



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Aistė Vaitkevičiūtė

**PASTOVAUS SKERSPJŪVIO PORTALINIO RĖMO KOLONOS IR SIJOS
MAZGO STORMENOS POVEIKIO RĖMO ELGSENAI ANALIZĖ**

**ANALYSIS OF THE EAVES HAUNCH EFFECT ON THE BEHAVIOUR OF
ORTHOGONAL PORTAL FRAME**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2018-06-05

(Data)

Aistė Vaitkevičiūtė

**PASTOVAUS SKERSPJŪVIO PORTALINIO RĖMO KOLONOS IR SIJOS
MAZGO STORMENOS POVEIKIO RĖMO ELGSENAI NUSTATYMAS**
**ANALYSIS OF THE EAVES HAUNCH EFFECT ON THE BEHAVIOUR OF
ORTHOGONAL PORTAL FRAME**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vadovas

Doc. dr. Kristina Urbaitė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

20180603

Lietuvių kalbos konsultantas

UAB Lina Jankaitė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

2018-05-30

Vilnius, 2018

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Antanas Šapalas
(Vardas, pavardė)
2018-06-05
(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2018-05-31 Nr.

Vilnius

Studentui (ei)

Aistei Vaitkevičiūtei
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: **Pastovaus skerspjuvio portalinio rėmo kolonos ir sijos mazgo stormenos poveikio rėmo elgsenai analizė**

patvirtinta 2018 m. kovo 14 d. dekanų potvarkiu Nr. 102 st

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2018 m. birželio 6 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

- Atlikti literatūros šaltiniuose pateiktos portalinio rėmo elgsenos ir skaičiavimo analizės apžvalgą;
- Pagal LST EN metodiką atlikti rėminės konstrukcijos skaičiavimus. Nustatyti stormenos geometrijos įtaką rėmo elgsenai;
- Atliktais tyrimais nustatyti stormenos optimalios geometrijos ribas;
- Pateikti išvadas ir pasiūlymus.

Vadovas

.....
(Parašas)

doc. dr. Kęstutis Urbonas
(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
Aistė Vaitkevičiūtė
(Vardas, pavardė)
2018-06-03
(Data)

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Aistė Vaitkevičiūtė, 20124256

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, LŠKfm-16

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2018 m. birželio 05 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Pastovaus skerspjuvio portalinio rėmo kolonos ir sijos mazgo stormenos poveikio rėmo elgsenai nustatymas“ patvirtintas 2018 m. kovo 14 d. dekanų potvarkiu Nr. 102st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas doc. dr. Kęstutis Urbonas.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).



(Parašas)

Aistė Vaitkevičiūtė
(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra

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

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

Pavadinimas **Pastovaus skerspjuvio portalinio rėmo kolonos ir sijos mazgo stormenos poveikio rėmo elgsenai nustatymas**

Autorius **Aistė Vaitkevičiūtė**

Vadovas **Kęstutis Urbonas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Darbe nagrinėjami pastovaus skerspjuvio portaliniai rėmai su stormena bei jos poveikis bendrai rėmo elgsenai. Tiriamas rėmas sudarytas iš greitai pagaminamų ir surenkamų standartinių HEB ir IPE tipo skerspjuvio elementų. Tai efektyvi ir dažnai naudojama didelių tarpatramių plieninių konstrukcinių sistema, kurios efektyvumą lemia kolonos ir sijos mazgo stormena. Tačiau rėmo stormenos poveikis bendrai rėmo elgsenai, praktinės vartosenos ir projektavimo klausimai nėra plačiai išnagrinėti.

Tiriamąjį darbą sudaro trys skyriai. Pirmajame skyriuje aptariama nagrinėjamo objekto samprata, rėmo sistemos geometrijos sąlygos, literatūros apžvalga bei rėmo elementų projektavimo pagrindai pagal Euronormas. Antrajame skyriuje pateikiama rėmo visuminė bei antrosios eilės efektų poveikio analizė, sijos su stormena skerspjuvio laikomosios galios išnaudojimo skaičiavimai bei rezultatų palyginimas su skaitinio metodo. Trečiajame aprašomas skaitinio metodo bandinių modeliavimas "Sofistik" programa, atliekama bendra rėmo elgsenos analizė, esant skirtingoms stormenos geometrinėms sąlygoms bei optimalių stormenos geometrinių sąlygų nustatymas.

Darbo apimtis – 90 p. teksto be priedų, 72 paveikslai, 23 lentelės, 16 bibliografiniai šaltiniai.

Prasminiai žodžiai: pastovaus skerspjuvio portalinis rėmas, stormena, ekvivalentinis skerspjuvis, skerspjuvio laikomoji galia, skersinis sukamasis klupumas

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 the eaves haunch effect on the behaviour of orthogonal portal frame
-------	--

Author **Aistė Vaitkevičiūtė**Academic supervisor **Kęstutis Urbonas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The thesis reviews the orthogonal portal frames with the haunched eaves connections and the haunch effect on the behaviour of frame. In research portal frames are designed from the standart HEB and IPE cross-section elements. These frames are one of the most efficient long span steel constructions due to the haunch, which is made to establish a higher structural efficiency of frame, resulting in a rigid connection. However, the haunch's influence on frame, practical use and design issues are not extensively investigated.

The work consists of three chapters. The first chapter discuss about research object, effective geometry of the frame constructural system and design of the frame elements according Eurocode 3. The second chapter deals with the effects of the deformed frame geometry, first and second order analysis, verification of the haunched beam cross-section resistance and comparison of the results of the analytical and numerical methods. The last chapter presents haunched portal frame analysis of the finite element method using "Sofistik" program.

The final thesis consists of 90 pages, 72 pictures, 23 tables, 16 bibliographical entries.

Keywords: orthogonal portal frame, haunch, equivalent cross-section, resistance of the cross section, lateral-torsional buckling resistance

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	13
ĮVADAS	15
1. LITERATŪROS APŽVALGA	17
1.1 Pastovaus skerspjuvio portalinis rėmas	17
1.2 Stormenos samprata	19
1.3 Ortogonalaus portalinio rėmo projektavimo pagrindai ir elgsena	21
1.3.1 Tampriojo ir plastinio būvio analizės	22
1.3.2 Deformuotos rėmo geometrijos įtaka. Antrosios eilės efektai	22
1.3.3 Rėmo visuminės nuokrypos įvertinimas	26
1.4 Stormenos projektavimo pagrindai	27
1.4.1 Stormenos geometrijos sąlygos	27
1.4.1 Kintamojo skerspjuvio ekvivalentinės charakteristikos	30
1.4.2 Sijos ir stormenos bendrojo skerspjuvio klasifikavimas	32
1.5 Rėmo elementų skerspjuvio laikomoji galia.....	33
1.6 Rėmo elementų klumpamoji galia	36
1.6.1 Pastovaus skerspjuvio elementų klumpamoji galia	36
1.6.2 Kintamo skerspjuvio elementų klumpamoji galia	40
2. PORTALINIO RĖMO ANALITINIAI SKAIČIAVIMAI	42
2.1 Nagrinėjamos konstrukcijos ir analitinių skaičiavimų aprašymas	42
2.2 Visuminė rėmo analizė	43
2.2.1 Antrosios eilės efektų poveikio nustatymas	43
2.2.2 Rėmo visuminės analizės nuokrypos.....	46
2.2.3 Sijos su stormena skerspjuvio laikomosios galios analizė	47
3. SKAITINIO EKSPERIMENTO DALIS	55
3.1 Portalinio rėmo skaitinio modelio sudarymas.....	55
3.1.1 Rėmo modeliavimas strypiniais elementais	55
3.1.2 Rėmo modeliavimas plokšteliniais elementais.....	57
3.2 Skaitinio modelio skaičiavimo rezultatų analizė	58
3.2.1 Skirtingo tarpatramio rėmų stormenos poveikio sąryšio analizė	58
3.2.2 Portalinio rėmo analizė su kolonos ir sijos su stormena jungties sąstandomis	65

3.2.3	Portalinio rėmo stormenos poveikio analizė nuo	70
3.2.4	Skaitinio ir analitinio metodo elementų laikomosios ir klupamosios galios nuo skersinio sukamojo klupumo rezultatų palyginimas	82
3.2.5	Rėmo elementų klupamoji galia nuo sukamojo skersinio klupumo	83
3.2.6	Portalinio rėmo palyginimas su santvaros konstrukcine sistema.....	85
IŠVADOS.....		87
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....		89

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Pastovaus skerspjūvio portalinio rėmo pavyzdžiai (Single storey...2017).....	17
1.2 pav. Vieno tarpatramio portalinio rėmo struktūra (King 2001)	18
1.3 pav. Rėmo sijos ir kolonos sąstandos ir ryšiai (Malik, King 2004)	19
1.4 pav. Lenkimo momentų diagrama tamprioje stadijo nuo išskirstytos vertikalios apkrovos (SCI 2004)	20
1.5 pav. Stormenos tipai: a) trijų juostų stormena; b) dviejų juostų stormena (Gorenc et al. 2005)	20
1.6 pav. Stormenos gamyba iš standartinio dvitėjo skerspjūvio elemento	21
1.7 pav. Plastinio būvio analizės lenkimo momentų diagrama su plastiniais lankstai (Steel building in Europe 2010).....	22
1.8 pav. Eksploatacinių apkrovų veikiamo rėmo deformuota schema antrosios eilės efektai (Steel building in Europe 2010).....	23
1.9 pav. α_{cr} , s , e reikšmės skaičiavimas (SCI 2003).....	25
1.10 pav. Skaitmeninei ir analitinei analizei naudojami stormenos matmenys (Henderson 2015)	28
1.11 pav. Bendras sijos ir stormeno skerspjūvio aukštis.....	29
1.12 pav. Pradinio stormenos ilgio nustatymas (Henderson 2015).....	29
1.13 pav. Stormenos charakteristinių reikšmių skaičiavimas (Koschmidder et al. 2012)	31
1.14 pav. Sijos su stormena dalies skerspjūvis: a) tikrasis sijos ir stormenos skerspjūvis; b) ekvivalentinis (SCI 2013).....	31
1.15 pav. Sijos ir stormenos skerspjūvio įtempiai	33
1.16 pav. C_1 koeficiento reikšmės (Steel building in Europe 2010)	40
2.1 pav. Nagrinėjamo rėmo geometrija.....	42
2.2 pav. Rėmo dalys, analizuojamos analitiniu ir skaitiniu metodu	43
2.3 pav. Tiesinės ir netiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmės, esant 0,07L, 0,1L, 0,15L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenoms	44
2.4 pav. Analitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,07L ir skerspjūvis IPE 400-600.....	48
2.5 pav. Analitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,1L ir skerspjūvis IPE 400-600.....	49

2.6 pav. Analitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjuvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,15L ir skerspjuvis IPE 400-600.....	50
2.8 pav. Skaitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjuvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,1L ir skerspjuvis IPE 400-600.....	51
2.7 pav. Skaitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjuvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,07L ir skerspjuvis IPE 400-600.....	51
2.9 pav. Skaitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjuvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,15L ir skerspjuvis IPE 400-600.....	52
3.1 pav. Analizuojamas rėmo mazgas su stromena ir programinėje įrangoje suprojektuotas mazgas su ekvivalentinėmis skerspjuvio savybėmis (Modelling and...2017).....	56
3.2 pav. Portalinio rėmo modeliavimas strypiniais elementais: a) sijos ir stormenos skerspjuvio modeliavimas; b) bendras rėmo strypnis modelis	56
3.3 pav. Rėmo strypinis modelis SOFiSTiK programos SSD modulyje	57
3.4 pav. Rėmo modeliavimas plokšteliniais elementais CAD aplinkoje	57
3.5 pav. Rėmo plokštelinis modelis SOFiSTiK programos SSD modulyje.....	58
3.6 pav. 25,0 m rėmo su 0,10L ilgio stormena laikomosios galios išnaudojimo koeficiento reikšmės	59
3.7 pav. 25,0 m rėmo su 0,10L ilgio stormena klupumo laikomosios galios nuo skersinio sukamojo klupumo išnaudojimo koeficiento.....	59
3.8 pav. 25,0 m rėmo su 0,10L ilgio stormena rėmo įlinkio reikšmės.....	59
3.9 pav. 25,0 m rėmo su stormena 0,10L nuo tarpatramio ilgio rėmo poslinio reikšmės.....	60
3.10 pav. 25,0 rėmo su stormena 0,10L ilgio stormena lenkimo momentų M_y diagrama	60
3.11 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena lenkimo momentų M_z diagrama	60
3.12 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena ašinių jėgų diagrama	61
3.13 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena skersinių V_y jėgų diagrama.....	61
3.14 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena skersinių V_z jėgų diagrama	61
3.15 pav. 30,0 m rėmo su 0,10L ilgio stormena laikomosios galios išnaudojimo koeficiento reikšmės	62
3.16 pav. 30,0 m rėmo su 0,10L ilgio stormena klupumo laikomosios galios nuo skersinio sukamojo klupumo išnaudojimo koeficiento.....	62
3.17 pav. 30,0 m rėmo su 0,10L ilgio stormena įlinkio reikšmės	62
3.18 pav. 30,0 m rėmo su 0,10L ilgio stormena poslinio reikšmės	62

3.19 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo elementų laikomosios galios išnaudojimo koeficiento priklausomybė nuo stormenos 0,07L, 0,10L ir 0,15L ilgio	63
3.20 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo elementų klupumo galios išnaudojimo nuo skersinio sukamojo klupumo koeficiento priklausomybė, esant 0,07L, 0,10L ir 0,15L ilgio stormenoms	64
3.21 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo įlinkio priklausomybė nuo stormenos ilgio	64
3.22 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo poslinkio priklausomybė nuo stormenos ilgio, kai stormenos ilgis 0,07L, 0,10L ir 0,15L	65
3.25 pav. Rėmo įlinkių reikšmės su 0,10 L ilgio stormenomis	66
3.24 pav. Maksimalių von Mizes įtempių pasiskirstymas ties kolonos ir sijos su stormena jungtimi, esant 0,1L stormenos ilgiui	66
3.23 pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymas rėme su 0,1L ilgio stormena	66
3.26 pav. Rėmo poslinkio reikšmės su 0,10 L ilgio stormenomis	67
3.28 pav. Maksimalių von Mizes įtempių pasiskirstymas ties kolonos ir sijos su stormena jungtimi, esant 0,15L stormenos ilgiui	67
3.27 pav. Maksimalių von Mizes įtempių pasiskirstymas rėme ties kolonos ir sijos su stormena jungtimi, esant 0,07 L stormenos ilgiui	67
3.29 pav. Von Mizes įtempių reikšmės kolonos ir sijos su stormena jungtyje, kai naudojamos sąstandos tarp kolonos juostų, esant 0,07L, 0,1L bei 0,15L ilgio stormenoms	68
3.30 pav. Von Mizes maksimalių įtempių reikšmių priklausomybė nuo kolonos ir sijos su stormena mazgo sąstandų	69
3.31 pav. Rėmo įlinkio reikšmių priklausomybė nuo kolonos ir sijos su stormena mazgo sąstandų	69
3.32 pav. Rėmo poslinkio reikšmių priklausomybė nuo kolonos ir sijos su stormena mazgo sąstandų	70
3.33 pav. Rėmo von Mizes įtempių pasiskirstymas su IPE 550 skerspjūvio 0,10 L ilgio stormenomis	71
3.34 pav. Rėmo elementų klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo, kai stormenos IPE 550 skerspjūvio 0,10 L ilgio	71
3.35 pav. Rėmo įlinkio su IPE 550 skerspjūvio 0,10 L ilgio stormena reikšmės	72
3.36 pav. Rėmo poslinkio su IPE 550 skerspjūvio 0,10 L ilgio stormena reikšmės	72
3.37 pav. Von Mizes įtempių rėmo kraige pasiskirstymo priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio	73

3.38 pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymo stormenos pabaigoje priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio	74
3.39 pav. Von Mizes įtempių stormenos apačioje pasiskirstymo priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio	75
3.40 pav. Rėmo įlinkio priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio	76
3.41 pav. Rėmo poslinkio priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio	77
3.42 pav. Rėmo kolonos klupamosios galios išnaudojimo koef. priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio	78
3.43 pav. Rėmo sijos su stormena klupamosios galios išnaudojimo koef. priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio.....	79
3.44 pav. Rėmo sijos klupamosios galios išnaudojimo koef. priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio	80
3.45 pav. Laikomosios galios išnaudojimo koeficiento analitinio ir skaitinio metodo reikšmės, esant 0,07L, 0,1L, 0,15L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenoms.	82
3.46 pav. Rėmo kolonos ir sijos klupamosios galios išnaudojimo koeficiento palyginimas analitiniu ir skaitiniu metodu, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenai...	84
3.47 pav. Stormenos masės priklausomybė nuo ilgio ir skerspjūvio	86

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Tiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmės, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenoms	45
2.2 lentelė. Netiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmės, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenoms	45
2.3 lentelė. Tiesinės ir netiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmių skirtumas, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenoms	46
2.4 lentelė. Analiniu ir skaitiniu metodu gautų laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmių palyginimas ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose.....	52
3.1 lentelė. Von Mizes įtempių kraige kitimas nuo stormenos ilgio 0,07 L, 0,10 L ir 0,15 L stormenos.....	73
3.2 lentelė. Von Mizes įtempių kraige kitimas tarp stormenos skerspjūvių IPE 400 – IPE 600 ..	73
3.3 lentelė. Von Mizes įtempių stormenos pabaigoje kitimas tarp 0,7 L, 0,10 L ir 0,15 L stormenos ilgio	74
3.4 lentelė. Von Mizes įtempių kitimas stormenos pabaigoje tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų	75
3.5 lentelė. Von Mizes įtempių stormenos apačioje kitimas tarp 0,7 L, 0,10 L ir 0,15 L stormenos ilgio.....	76
3.6 lentelė. Von Mizes įtempių kitimas stormenos apačioje tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų	76
3.7 lentelė. Įlinkio kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio	77
3.8 lentelė. Įlinkio kitimas stormenos apačioje tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų ..	77
3.9 lentelė. Poslinkio kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio	78
3.10 lentelė. Poslinkio kitimas stormenos apačioje tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų	78
3.11 lentelė. Kolonos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio.....	79
3.12 lentelė. Kolonos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų.....	79
3.13 lentelė. Sijos su stormena klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio	80

3.14 lentelė. Sijos su stormena klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų.....	80
3.15 lentelė. Sijos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio.....	81
3.16 lentelė. Sijos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų.....	81
3.17 lentelė. Rėmo elementų laikomosios galios išnaudojimo koeficiento analitinio ir skaitinio metodo reikšmių skirtumas.....	82
3.18 lentelė. Kolonos ir sijos klupamosios galios išnaudojimo koeficientas nuo skersinio sukamojo klupumo analitinio ir skaitinio metodo reikšmių skirtumas, esant 0,07L, 0,1L, 0,15 L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenoms.....	84
3.19 lentelė. Portalinio rėmo ir santvaros masės palyginimo lentelė	85

IVADAS

Šiuo metu didelė dalis pramoninės ir komercinės paskirties pastatų projektuojami iš greitai pagaminamų ir surenkamų plieninių konstrukcijų. Viena efektyviausių ir dažnai naudojamų didelių tarpatramių plieninių konstrukcinių sistemų yra ortogonalus portalinis rėmas su stormena. Jo efektyvumą lemia optimalus kolonos ir sijos skerspjūvio išnaudojimas, nedidelės medžiagų ir gamybos sąnaudos bei greitas montavimo procesas lyginant su kitomis didelių tarpatramių konstrukcijomis (King 2001).

Portaliniai rėmai gali būti projektuojami iš suvirintų plonasienių lakštų kintamo skerspjūvio elementų arba iš tolygaus skerspjūvio valcuotų elementų. Kintamojo skerspjūvio rėmai ekonominiu požiūriu yra vertinami dėl didelio skerspjūvio išnaudojimo pagal įrašų pasiskirstymą, tačiau dėl nepastovių skerspjūvio charakteristikų jų analitinis skaičiavimas tampa sudėtingas ir reikalauja ilgo projektavimo proceso, o skerspjūvių gamyba virinant tampa sudėtinga ir lėta. Siekiant optimizuoti šių rėmų projektavimo ir gamybos procesus, jiems pradėti taikyti pastovaus valcuoto skerspjūvio elementai ir stormenos. Todėl Lietuvoje portaliniai rėmai daugiausia projektuojami būtent iš pastovaus karštai valcuoto skerspjūvio elementų su stormenomis. Kaip tiriamojo darbo objektas pasirinktas tokios struktūros portalinis rėmas.

Bendras pastovaus skerspjūvio portalinių rėmų išskirtinis elementas, leidžiantis pasiekti efektyvų skerspjūvių išnaudojimą ir aukštą ekonominį lygį, yra kolonos ir sijos mazgo stormena. Ji, perimdama dalį veikiančių maksimalių įrašų, leidžia optimaliai sumažinti sijos ir kolonos skerspjūvį ir kartu užtikrina standžią jų jungtį. Tačiau rėmo stormenos poveikis bendrai rėmo elgsenai, praktinės vartosenos klausimai nėra plačiai išnagrinėti. Todėl, ištyrus stormenos poveikį bei nustatčius optimalias geometrijos sąlygas, jų pritaikymas leistų palengvinti rėmo struktūros optimizavimo procesą.

Baigiamojo magistro darbo tikslas – ištirti portalinio rėmo kolonos ir sijos mazgo stormenos poveikį bendrai rėmo elgsenai esant skirtingoms stormenos charakteristikoms, stormenos optimalias geometrijos sąlygas, atsižvelgiant į stiprumo ir ekonominius aspektus. Tikslui pasiekti rėmo analizė atliekama analitiniu skaičiavimo metodu pagal LST EN 1993-1-1:2005 normas bei skaitiniu.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Atlikti išsamią literatūros šaltiniuose pateiktos rėmo elgsenos ir skaičiavimo analizę;
2. Atlikti rėmo su stormena analitinius skaičiavimus pagal LST EN 1993-1-1:2005 normas, esant skirtingoms rėmo bei stormenos charakteristikoms;

3. Sudaryti tiriamųjų rėmų modelius ir atlikti skaitinę analizę;
4. Atlikti analitinių ir skaitinių skaičiavimų rezultatų analizę.

Tiriamąjį darbą sudaro trys skyriai. Pirmajame skyriuje aptariama nagrinėjamo objekto samprata, pagrindiniai naudojimo privalumai bei rėmo sistemos geometrijos sąlygos, aprašoma literatūros apžvalga, rėmo visuminės analizės tyrimai bei pastovaus ir kintamo skerspjūvio rėmo elementų projektavimo pagrindai. Antrajame skyriuje pateikiami analitiniu metodu gauti rėmo elementų laikomosios ir klupamosios galios nuo skersinio sukamojo klupumo skaičiavimų rezultatai ir jų analizė. Trečiajame aprašomas skaitinio metodo bandinių modeliavimas, atliekama rėmo kolonos ir sijos su stormena mazgo analizė, taip pat rėmo elgsenos analizė, esant skirtingoms stormenos geometrinėms sąlygoms bei optimalių stormenos geometrinių sąlygų nustatymas. Darbo gale pateikiamos tyrimo išvados ir pasiūlymai.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1 Pastovaus skerspjūvio portalinis rėmas

Principinė portalinio rėmo struktūra buvo sudaryta Antrojo pasaulinio karo metu, kai dėl plieno žaliavų trūkumo susiformavo pagrindinis konstrukcijų projektavimo tikslas – pasiekti kuo didesnę konstrukcijų efektyvumą medžiagų kiekio atžvilgiu. Jau daugiau nei septynis dešimtmečius portalinio rėmo struktūra plačiai nagrinėjama ir taikoma įvairiose, ypač projektavimo srityje pažengusiose, šalyse, tokiose kaip JAV, Australija, Vakarų Europos šalys. Lietuvoje tokio tipo konstrukcijų elgsenos ir praktinės vartosenos klausimai nėra plačiai nagrinėti literatūroje ar tiriami eksperimentiškai.

Tinkamai pasirinkus projektavimo duomenis ir prielaidas, pastovaus skerspjūvio portalinių rėmų su stormena naudojimas tampa labai efektyvus ir ekonomiškas. Šiuos veiksnius lemia optimalaus elementų skerspjūvio išnaudojimas prijungiant didžiausių lenkimo momentų veikiamose rėmo vietose stormenas ir taip lokaliai padidinant elementų skerspjūvį. Pritaikius rėmo struktūrai standartinius pastovaus skerspjūvio elementus su stormena vietoje kintamo skerspjūvio elementų, pasiekiamas didesnis gamybos ir montavimo našumas.

Portalinio rėmo elgsena plačiai nagrinėjama moksliniuose straipsniuose, vadovėliuose bei rekomendacinio pobūdžio leidiniuose. A. S. Malikas kartu su C. M. Kingu (Malik, King 2000), C. M. Kingas (King 2001), D. M. Koschmideris ir D. G. Brownas (Koschmider, Brown 2012), L. S. da Silva (2014) bei R. Hendersonas (Henderson 2015) detalai aprašė portalinio rėmo iš standartinių pastovaus skerspjūvio valcuotų elementų elgseną bei projektavimo principus. Išvardinti autoriai aptarė rėmo konstrukcinės sistemos geometrijos sąlygas, projektavimo pagrindus ir principus.



1.1 pav. Pastovaus skerspjūvio portalinio rėmo pavyzdžiai (Single storey...2017)

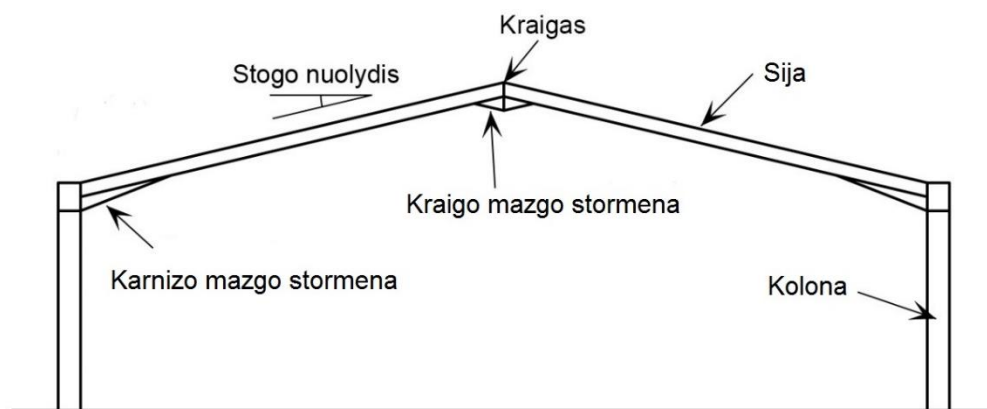
C. Kingas išskyrė pagrindinius rėmo naudojimo privalumus (King 2001):

- žema kaina;
- greita gamyba;
- lengvas išorinių atitvarų padengimas;
- greitas ir paprastas montavimas;
- lengva konstrukcijų priežiūra;
- pastatas lengvai pritaikomas prie pasikeitusių poreikių;
- mažos sąnaudos didelių tarpatramių sudarymui.

Dėl šių portalinio rėmo privalumų, šiuo metu rėmai dažnai naudojami pramoniniuose statiniuose, siekiant gero standumo ir konstrukcijos svorio santykio, greito projekto įgyvendinimo bei užtikrinti funkcinis ir architektūrinius reikalavimus.

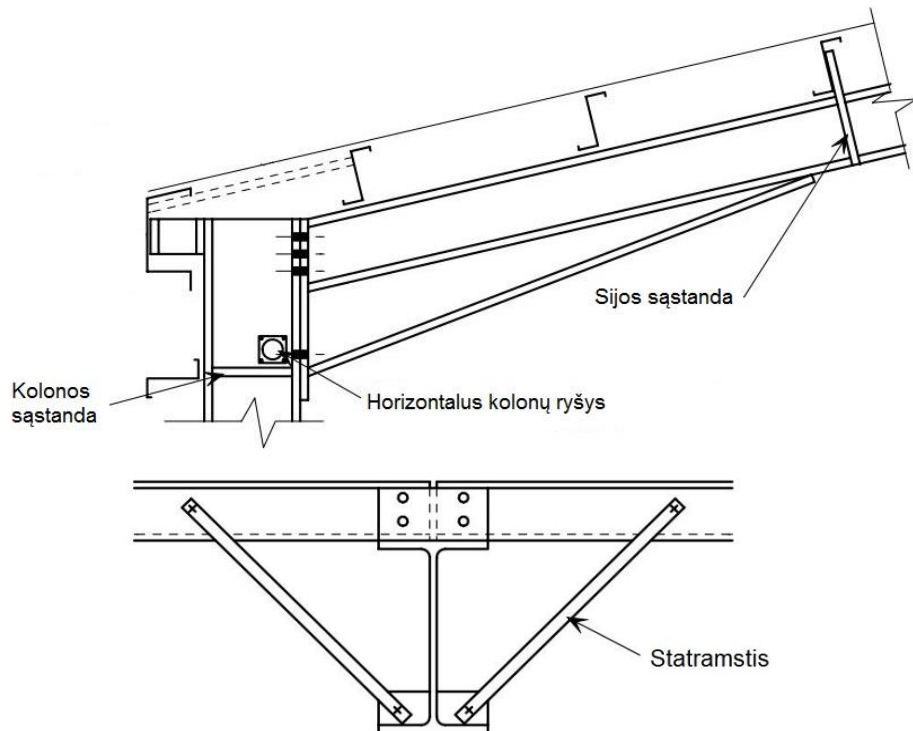
Literatūroje pateikiamos tipinio vienanavio portalinio rėmo struktūros elementų ir jų geometrijos rekomenduojamos kraštinės sąlygos (King 2001):

- rėmo tarpatramis nuo 15 iki 50 metrų (efektyviausias nuo 25 iki 35 metrų);
- karnizo aukštis 5 iki 10 metrų (efektyviausias nuo 5 iki 6 metrų);
- stogo nuolydis tarp 5° ir 10° (dažniausiai priimamas 6°);
- konstrukcijos sistemoje atstumas tarp rėmų priimamas nuo 5m iki 8m;
- rėmo karnizo ir kraigo mazgai projektuojami standūs dėl įrąžų pasiskirstymo iš sijos į koloną. Siekiant sumažinti sijos skerspjūvį bei sudaryti stiprius ir standžius rėmo mazgus mazguose ties didžiausiais lenkimo momentais projektuojamos stormenos (1.2 pav). Jei ties mazgu standumas nepakankamas, papildomai dedamos sąstandos (1.3 pav);



1.2 pav. Vieno tarpatramio portalinio rėmo struktūra (King 2001)

- rėmai tarpusavyje sujungiami sijų bei kolonų ilginiais, stogas dažniausiai dengiamas plonasienių banduotų lakštų paklotu, o fasadai „Sandwich“ tipo daugiasluoksnėmis plokštėmis;
- pastato stabilumui užtikrinti naudojami horizontalūs ir vertikalūs ryšiai. Esant nepakankamam sijos ir kolonos standumui bei skersinio sukamojo klupumo laikomajai galiai, papildomai įvedami tarpiniai įtvirčiai (1.3 pav);
- kolonos ir pamato juntis dažniausiai projektuojama kaip lankstinė jungtis.



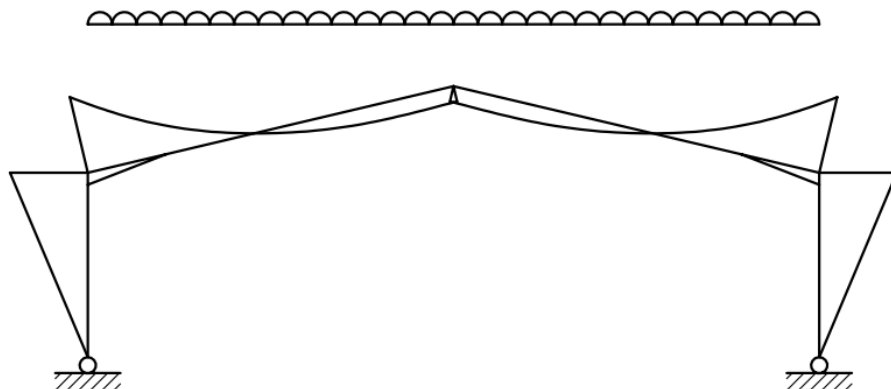
1.3 pav. Rėmo sijos ir kolonos sąstandos ir ryšiai (Malik, King 2004)

1.2 Stormenos samprata

Stormena – trikampis T formos skerspjūvio elementas, kuris prijungiamas prie sijos ir kolonos kraigo mazge, efektyviai sudaro standų ir stiprų mazgą, sumažina sijos skerspjūvį bei padidina bendrą rėmo stabilumą.

