlygos $\alpha_c \geq 3$ ir kitų metodikos taikymo prielaidų. Iš darbo rezultatų galima teigi, jog metodika yra gana tiksli, ypač kol laikomasi minėtos sąlygos. Tačiau verta pastebėti, jog, jei šis metodas nėra integruotas į naudojamą baigtinių elementų programą, žymiai paprasčiau atlikti antrosios eilės analizę, kadangi rankiniu būdu apskaičiuoti padidintas įrašas užima nemažai laiko. Taip pat atliekant skaičiavimus rankiniu būdu padidėja klaidų padarymo rizika.

2b metodas - antrosios eilės analizė įvertinant tik bendrąsias nuokrypas P-Δ. Šiam metodui, jei taikoma tampri analizė pritaikymo ribojimų nėra. Iš literatūros apžvalgos ir iš darbo rezultatų galima vienareikšmiškai teigi, kad atsižvelgiant į šiuolaikines technines galimybes, tai yra pats optimaliausias metodas atlikti visuminei rėmo analizei. Didžiausias šio metodo privalumas yra tas, jog atliekant stabilumo patikrą, skaičiuojamuoju ilgiu galima priimti geometrinį. Nuokrypų P-Δ modeliavimas daugumoje baigtinių elementų programų yra automatizuotas ir nereikalauja daug laiko. Visų antrosios eilės analizės metodikų trūkumas yra tas, jog negalioja superpozicijos principas, todėl visi deriniai turi būti skaičiuojami atskirai.

3a metodas - antrosios eilės analizė įvertinant pradinius pokrypius P-Δ ir elemento išlinkius P-δ. Šis metodas imlesnis darbu už prieš tai minėtus, kadangi reikia modeliuoti ir elemento išlinkius. Šis procesas daugumoje BE programų yra optimizuotas, tačiau reikia atkreipti dėmesį į pridėto elemento išlinkio kryptį. Naudota programa „SCIA Engineer“, kaip ir daugelis kitų šiuolaikinių BE programų, analizėje nevertina skersinio sukamojo klupumo ar kitų deplanacijos pastovumo praradimo formų strypiniams elementams, o integruotais analitiniais metodais apskaičiuoja M_{cr} , kuris panaudojamas tikrinant stabilumo sąlygoms. Tačiau tokiu atveju tenka tikrinti pastovumo lygtis pagal normas ir taip netenkama vieno iš antrosios eilės analizės vertinant visas nuokrypas privalumų. Taip pat tokiu atveju elemento nuokrypos įvertinamos pakartotinai.

3b metodas – antrosios eilės analizė priimant kritinio klupumo formą η_{cr} kaip vienintelę bendrąją ir vietinę nuokrypą. Šis metodas reikalauja daugiausia darbo lyginant su kitais. Ši

nuokrypų modeliavimo būdą labai sudėtinga pritaikyti konstrukcijoms, kadangi naudojama klupumo forma bei vieno skerspjūvio rodikliai. Jei norima pritaikyti nuokrypą kitoms rėmo kolonom, taip pat ir kitiems apkrovų deriniams, reikia nuokrypą apskaičiuoti iš naujo. Taip pat pats nuokrypos η_{cr} nustatymas yra sudėtingas, kadangi naudojant polinomo regresiją (vienas iš būdų) reikia aprašyti klupumo formą. Šio metodo naudoti pastatų projektavimui nerekomenduotina tol, kol nėra programinės įrangos, saugiai ir efektyviai automatizuojančios šį procesą.

SIŪLYMAI

Šiuo laikotarpiu praktikoje dažniausiai projektuojama pirmiausia atliekant pirmosios eilės visuminę analizę, po to analitinėmis išraiškomis tikrinama skerspjūvių laikomoji galia. Šios metodikos buvo sukurtos supaprastinti skaičiavimą dar tais laikais, kai kompiuteriai nebuvo naudojami projektavimui. Tačiau ir iki šiol šie metodai yra itin populiarūs, nors techninės galimybės leidžia atlikti žymiai detalesnę analizę. Šiame darbe buvo tiriamos visuminės analizės atlikimo metodikų pritaikymo galimybės, efektyvumas ir patikimumas. Buvo nustatyta, jog su dabartiniais kompiuteriniais resursais antrosios eilės analizė, priklausomai nuo įvertinamų nuokrypų, yra galima ir praktiška. Tačiau norint iki galo išnaudoti galimybes, kurias normos leidžia jau dabar ir įvykdyti BIM ateities viziją reikalingi kryptingi tyrimai šia tema.

