



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Naglis Elenbergas

NESUVARŽYTŲ RĖMŲ PROJEKTAVIMO METODŲ ANALIZĖ

ANALYSIS OF SWAY FRAMES DESIGN METHODS

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)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

(Data)

Naglis Elenbergas

NESUVARŽYTŲ RĖMŲ PROJEKTAVIMO METODŲ ANALIZĖ

ANALYSIS OF SWAY FRAMES DESIGN METHODS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos T 002 studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Kestutis Urbonas

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Lina Rutkienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2021

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Nesuvaržytų rėmų projektavimo metodų analizė
Autorius	Naglis Elenbergas
Vadovas	Kęstutis Urbonas
Kalba: lietuvių	
Anotacija Magistro baigiamajame darbe nagrinėjami nesuvaržytų plieninių rėmų projektavimo metodai pagal LST EN 1993-1-1. Tiriamąjį darbą sudaro trys skyriai. Pirmajame skyriuje aptariama nagrinėjamo objekto samprata, aprašomi suvaržytų ir nesuvaržytų rėmų apibrėžimai ir paaiškinami skirtumai, nurodoma, kas yra standus ir dalinio standžio mazgas, jų reikšmė visai konstrukcijos elgsenai. Taip pat aptariamos plieninių elementų geometrinės nuokrypos, jų įvertinimo metodai ir būtinybė. Antrajame skyriuje aptariami rėminės konstrukcijos analizių variantai, aprašomi pirmosios ir antrosios eilės analizės ypatumai. Dar šiame skyriuje pateikiami visuminės rėmo analizės taikymo metodai, aiškinamas jų pritaikomumas ir rezultatų tikslumas, paaiškinamas reikiamo metodo pasirinkimo algoritmas. Taip pat aprašoma, kaip kompiuterinės baigtinių elementų metodu pagrįstos programos atlieka iteracinę konstrukcijos antrosios eilės skaičiavimą. Trečiajame skyriuje atliekami praktiniai plieninių įvairaus aukštingumo nesuvaržytų rėmų skaičiavimai, įvertinant geometrines nuokrypas, įvedant dalinį sukamąjį mazgų standį ar abu šiuos aspektus kartu. Lyginami alfa kritinių koeficientų (jautrumo antros eilės efektams), irąžų bei poslinkių, gautų skirtingais visuminės analizės metodais rezultatai. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados. Darbo apimtis - 78p. teksto be priedų, 47 paveikslai, 13 lentelių, 20 bibliografinių šaltinių.	
Prasminiai žodžiai: nesuvaržytas rėmas, antrosios eilės analizė, pirmosios eilės analizė, geometrinių nuokrypos, dalinio standžio mazgas, antrosios eilės efektai	

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	Analysis of sway frames design methods
-------	---

Author Naglis Elenbergas

Academic supervisor
Kęstutis Urbonas

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The design methods of sway steel frames according to LST EN 1993-1-1 are analyzed in the Master's thesis.

The research work consists of three sections. The first chapter discusses the concept of the object under consideration, describes the definitions of sway and non-sway frames and explains the differences, indicates what is a rigid and semi-rigid joint, their significance for the whole behavior of the structure. The geometrical imperfections of steel elements, their estimation methods and necessity are also discussed.

The second chapter discusses the variants of frame structure analyzes, describes the peculiarities of the first and second order analysis. This chapter also presents the methods of application of the overall frame analysis, explains their applicability and accuracy of the results, explains the algorithm for selecting the required method. It also describes how computer programs based on the finite element method perform an iterative second-order calculation of a structure.

In the third chapter, practical calculations of sway steel frames of various heights are performed by estimating the geometrical imperfections, by introducing partial rotational rigidity of the joints or both of these aspects together. The results of alpha critical coefficients (sensitivity to second-order effects), stresses and deformations obtained by different methods of global analysis are compared. Conclusions are presented at the end of the thesis.

Thesis consists of: 78p. text without appendixes, 47 pictures, 13 tables, 20 bibliographical entries.

Keywords: sway frame, second order analysis, first order analysis, geometrical imperfections, semi-rigid joint, second order effects

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	10
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS.....	13
1. RĖMINĖS KONSTRUKCIJOS ANALIZĖ.....	15
1.1 Suvaržyti rėmai	15
1.2 Nesuvaržyti rėmai	19
1.3 Dalinio standžio ir standūs rėmo mazgai.....	19
1.3.1 Mazgų charakteristikos pagal LST EN 1993	20
1.3.2 Mazgų elgsena	21
1.3.3 Komponentų metodas	22
1.4 Rėmo geometrinės nuokrypos.....	24
2. RĖMINIŲ KONSTRUKCIJŲ SKAIČIAVIMO METODIKOS	28
2.1 Pirmosios eilės tamprioji analizė	28
2.2 Antrosios eilės tamprioji analizė.....	31
2.2.1 Antrosios eilės efektai.....	31
2.2.2 Rėmo jautrumas antrosios eilės efektams	33
2.3 Visuminė rėmo analizė	35
2.3.1 Pirmasis metodas	38
2.3.2 Antrasis metodas.....	38
2.3.3 Trečiasis metodas	41
2.4 Iteracinis konstrukcijų skaičiavimas	41
3. NESUVARŽYTŲ RĖMINIŲ KONSTRUKCIJŲ SKAIČIAVIMAI	43
3.1 Rėmo analizės variantai.....	43
3.1.1 Skaičiavimo atvejai.....	43
3.1.2 Skaičiavimo metodai.....	43
3.2 Dvylikos aukštų rėmas	47
3.2.1 Tiriamosios konstrukcijos pradinė schema	47

3.2.2	12-os aukštų rėmo pirmasis skaičiavimo atvejis	48
3.2.3	12-os aukštų rėmo antrasis skaičiavimo atvejis	51
3.2.4	12-os aukštų rėmo trečiasis skaičiavimo atvejis.....	54
3.2.5	12-os aukštų rėmo ketvirtasis skaičiavimo atvejis	57
3.2.6	12-os aukštų rėmo skaičiavimo rezultatų apibendrinimas	60
3.3	Kito aukštingumo nesuvaržyti rėmai.....	63
3.3.1	Pirmasis skaičiavimo atvejis	63
3.3.2	Ketvirtasis skaičiavimo atvejis	65
3.3.3	Skirtingo aukštingumo rėmų skaičiavimo rezultatų apibendrinimas	67
3.4	Ekonominis palyginimas	72
IŠVADOS.....		75
LITERATŪROS ŠALTINIAI		77

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Principinės rėmo suvaržymo schemas 2D ir 3D (da Silva <i>et al.</i> , 2013).....	15
1.2 pav. Nesuvaržyto (kairėje) ir suvaržyto (dešinėje) rėmų elgsena (Kindmann, 2008).....	16
1.3 pav. Teisingos vertikaliųjų ryšių išdėstymo principinės schemas	16
1.4 pav. Neteisinga ryšių išdėstymo schema ir galimas pastato susisukimas	17
1.5 pav. Ryšių skaičiavimo schema (Brown <i>et al.</i> , 2004).....	17
1.6 pav. Lankstaus mazgo pavyzdys (Trahair <i>et al.</i> , 2008).....	18
1.7 pav. Statiskai neišsprendžiamos sistemos pavyzdys su lanksčiais ir standžiais mazgais	18
1.8 pav. Nesuvaržyto rėmo principinė schema (da Silva <i>et al.</i> , 2013)	19
1.9 pav. Dalinai standaus mazgo pavyzdys (Trahair <i>et al.</i> , 2008).....	20
1.10 pav. Mazgų ribų klasifikacija pagal LST EN 1993-1-8	20
1.11 pav. Tipinio dalinai standaus mazgo elgsena (da Silva <i>et al.</i> , 2013)	21
1.12 pav. Mazgo lenkimo momento ir pasisukimo deformacijos kreivė (da Silva <i>et al.</i> , 2013).....	22
1.13 pav. Jėgų pasiskirstymas ir petys (Urbonas, 2006).....	23
1.14 pav. Lygiaverčio pokrypio nuokrypos (Vayas <i>et al.</i> , 2019).....	25
1.15 pav. Pradinių nuokrypų pakeitimas lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistema (LST EN 1993-1-1)	27
2.1 pav. Ašių, veikiančių jėgų bei momentų žymėjimas šešių laisvės laipsnių elemente (Vayas <i>et al.</i> , 2019)	28
2.2 pav. Tiesinės analizės principas (Trahair <i>et al.</i> , 2008).....	29
2.3 pav. Pirmos ir antros nesuvaržyto rėmo klupumo formų atvaizdavimas (Trahair <i>et al.</i> , 2008)..	30
2.4 pav. $P - \Delta$ (kairėje) ir $P - \delta$ (dešinėje) efektų iliustracija (Vayas <i>et al.</i> , 2019)	31
2.5 pav. Antrosios eilės efektų $P - \Delta$ ir $P - \delta$ sukeltų papildomų įrašų diagramos nesuvaržytiems ir suvaržytiems rėmams (Ziemian, 2010).....	32
2.6 pav. Visuminės analizės algoritmas	37
2.7 pav. Modifikuotas Niutono – Rafsono prieaugio – iteracinis metodas (Ziemian, 2010).....	42
3.1 pav. Dalinai standaus mazgo, naudojamo rėme, iliustracija	45
3.2 pav. Dydžiai koeficientui α_{cr} nustatyti (LST EN 1993-1-1)	45
3.3 pav. Dvylikos aukštų rėmo geometrija.....	47

3.4 pav. Vertikaliųjų ir horizontaliųjų rėmo apkrovų schemos (reikšmės kN/m)	48
3.5 pav. 12-os aukštų rėmo pirmojo atvejo rezultatų grafikas	50
3.6 pav. Apkrovų schema, papildyta lygiavertėmis horizontaliosiomis apkrovomis	51
3.7 pav. 12-os aukštų rėmo antrojo atvejo rezultatų grafikas.....	53
3.8 pav. 12-os aukštų rėmo trečiojo atvejo rezultatų grafikas	56
3.9 pav. 12-os aukštų rėmo ketvirtojo atvejo rezultatų grafikas.....	59
3.10 pav. 12-os aukštų rėmo ašinių jėgų pokyčio grafikas	60
3.11 pav. 12-os aukštų rėmo lenkimo momentų pokyčio grafikas	61
3.12 pav. 12-os aukštų rėmo poslinkių pokyčio grafikas.....	61
3.13 pav. Lenkimo momento pokyčio ir α_{cr} koeficiento priklausomybės grafikas	62
3.14 pav. Rėmų geometrija.....	63
3.15 pav. Pirmojo atvejo α_{cr} koeficiento reikšmių grafikas.....	64
3.16 pav. Pirmojo atvejo lenkimo momento procentinio pokyčio reikšmių grafikas.....	64
3.17 pav. Pirmojo atvejo poslinkio procentinio pokyčio reikšmių grafikas.....	65
3.18 pav. Ketvirtojo atvejo α_{cr} koeficiento reikšmių grafikas	65
3.19 pav. Ketvirtojo atvejo lenkimo momento procentinio pokyčio reikšmių grafikas	66
3.20 pav. Ketvirtojo atvejo poslinkio procentinio pokyčio reikšmių grafikas	66
3.21 pav. Pirmojo atvejo kolonos išnaudojimo koeficiento pokyčio grafikas	68
3.22 pav. Ketvirtojo atvejo kolonos išnaudojimo koeficiento pokyčio grafikas	68
3.23 pav. Pirmojo atvejo kolonos lenkimo momentų pokyčio ir α_{cr} koeficiento priklausomybės grafikas	71
3.24 pav. Ketvirtojo atvejo kolonos lenkimo momentų pokyčio ir α_{cr} koeficiento priklausomybės grafikas	71
3.25 pav. Kolonų skaičiuojamieji ilgiai μ apskaičiuoti programiniu paketu	72

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Skaičiuotinės pradinio išlinkio reikšmės pagal LST EN 1993-1-1.....	26
3.1 lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (1-asis atvejis)	48
3.2 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (1-asis atvejis)	49
3.3 lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (2-asis atvejis)	51
3.4 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (2-asis atvejis)	52
3.5. lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (3-iasis atvejis)	54
3.6 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (3-iasis atvejis)	54
3.7 lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (4-asis atvejis)	57
3.8 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (4-asis atvejis)	57
3.9 lentelė. Pirmojo atvejo optimizacijos rezultatai.....	73
3.10 lentelė. Antrojo atvejo optimizacijos rezultatai	73
3.11 lentelė. Trečiojo atvejo optimizacijos rezultatai	74
3.12 lentelė. Ketvirtojo atvejo optimizacijos rezultatai	74

IVADAS

Plienas, kaip statybinė medžiaga, statyboje yra naudojamas dideliais kiekiais ir jau labai seniai. Jis daugiausiai pritaikomas pramoniniams ar komercinės paskirties pastatams, dažniausiai apibūdinamas kaip „lengva konstrukcija“. Ir nors plieno tankis yra didelis ir lengva medžiaga jo pavadinti negalima, tačiau konstrukcijos, pagamintos iš plieno, sąlyginai būna labai lengvos. Taip yra dėl didelio plieno stiprio ir mažų materialųjų sąnaudų norint pagaminti elementą numatytoms projekcinėms apkrovoms išlaikyti.

Plieninės konstrukcijos dažniausiai yra labai liaunos, lyginant su kitų alternatyvių medžiagų konstrukcijomis. Praktikoje kita dažniausiai pritaikoma statybinė medžiaga – gelžbetonis, kuris beveik visada yra masyvus, tad stabilumo praradimas gelžbetoniniams elementams dažniausiai nebūna laikomąją galią lemiantis veiksnys. Projektuojant plieninę konstrukciją būtina tikrinti visos struktūros arba jos dalies stabilumą, kadangi liaunos plieno konstrukcijos dažnai pasižymi nestabilumu. Ypač tai pasakytina apie nesuvaržytus rėmus, kurie yra jautresni horizontalioms apkrovoms nei ryšiais suvaržytos rėminės konstrukcijos. Konstrukcijas analizuoti galima dviem skirtingais metodais: taikant tampriąją ir plastinę analizę, o šiuos metodus savo ruožtu dar galima skirstyti į smulkesnius porūšius.

Priimant sprendimą, kurią konstrukcijos projektavimo analizę (plastinę ar tampriąją) pasirinkti, turėtų būti atsižvelgiama ne tik į antrosios eilės efektus, tačiau ir kitus aspektus: netiesinę medžiagos fizinę elgseną, bei konstrukcijos elementų netobulumus.

Pirmosios eilės tamprioji konstrukcijos analizė yra daugiausiai projektuotojų naudojamas konstrukcijų skaičiavimo metodas, į kurį yra įtraukta supaprastintų sprendinių, skirtų įvertinti medžiagos fizinį netiesiškumą ar netobulumą, tačiau ši analizė ne visada užtikrina saugius skaičiavimų rezultatus. Tikrinant konstrukcijos stabilumą didelę įtaką gali turėti ir antrosios eilės efektai.

Antrosios eilės efektų analizė skirstoma į kelis porūšius (metodus), kurie šiuos efektus konstrukcijai pritaiko skirtingai: visiškas tiesioginis (globalus) pritaikymas, dalinis pritaikymas ir vietinis (lokalus) pritaikymas. Siekiant išgauti kompromisinį balansą tarp saugumo ir skaičiavimo procedūros sudėtingumo, dažniausiai atliekant skaičiavimus taikomas antrasis metodas.

Darbo aktualumas ir praktinis pritaikomumas

Projektuojant konstrukciją, kurios šoniniai poslinkiai nėra suvaržyti, didžiulę įtaką daro antrosios eilės efektai. Tinkamas deformuotos konstrukcijos elgsenos įvertinimas yra pagrindinis projektuotojo uždavinys. Projektavimo normose LST EN 1993-1-1 numatyta daug būdų šiems efektams įvertinti, tad projektuotojas turi laisvę pasirinkti sau tinkamą metodą. Metodo pasirinkimas ir juo gautų rezultatų analizė yra pagrindinis inžinieriaus kompetencijos rodiklis, parodantis jo

išmanymą apie statybines konstrukcijas. Dėl to pasirinktas baigiamojo **darbo tikslas** – išanalizuoti projektavimo normose LST EN 1993-1-1 nurodytus projektavimo metodus, kurie tikrina nesuvaržytos konstrukcijos jautrumą antrosios eilės poveikiams ir juos įvertina, taip pat patikrinti jų pritaikymo paprastumą ir rezultatų patikimumą.

Darbo tikslui pasiekti iškeliami **uždaviniai**

1. Išanalizuoti literatūrą, susijusią su darbo tema.
2. Išnagrinėti rėminių konstrukcijų projektavimo metodus pagal LST EN 1993.
3. Ištirti geometrinių nuokrypų svarbą projektuojant daugiaaukščius nesuvaržytus rėmus.
4. Ištirti dalinio mazgų standžio svarbą projektuojant daugiaaukščius nesuvaržytus rėmus.
5. Įvertinti antrosios eilės efektų svarbą konstrukcijai.
6. Ištirti rėmų aukštingumo įtaką įvairiais konstrukcijų projektavimo metodais.
7. Atlikti rezultatų analizę.

Tiriamąjį darbą sudaro trys skyriai. Pirmajame skyriuje aptariama nagrinėjamo objekto samprata, aprašomi suvaržytų ir nesuvaržytų rėmų apibrėžimai ir paaiškinami skirtumai, nurodoma, kas yra standus ir dalinio standžio mazgas, jų reikšmė visai konstrukcijos elgsenai. Taip pat aptariamos plieninių elementų geometrinės nuokrypos, jų įvertinimo metodai ir būtinybė. Antrajame skyriuje aptariami rėminės konstrukcijos analizių variantai, aprašomi pirmosios ir antrosios eilės analizės ypatumai. Dar šiame skyriuje pateikiami visuminės rėmo analizės taikymo metodai, aiškinamas jų pritaikomumas ir rezultatų tikslumas, paaiškinamas reikiamo metodo pasirinkimo algoritmas. Taip pat aprašoma, kaip kompiuterinės baigtinių elementų metodu pagrįstos programos atlieka iteracinę konstrukcijos antrosios eilės skaičiavimą. Trečiajame skyriuje atliekami praktiniai daugiaaukščių nesuvaržytų rėmų skaičiavimai, lyginami rezultatai, gauti skirtingais metodais, t.y. tais, kurie vertina arba nevertina antrosios eilės efektų. Darbo pabaigoje pateikiamos išvados.

Darbo apribojimai

Visi rėmai šiame darbe nagrinėjami tik jų plokštumoje, dėl to, kad erdvinė analizė yra labai plati atskira tema. Taip pat tiriamos yra tik skirtingais metodais analizuojamos konstrukcijos įrąžų ir poslinkių nuo skaičiuotinių apkrovų reikšmės, dėl to šiame darbe neatsižvelgiama į konstrukcijos tinkamumo ribinio būvio užtikrinimą. Rėmai skaičiuojami taikant tik tampriąją analizės rūšį, plastinė analizė nėra taikoma.

1. RĖMINĖS KONSTRUKCIJOS ANALIZĖ

Praeityje konstrukcijų projektavimas buvo paremtas supaprastintų pastato schemų sudarymu. Tipinis būdas rėmams konstruoti buvo suprojektuoti sijas laikyti sunkio jėgoms, o kolonas – atremti sijoms ir perimti sunkio jėgos sukeltas įrąžas bei vėjo apkrovas. Tobulėjant technologijoms, kuomet kompiuteriai gali vis greičiau atlikti sudėtingus ir ilgus skaičiavimus, inžinierius savo laiką gali išnaudoti efektyviau, kurdamas preciziškai tikslius pastatų konstrukcinius modelius jau nuo pat projektavimo pradžios. Taip jau ankstyvoje projekto stadijoje sumažinamas klaidų ir įvairių nenumatytų neatitikimų ar susikirtimų skaičius, žymiai supaprastėja bendradarbiavimas su kitais projekto inžinieriais ar architektais.

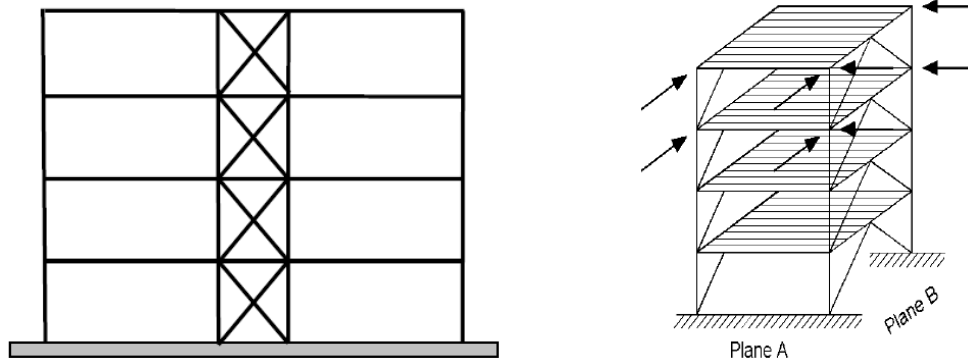
Pastato konstrukcijos projektavimas pradedamas nuo skaičiuojamosios schemos sudarymo, kuri yra esminis viso tolesnio proceso pagrindas. Pagrindinis rėminės konstrukcijos tikslas – perimti horizontaliąsias vėjo ir vertikaląsias sunkio jėgos apkrovas bei kartu išlaikyti stabilumą. Sudarant skaičiuojamąją schemą būtina pasirinkti kokio tipo rėmas bus, nes skirtingų tipų rėmų projektavimas turi labai nedaug bendrų bruožų.

Plieniniai rėmai pagal galimybę priimti horizontaliuosius poveikius yra skirstomi į du tipus:

- 1) suvaržytus;
- 2) nesuvaržytus.

1.1 Suvaržyti rėmai

Rėmo suvaržymui gali būti naudojamos vertikaliųjų (įstrižųjų) kolonų ryšių sistemos, taip pat sienos (da Silva *et al.*, 2013). Rėmo konstrukcijai be vertikaliųjų suvaržymų taip pat reikalinga ir skersinė (horizontalioji) suvaržymo sistema. Ši sistema yra skirta horizontaliosioms apkrovoms perkelti į vertikaliuosius ryšius ar sienas. Suvaržymo funkciją rėmo plokštumoje dažniausiai atlieka sijos, o iš plokštumos tam tinka standi aukšto perdangos diafragma, tačiau jei jos nėra arba ji nėra standi, tuomet reikia įrengti papildomus horizontaliuosius ryšius. Horizontaliąsias jėgas perkėlus į vertikaląją suvaržymo sistemą, jėgos yra nukreipiamos į pamatus ir taip rėmo kolonose yra išvengiama didelių lenkimo momento įrąžos reikšmių, ženkliai sumažinami poslinkiai.



1.1 pav. Principinės rėmo suvaržymo schemas 2D ir 3D (da Silva *et al.*, 2013)

Rėminę konstrukciją galima laikyti suvaržyta, jei yra tenkinama sąlyga (da Silva *et al.*, 2013):

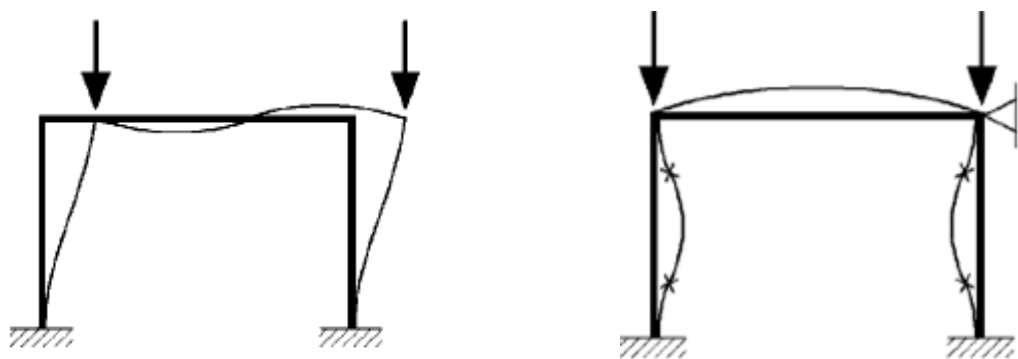
$$S_{br} \geq 5S_{unbr}; \quad (1.1)$$

čia

S_{br} – globalus šoninis suvaržyto rėmo standumas;

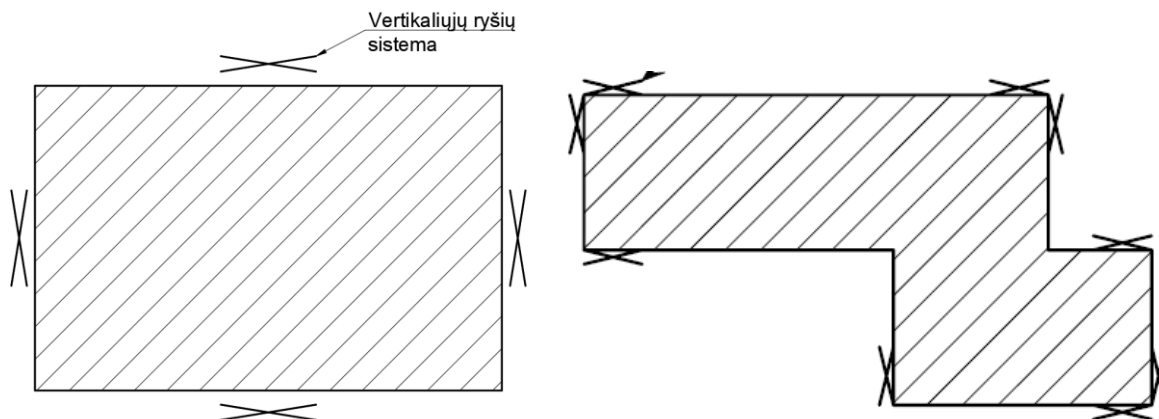
S_{unbr} – globalus šoninis nesuvaržyto rėmo standumas.

Globalaus šoninio standumo reikšmės galima prilyginti rėmo poslinkiams: jei įvedus ryšių sistemą rėmo poslinkiai sumažėja ne mažiau kaip 80%, galima teigti, jog rėmas yra suvaržytas. Dažniausiai jei rėmas yra tinkamai suvaržytas ir sąlyga yra tenkinama, jis nėra jautrus antrosios eilės efektams. Tai reiškia, kad gniuždomiems elementams vietinis klupumas pasireikš anksčiau, nei įvyks viso rėmo išklupimas.



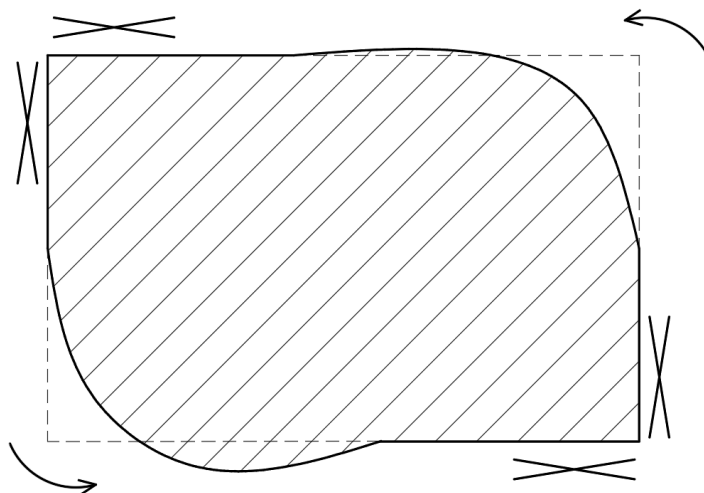
1.2 pav. Nesuvaržyto (kairėje) ir suvaržyto (dešinėje) rėmų elgsena (Kindmann, 2008)

Pagal Browną ir kt. (Brown *et al.*, 2004), kiekvienam pastatui reikia bent dviejų vertikalųjų ryšių komplektų kiekvienoje statmenoje kryptyje, kad būtų galima išvengti sukamųjų efektų, kurie konstrukcijoms būna itin pavojingi ir labai dažnai yra būna tinkamai neįvertinami. Taip pat vertikaliuosius ryšius reikia įrenginėti simetriškai kiekvienoje pastato pusėje, nenutolstant nuo pastato centro (arba nutolstant simetriškai, jei vienoje sienoje įrengiamas ne vienas ryšių komplektas).



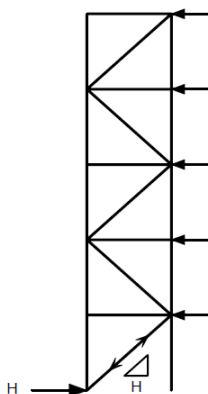
1.3 pav. Teisingos vertikalųjų ryšių išdėstymo principinės schemos

Sukoncentravus ryšių sistemas arti viena kitos arba nutolus nuo centro horizontaliosios pastatą veikiančios jėgos nėra paskirstomos tolygiai, atsiranda sukimo efektai ir pastatas gali „sisisukti“ (žr. 1.4 pav.)



