



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Rimvydas Krikštulis

**PLIENINIŲ STRYPINIŲ SISTEMŲ ANALIZĖS METODŲ, TAIKOMŲ EN
1993-1-1, LYGINAMASIS PARAMETRINIS TYRIMAS**

**STEEL BARS STRUCTURES ANALYSIS METHODS COMPARATIVE
PARAMETRIC RESEARCH ACCORDING TO EN 1993-1-1**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos T 002 studijų kryptis

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

prof. Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2021-05-31

(Data)

Rimvydas Krikštulis

**PLIENINIŲ STRYPINIŲ SISTEMŲ ANALIZĖS METODŲ, TAIKOMŲ EN
1993-1-1, LYGINAMASIS PARAMETRINIS TYRIMAS**

**STEEL BARS STRUCTURES ANALYSIS METHODS COMPARATIVE
PARAMETRIC RESEARCH ACCORDING TO EN 1993-1-1**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos T 002 studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Alfonsas Daniūnas

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

2021-05-31

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Lina Rutkienė

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

2021-05-31

(Data)

Vilnius, 2021

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data-.....-.....

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos magistro baigiamasis darbas

Pavadinimas **Plieninių strypinių sistemų analizės metodų, taikomų EN 1993-1-1, lyginamasis parametrinis tyrimas**

Autorius **Rimvydas Krikštulis**

Vadovas **Alfonsas Daniūnas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami plieninių strypinių konstrukcijų projektavimo metodai pagal EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015. Pagrindinis tyrimų objektas – plieninės strypinės sistemos. Tiriamąjį darbą sudaro keturi skyriai. Pirmajame skyriuje aprašomos plieninės strypinės sistemos ir nesuvaržyti plieniniai rėmai. Taip pat aptariama antrosios eilės teorija ir kas yra standus ir pusiau standus mazgas. Antrajame skyriuje aptariama visuminė plieninių konstrukcijų analizė pagal EN 1993-1-1:2005, nagrinėjami metodai, geometrinių nuokrypų vertinimas ir Eurokodo 3 atnaujinimo būtinybė. Trečiajame skyriuje palyginami pagrindiniai EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 visuminės analizės skirtumai. Ketvirtajame skyriuje atliekamas nesuvaržytų plieninių rėmų parametrinis tyrimas. Nagrinėjami skirtingo aukštingumo ir skirtingo tarpatramių skaičiaus rėmai. Skaičiavimuose įvertinamos geometrinės nuokrypos, mazgų dalinis sukamasis standis. Lyginami alfa kritinių koeficientų bei irąžų ir poslinkių pirmosios ir antrosios eilės analizių rezultatai. Tyrinėjama baigtinių elementų skaičiaus įtaka rezultatų tikslumui.

Darbo pabaigoje pateikiamos išvados ir rekomendacijos. Darbo apimtis – 87 p. teksto be priedų, 42 paveikslai, 20 lentelių ir 25 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: antrosios eilės analizė, antrosios kartos Eurokodas 3, geometrinė nuokrypa, nesuvaržytas plieninis rėmas, parametrinis tyrimas, pusiau standus mazgas, visuminė analizė

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

ISBN ISSN
Copies No.
Date-.....-.....

Master Degree Studies **Structural Engineering** study programme Master Graduation Thesis

Title **Steel bars structures analysis methods comparative parametric research according to EN 1993-1-1**

Author **Rimvydas Krikštulis**

Academic supervisor **Alfonsas Daniūnas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The final master's thesis deals with the design methods of steel bar structures according to EN 1993-1-1:2005 and prEN 1993-1-1:2015. The main object of research is steel bars structures. The research work consists of four chapters. The first chapter describes steel bar systems and sway steel frames. The second-order theory and what is a rigid and semi-rigid joint are also discussed. The second chapter discusses the global analysis of steel structures according to EN 1993-1-1:2005, examines the methods, the assessment of geometrical imperfections and the need to update Eurocode 3. The third chapter compares the main differences between the global analysis of EN 1993-1-1:2005 and prEN 1993-1-1: 2015. In the fourth chapter, a parametric study of sway steel frames is performed. Frames of different heights and different numbers of spans are considered. Geometrical imperfections and partial rotational stiffness of the joints are estimated in the calculations. The results of the alpha critical coefficients and the first and second order stresses and displacements are compared. The influence of the number of finite elements on the accuracy of the results is investigated.

Conclusions and recommendations are presented at the end of the thesis. Thesis consists of: 87 p. text without appendixes, 42 pictures, 20 tables and 25 bibliographical entries.

Keywords: geometric imperfection, global analysis, parametric research, second generation Eurocode 3, second order analysis, semi-rigid joint, sway steel frame

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	11
ĮVADAS.....	13
1. PLIENINIŲ KONSTRUKCIJŲ ANALIZĖ	15
1.1. Plieninės strypinės sistemos	15
1.2. Konstrukcijų netiesiškumas ir antrosios eilės efektai	18
1.2.1. Konstrukcijų netiesiškumo atvejai	18
1.2.2. Antrosios eilės teorija.....	19
1.3. Pusiau standžių mazgų samprata ir jų klasifikacija.....	22
1.3.1. Mazgų klasifikacija pagal lenkiamąjį stiprumą.....	25
1.3.2. Mazgų klasifikacija pagal sukamąjį standį	26
2. PLIENINIŲ KONSTRUKCIJŲ VISUMINĖ ANALIZĖ PAGAL EN 1993-1-1:2005.....	28
2.1. Rėminių konstrukcijų jautrumas antrosios eilės efektams pagal Eurokodą 3	28
2.2. Visuminė konstrukcijų analizė pagal EN 1993-1-1:2005	29
2.2.1. Metodas A.....	32
2.2.2. Metodas B.....	32
2.2.3. Metodas C.....	34
2.3. Rėmų visuminės analizės nuokrypų modeliavimas	35
2.4. EN 1993-1-1:2005 atnaujinimo būtinybė.....	37
2.5. Baigtinių elementų metodas (BEM).....	43
3. EN 1993-1-1:2005 IR prEN 1993-1-1:2015 VISUMINĖS ANALIZĖS PALYGINIMAS.....	46
3.1. Eurokodų rekomenduojamų analizės metodų pagrindiniai skirtumai.....	46
3.2. prEN 1993-1-1:2015 visuminės analizės skaičiavimo metodai.....	54
4. PARAMETRINIAI NESUVAŽYTŲ PLIENINIŲ RĖMŲ SKAIČIAVIMAI	57
4.1. Tyrimo metodika.....	57
4.1.1. Geometrinės tiriamųjų rėmų nuokrypos	58
4.2. Nagrinėjamų plieninių rėmų skaičiuojamosios schemos	61
4.3. Parametrinis tyrimas BE programa ir tyrimo rezultatų lyginamoji analizė.....	64
4.3.1. Koeficiento α_{cr} pokytis skirtingų parametų plieniniuose rėmuose	64

4.3.2. Tiriamųjų plieninių rėmų įrąžų ir poslinkių palyginimas	67
4.3.3. Pusiau standžių mazgų įtaka	76
4.4. Baigtinių elementų skaičiaus įtaka rezultatų tikslumui	81
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	84
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	86
PRIEDAI	88
A priedas. Tiriamųjų plieninių, nesuvaržytų rėmų apkrovos ir deriniai	88
B priedas. Vieno tarpatramio plieninių rėmų dešinės pusės kolonų įrąžos	90
C priedas. Dviejų tarpatramių plieninių rėmų dešinės pusės kolonų įrąžos	94
D priedas. Trijų tarpatramių plieninių rėmų dešinės pusės kolonų įrąžos	98
E priedas. Tiriamųjų plieninių, nesuvaržytų rėmų poslinkiai	102

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Mazgo modelio tipas (EN 1993-1-8:2005)	24
2.1 lentelė. Skaičiuotinės pradinio vietinio išlinkio e_0/L reikšmės (EN 1993-1-1:2005)	36
2.2 lentelė. Klupumo kreivės parinkimas skerspjūviui (pagal prEN 1993-1-1:2015)	40
3.1 lentelė. Koeficiento α_{cr} apskaičiavimo skirtumai	46
3.2 lentelė. EC-3 5.2 ir prEC-3 7.3 formulių skirtumai	48
3.3 lentelė. Kolonomis taikytino pataisos koeficiento ribos	51
3.4 lentelė. Koeficiento e_0 apskaičiavimo Eurokoduose palyginimas	51
3.5 lentelė. Sąlygų palyginimas	52
3.6 lentelė. Vietinio išlinkio formulių palyginimas	52
3.7 lentelė. Vietinio išlinkio reikšmės β parinkimas (prEN 1993-1-1:2015)	52
3.8 lentelė. Skerspjūvių klasių ribinės reikšmės	53
4.1 lentelė. 1-o tarpatramio rėmo nuokrypos pagal EN 1993-1-1:2005	58
4.2 lentelė. 2-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal EN 1993-1-1:2005	58
4.3 lentelė. 3-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal EN 1993-1-1:2005	58
4.4 lentelė. 1-o tarpatramio rėmo nuokrypos pagal prEN 1993-1-1:2015	59
4.5 lentelė. 2-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal prEN 1993-1-1:2015	59
4.6 lentelė. 3-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal prEN 1993-1-1:2015	59
4.7 lentelė. Apkrovos kontrolės metodai (<i>Robot Structural Analysis Professional</i>)	67
4.8 lentelė. Numatytieji apkrovos kontrolės metodo parametrai	67
4.9 lentelė. Koeficiento α_{cr} pokytis 5-ių aukštų rėme naudojant skirtingą BE kiekį	81
A. 1 lentelė. Fiktyvių apkrovų dydis ir išdėstymas skaičiuojamosiose schemose	88
A. 2 lentelė. Tiriamųjų rėmų apkrovų deriniai	89
B. 1 lentelė. 3-jų aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	90
B. 2 lentelė. 3-jų aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	90
B. 3 lentelė. 5-ių aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	91
B. 4 lentelė. 5-ių aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	91
B. 5 lentelė. 10-ies aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	92
B. 6 lentelė. 10-ies aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	93
C. 1 lentelė. 3-jų aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	94
C. 2 lentelė. 3-jų aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	94
C. 3 lentelė. 5-ių aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	95
C. 4 lentelė. 5-ių aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	95
C. 5 lentelė. 10-ies aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	96
C. 6 lentelė. 10-ies aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	97

D. 1 lentelė. 3-jų aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	98
D. 2 lentelė. 3-jų aukštų tiriamųjų rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	98
D. 3 lentelė. 5-ių aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	99
D. 4 lentelė. 5-ių aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas.....	99
D. 5 lentelė. 10-ies aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, nevertinant fiktyvių apkrovų	100
D. 6 lentelė. 10-ies aukštų tiriamųjų plieninių rėmų įrašos, įvertinus fiktyvias apkrovas	101
E. 1 lentelė. Vieno tarpatramio plieninių rėmų poslinkiai, nevertinant fiktyvių apkrovų.....	102
E. 2 lentelė. Vieno tarpatramio plieninių rėmų poslinkiai, įvertinant fiktyvias apkrovas.....	103
E. 3 lentelė. Dviejų tarpatramių plieninių rėmų poslinkiai, nevertinant fiktyvių apkrovų.....	104
E. 4 lentelė. Dviejų tarpatramių plieninių rėmų poslinkiai, įvertinant fiktyvias apkrovas.....	105
E. 5 lentelė. Trijų tarpatramių plieninių rėmų poslinkiai, nevertinant fiktyvių apkrovų	106
E. 6 lentelė. Trijų tarpatramių plieninių rėmų poslinkiai, įvertinant fiktyvias apkrovas	107
E. 7 lentelė. 10-ies aukštų plieninių rėmų poslinkiai, įvertinant dalinį mazgų standumą ir fiktyvias apkrovas	108

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Plieninių strypinių sistemų tipai (Nageim & Macginley, 2005).....	15
1.2 pav. Vertikaliais ryšiais suvaržytas plieninis rėmas	16
1.3 pav. Suvaržyto (a) ir nesuvaržyto (b) plieninio rėmo elgsena (pagal Yoo & Lee, 2011).....	17
1.4 pav. Nesuvaržytas plieninis rėmas.....	17
1.5 pav. Medžiagos netiesiškumas. Įtempių-deformacijų kitimo kreivė.....	18
1.6 pav. Geometrinis netiesiškumas: a) geometrinis netiesiškumas atsirandantis konstrukcijoje pridėjus apkrovą; b) apkrovos ir poslinkio kitimo kreivė	19
1.7 pav. Struktūrinis netiesiškumas konstrukcijoje	19
1.8 pav. Deformuotos schemos ir antrosios eilės lenkiamieji momentai sukelti: a) P-Δ efektų; b) P-δ efektų (pagal Ziemian, 2010)	20
1.9 pav. Sijos-kolonos mazgas ir jo elgsena (Silva et al., 2018).....	23
1.10 pav. Lenkiamojo momento-pasisukimo $M-\Phi$ kreivė.....	23
1.11 pav. Mazgų klasifikacija pagal lenkiamąjį stiprumą (pagal C. T. Gomes, 2002 ir EN 1993-1-8:2005)	25
1.12 pav. Mazgų klasifikavimas pagal standumą (EN 1993-1-8:2005)	26
2.1 pav. Visuminės analizės algoritmas (pagal EN 1993-1-1:2005, Chantrain & Schleich, 1997 ir Boissonnade et al., 2006)	31
2.2 pav. Lygiaverčio pokrypio nuokrypos (EN 1993-1-1:2005).....	36
2.3 pav. Pradinių nuokrypų pakeitimas lygiavertėmis horizontaliosiomis jėgomis (EN 1993-1-1:2005)	37
2.4 pav. Eurokodo 3 (EN 1993) dalys (Kuhlmann & Schmidt-Rasche, 2017).....	38
2.5 pav. Liekamieji įtempiai HD 400x1202 skerspjūvyje (Snijder et al., 2013)	42
2.6 pav. Baigtinių elementų modelis sukamojo lenkiamojo klupumo atsakui nustatyti (Snijder et al., 2014)	42
2.7 pav. Konstrukcinių elementų sudalijimas į BE: a) rėminė konstrukcija; b) plokštė; c) skerspjūvis (Kindmann & Kraus, 2011).....	43
2.8 pav. Modifikuotas Newton-Raphson apkrovos kontrolės metodas (Ziemian, 2010).....	44
2.9 pav. Pilno Newton-Raphson iteracinio apkrovos kontrolės metodo skaičiavimo principas.....	45
3.1 pav. Rėmų klasifikacija: a) suvaržytas plieninis rėmas; b) nesuvaržytas plieninis rėmas (prEN 1993-1-1:2015)	47
3.2 pav. Horizontalių ir vertikalų jėgų nustatymas pagal 7.2.1 10(B) (prEN 1993-1-1:2015).....	49
3.3 pav. Plieninių rėmų visuminės analizės skaičiavimo algoritmas (pagal prEN 1993-1-1:2015) .	50
4.1 pav. Pradinių pokrypių pagal EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 palyginimas	60
4.2 pav. Nagrinėjami vieno tarpatramio plieniniai, nesuvaržyti rėmai	61

4.3 pav. Nagrinėjami dviejų tarpatramių plieniniai, nesuvaržyti rėmai	62
4.4 pav. Nagrinėjami trijų tarpatramių plieniniai, nesuvaržyti rėmai	62
4.5 pav. Koeficientų α_{cr} pokytis nevertinant fiktyvių apkrovų	64
4.6 pav. Koeficientų α_{cr} pokytis įvertinant fiktyvias apkrovas	66
4.7 pav. 10-ies aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai.....	68
4.8 pav. 5-ių aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai	70
4.9 pav. 3-jų aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai	71
4.10 pav. 10-ies aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių poslinkių skirtumai	73
4.11 pav. Koeficiento α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose pokyčiai 10-ies aukštų rėmuose.....	74
4.12 pav. Koeficiento α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose pokyčiai 5-ių aukštų rėmuose	74
4.13 pav. Koeficiento α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose pokyčiai 3-jų aukštų rėmuose	75
4.14 pav. Koeficiento α_{cr} ir ašinių jėgų kolonose pokytis 10-ies aukštų rėmuose.....	76
4.15 pav. Koeficiento α_{cr} pokytis 10-ies aukštų rėmuose, įvertinant skirtingą mazgų standumą.....	77
4.16 pav. 10-ies aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai, įvertinant dalinį mazgų standumą	79
4.17 pav. Poslinkių pokytis 10-ies aukštų rėmuose, įvertinant skirtingą mazgų standumą.....	80
4.18 pav. BE įtaka rėmo stabilumui: a) ir b) – nesuvaržytas rėmas; c) ir d) – suvaržytas rėmas (Pimentel, 2019)	83
A. 1 pav. Tipinės charakteristinės rėmų apkrovos: a) nuolatinė apkrova; b) vėjo apkrova	88

IVADAS

Pagrindinis plieninių strypinių konstrukcijų projektavimo tikslas – atliekant jų analizę pasiekti kuo didesnę tikslumą ir skaičiavimo rezultatų artumą tikrajai šių sistemų elgsenai. Praktikoje visuomet stengiamasi, kad sistema būtų ekonomiška (siekiama sutaupyti medžiagų, optimizuoti konstrukcijų gamybą ir t.t.). Norint tai atlikti būtina įvertinti strypinės sistemos elgseną, t. y. pasirinkti tinkamą visuminės analizės metodą. EN 1993-1-1:2005 pateikia nurodymus, koku metodu ir kaip galima atlikti konstrukcinės sistemos visuminę analizę. Būtina įvertinti, kuriuo metodu remiantis bus gaunamas didžiausias rezultatų tikslumas.

Analizės rezultatų tikslumą galima padidinti šiais būdais:

1. Skaičiuoti antrosios eilės efektus;
2. Įvertinti tikrąją mazgų elgseną;
3. Įvertinti pagrindo deformacijų sukeltus poveikius.

Šiuo metu yra rengiama nauja Eurokodo 3 versija – prEN 1993-1-1:2015, kuri po poros metų pakeis dabar galiojantį EN 1993-1-1:2005. Naujajame Eurokode 3 (prEN 1993-1-1:2015) yra iš pagrindų atnaujintas konstrukcijų analizės skyrius. Tiriamajame darbe bus lyginamos abiejų Eurokodų versijų skaičiavimo metodai ir jų jautrumas rezultatų tikslumui.

Darbo aktualumas:

Atlikdami antrosios eilės konstrukcijų visuminę analizę pagal EN 1993-1-1:2005, projektuotojai turi daug laisvės pasirinkti, kuriuo metodu įvertinti konstrukcijų netiesiškumus. Eurokode 3 esantys visuminės analizės metodai nėra detalios paaiškinti, todėl atsiranda metodų taikymo ir nuokrypų įvertinimo patirties trūkumas. Todėl nemaža dalis projektuotojų Lietuvoje neatlieka konstrukcijų antrosios eilės analizės arba ją atlieka ne iki galo įvertindami visas nuokrypas ir poveikius. Tačiau, taikant antrosios eilės analizę galima gauti ne tik patikimesnius, bet kai kuriais atvejais net ir racialesnius rezultatus. Šiuo metu jau yra rengiama nauja Eurokodo 3 versija – prEN 1993-1-1:2015, todėl nemažai daliai projektuotojų reikės prisitaikyti prie konstrukcijų analizės algoritmo pakeitimų. Todėl šiame darbe nagrinėjami visuminės analizės metodai, pagrindiniai jų skirtumai tarp EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 ir antrosios eilės skaičiavimo metodai.

Darbo naujumas:

Būsimojo Eurokodo 3 prEN 1993-1-1:2015 tema Lietuvoje nenagrinėta. Užsienyje mokslininkai jau rašo straipsnius (Kuhlmann & Schmidt-Rasche, 2017; Snijder, 2017) ir supažindina projektuotojus su naujuoju Euro kodu 3 ir esminiais pakeitimais jame. Todėl svarbu atlikti panašaus pobūdžio tyrimus ir Lietuvoje.

Tyrimo metodai:

Darbe atliekama plieninių, nesuvaržytų rėmų parametrinė analizė, kurios metu keičiami atitinkami skaičiuojamųjų schemų parametrai, įvertinamos fiktyvios apkrovos ir atliekama antrosios eilės analizė. Parametrinis tyrimas atliekamas baigtinių elementų programa *Robot Structural Analysis Professional*.

Tiriamasis objektas – plieninių strypinių sistemų antrosios eilės efektai ir jų taikymas.

Darbo tikslai:

1. Atlikti plieninių strypinių sistemų analizės metodų pagal EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 palyginimą.
2. Ištirti antrosios eilės skaičiavimų vertinimo pokyčius pagal Eurokodus (EN 1993-1-1:2005, prEN 1993-1-1:2015).

Darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti plieninių strypinių sistemų visuminės analizės metodus pagal EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 ir nustatyti jų skirtumus.
2. Sudaryti skaičiuojamąsias schemas parametriniams nesuvaržytų plieninių rėmų tyrimams baigtinių elementų programoje *Robot Structural Analysis Professional*.
3. Atlikti parametrinių skaičiavimų lyginamąją analizę nesuvaržytiems plieniniams rėmams.
4. Įvertinti pusiau standžių mazgų įtaką visuminės analizės skaičiavimo rezultatams.
5. Nustatyti nesuvaržytų plieninių rėmų elementų padalinimo į daugiau baigtinių elementų įtaką visuminės analizės skaičiavimo rezultatų tikslumui.

1. PLIENINIŲ KONSTRUKCIJŲ ANALIZĖ

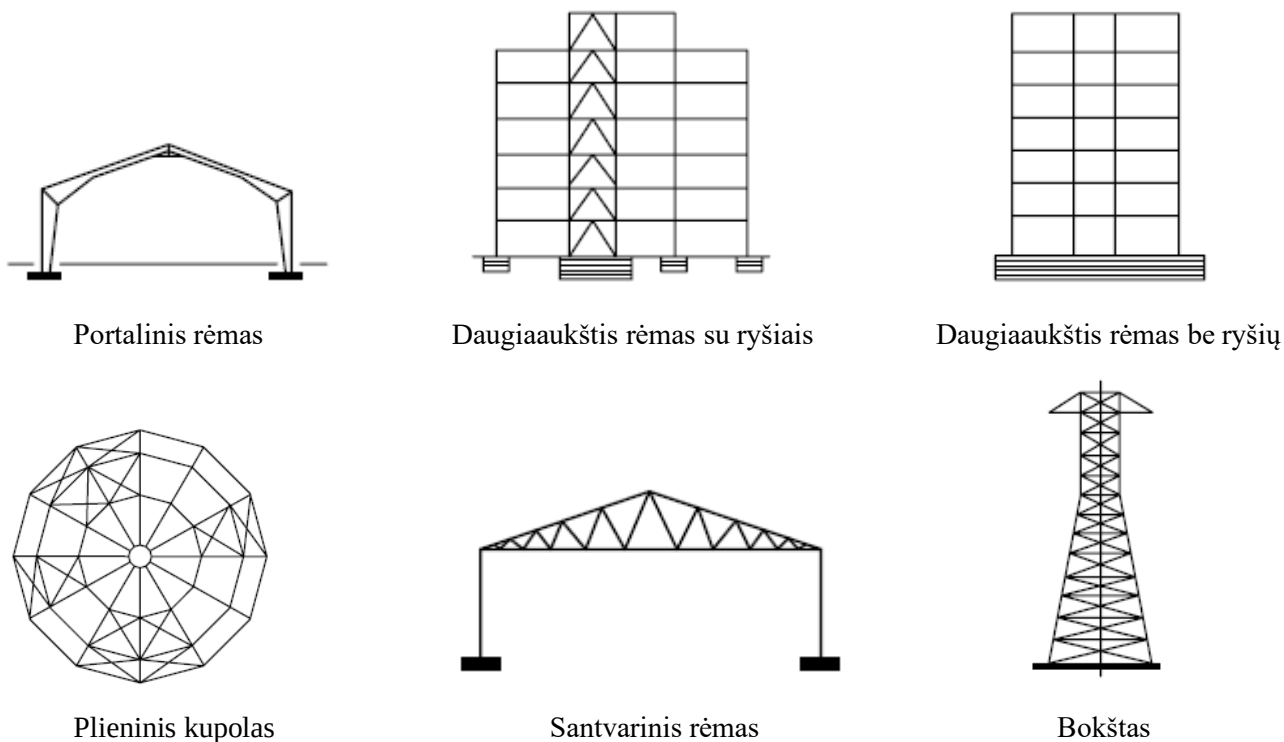
Šiame skyriuje aprašoma plieninių strypinių konstrukcijų, jų netiesiškumą ir pusiau standžių mazgų teoriniai pagrindai. Pagrindinis baigiamojo darbo tikslas yra ištirti plieninių, nesuvaržytų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių elgseną, įvertinti pusiau standžius mazgus, todėl šis skyrius daugiausia orientuotas būtent į šias strypines konstrukcijas.

1.1. Plieninės strypinės sistemos

Plieninės strypinės konstrukcijos – viena iš kelių plačiausiai naudojamų statybinių konstrukcijų rūšių, skirtų atlaikyti veikiančias apkrovas ir jėgas, perduoti jas į statinio pamatus ir kt. Plieninės strypinės sistemos naudojamos labai plačiai: nuo paprasčiausių atitvarų, iki dangoraižių ir tiltų. Plienines strypines konstrukcijas galima skirstyti taip (Nageim & Macginley, 2005):

- vieno aukšto, vieno arba kelių tarpatramių konstrukcijas, kurios sudarytos iš santvarinių arba sijinių rėmų;
- daugiaaukštes, vieno arba kelių tarpatramių konstrukcijas, kurias papildomai galima skirstyti į rėmus su ryšiais ir be ryšių;
- erdvines konstrukcijas – kupolus, bokštus ir t. t.;
- tempiamas konstrukcijas ir lynais laikomas stogo konstrukcijas;
- liaunas konstrukcijas, kuriose stabilumą užtikrina denginys.

Kai kurių plieninių strypinių konstrukcijų tipai parodyti 1.1 pav.



1.1 pav. Plieninių strypinių sistemų tipai (Nageim & Macginley, 2005)

Šio baigiamojo darbo pagrindinis tyrimų objektas yra būtent antrasis plieninių strypinių konstrukcijų tipas – nesuvaržyti, kelių aukštų plieniniai rėmai. Labai svarbu atskirti, kada rėmas yra laikomas suvaržytu, o kada ne.

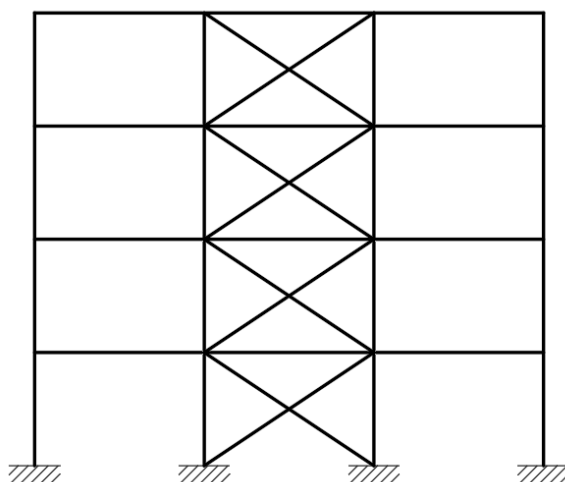
Plieniniai rėmai, kaip ir minėta anksčiau, pagal ryšių buvimą skirstomi į rėmus be ryšių ir rėmais su ryšiais. Rėmas laikomas turintis ryšius tik tada, kai ryšių sistema yra efektyvi ir suvaržo rėmo horizontalius poslinkius. Priešingu atveju jis bus klasifikuojamas kaip rėmas be ryšių.

Plieniniai rėmai pagal horizontalius poslinkius skirstomi į:

- suvaržytus (angl. *non-sway*);
- nesuvaržytus (angl. *sway*).

Rėmas su ryšiais gali būti ir nesuvaržytas, jeigu ryšių sistema yra neefektyvi – nesuvaržo rėmo horizontalių poslinkių. Plieninis rėmas be ryšių gali būti laikomas suvaržytu, jeigu jis yra nejautrus horizontalioms apkrovoms.

Suvaržyti plieniniai rėmai naudojami gan plačiai, kadangi jie yra ekonomiškesni ir lengviau pritaikomi. Tokie rėmai ekonomiškesni būtent dėl ryšinių sistemų tarp sijų ir kolonų (žr. 1.2 pav.), kurios leidžia padidinti rėmo stabilumą ir atsparumą didelėms horizontalioms jėgoms (pvz. vėjo apkrovai).



1.2 pav. Vertikaliais ryšiais suvaržytas plieninis rėmas

Daugiaaukščiame rėme vertikalūs ryšiai dažniausiai išdėstomi sukryžiuotais elementais, kurie laikomi kaip tik tempimą perimantys elementai. Vertikalūs ryšiai rėmuose turi būti suprojektuoti taip, kad perimtų šias apkrovas:

- vėjo apkrovas;
- fiktyvias apkrovas, kuriomis įvertinamos geometrinės nuokrypos;
- antrosios eilės efektų sukeltas apkrovas dėl posvyrio (jeigu rėmas yra jautrus antrosios eilės poveikiams).

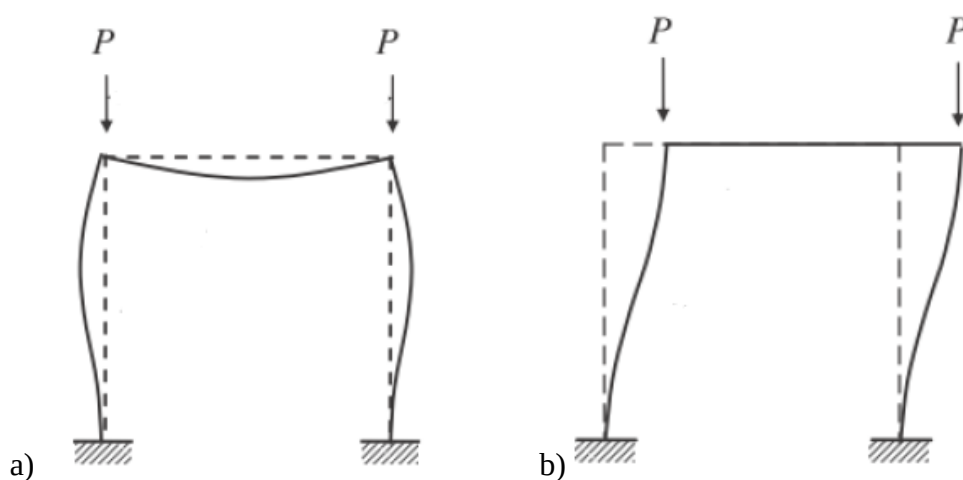
Ar rėmą galima laikyti suvaržytu, priklauso nuo ryšinės sistemos efektyvumo. Ryšinė rėmo sistema yra laikoma efektyvia, jeigu laikomasi sąlygos (da Silva, Simões & Gervásio, 2013):

$$S_{br} \geq 5S_{unbr}, \quad (1.1)$$

čia: S_{br} – konstrukcijos su ryšiais šoninis standis;

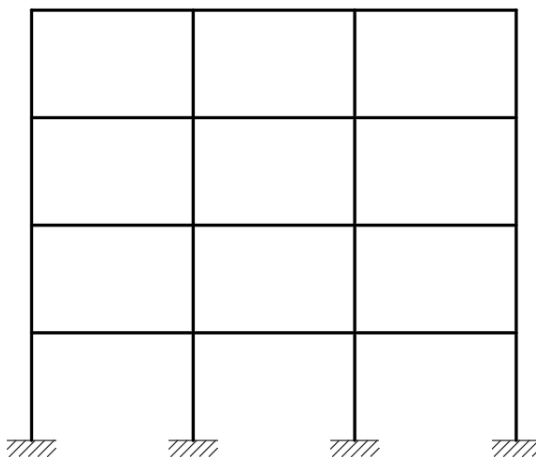
S_{unbr} – konstrukcijos be ryšių šoninis standis.

Dažniausiai, jeigu sąlyga yra tenkinama, tokie suvaržyti rėmai nėra jautrūs antrosios eilės poveikiams – P-Δ efektams (da Silva et al., 2013). Tai reiškia, kad gniuždomiems pavieniai elementai išklups anksčiau, nei įvyks viso rėmo išklupimas. Būtent todėl šiame darbe buvo nuspręsta nagrinėti tik idealiai laisvus (nesuvaržytus) daugiaaukščius plieninius rėmus.



1.3 pav. Suvaržyto (a) ir nesuvaržyto (b) plieninio rėmo elgsena (pagal Yoo & Lee, 2011)

Rėmai, kurie netenkina (1.1) sąlygos, laikomi nesuvaržytais (žr. 1.4 pav.). Tokiems rėmams, bendrasis nepastovumas (viso rėmo išklupimas) pasireiškia anksčiau, nei pavienių gniuždomų elementų išklupimas. Todėl šie rėmai yra jautresni antrosios eilės poveikiams (P-Δ efektams), tai matoma ir 1.3 b) pav.



1.4 pav. Nesuvaržytas plieninis rėmas

1.2. Konstrukcijų netiesiškumas ir antrosios eilės efektai

Dažniausiai rėminių konstrukcijų projektavimas atliekamas elementų lygyje. Įprastinė projektavimo procedūra yra tokia: nustatomos ašinės jėgos ir lenkimo momentai kiekviename elemente, projektuojamas kiekvienas elementas atskirai taip, kad atlaikytų pavojingiausią ašinių jėgų ir lenkimo momentų derinį. Tačiau iš tikrųjų rėmai turi būti projektuojami įvertinant bendrą rėmo elgseną, o ne priimant, kad rėmas susideda iš atskirų elementų. Projektuojant rėmus elementų lygyje, rėmo elementai nėra traktuojami kaip visiškai izoliuoti. Savaimė suprantama, kad izoliuotas elementas elgiasi visiškai kitaip, nei rėmo elementas, kadangi visada yra sąveikos įtaka tarp rėmo elementų. Ši sąveika apytikriai įvertinama pasinaudojant skaičiuojamojo ilgio samprata, kuri plačiai naudojama inžinerinėje praktikoje. Bet tai neišsprendžia konstrukcijoje atsirandančių netiesiškumų, todėl reikia atlikti antrosios eilės analizę, dar kitaip vadinamą netiesiniu projektavimo uždaviniu.

