



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Martynas Neščiovas

**ELIPSINIO TUŠČIAVIDURIO SKERSPJŪVIO EKSCENTRIŠKŲJŲ
ELEMENTŲ SKAIČIAVIMAS IR PROJEKTAVIMAS**

**CALCULATION AND DESIGN OF ELLIPTICAL HOLLOW CROSS
SECTION ECCENTRIC ELEMENTS**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T mokslo kryptis

Vilnius, 2014

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir medinių konstrukcijų katedra

ISBN ISSN
Egz. sk.
Data 2014-06-....

Statinių konstrukcijų studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Elipsinio tuščiavidurio skerspjūvio ekscentriškųjų elementų skaičiavimas ir projektavimas**

Autorius **Martynas Neščiokas**

Vadovas **prof., dr. Alfonsas Daniūnas**

Kalba

☒ X

lietuvių



užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas ekscentriškai gniuždomas elipsinis tuščiaviduris skerspjūvis (angl. EHS) bei sudaromas šio skerspjūvio projektavimo algoritmas. Darbą sudaro penki skyriai, išvados ir priedai. Pirmajame skyriuje pateiktas bendras *EHS* apibūdinimas, nurodyti šio skerspjūvio privalumai bei panaudojimo sritys. Antrajame skyriuje pateikta atliktų *EHS* tyrimų apžvalga, aptariami galimi metodai skerspjūvio klasei nustatyti. Trečiajame skyriuje sudaromas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmas, programiniu paketu *Mathcad* sukurama šio skerspjūvio skaičiavimo programa bei atliekami analitiniai skaičiavimai. Ketvirtajame skyriuje pateiktas baigtinių elementų modelio sudarymas naudojant programinį paketą *SolidWorks Simulation 2012*, atliekama baigtinių elementų (*BE*) analizė, atkartojanti analitinius skaičiavimus. Penktajame skyriuje palyginami analitinių skaičiavimų ir *BE* analizės rezultatai. Darbo gale pateiktas rezultatų apibendrinimas, suformuluojamos darbo išvados.

Darbo apimtis: 95 p. teksto be priedų, 62 iliustr., 7 lent., 31 bibliografinis šaltinis.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: analitiniai skaičiavimai, baigtinių elementų analizė, ekscentrinis gniuždymas, ekvivalentinis skersmuo, elipsinis tuščiaviduris skerspjūvis.

Vilnius Gediminas Technical University

Civil Engineering faculty

Steel and Timber structures department

ISBN ISSN

Copies No.

Date-06-2014

Structural Engineering study programme master thesis.

Title: **Calculation and design of elliptical hollow cross section eccentric elements**

Author **Martynas Neščiokas** Academic supervisor **Assoc. prof. dr. Alfonsas Daniūnas**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

The final postgraduate work consists of analysis of elliptical hollow section (*EHS*) under eccentric compression. Design algorithm is developed. There are five chapters, conclusions and appendixes presented. First chapter gives a background to *EHS* including applications and advantages. Second chapter gives a literature review of *EHS* related work, investigates methods for the cross-section class determination. Third chapter includes developing of the design algorithm of *EHS*. Analytical calculations are made using the software package *Mathcad*. In the fourth chapter the finite element model is generated using the software package *SolidWorks Simulation 2012*. The analytical calculations are replicated with the finite element analysis. The results are compared in the fifth chapter. In the end of the final paper the results are summarized and the final conclusions are made.

Work includes: 95 p. of text without appendixes, 62 illustrations, 7 tables, 31 bibliographic sources.

Appendixes included.

Keywords: analytical calculations, eccentric compression, elliptical hollow cross-section, equivalent diameter, finite element analysis.

TURINYS

ĮVADAS	19
1. BENDRA EHS APŽVALGA	20
1.1. EHS apibūdinimas	20
1.2. EHS panaudojimas	21
1.3. EHS privalumai ir trūkumai	24
1.4. Pirmojo skyriaus išvados.....	24
2. LITERATŪROS APŽVALGA	26
2.1. Mechaninės ir geometrinės EHS profiliuotųjų charakteristikos	26
2.1.1. Mechaninės EHS profiliuotųjų charakteristikos	26
2.1.2. Geometrinės EHS profiliuotųjų charakteristikos.....	26
2.2. Ašinio gniuždymo veikiamas EHS.....	29
2.2.1. Istorinė raida.....	29
2.2.2. EHS kluptis.....	32
2.2.3. Ekvivalentinio CHS metodas	37
2.2.4. Tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai skerspjūvio formai kinant nuo CHS į plokštelę.....	39
2.2.5. Ilgų EHS kolonų tyrimai	43
2.2.6. Ekvivalentinio RHS metodas	44
2.3. Lenkimo veikiamas EHS	45
2.3.1. Skerspjūvių klasifikacija	46
2.3.2. 4 klasės skerspjūviai	47
2.4. Šlyties veikiamas EHS.....	47
2.5. Lenkimo ir ašinio gniuždymo veikiamas EHS	48
2.5.1. Skerspjūvio klasės nustatymas.....	48
2.5.2. Skerspjūvio laikomoji galia.....	54
2.6. Antrojo skyriaus išvados	55
3. EKSCENTRIŠKAI GNIUŽDOMO EHS ELEMENTO SKAIČIAVIMAS ANALITINIU METODU.....	56
3.1. Projektavimo algoritmo sudarymas.....	56
3.2. Projektavimo rezultatai.....	63
3.3. Trečiojo skyriaus išvados	67

4. EKSCENTRIŠKAI GNIUŽDOMO <i>EHS</i> ELEMENTO SKAIČIAVIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU	68
4.1. Kolonos skaičiuojamoji schema	69
4.2. <i>EHS</i> kolonos modeliavimas.....	69
4.2.1. <i>Modelio elementai</i>	69
4.2.2. <i>Kraštinės sąlygos</i>	71
4.2.3. <i>Apkrovos</i>	72
4.2.4. <i>Kolonos elementų kontaktas</i>	72
4.2.5. <i>Baigtinių elementų tinklas</i>	73
4.2.6. <i>Skaičiavimo parametrai</i>	74
4.2.7. <i>Galutinis kolonos skaičiuojamasis modelis</i>	77
4.3. <i>BEM</i> validacija	77
4.3.1. <i>Trumpų kolonų tyrimai</i>	77
4.3.2. <i>Ilgų kolonų tyrimai</i>	79
4.4. Rezultatai.....	81
4.5. Ketvirtąjo skyriaus išvados	86
5. EKSCENTRIŠKAI GNIUŽDOMO <i>EHS</i> ELEMENTO ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ IR KOMPIUTERINIO MODELIAVIMO REZULTATŲ PALYGINIMAS	87
5.1. Rezultatų palyginimas	87
5.2. Penktojo skyriaus išvados	92
IŠVADOS	93
NAUDOTA LITERATŪRA	94
A priedas. <i>BE</i> analizės rezultatai bei palyginimas su analitinių skaičiavimų rezultatais.	96
B priedas. Analitinių skaičiavimų rezultatai	99
C priedas. Analitinių skaičiavimų <i>Mathcad</i> programiniu paketu pavyzdys.....	102

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Elipsinis tuščiaaviduris skerspjuvis (<i>EHS</i>).....	20
2 pav. Stratfordo metro stotis (<i>Stratford DLR Station</i>) Londone, Anglijoje (Fun...2014)	22
3 pav. <i>Heathrow</i> oro uosto 5 terminalas Londone (Fun is...2014).....	23
4 pav. <i>IKI</i> prekybos centras Šiaurės miestelyje, Vilniuje (autoriaus nuotr.).....	23
5 pav. Vietinis <i>EHS</i> klumpas pagal J. Kempnerį (Bradford, Roufeginejad 2008)	30
6 pav. Žemiausia <i>EHS</i> klupties forma (Ruiz-Teran, Gardner 2008)	31
7 pav. Pradinė <i>EHS</i> ($a/b = 2$, $H/t = 30$) klupties forma (Zhu, Wilkinson 2007)	33
8 pav. Maksimalios <i>EHS</i> ($a/b = 2$, $H/t = 30$) išorinės deformacijos (Zhu, Wilkinson 2007).....	34
9 pav. <i>EHS</i> ($a/b = 2$, $H/t = 30$) kolonos vidurinio skerspjuvio deformacijos (Zhu, Wilkinson 2007)	34
10 pav. <i>EHS</i> kolonos klumpamasis bangos ilgis (Bradford, Roufeginejad 2008)	35
11 pav. <i>EHS</i> klumpo formos (Silvestre 2008).....	36
12 pav. <i>EHS</i> kritinės klupdančiosios apkrovos priklausomybės nuo elemento ilgio grafikas (Silvestre 2008).....	36
13 pav. Skerspjuvio geometrijos perėjimas nuo <i>CHS</i> iki plokštelės (Ruiz-Teran, Gardner 2008).....	39
14 pav. Gniuždomo <i>CHS</i> išilginiai ir skersiniai ruožai. Ašiai simetrinė kluptis (Ruiz-Teran, Gardner 2008).....	41
15 pav. Ašiai nesimetrinė kluptis (Ruiz-Teran, Gardner 2008)	41
16 pav. Gniuždomos plokštelės išilginiai ir skersiniai ruožai (Ruiz-Teran, Gardner 2008)	42
17 pav. Ekvivalentinio <i>RHS</i> metodas (Zhao, Packer 2009)	44
18 pav. Ekscentrinio gniuždymo veikiamą <i>EHS</i> kolona: a) nedeformuoto bandinio schema; b) deformuoto bandinio schema; c) bandymo įranga (Gardner <i>et al.</i> 2011a).....	49
19 pav. <i>EHS</i> veikiamas ašinio gniuždymo ir lenkimo momento apie silpnąją skerspjuvio ašį (Gardner <i>et al.</i> 2011a).....	49
20 pav. <i>EHS</i> veikiamas ašinio gniuždymo ir lenkimo momento apie stipriąją skerspjuvio ašį (Gardner <i>et al.</i> 2011a).....	50
21 pav. Įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje tamprioje stadijoje, kartu veikiant ašiniam gniuždymui ir lenkimui (Gardner <i>et al.</i> 2011a)	52
22 pav. Įtempių pasiskirstymas skerspjuvyje plastinėje stadijoje, kartu veikiant ašiniam gniuždymui ir lenkimui (Gardner <i>et al.</i> 2011a)	53
23 pav. Ekscentriškai gniuždomo <i>EHS</i> elemento projektavimo algoritmas.....	62

24 pav. <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink silpnąją skerspjūvio ašį, grafikas	64
25 pav. <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink stipriąją skerspjūvio ašį, grafikas.....	64
31 pav. Kolonos skaičiuojamoji schema	69
32 pav. Modelio elementai	70
33 pav. Papildomos plokštelės, sudalintos pagalbinėmis linijomis.....	71
34 pav. Kolonos kraštinės sąlygos.....	71
35 pav. Kolonos apkrovimas	72
36 pav. <i>Bonded</i> kontakto aprašymo metodas	72
37 pav. <i>Shell</i> tipo antrosios eilės trikampis baigtinis elementas	73
38 pav. Išlinkio skaičiavimo tikslumo priklausomybė nuo baigtinių elementų skaičiaus.....	74
39 pav. Kolonos baigtinių elementų tinklas	74
40 pav. Prantlio diagrama idealiai tampriai plastinei medžiagai.....	75
41 pav. Modifikuoto Newtono-Raphsono jėgų kontrolės metodo schema (SolidWorks...2014).....	76
42 pav. Apkrovos kitimo virtualiame laike grafikas	76
43 pav. Galutinis kolonos skaičiuojamasis modelis	77
44 pav. Centriškai gniuždoma <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio, <i>0,3 m</i> ilgio kolona; pasiekta <i>517 kN</i> kritinė apkrova; a) įtempių <i>von - Mises</i> pasiskirstymo diagrama; b) deformacijų pasiskirstymo diagrama	81
45 pav. Ekscentriškai (<i>MA100</i>) gniuždoma <i>EHS 150x75x5</i> skerspjūvio, <i>0,3 m</i> ilgio kolona; pasiekta <i>240 kN</i> kritinė apkrova; a) įtempių <i>von - Mises</i> pasiskirstymo diagrama; b) deformacijų pasiskirstymo diagrama	82
46 pav. Ekscentriškai (<i>MI75</i>) gniuždoma <i>EHS 150x75x5</i> skerspjūvio, <i>0,3 m</i> ilgio kolona; pasiekta <i>171 kN</i> kritinė apkrova; a) įtempių <i>von - Mises</i> pasiskirstymo diagrama; b) deformacijų pasiskirstymo diagrama	82
47 pav. Centriškai gniuždoma <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio, <i>2,3 m</i> ilgio kolona; pasiekta <i>396 kN</i> kritinė apkrova; a) įtempių <i>von - Mises</i> pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagrama.....	83
48 pav. Ekscentriškai (<i>MA25</i>) gniuždoma <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio, <i>2,3 m</i> ilgio kolona; pasiekta <i>278 kN</i> kritinė apkrova; a) įtempių <i>von - Mises</i> pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagrama	83

49 pav. Ekscentriškai (<i>MI25</i>) gniuždoma <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio, 2,3 m ilgio kolona; pasiekta 166 kN kritinė apkrova; a) įtempių <i>von - Mises</i> pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagrama	84
50 pav. Ekscentriškai dviem kryptimis (<i>MA100/MI25</i>) gniuždoma <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio, 2,3 m ilgio kolona; pasiekta 123 kN kritinė apkrova; a) įtempių <i>von - Mises</i> pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagramos	84
51 pav. <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams, grafikas.....	85
52 pav. <i>EHS 150x75x5</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams, grafikas.....	85
53 pav. <i>EHS 150x75x6,3</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams, grafikas.....	86
54 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>A metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu	88
55 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>A metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x4</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu.....	88
56 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>A metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x5</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu	89
57 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>A metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x5</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu.....	89
58 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>B metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x5</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu.....	90
59 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>A metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x6.3</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu	90

60 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>A metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x6.3</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu.....	91
61 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>B metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x6.3</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu.....	91
62 pav. <i>BE</i> analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant <i>B metodą</i> , gautos <i>EHS 150x75x6.3</i> skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto esant dviašiam lenkimui.....	92

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. <i>EHS</i> profiliuotųjų matmenų, formos, tiesumo bei masės nuokrypiai	26
2 lentelė. Geometrinių <i>EHS</i> charakteristikų išraiškos	27
3 lentelė. <i>EHS</i> liaunio rodikliai ir klasių ribos	54
4 lentelė. Gardnerio ir kt. eksperimentų bandiniai ir rezultatai (Gardner <i>et al.</i> 2011a)	78
5 lentelė. Trumpų kolonų <i>BE</i> modelių validacija	78
6 lentelė. Chano ir Gardnerio eksperimentų bandiniai ir rezultatai (Chan, Gardner 2009)	79
7 lentelė. Ilgų kolonų <i>BE</i> modelių validacija	80

ŽYMENU SĄRAŠAS

Santrumpos

<i>BE</i>	–	baigtiniai elementai;
<i>BEM</i>	–	baigtinių elementų metodas;
<i>CHS</i>	–	apskritasis tuščiaviduris skerspjūvis (<i>Circular Hollow Section</i>);
<i>ENA</i>	–	tamprioji neutralioji ašis (<i>Elastic Neutral Axis</i>)
<i>EC3</i>	–	Eurokodas 3;
<i>EHS</i>	–	elipsinis tuščiaviduris skerspjūvis (<i>Elliptical Hollow Section</i>);
<i>HSS</i>	–	tuščiaviduris statybinis skerspjūvis (<i>Hollow Structural Section</i>);
<i>OHS</i>	–	ovalinis tuščiaviduris skerspjūvis (<i>Oval Hollow Section</i>);
<i>PNA</i>	–	plastinė neutralioji ašis (<i>Plastic Neutral Axis</i>)
<i>RHS</i>	–	stačiakampis tuščiaviduris skerspjūvis (<i>Rectangular Hollow Section</i>);
<i>SHS</i>	–	kvadratinis tuščiaviduris skerspjūvis (<i>Square Hollow Section</i>).

Simboliai

$x-x$	–	elemento išilginė ašis;
$y-y$	–	stiprioji skerspjūvio ašis;
$z-z$	–	silpnoji skerspjūvio ašis;
a	–	atstumas, lygus pusei išorinio <i>EHS</i> matmens ties ilgesniaja simetrijos ašimi
a_m	–	geometrinė <i>EHS</i> charakteristika;
A	–	skerspjūvio plotas;
A_s	–	vieno metro ilgio profiliuoto paviršiaus plotas;
$A_{v,y}$	–	šlyjamasis skerspjūvio plotas, kai veikianti jėga pridėta statmenai stipriajai skerspjūvio ašiai y-y;
$A_{v,z}$	–	šlyjamasis skerspjūvio plotas, kai veikianti jėga pridėta statmenai silpnajai skerspjūvio ašiai z-z;
b	–	atstumas, lygus pusei išorinio <i>EHS</i> matmens ties trumpesniaja simetrijos ašimi
b_m	–	geometrinė <i>EHS</i> charakteristika;
B	–	išorinis <i>EHS</i> matmuo ties trumpesniąją simetrijos ašimi;

C_1	–	koeficientas įvertinantis elemento lenkimo momentų diagramos formą;
c_{ENA}	–	atstumas nuo didžiausių gniuždomųjų įtempių skerspjūvio sluoksnio iki tampriosios neutraliosios ašies;
c_{PNA}	–	atstumas nuo didžiausių gniuždomųjų įtempių skerspjūvio sluoksnio iki plastinės neutraliosios ašies;
C_{my}	–	lyginamasis tolygiojo momento koeficientas, kai lenkimo momentas veikia aplink ašį y-y;
C_{mz}	–	lyginamasis tolygiojo momento koeficientas, kai lenkimo momentas veikia aplink ašį z-z;
C_t	–	skerspjūvio sukamoji atsparumo momento konstanta;
$D_{e,b,ma}$	–	ekvivalentinis <i>EHS</i> skersmuo veikiant lenkimui apie stipriąją skerspjūvio ašį;
$D_{e,b,mi}$	–	ekvivalentinis <i>EHS</i> skersmuo veikiant lenkimui apie silpnąją skerspjūvio ašį;
$D_{e,c}$	–	ekvivalentinis <i>EHS</i> skersmuo veikiant ašiniam gniuždymui;
$D_{e,ma}$	–	ekvivalentinis <i>EHS</i> skersmuo veikiant ašiniam gniuždymui ir lenkimui apie stipriąją skerspjūvio ašį;
$D_{e,mi}$	–	ekvivalentinis <i>EHS</i> skersmuo veikiant ašiniam gniuždymui ir lenkimui apie silpnąją skerspjūvio ašį;
E	–	tamprumo modulis;
f	–	koeficientas ekvivalentiniam <i>EHS</i> skersmeniui veikiant ašiniam gniuždymui skaičiuoti;
f_y	–	stipris pagal takumo ribą;
G	–	šlyties modulis;
h_m	–	geometrinė <i>EHS</i> charakteristika;
H	–	išorinis <i>EHS</i> matmuo ties ilgesniaja simetrijos ašimi;
i_y	–	skerspjūvio inercijos spindulys aplink y-y ašį;
i_z	–	skerspjūvio inercijos spindulys aplink z-z ašį;
I_t	–	skerspjūvio sukamoji inercijos konstanta;

I_y	–	skerspjūvio inercijos momentas aplink y-y ašį;
I_z	–	skerspjūvio inercijos momentas aplink z-z ašį;
K	–	standumų matrica;
k_{yy}	–	sąveikos koeficientas;
k_{yz}	–	sąveikos koeficientas;
k_{zy}	–	sąveikos koeficientas;
k_{zz}	–	sąveikos koeficientas;
L_{cr}	–	elemento klumpamasis ilgis;
$L_{w,EHS}$	–	klumpamasis <i>EHS</i> išilginių ruožų ilgis;
M	–	vieno metro ilgio profiliuotio masė;
$M_{b,Rd}$	–	skaičiuotinė lenkiamoji klumpamoji galia;
M_{cr}	–	tamprusis kritinis skersinio sukamojo klumpumo momentas;
$M_{eff,y,Rd}$	–	skaičiuotinė skerspjūvio tamprioji lenkiamoji galia aplink y-y ašį, apskaičiuota remiantis efektyviosiomis skerspjūvio charakteristikomis;
$M_{eff,z,Rd}$	–	skaičiuotinė tamprioji skerspjūvio lenkiamoji galia aplink z-z ašį, apskaičiuota remiantis efektyviosiomis skerspjūvio charakteristikomis;
$M_{el,y,Rd}$	–	skaičiuotinė tamprioji skerspjūvio lenkiamoji galia aplink y-y ašį;
$M_{el,z,Rd}$	–	skaičiuotinė tamprioji skerspjūvio lenkiamoji galia aplink z-z ašį;
$M_{pl,y,Rd}$	–	skaičiuotinė plastinė skerspjūvio lenkiamoji galia aplink y-y ašį;
$M_{pl,z,Rd}$	–	skaičiuotinė plastinė skerspjūvio lenkiamoji galia aplink z-z ašį;
$M_{y,Ed}$	–	skaičiuotinis lenkiamasis momentas aplink y-y ašį;
$M_{y,Rk}$	–	charakteristinė lenkiamoji galia aplink y-y ašį;
$M_{z,Ed}$	–	skaičiuotinis lenkiamasis momentas aplink z-z ašį;
$M_{z,Rk}$	–	charakteristinė lenkiamoji galia aplink z-z ašį;
$N_{b,Rd}$	–	skaičiuotinė gniuždomojo elemento klumpamoji galia;
$N_{c,Rd}$	–	skaičiuotinė ašinė skerspjūvio gniuždomoji galia;

N_{cr}	–	atitinkamos klupumo formos tamprioji kritinė jėga;
N_{Ed}	–	skaičiuotinė ašinė jėga;
N_{Rk}	–	charakteristinė gniuždomoji galia;
P	–	perimetras;
P_m	–	vidutinis perimetras;
Q	–	nesubalansuotų jėgų vektorius;
r	–	spindulys;
r_{max}	–	didžiausias elipsės spindulys;
r_{min}	–	mažiausias elipsės spindulys;
r_p	–	CHS , kurio perimetras yra P , spindulys;
t	–	skerspjūvio sienelės storis;
$W_{eff,y}$	–	efektyvusis skerspjūvio atsparumo momentas aplink y-y ašį;
$W_{eff,z}$	–	efektyvusis skerspjūvio atsparumo momentas aplink z-z ašį;
$W_{el,y}$	–	skerspjūvio tamprusis atsparumo momentas aplink y-y ašį;
$W_{el,z}$	–	skerspjūvio tamprusis atsparumo momentas aplink z-z ašį;
$W_{pl,y}$	–	skerspjūvio plastinis atsparumo momentas aplink y-y ašį;
$W_{pl,z}$	–	skerspjūvio plastinis atsparumo momentas aplink z-z ašį;
α	–	nuokrypos koeficientas;
α_{LT}	–	nuokrypos koeficientas;
α_{ma}	–	įtempių pasiskirstymo koeficientas skerspjūvyje esant ašiniam gniuždymui ir lenkimui aplink stipriąją skerspjūvio ašį plastinėje stadijoje;
α_{mi}	–	įtempių pasiskirstymo koeficientas skerspjūvyje esant ašiniam gniuždymui ir lenkimui aplink silpnąją skerspjūvio ašį plastinėje stadijoje;
β	–	koeficientas rodikliui Φ_{LT} nustatyti;
β_l	–	lokalizacijos koeficientas;
χ	–	atitinkamos klupumo formos klupumo koeficientas;

χ_{LT}	–	skersinio sukamojo klupumo koeficientas;
χ_y	–	lenkiamojo klupumo koeficientas (y-y ašis);
χ_z	–	lenkiamojo klupumo koeficientas (z-z ašis);
ΔF	–	apkrovos prieauglis;
ΔU	–	poslinkių vektoriaus prieauglis;
ε	–	koeficientas skerspjuvio klasei nustatyti;
Φ	–	rodiklis klupumo koeficientui χ nustatyti;
Φ_{LT}	–	rodiklis klupumo koeficientui χ_{LT} nustatyti;
φ	–	kampas, kurį sudaro kiekvienas be galo mažas elipsės elementas su z-z ašimi;
φ_h	–	elipsės kampas matuojamas nuo y-y ašies;
γ_{M1}	–	dalinis elementų klupumo laikomosios galios koeficientas;
$\bar{\lambda}$	–	sąlyginis liaunis;
$\bar{\lambda}_{LT}$	–	sąlyginis skersinio sukamojo klupumo liaunis;
$\bar{\lambda}_{LT,0}$	–	koeficientas rodikliui Φ_{LT} nustatyti;
σ_1	–	didžiausi gniuždomieji įtempiai skerspjuvyje;
σ_2	–	didžiausi tempiamieji įtempiai skerspjuvyje;
$\sigma_{cr,CHS}$	–	<i>CHS</i> tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai
$\sigma_{cr,EHS}$	–	<i>EHS</i> tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai
$\sigma_{cr,EHS,Approx}$	–	<i>EHS</i> tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai
$\sigma_{cr,EHS,C}$	–	<i>Corus</i> paremti <i>EHS</i> tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai
$\sigma_{cr,EHS,K}$	–	Kempnerio paremti <i>EHS</i> tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai
$\sigma_{cr,OHS}$	–	<i>OHS</i> tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai
$\sigma_{cr,PLATE}$	–	plokštelės tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai
ν	–	Puasono koeficientas;
ξ	–	skerspjuvio ekscentricitetas;

- ψ_{ma} – įtempių pasiskirstymo koeficientas skerspjūvyje esant ašiniam gniuždymui ir lenkimui aplink stipriąją skerspjūvio ašį tampriojoje stadijoje;
- ψ_{mi} – įtempių pasiskirstymo koeficientas skerspjūvyje esant ašiniam gniuždymui ir lenkimui aplink silpnąją skerspjūvio ašį tampriojoje stadijoje.

IVADAS

Tiriamoji problema

Elipsinis tuščiaviduris skerspjuvis (angl. *EHS*) – vėliausiai atsiradusi plieninių profiliuotųjų skerspjuvio forma. Šiuo metu *EHS* yra panaudotas įvairiose statybinėse konstrukcijose daugelyje pasaulio šalių dėl šių skerspjuvių estetinio patrauklumo ir keleto konstrukcinių privalumų, tačiau tai buvo padaryta be galiojančių projektavimo normų. Lietuvoje taip pat nėra nei galiojančių projektavimo normų, nei rekomendacinio pobūdžio normatyvinių dokumentų, kuriais remiantis būtų galima projektuoti šį skerspjuvį. Kai kuriose šalyse yra priimtos *EHS* konservatyvios projektavimo gairės, tačiau norint, jog šis skerspjuvis būtų dažniau ir racionaliau panaudojamas, būtinos projektavimo normos (Chan, Gardner 2007). Tiriamojo mokslo darbo motyvacija šia tema yra nustatyti saugias ir ekonomiškai *EHS* projektavimo rekomendacijas. Užsienio šalyse *EHS* panaudojimas kolonoms sparčiai auga, todėl kai šis moderniai atrodantis skerspjuvis pasieks ir Lietuvą, *EHS* projektavimo rekomendacijos taps ypač reikalingos.

Pagrindinis tyrimo tikslas

Šio magistrinio darbo tikslas yra pateikti preliminaras ekscentriškai gniuždomos *EHS* elemento projektavimo rekomendacijas.

Pagrindiniai uždaviniai

Siekiant pagrindinio tikslo, darbe išsikeliami šie uždaviniai:

- 1) išnagrinėti jau atliktus *EHS* tyrimus ir pateikti išsamią apžvalgą;
- 2) remiantis atliktais *EHS* tyrimais, sudaryti ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmą ir atlikti analitinius skaičiavimus;
- 3) baigtinių elementų programa sudaryti ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento skaitinį modelį imituojantį tikrąją kolonos fizikinę ir mechaninę elgseną kintant įvairiems skerspjuvio ir apkrovos parametrams, patvirtinti skaitinio modelio patikimumą, palyginant gautus rezultatus su kitų autorių atliktų natūrinių bandymų rezultatais bei atlikti analogiškus skaičiavimus analitiniam projektavimui;
- 4) palyginti baigtinių elementų analizės ir analitinių skaičiavimų rezultatus ir patvirtinti ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmo tinkamumą.

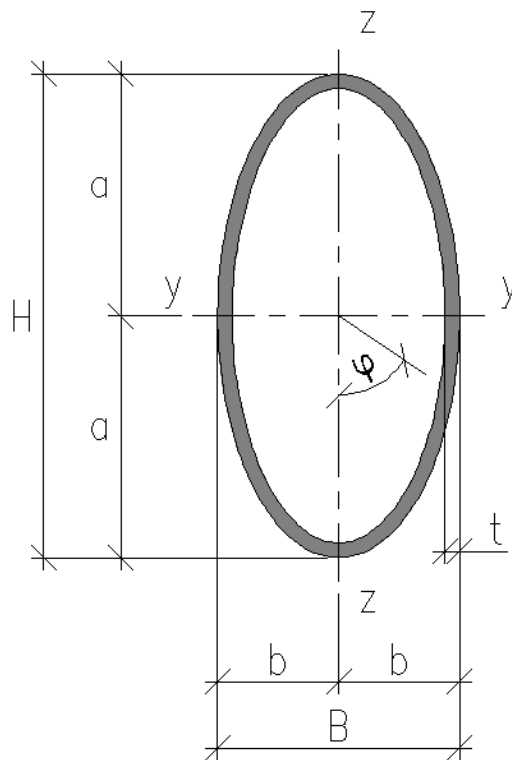
1. BENDRA *EHS* APŽVALGA

1.1. *EHS* apibūdinimas

Elipsė yra specifinė ovalo forma, kuri turi dvi skirtingas simetrijos ašis. Pagrindinė elipsės lygtis yra užrašoma taip:

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1; \quad (1)$$

čia y ir z Dekarto koordinatės, o a ir b yra atstumai, atitinkamai lygūs ilgosios ir trumposios elipsės ašių pusei (žr. 1 pav.).



1 pav. Elipsinis tuščiaviduris skerspjūvis (*EHS*)

EHS priklauso tuščiavidurių statybinių skerspjūvių (angl. *HSS*) rūšiai, kuri yra santykinai nauja forma statyboje iš plieno konstrukcijų. *HSS* taip pat priklauso apskritasis tuščiaviduris skerspjūvis (angl. *CHS*), kvadratinis tuščiaviduris skerspjūvis (angl. *SHS*) ir stačiakampis tuščiaviduris skerspjūvis (angl. *RHS*). *EHS* yra apibūdinamas kaip skerspjūvis, turintis dvi skirtingas simetrijos ašis. Santykis ilgesniosios simetrijos ašies ($H = 2a$) su trumpesniąja ($B = 2b$) yra vadinamas *EHS* ašių santykiu (angl. *aspect ratio*). Visų šiuo metu gaminamų *EHS* ašių santykis yra 2 (Packer 2008).

Apskritai *HSS* yra vamzdiniai skerspjūviai, kurie gali būti pagaminti tiek karštuju būdu, tiek šaltai formuoti virintieji tuščiaviduriai profiliuočiai, tačiau *EHS* yra gaminamas tik karštuju būdu. Taip gaminami *HSS* gali būti vientisi besiūliai arba suvirinti išilgine siūle. Besiūlio gamybos proceso metu tuščiavidurio vamzdžio forma yra suformuojama praduriant vientisą plieninę masę. Vamzdžių suvirinimo gamyba – tai plieninių lakštų sulenkimas į vamzdinę formą ir kraštinių suvirinimas išilgine siūle (Seamless...2010). *EHS* šiuo metu yra gaminami pastaruju būdu (Corus 2007).

EHS galima apibūdinti kaip *CHS* ir *RHS* derinį. *EHS* yra kaip *CHS* daugelio savybių ir elgsenos požiūriu, tačiau skirtumas yra tas, jog *EHS* turi kintamą spindulį, o *CHS* – pastovų. *EHS* panašus į *RHS* tuo, jog turi dvi simetrijos ašis – vienos ašies atžvilgiu inercijos momentas yra didesnis nei kitos ašies atžvilgiu, bet skiriasi tuo, jog *EHS* neturi sustandintų kampų bei plokščių paviršių priešingai nei *RHS*. Stiprioji skerspjūvio ašis yra $y-y$, silpnoji – $z-z$.

Šiuo metu gaminamų *EHS* profiliuočių diapazonas kinta nuo $150 \times 75 \times 4 \text{ mm}$ iki $500 \times 250 \times 16 \text{ mm}$ ($H \times B \times t$ arba $2a \times 2b \times t$, čia t yra sienelės storis). Mažiausias elipsės spindulys $r_{\min} = b^2 / a$ yra silpnosios $z-z$ skerspjūvio ašies galuose. Tai yra standžiausios skerspjūvio dalys, kurios gali būti vadinamos *EHS* „kampais“. Didžiausias elipsės spindulys $r_{\max} = a^2 / b$ yra stipriosios $y-y$ skerspjūvio ašies galuose. Čia skerspjūvis turi mažiausią standumą, o šios vietos galėtų būti vadinamos *EHS* „plokštumomis“ (Chan, Gardner 2007). Elipsės spindulys bet kuriame skerspjūvio taške gali būti apskaičiuojamas naudojant (2) formulę (Theofanous *et al.* 2009a), kur kampas φ parodytas 1 paveiksle.

$$r = \frac{b^2}{a} \left(\sin^2 \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) + \frac{a^2}{b^2} \cos^2 \left(\varphi + \frac{\pi}{2} \right) \right)^{3/2}. \quad (2)$$

1.2. *EHS* panaudojimas

EHS profiliuočiai pradėti gaminti 1994 m. Prancūzijoje. Pirmoji įmonė, pradėjusi tiekti šiuos profiliuočius, yra *Tubeurop* (Packer 2008). Šiuo metu yra ir kitų *EHS* profiliuočių gamintojų: *Corus* Didžiojoje Britanijoje, kuriems priklauso *Celsius® 355 Ovals* linija, *Ancofer Stahlhandel GmbH* Vokietijoje (Packer 2008).

Pirmoji konstrukcija, kurioje buvo bandyta panaudoti *EHS*, yra 1845 m. datuojamas Britanijos tiltas (*Britannia Bridge*) – *EHS* buvo norima suprojektuoti kaip pagrindinės santvaros gniuždomąją juostą (Ruiz-Teran, Gardner 2008). Kita konstrukcija, kurioje jau buvo panaudotas šis skerspjūvis, yra

Karališkasis Alberto tiltas (*Royal Albert Bridge*). Šį tiltą 1859 m. suprojektavo I. K. Brunelis, pagrindinėms arkoms panaudodamas kaustytos geležies *EHS* profiliuočius (Ruiz-Teran, Gardner 2008).

Pastaruoju metu *EHS* profiliuočiai vis dažniau naudojami kaip laikančiosios konstrukcijos perimti vėjo apkrovoms stiklo fasaduose. Orientuoti stipriąja ašimi į pridėtą apkrovą, šie skerspjūviai turi didelę lenkiamąją galią, kartu konstrukcijoms suteikia elegantiškas formas ir sukuria lengvumo įspūdį (Packer *et al.* 2009a). Tokio konstrukcinio sprendinio pavyzdžiai yra *Coeur Defense* atrijus Paryžiuje (architektas J.P. Viguieras) (Packer *et al.* 2009a), santvaros pavidalo laikančioji stiklo fasado konstrukcija *AXA* pastate Paryžiuje (Bortolotti *et al.* 2003).

EHS profiliuočiai taip pat yra naudojami kaip kolonos. Tai iliustruojantys pavyzdžiai yra Stratfordo metro stotis (*Stratford DLR Station*) Londone, Anglijoje (žr. 2 pav.), *Swords* biuras Dublino oro uoste, Airijoje (*RKD* architektai; konstruktoriai – T. Garlandas ir partneriai) (Packer *et al.* 2009a), *Jarold* universalinė parduotuvė Noridže, Jungtinėje Karalystėje (Chan, Gardner 2006).



2 pav. Stratfordo metro stotis (*Stratford DLR Station*) Londone, Anglijoje (Fun...2014)

EHS profiliuočius galima pastebėti moderniose plieno skulptūrose, pvz. *Hondos* eksponatas *Greičio* festivalyje 2005 (*Festival of Speed 2005, Goodwood, Sussex, England*). Šio eksponato architektas yra G. Judahas, konstruktorius – *NRM* Bobrowskis (Gardner *et al.* 2011a).

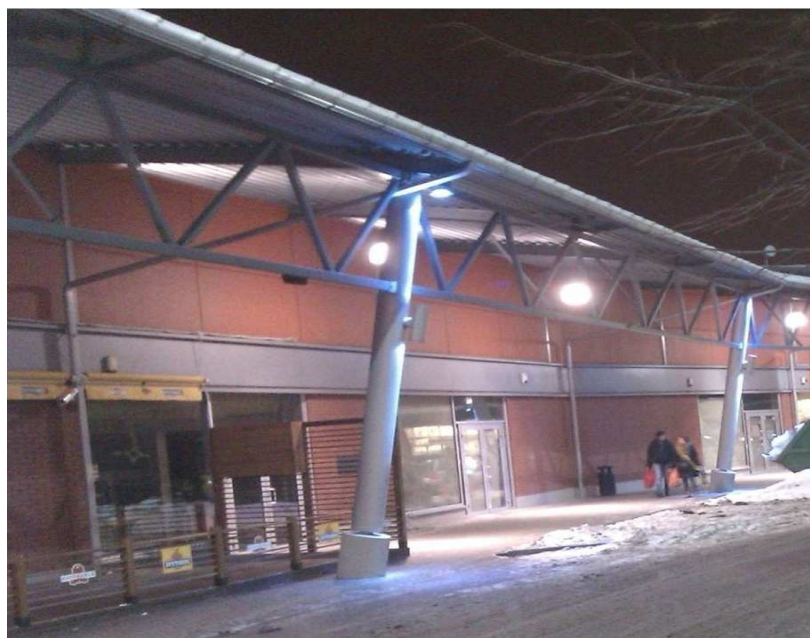
EHS profiliuočius taip pat galima rasti šiuolaikiniuose oro uostuose: *Heathrow* oro uoste Londone *EHS* profiliuočiai panaudoti stiklo fasadui laikyti (žr. 3 pav.), *Barajas* oro uoste Madride šio skerspjūvio profiliuočiai panaudoti kaip kolonos stogo konstrukcijoms laikyti (Ruiz-Teran, Gardner 2008). *EHS* profiliuočiai naudojami elektros perdavimo linijų stulpams, pvz., Prancūzijoje, pėsčiųjų tiltams, pvz., Jungtinėje Karalystėje, vėjo turbinų stiebams ir kt. konstrukcijoms (Packer 2008).



3 pav. *Heathrow* oro uosto 5 terminalas Londone (Fun is...2014)

Lietuvoje *EHS* profiliuočiai nėra populiarūs ir jie šiuo metu laikančiosiose statybinėse konstrukcijose yra naudojami labai retai arba iš viso nenaudojami. Vis dėlto kaip pavyzdį būtų galima išskirti *IKI* prekybos centrą Šiaurės miestelyje, Vilniuje (žr. 4 pav.). Tačiau sprendžiant iš atraminio kolonos mazgo, čia panaudotas *EHS* profiliuotis yra su pilnavidure betonine šerdimi.

Norint, kad *EHS* profiliuočiai būtų dažniau ir racionaliau naudojami, jiems turėtų būti sukurtos projektavimo normos (Chan, Gardner 2007).



4 pav. *IKI* prekybos centras Šiaurės miestelyje, Vilniuje (autoriaus nuotr.)

1.3. *EHS* privalumai ir trūkumai

EHS plieniniams profiliuočiams naudojami vis dažniau, nepaisant to, jog nėra pakankamai informacijos apie šio skerspjūvio elementų projektavimą. Architektūrinis motyvas naudoti *EHS* yra moderni (Packer *et al.* 2009a), įdomi ir neįprasta išvaizda (Ruiz-Teran, Gardner 2008). Stiklo fasaduose šio skerspjūvio profiliuočiai sukuria grakščias formas, sudaro lengvumo įspūdį. Be architektūrinių privalumų, karštuoju būdu pagaminti *EHS* turi aukščiausias mechanines savybes, lyginant su kitais gaminamais *HSS* (Packer *et al.* 2009a). *EHS* profiliuočiai yra iš smulkiagrūdžio konstrukcinio plieno, gerai suvirinami, neturi liekamųjų įtempių ir lengvai cinkuojami (Celsius 355...2014). Kadangi šio tipo profiliuočiai yra pagaminti karštuoju būdu, jie yra atsparesni klupčiai, kai yra gniuždomi (Bortolotti *et al.* 2003).

EHS turi dvi skirtingas simetrijos ašis ir nevienodus standumus kiekvienos iš jų atžvilgiu. Tai leidžia efektyviai orientuoti skerspjūvį pagal pridėtą apkrovą taip, jog skerspjūvio išnaudojimas būtų didžiausias (Ruiz-Teran, Gardner 2008) – pvz., perimti vėjo apkrovas stiklo fasaduose (Bortolotti *et al.* 2003). Dėl skerspjūvio uždaro *EHS* taip pat turi didelį sukamąjį standį. Lyginant su tokio paties skerspjūvio ploto ar svorio *CHS*, *EHS* turi didesnę lenkiamąją galią dėl nevienodų simetrijos ašių, tačiau kartu išlaiko sklandžią ir uždarą formą (Packer 2008). Be to, plonasieniams *CHS* klumpimas gali pasireikšti staigiau, nei plonasieniams *EHS* (Bradford, Roufeginejad 2008).

EHS trūkumas yra tas, jog šio skerspjūvio profiliuočiai yra gaminami tik karštuoju būdu – taip pagaminti profiliuočiai yra brangesni už šaltai formuotus virintinius tuščiavidurius profiliuočius. Taip pat norint tam tikrose nedidelėse konstrukcijose panaudoti šio tipo profiliuočius, greičiausiai reikės užsakyti gaminius užsienyje, nes nėra daug įmonių, užsiimančių *EHS* profiliuočių gamyba – o tai vėlgi įtakos galutinę konstrukcijos kainą. Kita vertus, karštuoju būdu pagaminti profiliuočiai yra atsparesni klumpymui, dėl to, esant toms pačioms apkrovoms, naudojant šiuos profiliuočius kolonomis, galima panaudoti mažesnių skerspjūvio matmenų bei liaunesnius profiliuočius. Ne daug įmonių, gaminančių *EHS* profiliuočius, yra dėl to, nes šie skerspjūviai yra rečiausiai naudojami iš visų įprastų *HSS*, o norint, kad jie būtų naudojami dažniau, reikia projektavimo normų.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateiktas bendras *EHS* apibūdinimas, nurodytos konstrukcijos užsienyje bei Lietuvoje, kuriose yra panaudotas šis skerspjūvis. *EHS* profiliuočių gamyba karštuoju būdu jau yra reglamentuota standartu *EN 10210*, tačiau į projektavimo normas šis skerspjūvis nėra įtrauktas. Norint projektuoti šį skerspjūvį pagal europinės projektavimo normas nėra duomenų kaip nustatyti skerspjūvio

klasę bei kokias tokio skerspjūvio elemento klupumo kreives naudoti. *EHS* turi dvi simetrijos ašis ir skirtingus standumus kiekvienos atžvilgiu, bet kartu išlaiko uždara ir sklandžią formą – dėl šių priežasčių šį skerspjūvį renkasi tiek architektai, tiek konstruktoriai. *CHS*, *RHS* ir *SHS* skerspjūvio elementų projektavimo metodika yra pateikta normose. Norint, kad *EHS* profiliuočiai būtų dažniau ir racionaliau naudojami, jie taip pat turi būti įtraukti į projektavimo normas.

2. LITERATŪROS APŽVALGA

2.1. Mechaninės ir geometrinės EHS profiliuočių charakteristikos

2.1.1. Mechaninės EHS profiliuočių charakteristikos

Visų karštuoju būdu gaminamų EHS profiliuočių mechaninės charakteristikos turi tenkinti standartą EN 10210-1 (Lietuvos standarto žymuo LST EN 10210-1). Šiuo metu šie profiliuočiai dažniausiai gaminami iš S355J2H klasės plieno, kurio stipris pagal takumo ribą f_y yra ne mažesnis už 355 MPa, kai plieno lakšto storis yra ne didesnis už 16 mm bei Šarpio smūginio tūsumo bandymo mažiausia energijos reikšmė 27 J esant $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai (Packer 2008).