1.4 pav. Neteisinga ryšių išdėstymo schema ir galimas pastato susisukimas

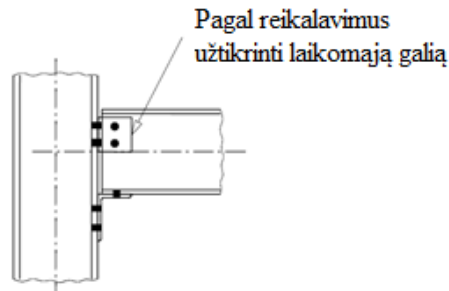
Vertikaliųjų ryšių sistema yra projektuojama kaip gembinė santvara, kurios elementuose veikia tik ašinės jėgos. Visos horizontaliosios apkrovos yra išdėstomos kaip koncentruotos jėgos kiekvieno aukšto lygyje (žr. 1.5 pav.), todėl elementuose nesusikuria lenkimo momento įrašos.



1.5 pav. Ryšių skaičiavimo schema (Brown *et al.*, 2004)

Horizontaliosios reakcijos ryšiais (santvaros tinkliuko elementais) perduodamos tiesiai į pamatą ir taip rėmas tampa nejautrus šoniniams poveikiams.

Ryšių sistemoms perimant horizontaliuosius poveikius, rėmai gali būti projektuojami su lanksčiomis sijų-kolonų jungtimis. Lankstūs mazgai apibūdinami kaip tokie, kurie neperduoda lenkimo momento įrašos tarp elementų. Tai reiškia, kad sujungti elementai gali pasisukti vienas kito atžvilgiu. Norint išvengti konstrukcijos sugriuvimo, elemento pasisukimas turi būti apribotas tam tikru dydžiu (kampu), kuriuo jam galima suktis, kad neįvyktų pačios jungties irties.



1.6 pav. Lankstaus mazgo pavyzdys (Trahair *et al.*, 2008)

Jei lanksčių mazgų skaičius rėme bus pakankamas, kad sistema taptų statišškai išsprendžiama, tuomet kiekvieną rėmo elementą galima projektuoti kaip atskirą, veikiamą tempimo, gniuždymo ar lenkimo įrašų. Statiškai išsprendžiamoje sistemoje kiekvienas narys dirba savarankiškai nuo kitų sistemos elementų, vienas kitam nedarydami jokios įtakos.

Tačiau jei lankstų skaičius netenkina statinio sistemos išsprendžiamumo sąlygos:

$$3K - L = 0 \quad (1.2)$$

čia

K – kontūrų skaičius;

L – lankstų skaičius;

arba rėme yra panaudojami standūs mazgai, kad konstrukcija netaptų mechanizmu, tuomet kai kurių rėmo dalių elgsena bus panaši į standžių mazgų rėmo elgseną, atsiras būtinybė įvertinti įrašų persiskirstymą tarp elementų.

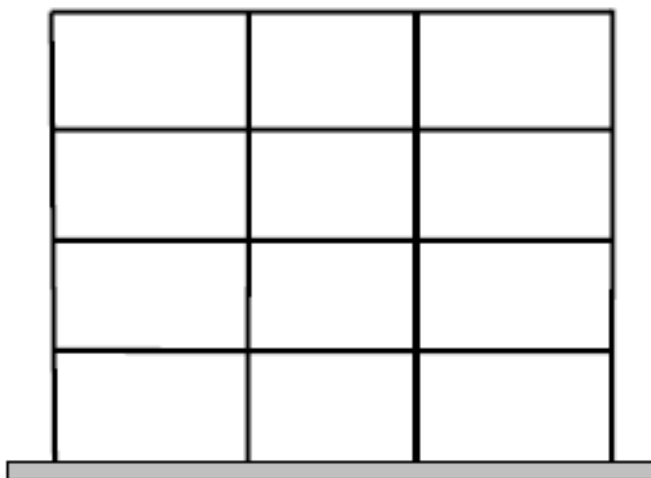


1.7 pav. Statiškai neišsprendžiamos sistemos pavyzdys su lanksčiais ir standžiais mazgais

Suvaržymai tokio tipo konstrukcijose pasitelkiami iš rėmo plokštumos bei stoge, kur įrengiama standi diafragma arba horizontalių skersinių ryšių sistema. Tokie rėmai praktikoje yra labai dažnai naudojami vertikaloms apkrovoms laikyti. Dėl mazgų paprastumo jie yra greitai montuojami, gana nesudėtingas projektavimas. Rėmo kolona apskaičiuojama kaip ekscentriškai gniuždomas elementas, o sija – kaip lenkiamas. Dažniausiai pritaikomi vienaaukščiams pramoniniams pastatams, vietoje sijų dar naudojant santvaras, efektyviau išnaudojant metalo sąnaudas bei padidinant rėmo tarpatramį.

1.2 Nesuvaržyti rėmai

Nesuvaržytas rėmas – tai rėmas, neturintis jokio standumo branduolio (vertikalių ryšių sistemų, skersinių sienų ar kt.), jame yra tik horizontaliosios aukšto perdangos diafragmos, kurios paskirsto šonines jėgas į rėmo elementus – sijas ir kolonas. Nesuvaržytų rėmų projektavimas yra sudėtingesnis nei suvaržytų, nes šių rėmų kolonose vyrauja lenkimo momento ir ašinės jėgos įrašos, kai tuo tarpu suvaržytų rėmų – tik ašinės jėgos. Rėmo atsakas horizontaliosioms jėgoms turi užtikrinti bendrąją konstrukcijos stabilumą, o tai reiškia, jog rėmas, kaip bendra sijų ir kolonų sistema, turi būti atsparus lenkimo momentams. Tam, kad rėmo elementus būtų galima vadinti bendra sistema, jie turi būti sujungti standžiais ar dalinio standžio mazgais, galinčiais perduoti lenkimo momento įrašą iš vieno elemento į kitą ir išlaikyti pusiausvyrą.

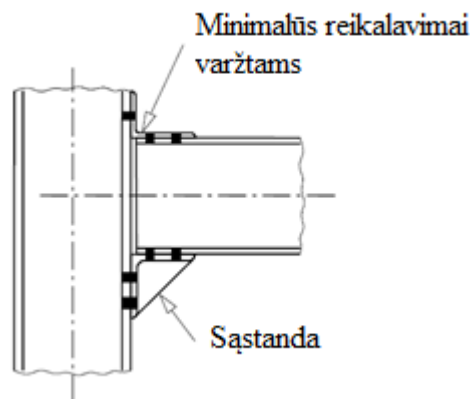


1.8 pav. Nesuvaržyto rėmo principinė schema (da Silva *et al.*, 2013)

Nesuvaržyto rėmo poslinkiai yra daug didesni už suvaržyto, todėl tokie rėmai tampa jautrūs antrosios eilės efektams, t.y. papildomų lenkimo momentų susidarymui nuo vertikaliosios apkrovos, kai rėmo schema yra deformuota (susidaro ekscentricitetai). Antrosios eilės efektai plačiau aprašomi 2-ame skyriuje.

1.3 Dalinio standžio ir standūs rėmo mazgai

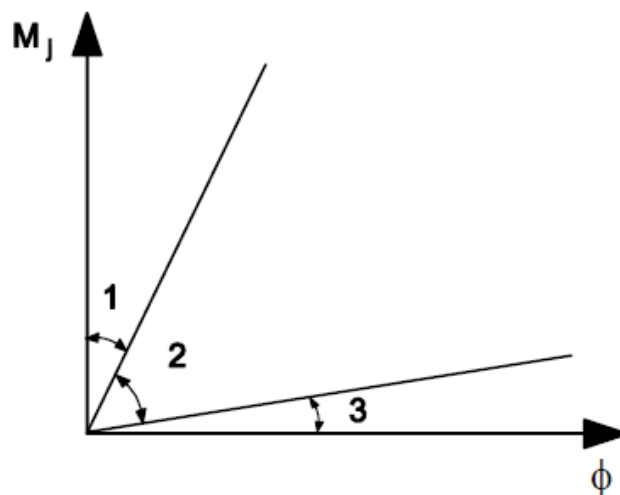
Dalinai standūs mazgai, dar vadinami pasiduodančiais (angl. *semi-rigid joints*), turi tam tikrą apskaičiuotą sukamąjį standį. Tai reiškia, kad jie leidžia dalinį momento paskirstymą ir pasisukimą tarp sujungiamų konstrukcijos elementų. Ir nors projektuojant nesuvaržytą rėmą dažnai naudojamas idealiai standus mazgas sijai sujungti su kolona, jis retai kada toks iš tiesų yra.



1.9 pav. Dalinai standaus mazgo pavyzdys (Trahair *et al.*, 2008)

1.3.1 Mazgų charakteristikos pagal LST EN 1993

Pagal LST EN 1993-1-8, standiems priskiriami mazgai, turintys pakankamą sukamąjį standį, kad būtų galima taikyti visiškų nekarpytumu pagrįstą analizę, o tariamai lankstiams – mazgai galintys perduoti vidines jėgas nesukeldami reikšmingų momentų, kurie galėtų paveikti kitus elementus ar visą konstrukciją. Mazgas, kuris neatitinka standaus arba tariamai lankstaus mazgo kriterijų, turi būti klasifikuojamas kaip pusiau standus mazgas. Pusiau standūs mazgai gali perduoti vidaus jėgas ir momentus. Visų mazgų, išskyrus kolonos pėdas, ribų klasifikacija pateikiama 1.10 pav.



1.10 pav. Mazgų ribų klasifikacija pagal LST EN 1993-1-8

Pirma zona: standus mazgas, jei

$$S_{j,ini} \geq k_b \cdot E \cdot I_b / L_b \quad (1.3)$$

čia

$k_b = 8$, suvaržytiems rėmams;

$k_b = 25$, nesuvaržytiems rėmams, jei $K_b/K_c < 0,1$.

Antra zona: dalinio standžio mazgas. Visi antros zonos mazgai turi būti klasifikuojami kaip pusiau standūs mazgai. Pirmos ir trečios zonos mazgai taip pat gali būti priskiriami pusiau standiems mazgams.

Trečia zona: tariamai lankstus mazgas, jei

$$S_{j,ini} \leq 0,5 \cdot E \cdot I_b / L_b \quad (1.4)$$

Paiškinimai:

$S_{j,ini}$ – pradinė mazgo standžio reikšmė;

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

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

I_b – sijos inercijos momentas;

I_c – kolonos inercijos momentas;

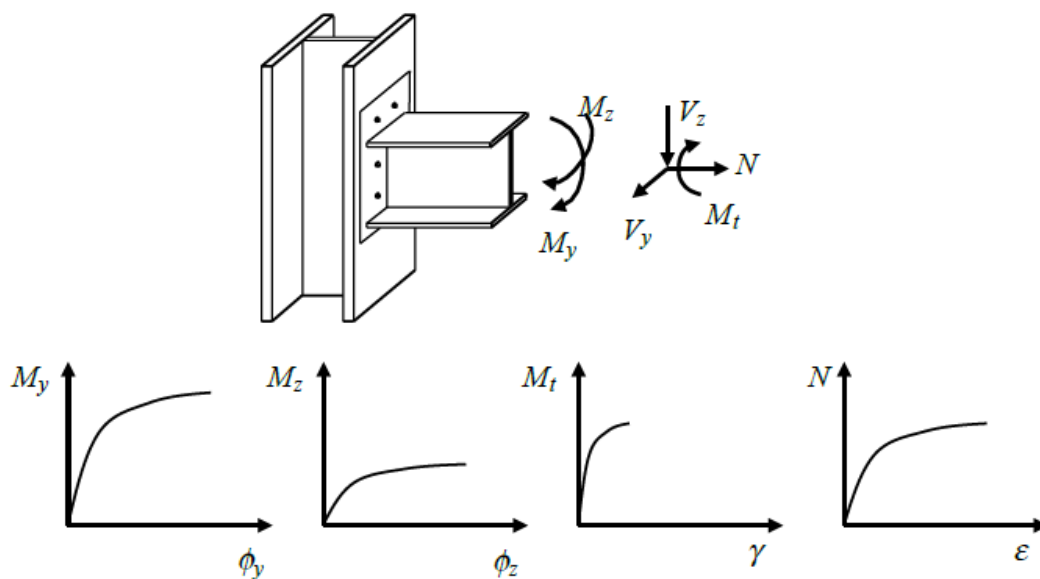
L_b – sijos tarpatramis (atstumas tarp kolonų centrų);

L_c – aukšto kolonos aukštis;

E – plieno tamprumo modulis.

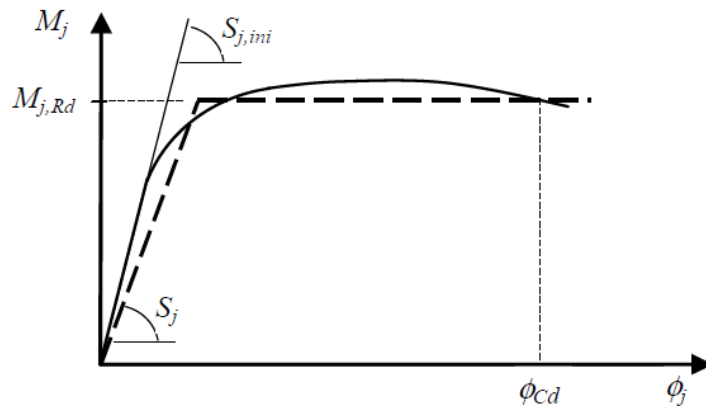
1.3.2 Mazgų elgsena

Bendruoju atveju dalinio standžio mazgo elgsena yra modeliuojama kaip spyruoklė, turinti 6 laisvumo laipsnius (da Silva *et al.*, 2013). Taip mazgas yra išskirtomas į šešias vidines jėgas – sukamąjį momentą, dviejų krypčių lenkimo momentus, ašinę jėgą ir dviejų krypčių skersines jėgas. Tačiau ši prielaida ne visada yra tinkama, tokiu atveju būtina atsižvelgti į vidinių jėgų tarpusavio sąveiką. 1.11 paveiksle pavaizduotos mazgo netiesinės įrašos ir deformacijos priklausomybės kreivės.



1.11 pav. Tipinio dalinai standaus mazgo elgsena (da Silva *et al.*, 2013)

Lenkimo momento sukeliamą deformaciją paprastai yra kritinė ir daro didžiausią įtaką skaičiavimo rezultatams. 1.12 paveiksle pavaizduota lenkimo momento ir pasisukimo deformacijos netiesinė diagrama $M-\phi$, kartu su idealizuota supaprastinta kreive, kurią apibrėžia pagrindiniai kintamieji: sukamasis standis S_j , pradinis sukamasis standis $S_{j,ini}$, skaičiuotinė mazgo lenkiamoji galia $M_{j,Rd}$, ir mazgo pasisukimo kampas ϕ_{Cd} .



1.12 pav. Mazgo lenkimo momento ir pasisukimo deformacijos kreivė (da Silva *et al.*, 2013)

1.3.3 Komponentų metodas

Pradinis sukamasis standis $S_{j,ini}$, kuris iš esmės apibūdina mazgo „pasiduodamumą“, pagal LST EN 1993-1-8 yra skaičiuojamas komponentų metodu. Mechaniniai modeliai yra sudaromi konstruojant mazgus lanksčiais ir standžiais komponentais (Urbonas, 2006). Komponentai ir jų charakteristikos yra aprašomi empirinėmis formulėmis.

Komponentų metodu vertinamos mazgų elgsenos įvertinimas susideda iš trijų pagrindinių dalių: komponentų identifikacijos, jų mechaninių savybių įvertinimo ir visų aktyvių komponentų surinkimo į bendrą mechaninį (spyruoklių) modelį.

Projektuojant konstrukcijas svarbiausios yra šios mazgų charakteristikos:

- mazgo lenkiamasis stipris;
- mazgo sukamasis standis;
- ribinis pasisukimas.

Komponentų metodas taikomas mazgo lenkiamajam stipriui, mazgo sukamajam standžiui ir pasisukimui nustatyti. Komponentų metodas paremtas vidinių jėgų pasiskirstymu mazge ir taikomas lenkiamuoju momentu veikiamo mazgo elgsenai nustatyti.

Sijos-kolonos mazgas gali būti padalintas į tokius pagrindinius komponentus, pagal LST EN 1993-1-8: kerpamoji kolonos sienelės plokštelė, gniuždomoji kolonos sienelė, tempiamoji kolonos sienelė, lenkiamoji kolonos juosta, lenkiamoji galinė plokštelė, lenkiamasis antdėklas, gniuždomoji sijos juosta ir sienelė, tempiamoji sijos sienelė, tempiamoji ar gniuždymoji plokštelė, tempiamasis varžtas, kerpamasis varžtas, glemžiamasis varžtas.

Mazgo komponentų kerpamasis, gniuždomasis, tempiamasis ar lenkiamasis stipriai nulemia viso mazgo lenkiamąjį stiprį $M_{j,Rd}$. Pradinis mazgo pasisukamasis standis $S_{j,ini}$ nustatomas pagal pagrindinių komponentų standį. Kiekvienas komponentas turi tamprųjį standžio koeficientą, priklausantį nuo mechaninių ir geometrinių mazgo charakteristikų.

$$S_{j,ini} = \frac{Ez^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}}; \quad (1.5)$$

čia

E – plieno tamprumo modulis;

k_i – mazgo komponentų i standžio koeficientai;

z – jėgų petys;

μ - standžio santykis:

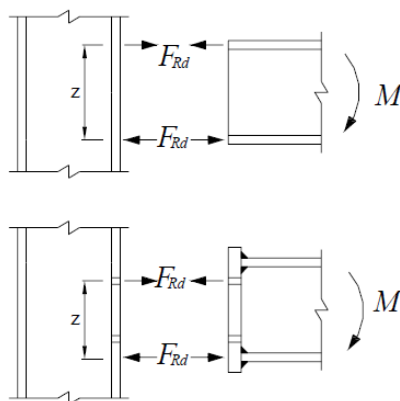
$$\text{kai } M_{j,Ed} \leq \frac{2}{3} M_{j,Rd}, \quad \text{tuomet } \mu = 1;$$

$$\text{kai } \frac{2}{3} M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}, \quad \text{tuomet } \mu = \left(\frac{1,5 M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \right)^\psi;$$

ψ - mazgo tipo koeficientas, pagal LST EN 1993-1-8 6.8 lentelę.

Komponentų metodas nustato ryšį, pagal kurį apibrėžiama kiekvieno komponento standumo įtaka viso mazgo pasisukamajam standžiui.

Nustatant mazgo lenkiamąjį stiprį yra neatsižvelgiama į sijoje veikiančią ašinę jėgą, todėl metodas negali būti taikomas, jei ašinė jėga prijungiamame elemente (sijoje) viršija 10% sijos laikomosios tempiamosios arba gniuždomosios galios pagal takumo ribą. Taip pat virintinių siūlių aukštinė a turi būti tokia, kad mazgo lenkiamasis stipris būtų apribojamas pagrindinių komponentų stiprumu, o ne virintinių siūlių stiprumu. Lenkiamasis momentas yra išskaidomas į komponentams tenkančias jėgas pagal petį z . Petys z priimamas kaip atstumas tarp gniuždymo ir tempimo centrų, žr. 1.13 pav.



1.13 pav. Jėgų pasiskirstymas ir petys (Urbonas, 2006)

Gniuždymo centras imamas gniuždomosios sijos juostos viduryje. Tempimo jėgos centras priklauso nuo mazgo tipo. Jei tai yra varžtinis mazgas – nuo varžtų eilių skaičiaus, priimant atstumą nuo gniuždomosios juostos centro iki vidurio taško tarp visų tempiamų varžtų eilių, jei mazgas virintinis – nuo atstumo tarp sijos juostų centrų.

Magzo lenkiamoji galia nustatoma:

$$M_{j,Rd} = F_{Rd} \cdot z \quad (1.6)$$

čia

z – jėgų petys;

F_{Rd} – silpniausio mazgo komponento atsparis.

1.4 Rėmo geometrinės nuokrypos

Visi plieniniai konstrukciniai elementai turi savo pradines nuokrypas. Nuokrypos gali būti skirstomos į dvi rūšis: geometrines ir struktūrines (Vayas *et al.*, 2019). Geometrinės elementų nuokrypos gali atsirasti gamybos ar konstrukcijų montavimo metu, o struktūrinės – tik gamybos metu. Struktūrinės elemento nuokrypos, arba netobulumai, – tai virinimo arba šalto skerspjuvių formavimo metu elemente susidarantys pradiniai įtempiai bei skerspjuvio geometrijos nesutapimai su etaloninėmis matmenų vertėmis. Geometrinės nuokrypos – tai elementų pradiniai posvyriai ar išlinkiai (angl. *bow imperfections*) per elemento ilgį. Nuokrypos paprastai lemia elemento laikomosios galios sumažėjimą ir į jas turi būti atsižvelgta atliekant konstrukcijos skaičiavimus. Įprastoje praktikoje geometrinės ir struktūrinės nuokrypos yra sujungiamos ir vertinamos bendrai, kaip geometrinis elemento netiesiškumas.

Pagal LST EN 1993-1-1, atliekant rėmo analizę, nesuvaržyto būvio klupdymui jautrių rėmų nuokrypų poveikis turi būti įvertinamas taikant lygiavertę nuokrypą pradinio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu. Šios nuokrypos pritaikymas apima visus galimus geometrinio netiesiškumo poveikius, jei jie nėra įtraukti į elementų projektavimo laikomosios galios formules.

Lygiavertė nuokrypa įvertina:

- elemento skerspjuvio matmenų nesutapimus su etalonine verte;
- gamybos ir montavimo metu atsirandančias geometrines nuokrypas;
- liekamuosius pradinius įtempius dėl struktūrinių nuokrypų;
- plieno stiprio pagal takumo ribą kaitą.

Nuokrypos turi būti vertinamos ta kryptimi ir forma, kuri būtų pati pavojingiausia konstrukcijai.

Bendrosios pradinės nuokrypos nustatomos taip (žr. 1.14 pav.):

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m; \quad (1.7)$$

čia

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

α_h – kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas;

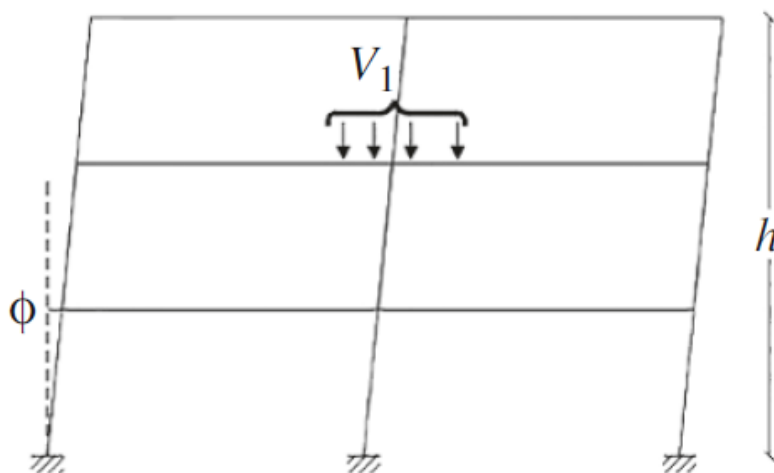
$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \quad \text{bet } 2/3 \leq \alpha_h \leq 1,0 \quad (1.8)$$

α_m – kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas;

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (1.9)$$

h – konstrukcijos aukštis metrais;

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



1.14 pav. Lygiaverčio pokrypio nuokrypos (Vayas *et al.*, 2019)

Santykinius pradinius lenkiamojo klūpdyimo veikiamų elementų vietinius išlinkius apskaičiuoti reikia taip:

$$\frac{e_0}{L}; \quad (1.10)$$

čia

e_0 – didžiausioji elemento nuokrypos amplitudė;

L – elemento ilgis.

Rekomenduojamos e_0/L reikšmės pateikiamos 1.1 lentelėje.

1.1 lentelė. Skaičiuotinės pradinio išlinkio reikšmės pagal LST EN 1993-1-1.

Klupumo kreivė pagal 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

Pradinio rėmų posvyrio galima nevertinti, kai:

$$H_{Ed} \geq 0,15 \cdot V_{Ed} \quad (1.11)$$

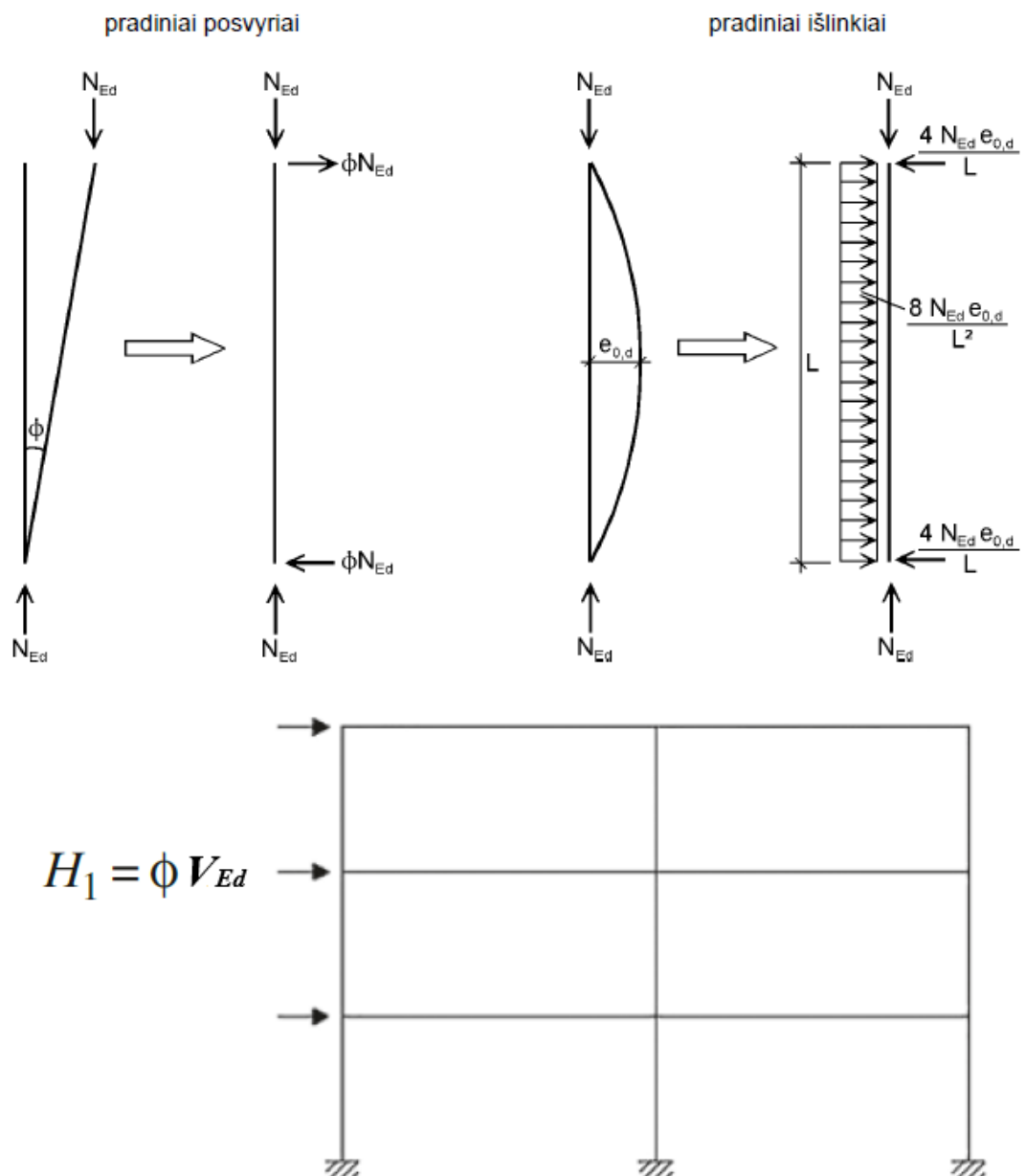
čia

H_{Ed} – horizontalioji suminė aukšto apkrova;

V_{Ed} – vertikalioji suminė aukšto apkrova.

Tokia skaičiuotinė situacija, kai horizontalios jėgos sudaro 15 ir daugiau procentų vertikalųjų jėgų reikšmės, gali nutikti projektuojant lengvos konstrukcijos rėmus be standžių gelžbetoninių diafragmų arba labai aukštus rėmus (dangoraižiams) labai vėjuotose ir (arba) seismiškai aktyviose teritorijose.

Pagal LST EN 1993-1-1, pradinio posvyrio ir vietinių išlinkių nuokrypų poveikius galima pakeisti lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemomis, taikomomis kiekvienai kolonai. Nuokrypų poveikių pakeitimas lygiaverčių horizontaliųjų sistemomis pavaizduotas 1.15 pav.



