



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Aleksandras Olampijevs

**KINTAMO SKERSPJŪVIO RĖMŲ, SUDARYTŲ IŠ KETVIRTOS
KLASĖS PROFILIUOČIŲ, PROJEKTAVIMO METODŲ ANALIZĖ IR JŲ
TAIKYMAS**

Analysis of calculation methods for portal frames designed of tapered class 4
cross-section steel elements

Baigiamasis magistro darbas

Statybos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vilnius, 2017

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Metalinių ir medinių konstrukcijų katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas	
Pavadinimas	Kintamo skerspjūvio rėmų, sudarytų iš ketvirtos klasės profiliuotųjų, projektavimo metodų analizė ir jų taikymas
Autorius	Aleksandras Olampijevs
Vadovas	Konstantin Rasiulis
Kalba: lietuvių	
Anotacija Darbe nagrinėjami kintančio skerspjūvio rėmai, sudaryti iš liaunų virintinių lakštų. Kintamo skerspjūvio elementai projektuojami, kad atvaizduotų momentų pasiskirstymo diagramą, taip pasiekiamas aukštas išnaudojimo koeficientas, o mažas sienelės storis leidžia pasiekti didesnės ekonominės naudos. Tačiau ketvirtos klasės plonasieniai elementai pasižymi mažu sukamuoju standžiu ir lengvai pasiduoda vietiniam klupumui. Ketvirtos klasės kintančio skerspjūvio elementų analitiniai skaičiavimai atliekami pagal LST EN 1993-1-5:2007, pritaikius ekvivalenčius skerspjūvio rodiklius. Siekiant išnagrinėti Euronormose aprašytas skaičiavimo metodikas, varijuojama portalinio rėmo skerspjūvio kitimo koeficientu ir sienelės storiu. Analitiniais metodais atliktų skaičiavimų rezultatai sugretinami su skaitinio eksperimento rezultatais. Skaitiniam eksperimentui atlikti buvo sudaryti analogiški skaičiuojamieji rėmų modeliai, baigtinių elementų programoje SOFiSTiK. Darbo apimtis – 81 p. teksto be priedų, 75 paveikslai, 7 lentelės, 24 bibliografiniai šaltiniai.	
Prasminiai žodžiai: Kintamas skerspjūvis, plonasieniai elementai, ketvirtos klasės skerspjūvis, vietinis klupumas, portalinis rėmas.	

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

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

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

Title **Analysis of calculation methods for portal frames designed of trapedered class 4 cross-section steel elements**

Author **Aleksandras Olampijevas**

Academic supervisor **Konstantin Rasiulis**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

Tapered cross-section elements are appreciated as highly efficient and cost-effective, because they represent the diagram of the moments, the web of tapered member is increased where the design moments are highest. Portal frames designed of thin-walled cross-section are mostly used because of their economical benefit. Due to the high width to thickness ratio class 4 cross-section elements are limited by local buckling resistance, which occurs before the attainment of yield stresses. Class 4 cross-sections analytical calculations are made by LST EN 1993-1-5:2007, applying appropriate equivalent cross section or equivalent length. In this paper calculations were made by varying the width and the height of tapered members, which provides possibility to analyze calculation methods that are written in Eurocode. There also is a comparison of the analytical test results with numerical modeling results. Numerical modeling was made by finite element structural analysis software SOFiSTiK AG. The final thesis consists of 81 pages text without appendixes, 75 pictures, 7 tables, 24 bibliographical entries.

Keywords: Tapered cross-section, thin-walled elements; class 4 cross-section, local buckling, portal frames.

TURINYS

ĮVADAS.....	13
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA	14
1.1. Mokslinių straipsnių apžvalga	14
1.2. Plonasienės metalinės konstrukcijos.....	18
1.3. Plokštelių elementų elgsena.....	20
1.3.1. Pokritinė plokštelių elgsena.....	21
1.4. Kintančio 4 klasės skerspjuvio skaičiavimo algoritmas pritaikant LST EN 1993-1-5:2007 skaičiavimo metodus.....	22
1.4.1. Efektyviojo pločio metodas	23
1.4.2. Sumažintų įtempių metodas.....	37
1.4.3. Baigtinių elementų analizės metodai	39
2. KERTVIRTOS KLASĖS KINTANČIO SKERSPJŪVIO ANALITINIAI SKAIČIAVIMO METODAI	42
2.1. Nagrinėjamos konstrukcijos aprašymas.....	42
2.1.1. Ekvivalentūs kintančio skerspjuvio rodikliai	43
2.1.2. Efektyvieji skerspjuvio rodikliai	43
2.1.3. Tamprioji laikomoji galia	44
2.1.4. Plokštelės klupimo formos analizė	45
2.1.5. Šlyties poveikio analizė	47
2.1.6. Klumpamosios galios nuo skersinių jėgų poveikio analizė.....	48
2.1.7. Skerspjuvį veikiančių įrašų sąveika	50
2.1.8. Euronormų metodikų sugretinimas	55
3. SKAITINIO EKSPERIMENTO DALIS	59
3.1. Kintančio skerspjuvio rėmo skaitinio modelio sudarymas	59
3.2. Taikytini baigtinių elementų analizės metodai	61
3.3. Skaitinio modelio skaičiavimo rezultatų analizė	64
IŠVADOS	76
LITERATŪROS SĄRAŠAS	78
PRIEDAI.....	81

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Portalinių rėmų pavyzdžiai (Design... 2013).....	14
1.2 pav. Sijos, apkrautos trijuose taškuose, klumpo formos (Elastic... 2012)	14
1.3 pav. Nagrinėjamų dvitėjų sijų geometriniai parametrai ir apkrovimo schema	15
(Asgarian <i>et al.</i> 2012)	15
1.4 pav. Gniuždomos plonasienės sienelės įtempių pasiskirstymas (Höglund 1972).....	16
1.5 pav. Įtempių pasiskirstymas plonasienėje sienelėje, sijos, kuri sustandinta ties atramomis; „pasuktų įtempių laukas“ (Höglund 1972)	16
1.6 pav. Baigtinių elementų programa sumodeliuotas kolonos modelis (Salem <i>et al.</i> 2009).....	17
1.7 pav. Įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje ir klumpo formos, kai skerspjuvio santykiai.....	18
$b_f/t_f=60$, $H_{max}/t_w=200$ (Salem <i>et al.</i> 2009)	18
1.8 pav. Skerspjuvio klasių elgsena (Daniūnas 2012)	19
1.9 pav. Elemento skerspjuvio pastovumo formos: a) lenkiamasis-sukamasis klumpas, b) vietinis klumpas, c) distorsinio stabilumo netekimas (Silvestre, Camotim 2003)	20
1.10 pav. Stačiakampės plokštelės pokritinė elgsena (Daniūnas 2012).....	21
1.11 pav. Efektyvaus pločio koncepcija (pagal Daniūną 2012).....	22
1.12 pav. Sumažintų įtempių ir efektyvaus skerspjuvio metodai (King 2014).....	22
1.13 pav. Kampas $\alpha = \alpha_{lim}$ (EN 1993-1-5)	23
1.14 pav. Kintančio dvitėjo skerspjuvio elementai (b , t_f ir t_w dydžiai yra konstantos).....	24
(Hirt, Crisinel 2010).....	24
1.15 pav. Kolonos tipo elgsena (EN 1993-1-5)	26
1.16 pav. Skerspjuvio elementai: vidiniai, ir išoriniai (EN 1993-1-5).....	26
1.17 pav. Tolygiai gniuždomas standintasis lakštas (EN1993-1-5).....	29
1.18 pav. Kolonos tipo ir plokštelės tipo klumpo sąveika	31
1.19 pav. Šlyties įtempiai plokštelėje (Plieninės konstrukcijos... 2012).....	32
1.20 pav. Šlyjamojo klumpo koeficientas χ_w (EN 1993-1-5).....	34
1.21 pav. Skersinių jėgų veikiamos sijos suirimo pobūdžiai: a) plokštelės takumas, b) sienelės klumpas, c) sienelės klumpas ties juosta (Plieninės konstrukcijos... 2012)	34
1.22 pav. Skirtingą apkrovos perdavą atitinkantys klumpo koeficientai (EN 1993-1-5)	35
1.23 pav. Lygiaverčių geometrinių nuokrypių modeliavimas	40
1.24 pav. Medžiagos elgsena (EN 1993-1-5).....	41
2.1 pav. Pasirinkto rėmo geometrija	42
2.2 pav. Dvitėjo skerspjuvio geometriniai rodikliai.....	42
2.3 pav. Efektyvaus skerspjuvio galios priklausomybė nuo skerspjuvio ploto	45

2.4 pav. 4 kl. skerspjuvio efektyviųjų rodiklių nustatymo algoritmo schema (Johansson <i>et al.</i> 2007)	46
2.5 pav. Plokštelės tipo klupimo pataisos koeficientas ir galutinis sąveikos pataisos koeficiento kitimas, nuo plokštelės kraštinių santykio	46
2.6 pav. Šlyjamosios galios priklausomybė nuo plokštelės kraštinių santykio	47
2.7 pav. Šlyjamosios galios priklausomybė nuo atstumo tarp sąstandų, įvedant skirtingus skerspjuvio sienelės storius.....	48
2.8 pav. Standžiosios atramos ilgis (EN 1993-1-5)	48
2.9 pav. Skersinė jėgos patikros koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp sąstandų	49
2.10 pav. Laikomosios galios nuo skersinė jėgos poveikio kitimas priklausomai nuo standžios atramos ilgio.....	49
2.11 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $tw = 5mm$, sija be išilginių sąstandų.....	51
2.12 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $tw = 6mm$, sija be išilginių sąstandų.....	51
2.13 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $tw = 7mm$, sija be išilginių sąstandų.....	52
2.14 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $tw = 5mm$, sija su išilginėmis sąstandomis.....	52
2.15 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $tw = 6mm$, sija su išilginėmis sąstandomis.....	53
2.16 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $tw = 7mm$, sija su išilginėmis sąstandomis.....	53
2.17 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės storis $tw = 5 mm$, sija be išilginių sąstandų, atstumas tarp skersinių sąstandų 1,56 m.....	54
2.18 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės storis $tw = 6 mm$, sija be išilginių sąstandų, atstumas tarp skersinių sąstandų 1,56 m.....	54
2.19 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės storis $tw = 5 mm$, sija su išilginėmis sąstandomis, atstumas tarp skersinių sąstandų 1,56 m.....	55
2.19 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės storis $tw = 6 mm$, sija su išilginėmis sąstandomis, atstumas tarp skersinių sąstandų 1,56 m.....	55
2.20 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas, tarp EN metodikų. Skerspjuvio sienelės maksimalios ir minimalios reikšmės santykio koef.: $hmaxhmin = 1000500; 1100500; 1200500; 1200350$	56

2.21 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas, tarp EN metodikų. Skerspjūvio sienelės maksimalios ir minimalios reikšmės santykio koef.: $h_{maxhmin} = 1000500; 1100500; 1200500; 1200350$	57
2.22 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas, tarp EN metodikų. Skerspjūvio sienelės maksimalios ir minimalios reikšmės santykio koef.: $h_{maxhmin} = 1000500; 1100500; 1200500; 1200350$	57
3.1 pav. Konstrukcijos fragmentai iš CAD aplinkos	60
3.2 pav. Rėmo modelis, atvaizduotas SOFiSTiK programos SDD modulyje	60
3.3 pav. Momentų diagrama, gauta <i>Robot</i> programiniame pakete	61
3.4 pav. Plieno įtempių ir deformacijų priklausomybė kreivė.....	62
3.5 pav. Išankstinio geometrinio netobulumo įvedimas SSD modulyje.	63
3.6 pav. Apkrovos kontrolės modifikuotas Newtono-Raphsono metodas.....	63
3.7 pav. Rėmo dešimtoji klupumo forma, kitimo koeficientas lygus $h_{maxhmin} = 1000500$.	65
3.8pav. Rėmo dešimtosios klupumo formos lokalus vaizdas, kitimo koeficientas lygus $h_{maxhmin} = 1000500$	65
3.9 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 4mm	66
3.10pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymas, kai rėmo sienelės storis 4mm, o aukščio kitimo koeficientas $h_{maxhmin} = 1000500$	66
3.11pav. Klupumo formos atvaizdavimas WinGraf modulyje, kai rėmo sienelės storis 4mm, o aukščio kitimo koeficientas $h_{maxhmin} = 1000500$	67
3.12pav. Netiesinės analizės, kai įvertinamas medžiagos netiesiškumas ir geometriniai netobulumai, Von Mizeso įtempių pasiskirstymas. Kai rėmo sienelės storis 4mm, o aukščio kitimo koeficientas $h_{maxhmin} = 1000500$	67
3.13 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 5mm	68
3.14pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymas, kai rėmo sienelės storis 5mm, o aukščio kitimo koeficientas $h_{maxhmin} = 1000500$	69
3.15pav. Klupumo formos atvaizdavimas WinGraf modulyje, kai rėmo sienelės storis 5mm, o aukščio kitimo koeficientas $h_{maxhmin} = 1000500$	69

3.16 pav. Netiesinės analizės, kai įvertinamas medžiagos netiesiškumas ir geometriniai netobulumai, Von Mizeso įtempių pasiskirstymas. Kai rėmo sienelės storis 5mm, o aukščio kitimo koeficientas $h_{maxhmin} = 1000500$	70
3.17 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo, laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 6mm	71
3.18 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 7mm	72
3.19 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėm netiesinės analizės įtempių pasiskirstymas SOFiSTiK SSD modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $h_{maxhmin} = 1200500$, sienelės storis 5mm, su išilgine sąstanda)	72
3.20 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo tiesinės analizės įtempių pasiskirstymas SOFiSTiK SSD modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $h_{maxhmin} = 1200500$, sienelės storis 5mm, su išilgine sąstanda)	73
3.21 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo klupumo analizės metu gauta klupumo forma, patvaizduota SOFiSTiK SSD modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $h_{maxhmin} = 1200500$, sienelės storis 5mm, su išilgine sąstanda)	73
3.22 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo netiesinės analizės įtempių pasiskirstymas SOFiSTiK SSD modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $h_{maxhmin} = 1200500$, sienelės storis 5mm, be išilginės sąstandos)	74
3.23 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo klupumo analizės metu gauta klupumo forma, patvaizduota SOFiSTiK SSD modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $h_{maxhmin} = 1200500$, sienelės storis 5mm, be išilginės sąstandos).....	74
3.24. pav. Kintančio skerspjūvio rėmų, laikomosios galios priklausomybė nuo sienelės storio, rėmo svorio kitimas.....	75

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Dvitėjinio kintančio profilio sijos, skersinio-sukamojo klupumo kritinės jėgos P_{cr} .	15
1.2 lentelė. Efektyviojo pločio koeficientas β	25
1.3 lentelė. Vidiniai gniuždomieji elementai (EN 1993-1-5:2006)	27
1.4 lentelė. Išoriniai gniuždomieji elementai (EN 1993-1-5:2006)	27
1.5 lentelė. Sienelės χ_w indėlis į šlyties klumpamąją galią (EN 1993-1-5)	33
1.6 lentelė. Baigtinių elementų analizės metodų prielaidos (EN 1993-1-5)	39
2.1 lentelė. Efektyvieji dvitėjo skerspjūvio geometriniai rodikliai	44

IVADAS

Plieniniai kintančio skerspjūvio rėmai yra vertinami dėl ekonomiškumo ir veiksmingumo, ne tik laikant denginio konstrukcijas ir kitas veikiančias apkrovas, bet ir išnaudojant erdvę. Dėl galimybės pasiekti didelius tarpatramius ir pastato aukštį kintančio skerspjūvio rėmai plačiai naudojami pramoniniuose, sandėliavimo pastatuose, sporto arenose, tiltų ir viadukų statyboje. Portaliniams rėmams dažniausiai naudojami dvitėjai virintinių lakštų profiliuočiai su kintančiu sienelės aukščiu, siekiant padidinti skerspjūvį ir pavaizduoti veikiančio momento diagramą, taip pasiekiamas ypač didelis išnaudojimo koeficientas.

Šiame darbe nagrinėjami kintančio skerspjūvio rėmai iš virintinių, liaunų lakštų. Tokios konstrukcijos ypač vertinamos dėl aukšto išnaudojimo koeficiento. Plonasienių elementų naudojimas statyboje leidžia maksimaliai optimizuoti konstrukcijas, siekiant didesnės ekonominės naudos. Tačiau ketvirtos klasės plonasieniai elementai pasižymi mažu sukamuoju standžiu ir lengvai pasiduoda vietiniam klupumui, todėl tokio tipo konstrukcijos reikalauja kruopštaus skaičiavimo ir analizės.

Portalinių rėmų iš kintančio skerspjūvio elementų analitinis skaičiavimas yra sudėtingas būtent dėl skerspjūvio, kadangi tokio tipo elementams sunku apskaičiuoti pagrindinius rodiklius. Tačiau yra metodikų leidžiančių rasti reikiamus ekvivalenčius rodiklius ir pritaikyti analitiniuose skaičiavimuose, bet nagrinėtos metodikos yra ribojamos, jomis vadovautis rekomenduojama, esant skerspjūvio kitimo koeficientui 2:1.

Baigiamojo magistrinio darbo tikslas – išnagrinėti rėmų, sudarytų iš plonasienių kintančio skerspjūvio elementų, skaičiavimo metodikas, nustatyti skerspjūvio kitimo koeficiento priklausomybę nagrinėjamoms metodikoms ir palyginti bendrus rezultatus.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

1. Išnagrinėti analitinių plonasienių ketvirtos klasės skerspjūvio elementų skaičiavimo metodikas, pritaikant kintančio skerspjūvio ekvivalenčius rodiklius.
2. Atlikti lyginamąją nagrinėtų analitinių metodikų skaičiavimo rezultatų analizę.
3. Sudaryti tiriamųjų rėmų skaitinius modelius ir atlikti skaitinę analizę, pagal baigtinių elementų metodus.
4. Atlikti analitinių ir skaitinių skaičiavimų rezultatų analizę.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

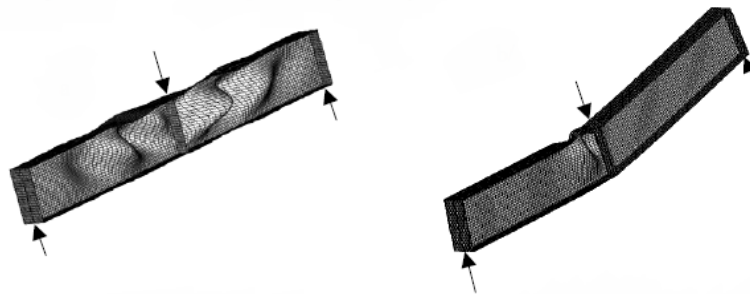
1.1. Mokslinių straipsnių apžvalga

Kintančio ketvirtos klasės skerspjūvio elementai plačiai paplito plieno statybos pramonėje dėl savo konstrukcinio efektyvumo. Jie dažniausiai naudojami statiniuose, norint pasiekti geresnį standumo ir konstrukcijos svorio santykį, taip pat norint užtikrinti funkcinis ir architektūrinius reikalavimus. Dėl to dažniausiai naudojami portaliniuose rėmuose, kurių skerspjūvio kontūras yra artimas momentų pasiskirstymo diagramai, todėl pasiekimas didelis išnaudojamumo koeficientas.



1.1 pav. Portalinių rėmų pavyzdžiai (Design... 2013)

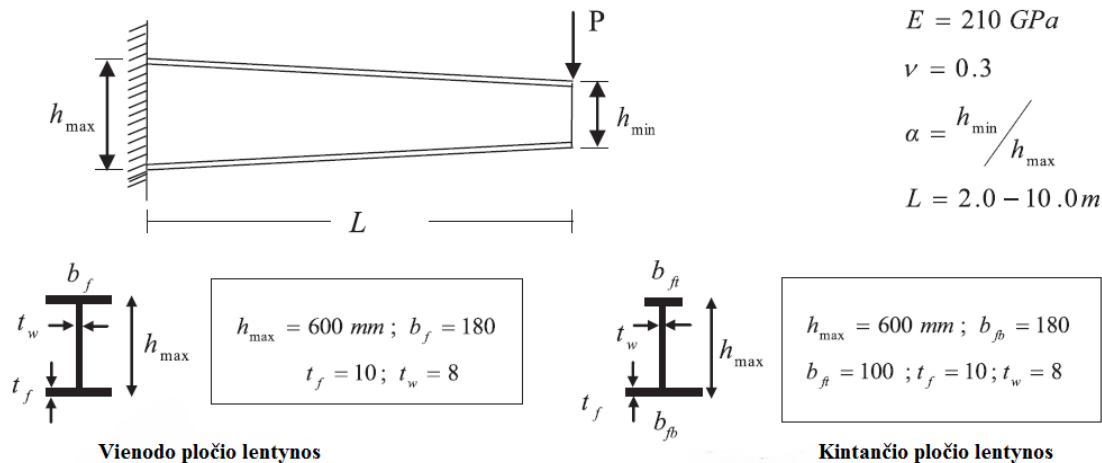
Naudojant kintančio skerspjūvio elementus, suvirintus iš liaunų lakštų, būtina tikrinti vietinį pastovumą, kadangi plonasieniai elementai pasižymi mažu sukamuoju standžiu ir lengvai pasiduoda vietiniam klupumui.



1.2 pav. Sijos, apkrautos trijuose taškuose, klumpo formos (Elastic... 2012)

B. Asgarianas, M. Soltani, F. Mohri (Asgarian *et al.* 2012) tyrė kintančio skerspjūvio plonasienių sijų sukamąjį klumpumą. Pritaikę sudėtingas matematines formules jie atliko analitinius skaičiavimus, kuriuos lygino su baigtinių elementų analizės metodais (FEM). Tam

buvo pasitelkta ANSYS programa, kurioje plokštelių (SHELL63) tipo elementais buvo sumodeliuoti tiriamieji objektai. Pirmai analizei atlikti buvo pasirinkta gembinė sija, kurios pirmuoju atveju kinta tik sienelės plotis, o kitu ir lentynos plotis. Sijos apkrautos netiesiškai, norint pasiekti sukamąjį klupumą.



1.3 pav. Nagrinėjamų dvitėjų sijų geometriniai parametrai ir apkrovimo schema (Asgarian *et al.* 2012)

Gauti rezultatai buvo lyginami su rezultatais, gautais iš baigtinių elementų programos, ir rezultatais, gautais A. Andrade metodu (Andrade 2007). Rezultatai parodyti 1 lentelėje.

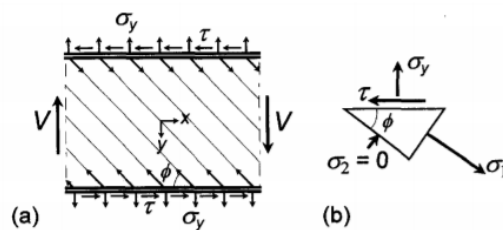
1.1 lentelė. Dvitėjinio kintančio profilio sijos, skersinio-sukamojo klupumo kritinės jėgos P_{cr}

$L \text{ (m)}$	α	Skersinio-sukamojo klupumo jėgos (kN)							
		Tolygaus pločio juosta				Kintančio pločio juosta			
		P_{cr}^{FEM} Ansys [30]	$P_{cr}^{Andrade}$ [18]	P_{cr} Šio metodo	$A(\%)$	P_{cr}^{FEM} Ansys [30]	$P_{cr}^{Andrade}$ [18]	P_{cr} Šio metodo	$A(\%)$
2	0.5	151.44	195.78	158.63	4.75	70.175	83.37	79.32	13.0
	1	166.45	253.9	169.0468	1.56	71.271	79.70	78.788	10.6
4	0.5	42.121	47.42	43.16	2.47	25.64	27.98	25.84	0.78
	1	41.695	43.68	42.93	2.96	18.488	19.12	18.793	1.65
6	0.5	21.984	23.45	22.87	4.03	14.724	15.47	15.16	2.96
	1	18.544	18.46	18.138	2.19	9.736	9.86	9.687	0.50
8	0.5	13.681	14.21	14.25	4.16	9.534	9.83	9.72	1.95
	1	10.577	10.75	10.567	0.09	6.306	6.4	6.301	0.08
10	0.5	9.18	9.41	9.22	0.44	6.536	6.73	6.71	2.66
	1	7.147	7.23	7.116	0.43	4.529	4.58	4.544	0.33

$$\Delta = (P_{cr} - P_{cr}^{FEM}) / P_{cr}^{FEM} \cdot 100. \quad (1.1)$$

Gauti rezultatai parodė, kad taikomo metodo analitinių skaičiavimų, kritinės apkrovos reikšmė gaunama didesnė nei baigtinių elementų programos, tačiau tikslesnė nei A. Andrade analitiniai skaičiavimai. Pastebėta, kad didinant sijos ilgį pasiekiami artimesni ir tikslesni rezultatai. Taip pat svarbus pastebėjimas, jog, atliekant 2 m ilgio sijos skaičiavimus, buvo pasiektas ne bendras sijos skersinis – sukamasis klupumas, o vietinis.

Vietinio pastovumo netekimas – tai elementų išsibangavimas esant normaliniams arba tangentiniams įtempiams. Dažniausiai vietinį klupumą plonasienėje sijoje sukelia veikiantys šlyties įtempiai. Atlikęs bandymus ir ištyręs prieš tai sukaupytus duomenis, T.Huglundas aprašė „pasuktų įtempių laukų“ metodą, kuriuo aiškinamas, šlyties jėgų poveikis plonasienės plokštelės įtempiams (Höglund 1971). Šis metodas gali būti taikomas skersai ir išilgai standintoms, nestandintoms ir banguotųjų sienelių lakštinėms sijoms. Šioje teorijoje apibrėžiama, kad gniuždomos, liaunos sijų sienelės turi esminį pokritinės laikomosios galios rezervą. Tol, kol nevyksta klupumas, membraniniai tempimo įtempiai σ_1 ir σ_2 yra panašūs, tačiau pasiekus kritinius klupumo įtempius, plokštelė išklumpa. Išklupus sieniei persiskirsto gniuždomieji įtempiai ($\sigma_1 \gg \sigma_2$) (žr. 1.4 pav.).



1.4 pav. Gniuždomos plonasienės sienelės įtempių pasiskirstymas (Höglund 1972)

Esant ilgoms sijoms, kurių sąstandos įrengtos tik ties galais, tik sijos sienelė suteikia jai standumą ir neleidžia juostoms susisukti. Išklupus sieniei nelieka skersinių membraninių įtempių ($\sigma_2 = 0$), o tempimo įtempiai σ_1 didėja iki plieno takumo ribos. Nagrinėdami „pasuktų įtempių laukų“ modelį (1.5 pav.) matome, jog:

$$\sigma_1 = \frac{\tau}{\tan \varphi}, \quad (1.2)$$

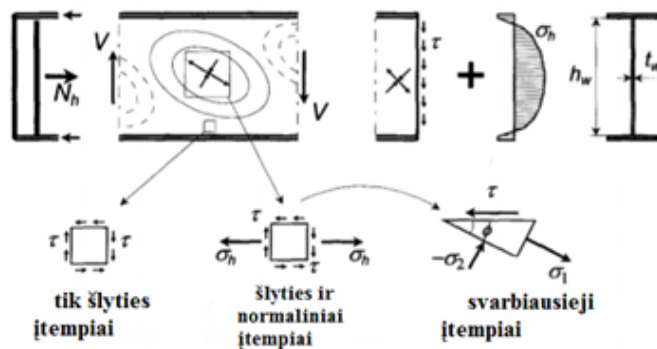
$$\sigma_2 = -\tau \cdot \tan \varphi, \quad (1.3)$$

čia

φ – svarbiausiųjų įtempių lauko pasisukimo kampas;

N_h – bendra išilginė jėga sisijos sienelėje;

σ_h – įtempiai, veikiantys išilgine sienelės kryptimi.



1.5 pav. Įtempių pasiskirstymas plonasienėje sienelėje, sijos, kuri sustandinta ties atramomis; „pasuktų įtempių laukas“ (Höglund 1972)

Iš formulių matyti, jog maksimalūs gniuždymo įtempiai pasiekiami, kai kampas tarp svarbiausiųjų įtempių lygus 45° :

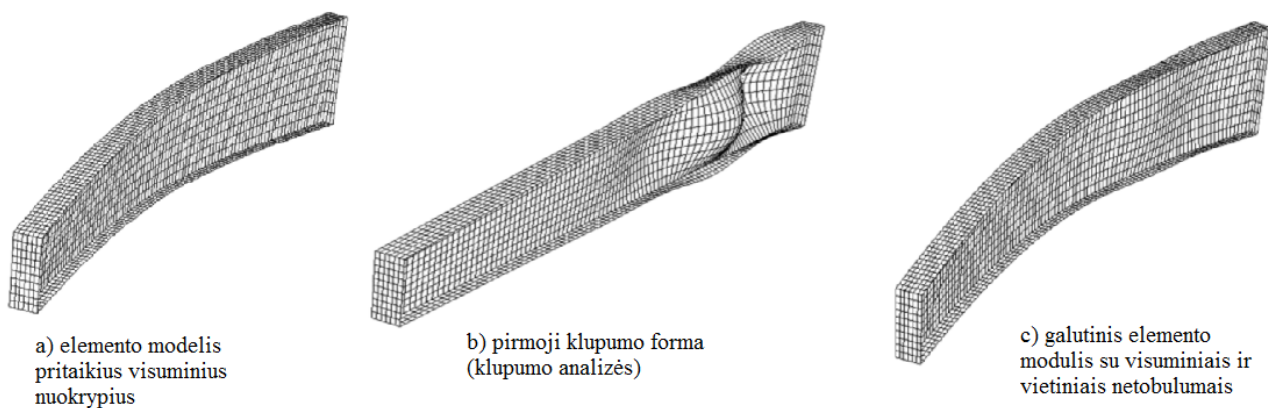
$$\sigma_2 = -\tau_{cr}. \quad (1.4)$$

Kritiniai klumpamieji įtempiai, kurie pritaikyti ir Eurokodo 1993-1-5 dalyje, randami pagal formulę:

$$\tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_e = k_\tau \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{h_w} \right)^2. \quad (1.5)$$

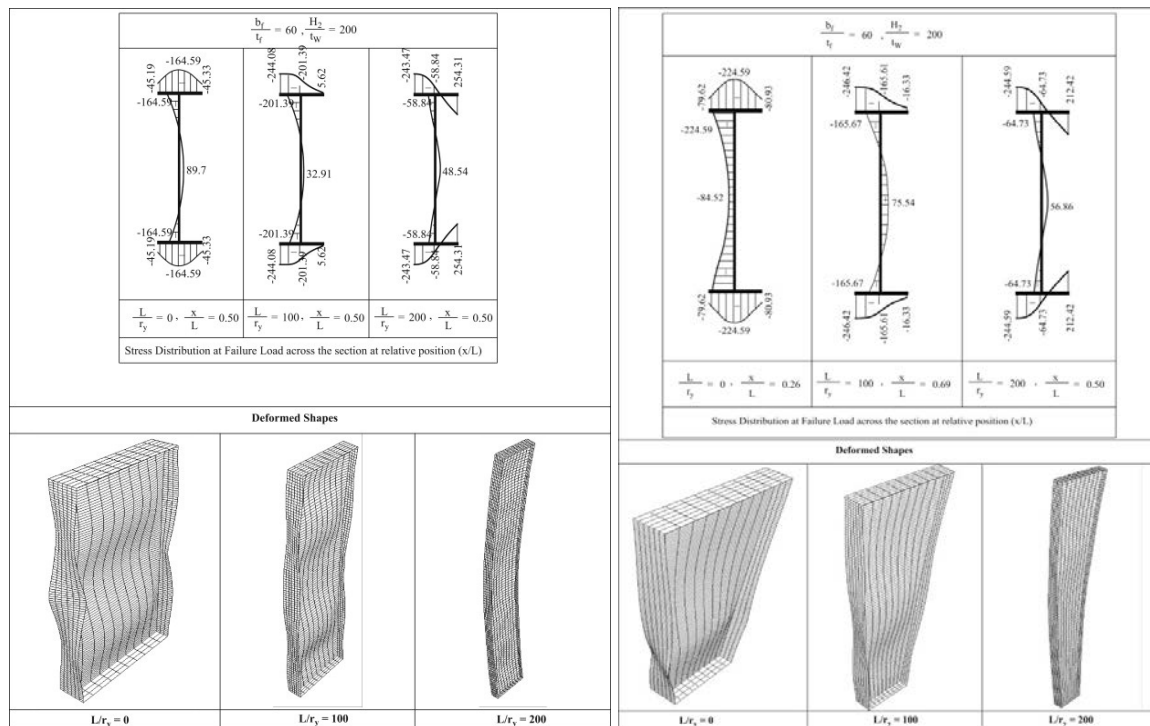
Šie įtempiai toliau įrašomi į sąlyginio plokštelės liaunio skaičiavimus. Iš skaičiavimų matome, kad didėjant kampui φ , tempimo įtempiai σ_1 mažėja, o tangentiniai atitinkamai didėja, dėl šio principo ši teorija ir vadinama „pasuktų įtempių lauku“.