2.1.2. Geometrinės EHS profiliuočių charakteristikos

EHS profiliuočių matmenų, formos, tiesumo bei masės nuokrypiai turi tenkinti reikšmes, pateiktas standarte EN 10210-2 (Lietuvos standarto žymuo LST EN 10210-2). Šios reikšmės pateiktos 1 lentelėje.

1 lentelė. EHS profiliuočių matmenų, formos, tiesumo bei masės nuokrypiai

Parametras	Nuokrypis
Išoriniai matmenys (H , B)	$\pm 1\%$, jei $H \geq 250\text{ mm}$; $\pm 2\%$, jei $H < 250\text{ mm}$
Sienelės storis (t)	-10%
Sąsūka	$2\text{ mm} + 0,5\text{ mm}/m$, jei $H \geq 250\text{ mm}$; $4\text{ mm} + 1,0\text{ mm}/m$, jei $H < 250\text{ mm}$
Tiesumas	$0,2\%$ viso ilgio $+ 3\text{ mm}/m$, jei $H \geq 250\text{ mm}$; $0,4\%$ viso ilgio $+ 3\text{ mm}/m$, jei $H < 250\text{ mm}$
Masė	$\pm 6\%$ atskirų ilgių profiliuočiams ($+8\%$ / -6% , jei profiluotis yra vientisas besiūlis)

EHS geometrinių charakteristikų išraiškos ir reikšmės yra taip pat pateiktos anksčiau paminėtame standarte EN 10210-2. Formulės, pagal kurias galima apskaičiuoti EHS geometrines charakteristikas, pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Geometrinių *EHS* charakteristikų išraiškos

Charakteristika	Išraiška	Matavimo vienetai
Ilgosios simetrijos ašies išorinis matmuo	H	(mm)
Trumposios simetrijos ašies išorinis matmuo	B	(mm)
Sienelės storis	t	(mm)
Paviršiaus plotas	$A_s = \frac{P}{10^3}$	(m ² /m)
Skerspjūvio plotas	$A = \frac{\pi [HB - (H - 2t)(B - 2t)]}{4 \cdot 10^2}$	(cm ²)
Ilgio vieneto masė	$M = 0,785A$	(kg/m)
Inercijos momentas		
<i>Stiprioji ašis</i>	$I_y = \frac{[BH^3 - (B - 2t)(H - 2t)^3] \frac{\pi}{64}}{10^4}$	(cm ⁴)
<i>Silpnoji ašis</i>	$I_z = \frac{[HB^3 - (H - 2t)(B - 2t)^3] \frac{\pi}{64}}{10^4}$	(cm ⁴)
Inercijos spindulys		
<i>Stiprioji ašis</i>	$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$	(cm)
<i>Silpnoji ašis</i>	$i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$	(cm)
Tamprusis atsparumo momentas		
<i>Stiprioji ašis</i>	$W_{el,y} = \frac{20I_y}{H}$	(cm ³)
<i>Silpnoji ašis</i>	$W_{el,z} = \frac{20I_z}{B}$	(cm ³)
Plastinis atsparumo momentas		
<i>Stiprioji ašis</i>	$W_{pl,y} = \frac{[H^2B - (H - 2t)^2(B - 2t)]}{6 \cdot 10^3}$	(cm ³)
<i>Silpnoji ašis</i>	$W_{pl,z} = \frac{[B^2H - (B - 2t)^2(H - 2t)]}{6 \cdot 10^3}$	(cm ³)
Sukamoji inercijos konstanta	$I_t = \frac{1}{10^4} \left[\frac{4A_m^2 t}{U} + \frac{Ut^3}{3} \right]$	(cm ⁴)
Sukamoji atsparumo momento konstanta	$C_t = \left[\frac{10I_t}{T + \left(\frac{2A_m}{U} \right)} \right]$	(cm ³)

2 lentelės pabaiga

Pagalbiniai dydžiai		
	$A_m = \frac{\pi(H-t)(B-t)}{4}$	(mm ²)
	$P = \frac{\pi}{2}(H+B) \left(1 + 0,25 \left(\frac{H-B}{H+B} \right)^2 \right)$	(mm)
	$U = \frac{\pi}{2}(H+B-2t) \left(1 + 0,25 \left(\frac{H-B}{H+B-2t} \right)^2 \right)$	(mm)

Kai kurios iš 2 lentelėje pateiktų formulių buvo sukritikuotos dėl per didelio jų konservatyvumo. Pažymėjus $H=2a$, o $B=2b$ ((1) pav.) EHS skerspjūvio ploto formulę galima užrašyti ir taip:

$$A = \frac{\pi}{4} [2a \times 2b - (2a-2t)(2b-2t)]. \quad (3)$$

T. M. Chanas ir L. Gardneris (Chan, Gardner 2007) pasiūlė, jog skerspjūvio plotą tiksliau būtų apskaičiuoti padauginant vidutinį perimetrą P_m iš sienelės storio t ((4) formulė). P_m būtų apskaičiuojamas pagal vidutinio perimetro formulę, kurią išvedė S. Ramanujanas ((5) formulė) (Chan, Gardner 2007):

$$A = P_m \times t; \quad (4)$$

$$P_m = \pi(a_m + b_m) \left(1 + \frac{3h_m}{10 + \sqrt{4 - 3h_m}} \right); \quad (5)$$

čia $a_m = (2a-t)/2$, $b_m = (2b-t)/2$ ir $h_m = (a_m - b_m)^2 / (a_m + b_m)^2$.

Chanas ir Gardneris (Chan, Gardner 2008) teigė, jog ne tik skerspjūvio plotas, bet ir tamprusis atsparumo momentas W_{el} bei plastinis atsparumo momentas W_{pl} pagal standartą EN 10210-2 yra apskaičiuojami su pernelyg didele atsarga. Šioms EHS charakteristikoms skaičiuoti, tiek apie stipriąją skerspjūvio ašį $y-y$, tiek apie silpnąją $z-z$, jie pasiūlė tokias formules:

$$W_{el,y} = \frac{I_y}{a} = \frac{4a_m^3 t^{\frac{3}{2}}}{a} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2 \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cos^2 \varphi} d\varphi; \quad (6)$$

$$W_{el,z} = \frac{I_z}{b} = \frac{4a_m b_m^2 t}{b} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cos^2 \varphi} d\varphi; \quad (7)$$

$$W_{pl,y} = 4a_m^2 t \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cos^2 \varphi} d\varphi; \quad (8)$$

$$W_{pl,z} = 4a_m b_m t \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cos^2 \varphi} d\varphi; \quad (9)$$

čia dydžiai a_m , b_m tokie patys kaip ir (5) formulėje, I_y , I_z atitinkamai yra inercijos momentai apie stipriąją $y-y$ ir apie silpnąją $z-z$ skerspjūvio ašis, φ yra kampas kurį sudaro kiekvienas be galo mažas skerspjūvio elementas su $z-z$ ašimi (žr. 1 pav.).

Anot Chano ir Gardnerio (Chan, Gardner 2007, 2008), šiomis formulėmis ((4) – (9) formulės) gaunamas racionalesnis rezultatas nei naudojant išraiškas pateiktas standarte *EN 10210-2* (2 lentelė).

2.2. Ašinio gniuždymo veikiamas *EHS*

2.2.1. Istorinė raida

Mokslinis *EHS* tyrimas pradėtas nuo *CHS* studijų. 1908 metais R. Lorenzas, 1910 metais S. P. Timoshenko ir 1914 metais R. V. Southwellis, nepriklausomai vienas nuo kito, išvedė tą pačią *CHS* tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių formulę (Ruiz-Teran, Gardner 2008):

$$\sigma_{cr,CHS} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{r}; \quad (10)$$

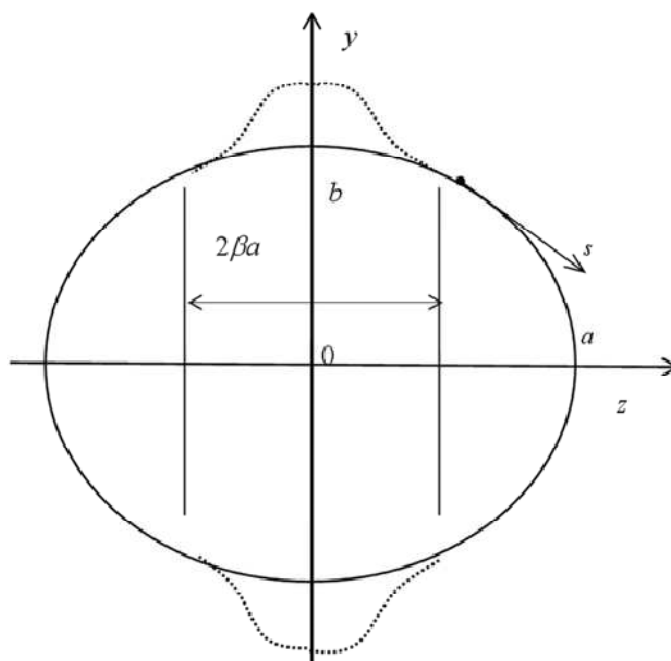
čia t ir r atitinkamai yra *CHS* sienelės storis ir spindulys, o E ir ν atitinkamai yra medžiagos tamprumo modulis bei Puasono koeficientas.

1951 metais K. Marguerre'as atliko pirmuosius neapskritųjų tuščiavidurių skerspjūvių tyrimus (Ruiz-Teran, Gardner 2008). Jis studijavo kintančio spindulio cilindrinis kevalus, kitaip žinomus kaip ovaliniai tuščiaviduriai skerspjūviai (angl. *OHS*). *OHS* gali būti aprašomas Furjė (*Fourier*) polinomu ((11) formulė), čia r yra spindulys tam tikrame *OHS* ilgio taške s , ξ yra skerspjūvio ekscentricitetas – parametras, aprašantis kreivinę formą, P yra skerspjūvio perimetras, r_0 yra tokio paties perimetro *CHS* spindulys.

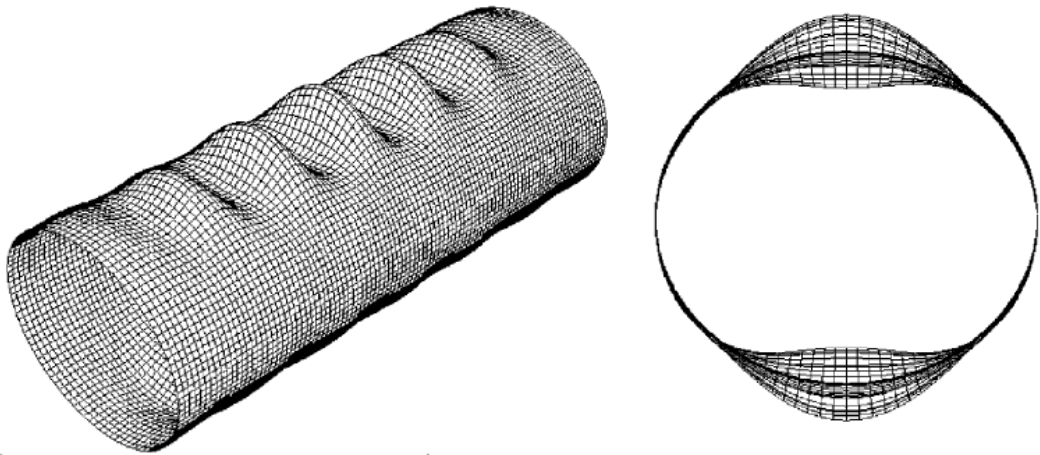
$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_p} \left(1 + \xi \cos \left(\frac{4\pi s}{P} \right) \right). \quad (11)$$

Marguerre'as nustatė, jog (11) lygtimi aprašomas *OHS* gali būti prilyginamas elipsei, jeigu skerspjūvio ekscentricitetas tenkina sąlygą $0 \leq \xi \leq 1$. Kai ekscentricitetas $\xi = 0$, (11) formulė aprašo *CHS*, o kai $\xi = 1$, maksimalus skerspjūvio spindulys yra begalybė, o simetrijos ašių santykis tampa lygus 2,06 (anksčiau buvo minėta, jog visų šiuo metu gaminamų *EHS* ašių santykis yra 2). Marguerre'as bandė nustatyti *OHS* klupties formą ir padarė prielaidas, jog didžiausi geometriniai nuokrypiai yra netoli didžiausio *OHS* spindulio taško (anksčiau buvo minėta, jog šiame taške skerspjūvis turi mažiausią standumą), o pačiame taške jie lygūs nuliui. Vėliau buvo įrodyta, kad šios prielaidos buvo klaidingos (Bradford, Roufeginejad 2008).

1962 metais J. Kempneris praplėtė Marguerre'o *OHS* tyrinėjimus. Jis nustatė, jog didžiausi skerspjūvio klupties formos geometriniai nuokrypiai atsiranda didžiausio *OHS* spindulio taške, priešingai nei manė Marguerre'as (Ruiz-Teran, Gardner 2008). Šie nuokrypiai lokaliai atsiranda atstume $2\beta_1 a$, kur a yra pusė ilgosios simetrijos ašies, o β_1 yra lokalizacijos koeficientas (žr. 5 pav.). Trimatis *EHS* klupties formos vaizdas pateiktas 6 paveiksle.



5 pav. Vietinis *EHS* klupumas pagal J. Kempnerį (Bradford, Roufeginejad 2008)



6 pav. Žemiausia *EHS* klupties forma (Ruiz-Teran, Gardner 2008)

Kempneris padarė išvadą, kad *OHS* tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai gali būti nustatyti pagal *CHS* tampriuosius kritinius klumpamuosius įtempius, priimant *CHS* spindulį r lygų didžiausiam *OHS* spinduliui $r_{\max}$ ((12) formulė) arba pusei ekvivalentinio skersmens D_e . Į (11) formulę įrašius $r_{\max}$ išraišką buvo gauta gniuždomo *OHS* tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių formulė ((13) formulė). Šios, 1962 metais Kempnerio pasiūlytos, mokslinės idėjos tapo pagrindu toliau vystantis *EHS* tyrimams (Bradford, Roufeginejad 2008).

$$r = r_{\max} = \frac{D_e}{2} = \frac{a^2}{b}; \quad (12)$$

$$\sigma_{cr,OHS} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{a^2/b}. \quad (13)$$

1964 metais Kempneris kartu su Y. N. Chenu studijavo pokritinę *OHS* elgseną (Ruiz-Teran, Gardner 2008). Jie nustatė, jog skerspjūvio ašių santykiui artėjant link 1 (ašių santykis $a/b=1$ atitinka *CHS*), pokritinė *OHS* elgsena tampa nestabili, ir priešingai, ašių santykiui didėjant – skerspjūviui panašėjant į plokštelę – pokritinė elgsena tampa stabilesnė. Be to, Kempneris su Chenu išsiaiškino, kad mažėjant skerspjūvio spindulio ir sienelės storio santykiui (r/t), didėja pokritinės elgsenos nestabilumas. Vėliau jie taip pat nustatė, jog *OHS*, turintys didesnę ašių santykį, sugeba atlaikyti didesnę apkrovą. To priežastis – įtempių persiskirstymas į standesnes skerspjūvio zonas, kur skerspjūvio spindulys yra mažiausias (Ruiz-Teran, Gardner 2008).

J. W. Hutchinsonas buvo pirmasis mokslininkas, pradėjęs *EHS* (nebe *OHS* kaip anksčiau minėti mokslininkai) klupties pobūdžio ir pokritinės elgsenos tyrinėjimus. 1968 metais jis nustatė, jog

Kempnerio išvada, kad *OHS* tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai gali būti nustatyti pagal *CHS* tampruosius kritinius klumpamuosius įtempius, priimant *CHS* spindulį r lygų didžiausiam *OHS* spinduliui $r_{\max}$, gali būti pritaikyta ir *EHS*. Hutchinsonas taip pat įrodė, kad apskritai *EHS* turi nestabilią pokritinę elgseną dėl didelio jautrumo geometrinėms nuokrypoms. Tokie tyrimo rezultatai prieštaravo Kempnerio ir Cheno išvadoms. Anot Hutchinsono, rezultatai nesutapo ne dėl geometrinių ovalo ir elipsės skirtumų, bet dėl Kempnerio ir Cheno pasirinktos geometrinių nuokrypių funkcijos. Hutchinsonas teigė, jog ši funkcija yra netinkama nagrinėjant pokritinę *EHS* elgseną (Ruiz-Teran, Gardner 2008).

Tais pačiais 1968 metais Kempneris ir Chenas praplėtė savo 1964 metų darbą papildydami, jog *OHS* su mažais ekscentricitetais (ξ artėjant link 0) yra jautrūs geometrinėms nuokrypoms, o tai daro įtaką pokritinei elgsenai. *OHS* su dideliais ekscentricitetais (ξ artėjant link 1) yra mažiau jautrūs geometrinėms nuokrypoms, pokritinė elgsena stabilesnė ir skerspjūvis gali atlaikyti didesnę apkrovą už kritinę klupdančiąją jėgą.

1968 metų Hutchinsono bei Kempnerio ir Cheno tyrimai 1971 metais buvo patvirtinti R. C. Tennysono, M. Bootono ir R. D. Caswello. Jie tyrė *EHS*, kurių ašių santykis kinta nuo 1 iki 2, klupties pobūdį (Ruiz-Teran, Gardner 2008).

Praėjo nemažai laiko, kol vėl buvo susidomėta *EHS*. Kitame skyriuje pateikta informacija apie atnaujintus pastarojo dešimtmečio ašinio gniuždymo veikiamo *EHS* tyrimus.

2.2.2. *EHS* kluptis

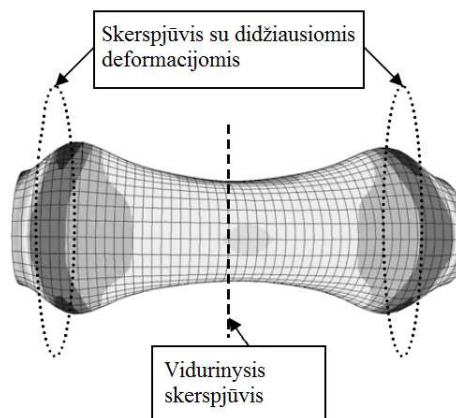
Kaip galima matyti iš *EHS* istorinės tyrinėjimų raidos, šio skerspjūvio atsparumą gniuždymui buvo bandytą išreikšti remiantis *CHS* lygtimis. Y. Zhu ir T. Wilkinsonas (Zhu, Wilkinson 2007) toliau tęsė šiuos tyrimus. Jie, naudodami baigtinių elementų (*BE*) programinį paketą ABAQUS, atliko *BE* analizę, kuria imitavo *CHS* ir *EHS* mažų kolonų vietinę kluptį.

Sudarydami *CHS BE* modelius, kaip ir įprasta šiems skerspjūviams, Zhu ir Wilkinsonas naudojo tolygų *BE* tinklą, tačiau *EHS* modeliams jie naudojo tankesnę *BE* tinklą mažiausio spindulio skerspjūvio vietose. *BE* analizė buvo atlikta trimis etapais. Pirmuoju etapu „tobulam“ (be jokių geometrinių nuokrypių) skerspjūviui buvo atlikta klupumo analizė norint nustatyti skerspjūvio suirimo pobūdį. Antruoju etapu šiam skerspjūviui buvo įvesti geometriniai nuokrypiai pagal pirmajame etape gautas klupties formas. Trečiuoju etapu skerspjūviui su geometriniais nuokrypiais buvo atlikta

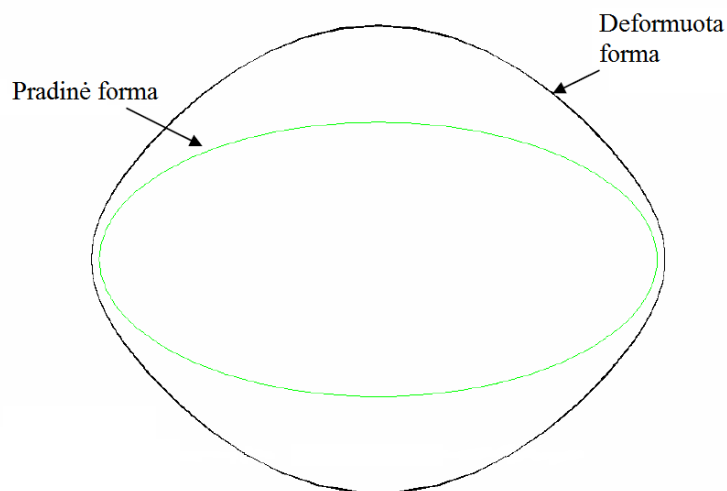
geometriškai ir fiziškai netiesinė analizė. Netiesiniam uždaviniui spręsti panaudotas arkos ilgio kontrolės metodas (Zhu, Wilkinson 2007).

Pirmajame etape Zhu ir Wilkinsonas tyrė skerspjuvio klupties pobūdį tamprioje stadijoje. Tyrimai atlikti *EHS*, kurių ašių santykis a/b kinta nuo 1 iki 3, o skerspjuvio liaunis H/t kinta nuo 20 iki 120. Šio etapo tikslas buvo nustatyti įtempius kuriems esant skerspjuvis pradeda klupti. *BE* analizės rezultatai buvo palyginti su Kempnerio pasiūlyta formule ((13) formulė) (Zhu, Wilkinson 2007). Kai ašių santykis $a/b=1$, o tai yra *CHS*, *BE* analizės ir Kempnerio formulės rezultatai beveik sutapo. Didėjant a/b , didėjo ir rezultatų neatitiktis. Zhu ir Wilkinsonas pastebėjo, jog mažėjant skerspjuvio liauniui H/t , *BE* analizės ir Kempnerio formulės rezultatų neatitiktis taip pat didėja. Jie padarė išvadą, jog šie skirtumai atsirado dėl to, jog Kempnerio formulė buvo išvesta remiantis *CHS* tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių formule (Zhu, Wilkinson 2007). Kita vertus, praktiniam pritaikymui ašių santykių kitimas yra nesvarbus, nes šiuo metu visų gaminamų *EHS* profiliuotųjų ašių santykis yra 2. Be to, visų šiuo metu gaminamų *EHS* skerspjuvio liaunis nėra pernelyg mažas. Dėl šių priežasčių Zhu ir Wilkinsonas visgi patvirtino, kad šią Kempnerio apytikslę išraišką galima naudoti saugiam *EHS* kritinių tampriųjų klumpamųjų įtempių nustatymui.

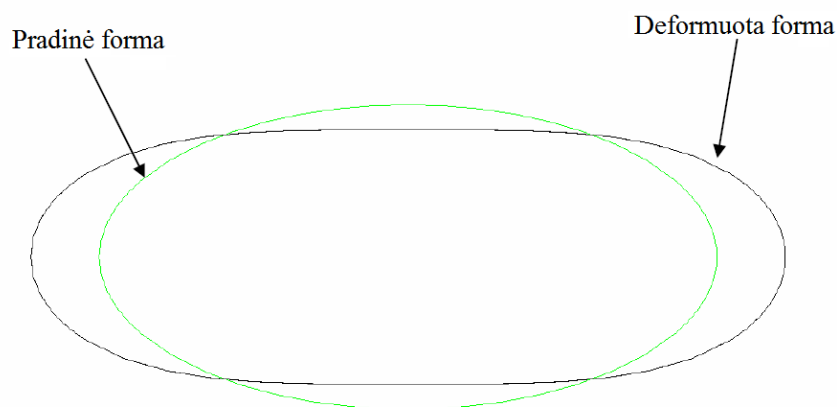
Zhu ir Wilkinsono *BE* analizės rezultatai parodė, jog didžiausios skerspjuvio deformacijos atsiranda didžiausio *EHS* spindulio $r_{\max}$ vietose. Mažos deformacijos arba visiškai jokių, priešingai – atsiranda mažiausio spindulio $r_{\min}$ vietose. To priežastis yra didesnis skerspjuvio standumas mažiausio spindulio $r_{\min}$ vietose. Pradinė *EHS* klupties forma parodyta 7 paveiksle. Maksimalios deformacijos atsiranda netoli kolonos viršaus ir apačios – *EHS* deformuojasi į išorę (žr. 8 pav.). Mažiausiai skerspjuvis deformuojasi kolonos viduryje (žr. 9 pav.).



7 pav. Pradinė *EHS* ($a/b = 2$, $H/t = 30$) klupties forma (Zhu, Wilkinson 2007)



8 pav. Maksimalios EHS ($a/b = 2$, $H/t = 30$) išorinės deformacijos (Zhu, Wilkinson 2007)

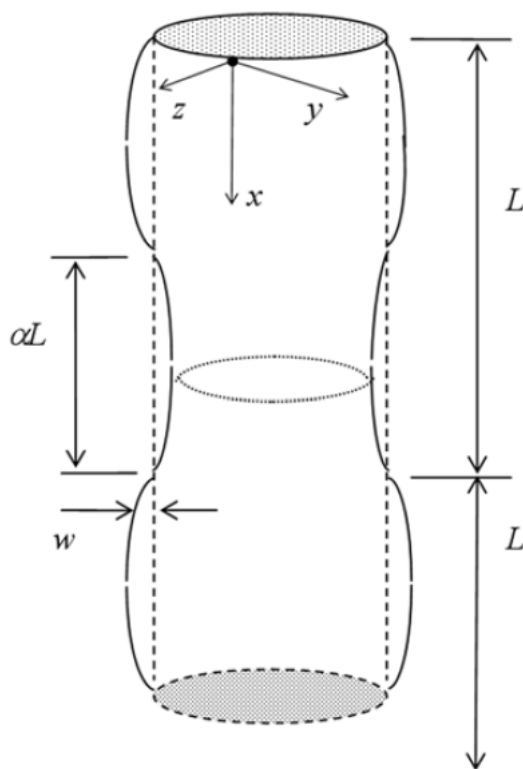


9 pav. EHS ($a/b = 2$, $H/t = 30$) kolonos vidurinio skerspjūvio deformacijos (Zhu, Wilkinson 2007)

Vėliau šiuos tyrimus papildė M. A. Bradfordas ir A. Roufeginejadas. Jie padarė prielaidą, jog 7, 8, 9 paveiksluose pavaizduota elgsena pasireiškė nenutrūkstamai visame EHS kolonos ilgyje tol, kol pridėta vienašė deformacija išilgai kolonos ilgio pasieks kritinę reikšmę. Deformacijai pasiekus kritinę reikšmę, įvyks tamprioji kluptis. Šis nenutrūkstamas klupties pobūdis pavaizduotas 10 paveiksle, kuriame L yra bangos ilgis išilgai kolonos ilgio, w yra šoninė deformacija, α yra koeficientas, kintantis nuo 0 iki 1, kuris parodo, kuri bangos dalis deformuojasi į vidų (Bradford, Roufeginejad 2008).

Antruoju BE analizės etapu Zhu ir Wilkinsonas į BE modelį įtraukė geometrinius nuokrypius, paremtus pirmojo etapo klumpumo analizės rezultatais. Jie pastebėjo, jog didesni geometriniai nuokrypiai lemia mažesnius tampriuosius kritinius klumpamuosius įtempius. Šiais tyrimais buvo įrodyta, jog CHS yra jautresnis geometriniams nuokrypiams palyginus su EHS – tai yra esant

skerspjuviui su geometriniais nuokrypiais, *CHS* kritiniai tamprieji klumpamieji įtempiai sumažėja daugiau negu ekvivalentinio skerspjuvio ploto *EHS*. Tai vienas iš *EHS* pranašumu prieš *CHS* (Zhu, Wilkinson 2007). Šios išvados taip pat patvirtino 1968 metų Hutchinsono bei Kempnerio ir Cheno tyrimus.

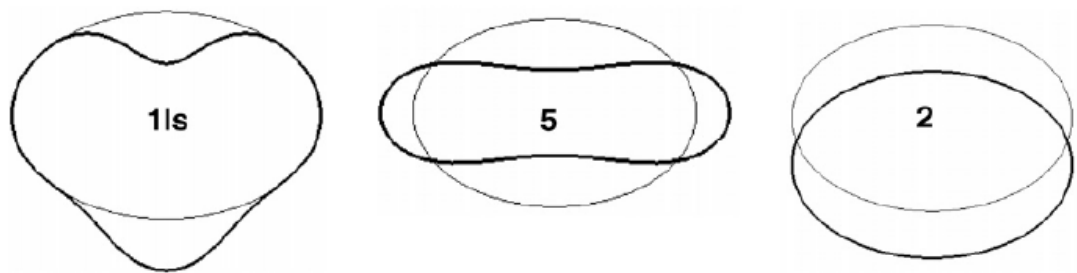


10 pav. *EHS* kolonos klumpamasis bangos ilgis (Bradford, Roufeginejad 2008)

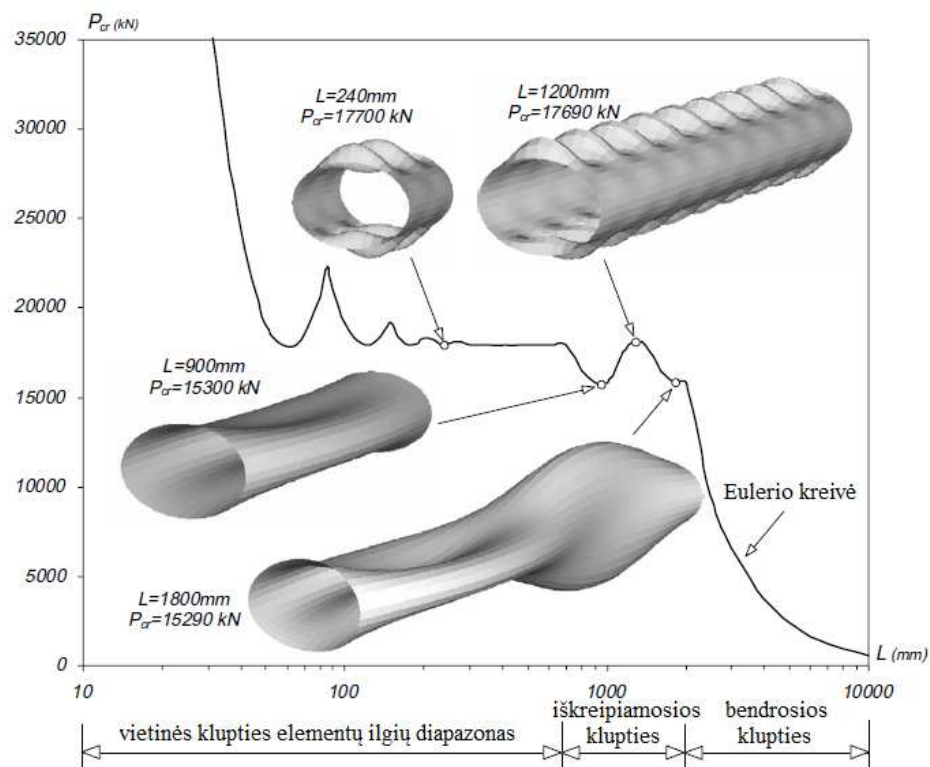
Trečiuoju ir paskutiniu etapu Zhu ir Wilkinsonas nustatė netampriosios klupties pobūdį, įtraukdami į *BE* analizę plastines medžiagos savybes. Tyrimai parodė, jog mažesnio liaunio skerspjuviai pasiekia takumo ribą prieš pasireiškiant klupumui, o liaunuose skerspjuviuose kluptis pasireiškia prieš jiems pasiekiant takumo ribą (4 klasės skerspjuvių elgsena). Be to, rezultatai taip pat parodė, jog apkritai *EHS* yra plastiškesnis skerspjuvis nei *CHS* (Zhu, Wilkinson 2007).

Tolesnius bandymus atliko N. Silvestre'as norėdamas nustatyti gniuždomų *EHS* elementų klupties pobūdį. Naudodamas *EHS* 150x100x6 jis nustatė daug, įskaitant ir aukštesnės eilės, skerspjuvio klupties formų. Dominuojančios, arba žemiausios klupumo formos, yra pateiktos 11, 12 paveiksluose. Bet kokiam elementui, kurio ilgis $L < 720$ mm, kritinė klupties forma yra vietinės klupties pobūdžio. Ši klupumo forma panaši į Kempnerio gautą *EHS* klupties formą (11 paveikslas: 11s klupties forma), klupties pobūdis kartojasi išilginėmis bangomis per visą elemento ilgį. Pusbangių skaičius n

išilgai elemento kinta nuo $n = 1$ ($L = 60 \text{ mm}$) iki $n = 12$ ($L = 720 \text{ mm}$). Didesnio ilgio EHS elementams, kai $720 \text{ mm} < L < 2000 \text{ mm}$, kritinė klupumo forma yra skerspjūvio iškrepiamosios klupties, čia $n = 1$ ($L = 900 \text{ mm}$) arba $n = 2$ ($L = 1800 \text{ mm}$) (11 paveikslas: 5 klupties forma). Tačiau šiame elementų ilgių diapazone atsiranda išimtis, kai $1200 \text{ mm} < L < 1300 \text{ mm}$. Šiame diapazone 1ls klupties formos kritinė klupdančioji apkrova yra mažesnė negu 5, todėl skerspjūvis vėl grįžta prie 1ls klupties formos. Kai $L > 2000 \text{ mm}$, kritinė klupties forma yra bendrosios klupties pobūdžio (galioja Eulerio dėsnis) (11 paveikslas: 2 klupties forma) (Silvestre 2008).



11 pav. EHS klupumo formos (Silvestre 2008)



12 pav. EHS kritinės klupdančiosios apkrovos priklausomybės nuo elemento ilgio grafikas (Silvestre 2008)

Silvestre'as taip pat atliko parametrinę analizę, norėdamas nustatyti, kaip keičiantis *EHS* sienelės storiui t ir ašių santykiui a/b , kinta elementų ilgių diapazonai, kuriuose pasireiškia skirtingos klupties formos (Silvestre 2008). Apibendrinus rezultatus, buvo nustatyta, jog mažėjant skerspjuvio sienelės storiui t , (13) lygtis tampa tikslesnė, o elementų ilgių diapazonai, kuriuose pasireiškia vietinė (11s) ir iškreipiamoji (5) klupties formos, didėja. Keičiant *EHS* ašių santykį a/b , buvo nustatyta, jog a/b artėjant link 1, skerspjuvio elgsena panašėdavo į *CHS*, o kai a/b artėdavo į begalybę, skerspjuvio elgsena panašėdavo į plokštelės.

2.2.3. Ekvivalentinio CHS metodas

Chanas ir Gardneris (Chan, Gardner 2007) atliko natūrinius bandymus su 25 kolonomis ir nustatė jų elgseną ir laikomąją galią veikiant ašiniam gniuždymui. Jie apsiribojo bandymais tik su šiuo metu gaminamais *EHS* profiliuočiais – tai atitinka skerspjuvius, kurių ašių santykis yra 2, o diapazonas kinta nuo 150x75x4 mm iki 500x250x16 mm. Chanas ir Gardneris nustatė, jog skerspjuvio standumas kiekviename taške yra skirtingas ir standesnės skerspjuvio dalys perima daugiau apkrovos. Tai galima užrašyti (14) formule, kur N yra veikianti ašinė jėga, σ_c – normaliniai gniuždomieji įtempiai, t yra skerspjuvio sienelės storis, o P_m yra vidutinis perimetras, apskaičiuojamas pagal Ramanujano formulę ((5) formulė) (Chan, Gardner 2007).

$$N = \int_0^{P_m} (\sigma_c t) dP_m. \quad (14)$$

EHS kolonos buvo išbandytos ardančiajai apkrovai. Vidutinio liaunumo skerspjuviai pasiekė takumo ribą prieš pasireiškiant netampriai klupčiai. Mažiau liauni skerspjuviai pasiekė didesnę jėgą negu takumo apkrova. Chanas ir Gardneris teigė, jog veikiant ašiniam gniuždymui *EHS* kritiniai tamprieji klumpamieji įtempiai gali būti apskaičiuoti apytiksliai naudojant (15) formulę. Ši išraiška – tai ta pati Kempnerio formulė ((13) formulė), tik naudojant ekvivalentinį D_e .

$$\sigma_{cr,EHS} = \frac{E}{\frac{D_e}{2t} \sqrt{3(1-\nu^2)}}. \quad (15)$$

Kai *EHS* yra veikiamas visiško gniuždymo, yra svarbu nustatyti, ar skerspjuvis patirs vietinę kluptį tamprioje stadijoje, tai yra ar atkartos 4 klasės skerspjuvio elgseną (Chan, Gardner 2007). Dažniausiai skerspjuvio klasė yra nustatoma pagal skerspjuvio liaunį, o tai yra tam tikros skerspjuvio dalies pločio ir sienelės storio santykis arba skersmens ir sienelės santykis. Nustačius skerspjuvio

liaunį, jis lyginamas su ribinėmis reikšmėmis. Kiekvienai skerspjūvio klasei yra nustatytos skirtingos ribinio skerspjūvio liaunio reikšmės. *EHS* neturi nei plokščių skerspjūvio dalių, nei skersmens, todėl šiam skerspjūviui neišeina nustatyti plokščios skerspjūvio dalies pločio ar skersmens ir sienelės storio santykį (kaip tai būtų galima padaryti dvitėjinio, lovinio ir kt. ar apskritojo tuščiaavidurio profilio skerspjūviams). Kaip buvo išsiaiškinta, *CHS* tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių formulė gali būti naudojama *EHS*, jeigu yra naudojamas ekvivalentinis skersmuo. Todėl taip pat yra svarbu išsiaiškinti, ar šį ekvivalentinį skersmenį galima naudoti *EHS* skerspjūvio klasei nustatyti remiantis *CHS* skerspjūvio liaunio rodikliais ir ribinėmis reikšmėmis. Jeigu to padaryti neišeitų, tai reikėtų, jog reikėtų išvesti naujas skerspjūvio klasės ribas ar sukurti naujus metodus nustatant *EHS* skerspjūvio klase.

Chanas ir Gardneris studijavo gniuždomų *EHS* skerspjūvių klasifikaciją ir klasių ribas ir padarė pirmuosius pasiūlymus skerspjūvio liauniui skaičiuoti ir riboms nustatyti. Pagal *EC3 CHS* skerspjūvio liaunis nustatomas pagal (16) formulę; čia D yra skersmuo, t sienelės storis, f_y plieno stipris pagal takumo ribą. Jeigu skerspjūvio liaunio rodiklio reikšmės netenkina sąlygos ≤ 90 , skerspjūvis priklauso 4 klasei (EN 1993).

$$\frac{D}{t\epsilon^2}, \text{ čia } \epsilon^2 = \frac{235}{f_y}. \quad (16)$$

Atlikę tyrimus, Chanas ir Gardneris pasiūlė, jog *CHS* skerspjūvių klasifikacija gali būti pritaikyta *EHS* naudojant Kempnerio pasiūlytą ekvivalentinį skersmenį D_e ((12) formulė). *EHS* skerspjūvio liaunio rodiklis gali būti išreikštas (17) formule (Chan, Gardner 2007).

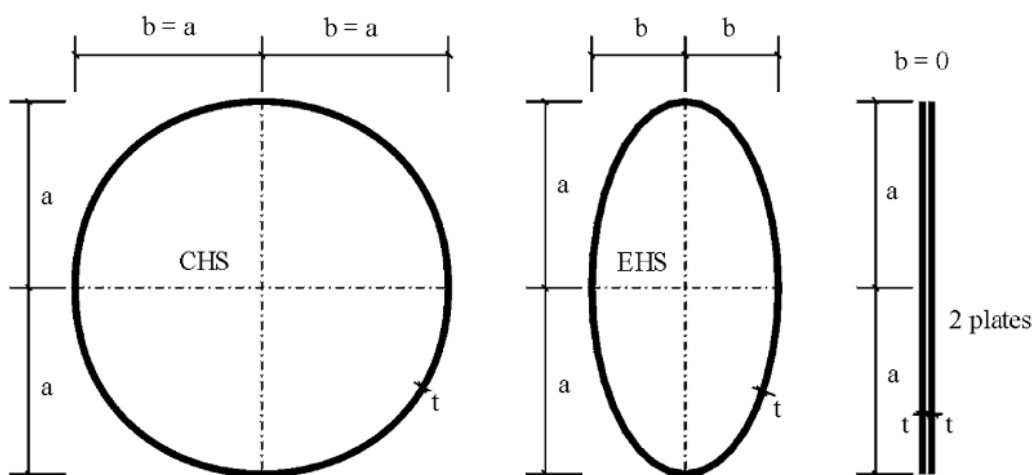
$$\frac{D}{t\epsilon^2} = \frac{D_e}{t\epsilon^2} = 2 \frac{a^2 / b}{t\epsilon^2}. \quad (17)$$

Chanas ir Gardneris sudarė centriškai gniuždomų *EHS* kolonų skaitinius *BE* modelius, kurių tinkamumas buvo patikrintas natūriniais bandymais (Chan, Gardner 2007). Remdamiesi skaitinio modeliavimo rezultatais, jie atliko parametrinę analizę, kuria nustatė skerspjūvio liaunio ir ašių santykio įtaką *EHS* kolonos ribinei laikomajai galiai ir jos santykiui su takumo apkrova. Atlikę parametrinę analizę, jie nustatė, jog didėjant skerspjūvio liauniui, kolonos ribinės laikomosios galios santykis su takumo apkrova mažėja. Taip pat Chanas ir Gardneris palygino *EHS* tiek su karštuoju būdu pagamintais, tiek su šaltai formuotais virintiniais *CHS* ir parodė, jog mažiau liauni *EHS* pademonstravo didesnę ribinę laikomąją galią negu tokio paties skerspjūvio ploto *CHS*. Priežastis, dėl kurios buvo pasiekta didesnė ribinė laikomoji galia, yra *EHS* standesnių zonų, mažiausio $r_{\min}$ spindulio vietose, sustiprėjimas. Veikiant ašiniui gniuždymui *CHS* buvo efektyvesnis, lyginant su liaunais *EHS*, kadangi

liauniems skerspjūviams vietinė kluptis įvyko prieš sustiprėjant standesnėms zonoms. Remdamiesi atliktais tyrimais, Chanas ir Gardneris padarė išvadą, jog *CHS* skerspjūvių klasifikavimo sistema, pateikta *EC3*, gali būti saugiai pritaikyta ir *EHS* (Chan, Gardner 2007).

2.2.4. *Tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai skerspjūvio formai kintant nuo CHS į plokštelę*

Visi mokslininkai bandė kurti *EHS* projektavimo normas remdamiesi panašumu į *CHS*. Tačiau, atlikus tyrimus, paaiškėjo, jog veikiant ašiniam gniuždymui *EHS* elemente pasireiškia skirtinga elgsena nei *CHS*. A. M. Ruizas-Teranas ir Gardneris atliko tyrimus, norėdami nustatyti *EHS* tampriosios klupties pobūdį, skerspjūvio formai kintant nuo *CHS* iki plokštelės (Ruiz-Teran, Gardner 2008). Kai ašių santykis $a/b = 1$, skerspjūvis yra *CHS*, o kada santykis a/b artėja į begalybę, b artėja į 0, skerspjūvis panašėja į dvi gretimas plokšteles (žr. 13 pav.).



13 pav. Skerspjūvio geometrijos perėjimas nuo CHS iki plokštelės (Ruiz-Teran, Gardner 2008)

Ruizas-Teranas ir Gardneris tyrė tiek ekvivalentinį Kempnerio pasiūlytą skersmenį ((12) formulė), tiek *Corus*, *EHS* gamintojo, pasiūlytą ekvivalentinį skersmenį ((18) formulė).

$$D_e = 2a\sqrt{\frac{a}{b}}. \quad (18)$$

Jie panaudojo šiuos pasiūlytus ekvivalentinius skersmenis *CHS* tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių formulėje ir palygino gautus rezultatus. Kempnerio išvesta *EHS* tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių $\sigma_{cr,EHS,K}$ formulė yra pateikta žemiau ir lygi (13) formulei.

$$\sigma_{cr,EHS,K} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{a^2/b}.$$

Corus paremta *EHS* tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių $\sigma_{cr,EHS,C}$ formulė:

$$\sigma_{cr,EHS,C} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{t}{a\sqrt{\frac{a}{b}}}. \quad (19)$$

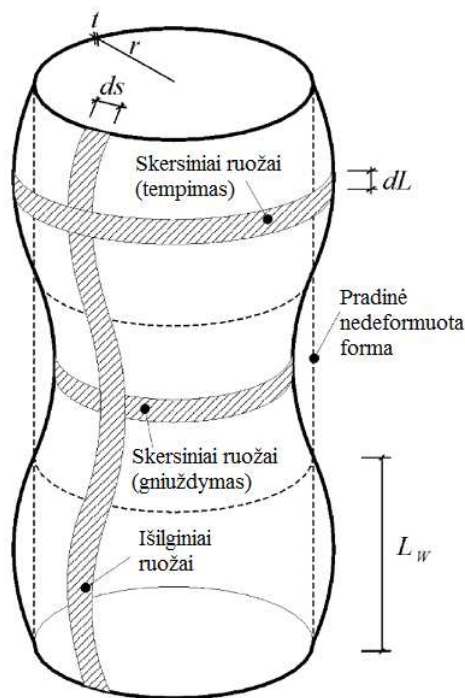
Ruizas-Teranas ir Gardneris gautus rezultatus taip pat palygino su gniuždomos plokščios plokštelės tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių $\sigma_{cr,PLATE}$ formule, kurią išvedė G. H. Bryanas ((20) formulė).