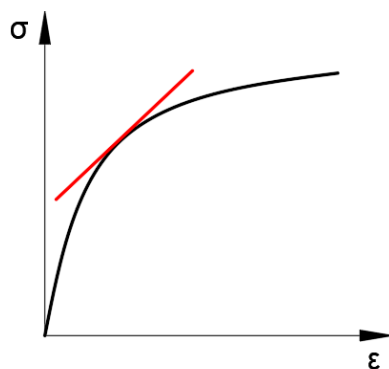
Formaliai netiesinis uždavinys suprantamas, kaip algebrinis uždavinys (pvz. lygčių sistema), kurio koeficientai priklauso nuo uždavinio nežinomųjų konkrečių reikšmių. Tokio uždavinio sprendimas atliekamas sprendžiant tiesinių uždavinių seką. Konkretūs sprendimo algoritmai labai priklauso nuo konkretaus uždavinio savybių.

1.2.1. Konstrukcijų netiesiškumo atvejai

Plieninių konstrukcijų skaičiavimo uždaviniuose pasitaikantys netiesiškumo atvejai yra:

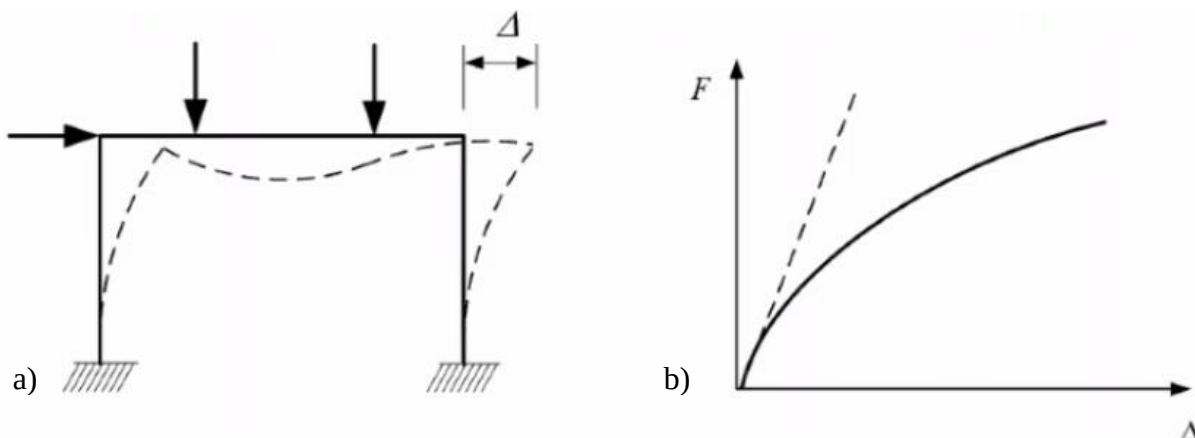
- medžiagos (fizinis) netiesiškumas;
- geometrinis netiesiškumas;
- struktūrinis (konstrukcinis) netiesiškumas.

Medžiagos netiesiškumo atveju įvertinamas netiesinis įtempių ir deformacijų ryšys. Šiuo atveju linijiniai ir kampiniai poslinkiai, bei linijinės ir kampinės deformacijos laikomos mažomis.



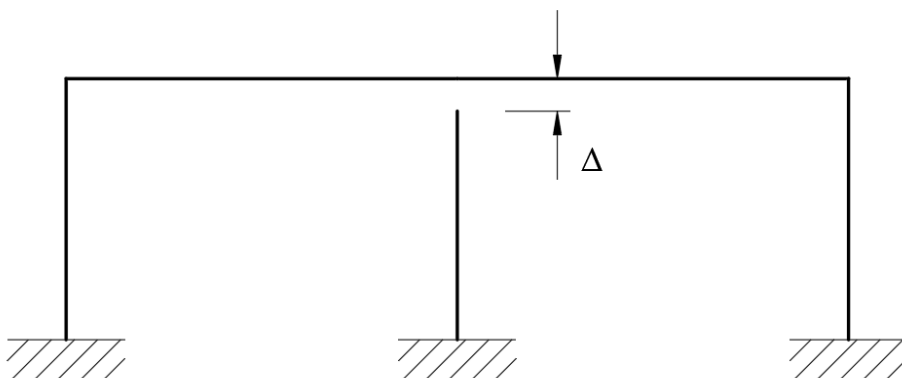
1.5 pav. Medžiagos netiesiškumas. Įtempių-deformacijų kitimo kreivė

Paprastai mechanikoje priimami du galimi **geometrinio netiesiškumo** atvejai, tai geometrinis netiesiškumas esant dideliems poslinkiams, kai deformacijos laikomos mažomis ir geometrinis netiesiškumas esant didelėms deformacijoms. Galimi šių netiesiškumų įvairūs variantai, juos supaprastinant.



1.6 pav. Geometrinis netiesiškumas: a) geometrinis netiesiškumas atsirandantis konstrukcijoje pridėjus apkrovą; b) apkrovos ir poslinkio kitimo kreivė

Struktūrinio netiesiškumo atveju įvertinamas kraštinių sąlygų kitimas ir dėl to pakitusi kūno (konstrukcijos) elgsena. Statybinėse konstrukcijose struktūrinio netiesiškumo dažni atvejai – sistemos su vienpusiais ryšiais.

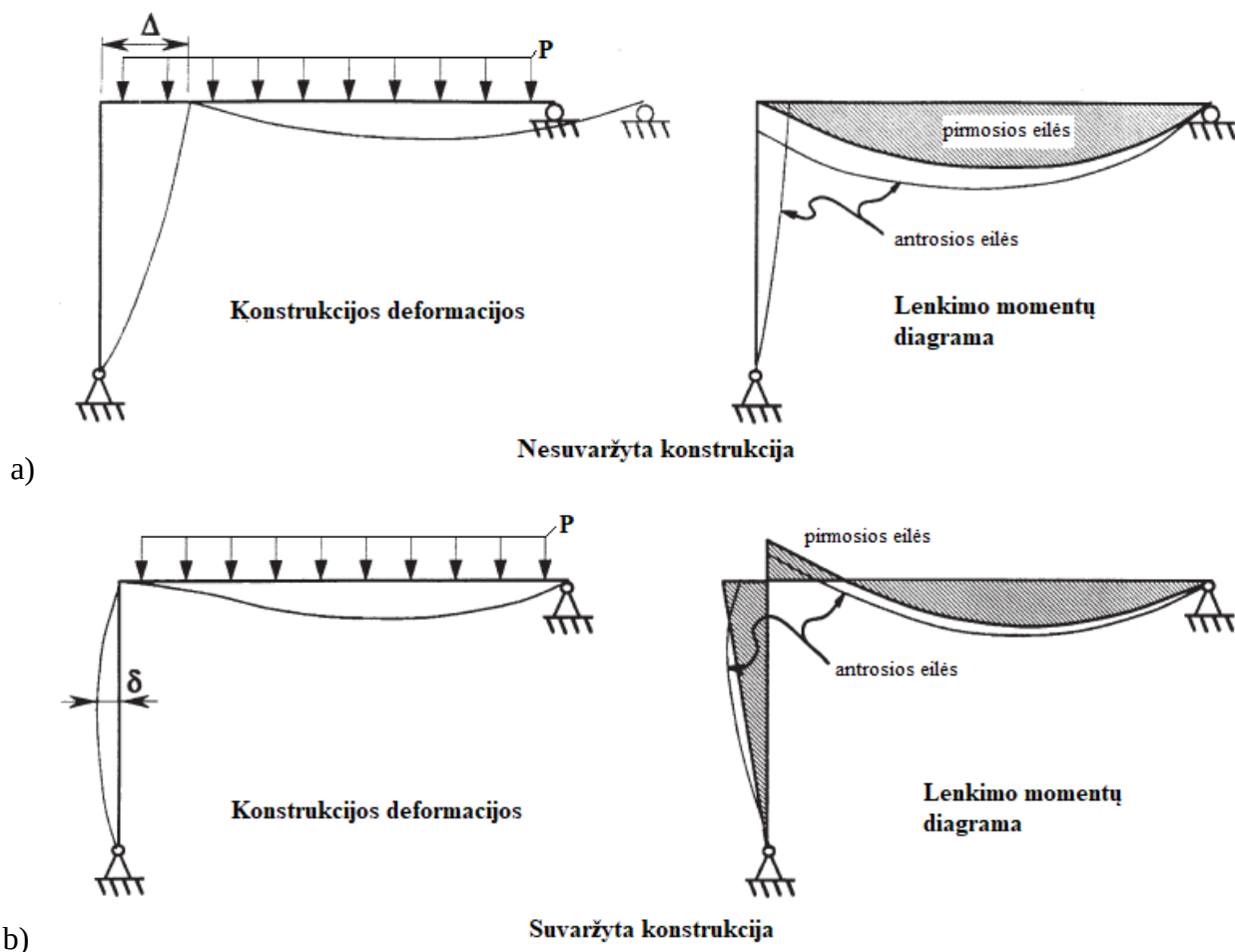


1.7 pav. Struktūrinis netiesiškumas konstrukcijoje

1.2.2. Antrosios eilės teorija

Konstrukcijas veikiant tam tikroms jėgoms, atsiranda įtempiai bei nuokrypos, kurios palaipsniui deformuoja konstrukciją horizontaliai dar iki pasiekiant kritinę apkrovą. Ši deformacija sukelia papildomus antrosios eilės momentus, kurie sumažina konstrukcijos laikomąją galią. Antrosios eilės vietiniai (elemento) ir globalūs (rėmo) poveikiai literatūroje dažnai skirstomi į P- δ

(elementui) ir $P-\Delta$ (rėmui) (da Silva et al., 2013). $P-\delta$ efektai pasireiškia išilgai elemento, o $P-\Delta$ – elementų galuose (žr. 1.8 pav.).



1.8 pav. Deformuotos schemas ir antrosios eilės lenkiamieji momentai sukelti: a) $P-\Delta$ efektų; b) $P-\delta$ efektų (pagal Ziemian, 2010)

Remiantis Ziemiano išnagrinėtais pavyzdžiais (1.8 pav.), antrosios eilės $P-\Delta$ ir $P-\delta$ efektus apibūdinti galima paprastai. Pagrindinis konstrukcijos antrosios eilės reikalavimas yra užtikrinti deformuotos sistemos pusiausvyrą. 1.8 a) pav. matoma, kad gauti lenkimo momentai, atlikus pirmosios eilės analizę, yra panašūs į lanksčiai atremtos sijos atvejį – kolonoje veikiantis lenkimo momentas yra lygus 0. Tačiau, atliekant antrosios eilės analizę, lenkimo momentai, įvertinant deformacijas (sukeltas $P-\Delta$ efektų), persiskirsto ir taip kolonoje atsiranda lenkiamasis momentas, kad sistema būtų pusiausvyros būsenoje. Taigi, reiškiny, kai vertikalios jėgos ΣF sukelia papildomus horizontalius poslinkius, o kartu ir papildomas įrąžas, vadinamas $P-\Delta$ efektu. Projektuojant konstrukcijas šį efektą būtina įvertinti, nes dėl jo gali žymiai padidėti poslinkiai ir įrąžos, o kartu pasikeisti rėmo elementų pastovumas. Norint tiksliai nustatyti įrąžas ir poslinkius, įvertinant $P-\Delta$ efektą, būtina deformuotai rėmo schemai atlikti antrosios eilės skaičiavimus.

Pagal 1.8 b) pav. nesunku paaiškinti P- δ efektus. Konstrukcija yra suvaržyta ir šoninės deformacijos negalimos, todėl antrosios eilės momentai atsiranda dėl elementų išlinkių δ . Antrosios eilės momentai šiuo atveju yra lygūs koloną veikiančiai apkrovai F , padaugintai iš išlinkio δ . Kadangi išlinkio kryptis sutampa su esamo lenkimo momento kryptimi kolonoje, šis dar labiau padidėja, tačiau dėl įrąžų pusiausvyros sumažėja sijoje. Svarbu atkreipti dėmesį, kad tokiu atveju pasikeičia didžiausio lenkimo momento vieta kolonoje. Apibendrinant galima daryti išvadą, kad P- δ efektus sukelia ašinė jėga ir elementų išlinkis, kuris sukelia antrosios eilės lenkiamuosius momentus konstrukcijoje.

Taip pat yra keletas dalykų, į kuriuos būtina atkreipti dėmesį atliekant rėmų antrosios eilės skaičiavimus (Ziemian, 2010):

- Antrosios eilės efektai paveikia ne tik sijų ir kolonų lenkiamuosius momentus, bet ir ašinės ir skersinės jėgas. Kitaip tariant, antrosios eilės efektai daro poveikį visiems konstrukcinės sistemos elementams ir jų vidinėms jėgoms. Tačiau ašinių ir skersinių jėgų pokyčiai iš esmės turi mažesnę įtaką nesuvaržytuose plieniniuose rėmuose, nei lenkiamųjų momentų pokytis;
- Antrosios eilės momentai nebūtinai turi tokį patį pasiskirstymą kaip ir pirmosios eilės momentai. Tai reiškia, jog negalioja superpozicijos principas ir ne visuomet galima taikyti apytikslius antrosios eilės poveikius vertinančius metodus, pagrįstus pirmosios eilės momentų didinimu;
- Visos konstrukcijos, nesvarbu, suvaržytos ar ne, patiria P- Δ ir P- δ efektus. Nors 1.8 pav. pateikti pavyzdžiai yra netipiniai atvejai, kuriuose dominuoja tik P- Δ arba tik P- δ efektas, tai nereiškia, kad realiose konstrukcijose taip bus. 1.8 a) pav. P- Δ efektas sukelia kairės kolonos lenkimą, kuris kartu sukelia ir P- δ efektus. 1.8 b) pav. veikiant apkrovai įvyksta nežymus sijos sutrumpėjimas dėl ašinių deformacijų, o tai sukelia nedidelį P- Δ efektą. Daugeliu atvejų praktikoje vieną arba kitą antrosios eilės efektą galima ignoruoti (prieš tai, žinoma, patikrinus, ar tai yra saugu), bet visada svarbu žinoti, kad nesvarbu, ar sistema suvaržyta, ar ne, joje atsiranda abu netiesiškumai.

Pasitelkiant šiuolaikines technologijas ir programinę įrangą, atlikti konstrukcijų antrosios eilės analizę tampa vis paprasčiau. Kadangi antrosios eilės teorijai negalioja superpozicijos principas, daugelis konstrukcijų skaičiavimo programinių paketų naudoja P- Δ efektus netiesiniams skaičiavimams, kurie leidžia greitai išspręsti didelį kiekį tiesinių uždavinių. Tai aktualu, kadangi skaičiuojant net ir paprastus pastatus gaunama daugybė apkrovų variantų.

Atliekant tampriąją plieninių rėmų, kurių deformacijos sąlyginai nedidelės, analizei dažniausiai naudojami supaprastinti metodai, įvertinantys antrosios eilės poveikius. Šiuose metoduose dažniausiai naudojamos fiktyvios horizontalios jėgos, kurios sukelia P- Δ efektus. Todėl

kiekvienam projektuotojui svarbu žinoti naudojamo programinio paketo netiesinės analizės prielaidas, nes skirtingi metodai skirtingai įvertina geometrinį netiesiškumą. Svarbu paminėti, kad programiniuose paketuose esantys P- Δ efektų vertinimo skaičiavimai dažniausiai nevertina P- δ efektų.

Baigiamojo darbo tyrime naudojamas programinis paketas *Robot Structural Analysis Professional* netiesinius skaičiavimus atlieka tik įvertindamas P- Δ efektus. Programa neturi galimybės vertinti P- δ efektų. Tačiau nesuvaržytiems rėmams tai didelės įtakos rezultatų tikslumui neturi, nes, kaip buvo minėta anksčiau, nesuvaržytas rėmas išklups žymiai anksčiau, nei gniuždomiems elementams pasireikš vietinis klupumas.

1.3. Pusiau standžių mazgų samprata ir jų klasifikacija

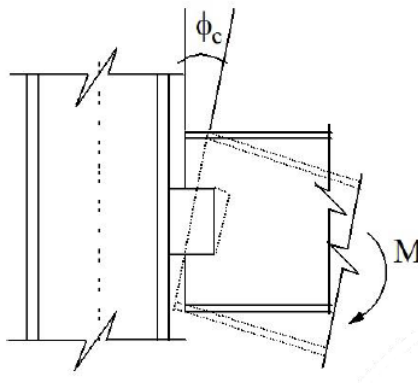
Plieninių konstrukcijų mazgai dažniausia yra skirstomi tik į standžius arba lanksčius. Toks mazgų skirstymas leidžia supaprastinti visos konstrukcijos skaičiavimą ir projektavimą, bet neleidžia tiksliai nustatyti tikrosios konstrukcijos elgsenos. Būtent mazgų elgsenos įvertinimas yra vienas iš būdų, kaip galima padidinti analizės rezultatų tikslumą. Žinant tikrąją visos konstrukcijos elgseną, ją galima suprojektuoti saugią bei ekonomiškai naudingą.

Teoriškai standūs mazgai neleidžia elemento galams pasisukti ir perima 100 % lenkiamojo momento. Tariamai lankstūs mazgai leidžia elemento galams pasisukti nuo sukiamų apkrovų ir neperima lenkiamųjų momentų. Pusiau standūs mazgai gali perduoti vertikalias skersines jėgas ir perimti tik dalį lenkiamojo momento elemento galuose. Praktikoje pusiau standūs mazgai dažniausiai naudojami konstrukcijose, kuriose horizontalių jėgų poveikis rėmo poslinkiams mažinamas įvedant vertikalius ryšius (Vayas, Ermopoulos & Ioannidis, 2019).

Pusiau standžių mazgų savybes, jų įvertinimą ir metodų taikymą plačiai nagrinėjo mokslininkai ir tyrėjai. Yra atlikta nemažai skaitinių mazgų eksperimentų, lyginamųjų skaičiavimų ir tikrų rėmų eksperimentų, kurių rezultatai parodo tikrąją mazgų elgsenos vertinimo svarbą (Urbonas, 2006).

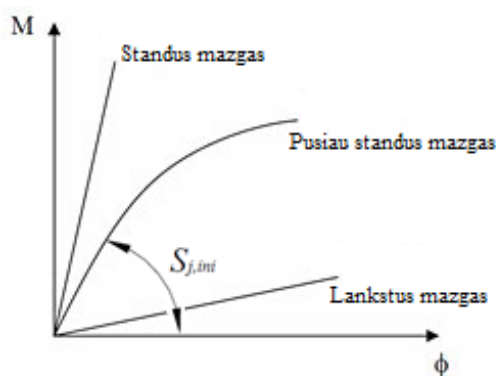
Pusiau standžių mazgų skaičiavimo metodika aprašoma EN 1993-1-8:2005. Čia pateikiamas pusiau standžių mazgų skaičiavimo metodas, įvertinant sukamąjį standį ir sukamąją gebą. Tačiau Lietuvoje nemaža dalis projektuotojų skaičiavimus atlieka pagal lietuviškas projektavimo normas (statybos techninius reglamentus, toliau – STR), kuriose pusiau standžių mazgų skaičiavimo metodikos nėra nurodyta. STR 2.05.08:2005 yra rašoma, kad tikroji mazgų elgsenos įtaka įrąžų ir deformacijų pasiskirstymui konstrukcijoje gali būti nevertinama, nebent turi pakankamai didelę įtaką (STR 2.05.08:2005, 2007). Todėl pusiau standžius mazgus projektuotojai naudoja retai.

Lenkiamose sistemose didžiausią įtaką turi lenkimo momentai M , todėl į ašines jėgas N ir skersines jėgas V dažniausiai nekreipiamas dėmesys. Todėl pusiau standžių mazgų elgseną galima aprašyti kaip lenkiamojo momento M ir pasisukimo ϕ priklausomybę. Šią priklausomybę iliustruoja 1.9 pav., čia ϕ_c – kolonos ir sijos pasisukimo skirtumas, M – lenkiamasis momentas.



1.9 pav. Sijos-kolonos mazgas ir jo elgsena (Silva et al., 2018)

Tokių mazgų elgsena geriausiai iliustruoja M - ϕ kreivė (žr. 1.10 pav.). Kaip matoma iš 1.10 pav., pusiau standaus mazgo elgsena yra tarpinė tarp idealiai standaus ir idealiai lankstaus mazgo elgsenų. Kol pusiau standžiam mazge nevyksta plastinės deformacijos, M - ϕ kreivės priklausomybė yra tiesinė ir mazgo elgseną apibūdina pradinis mazgo sukamasis standis $S_{j,ini}$.



1.10 pav. Lenkiamojo momento-pasisukimo M - Φ kreivė

Būtent lenkiamojo momento-pasisukimo priklausomybė yra pagrindinė pusiau standaus mazgo charakteristika. Lenkiamojo momento-pasisukimo M - Φ priklausomybę galima nustatyti skaitiniais metodais, įvairiais eksperimentais, analitinių ar mechaninių modelių tyrimais.

Šiuo metu vis aktyviau yra tiriama ir ašinės jėgos įtaka mazgo sukamajam standumui, t. y. atsižvelgiama ir į ašinės jėgos poveikį lenkiamojo momento-pasisukimo M - Φ kreivės pokyčiui (Urbonas, 2006).

Norit įvertinti tikslias mazgų charakteristikas, būtina nustatyti mazgo elgsenos būdą. Mazgų elgsenos nustatymo metodus galima suskirstyti į penkias grupes (Faella, Piluso & Rizzano, 2000):

- empiriniai metodai;
- analitiniai metodai;
- komponentų metodas;
- skaitiniai metodai (baigtinių elementų metodas);
- realūs eksperimentiniai tyrimai.

Tiksliausias iš šių metodų yra realus eksperimentas, bet jis užima daug laiko ir yra sąlyginai brangus. Analitiniai ir empiriniai metodai teoriniai ir taikomi tik tam tikriems mazgams. Baigtinių elementų metodas (toliau – BEM) ir realūs eksperimentiniai tyrimai taikomi mazgų analizei ir palyginimui atlikti.

Projektuojant konstrukcijas plačiausiai taikomas komponentų metodas. Jis pasižymi tuo, kad jį taikant galima gana greitai ir patogiai nustatyti mazgo sukamojo standumo ir lenkiamojo stiprumo charakteristikas (Urbonas, 2006).

Pagal EN 1993-1-8:2005 pateikiamą mazgo modelio klasifikavimo sistemą pasirenkamas atitinkamas metodas rėmo visuminei analizei atlikti (žr. 1.1 lentelę).

1.1 lentelė. Mazgo modelio tipas (EN 1993-1-8:2005)

Konstrukcijos visuminės analizės metodas	Mazgo klasifikacija		
Pagal tamprųjį modelį	Tariamai lankstinis	Standusis	Pusiau standus
Pagal standųjį plastiškąjį modelį	Tariamai lankstinis	Viso stiprumo	Dalinio stiprumo
Pagal tamprųjį plastiškąjį modelį	Tariamai lankstinis	Standusis ir viso stiprumo	Pusiau standus ir dalinio stiprumo Pusiau standus ir viso stiprumo Standusis ir dalinio stiprumo
Mazgo modelio tipas	Paprastasis	Vientisasis	Pusiau vientisasis

1.1 lentelėje nurodoma, kad konstrukcijos visuminei analizei atlikti gali būti taikoma vienas iš trijų konstrukcijų skaičiavimo metodų – tamprus, standžiai plastinis ir tampriai plastinis.

Konstrukcijoms taikant tamprųjį modelį, mazgai turi būti klasifikuojami pagal sukamąjį standumą. Taikant standųjį plastinį metodą, mazgai turi būti klasifikuojami pagal lenkiamąjį

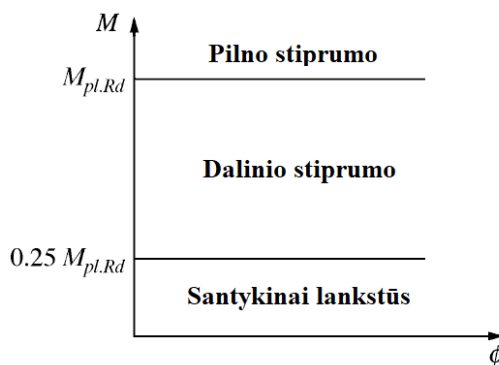
stiprumą, o taikant tamprųjų plastinį metodą, mazgai turi būti klasifikuojami kartu pagal pasisukamąjį standumą ir lenkiamąjį stiprumą (Urbonas, 2006).

1.3.1. Mazgų klasifikacija pagal lenkiamąjį stiprumą

Pagal lenkiamąjį stiprumą mazgai skirstomi į (C. T. Gomes, 2002):

- Pilno stiprumo mazgus;
- Dalinio stiprumo mazgus;
- Santykinai lanksčius mazgus.

Toks pats mazgų skirstymas pagal lenkiamąjį stiprumą pateikiamas ir EN 1993-1-8:2005. Ribos šioje mazgų klasifikacijoje nustatomos pagal jungiamųjų elementų lenkiamąjį stiprumą pagal takumo ribą $M_{pl,Rd}$ (žr. 1.11 pav.).



1.11 pav. Mazgų klasifikacija pagal lenkiamąjį stiprumą (pagal C. T. Gomes, 2002 ir EN 1993-1-8:2005)

1.11 paveiksle matoma, kad pagal šią klasifikavimo sistemą santykinai lankstus mazgas yra tada, kai šio mazgo lenkiamasis stiprumas yra ne didesnis nei $0,25 \cdot M_{pl,Rd}$. Dalinio stiprumo mazgas yra tada, kai jo lenkiamasis stiprumas patenka tarp $0,25 \cdot M_{pl,Rd}$ ir $M_{pl,Rd}$, o pilno stiprumo mazgas, kai viršijama $M_{pl,Rd}$ riba. Todėl galima daryti išvadą, kad pilno stiprumo mazgo lenkiamasis stiprumas turi būti ne mažesnis už bet kurio jungiamojo elemento lenkiamąjį stiprumą pagal takumo ribą. Jeigu mazgas yra priskiriamas pilno stiprumo mazgų grupei, tada šio mazgo laikomosios galios atskirai tikrinti nereikia. Tuo tarpu dalinio stiprumo mazgų lenkiamasis stiprumas yra mažesnis už jungiamojo elemento stiprį, todėl reikia atskirai patikrinti mazgo laikomąją galią.

Santykinai lanksčių mazgų lenkiamasis stiprumas yra labai nedidelis ir jo galima nevertinti skaičiuojant konstrukcijas. Dažnai šie mazgai neišskiriami į atskirą grupę, o priklauso dalinio lenkiamojo stiprumo mazgų grupei (Urbonas, 2006).

1.3.2. Mazgų klasifikacija pagal sukamąjį standį

Mazgai, remiantis sukamuoju standžiu (lyginant pradinį sukamąjį standį $S_{j,ini}$ su EN 1993-1-8:2005 5.2.2.5 pateikiamomis ribomis), skirstomi į 3 kategorijas (EN 1993-1-8:2005):

- Standūs;
- Pusiau standūs;
- Tariamai lankstiniai.

Pradinis sukamasis standis $S_{j,ini}$ nustatomas pagal pagrindinių mazgo komponentų lankstumą, kuris apibrėžiamas mazgo komponento i standžiu k_i . 1 zonai (žr. 1.12 pav.) priklauso standūs mazgai, jeigu jų sukamasis standis:

$$S_j \geq \frac{k_b EI_b}{L_b}, \quad (1.2)$$

čia: E – tamprumo modulis;

$k_b = 8$, rėmams, kuriuose ryšiai sumažina horizontalų poslinkį 80 %, $k_b = 25$ kitiems rėmams, jei kiekviename aukšte santykis $K_b / K_c \geq 0,1$;

K_b – vidutinė visų sijų, esančių to aukšto viršuje, I_b / L_b reikšmė;

K_c – vidutinė visų kolonų, esančių tame aukšte, I_c / L_c reikšmė;

I_b – sijų inercijos momentas;

I_c – kolonos inercijos momentas;

L_b – sijų tarpatramis;

L_c – aukšto kolonos aukštis.

Tariamai lankstūs mazgai priskiriami 3 zonai, jeigu jų sukamasis standis:

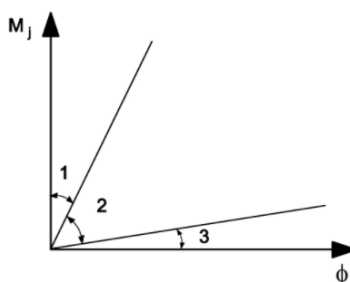
$$S_j \geq \frac{0,5 EI_b}{L_b}, \quad (1.3)$$

čia: E – tamprumo modulis;

I_b – sijų inercijos momentas;

L_b – sijų tarpatramis.

Likę mazgai, patenkantys į 2 zoną yra pusiau standūs. Verta paminėti, kad 1 ir 3 zonos mazgus taip pat galima priskirti pusiau standiems.



1.12 pav. Mazgų klasifikavimas pagal standumą (EN 1993-1-8:2005)

Sijos-kolonos ir sijos-sijos mazgų sukamąjį standį S_j pakankamai tiksliai, jeigu jo lenkiamasis momentas $M_{j,Ed}$ mažesnis už skaičiuotinę lenkiamąją galią $M_{j,Rd}$, galima apskaičiuoti pagal šią formulę:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}}, \quad (1.4)$$

čia: E – tamprumo modulis;

k_i – pagrindinio mazgo komponento i standžio koeficientas;

z – petys;

μ – standžio santykis $S_{j,ini} / S_j$.

Verta paminėti, kad mazgai gali būti klasifikuojami ir pagal eksperimentų rezultatus, panašių atvejų eksploatacinių savybių patirtį arba bandymų rezultatais pagrįstus skaičiavimus. Konstrukcijų skaičiavimuose būtinai reikia įvertinti tikrąją mazgo elgseną, siekiant tikslių rezultatų.

2. PLIENINIŲ KONSTRUKCIJŲ VISUMINĖ ANALIZĖ PAGAL EN 1993-1-1:2005

Šiame skyriuje aprašomi plieninių strypinių konstrukcijų visuminės analizės skaičiavimai ir prielaidos pagal dabar galiojantį Eurokodą 3 (EN 1993-1-1:2005). Siekiant optimaliai ir teisingai apskaičiuoti konstrukcijas, būtina pasirinkti tinkamą analizės metodą.

Ypatingas dėmesys skiriamas dabar galiojančio EN 1993-1-1:2005 atnaujinimo būtinybei ir svarbiausiems antrosios kartos (angl. *Second generation*) Eurokodo 3 pokyčiams.

2.1. Rėminių konstrukcijų jautrumas antrosios eilės efektams pagal Eurokodą 3

Rėminių konstrukcijų jautrumo antrosios eilės efektams nustatymo pagrindas yra tamprioji kritinė klupumo apkrova F_{cr} . Tamprioji kritinė klupumo apkrova F_{cr} pasižymi keliais privalumais (da Silva et al., 2013):

- Apskaičiuojama paprasčiau nei antrosios eilės analizė;
- Naudojama daugelyje apytikslių metodų, kurie vertina antrosios eilės efektus, kai koeficientas, kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas $\alpha_{cr} \geq 3$;
- Parodo kiekvieno apkrovų derinio santykinį jautrumą antrosios eilės poveikiams.

Kaip nurodo EN 1993-1-1:2005, konstrukcijų jautrumas antrosios eilės poveikiams nustatomas remiantis prieš tai jau minėta tampriąją kritine klupumo jėga F_{cr} ir koeficientu α_{cr} . Norint rasti F_{cr} ir koef. α_{cr} naudojami iteraciniai metodai. Rankinis skaičiavimas tampa per daug sudėtingas, todėl geriausias būdas naudoti komercinius konstrukcijų skaičiavimo programų paketus. Pagal Eurokodą 3 (EN 1993-1-1:2005) koef. α_{cr} , kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad, esant bendrajam nepastovumui, pasireikštų tamprusis nepastovumas, apskaičiuojamas taip:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10, \text{ kai atliekama tampriojo būvio analizė,} \quad (2.1)$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15, \text{ kai atliekama plastinio būvio analizė,} \quad (2.2)$$

čia: F_{Ed} – skaičiuotinė konstrukcijos apkrova;

F_{cr} – kritinė tamprioji klupumo apkrova, esant bendrajam nepastovumui, nustatoma pagal pradinį tamprųjų standį.

Jeigu tenkinama ši sąlyga, konstrukcija nėra jautri antrosios eilės poveikiams. Jei sąlyga netenkinama, konstrukcija yra jautri šiems poveikiams ir juos reikia patikrinti, atsižvelgiant į konstrukcijos nuokrypą.

Tam tikrais atvejais koef. α_{cr} gali būti apskaičiuotas pagal supaprastintą formulę, pateikiamą EN 1993-1-1:2005. Žymiai anksčiau šią formulę jau buvo pasiūlęs M. R. Hornas (Horne, 1975), todėl kai kuriose knygose ir moksliniuose straipsniuose ji ir dabar vadinama Horno formule:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \cdot \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right), \quad (2.3)$$

čia: H_{Ed} – visuminė skaičiuotinė horizontalioji apkrova, įskaitant aukšto perduodamas lygiavertes jėgas (aukštų šlytų);

V_{Ed} – visuminė skaičiuotinė rėmą veikianti vertikalioji apkrova, kurią perduoda aukštas (aukšto slėgis);

$\delta_{H,Ed}$ – 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.

(2.3) formulę galima taikyti tik laikantis šių sąlygų:

- Konstrukcijos stogo nuolydis turi būti nedidelis, t. y. nedidesnis kaip 1:2 arba 26° laipsniai;
- Konstrukcijos sijų ar gegninių sijų ašinis gniuždymas turi būti nereikšmingas. Jeigu neturima tikslesnės informacijos, gniuždymas laikomas reikšmingu, jei:

$$\bar{\lambda} > 0,3 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}, \quad (2.4)$$

čia: N_{Ed} – skaičiuotinė gniuždomosios jėgos reikšmė;

$\bar{\lambda}$ – sijų ar gegninių sijų, laikomų jų geometrinio ilgio (matuojant išilgai sijų ar gegnių) galuose įtvirtintais lankstais, sąlyginis liaunis rėmo plokštumoje;

A – skerspjūvio plotas;

f_y – plieno stipris pagal takumo ribą.