1.15 pav. Pradinių nuokrypų pakeitimas lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistema (LST EN 1993-1-1)

Lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemos pritaikymo sąlygos:

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

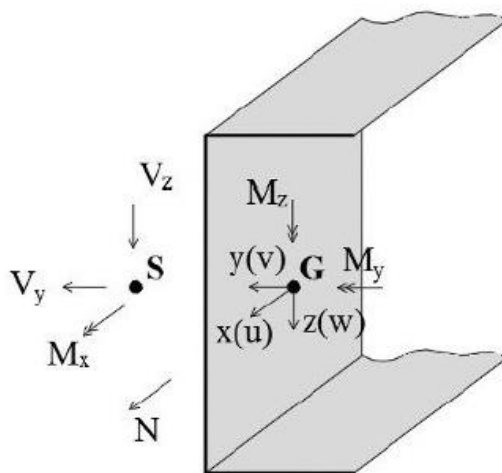
2. RĖMINIŲ KONSTRUKCIJŲ SKAIČIAVIMO METODIKOS

Plieno konstrukcijos dėl didelio savo stiprio dažniausiai yra labai liaunos, lyginant su kitų medžiagų alternatyvomis statyboje, pavyzdžiui, gelžbetoniui. Didelis plieno takumo stipris lemia, kad norint užtikrinti laikomąją galią galima elementui parinkti sąlyginai mažą profiliuoto skerspjūvio plotą ir kitas geometrines charakteristikas. Dėl to tempimo įtempių veikiamoms konstrukcijoms geresnės ir efektyvesnės medžiagos už plieną nėra. Tačiau gniuždymo jėgų veikiamoms konstrukcijoms reikia užtikrinti jų stabilumą. Liaunoms konstrukcijoms stabilumo praradimo kriterijus visada daro didelę, neretai ir pačią didžiausią įtaką bendrai laikomajai galiai. Plieninių nesuvaržytų rėmų stabilumui ir stiprumui skaičiuoti taikomi skirtingi analizės metodai, kurie bus negrinėjami šiame skyriuje.

2.1 Pirmosios eilės tamprioji analizė

Pirmosios eilės tamprioji analizė, dar vadinama geometriškai tiesine arba tiesiog tiesine analize, yra dažniausiai praktikoje taikomas analizės metodas. Jis yra greitas, paprastas, pranašus galimybe taikyti superpozicijos principą kombinuotiems skaičiavimo rezultatams, kuomet įrašos nuo apkrovų derinių skaičiuojamos atskirai. Tačiau šis metodas neapima konstrukcijos stabilumo ir galimo plastiškumo efektų, į kuriuos būtina atsižvelgti projektuojant (Vayas *et al.*, 2019).

Rėminių konstrukcijų elementai yra apibūdinami kaip linijiniai elementai, kurių linija eina per skerspjūvio centrą. Elementų skerspjūviai visada išlieka plokšti ir visada statmeni deformuoto elemento išilginei ašiai x . Įtempiai ir deformacijos vystosi išilgai tai pačiai ašiai x . Ašys y ir z sutampa su skerspjūvio stipriausiąja ir silpniausiąja ašimis. Trys iš gautųjų elementą veikiančių vidinių jėgų ir momentų (ašinė jėga N ir lenkimo momentai M_y , ir M_z) veikia svorio centre G , o kitos trys (skersinės jėgos V_y , V_z ir sukimo momentas M_x) veikia šlyties centre S , žr. 2.1 pav.

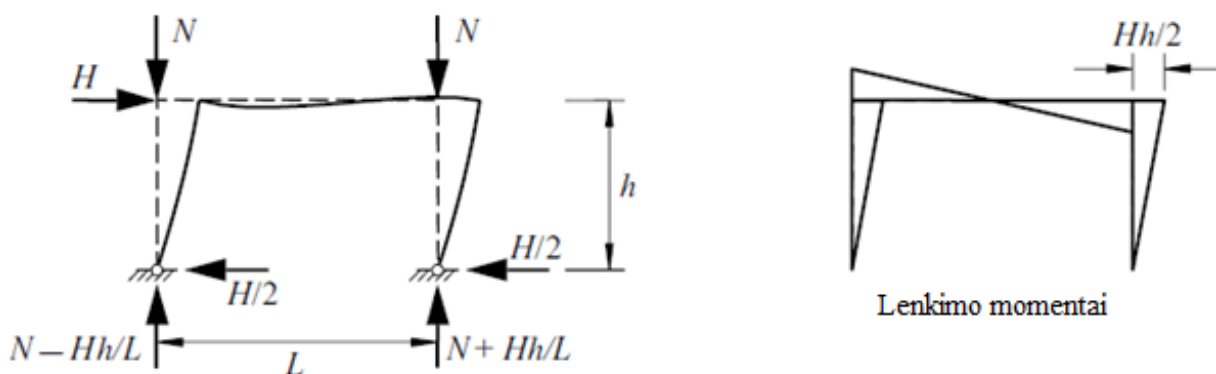


2.1 pav. Ašių, veikiančių jėgų bei momentų žymėjimas šešių laisvės laipsnių elemente (Vayas *et al.*, 2019)

Plieninio rėmo pirmosios eilės tamprioji analizė atliekama taikant tokias prielaidas (Trahair *et al.*, 2008):

- Medžiagos elgsena yra geometriškai tiesinė, visi takumo efektai yra nevertinami.
- Elementų elgsena yra tiesinė, nevertinami jų nestabilumo sukelti poveikiai, sukelti ašinės gniuždomosios jėgos, kuri sumažina elementų lenkiamąjį standį (dar vadinami $P - \delta$ efektais).
- Rėmo elgsena yra tiesinė, nevertinami nestabilumo efektai, kuriuos sukelia momento įrąžos nuo vertikalios apkrovos bei momentų dėl horizontalių rėmo poslinkių (dar vadinami $P - \Delta$ efektais).

Pusiausvyros sąlyga geometriškai tiesinės analizės metode yra sudaroma nedeformuotam konstrukcijos būviui, jame nėra vertinami antrosios eilės efektai ir geometriniai netiesiškumai, todėl momentų pasiskirstymas elementuose yra vienodai ir tolygiai kintantis, žr. 2.2 pav.



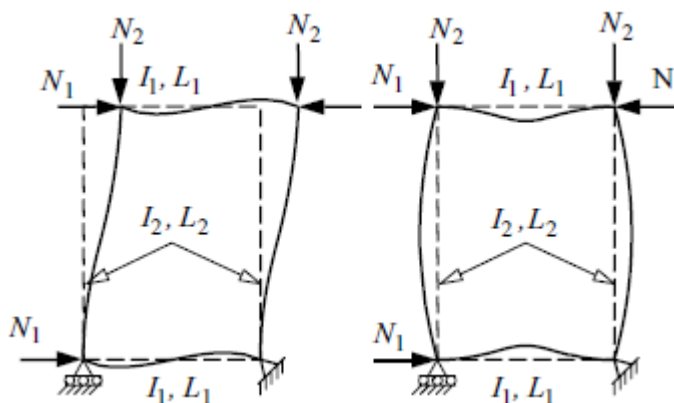
2.2 pav. Tiesinės analizės principas (Trahair *et al.*, 2008)

Pirmosios eilės analizė skirta prognozuoti tamprią rėmo elgseną iki pasireikš geometrinis medžiagos ir elementų netiesiškumas. Geometriškai tiesinė konstrukcijos analizė yra daugiausiai projektuotojų taikomas analizės metodas, į kurį galima papildomai įtraukti supaprastintų sprendinių, skirtų įvertinti medžiagos geometrinį netiesiškumą ar netobulumą. Toks papildomas netiesiškumo įvertinimas vadinamas lygiavertės kolonos metodu.

Lygiavertės kolonos metodas yra pagrįstas pirmosios eilės analize, įvertinantis antrosios eilės poveikius per elementų skaičiuojamuosius ilgius pagal konstrukcijos bendrąją klupumo formą. Atliekant rėmo kolonų stabilumo patikrinimą pasitelkus klupumo kreives, pagal kurias įvertinamos elementų nuokrypos, yra užtikrinamas bendras elementų ir viso rėmo stabilumas. Klupumo formai gauti reikia taip pat atlikti tampraus klupumo analizę. Tokia analizė atliekama pakeitus visas rėmo apkrovas į tokias, kur elementuose veikia tik ašinės jėgos, t.y. eliminuojama lenkimo momento įrąža (žr. 2.3 pav. schemą). Tokiu būdu norima nustatyti, kokia bus bendroji rėmo klupumo forma, ir tinkamai prognozuoti $P - \Delta$ efektus konstrukcijoje, kad būtų galima tiksliai apskaičiuoti kolonų skaičiuojamojo ilgio koeficientus μ .

Metodui yra taikomos dvi prielaidos (da Silva *et al.*, 2013):

- visos vieno aukšto kolonos klumpa kartu;
- visuminė rėmo kritinė apkrova atitinka silpniausio aukšto kritinę apkrovą.



2.3 pav. Pirmos ir antros nesuvaržyto rėmo klumpo formų atvaizdavimas (Trahair *et al.*, 2008)

Remiantis LST EN 1993-1-1 5.2.2(8) punktu, jei konstrukcijos pastovumas yra vertinamas taikant lygiavertės kolonos metodą pagal visas 6.3 poskyrio nuostatas, klumpamojo ilgio reikšmės turi būti grindžiamos bendrąja rėmo klumpo forma, atsižvelgiant į elementų ir mazgų standį, plastinių lankstų buvimą ir gniuždomųjų jėgų, veikiant skaičiuotinėms apkrovoms, pasiskirstymą. Šiuo atveju laikomajai galiai patikrinti taikomos vidinės jėgos apskaičiuojamos pagal pirmosios eilės teoriją, nepaisant nuokrypų.

Tačiau lygiavertės kolonos metodas neužtikrina visiškai saugių skaičiavimų rezultatų, nes tikslios klumpo formos ir skaičiuojamųjų ilgių koeficientų μ nustatymas sudėtingai konstrukcijai yra labai komplikotas ir dažnai netikslus, todėl praktiškai yra panaudojamas tik paprasčiausioms konstrukcijoms. Pavyzdžiui, vieno ar kelių aukštų stadiems rėmams arba vienaaukščiams pastatams, kuriuose sijos ar santvaros prie kolonų yra jungiamos lanksčiai.

Apsisaugoti nuo rizikos, projektuojant rėmą ir taikant šį analizės metodą, dažnai kolonos skaičiuojamasis ilgis priimamas kaip maksimalus (plieninėms konstrukcijoms $\mu = 2,0$). Be to, paliekama nemaža elementų išnaudojimo atsarga, pavyzdžiui, kad labiausiai apkrauto elemento veikiančiosios ir laikomosios galios santykis neviršytų $E_d / R_d < \sim 0,85$ (procentą pasirenka projektuotojas atsižvelgdamas į savo patirtį).

Anksčiau, kai visi skaičiavimai buvo atliekami rankiniu būdu, tai buvo priimtinas sprendimas, kadangi detalesnė antrosios eilės tamprioji analizė buvo tik teoriškai inžinieriams žinomas principas, o praktiškai – labai sudėtingas arba net ir neįmanomas. Tačiau dabar sprendimas projektuoti nesuvaržytą rėmą taikant geometriškai tiesinę analizę nėra optimalus ir saugus, nes pasilikta atsarga gali būti nepakankama arba nepamatuotai per didelė, o kompiuterinėmis programomis detalesnės analizės atlikti galima pakankamai greitai.

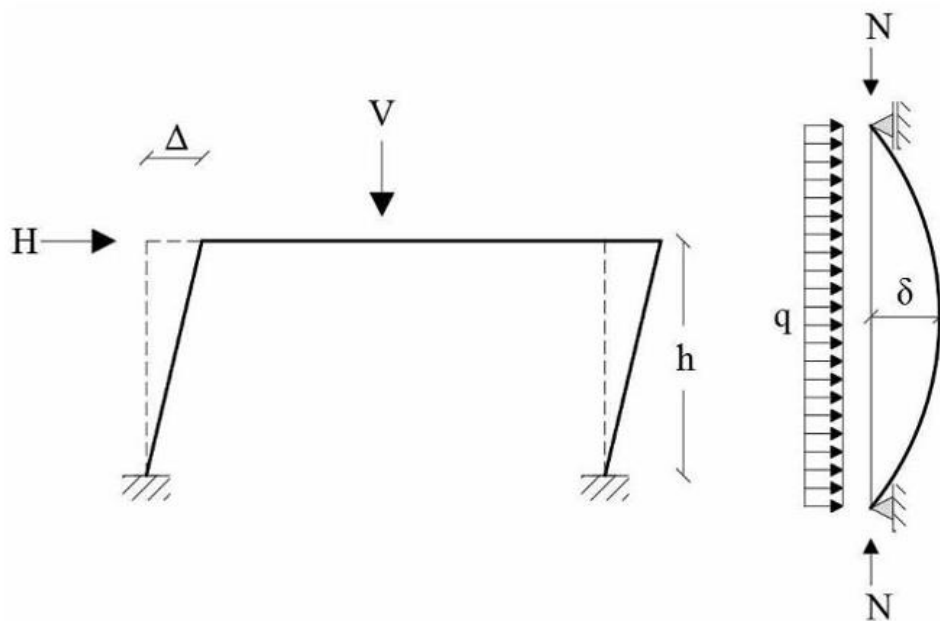
2.2 Antrosios eilės tamprioji analizė

Eksplotacinių apkrovų veikiamos rėminės konstrukcijos deformuojasi, jų pradinė geometrija kinta. Deformuotoje konstrukcijoje atsiranda nauji (ar padidėja jau buvę, jei pradinėje formoje buvo įvertinti) ekscentricitetai, kurie sukelia papildomas įrašas, dar vadinami antrosios eilės efektais. Pasikeitusi skaičiuojamoji konstrukcijos schema gali lemti griūtį, net ir tada, kai apkrovos nekinta, todėl schemą keičiančius poveikius būtina įvertinti. Projektuojant konstrukciją ir taikant antrosios eilės tampriąją analizę, dar vadinamą geometriškai netiesine analize, pusiausvyros sąlyga yra sudaroma deformuotam konstrukcijos būviui. Rėminei konstrukcijai atlikti tokią analizę yra būtina kompiuterinė programa, kuri galėtų greitai įvykdyti ilgą iteracinį skaičiavimą.

2.2.1 Antrosios eilės efektai

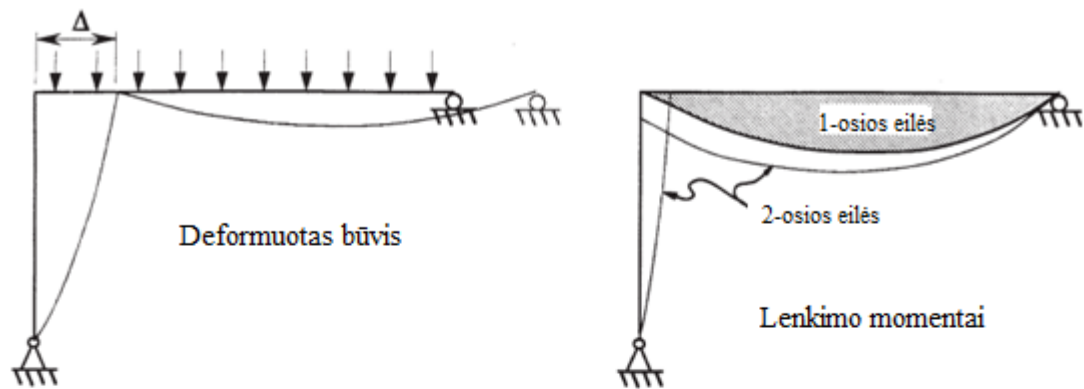
Antrosios eilės efektai literatūroje dar vadinami antrosios eilės momentais, kadangi lenkimo momentai dažniausiai yra pati pavojingiausia įraša konstrukcijai ir būtent jų padidėjimas yra pats aktualiausias projektuojant rėmus. Šie momentai yra skirstomi į du pagrindinius tipus pagal jų kilmę:

- 1) rėmo elementų deformacijų sukelti momentai vadinami $P - \delta$ efektais;
- 2) rėmo mazgų poslinkių sukelti momentai vadinami $P - \Delta$ efektais.

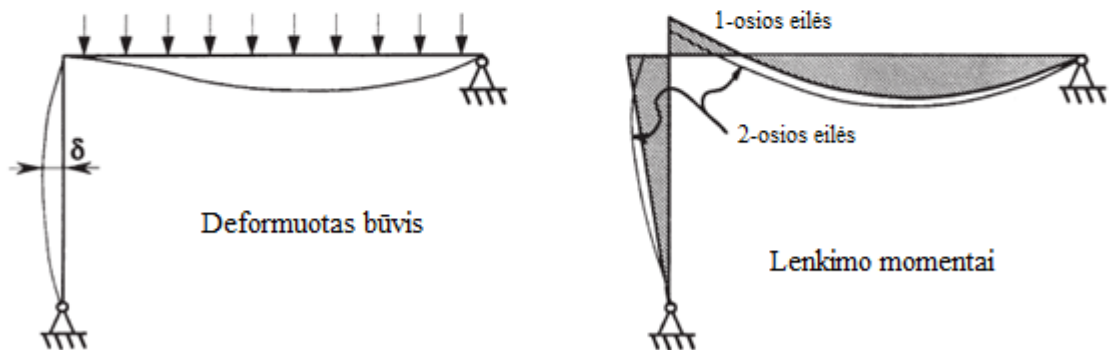


2.4 pav. $P - \Delta$ (kairėje) ir $P - \delta$ (dešinėje) efektų iliustracija (Vayas *et al.*, 2019)

P raidė šiuose pavadinimuose reiškia skaičiuotinę ašinę jėgą, δ ir Δ – deformacijas. Suvaržytiems rėmams didesnę įtaką turi $P - \delta$ efektai, kadangi mazgų poslinkiai yra labai maži arba jų išvis nėra. Tačiau nesuvaržytiems rėmams $P - \Delta$ efektai dažniausiai daro daug didesnę įtaką nei $P - \delta$ efektai, kadangi mazgų poslinkiai būna didesni už elementų deformacijas, susidaro didesni jėgos veikimo ekscentricitetai (Ziemian, 2010). Kiti mažiau reikšmingi antrosios eilės efektai atsiranda dėl elementų pailgėjimo (sutrumpėjimo) nuo juose veikiančių įtempių.



a) nesuvaržytas rėmas



b) suvaržytas rėmas

2.5 pav. Antrosios eilės efektų $P - \Delta$ ir $P - \delta$ sukeltų papildomų įrašų diagramos nesuvaržytiems ir suvaržytiems rėmams (Ziemian, 2010)

Nesuvaržyto rėmo pavyzdžio 2.5 pav. a dalyje pavaizduota lenkimo momentų diagrama atlikus pirmosios eilės tampriąją analizę atitinka lanksčiai įtvirtintos sijos atvejį. Atlikę antrosios eilės tampriąją analizę matome įrašų persiskirstymą dėl deformuotos konstrukcijos būvio. Standžiam sijos-kolonos mazge, sijos gale lenkimo momento reikšmė nebėra nulinė, todėl, išlaikant įrašų pusiausvyrą, tokio pat dydžio lenkimo momento reikšmė atsiranda ir kolonos gale. Taip, paprasčiausiu būdu, apibūdinami $P - \Delta$ efektai.

$P - \delta$ efektus apibūdinti galima pagal 2.5 pav. b dalyje pavaizduotą rėmą. Horizontalios rėmo deformacijos nėra galimos dėl suvaržymo, todėl elemente formuojasi išlinkis (δ deformacija). Ši deformacija gali būti dvikryptė, tačiau jos krypties idealaus elemento skerspjūvio atveju nuspėti neįmanoma, todėl projektuojant reikia numatyti tą, kuri yra konstrukcijai pavojingesnė. Šiuo atveju – kai išlinkis sutampa su lenkimo momento įrašos kryptimi, kas padidina pradinę lenkimo momento įrašos reikšmę. Taip pat dėl deformuoto kolonos būvio pasikeičia ir pati diagramos forma, įrašos pasiskirsto kitaip ir didžiausia reikšmė pasislenka nuo mazgo. Pasikeitus diagramai kolonoje, įtaka daroma ir sijai – išlaikant lenkimo momentų įrašų pusiausvyrą mazge, kai sumažėja įrašos reikšmė

kolonos elemento gale, ji taip pat mažėja ir sijos gale, o tai reiškia, kad padidėja sijos diagramos „pilvas“ – didžiausia elemente veikiančios įrašos reikšmė.

Taip pat svarbūs antrosios eilės efektų poveikiai konstrukcijoms:

1) Antrosios eilės efektai daro įtaką rėmo kolonomis, sijoms ir jų mazgams. Be to, dėl jų keičiasi ne tik lenkimo momento, bet ir ašinės bei skersinių jėgų reikšmės visoje konstrukcijoje. Tik šie pokyčiai praktiškai beveik nedaro jokios įtakos rėmo elementams, lyginant su lenkimo momentų įrašų pasikeitimu.

2) Antrosios eilės momentai ne visada būna pasiskirstę taip pat, kaip ir pirmosios eilės momentai, todėl antrosios eilės analizė įvertina ne tik lenkimo momentų įrašų prieaugį. Ir dėl to kiti projektavimo metodai, skirti įvertinti antrosios eilės efektams, netaikant geometriškai netiesinės analizės, ne visada yra tikslūs ir veiksmingi. Vienas iš tokių metodų aptariamas 2.3 poskyryje.

3) $P - \delta$ ir $P - \Delta$ efektai kartu veikia visas konstrukcijas, nesvarbu, jos suvaržytos ar nesuvaržytos. Ir nors 2.5 pav. pavaizduotuose pavyzdžiuose rodomos kraštutinės situacijos, kuomet dominuoja vienas iš šių efektų, tačiau kitas taip pat veikia, tam tikru dydžiu darydamas įtaką konstrukcijai. Pavyzdžiui, 2.5 pav. a dalyje esančiame (pavaizduotame) nesuvaržytame rėme $P - \Delta$ efektai sukelia kolonos lenkimą, o tai savo ruožtu generuoja $P - \delta$ efektus. 2.5 pav. b dalyje esančiame suvaržytame rėme sijos-kolonos mazgas šiek tiek pasislenka dėl ašinės jėgos poveikio sukulto kolonos patrupėjimo ir taip sąlygojami nedideli $P - \Delta$ efektai. Dažniausiai vienas ar kitas iš šių efektų projektuojant suvaržytą arba nesuvaržytą rėmą yra ignoruojamas. Tačiau reikia žinoti, kad šie pavyzdyje pateikti rėmai yra idealios teorinės skaičiuotinės sistemos ir kad realiame projektavime suvaržyti ir nesuvaržyti rėmai nebūna taip aiškiai apibrėžti. Tai reiškia, kad suvaržytam rėmui neįmanoma visiškai neleisti pasislinkti. Ir atvirkščiai, nesuvaržyto rėmo poslinkis pasiekia ribinę reikšmę.

4) Antrosios eilės efektams negalima taikyti superpozicijos principo. Jei 2.5 pav. a dalyje esantis rėmas būtų veikiamas tik šoninės apkrovos, jos sukulto poslinkio Δ negalėtume tiesiog sudėti su vertikalia apkrova veikiamos sijos sukeltu kolonos poslinkiu. Šiuos poveikius reikia vertinti kartu, nes poslinkio reikšmė ir įrašų dydžiai nesutaps su atskirai veikiančių ir susumuotų apkrovų sukeltu poveikių reikšmėmis.

5) Antrosios eilės efektai patys nekinta tiesiškai. Tai reiškia, kad antrosios eilės momentai ir poslinkiai veikiant skaičiuotinėms apkrovoms nėra tiesiogiai proporcingi tiems momentams ir poslinkiams, kuriuos sukelia charakteristinės apkrovos.

2.2.2 Rėmo jautrumas antrosios eilės efektams

Pagal LST EN 1993-1-1, jeigu deformuotos geometrijos veiksniai (antrosios eilės efektai) gerokai padidina įrašas arba reikšmingai keičia konstrukcijos elgseną, į juos būtina atsižvelgti.

Pirmosios eilės analizę leidžiama/prasminga taikyti, jei deformacijų sukulto atitinkamų įrašų padidėjimo ar kitokio konstrukcijos elgsenos pokyčio galima nepaisyti.

Konstrukcijos jautrumas antrosios eilės efektams apibūdinamas veikiančios skaičiuotinės apkrovos F_{Ed} ir kritinės tampriosios klupumo apkrovos F_{cr} santykiu, esant bendrajam nepastovumui. Šių jėgų santykis normose žymimas dydžiu α_{cr} . Tai yra koeficientas, kuriuo reiktų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad esant bendrajam nepastovumui pasireikštų tamprusis nepastovumas. α_{cr} koeficiento dydis LST EN 1993-1-1 nurodo, kada galima nepaisyti antrosios eilės efektų sukeltų poveikių konstrukcijai:

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

čia

F_{cr} – kritinė tamprioji konstrukcijos klupumo apkrova;

F_{Ed} – skaičiuotinė konstrukcijos apkrova.

Jei sąlyga yra tenkinama, konstrukcija nėra jautri antrosios eilės efektams ir jų vertinti projektuojant konstrukciją nebūtina. Tačiau jei ji nėra tenkinama, vadinasi antrosios eilės efektai konstrukcijai darys tokią įtaką, kurią būtina įvertinti.

Vienaukščiai pastatų rėmai su nedideliu stogo nuolydžiu bei sijos ir kolonos tipo plokštieji rėmai gali būti tikrinami kaip nesuvaržyti horizontalių poslinkių atžvilgiu, taikant pirmosios eilės analizę. Šių konstrukcijų α_{cr} koeficientas gali būti apskaičiuojamas pagal apytikslę formulę, jei rėmo sijų ašinis gniuždymas nėra žymus:

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

čia

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

V_{Ed} – bendroji skaičiuotinė vertikalioji apkrova, veikianti konstrukciją aukšto apačioje;

$\delta_{H,Ed}$ – aukšto viršaus horizontalusis poslinkis aukšto apačios atžvilgiu, kai rėmas yra veikiamas horizontaliųjų apkrovų, veikiančių kiekvieno aukšto perdangos lygyje;

h – aukšto aukštis.

Rėmo sijų ašinis gniuždymas laikomas žymiu ir 2.2 formulės naudoti negalima, jei:

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

čia

$\bar{\lambda}$ – sijų, laikomų jų geometrinio ilgio galuose įtvirtintais lankstais, sąlyginis liaunis rėmo plokštumoje;

N_{Ed} – skaičiuotinė gniuždomosios jėgos vertė;

A – sijos profiliuotio skerspjūvio plotas;

f_y – plieno stipris pagal takumo ribą.

2.3 Visuminė rėmo analizė

Visuminė rėmo analizė gali būti atlikta įvairiais skirtingais metodais, pagrįsta pirmosios arba antrosios eilės tampriąja arba plastine analizėmis. Pagal LST EN 1993-1-1, plastinę ir pirmosios eilės tamprią analizę galima naudoti tik tam tikrais atvejais, o tamprioji antrosios eilės analizė leidžiama visada.

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

- Nepriklausomai nuo įtempių dydžio, medžiagos įtempiai ir deformacinės savybės yra tiesinės.
- Vidinės jėgos ir momentai gali būti apskaičiuojami tampriąja analize net jei skerspjūvio laikomoji galia yra pagrįsta jo plastine laikomąja galia.
- Tamprioji analizė gali būti taikoma skerspjūviams, kurių laikomąją galią riboja vietinis klupumas.

Plastinė visuminė analizė yra galima, jei laikomasi sąlygų ir yra modeliuojama vienu iš šių metodų, pagal LST EN 1993-1-1 (5.4.1(3)):

- Konstrukcijos sukamoji geba elementuose ir mazguose tikrosiose plastinių lankstų vietose yra pakankama.
- Elemente susidarant plastiniam lankstui, jo skerspjūvis turi būti viensimetris arba dvisimetris, kai simetrijos plokštuma yra toje pačioje plastinio lanksto sukimosi plokštumoje.
- Mazge susidarant plastiniam lankstui, jis turi būti pakankamo stiprio, kad lankstas ten ir išliktų, arba turėti pakankamam posūkiui reikalingą plastinę laikomąją galią.

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

- Elementai turi pakankamą sukamąją gebą, kad lenkiamieji momentai galėtų reikiamai persiskirstyti.
- Elementai plastiniuose lankstuose išlieka stabilūs.
- Skaičiuojant konstrukcijų sistemos įrašas, konstrukcijos elgsena turi būti modeliuojama vienu iš šių metodų:
 - taikant tampriąją – plastinę analizę, kai plastiniai lankstai susidaro elemento skerspjūvyje arba mazge;
 - taikant netiesinę plastinę analizę bei dalinį elementų plastiškumą plastinėse zonose;
 - taikant analizę pagal standųjį plastiškąjį modelį, nepaisant tampriosios elgsenos tarp lankstų.

Konstrukcijų plastinė analizė šiame darbe nebus taikoma.

Projektavimo normos apibrėžia pagrindinius skaičiavimo būdus kaip įvertinti antrosios eilės efektus ir nuokrypas konstrukcijai, atsižvelgiant į rėmo visuminės analizės tipą.