Čia dydis w yra plokštelės plotis, k klupumo koeficientas priklausantis nuo įtvirtinimo sąlygų, E ir ν atitinkamai yra standumo modulis ir Puasono koeficientas.

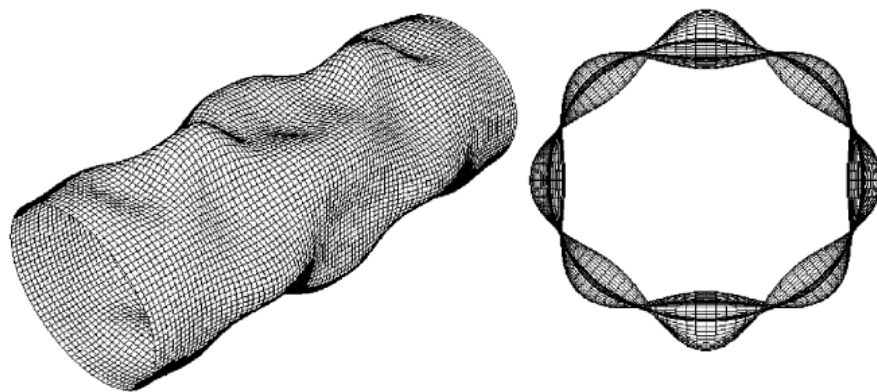
$$\sigma_{cr,PLATE} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{w}\right)^2. \quad (20)$$

Iš šių trijų tampriųjų kritinių klumpamųjų įtempių formulių Ruizas-Teranas ir Gardneris nustatė, jog a/b artėjant į 1, tiek $\sigma_{cr,EHS}^K$, tiek $\sigma_{cr,EHS}^C$ formulės yra tinkamos. Visgi didėjant *EHS* ašių santykiui a/b , tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai panašėja į gniuždomos plokščios plokštelės, ir nei viena iš $\sigma_{cr,EHS}^K$ ir $\sigma_{cr,EHS}^C$ formulių nebeužtikina tikslaus rezultato. Ruizas-Teranas ir Gardneris padarė išvadą, jog ekvivalentinis *EHS* skersmuo turi priklausyti tiek nuo ašių santykio a/b , tiek nuo santykinio storio $t/2a$ (Ruiz-Teran, Gardner 2008).

Iprastai, kai *CHS* yra veikiamas ašinio gniuždymo, du skirtingi elementai bando priešintis klupčiai: lenkiamąjį poveikį perima išilginiai ruožai, ašinį poveikį perima skersiniai ruožai (žr. 14 pav.). Skersiniai ruožai deformuojasi į išorę, kai yra tempiami, o kai yra gniuždomi – deformuojasi į vidų. Skersiniai ir išilginiai ruožai turi nevienodą standumą. Skersinių ruožų standumas yra sienelės storio t ir spindulio r funkcija t/r^2 . Jeigu skersiniai ruožai yra pakankamai standūs, santykis t/r^2 didelis – gniuždomi skersiniai ruožai sugebės priešintis deformacijai į vidų ir *CHS* klupties pobūdis bus ašiai simetrinis (žr. 14 pav.). Mažo t/r^2 santykio arba liaunų skerspjuvių, skersiniai ruožai nėra pakankamai standūs ir *CHS* klumpa ašiai nesimetriškai (žr. 15 pav.) (Ruiz-Teran, Gardner 2008).

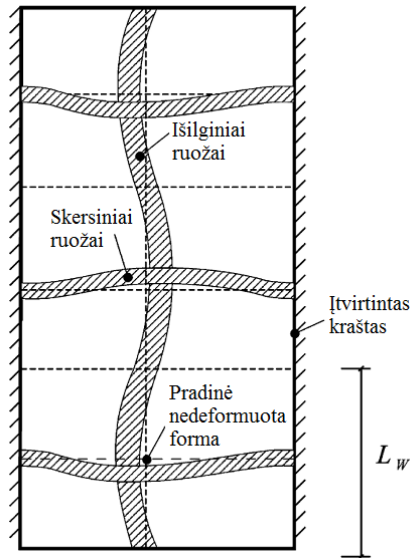


14 pav. Gniuždomo *CHS* išilginiai ir skersiniai ruožai. Ašiai simetrinė kluptis (Ruiz-Teran, Gardner 2008)



15 pav. Ašiai nesimetrinė kluptis (Ruiz-Teran, Gardner 2008)

Šis ašinio gniuždymo veikiamo *CHS* klupties pobūdžio modelis gali būti pritaikytas ir plokščiai plokštei. Kai plokštelė veikama ašinio gniuždymo, taip pat yra du elementai, kurie priešinasi klupčiai: lenkiamasis išilginių ruožų poveikis ir lenkiamasis skersinių ruožų poveikis (žr. 16 pav.). Išilginių plokštelės ruožų elgsena yra tokia pati kaip *CHS*, o skersiniai ruožai yra priimti standžiai įtvirtinti galuose, nes tai atspindi didelį sukamąjį suvaržymą, kurį suteikia standūs *EHS* galai. Taigi ašiai simetrinės deformacijos atsiras tik toliau nuo šių suvaržytų kraštų (Ruiz-Teran, Gardner 2008).



16 pav. Gniuždomos plokštelės išilginiai ir skersiniai riuožai (Ruiz-Teran, Gardner 2008)

Ruizas-Teranas ir Gardneris panaudojo šiuos du modelius nustatant ašinio gniuždymo veikiamo *EHS* elgseną. *EHS* turės tokius pačius abiejų modelių išilginius riuožus, bet skersinių riuožų elgsena turės panašumu tiek į *CHS*, tiek į plokštelės. Ruizas-Teranas ir Gardneris nustatė, jog skersinių ir išilginių riuožų priešinimasis klupčiai yra lygus nepriklausomai nuo ašių santykio a/b ar santykinio storio $t/2a$. Todėl apytiksliai *EHS* tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai buvo išreikšti kaip padvigubinti išilginių riuožų Eulerio tamprieji kritiniai klumpamieji įtempiai ((21) formulė), čia $L_{w,EHS}$ yra *EHS* išilginių riuožų klumpamasis ilgis (Ruiz-Teran, Gardner 2008).

$$\sigma_{cr,EHS,Approx} = 2 \left(\frac{\pi^2 EI}{t L_{w,EHS}^2} \right). \quad (21)$$

Išanalizavę rezultatus, Ruizas-Teranas ir Gardneris pasiūlė naują mažiau konservatyvesnę ekvivalentinio skersmens išraišką (2.20 formulė), kur koeficientas f įvertina skerspjuvio santykinę storį ((22) formulė) (Ruiz-Teran, Gardner, 2008). Naudojant šį ekvivalentinį skersmenį apskaičiuojamas skerspjuvio liaunis, kuris lyginamas su *CHS* ribinėmis skerspjuvio liaunio reikšmėmis pateiktomis *EC3*. Galiausiai taip buvo nuspręsta nustatinėti ašinio gniuždymo veikiamo *EHS* skerspjuvio klasę.

$$D_e = H \left[1 + f \left(\frac{H}{B} - 1 \right) \right]; \quad (22)$$

$$f = 1 - 2,3 \left(\frac{t}{H} \right)^{0,6} . \quad (23)$$

2.2.4.1. 4 klasės skerspjūviai

Priėmus sprendimą naudoti pagal (22) ir (23) formules apskaičiuojamą ekvivalentinį skersmenį EHS skerspjūvio liauniui nustatyti bei jį lyginti su CHS klasių ribomis, norint nustatyti skerspjūvio klasę, iškilo klausimas, kaip įvertinti 4 klasės skerspjūvius. Apskritai yra keltas galimų metodų pagal kuriuos galima įvertinti 4 klasės skerspjūvius. Vienas iš metodų yra efektyviojo ploto naudojimas. Chanas ir Gardneris (Chan, Gardner 2007) atliko tyrimus ir pasiūlė efektyviojo ploto A_{eff} formulę ((24) formulė) paremtą CHS efektyviojo ploto formule, kuri yra pateikta BS 5950-1.

$$A_{eff} = A \left[\frac{90}{D_e / t} \cdot \frac{235}{f_y} \right]^{0,5} . \quad (24)$$

2.2.5. Ilgų EHS kolonų tyrimai

Iki šiol atlikti tyrimai buvo sutelkti skerspjūvio elgsenos nagrinėjimui. Chanas ir Gardneris tyrė galuose lanksčiai įtvirtintų kolonų lenkiamąjį klupumą. Jie atliko natūrinius EHS 150x75 su sienelės storiais 4, 5, 6.3 mm bandymus, kolonų ilgiams kintant nuo 0,7 iki 3,1 m. Kolonos buvo klupdomos aplink abi EHS simetrijos ašis – tiek aplink silpnąją, tiek aplink stipriąją (Chan, Gardner 2009).

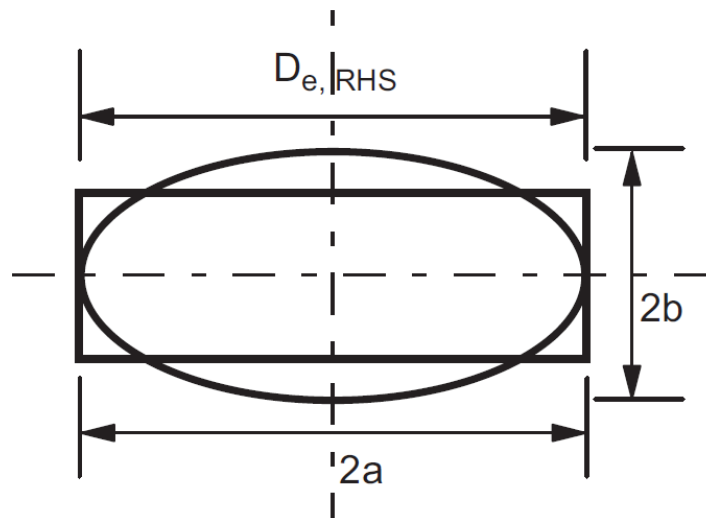
Iš klupdomų EHS kolonų apkrovos – vertikalios įlinkio kreivės, Chanas ir Gardneris nustatė, jog ne liauno skerspjūvio EHS kolonos tiek klupdomos apie stipriąją, tiek apie silpnąją skerspjūvio ašis, pasiekė panašias maksimalias apkrovas. Tačiau pasireiškus kolonos nukrovimui visgi jos pademonstravo skirtingas elgsenas: laikomoji galia kolonų kurios klupo apie silpnąją ašį sumažėjo greičiau palyginus su kolonomis kurios klupo apie stipriąją ašį. To priežastis – kolonas gniuždant apie silpnąją skerspjūvio ašį – didžiausi gniuždymo įtempiai pasireiškia didžiausio spindulio r_{max} skerspjūvio vietoje, kurio skerspjūvio standumas yra mažiausias. Vietinė kluptis ir susidaręs plastinis lankstas lėmė staigų laikomosios galios sumažėjimą. Kolonomis klupdomoms apie stipriąją skerspjūvio ašį, didžiausi gniuždymo įtempiai pasireiškė mažiausio spindulio r_{min} skerspjūvio vietose, kur standumas yra didžiausias ir vietinės klupties poveikis čia neturėjo tokios įtakos (Chan, Gardner 2009).

Chanas ir Gardneris natūrinius eksperimentus atkartoję sudarydami BE modelius. Natūriniais bandymais patvirtinę BEM tinkamumą, jie atliko parametrinę analizę, kurios tikslas buvo ištirti skerspjūvio liaunio, ašių santykio, elemento ilgio įtaką laikomajai galiai. Gauti rezultatai palyginti su

trimis projektavimo normomis: Europos EC3, Šiaurės Amerikos AISC360 ir Australijos AS4100. *EHS* klumpymo aplink abi skerspjūvio ašis rezultatai buvo panašaus pobūdžio kaip ir *CHS*. Visų anksčiau paminėtų trijų standartų klumpumo kreivės pasirodė labai artimos viena kitai. Buvo padaryta išvada, jog *CHS* klumpumo kreivės gali būti pritaikytos ir *EHS* esant elemento klumpymui tiek apie stipriąją, tiek apie silpnąją skerspjūvio ašis (Chan, Gardner 2009).

2.2.6. Ekvivalentinio *RHS* metodas

Kol daugelis mokslininkų bandė nustatyti lygybę tarp *EHS* ir *CHS* tam, kad būtų galima naudoti *CHS* skerspjūvio klasės ribas, X. L. Zhao ir J. A. Packeris (Zhao, Packer 2009) pasiūlė, kad yra geriau nustatyti ekvivalentinį *RHS* nei *CHS*. Visiems šiuo metu gaminamiems *EHS*, veikiamiems ašinio gniuždymo, vietinės skerspjūvio klupties forma yra panaši į plokštelės klupties pobūdį (arba *RHS* klupties pobūdį), dažniau nei į *CHS* klupties formą. Dėl šios priežasties Zhao ir Packeris pasiūlė naudoti ekvivalentinį *RHS*, kurio aukštis $D_{e,RHS} = 2a = H$, o plotis parenkamas toks, jog skerspjūvio plotas ir sienelės storis išliktų nepakitę (žr. 17 pav.).



17 pav. Ekvivalentinio *RHS* metodas (Zhao, Packer 2009)

Šis būdas skiriasi nuo visų kitų pasiūlytų ekvivalentinių metodų. Kituose metoduose ekvivalentinis skersmuo D_e įvestas dėl to, jog būtų galima nustatyti skerspjūvio klasę. Naudojant $D_{e,RHS}$ yra sukuriamas skerspjūvis iš tikrųjų lygus skerspjūvio ploto ir sienelės storio atžvilgiu. Ekvivalentinis *RHS* metodas yra racionalus pakeitimo būdas gniuždomų ir tempiamų elementų projektavimui, nes jis išlaiko tą patį skerspjūvio plotą kaip ir *EHS*. Šis metodas tinka projektuojant *EHS* veikiamo ašinio

gniuždymo arba lenkimo, tačiau kol kas nėra aišku kaip šiuo metodu projektuoti ekscentriškai gniuždomus elementus. Ašinės jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo *EHS* tyrimus atliko Gardneris ir kiti pritaikę ekvivalentinį *CHS* skersmenį. (Gardner *et al.* 2011a). Šie jų tyrimai aprašyti 2.5 skyriuje.

2.3. Lenkimo veikiamas *EHS*

Chanas ir Gardneris atliko *EHS* elementų lenkimo bandymus (Chan, Gardner 2008). Tyrimams jie naudojo *EHS* 400x200, su skerspjūvio sienelės storiais 8, 10, 12, 14, 16 mm bei *EHS* 500x250x8. Septynios sijos buvo išbandytos lenkiant apie stipriąją skerspjūvio ašį bei 11 sijų – apie silpnąją skerspjūvio ašį. Atlikdami eksperimentus Chanas ir Gardneris naudojo trijų ir keturių taškų bandinių lenkimo schemas. Pasinaudodami natūrinių bandymų bei *BE* analizės rezultatais, jie nustatė mažiau konservatyvius tamprųjų ir plastinių *EHS* skerspjūvio atsparumo momentus ir išvedė šių skerspjūvio geometrinių charakteristikų skaičiavimo formules projektavimo tikslams ((6) – (9) formulės).

K. H. Law ir Gardneris atliko lenkimo veikiamo *EHS* elemento tyrimus, norėdami nustatyti elemento nepastovumą – lenkiamąjį sukamąjį klupumą (Law, Gardner 2012). Kadangi *EHS* yra uždaro profilio skerspjūviai, jie turi didelį sukamąjį standumą. Lenkiamasis sukamasis klupumas nėra būdingas suirimo pobūdis uždaro profilio skerspjūviams. Law ir Gardneris atliko 3 taškų lenkimo bandymus naudodami *EHS* 150x75x5 elementą, lenkiamą apie stipriąją skerspjūvio ašį. Bandymams naudojo 4, 6, 8, 10 metrų ilgio sijas, kurių liaunių diapazonas kito nuo 0,29 iki 0,48. Law ir Gardneris nustatė, jog visi bandiniai suiro lenkimo plokštumoje. Lenkiamasis sukamasis klupumas pasireiškė tik elementui jau pasiekus maksimalų lenkimo momentą. Tuo metu sijoje atsirado nedideli šoniniai nuokrypiai, o pati sija truputį susisuko. Kaip ir buvo tikėtasi, didinant elemento ilgį (ar liaunį), didėja lenkiamojo sukamojo klupumo poveikis. Trumpesnės sijos pasiekė maksimalią lenkiamąją galią didesnę nei plastinę lenkiamoji galia dėl standesnių zonų sustiprėjimo reiškinio kuris pasireiškė *EHS* mažiausio spindulio $r_{\min}$ skerspjūvio vietose (Law, Gardner 2012). Law ir Gardneris taip pat sudarė *BE* modelius ir atliko parametrinę analizę, kurios tikslas buvo nustatyti *EHS* ašių santykio įtaką lenkiamajam sukamajam klupumui. Didėjant ašių santykiui (skerspjūvio formai kintant nuo *CHS* į plokštelę), elemento nestabilumas didėja. Law ir Gardneris, remdamiesi tyrimo rezultatais ir klupimo kreivėmis pateiktomis EC3, rekomendavo, jog naudojant 6.3.2.2 skyriuje pateiktame skaičiavimo metode reikia naudoti klupumo kreivę „d“. Naudojant EC3 6.3.2.3 pateiktą skaičiavimo metodą, jie rekomendavo naudoti klupumo kreivę „b“, kai ašių santykis $a/b \leq 2$, klupumo kreivę „c“, kai $2 < a/b \leq 3.1$ ir klupumo kreivę „d“, kai ašių santykis $a/b > 3.1$. Law ir Gardneris taip pat ištyrė

elemento ilgio įtaką bei nustatė, jog didėjant elemento ilgiui, didėja jo nestabilumas. Lenkiamasis sukamasis klupumas pasireiškė *EHS* 150x75x5 elementui, tik kai jo ilgis pasiekė daugiau nei 5,66 m (Law, Gardner 2012).

2.3.1. Skerspjuvių klasifikacija

Ašinio gniuždymo veikiamo *EHS* skerspjuvio klasei nustatyti buvo pasiūlyta naudoti ekvivalentinį skersmenį D_e ir taip apskaičiuoti skerspjuvio liaunio rodiklį. Kai *EHS* yra veikiamas ašinio gniuždymo, svarbiausias dalykas yra nustatyti ar skerspjuvis patirs vietinę tampriąją kluptį t.y. ar jis pademonstruos 4 skerspjuvio klasės elgseną (Chan, Gardner 2007). Tuomet vietoje viso skerspjuvio ploto naudojamas efektyvusis skerspjuvio plotas – klupiosios skerspjuvio dalys išeliminuojamos iš skaičiavimų. Kai skerspjuvis yra veikiamas lenkimo, jis gali būti laikomas 1, 2, 3 ar 4 klasės. Nuo to priklauso kokios geometrinės charakteristikos yra naudojamos – tampriosios, plastiškosios ar efektyviosios. Remiantis EC3, 1 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kurie gali sudaryti analizei pagal plastiškąjį modelį reikiamą sukamosios gebos plastinį lankstą, kai bendroji galia nesumažėja; 2 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kurie pasiekia savo plastinę lenkiamąją galią, tačiau dėl vietinio klupumo jų sukamoji geba yra ribota; 3 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kuriuose įtempių plieninio elemento kraštiniame gniuždomame sluoksnyje, kai daroma tampriojo įtempių pasiskirstymo prielaida, gali pasiekti stiprį pagal takumo ribą, tačiau vietinis klupumas neleidžia pasiekti plastinės lenkiamosios galios; 4 klasės skerspjuviai – tai skerspjuviai, kuriuose vietinis klupumas įvyksta prieš pasiekiant stiprį pagal takumo ribą vienoje ar daugiau skerspjuvio dalių.

Anksčiau buvo minėta, jog Kempneris išvedė *EHS* veikiamo ašinio gniuždymo ekvivalentinio skersmens formulę ((12) formulė), o Ruizas-Teranas ir Gardneris ją patobulino ((22), (23) formulės). Šios formulės buvo išvestos atsižvelgiant į tai, jog ašinio gniuždymo veikiamame skerspjuvyje vietinė kluptis prasideda didžiausio spindulio $r_{\max}$ taške. Chanas ir Gardneris nustatė, jog *EHS* lenkiant apie silpnąją skerspjuvio ašį, vietinė kluptis taip pat prasideda $r_{\max}$ taške. Taigi, šios, *EHS* veikiamo ašinio gniuždymo ekvivalentinio skersmens formulės yra tinkamos ir lenkimo apie silpnąją skerspjuvio ašį veikiamo *EHS* ekvivalentiniam skersmeniui nustatyti. Tačiau esant *EHS* lenkimui apie stipriąją skerspjuvio ašį, skerspjuvio vietinė kluptis neprasidės nei taške $r_{\max}$ ar taške $r_{\min}$, o kritinio spindulio r_{cr} taške ((25) formulė). Sudarę *BE* modelius ir atlikę parametrinę analizę, kuria nustatė *EHS* ašių santykio įtaką klupumo pradžios taško vietai, Chanas ir Gardneris pasiūlė kaip apskaičiuoti skerspjuvio

liaunio rodiklius, kai jis yra lenkiamas apie stipriąją skerspjūvio ašį ((26) formulė) (Chan, Gardner 2008).

$$r_{cr} = 0,65 \frac{a^2}{b}; \quad (25)$$

$$\frac{D_e}{t\varepsilon^2} = \begin{cases} 0,8 \frac{(a^2/b)}{t\varepsilon^2}, & \frac{a}{b} > 1,357 \\ 2 \frac{(b^2/a)}{t\varepsilon^2}, & \frac{a}{b} \leq 1,357 \end{cases}; \quad (26)$$

Chano ir Gardnerio išvestoje formulėje ((26) formulė) skaitinė vertė 1,357 reiškia, jog skerspjūviams su mažesniais ašių santykiais (skerspjūvio forma panašėja į *CHS*), vietinė kluptis pasireišk didžiausių gniuždymo įtempių vietoje, o tai sutampa su mažiausio *EHS* spindulio $r_{\min}$ vieta – standžiausia *EHS* zona. Esant didesniems ašių santykių (skerspjūvio forma panašėja į dvi gretimas plokšteles), vietinė kluptis pasireišk šalia didžiausių gniuždymo įtempių taško. Kadangi visų šiuo metu gaminamų *EHS* ašių santykis yra $2 > 1,357$, Chanas ir Gardneris padarė išvadą, jog *EC3* pateiktos *CHS* klasių ribos gali būti saugiai pritaikytos ir *EHS*. Taip pat jie pasiūlė, jog 3 skerspjūvio klasės liaunio riba būtų sušvelninta iki $140\varepsilon^2$ vietoj $90\varepsilon^2$ tiek *EHS*, tiek *CHS* (Chan, Gardner 2008).

2.3.2. 4 klasės skerspjūviai

Lenkimo veikiamus yra 4 klasės skerspjūvius, *EC3* įvertinta naudojant efektyvųjį skerspjūvio atsparumo momentą. Chanas ir Gardneris išvedė efektyviojo skerspjūvio atsparumo momento formulę ((27) formulė), čia W_{el} yra nustatomas remiantis (6), (7) formulėmis, D_e nustatomas pagal (22) formulę, o skerspjūvio liaunio ribinis rodiklis 3 skerspjūvio klasei gali būti naudojamas $140\varepsilon^2$ vietoj $90\varepsilon^2$ (Chan, Gardner 2008).

$$W_{eff} = W_{el} \left[\frac{140}{D_e/t} \cdot \frac{235}{f_y} \right]^{0,25}. \quad (27)$$

2.4. Šlyties veikiamas *EHS*

Gardneris ir kiti norėdami nustatyti *EHS* šlyjamąją galią atliko bandymus su *EHS* 150x75, kurių sienelės storiai 4, 5, 6.3 mm (Gardner *et al.* 2008). Jie atliko trijų taškų lenkimo bandymus su su 24 įvairaus ilgio bandiniais. Pagrindinis bandymų tikslas buvo nustatyti kaip mažėja skerspjūvio lenkiamoji galia, didėjant šlyčiai. Be natūrinių bandymų, Gardneris ir kiti sudarė *BE* modelius ir atliko

parametrinę analizę, kurios tikslas buvo nustatyti skerspjuvio liaunio ir ašių santykio įtaką lenkiamajai ir šlyjamajai galiai. Jie pasiūlė formules, pagal kurias galima projektuoti *EHS* plastinę šlyjamąją galią. Gardneris ir kiti nustatė, jog šlyjamieji *EHS* plotai $A_{v,y}$, jeigu veikianti jėga pridėta statmenai stipriajai skerspjuvio ašiai $y-y$ ir $A_{v,z}$, jeigu veikianti jėga pridėta statmenai silpnajai skerspjuvio ašiai $z-z$, gali būti nustatomi atitinkamai pagal (28) ir (29) formules. Jie taip pat padarė išvadą, jog jeigu šlyties jėga yra mažesnė už pusę plastinės šlyjamosios galios, jos poveikio lenkiamajai galiai galima nepaisyti. Kai šlyties jėga yra didesnė už pusę plastinės šlyjamosios galios, šlyties jėga turi būti įvertinama skaičiuojant skerspjuvio lenkiamąją galią (Gardner *et al.* 2008).

$$A_{v,y} = 2(2a - t); \quad (28)$$

$$A_{v,z} = 2(2b - t). \quad (29)$$

2.5. Lenkimo ir ašinio gniuždymo veikiamas *EHS*

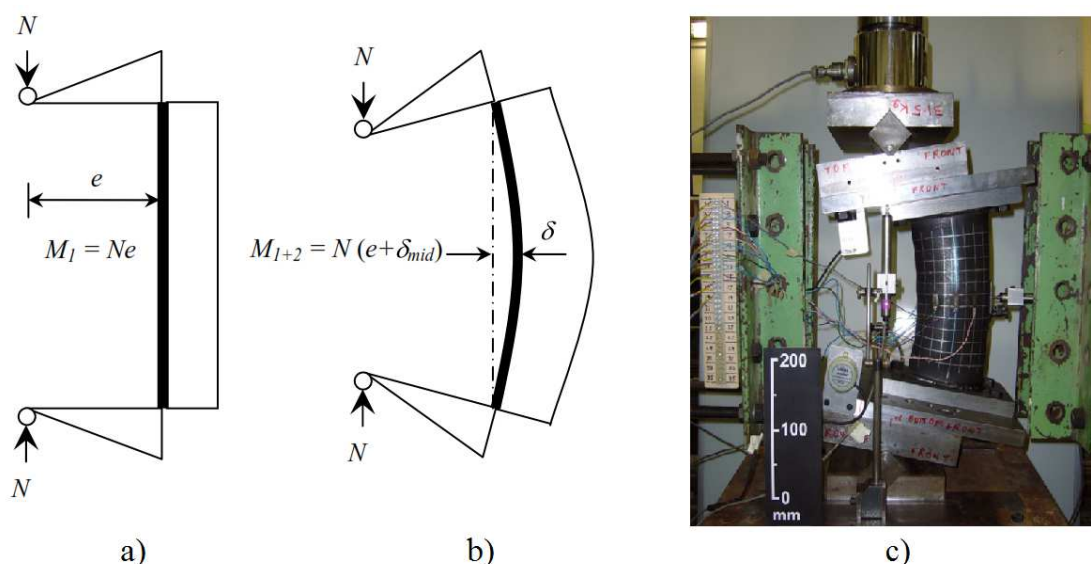
2.5.1. Skerspjuvio klasės nustatymas

EHS skerspjuvio klasės apskaičiavimui, kai skerspjuvis yra veikiamas ašinio gniuždymo arba lenkimo buvo pasiūlyta įvesti ekvivalentinį *EHS* skersmenį - tai *CHS*, pagal kurį apskaičiuojami tamprieji kritiniai klumpamieji *EHS* įtempiai, skersmuo. Ruizas-Teranas ir Gardneris pasiūlė ekvivalentinio skersmens išraišką kai skerspjuvis yra veikiamas tik ašinio gniuždymo ((22), (23) formulės), o Chanas ir Gardneris pasiūlė ekvivalentinio skersmens išraišką kai skerspjuvis yra veikiamas tik lenkimo ((26) formulė).

Gardneris ir kiti atliko tyrimus norėdami ištirti *EHS* elgseną, kai skerspjuvis yra veikiamas ašinio gniuždymo kartu su lenkimo momentu tiek apie stipriąją, tiek apie silpnąją skerspjuvio ašis. Bandymams buvo naudojamas *EHS* 150x75, su sienelės storiais 5, 6.3 mm. Bandiniai buvo veikiami gniuždančiąja apkrova pridėta su ekscentricitetu. Ekscentriciteto reikšmės buvo parinktos 25, 100 mm – lenkiant apie stipriąją skerspjuvio ašį ir 25, 75 mm – lenkiant apie silpnąją skerspjuvio ašį (Gardner *et al.* 2011a). Bandymų schema bei naudojama įranga pateikta 18 paveiksle. Gardneris ir kiti atkartoję natūrinius bandymus sudarydami *BE* modelius. Natūriniais bandymais patvirtindami jų tinkamumą jie atliko parametrinę analizę.

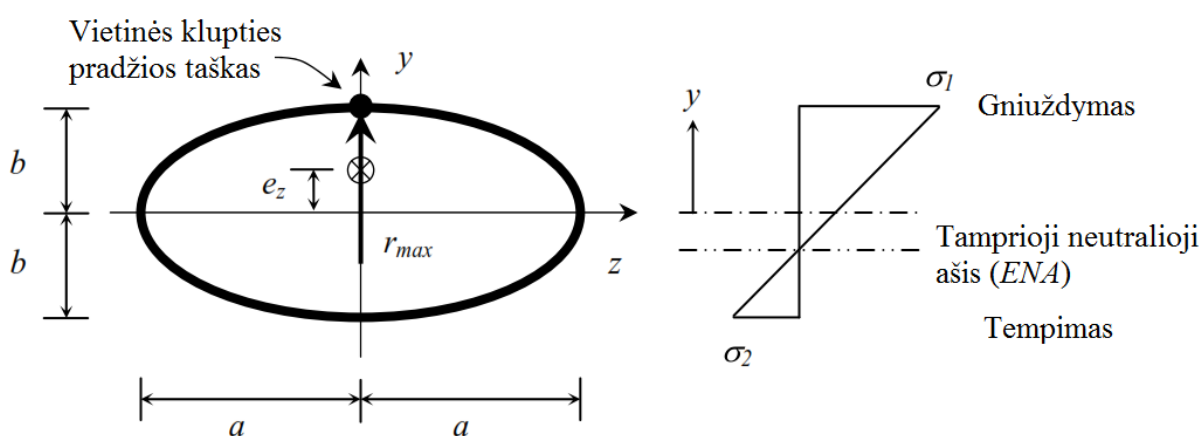
Tiek esant ašiniam gniuždymui, tiek esant lenkimui apie silpnąją *EHS* ašį, skerspjuvio vietinė kluptis prasideda tame pačiame taške, kuris sutampa su didžiausio *EHS* spindulio vieta $r_{\max} = a^2 / b$ (žr. 19 pav.); taigi esant grynam lenkimui Chanas ir Gardneris pasiūlė, ekvivalentinį skersmenį

$D_e = 2r_{\max} = a^2 / b$ ((26) formulė) (Chan, Gardner 2008). Ekvivalentinio skersmens esant vien tik gniuždymui išraišką šiek tiek patobulino Ruizas-Teranas ir Gardneris ((22), (23) formulės) (Ruiz-Teran, Gardner 2008).



18 pav. Ekscentrinio gniuždymo veikiamą EHS koloną: a) nedeformuoto bandinio schema; b) deformuoto bandinio schema; c) bandymo įranga (Gardner *et al.* 2011a)

Ašinio gniuždymo veikimo kartu su lenkimo momentu apie silpnąją skerspjūvio ašį atveju, vietinė kluptis atsiras tame pačiame didžiausio EHS spindulio taške kaip ir atskirai veikiant ašiniam gniuždymui ar lenkimui (žr. 19 pav.).

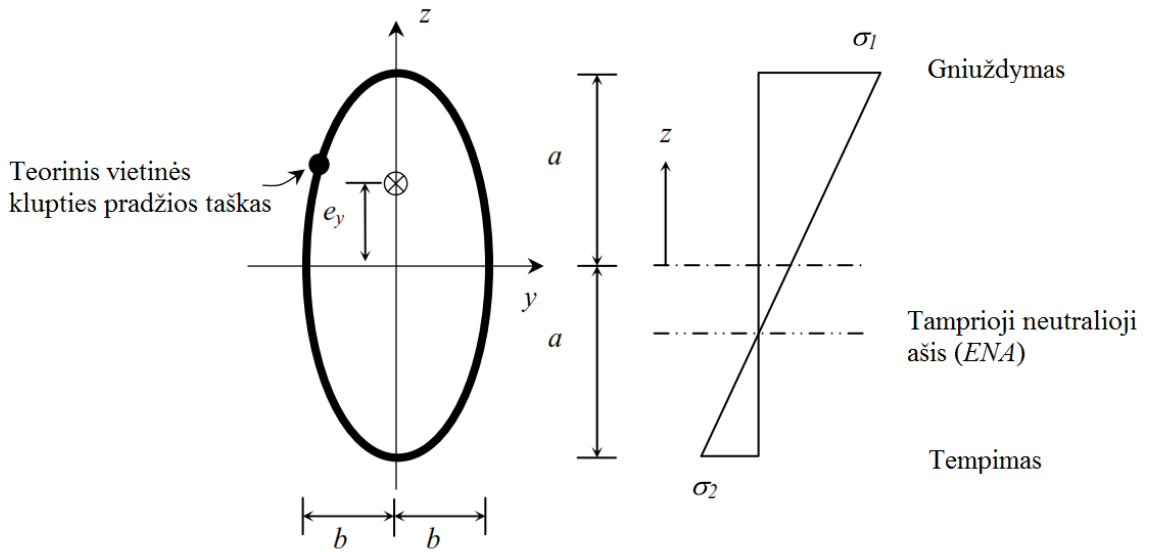


19 pav. EHS veikiamas ašinio gniuždymo ir lenkimo momento apie silpnąją skerspjūvio ašį (Gardner *et al.* 2011a)

Ekvivalentinis *EHS*, veikiamo ašinio gniuždymo ir lenkimo apie silpnąją skerspjūvio ašį, skersmuo tuomet gali būti apskaičiuojamas pagal (30) formulę (Gardner *et al.* 2011a).

$$D_{e,mi} = \frac{2a^2}{b}. \quad (30)$$

Kai *EHS* yra veikiamas ašinio gniuždymo ir lenkimo apie stipriąją skerspjūvio ašį, vietinės klupties pradžios taškas, didėjant gniuždomo skerspjūvio daliai, slinksis link skerspjūvio centrinių ašių (žr. 20 pav.) (Gardner *et al.* 2011a).



20 pav. EHS veikiamas ašinio gniuždymo ir lenkimo momento apie stipriąją skerspjūvio ašį (Gardner *et al.* 2011a)

Gardneris ir kiti išvedė formulę, pagal kurią galima nustatyti vietinės klupties pradžios taško vietą skerspjūvyje ((33) formulė). Jie teigė, jog vietinė kluptis pasireiškš tame taške, kuriame *EHS* spindulio r ((31) formulė) ir ašinio gniuždymo bei lenkimo momento sukeltų tampriųjų įtempių σ ((32) formulė) sandauga yra didžiausia. Dydis ψ , esantis (32), (33), (34) formulėse, yra įtempių pasiskirstymo skerspjūvyje tamprioje stadijoje koeficientas, kuris kinta nuo 1 iki -1 – kai yra grynasis gniuždymas $\psi = 1$, o kai yra grynasis lenkimas $\psi = -1$.

$$r = \frac{a^2}{b} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right] \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}; \quad (31)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{2a}(\psi(a-z) + a+z); \quad (32)$$

$$\frac{z_{cr}}{a} = \frac{1}{8(1-\psi)} \left(\sqrt{\left(9 + \frac{16}{1-\frac{b^2}{a^2}}\right)(\psi^2 + 1) + 2\psi \left(9 - \frac{16}{1-\frac{b^2}{a^2}}\right)} - 3\psi - 3 \right); \quad (33)$$

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}. \quad (34)$$

Remdamiesi savo tyrimo rezultatais ir priėmę $a/b = 2,0$ (kaip ir visų šiuo metu gaminamų *EHS* profiliuočių), Gardneris ir kiti išvedė ašinio gniuždymo ir lenkimo apie stipriąją skerspjūvio ašį veikiamo *EHS* ekvivalentinio skersmens $D_{e,ma}$ formulę ((35) formulė).

$$D_{e,ma} = D_{e,b} + (D_{e,c} - D_{e,b}) \left(\frac{\psi + 1}{2} \right); \quad (35)$$

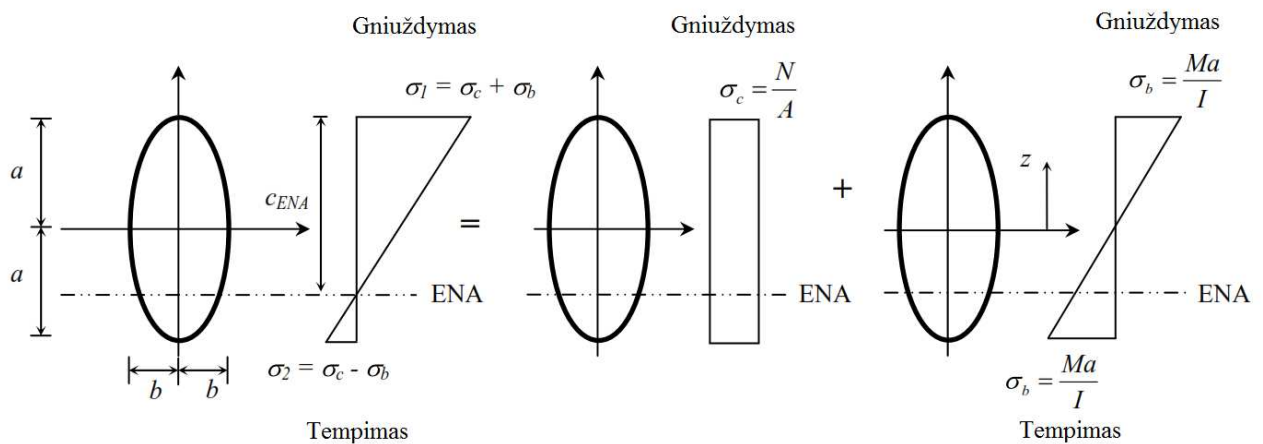
čia $D_{e,c}$ yra ekvivalentinis skersmuo esant grynam gniuždymui ((22) formulė), ekvivalentinis skersmuo esant grynam lenkimui $D_{e,b} = 2b^2/a$, kai $a/b > 1,357$ ((26) formulė), ψ yra įtempių pasiskirstymo koeficientas skerspjūvyje tampriojoje stadijoje ((34) formulė).

Kai pirmos arba antros skerspjūvio klasės *EHS* yra veikiamas ašinio gniuždymo ir lenkimo apie stipriąją skerspjūvio ašį, įtempiai skerspjūvyje pasiskirsto plastinėje stadijoje. Šiam atvejui Gardneris ir kiti pasiūlė kitą ekvivalentinio skersmens formulę ((36) formulė), čia α yra įtempių pasiskirstymo koeficientas skerspjūvyje plastinėje stadijoje - kai visas skerspjūvis yra gniuždomas $\alpha = 1$, $D_{e,ma} = D_{e,c}$, kai skerspjūvis yra veikiamas grynojo lenkimo $\alpha = 0,5$, $D_{e,ma} = D_{e,b}$ (Gardner *et al.* 2011a).

$$D_{e,ma} = D_{e,b} + (D_{e,c} - D_{e,b})(2\alpha - 1). \quad (36)$$

Norint apskaičiuoti įtempių pasiskirstymo skerspjūvyje tiek tampriojoje, tiek plastinėje stadijose koeficientus, reikia nustatyti tampriosios (angl. *ENA*) ir plastinės (angl. *PNA*) neutraliosios ašies padėtį skerspjūvyje. Sunkiausia yra nustatyti šią padėtį ašinio gniuždymo ir lenkimo apie stipriąją skerspjūvio ašį atveju, nes esant ašiniui gniuždymui ir lenkimui apie silpnąją skerspjūvio ašį, vietinė kluptis visada prasideda tame pačiame didžiausio *EHS* spindulio taške. Ašinei jėgai ir lenkimo momentu veikiant kartu, tiek plastinė, tiek tamprioji neutraliosios ašys pasislenka. Sudėtinga *EHS* forma apsunkina šio pasislinkimo nustatymą ypač plastinėje stadijoje (Gardner *et al.* 2011a).

Esant įtempių pasiskirstymui skerspjūvyje tampriojoje stadijoje, maksimalūs įtempiai pasireiškia skerspjūvio išoriniuose sluoksniuose (pažymėti kaip σ_1 ir σ_2). Tarp šių taškų bus tiesinis įtempių pasiskirstymas (žr. 21 pav.) (Gardner *et al.* 2011a).



21 pav. Įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje tampriojoje stadijoje, kartu veikiant ašiniam gniuždymui ir lenkimui (Gardner *et al.* 2011a)

Atstumas nuo skerspjūvio viršaus iki skerspjūvio ENA gali būti apskaičiuojama pagal (37) formulę:

$$c_{ENA} = 2a \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2} \right) = 2a \left(\frac{1}{1 + \psi} \right). \quad (37)$$

Į šią formulę įrašius skerspjūvio charakteristikas ir pridėtas apkrovas, gaunama (38) formulė (Gardner *et al.* 2011a):

$$c_{ENA} = a \left(1 + \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} \frac{Aa}{I} \right); \quad (38)$$

čia N_{Ed} yra veikianti ašinė gniuždančioji jėga, M_{Ed} yra veikiantis lenkimo momentas, A – skerspjūvio plotas, I – inercijos momentas aplink stipriąją skerspjūvio ašį. Tampriosios neutraliosios skerspjūvio ašies vieta yra reikalinga 3 ir 4 skerspjūvio klasėms, kurių laikomoji galia yra nustatoma darant prielaidą, jog skerspjūvyje pasireiškia tamprūsiai įtempių pasiskirstymas.

Gardneris ir kiti pasiūlė apytiksles išraiškas ašinio gniuždymo ir lenkimo veikiamo EHS plastinės neutraliosios ašies padėčiai nustatyti. Ši ašis gali būti nustatoma per įtempių pasiskirstymo koeficientą plastinėje stadijoje α . Gardneris ir kiti išvedė apytiksles formules šiam koeficientui nustatyti tiek esant gniuždymui ir lenkimui apie stipriąją skerspjūvio ašį ((39) formulė), tiek esant gniuždymui ir lenkimui apie silpnąją skerspjūvio ašį ((40) formulė).