A. H. Salemas su bendraautorais (Salem *et al.* 2009) tyrė plonasienes kintančio skerspjūvio kolonas. Darbo tikslas buvo ištirti vietinio klumpo priklausomybę nuo skerspjūvio parametrų santykio, t.y. santykio tarp sienelės/lentynos storio ir aukščio su kolonos skerspjūvio kitimo santykiu. Analizei atlikti buvo pasitelkta baigtinių elementų programa ABAQUS, kurioje elementai buvo modeliuojami plokšteliniais „SHELL S4“ tipo elementais. Analizėje buvo pritaikyti nuokrypiai, visuminiai nuokrypiai buvo sumodeliuoti, elementą pakreipus iš plokštumos santykiu $L/1000$ (5 pav.), o vietiniai nuokrypiai gauti atlikus klumpo analizę iš pirmosios klumpo formos. Sulyginus įvairių standartų rekomenduojama vietinio išlinkio reikšmes, pasirinktas optimalus $H_2/400$ santykis vietiniam išlinkiui (1.6 c pav.).



1.6 pav. Baigtinių elementų programa sumodeliuotas kolonos modelis (Salem *et al.* 2009)

Skaičiavimams pasirinkti geometriniai kolonos santykiai: skerspjūvio aukščio $H_{\max}/H_{\min}$ nuo 1 iki 4, sienelės aukščio su storio h_{av}/t_f nuo 50 iki 250 ir elemento ilgio su aukščiu L/r_y . Analizės rezultatai (1.7 pav.) parodė, kad visuose elementuose, kuriuose įvedamos sąstandos norint suvaržyti bendrąjį poslinkį, pasireiškė vietinis klumpas.



1.7 pav. Įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje ir klupumo formos, kai skerspjūvio santykiai $b_f/t_f=60$, $H_{max}/t_w=200$ (Salem *et al.* 2009)

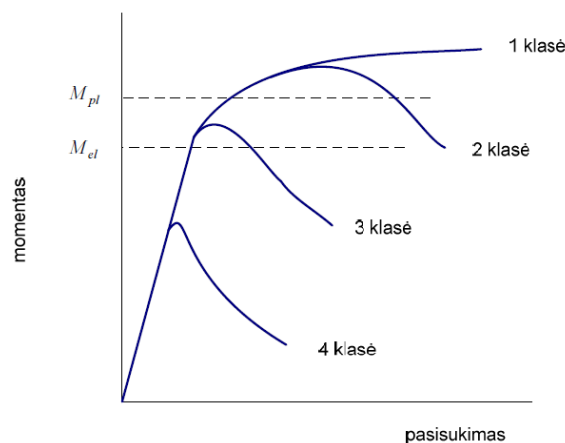
Rezultatai parodė, kad:

- kritinė jėga labiausiai priklauso nuo sienelės/lentynos aukščio ir storio santykio esant mažam skaičiuojamojo ilgio ir aukščio santykiui (iki 100), taip yra dėl vietinio klupumo pasireiškimo, tačiau esant dideliame santykiui, daugiau kaip 100) – sienelės ar lentynos geometriniai rodikliai yra nereikšmingi, tada pasireiškia visuminio pastovumo netekimas arba nepakankamas skerspjūvio stiprumas.
- Gniuždomiems elementams, sudarytiems iš dvitėjinio skerspjūvio, reikšmingesnis sienelės storio ir aukščio santykis, nei lentynos.
- Dvitėjų skerspjūvio atlaikomoji kritinė jėga mažėja, didėjant skaičiuojamojo ilgio ir aukščio santykiui.

1.2. Plonasienės metalinės konstrukcijos

Europos Sąjungoje galiojančios statinių projektavimo taisyklės yra Euronormos (EN). Europos standartams (EN) yra suteiktas Lietuvos standartų (LST EN) statusas, leidžiantis jais vadovautis Lietuvos Respublikoje. Pagal plieninių konstrukcijų projektavimo normas (LST EN 1993-1-5:2007) apskaičiuojant konstrukcijų laikomąją galią, pirmiausia reikia nustatyti skerspjūvio klasę. Vienų skerspjūvių dalių standumas, t.y. sienelės, juostos ir t.t., leidžia plastines deformacijas, kiti skerspjūviai dėl liaunų sudedamųjų gali netekti vietinio pastovumo jau tamprioje stadijoje (Daniūnas 2012). Eurokode siekiant apibūdinti skerspjūvių elgseną yra apibrėžtos keturios skerspjūvių klasės:

- 1 klasės skerspjūviai – tai skerspjūviai, kurie gali sudaryti analizei pagal plastiškąjį modelį reikiamą sukamosios gebos plastinį lankstą, kai bendroji galia nesumažėja;
- 2 klasės skerspjūviai – tai skerspjūviai, kurie pasiekia savo plastinę lenkiamąją galią, tačiau dėl vietinio klupumo jų sukamoji geba ribota;
- 3 klasės skerspjūviai – tai skerspjūviai, kuriuose įtempiai plieninio elemento kraštiniame gniuždomame sluoksnyje, kai daroma tamprioji įtempių pasiskirstymo prielaida, gali pasiekti stiprį pagal takumo ribą, tačiau vietinis klupumas neleidžia pasiekti plastinės lenkiamosios galios;
- 4 klasės skerspjūviai – tai skerspjūviai, kuriuose vietinis klupumas įvyksta prieš pasiekiant stiprį pagal takumo ribą vienoje ar daugiau skerspjūvio dalių. Ketvirtos klasės skerspjūviams atskirose skerspjūvio dalyse leidžiamas vietinio pastovumo netekimas tamprioje stadijoje ir tai turi būti įvertinta apskaičiuojant viso skerspjūvio laikomąją galią.



1.8 pav. Skerspjūvio klasių elgsena (Daniūnas 2012)

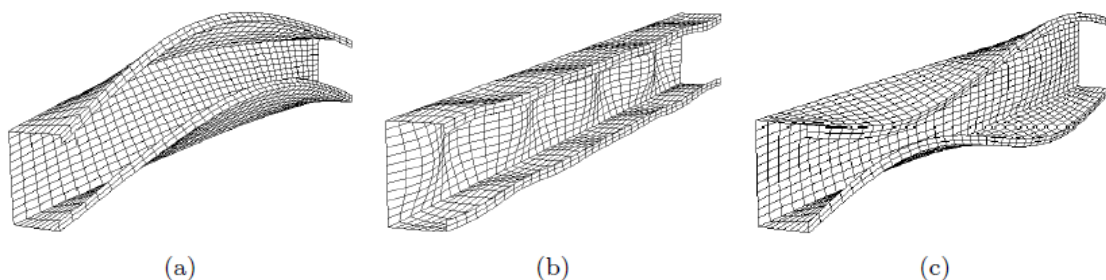
Sudėtinio skerspjūvio elementai, sudaryti iš liaunų plonų lakštų – tai plonasienės metalinės konstrukcijos, priskirtos 4 klasės skerspjūviams. Skaičiuojant ketvirtos klasės skerspjūvius, reikia atsižvelgti į tai, jog plonasieniai elementai, veikiami įrąžų, gali pasiekti šiuos ribinius būvius (Daniūnas 2012):

- tampraus pastovumo ribinis būvis, kai plonasienis elementas netenka laikomosios galios dėl vietinio ar bendrojo pastovumo netekimo;
- tamprus ribinis būvis, kai labiausiai įtemptose skerspjūvio dalyse pasiekiami įtempiai lygūs didžiausiems įtempiams, kai medžiaga dirba tampriai;
- plastinis ribinis būvis, kai skerspjūvyje pasiekiami tamprumo įtempiai, tariant, kad medžiaga dirba tampriai plastiškai. Šiuo atveju neturi būti vertinamas medžiagos sustiprėjimas ir maksimalūs įtempiai priimami didžiausi, kai laikoma, jog medžiaga dirba tampriai.

- suirimo ribinis būvis, kai pasiekama skerspjūvio laikomoji galia vertinant medžiagos sustiprėjimą.

Plonasienių elementų skaičiavimo sudėtingumą nulemia liauni skerspjūvio elementai, kurie gali netekti vietinio pastovumo tamprioje stadijoje. Tampraus plonasienio elemento netekimo formos (Daniūnas 2012):

- Vietinio pastovumo netekimas (1.9 pav. b) – kai atskiri skerspjūvio elementai netenka pastovumo. Laikoma, kad skerspjūvio elementų sujungimai ir kampai, išlieka tiesūs ir nepakitę.
- Pastovumo netekimas dėl skerspjūvio distorsijos (1.9 pav. c) – skerspjūvio formos pasikeitimas, nevertinant vietinio pastovumo.
- Bendrasis pastovumo netekimas (1.9 pav. a) – elemento pastovumo forma, kuri apima elemento išlinkius iš išlenkimo plokštumos įvertinant pasisukimus.



1.9 pav. Elemento skerspjūvio pastovumo formos: a) lenkiamasis-sukamasis klupumas, b) vietinis klupumas, c) distorsinio stabilumo netekimas (Silvestre, Camotim 2003)

Šiame darbe nagrinėjami kintančio skerspjūvio elementai iš suvirintų lakštų – tai dvitėjis skerspjūvis su liauna, ketvirtos klasės sienelė. Sienelės liaunumas nusako skerspjūvio stiprumą, kadangi ji pirmiausia netenka vietinio pastovumo. Vietinio pastovumo skaičiavimams naudojamas eurokodas – EN 1993-1-5 dalis „Lakštinių konstrukcijų elementai“.

1.3. Plokštelių elementų elgsena

Nagrinėjant plonasienesius elementus yra priimama prielaida, kad skerspjūvis sudarytas iš liaunų stačiakampių plokštelių, kurios tarpusavyje yra sujungtos ir kurias jėgos veikia jų plokštumoje. Nustatant skerspjūvio vietinį pastovumą, nagrinėjamos jų sudarančių plokštelių elgsenos, kurios skiriasi priklausomai nuo plokštelių veikiančios apkrovos (gniuždymas, tempimas, lenkimas ar bendras šių jėgų poveikis) ir įtvirtinimo sąlygų. Nagrinėjamas dvitėjis skerspjūvis, kurio sienelė gali būti modeliuojama kaip tolygiai gniuždoma plokštelė, kurios kritiniai įtempiai gali būti apskaičiuoti taip:

$$\sigma_{cr} = k_{\sigma,p} \cdot \sigma_e = k_{\sigma,p} \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot t^2}{12(1 - \nu^2) \cdot b^2}, \quad (1.6)$$

čia

$k_{\sigma,p}$ – klupumo koeficientas, nustatomas pagal plokštelės įtvirtinimo sąlygas ir veikiančias įrašas,

E – tamprumo modulis,

ν – Puasono koeficientas,

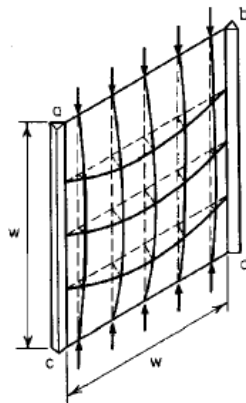
t – plokštelės storis,

b – plokštelės plotis.

Plonasienis elementas netenka pastovumo, kai jame veikiantys įtempiai yra didesni už kritinius.

1.3.1. Pokritinė plokštelių elgsena

Liauna plokštelė, netekusi pastovumo, gali ir toliau perimti apkrovą, kadangi plokštelė nėra visiškai laisva, ji įtvirtinta bent dviem kraštinėmis – tai vadinama pokritinės galios rezervu.



1.10 pav. Stačiakampės plokštelės pokritinė elgsena (Daniūnas 2012)

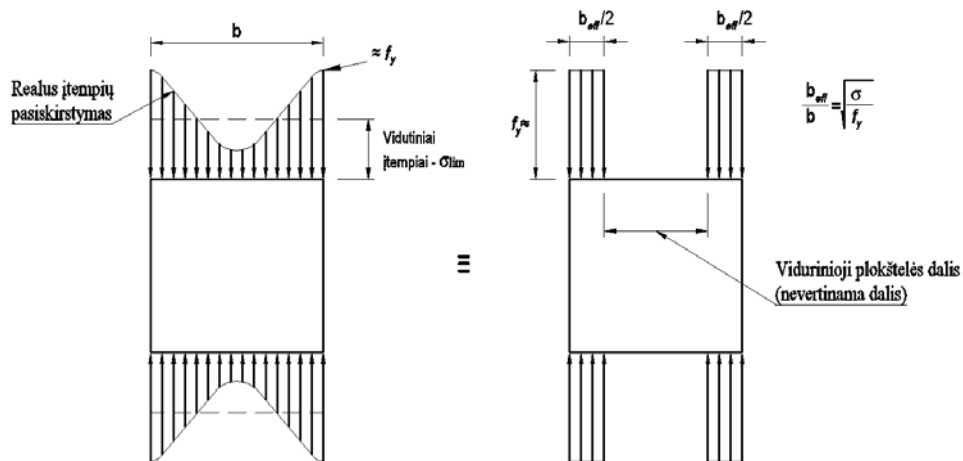
Pokritinėje stadijoje įtempiai išklupusioje plokštelėje persiskirsto: įtempiai prie plokštelės įtvirtinimų didėja, o ties išklupusiu plokštelės viduriu mažėja. Įtempių mažėjimas ties išklupusia plokštelės dalimi rodo, jog ši skerspjūvio dalis nebedirba – didėja poslinkiai ir nebegali perimti apkrovos. Įtempiai ties lakšto įtvirtinimais didėja, kol pasiekama plieno takumo riba. Tolesnis skerspjūvio apkrovimas sukeltų plokštelės suirimą (Daniūnas 2012).

Atlikti analitinius skaičiavimus su realiu įtempių pasiskirstymu yra sudėtinga, todėl yra naudojami supaprastinti metodai:

- efektyviojo pločio metodas;
- sumažintų įtempių metodas.

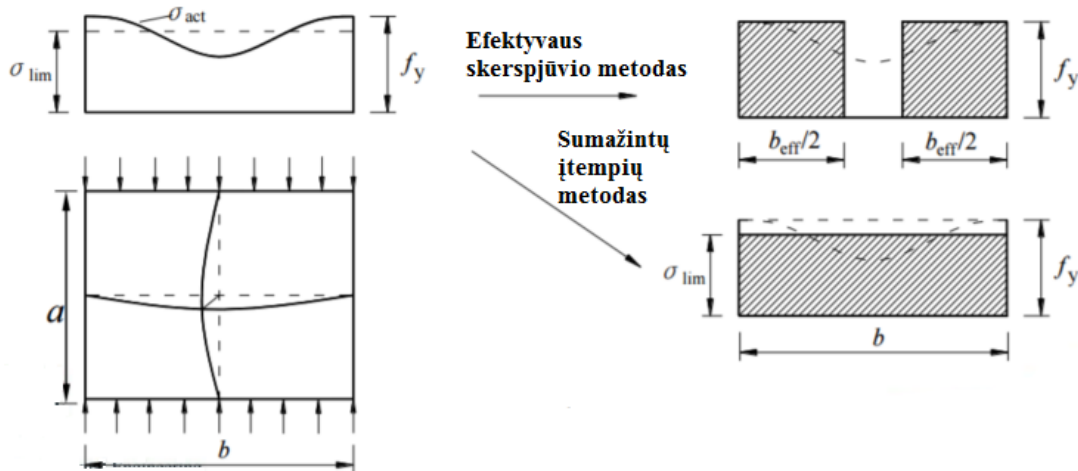
Efektyviojo pločio koncepcija – pagal ją tariama, kad lanksčiai įtvirtintoje plokštelėje ribiniame būvyje vidurinė plokštelės dalis (suklupusi dalis) nevertinama, o kraštinėse dalyse

įtempiai yra pasiskirstę tolygiai. Efektyvusis plotis b_{eff} priimamas kaip efektyvus skerspjūvis. Efektyvaus pločio metodas pavaizduotas 1.11 pav.



1.11 pav. Efektyvaus pločio koncepcija (pagal Daniūną 2012)

Sumažintųjų įtempių metodas – veikiantys įtempiai σ_{act} yra sumažinami ir tariama kad veikia visu skerspjūviu tolygiai ($\sigma_{lim} = const.$). Šis metodas taikytinas sudėtingiems skerspjūviams, tačiau jo trūkumas – neįvertinamas tikras įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje, įvykus klupumui neatsižvelgiama į išklupusią skerspjūvio dalį ir įtempių persiskirstymą iš vienos plokštelės į kitą.



1.12 pav. Sumažintų įtempių ir efektyvaus skerspjūvio metodai (King 2014)

Esant gniuždymui, abiem metodais gauti rezultatai yra panašūs. Tačiau sumažintųjų įtempių metodas yra mažiau tikslus, nes neatsižvelgiama į plokštelės išklupimą, sunku numatyti vidutines įtempių reikšmes po persiskirstymo. Šį metodą taip pat riboja silpniausias skerspjūvio elementas. Efektyviojo pločio metodu gaunamas didesnis skerspjūvio atsparumas, esant netolygiam gniuždymui, kadangi yra atsižvelgiama į plokštelės įtempių persiskirstymą ir pokritinę elgseną.

1.4.Kintančio 4 klasės skerspjūvio skaičiavimo algoritmas pritaikant LST EN 1993-1-5:2007 skaičiavimo metodus

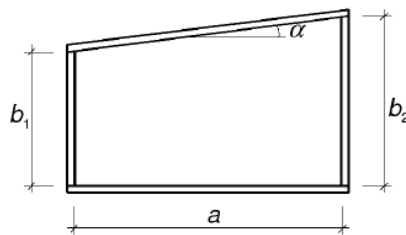
Skaiciuojant plonasienius elementus pagal euronormas, yra taikytini trys metodai:

- efektyviojo pločio metodas;
- sumažintų įtempių metodas;
- baigtinių elementų analizės metodai (BEM)

1.4.1. Efektyviojo pločio metodas

Lakštinių elementų, kurių skerspjūvio klasė yra ketvirta, laikomoji galia gali būti nustatyta pagal EN 1993-1-1, tačiau pritaikius gniuždomųjų lakštinių elementų efektyviojo skerspjūvio ploto ir skerspjūvio duomenis (A_{eff} , L_{eff} , W_{eff}). Pagal LST EN 1993-1-5 skaičiuojant skerspjūvio laikomąją galią turi būti atsižvelgta į vietinio klupumo poveikį, taikant efektyviojo skerspjūvio rodiklius. Šis metodas gali būti taikomas, esant šioms sąlygoms:

- plokštelės yra stačiakampės, o juostos – lygiagrečios;
- visų nestandintų atvirų skylių ar išpjovų skersmuo yra ne didesnis kaip $0,05b$ (čia b yra plokštelės plotis)
- elementų skerspjūvis yra pastovus;
- sąstandos yra stačiakampės ir eina išilgine, skersine arba abiem kryptimis;
- juostos gali būti nestačiakampės, jei kampas α_{lim} yra ne didesnis kaip 10° (žr. 1.13 pav.).



1.13 pav. Kampas $\alpha = \alpha_{lim}$ (EN 1993-1-5)

Šiuo metu yra keletas galimybių, kaip pritaikyti tas pačias skaičiavimo metodikas kintančio skerspjūvio elementams. Vieną iš jų aprašo A. Hirtas ir M. Crisinelis (Hirt, Crisinel 2010). Jie, pritaikę papildomas formules, apskaičiuoja atitinkamus ekvivalenčius skerspjūvio rodiklius:

Koeficiento C apskaičiavimas kiekvienam elemento tipui:

1. Kintančio skerspjūvio elementui pavaizduotam 1.14 pav. b:

$$C = 0,08 + 0,92r. \quad (1.7)$$

2. Kintančio skerspjūvio elementui, pavaizduotam 1.14 pav. c:

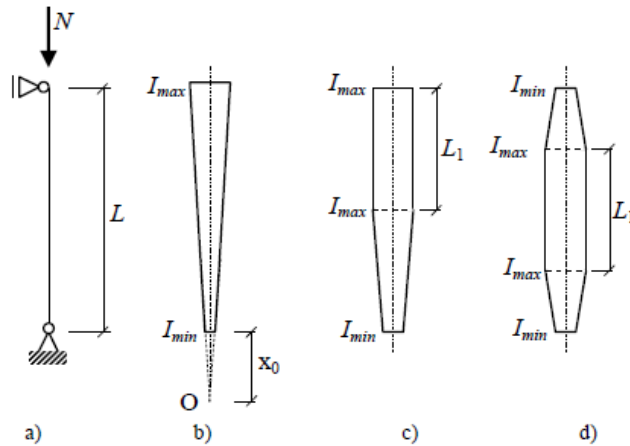
$$C = (0,08 + 0,92r) + (0,32 + 4\sqrt{r} - 4,32r) \left(\frac{L_1}{L}\right)^2, L_1 < 0,5L. \quad (1.8)$$

3. Kintančio skerspjūvio elementui pavaizduotam 1.14 pav. d:

$$C = (0,17 + 0,33r + 0,5\sqrt{r}) + (0,62\sqrt{r} - 1,62r) \left(\frac{L_1}{L}\right), L_1 < 0,5L, \quad (1.9)$$

čia

$$r = \sqrt{I_{y,min}/I_{y,max}} \quad (1.10)$$



1.14 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio elementai (b , t_f ir t_w dydžiai yra konstantos)

(Hirt, Crisinel 2010)

Toliau koeficientas C naudojamas ekvivalentiniam kintančio skerspjūvio elemento inercijos momentui apskaičiuoti:

$$I_{eq,y} = C \cdot I_{y,max}, \quad (1.11)$$

Skerspjūvio ekvivalentinio aukščio reikšmė nustatoma pagal formulę:

$$h_{eq} = h_{max} \sqrt{0,283 + 0,434\gamma + 0,283\gamma^2}, \quad (1.12)$$

čia

h_{max} – maksimalus skerspjūvio aukštis;

γ – skerspjūvio kintamumo koeficientas h_{min}/h_{max} ;

$I_{y,max}$ – maksimalus inercijos momentas.

Skaičiuojant skerspjūvio laikomąją galią, kai skerspjūvio juosta pakankamai plati, lyginant su elemento ilgiu, būtina atsižvelgti į atsiknojomą dėl šlyties (EN 1993-1-5). Efektyvusis plotis b_{eff} , atsižvelgiant į atsiknojomą dėl šlyties tampriosiomis sąlygomis, turi būti nustatytas pagal (1.12) formulę:

$$b_{eff} = \beta \cdot b_0, \quad (1.13)$$

čia

β – efektyviojo pločio koeficientas, kuris randamas pagal euronormų (EN 1993-1-5:2006) efektyviojo pločio koeficiento lentelę:

1.2 lentelė. Efektyviojo pločio koeficientas β

κ	Patikra	β reikšmė
$\kappa \leq 0,02$		$\beta = 1,0$
$0,02 < \kappa \leq 0,70$	lenkimas tarpatramyje	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4\kappa^2}$
	lenkimas ties atrama	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500 \kappa} \right) + 1,6\kappa^2}$
$> 0,70$	lenkimas tarpatramyje	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9 \kappa}$
	lenkimas ties atrama	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6 \kappa}$
visi κ	galinė atrama	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa)\beta_1$, bet $\beta_0 < \beta_1$
visi κ	gembė	$\beta = \beta_2$ ties atrama ir gale
$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e$; čia: $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{se}}{b_0 t}}$; kur A_{se} yra visų b_0 atkarpoje esančių išilginių sąstandų skerspjūvio plotas, o kiti simboliai nurodyti 3.1 ir 3.2 paveiksluose.		

Atsiknoijimas dėl šlyties – tai pirmosios eilės analizė, kuri negali būti painiojama su plokštelės klupumu, kuris yra antrosios eilės analizės efektas.

Kai tenkinama (1.13) sąlyga, atsiknoijimo dėl šlyties galime nepaisyti, kadangi juostos išsikišusi dalis yra pakankamai trumpa, įtempiai persiskirsto nežymiai ir galime laikyti, jog juostoje jie pasiskirsto tolygiai.

$$b_0 < L_e/50, \quad (1.14)$$

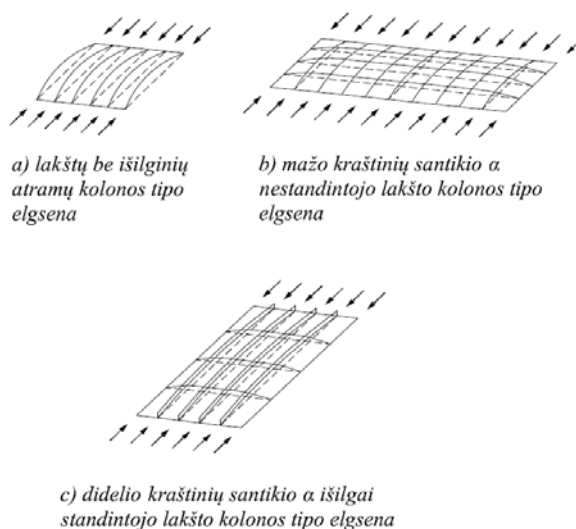
čia

b_0 – juostos iškyša arba pusė vidinio elemento pločio;

L_e – yra atstumas tarp taškų, kuriuose lenkiamasis momentas lygus nuliui.

Nagrinėdami vietinį plokštelių pastovumą teigėme, kad gniuždoma plokštelė turi papildomą pokritinį laikomosios galios rezervą, leidžiantį atlaikyti papildomą apkrovą, persiskirsčius įtempiams. Šis atvejis galimas, tik kai plokštelės kraštinių santykis a/b nedidelis – vyksta „plokštelės“ tipo klupimas, kai šis santykis sumažėja ($a=b$, $a>b$), tai pasireiškia „kolonos“ tipo klupimas. Kolonos tipo klupimui nepasireiškia pokritinės laikomosios galios rezervas, plokštelės suirimas įvyksta staiga. Kolonos tipo elgsena parodyta 1.15 pav.

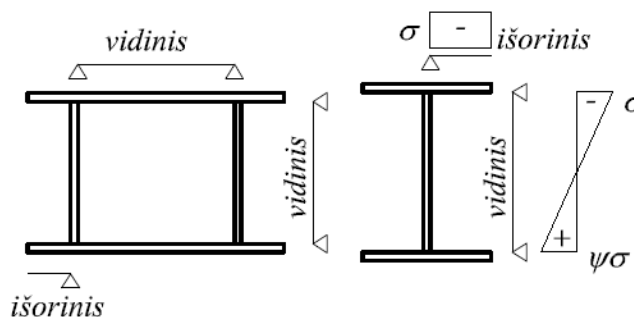
Plokštelės esant kolonos tipo klupimui visada atlaiko mažesnius kritinius įtempius, kadangi plokštelė traktuojama kaip laisvai atremtais, išilginiais kraštais. Skaičiuojant plokšteles, kurių kraštinių santykis yra nedidelis, būtina atlikti interpoliaciją tarp abiejų tipo klupimų (Plieninės konstrukcijos... 2012).



1.15 pav. Kolonos tipo elgsena (EN 1993-1-5)

1.4.1.1. Plokštelės tipo klupimas

Kaip ir buvo minėta, kad plonasieniai skerspjūviai sudaryti iš plokštelių, kurios atitinkamai skirstomos į vidinius ir išorinius elementus (1.16 pav.):



1.16 pav. Skerspjūvio elementai: vidiniai, ir išoriniai (EN 1993-1-5)

Norint apskaičiuoti efektyvųjį skerspjūvio plotą b_{eff} arba efektyvųjį plotą A_{eff} , nestandintiems lakštiniam elementams, taikomas pataisos koeficientas ρ . Tikrasis elemento ilgis $\bar{b}$ yra dauginamas iš pataisos koeficiento ρ , taip gaunamas efektyvusis plotis, atmetus išklupusią plokštelės dalį:

$$b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}, \quad (1.15)$$

$$A_{eff} = \rho \cdot A. \quad (1.16)$$

Pataisos koeficientas ρ gaunamas iš 1.3 ir 1.4 lentelių, priklausomai nuo plokštelės padėties elemente (vidinis ar išorinis), nuo plokštelės sąlyginio liaunio $\bar{\lambda}_p$, nuo įtempių pasiskirstymo koeficiento ψ . Dvitėjams ir dėžiniams skerspjūviams įtempių koeficientas ψ sienelėje gaunamas pagal įtempių pasiskirstymą, pagrįstą gniuždomos juostos efektyviuoju skerspjūvio plotu ir suminiu sienelės skerspjūvio plotu.

1.3 lentelė. Vidiniai gniuždomieji elementai (EN 1993-1-5:2006)

Įtempių pasiskirstymas (teigiami įtempiai, kai vyksta gniuždymas)				Efektyvusis ^p plotis b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$; $b_{e1} = 0,5b_{eff}$; $b_{e2} = 0,5b_{eff}$.		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$; $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$; $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$.		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$; $b_{e1} = 0,4b_{eff}$; $b_{e2} = 0,6b_{eff}$.		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Klupumo koeficientas k_{σ}	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1 - \psi)^2$

Pataisos koeficientas, esant vidiniams elementams (dvi plokštelės kraštinės įtvirtintos), randamos pagal (1.15) sąlygą:

$$\rho = 1,0, \text{ kai } \bar{\lambda}_p \leq 0,673;$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0, \text{ kai } \bar{\lambda}_p > 0,673. \quad (1.17)$$

1.4 lentelė. Išoriniai gniuždomieji elementai (EN 1993-1-5:2006)

Įtempių pasiskirstymas (teigiami įtempiai, kai vyksta gniuždymas)			Efektyvusis ^p plotis b_{eff}		
			$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$.		
			$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$.		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Klupumo koeficientas k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
			$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$.		
			$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$.		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Klupumo koeficientas k_{σ}	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Pataisos koeficientas, esant išoriniams elementams (viena plokštelės kraštinė įtvirtinta), randamas pagal (1.16) sąlygą:

$$\rho = 1,0, \text{ kai } \bar{\lambda}_p \leq 0,748;$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0, \text{ kai } \bar{\lambda}_p > 0,748. \quad (1.18)$$

čia

$\bar{\lambda}_p$ – plokštelės sąlyginis liaunis, kuris randamas pagal (1.17 ir 1.18) formules.

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,p}}}, \quad (1.19)$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}, \quad (1.20)$$

čia

k_σ – klupumo koeficientas, atitinkantis įtempių koeficientą ψ ir kraštinės sąlygas, nurodytas 1.3 arba 1.4 lentelėse.

$\sigma_{cr,p}$ – tamprieji kritiniai lakšto įtempiai:

$$\sigma_{cr,p} = k_\sigma \cdot \sigma_E = k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{t_w}{b}\right)^2. \quad (1.21)$$

Pirmojoje (1.17) plokštelės sąlyginio liaunio formulėje pastebimas *von Karman* įnašas, kuris apibūdina pokritinį laikomosios plokštelės galios rezervą. Ši teorija atvaizduoja idealiai tamprios plokščiosios plokštelės elgseną. Antroji (1.18) formulė buvo sudaroma prieš bandymo rezultatus, kad būtų atsižvelgta į geometrinius plokščiosios plokštelės netobulumus, liekamuosius įtempius ir sąveiką tarp medžiagos netiesinio įtempių pasiskirstymo ir plokštelės klupimo (Comentary... 2007).

Esant išilginėms plokštelės sąstandoms, efektyvusis skerspjūvio plotas randamas taip:

$$A_{c,eff} = \rho_c \cdot A_{c,eff,loc} + \sum b_{edge,eff} \cdot t, \quad (1.22)$$

čia

$A_{c,eff,loc}$ – yra visų sąstandų ir plokštelių, kurios visiškai ar iš dalies yra gniuždomoje srityje, išskyrus efektyviasias dalis, efektyvusis skerspjūvio plotas (EN1993-1-5 4.5.1.3 p.). Apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A_{c,eff,loc} = A_{sl,eff} + \sum \rho_{loc} \cdot b_{c,loc} \cdot t, \quad (1.23)$$

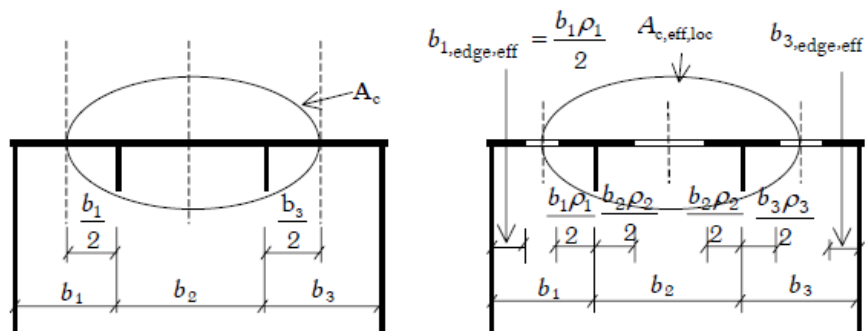
čia

$\sum_c$ – taikoma standintojo lakšto pločio daliai, kuri gniuždoma, išskyrus dalis $b_{edge,eff}$, žr. 1.16 paveikslą;

$A_{sl,eff}$ – visų A_{sl} suminio skerspjūvio ploto išilginių sąstandų, esančių gniuždomoje srityje efektyviojo skerspjūvio ploto suma;

$b_{c,loc}$ – kiekvienos plokštelės gniuždomosios dalies plotis;

ρ_{loc} – kiekvienos plokštelės pataisos koeficientas.