1. Pagrindiniais nesudėtingais atvejais – tikrinant atskirų elementų stabilumą, kur klumpamasis ilgis priimamas pagal bendrąją klumpumo formą.
2. Iš dalies taikant visuminę analizę ir iš dalies tikrinant atskirų konstrukcijos elementų stabilumą.
3. Taikant išsamią antrosios eilės analizę, kartu įvertinant globaliuosius ir lokaliuosius antrosios eilės efektus $P - \Delta$ ir $P - \delta$.

Pirmasis metodas tik apytiksliai atsižvelgia į antrosios eilės efektus, ir jo pritaikymas didesnėms konstrukcijoms yra labai sudėtingas, dėl sunkiai randamos tikslios klumpumo formos ir skaičiuotinių elementų ilgių, dėl to praktikoje yra retai taikomas. Antrasis metodas $P - \delta$ efektus įvertina pasitelkus atskirų elementų pastovumo tikrinimą, o $P - \Delta$ efektus – visuminę analizę. Šis metodas yra plačiai taikomas projektuotojų, dėl pakankamai gero rezultatų tikslumo ir metodo taikymui reikalingo laiko santykio. Trečiasis metodas yra pats moderniausias, bet tuo pačiu ir pats sudėtingiausias. Taikant šį metodą globaliame lygyje yra modeliuojami geometriniai netiesiškumai ir lokalios nuokrypos, todėl šiuo metodu gauti rezultatai yra patys tiksliausi. Šiam metodui reikalingi dideli projektuotojo laiko ir kompiuteriniai resursai, dėl to, bent kol kas, metodas nėra plačiai naudojamas.

2.3.1 Pirmasis metodas

Pirmasis metodas yra vadinamas lygiavertės kolonos metodu ir yra pagrįstas pirmosios eilės analize, įvertinantis antrosios eilės poveikius per elementų skaičiuojamuosius ilgius pagal konstrukcijos bendrąją klupumo formą (1b). Šis metodas jau buvo aprašytas 2.1 poskyryje. Schemoje 1a skaičiavimo būdas lygiavertės kolonos metodu skirtas antrosios eilės efektams nejautrių rėmų projektavimui. Kai rėmas yra nejautrus, jo elementų skerspjūvius galima optimizuoti, tai yra priimti mažesnį skaičiuojamąjį ilgį nei yra geometrinis. Skaičiuotinio ilgio redukciją galima taikyti suvaržytuose rėmuose, jei juose be ryšių sistemos taip pat naudojamos standžios mazgų jungtys.

2.3.2 Antrasis metodas

Antrasis visuminės analizės metodas – įgyvendinamas iš dalies taikant visuminę analizę ir iš dalies tikrinant atskirų konstrukcijos elementų stabilumą. $P - \delta$ efektai šiuo metodu yra įvertinami atliekant atskirų elementų stabilumo patikrinimą, o $P - \Delta$ efektai pasitelkus visuminę analizę. Metodui galima pritaikyti tiek tampriąją, tiek plastinę analizes. Jis taip pat yra skirstomas į dvi smulkesnes metodikas, priklausomai nuo pasirinktos pirmosios arba antrosios eilės analizės ir nuokrypų vertinimo (2.6 pav. paveiksle metodika 2a ir 2b).

Pirmoji metodika (2a) yra pagrįsta pirmosios eilės tampriąja analize ir skaičiuotinių rėmo apkrovų padidinimu. Ši metodika taikoma rėmams, kuriems būdinga pirmoji laisvumo forma (2.3 pav., kairėje). Apkrovų didinimas priklauso nuo rėmo jautrumo antrosios eilės efektams koeficiento α_{cr} . Visa metodikos esmė yra padidinti rėmą veikiančias horizontaliąsias (tuo pačiu ir lygiavertės jėgas iš bendrųjų nuokrypų modeliavimo) apkrovas koeficientu:

$$\theta = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \quad (2.4)$$

Metodika gali būti taikoma, tik jei laikomasi sąlygos:

$$3 \leq \alpha_{cr} < 10 \quad (2.5)$$

Padidinus apkrovas koeficientu θ ir atlikus pirmosios eilės tampriąją analizę, gaunamos apytikslės konstrukcijos antrosios eilės įrąžos ir poslinkiai. Taip pat reikia papildomai atlikti rėminės konstrukcijos pastovumo patikrinimą, nes ši metodika to neapima. Kolonos efektyvusis ilgis stabilumo skaičiavimams priimamas kaip geometrinis ($\mu = 1,0$). Taikant tampriąją pirmosios eilės analizę taip pat turi būti vertinamos rėmo nuokrypos pagal 1.4 poskyrį.

Pagal LST EN 1993-1-1 (5.2.2 (6B)), daugiaaukščių rėmų antrosios eilės kampinio pokrypio poveikiai gali būti skaičiuojami šia nurodyta metodika, jei visuose aukštuose panašiai pasiskirsčiusios:

- vertikaliosios apkrovos;

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

Pirmosios metodikos taikymo eilės tvarka (da Silva *et al.*, 2013):

1. Kiekvienam rėmo aukštui pridedamos horizontaliosios atramos ir atliekama pirmosios eilės analizė, gaunamos atramų reakcijos.
2. Atramos pašalinamos ir vėl atliekama pirmosios eilės analizė, visas rėmo apkrovas pakeitus prieš tai gautomis horizontaliosiomis reakcijomis.
3. Sujungus pirmų dviejų punktų rezultatus gaunamos apytikslės antrosios eilės įrašos, kurios naudojamos tolimesniam konstrukcijos projektavimui.

Tas pačias apytiksles antrosios eilės įrašas bei poslinkius taip pat galima apskaičiuoti šiomis lygtimis:

$$d_{ap}^{II} = d_R^I + \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \cdot d_S^I \quad (2.6)$$

$$M_{ap}^{II} = M_R^I + \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \cdot M_S^I \quad (2.7)$$

$$V_{ap}^{II} = V_R^I + \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \cdot V_S^I \quad (2.8)$$

$$N_{ap}^{II} = N_R^I + \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}} \cdot N_S^I \quad (2.9)$$

čia

d - poslinkiai

M – lenkimo momentai;

V – skersinės jėgos;

N – ašinės jėgos;

ap – žymi apytikslę reikšmę;

S – žymi įrašas nuo atramų reakcijų, kaip apkrovų (2 punktas)

R – žymi horizontalių atramų reakcijas (1 punktas)

I ir II – žymi pirmąją ir antrąją eiles.

Antroji metodika – antrosios eilės analizė, vertinant tik globaliuosius antrosios eilės efektus $P - \Delta$ (2b). Šiuo atveju atliekama konstrukcijos antrosios eilės analizė, o $P - \delta$ efektai, kaip ir pirmoje metodikoje, įvertinami atskirai tikrinant rėmo elementų stabilumą, taip pat ir skaičiuotinį ilgį priimant

kaip geometrinį. Ši metodika sujungia antrosios eilės analizę ir lygiavertės kolonos (pirmojo metodo) privalumus. Laiko atžvilgiu projektuotojui ši metodika dažniausiai yra labiausiai priimtina, kadangi rezultatai ir konstrukcijos elgsena gaunami pakankamai tikslūs, išvengiama trečiojo metodo taikymo ir pirmojo metodo sunkumų – kolonų skaičiuojamojo ilgio nustatymo.

Pagal LST EN 1993-1-1 (5.3.2 (6)), gniuždomųjų elementų vietinių išlinkių sukelti poveikiai kartu su bendrosiomis nuokrypomis turi būti įtraukti į rėmo konstrukcijos analizę ir paisoma šių sąlygų:

- Viename elemento gale yra bent viena jungtis, perimanti momentus.

$$\lambda \geq 0,5 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}; \quad (2.10)$$

Galima taikyti pertvarkytą (2.10) išraišką:

$$N_{Ed} > 0,25 \cdot N_{cr}; \quad (2.11)$$

čia

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{eff}^2}; \quad (2.12)$$

λ - lankstais galuose įtvirtinto elemento plokštuminis liaunis;

N_{Ed} – skaičiuotinė gniuždančioji elementą veikianti jėga;

N_{cr} – elemento kritinė apkrova pagal Eulerio teoriją;

A – elemento skerspjūvio plotas;

f_y – plieno stipris pagal takumo ribą;

E – plieno tamprumo modulis;

I – elemento skerspjūvio inercijos momentas;

L_{eff} – elemento skaičiuotinis ilgis.

Jei (2.10) ar pertvarkyta (2.11) sąlyga nėra tenkinama ir elemente veikia reikšmingo dydžio ašinė jėga, tuomet yra du pasirinkimai, priklausomai nuo to, ar buvo vertintos elemento geometrinės nuokrypos (pradinis rėmo posvyris ir vietiniai išlinkiai) (2c). Jei nuokrypos yra įvertintos – galima naudoti 2b metodiką, jei ne – būtina taikyti trečiąjį projektavimo metodą.

Pradinio posvyrio ir vietinių išlinkių nuokrypų poveikius galima pakeisti lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemomis, taikomomis kiekvieno aukšto kolonomis, pagal 1.4 skyrių.

2.3.3 Trečiasis metodas

Trečiasis metodas iš visų, aprašytų literatūroje, yra pats inovatyviausias. Taikant šį metodą globaliame lygyje yra modeliuojami geometriniai netiesiškumai ir lokalsios nuokrypos, todėl šiuo metodu gauti rezultatai yra patys tiksliausi. Jis tiesiogiai įvertina antrosios eilės efektus ir bendrąsias bei vietines rėminės konstrukcijos nuokrypas. Tokiu būdu projektuojant yra labiausiai priartėjama prie tikrosios, eksploatacinių apkrovų veikiamo rėmo elgsenos. Naudojant šį metodą nuokrypos gali būti modeliuojamos keliais būdais:

- lygiavertė nuokrypa pradinio pokrypio ir vietinių išlinkių pavidalu (3a);
- tampriojo kritinio klupumo forma η_{cr} kaip vienintelė bendroji ir vietinė nuokrypa (3b).

Didelis metodo privalumas – jis įvertina visas konstrukcijos klupumo formas ir atskirai tikrinti stabilumo nereikia. Tačiau projektuojant sąlyginai paprastas konstrukcijas metodo taikymas reikalauja daug laiko ir specialių kompiuterinių programų (dauguma plačiausiai naudojamų programų nevertina elementų skersinio sukamojo klupumo), o rezultatai paprastai būna užtektinai tikslūs ir taikant antrąjį projektavimo metodą.

2.4 Iteracinis konstrukcijų skaičiavimas

Komercinės konstrukcijų skaičiavimo programos yra paremtos baigtinių elementų metodu (BEM) (angl. *finite element method* arba *FEM*). Yra daug skirtingų būdų modeliuoti konstrukcijos geometrinius netiesiškumus, tačiau visi jie kompiuterio apskaičiuojami priartėjimo (iteraciniu) būdu ir bendra forma užrašomi tokia išraiška (Ziemian, 2010):

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

čia

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

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

$[K]$ – konstrukcijos globalioji standumo matrica;

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

Vektorių $\{dR\}$ apibūdinant kaip veikiančios apkrovos prieaugio ir jai besipriešinančios elemento vidinės jėgos skirtumą, (2.13) lygtis gali būti užrašoma ir taip:

$$\{dR\} = \{dF_{app}\} - \{dF_{int}\} = [K]\{d\Delta\} \quad (2.14)$$

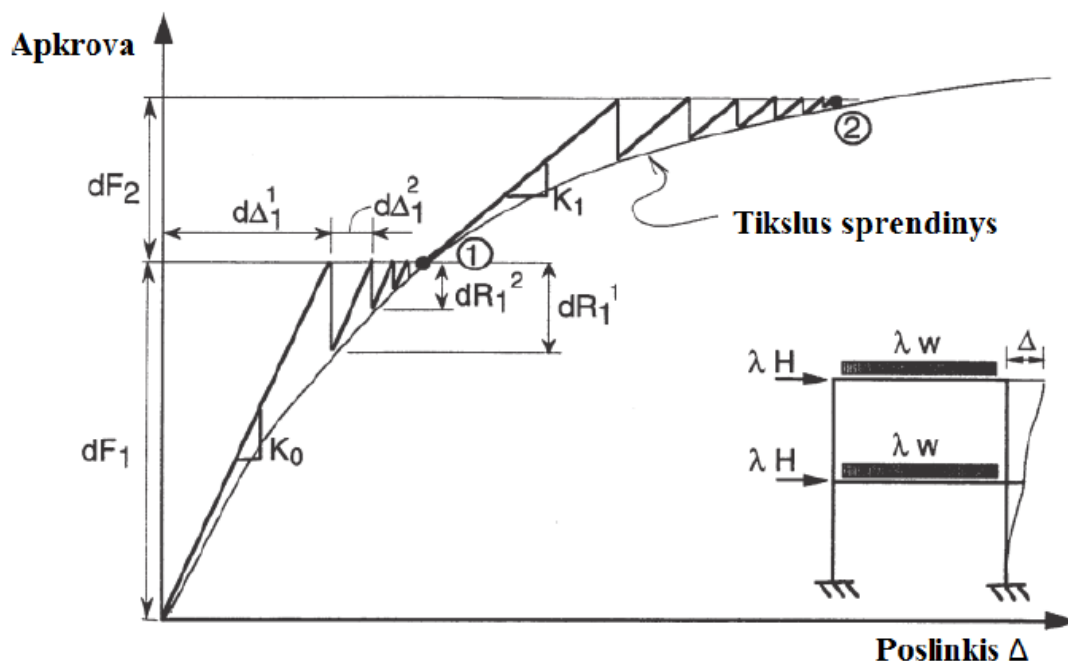
čia

$\{dF_{app}\}$ – veikiančios apkrovos prieaugis (angl. *applied*);

$\{dF_{int}\}$ – atsakomosios vidinės jėgos prieaugis (angl. *internal*).

(2.14) išraiška rodo, kad nesubalansuotos apkrovos vektorius $\{dR\}$ prasideda kaip didžiausia apkrovos prieaugio reikšmė, nes vidinės jėgos vektorius pradžioje lygus nuliui. Atliekant iteracijas nesubalansuotos jėgos vektorius nuosekliai mažėja, o vidinės jėgos vektorius didėja.

Požymis, išskiriantis antrosios eilės analizės rezultatus pagal (2.13) lygtį iš pirmosios eilės analizės rezultatų, yra toks, kad matricinės lygtys yra formuluojamos jėgų ir poslinkių prieaugio atžvilgiu, o nesubalansuotos jėgos vektorius pagal deformuotą konstrukcijos geometriją iteracijos pabaigoje.



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

2.7 paveiksle schematiškai pavaizduotas tikslaus konstrukcijos sprendinio radimas atliekant antrosios eilės analizę. Bet kokiam pasirinkto dydžio apkrovos prieaugiui $\{dF_i\}$ apskaičiuojamas poslinkio prieaugis $\{d\Delta_i^1\}$, naudojantis tiesine šių dydžių priklausomybe. Tuomet apskaičiuojamas veikiančios vidinės jėgos ir atsakančiosios jėgos vektoriaus skirtumas $\{dR_i^1\}$. Skaičiavimas atliekamas iteracijų (kartojimo) principu iki kol pasiekiamas konvergavimas, kai vektoriaus $\{dR_i^j\}$ reikšmė tampa nereikšminga bendrai pusiausvyros sąlygai.

Šis skaičiavimo metodas vadinamas apkrovos prieaugio arba modifikuotu Niutono – Rafsono metodu. Metodas yra naudojamas baigtinių elementų metodo programose kaip numatytas standartinis metodas (angl. *default method*) skaičiuojant antrosios eilės analizės rezultatus.

Modifikuotas Niutono – Rafsono metodas neįvertina konstrukcijos stabilumo ir skaičiavimas vyksta net ir po to, kai pasiekiamas kritinė konstrukcijos apkrova. Dėl to iteraciniam skaičiavimui gali būti naudojamos ir alternatyvos: poslinkio kontrolės ar arkos ilgio metodai.

3. NESUVARŽYTŲ RĖMINIŲ KONSTRUKCIJŲ SKAIČIAVIMAI

Šiame skyriuje nagrinėjami skirtingumo aukštingumo nesuvaržyti plieniniai rėmai. Baziniu dydžiu pasirinktas dvylikos aukštų rėmas, su kuriuo bus lyginami kiti – trijų, šešių, devynių ir penkiolikos aukštų. Rėmai analizuojami keturiais skirtingais atvejais ir trimis projektavimo metodais pagal LST EN 1993-1-1.

3.1 Rėmo analizės variantai

Be skaičiuojamosios schemos sudarymo ir visų konstrukciją veikiančių apkrovų surinkimo, norint optimaliai, bet užtikrinant saugumą, suprojektuoti plieninį daugiaaukštį rėmą, būtina vertinti svarbiausius tikrąją konstrukcijos elgseną keičiančius aspektus – nuokrypas ir mazgų standį.

3.1.1 Skaičiavimo atvejai

Tam, kad galima būtų nustatyti geometrinių nuokrypų ir dalinio standžio mazgų įtaką rėminei konstrukcijai, standūs plieniniai rėmai analizuojami keturiais skirtingais atvejais:

- 1) Nevertinant geometrinių nuokrypų ir visus rėmo mazgus laikant idealiai standžiais.
- 2) Įvertinant geometrines nuokrypas, panaudojant lygiavertes horizontaliąsias jėgas (pagal 1.4 poskyrį), visus rėmo mazgus laikant idealiai standžiais.
- 3) Įvedant dalinį sukamąjį sijų ir kolonų mazgų standį (pagal 1.3 poskyrį).
- 4) Įvertinant geometrines nuokrypas, panaudojant lygiavertes horizontaliąsias jėgas, ir įvedant dalinį sukamąjį kolonų ir sijų mazgų standį.

3.1.2 Skaičiavimo metodai

Kiekvienas iš keturių atvejų skaičiuojamas trimis rėmų analizės metodais.

Pirmuoju metodu yra apskaičiuojamos bazinės įrąžų, poslinkių ir kt. darbe nagrinėjamų dydžių vertės. Šios vertės gaunamos atliekant geometriškai tiesinį konstrukcijos skaičiavimą, taikant pirmosios eilės analizę. Pagal LST EN 1993-1-1, atliekant rėminės konstrukcijos visuminę analizę ir naudojant pirmosios eilės analizę turi būti taikomas lygiavertės kolonos principas, aprašytas 2.1 poskyryje (2.6 pav. metodas 1b), kai antrosios eilės efektai įvertinami naudojant skaičiuotinius elementų ilgius. Tačiau šiame darbe principas nebus taikomas ir rėmo kolonų bei sijų ilgiai priimami kaip geometriniai, o antrosios eilės efektai nebus vertinami taikant pirmąjį metodą. Netaikyti lygiavertės kolonos principo pasirinkta dėl to, kad rėmo įrąžoms ir poslinkiams įtakos tai nedaro, o kolonos laikomosios galios išnaudojimas paskaičiuotas antruoju ir trečiuoju metodu bus lyginamas su pirmuoju, dėl to elementams išlaikomos vienodos sąlygos.

Antrasis analizės metodas tai 2.3.2 poskyryje aprašyta pirmoji metodika (2.6 pav. 2a), pagrįsta pirmosios eilės tampriąja analize ir skaičiuotinių horizontaliųjų rėmo apkrovų padidinimu koeficientu θ .

Trečiasis metodas – 2.3.2 poskyryje aprašyta antroji metodika (2.6 pav. 2b), kai atliekama geometriškai netiesinė antrosios eilės analizė vertinant tik globaliuosius antrosios eilės efektus $P - \Delta$.

Geometrinės nuokrypos

Rėmo geometrinės nuokrypos įvertinamos pradinio posvyrio ir vietinio elementų išlinkio poveikius apskaičiuojant ir pakeičiant lygiavertėmis horizontaliosiomis apkrovomis pagal 1.4 poskyrį:

Bendrosios pradinės nuokrypos pagal (1.7) išraišką:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m$$

čia

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

α_h – kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas;

α_m – kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas.

Skaičiuojamas kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas pagal (1.8) išraišką:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{42}} = 0,308,$$

$$\text{bet } 2/3 \leq \alpha_h \leq 1,0 \rightarrow \alpha_h = 0,67$$

Skaičiuojamas kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas pagal (1.9) išraišką:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5 \cdot \left(1 + \frac{1}{4}\right)} = 0,79$$

čia

m – kolonų skaičius eilėje, kurios laiko vertikaliąją apkrovą N_{Ed} .

Rėmo aukštis ir kolonų skaičius iš 3.2 poskyrio.

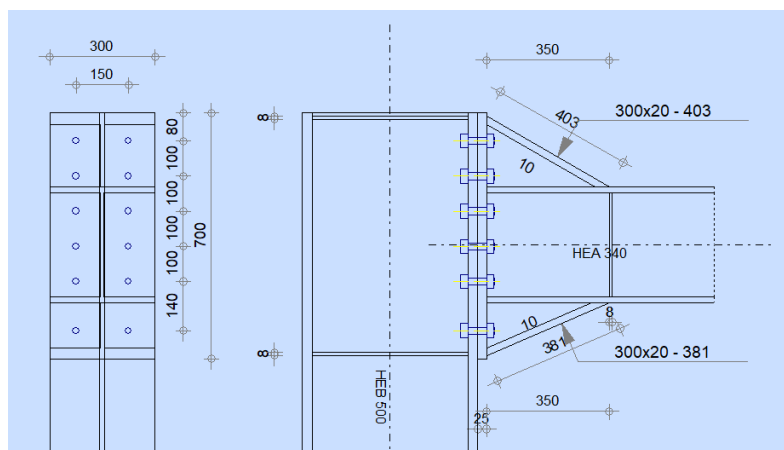
Skaičiuojamos bendrosios pradinės nuokrypos:

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m = 1/200 \cdot 0,67 \cdot 0,79 = 0,00265 \text{ rad}$$

Lygiavertės horizontaliosios koncentruotos apkrovos kiekvieno aukšto viršuje gaunamos aukšto apačios ašinę jėgą (nuo derinio, kuriame veikia tik vertikalios apkrovos) padauginus iš gauto koeficiento ϕ .

Dalinis mazgų standis

Įvedant dalinį sijų ir kolonų mazgų standį pasirinkta $S_j = 75\% S_{j,rig}$ reikšmė, tokio mazgo pavyzdį žr. 3.1 pav.

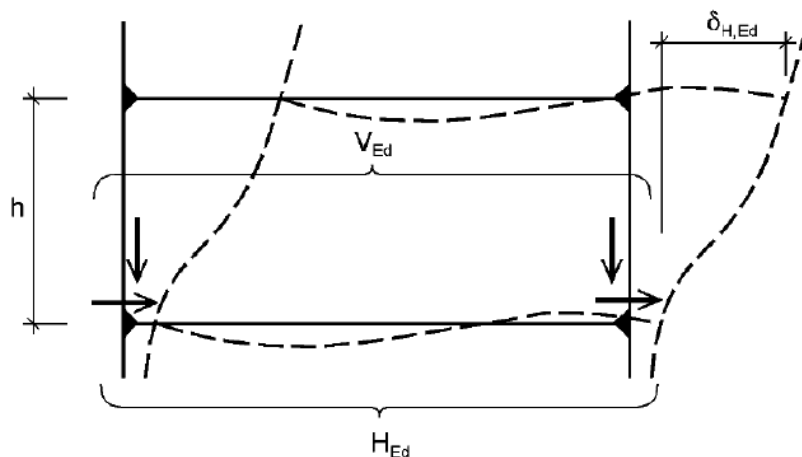


3.1 pav. Dalinai standaus mazgo, naudojamo rėme, iliustracija

Analizės algoritmas

Pradžioje apskaičiuojamas pirmasis rėmo atvejis pagal pirmąjį projektavimo metodą ir parenkami rėmo elementų skerspjūviai. Parinkus rėmo skerspjūvius, visiems likusiems skaičiavimo atvejams atliekamas geometriškai tiesinis skaičiavimas (pirmosios eilės analizė) ir nustatomas jautrumas antrosios eilės efektams. Remiantis LST EN 1993-1-1, rėmo jautrumas antrosios eilės poveikiams yra nustatomas pagal koeficientą α_{cr} , pasitelkus tampriosios kritinės jėgos F_{cr} ir veikiančios jėgos F_{Ed} santykį. Šiame skyriuje naudojamas α_{cr} koeficientas apskaičiuojamas pagal 2.2.2 poskyryje nurodytą išraišką (2.2):

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



3.2 pav. Dydžiai koeficientui α_{cr} nustatyti (LST EN 1993-1-1)

čia

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

V_{Ed} – bendroji skaičiuotinė vertikalioji apkrova, veikianti konstrukciją aukšto apačioje;

$\delta_{H,Ed}$ – aukšto viršaus horizontalusis poslinkis aukšto apačios atžvilgiu, kai rėmas yra veikiamas horizontaliųjų apkrovų, veikiančių kiekvieno aukšto perdangos lygyje;
 h – aukšto aukštis.

Gavus visų rėmo skaičiavimo atvejų koeficiento α_{cr} reikšmes, atliekamas antrasis projektavimo metodas, kuomet visos horizontaliosios apkrovos yra padidinamos ir iš naujo atliekama pirmosios eilės analizė. Apkrovos didinamos koeficientu θ pagal 2.3.2 poskyryje nurodytą išraišką (2.4):

$$\theta = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}}, \quad \text{jei } \alpha_{cr} \geq 3,0.$$

Pagal LST EN 1993-1-1 (5.2.2 (6B)), daugiaaukščių rėmų antrosios eilės kampinio pokrypio poveikiai gali būti skaičiuojami aukščiau nurodytu metodu, jei visuose rėmo aukštuose panašiai pasiskirsčiusios:

- vertikaliosios apkrovos;
- horizontaliosios apkrovos;
- rėmo standžio reikšmės, turint omenyje aukštuose veikiančias skersines jėgas.

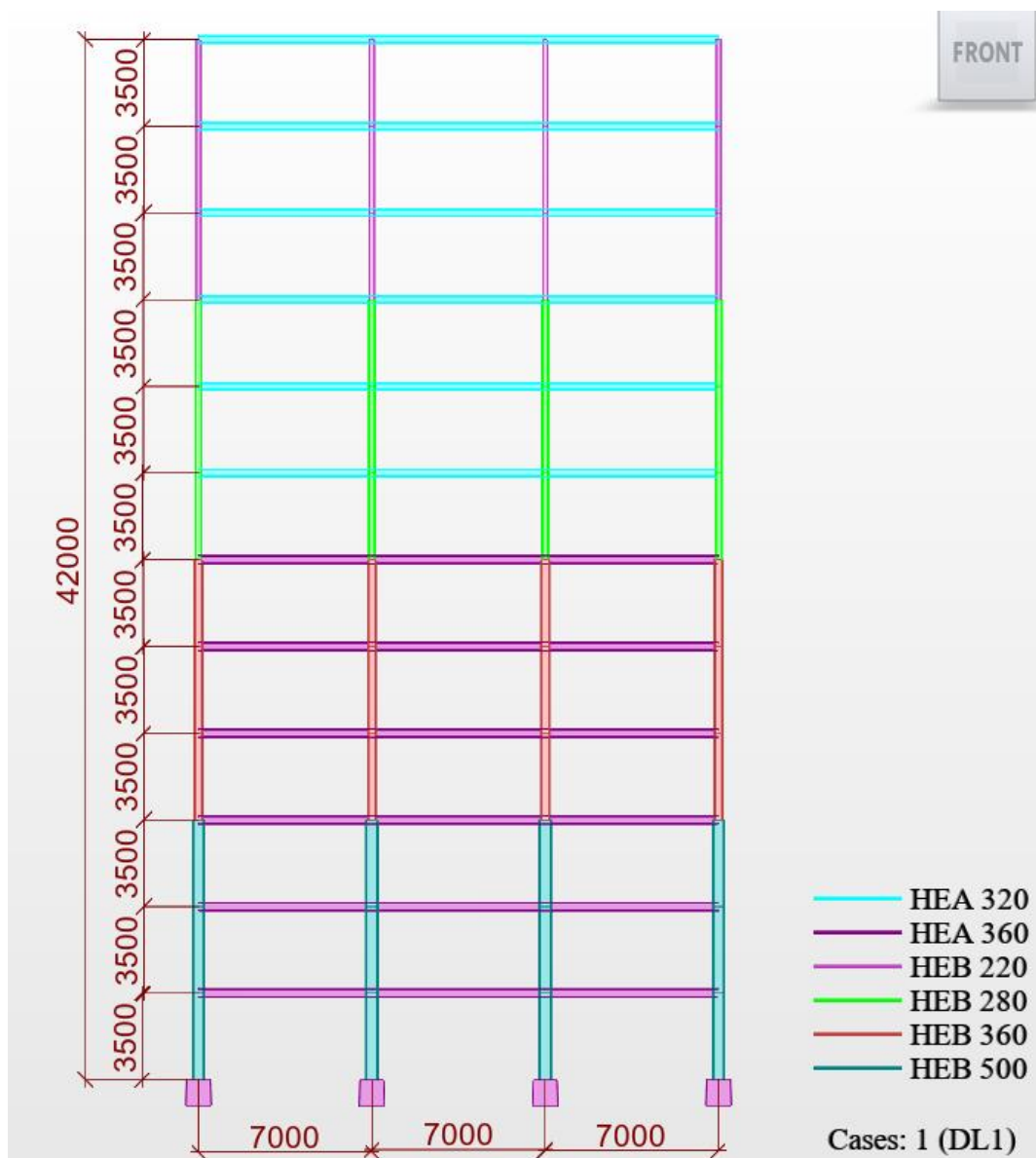
Paskutinė sąlyga nėra tenkinama, kadangi vertikalioji ir horizontalioji veikiančios jėgos aukštuose nekinta, o rėmo standumas (kolonos profilio dydis) mažėja. Tačiau darbe tokia analizė vis tiek atliekama, norint įsitikinti, kokį poveikį įrašų pokyčiui tai darys.