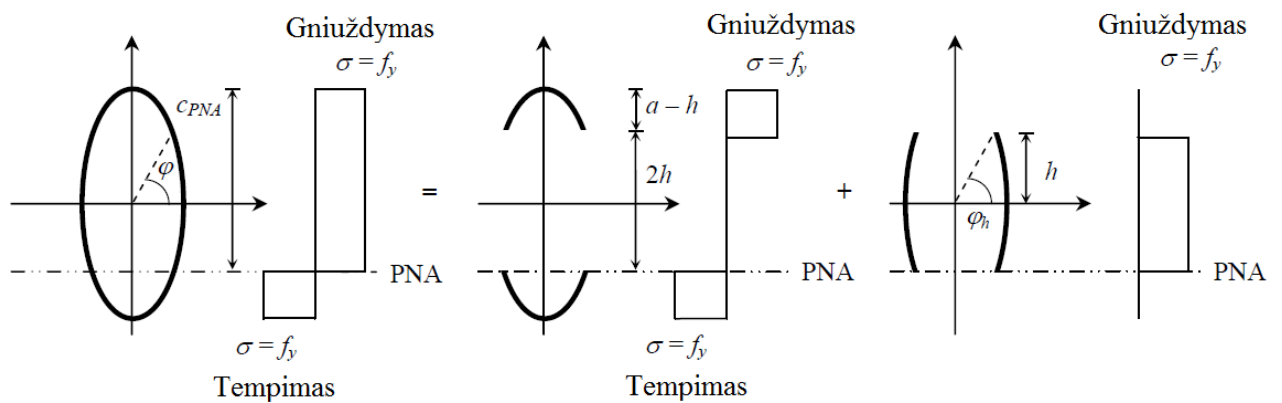
$$\alpha_{ma} = \frac{c_{PNA}}{2a} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\sin \varphi_h}{1 + \left(\frac{a}{b} - 1 \right) \cos \varphi_h} \right]; \quad (39)$$

$$\alpha_{mb} = \frac{c_{PNA}}{2b} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\cos \varphi_h}{1 + \left(\frac{b}{a} - 1 \right) \sin \varphi_h} \right]; \quad (40)$$

čia c_{PNA} – atstumas nuo didžiausių gniuždomųjų įtempių skerspjūvio sluoksnio iki plastinės neutraliosios ašies (žr. 21 pav.), dydis φ_h , kai ašių santykis $a/b=2$ bei skerspjūvis yra veikiamas ašinio gniuždymo ir lenkimo momento apie stipriąją skerspjūvio ašį, gali būti apytiksliai nustatytas pagal (41) formulę. Kai veikia gniuždydas ir lenkimo momentas apie silpnąją skerspjūvio ašį, naudojama ta pati (41) išraiška, tik reikia naudoti b vietoj a , o kampą φ_h matuoti nuo z-z ašies (Gardner *et al.* 2011a).

$$\frac{\varphi_h}{\pi/2} = 0,25 \left(\frac{N_{Ed}}{4(a-t/2)tf_y} \right)^3 - 0,72 \left(\frac{N_{Ed}}{4(a-t/2)tf_y} \right)^2 + 1,33 \left(\frac{N_{Ed}}{4(a-t/2)tf_y} \right). \quad (41)$$

Įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje plastinėje stadijoje kartu veikiant ašiniam gniuždymui ir lenkimo momentui pateiktas (22) paveiksle.



22 pav. Įtempių pasiskirstymas skerspjūvyje plastinėje stadijoje, kartu veikiant ašiniam gniuždymui ir lenkimui (Gardner *et al.* 2011a)

Norint nustatyti skerspjūvio klasę be skerspjūvio liaunio rodiklių, taip pat reikia nustatyti ir skerspjūvio liaunio ribas. Gardneris ir kiti pirmai ir antrai ašinio gniuždymo ir lenkimo veikiamo EHS skerspjūvio klasei pasiūlė išlaikyti tas pačias skerspjūvio liaunio ribas kaip ir veikiant ašiniam

gniuždymui ar lenkimui atskirai. Šios reikšmės atitinka *CHS* liaunio ribas ir yra pateiktos *EC3*. Gardneris ir kiti nustatė, jog trečios skerspjūvio klasės liaunio riba yra kintantis dydis, tiesiškai priklausanti nuo įtempių pasiskirstymo koeficiento tamprioje stadijoje ψ (Gardner *et al.* 2011a). *EHS* liaunio rodikliai ir klasių ribos veikiant skirtingiems įrąžų tipams pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. *EHS* liaunio rodikliai ir klasių ribos

Įrąžos tipas	Skerspjūvio liaunio rodiklis	Ekvivalentinio skersmens išraiška	Skerspjūvio liaunio ribinis rodiklis		
			1 klasė	2 klasė	3 klasė
Ašinis gniuždymas	$\frac{D_{e,c}}{t}$	$D_{e,c} = H \left[1 + f \left(\frac{H}{B} - 1 \right) \right],$ $f = 1 - 2,3 \left(\frac{t}{H} \right)^{0,6}$	-		$90\varepsilon^2$
Lenkimas apie stipriąją skerspjūvio ašį (y-y)	$\frac{D_{e,b,ma}}{t}$	$D_{e,b,ma} = \begin{cases} \frac{B^2}{H}, & \frac{H}{B} \leq 1,36 \\ 0,4 \frac{H^2}{B}, & \frac{H}{B} > 1,36 \end{cases}$	$50\varepsilon^2$	$70\varepsilon^2$	$140\varepsilon^2$
Lenkimas apie silpnąją skerspjūvio ašį (z-z)	$\frac{D_{e,b,mi}}{t}$	$D_{e,b,mi} = \frac{H^2}{B}$			
Ašinis gniuždymas ir lenkimas apie stipriąją skerspjūvio ašį (y-y)	$\frac{D_{e,ma}}{t}$	1, 2 skerspjūvio klasėms $D_{e,ma} = D_{e,b} + (D_{e,c} - D_{e,b})(2\alpha_{ma} - 1)$ 3, 4 skerspjūvio klasėms $D_{e,ma} = D_{e,b} + (D_{e,c} - D_{e,b}) \left(\frac{\psi + 1}{2} \right)$	$50\varepsilon^2$	$70\varepsilon^2$	$\frac{2520\varepsilon^2}{5\psi + 23}$
Ašinis gniuždymas ir lenkimas apie silpnąją skerspjūvio ašį (z-z)	$\frac{D_{e,mi}}{t}$	$D_{e,mi} = \frac{H^2}{B}$			

čia $\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$.

2.5.2. Skerspjūvio laikomoji galia

Ašinio gniuždymo ir lenkimo plastinėje stadijoje sąveikos formulę pirmai ir antrai *EHS* skerspjūvio klasėms išvedė F. Nowzartashas ir M. Moharebas ((42) formulė) (Gardner *et al.* 2011a).

$$2 \left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^{1,75} - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^{3,5} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,y,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,z,Rd}} \right)^{1,7} \leq 1,0; \quad (42)$$

čia $M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} f_y$ ir $M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} f_y$ atitinkamai yra skerspjūvio plastinės lenkiamosios galios apie stipriąją ir silpnąją skerspjūvio ašis, $M_{y,Ed}$ ir $M_{z,Ed}$ atitinkamai yra lenkimo momentai apie stipriąją ir silpnąją skerspjūvio ašis ($M_{y,Ed} = 0$ reiškia, jog skerspjūvis yra lenkiamas apie silpnąją skerspjūvio ašį, $M_{z,Ed} = 0$ – skerspjūvis yra lenkiamas apie stipriąją skerspjūvio ašį), $N_{c,Rd} = A f_y$ yra ašinė skerspjūvio gniuždomoji galia, N_{Ed} yra veikianti ašinė jėga.

Plieninių konstrukcijų projektavimo normose *EC3* nurodyta tiesinė sąveika tarp lenkimo ir gniuždymo trečiai ir ketvirtai skerspjūvio klasėms. Taigi trečiai skerspjūvio klasei *EHS* laikomoji galia gali būti išreikšta taip:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{el,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{el,z,Rd}} \leq 1, 0. \quad (43)$$

Ketvirtos klasės skerspjūvio laikomoji galia apskaičiuojama remiantis efektyviosiomis skerspjūvio charakteristikomis, norint įvertinti vietinį skerspjūvio klupumą prieš jam pradedant tekėti:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,eff,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{eff,y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{eff,z,Rd}} \leq 1, 0. \quad (44)$$

(43), (44) formulėse dydžiai N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$, $N_{c,Rd}$ tokie patys kaip ir (42) formulėje $M_{el,y,Rd} = W_{el,y} f_y$ ir $M_{el,z,Rd} = W_{el,z} f_y$ atitinkamai yra skerspjūvio tampriosios lenkiamosios galios apie stipriąją ir silpnąją skerspjūvio ašis, $M_{eff,y,Rd} = W_{eff,y} f_y$ ir $M_{eff,z,Rd} = W_{eff,z} f_y$ atitinkamai yra skerspjūvio tampriosios lenkiamosios galios apie stipriąją ir silpnąją skerspjūvio ašis, apskaičiuotos remiantis efektyviosiomis skerspjūvio charakteristikomis (Gardner *et al.* 2011a).

2.6. Antrojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateikta išsami atliktų *EHS* tyrimų apžvalga. Istoriškai šio skerspjūvio tyrimai prasidėjo nuo *CHS* studijų. *EHS* elgseną veikiant apkrovoms bandyta sulyginti tiek su *CHS*, tiek su *RHS*, tiek su dviem gretimom plokštelėmis. Skerspjūvio klasei nustatyti pateikti ekvivalentinio *RHS* ir ekvivalentinio *CHS* metodai. Ekvivalentinio *RHS* metodą galima taikyti tik centriškai gniuždomo arba lenkiamo elemento skerspjūviui. Labiau išplėtotas, susietas su europinėmis projektavimo normomis bei tinkamas ekscentriškai gniuždomo elemento *EHS* skerspjūvio klasei nustatyti yra ekvivalentinio *CHS* metodas. Šis metodas pasirinktas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmui sudaryti.

3. EKSCENTRIŠKAI GNIUŽDOMO *EHS* ELEMENTO SKAIČIAVIMAS ANALITINIU METODU

3.1. Projektavimo algoritmo sudarymas

Šiame skyriuje pateiktas ekscentriškai gniuždomo *EHS* projektavimo algoritmas. Algoritmas sudarytas remiantis ekvivalentinio *CHS* metodu. *EHS* geometrinės charakteristikos skaičiuojamos pagal Chano ir Gardnerio išvestas formules ((4) – (9) formulės). Ekscentriškai gniuždomo *EHS* skerspjūvio klasė nustatoma naudojant Chano, Gardnerio, Ruizo-Terano ir kitų pasiūlytas *EHS* skerspjūvio liaunio ir ribinio skerspjūvio liaunio rodiklių išraiškas (3 lentelė). Skerspjūvio laikomoji galia skaičiuojama pagal (42), (43), (44) formules. Remiantis Chano ir Gardnerio tyrimais, gniuždomojo *EHS* elemento klumpamoji galia skaičiuojama naudojant *EC3* pateiktą karštuuju būdu pagaminto *CHS* klumpumo kreivę a tiek elementui klumpant apie stipriąją, tiek apie silpnąją skerspjūvio ašis. Pagal *EN 1993-3-1* gniuždomasis elementas turi būti patikrinamas pagal klumpumą taip:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0; \quad (45)$$

čia N_{Ed} – veikianti skaičiuotinė gniuždančioji jėga, $N_{b,Rd}$ – skaičiuotinė gniuždomojo elemento klumpamoji galia apskaičiuojama pagal (46) formulę, jei skerspjūviai 1, 2 arba 3 klasės, arba pagal (47) formulę, jei skerspjūviai 4 klasės.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}; \quad (46)$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}}; \quad (47)$$

čia A ir A_{eff} atitinkamai yra skerspjūvio plotas ir efektyvusis skerspjūvio plotas, f_y yra plieno stipris pagal takumo ribą, $\gamma_{M1}=1,0$ yra dalinis elementų klumpumo laikomosios galios koeficientas, χ atitinkamos klumpumo formos klumpumo koeficientas. Pagal *EN 1993-3-1* ašinio gniuždymo veikiamų elementų χ reikšmės pagal atitinkamą sąlyginį liaunį $\bar{\lambda}$ turi būti nustatomos iš atitinkamos klumpumo kreivės taip:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0; \quad (48)$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]; \quad (49)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}, \text{ jei skerspjūviai 1, 2 arba 3 klasės}; \quad (50)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}}, \text{ jei skerspjūviai 4 klasės}. \quad (51)$$

(48) ir (49) formulėse Φ yra rodiklis klupumo koeficientui χ nustatyti, (49) formulėje α – nuokrypos koeficientas parenkamas pagal atitinkamas klupumo kreives. Kaip buvo minėta, anot Chano ir Gardnerio, *EHS* geriausiai tinka klupumo kreivė *a*, kaip ir kitiems karštai apdorotiems tuščiaviduriams profiliuotiesiems. (50) ir (51) formulėse dydis N_{cr} – tamprioji kritinė jėga apskaičiuojama pagal Oilerio formulę (Gardner, Nethercot 2005):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}; \quad (52)$$

čia E – tamprumo modulis, I – skerspjūvio inercijos momentas, L_{cr} – elemento klumpamasis ilgis.

EHS elemento lenkiamoji klumpamoji galia skaičiuojama pagal *EC3* naudojant klupumo kreivę *b* ir pritaikant 6.3.2.3 skyriuje pateiktą metodiką, kurioje dydžių $\bar{\lambda}_{LT,0}$ ir β reikšmės atitinkamai priimant $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$, $\beta = 0,75$ (Law, Gardner 2012). Pagal *EN 1993-3-1* šoninio įtvirčio neturintis ir aplink pagrindinę ašį lenkimo veikiamas elementas turi būti patikrinamas, ar gali išlaikyti skersinį sukamąjį klupdymą:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0; \quad (53)$$

čia M_{Ed} – skaičiuotinė lenkimo momento reikšmė, $M_{b,Rd}$ – skaičiuotinė lenkiamosios klumpamosios galios reikšmė. Šoninio įtvirčio neturinčios sijos skaičiuotinė lenkiamoji klupumo galia turi būti apskaičiuojama taip:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}}; \quad (54)$$

čia W_y – atitinkamas skerspjūvio atsparumo momentas: $W_y = W_{pl,y}$, jei skerspjūviai 1 arba 2 klasės;

$W_y = W_{el,y}$, jei skerspjūviai 3 klasės; $W_y = W_{eff,y}$, jei skerspjūviai 4 klasės; χ_{LT} – skersinio sukamojo

klupumo koeficientas. Pagal *EN 1993-3-1* 6.3.2.3 punktą, lenkimo veikiamų valcuotų arba lygiaverčių virintinių profiliuotųjų χ_{LT} reikšmė pagal atitinkamą sąlyginį liaunį $\bar{\lambda}_{LT}$ gali būti nustatomos taip:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ bet } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}; \quad (55)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]; \quad (56)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (57)$$

(55) ir (56) formulėse Φ_{LT} yra rodiklis klupumo koeficientui χ_{LT} nustatyti, (56) formulėje α_{LT} – nuokrypos koeficientas parenkamas pagal atitinkamas skersinio sukamojo klupumo kreives. Kaip buvo minėta, anot Law ir Gardnerio, *EHS* geriausiai tinka skersinio sukamojo klupumo kreivė *b*, dydžiai $\bar{\lambda}_{LT,0}$ ir β reikšmės atitinkamai priimami $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$, $\beta = 0,75$. (57) formulėje dydis M_{cr} – tamprusis kritinis skersinio sukamojo klupumo momentas apskaičiuojamas pagal (58) formulę (Gardner, Nethercot 2005):

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{L_{cr}^2 \cdot G \cdot I_T}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} \right)}; \quad (58)$$

čia E ir G atitinkamai yra tamprumo ir šlyties moduliai, I_y – skerspjūvio inercijos momentas aplink ašį y-y, I_T – skerspjūvio sukamoji inercijos konstanta, L_{cr} – atstumas tarp įtvirčių arba klumpamasis elemento ilgis, C_1 – koeficientas įvertinantis elemento lenkimo momentų diagramos formą.

EC3 taip pat yra nurodyta, jog elementai, kuriuos kartu veikia lenkimas ir ašinis gniuždymas, turi tenkinti *EN 1993-3-1* 6.61 ir 6.62 išraiškas. Gardnerio ir kitų pasiūlytoje *EHS* elementų projektavimo rekomendacijose yra nurodyta kaip nustatyti gniuždomojo elemento klumpamąją galią bei elemento lenkiamąją klumpamąją galią, tačiau nėra nurodyta kaip nustatyti *EHS* elemento, kurį veikia gniuždančioji ašinė jėga ir lenkimo momentas, klumpamąją galią (Gardner *et al.* 2011b). Ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritme priimama, jog skaičiuojant klumpamąją galią turi būti tenkinamos *EN 1993-3-1* pateiktos 6.61 ir 6.62 išraiškos. Į šias formules įrašius dalinio elementų klupumo laikomosios galios koeficiento reikšmę $\gamma_{M1} = 1,0$, o momentus, susidarančius dėl sunkio centro ašies poslinkio pagal 4 klasės skerspjūviams taikomas nuostatas,

išeliminavus, nes skerspjūvis simetriškas ir nevertinant skerspjūvio klupiųjų zonų sunkio centro ašis nepersislenka, jos gali būti užrašytos taip:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} &\leq 1; \\ \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rk}} &\leq 1; \end{aligned} \quad (59)$$

čia N_{Ed} , $M_{y,Ed}$ ir $M_{z,Ed}$ – skaičiuotinės gniuždomosios jėgos ir didžiausiųjų momentų, atitinkamai aplink y-y ir z-z ašis išilgai elemento, reikšmės; χ_y , χ_z – lenkiamojo klupumo koeficientai pagal (48) formulę; χ_{LT} – skersinio sukamojo klupumo koeficientas pagal (55) formulę; $N_{Rk} = f_y A$, jei skerspjūviai 1, 2 arba 3 klasės, $N_{Rk} = f_y A_{eff}$, jei skerspjūviai 4 klasės; $M_{y,Rk} = f_y W_{pl,y}$, $M_{z,Rk} = f_y W_{pl,z}$, jei skerspjūviai 1 arba 2 klasės, $M_{y,Rk} = f_y W_{el,y}$, $M_{z,Rk} = f_y W_{el,z}$, jei skerspjūviai 3 klasės, $M_{y,Rk} = f_y W_{eff,y}$, $M_{z,Rk} = f_y W_{eff,z}$, jei skerspjūviai 4 klasės.

Sąveikos koeficientai k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} gali būti nustatomi pagal *EN 1993-3-1 A* arba *B priedus* (toliau *A metodas* ir *B metodas*). Abiem metodais skaičiavimas yra sunkus bei varginantis ir nėra tinkamas rankiniam skaičiavimui. Baigiamajame darbe skaičiavimai atlikti pagal abu metodus ir atliktas rezultatų palyginimas. Skaičiuojant sąveikos koeficientus *A metodu*, *EN 1993-3-1* pateiktos tokios jų išraiškos: (60), (61), (62), (63) išraiškos taikomos 3 ir 4 skerspjūvio klasėms (tampriosios skerspjūvio savybės); (64), (65), (66), (67) išraiškos taikomos 1 ir 2 skerspjūvio klasėms (plastinės skerspjūvio savybės).

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}; \quad (60)$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}; \quad (61)$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}; \quad (62)$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}; \quad (63)$$

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}; \quad (64)$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}; \quad (65)$$

$$k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}; \quad (66)$$

$$k_{yz} = C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}; \quad (67)$$

Šiose sąveikos koeficientų formulėse ((60) – (67) formulės) μ_y , μ_z , w_y , w_z , C_{yy} , C_{yz} , C_{zy} ir C_{zz} yra išreikštiniai dydžiai, kurių skaičiavimo formulės pateiktos *EN 1993-3-1 A priede*, dydžiai C_{my} , C_{mz} ir C_{mLT} yra lyginamieji tolygiojo momento koeficientai, nustatomi pagal elemento lenkimo momentų diagramos formą.

Šiek tiek trumpesnis skaičiavimo algoritmas yra pateiktas *B metode*. Kai yra atsižvelgiama į tampriąsias skerspjūvio savybes (3 arba 4 skerspjūvio klasė), sukamosioms deformacijoms nejautrių elementų sąveikos koeficientai skaičiuojami pagal formules:

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \leq C_{my} \left[1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]; \quad (68)$$

$$k_{yz} = k_{zy}; \quad (69)$$

$$k_{zy} = 0,8 k_{yy}; \quad (70)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left[1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \leq C_{mz} \left[1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]. \quad (71)$$

Kai yra atsižvelgiama į plastines skerspjūvio savybes (1 arba 2 skerspjūvio klasė), sąveikos koeficientai skaičiuojami pagal formules:

$$k_{yy} = C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \leq C_{my} \left[1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]; \quad (72)$$

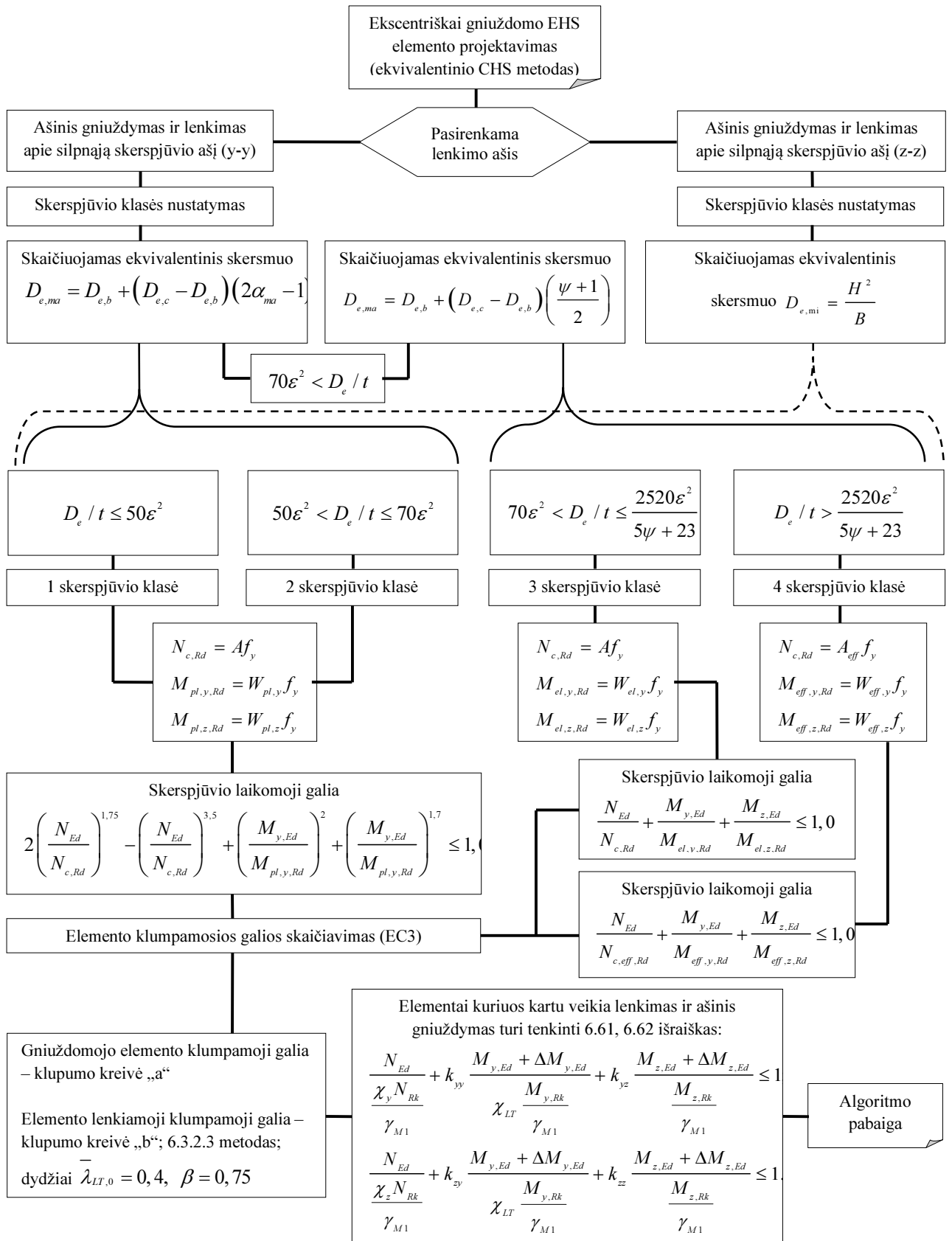
$$k_{yz} = 0,6k_{zz}; \quad (73)$$

$$k_{zy} = 0,6k_{yy}; \quad (74)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right] \leq C_{mz} \left[1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]. \quad (75)$$

Šiose sąveikos koeficientų skaičiavimo formulėse ((68) – (75) formulės) visi dydžiai paaiškinti ankstesnėse formulėse.

Ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmas pateiktas 23 paveiksle.



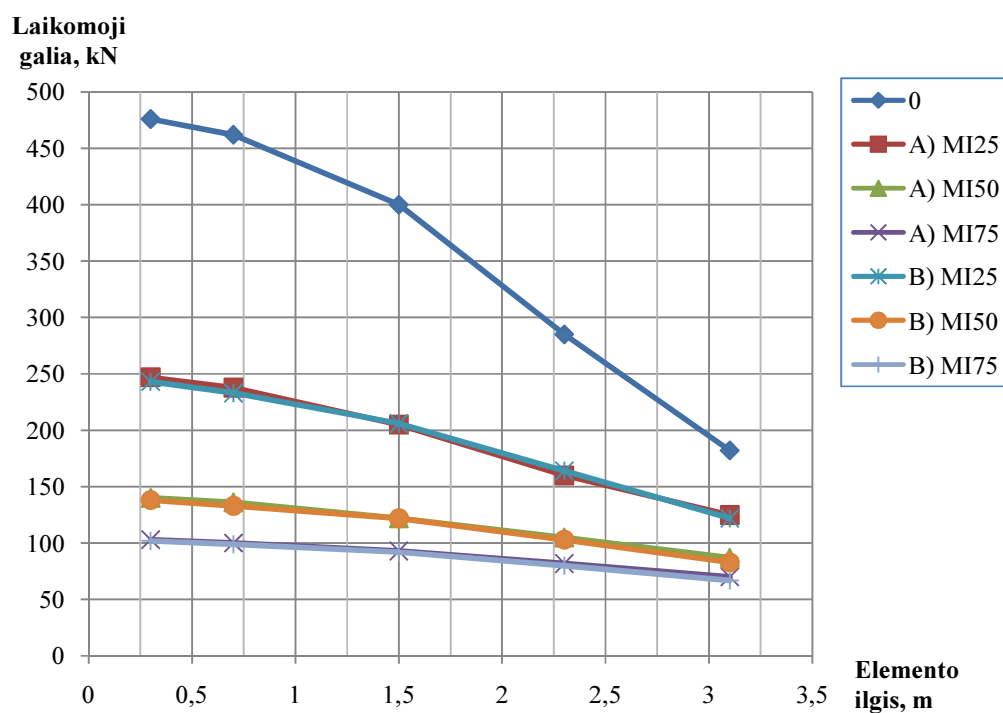
23 pav. Ekscentriškai gniuždomo EHS elemento projektavimo algoritmas

3.2. Projektavimo rezultatai

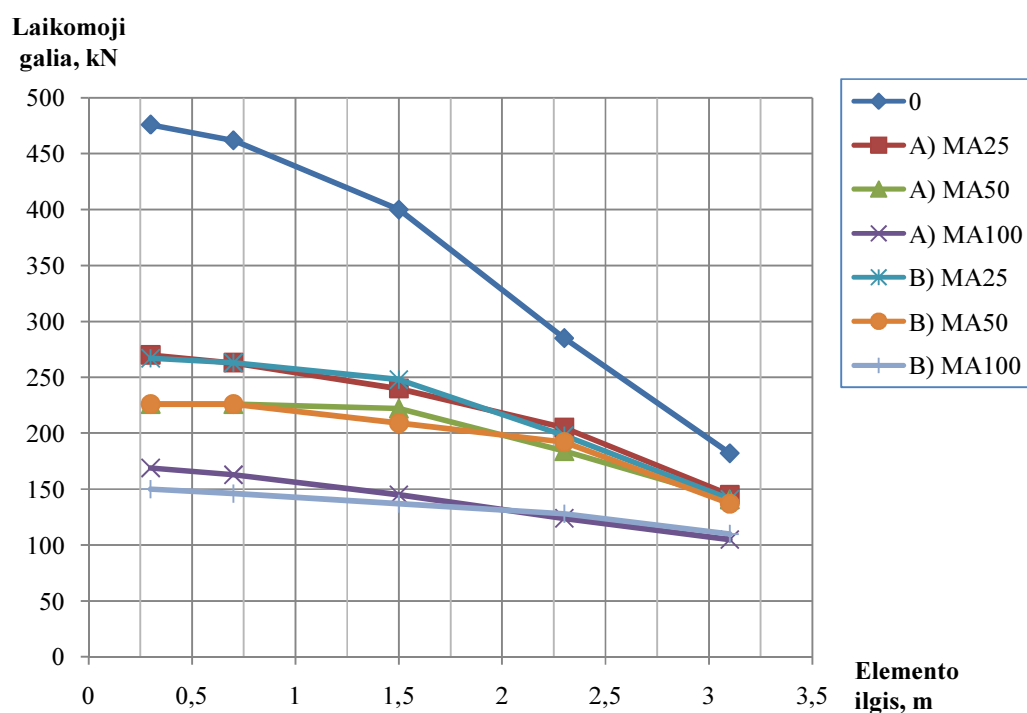
Remiantis sudarytu algoritmu, keičiant *EHS* kolonos ilgį, apkrovos pridėjimo ekscentricitetą ir skerspjūvio sienelės storį, atlikti 105 *EHS* kolonos, veikiamos ašinės gniuždančiosios jėgos ir vienašio lenkimo momento, analitiniai skaičiavimai. Projektavimas atliktas *EHS 150x75* su sienelės storiais 4, 5, 6.3 mm. Elemento ilgiai 0,3, 0,7, 1,5, 2,3, 3,1 m. Pridėti 25, 50 ir 100 mm ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentricitetai stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu bei 25, 50 ir 75 mm silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu. Be to algoritmas pritaikytas ir kai *EHS* kolona yra veikiamas ašinės gniuždančiosios jėgos ir dviašio lenkimo momento. Atlikta 10 analitinių skaičiavimų 0,3, 0,7, 1,5, 2,3, 3,1 m ilgių, *EHS 150x75x4* skerspjūvio, elementui. Ašinė gniuždančioji jėga pridėta naudojant ekscentricitetų derinius *MA100/MI25* ir *MA50/MI75* (*Ekscentricitetų pažymėjimai: MA – (angl. major) pridėtas ekscentricitetas apie stipriąją skerspjūvio ašį; MI – (angl. minor) pridėtas ekscentricitetas apie silpnąją skerspjūvio ašį; skaičius reiškia ekscentriciteto dydį milimetrais. Pvz.: MA50 – pridėta ašinė gniuždančioji jėga su ekscentricitetu $e = 50$ mm apie stipriąją skerspjūvio ašį; MA25/MI75 – pridėta ašinė gniuždančioji jėga su ekscentricitetu $e = 25$ mm apie stipriąją skerspjūvio ašį ir ekscentricitetu $e = 75$ mm apie silpnąją skerspjūvio ašį*). EN 1993-3-1 6.61 ir 6.62 išraiškos patikrintos skaičiuojant sąveikos koeficientus tiek *A*, tiek *B* metodais.

Visi analitinių skaičiavimų rezultatai pateikti B priede. Ašinės gniuždančiosios jėgos ir vienašio lenkimo momento veikiamos *EHS* skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio ir pridėtos ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto grafikai pateikti 24 – 29 paveiksluose: *EHS 150x75x4* skerspjūvio kolonai grafikai pateikti 24, 25 paveiksluose, *EHS 150x75x5* skerspjūvio kolonai grafikai pateikti 26, 27 paveiksluose ir *EHS 150x75x6.3* skerspjūvio kolonai grafikai pateikti 28, 29 paveiksluose. Ašinės gniuždančiosios jėgos ir dviašio lenkimo momento veikiamos *EHS 150x75x4* skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio ir pridėtos ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto grafikas pateiktas 30 paveiksle. (*Šiuose grafikuose pažymėjimas A) arba B) reiškia, jog analitiniai skaičiavimai atlikti atitinkamai pagal A arba B metodą; 0 reiškia, jog analitiniai skaičiavimai atlikti centriškai gniuždomai kolonai*).

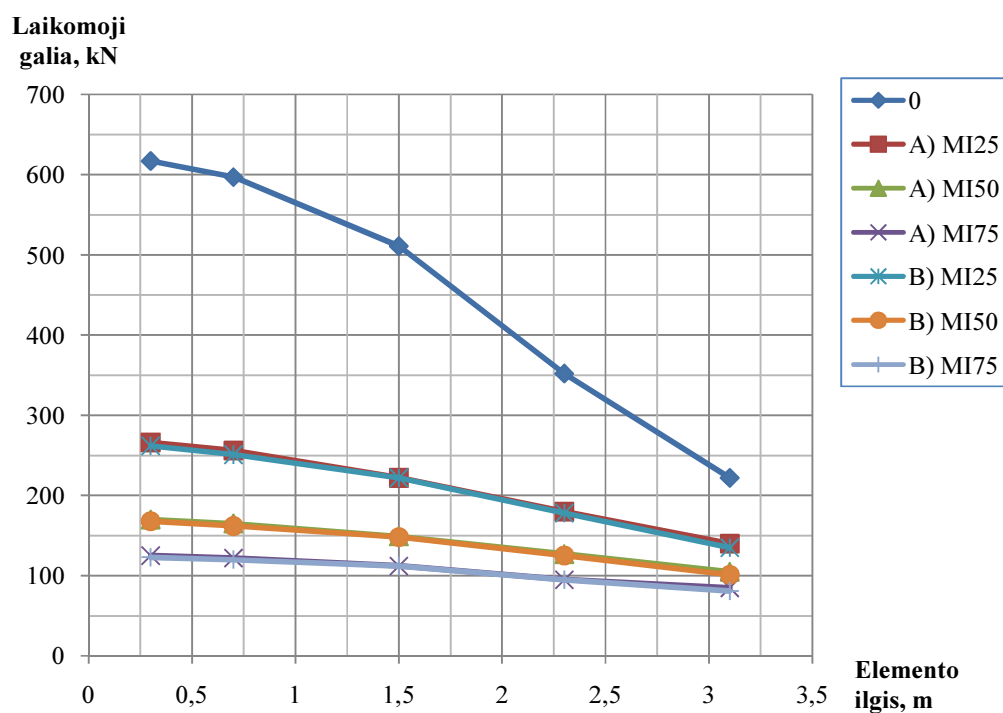
Skaičiavimai atlikti *Mathcad* programiniu paketu. Lenkimo ir ašinio gniuždymo veikiamo *EHS 150x75x5* skerspjūvio, 2,3 m ilgio elemento, kai ašinė gniuždančioji jėga pridėta su ekscentricitetu $e = 25$ mm apie stipriąją skerspjūvio ašį, skaičiavimo algoritmas pateiktas C priede. Tokio paties elemento laikomosios galios skaičiavimo esant centriniam gniuždymui pavyzdys taip pat pateiktas C priede.



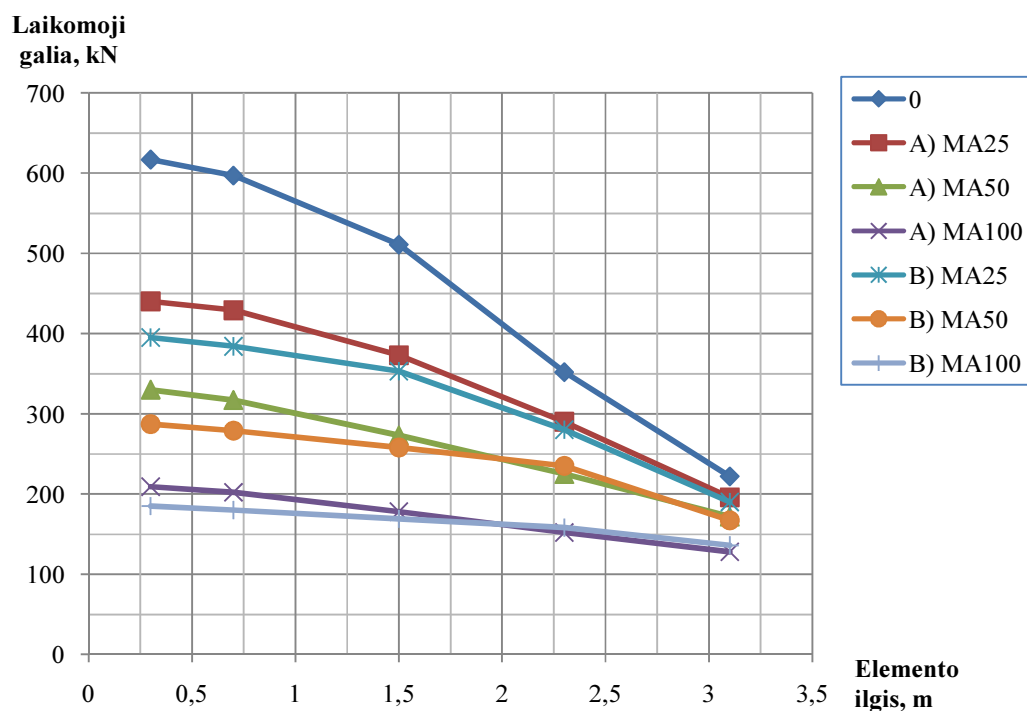
24 pav. EHS 150x75x4 skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink silpnąją skerspjūvio ašį, grafikas



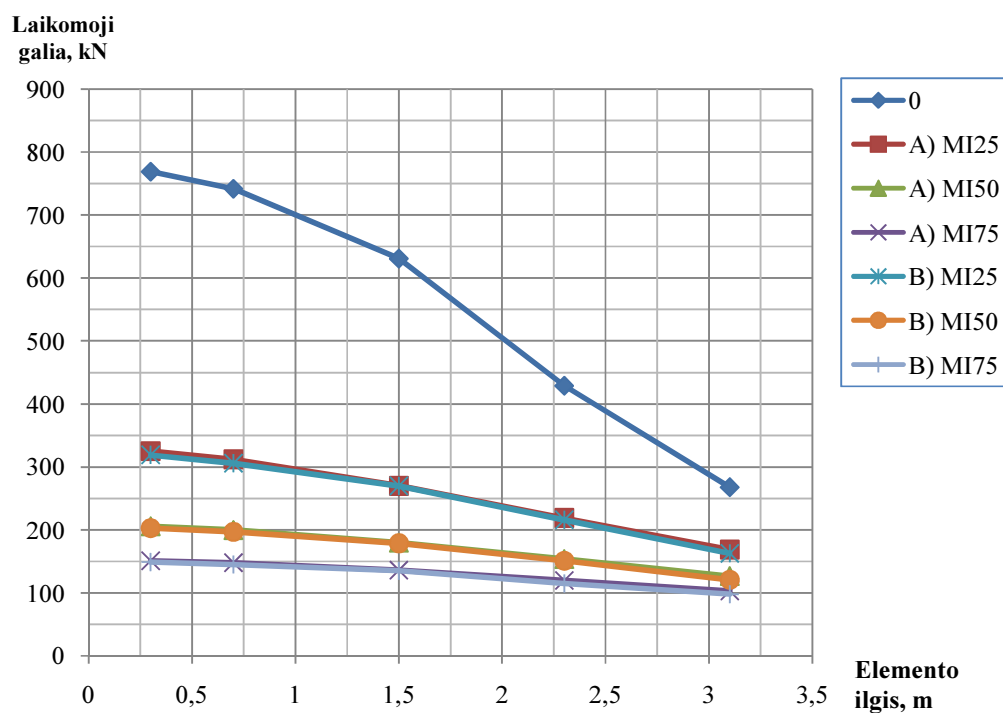
25 pav. EHS 150x75x4 skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink stipriąją skerspjūvio ašį, grafikas



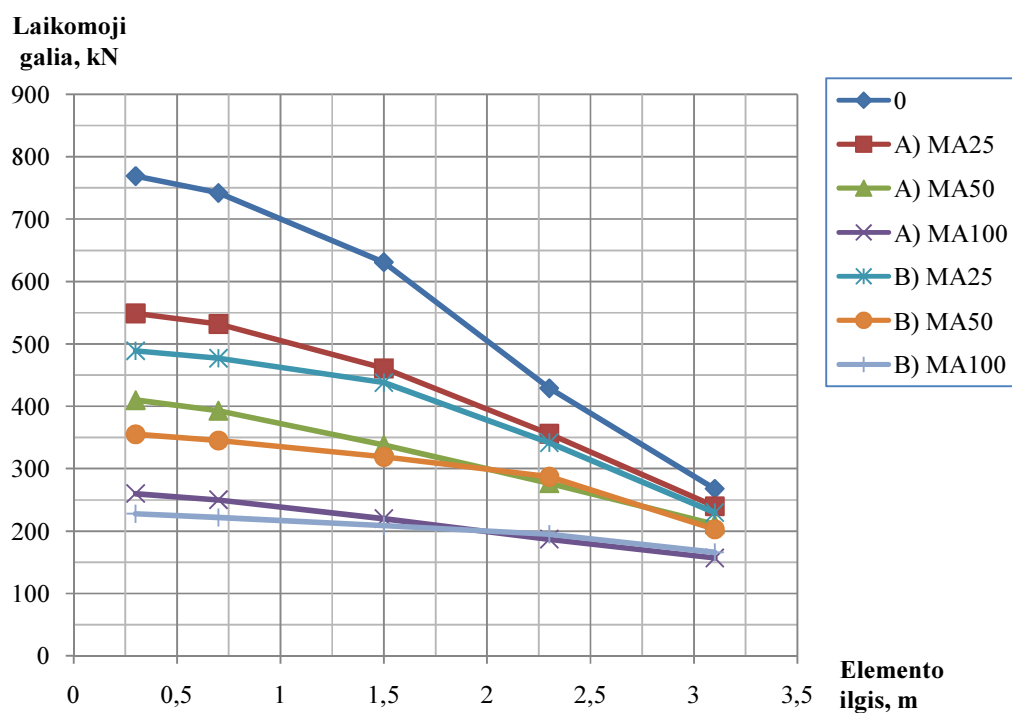
26 pav. EHS 150x75x5 skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink silpnąją skerspjūvio ašį, grafikas



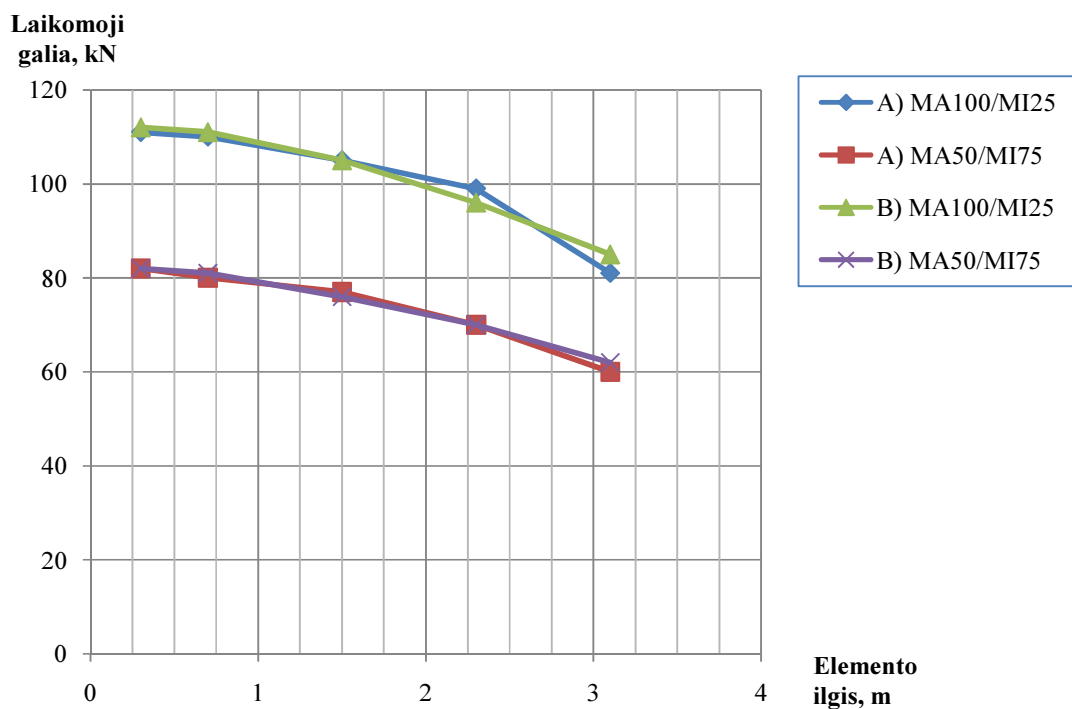
27 pav. EHS 150x75x5 skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink stipriąją skerspjūvio ašį, grafikas



28 pav. EHS 150x75x6.3 skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink silpnąją skerspjūvio ašį, grafikas



29 pav. EHS 150x75x6.3 skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink stipriąją skerspjūvio ašį, grafikas



30 pav. *EHS 150x75x4* skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams aplink abi skerspjūvio ašis, grafikas

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

Projektavimo normose nėra pateikta *EHS* elemento skaičiavimo metodikos, priešingai nei kitų įprastų *HSS* skerspjūvių profiliuočiams. Šiame skyriuje remiantis ekvivalentiniu *CHS* metodu skerspjūvio klasėms nustatyti, sudarytas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmas. Gardneris ir kiti pateikė kaip nustatyti skerspjūvio klasę, kaip suskaičiuoti skerspjūvio laikomąją galią bei kokias klupumo kreives naudoti tikrinant *EHS* elemento klupumą atskirai veikiant ašiniui gniuždymui arba lenkimui. Tačiau kaip suskaičiuoti elemento laikomąją galią, kai veikia ekscentrinis gniuždymas nėra pateikta. Magistriniame darbe pasiūlyta taikyti *EN 1993-1* pateiktas 6.61 ir 6.62 išraiškas. Keičiant *EHS 150x75* skerspjūvio sienelės storį (4, 5, 6,3 mm), elemento ilgį (0,3, 0,7, 1,5, 2,3, 3,1 m) ir pridėtos ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentricitetą (0, *MA25*, *MA50*, *MA100*, *MI25*, *MI50*, *MI75*) atlikti 105 analitiniai skaičiavimai. 6.61 ir 6.62 sąlygos patikrintos skaičiuojant sąveikos koeficientus tiek pagal *EN 1993-1 A*, tiek pagal *B priedų* algoritmus. Be to, sudarytas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmas pritaikytas ir esant ašinei gniuždančiajai jėgai bei dviašiam lenkimo momentui – atlikta dar 10 analitinių skaičiavimų su ašinės jėgos ekscentricitetais *MA100/MI25* ir *MA50/MI75*.