2.2. Visuminė konstrukcijų analizė pagal EN 1993-1-1:2005

Visuminė plieninių konstrukcijų analizė gali būti atlikta taikant pirmosios arba antrosios eilės skaičiavimus. Pirmosios eilės, arba kitaip vadinamus tiesinius, skaičiavimus atlikti nesunku. Tuo tarpu antrosios eilės (netiesiniai) skaičiavimai reikalauja papildomų skaičiavimų ir žinių. EN 1993-1-1:2005 pagal plieninio rėmo ir analizės tipą, apibrėžia tris metodus, kaip skaičiavimuose galima įvertinti antrosios eilės poveikį ir nuokrypas (žr. 2.1 pav.):

- Nesudėtingais atvejais tikrinant atskirų elementų stabilumą. Klumpamasis ilgis priimamas pagal bendrąją klumpumo formą;
- Iš dalies atliekant visuminę konstrukcijos analizę, o iš dalies – tikrinant atskirų konstrukcijos elementų pastovumą;

- Atliekama išsami antrosios eilės analizė – nuokrypos modeliuojamos lokaliame ir globaliame lygmenyje.

Šiems metodams paaiškinti yra išskiriami vietiniai (elemento) ir globalūs (rėmo) efektai, kurie yra skirstomi į P- δ (elementui) ir P- Δ (rėmui) (da Silva et al., 2013). P- Δ efektai pasireiškia elementų galuose, o P- δ efektai – išilgai elemento.

Pirmas visuminės analizės metodas yra sudėtingiausias, kadangi globaliame lygyje modeliuojami geometriniai ir medžiagos netiesiškumai kartu su nuokrypomis, todėl šis metodas nėra populiarus projektuojant konstrukcijas.

Antrasis metodas P- δ efektus bei vietines elementų nuokrypas vertina per atskirų elementų stabilumą, o P- Δ efektus bei globalias nuokrypas – visumine analize.

Trečias metodas apytiksliai įvertina P- Δ ir P- δ efektus, tikrinant atskirus lygiaverčius elementus pagal EN 1993-1-1:2005 6.3 nuostatas, tačiau skaičiuojant šiuo metodu reikia tiksliai nustatyti elementų skaičiuojamuosius ilgius ir klupumo formas. Todėl šis metodas taikomas tik paprastoms konstrukcijoms projektuoti, kai kolonos skaičiuojamasis ilgis nustatomas nesudėtingais skaičiavimais.

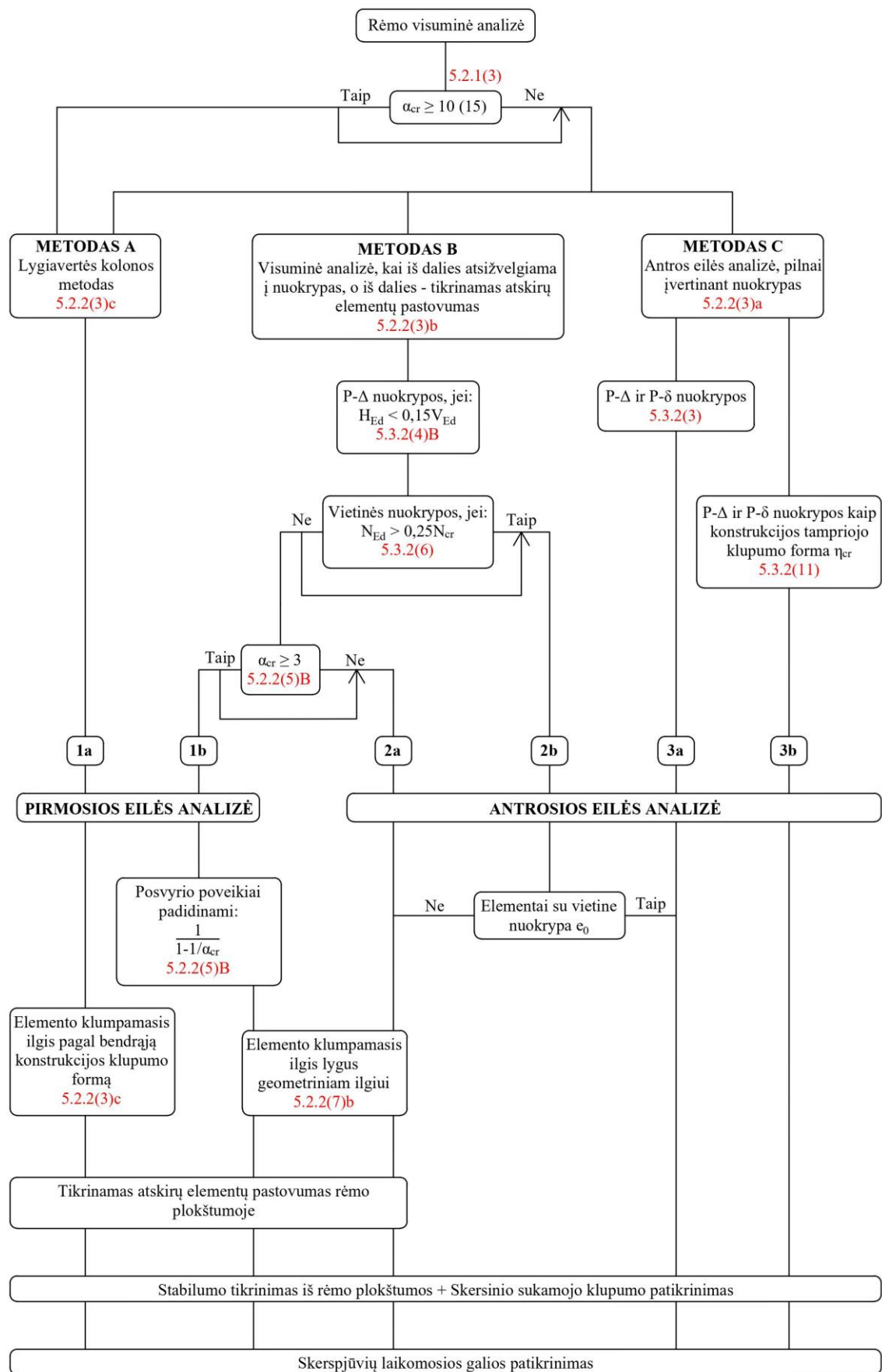
Remiantis EN 1993-1-1:2005, Boissonnade (Boissonnade, Greiner, Jaspart & Lindner, 2006) ir Chantrain (Chantrain & Schleich, 1997) schematiškai sudaromas konstrukcijų visuminės analizės algoritmas (žr. 2.1 pav.). Raudona spalva pažymėti EN 1993-1-1:2005 punktai.

Visuminės analizės pagal tamprųjų modelį prielaidos (pagal EN 1993-1-1:2005 5.4.2 skyrelį):

- Nepriklausomai nuo įtempių dydžio, medžiagos įtempių ir deformacijų savybės turi būti tiesinės;
- Vidinės jėgas ir momentus galima apskaičiuoti naudojantis visumine analize pagal tamprųjų modelį, net jei skerspjuvio laikomoji galia yra pagrįsta jo plastine laikomąja galia;
- Tamprioji visuminė analizė taip pat gali būti taikoma skerspjuviams, kurių laikomąją galią riboja vietinis klupumas.

Visuminės analizės pagal plastiškąjį modelį prielaidos (pagal EN 1993-1-1:2005 5.4.3 skyrelį):

- Plastinė elgsena turi būti modeliuojama vienu iš šių metodų:
 - 1) taikant tamprųjų-plastiškąjį modelį, kai skerspjuviuose arba mazguose susidaro plastiniai lankstai;
 - 2) taikant plastinę netiesinę analizę ir dalinį elementų plastiškumą plastinėse zonose;
 - 3) nepaisant tamprios lankstų elgsenos ir atliekant analizę pagal standųjį plastiškąjį modelį.
 - Plastinė visuminė analizė gali būti taikoma tik tuomet, kai elementų sukamoji geba yra pakankama ir galima užtikrinti, kad elementai plastiniuose lankstuose išliks stabilūs.



2.1 pav. Visuminės analizės algoritmas (pagal EN 1993-1-1:2005, Chantry & Schleich, 1997 ir Boissonnade et al., 2006)

Visuminę analizę pagal plastiškąjį modelį galima taikyti tik tuomet, jei laikomasi šių EN 1993-1-1:2005 5.4.1(3) sąlygų:

- Konstrukcijos sukamoji galia tikrosiose plastinių lankstų vietose yra pakankama;
- Elemento skerspjūviai turi būti viensimetriai arba dvisimetriai jeigu 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.

2.2.1. Metodas A

Metodas A – lygiavertės kolonos metodas (žr. 2.1 pav.), grindžiamas konstrukcijos pirmosios eilės visumine analize. Šis metodas antrosios eilės poveikius įvertina per atitinkamus skaičiuojamuosius (klumpamuosius) elementų ilgius pagal bendrąją konstrukcijos klupumo formą. Bendrasis rėmo bei atskirų elementų stabilumas užtikrinamas atliekant kolonų stabilumo patikrinimą pagal klupumo kreives, taip įvertinant elemento nuokrypas.

Tačiau, kalbant apie P- Δ efektus, kolonos skaičiuojamojo ilgio reikšmės turi būti nustatomos pagal bendrąją rėmo klupumo formą. Todėl šis metodas reikalauja tikslios klupumo formos bei atitinkamo skaičiuojamojo ilgio koeficiento μ nustatymo, o tai riboja šio metodo taikymą sudėtingose konstrukcijose.

Šis metodas remiasi dvejomis konservatyviomis prielaidomis (da Silva et al., 2013):

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

Lygiavertės kolonos metodas EN 1993-1-1:2005 5.2.2(8) nuostatoje apibrėžiamas taip: 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.

2.2.2. Metodas B

Metodas B – visuminė konstrukcijos analizė, kai iš dalies atsižvelgiama į nuokrypas, o iš dalies – tikrinant atskirų elementų pastovumą (žr. 2.1 pav.). Šis metodas P- δ efektus bei vietines elementų nuokrypas įvertina pagal atskirų elementų stabilumą, o P- Δ efektus bei globalias nuokrypas

– pagal konstrukcijos visuminę analizę. Metodas gali būti naudojamas atliekant tamprią arba plastinę konstrukcijos analizę. Priklausomai nuo analizės tipo bei nuokrypų įvertinimo šis metodas padalinamas į kelias dalis.

Apytikslis metodas pagrįstas pirmosios eilės analize bei įrašų padidinimu (metodas 1b, žr. 2.1 pav.) taikomas rėmams, kuriems būdinga pirmoji laisvojo klupumo forma. Metodas horizontaliąsias bei lygiavertes apkrovas V_{Ed0} dėl nuokrypų padidina koeficientu:

$$\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}}, \text{ jei } 3,0 \leq \alpha_{cr} < 10,0 \quad (2.5)$$

Apskaičiavus antrosios eilės įrašas reikia patikrinti rėmo pastovumą plokštumoje ir iš plokštumos, kadangi šis metodas to neįvertina. Stabilumo skaičiavimams kaip efektyvusis priimamas geometrinis kolonos ilgis. Atliekant tamprią, tiesinę analizę turi būti įvertinami rėmo nuokrypų sukelti poveikiai. Daugiaaukščių rėmų antrosios eilės kampinio pokrypio poveikiai gali būti apskaičiuojami šiuo metodu jeigu laikomasi (2.5) formulės sąlygų bei visuose aukštuose panašiai pasiskirsčiusios:

- vertikalios apkrovos;
- horizontalios apkrovos;
- rėmo standžio reikšmės.

Šis metodas atliekamas tokia tvarka (da Silva et al., 2013):

- 1) Atliekama konstrukcijos pirmosios eilės analizė su pridėtomis horizontaliomis atramomis kiekviename aukšte, gaunamos jų reakcijos;
- 2) Dar kartą atliekama konstrukcijos pirmosios eilės analizė, tik 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 tolesnės analizės metu.

Antrosios eilės analizė įvertinant tik P-Δ nuokrypas (metodas 2a, žr. 2.1 pav.). Šiame metode atliekama antrosios eilės analizė, kurios metu įvertinamos tik bendrosios P-Δ nuokrypos, o elemento nuokrypos įvertinamos per atskirų elementų stabilumo patikrinimą. Šiuo metodu sujungiami antrosios eilės analizės ir lygiavertės kolonos metodo (Metodas A, žr. 2.1 pav. ir 2.2.1 skyrelį) privalumai, taip išvengiama sudėtingos analizės modeliuojant visas konstrukcijos nuokrypas. Atliekant atskirų elementų stabilumo patikrinimą skaičiuojamuoju ilgiu gali būti priimamas geometrinis kolonos ilgis, todėl galima paprasčiau atlikti visuminę konstrukcijų analizę, kai skaičiuojamasis elemento ilgis nėra akivaizdus.

Bendrujų pastato rėmo posvyrio nuokrypų galima nevertinti, jei tenkinama EN 1993-1-1:2005 sąlyga:

$$H_{Ed} \geq 0,15 \cdot V_{Ed} \quad (2.6)$$

Jeigu rėmai yra jautrūs antrosios eilės poveikiams ir tenkinama sąlyga (žr. 2.1 pav. 2b):

$$N_{Ed} > 0,25 \cdot N_{cr} \quad (2.7)$$

Tuomet pagal EN 1993-1-1:2005 5.3.2(6) nuostatą būtina įvertinti gniuždomų elementų vietinius išlinkius ir bendruosius posvyrius, laikantis šių sąlygų:

– Bent viename elemento gale yra momentus perimantis mazgas;

$$-\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}; \quad (2.8)$$

Jeigu elementai yra su vietiniais išlinkiais, toliau pereinama prie 3a metodo (žr. 2.1 pav. ir 2.2.3 skyrelį), jeigu ne – grįžtama prie jau anksčiau aptarto metodo B (žr. 2.2.1 skyrelį), kuriame elemento klumpamasis ilgis prilyginamas jo geometriniam ilgiui.

2.2.3. Metodos C

Metodas C – antrosios eilės analizė, pilnai įvertinant nuokrypas. Šis metodas ne tik įvertina antrosios eilės poveikius, bet įvertina ir bendrąsias rėmo bei vietinės elemento nuokrypas. Taip bandoma priartėti prie realios konstrukcijos elgsenos. Literatūroje ši analizė dažniausiai vadinama geometrine netiesine tampriąja analize, įvertinant nuokrypas, trumpinys – GNIA (angl. *Geometrically non-linear elastic analysis with imperfections*), arba GMNIA (angl. *Geometrically and materially non-linear analysis with imperfections*), jei įvertinamas ir medžiagos netiesiškumas (Vayas et al., 2019). Vienas iš metodo privalumų, kad atliekant visuminę analizę įvertinama visos konstrukcijos stabilumo praradimo formos, todėl nereikia papildomai tikrinti stabilumo pagal EN 1993-1-1:2005 6.3 skyrių. Tačiau dauguma šiuolaikinių baigtinių elementų programų strypiniams elementams nevertina sukimo ir skersinio sukamojo klumpo, todėl ir įvertinus nuokrypas, papildomai reikia patikrinti konstrukcijos stabilumą.

Šį metodą galima naudoti keliais būdais:

- Lygiavertė nuokrypa pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu (žr. 2.1 pav., 3a);
- Tampriojo kritinio klumpo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (žr. 2.1 pav., 3b).

2.3. Rėmų visuminės analizės nuokrypų modeliavimas

Pagal EN 1993-1-1:2005 rėmų nuokrypas galima išskirti į:

- Lygiavertės nuokrypas pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu (žr. 2.2 ir 2.3 pav.);
- Tampriojo kritinio klupumo formą η_{cr} , kurią galima laikyti kaip vienintelę bendrąją ir vietinę nuokrypą.

Tiriamajame darbe analizuojamos ir naudojamos lygiavertės nuokrypos pradinio pokrypio pavidalu.

Kaip buvo minėta anksčiau, priklausomai nuo visuminės analizės metodo turi būti įvertinamos bendrosios rėmo (P- Δ efektai) bei vietinės atskirų elementų (P- δ efektai) nuokrypos. Šios nuokrypos gali būti įvertinamos lygiaverčių geometrinių nuokrypų pavidalu, kurių reikšmės apimtų galimus visų tipų nuokrypų poveikius, jei tie poveikiai nėra įtraukti į elementų laikomosios galios nustatymo formules. Lygiavertės geometrinės nuokrypos įvertina (EN 1993-1-1:2005):

- liekamuosius įtempius;
- stiprio pagal takumo ribą kitimą;
- konstrukcijos nuokrypas gamybos ir(arba) statybų metu;
- gaminių standartuose apibūdintas elementų geometrinių matmenų nuokrypas.

Atliekant visuminę nesuvaržyto plieninio rėmo analizę, nuokrypų poveikis turi būti įvertinamas taikant lygiavertę nuokrypą pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu, nes toks rėmas jautrus klupdymui.

Geometrinės rėmo nuokrypos įvertinamos pridėdant fiktyvias horizontalias jėgas. Jos yra lygios visai vertikalčiai jėgai padaugintai iš koeficiento ϕ , kuris yra apskaičiuojamas pagal EN 1993-1-1:2005 5.3.2 3) punktą.

Bendrieji pradiniai pokrypiai:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m, \quad (2.9)$$

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

α_h – kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas;

α_m – kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas.

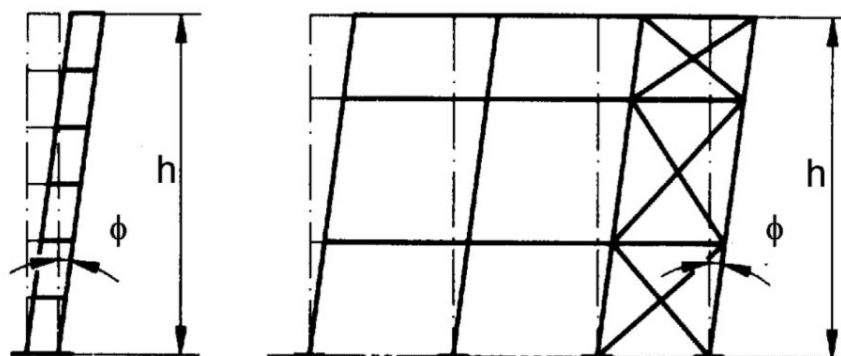
Kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ bet } 2/3 \leq \alpha_h \leq 1,0. \quad (2.10)$$

Kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)}, \quad (2.11)$$

čia: m – kolonų skaičius eilėje, įskaitant tik tas 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 (EN 1993-1-1:2005)

Santykiniai pradiniai lenkiamieji klūpdyto veikiamų elementų vietiniai išlinkiai nustatomi pagal EN 1993-1-1:2005 (5.6) formulę:

$$\frac{e_0}{L}, \quad (2.12)$$

čia: L – elemento ilgis;

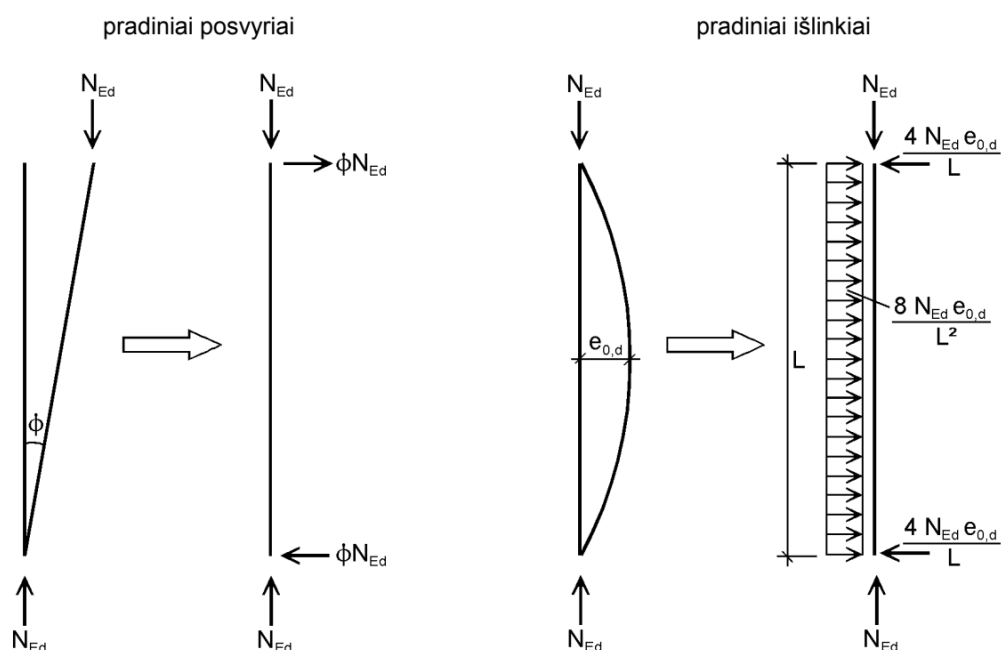
e_0 – pradinio šoninio posvyrio maksimali amplitudė.

Rekomenduojamas reikšmės pagal klūpumo kreives ir analizės modelį pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Skaičiuotinės pradinio vietinio išlinkio e_0/L reikšmės (EN 1993-1-1:2005)

Klūpumo kreivė pagal EN 1993-1-1:2005 6.1 lentelę	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

EN 1993-1-1:2005 leidžiama elemento ir rėmo nuokrypas pakeisti lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemomis, taikomomis kiekvienai kolonai (žr. 2.3 pav.).



2.3 pav. Pradinių nuokrypų pakeitimas lygiavertėmis horizontaliosiomis jėgomis (EN 1993-1-1:2005)

Norint pritaikyti lygiavertes horizontalias jėgas, turi būti laikomasi šių sąlygų (EN 1993-1-1:2005):

- Pradiniai posvyriai turi būti taikomi visomis galimomis horizontaliomis kryptimis, tačiau turi būti vertinami atskirai kiekviena kryptimi;
- Jeigu lygiaverčių horizontalių jėgų sistema taikoma daugiaaukščiams rėmams, šios jėgos turi būti pridėtos kiekvieno aukšto lygyje;
- Galimi sukamieji konstrukcijos poveikiai, sukelti nesimetrinio posvyrio dviejose priešingose pusėse, turi būti nagrinėjami papildomai.

Jei atliekama antrosios eilės analizė, pagal kurią įvertinamas lenkimo veikiamo elemento skersinis sukamasis klupumas, lygiavertės nuokrypos gali būti išreiškiamos dydžiu $ke_{0,d}$, kur $e_{0,d}$ yra nagrinėjamo profilio silpnosios ašies lygiavertis pradinis išlinkis. Rekomenduojamoji reikšmė yra $k = 0,5$. Paprastai į papildomą sukamąją nuokrypą atsižvelgti nebūtina (EN 1993-1-1:2005).

2.4. EN 1993-1-1:2005 atnaujinimo būtinybė

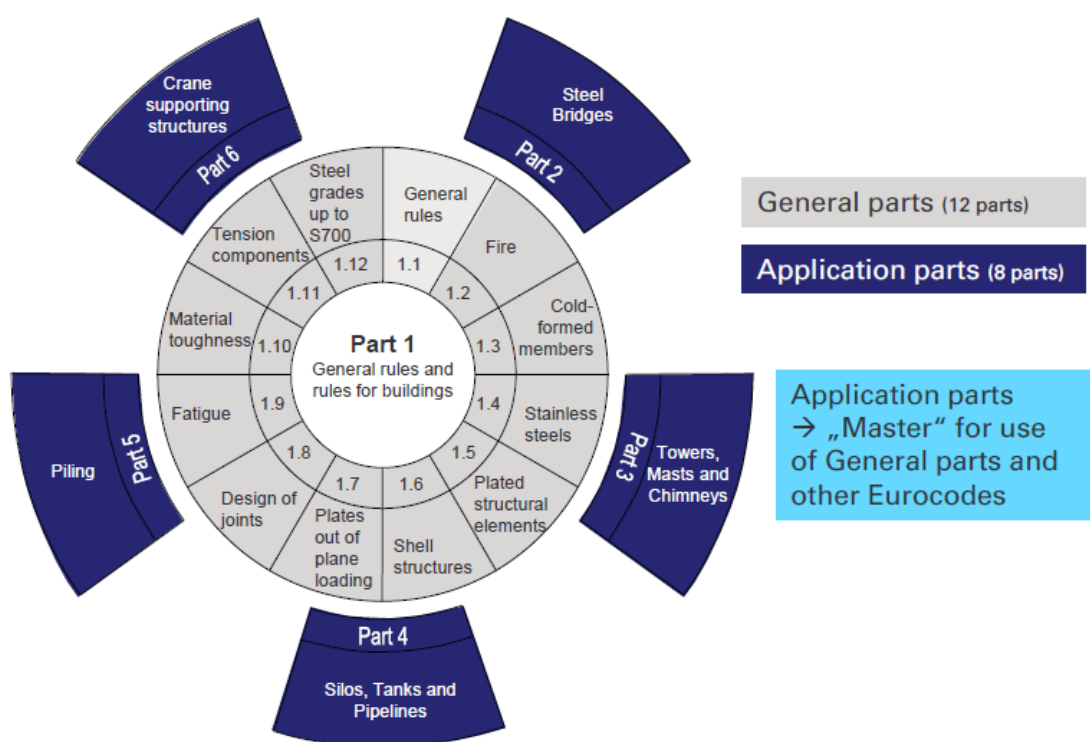
Šiuo metu yra rengiamas naujas arba dar kitaip vadinamas antrosios kartos Eurokodas 3 – prEN 1993-1-1:2015. Taip pat yra rengiamos visų 10-ies dabar egzistuojančių eurokodų naujos versijos.

Žvelgiant šiek tiek atgal, visi 10 dabartinių eurokodų (iš viso 58 dalys) buvo išleisti 2007 metais. Jų išleidimas buvo puikus pasiekimas, kuris vainikavo 30-ies metų bendrą specialistų ir mokslininkų darbą. Išleisti eurokodai padarė lemtingą įtaką daugiau nei 500 000 inžinierių specialistų visoje Europoje (Kuhlmann & Schmidt-Rasche, 2017). Žinoma, į kiekvieną eurokodą kartu įeina ir atitinkamos šalies nacionaliniai priedai (žymimi trumpiniu NA), kurių parengimas užtruko dar keletą metų ir viskas galutinai buvo išleista 2010 m.

Žinoma, sparčiai augant ir tobulėjant technologijoms, norint ir toliau tinkamai pasitikėti eurokodais, būtinas jų vystymas ir atnaujinimas. Taigi, patvirtintoje antrosios kartos eurokodų darbo programoje pagrindinis dėmesys skiriamas, kad eurokodai būtų atnaujinti įvertinus naujus skaičiavimo metodus, medžiagas ir rinkos reguliavimo reikalavimus (Kuhlmann & Schmidt-Rasche, 2017).

Tolesnį eurokodų raidos įgyvendinimą nustato mandatas M/515, kurį 2012 m. gruodžio mėn. priėmė Europos Komisija ir CEN (Europos standartizacijos komitetas). Šio įgaliojimo tikslai yra papildyti eurokoduose taikomas projektavimo taisykles naujomis medžiagomis, gaminiais ir statybų metodais, pagerinti praktinį skaičiavimų taikymą. Mandatas M/515 įsigaliojo 2015 m. ir turi 5-erių metų terminą. Pirmosios patikslintos eurokodų versijos turėtų atsirasti jau 2021/2022 m. Tačiau dėl būtinų oficialių procedūrų, CEN tyrimų, publikacijų ir šiuo metu vykstančios globalios pandemijos, visa tai gali užtrukti iki 2024 m.

Iš visų eurokodų būtent Eurokodas 3 (EN 1993), kurį sudaro 20 dalių ir maždaug 1250 puslapių, yra didžiausias (žr. 2.4 pav.).



2.4 pav. Eurokodo 3 (EN 1993) dalys (Kuhlmann & Schmidt-Rasche, 2017)

Atnaujinant Eurokodą 3 (EN 1993), 20 jo dalių buvo suskirstyta į 13 atskirų darbo grupių. Šių 13-os dalių techninis darbas yra rengiamas „Projektinių pasiūlymų“ (angl. *Project Proposals* arba trumpinys *pr*) forma ir koordinuojamas su kiekviena darbo grupe. Kadangi EN 1993-1-1:2005 ir EN 1993-1-8:2005 yra pagrindinės ir svarbiausios Eurokodo 3 dalys, jas labai svarbu suderinti su kitomis dalimis, todėl jų projektų pasiūlymai buvo parengti patys pirmiausi.

Ruošiant naują EN 1993-1-1:2005 versiją, pagrindinis tikslas yra sumažinti nacionaliniais priedais nustatomų parametrų skaičių (šiuo metu jų yra 25). Nacionalinių priedų parametrai egzistuoja, nes pastatų projektavimo saugumas vis dar yra kiekvienos šalies atsakomybė. Na, o visos šalys tai traktuoja vis dar skirtingai. Todėl rengiant naują Eurokodą 3 prEN 1993-1-1:2015 buvo peržvelgti visų šalių nacionaliniai priedai, siekiant jų parametrus įtraukti į pagrindinę naujojo Eurokodo 3 (prEN 1993-1-1:2015) dalį kaip numatytuosius. Tokių būdu pavyko sumažinti nacionalinių priedų parametrų skaičių.

Naujojo Eurokodo 3 prEN 1993-1-1:2015 taikymas yra paprastesnis dėl šių priežasčių (Snijder, 2017):

- Patobulinta struktūra ir prielaidų formuluotės;
- Supaprastinta projektavimo taisyklės: pateikimo formatas, struktūra, žymenys;
- Pateikta visa reikiama informacija, kurios gali prireikti projektuotojui taikant tam tikras projektavimo taisykles;
- Suderinta informacija ir prielaidos su kitomis Eurokodo 3 dalimis;
- Pateikti pagrindiniai dokumentai, pagrindžiantys ir paaiškinantys projektavimo taisykles;
- Supaprastinti skaičiavimo algoritmai;
- Sumažintos prielaidų interpretavimo galimybės;
- Pašalintos nereikalingos prielaidos;
- Kur įmanoma, sutrumpintas turinys;
- Pašalinti priedai, kuriuos, anot autoriaus, „malonu turėti“, bet praktinės naudos iš jų nėra.

Visi pakeitimai naujame Eurokode 3 prEN 1993-1-1:2015 buvo parengti pagal konkretų formatą, kuriame pateikiama ši informacija (Snijder, 2017): nagrinėjama tema; EN 1993-1-1:2005 punktas; pakeitimo priežastis; siūlomas pakeitimas; papildoma informacija. Toks pakeitimų standartizavimas labai pravers ateityje, tolesniam Eurokodo 3 tyrinėjimui ir atnaujinimui. Šiuo metu pagrindiniai pakeitimai *prEN1993-1-1:2015* susideda iš šių temų (Snijder, 2017):

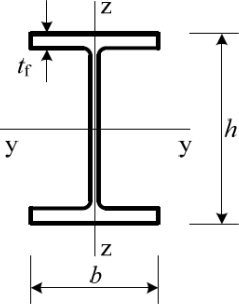
- medžiagos storio pasikeitimas;
- šlyjamoji elementų galia;
- pusiau kompaktiškas skerspjūvių parinkimas;
- elementų klupumas;
- didelio stiprumo plienas;

- kampuočių klupumo kreivės;
- didelių matmenų skerspjūvių klupumo kreivės;
- tėjinių elementų I ir H klupumo kreivės naudojant S460 klasės plieną;
- skerspjūvių klasifikacija pagal koeficientą α ;
- sukimas ir jo sąveika su kitomis vidinėmis jėgomis;
- vietinės apkrovos be sąstandų;
- vamzdinių elementų lenkimas ir ašinis gniuždymas;
- elipsės formos tuščiaviduriai skerspjūviai;
- pradinių išlinkių taikymas pagal EN 1993-1-1:2005 5.1 lentelę.

CEN/TC250/SC3 komitetas priėmė sprendimą, kad didelio stiprumo plieno naudojimo taisyklės ir charakteristikos, kurios iki šiol buvo pateikiamos EN 1993-1-12 dalyje, neturi būti naudojamos kaip atskiras dokumentas ir privalo būti perkeltos į pagrindinę naujojo Eurokodo 3 dalį prEN 1993-1-1:2015. Taip pat atitinkamai jau prieš tai buvusios lentelės su įvairių klasių plieno savybėmis yra papildomos stipriojo plieno charakteristikomis.

prEN 1993-1-1:2015 užpildo trūkstamą dalį dabartinėse klupumo kreivėse pagal EN 1993-1-1:2005 6.2 lentelę. Valcuotiems skerspjūviams, kurių aukščio ir pločio santykis $h/b > 1,2$ ir juostos storis $t_f > 100$ mm trūko klupumo kreivių, nors šiais laikais tokie skerspjūviai jau yra naudojami. Ši trūkstama dalis yra užpildyta naujame Eurokode 3 (prEN 1993-1-1:2015), lentelėje 2.2 pateikiama ištrauka iš prEN 1993-1-1:2015 6.2 lentelės, kurioje įtrauktos naujos klupumo kreivės.