Pagal tipinio portalinio rėmo lenkimo momentų diagramą matoma (1.4 pav), jog ties sijos ir kolonos mazgu momentų reikšmės susitelkia didžiausios. Siekiant optimalaus rėmo elementų skerspjūvio išnaudojimo, panaudojant stormeną ties didžiausiomis įrąžų reikšmėmis, lokaliai padidinamas sijos skerspjūvis. Todėl ši rėmo struktūra vertinama dėl optimalaus skerspjūvių išnaudojimo.

Stormena prie sijos prijungiama virinant, o prie kolonos jungiant varžtais.

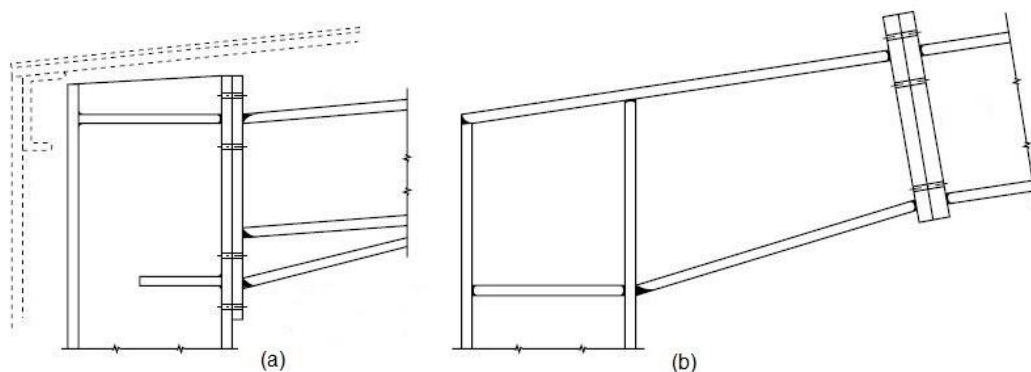


1.4 pav. Lenkimo momentų diagrama tamprioje stadijo nuo išskirstytos vertikalios apkrovos (SCI 2004)

Stormenos, kaip ir kitų rėmo elementų, projektavimo procese būtina patikrinti skerspjūvio stiprumo ir stabilumo tinkamumą pagal saugos ribinio būvio reikalavimus bei deformacijas pagal tinkamumo ribinio būvio sąlygas.

Rėmo sijos ir kolonos mazgo jungtyje stormenos gali būti projektuojamos kelių tipų:

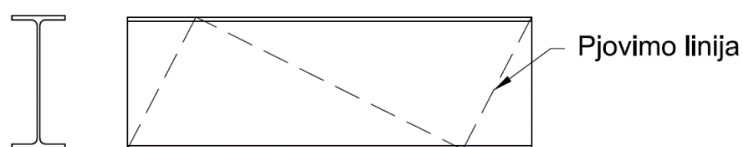
- kintamos T formos skerspjūvio stormena, pagamintą išpjauant iš standartinio karštai valcuoto skerspjūvio elemento arba virinant atskirus plonasienius lakštus. Stormena jungiama prie sijos virinant, o prie kolonos varžtais. Šio tipo stormena su sija pagal normas bendrai apibūdinama kaip elementas su trijų juostų stormena (1.5 pav. a);
- stormena, gaunama prie kolonos privirinant tris plonasienes plokšteles. Tokiu būdu sudaromas kintamo skerspjūvio elementas, prie kurio varžtais prijungiama standartinio skerspjūvio sija. LTS EN 1993-1-1:2005 normose stormena su sija bendrai apibūdinama kaip elementas su dviejų juostų stormena (1.5 pav. b).



1.5 pav. Stormenos tipai: a) trijų juostų stormena; b) dviejų juostų stormena (Gorenc *et al.* 2005)

Lyginant šiuos du stormenos tipus elementų gamybos ir montavimo atžvilgiu, pirmasis tipas vertinamas kaip daug paprastesnis ir greičiau pagaminamas, ekonomiškesnis laiko ir kainos atžvilgiu. Todėl dėl minėtų priežasčių stormenos daugiausia išpjaunamos iš to paties karštai valcuoto skerspjuvio elemento kaip sijos ar didesnio nei virinant iš atskirų plieninių lakštų. 1.6 paveiksle pavaizduotas stormenos gaminimo būdas pjaunant iš standartinio skerspjuvio elemento.

Kai sijos ir stormenos elementai pagaminti iš tokio pat skerspjuvio, bendras sijos ir stormenos aukštis būna šiek tiek mažesnis nei dvigubas sijos skerspjuvio aukštis.



1.6 pav. Stormenos gamyba iš standartinio dvitėjo skerspjuvio elemento

1.3 Ortogonalus portalinio rėmo projektavimo pagrindai ir elgsena

Portalinis rėmas, kaip ir kitos standartinės plieninės konstrukcijos, Lietuvoje projektuojamas pagal Europos Sąjungoje galiojančius statinių projektavimo Euronormų (EN) standartą ribinių būviu metodu. Europos standartams (EN) yra suteiktas Lietuvos standartų (LST EN) statusas, leidžiantis jais vadovautis Lietuvos Respublikoje.

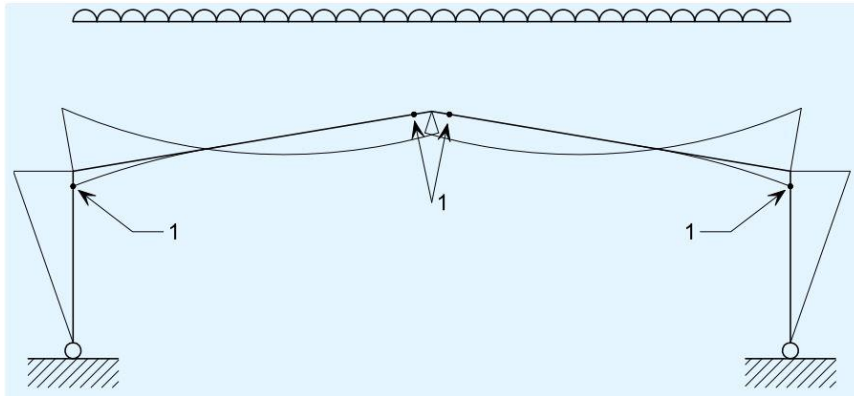
Pagal LST EN 1990 ribinio būvio metodas yra išskiriamas į du ribinius būvius (Kvedaras et al. 2017):

- Saugos ribinis būvis (angl. sutrumpintai žymima ULS). Šis ribinis apima konstrukcijos pusiausvyros netekties, per mažos laikomosios galios, per didelių grunto deformacijų ir varginamosios iirties ribinių sąlygų tikrinimą;
- Tinkamumo ribinis būvis (angl. sutrumpintai žymimas SLS). Bendruoju atveju šis ribinis būvis susijęs su konstrukcijos naudojimo tinkamumu ir riboja deformacijas, kurios neturi viršyti didžiausių leidžiamųjų reikšmių (poslinkių, įlinkių, pasisukimų ir kt.).

1.3.1 *Tampriojo ir plastinio būvio analizės*

Projektuojant portalinį rėmą, skaičiavimai gali būti atliekami pagal du analizės tipus: tampriojo būvio analizę bei plastinio būvio analizę. Šie tipai priklauso nuo elementų skerspjūvio klasės. Plastinio būvio analizė galima tik 1 ir 2 klasės skerspjūviams.

Tipinė simetrinio portalinio rėmo lenkimo momentų diagrama plastinėje stadijoje nuo vertikaliųjų aprovų pavaizduota 2.4 paveiksle. Šioje diagramoje 1 numeriu nurodomos plastinių lankstų atsiradimo vietos. Pirmieji plastiniai lankstai susiformuoja kolonos viršuje ties sijos ir kolonos mazgu, o vėliau susidaro ties rėmo kraigo didžiausias lenkimo momentais, dėl kurių rėmas tampa judriu mechanizmu ir praranda laikomąją galią. Skaičiuojant rėmą tamprioje stadijoje, laikomosios galios išnaudojimas, lyginant su plastinės stadijos rezultatais, gaunamas didesnis iki 10 % (Steel building in Europe 2010).



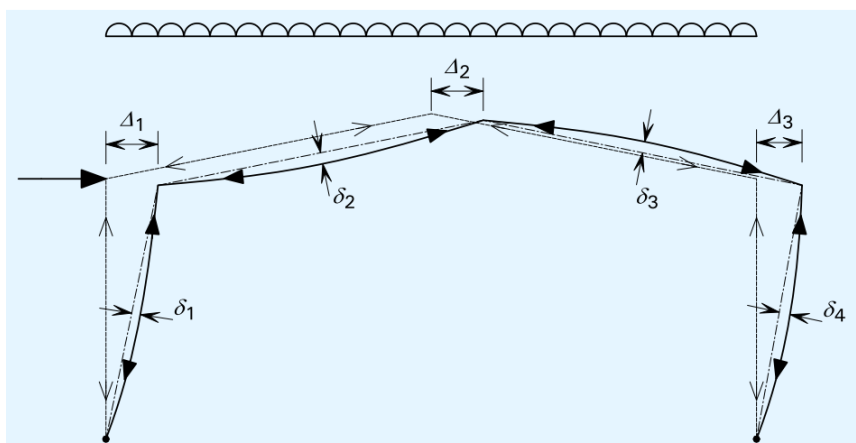
1.7 pav. Plastinio būvio analizės lenkimo momentų diagrama su plastiniais lankstais (Steel building in Europe 2010)

1.3.2 *Deformuotos rėmo geometrijos įtaka. Antrosios eilės efektai*

Veikiamas eksploatacinių apkrovų rėmas deformuojasi ir jo geometrinė forma nuo pradinės pakinta. Veikiant deformuotos konstrukcijos rėmą susidaro antrosios eilės efektai, kurie sukelia papildomas įrašas.

Antrosios eilės lenkimo momentas yra rezultatas ašinės jėgos poveikio į išsikreivinusį strypą. Jis gali atsirasti dėl dviejų antrosios eilės efektų (2.5 pav) (Steel building in Europe 2010):

- $P - \delta$ efektas dėl elemento išlinkio, susijusio su jo chorda;
- $P - \Delta$ efektas dėl elemento išlinkio, susieto su elemento galais.



1.8 pav. Eksploatacinių apkrovų veikiamo rėmo deformuota schema antrosios eilės efektai (Steel building in Europe 2010)

Pagal Steel building in Europe (2010), praktikos rezultatai rodo, jog jei rėmas suprojektuotas pagal pirmosios eilės efektų analizę, atsiradę antrosios eilės P- δ ir P- Δ efektai gali reikšmingai sumažinti rėmo stabilumą ir jo elementų laikomąją galią. Portaliniai rėmai apibūdinami kaip pakankamai jautrios konstrukcinės sistemos antrosios eilės efektams ir ašinėms gniuždymo jėgoms. Šios ašinės jėgos gali siekti iki 10 % sijos ir kolonos tampriojo kritinio klupumo reikšmės, todėl į šiuos antrosios eilės efektų poveikius svarbu atsižvelgti.

Pagal Eurokodą 3 (LST EN 1993-1-1:2005) į antrosios eilės efektus turi būti atsižvelgiama, jeigu jie gerokai padidina įrašas arba reikšmingai keičia konstrukcijos elgseną. Esant labai liauniems rėmams arba įskaitant atskirus liaunus rėmo elementus, atsižvelgiant į ašinės ir lenkimo momento poveikius, pagal minėtas normas reikalaujama atlikti antrosios eilės analizę.

Antrosios eilės efektai gali būti ir neįvertinti naudojant pirmosios eilės analizę, jei tenkinama sąlyga, kuri taikoma kai pastatų vienaaukščiai rėmai su nedideliu stogo nuolydžiu (nedidesnis kaip 26°) bei sijos ir kolonos tipo plokštieji rėmai gali būti tikrinami kaip nesuvaržyti horizontalių poslinkių atžvilgiu (LST EN 1993-1-1:2005):

$$\alpha_{cr} \geq 10,0, \text{ kai atliekama tampriojo būvio analizė; } \quad (1.1)$$

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right); \quad (1.2)$$

čia

α_{cr} – koeficientas, kuriuo reikėtų padidinti skaičiuotines apkrovas, kad, esant bendrajam nepastovumui, pasireikštų tamprusis nepastovumas;

H_{Ed} – skaičiuotinė horizontaliųjų ir fiktyvių horizontaliųjų apkrovų sukeltos horizontaliosios reakcijos, veikiančios aukšto apačioje;

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 (pvz., vėjo) ir fiktyviųjų horizontaliųjų apkrovų, veikiančių kiekvieno aukšto perdangos lygyje;

h – aukšto aukštis.

Koeficientas α_{cr} gali būti apskaičiuojamas pagal minėtą išraišką, jei rėmo sijų ašinis gniuždymas yra nežymus. Ašinis gniuždymas laikomas žymiu, jei tenkinama sąlyginio liaunio rėmo plokštumoje (1.3) (LST EN 1993-1-1:2005) arba (1.4) sąlyga:

$$\bar{\lambda} \geq 0,3 \sqrt{\frac{Af_y}{N_{Ed}}}; \quad (1.3)$$

čia

N_{Ed} – skaičiuotinė gniuždomosios jėgos reikšmė;

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

Ašinės jėgos poveikio reikšmė gali būti įvertinama pagal Steel building in Europe (2010) apteikiamą sąlygą:

$$N_{Ed} \geq 0,09N_{cr}; \quad (1.4)$$

čia

N_{cr} – tamprioji krtinė klupumo jėga, kuri lygi:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_{cr}^2}; \quad (1.5)$$

L_{cr} priimamas kaip sijų poros ilgis ir yra lygus tarpatramio ilgiui, įvertinus sijų nuolydžio kampą:

$$L_{cr} = \frac{L}{\cos \alpha}; \quad (1.6)$$

čia

α – rėmo sijos nuolydžio kampas;

L – rėmo tarpatramio ilgis.

Jei nustatoma, jog ašinės jėgos poveikio reikšmė netenkina šių, t.y (1.3 ir 1.4) sąlygų ir turi reikšmingą poveikį rėmo stabilumui, tuomet (1.2) išraiška netinkama. Tokiu atveju, įvertinti ašinės

jėgos poveikiui portaliniam rėmui taikoma J. Limo ir C. Kingo (SCI 1983) sudaryta alternatyvi išraiška, kurioje α_{cr} pakeičiamas į $\alpha_{cr,est}$.

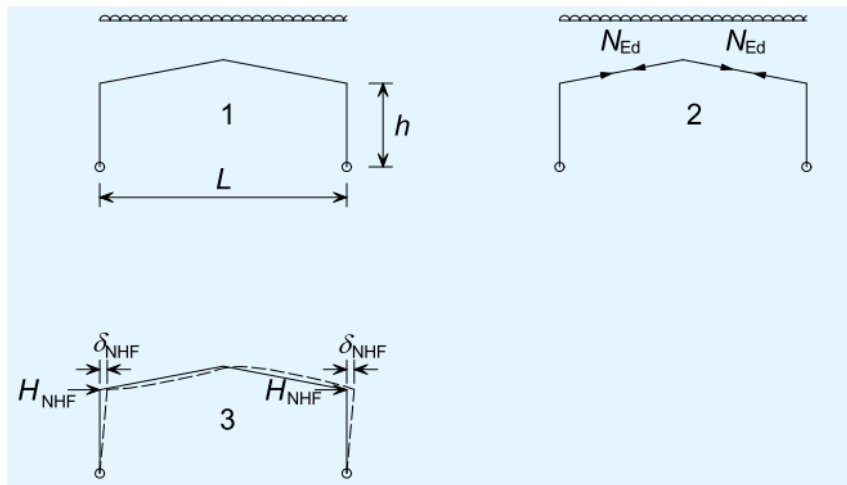
$$\alpha_{cr,est} = \min(\alpha_{cr,s,est}; \alpha_{cr,r,est}); \quad (1.7)$$

čia

$\alpha_{cr,s,est}$ – koeficientas, kad, esant bendrajam nepastovumui, pasireikštų tamprusis nepastovumas

$\alpha_{cr,r,est}$ – koeficientas. Šis dydis taikomas tik tada, kai rėmas sudarytas iš 3 ar daugiau tarpatramių. Todėl standartiniam vieno tarpatramio rėmui šiuo atveju skaičiuoti nereikia. Dydžiai, kurių reikia skaičiuojant portalinio rėmo $\alpha_{cr,s,est}$, yra pavaizduoti 1.9 paveiksle.

Vertinant rėmo stabilumą, δ_{NHF} dydis nusakomas kaip horizontalus kolonos viršaus



1.9 pav. $\alpha_{cr,s,est}$ reikšmės skaičiavimas (SCI 2003)

poslinkis, nuo tariamos skersinės jėgos H_{NHF} , pritaikytos rėmui pagal rekomendacijas bei kolonos pagrindo standumą.

$$\alpha_{cr,s,est} = 0,8 \left\{ 1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \right)_{max} \right\} \alpha_{cr}; \quad (1.8)$$

$$\alpha_{cr} = \left\{ \frac{1}{200} \frac{h}{\delta_{NHF}} \right\}; \quad (1.9)$$

čia

δ_{NHF} – horizontalus rėmo poslinkis, veikiant tariamai H_{NHF} horizontaliai jėgai;

$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \right)_{max}$ – maksimalių sijos N_{Ed} ir N_{cr} reikšmių santykis;

V_{Ed} – vertikali reakciją kolonos atramoje;

H_{NHF} – horizontali jėga, kuri pagal praktinio pritaikymo rekomendacijas apskaičiuojama vertikalios reakcijos į kolonos atramą santykiu:

$$H_{NHF} = \frac{1}{200} V_{Ed}. \quad (1.10)$$

Tada pagal Eurokodą 3 (LST EN 1993-1-1:2005), atliekant tampriojo būvio analizę, į rėmo deformuotos geometrijos veiksnius (antrosios eilės veiksnius) gali būti neatsižvelgiama, jei tenkinama ši sąlyga:

$$\alpha_{cr,s,est} = \alpha_{cr} \geq 10. \quad (1.11)$$

Jei sąlygos netenkinamos ir į konstrukcijos deformacijos įtaką reikia atsižvelgti, portalinio rėmo, projektuojamo remiantis visumine analize pagal tamprųjų modelį, antrosios eilės kampinio pokrypio dėl vertikaliųjų apkrovų poveikiai gali būti apskaičiuojami horizontaliąsias apkrovas H_{Ed} , lygiavertės apkrovas $V_{Ed\phi}$ dėl nuokrypų ir kitus galimus kampinio pokrypio poveikius pagal pirmosios eilės teoriją padidinant koeficientu:

- jei $\alpha_{cr} \geq 3,0$, tada koeficientas lygus: $\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}}$;
- jei ašinė sijos jėga yra reikšminga, tada koeficientas gali būti skaičiuojamas pagal anksčiau aptartą $\alpha_{cr,s,est}$ dydį: $\frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr,s,est}}}$.

Jei $\alpha_{cr} < 3,0$, rėmui projektuojant būtina taikyti tikslesnę antros eilės analizę.

1.3.3 Rėmo visuminės nuokrypos įvertinimas

Rėmo netobulumų tikrinimas atliekamas pagal LST EN 1993-1-1:2005 rėmų visuminės analizės nuokrypų sąlygas. Pastatų rėmų posvyrio galima nepaisyti, jei tenkinama sąlyga:

$$H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed}. \quad (1.12)$$

Atliekant rėmo analizę, nesuvaržyto būvio klupdymui jautrių rėmų nuokrypų poveikis turi būti įvertinamas taikant lygiavertę nuotrypą pradinio pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu. Nuokrypos gali būti nustatomos pagal bendruosius pradinius nuokrypius:

$$\phi = \phi_0 \alpha_h \alpha_m; \quad (1.13)$$

čia

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

α_h – kolonomis taikytinas aukščio h pataisos koeficientas, lygus:

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ bet } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0; \quad (1.14)$$

h – konstrukcijos aukštis metrais. Nagrinėjamu portalinio rėmo atveju lygus kolonos aukščiui;

α_m – kolonų skaičiaus eilėje pataisos koeficientas, lygus:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}; \quad (1.15)$$

m – kolonų skaičius eilėje, įskaitant tik tas kolonas, kurios laiko vertikaliąją apkrovą.

Portalinio rėmo atveju $m = 2,0$;

Pradinė posvyrio nuokrypa gali būti įvertinama dviem būdais:

- modeliuojant rėmą ne vertikaliai su posvyriu;
- pradinio posvyrio ir vietinių išlinkių nuokrypų poveikius pakeičiant lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemomis, taikomomis kiekvienai kolonai. Pritaikant šį būdą, lygiaverčios jėgos reikšmė apskaičiuojama:

$$H_{EHF} = \phi V_{Ed}. \quad (1.16)$$

1.4 Stormenos projektavimo pagrindai

1.4.1 Stormenos geometrijos sąlygos

Stormenos elgsena priklauso nuo konkrečios rėmo konstrukcinės struktūros charakteristikų, rėmo būvio analizės tpo, mazgo komponentų (varžtų, sąstandų ir kt.), kolonos ir sijos skerspjūvių. Daugumoje literatūros šaltinių rekomenduojama pirminiams rėmo skaičiavimais parinkti stormenos skerspjūvį kaip ir sijos.

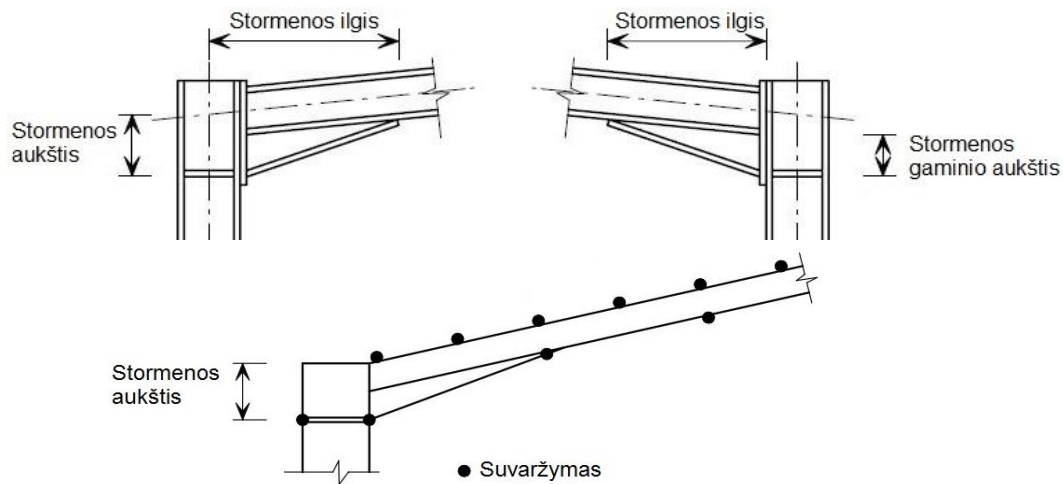
Masyvesnio stormenos skerspjūvio parinkimas nulemia didesnę skersinę sukamąją klupumo galią, dėl kurios elementas tampa mažiau klupus. Tačiau dauguma atvejų dėl ekonomiško bei pastato naudingo aukščio stengiasi stormeną optimizuoti pritaikant keletą pagrindinių sąlygų, kurios toliau aprašomos.

Projektuojant stormeną būtina tiksliai apibrėžti aukščio sąvoką, kadangi pagal projektavimo sąlygas išskiriamos net trys skirtingos stormenos aukščio reikšmės (SCI 2004) (1.10 pav):

- aukštis, priimamas kaip vertikalus atstumas nuo centrinės sijos ašies iki stromenos apačios. Ši aukščio reikšmė taikoma programinėse įrangose skaičiuoti baigtinių elementų metodu (BEM);

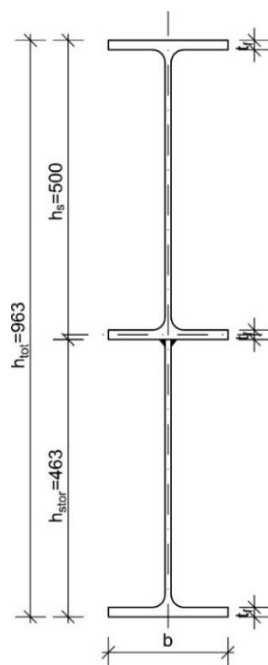
- aukštis, vertinamas kaip atstumas nuo sijos apačios ties kolonos ir sijos susikirtimo vieta iki stormenos apačios. Šis dydis priimamas kaip tikrasis stormenos gaminio aukštis ir taikomas analitiniuose skaičiavimuose;
- vertikalus atstumas tarp šoninių suvaržymų nuo kolonos viršaus iki stormenos apačios.

Dažniausiai rekomenduojama stormenai parinkti tokius skerspjūvius kaip ir sijos, tačiau tokiu atveju bendras sijos ir kolonos skerspjūvis būna ne visada pakankamos laikomosios galios atlaikyti didelius lenkimo momentus ir gali išklupti. Pagal C. Kingą (King 2001), didesnių matmenų stormena labiau priimtina, kadangi tokiu atveju didesnis stormenos stabilumas, sumažėja ją veikianti gniuždymo jėga bei tempimo jėga tenkanti varžtams.



1.10 pav. Skaitmeninei ir analitinei analizei naudojami stormenos matmenys (Henderson 2015)

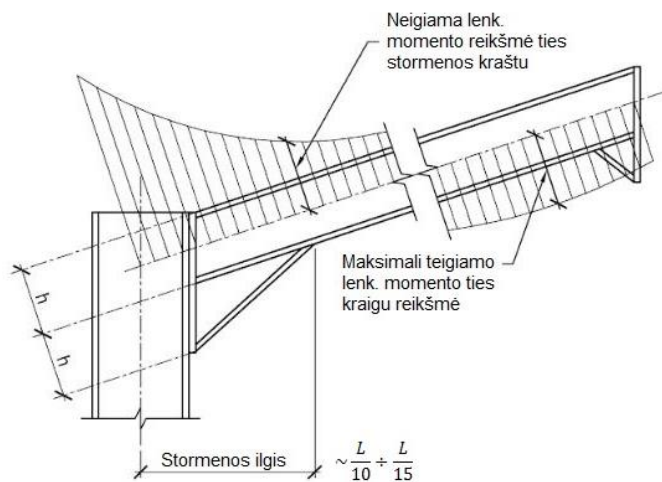
Sijos ir stormenos bendras aukštis dažniausiai būna lygus santykiui nuo $1/35$ iki $1/50$ tarpatramio ilgio (King 2001). Išpjautos iš standartinio valcuoto skerspjūvio elemento kaip sijos stormenos aukštis gaunamas šiek tiek mažesnis už sijos dvigubo skerspjūvio aukštį, atėmus juostos storį bei juostos ir sienutės jungimo spindulį r . Kai sijos ir stormenos bendras skerspjūvis, sudarytas iš IPE 500 profilio elementų, pateikiamas 1.11 paveiksle.



1.11 pav. Bendras sijos ir stormeno skerspjūvio aukštis

Analogiškai stormenos aukščiui, ilgis apibūdinamas kaip atstumas nuo kolonos ašinės linijos iki stormenos pabaigos (1.12 pav.) arba nuo kolonos vidinio krašto iki stormenos smailiojo krašto.

Pagal A. Mittali ir P. Trägeri, projektuojant stormeną, užsiduodamas pradinis ilgis, kuris kinta nuo 10 % iki 15 % rėmo tarpatramio ilgio. Ši procentinė pradinio ilgio sąlyga rodo, kad projektuojant rėmą lenkimo momento neigiama reikšmė pagal diagramą stromenos pabaigoje yra apytikriai lygi sijos didžiausiai teigiamai lenkimo momento reikšmei ties rėmo kraigu ir ši momento reikšmė nutolusi nuo kolonos vidurio santykiu nuo tapratramio ilgio $L/10$ arba $L/15$, priklausomai nuo rėmo būvio analizės.



1.12 pav. Pradinio stormenos ilgio nustatymas (Henderson 2015)

Projektuojant rėmą tamprioje stadijoje, maksimalaus lenkimo momento reikšmė ties sijos ir kolonos jungtimi susidaro didesnė 5 % už plastinėje stadijoje gaunamas reikšmes. Todėl, atliekant skaičiavimus, pagal (SCI 2013) rekomenduojamas stormenos ilgis tamprioje stadijoje 15 %, plastinėje 10 % tarpatramio ilgio.

Taigi, dauguma atvejų dėl ekonomiško bei pastato naudingo aukščio stengiamasi stormeną optimizuoti pritaikant keletą pagrindinių sąlygų:

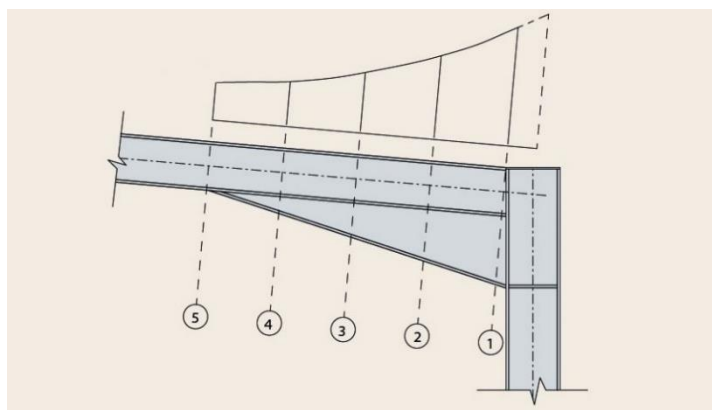
- stormenos pradinis skerspjūvio aukštis priimamas lygus sijos skerspjūviui arba iki 1,5 – 1,7 karto didesnis;
- stormenos ilgis nuo kolonos ašinės linijos priimamas lygiu apytiksliai 10 % iki 15 % tarpatramio ilgio.

1.4.1 Kintamojo skerspjūvio ekvivalentinės charakteristikos

Norint apskaičiuoti kintamo skerspjūvio stormenos laikomąją galią bei atsparumą klupčiai, iškyla tam tikrų problemų. Kintant skerspjūvio aukščiui keičiasi ir skerspjūvio geometrinės charakteristikos (skerspjūvio plotas, inercijos spindulys, inercijos momentas, tamprusis skerspjūvio atsparumo momentas ir kt.), todėl nėra aišku kaip nustatyti tokio elemento laikomąją galią. Euronormų metodika (EN 1993-1-1:2005) yra skirta tik pastovaus skerspjūvio elementams skaičiuoti. Bet ją galima panaudoti ir kintamojo skerspjūvio stormenai įvairiuose pjūviuose skaičiuoti.

Stormenos skerspjūvio laikomoji galia tikrinama sudalijus siją su stormena į keturias lygias dalis (Koschmidder *et al.* 2012) (1.13 pav). Ties penkiomis ašimis nustatomos pagrindinės sijos su stormena skerspjūvio ekvivalentinės charakteristikų reikšmės:

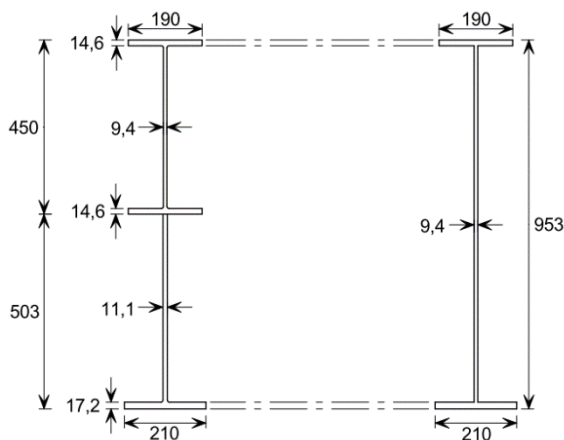
- stormenos skerspjūvio aukštis h_h ;
- bendras sijos ir stormenos aukštis;
- sijos su stormena skerspjūvio plotas;
- sijos su stormena skerspjūvio neutralioji ašis (n.l);
- mažiausias bendro skerspjūvio inercijos momentas $I_{Y,min}$;
- mažiausias tamprusis skerspjūvio atsparumo momentas $W_{el,min}$.



