



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

STATYBINĖS MECHANIKOS KATEDRA

Andrius Paliokas

**SANTVARŲ IŠ APSKRITŲ VAMZDŽIŲ
ĮTEMPTO DEFORMUOTO BŪVIO ANALIZĖ**

**STRAINED DEFORMED STATE ANALYSIS
OF TRUSSES FROM CIRCULAR TUBES**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 62402T107

Statinių projektavimo ir optimizacijos kompiuterinių technologijų specializacija

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2011

Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas

Statybos fakultetas

Statybinės mechanikos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 1

Data 2011-06-06

Statybos inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas: **Santvarų iš apskritų vamzdžių įtempto deformuoto būvio analizė**

Autorius: **Andrius Paliokas**

Vadovas: **dr. Ela Jarmolajeva**

Kalba

☒ Lietuvių

☐ Užsienio

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių analizė, remiantis dviem plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentais, ir jos skaitinis eksperimentas standartine baigtinių elementų programa.

Nustatyta, kad LST EN 1993:2005 leidžia suprojektuoti ekonomiškesnes konstrukcijas, nei STR 2.05.08:2005. Taip pat nustatyta, kokie faktoriai lemia projektavimo rezultatų skirtumą tarp minėtų reglamentų.

Aprašyti ir pritaikyti du skirtingi baigtinių elementų tinklo optimalumo nustatymo metodai. Taip pat, remiantis šiais metodais, įvertintas analizuotos konstrukcijos baigtinių elementų tinklo optimalumas.

Atliktas konstrukcijos skaitinis eksperimentas standartine baigtinių elementų programa. Jis parodė, jog gauti rezultatai yra artimi konstrukcijos analizės rezultatams, kurie buvo gauti taikant analitinius metodus.

Nustatyta, kad kritinės jėgos dydis konstrukcijai, remiantis skaitinio eksperimento rezultatais, yra didesnis nei analizuotos santvaros elementai gali atlaikyti remiantis analitinių skaičiavimų rezultatais.

Baigiamąjį magistro darbą sudaro 108 psl. teksto be priedų, 68 iliustracijos, 57 lentelės, 44 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: plieninės konstrukcijos, santvara, analizės uždavinys, baigtinių elementų metodas, diskretinis modelis, poslinkiai, įrašos, įtempiai, stabilumas.

Vilnius Gediminas Technical University
Civil Engineering faculty
Structural mechanics department

ISBN ISSN
Copies No. 1
Date 06-06-2011

Building Structure study programme master thesis

Title: **Strained deformed state analysis of trusses from circular tubes**

Author: **Andrius Paliokas**

Academic supervisor: **dr. Ela Jarmolajeva**

Thesis language

☒ Lithuanian

☐ Foreign (English)

Annotation

In this master thesis, the analysis of truss from circular tubes based on two design rules of steel structures was carried out as well as its numerical experiment based on standard finite element program.

It was found out that LST EN 1993:2005 lets design more economical construction than STR 2.05.08:2005. Furthermore, the factors influencing the difference of the design results between the previously mentioned regulations were identified.

In addition, two different methods of optimal grid of finite elements were described and applied. The optimal grid of finite elements of the analysed structure was evaluated according to those methods as well.

The numerical experiment of the structure based on standard finite element program was performed. Moreover, the experiment showed that the obtained results are similar to the results of the structure analysis when applying analytical methods.

According to the results of the numerical experiment, it was discovered that magnitude of the critical force is bigger than the elements of the analyzed truss can resist according to the results of the analytical methods.

Thesis consists of the text of 108 p. without appendixes, 68 pictures, 57 tables, 44 bibliographic entries. Appendixes included.