2.2 lentelė. Klupumo kreivės parinkimas skerspjūviui (pagal prEN 1993-1-1:2015)

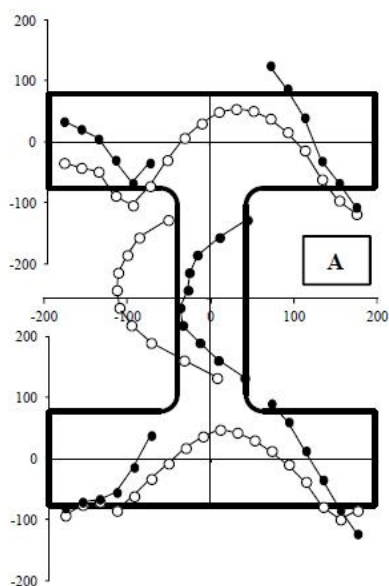
Skerspjūvis		Ribos		Klupumas aplink ašį	Klupumo kreivė	
					S235 S275 S355 S420 S450	Nuo S460 iki S700
Valcuoti profiliuočiai		$h/b > 1,2$	$t_f < 40$ mm	y-y	a	a0
			$40 < t_f \leq 100$ mm	z-z	b	a0
				y-y	b	a
			$t_f > 100$ mm	z-z	c	a
				y-y	b	a
				z-z	c	b

2.2 lentelės tęsinys. Klupumo kreivės parinkimas skerspjūviui (pagal prEN 1993-1-1:2015)

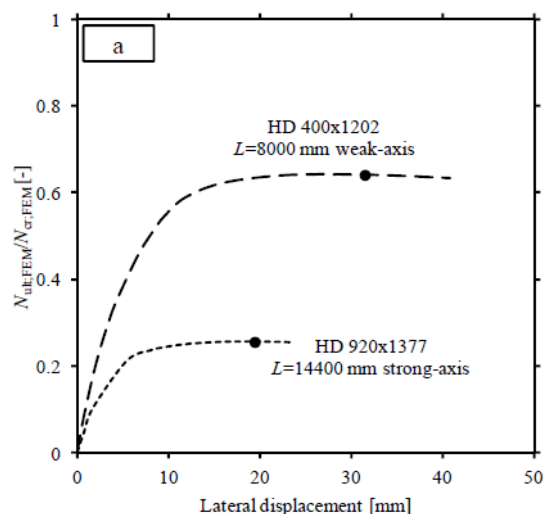
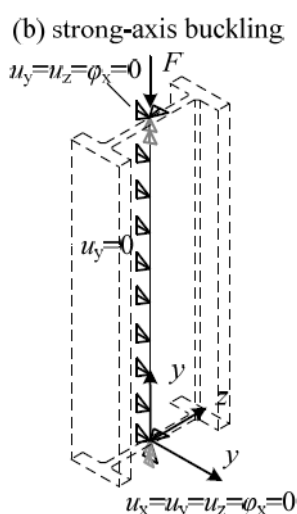
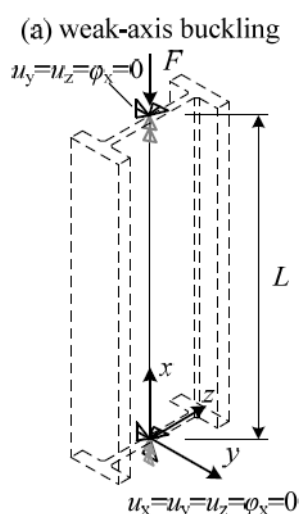
Skerspjūvis	Ribos		Klupumas aplink ašį	Klupumo kreivė	
				S235 S275 S355 S420 S450	Nuo S460 iki S700
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y	b	a
			z-z	c	a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y	d	c
			z-z	d	c

2.2 lentelėje pateiktos klupumo kreivės buvo lyginamos su eksperimentinių tyrimų rezultatais, kurių dalį atliko Snijderis, Spoorenbergas, Cajotas, May (Snijder, Spoorenberg, Cajot & May, 2013) ir Popas (Snijder, Spoorenberg, Cajot & Popa, 2014). Tyrimui buvo pasirinkta du skirtingo tipo profiliuočiai: storas HD tipo ir liaunesnis HL tipo skerspjūvis. Dėl skerspjūvių juostų storio, plieno takumo ribos buvo sumažintos, kad atstotų storuose skerspjūviuose sumažėjusias medžiagos savybės. S235 plienui buvo naudojama 195 N/mm^2 takumo riba, S355 plienui – 385 N/mm^2 , o S460 plienui – 385 N/mm^2 . Eksperimento metu buvo matuojami liekamieji įtempiai HD tipo skerspjūvyje (žr. 2.5 pav.). Šis eksperimento modelis buvo naudojamas kaip vidinių įtempių nustatymas netiesinės analizės BEM metu, kai imituojamas sukamasis lenkiamasis klupumas.

Eksperimentui buvo sukurti baigtinių elementų modeliai programoje *Ansys v.11.0*, kuriems buvo imituojamos apkrovos, nuo kurių pasireikštų tamprusis-plastinis klupumas (2.6 pav.). Visi gauti skaitiniai eksperimentų rezultatai buvo normalizuoti pagal teorines reikšmes ir palyginti su prieš tai aptartomis klupumo kreivėmis (2.2 lentelė), kurių parinkimas pagrįstas jau prieš tai buvusiomis EN 1993-1-1:2005 klupumo kreivėmis.



2.5 pav. Liekamieji įtempiai HD 400x1202 skerspjūvyje (Snijder et al., 2013)



2.6 pav. Baigtinių elementų modelis sukamojo lenkiamojo klupumo atsakui nustatyti (Snijder et al., 2014)

Išnagrinėjus eksperimentų rezultatus ir prEN 1993-1-1:2015 klupumo kreives, buvo nuspręsta, kad HD ir HL profiliuočiai esminių skirtumų neturi ir lenkimui aplink stipriąją ašį reikia naudoti klupumo kreivę „a“, kadangi klupumo kreivė „a₀“ buvo gauta tik HD profiliuočių tyrimų metu (Snijder et al., 2017).

Šiuo metu yra atnaujintas „Konstrukcijų analizė“ skyrius (žr. 3 skyrių), padaryti pagrindiniai ir svarbiausi pakeitimai prEN 1993-1-1:2015, praplėstas plieno naudojimas iki S700 klasės, detaliau išnagrinėtos klupumo kreivės, sukimo sąveika su vidinėmis elementų jėgomis ir pradinių išlinkių įvertinimo pakeitimai.

prEN 1993-1-1:2015 pokyčiai atspindi naujausius atliktus tyrimus, kurie leidžia dar plačiau išnaudoti plieno galimybes: didelio stiprumo plieną galima naudoti įspūdingiems architektūriniams

sprendiniams, pagrįstiems baigtinių elementų analize. Plieninės konstrukcijos ir toliau formuoja konkurencingus konstrukcinius sprendinius, kurie bus sėkmingai plėtojami ir ateityje. Prie to prisideda tarptautinė mokslininkų veikla ir kartu derinamas jų darbas, kuris ateityje leis dar labiau išplėsti projektavimo normas ir parengti naujus standartus.

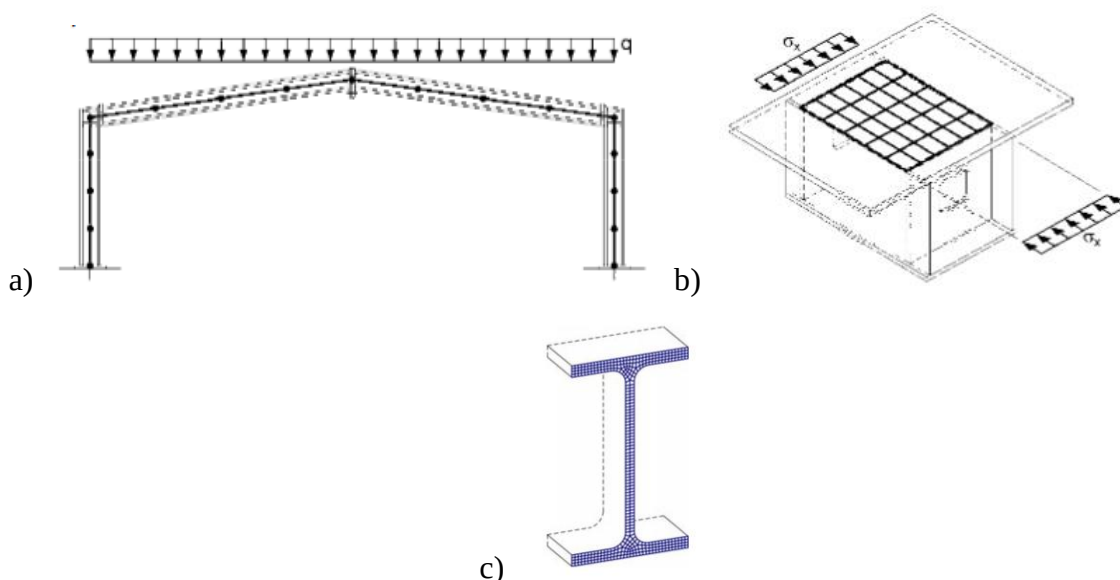
2.5. Baigtinių elementų metodas (BEM)

Norint apskaičiuoti konstrukciją būtina pasirinkti tinkamą skaičiavimų metodą. Elementų vidines jėgas ir momentus statiskai išsprendžiamose sistemose galima apskaičiuoti sprendžiant pusiausvyros lygtis, tačiau tai nėra įmanoma statiskai neišsprendžiamose sistemose, todėl taikomi kiti metodai.

Elementų vidinių jėgų ir momentų nustatymo metodai skirstomi į (Kindmann & Kraus, 2011):

- jėgų metodą;
- poslinkių metodą (BEM);
- mišrųjį (BEM).

Dėl konstrukcijų skaičiavimų sudėtingumo šiais laikais plačiausiai naudojamas baigtinių elementų metodas (toliau – BEM), kuris paremtas poslinkių metodu. Atliekant skaičiavimus BEM, konstrukcinės schemos elementai (sijos, kolonos, plokštės, elementų skerspjūviai ir kt.) yra padalinami į daugybę baigtinių elementų (toliau – BE) (žr. 2.7 pav.).



2.7 pav. Konstrukcinių elementų sudalijimas į BE: a) rėminė konstrukcija; b) plokštė; c) skerspjūvis
(Kindmann & Kraus, 2011)

Šiais laikais egzistuoja įvairių BEM variantų, kuriais galima įvertinti geometrinius netiesiškumus konstrukcinėse sistemose.

Bendru atveju antrosios eilės analizę galima aprašyti tokia išraiška (Ziemian, 2010):

$$\{dF\} - \{dR\} = [K] \cdot \{d\Delta\}, \quad (2.13)$$

čia: $\{dF\}$ – apkrovos prieaugio vektorius;

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

$[K]$ – standumo matrica;

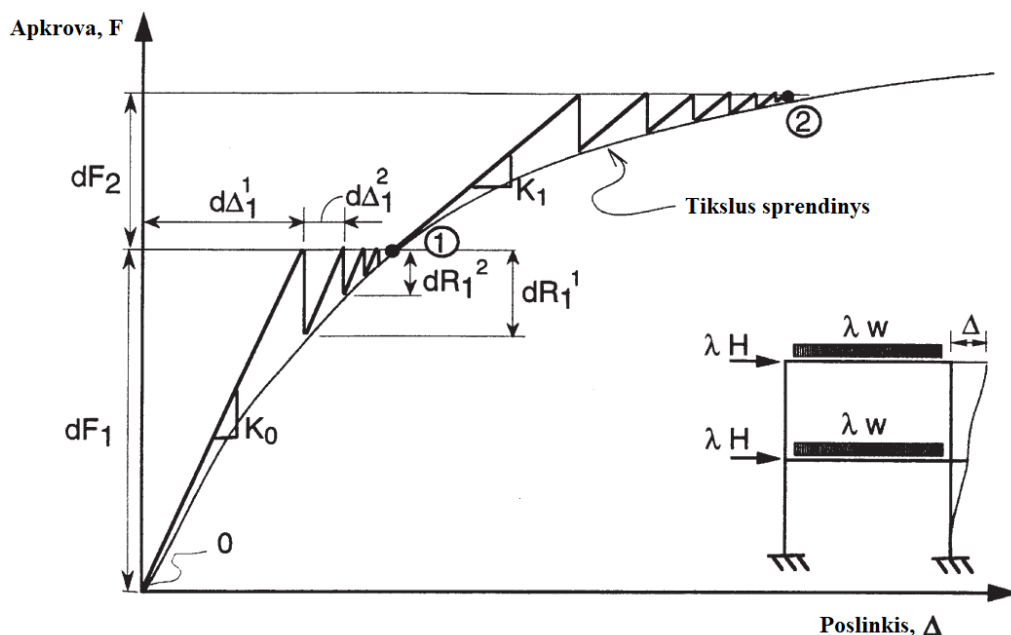
$\{d\Delta\}$ – mazgų poslinkio prieaugio vektorius.

$\{dR\}$ galima apibūdinti kaip skirtumą tarp apkrovų prieaugių $\{dF_{\text{applied}}\}$ ir priešingų vidinių jėgų $\{dF_{\text{int}}\}$, tada 2.13 lygtį galima išreikšti tokiu pavidalu:

$$\{dR\} = \{dF_{\text{applied}}\} - \{dF_{\text{int}}\} = [K] \cdot \{d\Delta\}, \quad (2.14)$$

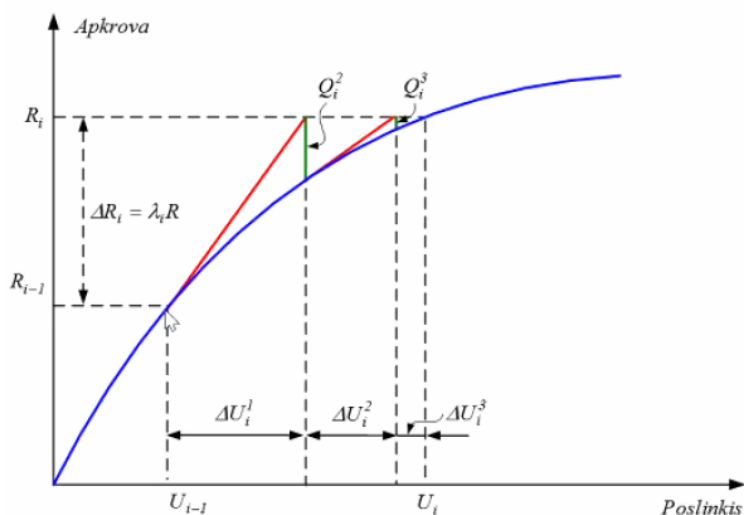
Ši lygtis parodo, kad $\{dR\}$, nesubalansuotos jėgos vektorius, galima priimti kaip didžiausią apkrovos prieaugį (kadangi pirmajame iteracinio skaičiavimo žingsnyje vidinių apkrovų vektorius yra lygus 0), kuris su kiekviena iteracija mažėja.

Netiesiniai skaičiavimai atliekami žingsniniu metodu, naudojant apkrovos prieaugių seką. Sistemos statiniai ir kinematiniai kintamieji, gauti iteracijos pabaigoje, naudojami formuojant uždavinį kitai iteracijai. Taigi sprendinys gaunamas sprendžiant tam tikrą skaičių tiesinių uždavinių.



2.8 pav. Modifikuotas Newton-Raphson apkrovos kontrolės metodas (Ziemian, 2010)

Didelę įtaką sprendimo rezultatų tikslumui turi teisingas apkrovos prieaugio metodo parinkimas. Siekiant tikslių rezultatų, BE programose netiesinei analizei atlikti reikėtų naudoti pilną iteracinį Newton-Raphson apkrovos kontrolės metodą, kurio skaičiavimo principas parodytas 2.9 pav.



2.9 pav. Pilno Newton-Raphson iteracinio apkrovos kontrolės metodo skaičiavimo principas

Pilname Newton-Raphson apkrovos kontrolės metode, kiekvienoje iteracijoje reikalinga suformuoti naują standumų matricą ir išspręsti tiesinių lygčių sistemą, o tai reikalauja daugiau kompiuterio resursų.

Žinoma, atliekant konstrukcijų antrosios eilės analizės skaičiavimus BE programoje, neužtenka tik parinkti apkrovos kontrolės metodą. Būtina laikytis ir tam tikrų sąlygų (da Silva et al., 2013):

- Konstrukcijos modelis turi tiksliai atspindėti standžiąją konstrukcijos elgseną, o modeliuojant mazgus turėtų būti naudojamas pradinis jų standis;
- Kritinė apkrova turi būti nustatoma kiekvienam apkrovų variantui;
- Konstrukcijai turint daugiau nei vieną klupumo formą, o šios gali būti reikšmingos antrosios eilės efektams, turi būti apskaičiuota daugiau nei viena kritinė apkrova bei nustatytos visos klupumo formos;
- Elementų diskretizacija turi būti adekvati.

Tiriamasis darbas yra atliekamas programiniu paketu *Robot Structural Analysis Professional*, elementai į daugiau BE nėra dalinami, naudojamas 1 BE.

Verta paminėti, kad dauguma šiuolaikinių BE programų baigtiniuose elementuose nevertina vidinio deplanacijos sukamojo momento. Programinis paketas *Robot Structural Analysis Professional* viendimensius (sijas, kolonas) elementus modeliuoja tik su 6-iais laisvumo laipsniais ir įvertina tik Sen Venano sukamuosius momentus. Norint, kad būtų vertinama ir vidinės deplanacijos sukamasis momentas, elementai turi turėti 14 laisvumo laipsnių. Tačiau naudojant tokius elementus išauga kompiuterinių resursų naudojimas ir atsiranda kitų problemų juos taikant, todėl jie vis dar nėra plačiai naudojami BE programų paketuose.

3. EN 1993-1-1:2005 IR prEN 1993-1-1:2015 VISUMINĖS ANALIZĖS PALYGINIMAS

Šiame skyriuje palyginami pagrindiniai EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 „Konstrukcijų analizės“ skyrių skirtumai. Pagrindiniai pokyčiai antrosios kartos Eurokode 3 (prEN 1993-1-1:2015) nubrėžia aiškią ribą tarp suvaržytų ir nesuvaržytų plieninių rėmų. Padidėjusi α_{cr} koeficiento riba leidžia daryti išvadą, kad ateityje atliekant visuminę plieninių konstrukcijų analizę beveik visoms konstrukcijoms reikės įvertinti antrosios eilės efektus, geometrinius netiesiškumus.

3.1. Eurokodų rekomenduojamų analizės metodų pagrindiniai skirtumai

Naujai rengiamame Eurokode 3 (prEN 1993-1-1:2015) „Konstrukcijų analizės“ skyrius yra atnaujintas, jame pastebima nemažai pokyčių, lyginant su dabar galiojančiu Euro kodu 3 (EN 1993-1-1:2005)

Lyginant EN 1993-1-1:2005 (toliau – EC-3) 5.1 ir būsimo Eurokodo 3 prEN 1993-1-1:2015 (toliau – prEC-3) 7.1 poskyrius, matyti, kad esminių skirtumų nėra. Verta paminėti tik tai, kad būsimajame Eurokode 3 nelieta 5.1.1 skyrelyje esančių (2) ir (4)B prielaidų. Šios panaikintos prielaidos konstrukcijų skaičiavimams įtakos neturi, nes buvo bendrinės pastabos ir nuoroda dėl pastatų komponentų konstrukcijos modeliavimo į EN 1993-1-5 ir EN 1993-1-11.

EC-3 5.2 ir prEC-3 7.2 poskyriuose atsiranda esminių pakeitimų. EC-3 5.2.1 skyrelio „Deformuotos konstrukcijos geometrijos įtaka“ pavadinimas prEC-3 pakeistas į 7.2.1 „Antrosios eilės efektų įvertinimas“. Pirmosios dvi prielaidos ((1) ir (2) prielaida, kurios nurodo, koku analizei būdu gali būti nustatomos vidinės jėgos ir momentai, bei kada reikia atsižvelgti į antrosios eilės veiksmus) abiejuose skyreliuose išlieka tos pačios.

Prielaida (3) apie pirmosios eilės analizę yra supaprastinama – nelieta atskirų kriterijų α_{cr} tampriojo ir plastinio būvio analizėms (5.1 formulės). (5.1) formules pakeičia viena bendra formulė (7.1), formulių skirtumai pateikiami 3.1 lentelėje.

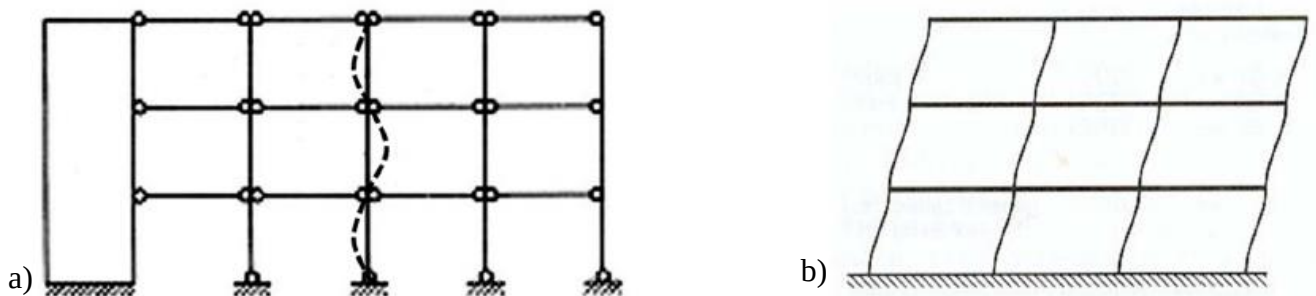
3.1 lentelė. Koeficiento α_{cr} apskaičiavimo skirtumai

5.1 formulės (EN 1993-1-1:2005)	7.1 formulė (prEN 1993-1-1:2015)
$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10, \text{ kai atliekama tampriojo būvio analizė;}$ (3.1)	$\alpha_{cr,FB} = \frac{F_{cr,FB}}{F_{Ed}} \geq k, \quad (3.3)$ čia: F_{Ed} – skaičiuotinė konstrukcijos apkrova;

3.1 lentelės tęsinys. Koeficiento α_{cr} apskaičiavimo skirtumai

5.1 formulės (EN 1993-1-1:2005)	7.1 formulė (prEN 1993-1-1:2015)
$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15$, kai atliekama plastinio būvio analizė; (3.2) čia: α_{cr} – koeficientas, kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad, esant bendrajam nepastovumui, pasireikštų tamprusis nepastovumas; F_{Ed} – skaičiuotinė konstrukcijos apkrova; F_{cr} – kritinė tamprioji klupumo apkrova, esant bendrajam nepastovumui, nustatoma pagal pradinį tamprųjų standį.	$F_{cr,FB}$ – mažiausia kritinė tamprioji klupumo apkrova nesuvaržytam arba suvaržytam rėme. Sukamasis klupumas, sukamasis-lenkiamasis ir skersinis sukamasis klupumas nevertinami; $\alpha_{cr,FB}$ – koeficientas, kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad pasireikštų tamprusis nepastovumas bet kurioje anksčiau paminėtoje lenkiamojo klupdymo formoje; $k = 25$, nebent kitaip nurodo Nacionalinis priedas (NA).

prEC-3 7.2.1 skyrelio (4) prielaida nurodo, jog klupumo formos gali būti klasifikuojamos dvejopai. Grafinė iliustracija 7.1 (žr. 3.1 pav.) parodo, kuo skiriasi suvaržytas ir nesuvaržytas plieninis rėmas atliekant visuminę analizę.



3.1 pav. Rėmų klasifikacija: a) suvaržytas plieninis rėmas; b) nesuvaržytas plieninis rėmas (prEN 1993-1-1:2015)

Remiantis nauja prEC-3 7.2.1 skyrelio (5) prielaida, pirmosios eilės analizę galima naudoti nustatant plokštumoje veikiančius lenkiamuosius momentus, jeigu tenkinama sąlyga, kad vidinės jėgos ir momentai pasvirus sistemai padidėja ne daugiau nei 10 % lyginant su pradiniais:

$$\alpha_{cr,sw} = \frac{F_{cr,sw}}{F_{Ed}} \geq 10, \quad (3.4)$$

čia:

F_{Ed} – skaičiuotinė konstrukcijos apkrova;

$F_{cr,sw}$ – kritinė tamprioji lenkiamojo klupumo apkrova bendrajai konstrukcijos klupumo formai;

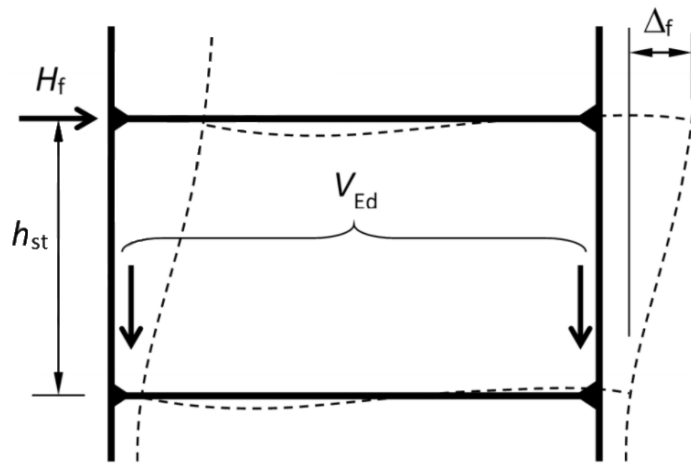
$\alpha_{cr,sw}$ – koeficientas, kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad pasireikštų tamprusis nepastovumas nesuvaržytam rėme.

Nauja prEC-3 7.2.1 skyrelio (7) prielaida nurodo kriterijus, kuriais remiantis galima nepaisyti antrosios eilės efektų atsirandančių dėl skersinio sukamojo klupumo kai atliekama konstrukcijos visuminė analizė.

EC-3 5.2.1 (4)B prielaidą pakeičia prEC-3 7.2.1 (10)B prielaida. Formulė (5.2) pakeičiama (7.3) formule, formulių skirtumai pateikiami 3.2 lentelėje ir 3.2 pav.:

3.2 lentelė. EC-3 5.2 ir prEC-3 7.3 formulių skirtumai

5.2 formulė (EN 1993-1-1:2005)	7.3 formulė (prEN 1993-1-1:2015)
$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \cdot \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right), \quad (3.5)$ čia: H_{Ed} – visuminė skaičiuotinė horizontalioji apkrova, įskaitant aukšto perduodamas lygiavertės jėgas (aukštų šlytų); V_{Ed} – visuminė skaičiuotinė rėmą veikianti vertikalioji apkrova, kurią perduoda aukštas (aukšto slėgis); $\delta_{H,Ed}$ – 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.	$\alpha_{cr,sw} = \frac{K \cdot h_{st}}{V_{Ed}}, \quad (3.6)$ čia: V_{Ed} – visuminė skaičiuotinė rėmą veikianti vertikalioji apkrova, kurią perduoda aukštas (aukšto slėgis); h_{st} – aukšto aukštis; K – šoninis pastato standumas, išreiškiamas formule: $K = \frac{H_f}{\Delta_f}, \quad (3.7)$ čia: Δ_f – aukšto viršaus horizontalusis poslinkis aukšto apačios atžvilgiu; H_f – horizontali apkrova, veikianti kiekvieno aukšto perdangos lygyje. Koeficientas $\alpha_{cr,sw}$ taikomas tik nesuvaržytiems rėmams.



3.2 pav. Horizontalių ir vertikalų jėgų nustatymas pagal 7.2.1 10(B) (prEN 1993-1-1:2015)

Prielaidoje nelieta sąlygos, kuria reikėtų įvertinti sijų arba gegninių sijų sąlyginį liaunį rėmo plokštumoje. Po prielaida esanti pastaba B nurodo, kad 7.2.1 10(B) prielaidoje būtina atsižvelgti į sijų arba gegnių ašinį gniuždymą, jei šis:

$$N_{Ed} \geq 0,1 \cdot N_{cr}, \quad (3.8)$$

čia:

N_{Ed} – veikianti ašinė jėga;

N_{cr} – sijų arba gegnių, laikomų jų geometrinio ilgio (matuojant išilgai sijų ar gegnių) galuose įtvirtintais lankštais, plokštumoje veikianti tamprioji kritinė apkrova.

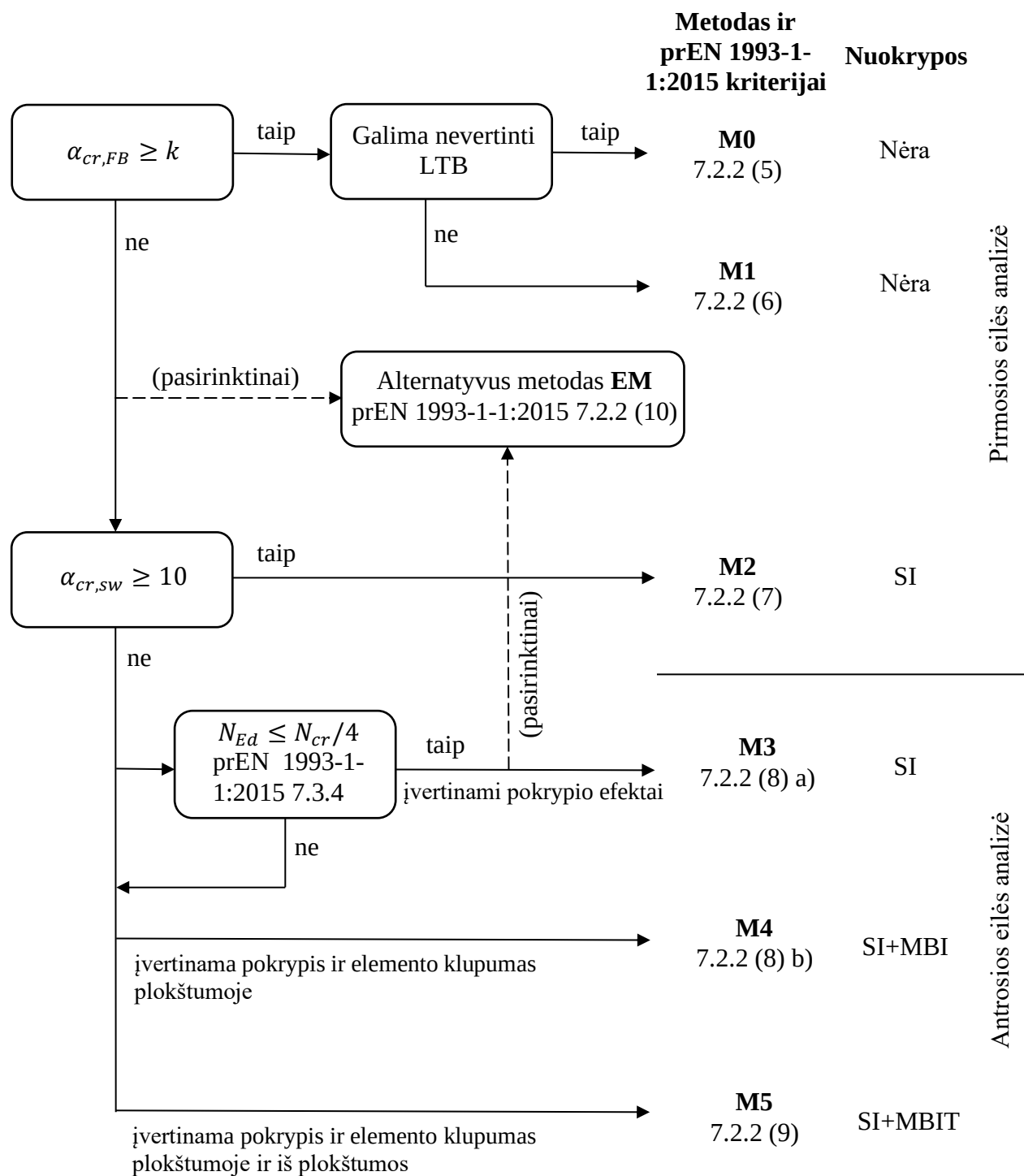
EC-3 5.2.2 skyrelį „Rėmų konstrukcijos pastovumas“ prEC-3 keičia 7.2.2 skyrelis „Analizės metodai saugos ribinio būvio patikrai“.

Atsižvelgiant į konstrukcijos tipą ir visuminę analizę, nuokrypos ir antrosios eilės efektai gali būti vertinami pagal šiuos metodus:

- Taikant vien tik visuminę analizę;
- Iš dalies taikant visuminę analizę ir iš dalies tikrinant atskirų elementų pastovumą, remiantis 8.3 nurodymais;
- Pagrindiniais atvejais – tikrinant atskirus lygiaverčius elementus pagal 8.3 nuostatas, kai naudojami atitinkami klumpamieji ilgiai pagal bendrąją konstrukcijos klupumo formą.

prEC-3 7.2.2 skyrelio (3) prielaidoje nurodama, kad saugos ribinio būvio analizės pirmosios ir antrosios eilės efektų vertinimui galima taikyti visuminės analizės metodus (žr. 3.3 pav.) **M0-M5**, jų numeracija kartu parodo ir metodo sudėtingumą (nuo paprasčiausio – 1 iki sudėtingiausio – 5). Tačiau sudėtingesnis metodas gali būti taikomas ir kai skaičiavimai leidžiami paprastesniu metodu. Prie kiekvieno iš metodo nurodomi kriterijai, kuriais vadovaujantis galima taikyti atitinkamą analizės metodą.

Detaliau šie metodai ir jų prasmė aprašyta šio darbo 3.2 poskyryje.



čia: *LTB* – skersinis sukamasis klupumas (angl. *Lateral Torsional Buckling*);

SI – Pokrypio efektai (angl. *Sway Imperfections*);

MBI – Elementų išlinkiai (angl. *Members Bow Imperfections*);

MBIT – Elementų išlinkiai, įskaitant ir sukamuosius efektus (angl. *Member Bow Imperfection including Torsional effects*).