1.13 pav. Stormalio charakteristinių reikšmių skaičiavimas (Koschmidder *et al.* 2012)

Dėl paprastesio skerspjūvio charakteristikų nustatymo, sijos ir stormalio skerspjūviai sujungiami į bendrą skerspjūvį, o sijos apatinė juosta eliminuojama. Jei sijos ir stormalio elementai iš skirtingų skerspjūvių, tai bendro skerspjūvio sienelės storis priimamas lygus plonesniajai skerspjūvių sieniei (1.14 pav.) Sudalijimų vietose, kaip ir charakteristikų reikšmės, nustatomos veikiančios N_{Ed} , M_{Ed} ir V_{Ed} įrašos.

Kadangi sijos su stormena skerspjūvis sudarytas iš dviejų ir yra kintantis, skaičiuojami ekvivalentiniai skerspjūvio rodikliai kiekviename pjūvyje: h_{eq} , A_{eq} , $I_{y,min,eq}$, $W_{el,min,eq}$.



1.14 pav. Sijos su stormena dalies skerspjūvis: a) tikrasis sijos ir stormalio skerspjūvis; b) ekvivalentinis (SCI 2013)

Mažiausiasis tamprusis skerspjūvio atsparumo momentas apskaičiuojamas taip (Plieninės konstrukcijos...2012):

$$W_{el,min} = \frac{I_{eq}}{r_{T,min}}; \quad (1.17)$$

čia

r_T – maksimalus atstumas nuo apatinės arba viršutinės (kuris didesnis) juostos svorio centro iki viso skerspjūvio svorio centro (neutraliosios ašies):

$$r_{T,min} = \frac{h_{weq} + t_f}{2}; \quad (1.18)$$

Tada suminio skerspjūvio tamprioji lenkiamoji galia randama pagal formulę:

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}}; \quad (1.19)$$

Dvitėjo skerspjūvio inercijos momentas apie y-y ašį nustatomas pagal formulę (Plieninės konstrukcijos... 2012):

$$I_y = \frac{t_w h_w^3}{12} + 2 \left(\frac{b_f t_f^3}{12} + b_f t_f \left(\frac{h_f}{2} \right)^2 \right); \quad (1.20)$$

čia

h_w, h_f – ekvivalentinio skerspjūvio sienelės aukščiai, randami pagal formules:

$$h_w = h - 2 \cdot t_f; \quad (1.21)$$

$$h_f = h - t_f. \quad (1.22)$$

1.4.2 Sijos ir stormenos bendrojo skerspjūvio klasifikavimas

Skerpjūvio juostos tikrinamos įprasta tvarka. Tačiau nustatant bendro sijos ir stormenos skerspjūvio sienelės klasę, ji gali būti dalijama į dvi dalis ir klasifikuojamos pagal įtempius bei geometriją. Sijos skerspjūvio sienelė pavadinama viršutine sienele, o stormenos skerspjūvio – apatine sienele (SCI 2013).

Viršutinė sienelė. Viršutinė sienutė dauguma atvejų yra veikiamą tempimo įrašų, todėl ji bus 3 arba aukštesnės klasės (1 arba 2).

Apatinė sienelė. Apatinė sienelė veikiamą lenkimo ir gniuždymo, todėl klasė nustatoma pagal atsižvelgiant į įtempių koeficientą ψ pagal LST EN 1993-1-1:2005. Įtempiai, atsirandantys dėl ašinės jėgos apatinėje sienutė apskaičiuojami pagal standartinę išraišką:

$$\sigma_N = \frac{N_{Ed}}{A}; \quad (1.17)$$

čia

N_{Ed} – veikianti ašinė jėga;

A – bendras sijos ir stormenos skerspjūvio plotas.

Maksimalūs įtempiai, atsirandantys dėl lenkimo momento apatinėje sienelė:

$$\sigma_M = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} - \sigma_N. \quad (1.18)$$

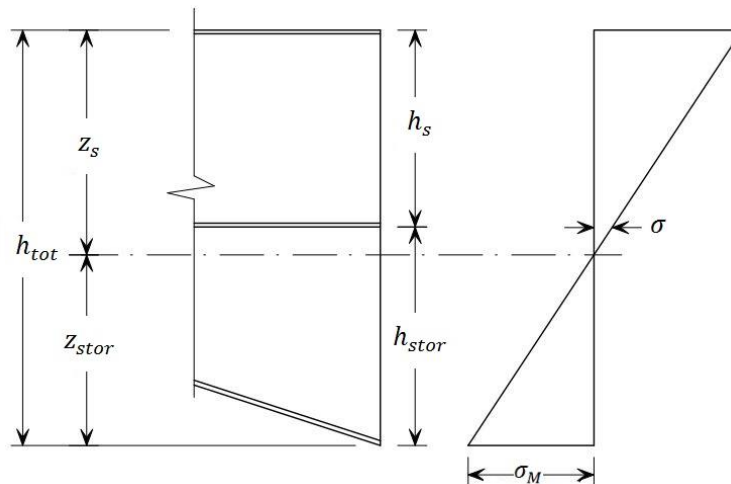
Įvertinus atstumą tarp skerspjūvio neutralios ašies ir stormenos viršaus, kuris įvardinamas kaip z dydis (1.15 pav.), gaunami veikiami įtempiai nuo lenkimo momento ir ašinės jėgos, stormenos viršuje:

$$\sigma = \sigma_M \left(\frac{z}{z_h} \right) + \sigma_N; \quad (1.19)$$

$$\psi = \frac{\sigma}{\sigma_M}.$$

čia

z – atstumas nuo stormenos skerspjūvio viršaus iki neutralios ašies: $z = z_s - h_s$.



1.15 pav. Sijos ir stormenos skerspjūvio įtempiai

1.5 Rėmo elementų skerspjūvio laikomoji galia

Pagal Eurokodą 3 (LTS EN 1993-1-1:2005) portalinio rėmo plieninių elementų skerspjūvių laikomosios galios gali būti:

- ašinio gniuždymo;
- lenkimo momento;
- šlyties;
- kartu veikiančio gniuždymo ir lenkimo;

- kartu veikiančios šlyties ir lenkimo.

Apskaičiuojant konstrukcijų laikomąją galią, pirmiausia reikia nustatyti skerspjuvio klasę. Vienų skerspjuvių dalių standumas, t.y. sienelės, juostos ir t.t., leidžia plastines deformacijas, kiti skerspjuviai dėl liaunų sudedamųjų gali netekti vietinio pastovumo jau tamprioje stadijoje. Skerspjuvio klasifikacija priklauso nuo gniuždomųjų dalių pločio ir storio santykio. Eurokode siekiant apibūdinti skerspjuvių elgseną yra nustatytos keturios skerspjuvių klasės (Kvedaras et al. 2017):

- 1 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kurie gali sudaryti analizei pagal plastiškąjį modelį reikiamą sukamosios gebos plastinį lankstą, kai bendroji galia nesumažėja;
- 2 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kurie pasiekia savo plastinę lenkiamąją galią, tačiau dėl vietinio klupumo jų sukamoji geba ribota;
- 3 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kurių plieninio elemento kraštinio gniuždomojo sluoksnio, kai daroma tamprioji įtempių pasiskirstymo prielaida, gali pasiekti plieno takumo ribą atitinkantį stiprį stiprį, tačiau dėl vietinės klupties negali pasiekti plastinės lenkiamosios galios;
- 4 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kuriuose vietinė kluptis įvyksta vienoje ar daugiau skerspjuvio dalių prieš įtempiams pasiekiant plieno takumo ribą atitinkantį stiprį. Ketvirtos klasės skerspjuviams atskirose skerspjuvio dalyse leidžiamas vietinio pastovumo netekimas tamprioje stadijoje ir tai turi būti įvertinta apskaičiuojant viso skerspjuvio laikomąją galią.

Gniuždomo elemento skaičiuotinė laikomoji galia 1, 2 ir trečios klasės skerspjuviams apskaičiuojama pagal LST EN 1993-1-1:2005:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}; \quad (1.20)$$

čia

A – skerspjuvio plotas;

f_y – stipris pagal takumo ribą;

γ_{M0} – dalinis patikimumo koeficientas.

Skaičiuotinė lenkiamoji galia aplink vieną pagrindinių skerspjuvio ašių, jei skerspjuviai 1 arba 2 klasės, apskaičiuojama (LTS EN 1993-1-1:2005):

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}}; \quad (1.21)$$

jei skerspjūvis 3 klasės:

$$M_{C,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}}; \quad (1.22)$$

jei kerspjuvis 4 klasės:

$$M_{C,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}}; \quad (1.23)$$

čia

W_{pl} – plastinis atsparumo momentas;

$W_{el,min}$ – mažiausiasis tamprusis skerspjūvio atsparumo momentas;

$W_{eff,min}$ – mažiausiasis efektyvusis skerspjūvio atsparumo momentas;

Skaičiuotinė šlyjamoji galia apskaičiuojama (LST EN 1993-1-1:2005):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}; \quad (1.24)$$

čia

A_v – šlyjamasis plotas.

Kai rėmas sudarytas iš valcuotų dvitėjų ir H formos profiliuotųjų, šlyjamasis plotas A_v apskaičiuojamas:

$$A = 2bt_f + (t_w + 2r)t_f, \text{ bet ne mažesnė kaip } \eta h_w t_w. \quad (1.25)$$

Jei veikia šyties jėga, turi būti atsižvelgiama į jos poveikį lenkiamajai galiai. Kai šlyties jėga mažesnė kaip pusė plastinės šlyjamosios galios, jos poveikio lenkiamajai galiai galima nepaisyti, išskyrus atvejį, kai skerspjūvio laikomąją galią mažina šlyties klupumas. Kitu atveju elemento sumažinta lenkiamoji galia apskaičiuojama šlyjamajam plotui taikant sumažintąjį stiprį pagal takumo ribą (LST EN 1993-1-1:2005):

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left[W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4t_w} \right] f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ bet } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}; \quad (1.26)$$

Elementą kartu veikiant lenkimui ir ašinei jėgai kai yra dvisimetriai dvitėjai bei H formos profiliuotieji ir kiti skerspjūviai su juostomis, atsižvelgiant į ašinės jėgos poveikį plastinei lenkiamajai galiai aplink y-y ašį nebūtina, jei laikomasi abiejų šių kriterijų:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad \text{ir} \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}; \quad (1.27)$$

1.6 Rėmo elementų klumpamoji galia

1.6.1 Pastovaus skerspjuvio elementų klumpamoji galia

Portalinio rėmo elementų vietinis bei viso rėmo visuminis stabilumas priklauso nuo tinkamo ryšių išdėstymo. Taip pat tarp rėmų išdėstyti ilginiai, fasado ir stogo plokštės/banguoto lakšto denginiai elementams suteikia papildomą standumą.

Elementų stabilumas turėtų būti tikrinamas tarp ilginių pagal visus galimus klupumo tvejus. Skersinis klupumas ir skersinis sukamasis klupumas turi būti patikrinamas tarp šoninių suvaržymo, ilginių bei sukimosi įtvirčių.

Skaiciuojant pagal Euronormas, portalinio rėmo elementus reikia tikrinti gniuždomus, lenkiamus bei kartu lenkimo ir ašinio gniuždymo veikiamus elementus rėmo plokštumoje, o taip pat ir iš rėmo plokštumos. Euronormų metodika (LST EN 1993-1-1:2005) yra skirta tik pastovaus skerspjuvio elementams skaičiuoti. Bet ją galima panaudoti ir kintamojo skerspjuvio stormenai įvairiuose pjūviuose skaičiuoti.

Kai elementas veikiamas gniuždymo (rėmo kolona), skaičiuotinė gniuždomojo elemento klumpamoji galia turi būti apskaičiuojama pagal sąlygą LST EN 1993-1-1:2005 sąlygą:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}, \quad \text{jei skerspjuviai 1, 2 arba 3 klasės} \quad (1.28)$$

Jei skerspjuvis 4 klasės, skerspjuvio plotas A pakeičiamas į efektyvų skerspjuvio plotą A_{eff} .
čia

χ – klupumo koeficientas pagal atitinkamą klupumo kreivę, apskaičiuojamas:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \text{bet} \quad \chi \leq 1,0 \quad (1.29)$$

Φ – rodiklis klupumo koeficientui χ nustatyti, kuris apskaičiuojamas:

$$\Phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]; \quad (1.30)$$

čia

α – nuokrypos koeficientas, parenkamas pagal atitinkamą klupumo kreivę;

$\bar{\lambda}$ – sąlyginis liaunis, kai skerspjuviai 1, 2 arba 3 klasės:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}; \quad (1.31)$$

Jeigu skerspjūvis 4 klasės, skerspjūvio plotas A pakeičiamas į efektyvų skerspjūvio plotą A_{eff} .
čia

N_{cr} – atitinkamos klumpo formos tamprioji kritinė jėga, pagrįsta bendrojo skerspjūvio savybėmis;

Kai elementas neturi pakankamai šoninio standumo arba šoninis poslinkis nėra suvaržytas, gali įvykti skersinė sukamoji klumpis.

Skersinei sukamajai klumpčiai yra būdingos lenkiant pasireiškiančios stačiosios elemento gniuždomos dalies (juostos) deformacijos. Ši dalis veikia kaip gniuždomasis elementas, tačiau jos deformacijas varžo likusi skerspjūvio tempiamoji dalis. Todėl atsiranda tiek stačiųjų, tiek sukamųjų deformacijų. Šis poveikis vadinamas skersine sukamąja klumpimi.

Kritinis lenkiamasis momentas priklauso nuo šių veiksnių:

- apkrovos (lenkiamųjų momentų diagramos pavidalo);
- atramų tipo;
- atstumo tarp šoninių suvaržymų;
- lenkiamojo elemento standumo;
- sukamojo standumo;

Lenkimo veikiamų rėmo elementų klumpamosios galios reikšmė apskaičiuojama pagal LST EN 1993-1-1:2005 sąlygą:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}; \quad (1.32)$$

čia

χ_{LT} – skersinio sukamojo klumpo koeficientas;

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \quad \text{bet} \quad \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (1.33)$$

Φ_{LT} – rodiklis klumpo koeficientui χ_{LT} nustatyti, kuris apskaičiuojamas:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]; \quad (1.34)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}};$$

α_{LT} – nuokrypos koeficientas;

M_{cr} – tamprusis kritinis skersinio sukamojo klupumo momentas;

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}}; \quad (1.35)$$

Lenkimo ir ašinio gniuždymo bendrai veikiami pastovaus skerspjūvio rėmo elementai turi būti tikrinami pagal LST EN 1993-1-1:2005 klupumo sąlygas, kurios apima elemento klupumą jo plokštumoje (1.36) ir iš plokštumos (1.37):

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0; \quad (1.36)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_z N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0. \quad (1.37)$$

čia

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, ir $M_{z,Ed}$ – skaičiuotinės gniuždomosios jėgos ir didžiausiųjų lenkiamųjų momentų, atitinkamai apie y–y ir z–z ašis išilgai elemento, reikšmės;

$\Delta M_{y,Ed}$ ir $\Delta M_{z,Ed}$ – lenkiamieji momentai, susidarantys dėl sunkio centro ašies poslinkio 4 klasės skerspjūviams;

χ_y ir χ_z – lenkiamojo klupumo koeficientai;

χ_{LT} – skersinio sukamojo klupumo koeficientas;

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , ir k_{zz} – sąveikos koeficientai;

N_{Rk} – elemento charakteristinė gniuždomoji galia;

$M_{y,Rk}$ ir $M_{z,Rk}$ – elemento charakteristinė lenkiamoji galia.

Pastovaus skerspjūvio portalinio rėmo elementams esant iš 1, 2 ir 3 klasės skerspjūvių, $\Delta M_{y,Ed}$ ir $\Delta M_{z,Ed}$ reikšmės lygios 0,0. $M_{z,Ed}$ lenkimo momentas lygus 0,0, kadangi rėmas apkraunamas tik jo plokštumoje. Todėl (1.38) ir (1.39) išraiškas galima užrašyti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,y,Rd}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0; \quad (1.38)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,z,Rd}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0; \quad (1.39)$$

Klupumas iš plokštumos apibūdinamas kaip elemento klupumas apie silpniausią skerspjūvio ašį ir tikrinimas pagal (1.40) sąlygą. Ši sąlyga turi būti taikoma patikrinti klupumą visam elementui ir atskiroms elemento dalims tarp šoninių įtvirtinimų. Todėl reikalinga nustatyti maksimalų atstumą tarp suvaržymų, kuris negali būti viršijamas.

Skersinio sukamojo klupumo poveikių galima nepaisyti, jei elemento segmento, esančio tarp suvaržytos dalies plastinio lanksto vietoje ir gretimo šoninio įtvirčio, ilgis L yra ne didesnis kaip L_m .

LST 1993-1-1:2005 normų BB.3 priede pateikiama stabiliojo ilgio tarp gretimų šoninių įtvirčių sąlyga, taikoma pastovaus skerspjūvio elementams:

$$L_m = \frac{38i_z}{\sqrt{\frac{1}{57,4} \left(\frac{N_{Ed}}{A} \right) + \frac{1}{756C_1^2} \left(\frac{W_{pl,y}^2}{AI_t} \right) \left(\frac{f_y}{235} \right)^2}} \quad (1.40)$$

čia

N_{Ed} – skaičiuotinė element gniuždomosios jėgos reikšmė;

A – element skerspjūvio plotas, mm²;

$W_{pl,y}$ – elemento plastinis pjūvio atsparumo momentas;

I_t – element sukimo konstanta;

f_y – stipris pagal takumo ribą;

C_1 – koeficientas, priklausantis nuo apkrovų ir tvirtinimo sąlygų. Nustatomas pagal 1.16 pav.

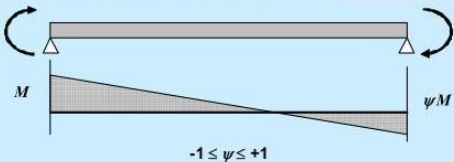
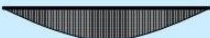
Ši sąlyga galioja, jei elementas ties plastiniu lankstu ir kitas segmento galas yra suvaržyti:

- gniuždomosios juostos šoniniu įtvirčiu, jei viena juosta yra gniuždoma per visą segmento ilgį;
- sukimosi įtvirčiu;
- šoniniu įtvirčiu segmento gale ir elemento sukimosi įtvirčiu, kuris yra L_s reikalavimus atitinkančiu atstumu;

C_1 koeficientas nustatomas pagal lenkimo momento diagramą. Šio koeficiento reikšmės, kai lenkimo momentai veikia elemento galuose arba elementas veikiamas skersai elemento išskirstytos apkrovos ar koncentruotos jėgos, pateikiamos 1.16 paveiksle.

čia

ψ – lenkimo momentų reikšmių ties gretimais įtvirčiais santykis

Kai momentai elemento galuose		ψ	C_1
		+1,00	1,00
		+0,75	1,17
		+0,50	1,36
		+0,25	1,56
		0,00	1,77
		-0,25	2,00
		-0,50	2,24
		-0,75	2,49
		-1,00	2,76
Kai momentai elemento viduryje			
		0,94	1,17
		0,62	2,60
		0,86	1,35
		0,77	1,69

1.16 pav. C_1 koeficiento reikšmės (Steel building in Europe 2010)

1.6.2 Kintamo skerspjūvio elementų klupamoji galia

Sijos dalies su stormena klupumas tarp įtvirčių pirmiausia tikrinamas pagal anksčiau minėtą (1.40) formulę. Jei atstumas tarp suvaržymų yra mažesnis už L_m atstumą, tokiu atveju priimama, kad ši sijos su stormena dalis neišklups. Tačiau, jei atstumas didenis, tuomet turi būti vertinamas elemento klupumas. Šioje situacijoje susiduriama su problema, kadangi LST EN 1993-1-1:2005 normos nepritaikytos kintamo skerspjūvio elementų klupumo tikrinimui, šiuo atveju stormenos. Tokiu atveju patikrinamas elemento jautrumas skersinio sukamojo klupumo poveikiui pagal (1.41) sąlygą bei patikrinamas bendrasis klupumas katu nuo ašinio gniuždymo bei lenkimo momento pagal Steel building in Europe (2010) skaičiavimų metodiką.

Pagal LST EN 1993-1-1:2005 6.3.2.4 (1)B skersinio sukamojo klupumo sąlygą, atskiri gniuždomos juostos šoninį įtvirčius turintys elementai nėra jautrūs skersiniam sukamajam klupdymui, jei atstumas L_c tarp įtvirčių arba lygiavertės gniuždomosios juostos atstojamasis liaunis $\bar{\lambda}_f$ atitinka sąlygą:

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \bar{\lambda}_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}}; \quad (1.41)$$

čia

$M_{y,Ed}$ – didžiausioji skaičiuotinė lenkiamojo momento tarp įtvirčių reikšmė;

$M_{c,Rd}$ – skaičiuotinė lenkiamoji galia aplink vieną svarbiausių skerspjūvio ašių;

k_c – liaunio korekcijos koeficientas, įvertinantis momentų pasiskirstymą tarp įtvirčių;

$\bar{\lambda}_{c0}$ – pirmiau apibrėžtos lygiavertės gniuždomosios juostos liaunio ribinis rodiklis;

$i_{f,z}$ – lygiavertės gniuždomosios juostos ploto, kurį sudaro gniuždomoji juosta ir 1/3 gniuždomojo sienelės ploto, inercijos momento spindulys aplink skerspjūvio silpnąją ašį, kuris apskaičiuojamas:

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_f}{A_f + \frac{1}{3}A_{w,c}}}; \quad (1.42)$$

čia

I_f – gniuždomosios juostos inercijos momentas aplink skerspjūvio silpnąją ašį;

A_f – gniuždomosios juostos skerspjūvio plotas;

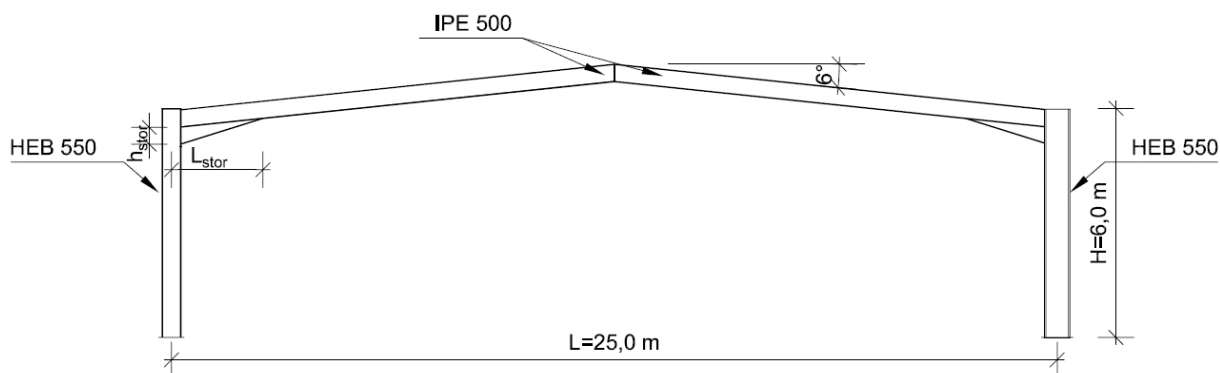
$A_{w,c}$ – gniuždomosios sienelės dalies skerspjūvio plotas.

1.41 sąlyga nusako sijos su stormena dalies jautrumą skersiniam sukamajam klupumui: jei atstojamasis liaunis $\bar{\lambda}_f$ mažesnis ir atitinka pagal sąlygą, tuomet elementas nėra jautrus ir neišklups.

2. PORTALINIO RĖMO ANALITINIAI SKAIČIAVIMAI

2.1 Nagrinėjamos konstrukcijos ir analitinių skaičiavimų aprašymas

Šiame skyriuje analitiniais skaičiavimais pagal LST 1993-1-1:2005 normas projektuojamas 25,0 m tarpatramio portalinis rėmas, esant skirtingam stormenos skerspjūviui bei ilgiui. Stormenos skerspjūvis parenkamas nuo IPE 400 iki IPE 600 imtinai, ilgis – $0,07L$, $0,10L$ bei $0,15L$. Skaičiavimai atliekami suvedus duomenis ir sukūrus skaičiavimo algoritmą *SMath Studio* programa. Rėmo tarpatramis nusakomas dydžiu L . Pasirinkto rėmo geometrija parodyta 2.1 paveiksle.



2.1 pav. Nagrinėjamo rėmo geometrija

Nagrinėjamo rėmo elementų geometriniai rodikliai:

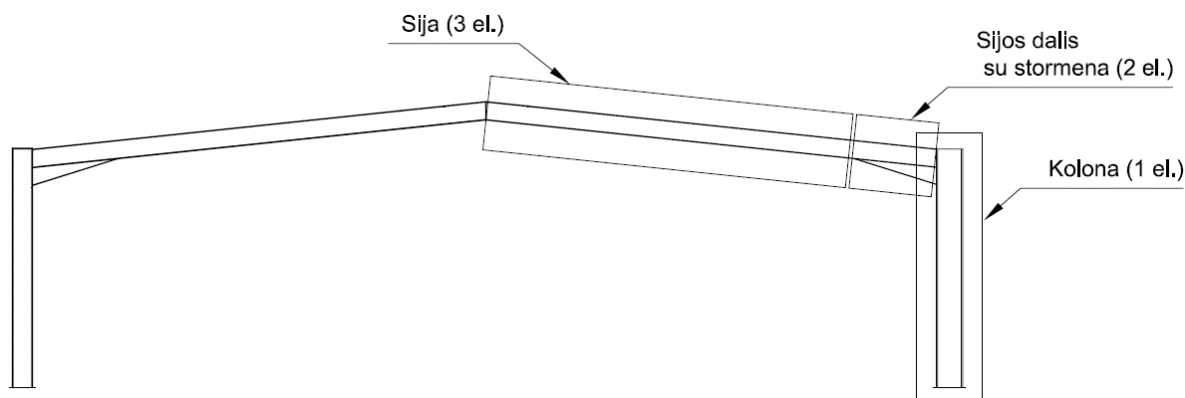
- Plieno tamprumo modulis – $E = 210 \text{ G}$;
- Plieno klasė – S355;
- Kolonos skerspjūvis – HEB 550;
- Sija skerspjūvis – IPE 500;
- Stormenos skerspjūvis – IPE 400 - IPE 600;
- Stormenos ilgis: $0,07L$, $0,1L$, $0,15L$.

Projektuojant portalinį rėmą, pirmiausia atliekama rėmo visuminė analizė, t.y. įvertinama deformuotos konstrukcijos geometrijos įtaka bei nuokrypos.

Deformuotos geometrijos poveikis įvertinamas pagal sąlygas, kurios apibrėžia kada gali būti taikoma pirmosios eilės analizė. Skaičiavimais nustatius, jog rėmas, kai atliekama tampriojo būvio analizė, netenkina šios sąlygos keliamo kriterijaus, atliekamas antrosios ir pirmosios eilės analizės skaitiniu metodu gautų įrašų palyginimą ir pagal jas nustatomas rėmo jautrumas antrosios eilės efektų poveikiui. Rėmo nuokrypos įvertinamos pradinio posvyrio ir vietinių išlinkių poveikius

apskaičiuojant ir pakeičiant lygiaverčių horizontaliųjų jėgų sistemomis, taikomomis kiekvienai kolonai (pagal LST EN 1993-1-1:2005 5.4 pav.).

Atlikus visuminę rėmo analizę, toliau tikrinamos atskirų rėmo elementų, t.y. kolonos (1 elementas), sijos dalis su stormena (2 elementas) bei likusi sijos dalis (3 elementas) pagal 2.2 pav., skerspjūvio laikomosios ir klupamosios galios tikrinimas. Šių rezultatų palyginimas su skaitinio metodo gautais rezultatais pateikiamas trečiame skyriuje, tuo tarpu sijos dalies su stormena detalesnis rezultatų palyginimas kiekviename skerspjūvio pjūvyje pateikiami antro skyriaus 2.3 poskiryje.



2.2 pav. Rėmo dalys, analizuojamos analitiniu ir skaitiniu metodu

2.2 Visuminė rėmo analizė

2.2.1 Antrosios eilės efektų poveikio nustatymas

Portaliniai rėmai apibūdinami kaip pakankamai jautrios konstrukcinės sistemos antrosios eilės efektams ir ašinėms gniuždymo jėgoms. Šios ašinės jėgos gali siekti iki 10 % sijos ir kolonos tampriojo kritinio klupumo reikšmės, todėl į šiuos antrosios eilės efektų poveikius svarbu atsižvelgti. Pagal Eurokodą 3 (LST EN 1993-1-1:2005) antrosios eilės efektai gali būti ir neįvertinti naudojant pirmosios eilės analizę, jei tenkinama sąlyga, kuri taikoma kai pastatų vienaaukščiai rėmai pagal anksčiau aprašytą (2.2) sąlygą, kai konstrukcija projektuojama tamprioje stadijoje:

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

Kadanti tiriamų rėmų atveju ašinė jėga turi reikšmingą poveikį, jį reikia įvertinti pakeičiant α_{cr} į $\alpha_{cr,s,est}$ ir skaičiuojamas pagal anksčiau apteiktas (2.8) ir (2.9) išraiškas:

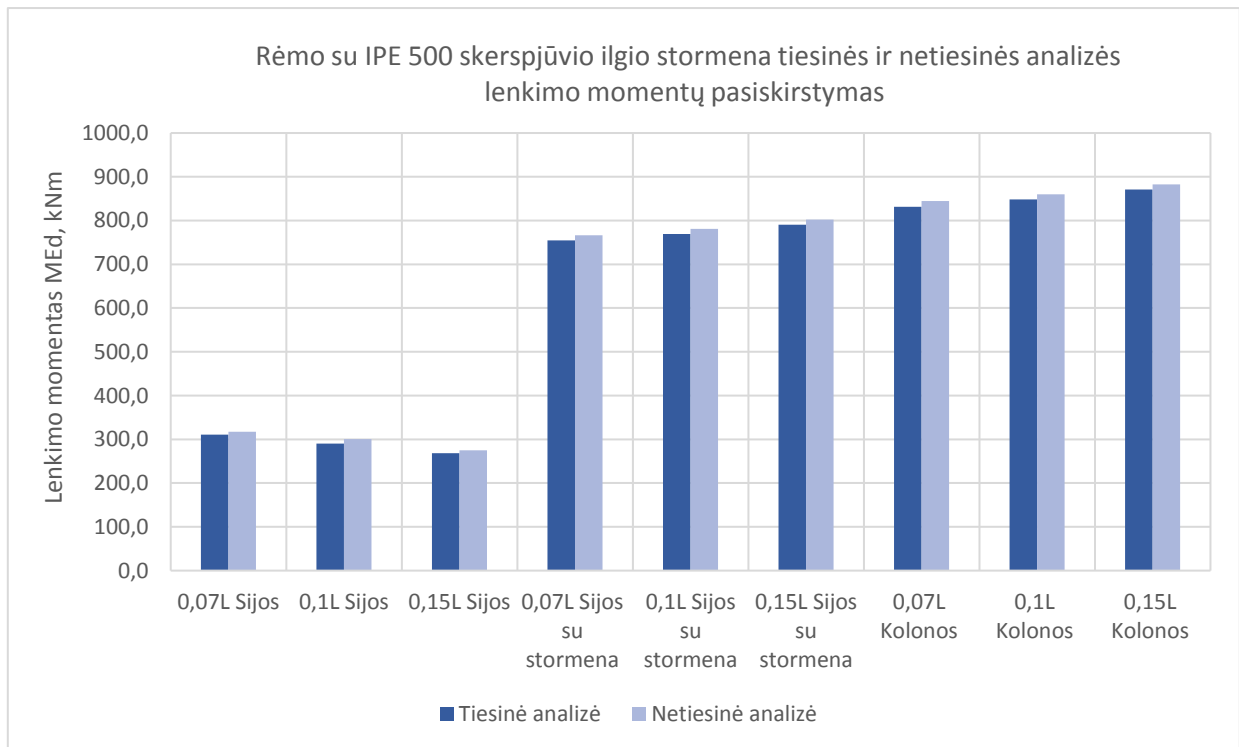
$$\alpha_{cr,s,est} = 0,8 \left\{ 1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \right)_{max} \right\} \alpha_{cr};$$

$$\alpha_{cr} = \left\{ \frac{1}{200} \frac{h}{\delta_{NHF}} \right\};$$

Darbe analizuojami 15 variantų rėmų, kurie skiriasi vienas nuo kito stormenos ilgiu ir skerspjūviu. Pagal LST EN 1993-1-1:2005, atliekant tampriojo būvio analizę, į rėmo deformuotos geometrijos veiksnius (antrosios eilės veiksnius) gali būti neatsižvelgiama, jei tenkinama ši sąlyga:

$$\alpha_{cr,s,est} = \alpha_{cr} \geq 10.$$

Apskaičiavus šių rėmų α_{cr} pastebima, kad šis dydis visuose rėmuose yra apie 2,3. Pagal LST EN 1993-1-1:2005, antros eilės efektus reikia įvertinti, kai $\alpha_{cr} < 3$. Todėl visiems rėmams, su skirtingo ilgio ir skerspjūvio stormenomis, atliekamas įrąžų palyginimas, norint nustatyti antros eilės efektų poveikį. Žemiau pateikiama diagrama (2.3 pav.) su maksimalių lenkimo momentų įrąžų pasiskirstymu pagal tiesinę ir netiesinę analizės rėmo kolonoje, sijos dalyje su stormena ir be jos, esant stormenos IPE 500 skerspjūviui bei 0,07L, 0,1L ir 0,15L ilgiui. Rezultatai su kitais stormenos skerspjūviais bei reikšmių skirtumas tarp tiesinės ir netiesinės analizės pateikiami 2.1–2.3 lentelėse.