4. EKSCENTRIŠKAI GNIUŽDOMO *EHS* ELEMENTO SKAIČIAVIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU

Įvairiose mokslo ir technikos srityse šiuo metu yra populiarūs skaitiniai tyrimų metodai, kurie leidžia modeliuoti įvairius reiškinius, kartoti skaitinį eksperimentą reikiamą kartų skaičių, keisti jo sąlygas. Tai ekonomiškai racionaliau, nes nereikalinga brangi eksperimentų įranga. Skaitinis eksperimentas nekelia pavojaus aplinkai ir personalui. Vienas labiausiai paplitusių skaitinių metodų yra baigtinių elementų metodas, plačiai taikomas inžinerijoje (Tumonis 2009).

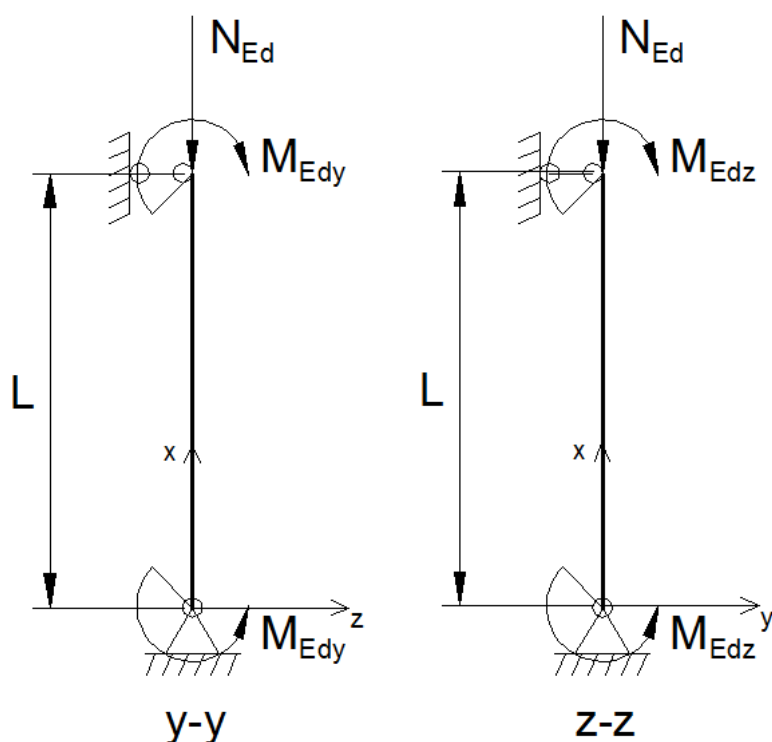
Šiuolaikinė baigtinių elementų metodo (*BEM*) samprata labai plati, ji apima ne tik apytikslį matematinį diferencialinių lygčių sprendimo dalinėmis išvestinėmis metodą. *BEM* dažniau suvokiamas kaip *skaičiavimų technologija*, o gal netgi kaip universalu būdas fizikinių ir inžinerinių objektų ar sistemų elgsenos analizei atlikti. Daugelį praktinių uždavinių šiandien galima išspręsti taikant rinkoje pateikiamas *BEM* kompiuterines programas (Barauskas *et al.* 2004).

Baigtinių elementų metodo pagrindu yra sukurta daug universalių bei specializuotų kompiuterinių programų. Universaliosios programos *ANSYS*, *ALGOR*, *ABAQUS*, *COSMOS* ir pan. leidžia greitai ir patikimai ištirti projektuojamas sistemas ir dar projektavimo stadijoje patikrinti ar prognozuoti jų savybes (Barauskas *et al.* 2004). Šiame darbe skaičiuojamajam modeliui sukurti pasirinktas programinis paketas *SolidWorks Simulation 2012*. Tai trimačio modeliavimo programinis paketas, kuriame integruota *COSMOS* baigtinių elementų skaičiavimo programa. Naudojant šį programinį paketą, galima išsamiai aprašyti kraštines sąlygas ir apkrovas, suskaidyti į baigtinius elementus, atsižvelgiant į trimačio modelio geometriją bei apkrovų ir kraštinių sąlygų pridėjimo vietas. Pasitelkus *SolidWorks Simulation 2012* galima atlikti tiesinę, netiesinę, klupumo analizes ir gauti įtempių bei deformacijų pasiskirstymą elementuose.

Šiame skyriuje pateiktas *BEM* skaitinio modelio sudarymas. Tyrimo objektas – ekscentriškai gniuždomas *EHS* elementas (kolona). Pagrindinis skaitinio modeliavimo tikslas – sudaryti baigtinių elementų modelį, kuris atspindėtų tikrąją tyrimo objekto fizikinę, mechaninę elgseną, nustatytų tikslus įtempius ir deformacijas esant ekscentriniam kolonos gniuždymui – veikiant gniuždančiąjį ašinei jėgai kartu su lenkimo momentu. Tolesniuose skyriuose kolonos skaitinio modelio gauti rezultatai bus lyginami su analitiniais skaičiavimais, atliktais pagal trečiajame skyriuje pateiktą ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmą.

4.1. Kolonos skaičiuojamoji schema

Sudarant skaitinį ekscentriškai gniuždomos *EHS* kolonos modelį, siekiama, jog sudarytas modelis atitiktų skaičiuotinę schemą (žr. 31 pav.), pagal kurią atliekami analitiniai skaičiavimai. 31 paveiksle L yra *EHS* kolonos ilgis, N_{Ed} – veikianti skaičiuotinė gniuždančioji jėga, M_{Edy} ir M_{Edz} yra skaičiuotiniai lenkimo momentai atitinkamai apie stipriąją (y - y) ir silpnąją (z - z) skerspjūvio ašis. Lenkiamieji momentai pridėti abiejuose elemento galuose – lenkimo momentas pasiskirsto tolygiai per visą elemento ilgį. Apačioje kolona atremta lanksčiai nepaslankiai, viršuje – lanksčiai ir paslankiai išilginės ašies (x - x) atžvilgiu.

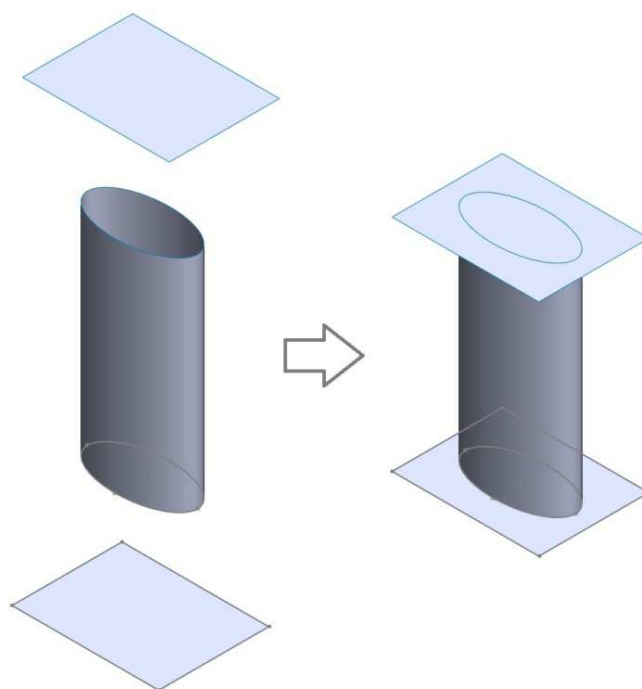


31 pav. Kolonos skaičiuojamoji schema

4.2. *EHS* kolonos modeliavimas

4.2.1. Modelio elementai

Ekscentriškai gniuždomos *EHS* kolonos skaitinis modelis sudarytas iš šių elementų: *EHS* vamzdžio bei dviejų papildomų atraminių plokštelių vamzdžio viršuje ir apačioje (žr. 32 pav.). Plokštelės skirtos tikslaus atrėmimo ir apkrovos pridėjimo taškų modeliavimui (žr. 33 pav.).

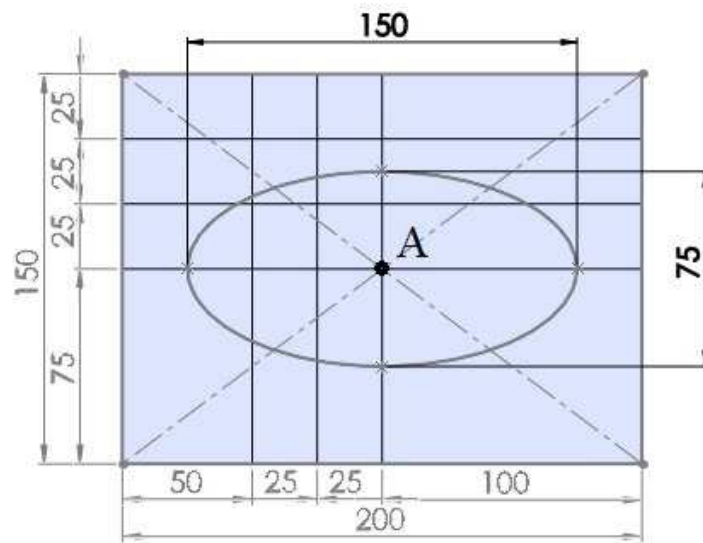


32 pav. Modelio elementai

Visos kolonos sudedamosios dalys – lakštiniai elementai, kurie braižomi pagal norimus matmenis paviršių (*surface*) modelio aplinkoje. Tūriniai elementai šiuo atveju tik padidintų skaičiavimo laiką. Kadangi skaičiuojamas tuščiaviduris vamzdis – plonasienė konstrukcija, modeliavimas supaprastinamas paviršiais. Plokštuminių elementų storis bus įvedamas konstrukcijos skaičiavimu metu, kai ji bus sudalinama baigtiniais elementais. *EHS* vamzdžiui ir apatinei plokštei skaičiavimo metu elementų storis priskiriamas pagal vidinį paviršių, o viršutinei plokštei – pagal išorinį paviršių. Taip supaprastinamas modelio braižymas – norint tiksliai paviršiais nusibraižyti konkretų elementą, nereikia įvertinti jo storio.

Plokštelės sudalinamos pagalbinėmis linijomis (žr. 33 pav.). Tai leidžia tiksliai įvesti apkrovų bei suvaržymų vietas. Pagalbinių linijų susikirtimo taškas *O* – *EHS* svorio centras. Šiame taške įvedami kolonos suvaržymai. Atstumai tarp pagalbinių linijų įvesti pagal numatomus naudoti ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentricitetus: 25, 50 ir 100 mm – stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu bei 25, 50 ir 75 mm – silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu.

Modeliuojamas skerspjūvis - *EHS 150x75*. Tyrimais atliekami tik su šiuo skerspjūviu, kintant tik sienelės storiui ir elemento ilgiui. Naudojami skerspjūvio sienelės storiai 4, 5 ir 6,3 mm. Elemento ilgiai 0,3, 0,7, 1,5, 2,3, 3,1 m.

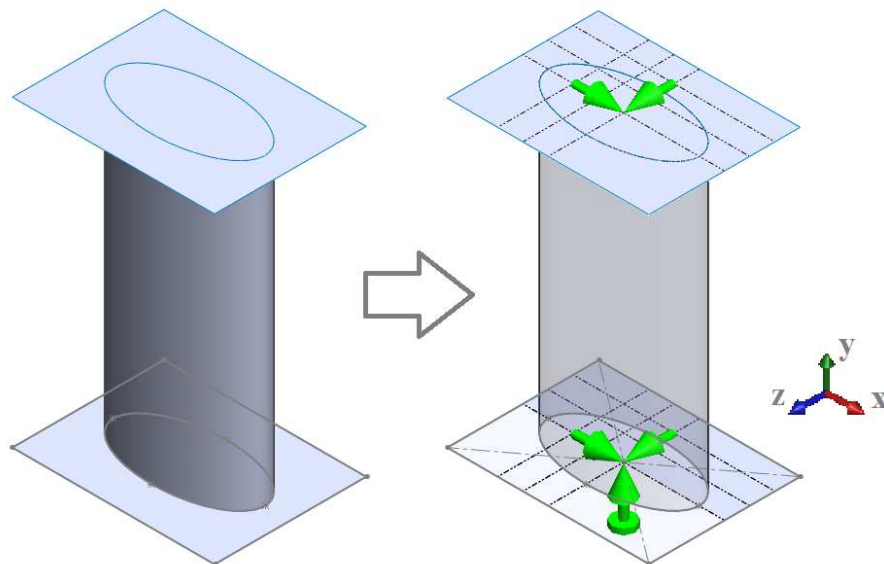


33 pav. Papildomos plokštelės, sudalintos pagalbinėmis linijomis

4.2.2. Kraštinės sąlygos

Norint, jog modelis kuo tiksliau atitiktų skaičiuojamąją schemą – lankstų abiejų kolonos galų atrėmimą, kolonos galuose skerspjūvio svorio centre per papildomas plokšteles įvedami suvaržymai (žr. 34 pav.):

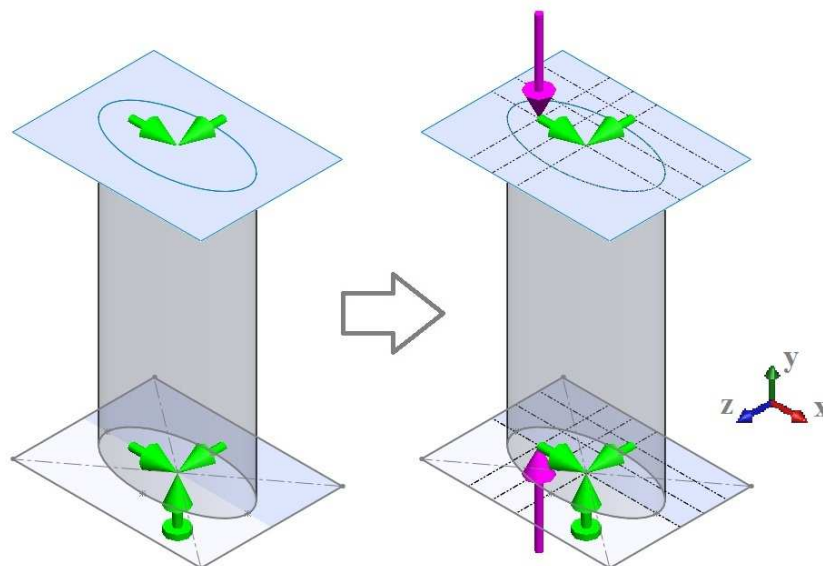
- Kolonos viršuje suvaržomi X ir Z krypties poslinkiai;
- Kolonos apačioje suvaržomi X , Y , Z krypties poslinkiai bei pasisukimas aplink Y ašį.



34 pav. Kolonos kraštinės sąlygos

4.2.3. Apkrovos

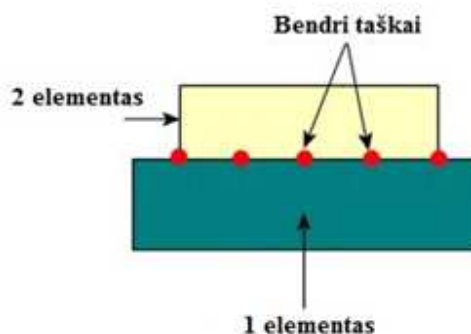
Kolona yra ekscentriškai gniuždoma Y ašies kryptimi koncentruotomis apkrovomis, pridėtomis abiejuose jos galuose su ekscentricitetu. Naudojant papildomas plokšteles, sudalintas pagalbinėmis linijomis, ekscentricitetas įvedamas tiksliai pagal norimas apkrovos pridėjimo sąlygas (žr. 35 pav.).



35 pav. Kolonos apkrovimas

4.2.4. Kolonos elementų kontaktas

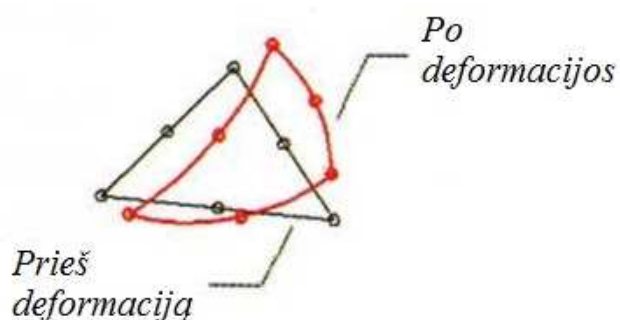
Kolonos elementai – plokštelės bei EHS vamzdis tarpusavyje liečiasi, o tai turi įtakos skaičiavimo rezultatams, todėl turi būti įvedamos atitinkamos jų kontakto sąlygos. Norint, kad visi elementai dirbtų kaip vienas, įvedamas *Bonded* kontakto aprašymo metodas (žr. 36 pav.). Toks elementų sujungimas atstoja suvirinimą. Plokštelėms užduodama standumo *rigid* funkciją tam, kad jų deformacijos nedarytų įtakos ir visa apkrova tolygiai būtų perduodama į EHS vamzdžio sieneles.



36 pav. *Bonded* kontakto aprašymo metodas

4.2.5. Baigtinių elementų tinklas

Nagrinėjamos kolonos visos sudedamosios dalys sudalinamos baigtiniais elementais. Kadangi, visos dalys – lakštiniai plokštuminiai elementai, pasirenkamas antrosios eilės trikampis *Shell* baigtinių elementų tipas, turintis šešis mazgus ir kiekvienas mazgas apibūdinamas 6 laisvės laipsniais (trys poslinkiai ir trys posūkiai) (žr. 37 pav.). Naudojant šį baigtinių elementų tipą gaunamos tikslesnės deformacijos nei naudojant pirmosios eilės trikampi *Shell* baigtinių elementų tipą.

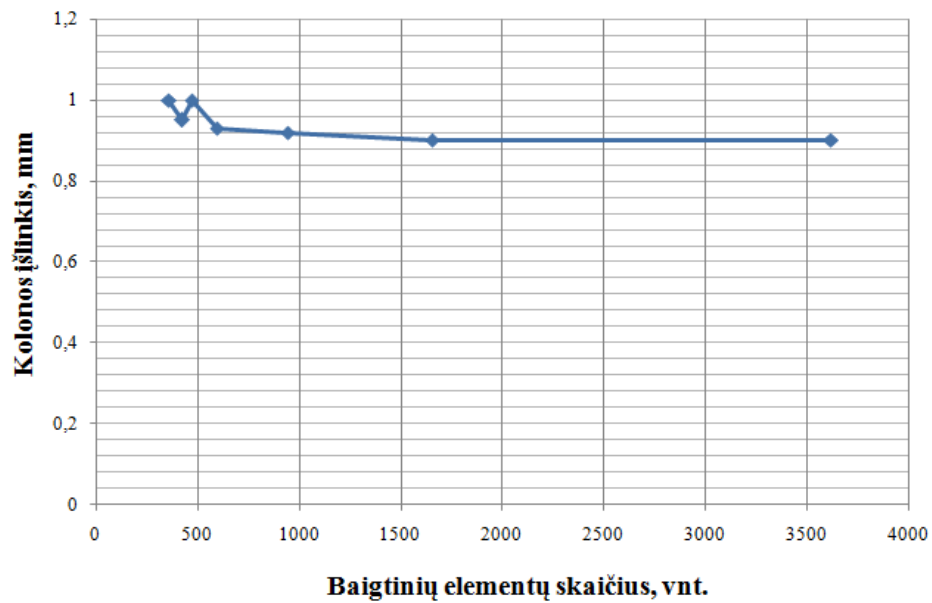


37 pav. *Shell* tipo antrosios eilės trikampis baigtinis elementas

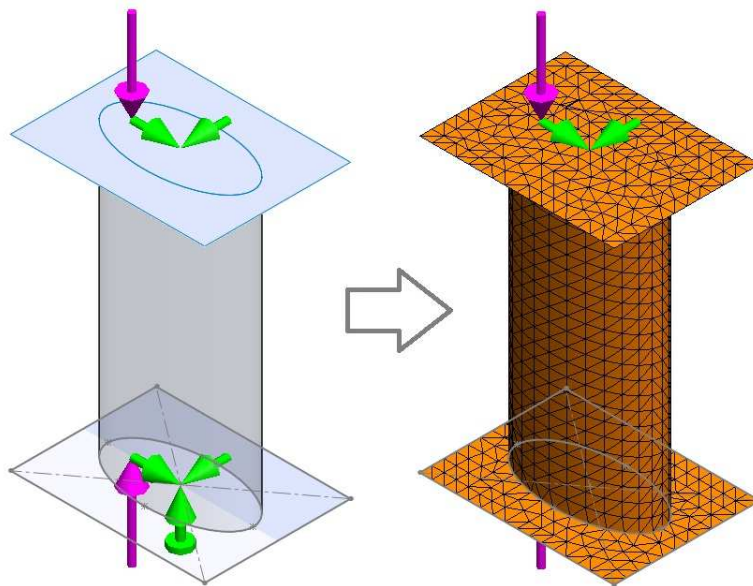
Rezultatų tikslumas priklauso nuo baigtinių elementų tinklo tankio. Didinant baigtinių elementų skaičių, rezultatai gaunami tikslesni, tačiau padidėja skaičiavimo laiko sąnaudos, todėl reikia parinkti racionalią baigtinių elemento tinklo tankį. Tam tikslui sudaroma priklausomybė tarp kolonos išlinkio ir baigtinių elementų skaičiaus. Didinant baigtinių elementų skaičių, tikrinamas išlinkio pokytis z - z ašies kryptimi, siekiant gauti vienodą (arba artimą) įlinkio reikšmę (žr. 38 pav.).

Iš grafiko matyti (žr. 38 pav.), jog baigtinių elementų dydis šiuo atveju turi labai nedidelę įtaką kolonos išlinkiui, tačiau galima teigti, jog įlinkio dydis nekinta ties 1500 baigtinių elementų skaičiumi. Šiuo atveju nustatomas *EHS 150x75x5* skerspjūvio ir 300 mm ilgio kolonos išlinkis. Šiai kolonai nustatytas 15 mm baigtinio elemento dydžio apribojimas su 0,75 mm dydžio kitimo intervalu. Kolonos baigtinių elementų tinklas pateiktas 39 paveiksle.

Modeliuojant ir skaičiuojant ilgesnes kolonas parenkant baigtinio elemento dydžius, atliekama tokia pati procedūra. Trumpesnėse kolonose pirmiau pasireiškia vietinė skerspjūvio kluptis ir norint tai užfiksuoti *BE* dydis turi būti pakankamai mažas. Ilgesnėms kolonomis, kuriose pirmiau pasireiškia bendrasis elemento pastovumo netekimas *BE* dydis gali būti didesnis.



38 pav. Išlinkio skaičiavimo tikslumo priklausomybė nuo baigtinių elementų skaičiaus



39 pav. Kolonos baigtinių elementų tinklas

4.2.6. Skaičiavimo parametrai

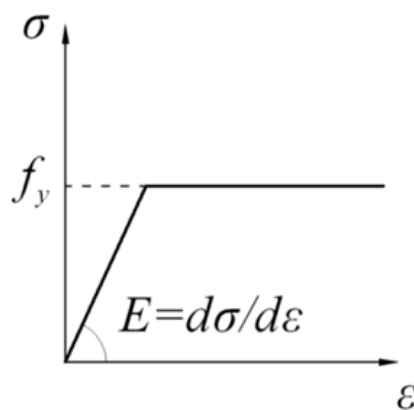
Prieš atliekant skaičiavimą, įvedamos kolonos (S355 plieno klasės) medžiagos pagrindinės charakteristikos:

- Plieno stipris pagal takumo ribą: $f_y = 355 \text{ MPa}$;

- Tamprumo modulis: $E = 210 \text{ GPa}$;
- Puasono koeficientas plienui $\nu = 0,3$.

Baigiamajame darbe atliekama netiesinė elemento skaičiavimo analizė, todėl reikia įvertinti geometrinį ir fizinį netiesiškumus:

- Geometrinis netiesiškumas – įvertinama kintanti konstrukcijos geometrija. Atsisakoma deformacijų ir poslinkių mažumo prielaidų;
- Fizinis (medžiagos) netiesiškumas – įvertinamas netiesinį įtempių bei deformacijų ryšys. Elemento medžiaga – plienas, aprašomas idealiai tampriai plastine Prantlio diagrama. Taip aprašyta medžiaga iš pradžių deformuojasi kaip ideali tampri ($\sigma = E\varepsilon$), o kai įtempiai išauga iki tam tikros reikšmės (plastiškumo įtempio f_y), medžiaga tampa ideali plastinė: ji neribotai deformuojasi, tįsta, įtempiams nebedidėjant. (žr. 40 pav.).

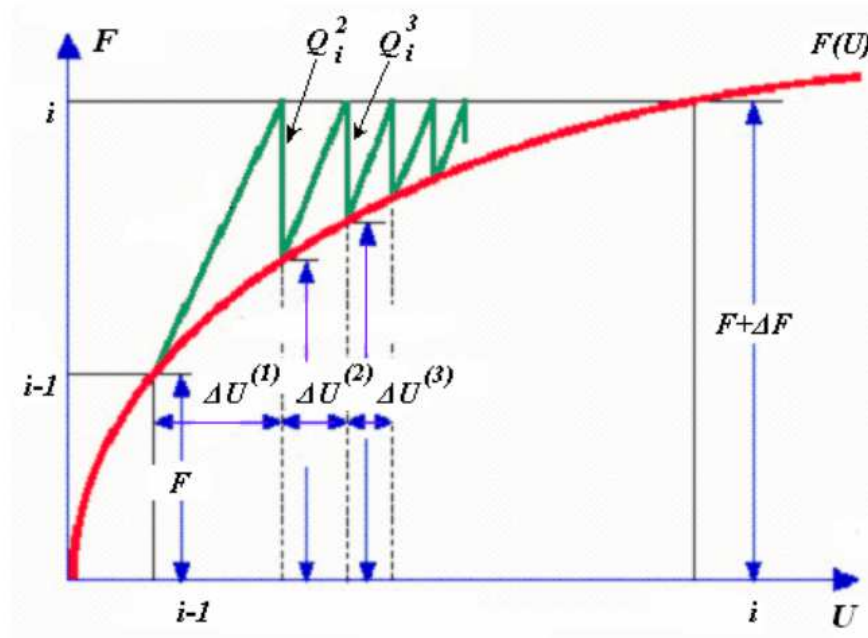


40 pav. Prantlio diagrama idealiai tampriai plastinei medžiagai

Netiesiniam uždaviniui spręsti taikomas modifikuotas Newtono – Raphsono jėgų kontrolės metodas (žr. 41 pav.). Jėgų kontrolės Newtono – Raphsono metode daromos iteracijos tam, kad būtų eliminuotos nesubalansuotos jėgos $\{Q_i^j\}$. Šios paklaidos atsiranda ištiesinant uždavinį, t.y. standumų matrica i apkrovos prieauglyje nekeičiama visam j iteracijų skaičiui. Tarkime, kad i apkrovos prieauglyje ($j - 1$) iteracijos rezultatai yra žinomi. Tuomet i apkrovos prieauglio j iteracijai galima užrašyti:

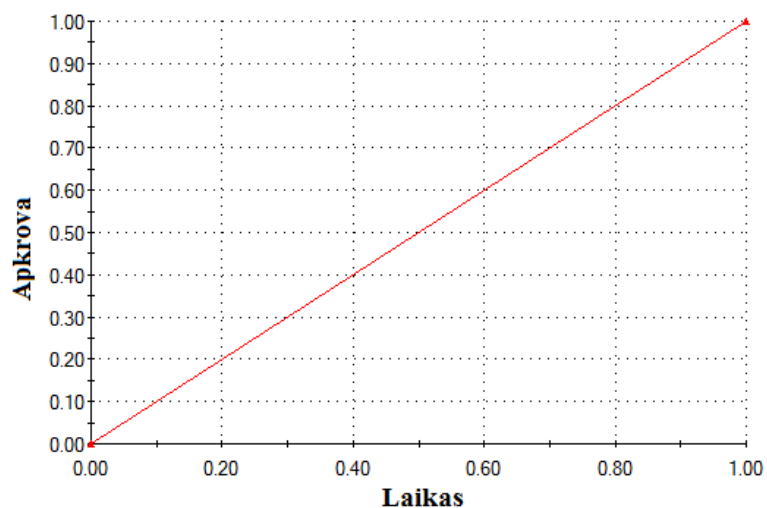
$$[K_i^{j-1}] \{\Delta U_i^j\} = \{\Delta F_i^j\} + \{Q_i^j\};$$

čia $[K_i^{j-1}]$ – i apkrovos žingsnio standumų matrica; $\{\Delta U_i^j\}$ – poslinkių vektoriaus prieauglis i apkrovos žingsnio iteracijoje; $\{\Delta F_i^j\}$ – apkrovos prieauglis i apkrovos žingsnio iteracijoje; $\{Q_i^j\}$ – nesubalansuotų jėgų vektorius i apkrovos žingsnio j iteracijoje.



41 pav. Modifikuoto Newtono-Raphsono jėgų kontrolės metodo schema (SolidWorks...2014)

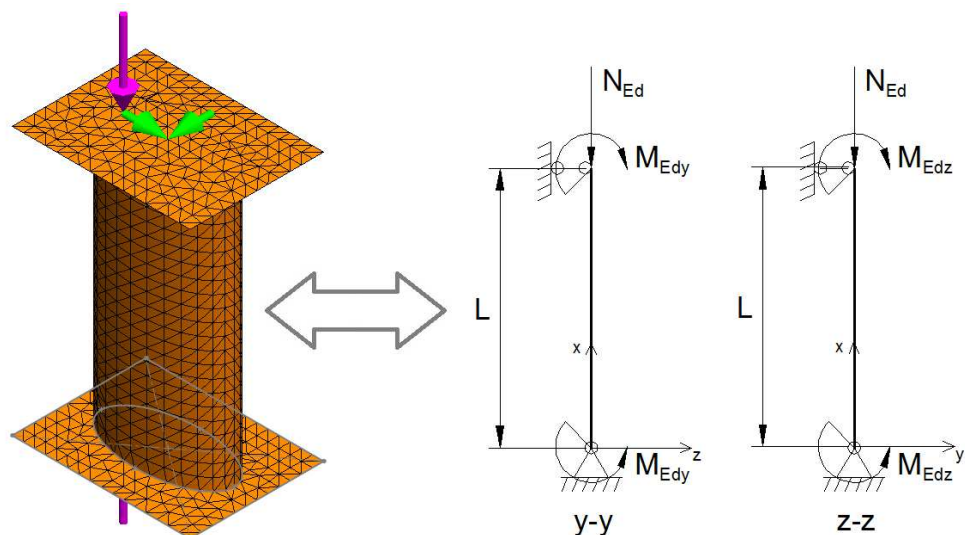
Kadangi šiame darbe naudojamas jėgos kontrolės metodas prieaugių kontrolei, todėl, atliekant netiesinę analizę, yra būtina įvesti apkrovos kitimo grafiką virtualiame laike (žr. 42 pav.).



42 pav. Apkrovos kitimo virtualiame laike grafikas

4.2.7. Galutinis kolonos skaičiuojamasis modelis

Atlikus visus modeliavimo etapus: parinkus modelio elementus, įvedus kraštines sąlygas, pridėjus apkrovas, padengus elementus skaičiuojamuoju baigtinių elementų tinklu bei įvertinus medžiagos plastines savybes ir kintančią konstrukcijos geometriją – gautas galutinis kolonos skaičiuojamasis modelis, atitinkantis skaičiuotinę schemą pagal kurią atlikti analitiniai skaičiavimai (žr. 43 pav.).



43 pav. Galutinis kolonos skaičiuojamasis modelis

4.3. BEM validacija

Sudarius galutinį kolonos skaičiuojamąjį modelį, reikia patikrinti ar šis modelis yra tinkamas numatytiems rezultatams gauti. Skaičiuotinio modelio tinkamumas nustatomas palyginant *BE* analizės rezultatus su natūrinių bandymų rezultatais. Šiame baigiamajame darbe natūriniai bandymai nebuvo atliekami, todėl visų pirma sudaromi tokie skaičiuotiniai modeliai, kurie atitinka Gardnerio ir kitų bei Chano ir Gardnerio atliktus natūrinius eksperimentus.

4.3.1. Trumpų kolonų tyrimai

Ekscentriškai gniuždomus *EHS* elementus skerspjuvio ribose tyrė Gardneris ir kiti (žr. 18 pav.) (Gardner *et al.* 2011a). Norėdami nustatyti plieno stiprį, pirmiausia jie atliko iš kolonų bandinių išpjautų plieno plokštelių tempimo bandymus (baigiamajame darbe atliekant modelio validaciją, gauti natūrinių bandymų takumo įtempiai įvesti ir į skaičiuotinį modelį). Gardnerio ir kitų atliktų natūrinių bandymų duomenys ir rezultatai pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Gardnerio ir kt. eksperimentų bandiniai ir rezultatai (Gardner *et al.* 2011a)

Bandinys	Skerspjūvio matmenys			Ilgis L (mm)	Vietinis skerspjūvio geometrinis nuokrypis ω_0 (mm)	Laikomoji galia N_u (kN)
	H (mm)	B (mm)	t (mm)			
150x75x5,0-SC1	150,25	75,80	4,85	300,00	0,099	671
150x75x5,0-SC2	150,05	76,00	4,90	300,05	0,072	676
150x75x6,3-SC1	148,15	76,05	6,72	300,15	0,078	973
150x75x6,3-SC2	148,85	76,05	6,64	300,15	0,036	990
150x75x5,0-MI-25	150,00	76,15	4,81	300,05	0,068	343
150x75x5,0-MI-75	150,20	75,90	4,88	300,00	0,080	181
150x75x6,3-MI-25	148,70	76,00	6,65	300,10	0,073	500
150x75x6,3-MI-75	149,55	75,80	6,80	300,10	0,277	248
150x75x5,0-MA-25	150,50	75,65	4,94	300,05	0,129	490
150x75x5,0-MA-100	150,20	76,95	4,84	299,95	0,099	235
150x75x6,3-MA-25	148,40	76,10	6,72	300,10	0,060	712
150x75x6,3-MA-100	148,55	76,00	6,74	300,10	0,138	342

Pagal šiuos natūrinius bandymus sudaryti skaičiuojamieji modeliai. *BE* modeliai sudaryti idealių skerspjūvio matmenų ir neįvertinus geometrinių skerspjūvio nuokrypų. Gauti rezultatai pateikti 5 lentelėje. Galima pastebėti, jog rezultatai beveik sutapo: sisteminė modelio paklaida 0,97, o atsitiktinė modelio paklaida 0,04. Daroma išvada, jog sudarytas *BE* modelis teisingai įvertina tikrąją ekscentriškai ir centriškai gniuždomos kolonos elgseną.

5 lentelė. Trumpų kolonų *BE* modelių validacija

Eil. Nr.	Skerspjūvis	Lenkimo ašis	Ekscentricitetas e (mm)	Ilgis L (m)	Laikomoji galia pagal atliktą natūrinį eksperimentą $N_{u,NB}$ (kN)	Laikomoji galia pagal <i>BEM</i> $N_{u,BEM}$ (kN)	Santykis $N_{u,BEM} / N_{u,NB}$
1	150x75x5,0	-	0	0,3	674	674	1,00
2	150x75x5,0	MI	25	0,3	343	350	1,02
3	150x75x5,0	MI	75	0,3	181	171	0,94

5 lentelės pabaiga

4	150x75x5,0	MA	25	0,3	490	483	0,99
5	150x75x5,0	MA	100	0,3	235	240	1,02
6	150x75x6.3	-	0	0,3	982	938	0,96
7	150x75x6.3	MI	25	0,3	500	480	0,96
8	150x75x6.3	MI	75	0,3	248	243	0,98
9	150x75x6.3	MA	25	0,3	712	638	0,90
10	150x75x6.3	MA	100	0,3	342	334	0,98
Sisteminė modelio paklaida $\mu_{\Delta N}$							0,97
Atsitiktinė modelio paklaida $\sigma_{\Delta N}$							0,04

4.3.2. Ilgų kolonų tyrimai

Lenkiamąjį ilgų kolonų klupumą tyrė Chanas ir Gardneris (Chan, Gardner 2009). Bandinių skerspjūvio matmenys, ilgiai, elementų geometriniai nuokrypiai ir gauta laikomoji galia pateikta 6 lentelėje.

6 lentelė. Chano ir Gardnerio eksperimentų bandiniai ir rezultatai (Chan, Gardner 2009)

Bandinys	Skerspjūvio matmenys			Ilgis L (mm)	Elemento geometrinis nuokrypis ω_0 (mm)	Laikomoji galia N_u (kN)
	H (mm)	B (mm)	t (mm)			
150x75x4,0-C1	150,56	75,48	4,14	700	0,29	495
150x75x5,0-C1	150,08	76,00	5,13	700	0,10	614
150x75x6,3-C1	150,37	75,25	6,27	700	1,23	820
150x75x4,0-C3	150,44	75,53	4,20	1500	0,15	507
150x75x5,0-C3	150,31	75,53	5,19	1500	1,80	647
150x75x6,3-C3	148,36	75,48	6,30	1500	0,20	789
150x75x4,0-C5	150,26	75,40	4,22	2300	1,09	365
150x75x5,0-C5	150,11	75,40	5,12	2300	3,38	393
150x75x6,3-C5	148,82	75,92	6,31	2300	0,89	452
150x75x4,0-C7	150,50	75,45	4,22	3100	1,93	234
150x75x5,0-C7	149,93	75,79	5,09	3100	1,55	242
150x75x6,3-C7	148,77	75,85	6,28	3100	0,74	292

Atkartojant šiuos eksperimentus taip pat sudaryti analogiški skaičiuotiniai modeliai ir atlikta BE analizė. Skaičiuotiniai kolonų modeliai sudaromi idealių skerspjūvio matmenų ir neįvertinus elementų geometrinių nuokrypių. Plieno stipris pagal takumo ribą įvedamas pagal gautus takumo įtempius atliekant plokštelių tempimo bandymus. Rezultatai pateikti 7 lentelėje.

Šiuo atveju, *EHS* kolonų laikomųjų galių gautų pagal atliktus natūrinius eksperimentus ir gautų pagal *BE* analizę, sisteminė ir atsitiktinė modelio paklaidos yra didesnės (reikšmės atitinkamai 1,15 ir 0,09). Visos kolonos natūrinių eksperimentų metu pasiekė šiek tiek mažesnę ardančiąją apkrovą. Daroma prielaida, jog tam turėjo įtakos elemento geometriniai nuokrypiai ir bandymo metu pridėtas atsitiktinis apkrovos ekscentricitetas.

7 lentelė. Ilgų kolonų *BE* modelių validacija

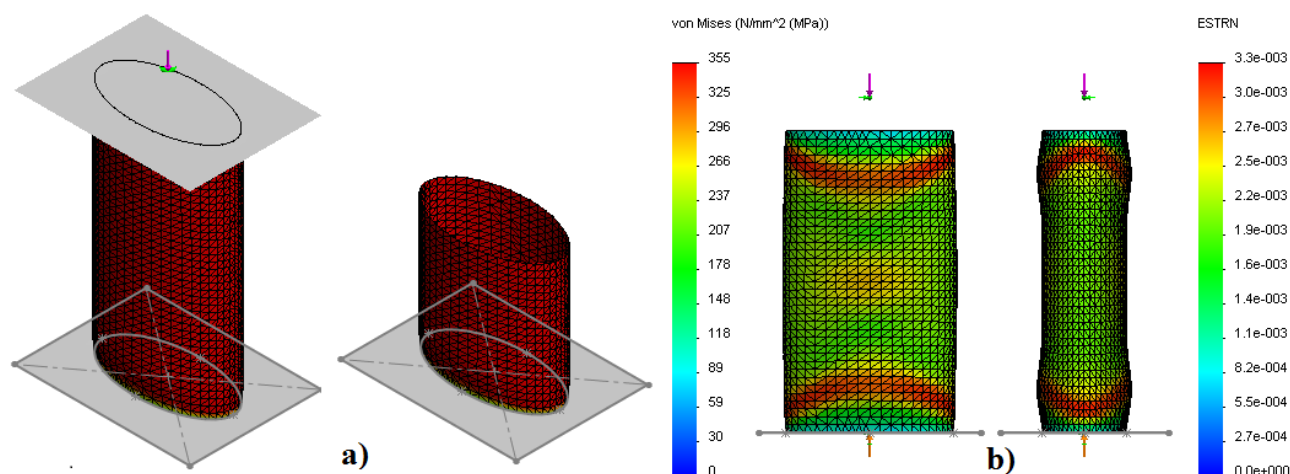
Eil. Nr.	Skerspjūvis	Lenkimo ašis	Ekscentricitetas e (mm)	Ilgis L (m)	Laikomoji galia pagal atliktą natūrinį eksperimentą $N_{u,NB}$ (kN)	Laikomoji galia pagal <i>BEM</i> $N_{u,BEM}$ (kN)	Santykis $N_{u,BEM} / N_{u,NB}$
11	150x75x4	-	0	0,7	495	545	1,10
12	150x75x5	-	0	0,7	614	666	1,08
13	150x75x6.3	-	0	0,7	820	888	1,08
14	150x75x4	-	0	1,5	507	543	1,07
15	150x75x5	-	0	1,5	647	667	1,03
16	150x75x6.3	-	0	1,5	789	891	1,13
17	150x75x4	-	0	2,3	365	411	1,13
18	150x75x5	-	0	2,3	393	499	1,27
19	150x75x6.3	-	0	2,3	452	595	1,32
20	150x75x4	-	0	3,1	234	248	1,06
21	150x75x5	-	0	3,1	242	293	1,21
22	150x75x6.3	-	0	3,1	292	368	1,26
Sisteminė modelio paklaida $\mu_{\Delta N}$							1,15
Atsitiktinė modelio paklaida $\sigma_{\Delta N}$							0,09

Įvertinus gautus rezultatus daroma išvada, jog sudarytas *BE* modelis pakankamai gerai įvertina tikrąją *EHS* kolonos elgseną veikiant centriniam ir ekscentriniam gniuždymui.