1.17 pav. Tolygiai gniuždomas standintasis lakštas (EN1993-1-5)

Efektinio skerspjūvio skaičiavimo metodas paremtas prielaida, kad plokštelės kraštuose – labiausiai įtemptoje zonoje, būtų pasiekta takumo įtempių riba f_y .

1.4.1.2. Kolonos tipo klupimas

Kaip jau buvo minėta, kolonos tipo klupimas pasireiškia, kai plokštelės kraštinių santykis yra mažesnis už vienetą ($a/b < 1$). Šio tipo klupimui naudojamas klupumo koeficientas χ_c . Skaičiuojant tampriuosius kritinius plokštelės įtempius, pašalinami išilginiai plokštelės kraštų įtvirtinimai, t.y. plokštelė traktuojama, kaip laisvai atremtais išilginiais kraštais. Tamprieji įtempiai, nestandintai kolonos tipo plokštei, randami pagal (1.20) formulę:

$$\sigma_{cr,c} = k_\sigma \cdot \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{t_w^2}{a^2} \quad (1.24)$$

Esant išilginėms sąstandoms:

$$\sigma_{cr,sl} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{sl,1}}{A_{sl,1} \cdot a^2}, \quad (1.25)$$

čia

E – plieno tamprumo modulis;

a – atstumas tarp skersinių sąstandų;

ν – Puasono koeficientas;

t_w – plokštelės storis;

$I_{sl,1}$ – suminio sąstandos ir gretimų lakšto dalių skerspjūvio ploto inercijos momentas;

$A_{sl,1}$ – suminis sąstandos ir gretimų lakšto dalių skerspjūvio plotas.

Sąlyginis kolonos tipo plokštelės liaunis nustatomas taip:

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (1.26)$$

Kolonos tipo klupimo koeficientas χ_c , kai lakštai nestandinti išilginėmis sąstandomis, skaičiuojamas pagal EN 1993-1-1 6.3.1.2.:

$$\chi_c = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}_c^2}}, \quad (1.27)$$

čia

φ – koeficientas, randamas pagal:

$$\varphi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_c - 0,2) + \bar{\lambda}_c^2 \right]; \quad (1.28)$$

α – nuokrypos koeficientas randamas pagal klupumo kreivę. Esant nestandintiems lakštams, turi būti imamas, pagal a klupumo kreivę, tada $\alpha = 0,21$, tačiau esant išilginėms plokštelės sąstandoms, turi būti padidintas:

$$\alpha_e = \alpha + \frac{0,09}{i/e}, \quad (1.29)$$

čia

i – koeficientas, randamas taip:

$$i = \sqrt{\frac{I_{sl,1}}{A_{sl,1}}}, \quad (1.30)$$

e – didžiausias atstumas nuo atitinkamų lakštų ir vienpusės sąstandos sunkio centrų (pagal A priedą).

1.4.1.3. Plokštelės tipo ir kolonos tipo klupimo sąveika

Pirmiausia nustatėme pataisos koeficientą ρ plokštelės klupimo atveju ir klupumo koeficientą χ_c . Kai plokštei pasireiškia kolonos klupimas, esant mažoms plokštelėms, negalime vadovautis nei vienu nei kitu pataisos koeficientu, turime apskaičiuoti sąveiką tarp šių koeficientų. Sąveika randama interpoliuojant tarp pataisos koeficientų:

$$\rho_c = (\rho - \chi_c)\xi(2 - \xi) + \chi_c, \quad (1.31)$$

čia

ξ – parametras apibūdinantis „atstumą“ tarp plokštelės klupimo tapriųjų įtempių ir kolonos tipo klupimo įtempių.

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p}}{\sigma_{cr,c}} - 1, \text{ bet } 0 \leq \xi \leq 1 \quad (1.32)$$

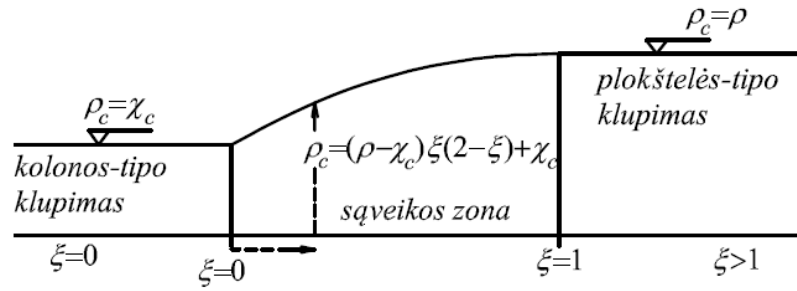
ρ – plokštelės tipo klupumo koeficientas;

χ_c – kolonos tipo klupumo koeficientas;

$\sigma_{cr,p}$; $\sigma_{cr,c}$ – tamprieji kritiniai lakšto ir kolonos tipų klumpamieji įtempiai.

Efektyvusis skerspjūvio plotis:

$$b_{c,eff} = \rho_c \cdot b. \quad (1.33)$$



1.18 pav. Kolonos tipo ir plokštelės tipo klupimo sąveika

Pagal B. Johansona (Johansson *et al.* 2007) ξ parametro režiai yra aiškinami taip:

- Kolonos tipo klupimo įtempiai visada bus mažesni už plokštelės tipo tampruosius kritinius įtempius $\sigma_{cr,c} < \sigma_{cr,p}$, todėl ξ visada teigiamas.
- Sutinkama, kad kolonos tipo klupimas nepasireiškia, kai plokštelės tipo tamprieji kritiniai įtempiai yra daug didesni nei kolonos tipo, tarkime $\sigma_{cr,p} \geq 2 \cdot \sigma_{cr,c}$, tada sąveikos pataisos koeficientas ρ_c yra lygus pataisos koeficientui ρ ($\rho_c = \rho$).

1.4.1.4. Skerspjuvio laikomosios galios patikra

Skerspjuvio laikomosios galios patikra, esant vienašiai lenkimui tikrinama, pagal sąlygą:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y \cdot A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N}{\frac{f_y \cdot W_{eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1, \quad (1.34)$$

Esant ašinei jėgai ir dviašiam lenkimui, tikrinama ši sąlyga:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y \cdot A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{y,N}}{\frac{f_y \cdot W_{y,eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{z,N}}{\frac{f_y \cdot W_{z,eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1, \quad (1.35)$$

čia

A_{eff} – efektyvusis skerspjuvio plotas (1.15 formulė);

e_N – neutralios ašies padėties poslinkis;

N_{Ed} – skaičiuotinė ašinė jėga;

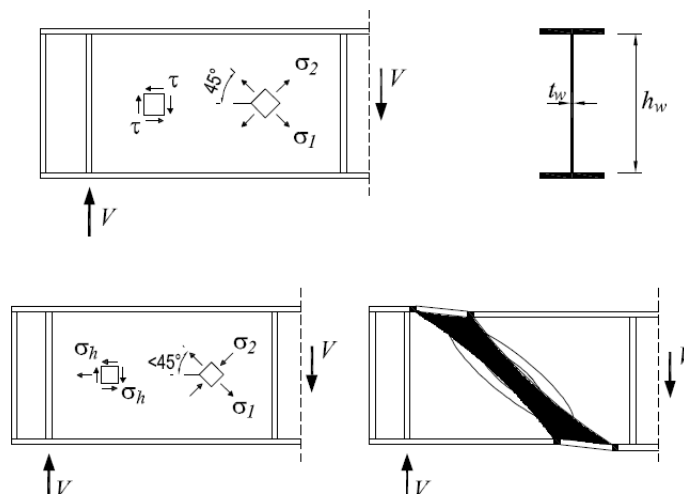
M_{Ed} – skaičiuotinis lenkiamasis momentas;

W_{eff} – efektyvus, tamprusis skerspjuvio atsparumo momentas;

γ_{M0} – dalinis koeficientas, pagal EN 1993-2, lygus 1,0.

1.4.1.5. Šlyjamosios galios patikra

Kaip jau buvo minėta anksčiau, plokštelės veikiamos šlyties turi pokritinį pastovumo rezervą. Plonasienių skerspjuvių plokštelė, veikiamą šlyties išklumpa tempimo įtempių σ_1 kryptimi, gniuždymo įtempiai σ_2 nustoja didėti, o tempimo įtempiai gali didėti iki plieno takumo ribos. Tai įmanoma, kai plokštelė yra pakankamai suvaržyta sąstandų, kad susiformuotų tempimo juosta. Ribinis būvis pasiekiamas, susiformavus plastiniam lankstui (1.19 pav.).



1.19 pav. Šlyties įtempiai plokštelėje (Plieninės konstrukcijos... 2012)

Lakštų šlyjamoji galia tikrinama, esant tokioms sąlygoms:

- Sienelė nestandinta:

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{72}{\eta} \varepsilon; \quad (1.36)$$

- Esant standintoms sienelėms:

$$\frac{h_w}{t_w} > \frac{31}{\eta} \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}, \quad (1.37)$$

čia

h_w – plokštelės aukštis;

k_τ – šlyjamąjo sienelės klupumo koeficientas, jei sienelė standinta tik skersinėmis sąstandomis, apskaičiuojama pagal sąlygą:

$$\begin{aligned} k_\tau &= 5,34 + 4,0 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}, \text{ kai } \frac{h_w}{a} \geq 1, \\ k_\tau &= 4,0 + 5,34 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}, \text{ kai } \frac{h_w}{a} < 1. \end{aligned} \quad (1.38)$$

Jei sienelė standinta išilginėmis sąstandomis, tada ieškomas santykis $\alpha = a/h_w$, atstumo tarp skersinių sąstandų ir sienelės aukščio, jei $\alpha \geq 3$, tada galioja 1.35 sąlyga, jei santykis $\alpha < 3$ šlyjamąjo klupumo koeficientas turi būti apskaičiuotas pagal:

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{I_{sl}}{t^3 \cdot h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{t^3 \cdot h_w}}, \quad (1.39)$$

čia

a – atstumas tarp skersinių sąstandų;

I_{sl} – išilginės sąstandos skerspjūvio ploto inercijos momentas apie z-z ašį (pagal A priedą).

Kai sienelė sustandinta išilginėmis sąstandomis. Jei sienelė standinta tik skersinėmis sąstandomis, I_{sl} priimamas kaip sąlyginis juostos ir dalies sienutės skerspjūvio inercijos momentas;

$$k_{\tau sl} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \cdot \sqrt[4]{\frac{I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}} \geq \frac{2,1}{t_w} \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}}. \quad (1.40)$$

Jei plokštelė nestandinta išilginėmis sąstandomis, koeficientas $k_{\tau sl}$ prilyginamas 0.

Skaiciuotinė sienelės šlyjamoji galia nustatoma pagal išraišką:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (1.41)$$

čia

η – jei plieno klasė ne didesnė kaip 460MPa, lygus 1,2, kitu atveju lygus 1,0;

$V_{bf,Rd}$ – juostų indėlis, apskaičiuojamas taip:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right); \quad (1.42)$$

$V_{bw,Rd}$ – sienelės indėlis, randamas pagal formulę:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}, \quad (1.43)$$

čia

χ_w – sienelės indelio į šlyties klumpamąją galią koeficientas, kuris įvertina grynąją šlytį ir tempimo jėgų suvaržymą skersinėmis sąstandomis. Šis koeficientas turi būti imamas atitinkamai iš 1.5 lentelės arba 1.20 pav.

1.5 lentelė Sienelės χ_w indėlis į šlyties klumpamąją galią (EN 1993-1-5)

	Su standžiuoju galiniu statramsčiu	Su nestandžiuoju galiniu statramsčiu
$\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$	η	η
$0,83 / \eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

Sienelės liaunio parametras $\bar{\lambda}_w$, priklauso nuo sąstandų išdėstymo plokštelėje, esant tik skersinėms sąstandoms ties atramomis, jis gali būti apskaičiuojamas:

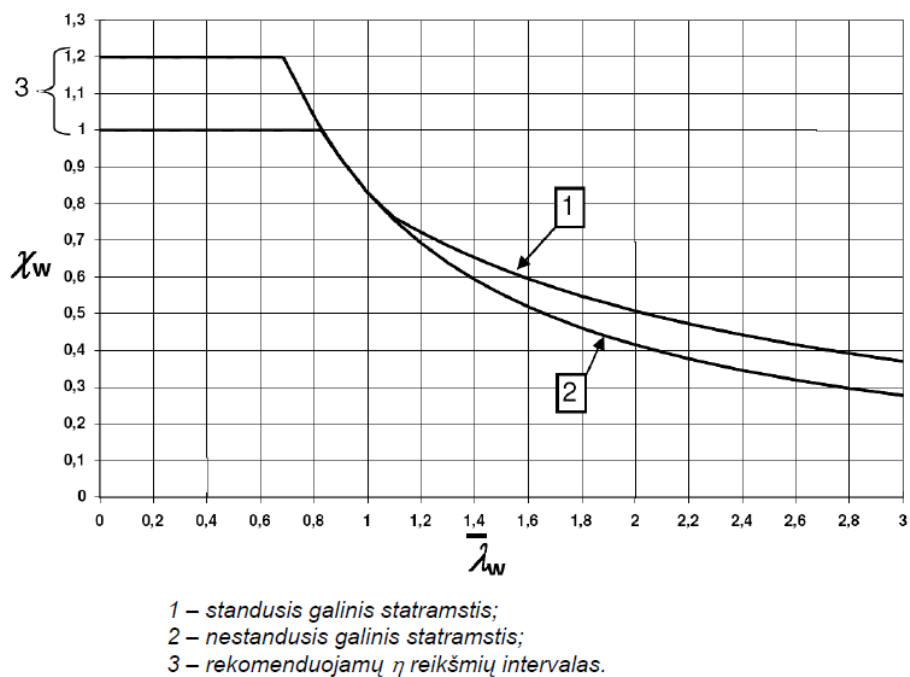
$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t_w \varepsilon}; \quad (1.44)$$

Kai skersinės sąstandos yra ties atramomis, tarpinės skersinės ar išilginės, arba abiejų tipų sąstandos:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \varepsilon \sqrt{k_\tau}}; \quad (1.45)$$

Šlyjamosios galios patikra atliekama pagal išraišką:

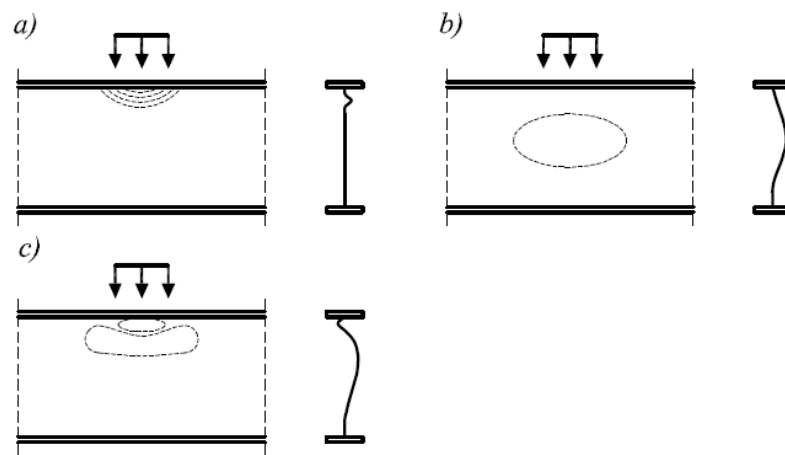
$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0. \quad (1.46)$$



1.20 pav. Šlyjamojo klupumo koeficientas χ_w (EN 1993-1-5)

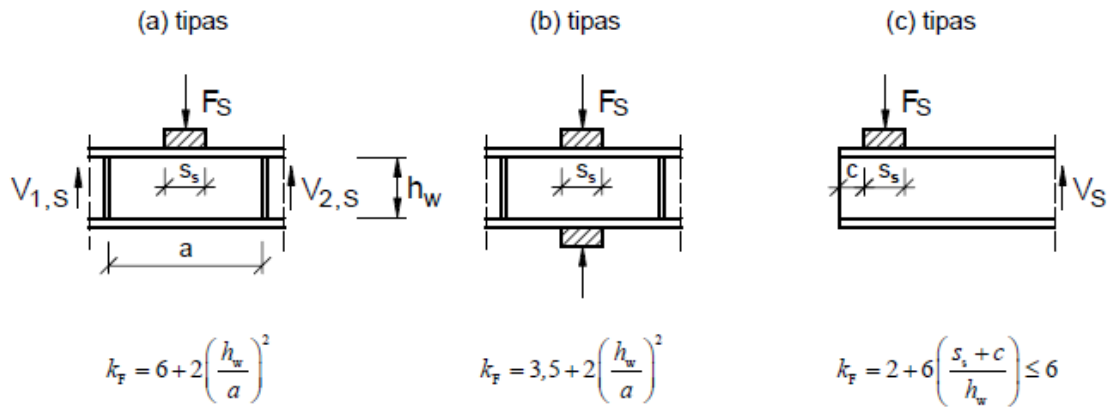
1.4.1.6. Skersinių jėgų veikiamo elemento laikomoji galia

Skersinės jėgos veikiančios rėmo siją – tai fiksuota apkrova nuo ilginių. Galimi trys dvitėjo skerspjūvio sienelės suirimo atvejai: pasireiškia takumas, plokštelės klupimas ties viduriu ir sienelės susibangavimas prie juostos. Suirimo pobūdžiai pavaizduoti 1.21 paveiksle:



1.21 pav. Skersinių jėgų veikiamos sijos suirimo pobūdžiai: a) plokštelės takumas, b) sienelės klupimas, c) sienelės klupimas ties juosta (Plieninės konstrukcijos... 2012)

Euronormos išskiria tris skersinės apkrovos pridėjimo atvejus (1.22 pav.):



1.22 pav. Skirtingą apkrovos perdavą atitinkantys klupumo koeficientai (EN 1993-1-5)

Tiriamąjį rėmą atveju bus parinktas (a) tipas, apkrovos perdavimą atitinkantis klupumo koeficientas k_F apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k_F = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 ; \quad (1.47)$$

Skersinių jėgų poveikių laikomosios galios patikra turi būti atliekama pagal formulę:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 0, \quad (1.48)$$

čia

F_{Ed} – veikianti skersinė jėga;

$F_{b,Rd}$ – skaičiuotinė sienelės vietinė klumpamoji galia, veikiant skersinėms jėgoms:

$$F_{b,Rd} = \frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}, \quad (1.49)$$

čia

t_w – sienelės storis;

f_{yw} – sienelės stipris pagal takumo ribą;

L_{eff} – efektyvusis ilgis, kai skaičiuojama skersinių jėgų veikiamo elemento laikomoji galia, nustatomas taip:

$$L_{eff} = \chi_F l_y; \quad (1.50)$$

čia

l_y – efektyvusis apkrovos veikiamas ilgis, atitinkantis standžios atramos ilgį.

χ_F – vietinio klupumo koeficientas, randamas pagal:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\bar{\lambda}_F} \leq 1,0, \quad (1.51)$$

čia

$\bar{\lambda}_F$ – salyginis sienelės liaunis, randamas pagal:

$$\overline{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{yw}}{F_{cr}}}, \quad (1.52)$$

čia

$$F_{cr} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w}, \quad (1.53)$$

čia

k_F - klupumo koeficientas, randamas iš 1.22 pav., kai nėra išilginių sąstandų, kai yra išilginės sąstandos, koeficientas gali būti apskaičiuojamas taip:

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \left(5,44 \frac{b_1}{a} - 0,21 \right) \sqrt{\gamma_s}, \quad (1.54)$$

čia

b_1 – apkrovos veikiamas plokštelės aukštis;

γ_s – koeficientas randamas taip:

$$\gamma_s = 10,9 \frac{I_{sl,1}}{h_w t_w^3} \leq 13 \left(\frac{h_w}{a} \right)^3 + 210 \left(0,3 - \frac{b_1}{a} \right); \quad (1.55)$$

čia

$I_{sl,1}$ – išilginės sąstandos, įskaitant veiksniąsias sienelės dalis, skerspjūvio inercijos momentas.

Efektyvusis apkrovos veikiamas ilgis l_y apskaičiuojamas taip:

$$l_y = s_s + 2 \cdot t_f (1 + \sqrt{m_1 + m_2}), \quad (1.56)$$

čia

s_s – standžiosios atramos ilgis nustatomas pagal 1.22 pav.,

m_1 ir m_2 – koeficientai randami pagal formules:

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t}, \quad (1.57)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2, \text{ jei } \overline{\lambda}_F > 0,5, \quad (1.58)$$

$$m_2 = 0, \text{ jei } \overline{\lambda}_F \leq 0,5.$$

1.4.1.7. Veikiamų įrašų sąveikos

Skerspjūvis dažniausiai yra veikiamas ne atskirų įrašos pobūdžių, o keletos vienu metu, todėl būtina tikrinti ne tik atskirus jų poveikius bet ir sąveiką. Sąveika – apibrėžia bendrą įrašų poveikį elemento laikomajai galiai.

Jeigu $\eta_3 \leq 0,5$, skaičiuotinė lenkiamoji ir gniuždomoji galia neturi būti mažinama siekiant atsižvelgti į šlyjamąją jėgą. Jei $\overline{\eta}_3 > 0,5$, bendri poveikiai turi atitikti sąlygą:

$$\overline{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right)(2\overline{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0, \text{ kai } \overline{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}, \quad (1.59)$$

čia

$M_{f,Rd}$ – skaičiuotinė skerspjūvio, kurį sudaro efektyvusis juostų skerspjūvio plotas, plastinė laikomoji galia;

$M_{pl,Rd}$ – skaičiuotinė skerspjūvio, kurį sudaro efektyvusis juostų ir visiškai veiksmingos sienelės, neatsižvelgiant į jos klasę, skerspjūvio plotas, plastinė laikomoji galia;

$\overline{\eta}_3$ – šlyjamoji galia;

$$\overline{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}, \quad (1.60)$$

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (1.61)$$

čia

W_{pl} – skerspjūvio plastinis atsparumo momentas. Dvitėjui skerspjūviui sudarytam iš virintinių lakštų randame plastinį atsparumo momentą pagal skerspjūvio svorio centrą:

$$W_{pl} = 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot c_T + c_T^2 \frac{t_w}{2}, \quad (1.62)$$

čia

c_T – atstumą randame pagal formulę:

$$c_T = \frac{A - 2 \cdot b_f \cdot t_f}{2 \cdot t_w}. \quad (1.63)$$

Jei skersinė jėga veikia gniuždomoje zonoje, reikia tikrinti sąveiką tarp lenkiamojo momento, ašinės ir skersinės jėgos:

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4. \quad (1.64)$$

Pagal prof. Kuhlmaną (Kuhlman 2007) galima patikrinti sąveiką tarp šlyjamosios ir skersinės jėgos pagal formulę:

$$\left[\eta_3 \cdot \left(-1 \frac{F_{Ed}}{2 \cdot V_{Ed}} \right) \right]^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0. \quad (1.65)$$

1.4.2. Sumažintų įtempių metodas

Alternatyvus metodas, efektyviojo pločio metodui, yra sumažintų įtempių metodas. Šio metodo esmė, tai plokštelę veikiančios jėgos F_{Ed} sumažinimas. Taip siekiama sumažinti įtempius skerspjūvyje iki charakteristinių su prielaida, kad jie išsidėsto per visą plokštelės plotį vienodai. Norint pasiekti charakteristinę skerspjūvio galią F_{Rk} , naudojamas koeficientas α_u , kuris gaunamas iš formulės:

$$\alpha_u = \rho \cdot \alpha_{ult,k}, \quad (1.66)$$

čia

$\alpha_{ult,k}$ – mažiausias apkrovos daugiklis, iš kurio dauginamos skaičiuotinės apkrovos, kad būtų pasiekta charakteristinė, kritiškiausio lakšto taško, laikomosios galios reikšmė;

ρ – nuo lakšto liaunio λ_p , priklausantis pataisos koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į lakšto klupimą.

Laikomosios galios patikra atliekama pagal sąlygą (Johansson *et al.* 2007):

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} = \frac{F_{Ed}}{\rho \frac{\alpha_{ult,k} \cdot F_{Ed}}{\gamma_{M1}}} \quad (1.67)$$

Euronormose (EN-1993-1-5) ši sąlyga, užrašoma taip:

$$\frac{\rho \cdot \alpha_{ult,k}}{\gamma_{M1}} \geq 1. \quad (1.68)$$

Norint rasti pataisos koeficientą ρ , pirmiausia turime apskaičiuoti lakšto liaunį λ_p , kuris randamas taip:

$$\overline{\lambda_p} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k}}{\alpha_{cr}}} \quad (1.69)$$

čia

α_{cr} – mažiausiasis apkrovos daugiklis, iš kurio dauginamos skaičiuotinės apkrovos, kad būtų pasiekta tamprioji kritinė lakšto apkrova, kai ją veikia visas įtempių laukas.

Pagal EN-1993-1-5, kai viso įtempių lauko α_{cr} neturima ir galime naudoti tik įvairias įtempių lauko komponentes: $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$, τ_{Ed} , atitinkančios $\alpha_{cr,i}$ reikšmės, α_{cr} nustatomos taip:

$$\frac{1}{\alpha_{cr}} = \frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4\alpha_{cr,z}} + \left[\left(\frac{1 + \psi_x}{4\alpha_{cr,x}} + \frac{1 + \psi_z}{4\alpha_{cr,z}} \right)^2 + \frac{1 - \psi_x}{2\alpha_{cr,x}^2} + \frac{1 - \psi_z}{2\alpha_{cr,z}^2} + \frac{1\psi_z}{\alpha_{cr,\tau}^2} \right]^{1/2}, \quad (1.70)$$

čia

$$\alpha_{cr,x} = \frac{\sigma_{cr,x}}{\sigma_{x,Ed}}; \alpha_{cr,z} = \frac{\sigma_{cr,z}}{\sigma_{z,Ed}}; \alpha_{cr,\tau} = \frac{\sigma_{cr,\tau}}{\sigma_{\tau,Ed}};$$

ψ_x , ψ_z – lakšto įtempių pasiskirstymo koeficientai;

Skaičiuojant $\alpha_{ult,k}$ gali būti taikomas takumo kriterijus su prielaida, kad laikomoji galia pasiekama, kai takumas prasideda lakštui neklumpant:

$$\frac{1}{\alpha_{ult,k}^2} = \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y} \right)^2, \quad (1.71)$$

čia

$\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{z,Ed}$, τ_{Ed} – įtempių lauko komponentės saugos ribinio būvio atveju.

Pataisos koeficientas ρ , pagal EN 1993-1-5, gali būti randamas šiais būdais:

a) imama mažiausioji šių pataisos koef. reikšmė:

ρ_x išilginių įtempių, ρ_z – skersinių įtempių, χ_w – šlyjamųjų įtempių, kiekvienas skaičiuojamas atsižvelgiant į liaunį $\overline{\lambda_p}$.

Laikomosios galios formulė:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y}\right)^2 \leq \rho^2; \quad (1.72)$$

b) reikšmė gaunama interpoliuojant tarp ρ_x , ρ_z ir χ_w reikšmių, nurodytų a) punkte, kaip interpoliacijos funkciją taikant $\alpha_{ult,k}$ skaičiavimo formulę.

Šiuo atveju taikoma laikomosios galios formulė:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{\rho_x \cdot f_y}{\gamma_{M1}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{\rho_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\frac{\rho_x \cdot f_y}{\gamma_{M1}}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{\frac{\rho_z \cdot f_y}{\gamma_{M1}}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{\frac{\chi \cdot f_y}{\gamma_{M1}}}\right)^2 \leq 1. \quad (1.73)$$

1.4.3. Baigtinių elementų analizės metodai

Baigtinių elementų metodas – tai vienas iš plačiausiai taikomų metodų, skirtų įvairių fizinių sistemų uždaviniams spręsti bei dinaminiais procesams modeliuoti. BEM - tai apytikslis matematinis metodas, skirtas diferencialinėms dalinių išvestinių lygtims spręsti. Atliekant baigtinių elementų analizę, pirmiausia sudaromas diskretinis nagrinėjamos konstrukcijos ar tiriamos srities modelis, kuris yra suskaidomas į nesudėtingos formos baigtinio dydžio elementus. Kiekvieno elemento srityje, diferencialinės lygtys dalinėmis išvestinėmis, su tam tikromis prielaidomis pakeičiamos algebrinių lygčių sistemomis. Tada pasitelkę skaitinius metodus (tiesinių algebrinių lygčių sprendimo, savųjų reikšmių radimo, netiesinių lygčių sprendimo ir t.t.) ieškome sprendinių, iš kurių yra apskaičiuojami išvestiniai dydžiai. (Barauskas *et al.* 2004).

Baigtinių elementų analizės metodai plačiai naudojami sudėtingų statinių konstrukcijų projektavimui. Baigtinių elementų analizės metodų pasirinkimas priklauso nuo siekiamų tikslų, konstrukcijos sudėtingumo ir grindžiamas prielaidomis pateiktomis 1.6 lentelėje:

1.6 lentelė. Baigtinių elementų analizės metodų prielaidos (EN 1993-1-5)

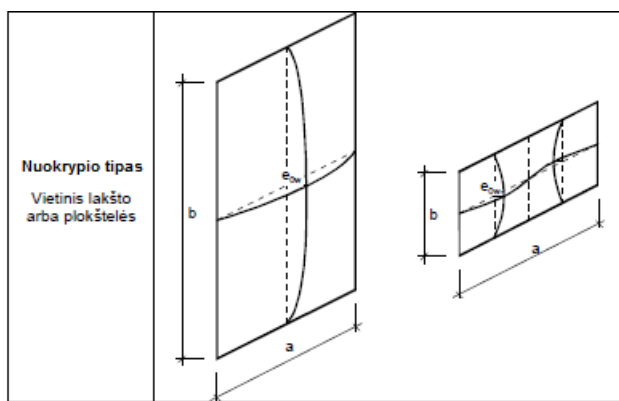
Nr.	Medžiagos elgsena	Geometrinė elgsena	Nuokrypiai, žr. C.5 poskyrį	Taikymo pavyzdys
1	tiesinė	tiesinė	nėra	tampriojo atsiknojimo dėl šlyties poveikis, tamprioji laikomoji galia
2	netiesinė	tiesinė	nėra	plastinė laikomoji galia saugos ribinių būvių atveju
3	tiesinė	netiesinė	nėra	kritinio lakšto klumpdomoji apkrova
4	tiesinė	netiesinė	yra	tamprioji lakšto klumpdomoji galia
5	netiesinė	netiesinė	yra	tamprioji plastinė laikomoji galia saugos ribinių būvių atveju

Baigtinių elementų analizės, kartu su normose aprašytais apribojimais, formuoja konstrukcijų projektavimo metodus. Šie metodai plačiai taikomi reminėms konstrukcijoms modeliuojant jas

stypiniais elementais. Visuminei konstrukcijų analizei atlikti, euronormos reikalauja ypatingą dėmesį skirti:

- konstrukcijos komponentams ir jų kraštinių sąlygų modeliavimui;
- programinės įrangos ir skaičiavimo ataskaitų pasirinkimui;
- nuokrypų, medžiagos savybių ir apkrovų modeliavimui;
- taikytiniams daliniams koeficientams;
- ribinių būvių kriterijams.

Šiame darbe bus nagrinėjamos liaunos plokštelės, turi būti atlikta klupumo analizė, todėl konstrukcijos turi būti modeliuojamos plokšteliniais „SHELL“ tipo elementais, kurie turi daug daugiau laisvės laipsnių, nei naudojant stypinius baigtinius elementus. Sudarytam BEM modeliui bus atliktos tiesinė ir netiesinė analizės, pastarosios atveju bus įvertintas medžiagos netiesiškumas ir geometrinis netiesiškumas, įvedant vietinius plokštelės nuokrypius.