2.3 pav. Tiesinės ir netiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmės, esant 0,07L, 0,1L, 0,15L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenoms

2.1 lentelė. Tiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmės, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenoms

Stormenos skerspjūvis	0,07L ilgio stormenos			0,1L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Kolonos, kNm	Sijos, kNm	Sijos su stormena, kNm	Kolonos, kNm	Sijos, kNm	Sijos su stormena, kNm	Kolonos, kNm	Sijos, kNm	Sijos su stormena, kNm
IPE 400	824,6	319,0	758,5	838,1	304,0	771	856,8	283,7	788,4
IPE 450	828,3	314,9	756,8	843,1	298,3	770,5	864,0	275,9	789,7
IPE 500	831,7	311,0	754,3	847,9	290,3	769,2	870,8	268,5	790,2
IPE 550	834,9	307,5	751,5	852,1	288,4	767,2	876,8	252,6	789,7
IPE 600	837,8	304,3	747,8	856,1	284,1	764,4	882,6	256,1	788,3

2.2 lentelė. Netiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmės, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenoms

Stormenos skerspjūvis	0,07L ilgio stormenos			0,1L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Kolonos, kNm	Sijos, kNm	Sijos su stormena, kNm	Kolonos, kNm	Sijos, kNm	Sijos su stormena, kNm	Kolonos, kNm	Sijos, kNm	Sijos su stormena, kNm
IPE 400	837,8	327,5	771,1	850,8	310,1	783,1	869,2	290,7	800,2
IPE 450	841,2	323,3	769,1	855,6	305,9	782,3	876,1	281,9	801,2
IPE 500	844,4	317,2	766,4	860,1	300,4	780,8	882,6	274,8	802,3
IPE 550	847,5	315,5	763,4	864,2	295,6	778,5	888,3	268,2	800,5
IPE 600	850,2	312,1	759,5	868,0	291,1	775,5	893,9	261,9	798,0

2.3 lentelė. Tiesinės ir netiesinės analizės rėmo elementų lenkimo momentų reikšmių skirtumas, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenoms

Stormenos skerspjūvis	0,07L ilgio stormenos			0,1L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Kolonos	Sijos	Sijos su stormena	Kolonos	Sijos	Sijos su stormena	Kolonos	Sijos	Sijos su stormena
IPE 400	1,58 %	2,60 %	1,63 %	1,49 %	1,97 %	1,55 %	1,43 %	2,41 %	1,47 %
IPE 450	1,53 %	2,60 %	1,60 %	1,46 %	2,48 %	1,51 %	1,38 %	2,34 %	1,44 %
IPE 500	1,50 %	2,57 %	1,58 %	1,42 %	2,46 %	1,49 %	1,34 %	2,29 %	1,51 %
IPE 550	1,49 %	2,54 %	1,56 %	1,40 %	2,44 %	1,45 %	1,29 %	2,24 %	1,35 %
IPE 600	1,46 %	2,50 %	1,54 %	1,37 %	2,40 %	1,43 %	1,26 %	2,21 %	1,22 %

Pagal tiesinės ir netiesinės eilės analizės lenkimo momento įrašos reikšmes, matoma, jog įvertinus antrosios eilės efektus jos labiau didėja, kai yra liaunesnis elemento skerspjūvis. Kolonos ir sijos su stormena lenkimo momentas padidėja apie 1,5 %, o sijos apie 2,5 %. Sijos skerspjūvis yra daug liaunesnis negu kolonos, todėl antrosios eilės efektas turi didesnę poveikį. Pagal LST EN 1993-1-1:2005 5.2.1 (2) sąlygą, į deformuotos geometrijos veiksnius turi būti atsižvelgiama, jeigu jie gerokai padidina įrašas arba reikšmingai keičia konstrukcijos elgseną. Nagrinėjamam portaliniam rėmui 2 eil. efektų poveikis yra nedidelis – įrašų padidėjimas iki 2,5 % ir nėra reikšmingas, todėl tolimesni elementų skaičiavimai pagal bei skaitinė analizė atliekami pagal pirmosios eilės analizę neįvertinus 2 eil. efektų.

Šiuo tyrimu galima priimti išvadą, jog tiriamas rėmas nėra jautrus antros eilės efektams, patikrinus pagal LST EN 1993-1-1:2005 normų rekomendacijas.

2.2.2 Rėmo visuminės analizės nuokrypos

Pagal LST EN 1993-1-1:2005, tiek rėmo klumpas plokštumoje, tiek klumpas iš plokštumos, įskaitant simetrinių ir nesimetrinių klumpo formų sukamąjį klumpą, turi būti įvertinamas nepalankiausia kryptimi ir forma. Todėl atliekant rėmo analizę nesuvaržyto būvio klumpymui jautrių rėmų nuokrypų, poveikis vertinamas taikant lygiavertę nuokrypą pradinio

pokrypio ir atskirų elementų išlinkio pavidalu. Nuokrypos nustatomos pagal ankstesniame darbo skyriuje pateiktas (1.12) – (1.16) formules. Nagrinėjamam rėmui, kai kolonų bendrosios įrašos lygios $H_{Ed} = -12,0kN$, $V_{Ed} = 442,2kN$, tuomet pagal (1.12) sąlygą nustatoma $H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed}$, jog rėmo pradinį posvyrį reikia įvertinti (LST EN 1993-1-1:2005 5.3.2.(4)):

$$12,0kN < 0,15 \cdot 442,2kN = 66,3kN.$$

Rėmo nuokrypiai įvertinami pagal (1.16):

$$H_{EHF} = \phi V_{Ed} = 0,7817kN.$$

Apskaičiavus H_{EHF} matoma, kad jėga, kurią reikia pridėti kolonos viršuje yra labai nedidelė lyginant su rėme veikiančiomis įrašomis. Kadangi poveikis labai nežymus, rėmo posvyrio galima nepaisyti.

2.2.3 Sijos su stormena skerspjuvio laikomosios galios analizė

Kaip jau buvo aprašyta pirmame skyriuje, analitiniais skaičiavimais sijos su stormena ekvivalentinio skerspjuvio laikomoji galia tikrinama penkiuose pjūviuose, sudalijus skerspjuvį į keturias lygias dalis (1.13 pav). Apskaičiavus ekvivalentinio skerspjuvio charakteristines reikšmes tikrinama lenkiamoji, šlyjamoji bei gniuždomoji skerspjuvio laikomoji galia pagal (1.20) – (1.25) formules.

Ekvivalentinio skerspjuvio laikomųjų galių išnaudojimas nuo veikiančio lenkimo momento, šlyties bei ašinio gniuždymo jėgų pjūviuose:

$$\frac{M_{Ed,y,n}}{M_{el,y,Rd,n}} \leq 1,0; \quad (2.1)$$

$$\frac{N_{Ed,n}}{N_{c,Rd,n}} \leq 1,0; \quad (2.2)$$

$$\frac{V_{Ed,n}}{V_{pl,Rd,n}} \leq 1,0; \quad (2.3)$$

čia

$M_{el,y,Rd,n}$ – tamprioji lenkiamoji galia apie y-y ašį pjūvyje n;

$M_{Ed,n}$ – lenkiamasis momentas apie y-y ašį pjūvyje n;

$N_{c,Rd,n}$ – ašinė gniuždomoji galia pjūvyje n;

$N_{Ed,n}$ – skaičiuotinė ašinė jėga pjūvyje n;

$V_{pl,Rd,n}$ – plastinė skerspjuvio šlyjamoji galia pjūvyje n;

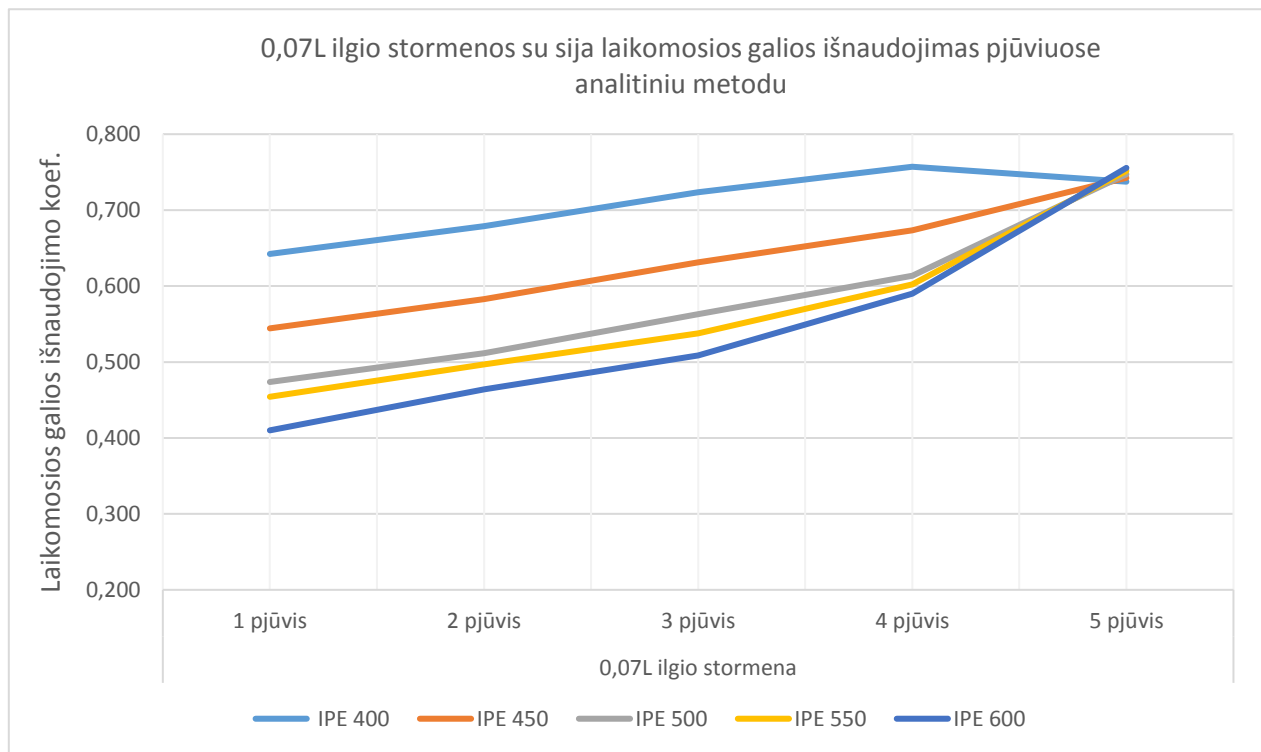
$V_{Ed,n}$ – skaičiuotinė šlyties jėga pjūvyje n;

n – pjūvio numeris;

Lyginant ekvivalentinio skerspjuvio pjūviuose analitinių skaičiavimų laikomosios galios išnaudojimo koeficientus su skaitinio metodo, skerspjuvio pjūvyje lenkiamosios ir ašinio gniuždymo išnaudojimo koeficientai sudedami pagal LST EN 1993-1-1:2005 6.2.(7) sąlygą:

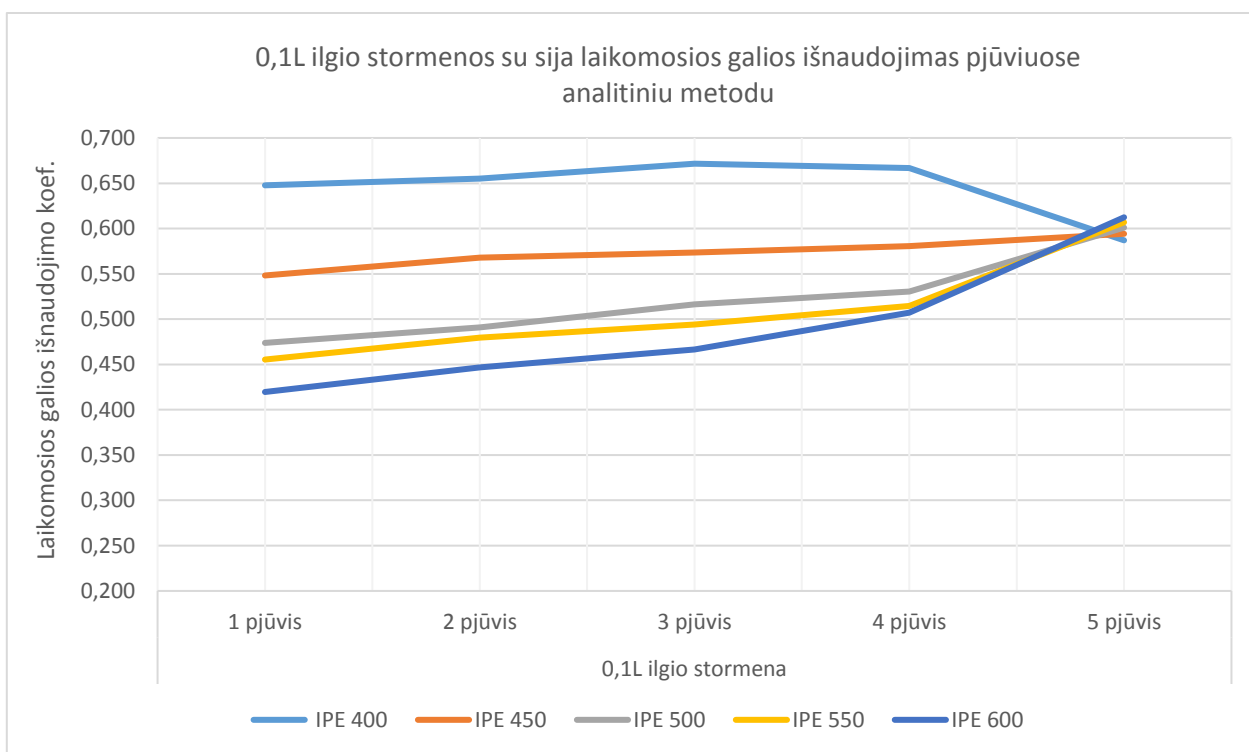
$$\frac{N_{Ed,n}}{N_{c,Rd,n}} + \frac{M_{Ed,y,n}}{M_{el,y,Rd,n}} \leq 1,0. \quad (2.4)$$

Žemiau pateikiamos diagramos (2.4 – 2.9 pav.), kuriose vaizduojamas analitiniu bei skaitiniu metodu gautos ekvivalentinio skerspjuvio laikomosios galios išnaudojimo koeficiento priklausomybė nuo stornenos ilgio bei skerspjuvio kiekviename pjūvyje. Rezultatų palyginimas tarp analitinio ir skaitinio metodo reikšmių pateikiamas 2.4 lentelėje.

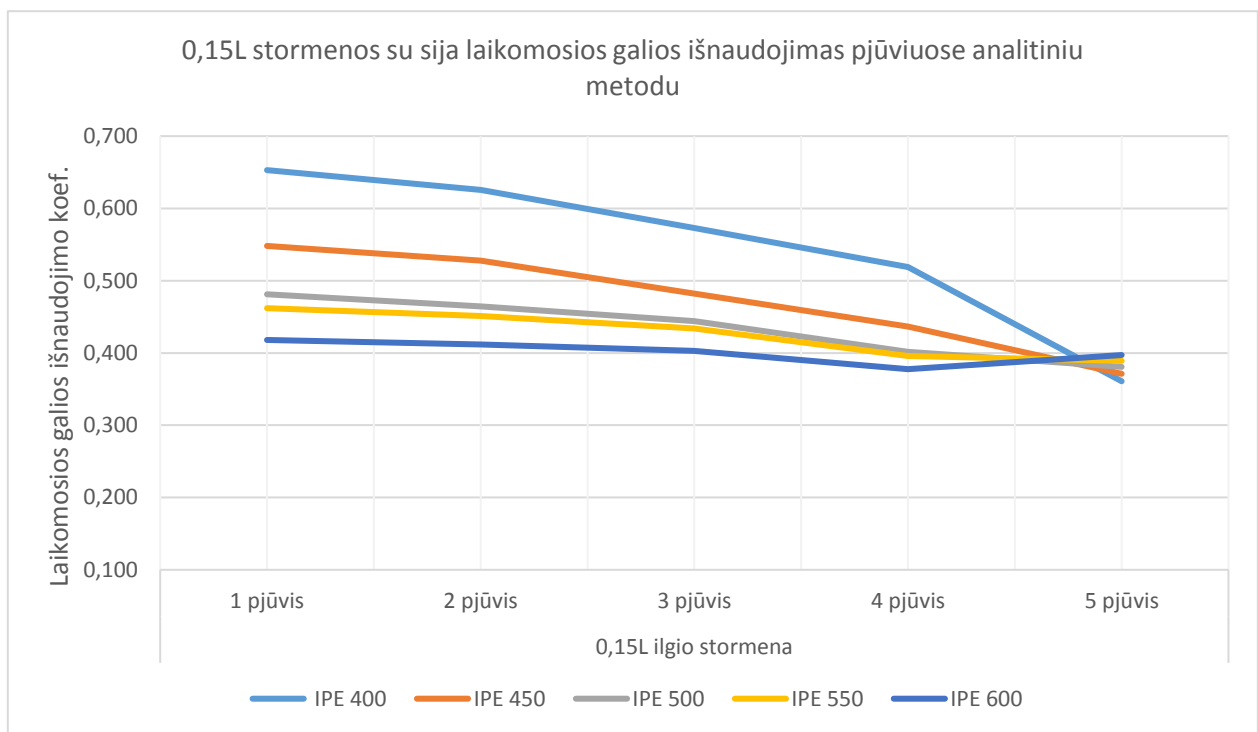


2.4 pav. Analitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjuvio pjūviuose, kai stornenos ilgis 0,07L ir skerspjuvis IPE 400-600

Iš 2.4 paveikslo matoma, jog pagal analitinių skaičiavimų rezultatus 0,07L ilgio stormenos su sija laikomosios galios išnaudojimas mažėja didėjant stormenos skerspjūviui. Visais stormenos skerspjūvio atvejais pastebima, kad nuo 1 iki 4 pjūvio laikomosios galios išnaudojimas tiesiškai didėja (padidėja iki 30,0 %). Pjūvyje nr. 5 laikomosios galios išnaudojimas visų stormenos skerspjūvio tipų sutampa ir yra lygus apie 0,75. Taip yra todėl, kadangi ties šiuo pjūviu baigiasi stormenos elementas ir visas veikiančias įrašas atlaiko tik sijos skerspjūvis.

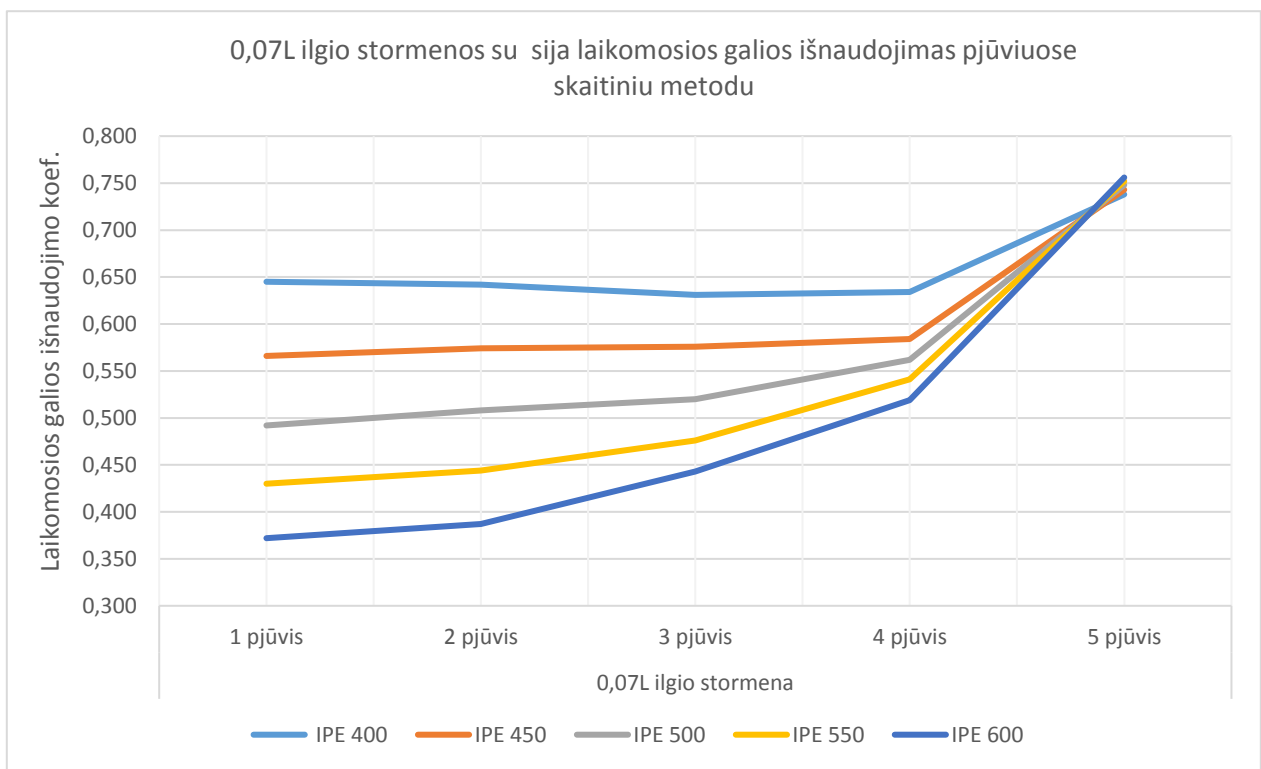


2.5 pav. Analitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo coef. reikšmės ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,1L ir skerspjūvis IPE 400-600

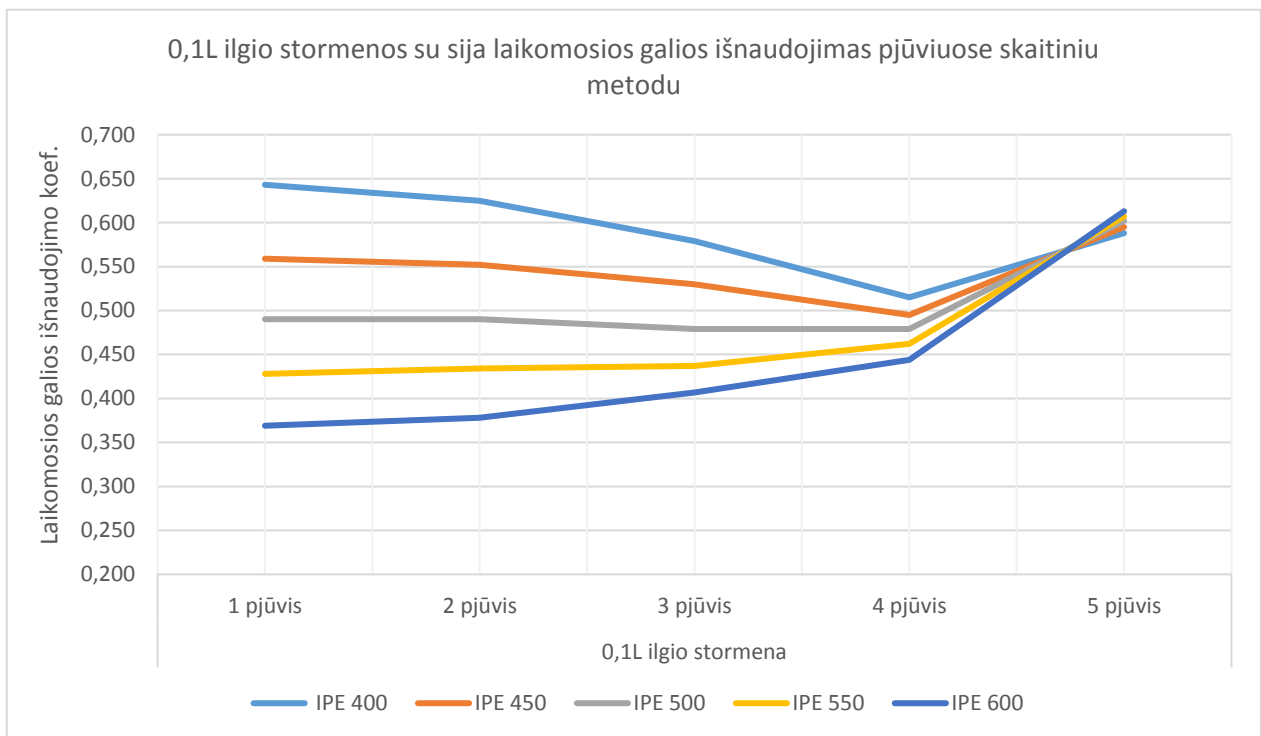


2.6 pav. Analitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,15L ir skerspjūvis IPE 400-600

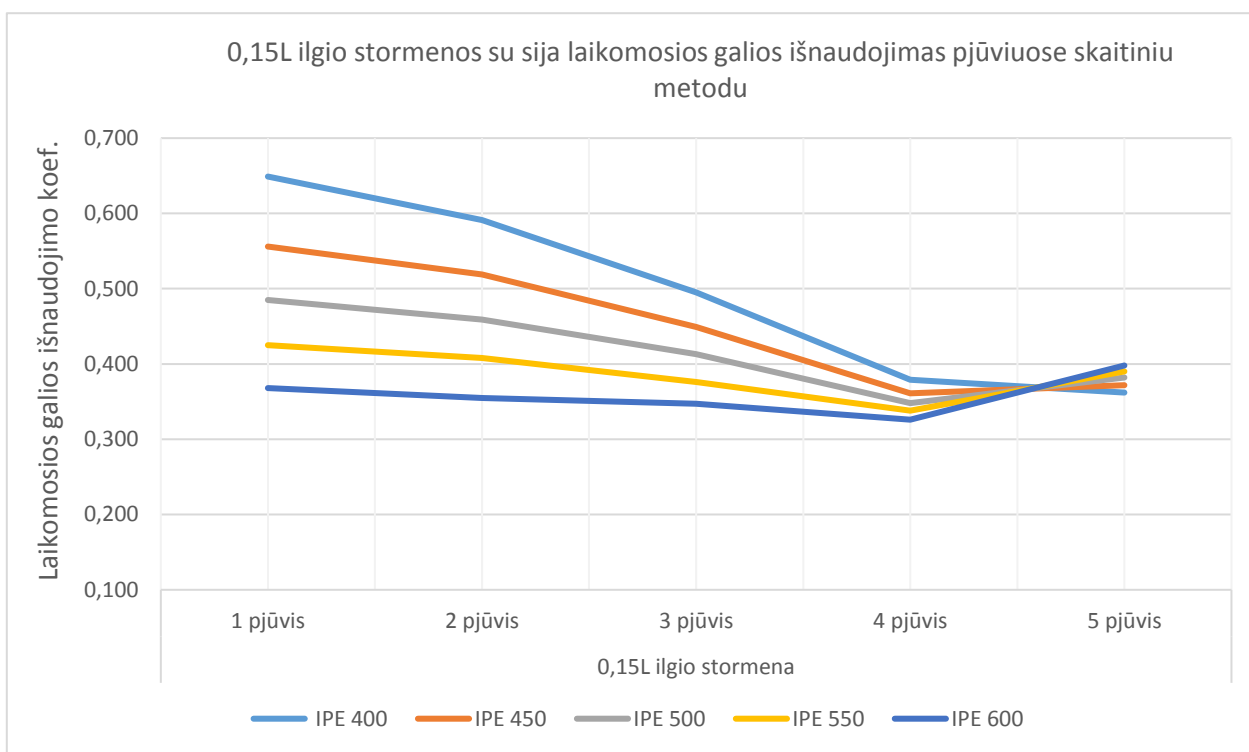
Aukščiau esančiuose 2.5 ir 2.6 paveiksluose pastebimas analogiškas laikomosios galios išnaudojimo kitimas pagal stormenos ilgį. 0,1L ir 0,15L ilgio stormenų su sija laikomosios galios išnaudojimas mažėja kai didinamas stormenos skerspjūvis. Tačiau, lyginant laikomosios galios išnaudojimo koef. kitimą pagal stormenos skerspjūvio nuo 1 ir 4 pjūvio eant 0,1L ir 0,15L ilgio stormenoms, tarp šių stormenos ilgių pastebimas skirtumas. 0,1L ilgio stormenos su sija laikomosios galios išnaudojimas praktiškai nekinta nuo 1 iki 4 pjūvio, o 0,15L ilgio stormenos su sija – mažėja. Taip yra todėl, kad ilgesnėje stormenoje pjūvis nr. 4 yra daug labiau nutolęs nuo kolonos ir todėl šiame pjūvyje veikia mažesnis lenkimo momentas.



2.8 pav. Skaitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,07L ir skerspjūvis IPE 400-600



2.7 pav. Skaitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo koef. reikšmės ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,1L ir skerspjūvis IPE 400-600



2.9 pav. Skaitiniu metodu gautos laikomosios galios išnaudojimo coef. reikšmės ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose, kai stormenos ilgis 0,15L ir skerspjūvis IPE 400-600

Stormenos su sija laikomosios galios išnaudojimas visais stormenos ilgio atvejais analogiškai kinta ir pagal skaitinių skaičiavimų rezultatus. Skirtumą tarp skaitinių ir analitinių skaičiavimo rezultatų galima matyti lentelėje 2.4 lentelėje.

2.4 lentelė. Analitiniu ir skaitiniu metodu gautų laikomosios galios išnaudojimo coef. reikšmių palyginimas ekvivalentinio skerspjūvio pjūviuose

IPE 400 skerspjūvio									
Pjūvio Nr.	0,07L ilgio stormenos			0,10L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %
1	0,642	0,645	-0,27	0,648	0,643	0,47	0,653	0,649	0,40
2	0,679	0,642	3,68	0,655	0,625	3,01	0,626	0,591	3,46
3	0,724	0,631	9,26	0,672	0,579	9,26	0,573	0,495	7,79
4	0,757	0,634	12,31	0,667	0,515	15,17	0,519	0,379	14,00
5	0,737	0,738	-0,07	0,587	0,588	-0,10	0,361	0,362	-0,11

2.4 lentelės tęsinys.