Galiausiai taikomas kiekvieno rėmo trečiasis projektavimo metodas – geometriškai netiesinis skaičiavimas (antrosios eilės analizė), įvertinant tik $P - \Delta$ efektus.

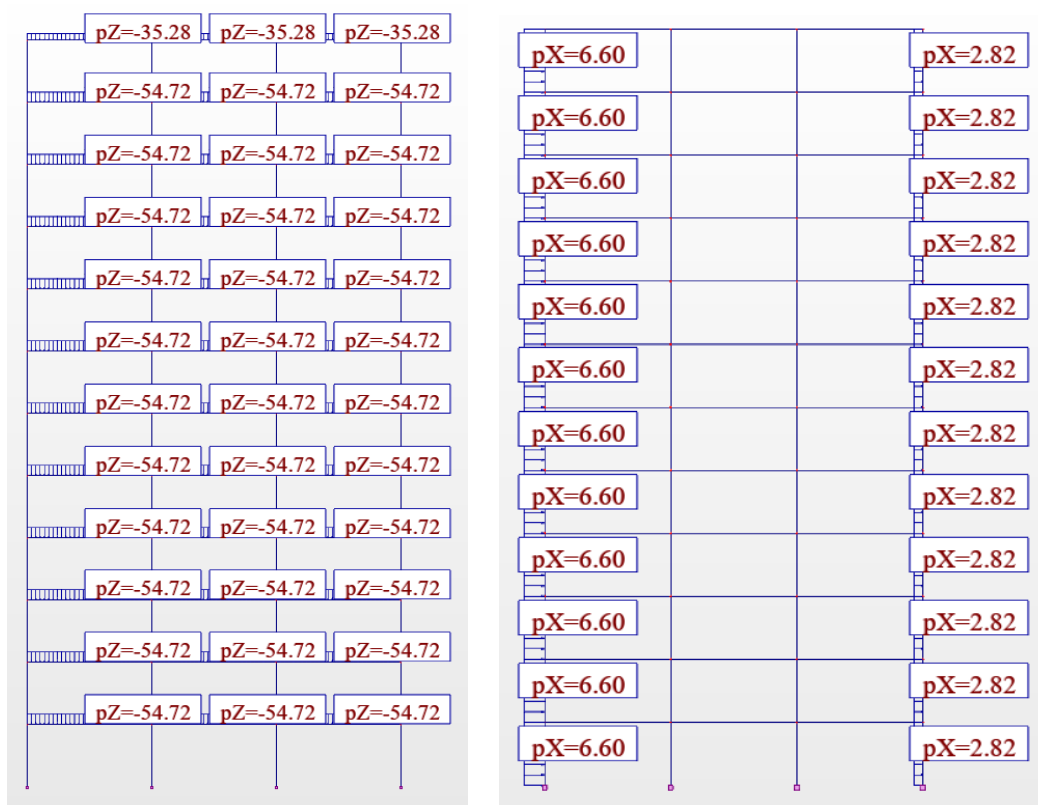
3.2 Dvylikos aukštų rėmas

3.2.1 Tiriamosios konstrukcijos pradinė schema

Pirmasis tiriamasis objektas yra keturių atramų dvylikos aukštų plieninis rėmas (žr. 3.3 pav.) Rėmo kolonų skerspjūviai – dvitėjai HEB profiliuočiai, sijų – dvitėjai HEA profiliuočiai. Rėmui priskiriamos charakteristinės savojo svorio, nuolatinės, naudojimo ir sniego apkrovos yra sutraukiamos į vieną bendrą vertikaliąją apkrovą, kintamos (vėjo) apkrovos yra horizontaliosios. Apkrovos suskirstytos tik į dvi rūšis dėl skaičiavimo paprastumo ir greitumo, kadangi vertikaliųjų apkrovų išskaidymas į atskiras rūšis analizės rezultatų praktiškai nekeičia. Visi toliau pateikiami analizių **rezultatai (įrašos, poslinkiai) yra skaičiuotinės reikšmės**, visoms apkrovoms veikiant vienu metu. Toks rėmo apkrovimo derinys realybėje nėra įmanomas, todėl ir tinkamumo ribinio būvio reikalavimai rėmams šioje analizėje netaikomi, skerspjūviai yra parinkti tik pagal saugos ribinį būvį.



3.3 pav. Dvylikos aukštų rėmo geometrija



3.4 pav. Vertikaliųjų ir horizontaliųjų rėmo apkrovų schemas (reikšmės kN/m)

Toliau pateikiami keturi skaičiavimo atvejai (pagal 3.1.1 poskyrį) ir visais atvejais panaudoti trys skaičiavimo metodai (pagal 3.1.2 poskyrį).

3.2.2 12-os aukštų rėmo pirmasis skaičiavimo atvejis

Pirmuoju skaičiavimo atveju rėmo mazgai yra idealiai standūs, nėra vertinamos rėmo geometrinės nuokrypos. Atlikus geometriškai tiesinę rėmo analizę (pirmąjį metodą), gaunami rezultatai, nurodyti 3.1 ir 3.2 lentelėse. Ašinių jėgų ir lenkimo momento įrašos bei poslinkiai šiame ir visuose kituose rėmuose bus lyginamos dešiniojoje rėmo kolonoje, kur pastebėti didžiausi pokyčiai.

3.1 lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (1-asis atvejis)

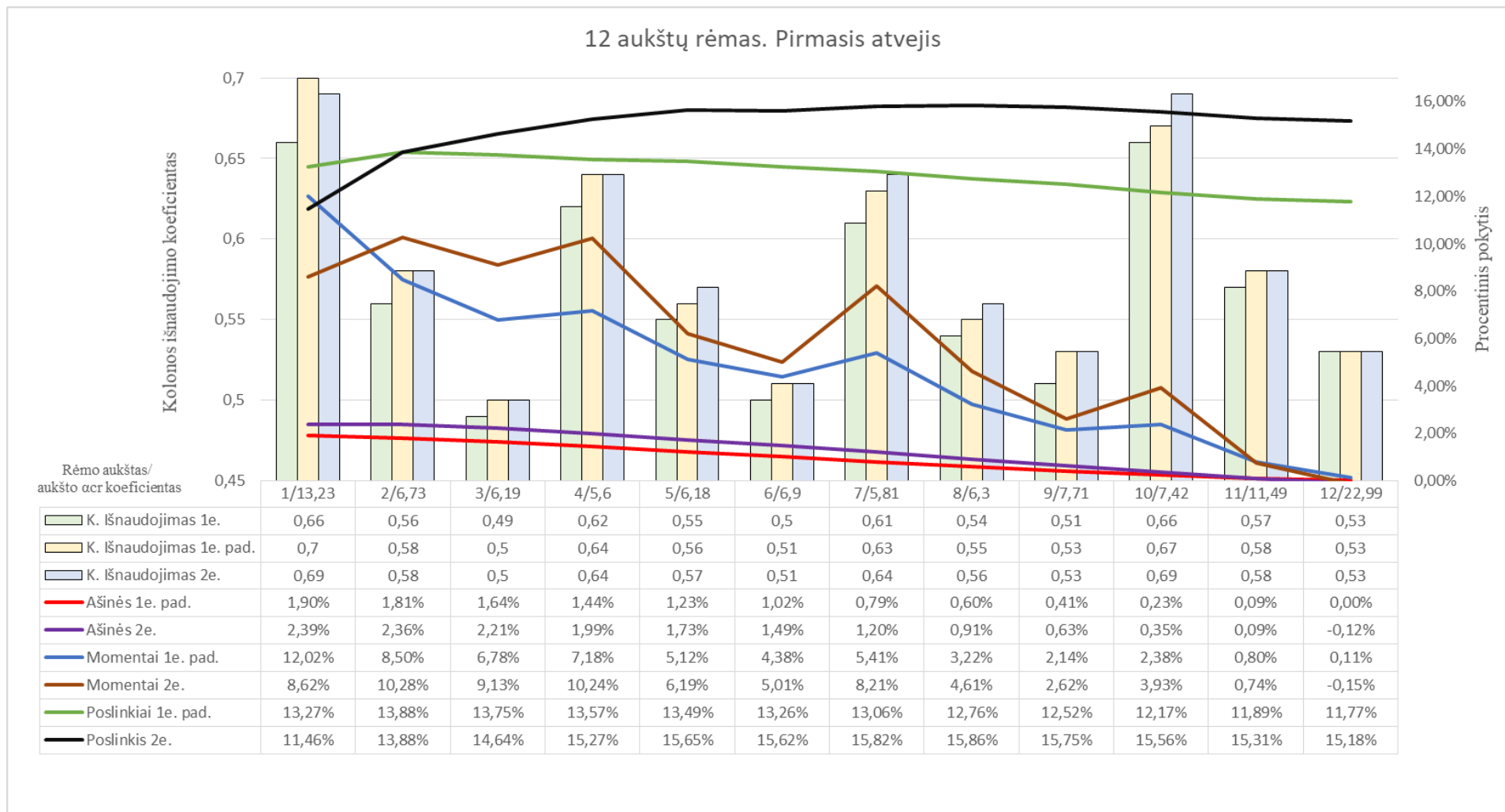
Aukštas	Kolonos išnaudojimas	Ašinės jėgos, kN	Lenkimo momentai, kNm	Poslinkis, mm
1	0,66	3706,7	-531,4	8,5
2	0,56	3374,7	-398,8	24,2
3	0,49	3023,77	-314,91	41,4
4	0,62	2670,97	-266,09	60,5
5	0,55	2326,12	-273,07	77,6
6	0,5	1984,48	-267,83	92,9
7	0,61	1650,05	-229,08	111,2
8	0,54	1336,06	-228,25	127,9
9	0,51	1025,57	-218,53	141,2
10	0,66	726,65	-154,57	155,2
11	0,57	445,51	-163,1	163,8
12	0,53	171,11	-147,69	167,1

Gavus rėmo įrašas ir poslinkius paskaičiuojami kiekvieno aukšto α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ antrajam skaičiavimo metodui, kuomet padidinamos rėmo horizontaliosios apkrovos.

3.2 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (1-asis atvejis)

Aukštas	α_{cr}	Didinimo koef. θ	Vėjo apkrova 1, kN/m	Vėjo apkrova 2, kN/m
1	13,23	1,082	7,14	3,05
2	6,73	1,175	7,75	3,31
3	6,19	1,193	7,87	3,36
4	5,6	1,217	8,03	3,43
5	6,18	1,193	7,87	3,36
6	6,9	1,169	7,72	3,30
7	5,81	1,208	7,97	3,41
8	6,3	1,189	7,85	3,35
9	7,71	1,149	7,58	3,24
10	7,42	1,156	7,63	3,26
11	11,49	1,095	7,23	3,09
12	22,99	1,045	6,90	2,95

Pasitelkus pirmąjį skaičiavimo metodą ir gavus rezultatus, pereinama prie antrojo ir trečiojo skaičiavimų metodų. Antruoju rėmo horizontaliosios apkrovos padidinamos iki reikšmių, nurodytų 3.2 lentelėje, o trečiuoju su pirminėmis apkrovomis atliekamas rėmo geometriškai netiesinis skaičiavimas (antrosios eilės analizė). Rezultatai pateikiami 3.5 pav. Grafike antrojo ir trečiojo metodų procentiniai ašinių jėgų, lenkimo momentų įrašų, poslinkio ir kolonos laikomosios galios išnaudojimo pokyčiai lyginami su pirmuoju metodu.

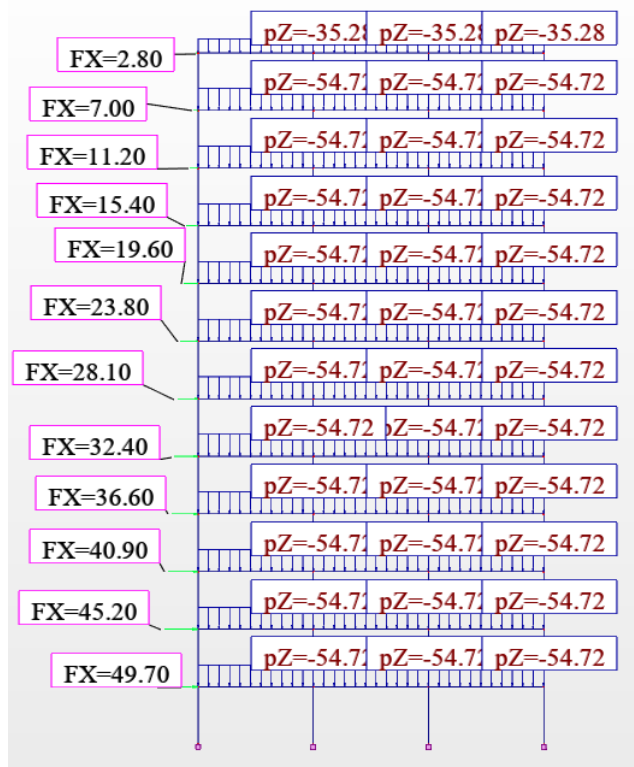


3.5 pav. 12-os aukštų rėmo pirmojo atvejo rezultatų grafikas

Grafike naudojami sutrumpinimai: K. – kolonos, 1e. – pirmosios eilės analizė (pirmasis metodas), 1e. pad. – pirmosios eilės analizė su padidintomis apkrovomis (antrasis metodas), 2e. – antrosios eilės analizė (trečiasis metodas).

3.2.3 12-os aukštų rėmo antrasis skaičiavimo atvejis

Antruoju rėmo skaičiavimo atveju yra įvertinamos jo geometrinės nuokrypos. Pagal 3.1 poskyryje pateiktus nurodymus rėmo apkrovos yra papildomos lygiavertėmis horizontaliosiomis jėgomis (žr. 3.6 pav). Rėmo mazgai idealiai standūs. Atlikus geometriškai tiesinę rėmo analizę (pirmąjį metodą), gaunami rezultatai, nurodyti 3.3 ir 3.4 lentelėse.



3.6 pav. Apkrovų schema, papildyta lygiavertėmis horizontaliosiomis apkrovomis

3.3 lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (2-asis atvejis)

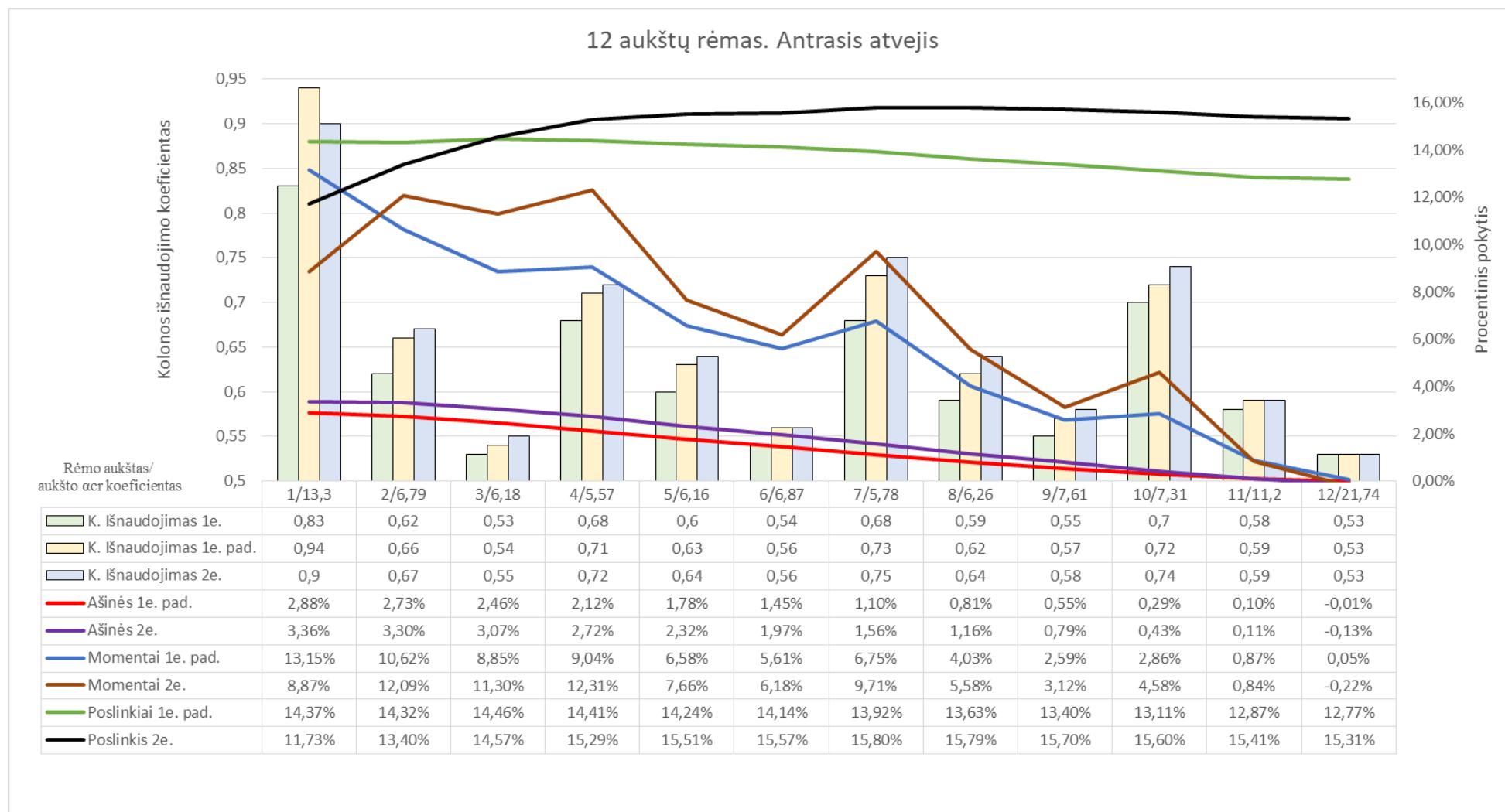
Aukštas	Kolonos išnaudojimas	Ašinės jėgos	Lenkimo momentai	Poslinkis
1	0,83	3964,3	-850,4	14,3
2	0,62	3591,8	-545,17	40,7
3	0,53	3193,45	-391,97	68,6
4	0,68	2796,15	-333,19	98,6
5	0,6	2414,87	-316,82	124,7
6	0,54	2044,54	-300,9	147
7	0,68	1687,18	-263,66	172,6
8	0,59	1358,3	-246,59	195,2
9	0,55	1037,28	-228,79	212,6
10	0,7	731,5	-162,56	230
11	0,58	446,87	-165,72	240,4
12	0,53	171,23	-147,68	244,5

Gavus rėmo įrašas ir poslinkius, paskaičiuojami kiekvieno aukšto α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ antrajam skaičiavimo metodui, kuomet padidinamos rėmo horizontaliosios apkrovos.

3.4 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (2-asis atvejis)

Aukštas	α_{cr}	Didinimo koef.	Vėjo apkrova 1, kN/m	Vėjo apkrova 2, kN/m	Padidinta lyg. Horiz. Apkrova, kN
1	13,3	1,081	7,14	3,05	53,74
2	6,79	1,173	7,74	3,31	53,01
3	6,18	1,193	7,87	3,36	48,80
4	5,57	1,219	8,04	3,44	44,61
5	6,16	1,194	7,88	3,37	38,68
6	6,87	1,170	7,72	3,30	32,89
7	5,78	1,209	7,98	3,41	28,78
8	6,26	1,190	7,85	3,36	23,33
9	7,61	1,151	7,60	3,25	17,73
10	7,31	1,158	7,65	3,27	12,97
11	11,2	1,098	7,25	3,10	7,69
12	21,74	1,048	6,92	2,96	2,94

Pasitelkus pirmąjį skaičiavimo metodą ir gavus rezultatus, pereinama prie antrojo ir trečiojo skaičiavimų metodų. Antruoju rėmo horizontaliosios apkrovos padidinamos iki reikšmių, nurodytų 3.4 lentelėje, o trečiuoju su pirminėmis apkrovomis atliekamas rėmo geometriškai netiesinis skaičiavimas (antrosios eilės analizė). Rezultatai pateikiami 3.7 pav. Grafike antrojo ir trečiojo metodų procentiniai ašinių jėgų, lenkimo momentų įrąžų, poslinkio ir kolonos laikomosios galios išnaudojimo pokyčiai lyginami su pirmuoju metodu.



3.7 pav. 12-os aukštų rėmo antrojo atvejo rezultatų grafikas

Grafike naudojami sutrumpinimai: K. – kolonos, 1e. – pirmosios eilės analizė (pirmasis metodas), 1e. pad. – pirmosios eilės analizė su papildintomis apkrovomis (antrasis metodas), 2e. – antrosios eilės analizė (trečiasis metodas).

3.2.4 12-os aukštų rėmo trečiasis skaičiavimo atvejis

Trečiuoju rėmo skaičiavimo atvejis yra įvertinamas dalins rėmo kolonų-sijų mazgų standis. Geometrinės rėmo nuokrypos nėra vertinamos. Atlikus geometriškai tiesinę rėmo analizę (pirmąjį metodą), gaunami rezultatai, nurodyti 3.5 ir 3.6 lentelėse.

3.5 lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (3-iasis atvejis)

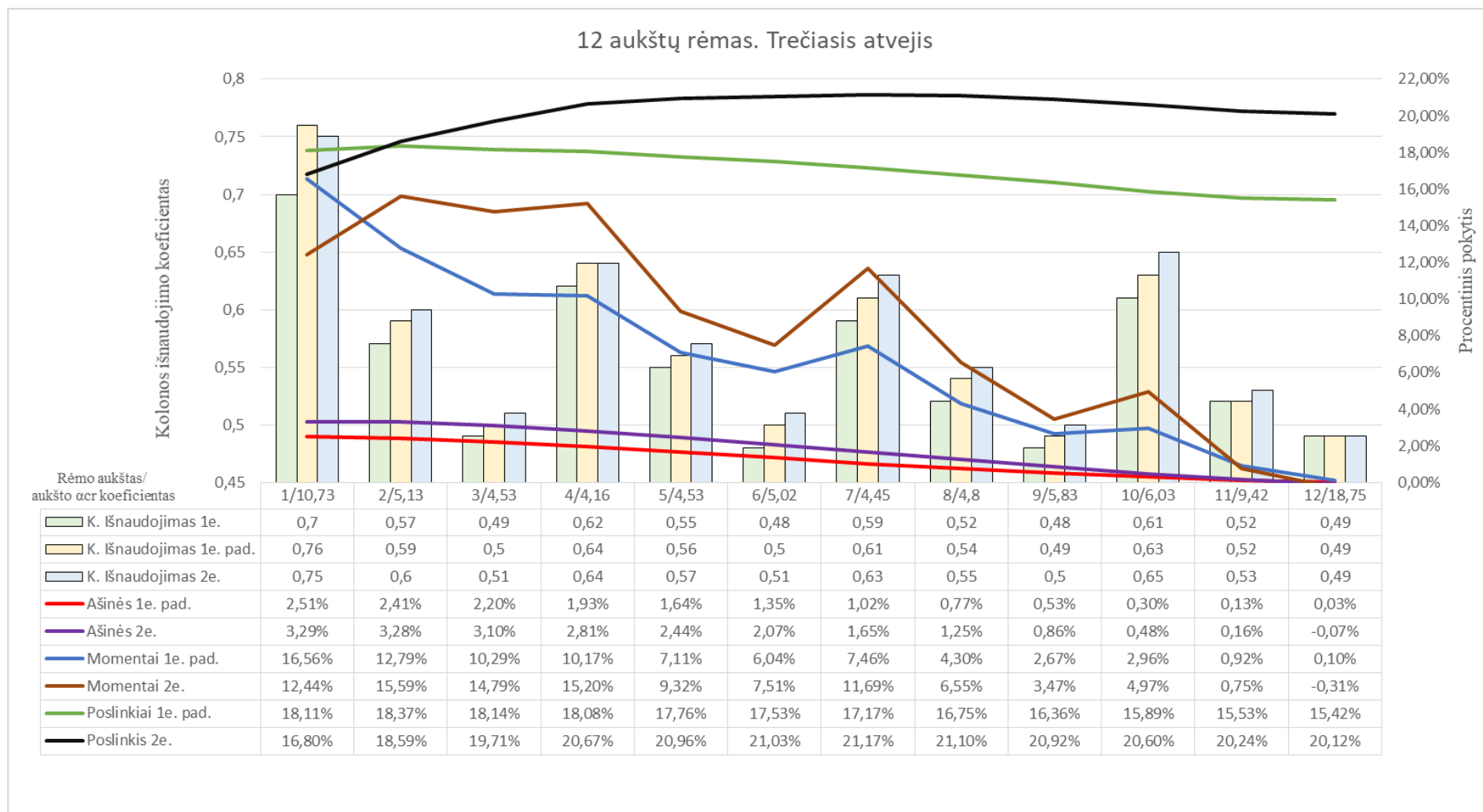
Aukštas	Kolonos išnaudojimas	Ašinės jėgos	Lenkimo momentai	Poslinkis
1	0,7	3686,3	-595,5	10,4
2	0,57	3361,02	-418	31,1
3	0,49	3016,49	-305,05	54,6
4	0,62	2668,26	-246,54	80,2
5	0,55	2325,97	-243,73	103,7
6	0,48	1987,37	-236,29	124,7
7	0,59	1654,7	-210,17	148,6
8	0,52	1342,13	-203,41	170,5
9	0,48	1033,45	-191,04	188,2
10	0,61	734,37	-139,24	205,4
11	0,52	450,88	-146,56	215,9
12	0,49	174,17	-132,59	220

Gavus rėmo įrašas ir poslinkius paskaičiuojami kiekvieno aukšto α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ antrajam skaičiavimo metodui, kuomet padidinamos rėmo horizontaliosios apkrovos.

3.6 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (3-iasis atvejis)

Aukštas	α_{cr}	Didinimo koef.	Vėjo apkrova 1, kN/m	Vėjo apkrova 2, kN/m
1	10,73	1,103	7,28	3,11
2	5,13	1,242	8,20	3,50
3	4,53	1,283	8,47	3,62
4	4,16	1,316	8,69	3,71
5	4,53	1,283	8,47	3,62
6	5,02	1,249	8,24	3,52
7	4,45	1,290	8,51	3,64
8	4,8	1,263	8,34	3,56
9	5,83	1,207	7,97	3,40
10	6,03	1,199	7,91	3,38
11	9,42	1,119	7,38	3,15
12	18,75	1,056	6,97	2,98

Pasitelkus pirmąjį skaičiavimo metodą ir gavus rezultatus, pereinama prie antrojo ir trečiojo skaičiavimų metodų. Antruoju rėmo horizontaliosios apkrovos padidinamos iki reikšmių, nurodytų 3.6 lentelėje, o trečiuoju su pirminėmis apkrovomis atliekamas rėmo geometriškai netiesinis skaičiavimas (antrosios eilės analizė). Rezultatai pateikiami 3.8 pav. Grafike antrojo ir trečiojo metodų procentiniai ašinių jėgų, lenkimo momentų įrašų, poslinkio ir kolonos laikomosios galios išnaudojimo pokyčiai lyginami su pirmuoju metodu.



3.8 pav. 12-os aukštų rėmo trečiojo atvejo rezultatų grafikas

Grafike naudojami sutrumpinimai: K. – kolonos, 1e. – pirmosios eilės analizė (pirmasis metodas), 1e. pad. – pirmosios eilės analizė su papildintomis apkrovomis (antrasis metodas), 2e. – antrosios eilės analizė (trečiasis metodas).

3.2.5 12-os aukštų rėmo ketvirtasis skaičiavimo atvejis

Ketvirtuoju rėmo skaičiavimo atveju yra įvertinamas dalinis rėmo kolonų-sijų mazgų standis ir geometrinės nuokrypos. Atlikus geometriškai tiesinę rėmo analizę (pirmąjį metodą), gaunami rezultatai, nurodyti 3.7 ir 3.8 lentelėse.