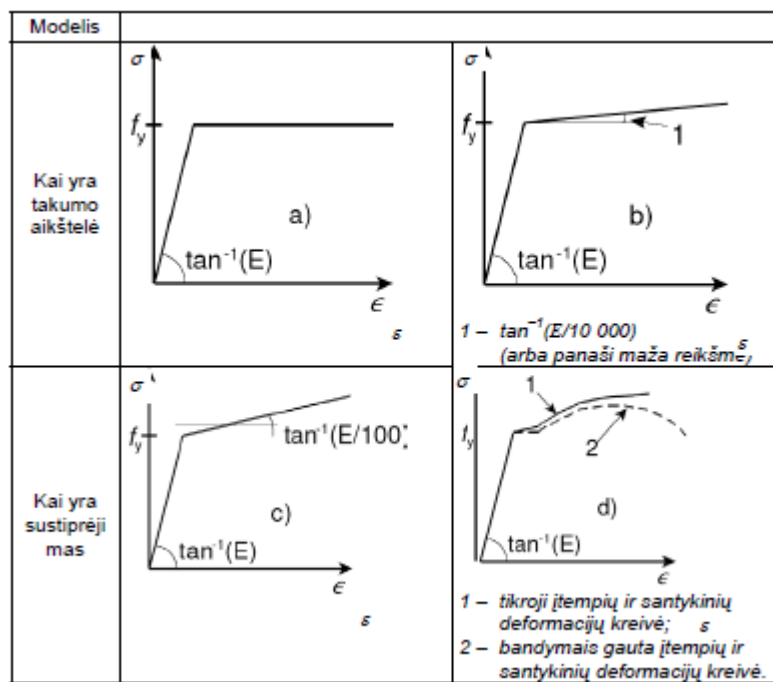
1.23 pav. Lygiaverčių geometrinių nuokrypių modeliavimas

Vietiniai lakšto nuokrypiai parinkti iš EN 1993-1-5 C priedo, klupimo forma, kurios nuokrypis priimamas kaip vienos iš lakšto kraštinių santykis su 200 - $e_{0w} = \frac{a}{200}$ arba $\frac{b}{200}$ (1.23 pav.). Atsižvelgiant į analizės tikslumą ir leidžiamą santykinę deformaciją, gali būti taikomos šios medžiagos elgsenos prielaidos (EN 1993-1-5 C Priedas):

- a) tampriosios plastinės be sustiprėjimo,
- b) tampriosios plastinės, kai yra takumo aikštelės nuolydis,
- c) tampriosios plastinės, kai yra tiesinis sustiprėjimas,
- d) pagal tikrąją įtempių ir santykinų deformacijų kreivę.

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon), \quad (1.74)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon). \quad (1.75)$$



1.24 pav. Medžiagos elgsena (EN 1993-1-5)

Baigtinių elementų metodo analizei atlikti pasirinkta SOFiSTiK baigtinių elementų programa. Šio metodo analizės rezultatai ir skaitinio modelio sudarymo principai pateikti trečiame šio darbo skyriuje.

- Juostos storis – $t_f = 12mm$;
- Virintinės siūlės aukštis – $a = 4mm$;
- Plieno tamprumo modulis – $E = 210 GPa$;
- Plieno klasė – S355;
- Plieno tankis – $\rho = 7850 kg/m^3$.

Kitos skaičiavimams būtinos kintančio ketvirtos klasės skerspjūvio charakteristikos, kurios nustatomos:

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

$$I_y = \frac{t_w h_w^3}{12} + 2 \left(\frac{b_f t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{h_f}{2} \right)^2 \right), \quad (2.1)$$

čia

h_w, h_f – sienelės aukščiai, randami pagal formules:

$$h_w = h - 2 \cdot t_f, \quad (2.2)$$

$$h_f = h - t_f. \quad (2.3)$$

2.1.1. Ekvivalentūs kintančio skerspjūvio rodikliai

Kadangi mūsų nagrinėjamas skerspjūvis kintamas, pritaikome pirmame skyriuje išdėstytą ekvivalenčių rodiklių teoriją ir (1.7-1.12) formules, randame ekvivalenčius skerspjūvio rodiklius:

I_{eq}, h_{eq}, d_{eq} , visi skaičiavimai iš *Mathcad* programos pateikti B prieduose.

Skerspjūvio atsparumo momentas apskaičiuojamas taip (Plieninės konstrukcijos... 2012):

$$W_y = \frac{I_{yeq}}{r_T}, \quad (2.4)$$

čia

r_T – atstumas nuo apatinės juostos svorio centro iki viso skerspjūvio svorio centro:

$$r_T = \frac{h_{weq} + t_f}{2}. \quad (2.5)$$

Tada suminio skerspjūvio tamprioji lenkiamoji galia randama taip:

$$M_{el,y,Rd} = \frac{W_y f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (2.6)$$

2.1.2. Efektyvieji skerspjūvio rodikliai

Toliau apskaičiuodami efektyviuosius skerspjūvio rodiklius pritaikome anksčiau išdėstytą efektyviojo skerspjūvio metodiką. Pasinaudoję 1.3 lentelę, randame klupumo koeficiento reikšmę. Kadangi plokštelės įtempių pasiskirstymo koeficientas $\psi = -1$ priimame, kad klupumo

koeficientas $k_{\sigma} = 23,9$. Toliau randame likusius geometrinius rodiklius iš 2.2 paveikslo (Plieninės konstrukcijos... 2012):

2.1 lentelė. Efektyvieji dvitėjo skerspjūvio geometriniai rodikliai

Gniuždomos zonos aukštis	$b_c = \frac{d_{eq}}{(1 - \psi)};$	(2.7)
Efektyvusis sienelės aukštis iki neutralios zonos (pagal 1.3 lentelę, kai $\psi < 1$)	$b_{e1} = 0,4b_{eff} + a_w \cdot \sqrt{2},$ $b_{e2} = 0,6b_{eff};$	(2.8)
Neutralios zonos plotis	$x_w = b_c - b_{eff};$	(2.9)
Neutralios zonos skerspjūvio plotas	$\Delta A = t_w \cdot x_w;$	(2.10)
Efektyvusis skerspjūvio plotas	$A_{eff} = A - \Delta A;$	(2.11)
Atstumas nuo neutralios zonos centro iki skerspjūvio svorio centro	$r = \frac{h_w - x_w}{2} - (b_{e1} - a_w \cdot \sqrt{2});$	(2.12)
Svorio centro pasislinkimas dėl neveiksnios skerspjūvio dalies	$\Delta r_T = \frac{r \cdot \Delta A}{A_{eff}}$	(2.13)
Atstumas tarp juostos svorio centro ir efektyviojo skerspjūvio svorio centro	$r_{Teff} = r_T - \Delta r_T$	(2.14)
Efektyviojo skerspjūvio inercijos momentas apie y-y ašį	$I_{eff,y} = I_y + A \cdot \Delta r_T^2 - \left(\frac{x_w^3 \cdot t_w}{12} + \Delta A(r + \Delta r_T)^2 \right)$	(2.15)
Efektyviojo skerspjūvio atsparumo momentai	$W_{eff,y,1} = \frac{I_{eff,y}}{h_w + t_f - r_{Teff}},$ $W_{eff,y,2} = \frac{I_{eff,y}}{r_{Teff}};$	(2.16)
Efektyviojo skerspjūvio tamprioji lenkiamoji galia:	$M_{c,y,Rd} = \min(W_{eff,y,1}, W_{eff,y,2}) \cdot f_y / \gamma_{M0}$	(2.17)

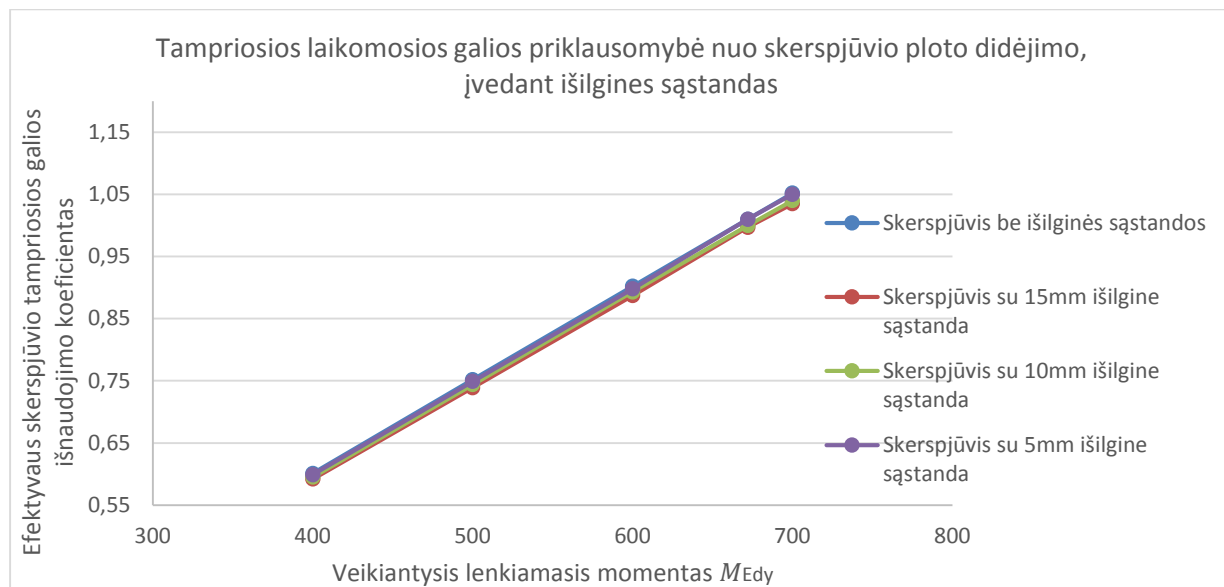
2.1.3. Tamprioji laikomoji galia

Turėdami visus skerspjūvio rodiklius tikriname plokštelės klupimą pagal sąlygą:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,y,Rd}} \leq 1,0. \quad (2.18)$$

Atlikdami skaičiavimus pagal pateiktą metodiką matome, jog algoritme atsižvelgiama tik į skerspjūvio plotą, tačiau niekur nėra ilgio rodiklio, t.y. tamprioji skerspjūvio laikomoji galia, nekinta, keičiant sijos atstumą tarp skersinių sąstandų. Tačiau kadangi figūruoja skerspjūvio rodikliai, pastebima tampriosios laikomosios galios priklausomybė, nuo skerspjūvio ploto, kuris gali būti padidintas įvedant išilgines sąstandas (žr. 2.3 pav.). Efektyvaus skerspjūvio lenkiamosios galios išnaudojimo koeficientas padidėja 1,6 %, 1,0 % ir 0,4 %, kai įvedamos išilginės sąstandos.

Įvedame išilgines 5 mm., 10 mm ir 15 mm, išilgines sąstandas, kurios atitinkamai padidina skerspjūvio plotą: $\frac{A_{eff,sas}}{A_{eff}} = 1,12; 1,24; 1,36$ karto. ($\frac{A_{eff,sas}}{A_{eff}}$ – skerspjūvio plotų santykis su sąstanda ir be jos).



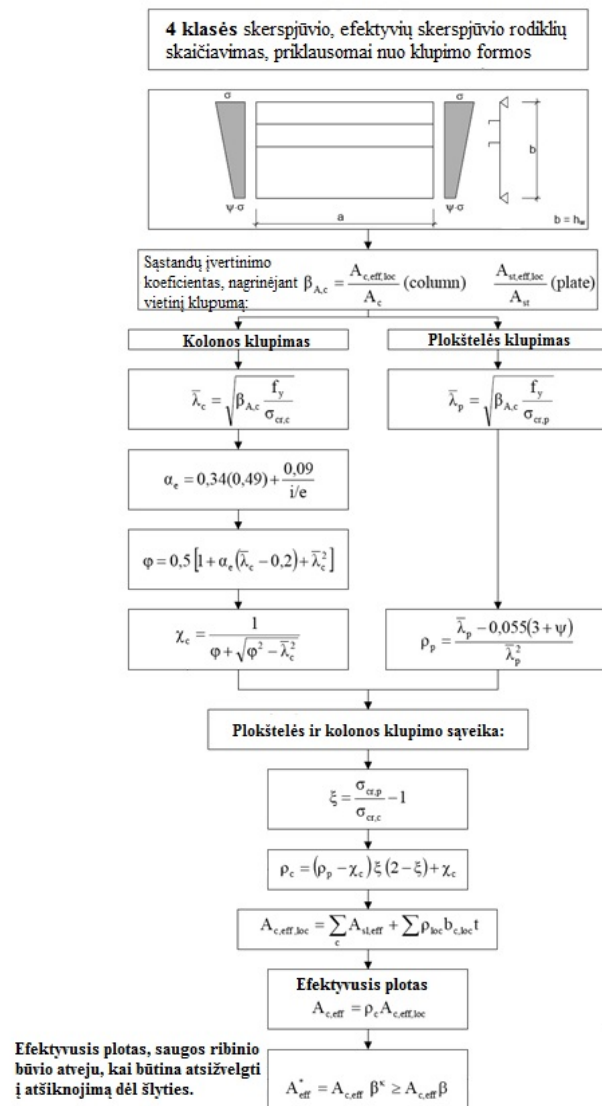
2.3 pav. Efektyvaus skerspjūvio galios priklausomybė nuo skerspjūvio ploto

Taigi tamprioji laikomoji galia gali būti padidinta didinant skerspjūvio plotą, t.y. įvedant išilgines sąstandas, didinant plokštelių storį ar kitus skerspjūvio rodiklius. Tačiau kaip matome, išilginės sąstandos ženkliai nepadidina tampriosios laikomosios galios, nors tai ir nėra pagrindinis rodiklis lemiantis liaunos plokštelės klupumą.

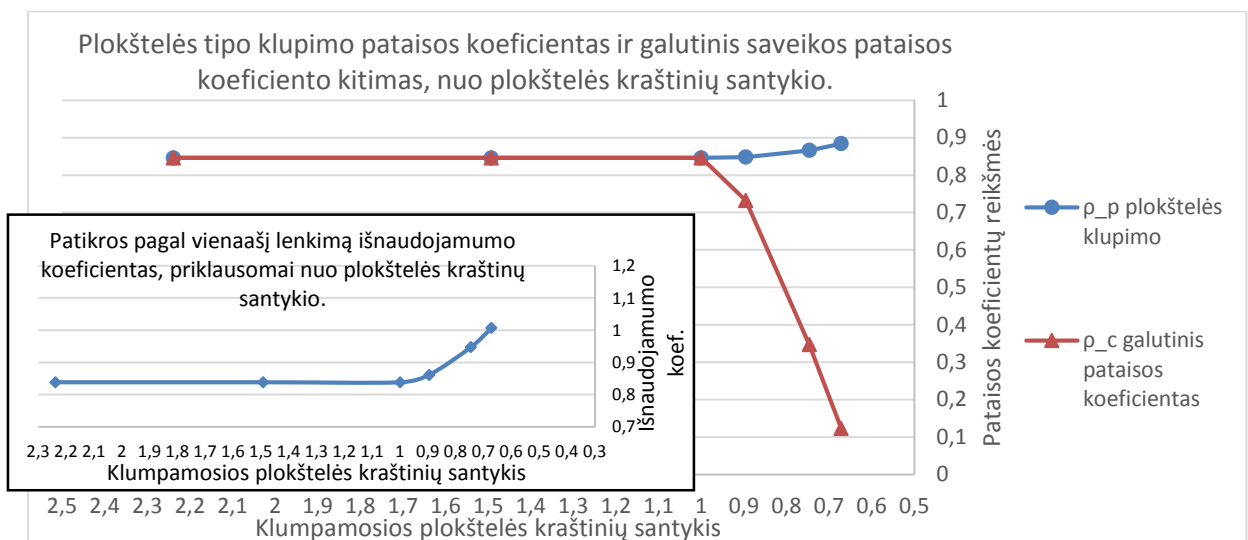
2.1.4. Plokštelės klupimo formos analizė

Toliau, pagal EC 1993-1-5, efektyviojo pločio metodiką turi būti tikrinama plokštelės klupimo forma. Efektyvaus skerspjūvio rodiklių, priklausomai nuo klupimo, skaičiavimo algoritmo schema pavaizduota 2.4 paveiksle. Radus efektyviuosius rodiklius, vykdoma patikra pagal anksčiau pateiktas (1.34) ir (1.35) sąlygas.

Atliekant skaičiavimus, pagal nagrinėjamą rėmą, kolonos klupimo forma taip ir nebuvo pasiekta, kadangi atstumai tarp sąstandų didesni už skerspjūvio maksimalų aukštį, tačiau siekiant išnagrinėti klupimo formas, buvo mažinamas atstumas iki sąstandų, kad pasiekti mažą plokštelės kraštinių santykį ($a/b \leq 1$). Minėtas santykis literatūroje apibūdinamas kaip kritinis, kuriame pasireiškia klupimo analizių sąveika ir būtina perskaičiuoti efektyvaus skerspjūvio pataisos koeficientą, kuris gaunams interpoliuojant tarp lakšto klupimo coef. ir kolonos klupimo koeficiento. Pataisos koeficientų kitimas parodytas 2.5 paveiksle.



2.4 pav. 4 kl. skerspjūvio efektyviųjų rodiklių nustatymo algoritmo schema (Johansson *et al.* 2007)

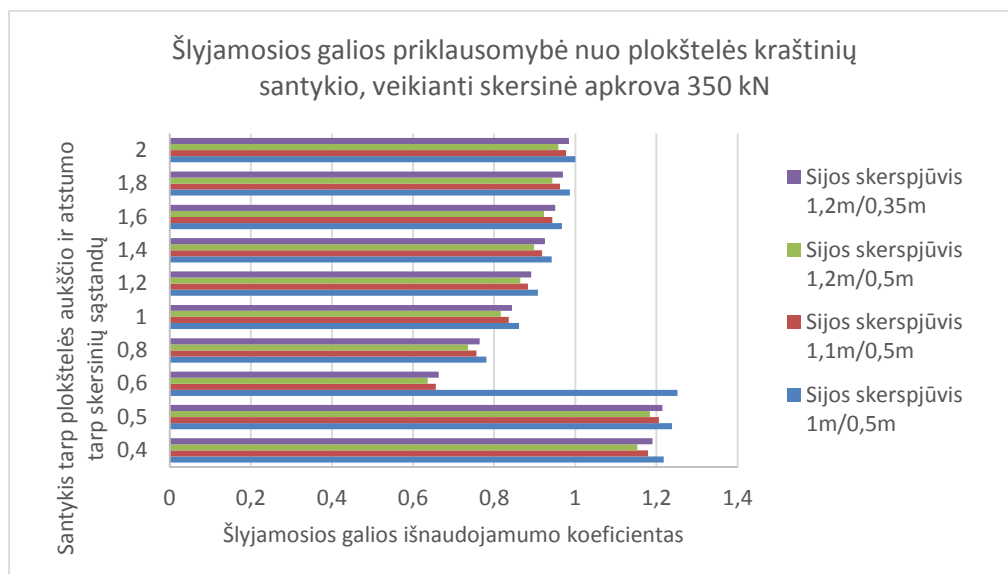


2.5 pav. Plokštelės tipo klumpimo pataisos koeficientas ir galutinis sąveikos pataisos koeficiento kitimas, nuo plokštelės kraštinių santykio

Rezultatai parodė, kad esant kraštinių santykiui $a/b > 1$, galutinis pataisos koeficientas lygus plokštelės klupimo koeficientui ($\rho_c = \rho_p$). Kai šis santykis sumažėja ($a/b \leq 1$), plokštelėje pasireiškia kolonos klupimas, šiuo atveju nepasireiškia pokritinės galios rezervas ir gali įvykti staigus plokštelės suirimas (aptarta 1.1 skyriuje T.Huglando tyrimas). Galutinis efektyvaus skerspjuvio pataisos koeficientas nuo plokštelės klupimo tipo koeficiento skiriasi per 14 %, 59 %, 86 % esant atitinkamiems plokštelės kraštinių santykiams – 0,9, 0,75, 0,67, o laikomoji galia sumažėja per 20 %. Taigi esant nedideliame kraštinių santykiui ($a/b \leq 1$) būtina interpoliacija tarp abiejų klupimų.

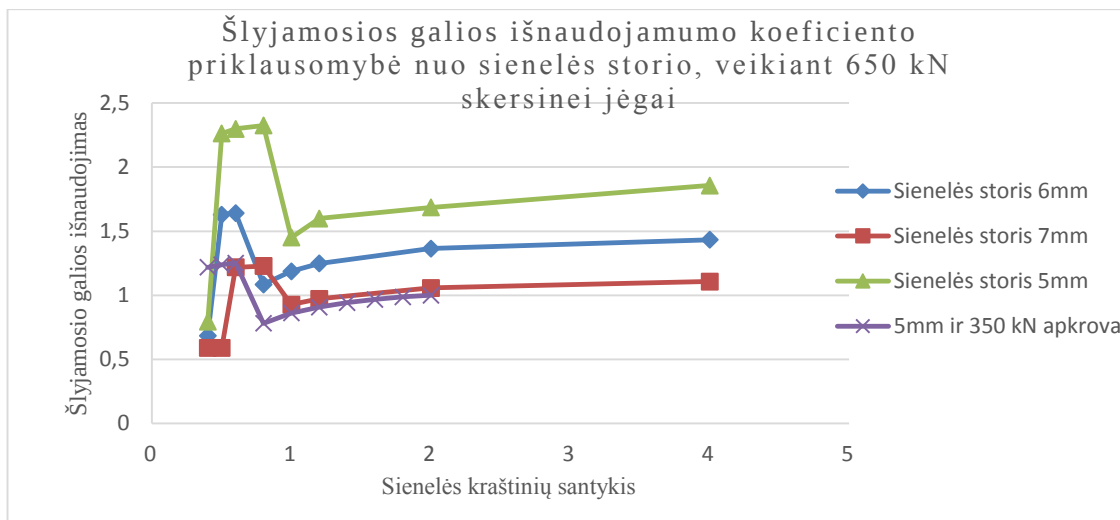
2.1.5. Šlyties poveikio analizė

Toliau pagal efektyvaus pločio metodą nagrinėjama plokštelės šlyjamoji galia, pagal 1.4.1.5 skyrelyje pateiktas formules. Kadangi šiame skaičiavimo algoritme figūruoja plokštelės liaunio parametras $\bar{\lambda}_w$, galime teigti, jog šlyjamajai galiai didelę įtaką turės plokštelės kraštinių santykis, t.y. sąstandų išdėstymas. *C priede* duotos visos skaičiavimo rezultatų lentelės. Norint išnagrinėti šlyties jėgos sąlygą, buvo varijuojama, ne tik sijos sienelės aukščio santykiu ($\frac{h_{max}}{h_{min}}$), bet ir sienelės storiu – t_w , sijos skersinių sąstandų atstumu, bei apkrovos dydžiu. Nagrinėjant šlyjamąją jėgą, pirmiausia buvo tikrinama, kokį poveikį daro sienelės aukščio kintamumo rodiklis. Iš 2.6 paveikslo matome, jog didinant šį santykį, šlyjamoji galia didėja apie 4-6 %. Aiškiai matomas ir nestandartinio rėmo ($\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{350} = 3,43$), šlyjamosios galios mažesnis pokytis, tačiau jo atlaikoma šlyties galia vis tiek didesnė nei standartinio kintamumo skerspjuvio ($\frac{h_{max}}{h_{min}} = 2,0$) per 3 %. Taip pat žymus šlyjamosios galios šuolis matomas, kai atstumas tarp sąstandų svyruoja nuo $0,5 \cdot d_{eq}$ iki $1,0 \cdot d_{eq}$.



2.6 pav. Šlyjamosios galios priklausomybė nuo plokštelės kraštinių santykio

Iš 2.6 ir 2.7 paveikslų matome jog šuolio persislinkimas priklauso ne tik nuo sienelės storio, bet ir veikiančios apkrovos, ir dvitėjo sienelės aukščio skirtumo koeficientų.

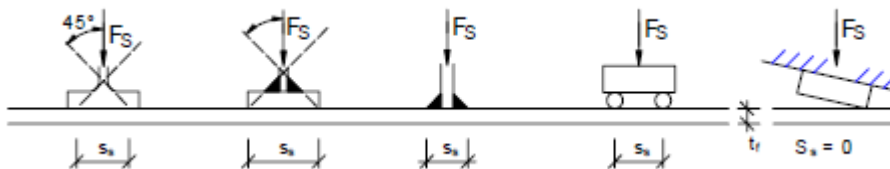


2.7 pav. Šlyjamosios galios priklausomybė nuo atstumo tarp sąstandų, įvedant skirtingus skerspjuvio sienelės storius

Taigi didžiausias šlyjamosios galios pokytis (iki 48 %) atsiranda, kai skerspjuvio sienelės kraštinių santykis varijuoja nuo $0,5 \cdot d_{eq}$ iki $1,0 \cdot d_{eq}$, t.y. būtent tuose režiuose, kuriuose vyksta sąveika tarp kolonos ir plokštelės tipų klupimų (skyrelis 1.4.1.3).

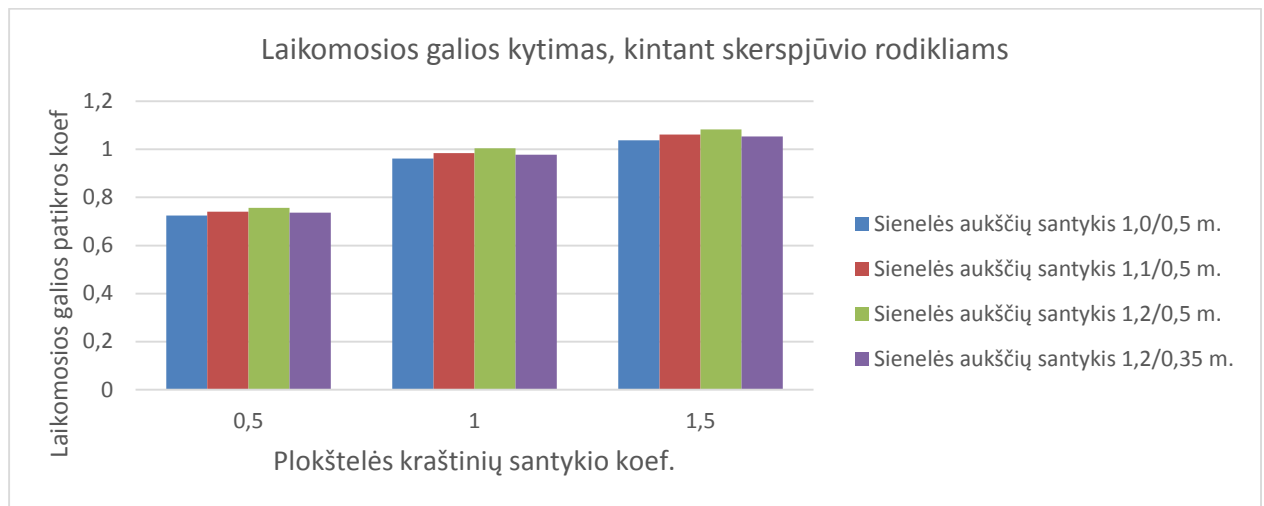
2.1.6. Klumpamosios galios nuo skersinių jėgų poveikio analizė

Skaičiuotinė virintinių sijų sienelės laikomoji galia turi būti patikrinta pagal jau minėtą 1.49 sąlygą, užtikrinant gniuždomosios juostos skersinį įtvirtį. Didelę įtaką skerspjuvio laikomajai galiai nuo skersinių apkrovų turi efektyvusis apkrovos veikimo ilgis, randamas pagal 1.50 sąlygą iš 1.4.1.6 skyrelio. Antras svarbus rodiklis yra standžiosios atramos ilgis s_s , tai ilgis dvitėjo skerspjuvio juostoje, kurioje veikianči apkrova veiksmingai pasiskirsto 1:1 nuolydžiu. Šios atramos ilgis randamas pagal 2.8 pav.



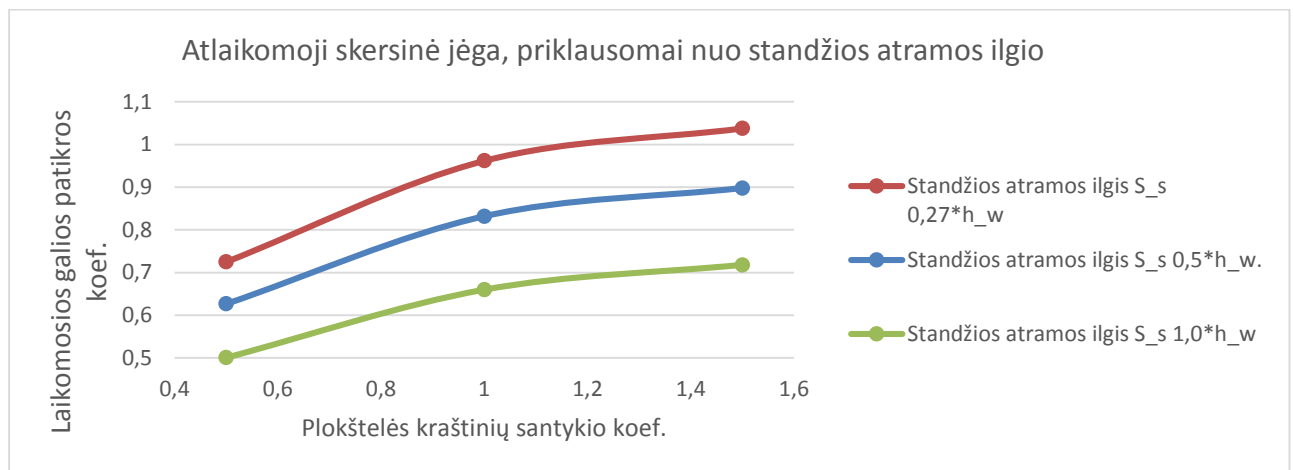
2.8 pav. Standžiosios atramos ilgis (EN 1993-1-5)

Skaičiavimų rezultatai (D priedas) parodė, kad didinant dvitėjo skerspjuvio sienelės aukščio santykį, mažėja atlaikoma skersinė jėga, t.y. kuo ekvivalentinis sienelės aukštis didesnis, tuo mažesnė skaičiuotinė laikomoji galia. Tačiau didžiausias skersinės jėgos atlaikomo koeficiento šuolis vėl pastebėtas keičiant atstumą tarp sąstandų, t.y. keičiant sienelės kraštinių santykį.



2.9 pav. Skersinė jėgos patikros koeficiento priklausomybė nuo atstumo tarp sąstandų

Kintant kraštinių santykiui nuo 1,0 iki 0,5, atlaikomoji jėga padidėja per 30-35 % (2.9 pav.), taigi mažinant atstumą tarp sąstandų galime pasiekti didesnę skersinės jėgos galia.



2.10 pav. Laikomosios galios nuo skersinė jėgos poveikio kitimas priklausomai nuo standžios atramos ilgio

Iš 2.10 pav. pavaizduoto laikomosios galios atlaikomumo koeficiento, priklausomybė nuo standžios atramos ilgio, skerspjuvis yra veikiamas 200 kN skersinės apkrovos, dvitėjo sienelės aukščio kitimo koeficientas - $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{500} = 2,4$. Matyti, kad didinant standžiosios atramos ilgį, pasiekiamas ženklus laikomosios galios padidėjimas. Kai standžiosios atramos ilgis padidėja nuo $s_s = 0,5 \cdot h_w$ iki $s_s = 1,0 \cdot h_w$, veikiančios skersinės jėgos, laikomoji galia padidėja per 43-45 %. Taip pat svarbus sienelės storis t_w , kurį padidinus nuo 4mm iki 6mm, atlaikoma skersinė jėga padidėja per 52 – 55 %. Galime daryti išvadas, jog sienelės galia nuo skersinė jėgos poveikio, gali būti padidinta, didinant sienelės storį, tankinant skersines sijos sąstandas ir didinant veikiančios jėgos pasiskirstymą, tačiau didžiausia galia bus pasiekta įvedus išilgines sąstandas.