IPE 450 skerspūvio									
Pjūvio Nr.	0,07L ilgio stormenos			0,10L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %
1	0,544	0,566	-2,17	0,548	0,559	-1,08	0,548	0,556	-0,79
2	0,583	0,574	0,88	0,568	0,552	1,60	0,528	0,519	0,87
3	0,631	0,576	5,51	0,574	0,530	4,35	0,482	0,449	3,30
4	0,674	0,584	8,96	0,581	0,495	8,55	0,436	0,361	7,54
5	0,743	0,743	-0,05	0,594	0,595	-0,08	0,371	0,372	-0,08
IPE 500 skerspūvio									
Pjūvio Nr.	0,07L ilgio stormenos			0,10L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %
1	0,474	0,492	-1,83	0,474	0,490	-1,62	0,481	0,485	-0,38
2	0,512	0,508	0,38	0,491	0,490	0,10	0,465	0,459	0,55
3	0,563	0,520	4,31	0,517	0,479	3,75	0,444	0,413	3,13
4	0,614	0,562	5,17	0,530	0,479	5,13	0,402	0,348	5,35
5	0,747	0,748	-0,07	0,601	0,602	-0,10	0,381	0,382	-0,12
IPE 550 skerspūvio									
Pjūvio Nr.	0,07L ilgio stormenos			0,10L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %
1	0,454	0,430	2,42	0,455	0,428	2,74	0,462	0,425	3,70
2	0,497	0,444	5,29	0,480	0,434	4,57	0,451	0,408	4,33
3	0,538	0,476	6,19	0,494	0,437	5,69	0,434	0,376	5,80
4	0,602	0,541	6,10	0,515	0,462	5,25	0,396	0,338	5,77
5	0,752	0,752	-0,04	0,607	0,607	-0,01	0,389	0,390	-0,09

2.4 lentelės tęsinys.

IPE 600 skerspūvio									
Pjūvio Nr.	0,07L ilgio stormenos			0,10L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %	Analitinio metodo	Skaitinio metodo	Skirtumas, %
1	0,410	0,372	3,80	0,420	0,369	5,06	0,418	0,368	5,00
2	0,464	0,387	7,71	0,447	0,378	6,88	0,412	0,355	5,66
3	0,509	0,443	6,56	0,467	0,407	5,95	0,403	0,347	5,59
4	0,590	0,519	7,09	0,507	0,444	6,32	0,378	0,326	5,16
5	0,756	0,756	-0,04	0,612	0,613	-0,06	0,397	0,398	-0,10

Išanalizavus skirtumus tarp analitinių ir skaitinių skaičiavimo rezultatų pastebima, kad sijos su stormena laikomosios galios išnaudojimas praktiškai sutampa 5 pjūvyje, o einant nuo 1 iki 4 pjūvio šis skirtumas didėja. Didžiausias skirtumas 5,0 – 15,0 % tarp skaitinių ir analitinių skaičiavimų rezultatų yra ketvirtame pjūvyje. Taip yra todėl, kad analitiniu skaičiavimu atveju taikomas ekvivalentinis skerspūvis. Šiuo skerspūviu neįvertinama sijos apatinė juosta, kuri irgi perima didelius įtempius ir taip sumažina įtempius stormenos juostoje.

Pjūvyje nr.1 sijos juosta praktiškai yra ant neutralinės linijos. Todėl sijos apatinė juosta neperima didelių įtempių ir nesumažina stormenos laikomosios galios išnaudojimo.

Dėl analitiniu skaičiavimo metodu taikomo ekvivalentinio skerspūvio beveik visais atvejais gaunamas didesnis stormenos su sija laikomosios galios išnaudojimas negu skaičiuojant skaitiniu metodu.

3. SKAITINIO EKSPERIMENTO DALIS

Šiame darbe skaitiniams strypiniams bei plokšteliniams rėmo eksperimentams atlikti pasirinkta baigtinių elementų programa *SOFiSTiK 2018*. Analizuojamos portalinio rėmo konstrukcijos buvo modeliuojamos *SOFiPLUS* aplinkoje strypiniais (BEAM) bei plokštuminiais (SHELL tipo) elementais. Strypiniais elementai braižomi linijomis, kurioms priskiriamas skerspjūvis, tuo tarpu lakštinio tipo elementai braižomi kaip plokštelės, kurioms užduodamas atitinkamas storis, įtvirtinimo sąlygos, apkrovos ir t.t. Atliekant skaičiavimus abiejais atvejais, elementai suskaidomi į baigtinius keturkampius elementus (galimi ir trikampiai).

3.1 Portalinio rėmo skaitinio modelio sudarymas

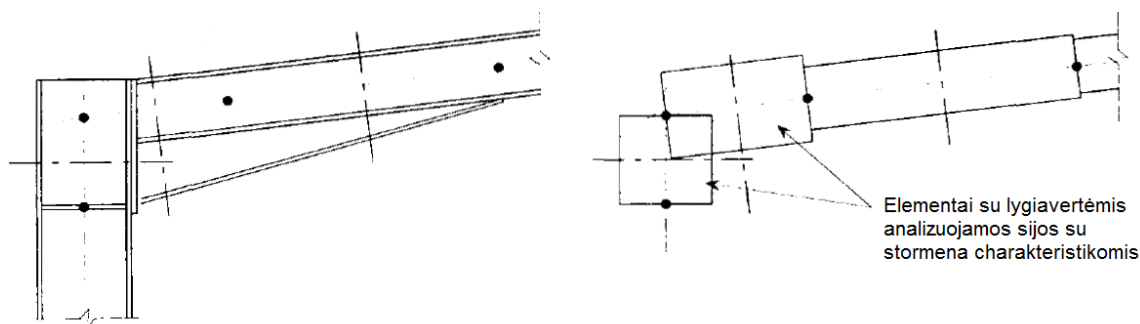
SOFiPLUS aplinkoje strypiniais elementais sumodeliuojami 25,0 m ir 30,0 m tarpatramio portaliniai rėmai. Rėmo konstrukcinės struktūros kintamieji: stormenos ilgis, kuris priimamas 0,07L, 0,10L ir 0,15L nuo tarpatramio ilgio. Pastovūs rėmo dydžiai: kolonos aukštis, kuris lygus 6,0 m, sijų nuolydžio kampas, lygus 6° bei atstumas tarp rėmų, priimamas 6 metrams. Toliau išsamesnei analizei modeliuojami 25,0 m tarpatramio rėmo 15 bandinių plošteliniais elementais su skirtingu stormenos ilgiu (0,07L, 0,10L, 0,15L) bei skerspjūviu nuo IPE 400 iki IPE 600. Šio rėmo tyrimas atliekamas dar su papildomomis kolonos ir sijos su stormena jungties sąstandomis, siekiant maksimalius įtempius bei taip pat įvertinti sąstandų efektyvumą bei poveikį bendrai rėmo elgsenai (įlinkiui bei poslinkiui). Skaitinių bandymų tyrimas atliekamas pagal EN 1993:2005 normų pirmosios eilės analizę.

Rėmui buvo taikomos eksploatacinės sniego, vėjo ir stogo dangos su ilginiais apkrovos, sudarant jų pavojingiausius saugos ir tinkamumo ribinių būvių derinius. Modeliuojant portalinius rėmus, sijos ir kolonos elementams įvedamos atramos tose vietose, kur numatoma tvirtinti stogo bei fasado ilginius.

3.1.1 Rėmo modeliavimas strypiniais elementais

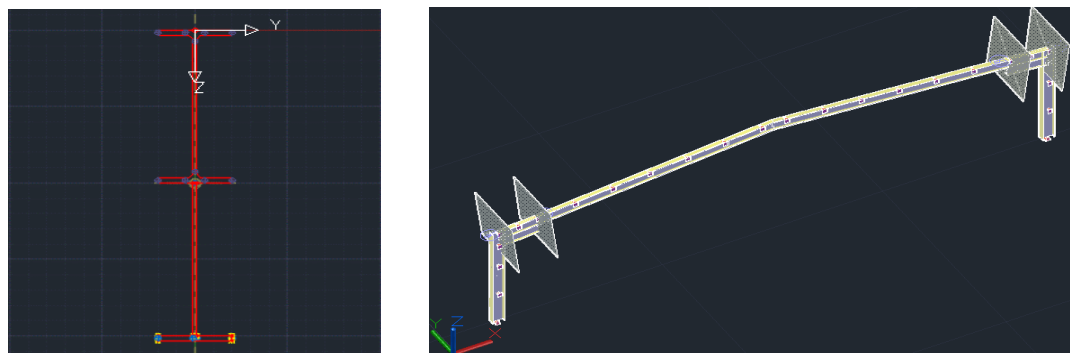
Modeliuojant portalinį rėmą strypiniais elementais, dažnai susiduriama su stormenos T formos kintamo skerspjūvio parinkimo problema. Naudojant paprastesnes standartines projektavimo programines įrangas, jose dažnai nėra galimybės priskirti tokios formos skerspjūvį elementui ar susikurti naują. Tokiu atveju, projektuojant stromeną naudojamas prismatinis sijos su stormena elemento suskirstymas kaip pavaizduota 3.1 paveiksle. Šio modeliavimo pagrindinis

principas yra priskirti skerspjūvius atskiriems jungties elementams, kurių ekvivalentinės charakteristinių dydžių reikšmės sutaptų su analizuojamos sijos su stormena reikšmėmis.



3.1 pav. Analizuojamas rėmo mazgas su stormena ir programinėje įrangoje suprojektuotas mazgas su ekvivalentinėmis skerspjūvio savybėmis (Modelling and...2017)

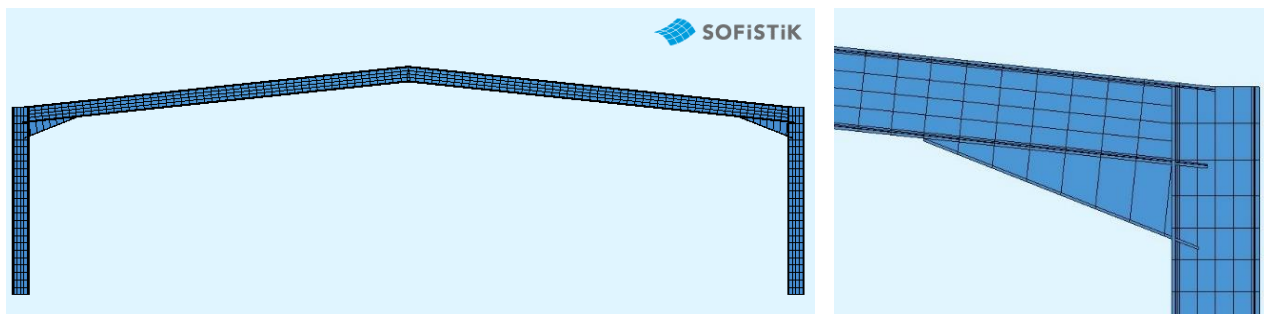
Rėmo T formos kintamas stormenos skerspjūvis modeliuojant strypiniais elementais SOFiPLUS programos CAD aplinkoje buvo sudaromas sukuriant bendrą sijos ir stormenos dalies skerspjūvį su „New solid section“ komanda. Sijos elementui parenkamas IPE skerspjūvis iš standartinio skerspjūvio gaminių asortimento, tuo tarpu stormenos T formos skerspjūvis iš numatomo IPE elemento gaminių sumodeliuojamas „Boundary“ komanda (3.2 a pav.). Sijos dalyje, kur bus prijungiama stormena, strypiniam elementui priskiriama ašis su „Axes“ komanda. Šioms ašims parenkamas stormenos aukščio kitimo parametras, kuriuo aprašomas stormenos aukščio kitimas ašies atžvilgiu.



3.2 pav. Portalinio rėmo modeliavimas strypiniais elementais: a) sijos ir stormenos skerspjūvio modeliavimas; b) bendras rėmo strypnis modelis

Sudarytas rėmo modelis eksportuojamas į SSD programos modulį, kuriame modelis jau suskaidomas į baigtinius elementus, atliekamas apkrovų derinių sudarymas, skaičiavimo metodo parinkimas, pataisos koeficientų įvedimas bei paleidžiamas skaičiavimo procesas. Rėmo strypinio modelio, kuris sudalintas į baigtinius elementus SSD modulyje, bei kolonos ir sijos su stormena mazgas pavaizduotas 3.3 paveiksle.

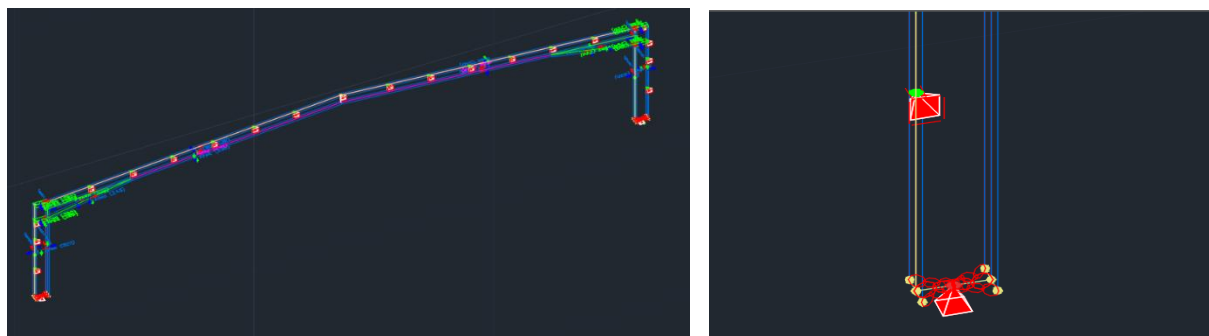
Strypinio modelio skaičavimo rezultatuose gaunami rėmo poslinkiai, įlinkiai, elementų skerspjūvių laikomoji ir klupumo galia bei įrašos, kurios panaudojamos analitiniuose skaičiavimuose.



3.3 pav. Rėmo strypinis modelis SOFiSTiK programos SSD modulyje

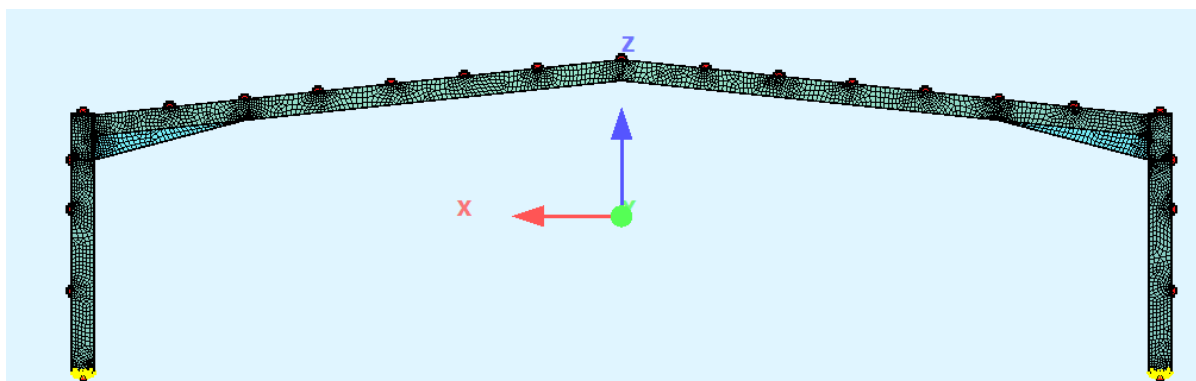
3.1.2 Rėmo modeliavimas plokšteliniais elementais

SOFiPLUS programos CAD modulyje buvo sumodeliuota 15 portalinių rėmų su skirtingo ilgio ir skerspjūvio stormenomis. Taip pat buvo sumodeliuoti rėmai su skirtingomis kolonos ir sijos su stormena jungties sąstandomis, siekiant ištirti jų efektyvumą jungties bendro rėmo darbo atžvilgiu. Visi konstrukcijos elementai plokšteliniais elementais modeliuojami „SHELL“ tipo, priskiriant atitinkamą storį. 3.4 paveiksle parodytas konstrukcijos fragmentas iš *SOFiPLUS* aplinkos, kuriame pavaizduotas kolonos bazės įtvirtinimas ir rėmo kraigo mazgas. Atramai suformuoti buvo įvedamos papildomos linijos, ties plokštelių elementų kraštais, kurioms priskiriamos įtvirtinimo sąlygos (standus elementas). Šios linijos sujungiamos su tašku, „Constraint“ ryšiais, o taškas atvaizduoja lanksčią atramą. Modeliuojant rėmus, sijos elemento viršutinė bei kolonos šoninė juosta suvaržoma įvedant atramas tose vietose, kur tvirtinami stogo ir fasado ilginiai.



3.4 pav. Rėmo modeliavimas plokšteliniais elementais CAD aplinkoje

Visos konstrukcijos plokšteliniai elementai suskaidomi į keturkampius baigtinius elementus, kurių dydis parenkamas lygus 10 centimetrų, tuo tarpu plokštelių sandūrų vietose sutankinamas iki 5 centimetrų (3.5 pav.).



3.5 pav. Rėmo plokštelinis modelis *SOFiSTiK* programos SSD modulyje

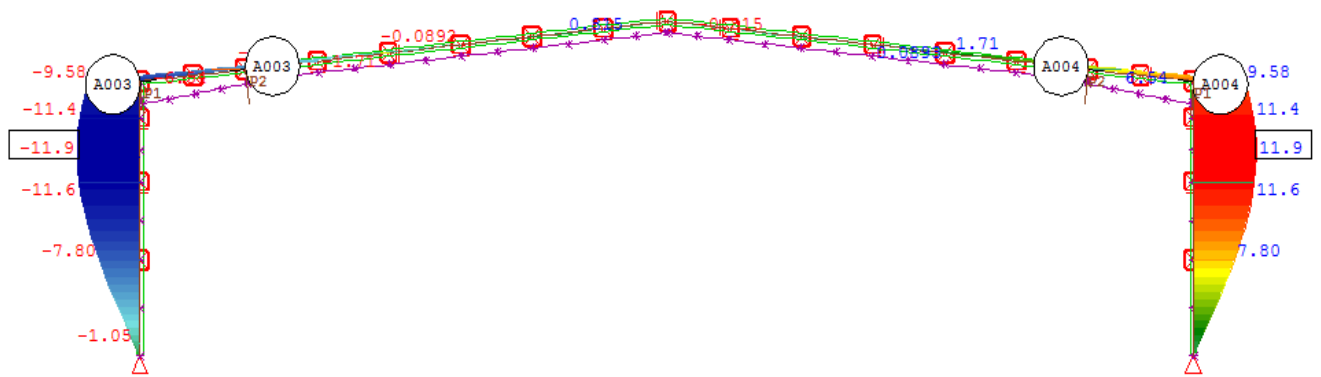
Plokšteliniais elementais modeliuoto rėmo skaičiavimo rezultatuose gaunami rėmo poslinkiai, įlinkiai bei detalus įtempių pasiskirstymas rėmo elementuose, kuris atvaizduoja realistinę elementų elgseną.

3.2 Skaitinio modelio skaičiavimo rezultatų analizė

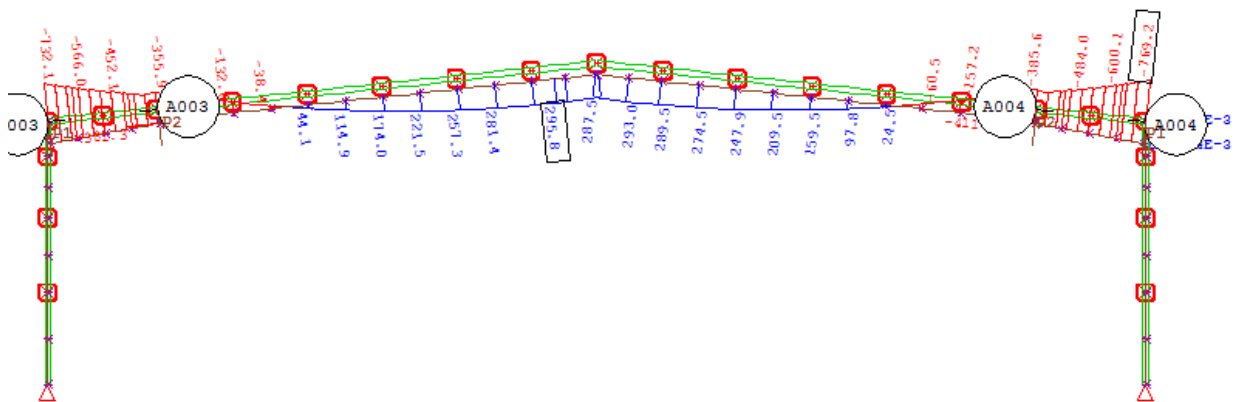
3.2.1 Skirtingo tarpatramio rėmų stormenos poveikio sąryšio analizė

Siekiant nustatyti stormenos poveikį esant skirtingo tarpatramio rėmams bei patikrinti šio sąryšio tiesiškumą, tiriami 25,0 m ir 30,0 m tarpatramio portaliniai rėmai. Abiem atvejams stormenos modeliuojamos 0,07L, 0,10L bei 0,15L ilgio. Mažesnio tarpatramio rėmo kolonomis parenkamas HEB 550 skerspjūvis, sijoms bei stormenoms – IPE 500, tuo tarpu 30,0 metrų tarpatramio rėmo kolonomis parenkamas skerspjūvis HEB 650, sijoms ir stormenoms – IPE 600. Abiem atvejams plieno stipris – S355.

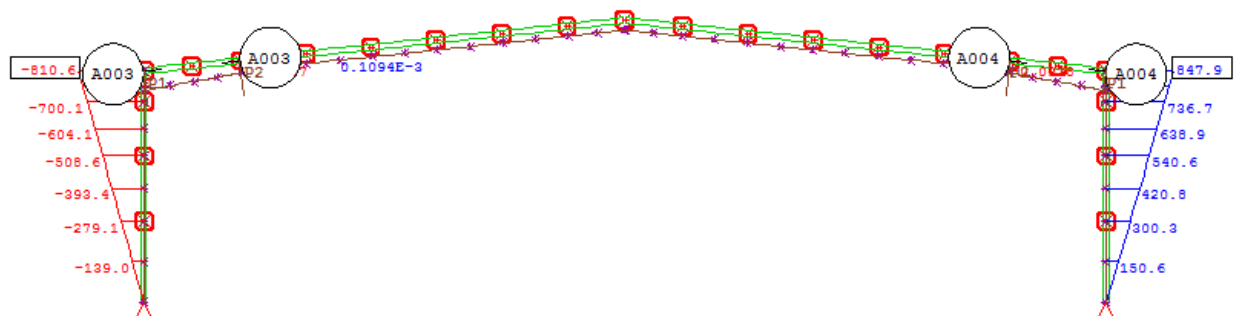
3.6 – 3.18 paveiksluose pavaizduoti *SOFiSTiK WinGraf* modulyje 25,0 m ir 30,0 m tarpatramio rėmų elementų skerspjūvio laikomosios galios, klupumo laikomosios galios nuo skersinio sukamojo klupumo, įlinkio bei poslinkio reikšmės bei 25,0m rėmo įrašų pasiskirstymas. Abiem skirtingų tarpatramių atvejais matoma, jog elementų laikomosios bei klupamosios galios išnaudojimas koeficientas siekia apie 0,5, tuo tarpu abiejų rėmo įlinkių reikšmės artimos ribinėms tinkamumo ribinio būvio reikšmėms. Todėl šių portalinių rėmų elementų skerspjūvių parinkimą nulemia ne skerspjūvių laikomoji ar klupamoji galia, tačiau rėmo įlinkis.



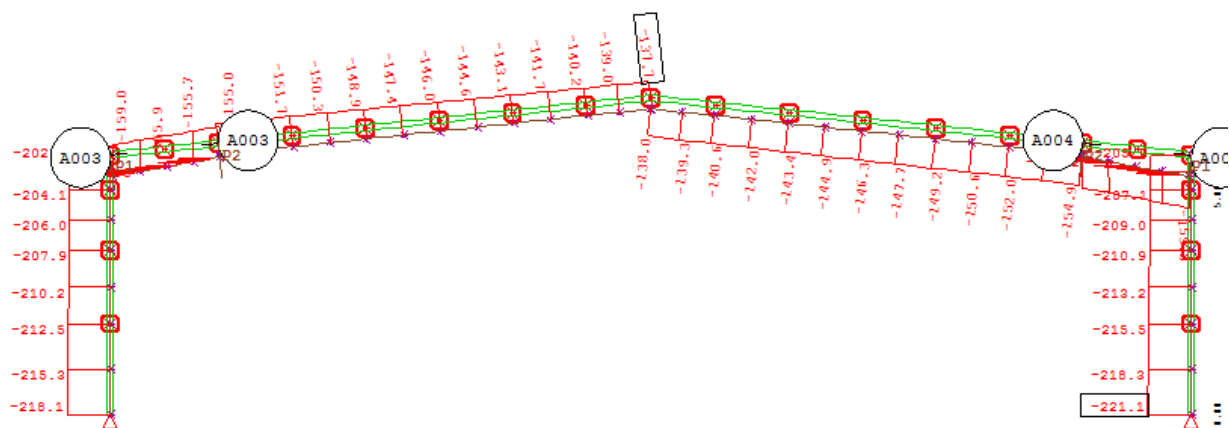
3.9 pav. 25,0 m rėmo su stormena 0,10L nuo tarpatramio ilgio rėmo poslinio reikšmės



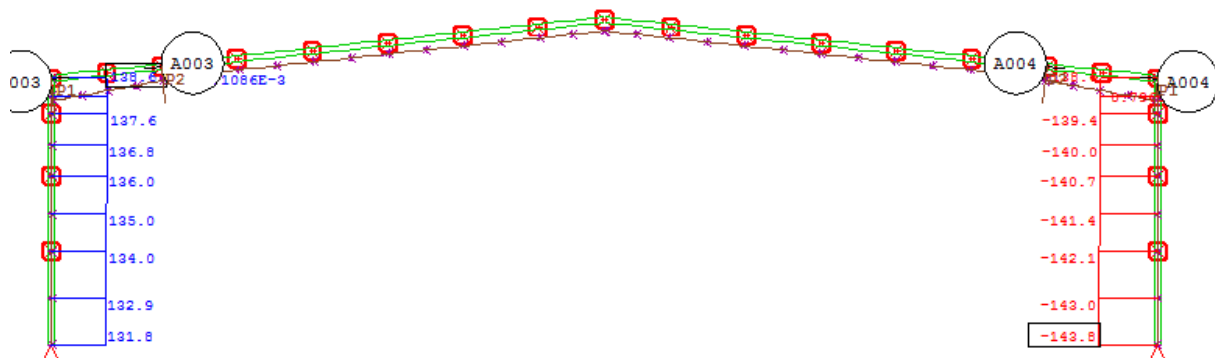
3.10 pav. 25,0 rėmo su stormena 0,10L ilgio stormena lenkimo momentų M_y diagrama



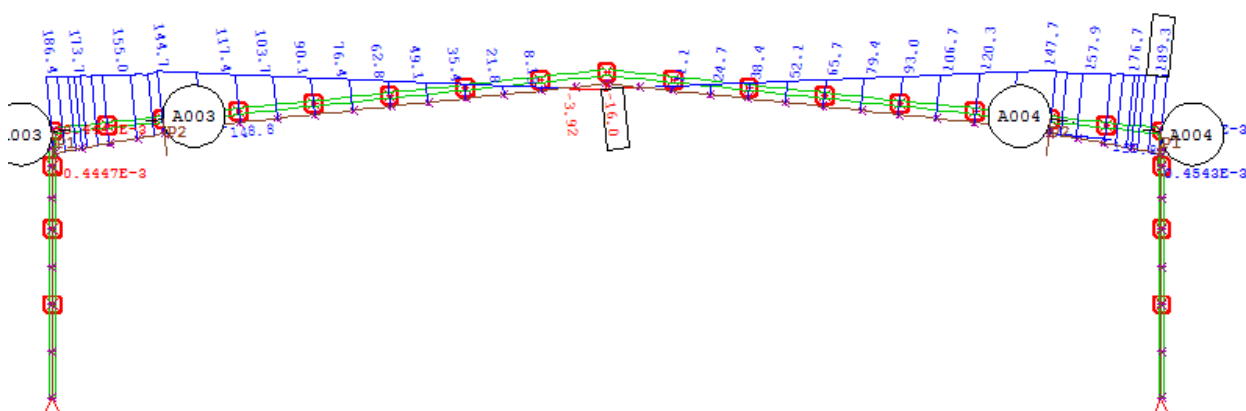
3.11 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena lenkimo momentų M_z diagrama



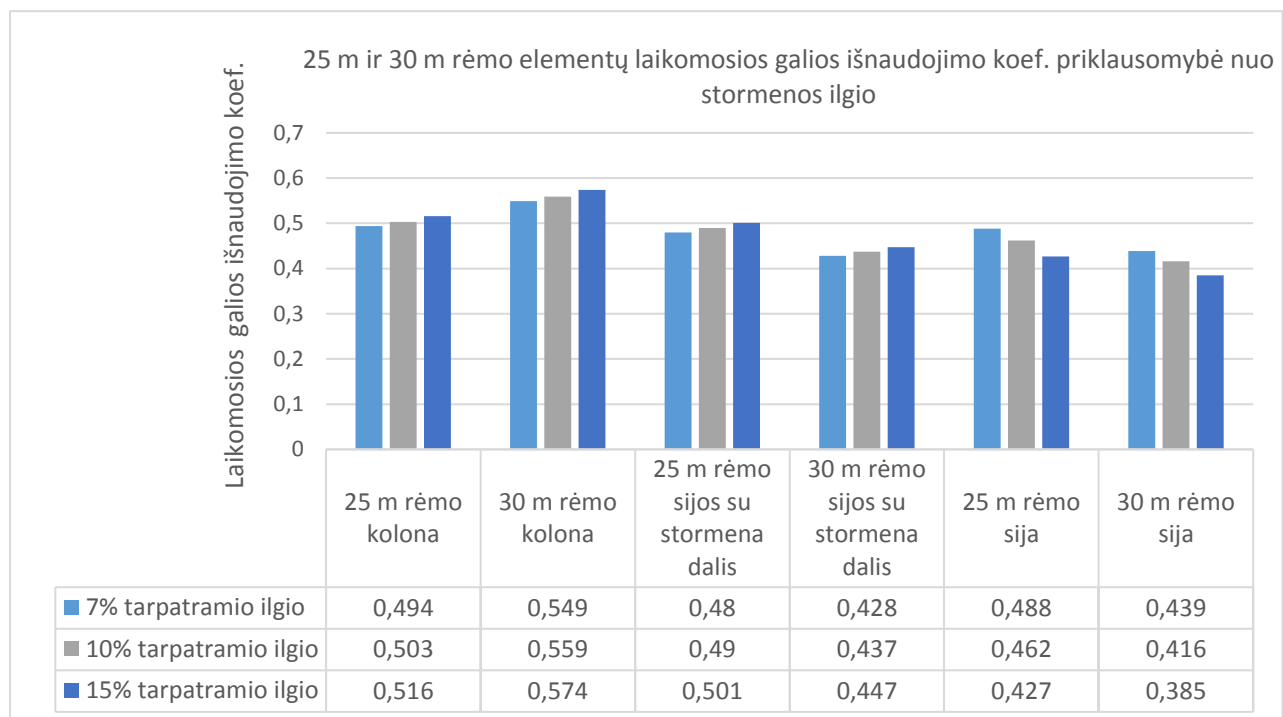
3.12 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena ašinių jėgų diagrama



3.13 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena skersinių V_y jėgų diagrama