3.3 pav. Plieninių rėmų visuminės analizės skaičiavimo algoritmas (pagal prEN 1993-1-1:2015)

prEC-3 poskyris 7.3 „Nuokrypos“ šiek tiek pasikeičia lyginant su EC-3 5.3 poskyriu. EC-3 5.3.1 skyrelio (3) prielaidą pakeičia prEC-3 7.3.1 (5) prielaida, apibrėžianti, jog turi būti vertinamos šios nuokrypos:

- Posvyrių, atliekant visuminę rėmų analizę;
- Išlinkių, atliekant visuminę ir elementų analizę;
- Ryšių sistemų nuokrypos.

prEC-3 skyrelio 7.3.2 „Rėmų visuminės analizės nuokrypos“ prielaidos yra supaprastinamos lyginant su EC-3 5.3.2 skyreliu. (3) prielaidos bendrųjų pradinių pokrypių pagrindinė reikšmė ϕ_0 parenkama pagal atitinkama atvejį – tampriajam konstrukcijos būviui naudojamas santykis 1/400, plastiniam būviui 1/200. Išplečiamos kolonomis taikytino pataisos koeficiento α_h ribos:

3.3 lentelė. Kolonomis taikytino pataisos koeficiento ribos

5.2 formulė (EN 1993-1-1:2005)	7.3 formulė (prEN 1993-1-1:2015)
$\frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0.$ (3.9)	$\alpha_h \leq 1,0.$ (3.10)

Keičiasi (11) prielaidos koeficiento e_0 apskaičiavimas (formulę (5.10) pakeičia prEC-3 (7.14) formulė):

3.4 lentelė. Koeficiento e_0 apskaičiavimo Eurokoduose palyginimas

5.10 formulė (EN 1993-1-1:2005)	7.14 formulė (prEN 1993-1-1:2015)
$e_0 = \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) \frac{M_{Rk} \frac{1-\chi\bar{\lambda}^2}{N_{Rk} \frac{1-\chi\bar{\lambda}^2}{Y_{M1}}}, \text{ kai } \bar{\lambda} > 0,2, \quad (3.11)$ čia: $\bar{\lambda}$ – konstrukcijos santykinis liaunis; α – nuokrypos koeficientas pagal atitinkamą klupumo kreivę; χ – klupumo koeficientas pagal atitinkamą klupumo kreivę, priklausantis nuo atitinkamo skerspjuvio; M_{Rk} – charakteristinė kritinio skerspjuvio lenkiamoji galia, atitinkamai $M_{el,Rk}$ arba $M_{pl,Rk}$; N_{Rk} – charakteristinė ašinė kritinio skerspjuvio gniuždomoji galia, t. y. $N_{pl,Rk}$.	$e_0 = \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) \frac{M_{Rk}}{N_{Rk}}, \text{ kai } \bar{\lambda} > 0,2, \quad (3.12)$ čia: $\bar{\lambda}$ – konstrukcijos santykinis liaunis; α – nuokrypos koeficientas pagal atitinkamą klupumo kreivę; M_{Rk} – charakteristinė kritinio skerspjuvio lenkiamoji galia, atitinkamai $M_{el,Rk}$ arba $M_{pl,Rk}$; N_{Rk} – charakteristinė ašinė kritinio skerspjuvio gniuždomoji galia, t. y. $N_{pl,Rk}$.

EC-3 5.3.2 skyrelio (6) prielaidos formulė (5.8) pakeičiama (7.9) formule (žr. 2.5 lentelėje).

3.5 lentelė. Sąlygų palyginimas

5.8 formulė (EN 1993-1-1:2005)	7.9 formulė (prEN 1993-1-1:2015)
$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}; \quad (3.13)$ čia: N_{Ed} – skaičiuotinė gniuždomosios jėgos reikšmė; $\bar{\lambda}$ – elemento, laikomo galuose įtvirtintu lankstais, plokštuminis sąlyginis liaunis.	$N_{Ed} > 0,25 \cdot N_{cr}; \quad (3.14)$ čia: N_{Ed} – veikianti ašinė jėga; N_{cr} – elemento, galuose įtvirtinto lankstais, plokštumoje veikianti tamprioji kritinė apkrova.

Keičiasi santykinio pradinio lenkiamojo klupdymo veikiamų elementų vietinio išlinkio skaičiavimas ((5.6) formulė) ir 5.1 lentelė (ją pakeičia 7.1 lentelė):

3.6 lentelė. Vietinio išlinkio formulių palyginimas

5.6 formulė (EN 1993-1-1:2005)	7.8 formulė (prEN 1993-1-1:2015)
$\frac{e_0}{L}, \quad (3.15)$ čia: L – elemento ilgis.	$e_0 = \frac{\alpha}{\varepsilon} \beta \cdot L, \quad (3.16)$ čia: L – elemento ilgis; α – rodiklis, priklausantis nuo klupumo kreivės; $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}};$ β – vietinio išlinkio reikšmės iš prEN 1993-1-1:2015 7.1 lentelės.

3.7 lentelė. Vietinio išlinkio reikšmės β parinkimas (prEN 1993-1-1:2015)

Klupumas aplink ašį	Analizė pagal tamprųjį modelį	Analizė pagal plastiškąjį modelį
y-y	1/110	1/75
z-z	1/200	1/68

prEC-3 nelieta EC-3 5.3.2 skyrelyje pateiktos (10) prielaidos ir 5.5 paveikslas apie sukamuosius konstrukcijos poveikius, kuriuos sukelia nesimetriškas posvyris dviejose priešingose pusėse.

Lyginant prEC-3 7.4 poskyrį „Analizės metodai, įvertinantys medžiagos netiesiškumą“ su EC-3 5.4 poskyriu, esminių pakeitimų nėra. Esminis skirtumas, kad visos prielaidos yra tinkamos plienui iki S460 klasės. Jeigu plieno klasė yra didesnė nei S460, atliekant plastinę analizę reikia įvertinti dalinį plastiškumą ir vietines plokštelių nuokrypas remiantis prEN 1993-1-1:2015 C priedu.

Skirtumų tarp EC-3 5.5 ir prEC-3 7.5 poskyrių nėra.

Lyginant prEC-3 7.6 poskyrį „Reikalavimai skerspjuviams atliekant visuminę analizę pagal plastiškąjį modelį“ su EC-3 5.6 poskyriu keičiasi ribinės skerspjuvių pločio ir storio santykių reikšmės vidinėms gniuždomoms dalims (prEN 1993-1-1:2015 7.2 lentelė).

Taip pat koreguojamos skerspjuvių klasių ribinės reikšmės (žr. 3.8 lentelę).

3.8 lentelė. Skerspjuvių klasių ribinės reikšmės

5.2 lentelė (EN 1993-1-1:2005), c/t santykis	7.2 lentelė (prEN 1993-1-1:2015), c/t santykis
1 klasės skerspjuviai: Gniuždymo veikiamas dalis: $33 \cdot \varepsilon$; Lenkimo ir gniuždymo veikiamas dalis, kai $\alpha > 0,5$: $\frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$.	1 klasės skerspjuviai: Gniuždymo veikiamas dalis: $28 \cdot \varepsilon$; Lenkimo ir gniuždymo veikiamas dalis, kai $\alpha > 0,5$: $\frac{126 \cdot \varepsilon}{5,5 \cdot \alpha - 1}$.
2 klasės skerspjuviai: Gniuždymo veikiamas dalis: $38 \cdot \varepsilon$; Lenkimo ir gniuždymo veikiamas dalis, kai $\alpha > 0,5$: $\frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$.	2 klasės skerspjuviai: Gniuždymo veikiamas dalis: $34 \cdot \varepsilon$; Lenkimo ir gniuždymo veikiamas dalis, kai $\alpha > 0,5$: $\frac{188 \cdot \varepsilon}{6,53 \cdot \alpha - 1}$.
3 klasės skerspjuviai: Lenkimo veikiamas dalis: $124 \cdot \varepsilon$; Gniuždymo veikiamas dalis: $42 \cdot \varepsilon$; Lenkimo ir gniuždymo veikiamas dalis, kai $\psi > -1$: $\frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33 \cdot \psi}$; kai $\psi \leq -1$: $62 \cdot \varepsilon (1 - \psi) \sqrt{(-\psi)}$.	3 klasės skerspjuviai: Lenkimo veikiamas dalis: $121 \cdot \varepsilon$; Gniuždymo veikiamas dalis: $38 \cdot \varepsilon$; kai $\psi > -1$: $\frac{38 \cdot \varepsilon}{0,608 + 0,343 \cdot \psi + 0,049 \cdot \psi^2}$; kai $\psi \leq -1$: $60,5 \cdot \varepsilon (1 - \psi)$.

Taip pat apibrėžiama koeficiento α , skirto nustatyti neutraliajai ašiai, kai skerspjuvis yra veikiamas ir lenkimo ir gniuždymo, skaičiavimo metodika.

Vamzdinių arba elipsės (naujas dalykas, apibrėžtas prEC-3) formos profiliuotųjų skerspjūvio klasės nustatymas prEC-3 atitinkamai yra skirstomas į:

- veikiamus lenkimo;
- veikiamus gniuždymo;
- veikiamus lenkimo ir gniuždymo.

3.2. prEN 1993-1-1:2015 visuminės analizės skaičiavimo metodai

prEC-3 7.2.2 skyrelyje „Analizės metodai saugos ribinio būvio patikrinimui“ apibrėžiami analizės metodai ir jų prielaidos, kuriomis remiantis turi būti atlikta saugos ribinio būvio (SRB) analizė.

Visuminės analizės metodai **M0** ir **M1** yra taikomi atliekant pirmosios eilės analizę, kai nevertinamos konstrukcijos nuokrypos (žr. 3.3 pav.). Pagrindinės šių metodų prielaidos pateikiamos žemiau.

Metodas M0.

Jeigu atliekant visuminę konstrukcijų analizę galima nevertinti antrosios eilės efektų (pagal prEN 1993-1-1:2015 7.2.1(3) ir 7.2.1(5) punktus) ir skersinio sukamojo klupumo (pagal prEN 1993-1-1:2015 7.2.1(7) punktą), tai:

- 1) Skerspjūvių atsparumo patikrinimui pagal 8.2 poskyrį gali būti naudojamos pirmosios eilės analizės metu gautos vidinės jėgos ir lenkiamieji momentai;
- 2) Atskirų elementų atsparumo klupdymui patikrinimas pagal 8.3 poskyrį nebūtinai;
- 3) Nuokrypos gali būti nevertinamos.

Metodas M1.

Metodas panašus į M0 metodą, tik čia turi būti įvertinamas skersinis sukamasis klupumas. 1) ir 3) prielaidos galioja tos pačios kaip ir M0 metodo, keičiasi 2) prielaida, kuri teigia, kad:

- Atskirų elementų atsparumo klupdymui iš plokštumos patikrinimas pagal 8.3 poskyrį privalomas, gali būti apskaičiuotas naudojant pirmosios eilės analizės metu gautas vidines jėgas ir lenkiamuosius momentus.

Metodas M2.

Taikomas atliekant pirmosios eilės visuminę analizę, kai konstrukcijoje turi būti įvertintos nuokrypos dėl posvyrio. Jeigu būtina įvertinti antrosios eilės efektus dėl elementų klupumo

plokštumoje, bet galima neatsižvelgti į bendrąją konstrukcijos klupumo formą, tai metodui taikomos šios prielaidos:

- 1) Skerspjuvių atsparumo patikrinimui pagal 8.2 poskyrį gali būti naudojamos pirmosios eilės analizės metu gautos vidinės jėgos ir lenkiamieji momentais;
- 2) Atskirų elementų atsparumo klupdymui plokštumoje ir iš plokštumos patikrinimas pagal 8.3 poskyrį yra privalomas, gali būti apskaičiuotas naudojant pirmosios eilės analizės metu gautas vidines jėgas ir lenkiamuosius momentais, atsižvelgiant į atitinkamus kritinius klumpamuosius ilgius ir lenkimo momento diagramas;
- 3) Į vietinius išlinkius galima neatsižvelgti, bet reikia įvertinti nuokrypas, atsirandančias dėl pokrypio;
- 4) Kritinis klumpamasis elemento ilgis prilyginamas geometriniam elemento ilgiui.

Metodai **M3**, **M4** ir **M5** taikomi, kai pagal 3.3 pav. algoritmą konstrukcijai būtina atlikti antrosios eilės analizę.

Metodai M3 ir M4.

Jeigu būtina įvertinti antrosios eilės efektus dėl elementų klupumo plokštumoje, ir atsižvelgti į bendrąją konstrukcijos klupumo formą, tai konstrukcijos patikrinimas gali būti atliekamas pagal vieną iš šių metodų:

a) Metodas M3:

Jeigu atliekant visuminę analizę įvertinamos nuokrypos dėl pokrypių, bet vietinių išlinkių galima nepaisyti, tai visuminė analizė atliekama pagal prEN 1993-1-1:2015 7.3.4 nuostatas:

- 1) Skerspjuvių atsparumo patikrinime pagal 8.2 poskyrį reikia naudoti dalinį patikimumo koeficientą γ_{M1} ir antrosios eilės analizės metu gautas vidines jėgas ir lenkiamuosius momentus;
- 2) Atskirų elementų atsparumo klupdymui plokštumoje ir iš plokštumos patikrinimas pagal 8.3 poskyrį yra privalomas ir turi būti naudojamos antrosios eilės analizės metu gautos vidinės jėgos ir lenkiamieji momentai, tačiau vidinių jėgų ir momentų pasiskirstymas elementų galuose gali būti nustatomas remiantis pirmosios eilės analize;
- 3) Klumpamasis elemento ilgis plokštumoje prilyginamas geometriniam ilgiui.

b) Metodas M4:

Jeigu atliekant visuminę analizę įvertinamos nuokrypos dėl pokrypių ir vietiniai išlinkiai, tai:

- 1) Skerspjūvių atsparumo patikrinime pagal 8.2 poskyrį reikia naudoti dalinį patikimumo koeficientą γ_{M1} ir turi būti naudojamos antrosios eilės analizės metu gautos vidinės jėgos ir lenkiamieji momentai;
- 2) Atskirų elementų klupumo plokštumoje patikrinimas pagal 8.3.3 skyrelio (8.65) formulę nebūtinai;
- 3) Atskirų elementų klupumo iš plokštumos patikrinimas pagal 8.3.3 skyrelio (8.66) formulę privalomas ir naudojamos antrosios eilės analizės metu gautos vidinės jėgos ir lenkiamieji momentai.

Metodas M5:

Jei atliekant visuminę analizę turi būti įvertinami antrosios eilės efektai, įskaitant sukamuosius efektus, nuokrypas dėl pokrypio ir plokštumoje bei iš plokštumos atsirandantys vietiniai išlinkiai (pagal prEN 1993-1-1:2015 7.3.4 skyrelį), tai:

- 1) Skerspjūvių atsparumo patikrinime pagal 8.2 poskyrį reikia naudoti dalinį patikimumo koeficientą γ_{M1} ir turi būti naudojamos antrosios eilės analizės metu gautos vidinės jėgos ir lenkiamieji momentai;
- 2) Atskirų elementų pasipriešinimo klupdymui patikrinimas pagal 8.3 poskyrį nėra būtinas.

Nustatant vidines jėgas ir momentus, kai nevertinami antrosios eilės efektai, gali būti naudojamas alternatyvus visuminės analizės metodas **EM**. Šis metodas naudojamas projektuojant jungtis ir sujungtus elementus, įskaitant ir atskirų elementų klupumo iš plokštumos patikrinimą. **EM** metodo apribojimais nurodomi Nacionaliniame priede.

Jeigu atliekant visuminę analizę galima nevertinti antrosios eilės efektų, individualių elementų klupumo atsparumui nustatyti gali būti naudojamas „Lygiaverčių elementų“ metodas:

- Skerspjūvių atsparumo patikrinimui pagal 8.2 poskyrį gali būti naudojamos pirmosios eilės analizės metu gautos elementų vidinės jėgos ir lenkiamieji momentai;
- Nuokrypos gali būti nevertinamos;
- Atskirų elementų atsparumas klupdymui pagal 8.3 poskyrį gali būti patikrintas remiantis pirmosios eilės analizės vidinėmis jėgomis ir lenkiamaisiais momentais, atsižvelgiant į sisteminius poveikius lygiaverčių elementų klupumo ilgiui nustatyti.

4. PARAMETRINIAI NESUVAŽYTŲ PLIENINIŲ RĖMŲ SKAIČIAVIMAI

Šiam skyriuje nagrinėjami nesuvaržyti, standžiai įtvirtinti plieniniai rėmai, įvertinant skirtingus nagrinėjamų konstrukcijų parametrus. Plieniniai rėmai nagrinėjami įvertinant pirmosios ir antrosios eilės efektus, dalinį mazgų standumą. Skaičiavimų metodika atliekama pagal EN 1993-1-1:2005 ir naujai pateikiamą prEN 1993-1-1:2015 metodiką.

4.1. Tyrimo metodika

Parametrinis plieninių nesuvaržytų rėmų tyrimas atliekamas baigtinių elementų (toliau – BE) programa *Robot Structural Analysis Professional*. Skaičiavimai atliekami keičiant tam tikrus parametrus skaičiuojamosiose konstrukcijų schemose. Atliekant skaičiavimus keičiami šie parametrai:

- **Rėmų skerspjūviai.** Skerspjūviai parenkami automatiškai, programinio paketo optimizacijos funkcija, pagal pavojingiausią saugos ribinio būvio (SRB) derinį (žr. 4.7 lentelę). Kolonomis naudojami dvitėjai profiliuočiai – HEB, sijoms – IPE;
- **Tarpatramių skaičius.** Skaičiavimuose naudojami 1, 2 ir 3 tarpatramių plieniniai rėmai;
- **Rėmų aukštų skaičius.** Skaičiuojami 3, 5 ir 10 aukštų plieniniai rėmai;
- **Mazgų standis.** Nuo pilnai standžių mazgų iki dalinio (0,5 ir 0,75) standumo mazgų;
- **Fiktyvių apkrovų įvertinimas.** Dalis skaičiuojamųjų schemų yra apkraunamos fiktyviomis apkrovomis, kurios įvertina geometrines nuokrypas.

Rėmų skaičiavimuose nekeičiami parametrai:

- **Plieno klasė.** Visiems nesuvaržytiems rėmams naudojama ta pati plieno klasė – S355;
- **Aukšto aukštis** – 4 m;
- **Tarpatramis** – 6 m;
- **Žingsnis tarp rėmų** – 6 m;
- **Nuolatinės ir kintamos apkrovos.**

Toliau tiriamojo darbo skaičiavimuose vertinamas ir tikrinamas tik saugos ribinis būvis (SRB). Tinkamumo ribinis būvis (TRB) nevertinamas, kadangi atsižvelgiant į leistinus poslinkius, daugiaaukščio pastato skerspjūviai smarkiai padidėtų, jų išnaudojimas būtų labai mažas ir nepavyktų ištirti koeficiento α_{cr} įtakos, nes jis būtų keliskart didesnis. O esant didelėms koeficiento α_{cr} reikšmėms, nereikėtų atlikti ir antrosios eilės analizės.

Tačiau darbe bus palyginami SRB poslinkiai, kadangi jie yra naudojami koeficiento α_{cr} apskaičiavimui pagal anksčiau aptartą (2.3) formulę.

4.1.1. Geometrinės tiriamųjų rėmų nuokrypos

Geometrinės rėmo nuokrypos įvertinamos pridendant fiktyvias horizontalias jėgas. Jos yra lygios visai vertikalčiai jėgai padauginčiai iš koeficiento ϕ , kuris yra apskaičiuojamas pagal EN 1993-1-1:2005 5.3.2 (3) punktą (žr. 2.3 poskyrį).

Fiktyvios koncentruotos apkrovos kiekvieno aukšto viršuje gaunamos aukšto apačios bendrą vertikalią (ašinę) jėgą padauginus iš bendrojo pradinio pokrypio koeficiento ϕ .

4.1 lentelė. 1-o tarpatramio rėmo nuokrypos pagal EN 1993-1-1:2005

Aukštų skaičius	Aukštis h , m	Kolonoms taikytinas aukščio h pataisos koef. α_h	Kolonų skaičiaus eilėje pataisos koef. α_m	Bendrieji pradiniai pokrypiai ϕ , rad
10	40	0,667	0,866	0,00289
5	20	0,667	0,866	0,00289
3	12	0,667	0,866	0,00289

4.2 lentelė. 2-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal EN 1993-1-1:2005

Aukštų skaičius	Aukštis h , m	Kolonoms taikytinas aukščio h pataisos koef. α_h	Kolonų skaičiaus eilėje pataisos koef. α_m	Bendrieji pradiniai pokrypiai ϕ , rad
10	40	0,667	0,816	0,00272
5	20	0,667	0,816	0,00272
3	12	0,667	0,816	0,00272

4.3 lentelė. 3-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal EN 1993-1-1:2005

Aukštų skaičius	Aukštis h , m	Kolonoms taikytinas aukščio h pataisos koef. α_h	Kolonų skaičiaus eilėje pataisos koef. α_m	Bendrieji pradiniai pokrypiai ϕ , rad
10	40	0,667	0,791	0,00264
5	20	0,667	0,791	0,00264
3	12	0,667	0,791	0,00264

Geometrinių nuokrypų naujoje Eurokodo 3 versijoje prEN 1993-1-1:2015 skaičiavimas, lyginant su EN 1993-1-1:2005 5.3.2 punktu, yra panašus, bet turi keletą pakeitimų.

Esminis skirtumas yra bendrųjų pradinių pokrypių formulėje:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m, \quad (4.1)$$

čia: ϕ_0 – pagrindinė reikšmė:

$\phi_0 = 1/200$ – taikant analizę pagal plastiškąjį modelį;

$\phi_0 = 1/400$ – taikant analizę pagal tamprųjų modelį;

α_h – kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas;

α_m – kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas.

Atliekant analizę pagal tamprųjų modelį, pagrindinė koeficiento ϕ_0 reikšmė mažesnė, lyginant su EN 1993-1-1:2005.

Kitas pakeitimas yra kolonomis taikomame aukščio h pataisos koeficiente:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ bet } \alpha_h \leq 1,0. \quad (4.2)$$

Šis pokytis leidžia taikyti mažesnes pataisos koeficiento reikšmes aukštiems rėmams, nes nelieka apribojimo iš ankstesnio Eurokodo 3 (EN 1993-1-1:2005), kad $\alpha_h \geq 2/3$.

Visi kiti koeficientai apskaičiuojami taip pat.

4.4 lentelė. 1-o tarpatramio rėmo nuokrypos pagal prEN 1993-1-1:2015

Aukštų skaičius	Aukštis h , m	Kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koef. α_h	Kolonų skaičiaus eilėje pataisos koef. α_m	Bendrieji pradiniai pokrypiai ϕ , rad
10	40	0,316	0,866	0,00068
5	20	0,447	0,866	0,00097
3	12	0,577	0,866	0,00125

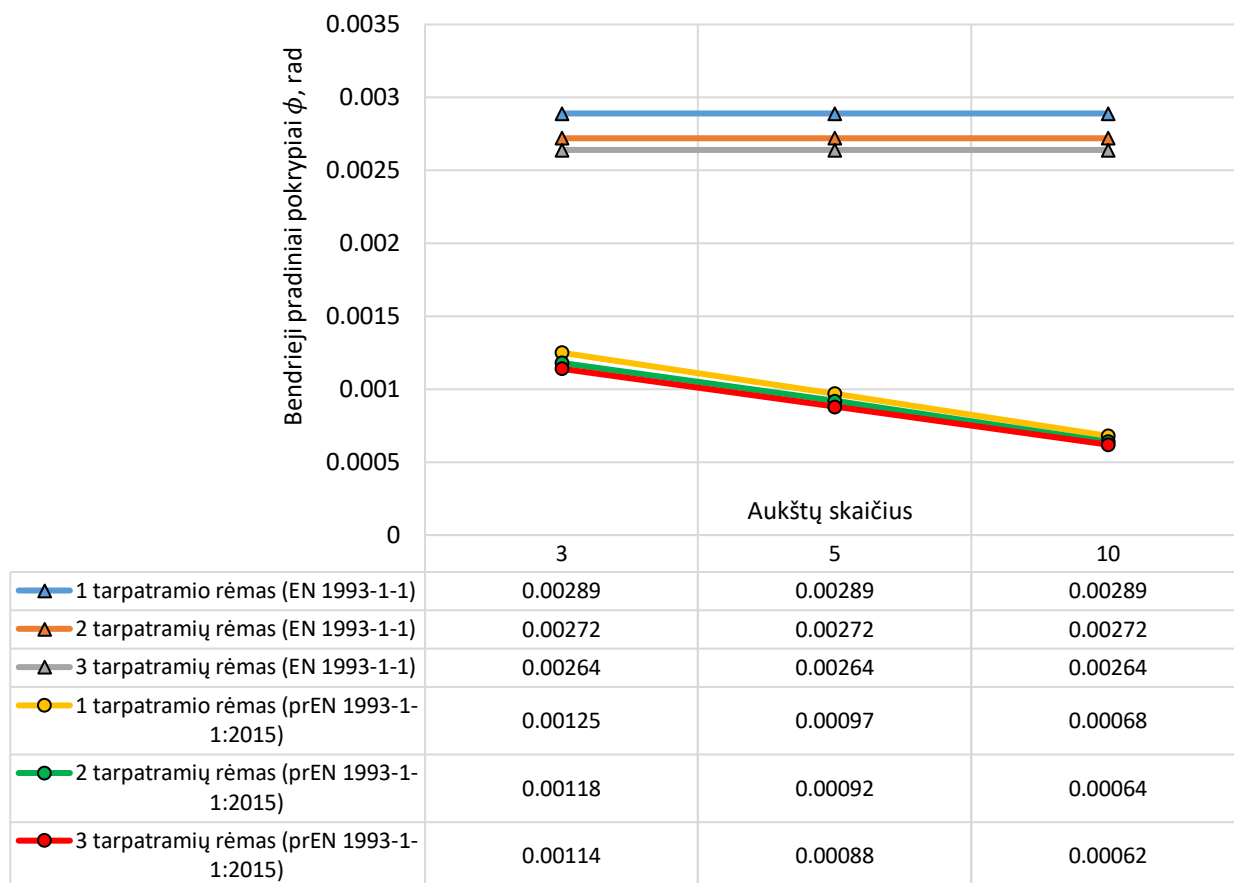
4.5 lentelė. 2-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal prEN 1993-1-1:2015

Aukštų skaičius	Aukštis h , m	Kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koef. α_h	Kolonų skaičiaus eilėje pataisos koef. α_m	Bendrieji pradiniai pokrypiai ϕ , rad
10	40	0,316	0,816	0,00064
5	20	0,447	0,816	0,00092
3	12	0,577	0,816	0,00118

4.6 lentelė. 3-jų tarpatramių rėmo nuokrypos pagal prEN 1993-1-1:2015

Aukštų skaičius	Aukštis h , m	Kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koef. α_h	Kolonų skaičiaus eilėje pataisos koef. α_m	Bendrieji pradiniai pokrypiai ϕ , rad
10	40	0,316	0,791	0,00062
5	20	0,447	0,791	0,00088
3	12	0,577	0,791	0,00114

Plieninių rėmų bendrųjų pradinių pokrypių palyginimas



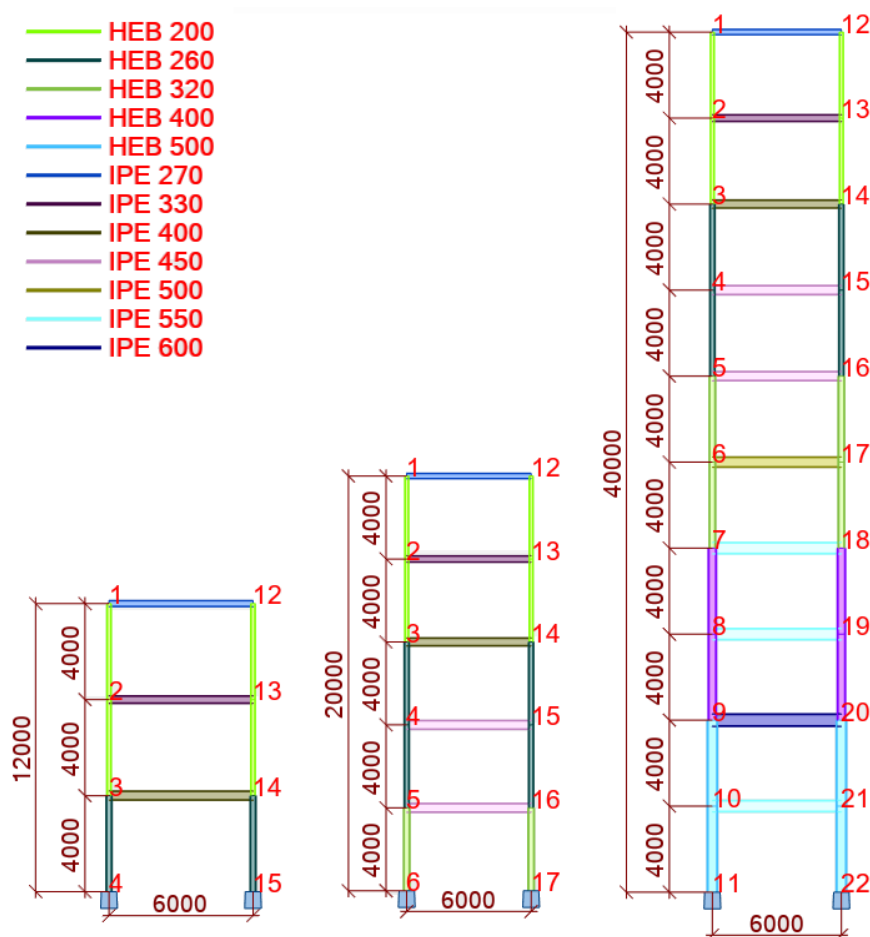
4.1 pav. Pradinių pokrypių pagal EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 palyginimas

Kaip matome 4.1 pav., atliekant skaičiavimus pagal prEN 1993-1-1:2015 bendrieji pradiniai pokrypiai gaunasi ženkliai mažesni, jie priklauso ne tik nuo tarpatramių (kolonų) skaičiaus, bet ir nuo aukštų skaičiaus. 10-ies aukštų rėmuose bendrieji pradiniai nuokrypiai yra mažiausi, jie, lyginant su EN 1993-1-1:2005, yra ~78,5 % mažesni, o tai jau yra labai reikšmingas skirtumas. Taip yra dėl prEN 1993-1-1:2015 leidžiamos mažesnės pataisos koeficiento α_h reikšmės, lyginant su dabar galiojančiu EN 1993-1-1:2005.

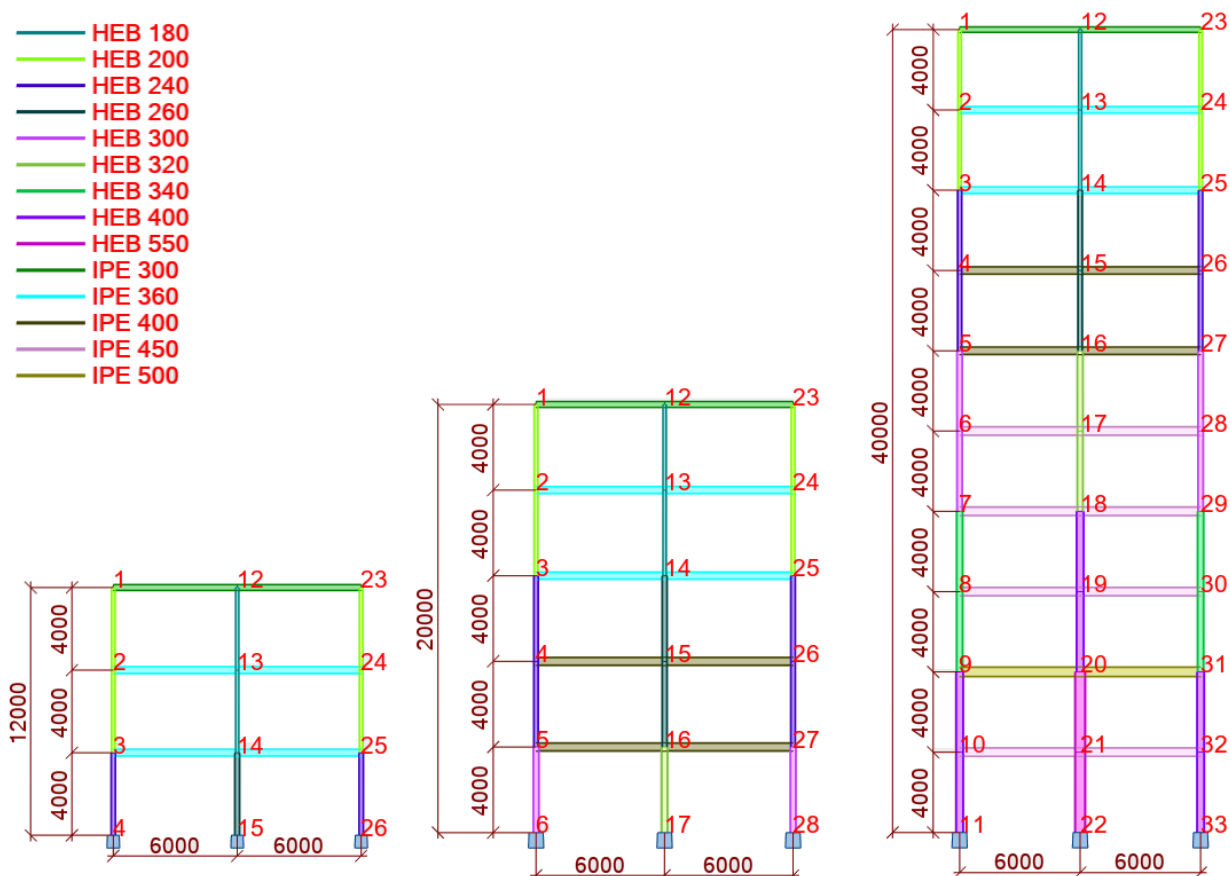
Kadangi buvo sudaryta daug skaičiuojamųjų schemų tiriamiesiems modeliams, siekiant paprasčiau ir sistemingai pateikti rezultatus ir juos palyginti, tolesniuose grafikuose pateikiamoms fiktyvioms apkrovoms apskaičiuoti buvo naudojami bendrieji pradiniai pokrypiai pagal dabar galiojančią Eurokodą 3 – EN 1993-1-1:2005. Toks sprendimas priimtas, nes taikant bendruosius pradinius pokrypius pagal prEN 1993-1-1:2015, fiktyvios apkrovos gaunasi sąlyginai mažos (palyginimui 10-ies aukštų 3-jų tarpatramių rėmo apačioje vietoj dabar pridėtos 31,85 kN jėgos (žr. A priedo A. 1 lentelę), būtų ~6,85 kN, viršutiniame aukšte ~0,4 kN), o tai nesudaro didelės reikšmės rezultatų pokyčiams, lyginant su EN 1993-1-1:2005 geometrinėmis nuokrypomis.