2.1.7. Skerspjūvį veikiančių įrašų sąveika

Kaip jau buvo minėta 1.4.1.7 skyrelyje, skerspjūviui būtina tikrinti jį veikiančių įrašų bendrą poveikį. Todėl atliekant analitinius pasirinkto kintančio dvitėjo skerspjūvio skaičiavimus buvo tikrinamos pagrindinės sąveikos, aptartos 1.4 skyriuje:

- lenkiamo momento, ašinės jėgos sąveika:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{\frac{f_y \cdot A_{eff}}{\gamma_{M0}}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} \cdot e_N}{\frac{f_y \cdot W_{eff}}{\gamma_{M0}}} \leq 1, \quad (2.19)$$

- šlyjamosios jėgos, lenkiamo momento ir ašinės jėgos sąveika:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0, \text{ kai } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}, \quad (2.20)$$

- lenkiamo momento, ašinės jėgos ir skersinės jėgos sąveika:

$$\eta_2 + 0,8\eta_1 \leq 1,4; \quad (2.21)$$

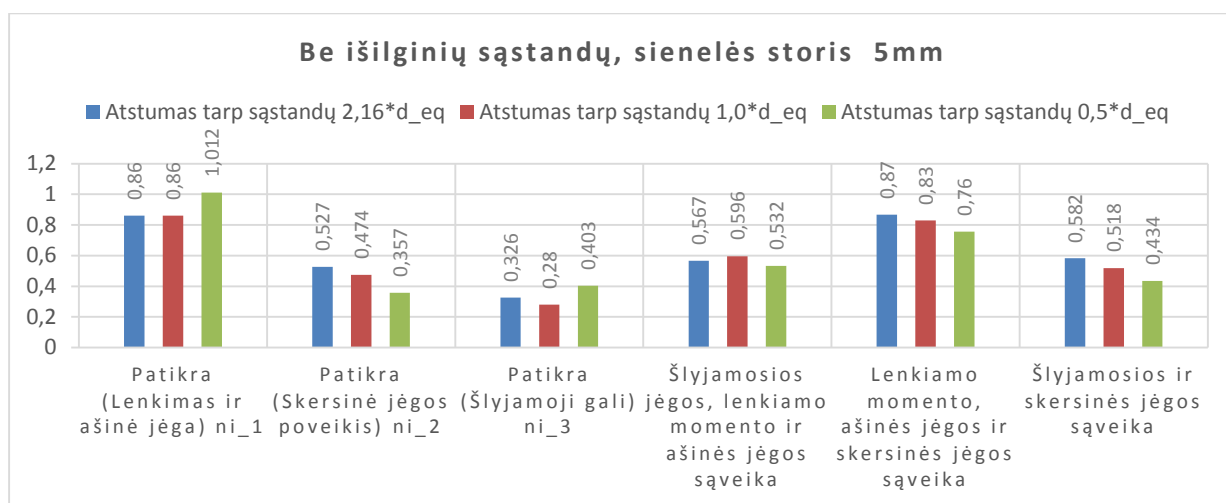
- šlyjamosios ir skersinės jėgos sąveika:

$$\left[\eta_3 \cdot \left(-1 \frac{F_{Ed}}{2 \cdot V_{Ed}}\right)\right]^{1,6} + \eta_2 \leq 1,0; \quad (2.22)$$

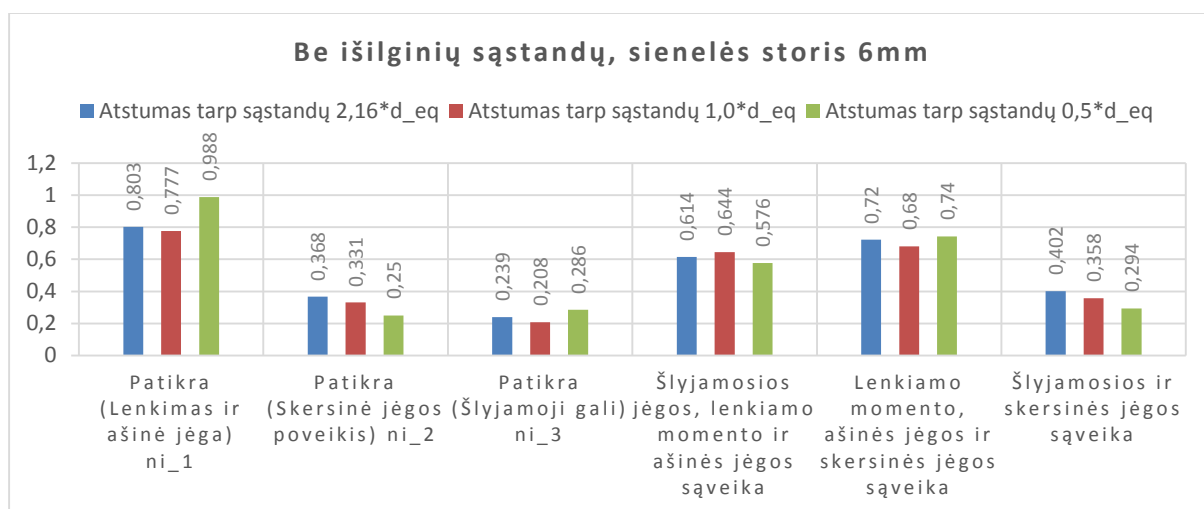
Visas analitinių skaičiavimų algoritmas sudarytas *Mathcad* programiniame pakete, skaičiavimų pavyzdžiai pateikti B priede. Pagal sudarytą algoritmą, buvo tikrinamos įvairios skerspjūvio geometrinių rodiklių variacijos: sienelės storis keičiamas $t_w = 4 \div 8 \text{ mm}$, sienelės aukščio kitimas $h = 350 \div 120$, į skerspjūvį buvo įvedamos skersinės sąstandos, kurių žingsnių variacija kito nuo $0,2 \cdot d_{eq}$ iki $2,5 \cdot d_{eq}$, taip pat buvo įvedamos ir išilginės skerspjūvio sąstandos, kurių storis nuo 5mm iki 25mm. Skerspjūvį veikiančios įrašos taip pat didinamos ir mažinamos norint išsiaiškinti įvairių poveikį laikomajai galiai. Tokia įvairių rodiklių variacija, buvo siekiama išsiaiškinti, kaip kinta pagrindinių galios rodiklių duomenys, kurios sąlygos ir sąveikos yra pavojingesnės ketvirtos klasės kintančiam skerspjūviui, o tolimesniame skyriuje bus lyginamos su skaitiniais skaičiavimo rezultatais.

Žemiau pateiktuose 2.11-2.13 paveiksluose pateiktos rezultatų diagramos. Skerspjūvio sienelės aukščio kitimo koeficientas šiuo atveju parinktas lygiai 2, t.y. $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500} = 2,0$. Šie rezultatai gauti, kai skerspjūvio įrašos buvo parinktos tokios: veikiantysis momentas – $M_{Ed} = 524 \text{ kNm}$, skersinė jėga – $V_{Ed} = 114 \text{ kN}$, ašinė jėga – $N_{Ed} = 205 \text{ kN}$. Tokios įrašos parinktos pagal skaitinius skaičiavimus, kurie bus aptarti 3 skyriuje. Iš grafikų pastebime, jog dažniausiai skerspjūvio galią nulemia pirmoji patikros sąlyga η_1 , t.y. lenkimas ir ašinės jėgos poveikis. Tačiau

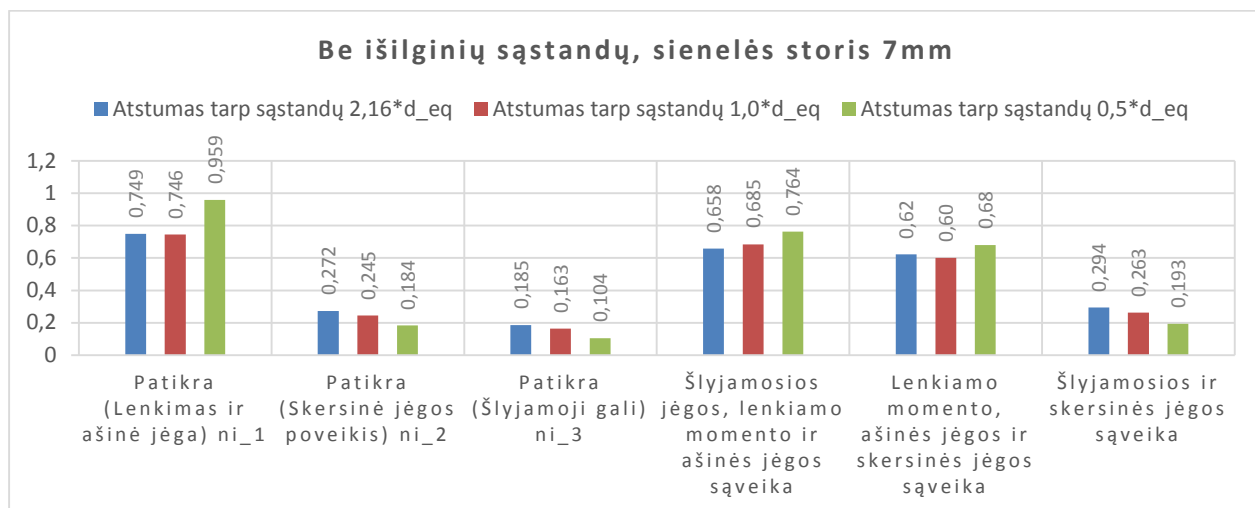
matome jog esant labai liaunai sienelei, kai jos storis $t_w = 5mm$, sienelės galią nors ir nežymiai apsprendžia antroji sąveika – lenkiamojo momento, ašinės jėgos ir skersinės jėgos. Didėjant sienelės storiui skersinės jėgos poveikis skerspjuviui ženkliai mažėja, pakitus sienelės storiui nuo 5 iki 7 mm, skersinės jėgos poveikis sumažėjo per 42-48 %. Taip pat skersinės jėgos poveikis mažėja mažinant atstumą tarp sąstandų – atstumui sumažėjus nuo $2,16 \cdot d_{eq}$ iki $0,5 \cdot d_{eq}$, čia d_{eq} – tai ekvivalentinis sienelės aukštis, skersinė sienelės galia padidėja per 32 %. Esant ypač liaunai sienelei pastebimas ir šlyjamosios galios šuolis, keičiant atstumą tarp sąstandų. Kaip jau buvo minėta anksčiau, esant atstumui tarp sąstandų $2,16 \cdot d_{eq}$ iki $1,0 \cdot d_{eq}$, šlyjamoji galia palaipsniui dideja apie 13-20 %, tuo tarpu, kai atstumas kinta nuo $1,0 \cdot d_{eq}$ iki $0,5 \cdot d_{eq}$, šlyjamoji galia staigiai sumažėja per 29-32%, pastebimas jau aptartas kolonos tipo klupimas.



2.11 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $t_w = 5mm$, sija be išilginių sąstandų

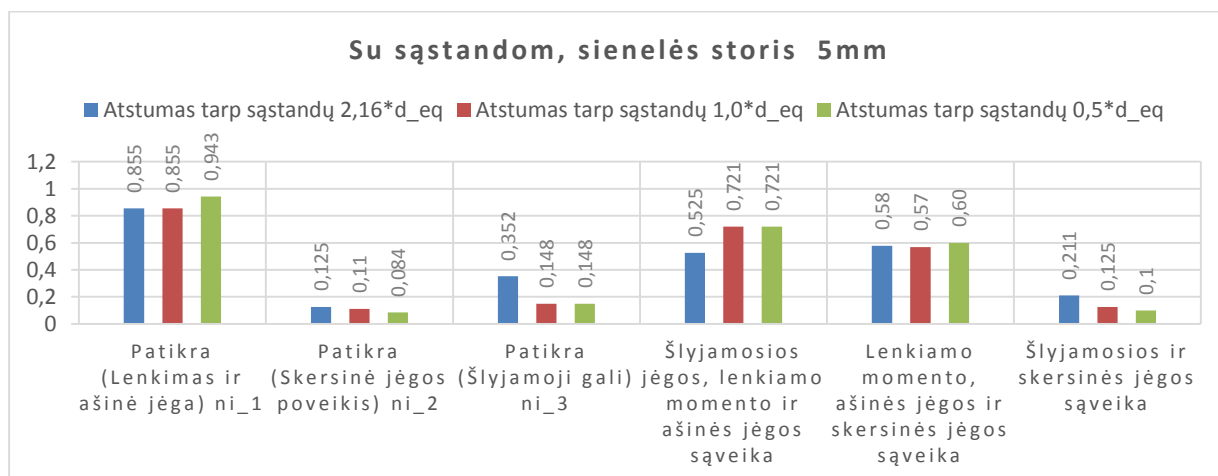


2.12 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $t_w = 6mm$, sija be išilginių sąstandų

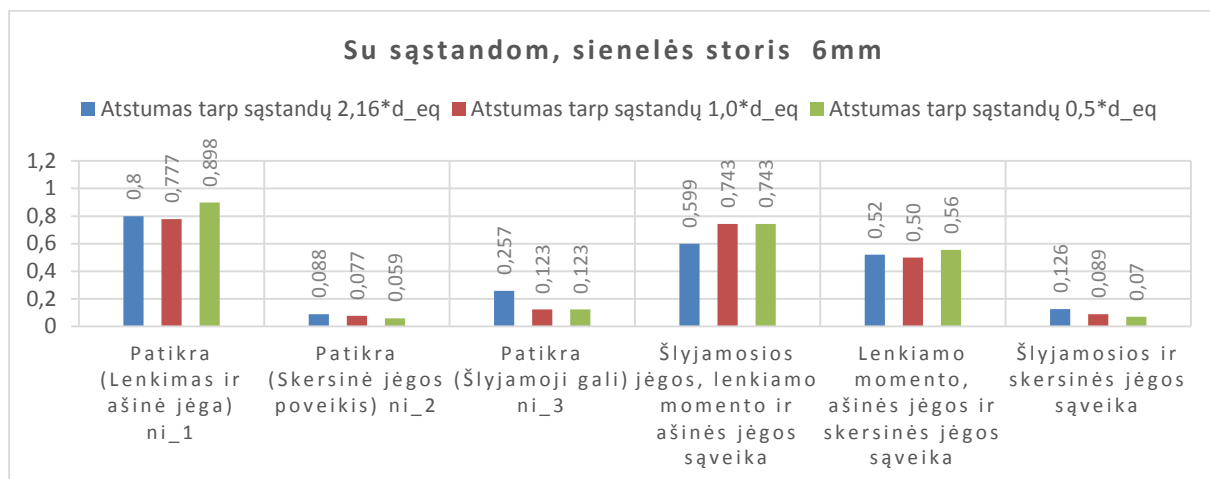


2.13 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $t_w = 7mm$, sija be išilginių sąstandų

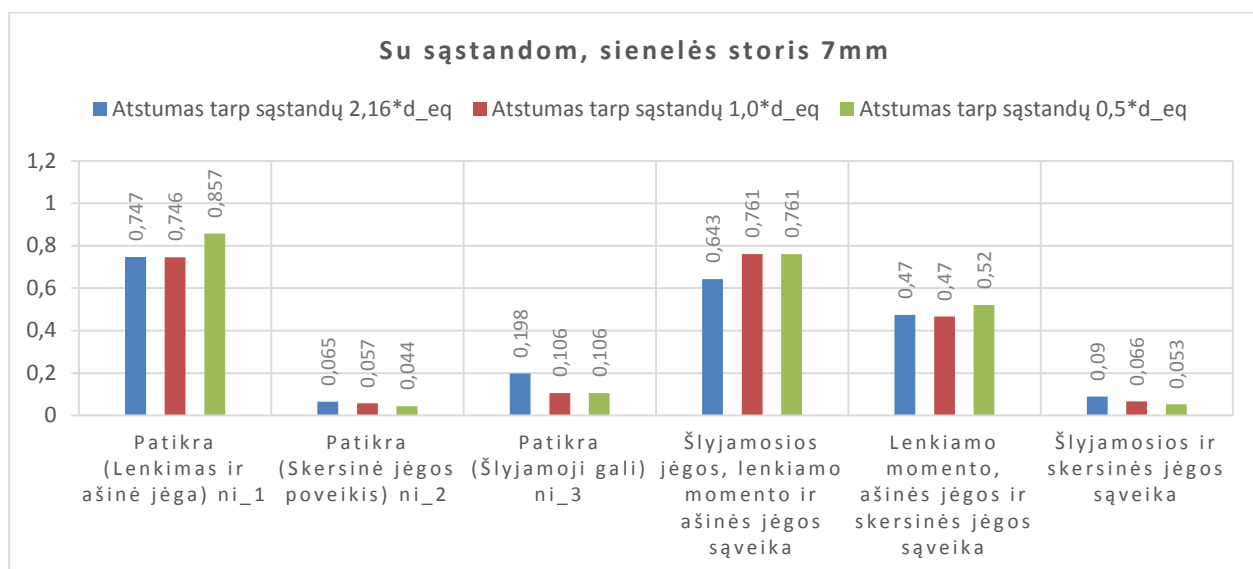
Atliekant analitinius skaičiavimus, skerspjuvis buvo sustandintas išilginėmis sąstandomis, 2.14 – 2.16 pav. būtent parodyti rezultatai gauti, prieš tai nagrinėtą skerspjuvį su tokiom pačiom veikiančios įrašom sustandinus dviem išilginėmis 5mm storio sąstandomis iš abiejų skerspjuvio pusių. Sąstandos ilgis atitinką atstumą tarp skersinių sąstandų. Iš rezultatų pastebime, jog skerspjuvio laikomoji galia padidėjo, lyginant su skerspjuviu be išilginių sąstandų, laikomoji galia padidėjo iki 10 %, žinoma didinant sąstandos plotį, galima pasiekti ir didesnę laikomąją galią. Esant sijai su išilginėmis sąstandomis, matome jog atstumas tarp skersinių sąstandų turi žymiai mažesnę įtaką. Laikomąją galią taip pat apsprendžia pirmoji patikros sąlyga η_1 . Tačiau pastebimas mažesnis laikomosios galios šuolis, kintant atstumui tarp skersinių sąstandų, čia kintant atstumui nuo $1,0 \cdot d_{eq}$ iki $0,5 \cdot d_{eq}$, laikomoji galia sumažėja per 9-12 %, tuo tarpu esant sijai be išilginių sąstandų – 15-20 %. Šlyjamoji galia esant išilginėms sąstandoms, mažėjant atstumui tarp sąstandų palaipsniui mažėja ir esant atstumui nuo $1,0 \cdot d_{eq}$ iki $0,5 \cdot d_{eq}$ nekinta.



2.14 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $t_w = 5mm$, sija su išilginėmis sąstandomis



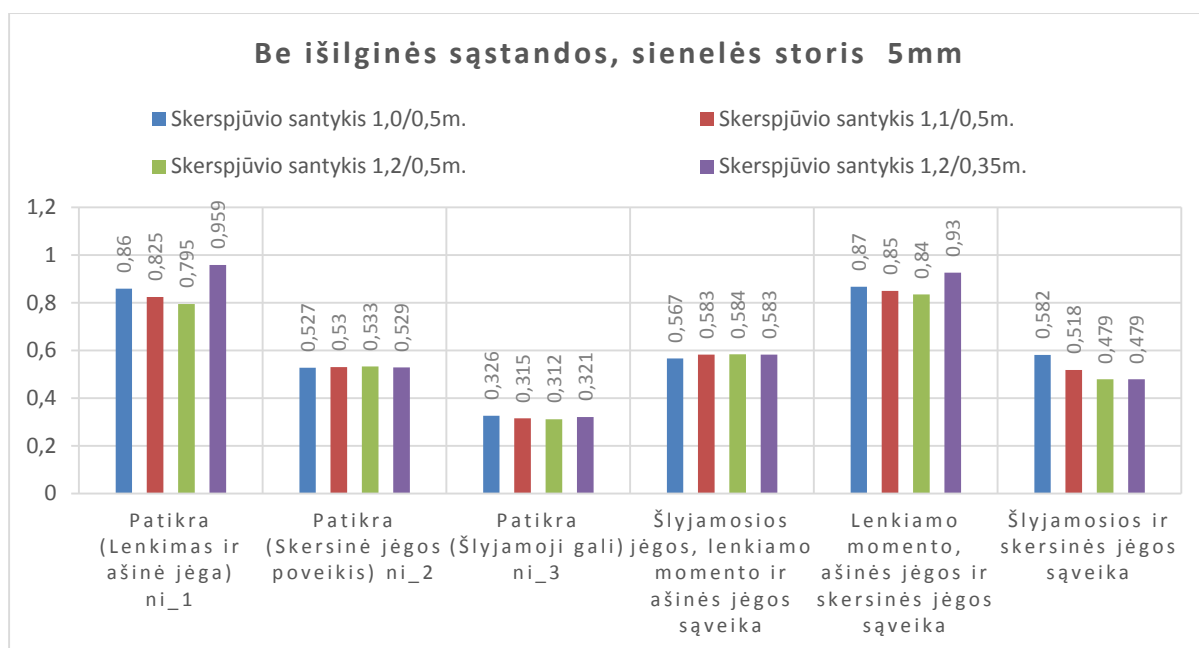
2.15 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjūvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $t_w = 6mm$, sija su išilginėmis sąstandomis



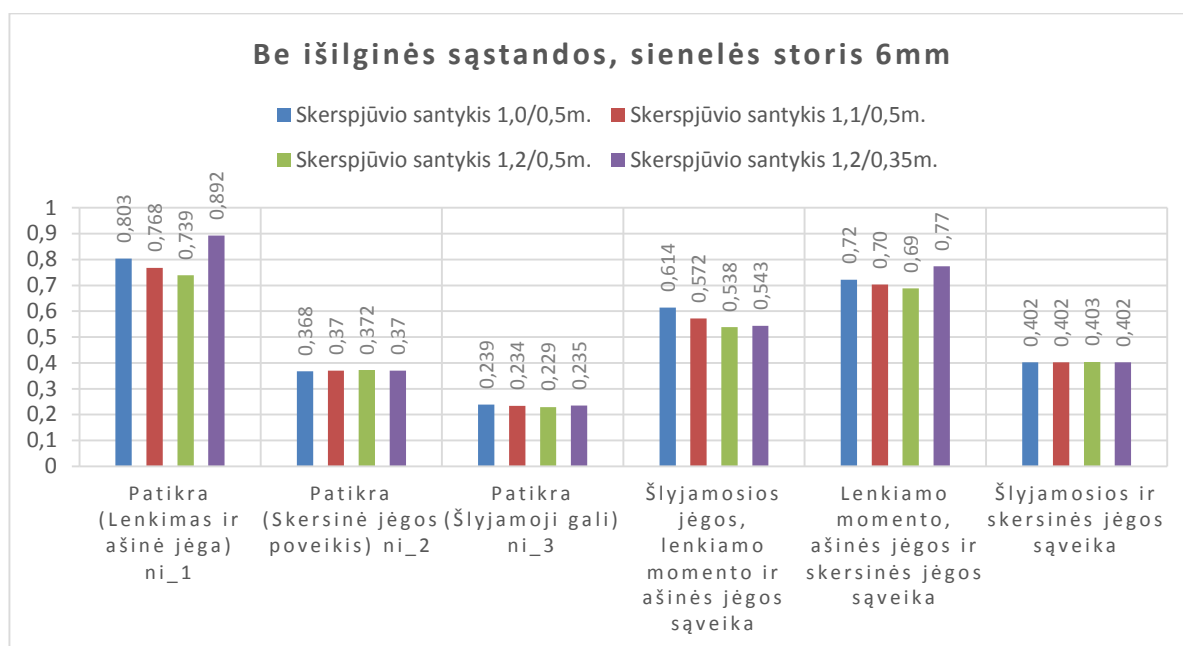
2.16 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjūvio sienelės aukščio kitimo koef. lygus 2, sienelės storis $t_w = 7mm$, sija su išilginėmis sąstandomis

Kaip jau buvo minėta, siekiant išnagrinėti euronormose aprašytus ketvirtos klasės kintančio skerspjūvio skaičiavimo metodus, buvo varijuojama ir sienelės aukščio kitimo koeficientu. Euronormose ir pagal jas paruoštuose skaičiavimo vadovuose, nurodyta, jog analitiniai skaičiavimai teisingi, su prielaida jog kitimo koeficientas neviršija 2, tai yra $\frac{h_{max}}{h_{min}} \leq 2$. Tačiau siekiant išanalizuoti skaičiavimo metodikas, šiame ddarbe varijuojama nuo 2 iki 3,42. Paveikslėluose 2.17 – 2.20 pateikti rezultatai yra gauti skerspjūvį apkrovus įrašomis: $M_{Ed} = 524 kNm$, $V_{Ed} = 114 kN$, $N_{Ed} = 205 kN$, keičiamas sienelės aukščio koeficientas ir sienelės storis. Sienelės aukščio kitimų reikšmės: $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}; \frac{1100}{500}; \frac{1200}{500}; \frac{1200}{350}$.

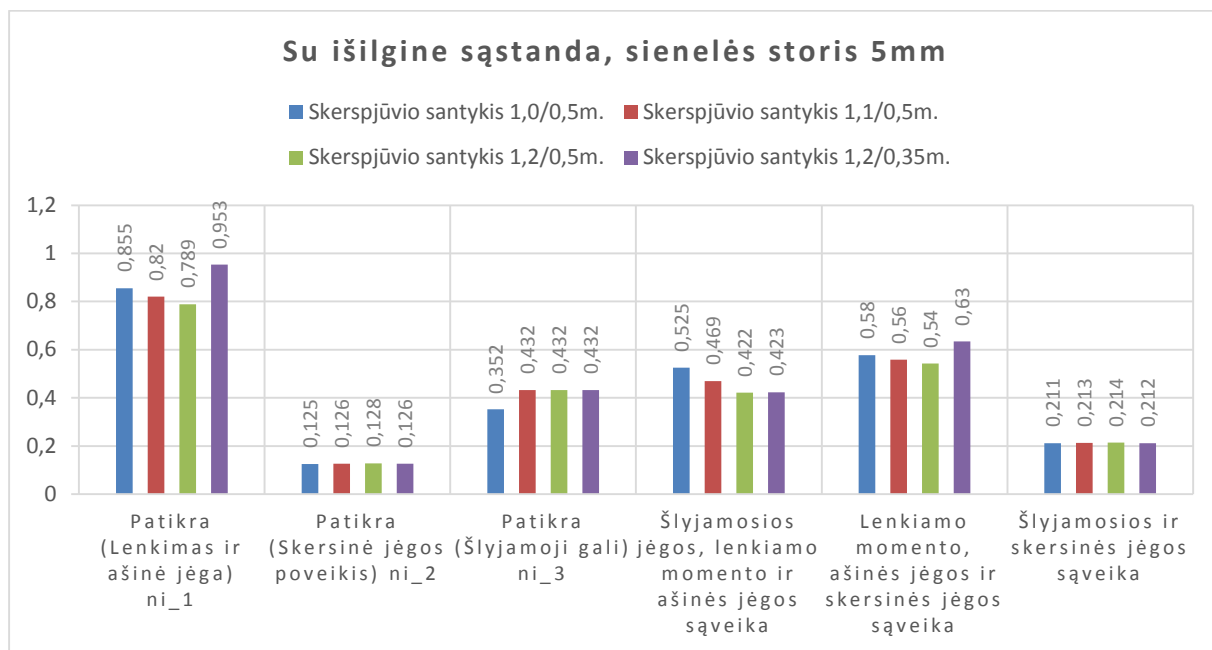
Lemiamą sąlygą visuose atvejuose – lenkimo ir ašinės jėgos poveikis, kuriam didėjant sijos aukščio kitimo koeficientas, santykinai mažėja, iki ypač nestandartinio skerspjuvio – $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{350}$, kurio laikomoji galia ženkliai sumažėja, nuo mažiausios reikšmės skiriasi per 20%. Kitos laikomosios galios tikrinimo sąlygos labai panašios, kinta nuo 2-5 %, Įvedus išilginės sąstandos, 5-10mm storio, pastebimas neženklaus laikomosios galios sustiprėjimas, kadangi labiausiai apsprendžia skersinės galios sustiprėjimą, o lemiamą sąlygą yra lenkimo ir ašinės jėgos poveikis.



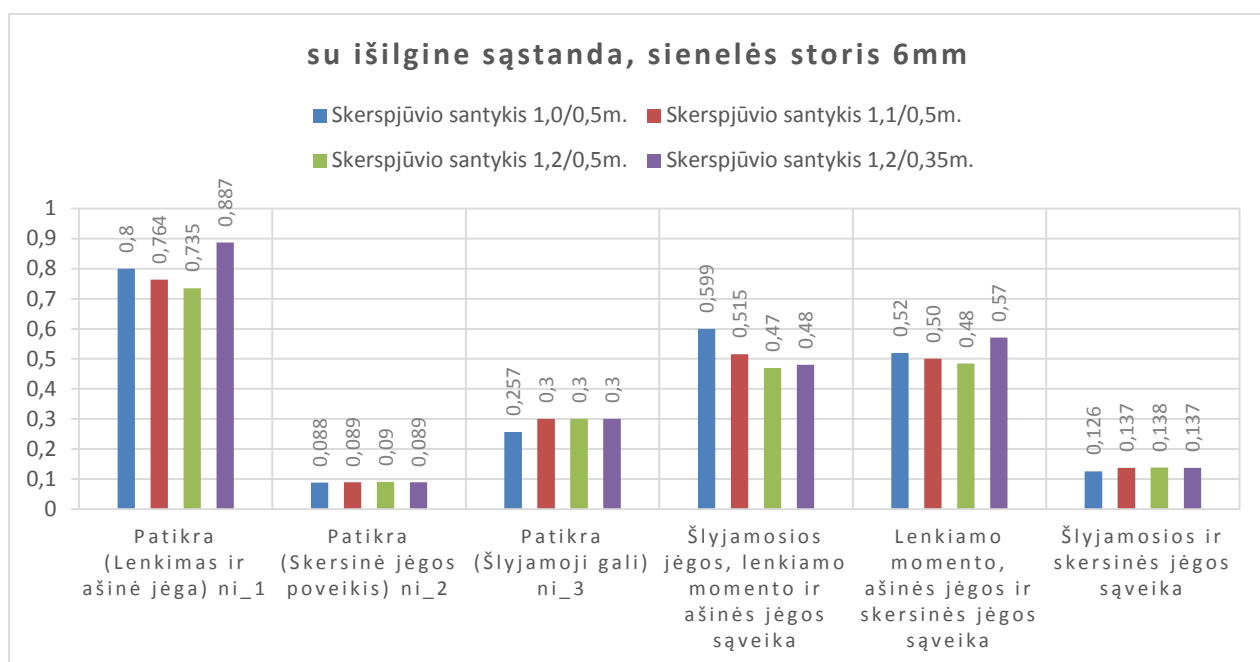
2.17 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės storis $t_w = 5 \text{ mm}$, sija be išilginių sąstandų, atstumas tarp skersinių sąstandų 1,56 m



2.18 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjuvio sienelės storis $t_w = 6 \text{ mm}$, sija be išilginių sąstandų, atstumas tarp skersinių sąstandų 1,56 m



2.19 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjūvio sienelės storis $t_w = 5 \text{ mm}$, sija su išilginėmis sąstandomis, atstumas tarp skersinių sąstandų $1,56 \text{ m}$

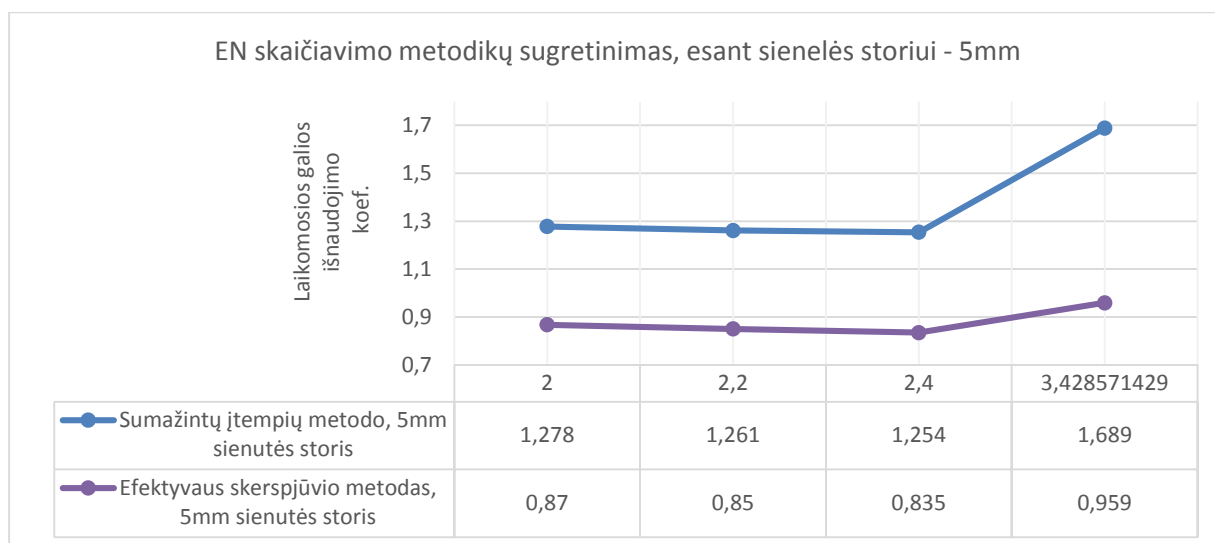


2.19 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas. Skerspjūvio sienelės storis $t_w = 6 \text{ mm}$, sija su išilginėmis sąstandomis, atstumas tarp skersinių sąstandų $1,56 \text{ m}$

2.1.8. Euronormų metodikų sugretinimas

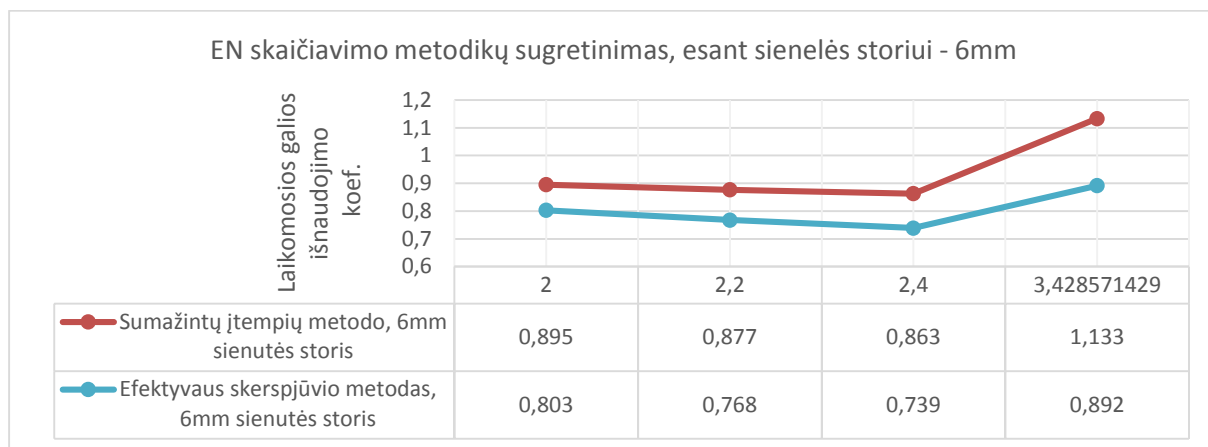
Euronormose (EN 1993-1-5 (10)) yra aprašytas sumažintųjų įtempių metodas, kaip jau buvo minėta anksčiau – tai alternatyva efektyviojo pločio metodui. Tam kad išnagrinėti šiuos du metodus, buvo sudarytas sumažintųjų įtempių metodo skaičiavimo algoritmas *Mathcad* skaičiavimo pakete (*B Priedas*). Kad sulyginti šiuos EN metodus skerspjūvis buvo apkrautas

įrašomis: $M_{Ed} = 524 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 114 \text{ kN}$, $N_{Ed} = 205 \text{ kN}$, keičiamas sienelės aukščio koeficientas ir sienelės storis. Sienelės aukščio kitimų reikšmės: $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}; \frac{1100}{500}; \frac{1200}{500}; \frac{1200}{350}$, kiti režiai: $t_w = 5 \div 7 \text{ mm}$ storio. Atstumas tarp sąstandų parenkamas kaip pavyzdiniame rėme – $1,56 \text{ m}$. Paveiksluose 2.20 – 2.22 pateikti rezultatai, kurie parodė jog esant labai liaunai sieniei $\lambda_p = 1,244 \div 1,304$, skirtumas tarp metodikų yra didžiausias ir siekia net 78 % tarp ekstreminių reikšmių. 2.20 pav. matome, jog skaičiuojant sumažintųjų įtempių metodu, skerspjūvis netenkina laikomosios galios sąlygos visais atvejais, tuo tarpu efektyviojo pločio metodu, laikomoji galia pakankama. Taip pat iš rezultatų matome, jog sienelės liauniui mažėjant, t.y. didinant sienelės storį, skirtumas tarp metodikų mažėja. Esant sienelės santykiniam liauniui $\lambda_p = 1,037 \div 1,087$, skirtumas tarp ekstreminių reikšmių sumažėjo iki 27 %. 2.21 pav. matome, jog sienelės storiui esant $t_w = 6 \text{ mm}$, abi metodikos tenkina laikomosios galios sąlygą, išskyrus atvejį kai sienelės aukščių santykis parenkamas ypač nestandartinis, t.y. $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{350}$. 2.22 paveiksle matome atvejį, kai sienelės santykinis liaunis $\lambda_p = 0,889 \div 0,931$, šiuo atveju metodikų rezultatai ypač artimi ir skirtumas varijuoja tarp 5-8 %. Taip pat pastebime, kad esant sienelės aukščių santykiui 3,43 didesnė laikomoji galia gaunama sumažintųjų įtempių atveju.