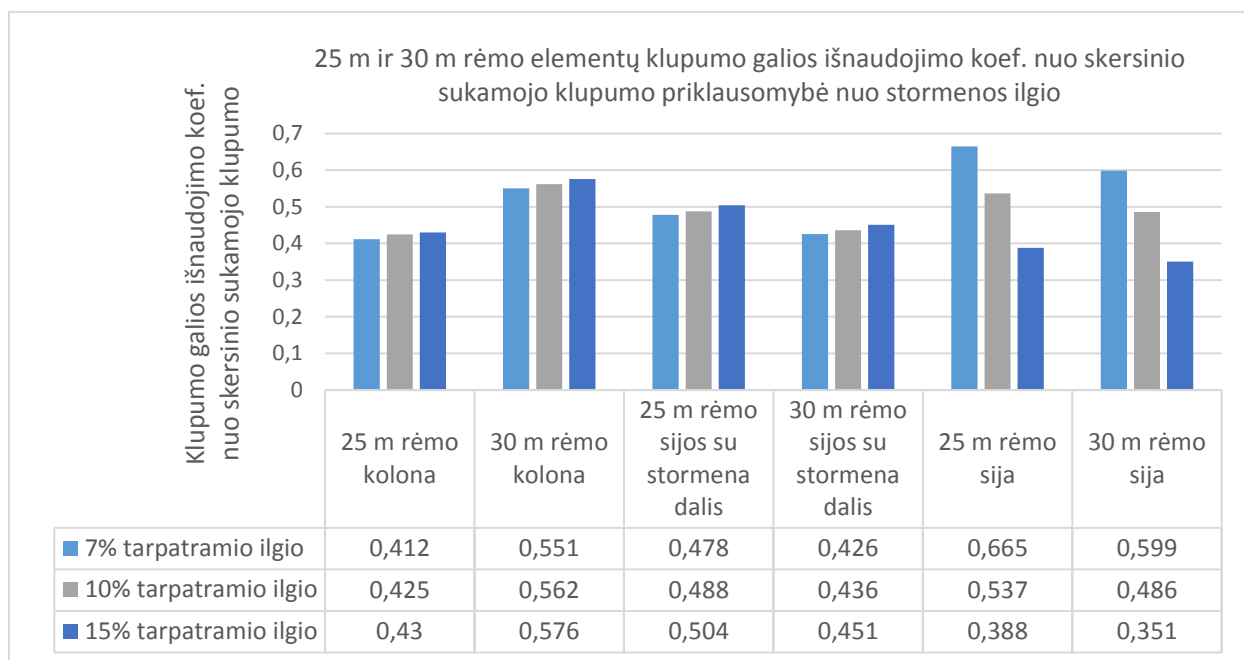


3.14 pav. 25,0 rėmo 0,10L ilgio stormena skersinių V_z jėgų diagrama



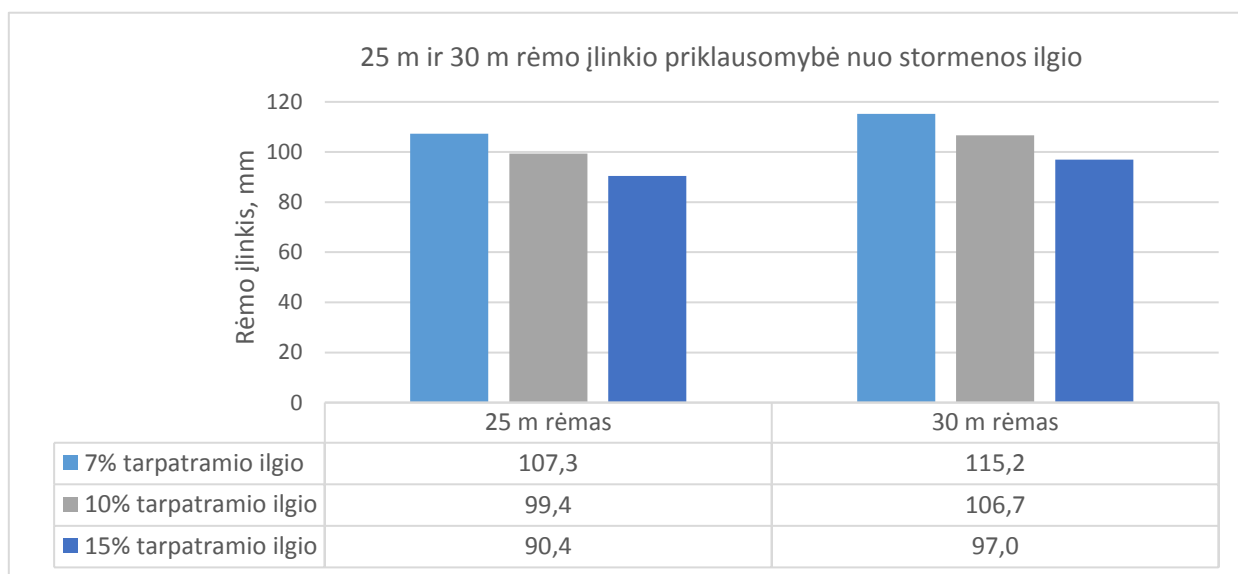
3.19 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo elementų laikomosios galios išnaudojimo koeficiento priklausomybė nuo sturmenos 0,07L, 0,10L ir 0,15L ilgio

Pagal laikomosios galios išnaudojimo koeficiento gautas reikšmes pastebima (3.19 pav), jog esant 0,07L sturmenos ilgiui 30,0 m rėmo kolonos išnaudojimas didesnis nei 25,0 m rėmo 11, 13 %, esant 0,1L nuo sturmenos ilgiui – 11,13 %, 0,15L ilgiui – 11,12 %. Lyginant sijos su stormena dalies išnaudojimą, 30,0 m tarpatramio rėmo esant 0,07L nuo tarpatramio ilgio sturmenai išnaudojimas sumažėja 12,15 %, esant 0,10L sturmenos ilgiui – 12,13 %, 0,15L sturmenos ilgiui – 12,08 %. Analogiškas laikomosios galios išnaudojimas gaunamas rėmo sijų: esant 0,07L nuo sturmenos ilgiui sijos išnaudojimas sumažėja 11,6 %, 0,10L sturmenos ilgiui – 11,05 % bei esant 0,15L sturmenos ilgiui – 10,9 %. Taigi, pastebimas vienodas elementų išnaudojimo kitimas tarp skirtingų rėmų esant skirtingam sturmenos ilgiui.

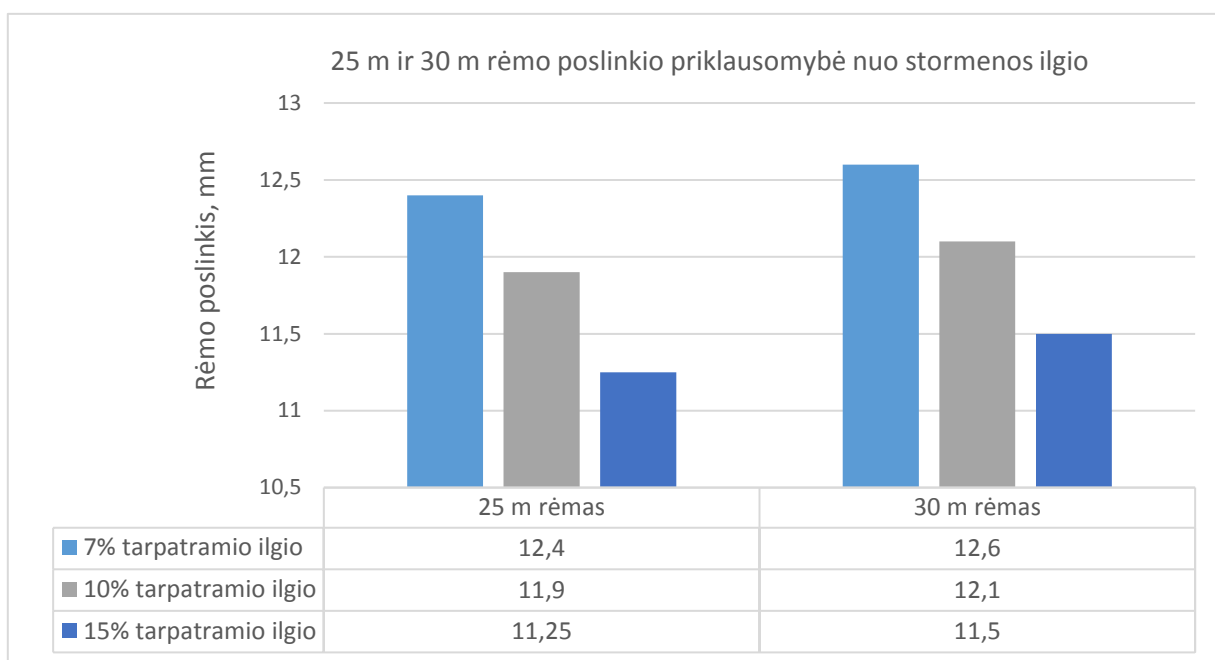


3.20 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo elementų klupumo galios išnaudojimo nuo skersinio sukamojo klupumo koeficiento priklausomybė, esant 0,07L, 0,10L ir 0,15L ilgio stormenoms

Analogiškas kitimas pastebimas tarp rėmo elementų klupumo galios išnaudojimo koeficiento nuo skersinio sukamojo klupumo (3.20 pav): esant 30,0 m rėmui kolonos išnaudojimas didesnis nei 25,0 m rėmo: kai stromenų ilgis 0,07L, 0,10L, 0,15L, kolonos išnaudojimas 33,73 %, 32,24 %, 33,95 %. 30,0 m tarpatramio rėmo sijos su stormena dalies išnaudojimas, kai stromenų ilgis 0,07L, 0,10L, 0,15L mažesnis 12,20 %, 11,93 %, 11,75 %.



3.21 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo įlinkio priklausomybė nuo stormenos ilgio



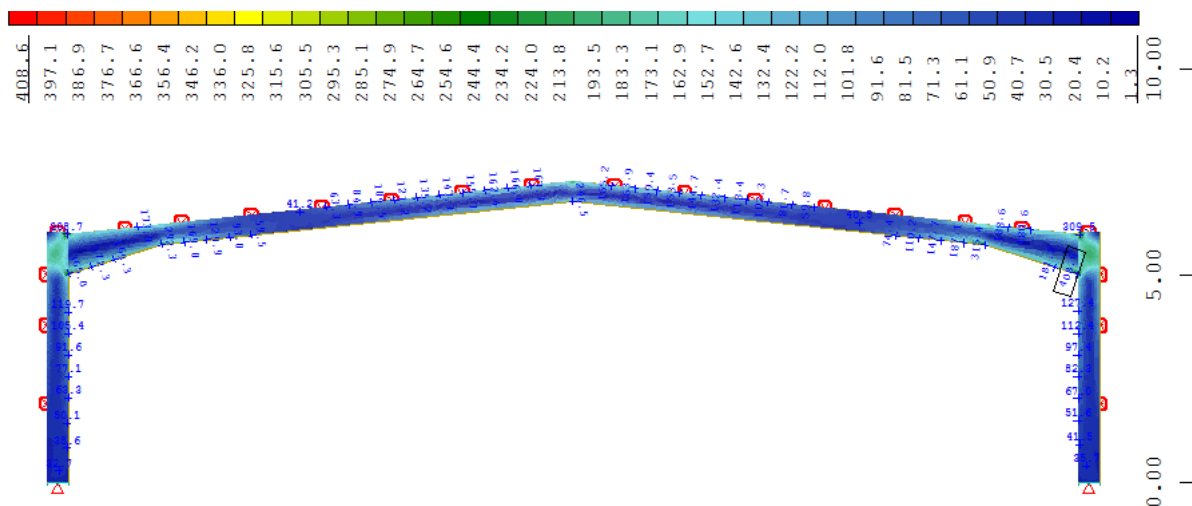
3.22 pav. 25,0 m ir 30,0 m rėmo poslinkio priklausomybė nuo stormenos ilgio, kai stormenos ilgis 0,07L, 0,10L ir 0,15L

Tarp 30 ir 25 metrų tarpatramio rėmų, esant 0,07L, 0,10L ir 0,15L stormenos ilgiams, atitinkamai įlinkis (3.21 pav.) kinta 7,36 %, 7,34 % bei 7,30 % dydžiu, poslinkis (3.22 pav.) – 1,6 %, 1,68 % ir 2,22%.

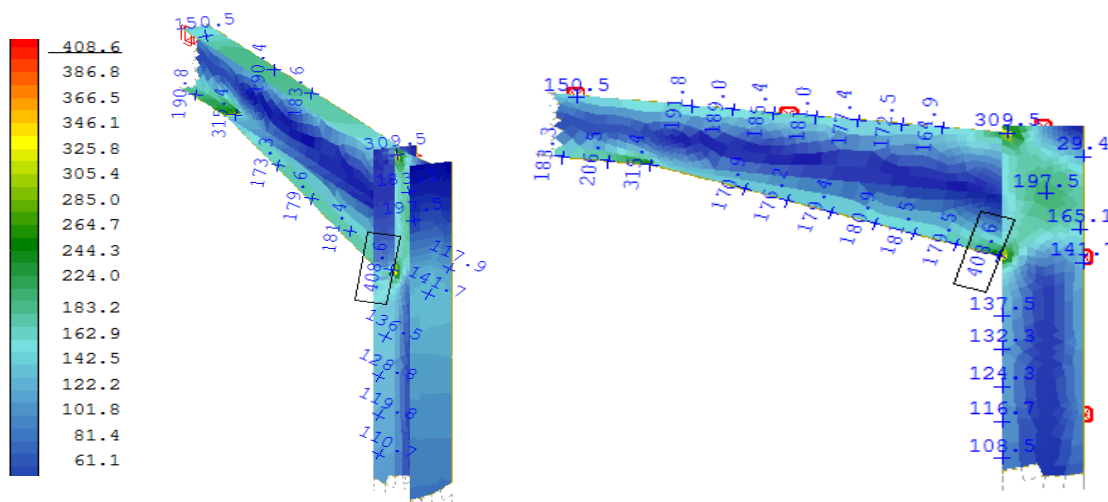
Visais atvejais, lyginant laikomosios ir klupamosios galios, įlinkio ir poslinkio reikšmės tarp stormenos ilgių 0,7L, 0,01L bei 0,15L, kinta tolygiai. Todėl tolimesnei analizei atlikti pasirenkamas 25 m tarpatramio rėmas su kintančiu stormenos ilgiu ir skerspjūviu.

3.2.2 Portalinio rėmo analizė su kolonos ir sijos su stormena jungties sąstandomis

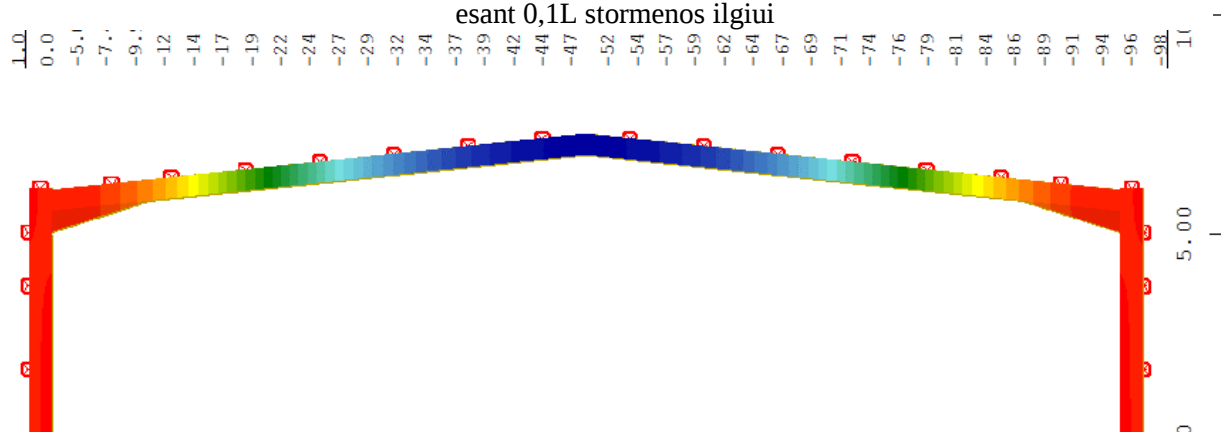
Kadangi ankstesne skirtingų tarpatramių rėmų analize buvo patikslintas spėjimas, jog stormenos poveikis rėmo bendrai elgsenai analogiškas skirtingų tarpatramių rėmams, todėl tolimesnei stormenos poveikio rėmo elgsenos analizei nustatyti pasirenkamas 25,0 m tarpatramio rėmas. Šios analizės metu plokšteliniais elementais *SOFiPLUS* aplinkoje modeliuojamas rėmas su HEB 550 skerspjūviu kolonomis bei IPE 500 skerspjūviu sijomis ir stormenomis. Stormenos ilgis parenkamas 7 %, 10 % bei 15 % rėmo tarpatramio ilgio. Tiriamo rėmo von Mises įtempių pasiskirstymas, įlinkio bei poslinkio reikšmės pavaizduotos 3.23-3.28 paveiksluose.



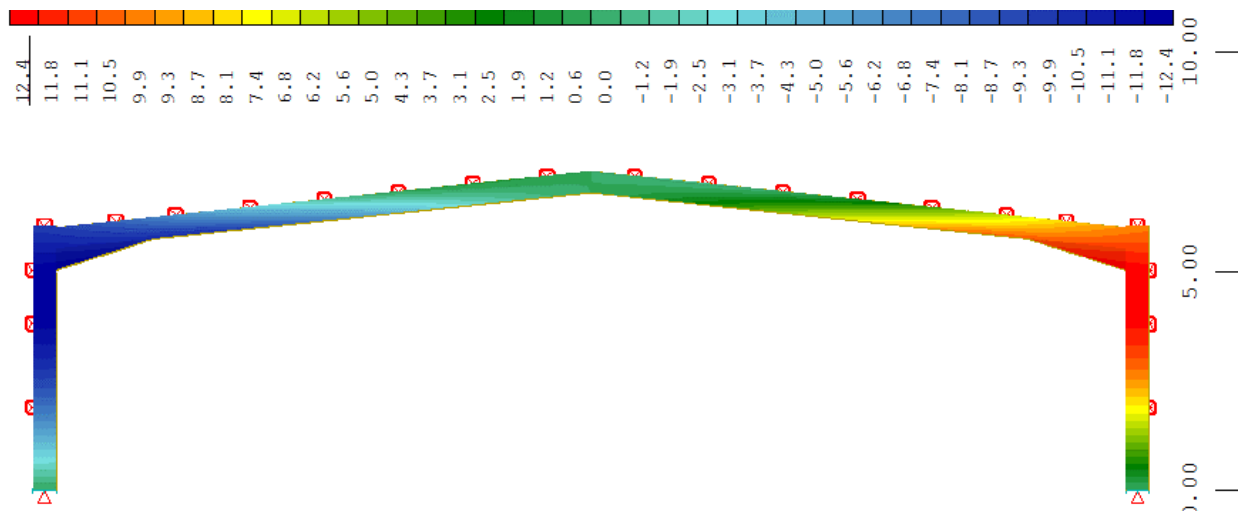
3.25 pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymas rėme su 0,1L ilgio stormena



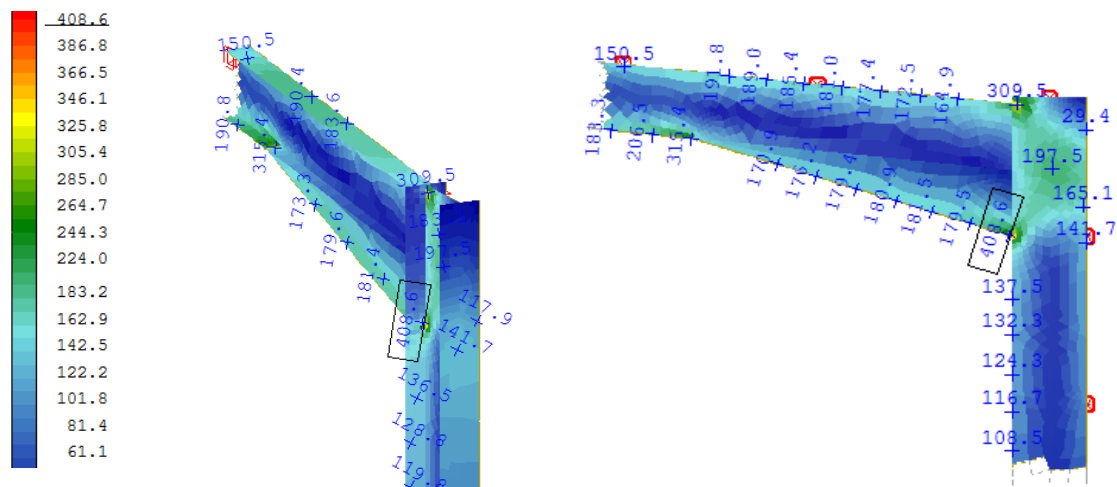
3.24 pav. Maksimalių von Mizes įtempių pasiskirstymas ties kolonos ir sijos su stormena jungtimi, esant 0,1L stormenos ilgiui



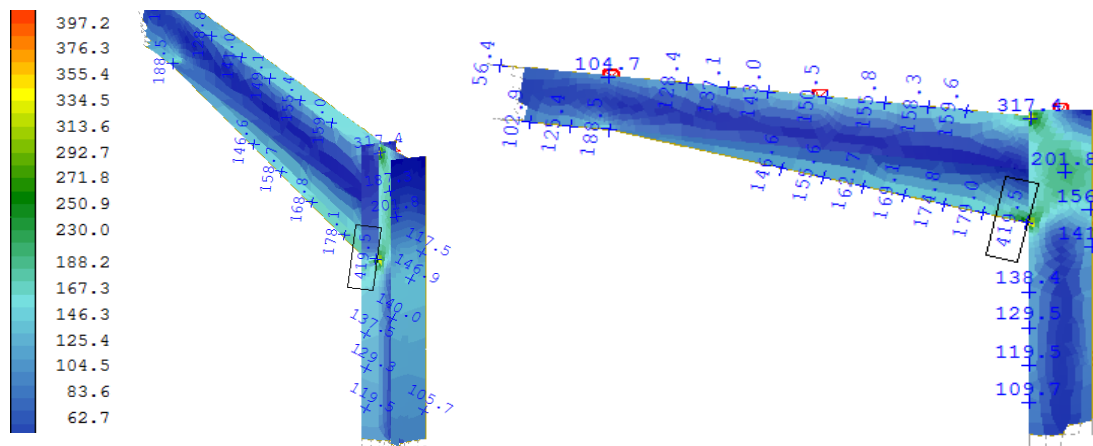
3.23 pav. Rėmo įlinkių reikšmės su 0,10 L ilgio stormenomis



3.26 pav. Rėmo poslinkio reikšmės su 0,10 L ilgio stormenomis

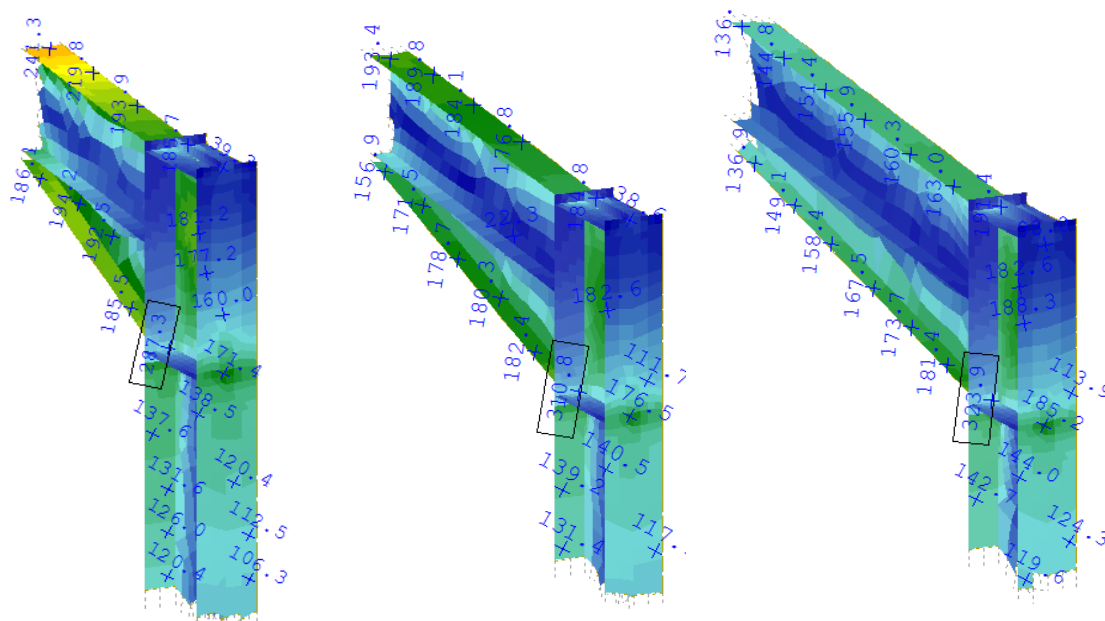


3.28 pav. Maksimalių von Mizes įtempių pasiskirstymas rėme ties kolonos ir sijos su stormena jungtimi, esant 0,07 L stormenos ilgiui



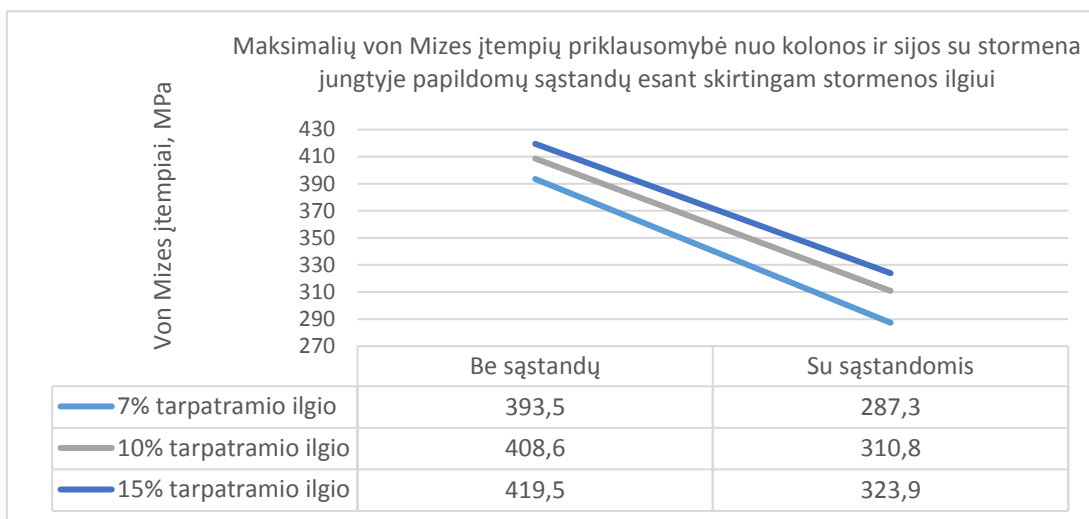
3.27 pav. Maksimalių von Mizes įtempių pasiskirstymas ties kolonos ir sijos su stormena jungtimi, esant 0,15L stormenos ilgiui

Pagal von Mizes įtempių pasiskirstymą 3.24, 3.27 bei 3.28 paveiksluose pastebima, jog maksimalių įtempių koncentracija susitelkia kolonos ir sijos su stormena jungtyje, kur kolonos sienelės plokštelė veikiama skersinio tempimo ties viršutine sijos juosta bei skersinio gniuždymo ties stormenos juosta. Šių įtempių reikšmės viršija rėmo plieno stiprio reikšmę 355 MPa: esant 0,07L ilgio stormenai, skersinio gniuždymo sukeltų įtempių reikšmė 393,5 MPa didesnė 10,8 % už plieno stiprį, esant 0,10L ilgio stormenai – 15,1 % plieno stiprį, kai stormena 0,15L ilgio – 18,1 %. Pagal šias įtempių reikšmes matoma, jog ilgėjant stormenai, maksimalių įtempių reikšmės taip pat analogiškai didėja. Todėl, siekiant panaikinti šiuos viršijančius plieno stiprį vietinius jungties įtempius, tarp kolonos juostų ties skersinio tempimo ir skersinio gniuždymo veikiamomis vietomis prijungiamos sąstandos ir atliekama rėmo analizė (3.29 pav.).



3.29 pav. Von Mizes įtempių reikšmės kolonos ir sijos su stormena jungtyje, kai naudojamos sąstandos tarp kolonos juostų, esant 0,07L, 0,1L bei 0,15L ilgio stormenoms

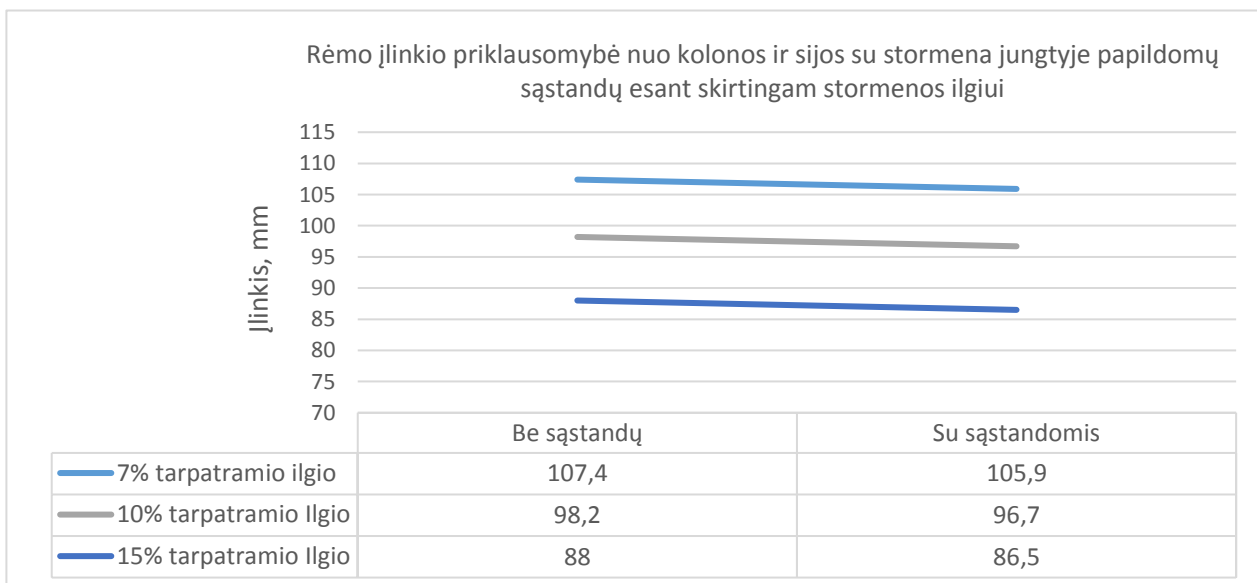
Siekiant nustatyti papildomų mazgo sąstandų efektyvumą, žemiau esančioje diagramoje 3.30 pav. palyginamos maksimalios mazgo įtempių reikšmės su sąstandomis ir be jų. Taip pat, siekiant įvertinti mazgo sąstandų poveikį ne tik elementų jungčiai, bet ir bendrai rėmo elgsenai, atliekamas palyginimas tarp rėmo įlinkio ir poslinkio reikšmių su sąstandomis ir be jų (3.31 pav., 3.32 pav.).