4.2. Nagrinėjimų plieninių rėmų skaičiuojamosios schemos

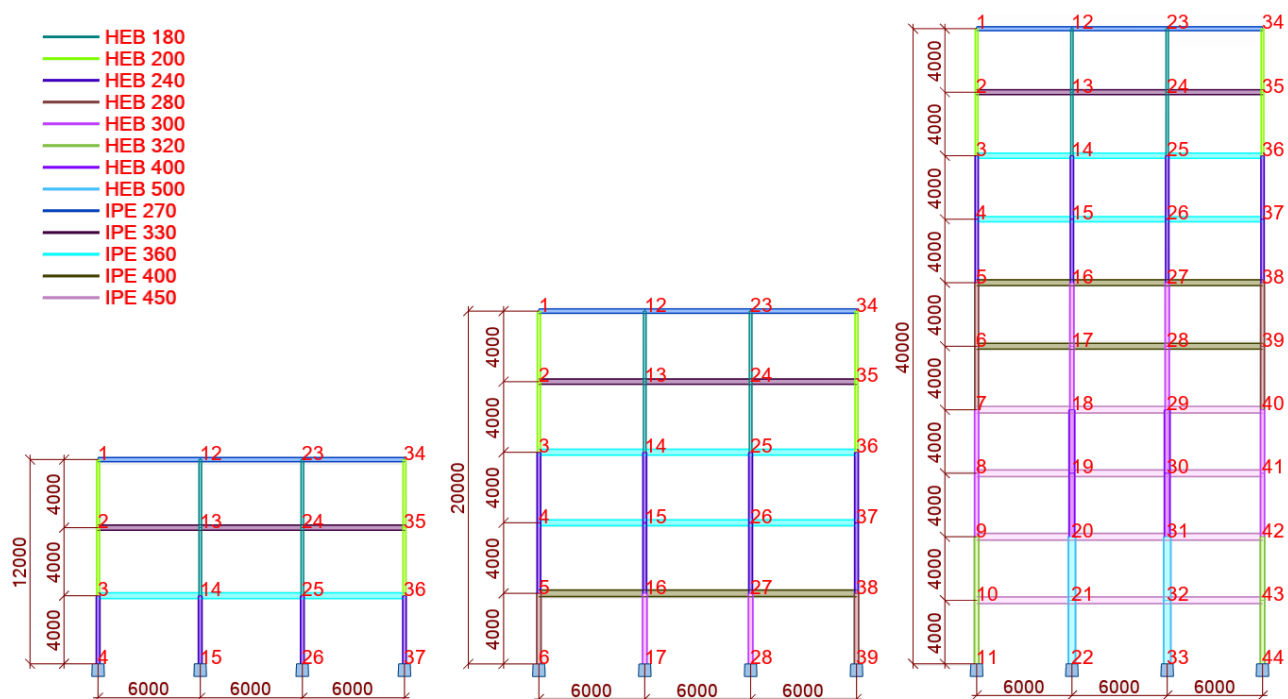
Tyrimui buvo sudaryta 54-ios parametrinės skaičiuojamosios schemos nesuvaržytiems plieniniams rėmams. Žemiau (4.2, 4.3 ir 4.4 pav.) pateikiamos tipinės šių rėmų skaičiuojamosios schemos. Kiekvieno paveikslėlio viršuje, kairiame kampe, pateikiama skerspjūvių legenda pagal spalvą. Matmenys nurodyti milimetrais, raudoni skaičiai žymi taško (mazgo) numerį.



4.2 pav. Nagrinėjami vieno tarpatramio plieniniai, nesuvaržyti rėmai



4.3 pav. Nagrinėjami dviejų tarpatramių plieniniai, nesuvaržyti rėmai



4.4 pav. Nagrinėjami trijų tarpatramių plieniniai, nesuvaržyti rėmai

Rėmams priskiriamos charakteristinės apkrovos (žr. A priedą). Skaičiuojamosios schemos kiekviename aukšte ir ant stogo apkraunamos vertikalios (žr. A priedo A. 1 a) pav.) nuolatine apkrova (toliau NA-1). Šioje apkrovoje kartu apjungta konstrukcijų savasis svoris, nuolatinė, naudojimo ir sniego apkrovos. Vertikalių apkrovų skaidymas į atskiras jėgas analizės rezultatams didelės įtakos neturi, todėl siekiant pagreitinti ir supaprastinti skaičiavimus buvo priimtas toks sprendimas.

Rėmai taip pat apkraunami horizontalia vėjo apkrova (toliau VA-1), kuri atitinkamai kinta pagal pastato aukštį (žr. A priedo A. 1 b) pav.). Apkrovos parinktos apytikslės, pagal panašios konfigūracijos pastatų skaičiavimus. Apkrovų schemos pateikiamos 10 aukštų rėmams. Kitiems žemesniems rėmams apkrovos išdėstomos tokiu pat principu (įvertinant VA-1 lūžį ties penktu aukštu). Nuolatinės ir vėjo apkrovos pateikiamos kN/m.

Vienas iš kintančių parametrų tiriamuosiuose nevaržytuose plieniniuose rėmuose – fiktyvios apkrovos (toliau FA-1). FA-1 dydis gaunamas aukšto apačioje veikiančių vertikalių jėgų sumą padauginus iš prieš tai gautų (žr. 4.1.1 skyrelį) bendrų pradinių pokrypių ϕ . Fiktyvių apkrovų dydžiai pateikiami A priede.

Sudaromi keli apkrovų deriniai (žr. A priedo A. 2 lentelę). Tolesniuose poskyriuose pateikiami rezultatai (įrašos, poslinkiai) yra skaičiuotinės reikšmės. Vertikalių apkrovų (NA-1) dalinio patikimumo koeficientas $\gamma_G = 1,35$, horizontalių apkrovų (VA-1) $\gamma_Q = 1,3$.

4.3. Parametrinis tyrimas BE programa ir tyrimo rezultatų lyginamoji analizė

Parametrinis rėmų skaičiavimas atliekamas programiniu paketu *Robot Structural Analysis Professional*. Žemiau esančiuose grafikuose pateikiama atitinkamo rėmo dešinės pusės kolonų įrąžų ir poslinkių palyginimai. Koeficientai α_{cr} pateikiami atitinkamo rėmo aukšto.

4.3.1. Koeficiento α_{cr} pokytis skirtingų parametrų plieniniuose rėmuose

Robot Structural Analysis Professional koeficientą α_{cr} , kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad, esant bendrajam nepastovumui, pasireikštų tamprusis nepastovumas, apskaičiuoja automatiškai, taikydamas EN 1993-1-1:2005 5.2 poskyrio (5.2) formulę (žr. 2.1 poskyrį). Koeficiento α_{cr} apskaičiavimas pagal prEN 1993-1-1:2015 yra analogiškas (žr. 3.1 poskyrį).

$$\alpha_{cr,X} = \frac{FX}{FZ} \cdot \frac{H}{drUX'} \quad (4.3)$$

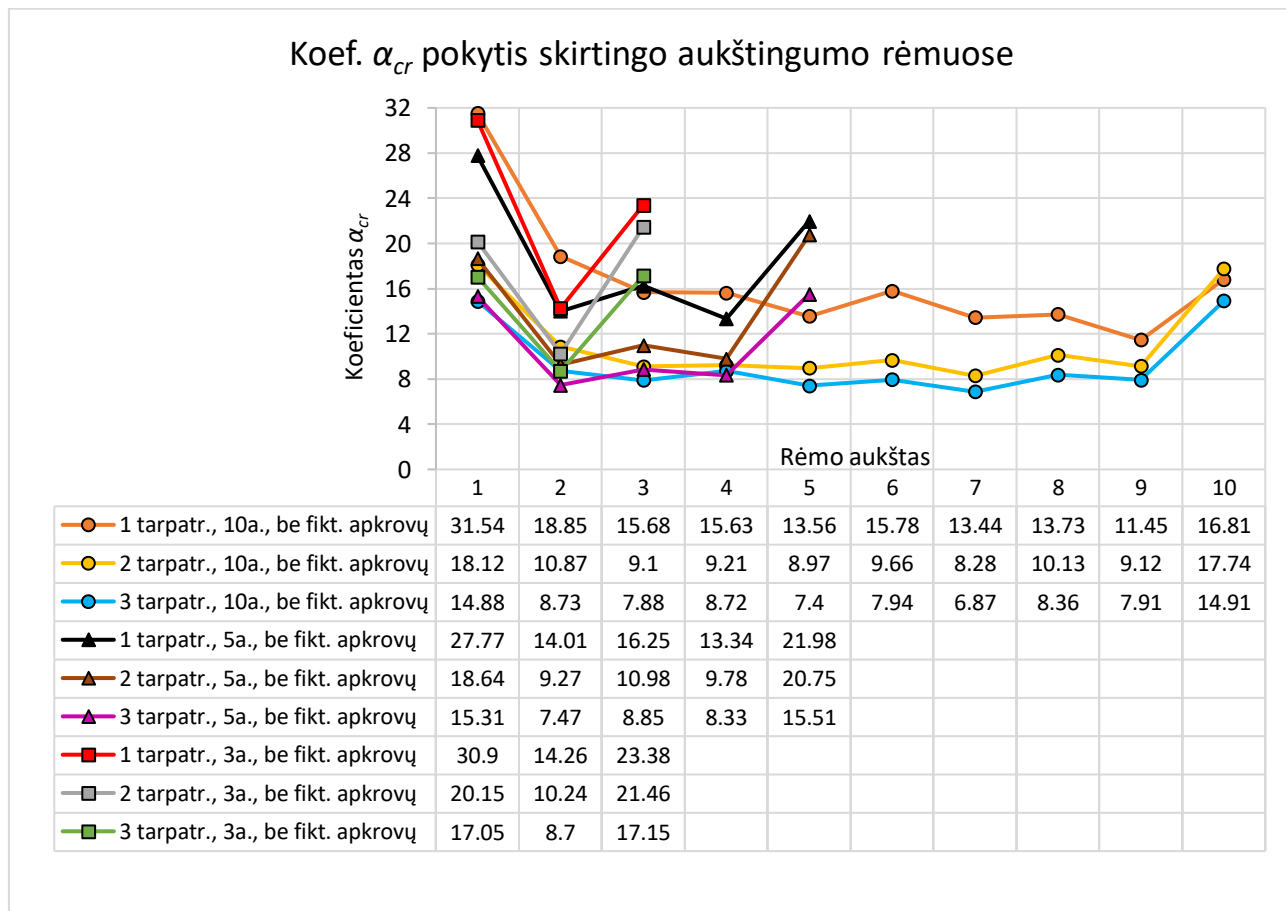
čia:

$FX = H_{Ed}$ – visuminė skaičiuotinė horizontalioji apkrova, įskaitant aukšto perduodamas lygiavertes jėgas;

$FZ = V_{Ed}$ – visuminė skaičiuotinė rėmą veikianti vertikalioji apkrova, kurią perduoda aukštas;

$drUX = \delta_{H,Ed}$ – aukšto viršaus horizontalusis poslinkis aukšto apačios atžvilgiu;

$H = h$ – aukšto aukštis.



4.5 pav. Koeficientų α_{cr} pokytis nevertinant fiktyvių apkrovų

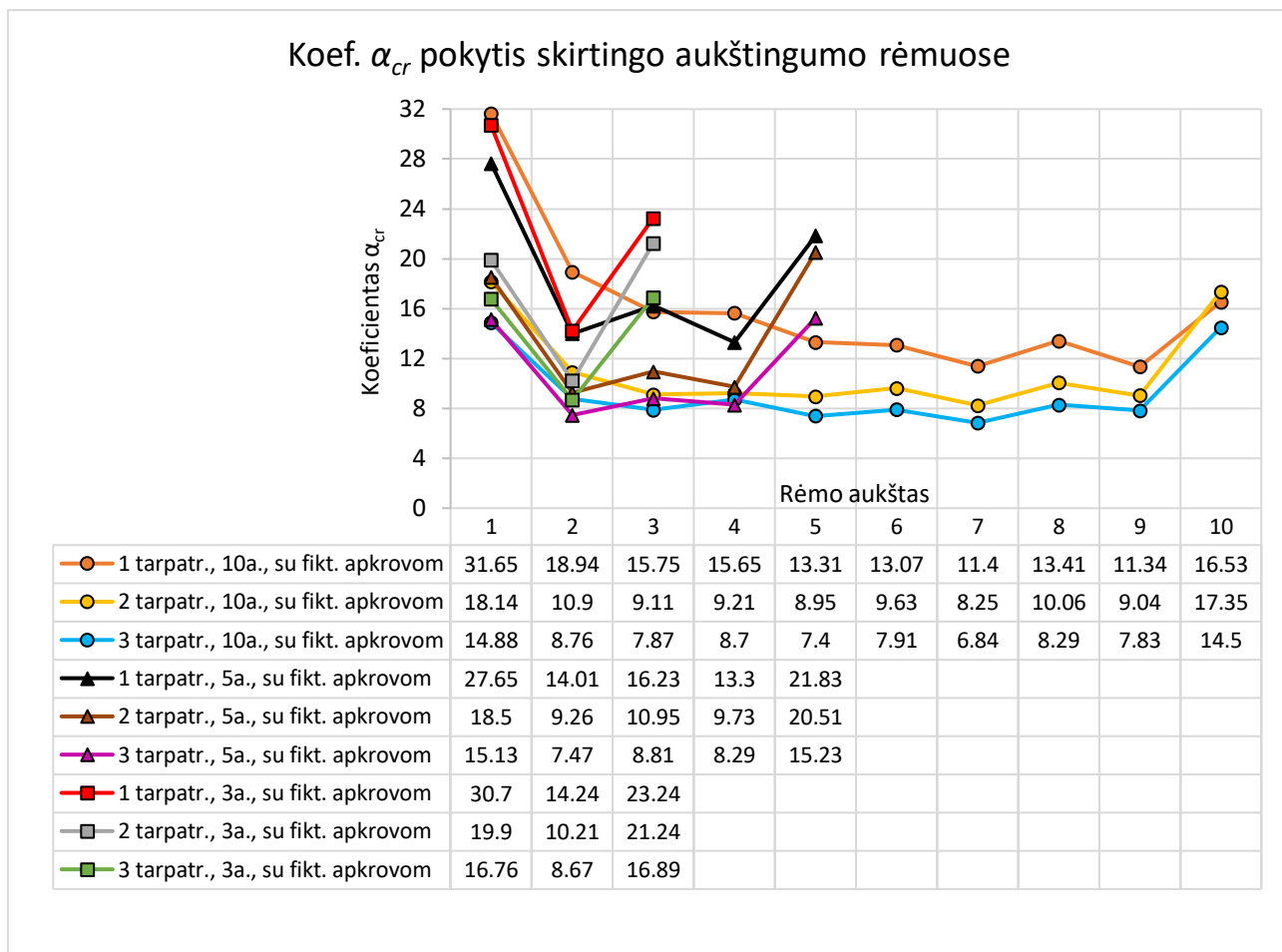
Kaip matome 4.5 pav., didžiausia koeficiento α_{cr} reikšmė yra rėmų apačioje (dėl standaus rėmo įtvirtinimo ir mažo poslinkio) ir viršuje (dėl mažų horizontalių ir vertikalų jėgų ir mažo aukštų poslinkių skirtumo). 10-ies aukštų rėmuose, tarp 3 ir 9 aukšto koeficientas α_{cr} pradeda šokinėti. Taip nutinka todėl, kad skaičiuojamosiose schemose (žr. 4.2-4.4 pav.) kolonų skerspjūviai kinta kas 2 aukštus, taip pakeičiant ir bendrą aukšto standumą.

Pagal EN 1993-1-1:2005 visiems 1-o tarpatramio ir 2-jų tarpatramių 3-jų aukštų rėmui galima netaikyti antrosios eilės analizės (visuose aukštuose koef. $\alpha_{cr} > 10$). 2-jų (išskyrus 3-jų aukštų rėmą) ir 3-jų tarpatramių rėmams jau reikia atlikti antrosios eilės analizę (keliuose aukštuose koef. $\alpha_{cr} < 10$). Kadangi visuose rėmuose $\alpha_{cr} \geq 3$ galima taikyti ir apytikrius metodus antrosios eilės poveikiams įvertinti, kurie detaliau išnagrinėti 2.2 poskyryje. Žinoma, nesvarbu, kokia yra koef. α_{cr} reikšmė, visada galima taikyti metodą A, tačiau tai atlikti tampa pernelyg sudėtinga, nes nustatyti tikslų elementų klumpamąjį ilgį sudėtingose konstrukcijose nėra paprasta. Tiriamajame darbe plieninių nesuvaržytų rėmų visuminei analizei pagal EN 1993-1-1:2005 atlikti taikomi 2 metodai. Pirmosios eilės analizei – metodas A, 1a (žr. 2.1 pav. ir 2.2.1 skyrelį), kuriame elementų klumpamasis ilgis parenkamas automatiškai BE programos, pagal bendrąją konstrukcijos klupumo formą. Antrosios eilės analizei – metodas B, 2a (žr. 2.1 pav. ir 2.2.2. skyrelį), kai atliekama antrosios eilės analizė ir elemento klumpamasis ilgis prilyginamas geometriniam elemento ilgiui.

Pagal būsimą Eurokodą 3 (prEN 1993-1-1:2015), antrosios eilės analizę reikia atlikti visiems rėmams (visuose tiriamųjų rėmų aukštuose koef. $\alpha_{cr} < 25$), tačiau visada galima naudoti alternatyvų metodą EM, bet jam galioja ta pati anksčiau aptartą problema kaip ir EN 1993-1-1:2005 metodui A, nes iš principo šie metodai vienodi. Kadangi tiriamieji rėmai yra nesuvaržyti, galima vadovautis prEN 1993-1-1:2015 7.2.1 (5) sąlyga, jei vidinių jėgų ir momentų prieaugis antrosios eilės analizėje yra ne didesnis nei 10 % lyginant su pirmosios eilės analizės skaičiavimais. Nevertinant pusiau standžių mazgų ši sąlyga yra tenkinama (žr. tolesnius skyrelius), todėl pagal prEN 1993-1-1:2015 antrosios eilės analizės taip pat galima netaikyti 1-o tarpatramio rėmams ir 2-jų tarpatramių 3-jų aukštų rėmui. Tiriamajame darbe plieninių, nesuvaržytų rėmų visuminei analizei pagal prEN 1993-1-1:2015 atlikti taip pat taikomi 2 analogiški metodai. Pirmosios eilės analizei – alternatyvus metodas EM (žr. 3.3 pav. ir 3.2 poskyrį), kuris yra identiškas EN 1993-1-1:2005 metodui A. Antrosios eilės analizei – metodas M3 (žr. 3.3 pav. ir 3.2 skyrelį), kai atliekant antrosios eilės analizę turi būti įvertinta geometrinių nuokrypos dėl pokrypio ir elemento klumpamasis ilgis prilyginamas geometriniam elemento ilgiui. Geometrinės nuokrypos įvertinamos tiriamuosiuose plieniniuose rėmuose pridedant fiktyvias apkrovas (žr. 4.1.1 skyrelį).

Pridėjus fiktyvias apkrovas, kuriomis įvertinamos plieninių rėmų geometrinių nuokrypos, 4.6 pav. esminių skirtumų koef. α_{cr} pokytyje nepastebima. Koeficientai α_{cr} pakinta nežymiai – didžiausias skirtumas, lyginant su tiriamaisiais rėmais be fiktyvių apkrovų, apie 2-3 %. Toks koef. α_{cr}

sumažėjimas yra nereikšmingas, todėl atliekamos visuminės analizės tipas išlieka toks pat, kaip ir aprašytas anksčiau.



4.6 pav. Koeficientų α_{cr} pokytis įvertinant fiktyvias apkrovas

Norint ištirti, ar teisingai koeficientas α_{cr} nustato analizės būdą, visiems tiriamiesiems rėmams atliekama netiesinė analizė ir gauti rezultatai palyginami su pirmosios eilės analizės rezultatais.

4.3.2. Tiriamųjų plieninių rėmų įrašų ir poslinkių palyginimas

Kaip jau buvo minėta anksčiau, pirmosios eilės plieninių, nesuvaržytų rėmų analizė atliekama pagal EN 1993-1-1:2005 metodą A, 1a (žr. 2.2.1 skyrelį) ir jam analogišką prEN 1993-1-1:2015 alternatyvų metodą EM (žr. 3.2 poskyrį). Skirtumo tarp šių metodų nėra.

Netiesinė analizė atliekama naudojant P- Δ efektus – įvertinant vertikalių jėgų ΣF sukeltus papildomus horizontalius poslinkius ir papildomas įrašas (žr. 1.2 poskyrį). Analizei atlikti naudojamas pilnas Newton-Raphson iteracinis apkrovos kontrolės metodas (žr. 4.7 lentelę).

Antrosios eilės plieninių, nesuvaržytų rėmų analizė atliekama pagal EN 1993-1-1:2005 metodą B, 2a (žr. 2.2.2 skyrelį) ir jam beveik analogišką prEN 1993-1-1:2015 metodą M3 (žr. 3.2 poskyrį). Skirtumas tarp šių metodų tik tas, kad, pagal naująjį Eurokodą 3 prEN 1993-1-1:2015, atliekant antrosios eilės analizę būtina įvertinti konstrukcijos nuokrypas dėl pokrypių. Todėl skaičiuojamųjų schemų, kuriose įvertintos fiktyvios apkrovos, rezultatų palyginimas ir išvados tinka ir pagal EN 1993-1-1:2005 ir pagal prEN 1993-1-1:2015. Rezultatų, gautų neįvertinus fiktyvių apkrovų, palyginimas tinka tik dabar galiojančiam EN 1993-1-1:2005.

4.7 lentelė. Apkrovos kontrolės metodai (*Robot Structural Analysis Professional*)

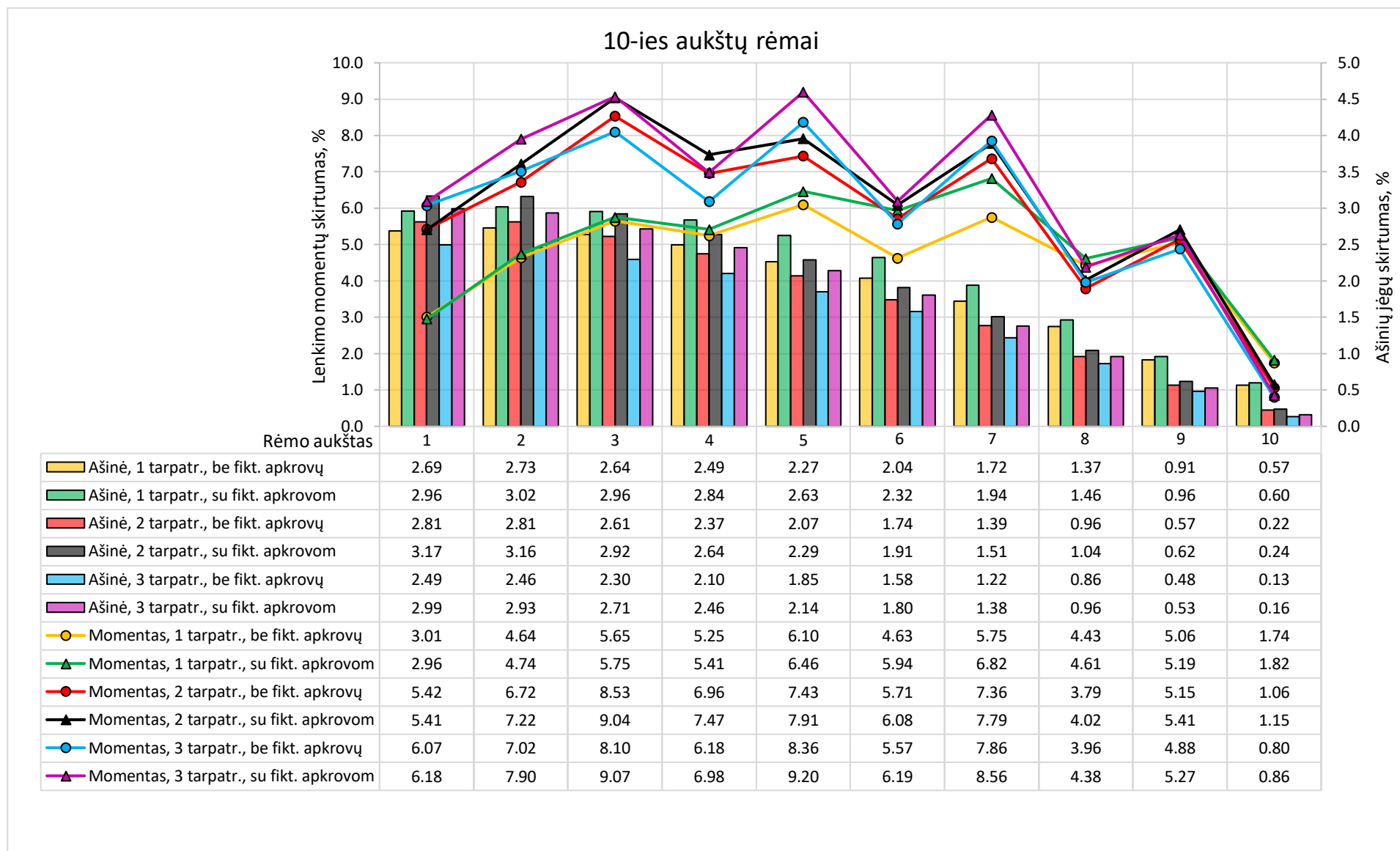
Skaičiavimo algoritmas	Matrica atnaujinama po kiekvieno padalijimo	Matrica atnaujinama po kiekvienos iteracijos
Pradinių įtempių metodas	Ne	Ne
Modifikuotas Newton-Raphson metodas	Taip	Ne
Pilnas Newton-Raphson metodas	Taip	Taip

Kiti apkrovos kontrolės metodo parametrai nekeičiami, naudojami numatyti BE programos (žr. 4.8 lentelę).

4.8 lentelė. Numatytieji apkrovos kontrolės metodo parametrai

Parametras	Reikšmė
Apkrovos prieaugių skaičius	5
Maksimalus iteracijų skaičius per vieną apkrovos prieaugį	40

Pirmosios ir antrosios eilės analizių rezultatų (poslinkių, įrašų) palyginimai pateikiami žemiau esančiuose grafikuose.



4.7 pav. 10-ies aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai

4.7 pav. pateikiama 10-ies aukštų rėmų (žr. 4.2-4.4 pav.) dešinės pusės kolonų lenkiamųjų momentų ir ašinių jėgų pokytis tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių. Dešinės pusės kolonos pasirinktos todėl, kad ten labiausiai pasireiškia netiesiškumas veikiant horizontalioms jėgoms iš kairės pusės.

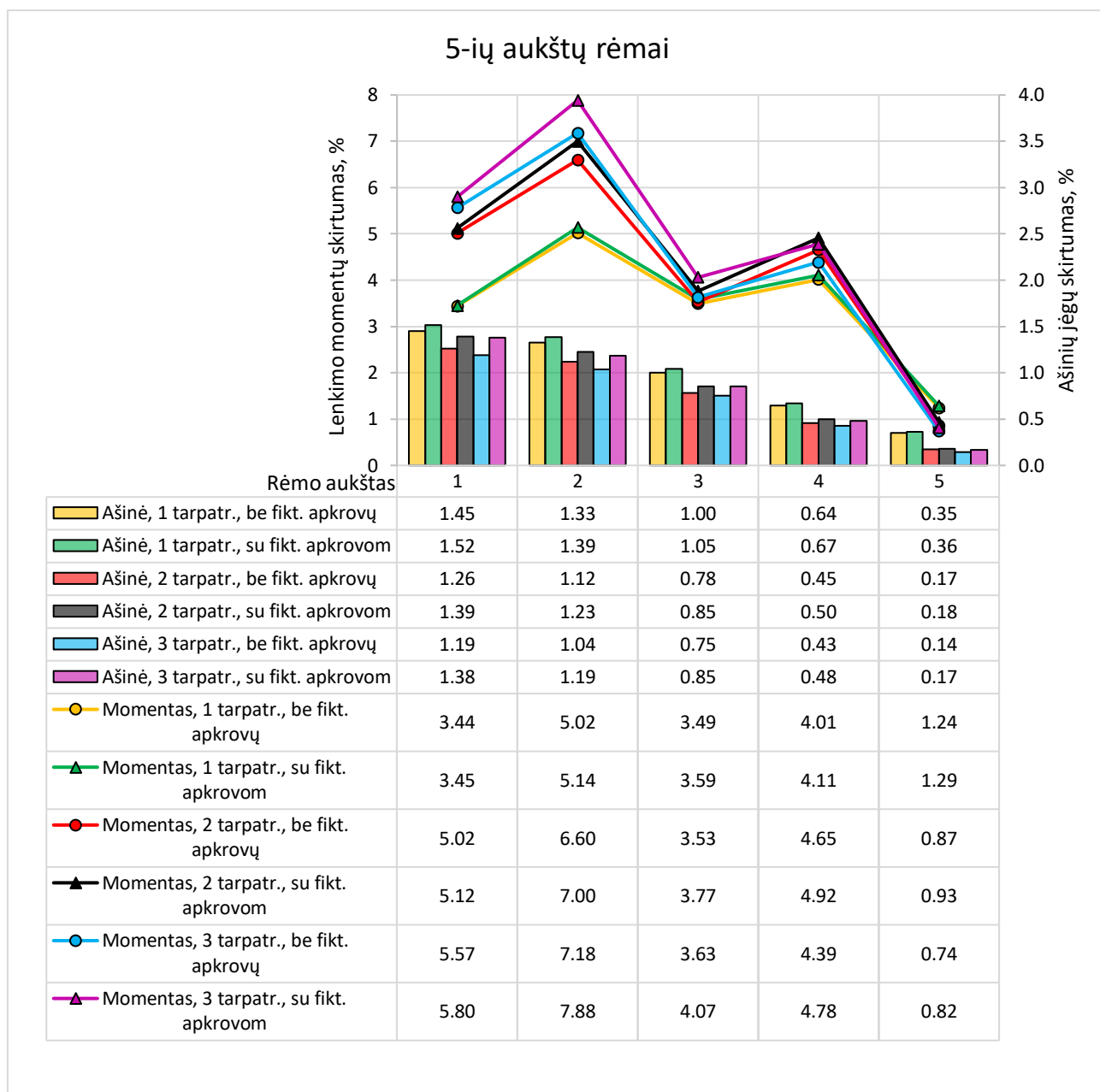
Ašinės jėgos atliekant netiesinę analizę padidėja nežymiai, išskyrus pirmus 5 pastato aukštus. Didžiausias padidėjimas – pirmame aukšte. Ten galima pastebėti didžiausią padidėjimą – nuo 2,5 iki 3 %. Bendruoju atveju galima teigti, kad netiesinė analizė neturi didelės įtakos ašinių jėgų pokyčiui. Verta pastebėti, kad 1-o tarpatramio rėmo viršutiniame aukšte ašinių jėgų prieaugis yra dvigubai didesnis nei 2-jų ir 3-jų aukštų rėmuose. Lyginant skaičiuojamųjų schemų ašinių jėgų skirtumo rezultatus be fiktyvių apkrovų ir su jomis, didelio skirtumo 1-o tarpatramio rėmuose nepastebiu ~0,2-0,3 %. Šiek tiek didesnis prieaugių skirtumas jau matomas 2-jų ir 3-jų tarpatramių rėmų pirmuosiuose aukštuose (~0,5 %).

Kaip matoma iš grafiko, didžiausias lenkiamųjų momentų pokytis pastebimas nuo 1-o iki 7-o aukšto ir 9-am aukšte (lenkiamieji momentai padidėja nuo 5 iki 9 %), išskyrus 1-o tarpatramio rėmus, ten didžiausias skirtumas nuo 2-o iki 7-o ir 9-am aukšte. 1-o tarpatramio rėme pastebimas ženkliai mažesnis lenkiamųjų momentų padidėjimas, kuris yra ~1,3, o vietomis ir 1,5 karto mažesnis. Tiesa, verta pastebėti, jog viršutiniame 1-o tarpatramio rėmo aukšte lenkiamųjų momentų skirtumas yra daugiau nei 1,5 karto didesnis, lyginant su kitais. Lyginant skaičiuojamųjų schemų lenkiamųjų momentų skirtumo rezultatus be fiktyvių apkrovų ir su jomis, reikšmingo skirtumo 1-o tarpatramio rėmuose nepastebima, skirtumas siekia ~0,2-0,3 %, o 2-jų ir 3-jų tarpatramių rėmuose skirtumas yra šiek tiek reikšmingesnis, kai kuriuose aukštuose siekia ~1 %. Galima daryti išvadą, kad skaičiuojant nesuvaržytas daugiaaukštes plienines strypines konstrukcijas, svarbu įvertinti geometrines nuokrypas tik dėl elementuose padidėjančių vidinių jėgų ir lenkiamųjų momentų. Pirmosios ir antrosios eilės analizių vidinių jėgų ir lenkiamųjų momentų pokyčiams fiktyvios apkrovos neturi reikšmingo poveikio.

Skirtumas tarp lenkiamųjų momentų ir ašinių jėgų prieaugių akivaizdus – beveik dvigubas. Prieš tai nustačius, kad pagal α_{cr} koeficientus antrosios eilės analizę reikia atlikti 2-jų ir 3-jų tarpatramių rėmams (pagal EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015), pasitvirtino.

Būsimas Eurokodas 3 prEN 1993-1-1:2015 nurodo, kad netiesinę analizę reikėtų atlikti ir 1-o tarpatramio rėmui. Žinoma, vadovaujantis sąlyga, jeigu vidinių jėgų ir momentų prieaugis antrosios eilės analizėje yra ne didesnis nei 10 % (prEN 1993-1-1:2015 7.2.1 (5)), antrosios eilės analizės galima ir neatlikti. Tačiau ~3-6 % skirtumas tarp lenkiamųjų momentų nors ir nėra didelis, bet rezultatų tikslumui reikšmingas, todėl rekomenduojama ir 1-o tarpatramio rėmui atlikti netiesinę analizę.