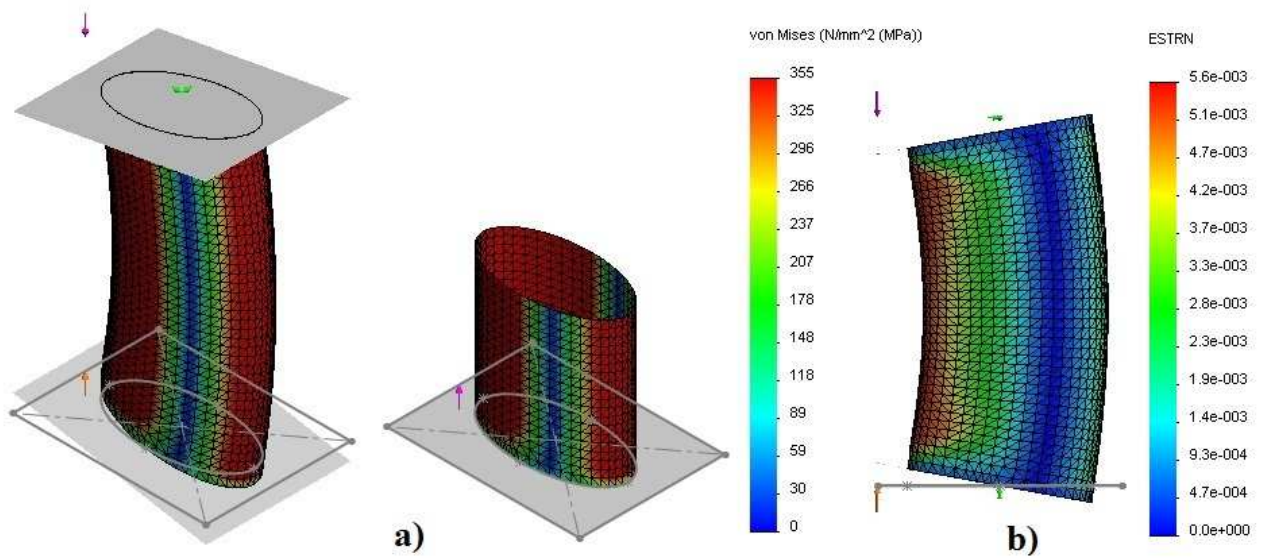
4.4. Rezultatai

Atlikus *BEM* validaciją, toliau sudaromi atitinkami *BE* modeliai atliktiems analitiniams skaičiavimams. Trumpų 0,3 m ilgio *EHS* kolonų bandymai pateikti 44, 45, 46 paveiksluose. Centriškai gniuždomoje *EHS 150x75x4* skerspjuvio kolonoje (žr. 44 pav.) vietinė skerspjuvio kluptis pasireiškia analogiškai kaip ir Zhu ir Wilkinsono atliktoje *BE* analizėje (žr. 7 pav.) – maksimalios deformacijos atsiranda netoli kolonos viršaus ir apačios, kur *EHS* deformuojasi į išorę. 45 ir 46 paveiksluose pateikta atitinkamai ekscentriškai apie stipriąją ir apie silpnąją skerspjuvio ašis gniuždomų *EHS 150x75x5* skerspjuvio kolonų deformuotos schemas bei įtempių ir deformacijų diagramos.

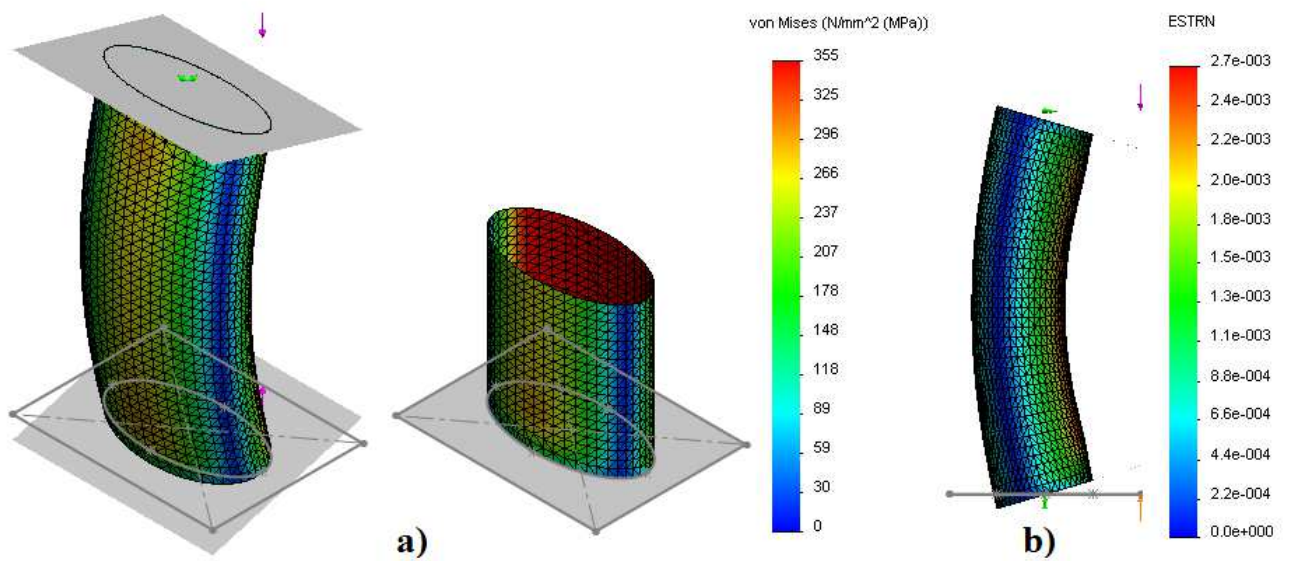
Ilgesnių (2,3 m ilgio) *EHS* kolonų bandymai pateikti 47 – 50 paveiksluose. Šiuo atveju centriškai gniuždomoje *EHS 150x75x4* skerspjuvio kolonoje (žr. 47 pav.) pasireiškia elemento bendrojo pastovumo netekimas dar prieš skerspjuviui pasiekiant plieno takumo įtempius. Šis *BE* modelis patvirtino Silvestre'o teiginį, jog kai elemento ilgis $L > 2000 \text{ mm}$, kritinė klupties forma yra bendrosios klupties pobūdžio (galioja Eulerio dėsnis) (žr. 11 pav.: 2 klupties forma) (Silvestre 2008). Pridėjus ašinę gniuždančiąją jėgą su ekscentricitetu skerspjuvyje buvo pasiekti takumo įtempiai. 48 ir 49 paveiksluose pateikta atitinkamai ekscentriškai apie stipriąją ir apie silpnąją skerspjuvio ašis gniuždomų *EHS 150x75x4* skerspjuvio kolonų deformuotos schemas bei įtempių ir poslinkių diagramos. Ašinės jėgos ir dviašio lenkimo veikiami *EHS 150x75x4* skerspjuvio kolona pateikta 50 paveiksle.



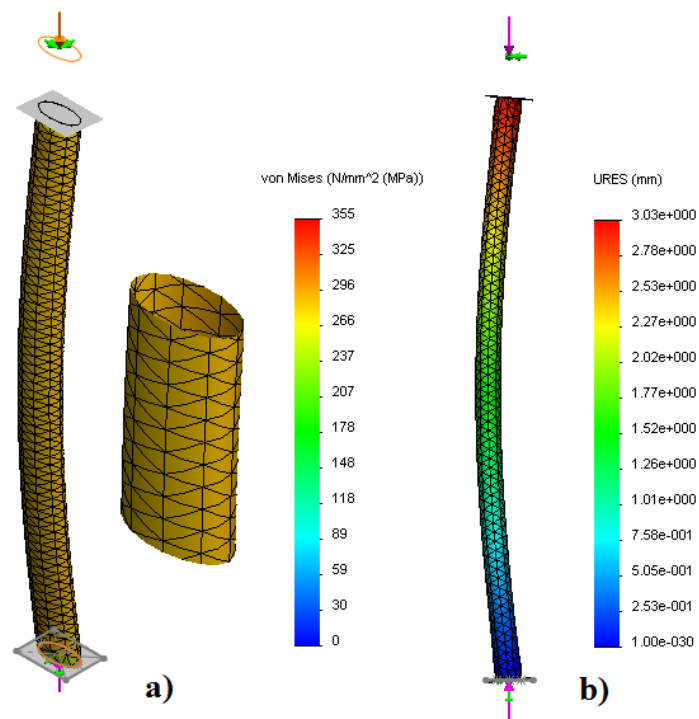
44 pav. Centriškai gniuždoma *EHS 150x75x4* skerspjuvio, 0,3 m ilgio kolona; pasiekta 517 kN kritinė apkrova; a) įtempių *von - Mises* pasiskirstymo diagrama; b) deformacijų pasiskirstymo diagrama



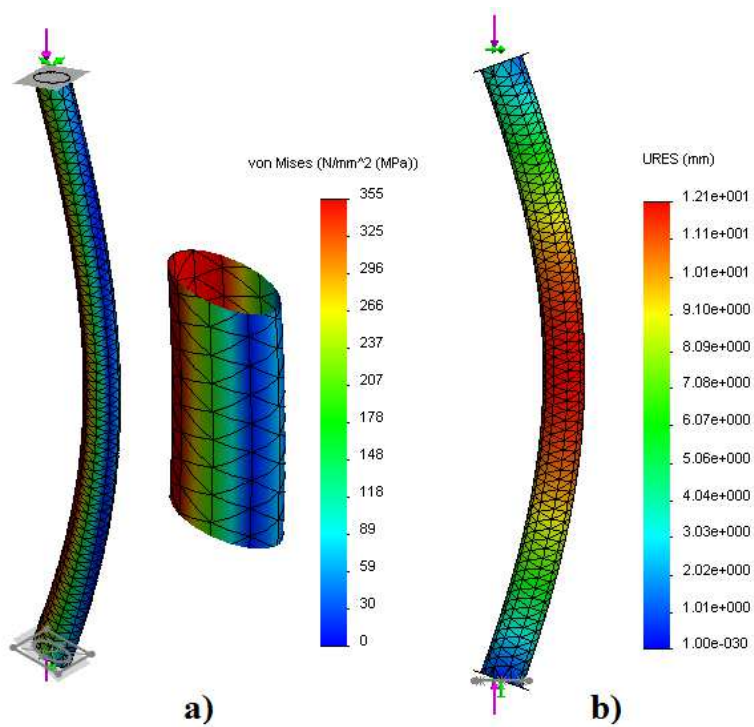
45 pav. Ekscentriškai (*MA100*) gniuždoma *EHS 150x75x5* skerspjūvio, *0,3 m* ilgio kolona; pasiekta *240 kN* kritinė apkrova; a) įtempių *von - Mises* pasiskirstymo diagrama; b) deformacijų pasiskirstymo diagrama



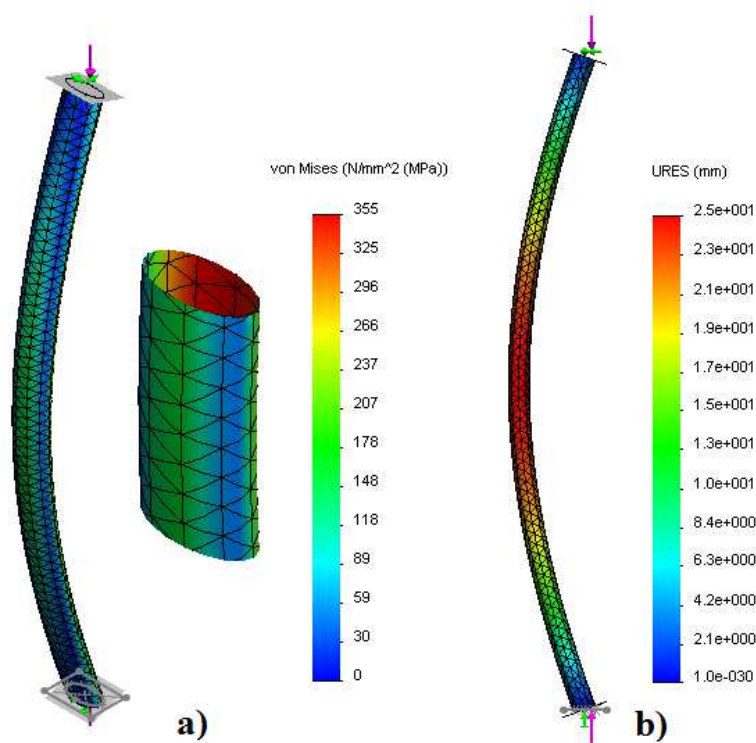
46 pav. Ekscentriškai (*MI75*) gniuždoma *EHS 150x75x5* skerspjūvio, *0,3 m* ilgio kolona; pasiekta *171 kN* kritinė apkrova; a) įtempių *von - Mises* pasiskirstymo diagrama; b) deformacijų pasiskirstymo diagrama



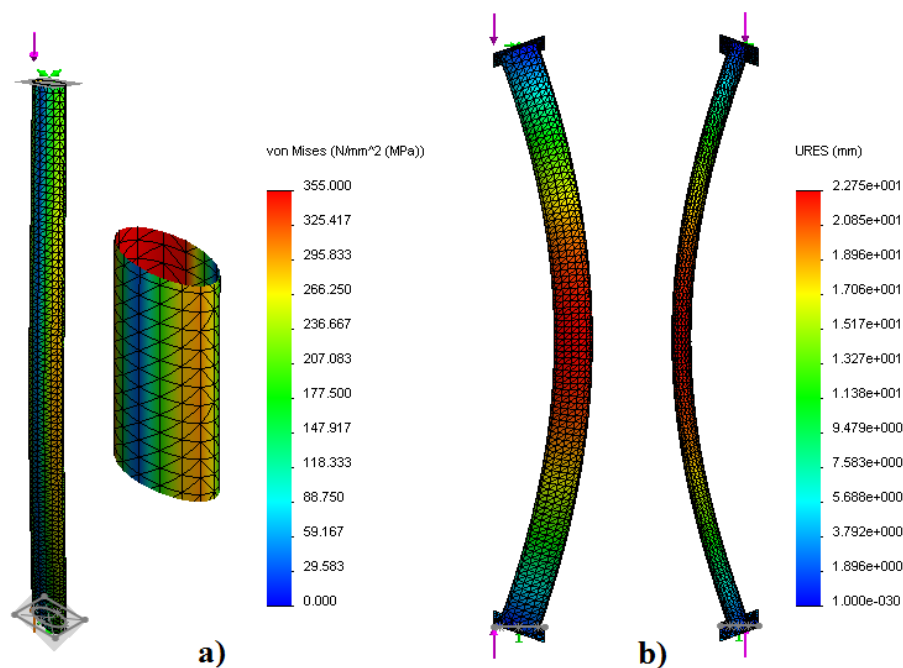
47 pav. Centriškai gniuždoma EHS 150x75x4 skerspjūvio, 2,3 m ilgio kolona; pasiekta 396 kN kritinė apkrova; a) įtempių *von - Mises* pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagrama



48 pav. Ekscentriškai (MA25) gniuždoma EHS 150x75x4 skerspjūvio, 2,3 m ilgio kolona; pasiekta 278 kN kritinė apkrova; a) įtempių *von - Mises* pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagrama

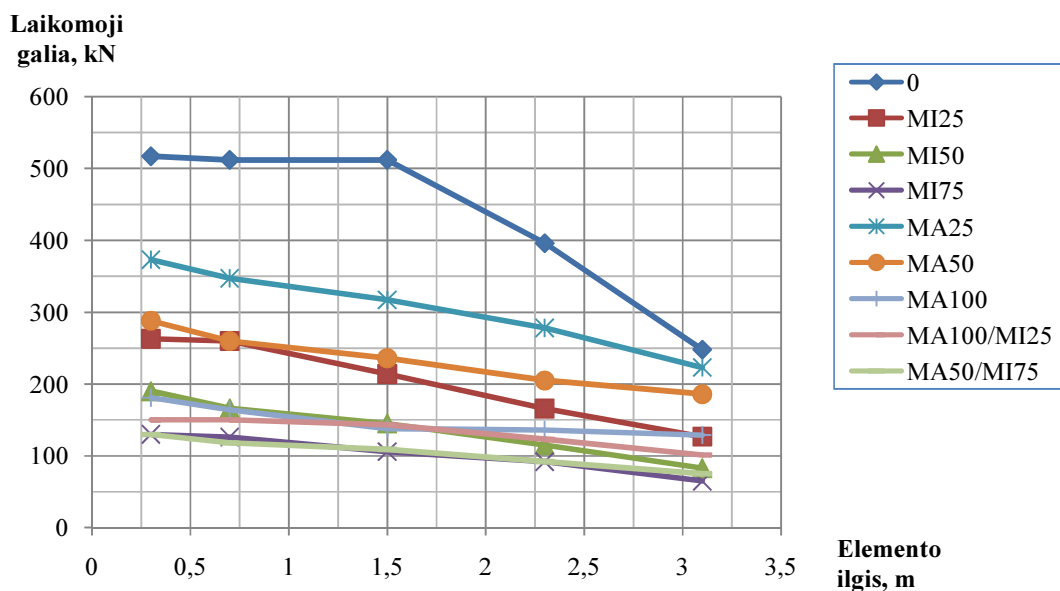


49 pav. Ekscentriškai (*MI25*) gniuždoma *EHS 150x75x4* skerspjūvio, *2,3 m* ilgio kolona; pasiekta *166 kN* kritinė apkrova; a) įtempių *von - Mises* pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagrama

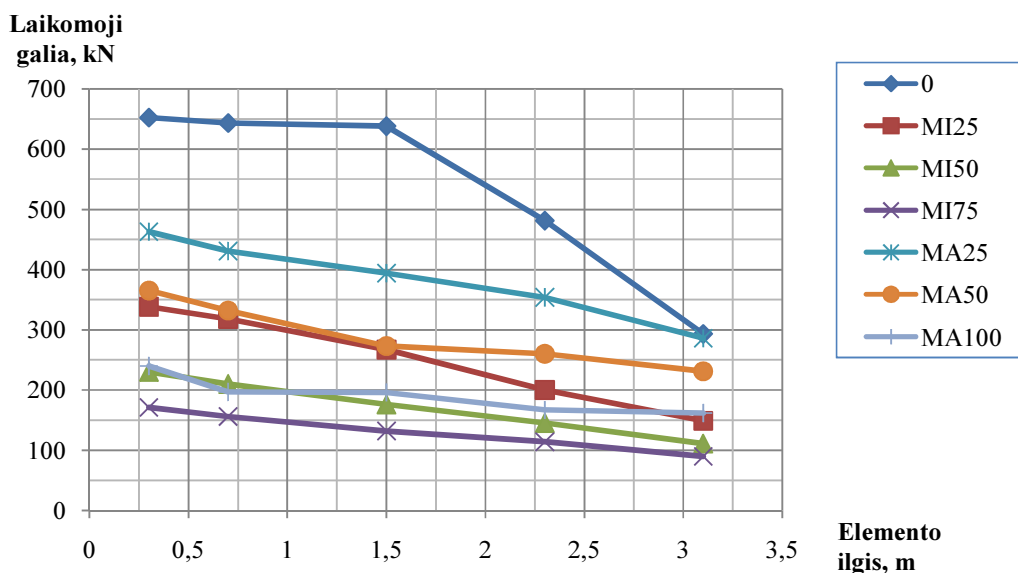


50 pav. Ekscentriškai dviem kryptimis (*MA100/MI25*) gniuždoma *EHS 150x75x4* skerspjūvio, *2,3 m* ilgio kolona; pasiekta *123 kN* kritinė apkrova; a) įtempių *von - Mises* pasiskirstymo diagrama; b) poslinkių pasiskirstymo diagramos

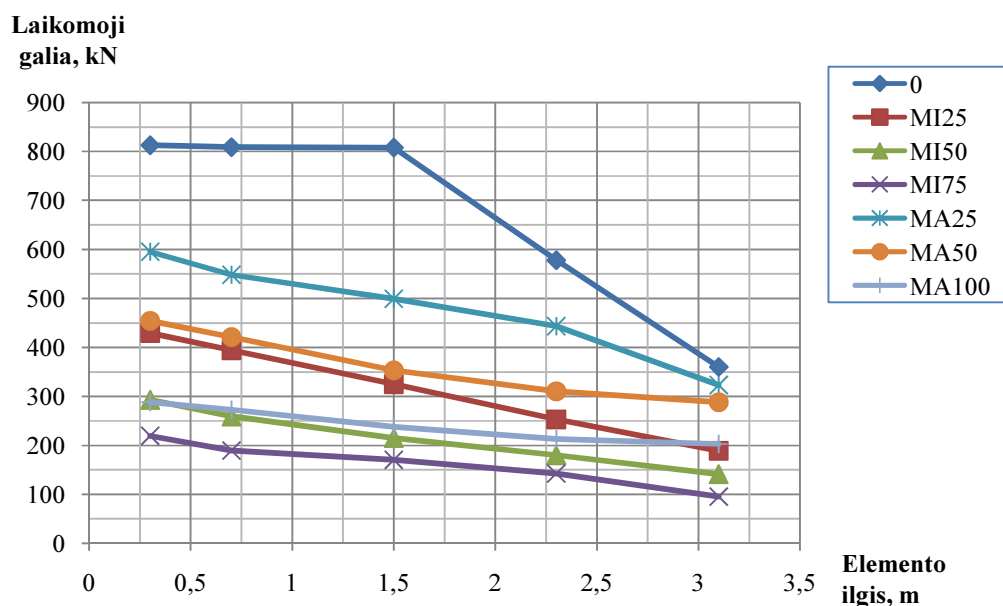
Visi *BE* analizės rezultatai pateikti A priede. Ašinės gniuždančiosios jėgos ir lenkimo momento veikiamos *EHS* skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio ir pridėtos ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto grafikai pateikti 51, 52, 53 paveiksluose: *EHS 150x75x4* skerspjūvio kolonai grafikas pateiktas 51 paveiksle, *EHS 150x75x5* skerspjūvio kolonai grafikas pateiktas 52 paveiksle ir *EHS 150x75x6.3* skerspjūvio kolonai grafikas pateiktas 53 paveiksle.



51 pav. *EHS 150x75x4* skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams, grafikas



52 pav. *EHS 150x75x5* skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams, grafikas



53 pav. *EHS 150x75x6,3* skerspjūvio kolonos laikomosios galios priklausomybės nuo kolonos ilgio, esant skirtingiems ekscentricitetams, grafikas

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateiktas *EHS* skerspjūvio, ekscentriškai gniuždomos kolonos skaitinio modelio imituojančio tikrąją kolonos fizikinę, mechaninę elgseną bei atitinkančio skaičiuojamąją schemą sudarymas baigtinių elementų programa. Modeliuojant įvertintos kolonos kraštinės sąlygos, apkrovos išdėstymas, elementų tarpusavio kontaktai, baigtinių elementų tinklas. Skaičiuojant įvertinami fizinis ir geometrinis netiesiškumai.

Baigtinių elementų modelis patikrintas ar yra tinkamas numatytiems rezultatams gauti – atlikta *BEM* validacija. Sudaryti 22 *BE* modeliai ir gauti *BE* analizės rezultatai palyginti su Chano ir Gardnerio ir Gardnerio ir kitų atliktų natūrinių bandymų rezultatais. Nustatyta, jog sudarytas *BE* modelis pakankamai gerai įvertina tikrąją *EHS* kolonos elgseną veikiant tiek centriniam, tiek ekscentriniam gniuždymui (trumpoms ekscentriškai gniuždomoms kolonomis sisteminė modelio paklaida 0,97, atsitiktinė modelio paklaida 0,04, o ilgoms centriškai gniuždomoms kolonomis reikšmės atitinkamai 1,15 ir 0,09).

Sudaryti 115 *BE* modelių atkartojančių analitinius skaičiavimus. Atlikus *BE* analizę gautos kolonų laikomosios galios, kurios kitame skyriuje lyginamos su analitiniais skaičiavimais gautomis *EHS* kolonų laikomosiomis galiomis.

5. EKSCENTRIŠKAI GNIUŽDOMO *EHS* ELEMENTO ANALITINIŲ SKAIČIAVIMŲ IR KOMPIUTERINIO MODELIAVIMO REZULTATŲ PALYGINIMAS

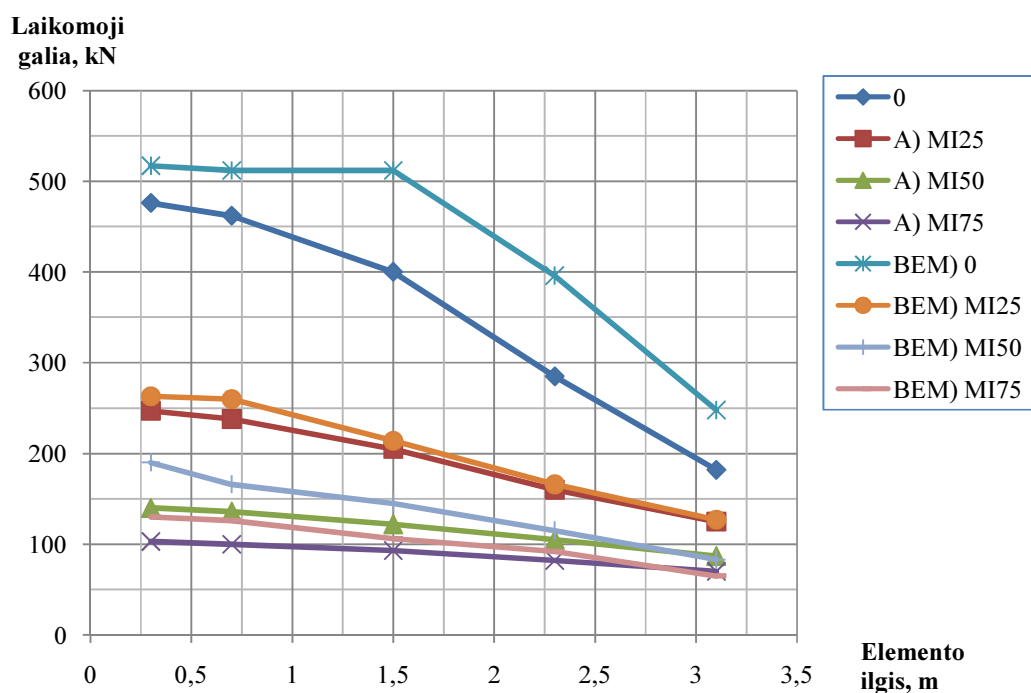
5.1. Rezultatų palyginimas

Atlikus analitinius ekscentriškai bei centriškai gniuždomos *EHS* kolonos analitinius skaičiavimus bei juos atkartojant taikant *BEM* gautų rezultatų palyginimas pateiktas 54 – 62 paveiksluose. Skaičiuojant analitiškai ekscentriškai gniuždomą aplink silpnąją skerspjūvio ašį *EHS* koloną, gautos laikomosios galios reikšmės nustatant sąveikos koeficientus pagal *A metodą* praktiškai sutapo visiems skaičiuotiems skerspjūviams (*EHS 150x75x4*, *150x75x5*, *EHS 150x75x6,3*) su laikomosios galios reikšmėmis, nustatant sąveikos koeficientus pagal *B metodą* (žr. 24, 26, 28 pav.). Taip pat, laikomosios galios reikšmės beveik sutapo ir *EHS 150x75x4* skerspjūvio kolonai esant ekscentriniam gniuždymui apie stipriąją skerspjūvio ašį – esant ekscentricitetui *MA25* laikomosios galios kreivės praktiškai sutampa (žr. 25 pav.). Esant ekscentriniam gniuždymui aplink silpnąją skerspjūvio ašį visi skaičiuoti skerspjūviai yra 3 arba 4 skerspjūvio klasės. Taip pat *EHS 150x75x4* yra 3 skerspjūvio klasės ir esant nedideliame ekscentricitetui apie stipriąją skerspjūvio ašį (*MA25*). Daroma išvada, jog skaičiuojant analitiškai 3 arba 4 klasės skerspjūvius, gauta *EHS* kolonos laikomoji galia gaunama tokia pati tiek skaičiuojant sąveikos koeficientus pagal *A*, tiek pagal *B* metodus. Šiais atvejais gautos laikomosios galios palyginamos su *BE* analizės rezultatais 54, 55, 56, 59 paveiksluose.

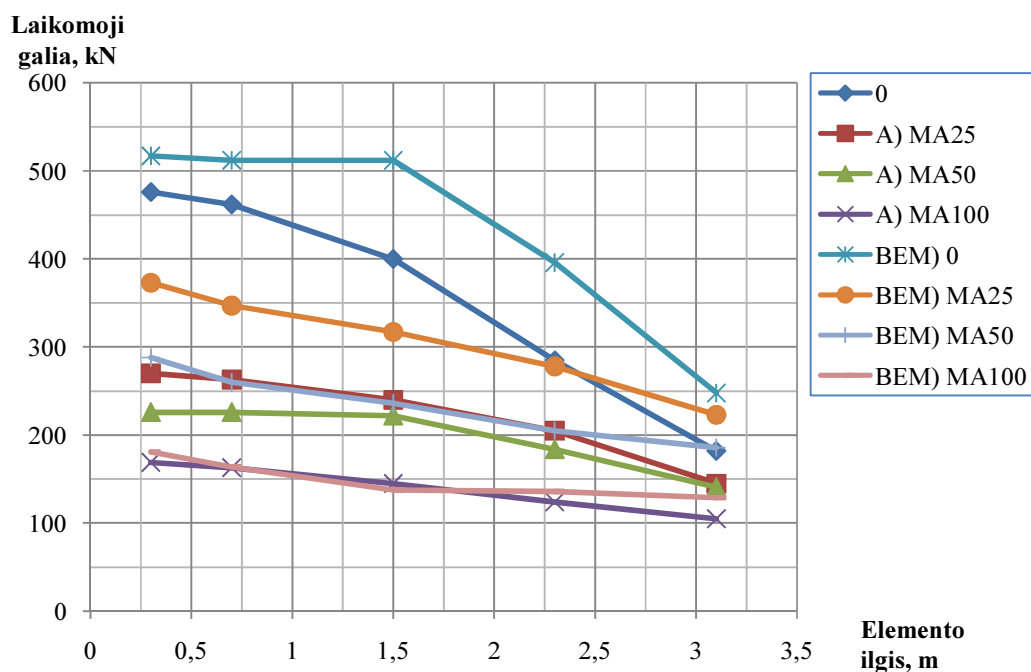
Skaičiuojant analitiškai *EHS* kolonas ekscentriškai gniuždomas aplink stipriąją skerspjūvio ašį, gautos laikomosios galios reikšmės nustatant sąveikos koeficientus pagal *A metodą* ne visiškai sutampa su laikomosios galios reikšmėmis, nustatant sąveikos koeficientus pagal *B metodą* (žr. 27, 29 pav.). Šios laikomosios galios kreivės palygintos su *BE* analizės rezultatais 57, 58, 60, 61 paveiksluose. Galima pastebėti, jog *A metodo* laikomosios galios kreivė yra šiek tiek artimesnė *BE* analizės laikomosios galios kreivei (*A metodu* sisteminė metodo paklaida 1,20, atsitiktinė metodo paklaida 0,14; *B metodu* reikšmės atitinkamai 1,22 ir 0,13 (žr. A priedą)).

Taip pat palygintos ekscentriškai gniuždomos *EHS* kolonos laikomosios galios esant dviašiam lenkimui. *BE* analizės ir analitinių skaičiavimų gautų laikomųjų galių kreivės pateiktos 62 paveiksle.

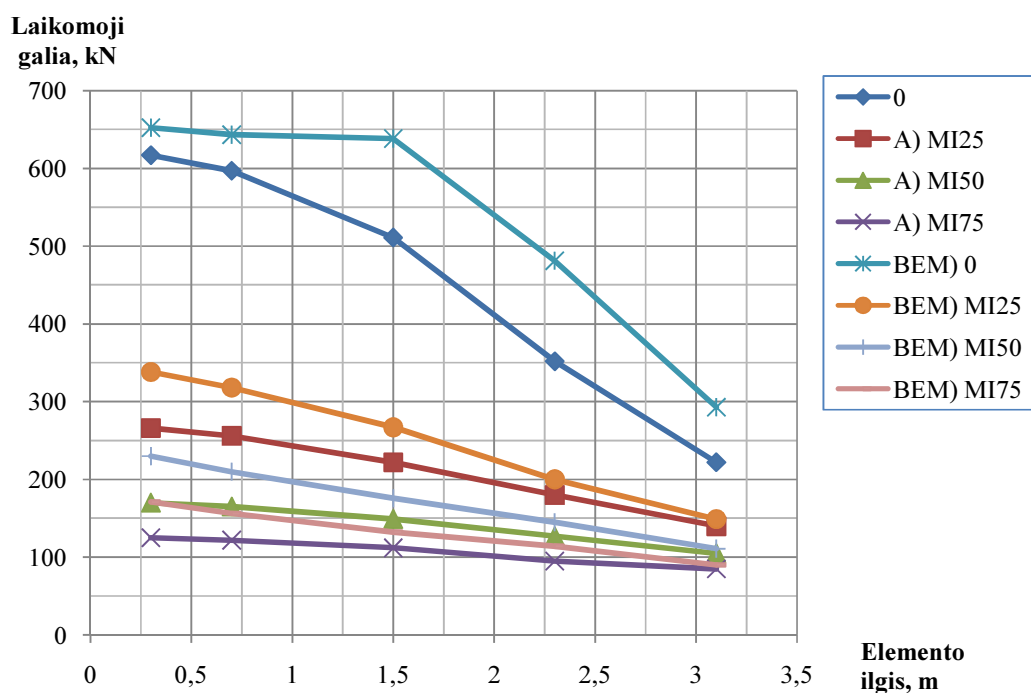
Visais kartais analitiniais skaičiavimais gauta laikomoji *EHS* kolonos galia buvo mažesnė už laikomąją galią, gauta taikant *BEM*. Didžiausia rezultatų neatitiktis yra centrinio gniuždymo atveju.



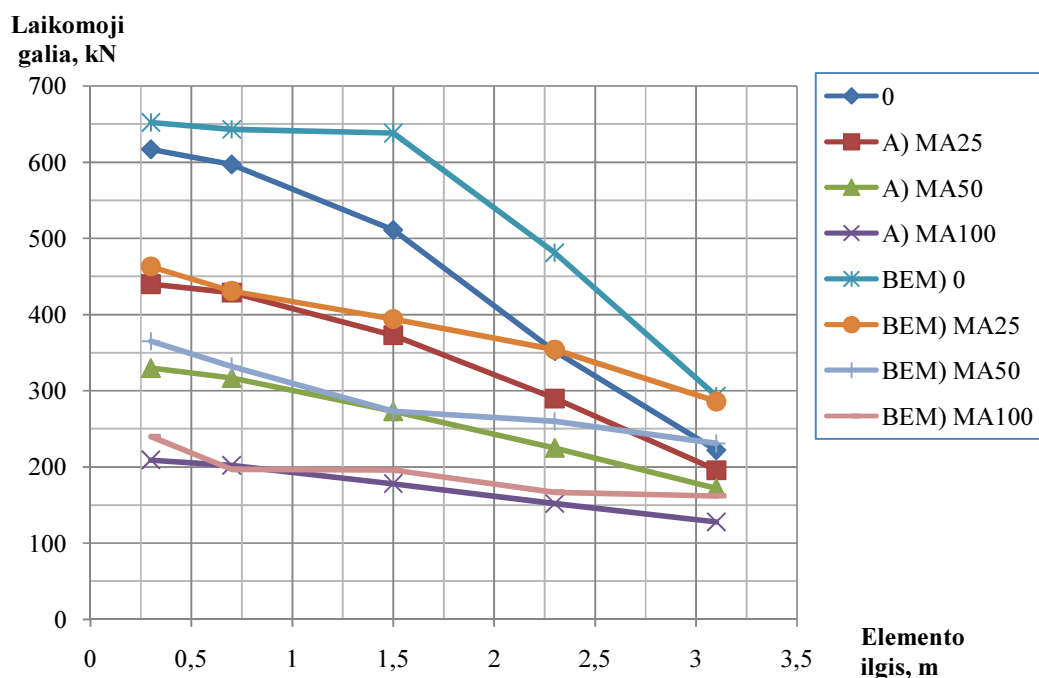
54 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *A metodą*, gautos EHS 150x75x4 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



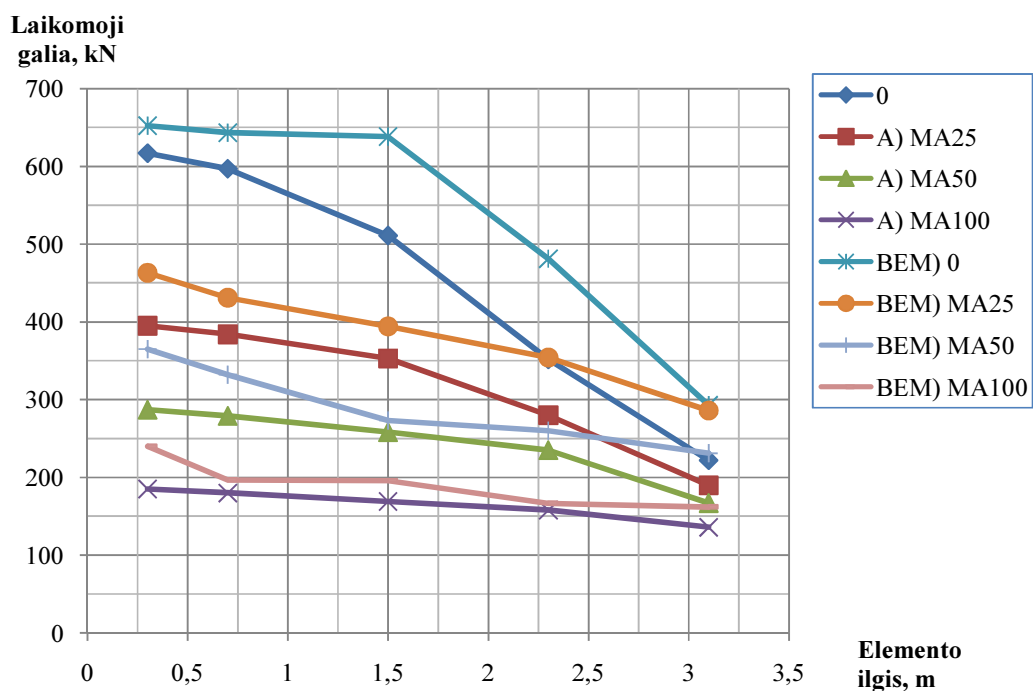
55 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *A metodą*, gautos EHS 150x75x4 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



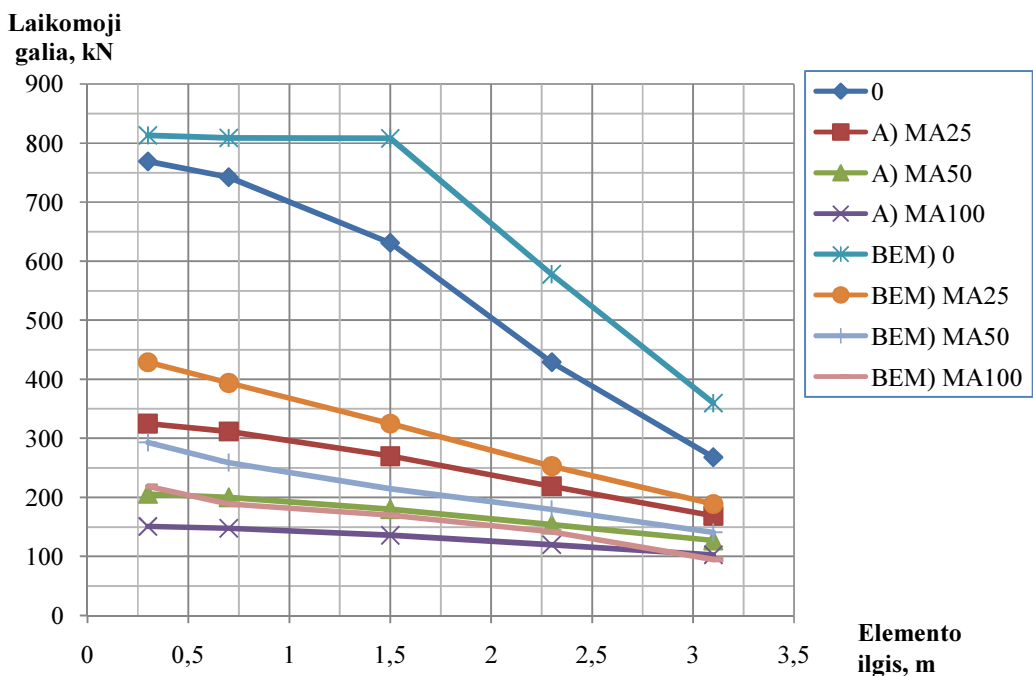
56 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *A metodą*, gautos EHS 150x75x5 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



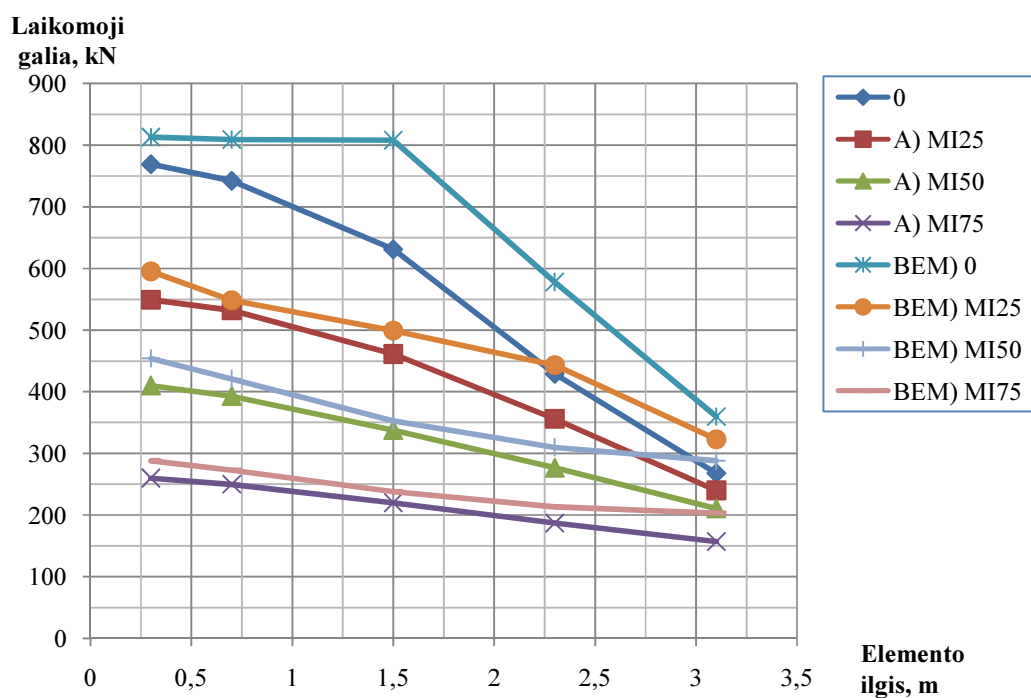
57 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *A metodą*, gautos EHS 150x75x5 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



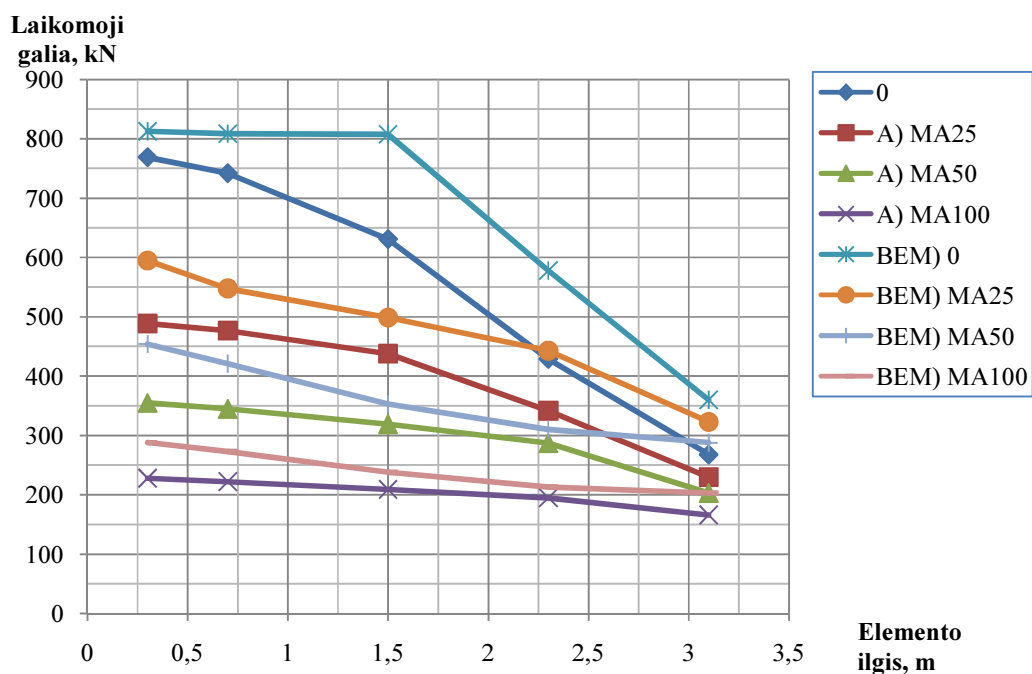
58 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *B metodą*, gautos EHS 150x75x5 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



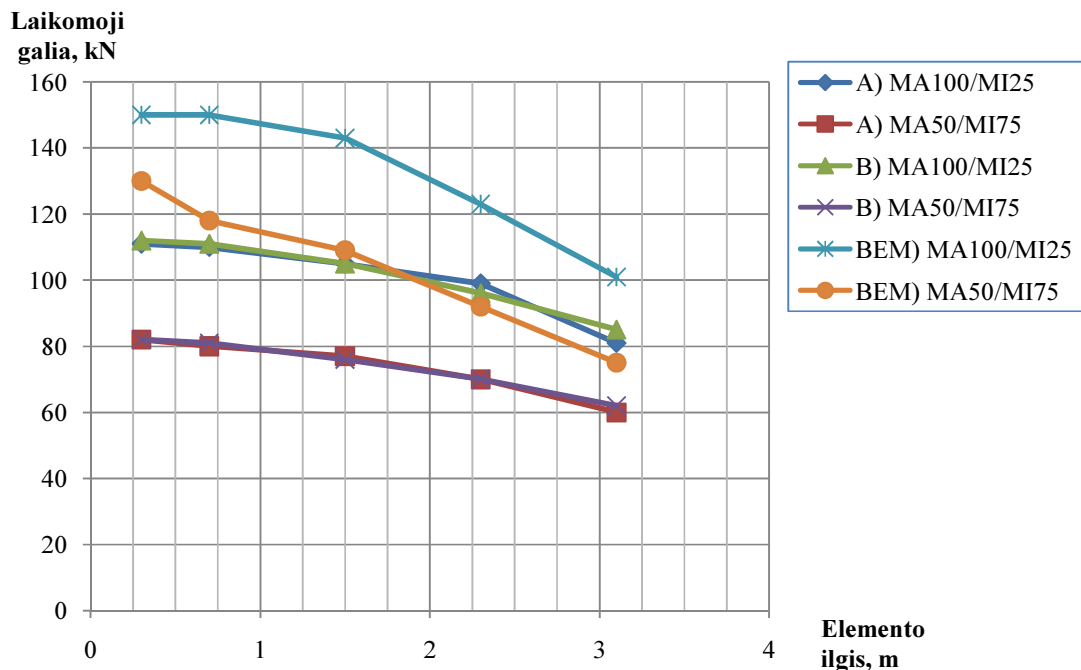
59 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *A metodą*, gautos EHS 150x75x6.3 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto silpnosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



60 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *A metodą*, gautos EHS 150x75x6.3 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



61 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *B metodą*, gautos EHS 150x75x6.3 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto stipriosios skerspjūvio ašies atžvilgiu



62 pav. BE analizės ir analitiniai skaičiavimai, taikant *B metodą*, gautos EHS 150x75x6.3 skerspjūvio kolonos laikomosios galios lyginamasis grafikas – laikomosios galios priklausomybė nuo kolonos ilgio ir ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentriciteto esant dviašiam lenkimui

5.2. Penktojo skyriaus išvados

Šiame skyriuje palyginti analitinių skaičiavimų ir BE analizės rezultatai. Palyginta laikomoji EHS kolonos galia. Kintant kolonos ilgiui bei pridėtos ašinės gniuždančiosios jėgos ekscentricitetui atlikta 115 skaičiavimų. Visais atvejais BE analize gauta EHS kolonos laikomoji galia buvo didesnė už gautą analitiniais skaičiavimais. Nustatyta, jog projektuojant EHS koloną analitiškai pagal pateiktą algoritmą, galima taikyti tiek *A*, tiek *B metodus* sąveikos koeficientų skaičiavimui, tačiau analitinių skaičiavimų rezultatai, taikant *A metodą*, yra šiek tiek artimesni BE analizės rezultatams (*A metodu* sisteminė metodo paklaida 1,20, atsitiktinė metodo paklaida 0,14; *B metodu* reikšmės atitinkamai 1,22 ir 0,13).