3.7 lentelė. Rėmo įrašos ir poslinkiai (4-asis atvejis)

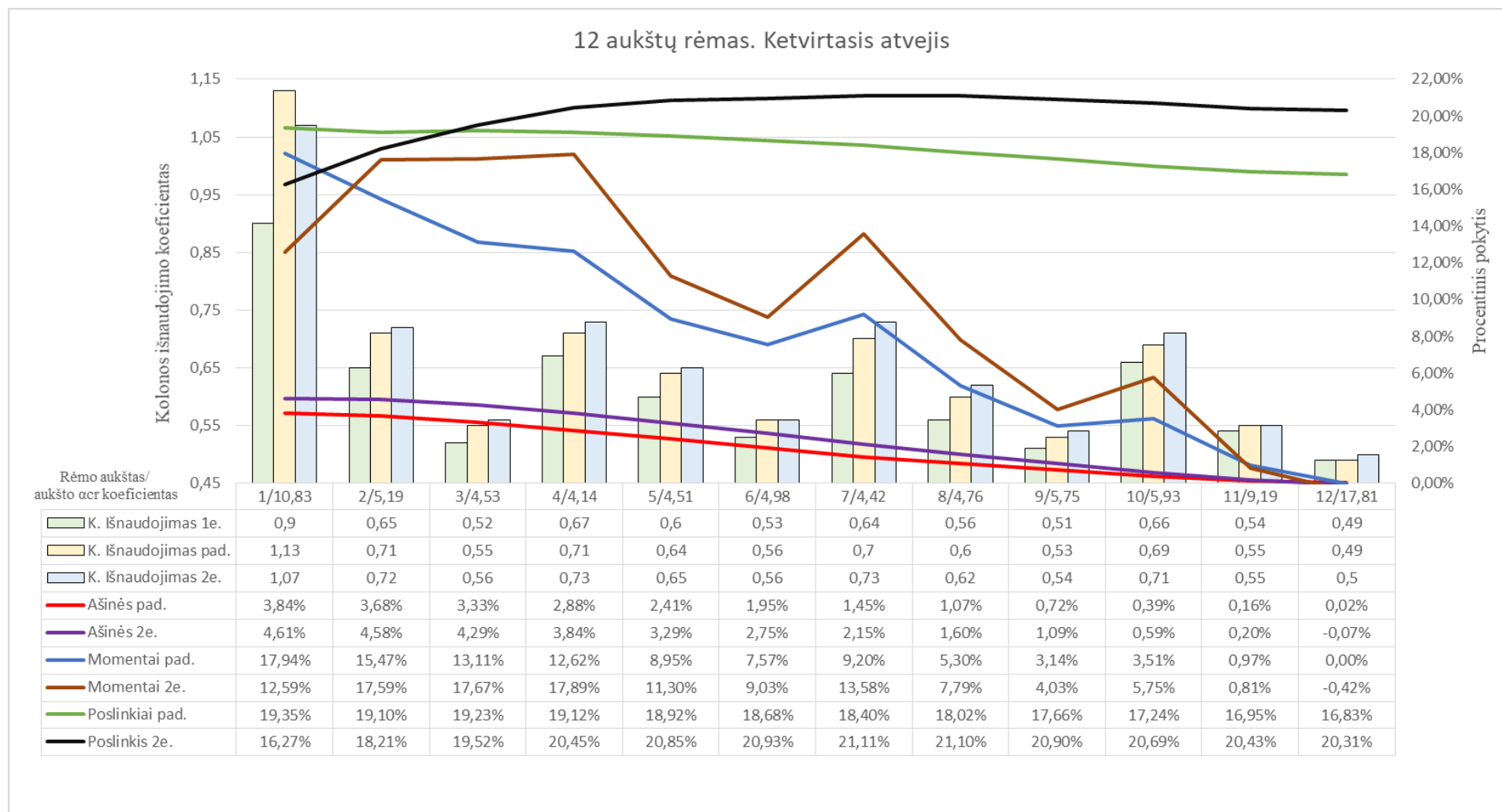
Aukštas	Kolono išnaudojimas	Ašinės jėgos	Lenkimo momentai	Poslinkis
1	0,9	3934,1	-964,3	17,5
2	0,65	3573,47	-590,53	52,1
3	0,52	3184,96	-388,64	90,3
4	0,67	2793,9	-310,4	130,7
5	0,6	2415,62	-282,35	166,3
6	0,53	2048,21	-265,1	197,2
7	0,64	1692,21	-243,12	230,6
8	0,56	1364,94	-219,86	260,2
9	0,51	1045,68	-199,55	283,4
10	0,66	739,56	-146,35	304,8
11	0,54	452,49	-148,7	317,5
12	0,49	174,42	-132,44	322,6

Gavus rėmo įrašas ir poslinkius paskaičiuojami kiekvieno aukšto α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ antrajam skaičiavimo metodui, kuomet padidinamos rėmo horizontaliosios apkrovos.

3.8 lentelė. Rėmo aukštų α_{cr} ir apkrovos didinimo koeficientai θ (4-asis atvejis)

Aukštas	α_{cr}	Didinimo koef.	Vėjo apkrova 1, kN/m	Vėjo apkrova 2, kN/m	Padidinta lyg. Horiz. Apkrova, kN
1	10,83	1,102	7,27	3,11	54,76
2	5,19	1,239	8,18	3,49	55,99
3	4,53	1,283	8,47	3,62	52,49
4	4,14	1,318	8,70	3,72	48,26
5	4,51	1,285	8,48	3,62	41,63
6	4,98	1,251	8,26	3,53	35,16
7	4,42	1,292	8,53	3,64	30,76
8	4,76	1,266	8,36	3,57	24,81
9	5,75	1,211	7,99	3,41	18,64
10	5,93	1,203	7,94	3,39	13,47
11	9,19	1,122	7,41	3,16	7,85
12	17,81	1,059	6,99	2,99	2,97

Pasitelkus pirmąjį skaičiavimo metodą ir gavus rezultatus, pereinama prie antrojo ir trečiojo skaičiavimų metodų. Antruoju rėmo horizontaliosios apkrovos padidinamos iki reikšmių, nurodytų 3.8 lentelėje, o trečiuoju su pirminėmis apkrovomis atliekamas rėmo geometriškai netiesinis skaičiavimas (antrosios eilės analizė). Rezultatai pateikiami 3.9 pav. Grafike antrojo ir trečiojo metodų procentiniai ašinių jėgų, lenkimo momentų įrašų, poslinkio ir kolonos laikomosios galios išnaudojimo pokyčiai lyginami su pirmuoju metodu.

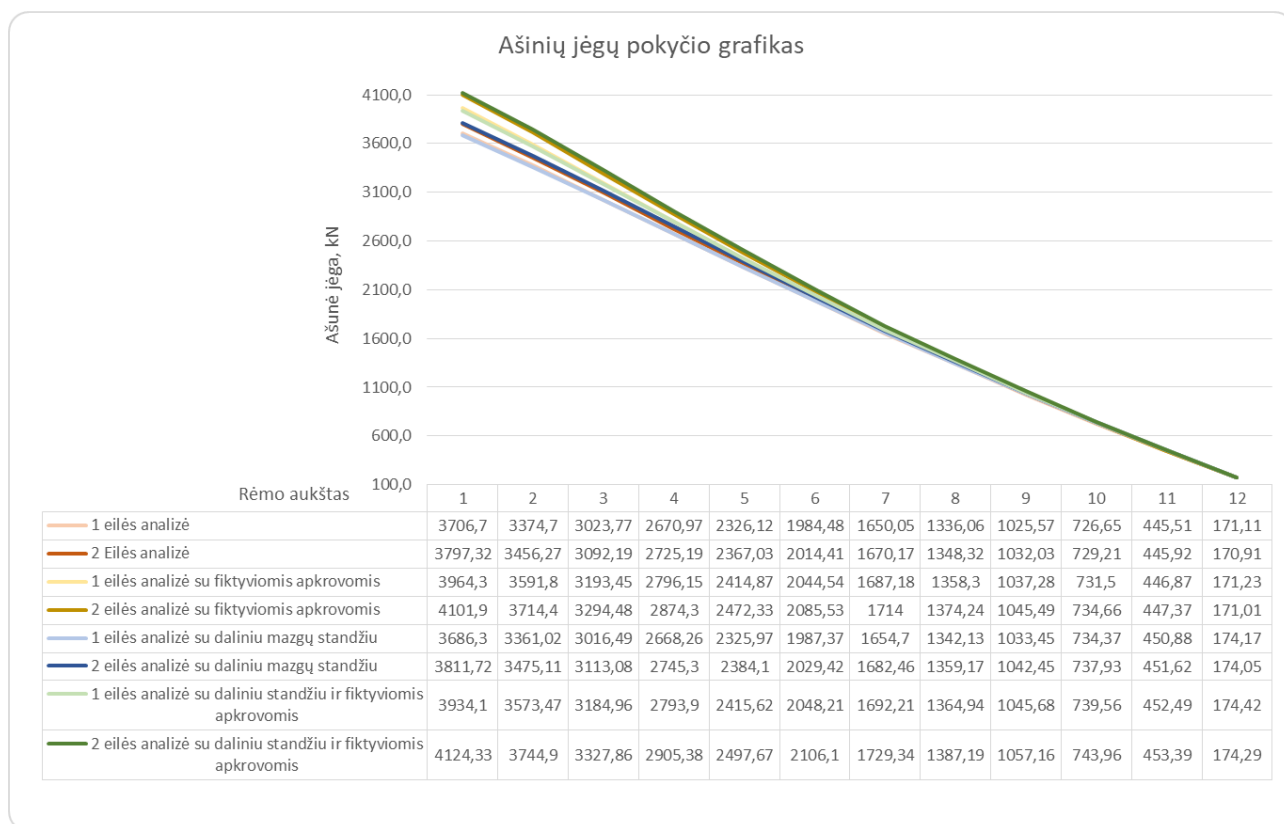


3.9 pav. 12-os aukštų rėmo ketvirtojo atvejo rezultatų grafikas

Grafike naudojami sutrumpinimai: K. – kolonos, 1e. – pirmosios eilės analizė (pirmasis metodas), 1e. pad. – pirmosios eilės analizė su padidintomis apkrovomis (antrasis metodas), 2e. – antrosios eilės analizė (trečiasis metodas).

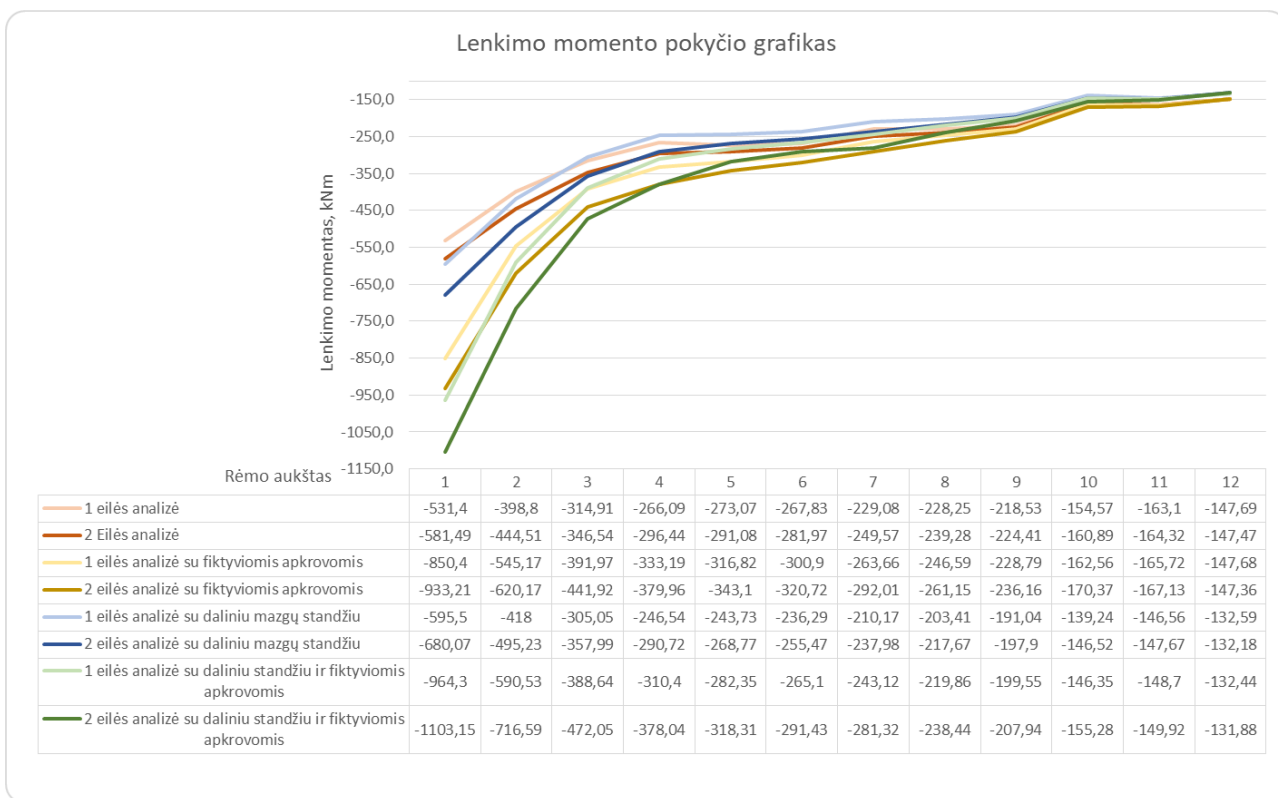
3.2.6 12-os aukštų rėmo skaičiavimo rezultatų apibendrinimas

Trimis metodais (pagal 3.1.2 poskyrį) apskaičiavus keturis rėmo projektavimo atvejus (pagal 3.1.1 poskyrį) ir gavus rezultatus matoma, kad antrasis metodas, kuomet rėmo apkrovos yra dirbtinai padidintos, norint gauti tikrąsias antrosios eilės analizės įrašas, neatliekant geometriškai netiesinio skaičiavimo, yra netikslus. Pagal LST EN 1993-1-1, projektuoti rėmus antruoju metodu yra leidžiama, kai $10 > \alpha_{cr} > 3$, tačiau rezultatai iš visų keturių grafikų rodo, jog lenkimo momento įraša pirmame aukšte visada yra didesnė (iki 6,0 %), o kituose aukštuose visada mažesnė, skirtumas siekia iki 4,5 %. Ašinės jėgos visuose aukštuose yra mažesnės, skirtumas iki 1 %. Rėmo poslinkiai nesutampa maždaug taip pat kaip ir lenkimo momentai, skirtumas iki 4 %. Toliau nagrinėjant 12-os aukštų rėmą antrojo metodo rezultatai nebus naudojami, darant išvadą, kad jie nėra tikslūs.

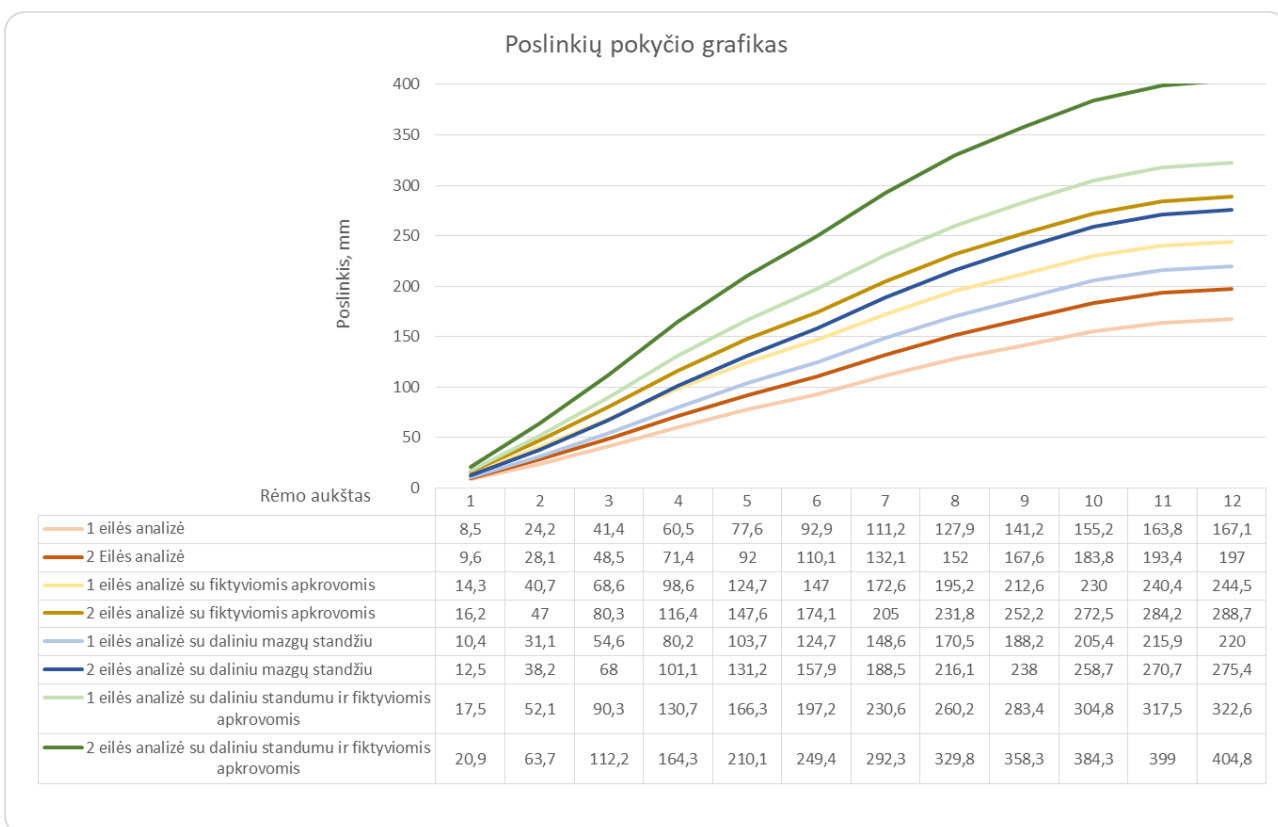


3.10 pav. 12-os aukštų rėmo ašinių jėgų pokyčio grafikas

Grafike *fiktyviomis* vadinamos lygiavertės horizontaliosios apkrovos geometrinėms nuokrypoms įvertinti.



3.11 pav. 12-os aukštų rėmo lenkimo momentų pokyčio grafikas



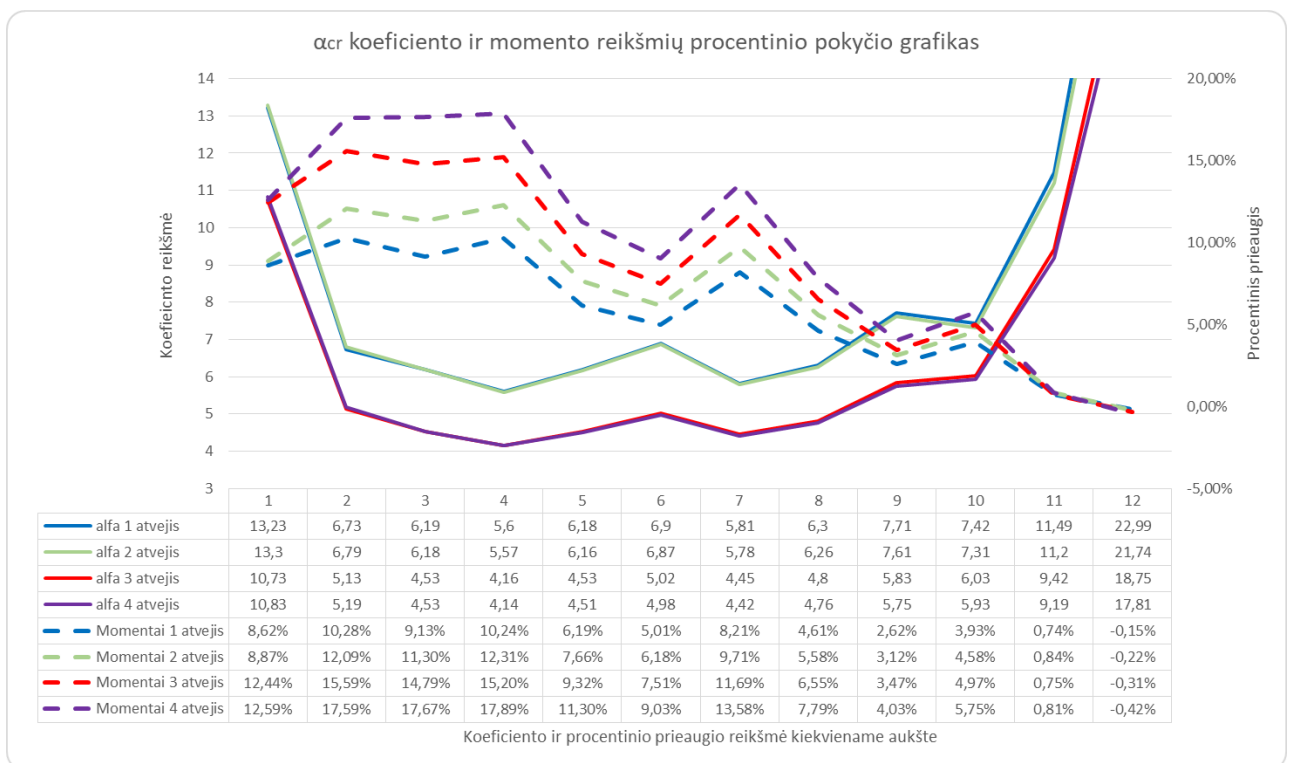
3.12 pav. 12-os aukštų rėmo poslinkių pokyčio grafikas

Atlikus visus palyginimus galima apibendrinti, kad 12-os aukštų nesuvaržytam rėmui antrosios eilės efektus įvertinti yra būtina, kadangi rėmo viršaus poslinkiai padidėja 15 – 20 %, ašinės jėgos

pirmo aukšto kolonose apie 2 – 5 %, lenkimo momentai 8 – 12 %. Didelę įtaką rėmui daro geometrinių nuokrypų įvertinimas pridėdant lygiavertes horizontaliąsias apkrovas, jos rėmo poslinkį padidina apie 32 %, o lenkimo momentus apatinėje kolonoje apie 38 %, nepriklausomai nuo analizės eilės. Įvedus mazgams dalinį 75 % mazgų standį, rėmo poslinkiai padidėja 24 % ir 28 % (pirmosios ir antrosios eilės analizėse), o lenkimo momentai apatiniame kolonos mazge 11 % ir 14,5 %. Vertinant ir lygiavertes apkrovas, ir dalinį mazgų standį, rėmo poslinkiai didėja 48 % ir 51 % (pirmosios ir antrosios eilės analizėse), o lenkimo momentai atraminiame kolonos mazge 45 – 47 %.

Ašinių jėgų ir poslinkių pokyčiai su α_{cr} koeficientu tiesioginės sąsajos neturi, tačiau lenkimo momento pokytis beveik visuose aukštuose yra atvirkščiai proporcingas šiam koeficientui (žr. 3.13 pav.)

Apačioje esančios linijos – α_{cr} koeficiento reikšmės, viršuje – lenkimo momento procentinio pokyčio reikšmės. Grafiko spalvos suvienodintos pagal keturis skaičiavimo atvejus.

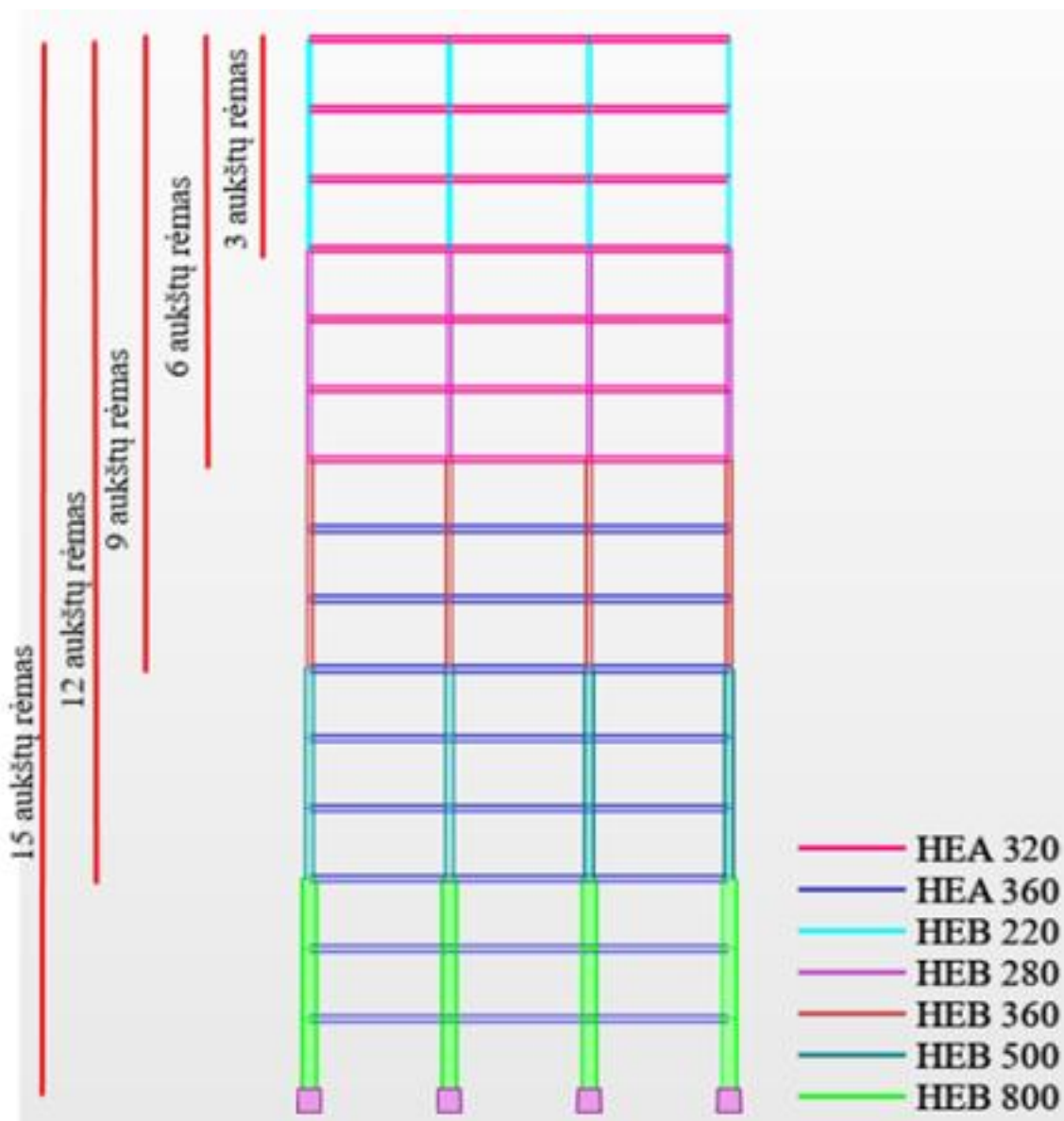


3.13 pav. Lenkimo momento pokyčio ir α_{cr} koeficiento priklausomybės grafikas

Iš šio grafiko rezultatų galima daryti išvadą, kad dalinis rėmo mazgų standis daro daug didesnę įtaką α_{cr} koeficiento ir lenkimo momento pokyčio reikšmei už geometrinių elementų nuokrypų vertinimą panaudojant lygiavertes horizontaliąsias jėgas.

3.3 Kito aukštingumo nesuvaržyti rėmai

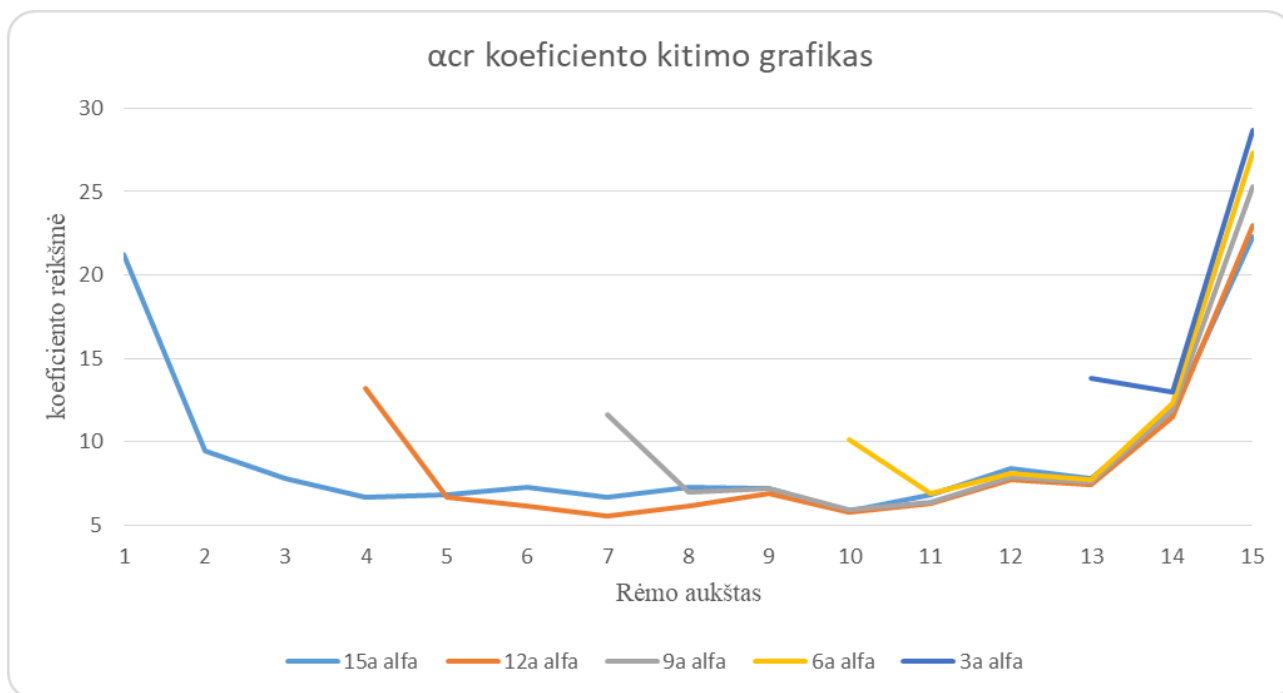
Norint ištirti rėmo aukštingumo daromą įtaką trims projektavimo metodams, šiame darbe taip pat yra išnagrinėti penkiolikos, devynių, šešių ir trijų aukštų rėmai. Siekiant kuo mažesnės rezultatų sklaidos, rėmų elementų skerspjūviai visuose rėmuose išlieka vienodi – nuo aukščiausio 15-os aukštų rėmo atimant po tris aukštus nuo apačios, iki kol lieka trijų aukštų rėmas (kolonos skerspjūvis mažinamas kas tris aukštus, žr. 3.14 pav.) Visų rėmų apkrovos taip pat išlieka analogiškos 12-os aukštų rėmui, kolonų atraminės jungtys su pamatu visada idealiai standžios.