Atlikus šį darbą galima išskirti konkrečius siūlymus tyrimams:

- Šiame darbe buvo atliekama tik tampri analizė rėmo plokštumoje, todėl tyrimus galima plėtoti vertinant poveikius ir iš rėmo plokštumos bei nagrinėti erdvinę konstrukcijų elgseną, taip pat ir vertinant medžiagos netiesiškumą.
- Rekomenduojama tirti išsamią antrosios eilės analizę su visomis nuokrypomis vertinant visas galimas stabilumo praradimo formas pačioje analizėje, pavyzdžiui, skersinį sukamąjį klupumą.
- Gali būti tiriamas ryšių sistemų poveikis rėminių konstrukcijų stabilumui bei antrosios eilės poveikiams. Taip pat ir antrosios eilės poveikiai šiose sistemose.
- Gali būti detaliau nagrinėjamos skaičiuojamojo kolonos ilgio nustatymo metodikos, kadangi šiame darbe didesnis dėmesys buvo skiriamas antrosios eilės analizei, todėl darbe nebuvo nagrinėjami visi populiarūs šio ilgio nustatymo metodai bei visi galimi veiksniai, darantys poveikį šiam ilgiui, pavyzdžiui, mazgų standumo poveikis.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Abreu A.; Sousa C. 2009. *Aspects on Nonlinear Geometric and Material Analysis of Three-Dimensional Framed Structures*, Ph.D. Dissertation, Porto University, 107 pp.

ANSI/AISC 360-16. 2016. Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

Attard, M. 1986. Lateral buckling analysis of beams by the fem. *Computers & Structures*, 23(2), pp.217-231.

Boissonnade, N. 2006. *Rules for member stability in EN 1993-1-1*. 1st ed. Brussel: ECCS Publications.

Brodniansky J. 2016. Elastic critical buckling mode as imperfection on frame with non-uniform cross-section along the members with imperfection according en 1993-1-1 clause 5.3.2 (11). *The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures – SDSS 2016*, Timisoara, Romania.

Chantrain, P.; Schleich, J. 1997. *Simplified version of Eurocode 3 for usual buildings*. 1st ed. European Commission.

Chladný, E. and Stujberová, M. 2013. Frames with unique global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 1). *Stahlbau*, 82(8), pp.609-617.

Chladný, E. and Stujberová, M. 2013. Frames with unique global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 2). *Stahlbau*, 82(9), pp.684-694.

Djalaly, H. 1976. Longueur de Flambement des éléments de structures. *Construction Metallique*.

Galambos T.; Surovek E. 2008. *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers*, Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.

Home, M. R. 1975. An Approximate Method for Calculating the Elastic Critical Loads of Multistorey Plane Frames, *The Structural Engineer*, Vol. 53:242.

LST EN 1993-1-1:2005/AC:2009. Eurokodas 3 Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios pastatų taisyklės. Vilnius, 2009.

Maleck S. 2001. *Second-Order Inelastic and Modified Elastic Analysis and Design Evaluation of Planar Steel Frames*, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 579 pp.

Markandu S. 2010. *Determination of buckling length of columns in multi storey plane steel frames*, Project, Aalborg University, 76 pp.

Oppe M.; Muller, C.; 2005. *NCCI SN008 Buckling Lengths of Columns Rigorous Approach*, Access Steel, London.

Simões da Silva L.; Simões, R.; Gervásio, H. 2016. *Design of steel structures*. 2nd ed., Mem Martins, Portugal.

Stability of steel structures. 1976. 1st ed. Liège, France: European Convention for Constructional Steelwork.

STR 2.05.08: 2005. Plieninių konstrukcijų projektavimas. Pagrindinės nuostatos. Vilnius, 2005.

Vogel U. 1984. "Calibrating Frames," *Stahlbau*, Vol. 54, pp. 295-301.

Webber, A.; Orr, J.; Shepherd, P. and Crothers, K. 2015. The effective length of columns in multi-storey frames. *Engineering Structures*, 102, pp.132-143.

Wood, R. H. 1974. Effective Lengths of Columns in Multi-Storey Buildings, *The Structural Engineer*, Vol. 52: 235-295.

Yoo, C.; Lee, S. 2011. *Stability of structures*. 1st ed. Burlington, Mass.: Butterworth-Heinemann.

Ziemian, R. 2010. *Guide to stability design criteria for metal structures*. 6th ed. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.