Remiantis atliktais tyrimais, daroma išvada, kad sudaryta ekscentriškai gniuždomo EHS elemento skaičiavimo metodika (žr. 23 pav.) yra tinkama šio elemento projektavimui. Įvertinus, jog įrašos turi būti gaunamos veikiant skaičiuotinėms apkrovoms (apkrovų dalinis patikimumo koeficientas 1,3), taikant šį algoritmą gautos kolonų galios yra vidutiniškai $1,2 \times 1,3 = 1,56$ karto didesnės už gautas taikant BEM.

IŠVADOS

Magistriniame darbe pristatytas *EHS* skerspjūvis bei pateikta išsami atliktų *EHS* tyrimų apžvalga. Remiantis literatūros analize nustatyta, jog labiausiai išplėtotas, susietas su europinėmis projektavimo normomis bei tinkamas ekscentriškai gniuždomo elemento *EHS* skerspjūvio klasei nustatyti yra ekvivalentinio *CHS* metodas. Šis metodas pasirinktas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento projektavimo algoritmui sudaryti. Literatūroje taip pat nurodyta, kokias klupumo kreives naudoti tikrinant *EHS* elemento klupumą atskirai veikiant ašiniam gniuždymui arba lenkimui. Tačiau kaip suskaičiuoti elemento laikomąją galią, kai veikia ekscentrinis gniuždymas, nėra pateikta. Magistriniame darbe pasiūlyta taikyti *EN 1993-1* pateiktas 6.61 ir 6.62 išraiškas.

Sudarytas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento skaičiavimo algoritmas ir atlikti analitiniai skaičiavimai. *EN 1993-1* 6.61 ir 6.62 sąlygos patikrintos skaičiuojant sąveikos koeficientus tiek pagal *EN 1993-1 A*, tiek pagal *B priedų* algoritmus.

Programinio paketo *Mathcad* aplinkoje sudaryta skaičiavimo programa analitiniais skaičiavimams atlikti (žr. C priedą).

Sudarytas *EHS* skerspjūvio ekscentriškai gniuždomos kolonos skaitinis modelis, imituojantis tikrąją kolonos fizikinę, mechaninę elgseną bei atitinkantis skaičiuojamąją schemą. Baigtinių elementų modelis patikrintas, ar yra tinkamas numatytiems rezultatams gauti, palyginant gautus rezultatus su kitų autorių atliktų natūrinių bandymų rezultatais. Nustatyta, jog sudarytas *BE* modelis pakankamai gerai įvertina tikrąją *EHS* kolonos elgseną veikiant tiek centriniam, tiek ekscentriniam gniuždymui (trumpoms ekscentriškai gniuždomoms kolonomis sisteminė modelio paklaida 0,97, atsitiktinė modelio paklaida 0,04, o ilgoms centriškai gniuždomoms kolonomis reikšmės atitinkamai 1,15 ir 0,09). Taikant *BEM*, atkartoti analitiniai skaičiavimai, o gauti rezultatai palyginti.

Nustatyta, jog sudarytas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento skaičiavimo algoritmas (žr. 23 pav.) yra tinkamas šio elemento projektavimui – visais atvejais *BE* analize gauta *EHS* kolonos laikomoji galia buvo didesnė už gautą analitiniais skaičiavimais.

Atliktais tyrimais įrodyta, jog projektuojant *EHS* koloną analitiškai, galima taikyti tiek *A*, tiek *B metodus* sąveikos koeficientams skaičiuoti, tačiau analitinių skaičiavimų rezultatai, taikant *A metodą*, yra šiek tiek artimesni *BE* analizės rezultatams (*A metodu* sisteminė metodo paklaida 1,20, atsitiktinė metodo paklaida 0,14; *B metodu* reikšmės atitinkamai 1,22 ir 0,13).

Nustatyta, jog sudarytas ekscentriškai gniuždomo *EHS* elemento skaičiavimo algoritmas yra tinkamas ir esant ašiniam gniuždymui bei dviašiam lenkimui.

NAUDOTA LITERATŪRA

- Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika, 612 p.
- Bortolotti, E.; Jaspart, J. P.; Pietrapertosa, C.; Nicaud, G.; Petitjean, P.; Grimault, J. P. 2003. Testing and modelling of welded joints between elliptical hollow sections. *10th International Symposium on Tubular Structures*. Madrid, Spain. Proceedings, pp. 259-264.
- Bradford, M. A.; Roufeginejad, A. 2008. Elastic local buckling of thin-walled elliptical tubes containing elastic infill material. *Interaction and Multiscale Mechanics*. Volume 1, Number 1, pp. 143-156.
- Celsius 355 elliptical sections [interaktyvus]. 2014. Tata Steel [žiūrėta 2014-04-23]. Prieiga per internetą: <http://www.tatasteelconstruction.com>.
- Chan, T. M.; Gardner, L. 2006. Experimental and numerical studies of elliptical hollow sections under axial compression and bending. *Tubular Structures XI*, pp. 163-170.
- Chan, T. M.; Gardner, L. 2007. Compressive resistance of hot-rolled elliptical hollow sections. *Engineering Structures*, Volume 30, Number 2, pp. 522-532.
- Chan, T.M.; Gardner, L. 2008. Bending strength of hot-rolled elliptical hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*. Volume 64, Number 9, pp. 971-978.
- Chan, T. M.; Gardner, L. 2009. Flexural buckling of elliptical hollow section columns. *Journal of Structural Engineering*, Volume 135, Number 5, pp. 546-557.
- Corus. 2007. Celsius Oval HSS Sizes, Properties and Design Strengths.
- EN 10210-1:2006. Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - part 1: Technical delivery conditions.
- EN 10210-2:2006. Hot finished structural hollow sections of non-alloy and fine grain steels - part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties.
- Fun is in the Details: Innovation in Steel Connections [interaktyvus]. 2014. [žiūrėta 2014-04-23]. Prieiga per internetą: <http://www.tboake.com>.
- Gardner, L.; Nethercot, D., A.; 2005. Designer's Guide to 1993-1-1 Eurocode 3: *Design of steel structures general rules and rules for buildings*. The Steel Construction Institute.
- Gardner, L.; Chan, T.M.; Wade, M. A. 2008. Shear response of elliptical hollow sections. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Structures and Buildings*. Volume 161, Number SB6, pp. 301-309.
- Gardner, L.; Chan, T.M.; Abela, J. M. 2011a. Structural behaviour of elliptical hollow sections under combined compression and uniaxial bending. *Advanced Steel Construction*. Vol. 7, No. 1, pp. 86-113.

Gardner, L.; Chan, T.M.; Abela, J. M. 2011b. Design recommendations for hot-finished elliptical hollow sections. Imperial College London

Haque, T., O. 2011. Elliptical Holo Section. T and X Connections. A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science. Graduate Department Of Civil Engineering. University of Toronto.

Kurowski, P., M. 2010. *Engineering Analysis with Soliworks Simulation 2010*. Schroff Development Corporation.

Law, K.H.; Gardner, L. 2012. Lateral instability of elliptical hollow section beams. *Engineering Structures*. Volume 37, pp 152-166.

LST EN 1993-1-1:2005. Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. Vilnius: 2005.

Lombard, M. 2010. *SolidWorks 2010 Bible*. Wiley Publishing, Inc.

Packer, J.A. 2008. Going elliptical. *Modern Steel Construction*, American Institute of Steel Construction, March 2008.

Packer, J.A.; Wardenier, J.; Choo, Y.S.; Chiew, S.P. 2009. Elliptical Steel Tubes. *Steel News and Notes*. Singapore Structural Steel Society, 25th Anniversary Issue, pp. 86-90.

Seamless vs. Welded [interaktyvus]. 2010. Pipeline magazine [žiūrėta 2014-04-23]. Prieiga per internetą: <http://www.pipelineme.com>.

Silvestre, N. 2008. Buckling behaviour of elliptical cylindrical shells and tubes under compression. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 45, Number 16, pp. 4427-4447.

SolidWorks Help [interaktyvus]. 2014. SolidWorks Web Help [žiūrėta 2014-05-06]. Prieiga per internetą: help.solidwoks.com.

Tumonis, L. 2009. Elektromagnetinės šaudyklės mechaninės elgsenos modeliavimas baigtinių elementų metodu. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika.

Ruiz-Teran, A. M.; Gardner, L. 2008. Elastic buckling of elliptical tubes. *Thin Walled Structures*. Volume 46, Number 11, pp. 1308-1318.

Theofanous, M.; Chan T.M.; Gardner, L. 2009a. Flexural behaviour of stainless steel oval hollow sections. *Thin Walled Structures*, Volume 47, pp. 776-787.

Zhu, Y.; Wilkinson, T. 2007. Finite element analysis of structural steel elliptical hollow sections in compression. University of Sydney. School of Civil Engineering. Australia. Research report No R874.

Zhao, X.L.; Packer, J.A. 2009. Tests and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns. *Thin Walled Structures*, Volume 47, pp. 617-628.

A priedas. *BE* analizės rezultatai bei palyginimas su analitinių skaičiavimų rezultatais

Eil. Nr.	Skerspjūvis	Lenkimo ašis	Ekscentri- citetas e (mm)	Ilgis L (m)	Laikomoji galia pagal <i>BEM</i> $N_{u,BEM}$ (kN)	$N_{u,A}$ (kN)	$\frac{N_{u,BEM}}{N_{u,B}}$	$N_{u,B}$ (kN)	$\frac{N_{u,BEM}}{N_{u,B}}$
1	150x75x4	-	0	0,3	517	476	1,09	476	1,09
2	150x75x4	MI	25	0,3	263	247	1,06	243	1,08
3	150x75x4	MI	50	0,3	190	140	1,36	138	1,38
4	150x75x4	MI	75	0,3	130	103	1,26	102	1,27
5	150x75x4	MA	25	0,3	373	270	1,38	267	1,40
6	150x75x4	MA	50	0,3	288	226	1,27	226	1,27
7	150x75x4	MA	100	0,3	181	169	1,07	150	1,21
8	150x75x5	-	0	0,3	652	617	1,06	617	1,06
9	150x75x5	MI	25	0,3	338	266	1,27	262	1,29
10	150x75x5	MI	50	0,3	230	170	1,35	168	1,37
11	150x75x5	MI	75	0,3	171	125	1,37	123	1,39
12	150x75x5	MA	25	0,3	463	440	1,05	395	1,17
13	150x75x5	MA	50	0,3	365	330	1,11	287	1,27
14	150x75x5	MA	100	0,3	240	209	1,15	185	1,30
15	150x75x6.3	-	0	0,3	813	769	1,06	769	1,06
16	150x75x6.3	MI	25	0,3	429	325	1,32	319	1,34
17	150x75x6.3	MI	50	0,3	293	206	1,42	203	1,44
18	150x75x6.3	MI	75	0,3	219	151	1,45	149	1,47
19	150x75x6.3	MA	25	0,3	595	549	1,08	489	1,22
20	150x75x6.3	MA	50	0,3	454	410	1,11	355	1,28
21	150x75x6.3	MA	100	0,3	288	260	1,11	228	1,26
22	150x75x4	-	0	0,7	512	462	1,11	462	1,11
23	150x75x4	MI	25	0,7	260	238	1,09	233	1,12
24	150x75x4	MI	50	0,7	166	136	1,22	133	1,25
25	150x75x4	MI	75	0,7	126	100	1,26	99	1,27
26	150x75x4	MA	25	0,7	347	263	1,32	263	1,32
27	150x75x4	MA	50	0,7	260	226	1,15	226	1,15
28	150x75x4	MA	100	0,7	164	163	1,01	146	1,12
29	150x75x5	-	0	0,7	643	597	1,08	597	1,08
30	150x75x5	MI	25	0,7	318	256	1,24	251	1,27
31	150x75x5	MI	50	0,7	210	165	1,27	162	1,30
32	150x75x5	MI	75	0,7	156	122	1,28	120	1,30
33	150x75x5	MA	25	0,7	431	429	1,00	384	1,12
34	150x75x5	MA	50	0,7	332	317	1,05	279	1,19
35	150x75x5	MA	100	0,7	197	202	0,98	180	1,09
36	150x75x6.3	-	0	0,7	809	742	1,09	742	1,09
37	150x75x6.3	MI	25	0,7	394	312	1,26	306	1,29
38	150x75x6.3	MI	50	0,7	259	200	1,30	197	1,31
39	150x75x6.3	MI	75	0,7	189	148	1,28	145	1,30
40	150x75x6.3	MA	25	0,7	548	532	1,03	477	1,15

41	150x75x6.3	MA	50	0,7	421	393	1,07	345	1,22
42	150x75x6.3	MA	100	0,7	273	250	1,09	222	1,23
43	150x75x4	-	0	1,5	512	400	1,28	400	1,28
44	150x75x4	MI	25	1,5	214	205	1,04	206	1,04
45	150x75x4	MI	50	1,5	145	122	1,19	122	1,19
46	150x75x4	MI	75	1,5	106	93	1,14	92	1,15
47	150x75x4	MA	25	1,5	317	240	1,32	248	1,28
48	150x75x4	MA	50	1,5	236	222	1,06	209	1,13
49	150x75x4	MA	100	1,5	138	145	0,95	137	1,01
50	150x75x5	-	0	1,5	638	511	1,25	511	1,25
51	150x75x5	MI	25	1,5	267	222	1,20	222	1,20
52	150x75x5	MI	50	1,5	176	149	1,18	148	1,19
53	150x75x5	MI	75	1,5	132	112	1,18	112	1,18
54	150x75x5	MA	25	1,5	394	373	1,06	353	1,12
55	150x75x5	MA	50	1,5	273	273	1,00	258	1,06
56	150x75x5	MA	100	1,5	196	178	1,10	169	1,16
57	150x75x6.3	-	0	1,5	808	631	1,28	631	1,28
58	150x75x6.3	MI	25	1,5	325	270	1,20	270	1,20
59	150x75x6.3	MI	50	1,5	215	180	1,19	179	1,20
60	150x75x6.3	MI	75	1,5	170	136	1,25	135	1,26
61	150x75x6.3	MA	25	1,5	499	461	1,08	438	1,14
62	150x75x6.3	MA	50	1,5	353	338	1,04	319	1,11
63	150x75x6.3	MA	100	1,5	238	220	1,08	209	1,14
64	150x75x4	-	0	2,3	396	285	1,39	285	1,39
65	150x75x4	MI	25	2,3	166	160	1,04	164	1,01
66	150x75x4	MI	50	2,3	115	105	1,10	103	1,12
67	150x75x4	MI	75	2,3	92	82	1,12	80	1,15
68	150x75x4	MA	25	2,3	278	205	1,36	198	1,40
69	150x75x4	MA	50	2,3	205	184	1,11	192	1,07
70	150x75x4	MA	100	2,3	136	124	1,10	128	1,06
71	150x75x5	-	0	2,3	481	352	1,37	352	1,37
72	150x75x5	MI	25	2,3	200	180	1,11	178	1,12
73	150x75x5	MI	50	2,3	145	127	1,14	125	1,16
74	150x75x5	MI	75	2,3	114	95	1,20	95	1,20
75	150x75x5	MA	25	2,3	354	290	1,22	280	1,26
76	150x75x5	MA	50	2,3	260	225	1,16	235	1,11
77	150x75x5	MA	100	2,3	167	152	1,10	158	1,06
78	150x75x6.3	-	0	2,3	578	429	1,35	429	1,35
79	150x75x6.3	MI	25	2,3	253	219	1,16	216	1,17
80	150x75x6.3	MI	50	2,3	180	154	1,17	151	1,19
801	150x75x6.3	MI	75	2,3	142	120	1,18	115	1,23
82	150x75x6.3	MA	25	2,3	443	356	1,24	342	1,30
83	150x75x6.3	MA	50	2,3	310	277	1,12	287	1,08
84	150x75x6.3	MA	100	2,3	213	187	1,14	195	1,09
85	150x75x4	-	0	3,1	248	182	1,36	182	1,36
86	150x75x4	MI	25	3,1	127	125	1,02	122	1,04
87	150x75x4	MI	50	3,1	83	87	0,95	83	1,00
88	150x75x4	MI	75	3,1	65	70	0,93	67	0,97
89	150x75x4	MA	25	3,1	223	145	1,54	141	1,58
90	150x75x4	MA	50	3,1	186	141	1,32	137	1,36
91	150x75x4	MA	100	3,1	129	105	1,23	110	1,17

92	150x75x5	-	0	3,1	293	222	1,32	222	1,32
93	150x75x5	MI	25	3,1	149	140	1,06	135	1,10
94	150x75x5	MI	50	3,1	111	105	1,06	101	1,10
95	150x75x5	MI	75	3,1	90	85	1,06	81	1,11
96	150x75x5	MA	25	3,1	286	196	1,46	190	1,51
97	150x75x5	MA	50	3,1	231	172	1,34	167	1,38
98	150x75x5	MA	100	3,1	162	128	1,27	136	1,19
99	150x75x6.3	-	0	3,1	360	268	1,34	268	1,34
100	150x75x6.3	MI	25	3,1	189	169	1,12	163	1,16
101	150x75x6.3	MI	50	3,1	141	127	1,11	121	1,17
102	150x75x6.3	MI	75	3,1	95	103	0,92	98	0,97
103	150x75x6.3	MA	25	3,1	323	240	1,35	230	1,40
104	150x75x6.3	MA	50	3,1	288	211	1,36	203	1,42
105	150x75x6.3	MA	100	3,1	203	157	1,29	166	1,22
106	150x75x4	MA/MI	100/25	0,3	150	112	1,35	111	1,34
107	150x75x4	MA/MI	100/25	0,7	150	111	1,36	110	1,35
108	150x75x4	MA/MI	100/25	1,5	143	105	1,36	105	1,36
109	150x75x4	MA/MI	100/25	2,3	123	96	1,24	99	1,28
110	150x75x4	MA/MI	100/25	3,1	101	85	1,25	81	1,19
111	150x75x4	MA/MI	50/75	0,3	130	82	1,59	82	1,59
112	150x75x4	MA/MI	50/75	0,7	118	81	1,48	80	1,46
113	150x75x4	MA/MI	50/75	1,5	109	76	1,42	77	1,43
114	150x75x4	MA/MI	50/75	2,3	92	70	1,31	70	1,31
115	150x75x4	MA/MI	50/75	3,1	75	62	1,25	60	1,21
Sisteminė metodo paklaida $\mu_{\Delta N}$							1,20		1,22
Atsitiktinė metodo paklaida $\sigma_{\Delta N}$							0,14		0,13

B priedas. Analitinių skaičiavimų rezultatai

Eil. Nr.	Skerspjuvis	Lenkimo ašis	e (mm)	Ilgis L (m)	ψ	α	Skerspjuvio klasė	χ_z	Stiprumo sąlyga	k_{yyA}	k_{yzA}	k_{zyA}	k_{zzA}	6.61 A	6.62 A	$N_{u,A}$ (kN)	k_{yyB}	k_{yzB}	k_{zyB}	k_{zzB}	6.61 B	6.62 B	$N_{u,B}$ (kN)
1	150x75x4	-	0	0,3	1,00	-	4	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	476	-	-	-	-	-	-	476
2	150x75x4	MI	25	0,3	0,00	-	4	1,00	0,98	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	247	1,03	1,04	0,82	1,04	1,00	1,00	243
3	150x75x4	MI	50	0,3	-0,33	-	3	1,00	0,98	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	140	1,01	1,02	0,81	1,02	1,00	1,00	138
4	150x75x4	MI	75	0,3	-0,50	-	3	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	103	1,01	1,02	0,81	1,02	1,00	1,00	102
5	150x75x4	MA	25	0,3	0,25	0,77	3	1,00	0,99	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	270	1,03	1,05	0,82	1,05	1,00	0,91	267
6	150x75x4	MA	50	0,3	-0,09	0,73	2	1,00	0,74	0,76	0,47	0,47	0,82	0,87	0,71	226	0,95	0,59	0,57	0,98	0,97	0,76	226
7	150x75x4	MA	100	0,3	-0,41	0,66	2	1,00	0,76	0,81	0,49	0,50	0,86	1,00	0,75	169	0,97	0,59	0,58	0,98	1,00	0,72	150
8	150x75x5	-	0	0,3	1,00	-	<4	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	617	-	-	-	-	-	-	617
9	150x75x5	MI	25	0,3	0,00	-	3	1,00	0,98	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	266	1,02	1,04	0,82	1,04	1,00	1,00	262
10	150x75x5	MI	50	0,3	-0,34	-	3	1,00	0,98	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	170	1,01	1,02	0,81	1,02	1,00	1,00	168
11	150x75x5	MI	75	0,3	-0,50	-	3	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	125	1,01	1,02	0,81	1,02	1,00	1,00	123
12	150x75x5	MA	25	0,3	0,24	0,81	2	1,00	0,86	0,66	0,42	0,40	0,73	1,00	0,89	440	0,93	0,58	0,56	0,97	1,00	0,86	395
13	150x75x5	MA	50	0,3	-0,09	0,74	2	1,00	0,77	0,72	0,45	0,44	0,79	1,00	0,82	330	0,95	0,59	0,59	0,98	1,00	0,79	287
14	150x75x5	MA	100	0,3	-0,41	0,66	1	1,00	0,76	0,80	0,49	0,49	0,85	1,00	0,74	209	0,97	0,59	0,58	0,99	1,00	0,72	185
15	150x75x6.3	-	0	0,3	1,00	-	<4	1,00	1,00	-	-	-	-	-	-	769	-	-	-	-	-	-	769
16	150x75x6.3	MI	25	0,3	-0,01	-	3	1,00	0,98	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	325	1,02	1,04	0,82	1,04	1,00	1,00	319
17	150x75x6.3	MI	50	0,3	-0,35	-	3	1,00	0,98	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	206	1,01	1,02	0,81	1,02	1,00	1,00	203
18	150x75x6.3	MI	75	0,3	-0,51	-	3	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	151	1,01	1,02	0,81	1,02	1,00	1,00	149
19	150x75x6.3	MA	25	0,3	0,24	0,81	1	1,00	0,85	0,65	0,41	0,39	0,72	1,00	0,89	549	0,93	0,58	0,56	0,97	1,00	0,85	489
20	150x75x6.3	MA	50	0,3	-0,10	0,73	1	1,00	0,77	0,71	0,44	0,43	0,77	1,00	0,82	410	0,95	0,59	0,57	0,98	1,00	0,78	355
21	150x75x6.3	MA	100	0,3	-0,42	0,66	1	1,00	0,75	0,80	0,48	0,49	0,85	1,00	0,74	260	0,97	0,59	0,58	0,99	1,00	0,72	228
22	150x75x4	-	0	0,7	1,00	-	4	0,97	0,97	-	-	-	-	-	-	462	-	-	-	-	-	-	462
23	150x75x4	MI	25	0,7	0,00	-	4	0,97	0,94	1,02	1,06	1,02	1,06	0,99	1,00	238	1,06	1,10	0,85	1,10	0,98	1,00	233
24	150x75x4	MI	50	0,7	-0,33	-	3	0,97	0,95	1,01	1,03	1,01	1,03	0,99	1,00	136	1,03	1,06	0,83	1,06	0,99	1,00	133
25	150x75x4	MI	75	0,7	-0,50	-	3	0,97	0,96	1,01	1,02	1,01	1,02	0,99	0,99	100	1,02	1,04	0,82	1,04	0,99	1,00	99
26	150x75x4	MA	25	0,7	0,25	0,76	3	0,97	0,97	1,02	1,07	1,02	1,06	0,98	1,00	263	1,06	1,11	0,85	1,11	1,00	0,92	263
27	150x75x4	MA	50	0,7	-0,09	0,73	2	0,97	0,74	0,80	0,51	0,49	0,89	0,89	0,74	226	1,00	0,64	0,60	1,07	1,00	0,80	226
28	150x75x4	MA	100	0,7	-0,41	0,66	2	0,97	0,72	0,85	0,52	0,52	0,91	1,00	0,75	163	1,00	0,63	0,60	1,04	1,00	0,73	146
29	150x75x5	-	0	0,7	1,00	-	<4	0,97	0,97	-	-	-	-	-	-	597	-	-	-	-	-	-	597
30	150x75x5	MI	25	0,7	0,00	-	3	0,97	0,94	1,02	1,05	1,02	1,05	0,99	1,00	256	1,05	1,09	0,84	1,09	0,99	1,00	251
31	150x75x5	MI	50	0,7	-0,34	-	3	0,97	0,95	1,01	1,03	1,01	1,03	0,99	1,00	165	1,03	1,06	0,83	1,06	0,99	1,00	162
32	150x75x5	MI	75	0,7	-0,50	-	3	0,97	0,96	1,01	1,02	1,01	1,02	0,99	1,00	122	1,02	1,04	0,82	1,04	0,99	1,00	120
33	150x75x5	MA	25	0,7	0,24	0,80	2	0,97	0,82	0,73	0,48	0,43	0,84	1,00	0,90	429	1,00	0,66	0,60	1,10	1,00	0,87	384
34	150x75x5	MA	50	0,7	-0,09	0,73	2	0,97	0,74	0,78	0,50	0,47	0,87	1,00	0,82	317	1,00	0,64	0,60	1,07	1,00	0,80	279
35	150x75x5	MA	100	0,7	-0,41	0,66	1	0,97	0,72	0,85	0,52	0,52	0,91	1,00	0,75	202	1,00	0,63	0,60	1,04	1,00	0,73	180

36	150x75x6.3	-	0	0,7	1,00	-	<4	0,97	0,96	-	-	-	-	-	-	742	-	-	-	-	-	-	742
37	150x75x6.3	MI	25	0,7	-0,01	-	3	0,97	0,94	1,02	1,05	1,02	1,05	0,99	1,00	312	1,05	1,04	0,84	1,09	0,99	1,00	306
38	150x75x6.3	MI	50	0,7	-0,35	-	3	0,97	0,95	1,01	1,03	1,01	1,03	0,99	1,00	200	1,03	1,06	0,83	1,06	0,99	1,00	197
39	150x75x6.3	MI	75	0,7	-0,51	-	3	0,97	0,96	1,01	1,02	1,01	1,02	1,00	1,00	148	1,02	1,04	0,82	1,04	0,99	1,00	145
40	150x75x6.3	MA	25	0,7	0,24	0,80	1	0,97	0,82	0,72	0,47	0,43	0,83	1,00	0,90	532	1,00	0,66	0,60	1,10	1,00	0,87	477
41	150x75x6.3	MA	50	0,7	-0,10	0,73	1	0,97	0,73	0,78	0,49	0,46	0,86	1,00	0,82	393	1,00	0,64	0,60	1,07	1,00	0,80	345
42	150x75x6.3	MA	100	0,7	-0,42	0,66	1	0,97	0,72	0,84	0,52	0,51	0,91	1,00	0,74	250	1,00	0,63	0,60	1,05	1,00	0,72	222
43	150x75x4	-	0	1,5	1	-	4	0,85	0,84	-	-	-	-	-	-	400	-	-	-	-	-	-	400
44	150x75x4	MI	25	1,5	0,00	-	4	0,85	0,83	1,08	1,28	1,03	1,23	0,96	1,00	205	1,11	1,22	0,89	1,22	0,94	1,00	206
45	150x75x4	MI	50	1,5	-0,33	-	3	0,85	0,87	1,04	1,15	1,02	1,12	0,98	1,00	122	1,07	1,13	0,85	1,13	0,96	1,00	122
46	150x75x4	MI	75	1,5	-0,50	-	3	0,85	0,89	1,03	1,11	1,02	1,09	0,99	1,00	93	1,05	1,10	0,84	1,10	0,97	1,00	92
47	150x75x4	MA	25	1,5	0,25	0,75	3	0,85	0,92	1,09	1,34	1,03	1,27	0,95	1,00	240	1,13	1,26	0,91	1,26	1,00	0,98	248
48	150x75x4	MA	50	1,5	-0,09	0,72	2	0,85	0,65	0,99	0,77	0,59	1,18	1,00	0,85	222	1,10	0,76	0,66	1,27	1,00	0,84	209
49	150x75x4	MA	100	1,5	-0,41	0,65	2	0,85	0,64	0,99	0,69	0,60	1,11	1,00	0,77	145	1,07	0,71	0,64	1,18	1,00	0,75	137
50	150x75x5	-	0	1,5	1,00	-	<4	0,83	0,83	-	-	-	-	-	-	511	-	-	-	-	-	-	511
51	150x75x5	MI	25	1,5	0,00	-	3	0,83	0,83	1,07	1,24	1,03	1,20	0,97	1,00	222	1,10	1,19	0,88	1,19	0,94	1,00	222
52	150x75x5	MI	50	1,5	-0,34	-	3	0,83	0,87	1,04	1,15	1,02	1,12	0,98	1,00	149	1,07	1,13	0,85	1,13	0,96	1,00	148
53	150x75x5	MI	75	1,5	-0,50	-	3	0,83	0,90	1,03	1,11	1,02	1,09	0,98	1,00	112	1,05	1,10	0,84	1,10	0,98	1,00	112
54	150x75x5	MA	25	1,5	0,24	0,78	2	0,83	0,73	0,99	0,87	0,56	1,28	1,00	0,94	373	1,14	0,83	0,68	1,37	1,00	0,93	353
55	150x75x5	MA	50	1,5	-0,09	0,72	2	0,83	0,65	0,99	0,77	0,58	1,19	1,00	0,85	273	1,10	0,76	0,66	1,27	1,00	0,84	258
56	150x75x5	MA	100	1,5	-0,41	0,65	1	0,83	0,64	0,99	0,69	0,60	1,11	1,00	0,77	178	1,07	0,71	0,64	1,18	1,00	0,76	169
57	150x75x6.3	-	0	1,5	1,00	-	<4	0,83	0,82	-	-	-	-	-	-	631	-	-	-	-	-	-	631
58	150x75x6.3	MI	25	1,5	-0,01	-	3	0,83	0,83	1,07	1,25	1,02	1,20	0,97	1,00	270	1,10	1,20	0,88	1,19	0,94	1,00	270
59	150x75x6.3	MI	50	1,5	-0,35	-	3	0,83	0,87	1,04	1,15	1,02	1,12	0,98	1,00	180	1,06	1,13	0,85	1,13	0,96	1,00	179
60	150x75x6.3	MI	75	1,5	-0,51	-	3	0,83	0,89	1,03	1,11	1,01	1,09	0,99	1,00	136	1,05	1,10	0,84	1,10	0,97	1,00	135
61	150x75x6.3	MA	25	1,5	0,24	0,78	1	0,83	0,73	0,99	0,86	0,06	1,29	1,00	0,93	461	1,14	0,83	0,68	1,39	1,00	0,93	438
62	150x75x6.3	MA	50	1,5	-0,10	0,71	1	0,83	0,64	0,99	0,76	0,57	1,19	1,00	0,84	338	1,10	0,77	0,66	1,28	1,00	0,84	319
63	150x75x6.3	MA	100	1,5	-0,42	0,65	1	0,83	0,64	0,99	0,69	0,59	1,12	1,00	0,76	220	1,07	0,71	0,64	1,18	1,00	0,76	209
64	150x75x4	-	0	2,3	1,00	-	4	0,61	0,60	-	-	-	-	-	-	285	-	-	-	-	-	-	285
65	150x75x4	MI	25	2,3	0,00	-	4	0,61	0,66	1,14	1,67	0,90	1,33	0,92	1,00	160	1,15	1,35	0,92	1,35	0,82	1,00	164
66	150x75x4	MI	50	2,3	-0,33	-	3	0,61	0,73	1,08	1,34	0,95	1,18	0,97	1,00	105	1,09	1,21	0,87	1,21	0,88	1,00	103
67	150x75x4	MI	75	2,3	-0,50	-	3	0,61	0,78	1,06	1,25	0,97	1,14	0,98	1,00	82	1,07	1,17	0,86	1,17	0,90	0,99	80
68	150x75x4	MA	25	2,3	0,25	0,71	3	0,61	0,73	1,18	2,02	0,83	1,43	0,88	1,00	205	1,18	1,41	0,94	1,41	0,85	1,00	198
69	150x75x4	MA	50	2,3	-0,09	0,70	2	0,61	0,56	1,30	1,55	0,67	1,52	1,00	0,94	184	1,20	0,92	0,72	1,53	1,00	1,00	192
70	150x75x4	MA	100	2,3	-0,41	0,64	2	0,61	0,56	1,19	1,05	0,68	1,31	1,00	0,83	124	1,13	0,81	0,68	1,35	1,00	0,86	128
71	150x75x5	-	0	2,3	1,00	-	<4	0,58	0,57	-	-	-	-	-	-	352	-	-	-	-	-	-	352
72	150x75x5	MI	25	2,3	0,00	-	3	0,58	0,67	1,12	1,58	0,91	1,27	0,94	1,00	180	1,13	1,30	0,90	1,30	0,83	1,00	178
73	150x75x5	MI	50	2,3	-0,34	-	3	0,58	0,73	1,08	1,35	0,95	1,18	0,96	1,00	127	1,09	1,21	0,87	1,21	0,88	1,00	125
74	150x75x5	MI	75	2,3	-0,50	-	3	0,58	0,78	1,06	1,25	0,97	1,13	0,97	1,00	95	1,07	1,17	0,86	1,17	0,90	1,00	95
75	150x75x5	MA	25	2,3	0,24	0,73	2	0,58	0,51	1,42	2,38	0,62	1,78	0,95	1,00	290	1,24	0,98	0,74	1,64	0,86	1,00	280
76	150x75x5	MA	50	2,3	-0,09	0,70	2	0,58	0,55	1,31	1,55	0,66	1,53	1,00	0,93	225	1,20	0,92	0,72	1,53	0,99	1,00	235
77	150x75x5	MA	100	2,3	-0,41	0,64	1	0,58	0,56	1,19	1,06	0,67	1,32	1,00	0,83	152	1,13	0,82	0,68	1,36	1,00	0,87	158
78	150x75x6.3	-	0	2,3	1,00	-	<4	0,57	0,56	-	-	-	-	-	-	429	-	-	-	-	-	-	429
79	150x75x6.3	MI	25	2,3	-0,01	-	3	0,57	0,66	1,21	1,59	0,90	1,27	0,94	1,00	219	1,13	1,30	0,90	1,30	0,82	1,00	216
80	150x75x6.3	MI	50	2,3	-0,35	-	3	0,57	0,73	1,08	1,35	0,94	1,18	0,97	1,00	154	1,09	1,21	0,87	1,21	0,87	1,00	151
801	150x75x6.3	MI	75	2,3	-0,51	-	3	0,57	0,78	1,06	1,25	0,96	1,13	0,98	1,00	120	1,07	1,17	0,86	1,17	0,91	1,00	115
82	150x75x6.3	MA	25	2,3	0,24	0,73	1	0,57	0,50	1,44	2,40	0,60	1,80	0,94	1,00	356	1,24	0,98	0,74	1,64	0,85	1,00	342

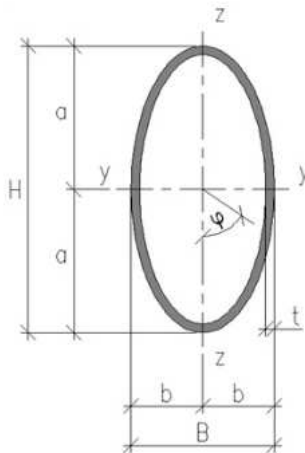
83	150x75x6.3	MA	50	2,3	-0,10	0,70	1	0,57	0,53	1,32	1,56	0,64	1,55	1,00	0,93	277	1,20	0,92	0,72	1,54	0,98	1,00	287
84	150x75x6.3	MA	100	2,3	-0,42	0,64	1	0,57	0,56	1,20	1,06	0,66	1,33	1,00	0,83	187	1,14	0,82	0,68	1,36	1,00	0,88	195
85	150x75x4	-	0	3,1	1,00	-	4	0,39	0,38	-	-	-	-	-	-	182	-	-	-	-	-	-	182
86	150x75x4	MI	25	3,1	0,00	-	4	0,39	0,49	1,17	2,22	0,68	1,28	0,88	1,00	125	1,17	1,40	0,94	1,40	0,67	1,00	122
87	150x75x4	MI	50	3,1	-0,33	-	3	0,39	0,59	1,11	1,60	0,81	1,17	0,95	1,00	87	1,12	1,27	0,89	1,27	0,76	0,99	83
88	150x75x4	MI	75	3,1	-0,50	-	3	0,39	0,65	1,09	1,43	0,86	1,13	0,96	0,92	70	1,09	1,22	0,88	1,22	0,81	0,99	67
89	150x75x4	MA	25	3,1	0,25	0,65	3	0,39	0,52	1,23	3,43	0,49	1,37	0,76	1,00	145	1,20	1,46	0,96	1,46	0,66	1,00	141
90	150x75x4	MA	50	3,1	-0,09	0,65	2	0,39	0,31	1,62	3,40	0,67	1,68	0,93	1,00	141	1,25	0,96	0,75	1,60	0,78	0,99	137
91	150x75x4	MA	100	3,1	-0,41	0,63	2	0,39	0,44	1,42	1,86	0,71	1,45	1,00	0,93	105	1,20	0,89	0,72	1,49	0,95	1,00	110
92	150x75x5	-	0	3,1	1,00	-	<4	0,37	0,36	-	-	-	-	-	-	222	-	-	-	-	-	-	222
93	150x75x5	MI	25	3,1	0,00	-	3	0,37	0,51	1,15	2,03	0,70	1,24	0,91	1,00	140	1,16	1,37	0,92	1,37	0,69	1,00	135
94	150x75x5	MI	50	3,1	-0,34	-	3	0,37	0,59	1,11	1,61	0,81	1,17	0,96	1,00	105	1,12	1,27	0,89	1,27	0,77	1,00	101
95	150x75x5	MI	75	3,1	-0,50	-	3	0,37	0,65	1,09	1,43	0,86	1,13	0,96	1,00	85	1,09	1,20	0,88	1,20	0,81	0,99	81
96	150x75x5	MA	25	3,1	0,24	0,67	1	0,37	0,27	1,73	4,72	0,59	1,78	0,76	1,00	196	1,28	1,01	0,77	1,69	0,65	1,00	190
97	150x75x5	MA	50	3,1	-0,09	0,65	1	0,37	0,30	1,64	3,52	6,53	1,70	0,93	1,00	172	1,25	0,96	0,75	1,60	0,77	1,00	167
98	150x75x5	MA	100	3,1	-0,41	0,62	1	0,37	0,42	1,43	1,86	0,70	1,47	1,00	0,93	128	1,20	0,89	0,72	1,49	0,94	1,00	136
99	150x75x6.3	-	0	3,1	1,00	-	<4	0,36	0,35	-	-	-	-	-	-	268	-	-	-	-	-	-	268
100	150x75x6.3	MI	25	3,1	-0,01	-	3	0,36	0,50	1,15	2,03	0,69	1,30	0,90	1,00	169	1,15	1,37	0,92	1,37	0,68	1,00	163
101	150x75x6.3	MI	50	3,1	-0,35	-	3	0,36	0,59	1,11	1,61	0,80	1,16	0,94	1,00	127	1,11	1,27	0,89	1,27	0,76	1,00	121
102	150x75x6.3	MI	75	3,1	-0,51	-	3	0,36	0,65	1,09	1,44	0,85	1,13	0,97	1,00	103	1,09	1,20	0,87	1,20	0,81	1,00	98
103	150x75x6.3	MA	25	3,1	0,24	0,66	1	0,36	0,26	1,74	5,05	0,55	1,80	0,76	1,00	240	1,28	1,01	0,77	1,69	0,64	1,00	230
104	150x75x6.3	MA	50	3,1	-0,10	0,64	1	0,36	0,29	1,68	3,71	0,62	1,73	0,94	1,00	211	1,25	0,96	0,75	1,61	0,76	1,00	203
105	150x75x6.3	MA	100	3,1	-0,42	0,62	1	0,36	0,41	1,45	1,89	0,68	1,49	1,00	0,93	157	1,20	0,90	0,72	1,50	0,93	1,00	166
106	150x75x4	MA/MI	100/25	0,3	-	-	2/4	1,00	0,99	1,00	1,01	1,00	1,01	1,00	1,00	112	1,01	1,02	0,81	1,02	1,00	0,87	111
107	150x75x4	MA/MI	100/25	0,7	-	-	2/4	0,97	0,98	1,01	1,03	1,01	1,03	0,96	1,00	111	1,03	1,05	0,82	1,05	1,00	0,90	110
108	150x75x4	MA/MI	100/25	1,5	-	-	2/4	0,85	0,93	1,04	1,13	1,02	1,11	0,99	1,00	105	1,06	1,11	0,85	1,11	1,00	0,92	105
109	150x75x4	MA/MI	100/25	2,3	-	-	2/4	0,61	0,88	1,08	1,31	0,96	1,17	0,97	1,00	96	1,09	1,21	0,87	1,21	0,99	1,00	99
110	150x75x4	MA/MI	100/25	3,1	-	-	2/4	0,39	0,72	1,11	1,58	0,82	1,18	0,95	1,00	85	1,12	1,27	0,89	1,27	0,86	1,00	81
111	150x75x4	MA/MI	50/75	0,3	-	-	2/3	1,00	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	82	1,01	1,01	0,81	1,01	1	0,96	82
112	150x75x4	MA/MI	50/75	0,7	-	-	2/3	0,97	0,97	1,01	1,02	1,01	1,02	0,99	1,00	81	1,02	1,03	0,82	1,03	1,00	0,96	80
113	150x75x4	MA/MI	50/75	1,5	-	-	2/3	0,85	0,93	1,03	1,09	1,01	1,07	0,99	1,00	76	1,04	1,08	0,83	1,08	1,00	0,98	77
114	150x75x4	MA/MI	50/75	2,3	-	-	2/3	0,61	0,85	1,05	1,21	0,98	1,11	0,99	1,00	70	1,06	1,15	0,85	1,15	0,96	1,00	70
115	150x75x4	MA/MI	50/75	3,1	-	-	2/3	0,39	0,73	1,08	1,36	0,88	1,12	0,98	1,00	62	1,08	1,20	0,87	1,20	0,87	1,00	60