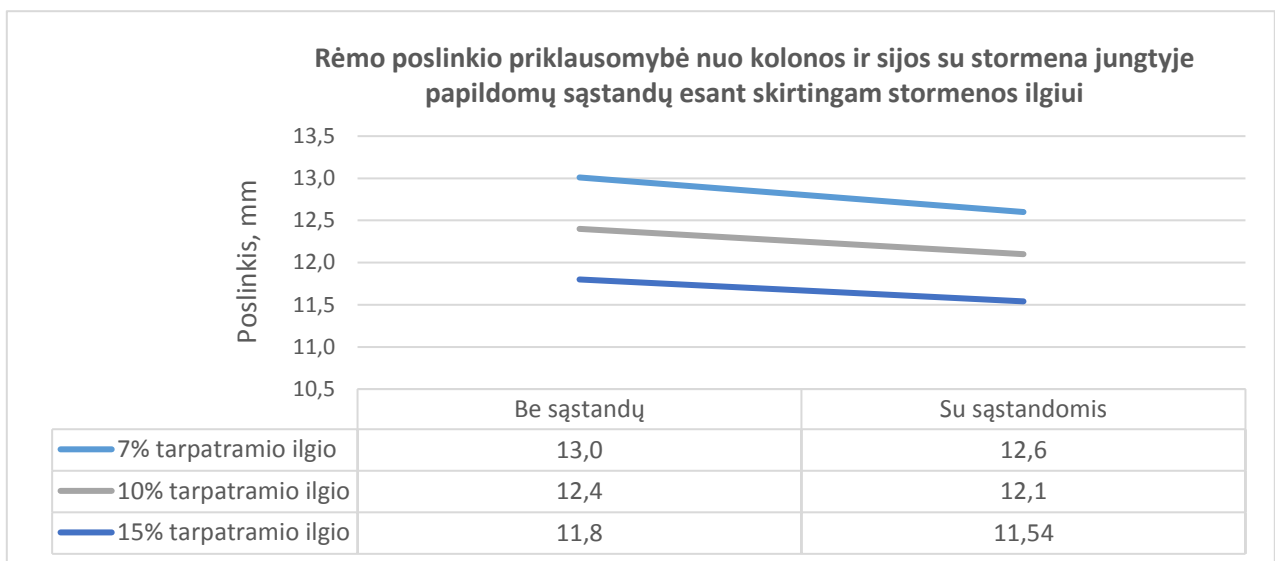
3.30 pav. Von Mises maksimalių įtempių reikšmių priklausomybė nuo kolonos ir sijos su stormena mazgo sąstandų

Atlikus rėmo skaitinių modelių skaičiavimus be sąstandų ir su jomis, maksimali von Mises įtempių reikšmė esant 7 % tarpatramio ilgio stormenai su sąstandomis jungtyje sumažėja nuo pradinės reikšmės be sąstandų 37,0 %, esant 10 % tarpatramio ilgio stormenai – 31,5 %, 15 % tarpatramio ilgio stormenai – 29,5 %. Esant mažiausiam 7 % tarpatramio stormenos ilgiui, sąstandų efektyvumas sumažinant maksimalius įtensionus didesnis 5,5 % lyginant su 10 % ilgio stormena, tuo tarpu pokytis tarp 10 % ir 15 % ilgio stormenų mažesnis ir lygus 2,0 %.

Taigi matomas ženklus sąstandų panaudojimo efektyvumas elementų jungtyje, dėl kurių maksimalios įtempių reikšmės ties jungtimi sumažėja ir neviršija 355 MPa plieno stiprio ribos.



3.31 pav. Rėmo įlinkio reikšmių priklausomybė nuo kolonos ir sijos su stormena mazgo sąstandų



3.32 pav. Rėmo poslinkio reikšmių priklausomybė nuo kolonos ir sijos su stormena mazgo sąstandų

Esant visiems stormenos ilgio atvejams, įlinkis sumažėja 1,55 %. Matoma, jog sąstandų poveikis nepriklauso nuo stormenos ilgio, pokytis kinta tiesiškai ir neturi žymaus poveikio bendram rėmo įlinkiui.

Vertinant sąstandų poveikį rėmo poslinkiui, pastebima, jog esant trumpiausiai 0,07L stormenai, sąstandų poveikis didžiausias ir poslinkį sumažina 3,17 %. Didėjant stormenos ilgiui, sąstandų poveikis mažėja: esant 0,1L stormenai poslinkis sumažėja 2,5 %, 0,15L ilgio – 2,25 %.

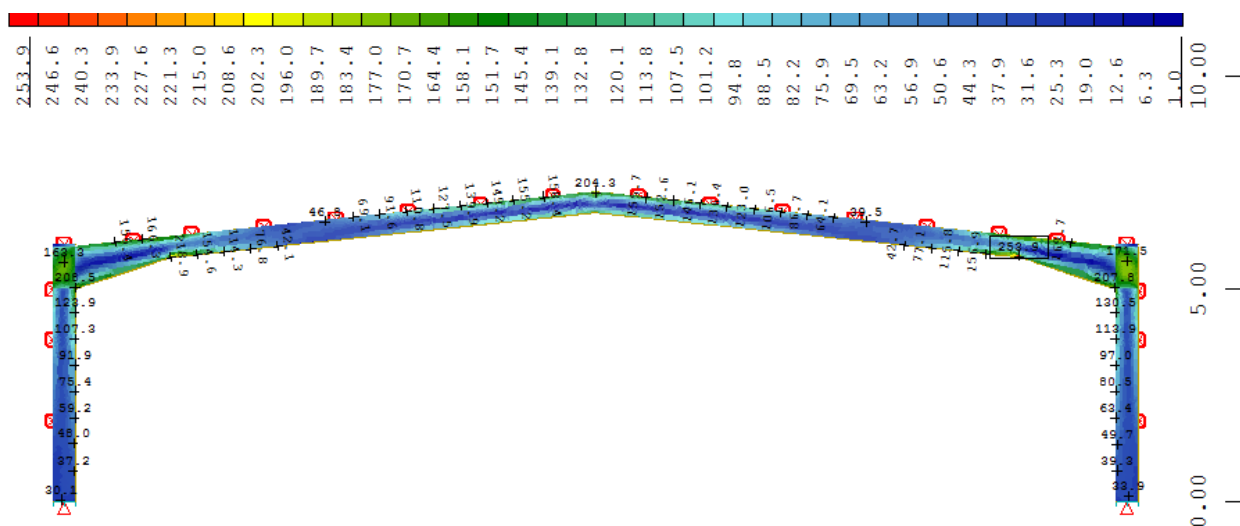
Dėl sąstandų efektyvumo panaikinant vietinius elementų jungties įtempius iki plieno stiprio reikšmės 355 MPa ties mazgu (maksimali reikšmė esant 0,15L ilgio stormenai yra 323, 9 MPa) bei nustačius jų tolygų poveikį stormenos ilgio atžvilgiu, tolesnė rėmų analizė bus atliekama įvedus sąstandas.

3.2.3 Portalinio rėmo stormenos poveikio analizė nuo

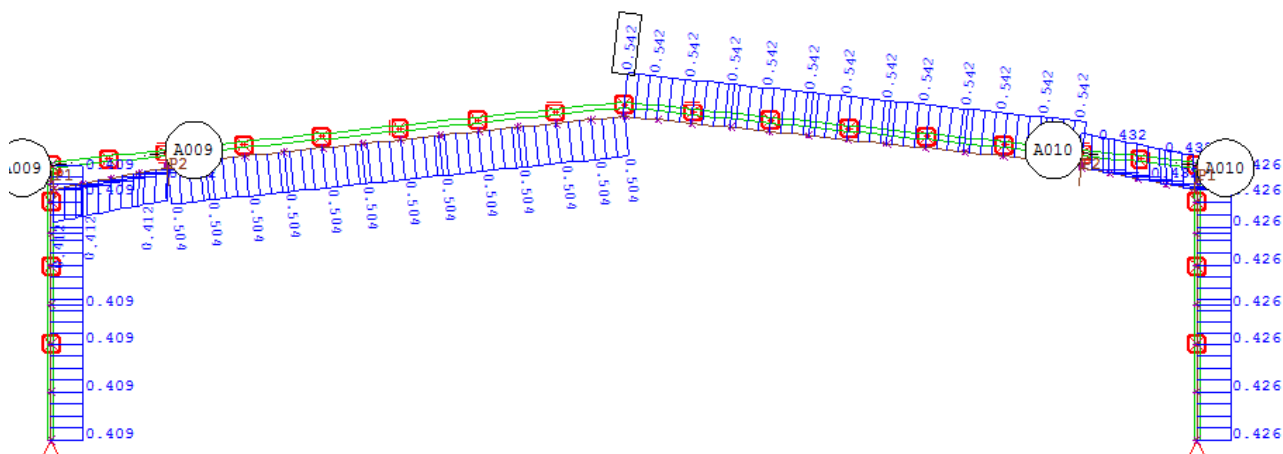
Siekiant įvertinti stormenos aukščio bei ilgio poveikį bendrai rėmo elgsenai ir nustant optimaliausias stormenos geometrijos sąlygas, plokšteliniais elementais nagrinėjami 15 rėmų su skirtingu stormenos ilgiu (7 %, 10 % bei 15 % tarpatramio ilgio) bei skerspjūviu (IPE 400, IPE 450, IPE 500, IPE 550, IPE 600), kas būtent leidžia įvertinti stormenos aukščio poveikį. Stormenos poveikis bendrai rėmo elgsenai vertinamas per von Mizes įtempių reikšmės rėmo kraigo, ties stormenos pabaiga bei ties jos apačia, taip pat per rėmo įlinkius bei poslinkius. Siekiant nustatyti

stормenos geometrijos poveikį nuo skersinio sukamojo klupumo poveikio, rėmai dar buvo sumodeliuoti strypiniais elementais.

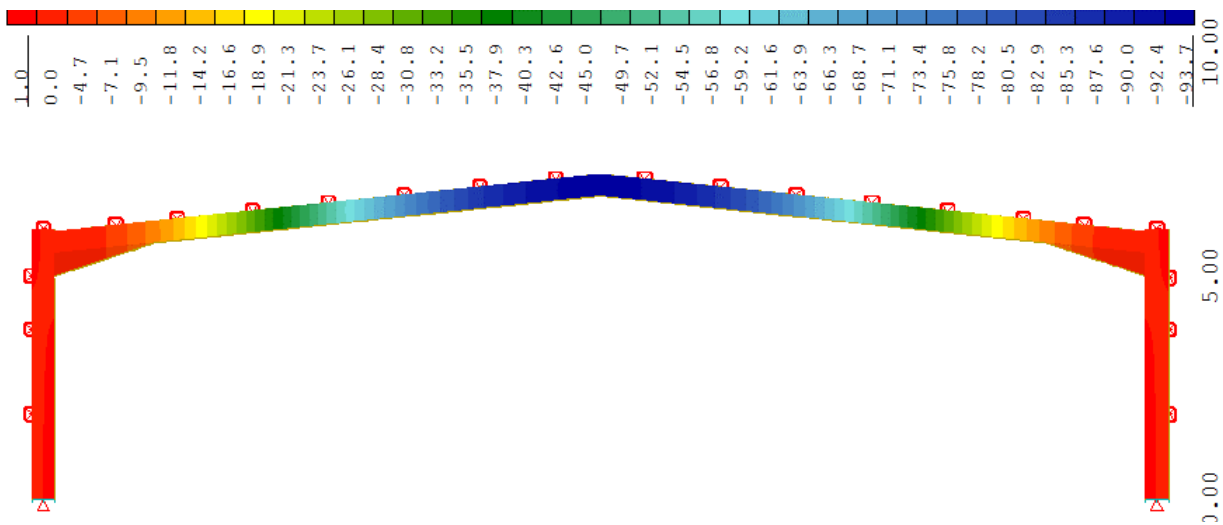
3.33 – 3.36 paveiksluose pavaizduoti *SOFiSTiK WinGraf* modulyje 25,0 m tarpatramio rėmo su 0,1L ilgio IPE 500 skerspjuvio stormena von Mises įtempių pasiskirstymas, klupumo laikomosios galios nuo skersinio sukamojo klupumo, įlinkio bei poslinkio reikšmės. Šių reikšmių priklausomybė nuo stormenos ilgio ir skerspjuvio pateikiama 3.37 - 3.44 diagramose. Rezultatų palyginimas pateikiamas 3.1 – 3.16 lentelėse.



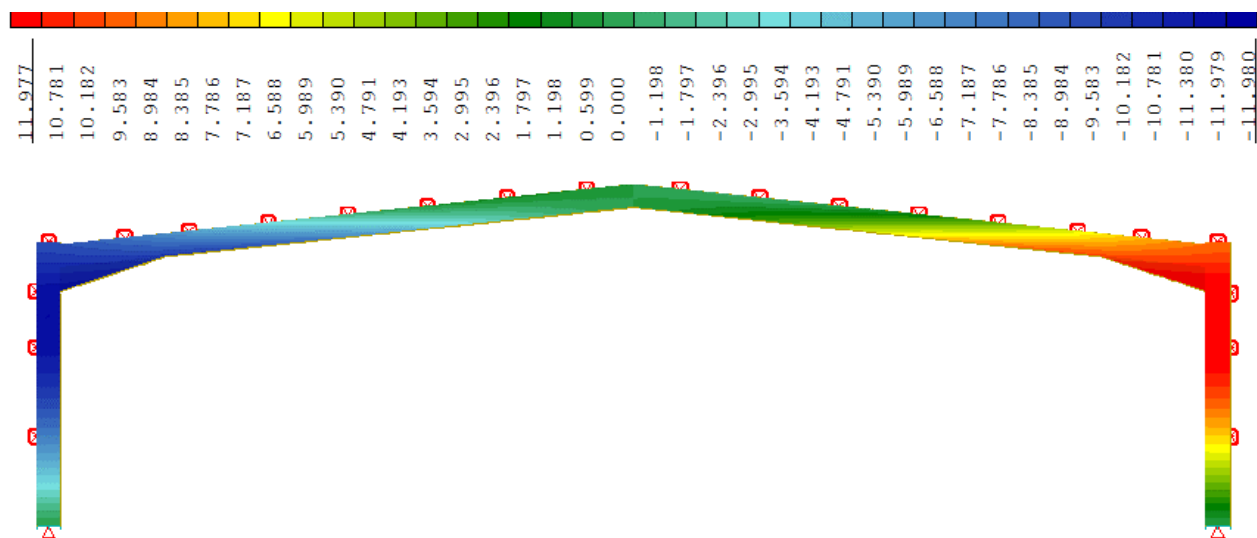
3.33 pav. Rėmo von Mises įtempių pasiskirstymas su IPE 550 skerspjuvio 0,10 L ilgio stormenomis



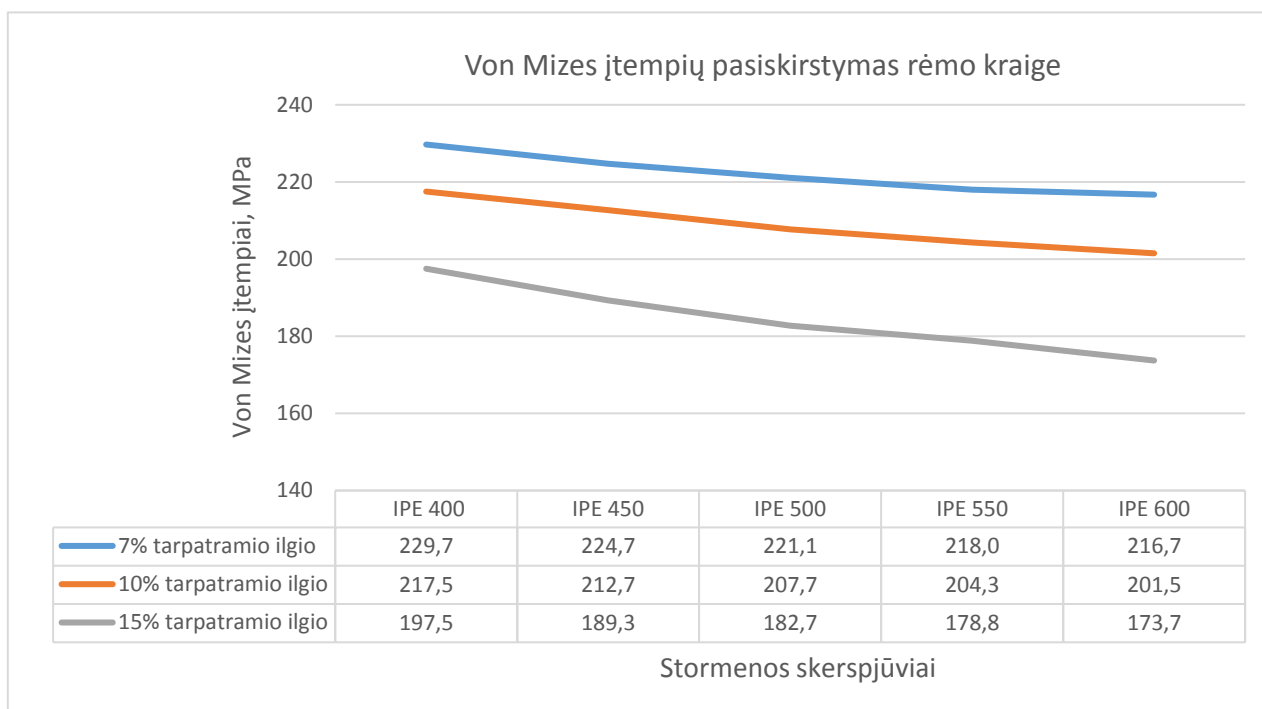
3.34 pav. Rėmo elementų klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo, kai stormenos IPE 550 skerspjuvio 0,10 L ilgio



3.35 pav. Rėmo įlinkio su IPE 550 skerspjūvio 0,10 L ilgio stormena reikšmės



3.36 pav. Rėmo poslinkio su IPE 550 skerspjūvio 0,10 L ilgio stormena reikšmės



3.37 pav. Von Mizes įtempių rėmo kraige pasiskirstymo priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio

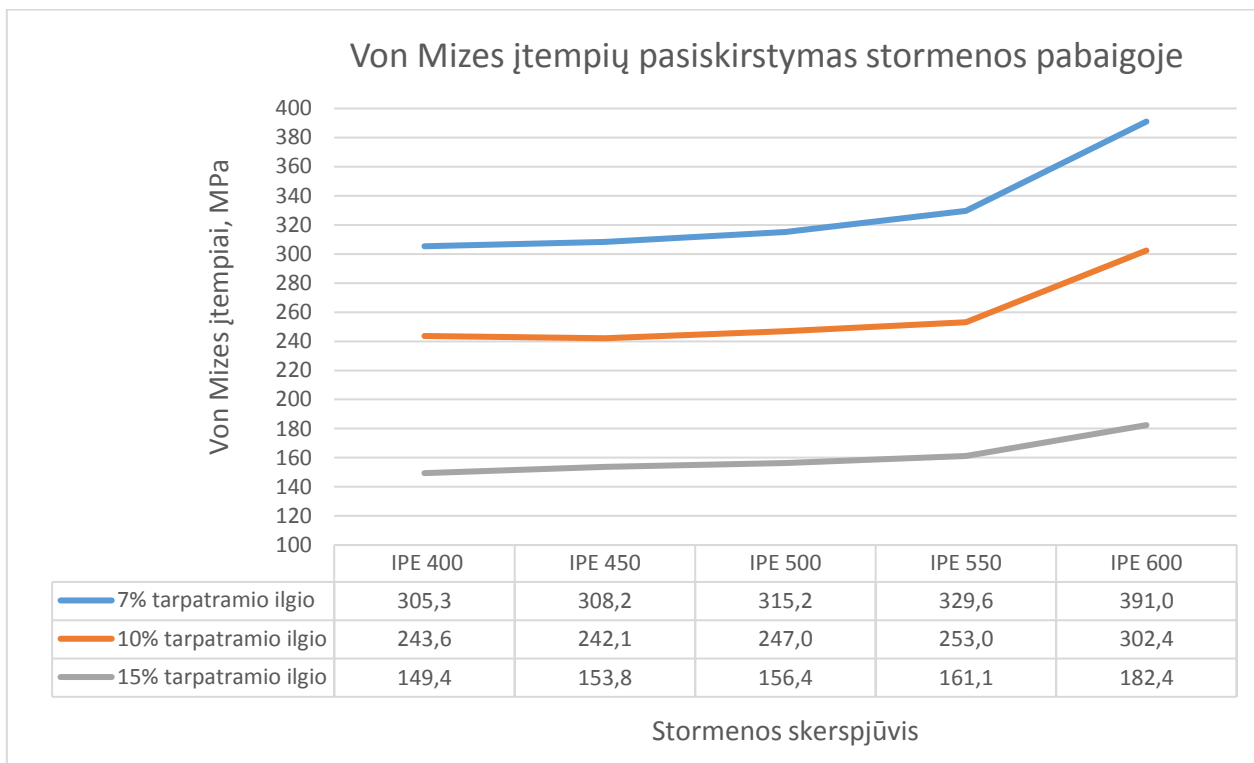
3.1 lentelė. Von Mizes įtempių kraige kitimas nuo stormenos ilgio 0,07 L, 0,10 L ir 0,15 L stormenos

Von Mizes įtempiai kraige	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 7% ir 10 % ilgio stormenos	5,31 %	5,34 %	6,06 %	6,28 %	7,01 %
Pokytis tarp 10 % ir 15 % ilgio stormenos	9,20 %	11,00 %	12,04 %	12,48 %	13,80 %

3.2 lentelė. Von Mizes įtempių kraige kitimas tarp stormenos skerspjūvių IPE 400 – IPE 600

Von Mizes įtempiai kraige	7% tarpatramio ilgio	10% tarpatramio Ilgio	15% tarpatramio Ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	2,18 %	2,21 %	4,15 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	1,60 %	2,35 %	3,49 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	1,40 %	1,64 %	2,13 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	0,60 %	1,37 %	2,85 %

Pagal gautus von Mizes įtempių rėmo kraige pasiskirstymo rezultatus esant 0,07L, 0,10L bei 0,15L stornenos ilgiui, pastebima, jog didinant stornenos ilgį bei aukštį įtempiai mažėja – mažėjimas vyksta abejomis kryptimis. Norint sumažinti įtempius rėmo kraige, daug efektyviau padidinti stornenos ilgį nei jos aukštį, kadangi didinant ilgį įtempiai mažėja nuo 6,0 – 12,0 %, o didinant stornenos aukštį apie 2,0 %.



3.38 pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymo stornenos pabaigoje priklausomybė nuo stornenos skerspjūvio ir ilgio

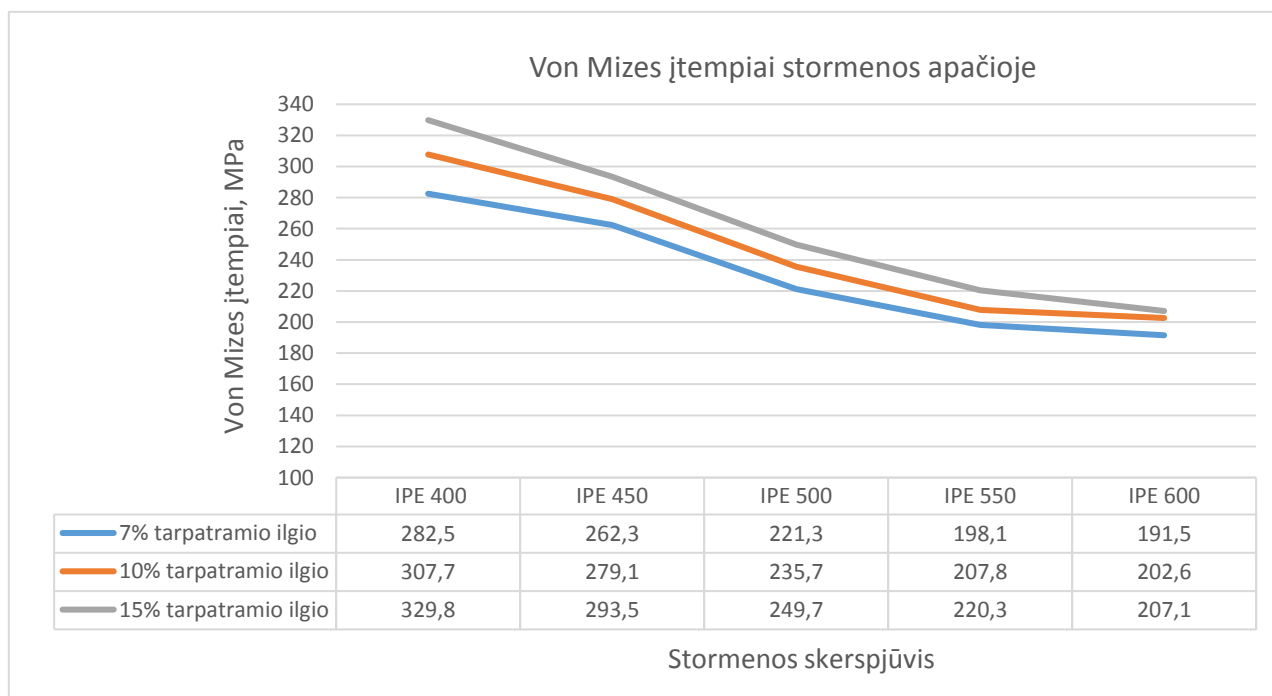
3.3 lentelė. Von Mizes įtempių stornenos pabaigoje kitimas tarp 0,7 L, 0,10 L ir 0,15 L stornenos ilgio

Von Mizes įtempiai stornenos pabaigoje	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 7% ir 10 % ilgio stornenos	20,21 %	21,45 %	21,64 %	23,24 %	22,66 %
Pokytis tarp 10 % ir 15 % ilgio stornenos	36,47 %	36,47 %	36,68 %	36,32 %	39,68 %

3.4 lentelė. Von Mizes įtempių kitimas stormenos pabaigoje tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų

Von Mizes įtempiai stormenos pabaigoje	7% tarpatramio ilgio	10% tarpatramio ilgio	15% tarpatramio ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	- 0,94 %	-0,62 %	-2,86 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	-2,22 %	-1,98 %	-1,66 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	-4,37 %	-2,37 %	-2,92 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	-15,70 %	-16,34 %	-11,68 %

Didinant stormenos ilgį nuo 0,07L iki 0,10L nuo tarpatramio ilgio įtempiai ties stormenos pabaiga sumažėja apie 20,0 %, didinant nuo 0,10L iki 0,15L stormenos ilgį – sumažėja 36 %. O didinant stormenos aukštį parenkant skerspjūvius nuo IPE 400 iki IPE 600, įtempiai padidėja 9 – 15 % (įtempių didėjimas žymimas su minuso ženklu kaip neigiamas poveikis). Norint sumažinti įtempius stormenos pabaigoje, reikia didinti stormenos ilgį.



3.39 pav. Von Mizes įtempių stormenos apačioje pasiskirstymo priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio

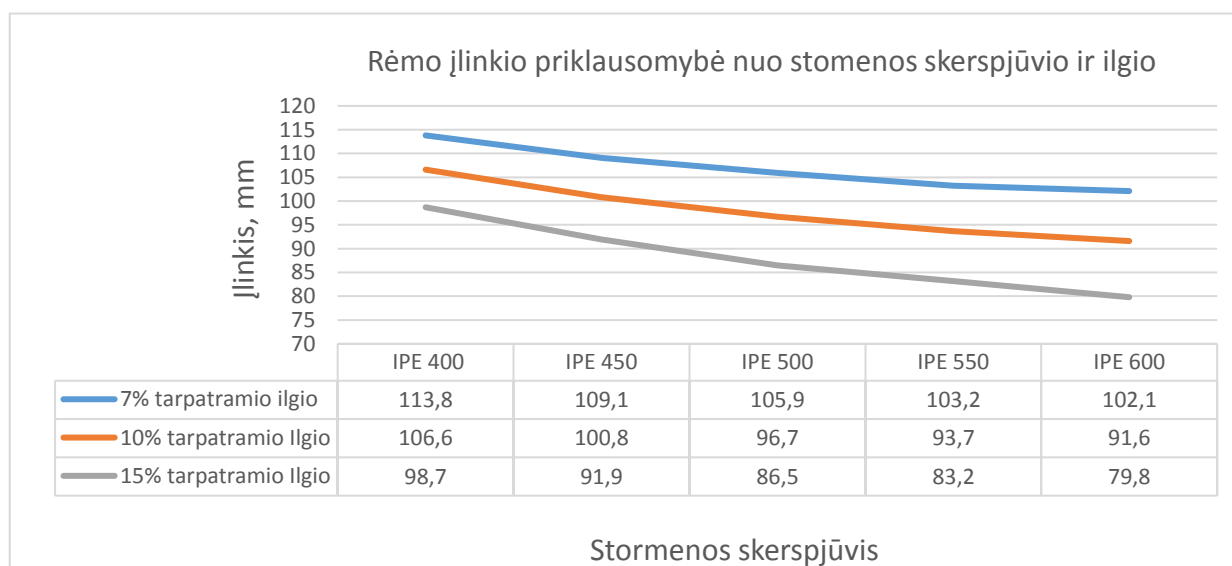
3.5 lentelė. Von Mizes įtempių stormenos apačioje kitimas tarp 0,7 L, 0,10 L ir 0,15 L stormenos ilgio

Von Mizes įtempiai stormenos apačioje	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 7% ir 10 % ilgio stormenos	8,19 %	6,02 %	6,11 %	4,67 %	5,48 %
Pokytis tarp 10 % ir 15 % ilgio stormenos	6,70 %	4,91 %	5,61 %	5,67 %	2,17 %

3.6 lentelė. Von Mizes įtempių kitimas stormenos apačioje tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų

Von Mizes įtempiai stormenos apačioje	0,07L stormenos ilgio	0,10L stormenos ilgio	0,15L tarpatramio Ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	7,15 %	9,29 %	11,01 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	15,63 %	15,55 %	14,92 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	10,48 %	11,84 %	11,77 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	3,33 %	2,50 %	5,99 %

Pagal įtempių pasiskirstymą ties stormenos apačia pastebima, jog didinant stormenos ilgį nuo 7 % iki 10 % tarpatramio ilgio įtempiai sumažėja apie 6 %, nuo 10 % iki 15 % sumažėja apie 5 %. Didinant stormenos aukštį, įtempiai visais atvejais taip pat mažėja apie 10 % - 15 %. Norint sumažinti įtempius stormenos apačioje, efektyviau padidinti stormenos aukštį nei ilgį.



3.40 pav. Rėmo įlinkio priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio

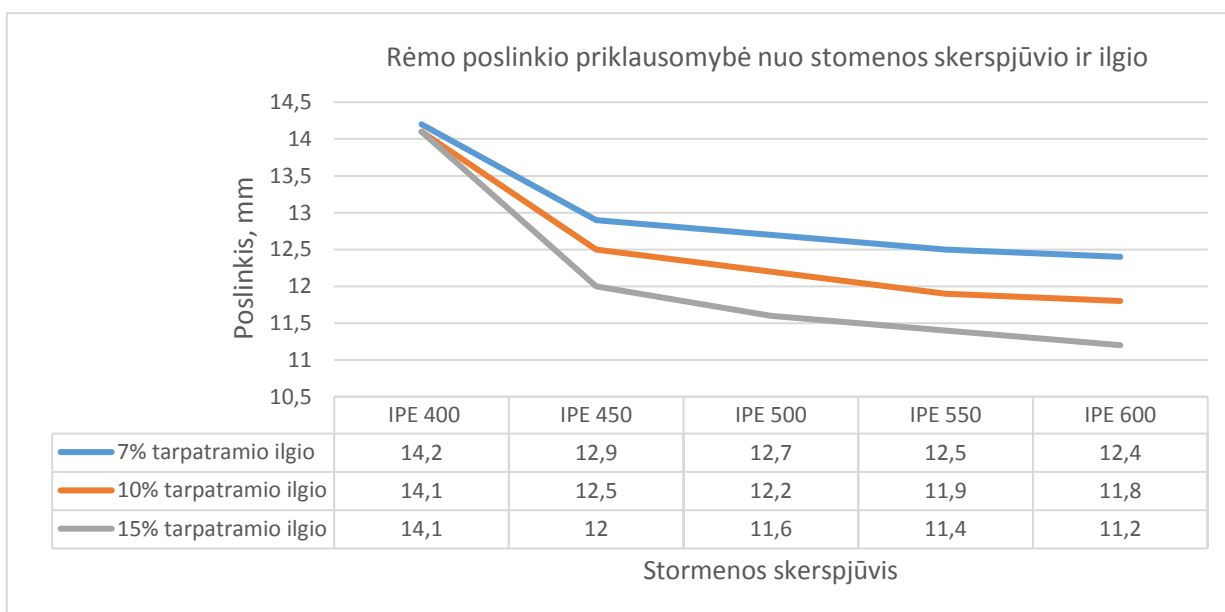
3.7 lentelė. Įlinkio kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio

Įlinkis	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 7% ir 10 % ilgio stormenos	6,33 %	7,61 %	8,69 %	9,21 %	10,28 %
Pokytis tarp 10 % ir 15 % ilgio stormenos	7,41 %	8,83 %	8,83 %	11,21 %	12,88 %

3.8 lentelė. Įlinkio kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stromenų

Įlinkis	7% tarpatramio ilgio	10% tarpatramio ilgio	15% tarpatramio ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	4,13 %	5,44 %	6,89 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	2,93 %	4,07 %	5,88 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	2,55 %	3,10 %	3,82 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	1,07 %	2,24 %	4,09 %

Rėmo įlinkiai, didinant stormenos ilgį nuo 7 % iki 10 % tarpatramio ilgio, sumažėja apie 7 % – 9 %, didinant nuo 10 % iki 15 % stormenos ilgį įlinkis sumažėja 9 – 11 %, o didinant stormenos aukštį įlinkis sumažėja 3 % – 5 %. Todėl, rėmo įlinkis efektyviau sumažinamas padidinant stormenos ilgį nei aukštį.