Neatlikus netiesinės analizės skaičiavimo rezultatai bus netikslūs ir tai gali lemti visos strypinės sistemos suirimą, todėl antrosios eilės analizę reikėtų atlikti tiek vadovaujantis dabartiniu (EN 1993-1-1:2005), tiek būsimu (prEN 1993-1-1:2015) Euro kodu 3.

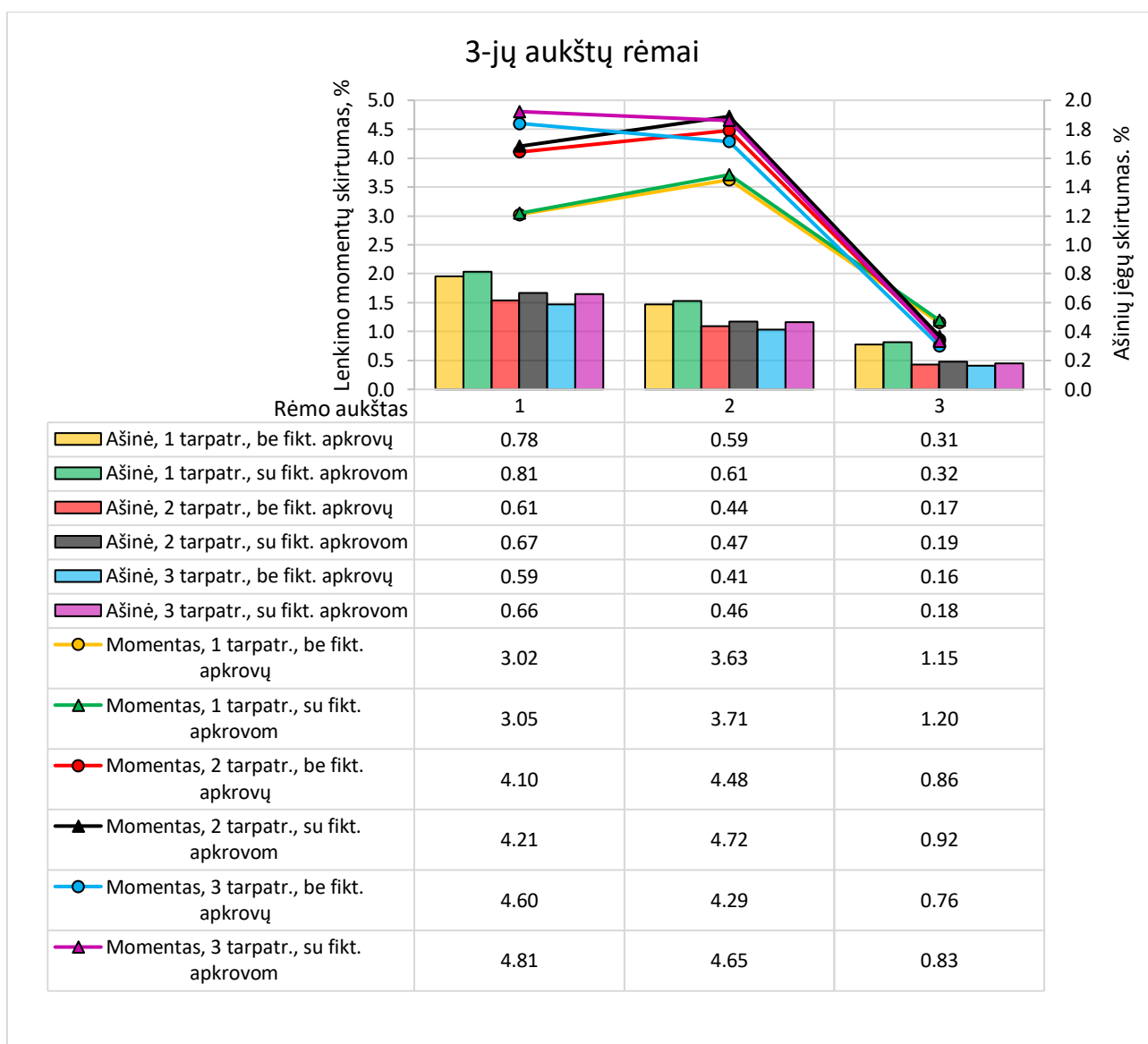


4.8 pav. 5-ių aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai

5-ių aukštų rėmuose (žr. 4.8 pav.) ašinių jėgų pokytis taip pat yra nedidelis. Didžiausias pokytis kaip visada atspindi būtent pirmame aukšte. Viršutiniame aukšte išlieka panaši situacija kaip ir 10-ies aukštų rėmuose – ašinių jėgų prieaugis dvigubai didesnis nei 2-jų ar 3-jų tarpatramių rėmuose. Lyginant skaičiuojamųjų schemų ašinių jėgų skirtumo rezultatus be fiktyvių apkrovų ir su jomis, didelio skirtumo nepastebima nei viename rėme, didžiausias skirtumas siekia ~0,2 %.

Kaip matoma grafike, didžiausias lenkiamųjų momentų pokytis pastebimas nuo 1-o iki 4-o aukšto, čia lenkiamieji momentai padidėja nuo ~5 iki ~8 %. Mažesnis lenkiamųjų momentų prieaugis pastebimas 1-o tarpatramio rėme ~3 %. Viršutiniame aukšte išlieka panaši situacija kaip ir 10-ies aukštų rėmuose – lenkiamųjų momentų prieaugiai 1-o tarpatramio rėme yra ~1,4 karto didesni nei kituose rėmuose. Lyginant skaičiuojamųjų schemų lenkiamųjų momentų skirtumo rezultatus be fiktyvių apkrovų ir su jomis, reikšmingo skirtumo nėra, todėl žemesniuose rėmuose galima ir nevertinti geometrinių nuokrypų (jeigu tai leidžia visuminės analizės metodas).

2-jų ir 3-jų tarpatramių rėmams išvados galioja tos pačios, kaip ir tiek pat tarpatramių turintiems 10-ies aukštų rėmams – netiesinę analizę būtina atlikti (kaip parodė prieš tai gauti koef. α_{cr}). Nors 1-o tarpatramio rėme esantis ~5 % skirtumas tarp lenkiamųjų momentų atrodytų yra reikšmingas, tačiau jis neturi realios įtakos dėl per mažų lenkiamųjų momentų reikšmių, todėl kaip ir buvo nustatyta anksčiau, šiam rėmui galima neatlikti antrosios eilės analizės.



4.9 pav. 3-jų aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai

3-ių aukštų rėmuose (žr. 4.9 pav.) pastebima tokie pat pokyčiai kaip ir 5-ių ir 10-ies aukštų rėmuose, tik yra mažesni procentiniai skirtumai tarp ašinių jėgų ir lenkiamųjų momentų. Skirtumai įvertinus ir neįvertinus fiktyvias jėgas yra nereikšmingi.

3-jų tarpatramių rėmui išvados galioja tos pačios, kaip ir tiek pat tarpatramių turintiems 5-ių ir 10-ies aukštų rėmams – netiesinę analizę būtina atlikti. 1-o tarpatramio rėme esantis ~3,5 % ir 2-jų tarpatramių ~4,5 % skirtumas tarp lenkiamųjų momentų nėra didelis ir reikšmingas (mažos lenkiamųjų momentų reikšmės), todėl kaip ir buvo nustatyta anksčiau, šiems rėmams galima netaikyti antrosios eilės analizės.

Norint geriau suprasti skirtumus tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių, reikia palyginti ir tiriamųjų rėmų poslinkius. Nors tiriamajame darbe nėra vertinamas tinkamumo ribinis būvis, tačiau skaičiuotinės poslinkių vertės (iš saugos ribinio būvio) yra naudojamos nustatyti koef. α_{cr} (pagal (2.3) ir (4.3) formules). Todėl 4.10 pav. pateikiama 10-ies aukštų rėmų horizontalių poslinkių atitinkamo aukšto viršuje skirtumas tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių.

Didžiausias poslinkių skirtumas yra 3-jų tarpatramių rėme. Čia jis viršutiniame aukšte pasiekia net 14,5 % skirtumą, tai yra išties didelis ir reikšmingas rodiklis. Poslinkių skirtumas didėja maždaug tolygiai, išskyrus aštuntame aukšte, ten jis šiek tiek šokteli į viršų dėl kolonų skerspjuvio pasikeitimo ties aukšto viršumi. Nors tiriamajame darbe nebuvo atsižvelgiama į tinkamumo ribinį būvį (SLS), tačiau galima teigti, jog projektuojant daugiaaukščius plieninius rėmus netiesinio skaičiavimo metu padidėję poslinkiai darytų smarkų poveikį visos konstrukcijos skaičiavimams. Todėl daugiaaukščiuose pastatuose elementų skerspjuvių parinkimą dažniausiai nulemia būtent tinkamumo ribinis būvis.

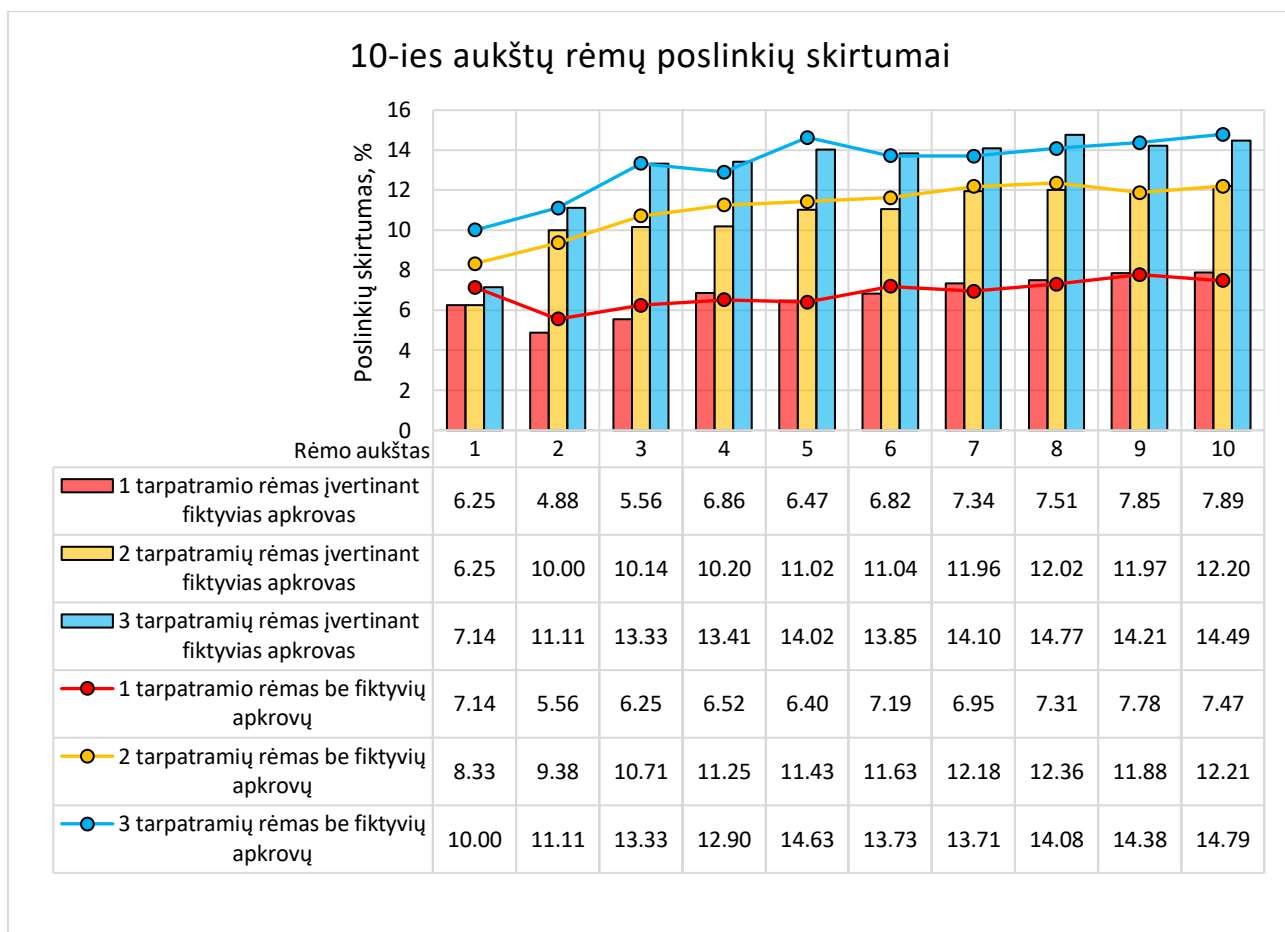
2-jų tarpatramių tiriamajame rėme poslinkių skirtumas sumažėja, lyginant su 3-jų tarpatramių rėmu, bet išlieka ir toliau didelis ir reikšmingas. Čia poslinkių skirtumas didėja tolygiau nei 3-jų tarpatramių rėme.

1-o tarpatramio rėmas išsiskiria iš kitų. Čia poslinkių skirtumas beveik visuose aukštuose (išskyrus antrą ir trečią) yra tolygus ir kintantis nežymiai. Čia poslinkių skirtumas yra ženkliai mažesnis, ~1,5 karto, lyginant su daugiau tarpatramių turinčiais rėmais.

Lyginant tiriamuosius rėmus su įvertintomis ir neįvertintomis fiktyviomis apkrovomis didelio skirtumo nepastebima, išskyrus dviejų ir trijų tarpatramių rėmus. Poslinkių skirtumas įvertinus fiktyvias apkrovas padidėja apie 2-3 %. Taip nutinka, nes pridėjus horizontalias fiktyvias apkrovas visa rėminė konstrukcija pasislenka ženkliai daugiau, o priartėjus prie atramos tas pokytis išryškėja labiausiai.

Taigi, kaip ir su prieš tai nagrinėtais lenkimo momentų ir ašinių jėgų skirtumais, čia taip pat matoma, jog antrosios eilės analizę būtina atlikti visiems 10-ies aukštų rėmams, nors anksčiau

nustatyti koef. α_{cr} leistų 1-o tarpatramio rėmui jos neatlikti. ~6-7 % poslinkio padidėjimas šiame rėme jau yra pernelyg reikšmingas. Panašus dėsningumas būtų pastebimas, jeigu būtų lyginami tinkamumo ribinio buvo poslinkiai. Jų pokytis būtų maždaug proporcingas, kaip ir saugos ribinio būvio poslinkių.

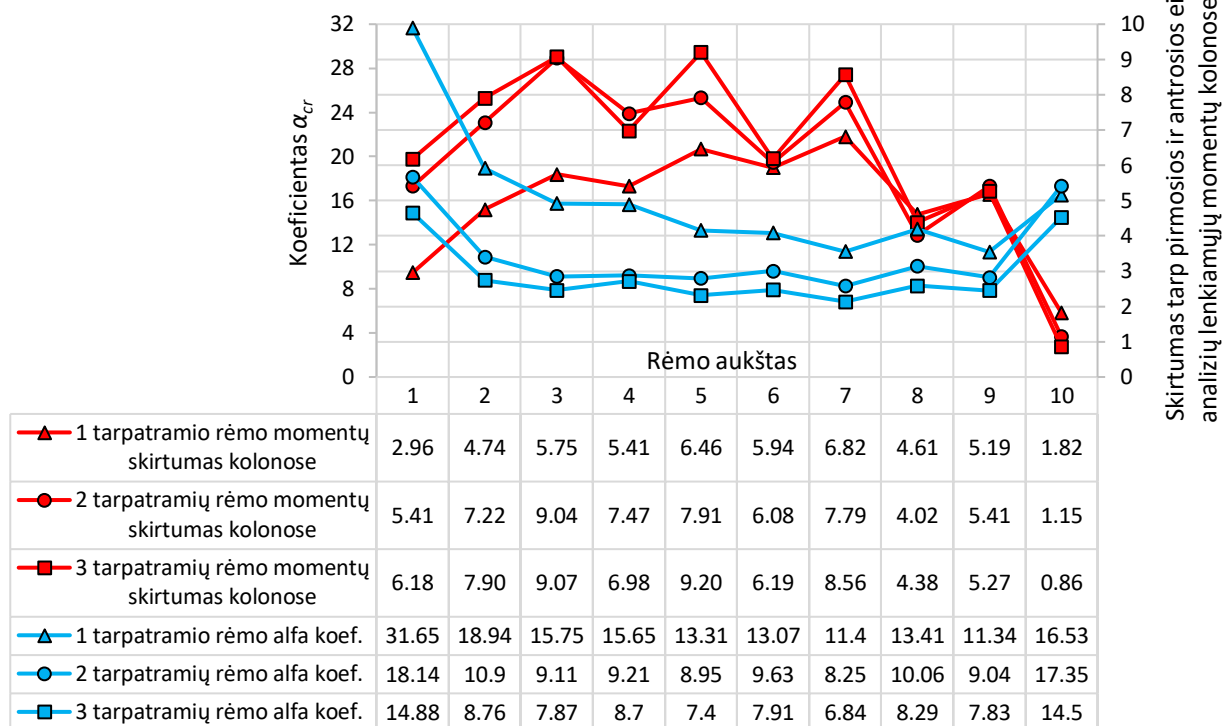


4.10 pav. 10-ies aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių poslinkių skirtumai

Išnagrinėjus visus aukščiau pateiktus grafikus, kyla klausimas, ar koef. α_{cr} turi ryšį su įrašų pokyčiais? Žvelgiant į 4.11 pav. galima pastebėti, kad ryšys yra. Grafike matoma jau prieš tai apžvelgta koef. α_{cr} kitimo kreivė 10-ies aukštų rėmuose įvertinant fiktyvias apkrovas. Lyginant ją su momentų priaugusių kreivėmis galima matyti, kad mažėjant koef. α_{cr} reikšmei, atitinkamai padidėja ir lenkiamųjų momentų skirtumas tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių. Kuo rėmas jautresnis antrosios eilės poveikiams, tuo momentų skirtumo kreivė stipriau reaguoja į koef. α_{cr} pasikeitimą. Koeficientui didėjant, skirtumas mažėja, o koeficientui sumažėjus skirtumas staigiai padidėja. Toks momentų skirtumo kreivės šokinėjimas geriausiai matomas jautriausiame rėme – 3-jų tarpatramių. Šis kreivės pokytis mažiau pastebimas 1-o tarpatramio rėme.

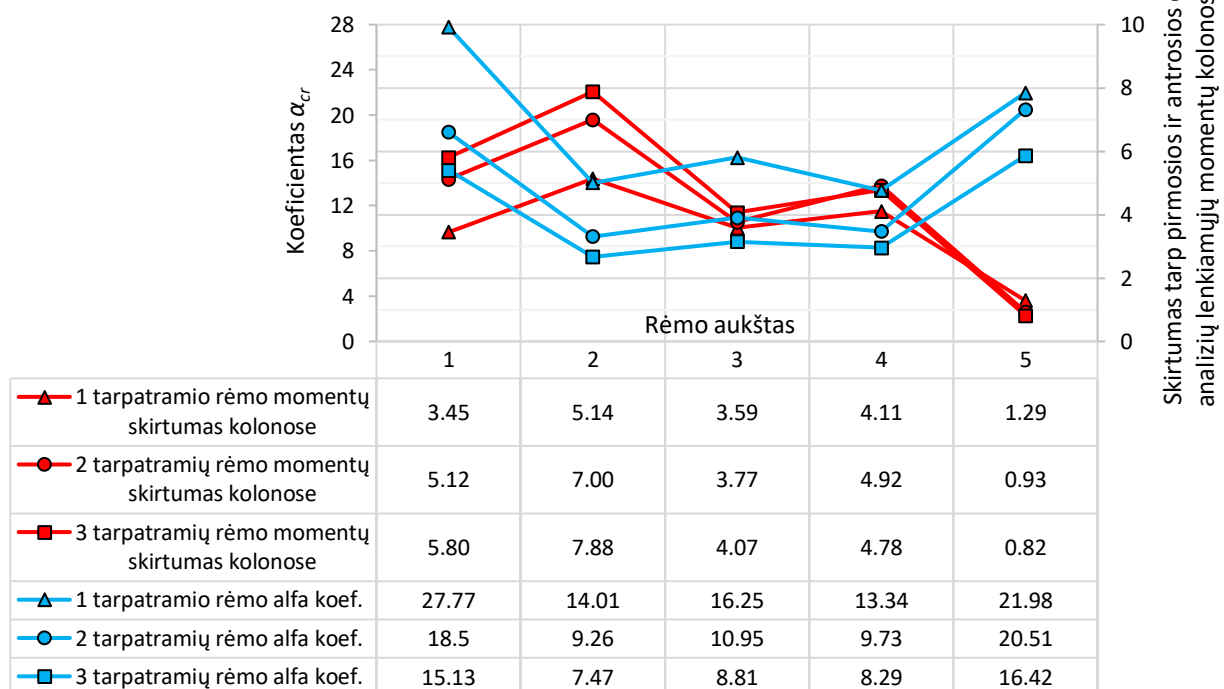
Panašus dėsningumas pastebimas ir 5-ių (žr. 4.12 pav.) ir 3-ių (žr. 4.13 pav.) aukštų rėmuose. Taigi, galima teigti, jog momentų skirtumas tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių tiriamuosiuose rėmuose iš dalies priklauso ir nuo koef. α_{cr} pokyčio.

Koef. α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose skirtumų pokyčiai

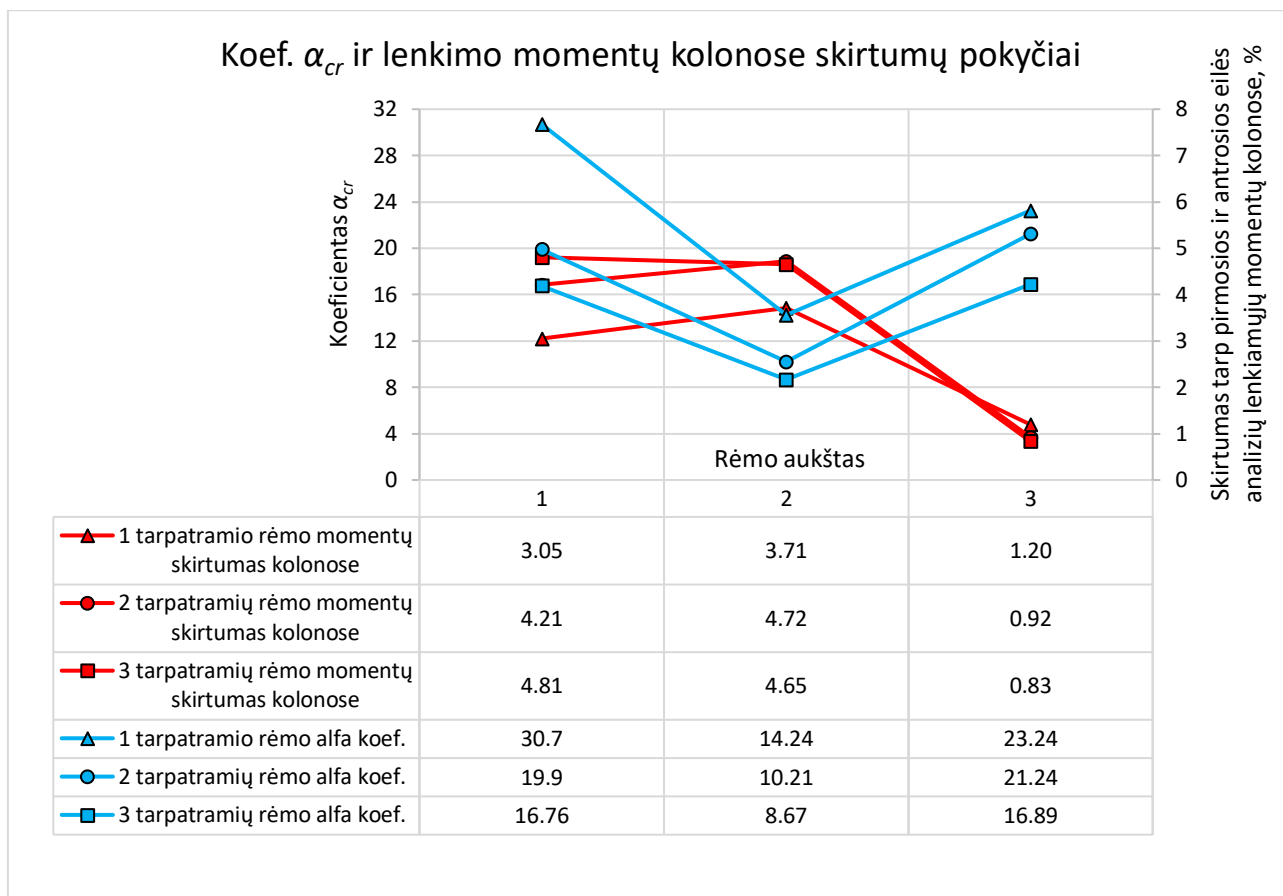


4.11 pav. Koeficiento α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose pokyčiai 10-ies aukštų rėmuose

Koef. α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose skirtumų pokyčiai



4.12 pav. Koeficiento α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose pokyčiai 5-ių aukštų rėmuose



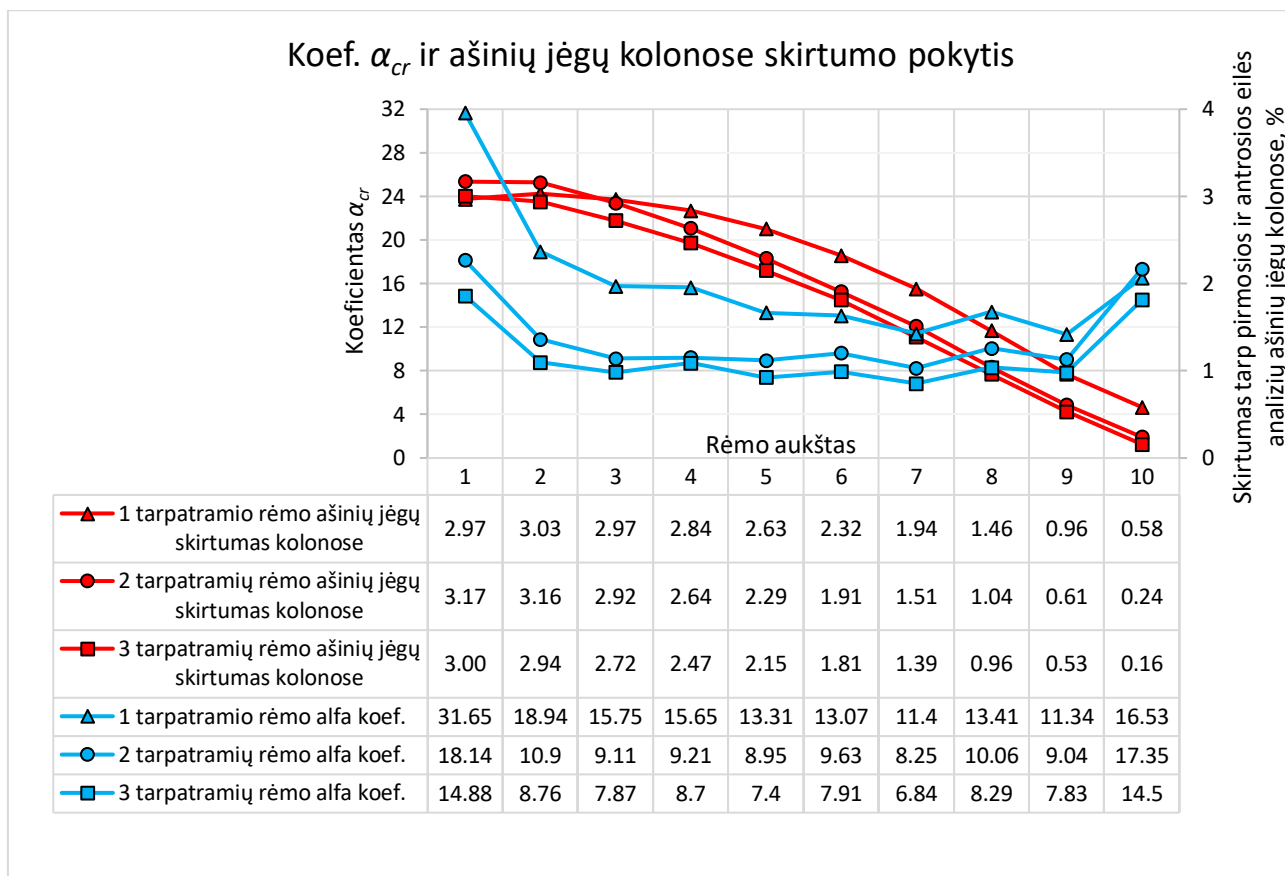
4.13 pav. Koeficiento α_{cr} ir lenkimo momentų kolonose pokyčiai 3-jų aukštų rėmuose

Nustačius dalinį sąryšį tarp lenkiamųjų momentų ir koef. α_{cr} būtina patikrinti, ar tai nepasikartoja ir su ašinėmis jėgomis.

4.14 pav., kaip ir prieš tai nagrinėjame (žr. 4.6 pav.), pateikiamos 10-ies aukštų rėmų koef. α_{cr} kitimo kreivė. Žvelgiant į grafiką galima daryti išvadą, kad ašinių jėgų skirtumas tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių neturi jokio sąryšio su koef. α_{cr} . Ašinių jėgų skirtumo kreivės staigių šuolių neturi, lyginant su lenkimo momentų kreivėmis, tolygiai mažėja ties viršutinių rėmų aukštais.

Skersinių jėgų skirtumai nėra apžvelgiami ir lyginami, kadangi jų pokytis kolonose tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių yra mažas (~0,5-3 %) ir neturi reikšmingos įtakos rezultatų tikslumui.

Galima teigti, kad vienintelis koef. α_{cr} turimas ryšys su įrašų prieaugių yra tik su lenkiamaisiais momentais. Ašinėms jėgoms ir poslinkiams koef. α_{cr} kitimas įtakos neturi.



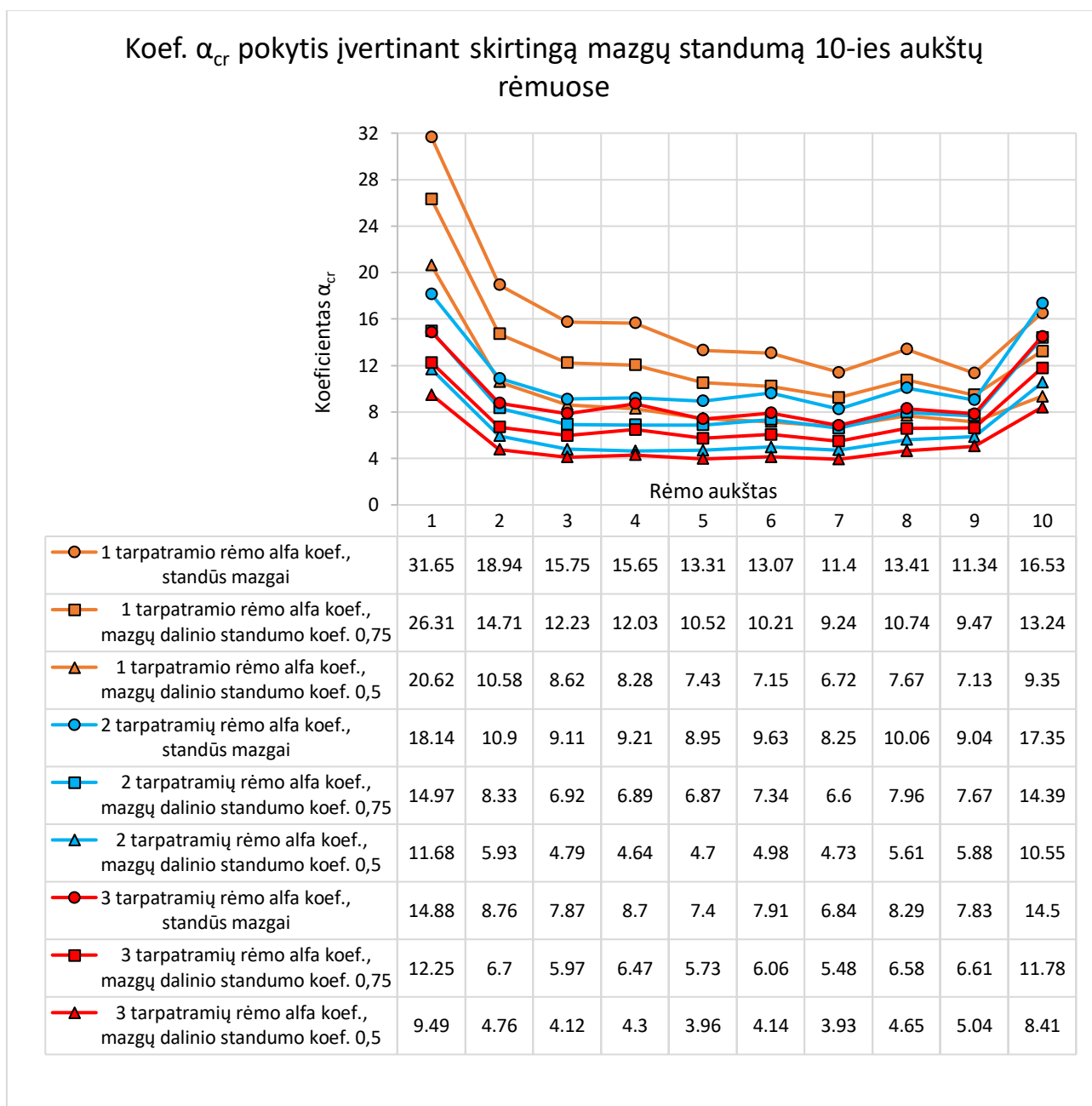
4.14 pav. Koeficiento α_{cr} ir ašinių jėgų kolonose pokytis 10-ies aukštų rėmuose

4.3.3. Pusiau standžių mazgų įtaka

Projektuojant rėmines konstrukcijas retai įvertinama tikroji mazgų elgsena, dažniausiai priimama, kad mazgai yra arba idealiai standūs, arba tariamai lankstūs, nors iš tiesų jie tokie nėra. Juolab projektuojant daugiaaukščius rėmus padaryti pilnai standžius mazgus yra labai sudėtinga. Standūs mazgai tokio tipo rėmuose būna neracionalūs ir sudėtingi. Realiose pastatuose tokie mazgai dažniausiai būna pusiau standūs, todėl svarbu išnagrinėti, kokį poveikį turi mazgo standis skaičiavimų rezultatams.