3.14 pav. Rėmų geometrija

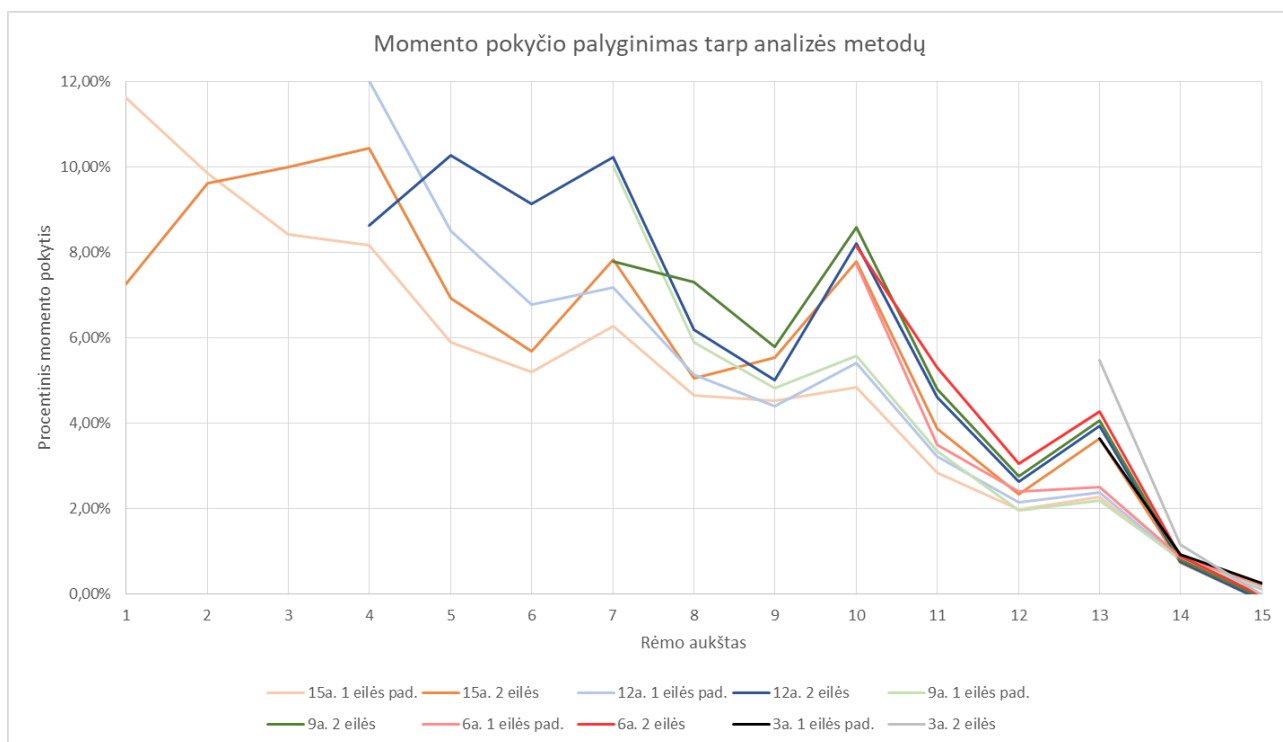
3.3.1 Pirmasis skaičiavimo atvejis

Apskaičiavus skirtingo aukščio rėmus pirmuoju atveju, kuomet nėra vertinamos rėmų geometrinės nuokrypos ir dalinis mazgų standis, gaunami rezultatai pateikti 3.15 – 3.17 pav. grafikuose.

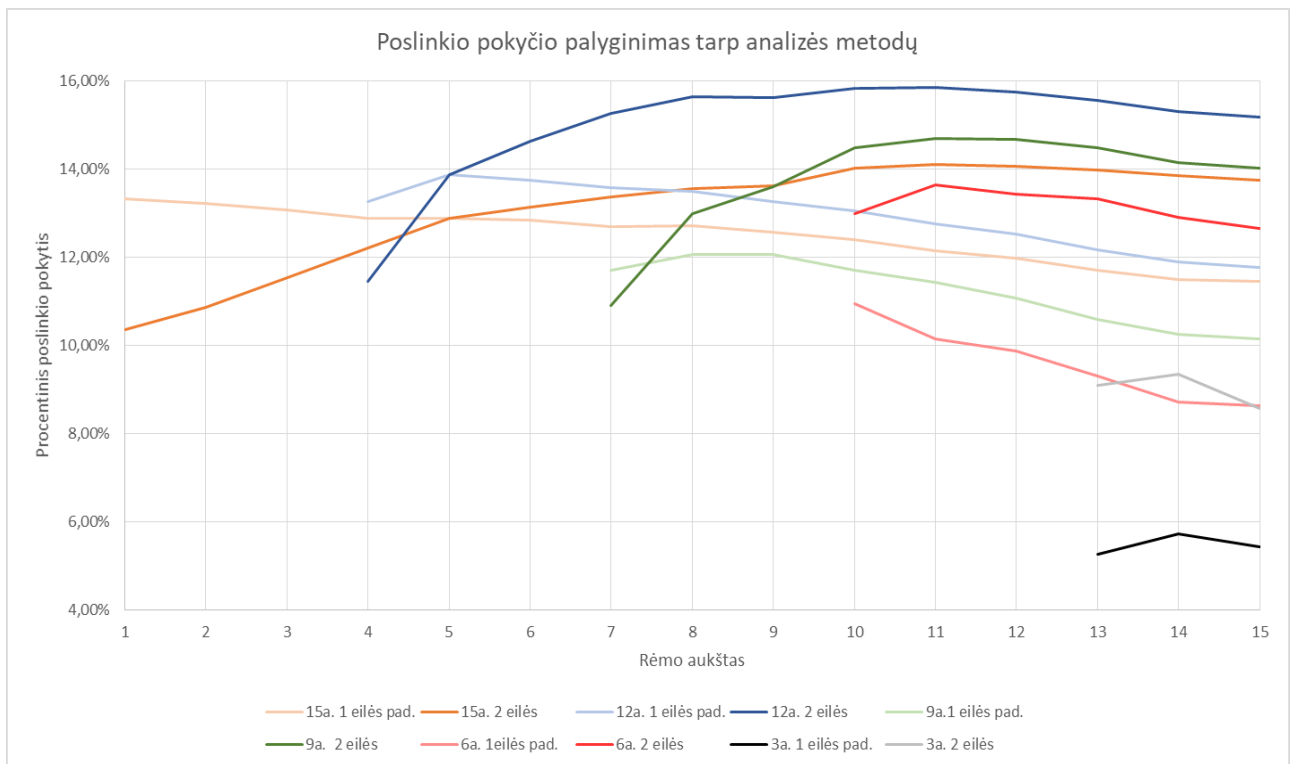


3.15 pav. Pirmojo atvejo α_{cr} koeficiento reikšmių grafikas

Rėmų lenkimo momentų ir poslinkių procentiniai pokyčiai lyginami antrojo (pirmosios eilės analizė su padidintomis apkrovomis) ir trečiojo (antrosios eilės analizė) metodų su pirmuoju (pirmosios eilės analizė).



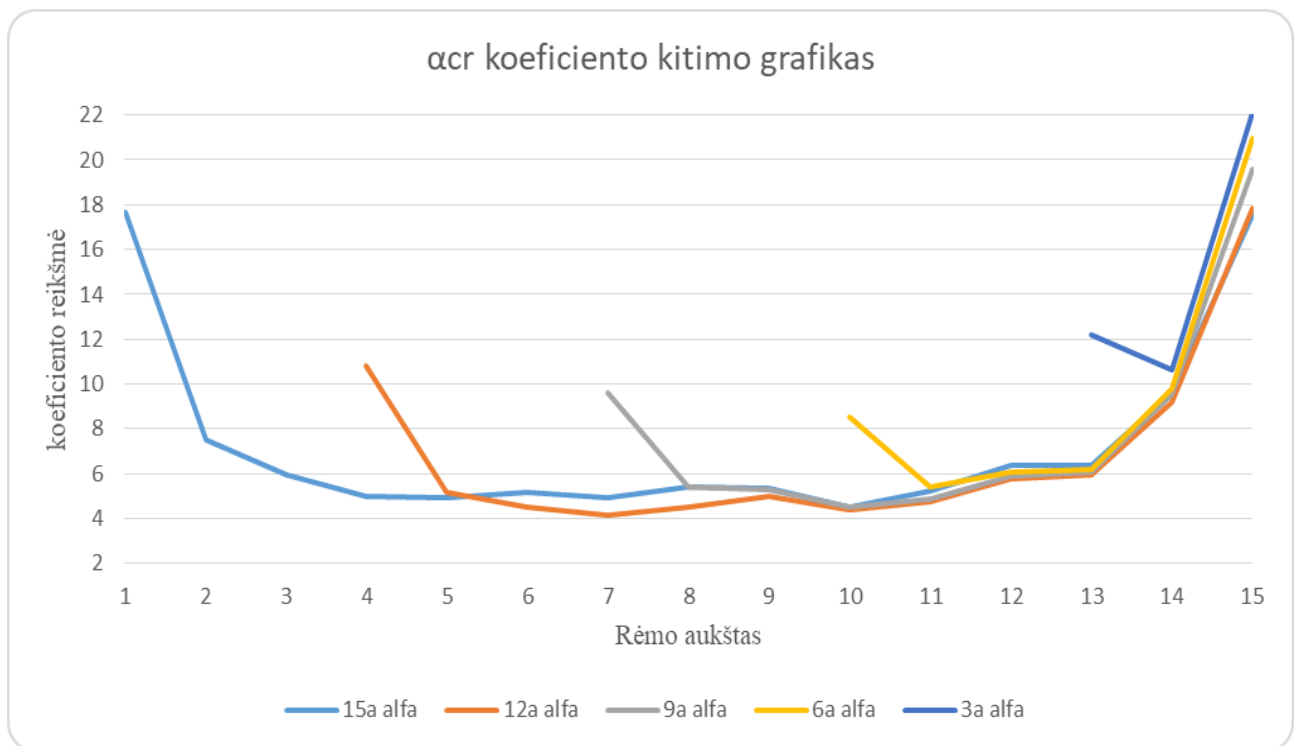
3.16 pav. Pirmojo atvejo lenkimo momento procentinio pokyčio reikšmių grafikas



3.17 pav. Pirmojo atvejo poslinkio procentinio pokyčio reikšmių grafikas

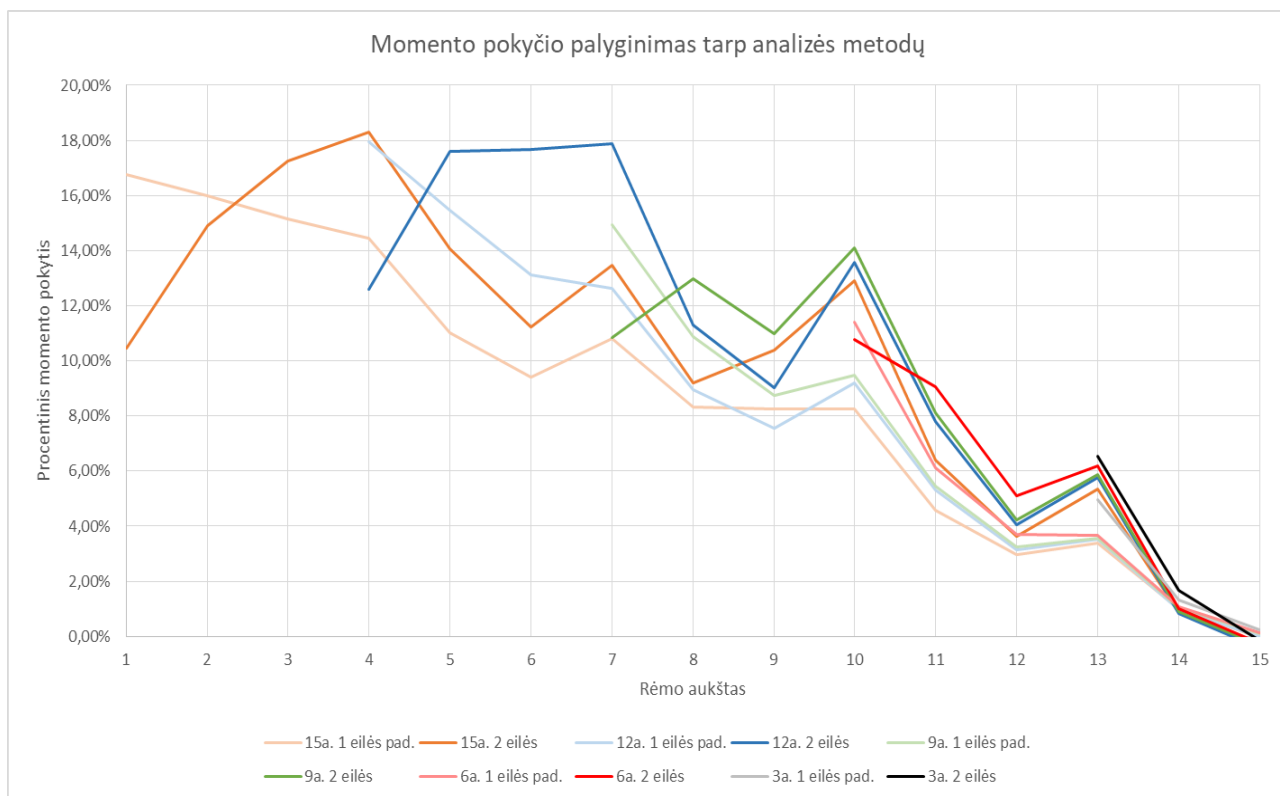
3.3.2 Ketvirtasis skaičiavimo atvejis

Ketvirtasis skaičiavimo atvejis apima antrąjį ir trečiąjį kartą, todėl jie yra praleidžiami. Apskaičiavus skirtingo aukščio rėmus ketvirtuoju atveju, kuomet yra vertinamos rėmų geometrinės nuokrypos ir dalinis mazgų standis, gaunami rezultatai pateikti 3.18 – 3.20 pav. grafikuose.

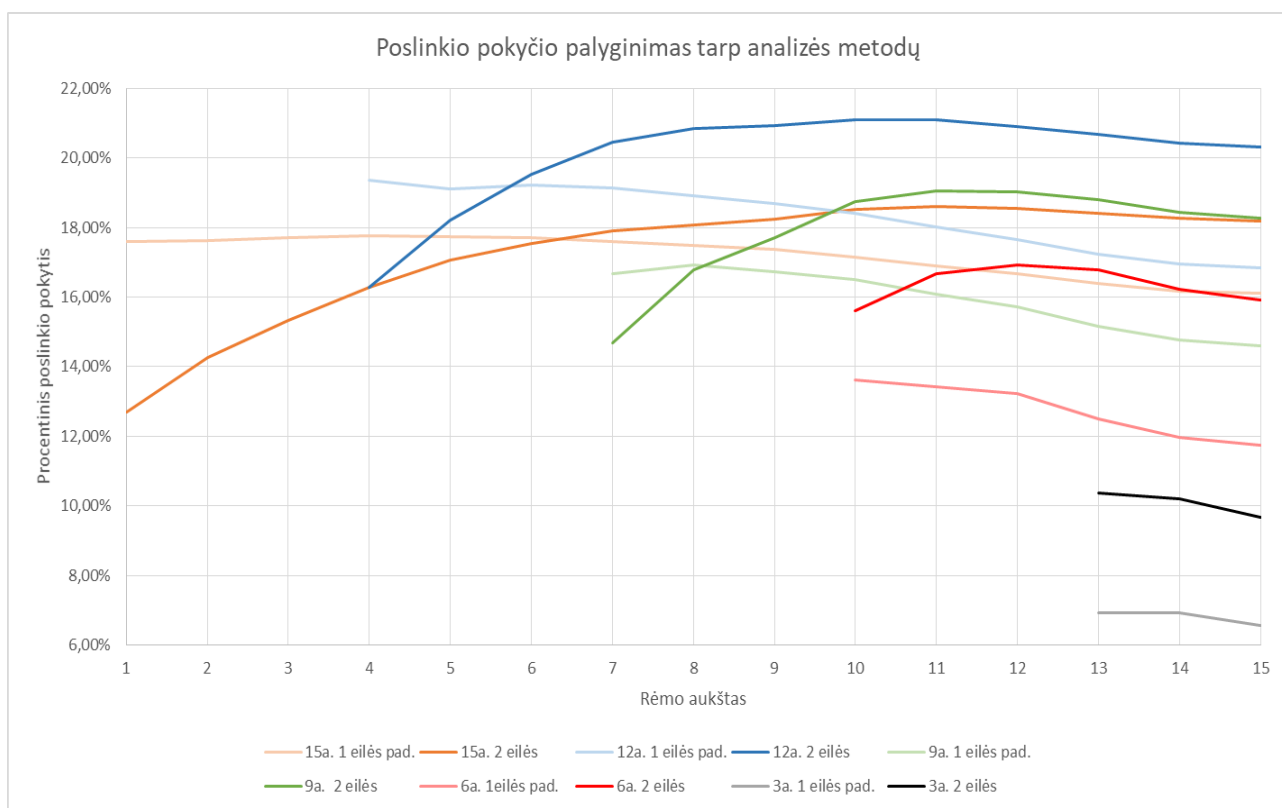


3.18 pav. Ketvirtojo atvejo α_{cr} koeficiento reikšmių grafikas

Rėmų lenkimo momentų ir poslinkių procentiniai pokyčiai lyginami antrojo (pirmosios eilės analizė su padidintomis apkrovomis) ir trečiojo (antrosios eilės analizė) metodų su pirmuoju (pirmosios eilės analizė).



3.19 pav. Ketvirtojo atvejo lenkimo momento procentinio pokyčio reikšmių grafikas



3.20 pav. Ketvirtojo atvejo poslinkio procentinio pokyčio reikšmių grafikas

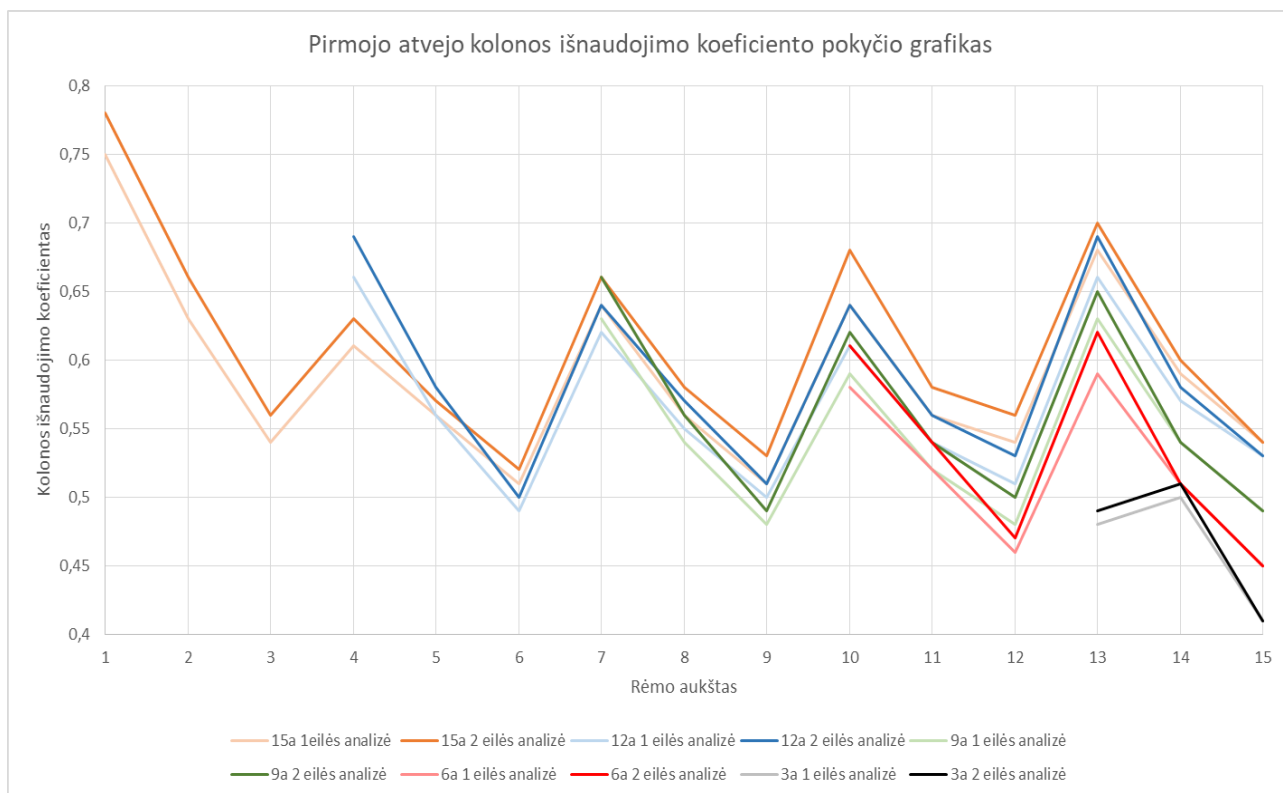
3.3.3 Skirtingo aukštingumo rėmų skaičiavimo rezultatų apibendrinimas

Trimis metodais (pagal 3.1.2 poskyrį) apskaičiavus pirmąjį ir ketvirtąjį rėmo projektavimo atvejus (pagal 3.1.1 poskyrį) ir gavus rezultatus matoma, jog prieš tai daryta išvada apie 12-os aukštų rėmą, kad antrasis metodas, kuomet dirbtinai didinamos apkrovos ir atliekama pirmosios eilės analizė, nėra tikslus, taip pat tinka ir kito aukštingumo rėmams. Pagal LST EN 1993-1-1, projektuoti rėmus antruoju metodu yra leidžiama, kai $10 > \alpha_{cr} > 3$, tačiau visų grafikų rezultatai rodo, jog lenkimo momento įrašą pirmame aukšte visada yra didesnė (išskyrus trijų aukštų rėmą, kurio visų aukštų $\alpha_{cr} > 10$, todėl antrasis metodas apskritai nėra taikytinas), o kituose aukštuose visada mažesnė, skirtumas siekia iki 6,0 %. Rėmo poslinkiai nesutampa analogiškai kaip ir lenkimo momentai, skirtumas iki 5,0 %.

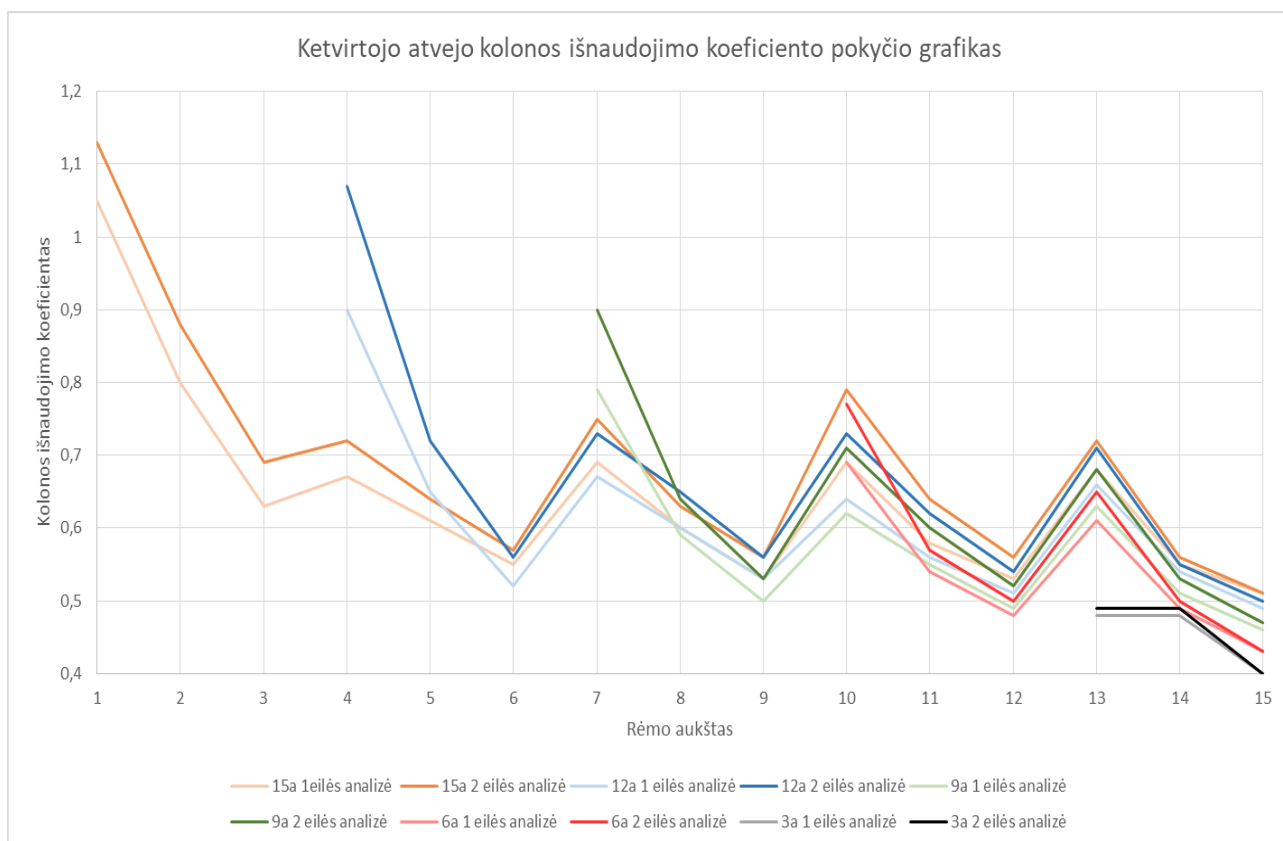
Tačiau gana aiškiai matoma, jog rėmo aukštingumas daro įtaką rezultatų tarp dviejų metodų tikslumui. Didėjant rėmo aukštų skaičiui didėja ir skirtumas tarp antrojo ir trečiojo metodo rezultatų. Šešių aukštų rėme lenkimo momento reikšmių skirtumas tarp antrojo ir trečiojo metodų nesiekia 2,0 %, o poslinkio skirtumo reikšmė 3,0 %.

Šiame darbe nebuvo laikomasi visų trijų LST EN 1993-1-1 nurodymų, kada galima taikyti antrąjį nesuvaržytų rėmų projektavimo metodą. Rėmo standžio reikšmės, turint omenyje aukštuose veikiančias skersines jėgas turi nesikeisti, o čia nagrinėtų rėmų kolonos profiliuoties standis (inercijos momentas) nuo didžiausio profiliuoties (HEB 800) iki mažiausio (HEB 220) sumažėja apie 44 kartus.

Atmetus antrojo metodo rezultatus, nagrinėjama antrosios eilės efektų bei geometrinių nuokrypų ir dalinio mazgų standžio įtaka rėmų kolonomis (žr. 3.21 ir 3.22 pav.)



3.21 pav. Pirmojo atvejo kolonos išnaudojimo koeficiento pokyčio grafikas



3.22 pav. Ketvirtojo atvejo kolonos išnaudojimo koeficiento pokyčio grafikas

Antrosios eilės efektai

Remiantis 3.21 pav. pavaizduoto grafiko reikšmėmis, galima teigti, kad antrosios eilės efektai kolonų laikomosios galios išnaudojimą skirtingo aukščio rėmuose ir jų aukštuose padidina 0 – 3 % ribose. Didžiausias padidėjimas pastebimas kiekvieno rėmo pirmame aukšte, čia pokytis lygus 3 %, nepriklausomai nuo rėmo aukštingumo. Šis padidėjimas proporcingai mažėja, kol rėmų viršuje laikomosios galios pokyčio iš vis nebelieka.