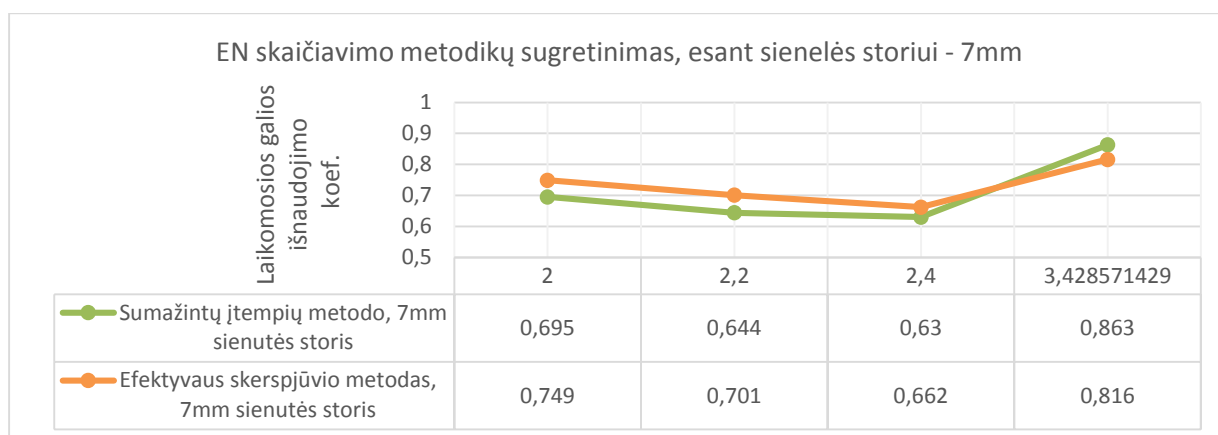


2.20 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas, tarp EN metodikų. Skerspjūvio

sienelės maksimalios ir minimalios reikšmės santykio koef.: $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}; \frac{1100}{500}; \frac{1200}{500}; \frac{1200}{350}$



2.21 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas, tarp EN metodikų. Skerspjuvio sienelės maksimalios ir minimalios reikšmės santykio koef.: $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}; \frac{1100}{500}; \frac{1200}{500}; \frac{1200}{350}$



2.22 pav. Laikomosios galios patikrinimo sąlygų sugretinimas, tarp EN metodikų. Skerspjuvio sienelės maksimalios ir minimalios reikšmės santykio koef.: $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}; \frac{1100}{500}; \frac{1200}{500}; \frac{1200}{350}$

Atlikus analitinių skaičiavimų rezultatų analizę, pastebima, jog didžiausią įtaką ketvirtos klasės kintančio skerspjuvio elementams turi lenkimo momentas ir ašinė jėga, kadangi esminė yra pirmoji skerspjuvio laikomosios galios tikrinimo sąlyga (1.34) nulemianti skerspjuvio laikomąją galią, neskaitant atvejo, kai skerspjuvio sienelės storis 5mm. Esant atstumui tarp sąstandų $2,0 \cdot d_{eq}$ iki $1,0 \cdot d_{eq}$, skerspjuvio laikomoji galia kinta nežymiai. Tačiau žymus laikomosios galios sumažėjimo šuolis atsiranda sumažinus atstumą tarp sąstandų iki $0,5 \cdot d_{eq}$. Esant tokiam atstumui pasireiškia sąveika tarp plokštelės ir kolonos klupimų, kurį ypač svarbu įvertinti nagrinėjant ketvirtos klasės skerspjuvį.

Ženklaus šlyjamosios galios padidėjimas pastebimas įvedant išilgines sąstandas į skerspjuvį, įvedus 5mm. storio sąstandas, iš abiejų skerspjuvio šonų, skersinės jėgos poveikis sumažėja per 25-32 %, priklausomai nuo sienelės liaunio. Tačiau bendra skerspjuvio laikomoji galia padidėja neženkliai iki 8 %.

Lyginant efektyviojo skerspjūvio ir sumažintų įtempių metodus, akivaizdu, jog laikomoji galia esant sienelės storiui $5 \div 7$ mm, pirmuoju atveju visada didesnė, tačiau skirtumas tarp metodų mažėja, didinant sienelės storį, t.y. mažinant santykinio liaunio reikšmę.

Skaičiavimo algoritmų pavyzdžiai pateikti B priede, o rezultatų lentelės ir grafikai pateikti C priede. Norint išnagrinėti gautų rezultatų tikslumą ir palyginti gautus rezultatus, atliekami eksperimentiniai tyrimai skaitiniais metodais, tai yra pasitelkus baigtinių elementų programą SOFiSTiK, bus sudaryti atitinkami modeliai ir atliekami baigtinių elementų metodo skaičiavimai. Trečiame skyriuje aprašomi baigtinių elementų analizės metodai – skaitinė baigiamojo darbo dalis.

3. SKAITINIO EKSPERIMENTO DALIS

Skaitiniai eksperimentai plačiai paplito mokslo ir technikos srityje, tai tiriamų objektų modeliavimas kompiuterinėje erdvėje, leidžiantis sukurti tiriamojo objekto ar reiškinių kompiuterinę simuliaciją. Inžinerijoje labiausiai paplitę baigtinių elementų metodai.

Inžinerinis baigtinių elementų metodų (BEM) taikymas labai platus, tai universali skaičiavimų technologija, leidžianti panagrinėti tiriamojo objekto ar sistemos fizikinius procesus, elgseną, veikiant įvairaus tipo apkrovoms, bei globalų sistemos būvį (Barauskas *et al.* 2004).

Šiame darbe skaitiniams eksperimentams atlikti pasirinkta baigtinių elementų programa SOFiSTiK. Baigtinių elementų konstrukcijų analizė šiame programiniame pakete atliekama trimis žingsniais:

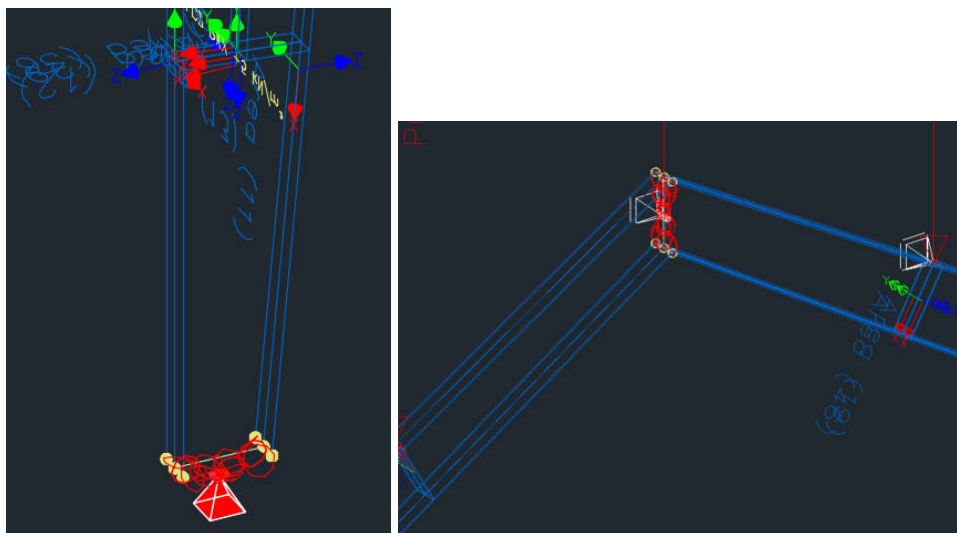
- Pre – procesingas – šiame žingsnyje sudaromas diskretusis tiriamosios konstrukcijos, ar jos elemento modulis, suvedamos apkrovos, parenkamos medžiagos, įvedami įtvirtinimai. Šis žingsnis gali būti atliekamas keliais SOFiSTiK programos moduliais: SOFiPLUS – tai CAD aplinkos modulis, MONET ir TEDDY – tai tekstinės įvesties moduliai.
- Procesingas – šiame žingsnyje atliekama struktūrinė sistemos analizė. Atliekamas SSD (SOFiSTiK Structural Desktop) modulyje, tai pagrindinis modulis, kuriame paleidžiami skaičiavimai, įvedami pataisos koeficientai. Tai valdantysis modulis, kuriame sukeliami informacija iš kitų modulių.
- Post-Procesingas – šiame žingsnyje atliekamas rezultatų apdorojimas ir tolesni skaičiavimai. Rezultatų apdorojimas ir vaizdavimas vyksta WiNGRAF modulio aplinkoje.

Analizuojamos rėminės konstrukcijos buvo modeliuojamos, SOFiPLUS aplinkoje, lakštiniais (SHELL) tipo elementais. Lakštinio tipo elementai braižomi kaip plokštelės, kurioms užduodamas atitinkamas storis, įtvirtinimo sąlygos, apkrovos ir t.t. Atliekant skaičiavimus, plokšteliniai elementai suskaidomi į baigtinius keturkampius elementus (galimi ir trikampiai), kurie turi daugiau laisvės laipsnių nei strypiniai elementai, ir gali atvaizduoti elemento klupimo formas.

3.1. Kintančio skerspjuvio rėmo skaitinio modelio sudarymas

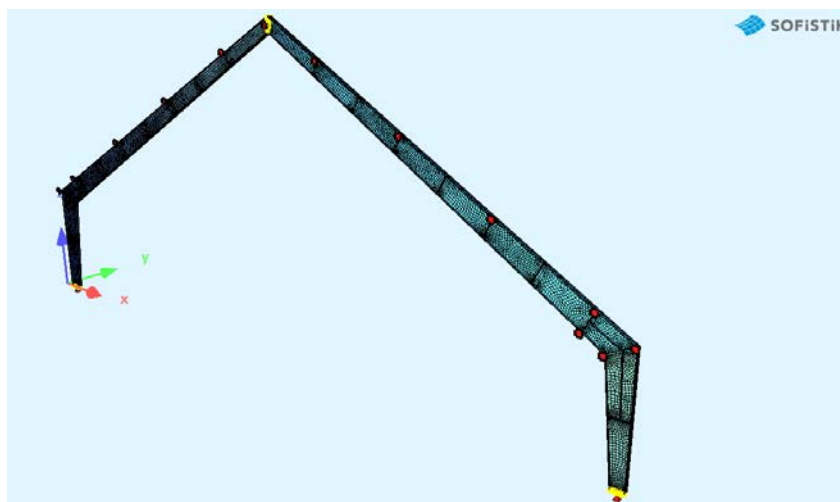
SOFiPLUS modulyje buvo sudaryta keletas skirtingų kintančio skerspjuvio rėmo konstrukcijų, pirmiausia skirtumas buvo tarp pagrindinių elementų, tai yra kolonos ir sijos dvitėjo skerspjuvio sienelės aukščio pokyčio, teko varijuoti ir sąstandų išdėstymu, ir nauju sąstandų įvedimu. Taigi iš viso buvo sudaryta šešiolika modelių. Visi konstrukcijos elementai

modeliuojami „SHELL“ tipo elementais, priskiriant atitinkamą storį. 3.1 paveiksle parodytas konstrukcijos fragmentas iš SOFiPLUS aplinkos, kuriame pavaizduotas kolonos bazės įtvirtinimas ir rėmo kraigo mazgas. Atramai suformuoti buvo įvedamos papildomos linijos, ties plokštelių kraštais, kurioms priskiriamos įtvirtinimo sąlygos (standus elementas). Šios linijos sujungiamos su tašku, „Constraint“ ryšiais, o taškas atvaizduoja lanksčią atramą. Tokiu pačiu principu buvo suformuotas lankstas, rėmo konstrukcijos, sijų susikirtimo taške.



3.1 pav. Konstrukcijos fragmentai iš CAD aplinkos

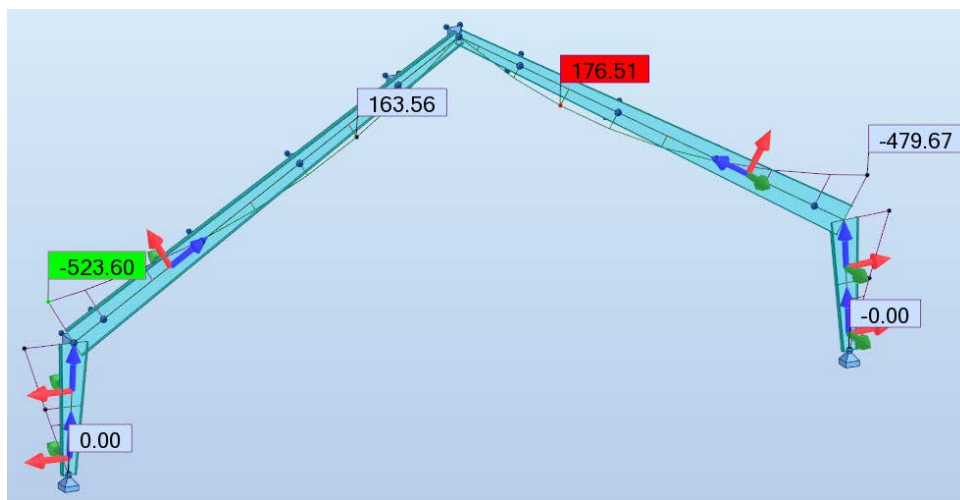
Modeliuojant portalinius rėmus, sijos elemento viršutinė juosta suvaržoma įvedant atramas tose vietose, kur tvirtinami stogo ilginiai, o tam kad užtikrintų apatinės juostos stabilumą, įvedamas suvaržymas iš plokštumos ir apatinėje juostoje, srityse, kuriose momentas pereina į gniuždymą apatinėje juostoje. Šioje vietoje turės būti suformuoti skersiniai ryšiai. Rėmo konstrukcijos modelis su įtvirtinimais parodytas 3.2 paveiksle. Šiame pavyzdyje parodytas rėmas, kurio sijos sienelės kraštinių aukščių santykis $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1100}{500}$, su įvesta išilgine sąstanda sijoje.



3.2 pav. Rėmo modelis, atvaizduotas SOFiSTiK programos SDD modulyje

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

Modeliuojant rėmą, jis buvo apkrautas taškinėmis apkrovomis, pastato ilginių įtvirtinimo vietose. Apkrovos buvo gautos iš *Robot Structural Analysis* baigtinių elementų programos, kurioje buvo modeliuojamas toks pat rėmas strypiniais elementais. Tai buvo atlikta tam, kad sulyginti analitinių skaičiavimus su skaitiniais, kadangi analitiniuose naudojamos įrašos, o *SOFiSTiK* baigtinių elementų programoje rėmas modeliuojamas plokšteliniais elementais, gaunami įtempiai. Todėl buvo būtinas modelis su strypiniais elementais, kuris lengvai atvaizduoja veikiančias apkrovas ir įrašas.



3.3 pav. Momentų diagrama, gauta *Robot* programiniame pakete

Taigi *Robot Structural Analysis* programoje, buvo sumodeliuotas analogiškas rėmas strypiniais elementais jam užduodant atitinkamą kintanti skerspjūvį. Rėmo modelis buvo apkrautas išskirstytomis apkrovomis: sniego, vėjo, įvesta papildoma naudojimo apkrova, norint padidinti įrašas, su atitinkamais saugos koeficientais. Išskirstytos apkrovos buvo perskaičiuojamos į taškines ir sudarytas naujas modelis su taškinėmis apkrovomis, ir sulyginamos įrašos.

3.2. Taikytini baigtinių elementų analizės metodai

Nagrinėjant pasirinktą konstrukciją ar elementą skaitiniais metodais, pirmiausia pasirenkamas baigtinių elementų analizės metodas, kuris priklauso nuo analizės objekto ir grindžiamų prielaidų. Plonasieniams elementams šios prielaidos nurodytos jau aptartoje 1.6 lentelėje (EN 1993-1-5 C.1). Išskirtos trys pagrindinės BEM analizės: tiesinė; klumpumo ir netiesinė.

Tiesinė analizė – tai analizė, kurios metu tiesiogiai sudaromos BEM priklausomybės bei į jas įeinančios matricos ir vektoriai, įpratai vadinami tiesioginiais baigtinių elementų formavimo metodais. Sudarant tiesinius uždavinio modelius, tai turi būti tiesinių algebrinių lygčių sistema, aprašomo elemento e modelis atrodytų taip (Barauskas *et al.* 2004):

$$[K^e]\{U^e\} = \{F^e\}, \quad (3.1)$$

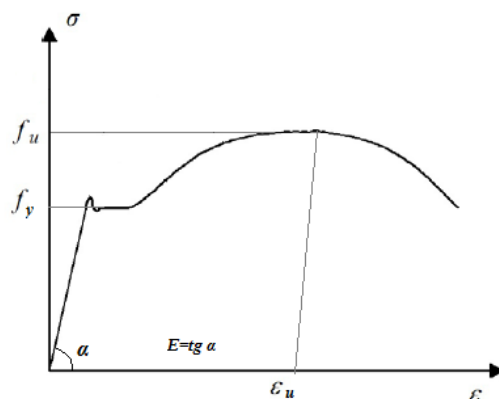
čia $[K^e]$ – elemento standumo matrica; $\{U^e\}$ – mazgų poslinkių vektorius; $\{F^e\}$ – išorinių jėgų vektorius.

Tačiau pastebime jog tiesiniai uždaviniai apibūdina ir atvaizduoja tik apytikslį modelį, tam kad gauti tikslesnį ir realistiškesnį modelį naudojamas netiesinių reiškinių skaitinis modeliavimas. Netiesinio uždavinio atvejų, algebrinė lygtys įvedamas nepriklausomas būvio kintamasis ir lygtis užrašoma taip:

$$[K^e(\{U^e\})]\{U^e\} = \{F^e\}. \quad (3.2)$$

Netiesinis uždavinys atsiranda atsisakius kai kurių tiesinio uždavinio hipotezių ir prielaidų. Šiame darbe netiesinės analizės metu bus nagrinėjami šie netiesiškumo atvejai:

- Medžiagos(fizinis) netiesiškumas, įvertinamas tik netiesinis įtempių ir deformacijų ryšys. Plieno atveju tiesiniame uždavinyje priimama jog tai idealiai tampriai platinė medžiaga, tačiau žinoma jog plieno įtempių ir deformacijų priklausomybė yra netiesinė (3.4 pav.). Netiesiniame uždavinyje atsižvelgiama į medžiagos sustiprėjimą, pagal 1.24 paveikslą.

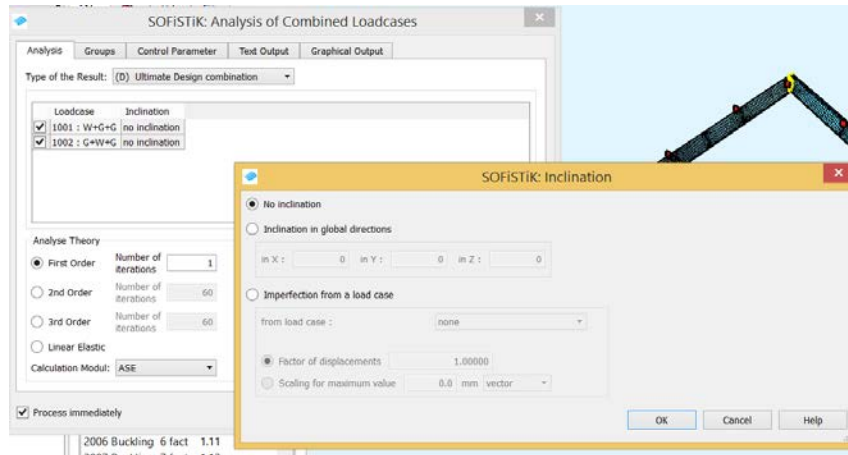


3.4 pav. Plieno įtempių ir deformacijų priklausomybė kreivė

- Geometrinis netiesiškumas – atsiranda dėl atskiro elemento ar visos konstrukcijos geometrijos pasikeitimų. Geometriniam netiesiškumui ypač jautrios plonasienės konstrukcijos, lemiamą įtaką čia turi netiesinės lenkimo deformacijos. Pasireiškia kaip stabilumo netekimas. Geometriniai nuokrypiai parenkami pagal EN 1993-1-5 C priedą, aptartą 1.4.3 poskyryje.

Šios netiesinio uždavinio sąlygos *SOFiSTiK* programoje gali būti įgyvendintos dvejopai, t.y. įvedant reikiamas reikšmes į tekstinę įvestį arba automatiškai. Programiniame pakete yra įvestas plieno dvitiesis įtempių ir deformacijų sąryšis, reikia tik modeliuojant pasirinkti atitinkamą plieno klasę, o geometrinis netiesiškumas, pasirenkamas SSD modulyje, kai parenkamas netiesinė analizė (3.5 pav.). Geometriniai nuokrypiai gali būti įvedami ranka užduodant atitinkamą atstumą arba pagal

elemento išklupimą prieš tai atlikus kitas analizes, arba įvedant atitinkamą geometrinį netiesiškumą TEDDY modulyje.



3.5 pav. Išankstinio geometrinio netobulumo įvedimas SSD modulyje.

Baigtinių elementų programiniame pakete *SOFiSTiK* geometriniam ir fiziniam netiesiškumui įvertinti atliekama netiesinė analizė, taikant modifikuotą Newtono – Raphsono apkrovos kontrolės metodas. Šiame metode kiekviename apkrovos prieaugio žingsnyje daromos iteracijos tam, kad būtų galima eliminuoti nesubalansuotas jėgas $\{Q_i^j\}$. Šios paklaidos atsiranda netiesinį uždavinį sprendžiant tiesinėmis lygtimis. Šiam metodui i -ojo apkrovos prieaugio, esant j -ajai iteracijai, galime užrašyti lygtį:

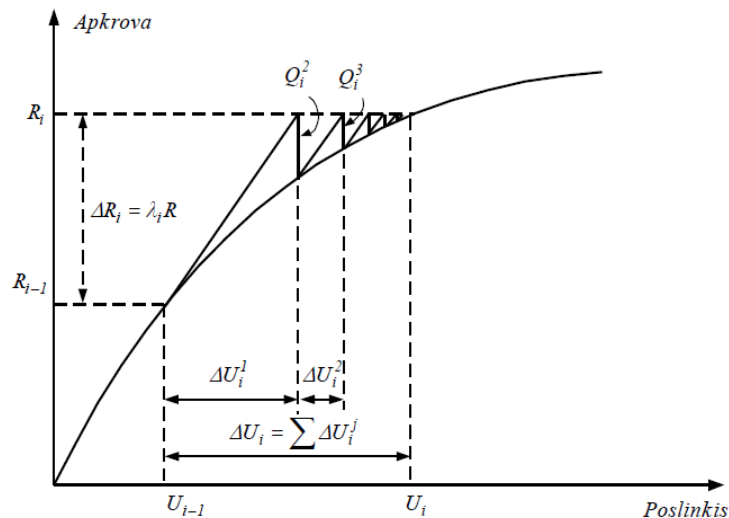
$$[K_i^{j-1}]\{\Delta U_i^j\} = \{\Delta R_i^j\} + \{Q_i^j\}; \quad (3.3)$$

čia

$[K_i^{j-1}]$ – i -ojo apkrovos žingsnio standumo matrica;

$\{\Delta U_i^j\}$ – poslinkių vektoriaus prieaugis;

$\{\Delta R_i^j\}$ – apkrovos pokyčio vektorius;



3.6 pav. Apkrovos kontrolės modifikuotas Newtono-Raphsono metodas

Pirmoje iteracijoje nesubalansuotos jėgos lygios nuliui, t.y. gauname tokią lygtį:

$$[K_i^0]\{\Delta U_i^1\} = \{\Delta R_i^1\}. \quad (3.4)$$

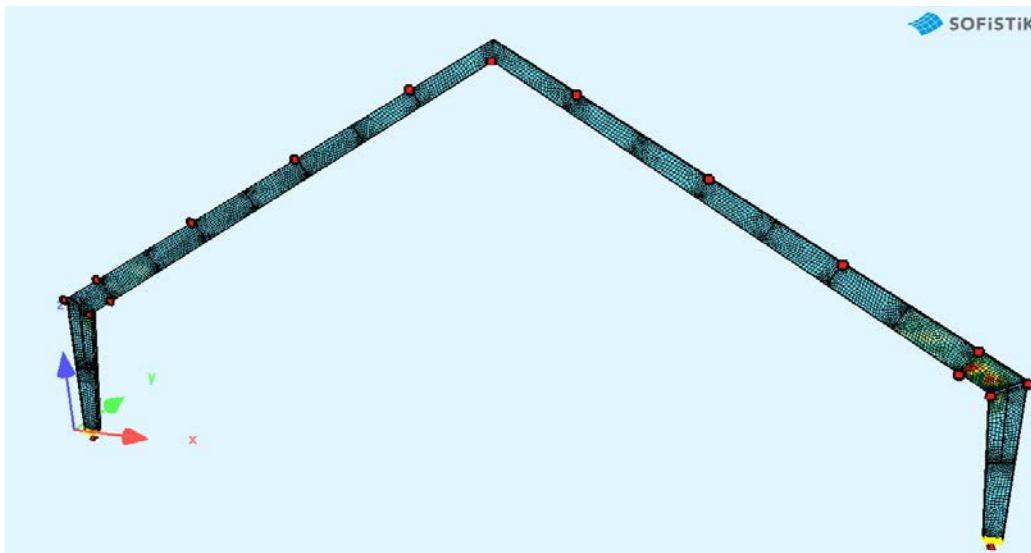
Pagal pirmos iteracijos lygčių sistemos gauname poslinkio pokyčio vektorius $\{\Delta U_i^1\}$. Toliau tikslinamas poslinkio nuo *i-tosios* apkrovos prieaugio. Tolesnėse iteracijos sudaromos poslinkiui tikrinti. Šis tikslinimas atliekamas sudarant lygtis nesubalansuotoms jėgoms.

$$[K_i^{j-1}]\{\Delta U_i^j\} = \{Q_i^j\}. \quad (3.5)$$

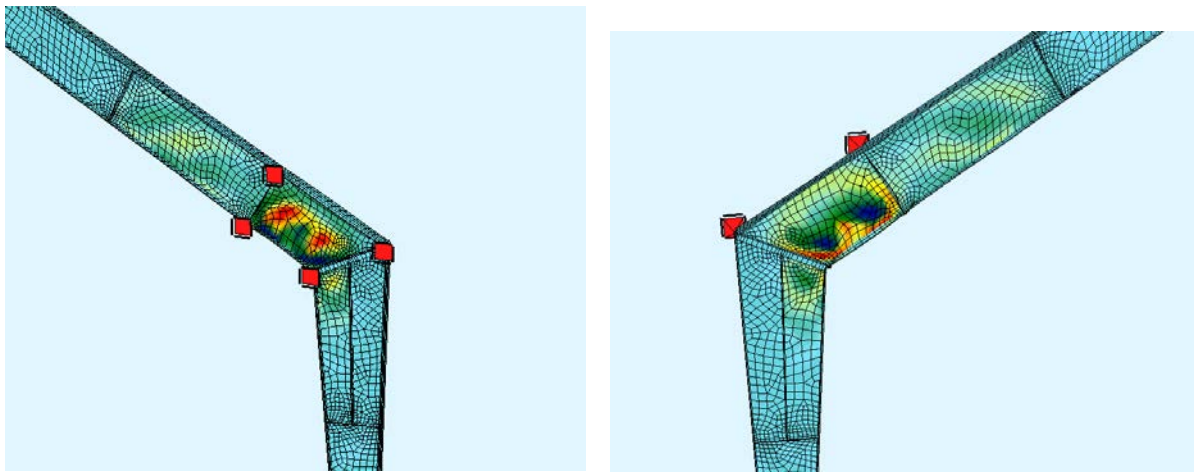
Iteracijos atliekamos kol dydžiai $\{Q_i^j\}$ ir $\{\Delta U_i^j\}$ tampa begalo maži. Modifikuotas Newtono-Raphsono metodas išsiskiria tuo, kad *i-osios* apkrovos prieaugyje visam iteracijų skaičiui standumo matrica nekeičiama (3.6 pav.).