Šiam klausimui atsakyti nagrinėjami jau prieš tai aptarti 10-ies aukštų rėmai (žr. 4.2-4.4 pav.) įvertinant fiktyvias apkrovas. Skaičiuojamosiose schemose sijos-kolonos mazgams yra įvedama dalinio standumo koeficientas (koeficientas, kuriuo sumažinamas mazgo standis, čia 0 reiškia lankstų mazgą, o 1 – standų mazgą), kuriuo galima įvertinti pusiau standžius mazgus. 4.15 pav. pateikiama koef. α_{cr} pokytis 10-ies aukštų rėme įvertinant skirtingą mazgų standumą – pilnai standūs mazgai ir mazgai su įvestais 0,5 ir 0,75 dalinio standumo koeficientais. Kaip matoma iš grafiko, α_{cr} atitinkamai sumažėja visuose aukštuose įvertinus pusiau standžius mazgus. Didžiausias sumažėjimas pastebimas rėmuose, kuriuose dalinio standumo koeficientas lygus 0,5. Čia α_{cr} vidutiniškai sumažėjo ~43 %, nepriklausomai nuo tarpatramių skaičiaus koef. sumažėja maždaug vienodai. Rėmuose, kuriuose dalinio standumo koeficientas lygus 0,75, α_{cr} vidutiniškai sumažėjo ~21 %. Taip stipriai sumažėjus

koef. α_{cr} , anksčiau padarytos išvados dėl analizės tipų keičiasi. Tiek pagal dabartinį EN 1993-1-1:2005, tiek pagal būsimą Eurokodą 3 (prEN 1993-1-1:2015) netiesinę analizę reikia atlikti visiems 10-ies aukštų rėmams, kurių mazgų dalinio standumo koeficientas yra 0,5 ir 0,75. Žinoma, galioja tos pačios anksčiau nagrinėtos prielaidos apie kitų metodų taikymą, kaip pvz. lygiavertės kolonos (EN 1993-1-1:2005) arba analogiško lygiavertio elemento (prEN 1993-1-1:2015) metodo, kuriais galima apytikriai įvertinti antrosios eilės efektų sukeliamus pokyčius.



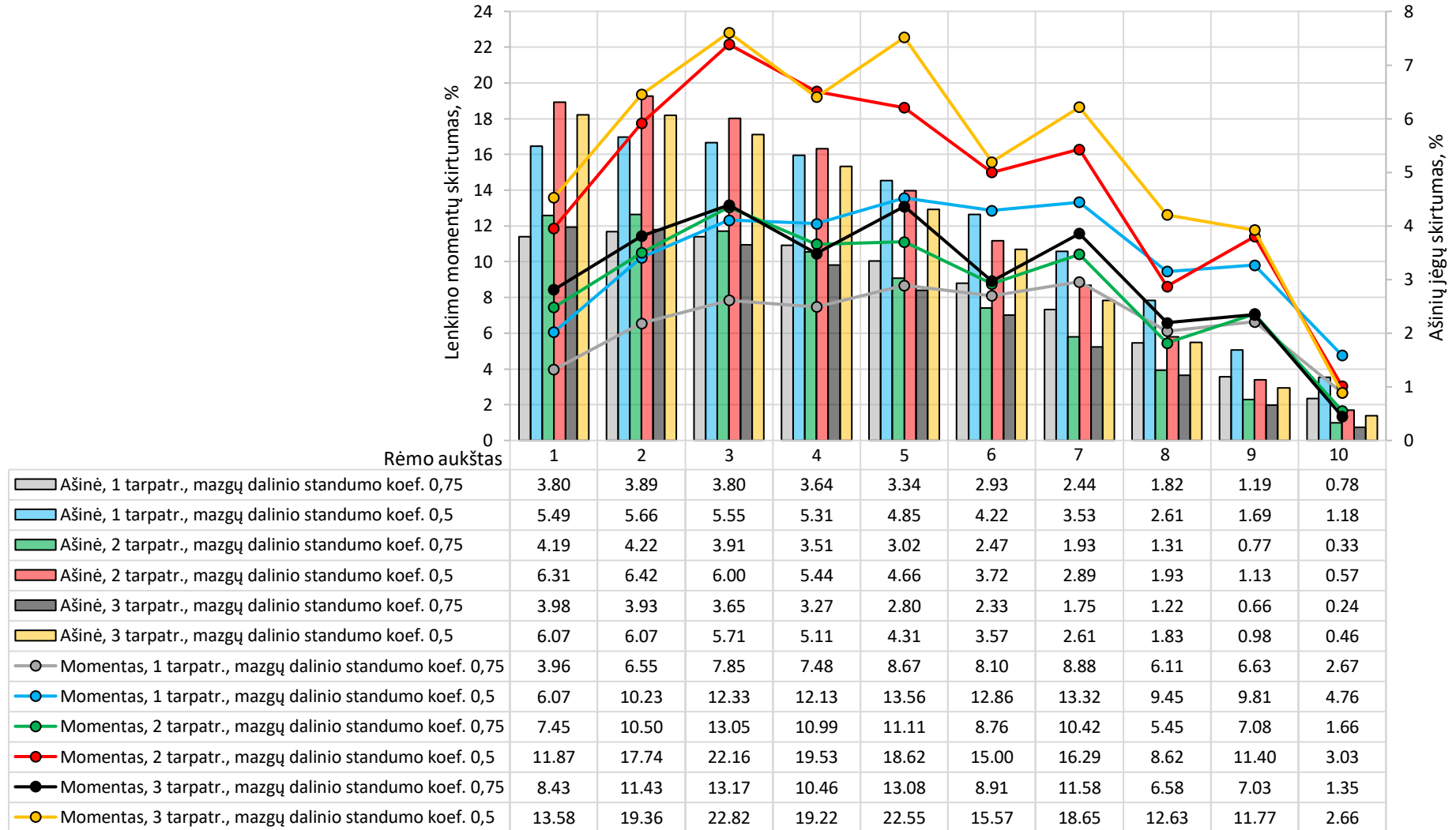
4.15 pav. Koeficiento α_{cr} pokytis 10-ies aukštų rėmuose, įvertinant skirtingą mazgų standumą

4.16 pav. pateikiama 10-ies aukštų rėmų (žr. 4.2-4.4 pav.) dešinės pusės kolonų lenkiamųjų momentų ir ašinių jėgų pokytis tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių, kai įvertinama skirtingo standumo sijos-kolonos mazgai.

Kaip matoma, situacija nesikeičia nuo standžių mazgų (žr. 4.7 pav.), didžiausi įrašų pokyčių skirtumai yra 3-jų tarpatramių rėme, mažiausi – 1-o tarpatramio rėme. Čia pastebima nemažai pakitimų su ašinėmis jėgomis. Jeigu 10-ies aukštų rėmuose su standžiais mazgais ašinių jėgų pokytis tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių daugiausiai siekė apie 3 %, čia pokytis pakyla net iki 6 %, o tai yra gan reikšmingas rodiklis. Didžiausias ašinių jėgų pokytis, kaip ir 10-ies aukštų rėmuose su standžiais mazgais, pastebimas 2-jų tarpatramių rėme, būtent ten jis antrame aukšte pakyla iki 6,42 %. Lyginant su rėmais su standžiais mazgais, 1-o tarpatramio rėme, įvedus dalinio standumo koeficientą 0,75, ašinių jėgų skirtumas vidutiniškai padidėjo apie 0,6 %, 2-jų tarpatramių rėme apie 0,62 %, o 3-jų tarpatramių rėme apie 0,58 %. Kaip matoma, didelių skirtumų, įvedus 0,75 dalinio standumo koeficientą sijos-kolonos mazgams, tarp ašinių jėgų pokyčio neįvyksta. Kitokia situacija jau pastebima sijos-kolonoms mazgams įvedus 0,5 dalinio standumo koeficientą. Čia 1-o tarpatramio rėme ašinių jėgų skirtumas vidutiniškai padidėja apie 1,8 %, 2-jų tarpatramių rėme apie 2 %, o 3-jų tarpatramių rėme apie 1,9 %, lyginant su rėmų su standžiais mazgais rezultatais (žr. 4.7 pav.). Kaip matoma, ašinių jėgų skirtumų padidėjimas yra maždaug proporcingas, tiek 0,75 dalinio standumo koeficiento atveju, tiek 0,5 koeficiento atveju. Todėl galima teigti, kad jis neturi sąryšio su tarpatramių skaičiumi ir padidėja maždaug proporcingai. Taigi, dėl mažesnių dalinio standumo koeficientų persiskirsčiusios rėmų įrašos sukelia ir šiek tiek didesnius ašinių jėgų skirtumų pokyčius. lyginant su pilnai standžiais mazgais.

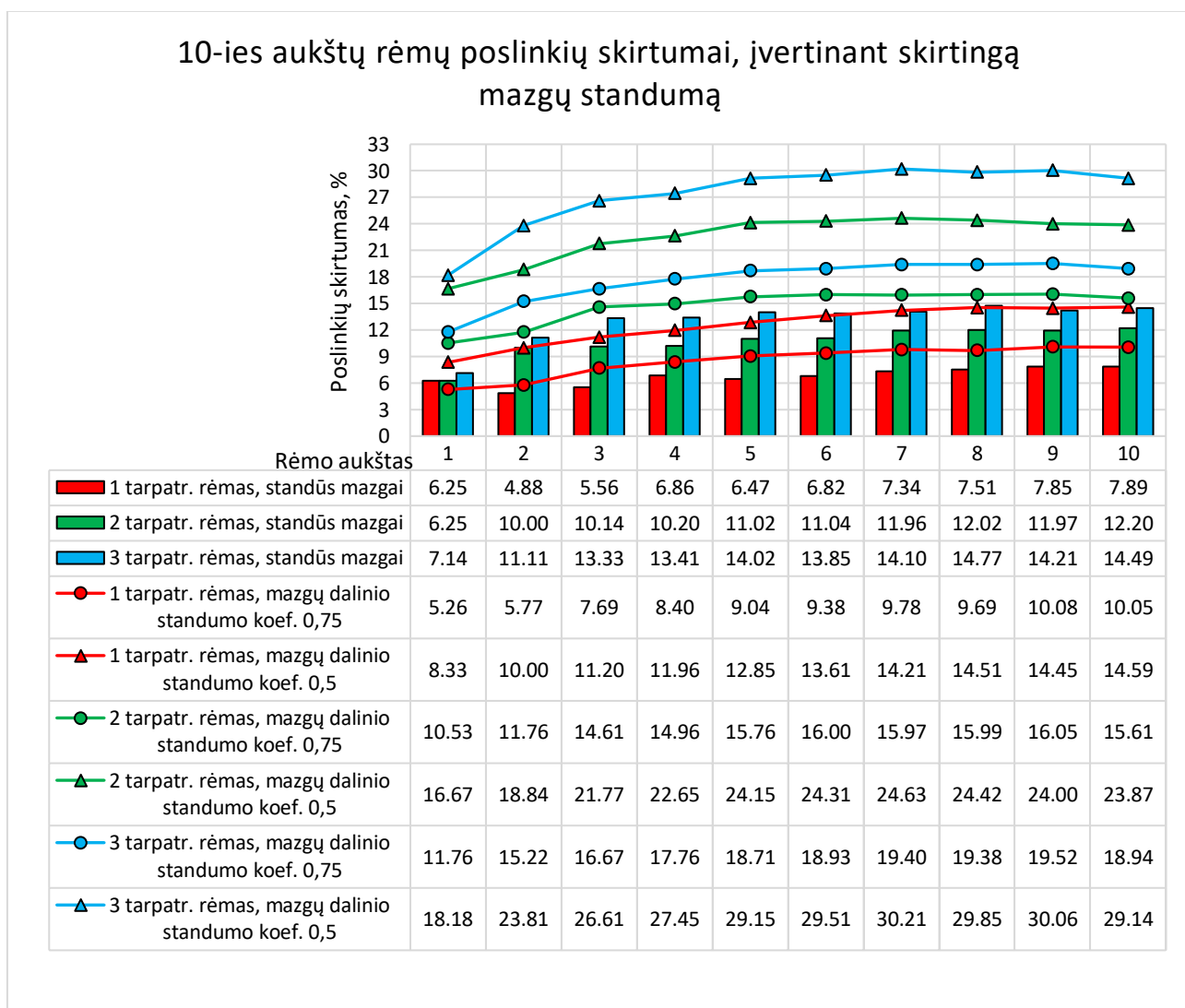
Panaši situacija įvyksta ir su lenkiamaisiais momentais. Lenkiamieji momentai, dėl pusiau standžių mazgų, kurie neperima dalies momento ir taip perskirsto įrašas pakito labai smarkiai. Didžiausi skirtumai pastebimi 3-jų tarpatramių rėme, ten lenkiamųjų momentų skirtumai 2-ame ir 4-ame aukšte peržengė net 22 %. Tai yra labai didelis pirmosios ir antrosios analizės lenkiamųjų momentų skirtumas, kuris neleidžia skaičiuojant koef. α_{cr} vadovautis 3.3 pav. pateikiama prEN 1993-1-1:2015 7.2.1 skyrelio (5) prielaida, todėl, kaip ir buvo nustatyta anksčiau, visiems rėmams su pusiau standžiais mazgais būtina atlikti antrosios eilės analizę. Lyginant su rėmais su standžiais mazgais, 1-o tarpatramio rėme, įvedus dalinio standumo koeficientą 0,75, lenkimo momentų skirtumas vidutiniškai padidėjo apie 1,7 %, 2-jų tarpatramių rėme apie 2,5 %, o 3-jų tarpatramių rėme apie 2,7 %. Kaip matoma, didelių skirtumų, įvedus 0,75 dalinio standumo koeficientą sijos-kolonos mazgams, tarp lenkimo momentų pokyčio neįvyksta. Kitokia situacija jau pastebima sijos-kolonoms mazgams įvedus 0,5 dalinio standumo koeficientą. Čia 1-o tarpatramio rėme lenkimo momentų skirtumas vidutiniškai padidėja apie 5,5 %, 2-jų tarpatramių rėme apie 8,3 %, o 3-jų tarpatramių rėme apie 9,4 %, lyginant su rėmų su standžiais mazgais rezultatais (žr. 4.7 pav.). Skirtumai tarp lenkiamųjų momentų pokyčių yra didesni, nes pusiau standūs mazgai perskirsto lenkiamuosius momentus visoje konstrukcijoje.

10-ies aukštų rėmai, įvertinant skirtingo standumo mazgus



4.16 pav. 10-ies aukštų rėmų pirmosios ir antrosios eilės analizių įrašų skirtumai, įvertinant dalinį mazgų standumą

Nemaži pokyčiai, žinoma, pastebimi ir tarp rėmų poslinkių nuo skaičiuotinių apkrovų, kai įvertinamas skirtingas mazgų standumas. Kaip matoma 4.17 pav., įvedus kolonos-sijos mazgui dalinio standumo koeficientą 0,75, poslinkių skirtumas 10-ies aukštų rėmuose įvertinus pusiau standžius mazgus vidutiniškai padidėja apie 1,8 % 1-o tarpatramio rėme, apie 4 % 2-jų tarpatramių rėme ir apie 4,6 % 3-jų tarpatramių rėme, lyginant su rėmų su standžiais mazgais. Dar didesnis pokytis įvyksta, kai kolonos-sijos mazgams įvedamas 0,5 dalinio standumo koeficientas. Čia bene didžiausias pokytis yra 3-jų tarpatramių rėme – net ~ 14,4 %, lyginant su standžiais kolonos-sijos mazgais ir ~9,8 % lyginant su dalinio standumo koeficientu 0,75. Tokie dideli poslinkių pokyčiai, žinoma, įvyksta dėl pasikeitusio viso rėmo aukšto standumo. Proporcingas pokytis būtų pastebimas ir tinkamumo ribinio būvio poslinkiuose, todėl projektuojant konstrukcijas su pusiau standžiais mazgais arba įvertinant tikrąją mazgų elgseną, privaloma visiems 10 aukštų rėmams atlikti antros eilės analizę, įvertinant P-Δ efektus. Tai pastebima ne tik prieš tai aptartame 4.15 pav., kuriame nustatytas koef. α_{cr} sumažėjimas, bet ir 4.17 pav., kuriame matomas didelis poslinkių skirtumo tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių padidėjimas įvertinant dalinį mazgų standumą.



4.17 pav. Poslinkių pokytis 10-ies aukštų rėmuose, įvertinant skirtingą mazgų standumą

4.4. Baigtinių elementų skaičiaus įtaka rezultatų tikslumui

Atliekant prie prieš tai išnagrinėtą tiriamąją dalį buvo priimtas 1 baigtinis elementas (toliau – BE). Visgi, siekiant tikslesnių rezultatų, reikėtų naudoti didesnę BE kiekį.

Norint išsiaiškinti, kokią įtaką BE elementų skaičius turi koef. α_{cr} tikslumui, atliekamas papildomas tyrimas. Tyrimui naudojamas trijų tarpatramių 5-ių aukštų rėmas (žr. 4.4 pav.), nes jis yra jautrus antrosios eilės poveikiams. Tiriamojo rėmo elementai (sijos ir kolonos) yra padalinami į 2, 3, 5 ir 10 BE, visos kitos skaičiavimų sąlygos išlieka tokios pat, kaip ir aptartos anksčiau.

4.9 lentelė. Koeficiento α_{cr} pokytis 5-ių aukštų rėme naudojant skirtingą BE kiekį

Tiriamasis rėmas	BE skaičius	Aukšto Nr.	α_{cr}	Koef. α_{cr} skirtumas, lyginant su 1 BE schema
3-jų tarpatramių, 5-ių aukštų rėmas (žr. 4.4 pav.), įvertinant fiktyvias apkrovas (žr. A priedo A.1 lentelę)	1	1	15,13	
		2	7,47	
		3	8,81	
		4	8,29	
		5	15,23	
	2	1	15,13	-
		2	7,47	-
		3	8,79	-0,02
		4	8,26	-0,03
		5	15,16	-0,07
	3	1	15,13	-
		2	7,46	-0,01
		3	8,79	-0,02
		4	8,26	-0,03
		5	15,14	-0,09
	5	1	15,13	-
		2	7,46	-0,01
		3	8,78	-0,03
		4	8,26	-0,03
		5	15,13	-0,10
	10	1	15,13	-
		2	7,46	-0,01

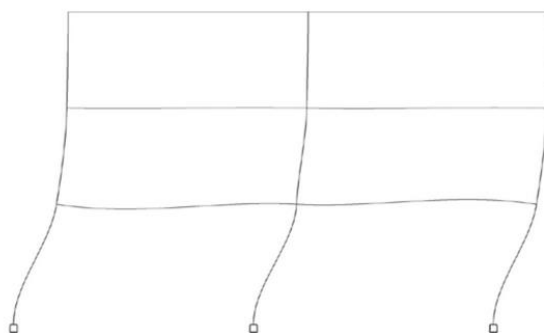
4.9 lentelės tęsinys. Koeficiento α_{cr} pokytis 5-ių aukštų rėme naudojant skirtingą BE kiekį

Tiriamasis rėmas	BE skaičius	Aukšto Nr.	α_{cr}	Koef. α_{cr} skirtumas, lyginant su 1 BE schema
		3	8,78	-0,03
		4	8,25	-0,04
		5	15,12	-0,011

4.9 lentelėje pateikiama, kaip kito koef. α_{cr} įvedus didesnę BE kiekį. Kaip matoma, didelio skirtumo 5-ių aukštų rėme įvedus daugiau BE nėra, išskyrus viršutinį aukštą. Žemesniuose aukštuose matomas nedidelis koef. skirtumas – sumažėjimas nuo 0,01 iki 0,03, kuris nekinta ir išlieka pastovus 2, 3 ir 5 BE rėmuose. Procentine išraiška pokytis būtų nuo 0,13 iki 0,36 %. Pirmajame aukšte pokyčių nėra. Didžiausias pokytis yra viršutiniame, 5-tame aukšte. Čia koef. α_{cr} , įvedus 10 BE, sumažėja 0,011 arba ~0,72 %. Tai yra nereikšmingas pokytis, kuris įvyksta, nes viršutiniame aukšte mažesnis horizontalių ir vertikalųjų jėgų santykis. Įvertinus daugiau BE, užtenka nedidelio rėmo viršaus pokyčio (šiuo atveju ~0,0003 m), kuris nulemia didesnę koef. α_{cr} sumažėjimą viršutiniame aukšte.

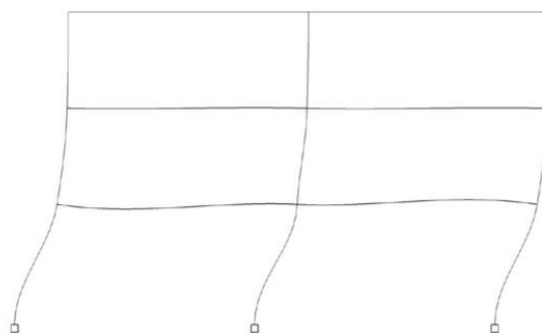
Prieš tai atliktiems skaičiavimams BE kiekis reikšmingų pokyčių neturi, kadangi visuose viršutiniuose aukštuose koef. α_{cr} yra ženkliai didesni ir jų sumažėjimas per 0,72 % tyrimo išvadų nepakeičia. Kadangi didelio skirtumo tarp 3-ių, 5-ių ir 10-ies BE nepastebima, siekiant tikslių rezultatų skaičiavimuose rekomenduojama naudoti didesnę BE, nei numatyta programoje (1 BE), kiekį – bent 3 baigtinius elementus.

Panašų tyrimą yra atlikęs R. Pimentelis (Pimentel, 2019). Savo tiriamajame darbe jis yra išskyręs dalį, kurioje aptariama BE skaičiaus įtaka suvaržyto ir nesuvaržyto rėmo stabilumui. Savo darbe jis tikrina dviejų tarpatramių 3-jų aukštų rėmą, veikiamą horizontalių ir vertikalųjų apkrovų (žr. 4.18 pav.). Koef. α_{cr} apskaičiuojami pagal anksčiau aptartą (žr. 2.1 poskyrį) EN 1993-1-1:2005 5.2 poskyrio (5.2) formulę.



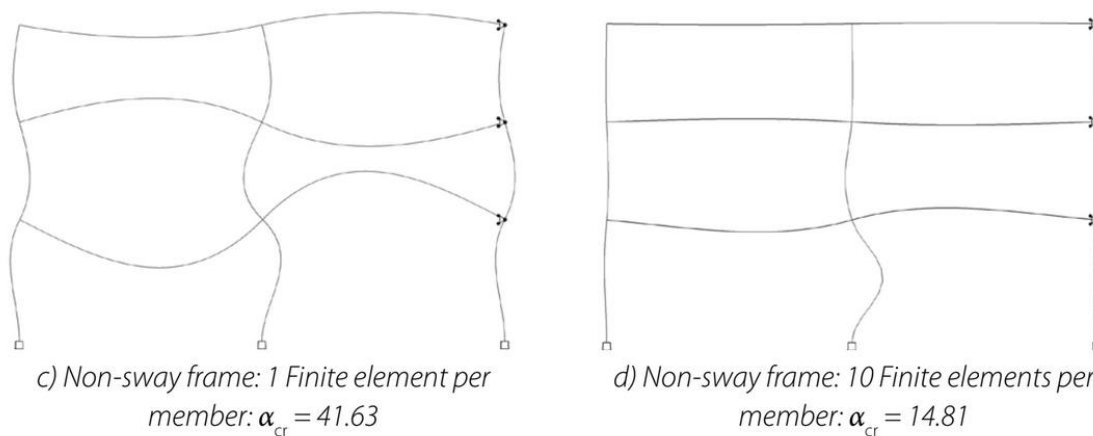
a) Sway frame: 1 Finite element per member:

$$\alpha_{cr} = 5.94$$



b) Sway frame: 10 Finite elements per member:

$$\alpha_{cr} = 5.87$$



4.18 pav. BE įtaka rėmo stabilumui: a) ir b) – nesuvaržytas rėmas; c) ir d) – suvaržytas rėmas (Pimentel, 2019)

Čia taip pat pastebima, kad nesuvaržytuose plieniniuose rėmuose BE skaičius rezultatų smarkiai nepakeičia, jie pakinta $\sim 1,2$ %. Tuo tarpu visiškai kitaip atrodo suvaržytas rėmas, čia didesnis BE skaičius koef. α_{cr} sumažina net 64,4 %. Tai yra labai didelis ir reikšmingas skirtumas, į kurį būtina atsižvelgti atliekant visuminę suvaržytų rėmų analizę ir skaičiavimams taikyti didesnę BE kiekį.

Pats R. Pimentelis teigia, kad baigtinių elementų kiekis atliekant skaičiavimus yra svarbus ir skaičiavimuose elementus taip pat rekomenduoja padalinti bent į 3 baigtinius elementus (Pimentel, 2019).

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

Atlikus nesuvaržytų plieninių rėmų visuminės analizės lyginamąjį parametrinį tyrimą pateikiamos tokios išvados ir pasiūlymai:

- 1) Atlikus EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 palyginimą, nustatyti keli reikšmingi skirtumai. Naujajame Eurokode 3 prEN 1993-1-1:2015 koeficiento α_{cr} riba padidinta iki 25 (dabartiniame Eurokode 3 – 10(15)). Taigi, įsigaliojus naujam Eurokodui 3 prEN 1993-1-1:2015, pirmosios eilės analizę bus galima taikyti mažesniai kiekiui plieninių konstrukcijų.
- 2) Nors pagal prEN 1993-1-1:2015 didžiajai daugumai konstrukcijų reikės atlikti antrosios eilės analizę, išliks ir lygiaverčio elemento (EN 1993-1-1:2005 – lygiavertės kolonos) metodas, kuriuo galima atlikti pirmosios eilės visuminę analizę neatsižvelgiant į koeficiento α_{cr} reikšmę.
- 3) Tiriamajame darbe naudoti visuminės analizės metodai pagal EN 1993-1-1:2005 ir prEN 1993-1-1:2015 (žr. 4.3.2 skyrelį) yra racionalūs nesuvaržytų plieninių rėmų visuminei analizei atlikti. Tačiau projektuotojams vis tiek labai svarbu tiksliai mokėti visą konstrukcijų visuminės analizės algoritmą, kuris būsimajame Eurokode 3 prEN 1993-1-1:2015 pateikiamas schematiškai (žr. 3.3 pav.).
- 4) Koeficiento α_{cr} reikšmės tiksliai parodo, kada taikyti pirmosios, o kada antrosios eilės analizę nesuvaržytiems plieniniams rėmams pagal dabartinį Eurokodą 3 EN 1993-1-1:2005 ir būsimąjį prEN 1993-1-1:2015. Pastebėta, jog koeficientas α_{cr} turi tam tikrą ryšį su lenkiamųjų momentų skirtumu tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių nesuvaržytuose plieniniuose rėmuose – mažėjant koeficientui α_{cr} , atitinkamai padidėja lenkiamųjų momentų pokytis ir atvirkščiai. Tokio sąryšio nepastebima su ašinių jėgų pokyčiu.
- 5) Geometrinių nuokrypų įvertinimas pagal EN 1993-1-1:2005, pridedant fiktyvias apkrovas, reikšmingos įtakos nesuvaržytų plieninių rėmų vidinių jėgų ir momentų bei SRB poslinkių pokyčiams tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių neturi. Rezultatai pakinta (padidėja) ~2-3 % lyginant su pirmosios ir antrosios eilės analizių, neįvertinus fiktyvių apkrovų, rezultatais, o tai nėra reikšmingas pokytis. Šis padidėjimas proporcingai būtų dar mažesnis, jei taikytume mažesnes geometrines nuokrypas pagal prEN 1993-1-1:2015.
- 6) Skaičiuojant plienines konstrukcijas būtina įvertinti ne tik tikrąją mazgų elgseną, bet ir atitinkamai atsižvelgti į tai, kad konstrukcijoje įvedus pusiau standžius mazgus ženkliai sumažėja koeficientai α_{cr} , todėl visada reikia atlikti antrosios eilės analizę. Tyrimo metu pastebėta, kad įvedus dalinį standumo koeficientą nesuvaržytų plieninių rėmų mazgams, koeficientas α_{cr} sumažėjo ~20-40 %. Lenkiamųjų momentų skirtumai, lyginant su rėmais su standžiais mazgais, vidutiniškai padidėjo nuo 5,5 iki 9,4 %, todėl bendrasis vidinių jėgų pokytis tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių kai kuriuose aukštuose siekia net 22 %, o tai labai reikšmingas skirtumas.

- 7) Parametrinis tyrimas parodė, kad, siekiant tikslesnių rezultatų, nesuvaržytų plieninių rėmų elementus rekomenduojama padalinti bent į 3 baigtinius elementus. Tai sutampa ir su R. Pimentelio pasiūlyta rekomendacija (Pimentel, 2019). Elementus padalinus į daugiau BE visuminės analizės skaičiavimo rezultatai pakinta labai nežymiai.
- 8) Rekomenduojama daugiaaukščiams nesuvaržytiems plieniniams rėmams ir pagal dabartinį Eurokodą 3 EN 1993-1-1:2005, ir pagal būsimąjį prEN 1993-1-1:2015 atlikti antrosios eilės analizę, nes vidinių jėgų ir lenkiamųjų momentų skirtumas tarp pirmosios ir antrosios eilės analizių yra reikšmingas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Boissonnade, N., Greiner, R., Jaspart, J. P. and Lindner, J. (2006). *Rules for member stability in EN 1993-1-1. Background documentation and design guidelines* (1st ed.). Brussels: ECCS Publications.

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

C. T. Gomes, F. (2002). *The EC3 classification of joints and alternative proposals*. Coimbra:Conference EUROSTEEL 2002.

EN 1993-1-1:2005/AC:2009 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. CEN, Brussels, 2005.

EN 1993-1-8:2005+AC:2006 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-8 dalis. Mazgų projektavimas*. CEN, Brussels, 2005.

Faella, C., Piluso, V. and Rizzano, G. (2000). *Structural steel semirigid connections: theory, design and software*. Boca Raton: CRC.

Faridmehr, I., Tahir, Mamood Md, and Lahmer, T. (2016). Classification System for Semi-Rigid Beam-to-Column Connections. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13(11), 2152–2175. DOI: [10.1590/1679-78252595](https://doi.org/10.1590/1679-78252595)

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

Kindmann, R. and Kraus, M. (2011). *Steel Structures Design using FEM*. Berlin:Ernst & Sohn.

Knobloch, M., Bureau, A., Kuhlmann, U., da Silva, L.S., Snijder, H. H., Taras, A., Bours, A.-L. and Jörg, F. (2020). Structural member stability verification in the new Part 1-1 of the second generation of Eurocode 3. Part 1: Evolution of Eurocodes, background to partial factors, cross-section classification and structural analysis. *Steel Construction*, 13: 98-113. DOI: [10.1002/stco.202000016](https://doi.org/10.1002/stco.202000016).

Kuhlmann, U. and Schmidt-Rasche, C. (2017). Next generation of Eurocode 3 – Evolution by improvements and harmonization. *ce/papers*, 1: 497-506. DOI: [10.1002/cepa.549](https://doi.org/10.1002/cepa.549).

Nageim, H. K. Al and Macginley, T. J. (2005). *Steel Structures. Practical design studies* (3rd ed.). USA and Canada:Taylor & Francis Group.

Pimentel, R. (2019). *Stability and second-order effects on steel structures: Part 1: fundamental behavior*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/339713356_Stability_and_second-order_effects_on_steel_structures_Part_1_fundamental_behaviour

Pimentel, R. (2019). *Stability and second order effects on steel structures: Part 2: design according to Eurocode 3*. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/339713420_Stability_and_second_order_effects_on_steel_structures_Part_2_design_according_to_Eurocode_3

prEN 1993-1-1:2015 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Doc. CEN-TC250-SC3_N3023.

Silva, Andréa R. D., Batelo, Everton A. P., Silveira, Ricardo A. M., Neves, Francisco A. and Gonçalves, Paulo B. (2018). On the Nonlinear Transient Analysis of Planar Steel Frames with Semi-Rigid Connections: From Fundamentals to Algorithms and Numerical Studies. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 15(3), e28. Epub May 03, 2018. DOI: [10.1590/1679-78254087](https://doi.org/10.1590/1679-78254087).

Simões da Silva, L., Simões, R. and Gervásio, H. (2013). *Design of steel structures* (1st ed., revised 2nd impression). Mem Martins: Multicomp Lda.

Snijder, H. H. (2017). Recent developments regarding the next version of Eurocode 3 Part 1-1 on steel structures. *ce/papers*, 1: 515-538. DOI: [10.1002/cepa.551](https://doi.org/10.1002/cepa.551).

Snijder, H. H., Spoorenberg, R. C., Cajot, L. G. and May, M. S. (2013). Experimental investigation on residual stresses in heavy wide flange QST steel sections. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 89, pp. 63-74.

Snijder, H. H., Spoorenberg R. C., Cajot, L. G. and Popa, N. (2014). Buckling curves for heavy wide flange QST columns based on statistical evaluation. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 101, pp. 280-289.

STR 2.05.08:2005 *Plieninių konstrukcijų projektavimas. Pagrindinės nuostatos*. 2007.

Urbonas, K. (2006). *Plieninių konstrukcijų pasiduošančių mazgų modeliavimo ir projektavimo metodų kūrimas*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Prieiga per internetą: <https://vb.vgtu.lt/object/elaba:1838978/>.

Vayas, I., Ermopoulos, J. and Ioannidis, G. (2019). *Design of Steel Structures to Eurocodes*. Switzerland: Springer International Publishing.

Yoo, C. and Lee, S. (2011). *Stability of structures: principles and applications* (1st ed.). Burlington: Butterworth-Heinemann.

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