Rėmams kartu įvedus dalinį mazgų standį ir vertinant geometrines nuokrypas, matoma didesnė pokyčių sklaida nei pirmuoju atveju. Čia kolonų laikomosios galios išnaudojimo koeficientas skiriasi 0 – 17 % ribose. Didžiausias padidėjimas, kaip ir pirmuoju atveju, yra pirmame kiekvieno rėmo aukšte. Čia pokyčio reikšmė siekia 8 – 17 %. Tačiau didžiausias pokytis nėra aukščiausiam rėme, ten jis kaip tik yra mažiausias. 15-os aukštų rėmo apatinės kolonos profiliuotis HEB 800 turi apie 3,5 karto didesnę inercijos momentą, 1,5 – 2,5 karto didesnius kitus geometrinius rodiklius (skerspjūvio plotą, atsparumo momentą ir kt.) už 12-os aukštų rėmo kolonos apatinės kolonos profiliuotį HEB 500. 12-os ir mažesnio aukštingumo rėmuose kolonų geometriniai rodikliai tiek smarkiai nepakinta, todėl ten ir pastebima didesnė antrosios eilės efektų įtaka.

Kas tris aukštus keičiantis kolonos skerspjūviui, kiekvienam rėmui matomas laikomosios galios išnaudojimo pokyčio šuolis. Skerspjūviui pasikeitus, kiekviename rėmo trijų aukštų intervale fiksuojama vis mažesnė antrosios eilės efektų įtaka, pavyzdžiui, 12-os aukštų rėme pirmame aukšte pokytis yra 17 %, o trečiame tik 4 %, 9-ių aukštų rėme ketvirtame aukšte pokytis yra 9 %, šeštame – 3 % ir t.t. Kiekviename rėme šie kolonos laikomosios galios išnaudojimo pokyčiai mažėja kaip ir pirmuoju atveju, kol paskutiniame aukšte jo arba nelygia, arba tesiekia 1 %.

Trijų aukštų rėmas remiantis bet kurio atvejo rezultatais turėtų būti nejautrus antrosios eilės efektams, nes jame α_{cr} koeficiento reikšmė visada viršija 10. Tačiau šiame rėme pastebimas 1 % laikomosios galios pokytis. Šis pokytis nėra didelis, tačiau jo ignoruoti negalima. Ir dėl to galima daryti prielaidą, kad LST EN 1993-1-1:2005 užduota α_{cr} koeficiento reikšmė, apibrėžianti, kada rėminė konstrukcija yra nejautri antrosios eilės efektams, nėra visiškai tiksli. Naujoje eurokodo 3 versijoje α_{cr} koeficiento ribinė reikšmė bus padidinta nuo 10 iki 25.

Dalinis mazgų standis ir geometrinių nuokrypos

Lyginant pirmojo ir ketvirtojo atvejų rezultatus, pastebimas ryškus kolonų laikomosios galios išnaudojimo padidėjimas. Geometrinių nuokrypų ir dalinio mazgų standžio įvertinimas koeficientą padidina iki 30 %. Atsižvelgiant į tai, kad šiame darbe nagrinėjama tik mažiau apkrauta dešinioji rėmo kolona, vidurinėms kolonoms šis išnaudojimo padidėjimas gali būti dar didesnis. Didžiausią įtaką nuokrypos ir mazgai, kaip ir antrosios eilės efektai, daro rėmo kolonos pirmojo aukšto atraminiame mazge. Tai didele dalimi lemia faktas, kad atraminis mazgas išlieka idealiai standus, kai

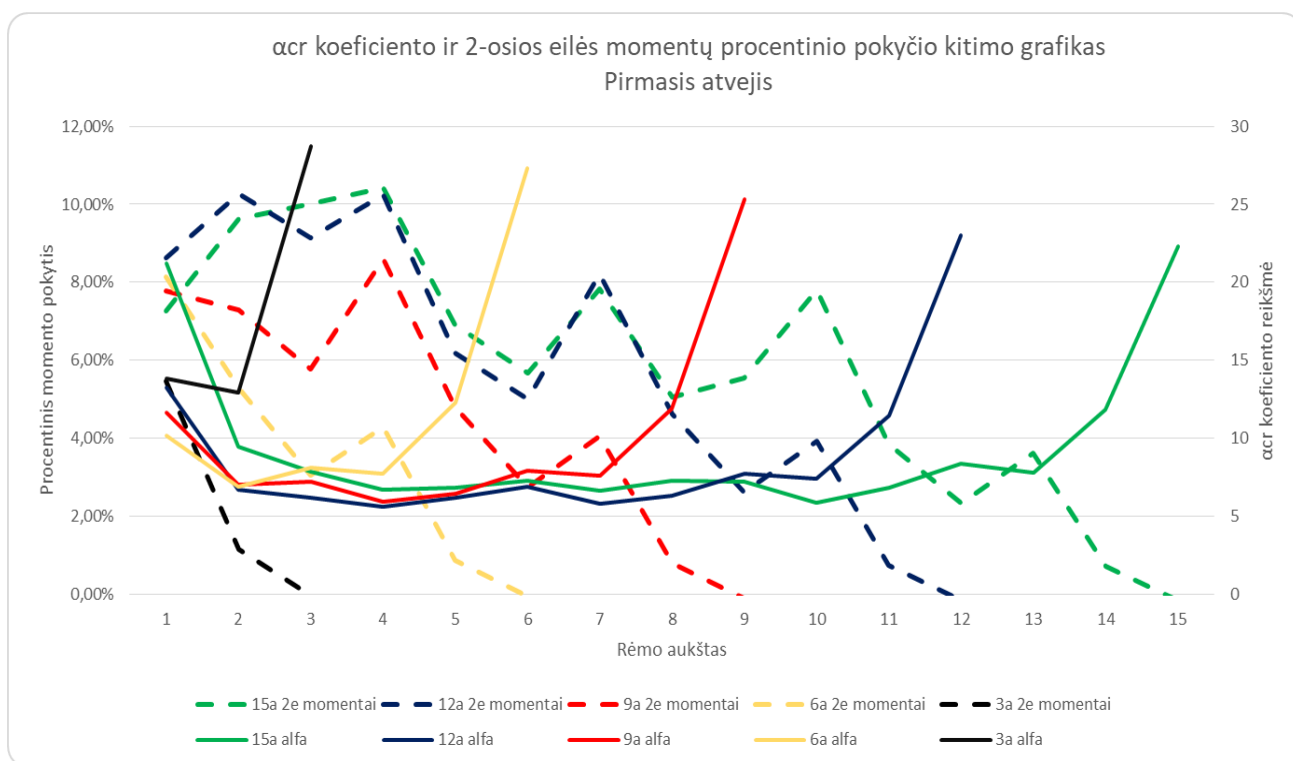
kiti jungčių mazgai yra dalinio standžio. Įrašos mazguose, kuriuose yra leidžiamas ribotas pasisukimas, persiskirsto taip, kad didesnė jų dalis tenka atraminiams kolonų mazgams.

Kituose rėmų aukštuose pokyčio reikšmė svyruoja 2 – 22 % ribose. Dalinio standžio ir geometrinių nuokrypų daroma įtaka proporcingai auga, didėjant rėmo aukštingumui. Šešių aukštų rėme, nepasaint pirmo aukšto, kolonos laikomosios galios išnaudojimas padidėja nuo 2 iki 4 % visuose aukštuose, nepriklausomai nuo analizės eilės, devynių aukštų rėme – nuo 3 iki 8 %. Tuo tarpu 12-os ar 15-os aukštų rėmuose šis pokytis apatiniuose aukštuose (be pirmo) gali siekti iki 17 % ir 22 %, skaičiavimus atliekant pagal pirmosios arba antrosios eilės analizę. Viršutiniuose aukščiausiųjų rėmų aukštuose kolonų laikomosios galios išnaudojimas netgi sumažėja apie 3 – 4 %.

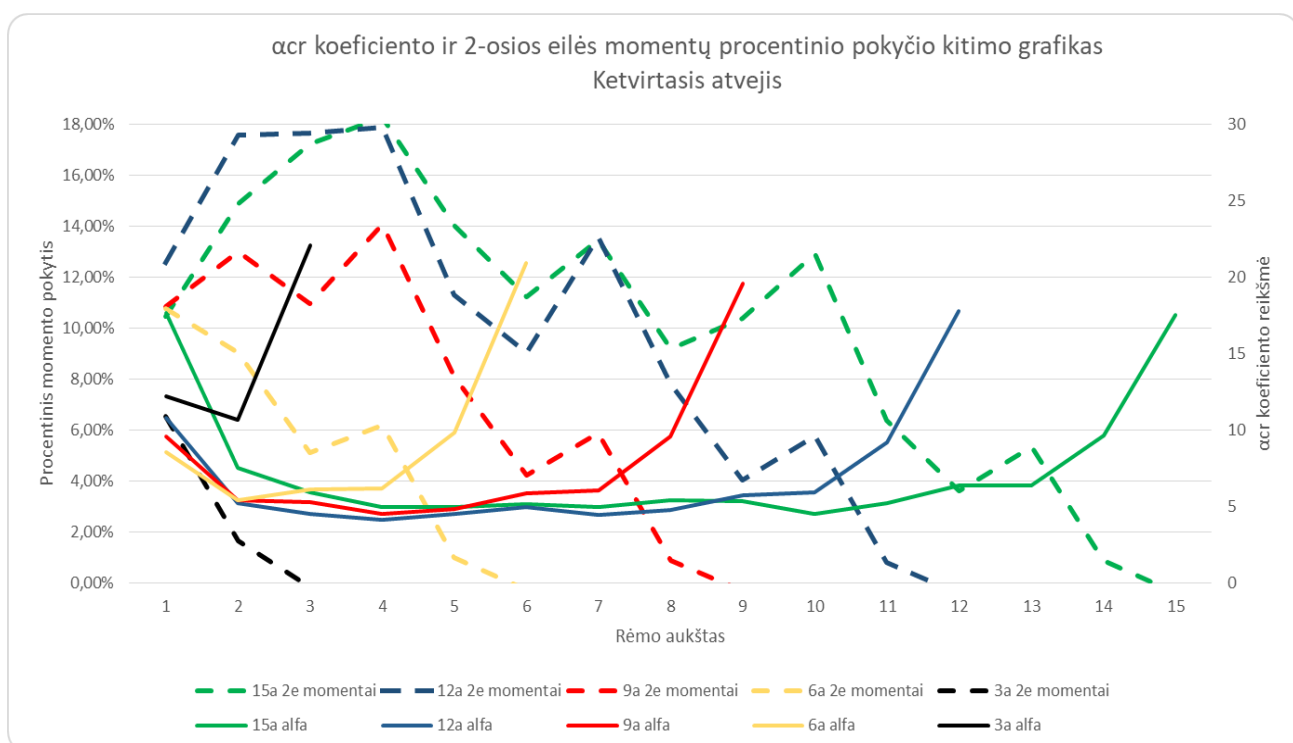
Lenkimo momentų pokyčio ir α_{cr} koeficiento priklausomybė

3.2.6 poskyryje buvo aptariama α_{cr} koeficiento ir lenkimo momento įrašos tarpusavio priklausomybė 12-os aukštų rėme pagal keturis skaičiavimo atvejus. 3.23 ir 3.24 pav. pavaizduotos šių dydžių priklausomybės skirtingo aukštingumo rėmuose. Lenkimo momento įrašos pokytis beveik visuose aukštuose yra atvirkščiai proporcingas šiam koeficientui, nepriklausomai nuo paties rėmo aukščio. Kiekvieno skirtingo aukščio rėmų kreivės yra gana panašios – matomi tokie patys kreivių kilimo ir leidimosi intervalai ir net susikirtimai. Tačiau tiesioginio sąryšio kiekvieno aukščio rėmų kreivės neturi. Tai pastebima apatiniuose rėmų aukštuose, kur žalia ir mėlyna punktyrinės kreivės (žyminčios 15-os ir 12-os aukštų rėmus) abiejuose grafikuose kyla ir leidžiasi kitaip nei raudona ir geltona punktyrinės kreivės (žyminčios 9-ųjų ir 6-ųjų aukštų rėmus). Apskaičiavus α_{cr} koeficiento reikšmę žemesniuose rėmuose prognozuoti, koks būtų lenkimo momento įrašos pokytis aukštesniuose rėmuose, galima tik labai abstrakčiai. Ir tuo tikrai negalima remtis kaip patikimu metodu.

Panaši α_{cr} koeficiento reikšmė tame pačiame rėmo aukšte gali reikšti visiškai skirtingą lenkimo momento procentinį pokytį vieno ar kito aukščio rėme. Pavyzdžiui, 15-os aukštų rėme ketvirtuoju skaičiavimo atveju 7-o aukšto α_{cr} reikšmė yra 4,94, o 12-os aukštų rėmo 6-o aukšto – 4,98, bet lenkimo momento procentinis pokytis atitinkamai yra 13,5 ir 9 %. Todėl kiekvieną nesuvaržytą rėminę konstrukciją reikia nagrinėti atskirai, ir kiekvienai iš jų ta pati jautrumą apibrėžianti α_{cr} reikšmė, bendrai rėmo elgsenai gali pasireikšti skirtingai.



3.23 pav. Pirmojo atvejo kolonos lenkimo momentų pokyčio ir α_{cr} koeficiento priklausomybės grafikas



3.24 pav. Ketvirtąjo atvejo kolonos lenkimo momentų pokyčio ir α_{cr} koeficiento priklausomybės grafikas

3.4 Ekonominis palyginimas

Efektyviai ir paprastai konstrukcijų projektavimo variantus galima palyginti suskaičiavus jų kainą. Kainos kriterijus statybose beveik visada yra pagrindinis veiksnys renkantis iš kelių alternatyvių variantų. Sudarinėjant statybos projekto sąmatą, plieno konstrukcijų kaina yra skaičiuojama pagal apytikslę bendrą masę.

Masės palyginimas bus atliekamas baziniu pasirinktam dvylikos aukštų rėmui, keturiems skaičiavimo atvejams ir dviem metodams – pirmajam ir trečiajam (antrasis atmestas, nes yra netikslus šiame darbe nagrinėjamiems daugiaaukščiams rėmams). Tik dabar, siekiant tikro laikomosios galios išnaudojimo, pirmasis metodas bus atliekamas taikant lygiavertės kolonos principą, kuris įvertina antrosios eilės efektus konstrukcijai. Skaičiuojamuosius kolonų ilgius programa „Autodesk Robot Structural Analysis“ apskaičiuoja automatiškai, pagal NCCI SN008 (Euronormas papildanti, jiems neprieštaraujanti dokumentacija, naudojama kartu su britų standartais) ir Woodo (Wood, 1974) originalią metodiką, įvertinančią gretimų elementų standį. Skaičiuojamieji ilgiai užduodami kolonoms, bet tik stipriajai dvitėjo profiliuotiesiems ašiai, o silpnajai toliau taikomas geometrinis ilgis, darant prielaidą, kad kolona iš rėmo plokštumos yra suvaržoma standžios perdangos diafragmos (iš plokštumos rėmas nėra nesuvaržytas). Automatiškai parinkti kolonų skaičiuojamųjų ilgių koeficientai μ pateikiami 3.25 pav.

1,49	1,27	1,27	1,49
1,64	1,36	1,36	1,64
1,79	1,45	1,45	1,79
2,10	1,64	1,64	2,10
2,24	1,73	1,73	2,24
2,29	1,77	1,77	2,29
2,51	1,91	1,91	2,51
2,69	2,03	2,03	2,69
3,02	2,26	2,26	3,02
3,72	2,73	2,73	3,72
4,06	2,96	2,96	4,06
1,78	1,64	1,64	1,78

3.25 pav. Kolonų skaičiuojamieji ilgiai μ apskaičiuoti programiniu paketu

Skerspjūvių optimizacija atliekama tik rėmo kolonomis, išlaikant tą patį žingsnį – kolonos HEB profiliuoties dydis mažinamas kas tris aukštus. Optimizacijos rezultatai pateikiami 3.9 – 3.12 lentelėse. Jose procentinis masės pokytis matuojamas pagal pirminius 3.2 poskyryje parinktus profiliuoties dydžius.

3.9 lentelė. Pirmojo atvejo optimizacijos rezultatai

Rėmo aukštas	1 – 3	4 – 6	7 – 9	10 – 12
Pirminis profiliuoties	HEB 500	HEB 360	HEB 280	HEB 220
Lygiavertės kolonos principu gautas profiliuoties	HEB 550	HEB 400	HEB 280	HEB 200
Laikomosios galios išnaudojimas	0,95	0,89	0,97	0,94
Procentinis masės pokytis	+6,4 %	+9,2 %	0	-16,6 %
Bendras rėmo masės pokytis	+3,0 %			
Antrosios eilės analizės metodu gautas profiliuoties	HEB 550	HEB 400	HEB 280	HEB 200
Laikomosios galios išnaudojimas	0,95	0,86	0,94	0,95
Procentinis masės pokytis	+6,4 %	+9,2 %	0	-16,6 %
Bendras rėmo masės pokytis	+3,0 %			

3.10 lentelė. Antrojo atvejo optimizacijos rezultatai

Rėmo aukštas	1 – 3	4 – 6	7 – 9	10 – 12
Pirminis profiliuoties	HEB 500	HEB 360	HEB 280	HEB 220
Lygiavertės kolonos principu gautas profiliuoties	HEB 800	HEB 450	HEB 300	HEB 200
Laikomosios galios išnaudojimas	0,99	0,87	0,91	0,96
Procentinis masės pokytis	+40,1 %	+20,4 %	+13,6 %	-16,6 %
Bendras rėmo masės pokytis	+21,4 %			
Antrosios eilės analizės metodu gautas profiliuoties	HEB 900	HEB 400	HEB 300	HEB 200
Laikomosios galios išnaudojimas	0,93	0,92	0,83	0,97
Procentinis masės pokytis	+55,6 %	+9,2 %	+13,6 %	-16,6 %
Bendras rėmo masės pokytis	+24,1 %			

Rautaruukki projektavimo žinyne (Rautaruukki, Vainu, 2000) yra pateikiama metodika, tiksliai dalinio mazgų standžio daromos įtakos kolonų skaičiuojamajam ilgiui įvertinti. Kiekvienos sijos mazgo sukamosios gebos S_j reikšmė lemia efektyvųjį (redukuotą) sijos profiliuoties inercijos momentą. Pritaikius redukuotą sijos inercijos momentą kolonos skaičiuojamasis ilgis padidėtų pagal anksčiau pateiktą skaičiavimo metodiką. Tačiau tai per daug nukrypsta nuo darbe nagrinėjamų temų, todėl kolonų skaičiuojamasis ilgis, įvertinant dalinį sijos-kolonos mazgų sukamąjį standį nebus skaičiuojamas ir lyginamas su kitais metodais.

3.11 lentelė. Trečiojo atvejo optimizacijos rezultatai

Rėmo aukštas	1 – 3	4 – 6	7 – 9	10 – 12
Pirminis profiliuotis	HEB 500	HEB 360	HEB 280	HEB 220
Antrosios eilės analizės metodu gautas profiliuotis	HEB 550	HEB 400	HEB 280	HEB 200
Laikomosios galios išnaudojimas	0,98	0,86	0,95	0,95
Procentinis masės pokytis	+6,4 %	+9,2 %	0	-16,6 %
Bendras rėmo masės pokytis	+3,0 %			

3.12 lentelė. Ketvirtojo atvejo optimizacijos rezultatai

Rėmo aukštas	1 – 3	4 – 6	7 – 9	10 – 12
Pirminis profiliuotis	HEB 500	HEB 360	HEB 280	HEB 220
Antrosios eilės analizės metodu gautas profiliuotis	HEB 900	HEB 450	HEB 300	HEB 200
Laikomosios galios išnaudojimas	0,99	0,82	0,83	0,98
Procentinis masės pokytis	+55,6 %	+20,4 %	+13,6 %	-16,6 %
Bendras rėmo masės pokytis	+27,2 %			

IŠVADOS

Išvados pateikiamos punktais, pagal darbo įvade iškeltus uždavinius.

1. Išnagrinėjus nesuvaržytų rėminių konstrukcijų projektavimo metodus pagal LST EN 1993-1-1, buvo pasirinkti trys metodai tarpusavio rezultatų palyginimui. Pirmasis metodas – tai pirmosios eilės tamprioji konstrukcijos analizė, kuriuo gauti rezultatai buvo priimti kaip bazinės įrąžų ir poslinkių vertės, taip pat skirtas apskaičiuoti α_{cr} koeficientui. Antrasis metodas – konstrukciją veikiančių horizontaliųjų įrąžų didinimas koeficientu θ ir pagrįstas pirmosios eilės tampriąja analize, taip įvertintinantis antrosios eilės efektus. Trečiasis metodas – konstrukcijos antrosios eilės analizė įvertinant tik globaliuosius $P - \Delta$ efektus.

Atlikus gautų rezultatų analizę priimta išvada, kad antrasis metodas nėra visiškai tikslus, jei nėra laikomasi visų LST EN 1993-1-1 sąlygų. Juo apskaičiuotos įrąžos ir poslinkiai yra panašūs į trečiuoju metodu gautas reikšmes, tačiau visais projektavimo atvejais jos yra iki 6 % mažesnės. Tai reiškia, kad metodas neturėtų būti taikomas daugiaaukštei rėminei konstrukcijai, jei jos standumas nėra vienodai išlaikomas visuose aukštuose. Šis metodas, kuomet yra didinamos apkrovos, buvo patogus naudoti, kai kompiuterinės skaičiavimo programos dar buvo sunkiai prieinamos inžinieriams ir atlikti antrosios eilės analizę rankiniu būdu buvo neįmanomas uždavinys. Tačiau dabar antrosios eilės analizę konstrukcijai atlikti galima keliais paspaudimais, o apkrovų padidinimas užima gerokai daugiau laiko, todėl antrojo metodo siūloma nebetaikyti iš vis.

Trečiajam metodui, jei taikoma tamprioji analizė, apribojimų ir papildomų sąlygų nėra, elementų laikomajai galiai tikrinti galima naudoti geometrinius jų ilgius. Todėl galima teigti, jog jis yra optimalus ir saugus projektuojant nesuvaržytą rėminę konstrukciją.

2. Geometrinės rėmo nuokrypos yra labai svarbus aspektas, darantis didžiulę įtaką konstrukcijos elgsenai. Nuokrypas vertinant pasitelkus lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemą, rėmo lenkimo momento įrąža kolonos atraminiam mazge bei poslinkis rėmo viršuje padidėja daugiau nei trečdaliu. Projektuojant dvylikos aukštų rėminę konstrukciją tai reiškia 21,4 % arba 24,1 % bendros masės prieaugį, priklausomai nuo pritaikyto skaičiavimo metodo. Trečiuoju metodu apskaičiuota konstrukcija suoptimizavus skerspjūvius yra sunkesnė, todėl taip pat daroma išvada, kad elementams automatinio būdu pritaikytas lygiavertės kolonos principas nėra toks tikslus kaip antrosios eilės analizė. Šio principo pritaikymas ir kitais projektavimo atvejais nėra visiškai saugus, nes kolonos laikomosios galios išnaudojimas yra mažesnis nei trečiojo metodo.

3. Dalinio sukamojo standžio mazgų įvertinimui pasirinkta 75 % standaus mazgo sukamosios gebos reikšmė. Šio aspekto įvertinimas taip pat yra labai svarbus, nes projektuojami realūs mazgai retai kada būna idealiai standūs. Tai lemia didelius nesuvaržytos rėminės konstrukcijos poslinkio prieaugius, kurie, savo ruožtu, sukelia papildomus lenkimo momentus, ypač atraminiam mazge, taip pat stipriai paveikia α_{cr} koeficiento reikšmę. Atraminis mazgas, kuris išlieka

idealiai standus (nes tai pasiekti jungtyje su pamatu nėra taip sudėtinga kaip sijos-kolonos mazge), perima dar didesnę dalį lenkimo momento, kad būtų išlaikyta bendroji konstrukcijos pusiausvyra. Ši įrąža dvylikos aukštų rėmo apatiniame mazge padidėja iki 15 %, poslinkis viršuje – iki 30 %.

4. Atlikus tiriamąją rėmų projektavimo analizę, apskaičiavus skirtingo aukštingumo konstrukcijas skirtingais metodais bei projektavimo atvejais galima teigti, kad rėmas, kurio bent vieno aukšto $\alpha_{cr} < 10$, yra laikomas nesuvaržytu ir antrosios eilės efektai jam yra kritiškai svarbus veiksnys. Nesuvaržyta konstrukcija yra labai jautri šoninėms apkrovoms, kurios sukelia poslinkius rėmo plokštumoje. Šie poslinkiai sukuria antrosios eilės efektus – papildomus lenkimo momentus dėl deformuoto konstrukcijos būvio, kuomet atsiranda jėgos veikimo ekscentricitetai. Įvertinus šiuos efektus ir priklausomai nuo projektavimo atvejo bei rėmo aukščio, pradinė lenkimo momento reikšmė padidėja iki 17 %.

Pagal LST EN 1993-1-1:2005, konstrukcija yra jautri antrosios eilės efektams, jei $\alpha_{cr} < 10$. Tačiau tiriant trijų aukštų nesuvaržytą rėminę konstrukciją, kur koeficientas vaisais atvejais viršijo 10, buvo pastebėta, kad antrosios eilės efektų įvertinimas vis tiek daro įtaką, nes joje fiksuojamas 1 % kolonos laikomosios galios pokytis. Šis pokytis, nors jis ir nėra didelis, ignoruoti negalima. Ir dėl to galima daryti prielaidą, kad LST EN 1993-1-1:2005 užduota α_{cr} koeficiento reikšmė, apibrėžianti, kada rėminė konstrukcija yra nejautri antrosios eilės efektams, nėra visiškai tiksli.

5. Nesuvaržytoms rėminėms konstrukcijoms jų aukštingumo daroma įtaka yra dėsninga – didėjant aukštų skaičiui, proporcingai didėja ir geometrinių nuokrypų įvertinimo, dalinio sukamojo mazgų standžio bei antrosios eilės efektų svarba. To priežastis – su kiekvienu pridėtu aukštu taip pat prisideda ir vertikaliosios bei horizontaliosios apkrovos. Nuo šių apkrovų priklauso ir rėmą laikančiųjų kolonų profiliučių dydžiai, didesnė apkrova – didesnis skerspjuvis.

Dėl didėjančio kolonos skerspjuvio skirtingo aukščių rėmų α_{cr} koeficiento reikšmė aukštuose praktiškai nesikeičia, ar tai būtų 6-ių, ar 15-os aukštų rėmas. Todėl galima teigti, kad rėmo aukštingumas tiesiogiai nedaro esminės įtakos tam, kiek jautrus rėmas yra antrosios eilės efektams.

LITERATŪRA IR ŠALTINIAI

- Boissonade, N. (2006). *Rules for member stability in EN 1993-1-1*. (1st ed.) Brussels: ECCS Publications.
- Brown, D.G., King C.M., Rackham, J.W. and Way, A. (2004). *Design of multi-storey braced frames*. Berkshire: The Steel Construction Institute.
- Chantrain, P., Schleich, J. (1997). *Simplified version of Eurocode 3 for usual buildings*. (1st ed.) European Commission.
- Galambos, T., Surovek, E. (2008). *Structural stability of steel: concepts and applications for structural engineers*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- Iu, C.K., Chen, W.F., Chan, S.L. and Ma, T.W. (2008). Direct second-order analysis for steel frame design. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 12 (pp. 379-389.)
- Kindmann, R. (2008). *Stahlbau. Teil 2. Stabilität und theorie II. Ordnung*. Germany: Ernst & Sohn.
- LST EN 1993-1-1:2005+AC:2006 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius, 2007.
- LST EN 1993-1-8:2005+AC:2006 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-8 dalis. Mazgų projektavimas*. Vilnius, 2007.
- Non-contradictionary complementary information (NCCI) to BS EN 1990 - 1999. *SN008a. Buckling length of columns*. United Kingdom: BSI, 2009.
- Rautaruukki Oyj, Vainu H. (2000). *Design handbook for Rautaruukki structural hollow sections*. Keuruu: Otava Book Printing Ltd.
- Saka, M.P. (2009). Optimum design of steel sway frames to BS5950. In *Journal of Constructional Steel Research*. Vol 65 (pp. 36-43.)

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

The Steel Construction Institute. (2009). *Steel buildings design: Worked examples for students. In accordance with Eurocodes and the UK National Annexes*. United Kingdom.

Trahair, N.S., Bradford, M.A., Nethercot, D.A. and Gardner, L. (2008). *The behaviour and design of steel structures to EC3*. (4th ed.) Abingdon: Taylor & Francis.

Urbonas, K. *Plieninių rėminių konstrukcijų pasiduodančių mazgų modeliavimo ir projektavimo metodų kūrimas*. Daktaro disertacija. Vilnius, 2006.

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

Wood, R.H. (1974). Effective lengths of Columns in multi-storey buildings. *The Structural Engineer*. 52 (pp. 235-295.)

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

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