3.3. Skaitinio modelio skaičiavimo rezultatų analizė

Taigi baigtinių elementų programoje *SOFiSTiK* buvo sudaryti skaičiuojamieji modeliai, pagal analitinius skaičiavimus. 3.9-3.10 paveiksluose pavaizduotos klupumo formos, kai skerspjuvio kitimo koeficientas $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$, sienelės storis 4mm, o veikiančios įrašos – $M_{Ed} = 524 \text{ kNm}$, $V_{Ed} = 114 \text{ kN}$, $N_{Ed} = 205 \text{ kN}$. 3.8 paveiksle pavaizduota analitinių skaičiavimo metodikų rezultatųulyginimas su skaitiniais metodais. Grafike pavaizduota laikomosios galios priklausomybė nuo rėmo elementų skerspjuvio sienelės aukščio kitimo. Visais atvejais analitinio efektyvaus skerspjuvio metodu gauti rezultatai yra artimesni skaitiniams. Esant 4 mm sienelės storiui sumažintų įtempių metodu gauti rezultatai, nuo skaitinio tiesinio metodo skiriasi per 105 %, netiesinio – 82÷116 %, o nuo klupimo analizės per 65 %. Tuo tarpu efektyvaus skerspjuvio metodas, nuo skaitiniu skiriasi per 7 – 21 %. Esant 4 mm sienelei, visais sienelės aukščio kitimo atvejais, skerspjuvio laikomąją galią nulemia klupimo analizė. Prie pasirinktos apkrovos klupimo analizė netenkinama, skerspjuvio sienelė išklumpa prie 0,84 apkrovos koeficiento. Nors netiesinės ir tiesinės analizės atveju, įtempiai neviršija leistinų. 3.10 – 3.12 paveiksluose pavaizduoti rezultatai *SOFiSTiK WinGraf* modulyje. Daugiau rezultatų iš *WinGraf* modulio pateikta D priede.

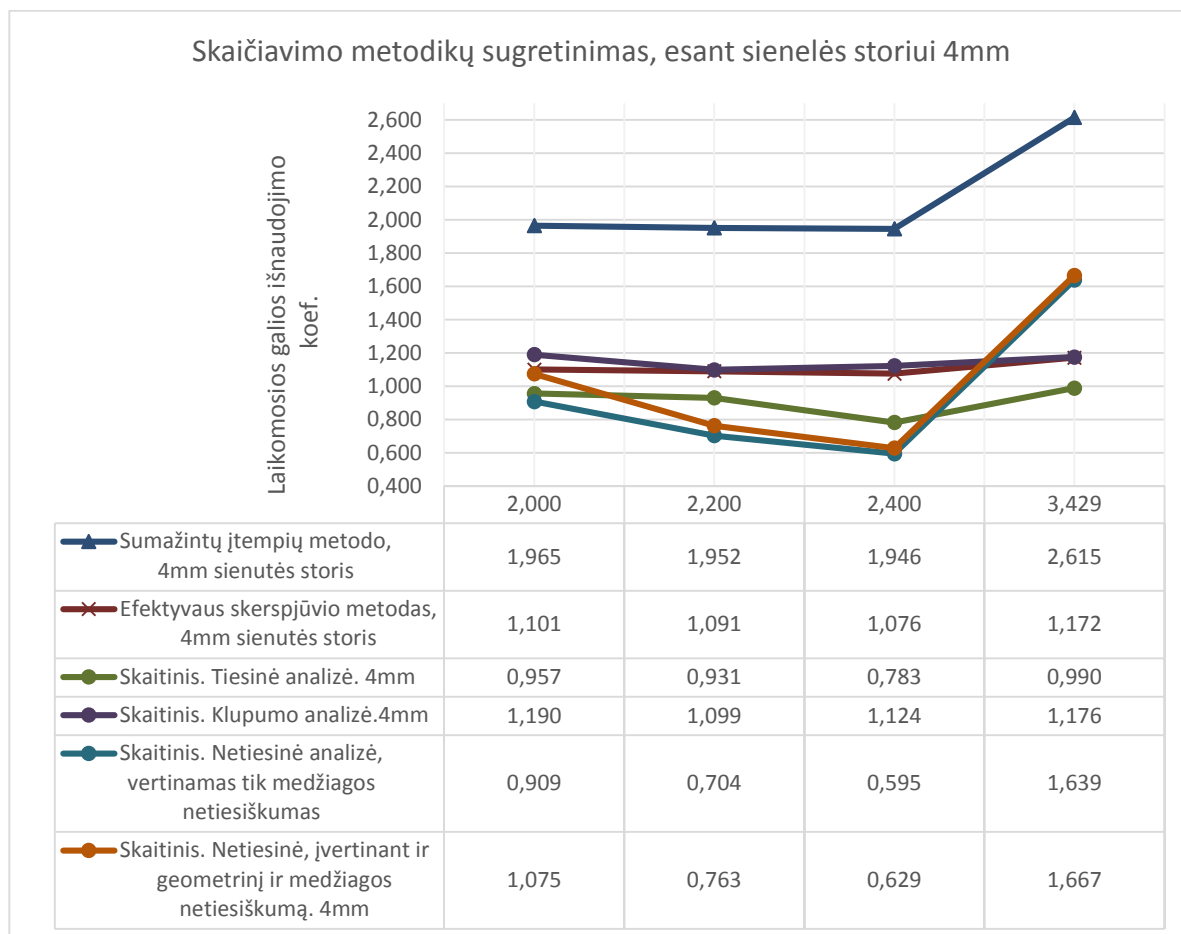


3.7 pav. Rėmo dešimtoji klupumo forma, kitimo koeficientas lygus $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$

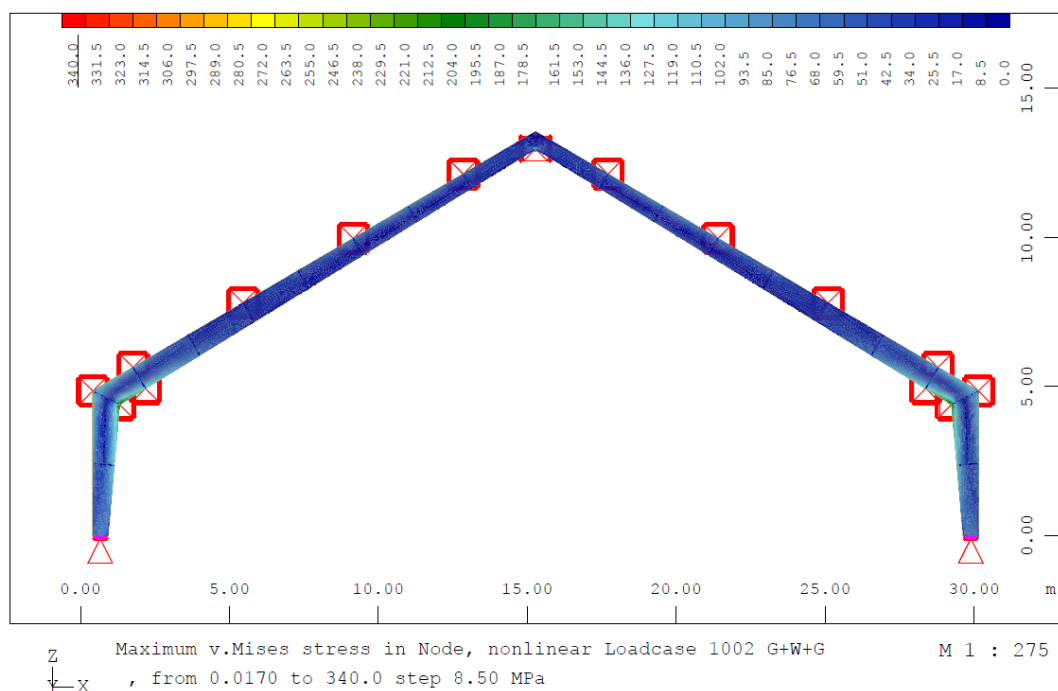


3.8 pav. Rėmo dešimtosios klupumo formos lokalus vaizdas, kitimo koeficientas lygus $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$

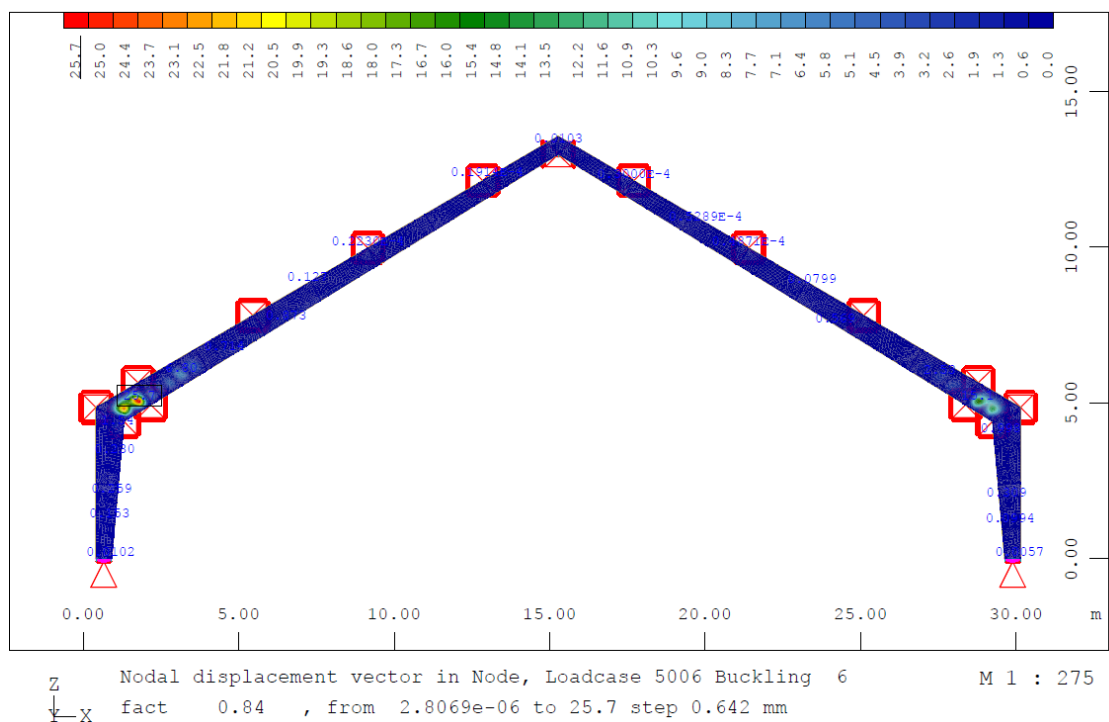
Analizuojant rėmus su 4 mm skerspjūvio sienelės storiu nustatyta, kad didinant elemento skerspjūvio aukščio kitimą, pasiekama didesnė laikomoji galia, tačiau dėl didelio sienelės liaunumo pokytis nepakankamas, kad skerspjūvis tenkintų klupumo analizę. Kintant skerspjūvio kitimo koeficientui nuo 2 iki 2,4, t.y. $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}; \frac{1100}{500}; \frac{1200}{500}$, klupumo analizė skerspjūvio išnaudojimo koeficientas pakinta atitinkamai – 8,3 %, 5,9 %. Pagal kitas skaitinių metodų sąlygas skerspjūvio laikomoji galia pakankama ir didinant skerspjūvį, didėja labiau nei klupumo analizė. (žr. 3.9 pav.).



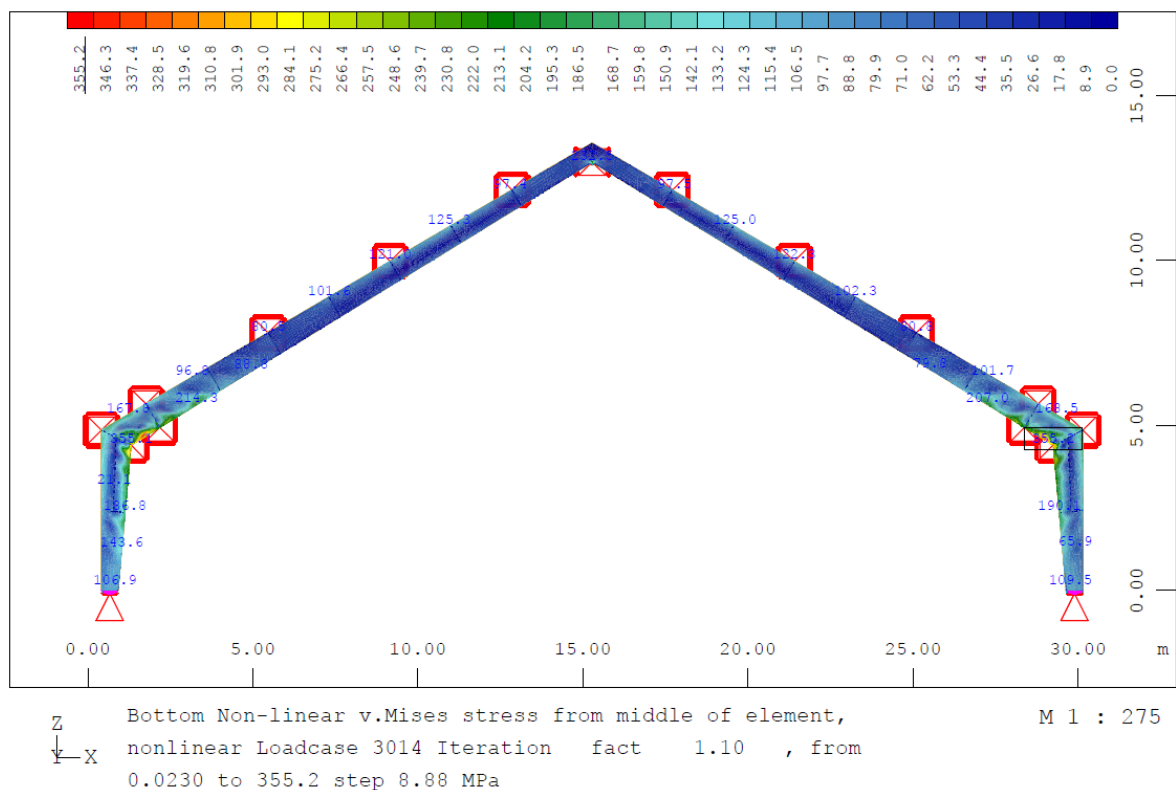
3.9 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 4mm



3.10 pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymas, kai rėmo sienelės storis 4mm, o aukščio kitimo koeficientas $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$



3.11pav. Klupumo formos atvaizdavimas WinGraf modulyje, kai rėmo sienelės storis 4mm, o aukščio kitimo koeficientas $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$

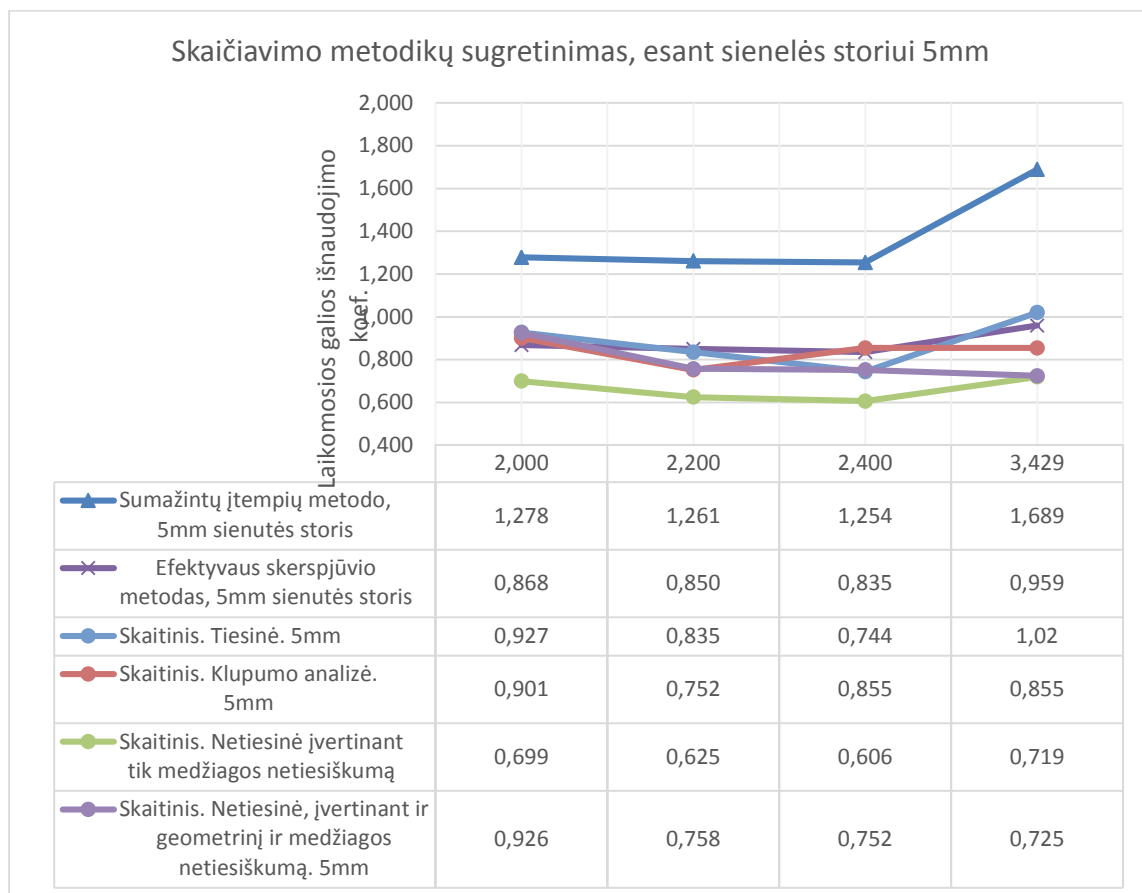


3.12pav. Netiesinės analizės, kai įvertinamas medžiagos netiesiškumas ir geometriniai netobulumai, Von Mizeso įtempių pasiskirstymas. Kai rėmo sienelės storis 4mm, o aukščio kitimo koeficientas $\frac{h_{max}}{h_{min}} =$

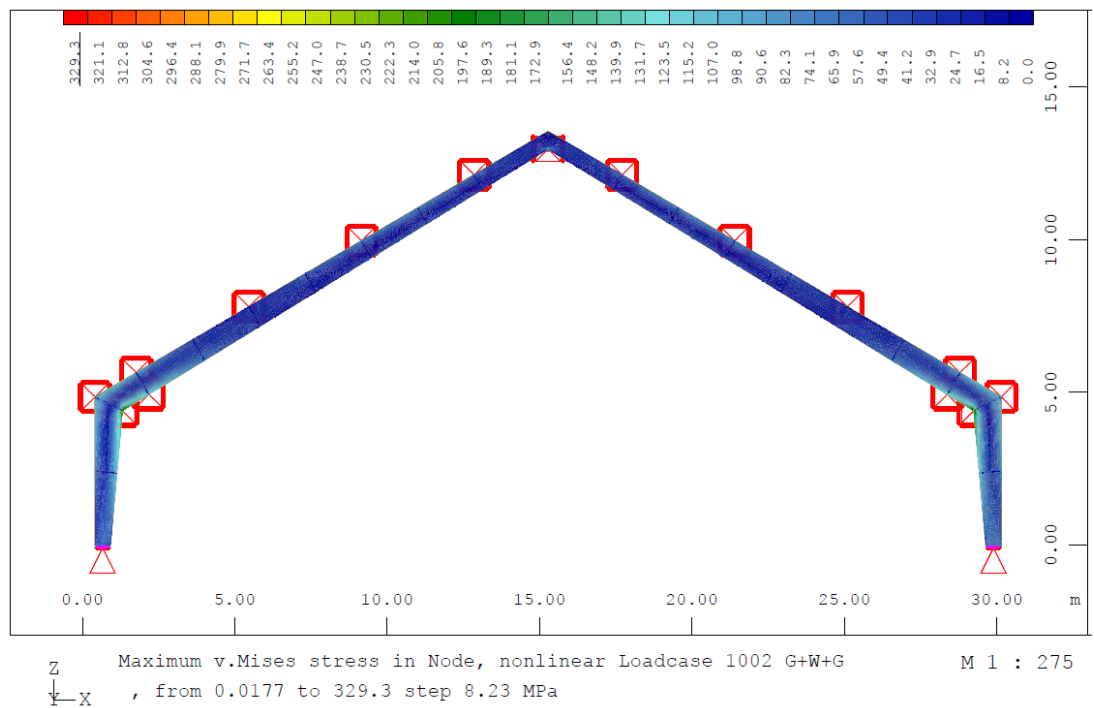
$$\frac{1000}{500}$$

Toliau buvo tiriami tie patys rėmai, tačiau keičiamas sienelės storis. 3.13 paveiksle parodytos identiškos priklausomybės, prie tos pačios apkrovos, kaip aukščiau esančiame pavyzdyje, tačiau skerspjūvio sienelės aukštis padidintas iki 5mm. Toks sienelės storis leido atsisakyti išilginės sąstandos, visos sąlygos tenkina skerspjūvio laikomąją galią. Sumažinus sienelės liaunumą ir didinant skerspjūvio kitimo koeficientas pastebėta, kad pagrindinė sąlygą apsprendžianti skerspjūvio galią – antros eilės netiesinė analizė, kai įvertinamas ir medžiagos ir geometrinis netiesiškumas. Kintant skerspjūvio kitimo koeficientui nuo 2 iki 2,4, t.y. $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}; \frac{1100}{500}; \frac{1200}{500}$, laikomoji skerspjūvio galia didėja atitinkamai – 22 %, 23,15 %. Pastebime, jog skirtumas laikomosios galios tarp skerspjūviu su kitimo koeficientu 2,2 ir 2,4 nedidelis, visose sąlygose svyruoja nuo 12 % tiesinės analizės atveju, 3,13 % - netiesinė, įvertinant tik medžiagos netiesiškumą ir 0,76 % – įvertinus ir geometrinius netobulumus.

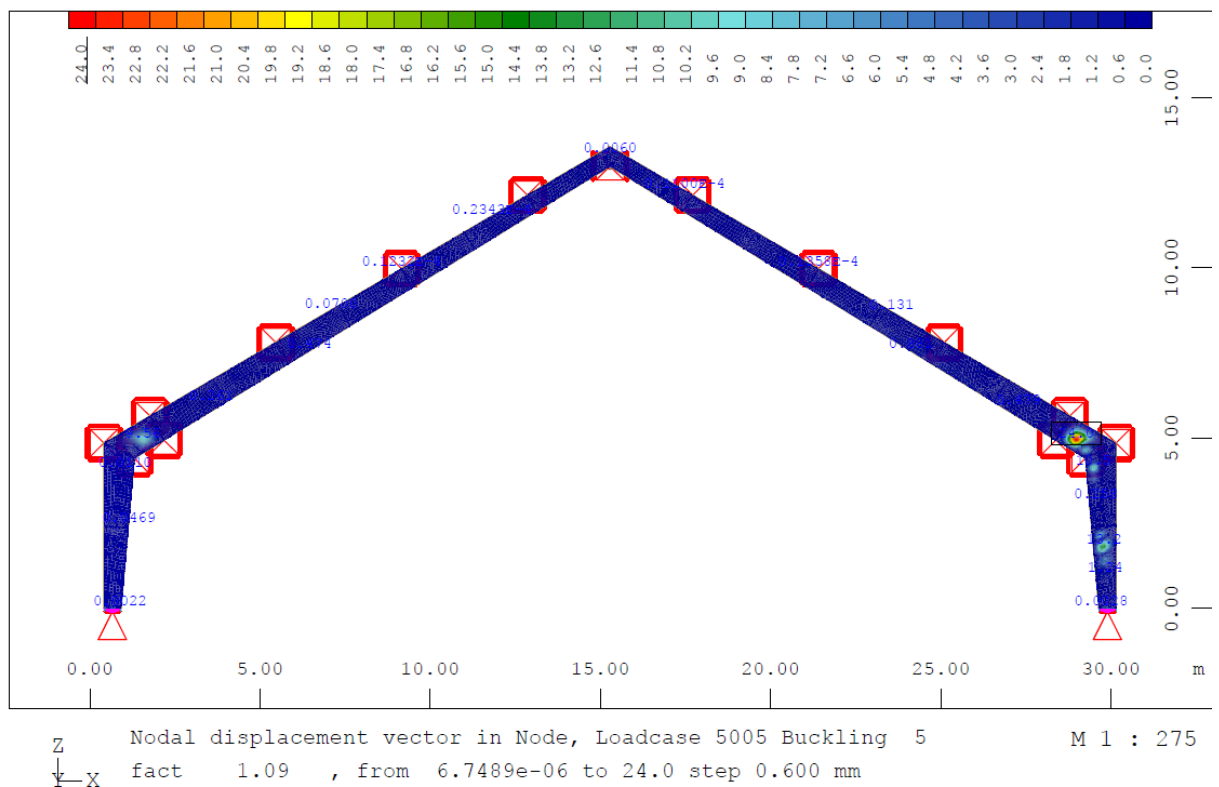
Skirtumas tarp metodikų panašus kaip ir esant sienelės storiui 4mm, tačiau didinant sienelę pastebėtas mažesnis atitrūkimas tarp sumažintųjų įtempių metodo ir skaitinių metodų – mažiausias skirtumas su tiesine analizę – 37-68 %, o efektyvaus skerspjūvio skirtumas labai nedidelis ir, lyginant su pagrindine laikomąją galią lemiančią sąlyga, yra 6,27 – 12,2 %. 3.14 – 3.16 paveiksluose pavaizduoti rezultatai iš *SOFiSTiK WinGraf* modulio.



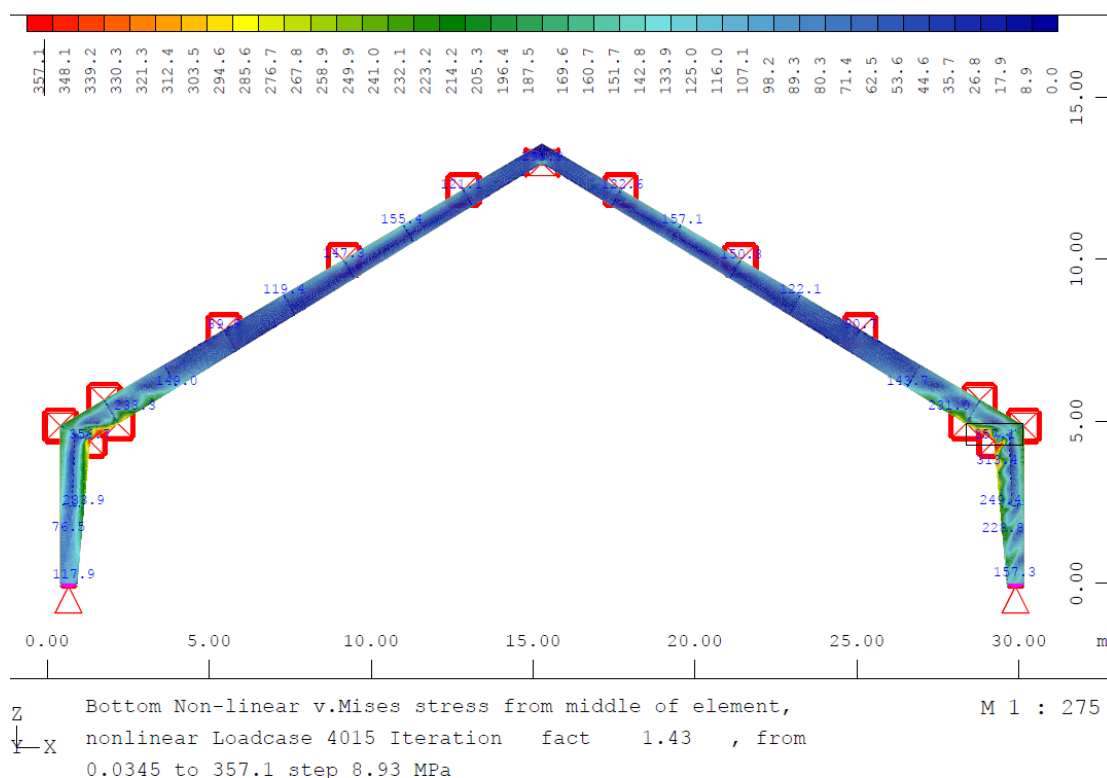
3.13 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 5mm



3.14pav. Von Mizes įtempių pasiskirstymas, kai rėmo sienelės storis 5mm, o aukščio kitimo koeficientas $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$

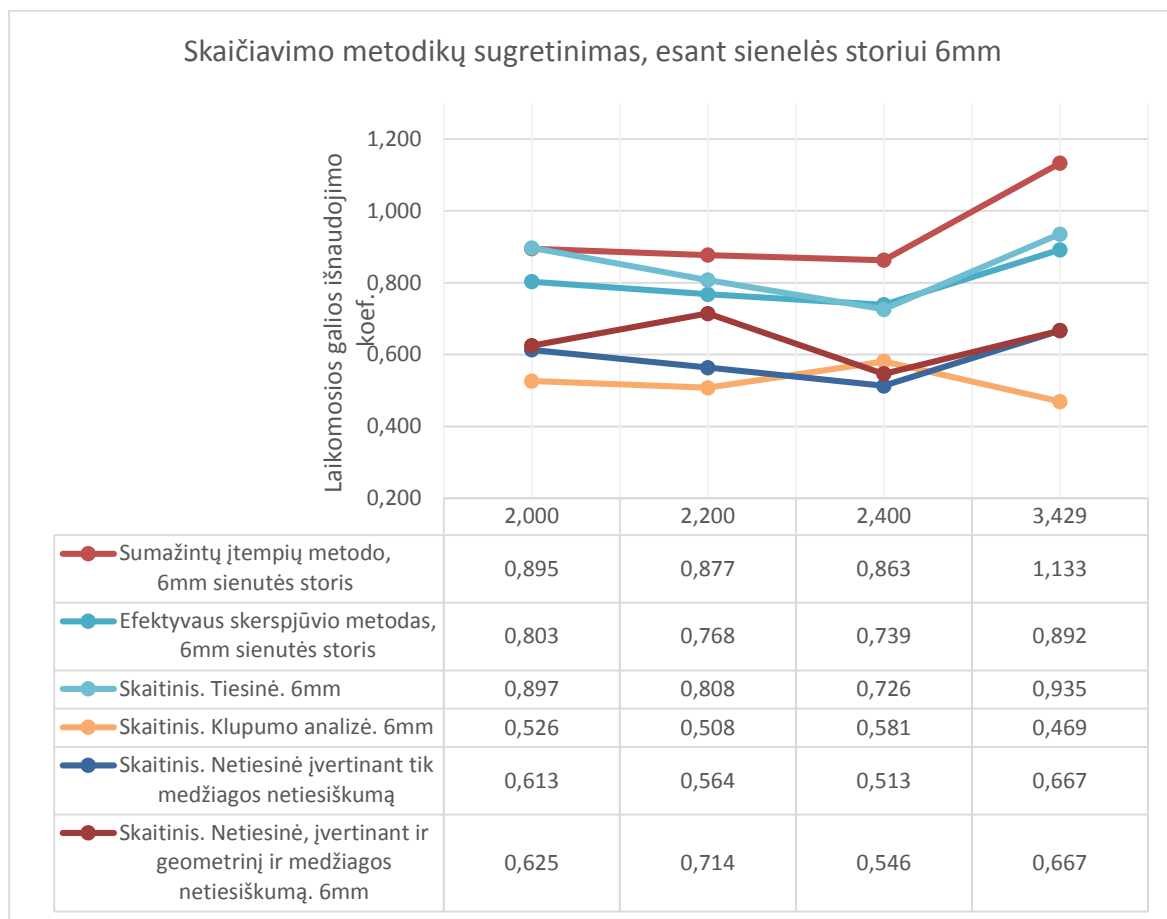


3.15pav. Klupumo formos atvaizdavimas WinGraf modulyje, kai rėmo sienelės storis 5mm, o aukščio kitimo koeficientas $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$



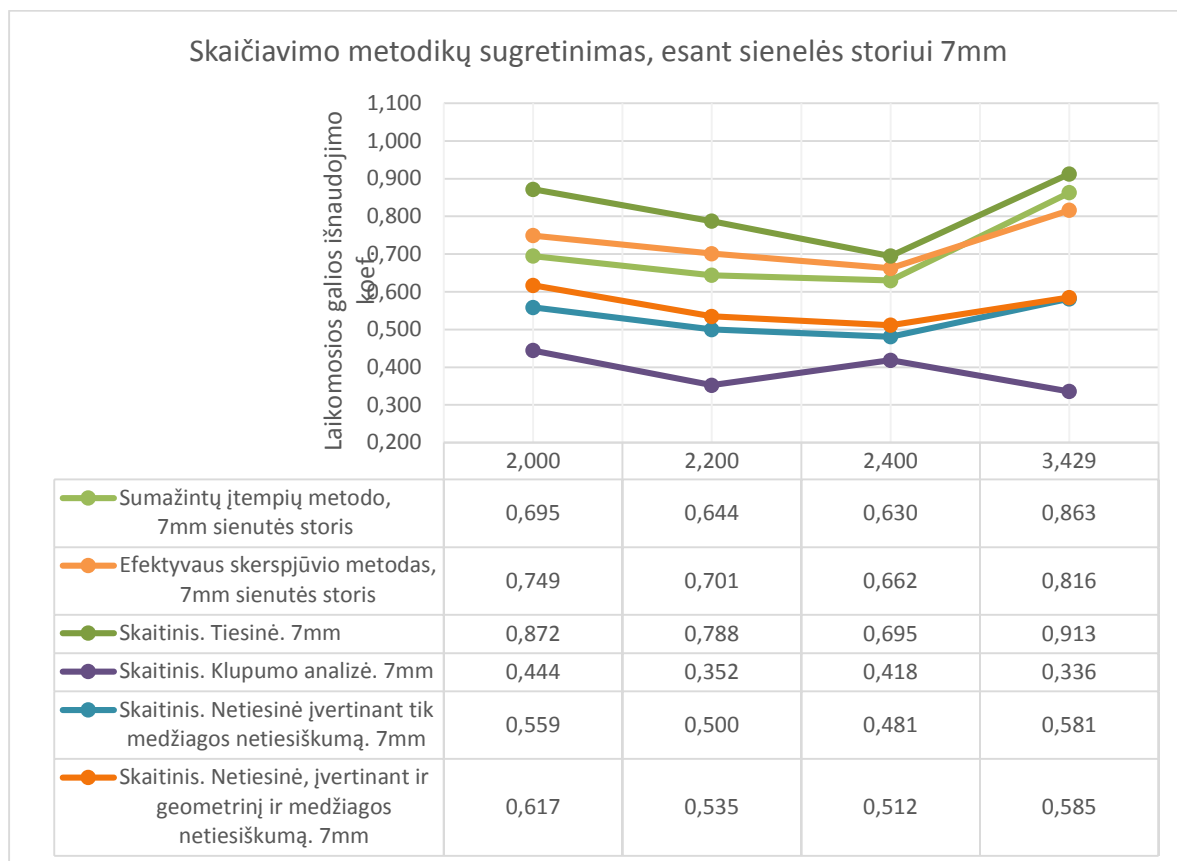
3.16pav. Netiesinės analizės, kai įvertinamas medžiagos netiesiškumas ir geometriniai netobulumai, Von Mizeso įtempių pasiskirstymas. Kai rėmo sienelės storis 5mm, o aukščio kitimo koeficientas $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$

Sienelės storį padidinus iki 6 mm. pastebima, kad procentinis atitrūkimas tarp analitinių ir skaitinių metodų sumažėja, tačiau matome ir žymų skirtumą tarp tiesinės ir netiesinių analizės metodų. Kai skerspjūvio aukščio kitimas - $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1000}{500}$, tiesinės analizės rezultatai artimi sumažintų įtempių metodo rezultatams – skirtumas 0,27 %, didėjant aukščio kitimo koeficientui tiesinė analizė tampa artimesnė efektyvaus skerspjūvio metodui – tarp jų skirtumas yra 1,93 %. Padidinę sienelės storį iki 6 mm, matome ir žymų klumpimo galios padidėjimą, šiuo atveju klumpimo analizė turi mažiausia įtakos skerspjūvio galiai. Netiesinės analizės skirtumas nuo tiesinės, skerspjūvio aukščio coef. kintant nuo 2 iki 2,4, atitinkamai kinta – 43,5 %; 13,1 %; 14,75 %. Nestandartinio rėmo ($\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{350}$) atveju, efektyvaus skerspjūvio analizės atveju gaunamas didesnis laikomosios galios rezervas nei tiesinės analizės, skirtumas – 4 %.