3.41 pav. Rėmo poslinkio priklausomybė nuo stromenos skerspjūvio ir ilgio

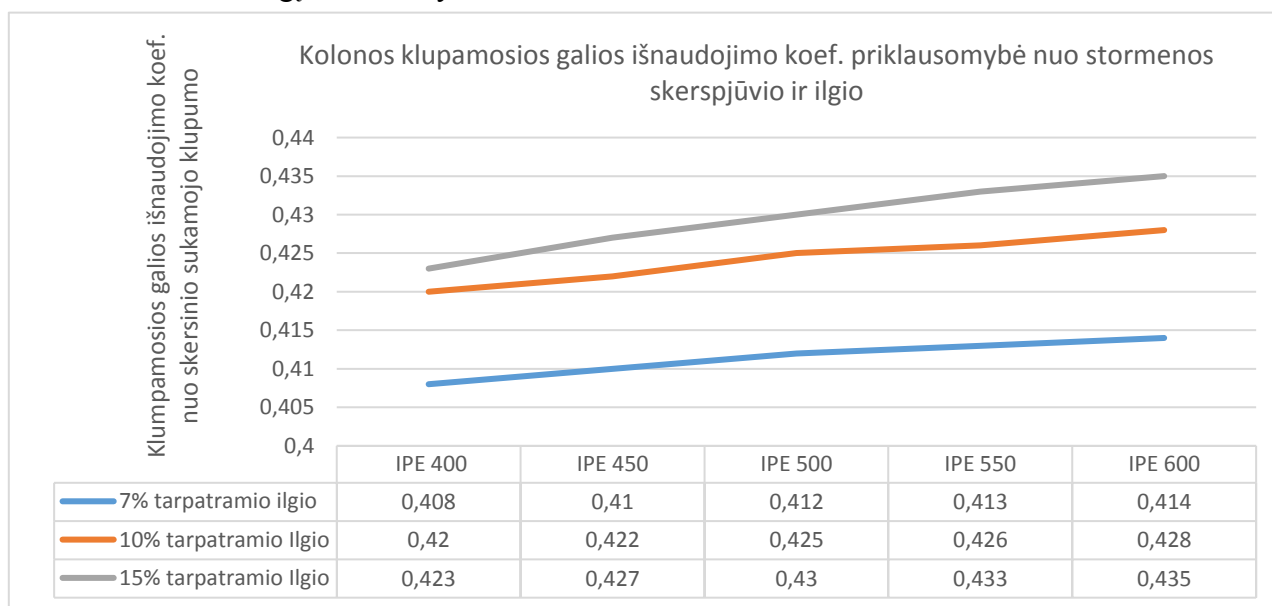
3.9 lentelė. Poslinkio kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stornenos ilgio

Poslinkis	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 0,07L ir 0,10L ilgio stornenos	0,70 %	3,10 %	3,94 %	4,80 %	4,84 %
Pokytis tarp 0,10L ir 0,15L ilgio stornenos	0,00 %	4,00 %	4,92 %	4,20 %	5,08 %

3.10 lentelė. Poslinkio kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stornenų

Poslinkis	7% tarpatramio ilgio	10% tarpatramio ilgio	15% tarpatramio ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	4,13 %	5,44 %	6,89 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	2,93 %	4,07 %	5,88 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	2,55 %	3,10 %	3,82 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	1,07 %	2,24 %	4,09 %

Bendru atveju didinant stornenos ilgį nuo 0,07L iki 0,10L ir nuo 0,10L iki 0,15L tarpatramio ilgio rėmo poslinkiai sumažėja apie 4 %. Didinant stornenos aukštį, poslinkiai mažėja taip pat apie 4 %. Matoma, jog didinant stornenos ilgį bei jos aukštį, poslinkio sumažėjimas ir priklausomybė nuo šių geometrinių charakteristikų vienoda. Rėmo poslinkiai naudojant IPE 400 skerspjūvį didinant stornenos ilgį kinta nežymiai 0,7 %.



3.42 pav. Rėmo kolono klupamosios galios išnaudojimo coef. priklausomybė nuo stornenos skerspjūvio ir ilgio

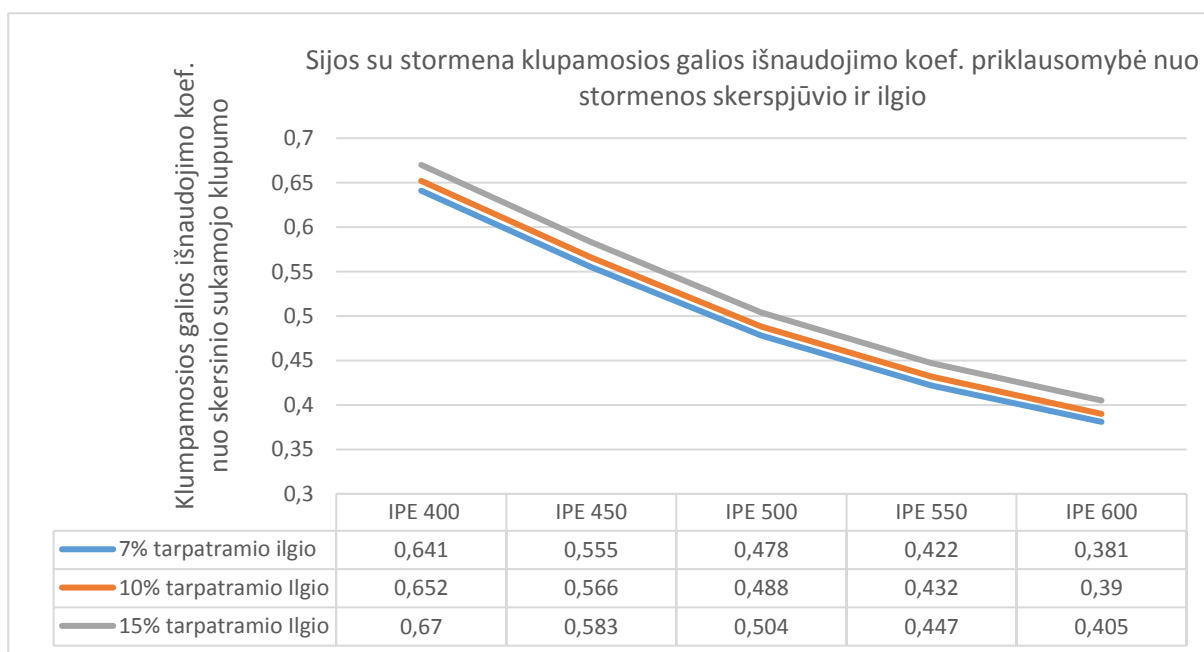
3.11 lentelė. Kolonos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio

Skersinis sukamasis klupumas	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 0,07L ir 0,10L ilgio stormenos	2,86 %	2,84 %	3,06 %	3,05 %	3,27 %
Pokytis tarp 0,10L ir 0,15L ilgio stormenos	0,71 %	1,17 %	1,16 %	1,62 %	1,61 %

3.12 lentelė. Kolonos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjuvio stormenų

Skersinis sukamasis klupumas	7% tarpatramio ilgio	10% tarpatramio ilgio	15% tarpatramio ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	0,49 %	0,48 %	0,95 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	0,49 %	0,71 %	0,70 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	0,24 %	0,24 %	0,70 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	0,24 %	0,47 %	0,46 %

Kolonos skersinio sukamojo klupumo išnaudojimas didėja apie 2% didinant stormenos ilgį arba stormenos aukštį.



3.43 pav. Rėmo sijos su stormena klupamosios galios išnaudojimo koef. priklausomybė nuo stormenos skerspjuvio ir ilgio

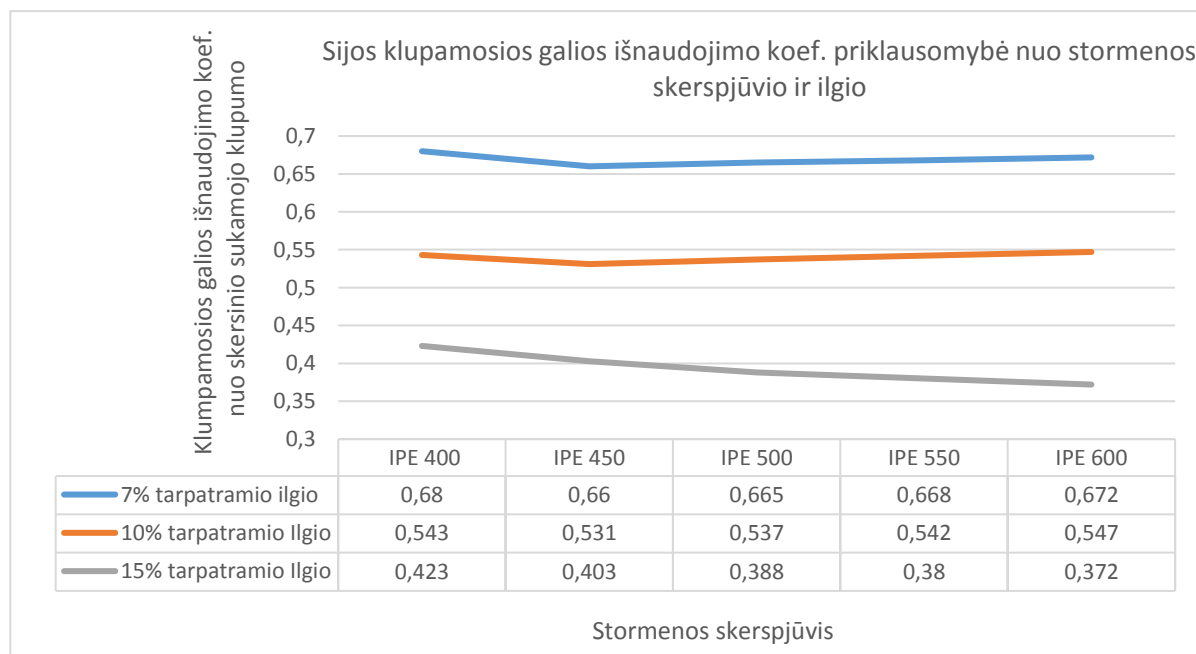
3.13 lentelė. Sijos su stormena klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio

Skersinis sukamasis klupumas	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 0,07L ir 0,10L ilgio stormenos	1,69 %	1,94 %	2,05 %	2,31 %	2,31 %
Pokytis tarp 0,10L ir 0,15L ilgio stormenos	2,69 %	2,92 %	3,17 %	3,36 %	3,70 %

3.14 lentelė. Sijos su stormena klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų

Skersinis sukamasis klupumas	7% tarpatramio ilgio	10% tarpatramio Ilgio	15% tarpatramio Ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	13,42 %	13,19 %	12,99 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	13,87 %	13,78 %	13,55 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	11,72 %	11,48 %	11,31 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	9,72 %	9,72 %	9,40 %

Didinant stormenos skerspjūvį, sijos su stormena skersinio sukamojo klupumo išnaudojimas mažėja apie 6,0 – 10,0 %, o didinant stormenos ilgį kinta nežymiai.



3.44 pav. Rėmo sijos klupamosios galios išnaudojimo koef. priklausomybė nuo stormenos skerspjūvio ir ilgio

3.15 lentelė. Sijos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp 0,07L, 0,1L ir 0,15L stormenos ilgio

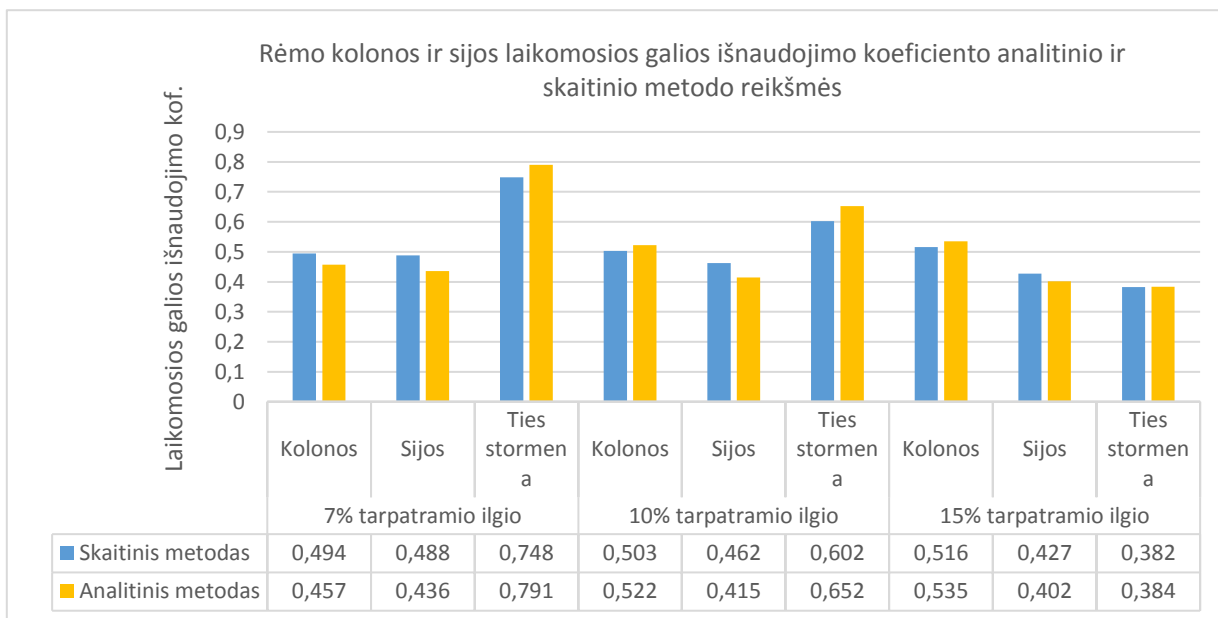
Skersinis sukamasis klupumas	IPE 400	IPE 450	IPE 500	IPE 550	IPE 600
Pokytis tarp 0,07L ir 0,10L ilgio stormenos	20,12 %	19,55 %	19,25 %	18,86 %	18,60 %
Pokytis tarp 0,10L ir 0,15L ilgio stormenos	22,14 %	24,11 %	27,75 %	29,89 %	31,99 %

3.16 lentelė. Sijos klupamosios galios išnaudojimo koef. nuo skersinio sukamojo klupumo kitimas tarp IPE 400 – IPE 600 skerspjūvio stormenų

Skersinis sukamasis klupumas	7% tarpatramio ilgio	10% tarpatramio Ilgio	15% tarpatramio Ilgio
Pokytis tarp IPE 400 ir IPE 450	0,61 %	1,32 %	1,23 %
Pokytis tarp IPE 450 ir IPE 500	0,75 %	1,12 %	3,72 %
Pokytis tarp IPE 500 ir IPE 550	0,45 %	0,92 %	2,06 %
Pokytis tarp IPE 550 ir IPE 600	0,60 %	0,91 %	2,11 %

Didinant stormenos ilgį, sijos skersinio sukamojo klupmo išnaudojimas mažėja apie 20 % – 30 %, o didinant stormenos skerspjūvį, skersinio sukamojo klupumo išnuadojimas kinta nežymiai.

3.2.4 Skaitinio ir analitinio metodo elementų laikomosios ir klupamosios galios nuo skersinio sukamojo klupumo rezultatų palyginimas



3.45 pav. Laikomosios galios išnaudojimo koeficiento analitinio ir skaitinio metodo reikšmės, esant 0,07L, 0,1L, 0,15L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenoms.

Aukščiau pateiktame 3.45 paveiksle vaizduojamos analitiniu ir skaitiniu būdu gautos rėmo elementų (kolonos, sijos bei sijos dalies su stormena) laikomosios galios išnaudojimo reikšmės, kaip stormena IPE 500 skerspjūvio ir 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio. 3.17 lentelė pateikiamos šių metodų reikšmių skirtumas procentine dalimi.

3.17 lentelė. Rėmo elementų laikomosios galios išnaudojimo koeficiento analitinio ir skaitinio metodo reikšmių skirtumas

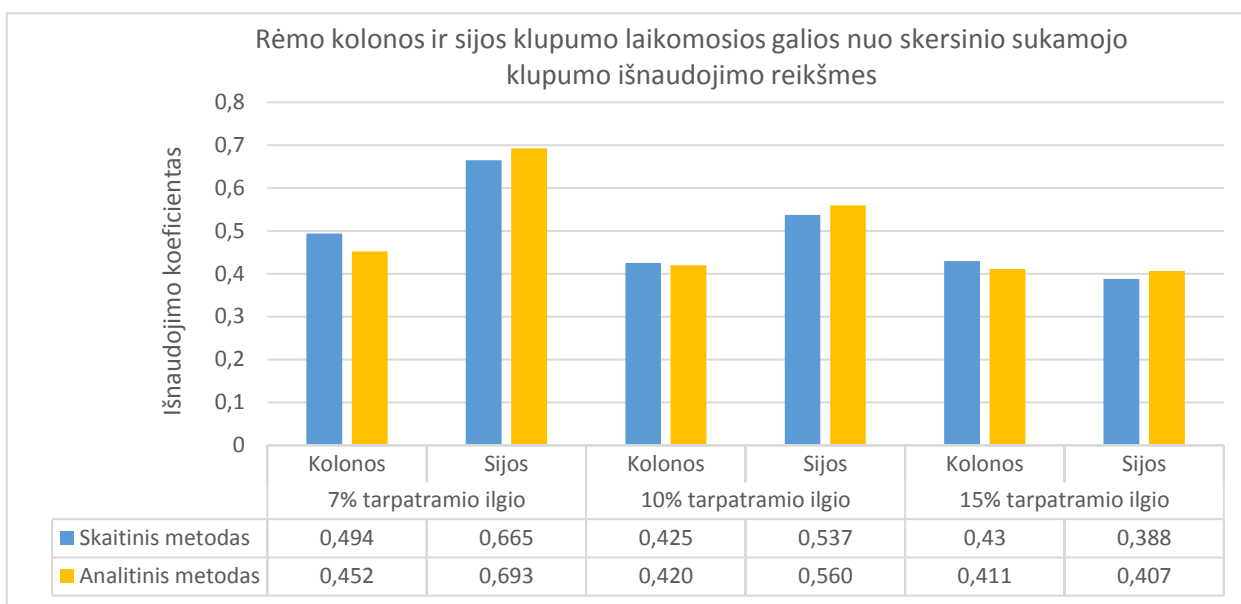
0,07L ilgio stormenos			0,10L ilgio stormenos			0,15L ilgio stormenos		
Kolonos	Sijos su stormena	Sijos	Kolonos	Sijos su stormena	Sijos	Kolonos	Sijos su stormena	Sijos
3,67 %	5,22 %	4,26%	1,88%	4,74%	5,02%	1,93%	2,49%	0,20%

Elementų laikomosios galios išnaudojimo skirtumas tarp skaitinių ir analitinių skaičiavimo rezultatų yra iki 5,0 %. Tačiau, laikomosios galios išnaudojimas skaičiuojant analitiniu metodu gali būti tiek didesnis 5,0 %, tie ir mažesnis 5,0 %, lyginant su skaitinių skaičiavimo metodų rezultatais.

Didinant stormenos ilgį kolonos laikomosios galios išnaudojimas didėja, o sijos ties stormena ir kraigu – mažėja. Šis dėsningumas pastebimas tiek skaitinių tiek ir analitinių metodų skaičiavimo rezultatuose.

3.2.5 Rėmo elementų klupamoji galia nuo sukamojo skersinio klupumo

3.46 paveiksle vaizduojamos analitiniu ir skaitiniu būdu gautos rėmo kolonos ir sijos be stormenos klupamosios galios išnaudojimo reikšmės nuo skersinio sukamojo klupumo, kaip stormena IPE 500 skerspjūvio ir 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio. 3.17 lentelė pateikiamos šių metodų reikšmių skirtumas procentine dalimi.



3.46 pav. Rėmo kolonos ir sijos klupamosios galios išnaudojimo koeficiento palyginimas analitiniu ir skaitiniu metodu, esant 0,07L, 0,10L, 0,15L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenai

3.18 lentelė. Kolonos ir sijos klupamosios galios išnaudojimo koeficientas nuo skersinio sukamojo klupumo analitinio ir skaitinio metodo reikšmių skirtumas, esant 0,07L, 0,1L, 0,15 L ilgio IPE 500 skerspjūvio stormenoms

IPE 500 skerspjūvio stormena	0,07L ilgio stormena		0,10L ilgio stormena		0,15L ilgio stormena	
	Kolonos	Sijos	Kolonos	Sijos	Kolonos	Sijos
	4,21 %	-2,77 %	0,46 %	-2,26 %	1,90 %	-1,87 %

Lyginant analitinius skaičiavimus su skaitiniais gaunamos artimos reikšmės nuo skersinio sukamojo klupumo išnaudojimo. Tarp analitinių ir skaitinių skaičiavimo rezultatų skirtumas sudaro apie 2,0 %. Tik rėmo su 0,07L ilgio stormena kolonos skersinis sukamojo klupumo išnaudojimas skiriasi 4,2 %.

Kolonos ir sijos skersiniam sukamajam klupumui išnaudojimas mažėja didinant stormenos ilgį. Šis dėsningas pastebimas tiek skaitiniais tiek analitiniais skaičiavimo metodais

3.2.6 Portalinio rėmo palyginimas su santvaros konstrukcine sistema

3.19 lentelė. Portalinio rėmo ir santvaros masės palyginimo lentelė

Palyginimas	Santvaros	Portalinis rėmas
Denginys	22,0 - 25,0 kg/m ²	16,6 kg/m ²
Kolonos	8,0 kg/m ²	16,0 kg/m ²
Iš viso	30,0 - 33,0 kg/m ²	32,6 kg/m ²

Pateiktoje lentelėje matoma, kad denginys iš portalinių rėmų yra ekonomiškesnis negu santvarų atveju. Sutaupoma iki 8 kg/m².

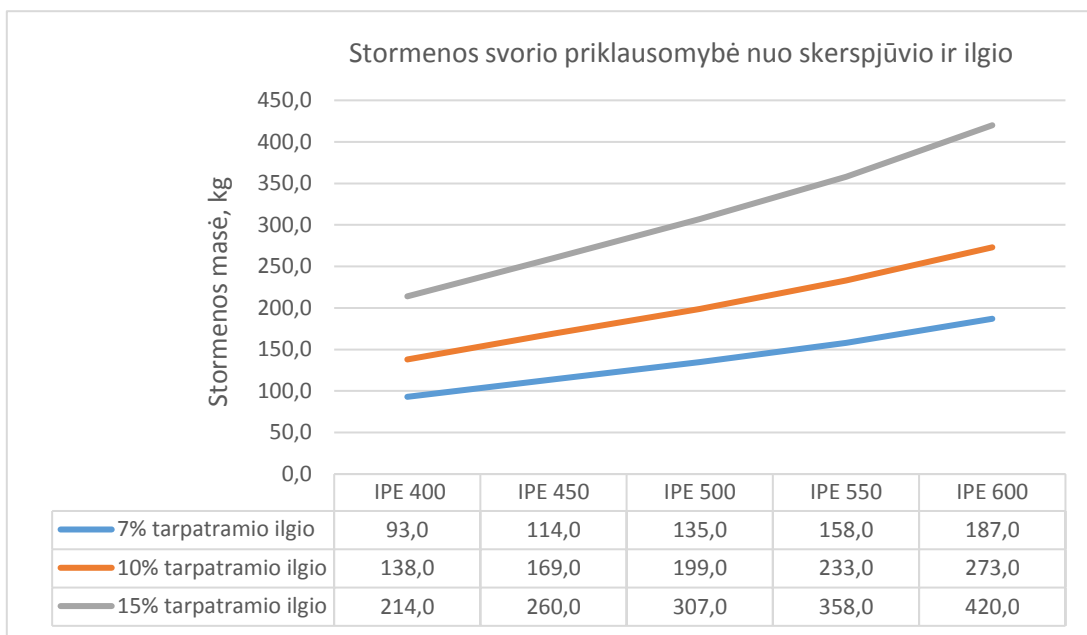
Portalinio rėmo atveju daug didesnis plieno sąnaudos yra kolonomis (apie 8 kg/m²). Taip yra todėl, kad portalinio rėmo atveju kolona su sija sujunta standžiai. Atsiranda didelis lenkimo momentas kolonoje.

Denginio iš santvarų atveju kolona su santvara jungiama lanksčiai. Tai šiuo atveju kolona yra ekscentriškai gniuždoma ir joje veikia daug mažesnis lenkimo momentas negu portalinio rėmo atveju.

Bendros plieno sąnaudos šiek tiek (1-2 kg/m²) mažesnis, kai yra denginys iš santvarų. Bet portalinis rėmas turi kitų privalumų:

- mažesnės gamybos sąnaudos;
- greitesnė gamyba, kadangi naudojami standartiniai skerspjūviai;
- greitesnis montavimas.

Stormenos svoris lyginant su sijos ir kolonos svoriu yra nedidelis 4,5 kg/m². Stormenos svorio pokytį priklausomai nuo jo ilgio ir skerspjūvio, galima matyti 3.47 paveiksle.



3.47 pav. Stormenos masės priklausomybė nuo ilgio ir skerspjūvio

IŠVADOS

1. Skaičiuojant stormeną analitiniais metodais, skaičiavimus sunkina skerspjūvio rodiklių (Inercijos momento, atsparumo momento ir kt.) sudėtingas apskaičiavimas. O modeliuojant portalinį rėmą BEM strypiniais elementais, dažnai susiduriama su stormenos T formos kintamo skerspjūvio parinkimo problema. Remiantis analizuota literatūra, portalinių rėmų kintančio skerspjūvio sijos dalies su stormenos analitiniai skaičiavimai atliekami tikrinant 5-iuose pjūviuose pagal ekvivalentinio sijos su stormena skerspjūvio rodiklių skaičiavimo metodą, kuri leidžia apskaičiuoti apytiksliai skerspjūvio rodiklių reikšmes.
2. Dėl analitiniu skaičiavimo metodu taikomo ekvivalentinio skerspjūvio beveik visais atvejais gaunamas didesnis stormenos su sija laikomosios galios išnaudojimas negu skaičiuojant skaitiniu metodu. Laikomosios galios geriausiai sutampa stormenos pradžioje ir pabaigoje. Tarpiniuose pjūviuose skirtumas tarp analitinių ir skaitinių gali siekti iki 15,0 %.
3. Netiesinės analizės skaičiavimo rezultatai rodo, kad kolonos ir sijos su stormena lenkimo momentas padidėja apie 1,5 %, o sijos apie 2,5 % lyginant su tiesinės analizės rezultatais. Šiuo tyrimu galima priimti išvadą, jog tiriamas rėmas nėra jautrus antros eilės efektams, patikrinus pagal LST EN 1993-1-1:2005 normų rekomendacijas.
4. Rėmo įlinkis efektyviau sumažinamas padidinant stormenos ilgį nei aukštį. Įtempiai stormenos apačioje efektyviau sumažinami didinant stormenos skerspjūvio aukštį. Įtempiai stormenos pabaigoje ir kraige efektyviau sumažina didinti stormenos ilgį.
5. Kolonos viršuje esančios sąstandos apie 30 % sumažina įtempius, atsirandančią kolonos ir stormenos jungties vietoje. Kolonose be sąstandų maksimalių įtempių koncentracija susitelkia kolonos ir sijos su stormena jungtyje, kur kolonos sienelės plokštelė veikiama skersinio tempimo ties viršutine sijos juosta bei skersinio gniuždymo ties stormenos juosta. Šių įtempių reikšmės dažnai viršija rėmo plieno stiprio reikšmę 355 MPa.
6. Optimalus darbe analizuotas 25,0 m tarpatramio rėmas yra su stormena IPE 500, kurios ilgis 0,15 % ir su sąstandomis kolonos ir sijos su stormena mazge. Stormenos ilgis efektyviausias, kai jos ilgis 15,0 % tarpatramio ilgio. Mažinant stormenos ilgį iki 10,0 % įtempiai rėmo kraige padidėja apie 12,0 %, stormenos apačioje 36,0 %, įlinkiai apie 8,0 – 10,0 %, poslinkiai iki 5,0 %. Stormenos skerspjūvį geriausia naudoti tokį pat kaip ir sija t.y. IPE 500. Didinant skerspjūvį

didėti įtempiai apie 15,0 % stormenos pabaigoje. Mažinant skerspjūvį įlinkiai padidėja apie 7,0 %, poslinkiai – 6,0 %.

7. Rėmo kolonos ir sijos laikomosios galios išnaudojimo skirtumas tarp skaitinių ir analitinių skaičiavimo rezultatų yra iki 5%. Tačiau laikomosios galios išnaudojimas skaičiuojant analitiniu metodu gali būti tiek didesnis 5%, tie ir mažesnis 5% lyginant su skaitinių skaičiavimo metodų rezultatais. Lyginant analitinius skaičiavimus su skaitiniais gaunamos iki 2% skirtumas skersinio sukamojo klupumo išnaudojimo.
8. Portalinio rėmo privalumai yra mažesnės gamybos sąnaudos, greitesnis montavimas, greitesnė gamyba, nes naudojami standartiniai skerspjūviai. Portalini rėmai yra pakankamai ekonomiški. Lyginant su santvaromis portalinio rėmo bendros plieno sąnaudos yra šiek tiek (1-2 kg/m²) didesnės.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Andrade, A., Camotin, D., Dinis, B. P. 2006. *Lateral-torsional buckling of singly symmetric web-tapered thin-walled I-beams: 1D model vs shell FEA*. Department of Civil Engineering, ICIST/IST, Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal.
- Atkočiūnas, J., Nagevičius, J. 2004. *Tamprumo teorijos pagrindai*. Vilnius: Technika.
- Brown, G. 2013. *Design of portal frames to Eurocode 3: an overview for UK designers*. SCI, Silwood Park, UK. 48p.
- King, M. C. 2001. *In – plane stability of portal frames to BS 5950-1:2000*. SCI, Silwood Park, UK.
- King, M. C. 2001. *Design of steel portal frames for Europe*. SCI, Silwood Park, UK. 107-109p.
- Koschimidder, D., Brown, G. 2012. *Elastic design of single-span steel portal frame building to Eurocode 3*. SCI, Silwood Park, UK. 196 p.
- Kvedaras, K. A., Rasiulis, K., Šapalas, A., Šapalas, V., Šaučiuvėnas, G., Urbonas, K., Zabulionis, D. 2017. *Plieninės konstrukcijos, elementai ir jungtys*. Vilnius: Technika.
- LST EN 1993-1-1:2005 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius, 2005. 102p.
- LST EN 1993-1-1:2005 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-5 dalis. Lakštinių konstrukcijų elementai*. Vilnius, 2007. 61p.
- Luis Simoões da Silva, Rui Simões, Helena Gervásio 2013. *Design of Steel Structures*. European Convention for Constructional Steelwork, Multicomp Lda, Mem Martins, Portugal.
- Saka, M.P. 2003. *Optimum design of pitched roof steel frames with haunched rafters by genetic algorithm, Computers & Structures*. 18-19, pp. 1967-1978p.
- Salter, R. P., Malik, S. A., King, M. C. 2004. *Design of single span steel portal frames to BS 5950-1:2000*. SCI, Silwood Park, UK. 48-51p.

2010. *Steel buildings in Europe. Single-story steel buildings part 4: Detailed design of portal frames*. European project (RFS2-CT-2008-0030). SCI, Silwood Park, UK

2013. *Steel buildings in Europe. Single-storey steel buildings part 11: Moment connections*. SCI, Silwood Park, UK. 11-15, 82-125p.

SOFiSTiK AG. 2016. *SOFiSTiK Basics. SOFiSTiK Manual*. Oberschleissheim, Germany. 143p.

Ungermann, D., Strohmann, I. 2009. *Stability of I-shaped members with haunches under bending – Design aids for individual member checks*. Institute of Steel Constructions, Germany. 125-131p.