C priedas. Analitinių skaičiavimų *Mathcad* programiniu paketu pavyzdys

Lenkimo ir ašinio gniuždymo veikimas pastovaus elipsinio tuščiaidurio skerspjūvio EHS elemento projektavimas

Skaiciavimo pavyzdys EHS 150x75x5-MA25, l=2,3 m

Duomenys projektavimui



1 pav. Elipsinis tuščiaiduris skerspjūvis (angl. EHS)

Skerspjūvio geometrinės charakteristikos:

Ilgoji ašis: $H := 0.15\text{m}$ Pusė ilgosios ašies: $a := \frac{H}{2} = 0.075\text{m}$
 Trumpoji ašis: $B := 0.075\text{m}$ Pusė trumposios ašies: $b := \frac{B}{2} = 0.038\text{m}$
 Sienelės storis: $t := 0.005\text{m}$

Skerspjūvio plotas skaičiuojamas pagal Chaną ir Gardnerį (Chan, Gardner 2007):

$$a_m := \frac{2a - t}{2} \quad b_m := \frac{2b - t}{2} \quad h_m := \frac{(a_m - b_m)^2}{(a_m + b_m)^2} \quad P := \pi \cdot (a_m + b_m) \cdot \left(1 + \frac{3h_m}{10 + \sqrt{4 - 3h_m}} \right) = 0.348\text{m}$$

$$A := P \cdot t = 1.74 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

Skerspjūvio inercijos spinduliai, inercijos momentai ir sukamoji inercijos konstanta skaičiuojami pagal EN 10210-2:

Inercijos momentas apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį:

$$I_y := \frac{\pi}{64} [B \cdot H^3 - (B - 2t) \cdot (H - 2t)^3] = 3.67 \times 10^{-6} \text{m}^4$$

Inercijos momentas apie silpnąją (z-z) skerspjūvio ašį:

$$I_z := \frac{\pi}{64} [B^3 \cdot H - (B - 2t)^3 \cdot (H - 2t)] = 1.219 \times 10^{-6} \text{m}^4$$

Inercijos spinduliai atitinkamai apie stipriąją (y-y) ir apie silpnąją (z-z) skerspjūvio ašis:

$$i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 0.046\text{m} \quad i_z := \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 0.026\text{m}$$

Sukamoji inercijos konstanta:

$$U := \frac{\pi}{2} (H + B - 2t) \left[1 + 0.25 \left(\frac{H - B}{H + B - 2t} \right)^2 \right] = 0.348\text{m} \quad A_m := \frac{\pi \cdot (H - t) \cdot (B - t)}{4} = 7.972 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$I_t := \frac{4 \cdot A_m^2 \cdot t}{U} + \frac{U \cdot t^3}{3} = 3.667 \times 10^{-6} \text{m}^4$$

Skerspjūvio atsparumo momentai skaičiuojamas pagal Chaną ir Gardnerį (Chan, Gardner 2008):

Tamprūs atsparumo momentas apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį:

$$W_{ely} := \frac{4 \cdot a_m^3 \cdot t}{a} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos(\phi))^2 \cdot \sqrt{(\sin(\phi))^2 + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cdot (\cos(\phi))^2} d\phi = 5.082 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

Tamprūs atsparumo momentas apie silpnąją (z-z) skerspjūvio ašį:

$$W_{elz} := \frac{4 \cdot b_m^2 \cdot a_m \cdot t}{b} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin(\phi))^2 \cdot \sqrt{(\sin(\phi))^2 + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cdot (\cos(\phi))^2} d\phi = 3.316 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

Plastinis atsparumo momentas apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį:

$$W_{ply} := 4 \cdot a_m^2 \cdot t \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\cos(\phi)) \cdot \sqrt{(\sin(\phi))^2 + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cdot (\cos(\phi))^2} d\phi = 7.155 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

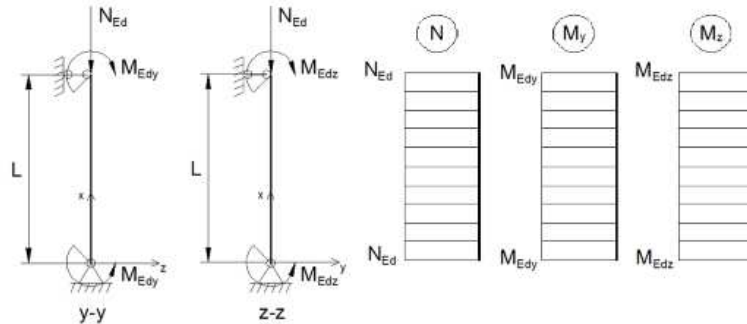
Plastinis atsparumo momentas apie silpnąją (z-z) skerspjūvio ašį:

$$W_{plz} := 4 \cdot b_m \cdot a_m \cdot t \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\sin(\phi)) \cdot \sqrt{(\sin(\phi))^2 + \frac{b_m^2}{a_m^2} \cdot (\cos(\phi))^2} d\phi = 4.317 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

Plieno mechaninės charakteristikos:

Plieno stipris esant plieno storii iki 40 mm: $f_y := 355\text{MPa}$ (LST EN 1993-1-1:2005, 3.1 lentelė)
 Dalinis koeficientas skerspjūvio laikomajai galiai: $\gamma_{M0} := 1.0$ (LST EN 1993-1-1:2005, 6.1 punktas)
 Dalinis koeficientas klupumo laikomajai galiai: $\gamma_{M1} := 1.0$ (LST EN 1993-1-1:2005, 6.1 punktas)
 Tamprumo modulis: $E := 210\text{GPa}$ (LST EN 1993-1-1:2005, 3.2.6 punktas)
 Šlyties modulis: $G := 81\text{GPa}$ (LST EN 1993-1-1:2005, 3.2.6 punktas)

Skačiuojamoji schema:



2 pav. Skačiuojamoji schema ir įrašų diagramos

Elemento ilgis: $L := 2.3m$

Įtvirtinimo sąlygų koeficientas apie stipriąją (x-x) skerspjūvio ašį: $\mu_y := 1$

Įtvirtinimo sąlygų koeficientas apie silpnąją (y-y) skerspjūvio ašį: $\mu_z := 1$

Elemento skaičiuojamieji ilgiai:

$$L_{crY} := L \cdot \mu_y = 2.3m$$

$$L_{crZ} := L \cdot \mu_z = 2.3m$$

Veikiančios įrašos:

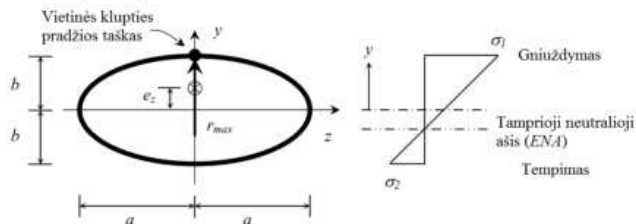
Skačiuojamoji ašinė jėga: $N_{Ed} := 235kN$ Ekscentricitetai: $e_y := 0.05m$ $e_z := 0m$

Skačiuojamasis lenkimo momentas apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį: $M_{Edy} := N_{Ed} \cdot e_y = 11.75 \cdot kN \cdot m$

Skačiuojamasis lenkimo momentas apie silpnąją (z-z) skerspjūvio ašį: $M_{Edz} := N_{Ed} \cdot e_z = 0 \cdot kN \cdot m$

Skerspjūvio klasės nustatymas

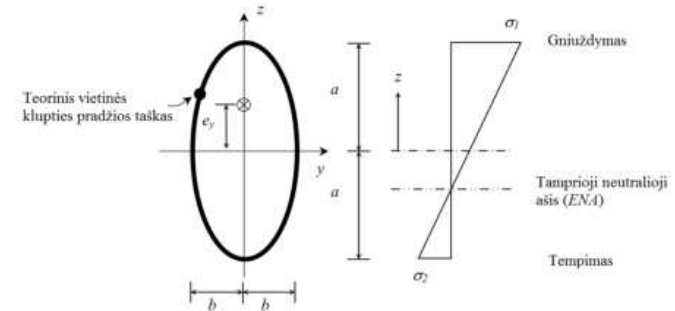
Ekvivalentinis skersmuo esant ašiniam gniuždymui ir lenkimui apie stipriąją (y-y) EHS skerspjūvio ašį:



3 pav. EHS skerspjūvis veikiant gniuždymui ir lenkimui apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį

$$D_{e.mi} := \frac{H^2}{B} = 0.3m$$

Ekvivalentinis skersmuo esant ašiniam gniuždymui ir lenkimui apie stipriąją (y-y) EHS skerspjūvio ašį:



4 pav. EHS skerspjūvis veikiant gniuždymui ir lenkimui apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį

$$D_{e.ma.e} = D_{e.b} + (D_{e.c} - D_{e.b}) \cdot \left(\frac{\psi + 1}{2} \right)$$

$$D_{e.ma.p} = D_{e.b} + (D_{e.c} - D_{e.b}) \cdot (2 \cdot \alpha - 1)$$

Ekvivalentinis elipsinio skerspjūvio skersmuo kai EHS skerspjūvis veikiamas tik gniuždymo:

$$D_{e.c} := H \cdot \left[1 + \left[1 - 2.3 \cdot \left(\frac{t}{H} \right)^{0.6} \right] \cdot \left(\frac{H}{B} - 1 \right) \right] = 0.255m$$

Ekvivalentinis elipsinio skerspjūvio skersmuo kai EHS skerspjūvis veikiamas tik lenkimo:

$$D_{e.b} := \begin{cases} 0.4 \cdot \frac{H^2}{B} & \text{if } \frac{H}{B} > 1.357 \\ \frac{B^2}{H} & \text{if } \frac{H}{B} \leq 1.357 \end{cases}$$

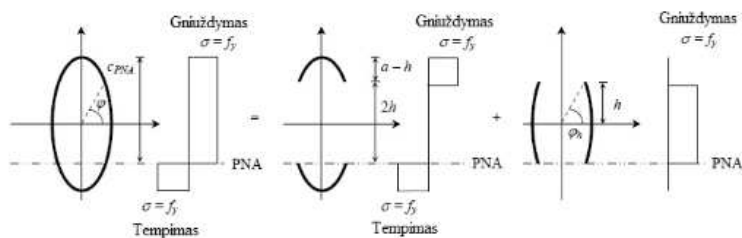
$$D_{e.b} = 0.12m$$

Įtempių pasiskirstymo plastinėje stadijoje koeficiento α skaičiavimas:

$$a_{m2} := a - \frac{t}{2} = 0.073m$$

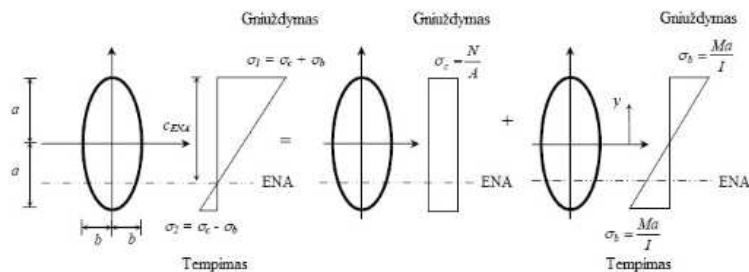
$$A_1 := \frac{N_{Ed}}{4 \cdot a_{m2} \cdot t \cdot f_y} = 0.457 \quad \varphi_h := \frac{\pi}{2} \cdot \left(0.25 \cdot A_1^3 - 0.72 \cdot A_1^2 + 1.33 \cdot A_1 \right) = 0.755$$

$$\alpha := \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \frac{\sin(\varphi_h)}{1 + \left(\frac{a}{b} - 1 \right) \cdot \cos(\varphi_h)} \right] = 0.698$$



5 pav. Gniuždymo ir lenkimo apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį įtempių pasiskirstymas plastinėje stadijoje

Įtempių pasiskirstymo tamproje stadijoje koeficiento ψ skaičiavimas:



6 pav. Gniuždymo ir lenkimo apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį įtempių pasiskirstymas tamproje stadijoje

Įtempių pasiskirstymas profiliuoties skerspjūvyje veikiant gniuždomai jėgai:

$$\sigma_N := \frac{N_{Ed}}{A} = 135 \text{ MPa}$$

Įtempių pasiskirstymas profiliuoties skerspjūvyje veikiant momentui:

$$\sigma_{Mx} := \frac{M_{Edy}}{W_{ply}} = 164 \text{ MPa} \quad \sigma_{My} := \frac{M_{Edz}}{W_{plz}} = 0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{1y} := \sigma_N + \sigma_{Mx} = 299 \text{ MPa} \quad \sigma_{1z} := \sigma_N + \sigma_{My} = 135 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{2y} := \sigma_N - \sigma_{Mx} = -29 \text{ MPa} \quad \sigma_{2z} := \sigma_N - \sigma_{My} = 135 \text{ MPa}$$

Įtempių pasiskirstymo tamproje stadijoje koeficientas:

$$\psi_y := \frac{\sigma_{2y}}{\sigma_{1y}} = -0.098 \quad \psi_z := \frac{\sigma_{2z}}{\sigma_{1z}} = 1$$

Ekvivalentinis skersmuo kai lenkimo momentas veikia apie stipriąją (y-y) EHS skerspjūvio ašį plastinėje stadijoje:

$$D_{e.ma.p} := D_{e.b} + (D_{e.c} - D_{e.b}) \cdot (2 - \alpha - 1) = 0.174 \text{ m}$$

Ekvivalentinis skersmuo kai lenkimo momentas veikia apie stipriąją (y-y) EHS skerspjūvio ašį tamproje stadijoje:

$$D_{e.ma.e} := D_{e.b} + (D_{e.c} - D_{e.b}) \cdot \left(\frac{\psi_y + 1}{2} \right) = 0.181 \text{ m}$$

Nuo f_y priklausantis koeficientas:

$$f_{y0} := 235 \text{ MPa}$$

$$\epsilon := \sqrt{\frac{f_{y0}}{f_y}} = 0.814$$

Lenkimo momentas veikia apie stipriąją (y-y) skerspjūvio ašį

Lenkimo momentas veikia apie silpnąją (z-z) skerspjūvio ašį

$$A_2 := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{D_{e.ma.p}}{t} \leq 50 \cdot \epsilon^2 \\ 2 & \text{if } 50 \cdot \epsilon^2 < \frac{D_{e.ma.p}}{t} \leq 70 \cdot \epsilon^2 \\ 3 & \text{if } 70 \cdot \epsilon^2 < \frac{D_{e.ma.p}}{t} \leq \frac{2520 \cdot \epsilon^2}{5 \cdot \psi_y + 23} \\ 4 & \text{if } \frac{D_{e.ma.p}}{t} > \frac{2520 \cdot \epsilon^2}{5 \cdot \psi_y + 23} \end{cases}$$

$$A_3 := \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{D_{e.mi}}{t} \leq 50 \cdot \epsilon^2 \\ 2 & \text{if } 50 \cdot \epsilon^2 < \frac{D_{e.mi}}{t} \leq 70 \cdot \epsilon^2 \\ 3 & \text{if } 70 \cdot \epsilon^2 < \frac{D_{e.mi}}{t} \leq \frac{2520 \cdot \epsilon^2}{5 \cdot \psi_z + 23} \\ 4 & \text{if } \frac{D_{e.mi}}{t} > \frac{2520 \cdot \epsilon^2}{5 \cdot \psi_z + 23} \end{cases}$$

$A_2 = 2$ skerspjūvio klasė

$A_3 = 4$ skerspjūvio klasė

Didesnioji skerspjūvio klasė:

$$A_{23} := \begin{cases} A_2 & \text{if } A_2 \geq A_3 \\ A_3 & \text{otherwise} \end{cases} \quad A_{23} = 4 \text{ skerspjūvio klasė}$$

Skerspjūvio klasė atitinkamai įvedus vienašį arba dviašį lenkimą:

$$A_4 := \begin{cases} A_{23} & \text{if } \begin{cases} e_y \neq 0 \\ e_z \neq 0 \end{cases} \\ A_2 & \text{if } e_z = 0 \\ A_3 & \text{if } e_y = 0 \end{cases} \quad A_4 = 2 \text{ skerspjūvio klasė}$$

Stiprumo skaičiavimas

Skaičiuotinė ašinė gniuždomoji galia:

$$N_{c.Rd} := A \cdot f_y = 617.835 \text{ kN}$$

Plastinė lenkiamoji galia apie stipriąją (y-y) EHS skerspjūvio ašį:

$$M_{pl.y.Rd} := W_{ply} \cdot f_y = 25.399 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Plastinė lenkiamoji galia apie silpnąją (z-z) EHS skerspjūvio ašį:

$$M_{pl.z.Rd} := W_{plz} \cdot f_y = 15.324 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Tamprioji lenkiamoji galia apie stipriąją (y-y) EHS skerspjūvio ašį:

$$M_{el,y,Rd} := W_{ely} \cdot f_y = 18.043 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Tamprioji lenkiamoji galia apie silpnąją (z-z) EHS skerspjūvio ašį:

$$M_{el,z,Rd} := W_{elz} \cdot f_y = 11.773 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Skaičiuotinė ašinė gniuždomoji galia apskaičiuota remiantis efektyviaisiais parametrais:

$$A_{eff} := A \cdot \left(\frac{90}{\frac{D_{e,c}}{t} \cdot f_y} \right)^{0.5} = 1.88 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2 \quad N_{c,eff,Rd} := A_{eff} \cdot f_y = 667.547 \cdot \text{kN}$$

Tamprioji lenkiamoji galia apie stipriąją (y-y) EHS skerspjūvio ašį apskaičiuota remiantis efektyviaisiais skerspjūvio parametrais:

$$W_{eff,y} := W_{ely} \cdot \left(\frac{140}{\frac{D_{e,b}}{t} \cdot f_y} \right)^{0.25} = 7.125 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^3 \quad M_{eff,y,Rd} := W_{eff,y} \cdot f_y = 25.293 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Tamprioji lenkiamoji galia apie silpnąją (z-z) EHS skerspjūvio ašį apskaičiuota remiantis efektyviaisiais skerspjūvio parametrais:

$$W_{eff,z} := W_{elz} \cdot \left(\frac{140}{\frac{D_{e,b}}{t} \cdot f_y} \right)^{0.25} = 4.649 \times 10^{-5} \cdot \text{m}^3$$

$$M_{eff,z,Rd} := W_{eff,z} \cdot f_y = 16.503 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{c,y,Rd} := \begin{cases} M_{pl,y,Rd} & \text{if } A_2 = 1 \\ M_{pl,y,Rd} & \text{if } A_2 = 2 \\ M_{el,y,Rd} & \text{if } A_2 = 3 \\ M_{eff,y,Rd} & \text{if } A_2 = 4 \end{cases} \quad M_{c,z,Rd} := \begin{cases} M_{pl,z,Rd} & \text{if } A_3 = 1 \\ M_{pl,z,Rd} & \text{if } A_3 = 2 \\ M_{el,z,Rd} & \text{if } A_3 = 3 \\ M_{eff,z,Rd} & \text{if } A_3 = 4 \end{cases}$$

Stiprumo sąlyga kai veikia gniuždymas ir lenkimo momentas:

$$A_5 := \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^{1.75} - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^{3.5} + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{c,y,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{M_{Edz}}{M_{c,z,Rd}} \right)^2 & \text{if } A_4 = 1 \\ 2 \cdot \left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^{1.75} - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right)^{3.5} + \left(\frac{M_{Edy}}{M_{c,y,Rd}} \right)^2 + \left(\frac{M_{Edz}}{M_{c,z,Rd}} \right)^2 & \text{if } A_4 = 2 \\ \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Edy}}{M_{c,y,Rd}} + \frac{M_{Edz}}{M_{c,z,Rd}} & \text{if } A_4 = 3 \\ \frac{N_{Ed}}{N_{c,eff,Rd}} + \frac{M_{Edy}}{M_{c,y,Rd}} + \frac{M_{Edz}}{M_{c,z,Rd}} & \text{if } A_4 = 4 \end{cases}$$

$$A_5 = 0.549$$

$$A_6 := \begin{cases} \text{"stiprumo sąlyga tenkinama"} & \text{if } A_5 \leq 1 \\ \text{"stiprumo sąlyga netenkinama"} & \text{if } A_5 > 1 \end{cases}$$

$$A_6 = \text{"stiprumo sąlyga tenkinama"}$$

Klumpumo skaičiavimas

Klumpumo koeficiento apie stipriąją ašį (y-y) skaičiavimas. Gniuždymas:

Tamprioji kritinė jėga:

Sąlyginis liaunis:

$$N_{cry} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cry}^2} = 1437.9 \cdot \text{kN} \quad \lambda_{sy} := \begin{cases} \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cry}}} & \text{if } A_4 = 1 \\ \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cry}}} & \text{if } A_4 = 2 \\ \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cry}}} & \text{if } A_4 = 3 \\ \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{cry}}} & \text{if } A_4 = 4 \end{cases} \quad \lambda_{sy} = 0.655$$

Nuokrypos koeficientas pagal klumpumo kreivę (a):

$$\alpha_y := 0.2$$

Funkcija:

$$\Phi_y := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_y (\lambda_{sy} - 0.2) + \lambda_{sy}^2 \right] = 0.763$$

Klumpumo koeficientas:

$$\chi_y := \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \lambda_{sy}^2}} = 0.868 \quad \chi_y := \begin{cases} \chi_y & \text{if } \chi_y \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \chi_y = 0.868$$

Klumpumo koeficiento apie silpnąją ašį (z-z) skaičiavimas. Gniuždymas:

Tamprioji kritinė jėga:

Sąlyginis liaunis:

$$N_{crz} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{crz}^2} = 477.6 \cdot \text{kN} \quad \lambda_{sz} := \begin{cases} \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crz}}} & \text{if } A_4 = 1 \\ \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crz}}} & \text{if } A_4 = 2 \\ \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crz}}} & \text{if } A_4 = 3 \\ \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{crz}}} & \text{if } A_4 = 4 \end{cases} \quad \lambda_{sz} = 1.137$$

Nuokrypos koeficientas pagal klumpumo kreivę (a):

$$\alpha_z := 0.2$$

Funkcija:

$$\Phi_z := 0.5 \left[1 + \alpha_z (\lambda_{sz} - 0.2) + \lambda_{sz}^2 \right] = 1.245$$

Klumpumo koeficientas:

$$\chi_z := \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \lambda_{sz}^2}} = 0.571 \quad \chi_z := \begin{cases} \chi_z & \text{if } \chi_z \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \chi_z = 0.571$$

Skersinio-sukamojo klumpumo koeficiento skaičiavimas. Lenkimas:

Tampriojo kritinio skersinio sukamojo klumpumo koeficiento skaičiavimas:

Koeficientas įvertinantis momentų pasiskirstymą per strypo ilgį: $C_1 := 1$

Atstumas tarp šoninių įtvirčių: $L_{cr} := L_{crz} = 2.3 \text{ m}$

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2} \cdot \sqrt{\frac{L_{cr}^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} = 376.639 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Sąlyginis liaunis:

$$\lambda_{LTs} := \begin{cases} \sqrt{\frac{W_{ply} \cdot f_y}{M_{cr}}} & \text{if } A_4 = 1 \\ \sqrt{\frac{W_{ply} \cdot f_y}{M_{cr}}} & \text{if } A_4 = 2 \\ \sqrt{\frac{W_{ely} \cdot f_y}{M_{cr}}} & \text{if } A_4 = 3 \\ \sqrt{\frac{W_{eff,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} & \text{if } A_4 = 4 \end{cases} \quad \lambda_{LTs} = 0.26$$

Klumpumo kreivė "b", nuokrypos koeficientas $\alpha_{LT} := 0.34$

Stabilizacijos koeficientai:

$$\lambda_{LTs,0} := 0.4 \quad \beta := 0.75$$

Funkcija:

$$\Phi_{LT} := 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\lambda_{LTs} - \lambda_{LTs,0}) + \beta \lambda_{LTs}^2 \right] = 0.501$$

Klumpumo koeficientas:

$$\chi_{LT} := \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \lambda_{LTs}^2}} = 1.053 \quad \chi_{LT} := \begin{cases} \chi_{LT} & \text{if } \chi_{LT} \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \chi_{LT} = 1$$

Klumpamoji galia gniuždant ir lenkiant:

Turi būti tenkinamos šios sąlygos:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{Edy} + \Delta M_{Edy}}{\chi_{LT} \frac{M_{Rky}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{Edz} + \Delta M_{Edz}}{\gamma_{M1} \frac{M_{Rkz}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{Edy} + \Delta M_{Edy}}{\chi_{LT} \frac{M_{Rky}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{Edz} + \Delta M_{Edz}}{\gamma_{M1} \frac{M_{Rkz}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\Delta M_{Edy} := 0 \quad \Delta M_{Edz} := 0$$

$$N_{Rk} := \begin{cases} f_y \cdot A & \text{if } A_4 \leq 3 \\ f_y \cdot A_{eff} & \text{otherwise} \end{cases} \quad N_{Rk} = 617.835 \text{ kN}$$

$$M_{Rky} := \begin{cases} f_y \cdot W_{ply} & \text{if } A_2 = 1 \\ f_y \cdot W_{ply} & \text{if } A_2 = 2 \\ f_y \cdot W_{ely} & \text{if } A_2 = 3 \\ f_y \cdot W_{eff,y} & \text{if } A_2 = 4 \end{cases} \quad M_{Rkz} := \begin{cases} f_y \cdot W_{plz} & \text{if } A_3 = 1 \\ f_y \cdot W_{plz} & \text{if } A_3 = 2 \\ f_y \cdot W_{elz} & \text{if } A_3 = 3 \\ f_y \cdot W_{eff,z} & \text{if } A_3 = 4 \end{cases}$$

$$M_{Rky} = 25.399 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{Rkz} = 16.503 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Sąveikos koeficientų skaičiavimas B metodu:

Koeficientai įvertinantys momentų pasiskirstymą

$$\psi_{M,y} := 1 \quad \psi_{M,z} := 1$$

Tolygiojo momento koeficientai:

$$C_{my} := 0.6 + 0.4 \cdot \psi_{M,y} = 1$$

$$C_{mz} := 0.6 + 0.4 \cdot \psi_{M,z} = 1$$

Plastinės skerspjūvio savybės (1, 2 klasės):

$$k_{yy12.0} := C_{my} \left[1 + (\lambda_{sy} - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right] = 1.2$$

$$k_{yy12} := \begin{cases} k_{yy12.0} & \text{if } k_{yy12.0} \leq C_{my} \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) \\ C_{my} \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{yy12} = 1.2$$

$$k_{zz12.0} := C_{mz} \left[1 + (\lambda_{sz} - 0.2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} \right] = 1.6$$

$$k_{zz12} := \begin{cases} k_{zz12.0} & \text{if } k_{zz12.0} \leq C_{mz} \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} \right) \\ C_{mz} \left(1 + 0.8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{zz12} = 1.5$$

$$k_{yz12} := 0.6 \cdot k_{zz12} = 0.9$$

$$k_{zy12} := 0.6 \cdot k_{yy12} = 0.7$$

Tampriosios skerspjūvio savybės (3, 4 klasės):

$$k_{yy34.0} := C_{my} \left[1 + 0.6 \lambda_{sy} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right] = 1.2$$

$$k_{yy34} := \begin{cases} k_{yy34.0} & \text{if } k_{yy34.0} \leq C_{my} \left(1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) \\ C_{my} \left(1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} \right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{yy34} = 1.2$$

$$k_{zz34.0} := C_{mz} \left[1 + 0.6 \lambda_{sz} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} \right] = 1.5$$

$$k_{zz34} := \begin{cases} k_{zz34.0} & \text{if } k_{zz34.0} \leq C_{mz} \left(1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} \right) \\ C_{mz} \left(1 + 0.6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_{zz34} = 1.4$$

$$k_{yz34} := k_{zz34} = 1.4$$

$$k_{zy34} := 0.8 \cdot k_{yy34} = 0.9$$

Galutiniai sąveikos koeficientai:

$$k_{yy} := \begin{cases} k_{yy12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{yy34} & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_{yz} := \begin{cases} k_{yz12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{yz34} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{zy} := \begin{cases} k_{zy12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{zy34} & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_{zz} := \begin{cases} k_{zz12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{zz34} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{yy} = 1.2 \quad k_{yz} = 0.92 \quad k_{zy} = 0.72 \quad k_{zz} = 1.533$$

Sąlygos:

$$A_7 := \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{Edy} + \Delta M_{Edy}}{\chi_{LT} M_{Rky}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{Edz} + \Delta M_{Edz}}{M_{Rkz}} = 0.993$$

$$A_8 := \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{Edy} + \Delta M_{Edy}}{\chi_{LT} M_{Rky}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{Edz} + \Delta M_{Edz}}{M_{Rkz}} = 0.999$$

$$A_9 := \begin{cases} \text{"klupumo sąlyga tenkinama"} & \text{if } \begin{cases} A_7 \leq 1 \\ A_8 \leq 1 \end{cases} \\ \text{"klupumo sąlyga netenkinama"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$A_9 = \text{"klupumo sąlyga tenkinama"}$

Sąveikos koeficientų skaičiavimas. A metodas.

Tampriojo sukamojo klumpo jėga:

Šlyties centro koordinatės bendrojo skerspjūvio sunkio centro atžvilgiu:

$$y_0 := 0 \quad z_0 := 0$$

$$i_0 := \sqrt{I_y^2 + I_z^2 + y_0^2 + z_0^2} = 0.053 \text{ m}$$

Kadangi skerspjūvis uždaras: $I_w := 0$

$$N_{cr,T} := \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{I_t^2} \right) = 1.057 \times 10^5 \text{ kN}$$

$$N_{cr,TF} := \frac{N_{cr,T}}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \right]} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,T}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,T}} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,T}}} \right] = 1.438 \times 10^6 \text{ N}$$

Koeficientai įvertinantys momentų pasiskirstymą

$$\psi_{AM,y} := 1 \quad \psi_{AM,z} := 1$$

Lyginamojo tolygiojo momento koeficientai:

$$C_{my,0} := 0.79 + 0.21 \cdot \psi_{AM,y} + 0.36 \cdot (\psi_{AM,y} - 1) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}} = 1$$

$$C_{mz,0} := 0.79 + 0.21 \cdot \psi_{AM,z} + 0.36 \cdot (\psi_{AM,z} - 1) \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} = 1$$

$$\varepsilon_y := \begin{cases} \frac{M_{Edy}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{ely}} & \text{if } A_4 \leq 3 \\ \frac{M_{Edy}}{N_{Ed}} \cdot \frac{A}{W_{eff,y}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \varepsilon_y = 1.712$$

$$\alpha_{ALT0} := 1 - \frac{I_t}{I_y} = 8.724 \times 10^{-4}$$

$$\alpha_{ALT} := \begin{cases} 0 & \text{if } \alpha_{ALT} < 0 \\ \alpha_{ALT0} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Kadangi lenkimo momentas skerspjūvyje tolygus:

$$\lambda_{0s} := \lambda_{LTs} = 0.26$$

$$A_{11} := 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}} \right)} = 0.161$$

$$C_{Amy} := \begin{cases} C_{my,0} & \text{if } \lambda_{0s} \leq A_{11} \\ C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot \alpha_{ALT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot \alpha_{ALT}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_{Amy} = 1$$

$$C_{Amz} := C_{mz,0} = 1$$

$$C_{mLTpr1} := \left[C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot \alpha_{ALT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot \alpha_{ALT}} \right]^2 \cdot \frac{\alpha_{ALT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}} \right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}} \right)}} = 1.338 \times 10^{-3}$$

$$C_{mLTpr2} := \begin{cases} 1 & \text{if } \lambda_{0s} \leq A_{11} \\ C_{mLTpr1} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_{mLTpr2} = 1.338 \times 10^{-3}$$

$$C_{mLT} := \begin{cases} C_{mLTpr2} & \text{if } 1 \leq C_{mLTpr2} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_{mLT} = 1$$

$$\lambda_{smax} := \begin{cases} \lambda_{sy} & \text{if } \lambda_{sy} > \lambda_{sz} \\ \lambda_{sz} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \lambda_{smax} = 1.137$$

$$\mu_{Ay} := \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}}{1 - \chi_y \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}} = 0.975 \quad \mu_{Az} := \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \cdot \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = 0.706 \quad C_{mLT} = 1$$

$$w_y := \begin{cases} \frac{W_{ply}}{W_{ely}} & \text{if } \frac{W_{ply}}{W_{ely}} \leq 1.5 \\ 1.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad w_z := \begin{cases} \frac{W_{plz}}{W_{elz}} & \text{if } \frac{W_{plz}}{W_{elz}} \leq 1.5 \\ 1.5 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$w_y = 1.408$$

$$w_z = 1.302$$

$$n_{pl} := \frac{N_{Ed}}{N_{Rk}} = 0.38$$

$$b_{LT} := 0.5 \cdot \alpha_{ALT} \cdot \lambda_{0s}^2 \cdot \frac{M_{Edy}}{\chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{Edz}}{M_{pl,z,Rd}} = 0$$

$$c_{LT} := 10 \cdot \alpha_{ALT} \cdot \frac{\lambda_{0s}^2}{5 + \lambda_{sz}^4} \cdot \frac{M_{Edy}}{C_{Amy} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 4.078 \times 10^{-5}$$

$$d_{LT} := 2 \cdot \alpha_{ALT} \cdot \frac{\lambda_{0s}}{0.1 + \lambda_{sz}^4} \cdot \frac{M_{Edy}}{C_{Amy} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} \cdot \frac{M_{Edz}}{C_{Amz} \cdot M_{pl,z,Rd}} = 0$$

$$e_{LT} := 1.7 \cdot \alpha_{ALT} \cdot \frac{\lambda_{0s}}{0.1 + \lambda_{sz}^4} \cdot \frac{M_{Edy}}{C_{Amy} \cdot \chi_{LT} \cdot M_{pl,y,Rd}} = 1.005 \times 10^{-4}$$

$$C_{yy0} := 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{Amy}^2 \cdot \lambda_{smax}^2 - \frac{1.6}{w_y} \cdot C_{Amy}^2 \cdot \lambda_{smax}^2 \right) \cdot n_{pl} - b_{LT} \right] = 0.882$$

$$C_{yy} := \begin{cases} C_{yy0} & \text{if } C_{yy0} \geq \frac{W_{ely}}{W_{ply}} \\ \frac{W_{ely}}{W_{ply}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_{yy} = 0.882$$

$$C_{yz0} := 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{Amz}^2 \cdot \lambda_{smax}^2}{w_z^5} \right) \cdot \eta_{pl} - c_{LT} \right] = 0.673$$

$$C_{yz} := \begin{cases} C_{yz0} & \text{if } C_{yz0} \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y} \cdot \frac{W_{elz}}{W_{plz}}} \\ 0.6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y} \cdot \frac{W_{elz}}{W_{plz}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_{yz} = 0.673$$

$$C_{zy0} := 1 + (w_y - 1) \cdot \left[\left(2 - 14 \cdot \frac{C_{Amy}^2 \cdot \lambda_{smax}^2}{w_y^5} \right) \cdot \eta_{pl} - d_{LT} \right] = 0.802$$

$$C_{zy} := \begin{cases} C_{zy0} & \text{if } C_{zy0} \geq 0.6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z} \cdot \frac{W_{ely}}{W_{ply}}} \\ \sqrt{\frac{w_y}{w_z} \cdot \frac{W_{ely}}{W_{ply}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_{zy} = 0.802$$

$$C_{zz0} := 1 + (w_z - 1) \cdot \left[\left(2 - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{Amz}^2 \cdot \lambda_{smax} - \frac{1.6}{w_z} \cdot C_{Amz}^2 \cdot \lambda_{smax}^2 \right) \cdot \eta_{pl} - e_{LT} \right] = 0.887$$

$$C_{zz} := \begin{cases} C_{zz0} & \text{if } C_{zz0} \geq \frac{W_{elz}}{W_{plz}} \\ \frac{W_{elz}}{W_{plz}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad C_{zz} = 0.887$$

Plastinės skerspjuvio savybės (1, 2 klasės):

$$k_{Ayy12} := C_{Amy} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_{Ay}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{C_{yy} \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cry}} \right)} = 1.322$$

$$k_{Ayz12} := C_{Amz} \cdot \frac{\mu_{Ay}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{C_{yz} \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crz}} \right)} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} = 1.644$$

$$k_{Azy12} := C_{Amy} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_{Az}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{C_{zy} \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cry}} \right)} \cdot 0.6 \cdot \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} = 0.657$$

$$k_{Azz12} := C_{Amz} \cdot \frac{\mu_{Az}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{C_{zz} \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crz}} \right)} = 1.568$$

Tampriosios skerspjuvio savybės (3, 4 klasės):

$$k_{Ayy34} := C_{Amy} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_{Ay}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cry}}} = 1.165$$

$$k_{Ayz34} := C_{Amz} \cdot \frac{\mu_{Ay}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crz}}} = 1.919$$

$$k_{Azy34} := C_{Amy} \cdot C_{mLT} \cdot \frac{\mu_{Az}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cry}}} = 0.844$$

$$k_{Azz34} := C_{Amz} \cdot \frac{\mu_{Az}}{N_{Ed}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crz}}} = 1.39$$

Galutiniai sąveikos koeficientai:

$$k_{Ayy} := \begin{cases} k_{Ayy12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{Ayy34} & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_{Ayz} := \begin{cases} k_{Ayz12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{Ayz34} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{Azy} := \begin{cases} k_{Azy12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{Azy34} & \text{otherwise} \end{cases} \quad k_{Azz} := \begin{cases} k_{Azz12} & \text{if } A_4 \leq 2 \\ k_{Azz34} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$k_{Ayy} = 1.322 \quad k_{Ayz} = 1.644 \quad k_{Azy} = 0.657 \quad k_{Azz} = 1.568$$

Sąlygos:

$$A_{12} := \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{Ayy} \cdot \frac{M_{Edy} + \Delta M_{Edy}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rky}}{\gamma_{M1}}} + k_{Ayz} \cdot \frac{M_{Edz} + \Delta M_{Edz}}{\frac{M_{Rkz}}{\gamma_{M1}}} = 1.05$$

$$A_{13} := \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{Azy} \cdot \frac{M_{Edy} + \Delta M_{Edy}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rky}}{\gamma_{M1}}} + k_{Azz} \cdot \frac{M_{Edz} + \Delta M_{Edz}}{\frac{M_{Rkz}}{\gamma_{M1}}} = 0.97$$

$$A_{14} := \begin{pmatrix} \begin{matrix} \text{"klupumo sąlyga tenkinama"} & \text{if } A_7 \leq 1 \\ & A_8 \leq 1 \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{"klupumo sąlyga netenkinama"} & \text{otherwise} \end{matrix} \end{pmatrix}$$

A₁₄ = "klupumo sąlyga tenkinama"

Centrinio gniuždymo veikimas pastovaus elipsinio tuščiaidurio skerspjuvio EHS elemento projektavimas

Skaičiavimo pavyzdys EHS 150x75x5, l=2.3 m

(iki čia viskas analogiškai kaip ir ankstesniajame pavyzdyje)

Veikiančios ištisos:

Skaičiuojamoji ašinė jėga: $N_{Ed} := 352 \text{ kN}$

Skerspjuvio klasės nustatymas

Ekvivalentinis elipsinio skerspjuvio skersmuo kai EHS skerspjuvis veikiamas tik gniuždymo:

$$D_{e,c} := H \cdot \left[1 + \left[1 - 2.3 \cdot \left(\frac{t}{H} \right)^{0.6} \right] \cdot \left(\frac{H}{B} - 1 \right) \right] = 0.255 \text{ m}$$

Nuo f_y priklausantis koeficientas:

$$f_{y0} := 235 \text{ MPa}$$

$$\epsilon := \sqrt{\frac{f_{y0}}{f_y}} = 0.814$$

$$A_4 := \begin{cases} "<4" & \text{if } \frac{D_{e,c}}{t} \leq 90 \cdot \epsilon^2 \\ 4 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{Skerspjuvio klasė:} \\ A_4 = "<4" \quad \text{klasė} \end{matrix}$$

Stiprumo skaičiavimas

Skaičiuotinė ašinė gniuždomoji galia:

$$N_{c,Rd} := A \cdot f_y = 617.835 \text{ kN}$$

Skaičiuotinė ašinė gniuždomoji galia apskaičiuota remiantis efektyviaisiais parametrais:

$$A_{eff} := A \cdot \left(\frac{90}{\frac{D_{e,c}}{t}} \cdot \frac{f_{y0}}{f_y} \right)^{0.5} = 1.88 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$N_{c,eff,Rd} := A_{eff} \cdot f_y = 667.547 \text{ kN}$$

Stiprumo sąlyga kai veikia gniuždymas ir lenkimo momentas:

$$A_5 := \begin{cases} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} & \text{if } A_4 = "<4" \\ \frac{N_{Ed}}{N_{c,eff,Rd}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_5 = 0.57$$

$$A_6 := \begin{cases} \text{"stiprumo sąlyga tenkinama"} & \text{if } A_5 \leq 1 \\ \text{"stiprumo sąlyga netenkinama"} & \text{if } A_5 > 1 \end{cases}$$

$$A_6 = \text{"stiprumo sąlyga tenkinama"}$$

Klumpumo skaičiavimas

Klumpumo koeficiento apie silpnąją ašį (z-z) skaičiavimas. Gniuždymas:

Tamprioji kritinė jėga:

$$N_{crz} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{crz}^2} = 477.6 \text{ kN}$$

Sąlyginis liaunis:

$$\lambda_{sz} := \begin{cases} \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{crz}}} & \text{if } A_4 = "<4" \\ \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_y}{N_{crz}}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \lambda_{sz} = 1.137$$

Nuokrypos koeficientas pagal klumpumo kreivę (a): $\alpha_z := 0.21$

Funkcija:

$$\Phi_z := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_z \cdot (\lambda_{sz} - 0.2) + \lambda_{sz}^2 \right] = 1.245$$

Klumpumo koeficientas:

$$\chi_z := \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \lambda_{sz}^2}} = 0.571 \quad \chi_z := \begin{cases} \chi_z & \text{if } \chi_z \leq 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \chi_z = 0.571$$

Stiprumo sąlyga kai veikia gniuždymas ir lenkimo momentas:

$$A_7 := \begin{cases} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd} \cdot \chi_z} & \text{if } A_4 = "<4" \\ \frac{N_{Ed}}{N_{c,eff,Rd} \cdot \chi_z} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$A_7 = 0.998$$

$$A_8 := \begin{cases} \text{"klumpumo sąlyga tenkinama"} & \text{if } A_7 \leq 1 \\ \text{"klumpumo sąlyga netenkinama"} & \text{if } A_7 > 1 \end{cases}$$

$$A_8 = \text{"klumpumo sąlyga tenkinama"}$$