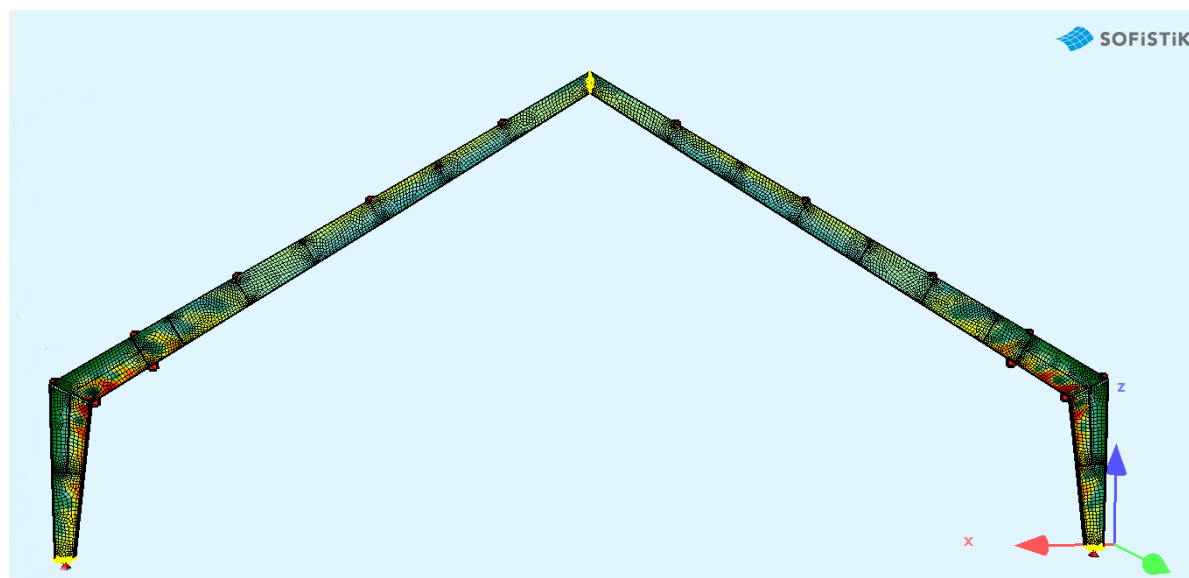
3.17 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo, laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 6mm

Padidinus sienelės storį iki 7 mm (žr. 3.18 pav.) tiesinės analizės atveju gaunama mažiausia skerspjūvio laikomoji galia. Skirtumas tarp netiesinės ir tiesinės analizės sudaro – 23 %, nagrinėjant rėmus, kurių skerspjūvio aukščio koef. kintant nuo 2 iki 2,4. Esant aukščio kitimo koef. 3,43 skirtumas siekia 56 %. Skirtumas tarp analitinių metodų sumažėja iki 5 – 9 % ir išskyrus nestandartinį rėmą, didesnė laikomoji galia gaunama sumažintųjų įtempių metodu. Kaip matome klumpamoji galia didinant sienelės storį turi mažiausiai įtakos skerspjūvio laikomajai galiai. Didinant skerspjūvio aukščių santykį, skirtumas tarp netiesinių analizių mažėja nuo 10 % iki minimalaus.

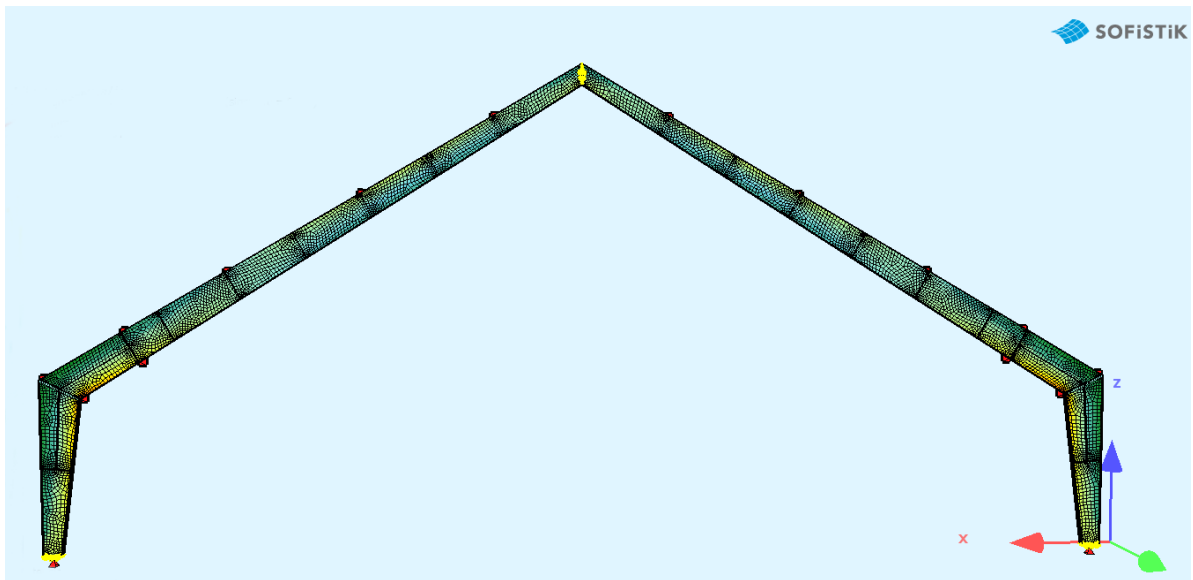


3.18 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio aukščio kitimo koeficiento, esant skirtingoms skaičiavimo metodikoms, kai sienelės storis lygus 7mm

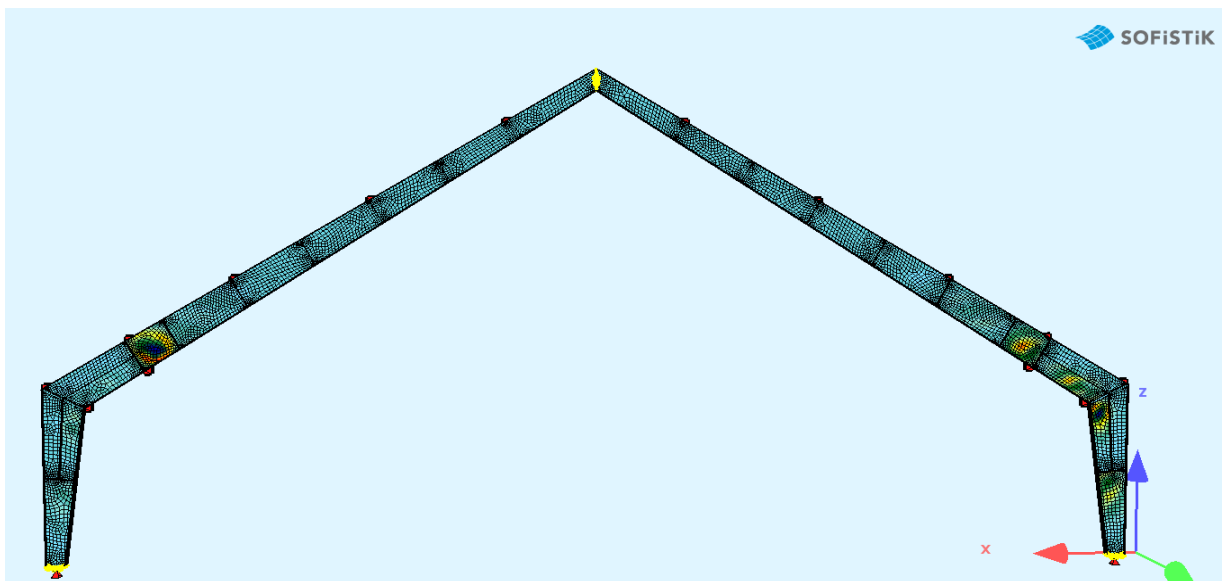
Žemiau pateikta keletas skaitinių analizių atvaizdavimas *SOFiSTiK SSD* modulio aplinkoje (3.19 – 3.23 pav.).



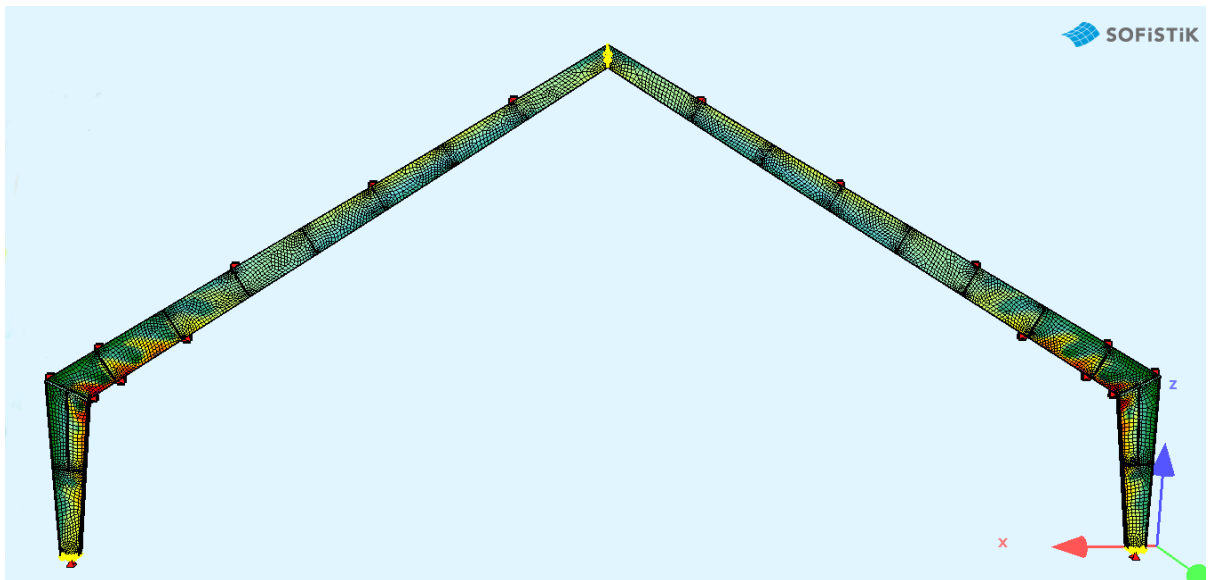
3.19 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėm netiesinės analizės įtempių pasiskirstymas SOFiSTiK SSD modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{500}$, sienelės storis 5mm, su išilgine sąstanda)



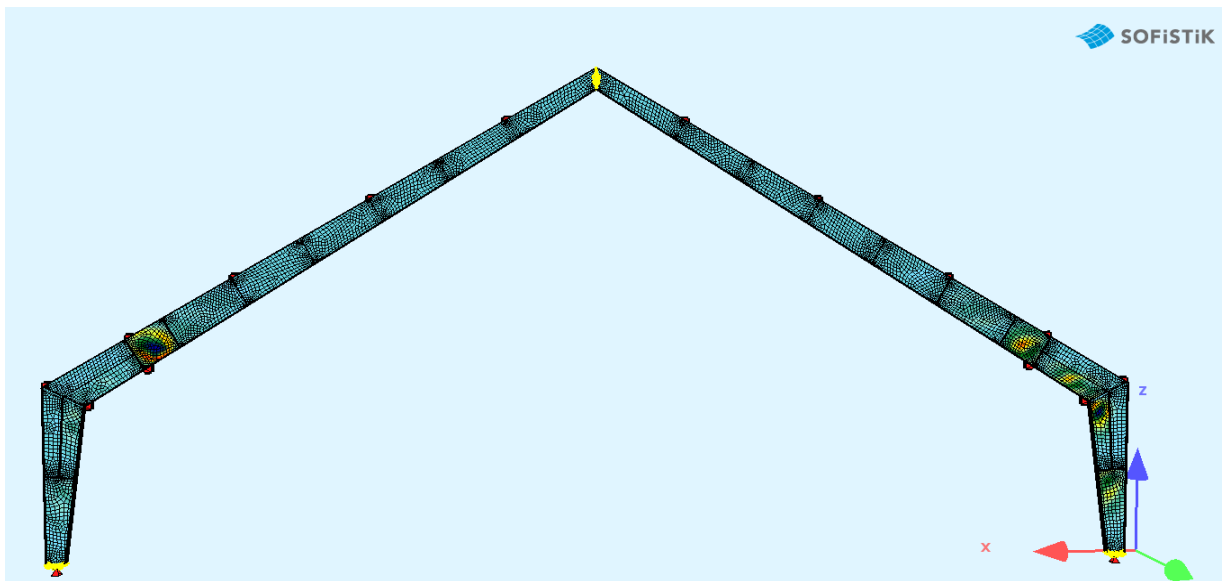
3.20 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo tiesinės analizės įtempių pasiskirstymas *SOFiSTiK SSD* modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{500}$, sienelės storis 5mm, su išilgine sąstanda)



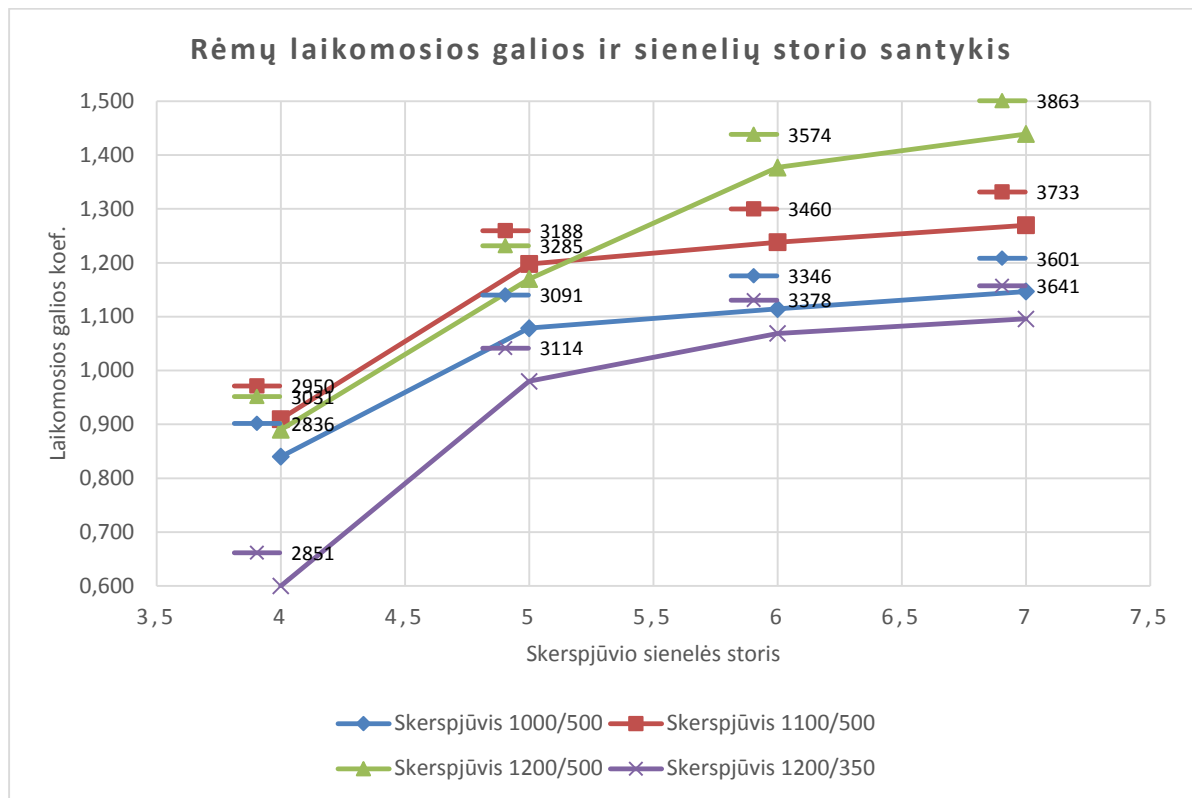
3.21 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo klumpumo analizės metu gauta klumpumo forma, patvaizduota *SOFiSTiK SSD* modulio aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{500}$, sienelės storis 5mm, su išilgine sąstanda)



3.22 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo netiesinės analizės įtempių pasiskirstymas *SOFiSTiK SSD* modulyje aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{500}$, sienelės storis 5mm, be išilginės sąstandos)



3.23 pav. Kintančio dvitėjo skerspjūvio rėmo klumpumo analizės metu gauta klumpumo forma, patvaizduota *SOFiSTiK SSD* modulyje aplinkoje (Rėmo skerspjūvio aukščių santykis $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1200}{500}$, sienelės storis 5mm, be išilginės sąstandos)



3.24. pav. Kintančio skerspjūvio rėmų, laikomosios galios priklausomybė nuo sienelės storio, rėmo svorio kitimas

Paveiksle 3.24 matome pavaizduotą skirtingų rėmų laikomosios galios priklausomybę nuo sienelės storio kitimo ir rėmo svorių reikšmes kilogramais. Iš diagramos matome, kad sienelės storiui esant tarp 4 – 5 mm didžiausia laikomoji galia yra rėmo, kurio skerspjūvio kitimo koeficientas 2,2, tačiau toliau didinant sienelės storį matomas ryškus sekančio rėmo laikomosios galios didėjimas. Esant labai liaunai skerspjūvio sieniei, skirtumas tarp skirtingą kitimo koeficientą turinčių rėmų nedidelis tik 5 – 7 %, tačiau padidinus sienelės storį skirtumas didėja iki 20 %. Iš šios diagramos taip pat matyti, jog siekiant padidinti rėmo laikomąją galią, efektyviau yra didinti skerspjūvio kitimo koeficientą, nei didinti sienelės storį. Esant skerspjūviui, kurio kitimo koef. – $\frac{h_{max}}{h_{min}} = \frac{1100}{500} = 2,2$ ir sienelės storiui 4 mm, laikomoji galia 4,5 % didesnė už 5 mm storio, su 2,0 skerspjūvio kitimo koeficientu rėmo laikomąją galią, pastarojo masė didesnė 413 kg. Taigi parenkant nestandartinį rėmo kitimo koeficientą ne tik pasiekama didesnė laikomoji galia, bet ir sutaupoma plieno.

Atliekant skaitinę analizę visais skerspjūvio kitimo atvejais įtempių pasiskirstymas tiesinės analizės atveju buvo panašaus pobūdžio. Didžiausi įtempiai susikoncentruoja ties sijos – kolonos mazgu, gniuždomoje zonoje. Netiesinės analizės atveju plonasienio dvitėjo formos skerspjūvio įtempiai persiskirsto, didžiausia įtempiai pasiekiami ties klupimo bangomis – atvaizduoja klupimo forma.

IŠVADOS

Rėmų sudarytų iš plonasienių kintančio skerspjuvio elementų, analitinius skaičiavimus apunkina sudėtingas tikslų skerspjuvio rodiklių nustatymas. Remiantis analizuota literatūra, kintančio skerspjuvio elementams projektuoti pasirenkamas skerspjuvio sumažinimo rodiklis, leidžiantis apskaičiuoti adekvačius skerspjuvio rodiklius, tačiau su prielaida, jog skerspjuvio maksimalaus ir minimalaus aukščio santykis neviršija 2. Kitais atvejais rekomenduojama vadovautis baigtinių elementų metodais.

Sudaryti kintančio dvitėjo skerspjuvio skaičiavimo algoritmai *Mathcad* programiniame pakete, pagal kuriuos atlikti analitiniai skaičiavimai Skaičiavimų rezultatai parodė, kad efektyvus skerspjuvio skaičiavimo metodu būtina tikrinti plokštelės klupimo tipų sąveiką, todėl kad esant liaunai plokštei labai svarbus kraštinių santykis, nulemiantis šlyjamąją galią. Sumažintų įtempių analizės atveju gaunami rezultatai į didesnę atsargos pusę, metodikų skirtumas ryškėja esant labai liaunai sienelei, tačiau didinant sienelės storį, metodikų rezultatai tampa artimesni.

Ketvirtos klasės kintančio skerspjuvio rėmo skaitinė analizė atlikta SOFiSTiK programiniu paketu. Skaitinės analizės rezultatai parodė, jog visais nagrinėtais atvejais, esant labai liaunai sienelei (sienelės storis 4mm), laikomoji galia nepakankama dėl vietinio pastovumo praradimo, didinant sienelės liaunį, vietinio klupumo sąlygą turi mažiau įtakos, plieno takumo įtempiai pasiekiami sijos ir kolonos mazge. Atliekant netiesinę analizę įvertinant medžiagos netiesiškumą ir geometrinius vietinius netobulumus pastebimas įtempių persiskirstymas, dėl kurio atsiranda skirtumas su tiesinės analizės rezultatais.

Lyginant analitinius skaičiavimus su skaitiniais, pastebėta, kad kuo liaunesnė sienelė, tuo rezultatų skirtumas didesnis. Visais atvejais didesnė laikomoji galia gaunama skaitinės analizės atveju, tačiau didinant sienelės liaunį, rezultatai gauti sumažintųjų įtempių metodu priartėja prie efektyvus skerspjuvio ir skaitiniais metodais gautų rezultatų. Vis dėlto tikslesni ir artimesni, skaitiniams rezultatams, yra gaunamos reikšmės pagal Euronormų pateiktą efektyvus skerspjuvio skaičiavimo metodą.

Analizės metu buvo panagrinėta skerspjuvio aukščio kitimo koeficiento įtaka laikomajai galiai. Gauti rezultatai parodė, kad siekiant didesnės laikomosios galios, vertėtų didinti skerspjuvio aukščių santykį, kuris leidžia mažinti sienelės storį. Kadangi rėmams naudojami dideli skerspjuviai, net ir nedidelis sienelės storio pokytis leidžia ženkliai sumažinti plieno sąnaudas.

Atliekant rėmų projektavimą iš kintančio skerspjuvio elementų, būtina atlikti netiesinę analizę baigtinių elementų programomis. Nors rezultatai, gauti analitiniais metodais ir tiesinės analizės

metodu, yra į saugiąją pusę, tačiau siekiant ištirti tikrąją plonasienio elemento elgseną bei suprojektuoti efektyvesnį ir ekonomiškesnį pastatą, būtina pasitelkti netiesinį baigtinių elementų metodą.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

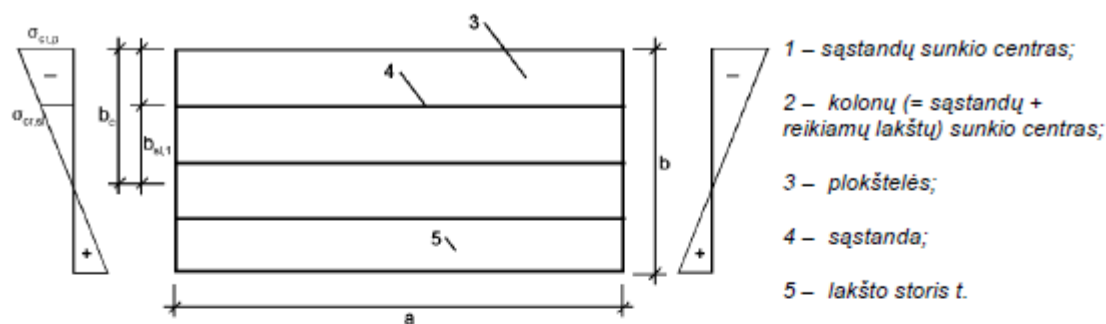
- Salem, A.H., El Aghoury, M., Fayed, M.N. 2009. *Ultimate capacity of axially loaded thin-walled tapered columns with doubly symmetric sections*. Department of Structural Engineering, Ain Shams University, 1 El-Sarayut Street, Abbassia, P.O. Box 11517, Cairo, Egypt.
- Andrade, A., Camotin, D., Dinis, 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.
- Andrade, A., Providencia, P., Camotim, D. 2010. *Elastic lateral-torsional buckling of restrained web-tapered I-beams*. Department of Civil Engineering, INESC Coimbra, University of Coimbra, FCTUC-Pólo II, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portugal.
- Asgarian, B., Soltani, M., Mohri, F. 2012. *Lateral-torsional buckling of tapered thin-walled beams with arbitrary*. K.N. Toosi university of Technology, Tehran, Iran.
- Atkočiūnas, J., Nagevičius, J., 2004. *Tamprumo teorijos pagrindai*. Vilnius: Technika. 528p.
- Barauskas, R., Belevičius, R., Kačianauskas, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika, 612p.
- Basaglia, C., Camotim, D., Silvestre, N. 2012. *Torsion warping transmission at thin-walled frame joints: Kinematics, modeling and structural response*. Department of Civil Engineering and Architecture, ICIST, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal.
- Brown, G. 2013. *Design of portal frames to Eurocode 3: an overview for UK designers*. SCI, Silwood Park, UK. 48p.
- Cosmin, G. Chiorean, Ioana, V. 2017. *A second-order flexibility-based model for steel frames of tapered members*. Faculty of Civil Engineering, Technical University of Cluj-Napoca, 15 C Daicoviciu Str., 400020 Cluj-Napoca, Romania.
- Daniūnas, A. 2012. *Plonasiinės metalinės konstrukcijos*. Vilnius: Technika. 171p.

- Höglund T. 1971. *Shear buckling resistance of steel and aluminium plate Girders*. Department of Structural Engineering, The Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. 13-30p.
- Gell, G., Thompsson, H. 2013. *Application of first-order Generalised Beam Theory on open thin-walled members*. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Johansson, B.; Maquoi, R.; Sedlacek, G.; Müller, C.; Beg, D. 2007. *Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 "Plated structural elements"*. 226 p.
- Koschmidder, 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. 2013. *Plieninės konstrukcijos, elementai ir jungtys*. Vilnius: Technika.
- Lee Chi King 2014. *A Beginner's Guide to Simple Plate Girder Design to EC3 Part 1-5*. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, 2014.
- Li, J., Li, Guoa-Quing, Chan Siu-Li 2012. *A second-order inelastic model for steel frames of tapered members with slender web*. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China.
- LST EN 1993-1-1:2005 *Eurokoda 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius, 2005. 102p.
- LST EN 1993-1-5:2007 *Eurokoda 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-5 dalis. Lakštinių konstrukcijų elementai*. Vilnius, 2007. 65p.
- Luis Simões da Silva, Rui Simões, Helena Gervásio 2013. *Design of Steel Structures* European Convention for Constructional Steelwork, Multicomp Lda, Mem Martins, Portugal.
- Marques, L., Simoes da Silva L., Rebelo, C., Santiago, A. 2014. *Extension of EC3-1-1 interaction formulae for the stability verification of tapered beam-columns*. ISISE, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal.
- Marques, L., Taras, A., Simoes da Silva L., Greiner, R., Rebelo, C. 2012. *Development of a consistent buckling design procedure for tapered columns*. ISISE, Department of Civil Engineering, University of Coimbra, Coimbra, Portugal.

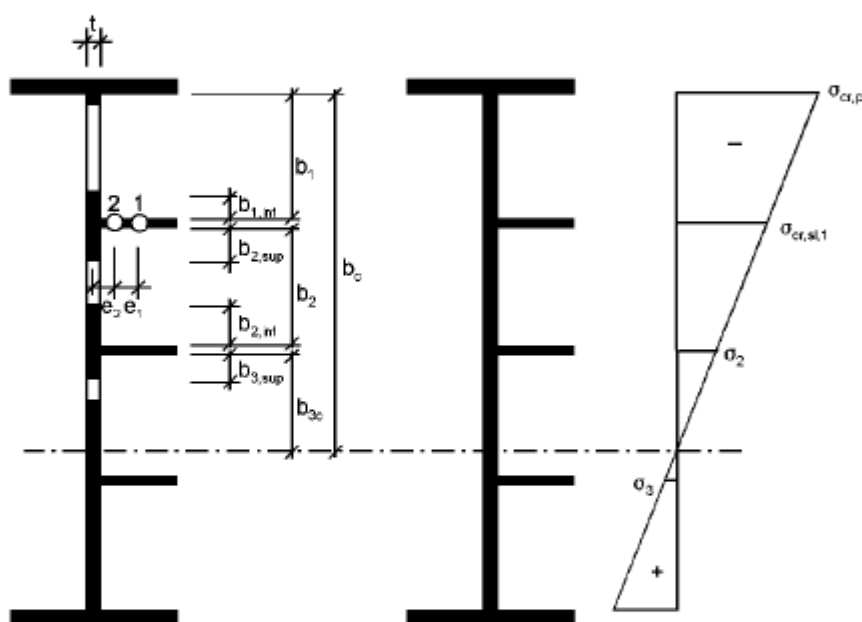
Silvestre, N., Camotim, D. 2003 *Nonlinear Generalized Beam Theory for cold-formed steel members* Civil Engineering Department, IST, Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal.

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

PRIEDAI



$$e = \max(e_1, e_2)$$



	Suminio skerspjūvio ploto plotis	Efektinio skerspjūvio ploto pagal 4.1 lentelę plotis	ψ_i sąlyga
$b_{1,inf}$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_1$	$\frac{3-\psi_1}{5-\psi_1} b_{1,eff}$	$\psi_1 = \frac{\sigma_{c,sl,1}}{\sigma_{c,p}} > 0$
$b_{2,sup}$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{c,sl,1}} > 0$
$b_{2,inf}$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_2$	$\frac{3-\psi_2}{5-\psi_2} b_{2,eff}$	$\psi_2 > 0$
$b_{3,sup}$	$0,4b_{3c}$	$0,4b_{3c,eff}$	$\psi_3 = \frac{\sigma_3}{\sigma_2} < 0$

A.1 paveikslas. Lakštų su išilginėmis sąstandomis žymenys