Keywords: plieninės konstrukcijos, santvara, analizės uždavinys, baigtinių elementų metodas, diskretinis modelis, poslinkiai, įrašos, įtempiai, stabilumas.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
PAGRINDINIAI ŽYMĖJIMAI	13
1. ĮVADAS.....	15
2. SANTVAROS ANALIZĖS UŽDAVINYS	23
2.1. Santvaros analizės uždavinio matematinis modelis.....	23
3. SANTVAROS ANALIZĖ TAİKANT NORMATYVINIUS DOKUMENTUS	26
3.1. Santvaros diskretinis modelis	26
3.2. Santvaros apkrovimas	29
3.3. Santvaros analizė remiantis STR 2.05.08:2005 reikalavimais	31
3.3.1. Elemento E1 analizė.....	37
3.3.2. Elemento E2 analizė.....	38
3.3.3. Elemento E3 analizė.....	39
3.3.4. Elemento E4 analizė.....	40
3.3.5. Elemento E5 analizė.....	41
3.3.6. Elemento E6 analizė.....	42
3.3.7. Elemento E7 analizė.....	43
3.3.8. Elemento E8 analizė.....	44
3.3.9. Elemento E9 analizė.....	45
3.3.10. Analizės rezultatų apibendrinimas.....	46
3.4. Santvaros analizė remiantis LST EN 1993-1-1:2005 reikalavimais.....	47
3.4.1. Elemento E1 analizė.....	53
3.4.2. Elemento E2 analizė.....	54
3.4.3. Elemento E3 analizė.....	55
3.4.4. Elemento E4 analizė.....	56
3.4.5. Elemento E5 analizė.....	57
3.4.6. Elemento E6 analizė.....	58
3.4.7. Elemento E7 analizė.....	59
3.4.8. Elemento E8 analizė.....	60
3.4.9. Elemento E9 analizė.....	61
3.4.10. Analizės rezultatų apibendrinimas.....	62

3.5. Santvaros mazgai	63
3.5.1. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, mazgų analizė	64
3.5.2. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993-1-1:2005, mazgų analizė	68
3.6. Išvados ir palyginimai	73
4. SANTVAROS ANALIZĖ TAIKANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ	75
4.1 Baigtinių elementų metodas	75
4.1.1. Tūriniai baigtiniai elementai	77
4.1.2. Kevaliniai baigtiniai elementai	77
4.2. Baigtinių elementų metodo sprendiniai	78
4.3 Santvaros stiprumo analizė	87
4.3.1. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, stiprumo analizė	89
4.3.2. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, stiprumo analizė	92
4.4 Santvaros stabilumo analizė	96
4.4.1. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, stabilumo analizė	98
4.4.2. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, stabilumo analizė	100
4.5 Skyriaus išvados	103
5. BAIGIAMOSIOS DARBO IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	104
LITERATŪRA	105
PRIEDAI	109
A priedas. Elementų analizės algoritmai pagal STR 2.05.08:2005	110
B priedas. Elementų analizės, pagal STR 2.05.08:2005, charakteristikų suvestinė	114
C priedas. Elementų analizės algoritmai pagal LST EN 1993-1-1:2005	118
D priedas. Elementų analizės, pagal LST EN 1993-1-1:2005, charakteristikų suvestinė	123
E priedas. Mazgų analizės, pagal STR 2.05.08:2005, charakteristikų suvestinė	127
F priedas. Mazgų analizės, pagal LST EN 1993-1-8:2005, charakteristikų suvestinė	132
G priedas. Mazgų iš apskritų vamzdžių irties pobūdžiai	135
H priedas. Koeficiento ERR (<i>Energy Norm Error</i>) pasiskirstymas santvaroje	137
I priedas. <i>Von Miseso</i> įtempių pasiskirstymas santvaros, kuri buvo surprojektuota remiantis STR 2.05.08:2005, mazguose.	139
J priedas. <i>Von Miseso</i> įtempių pasiskirstymas santvaros, kuri buvo suprojektuota remiantis LST EN 1993:2005, mazguose.	141
K priedas. Mazgų skaičiuoklės programinio paketo „MathCAD“ aplinkoje	143

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Analizės objektas	16
1.2 pav. Geometrinių parametrų įtaka mazgo ašiniam standžiui	17
1.3 pav. Geometrinių parametrų įtaka mazgo lenkiamajam standžiui	17
1.4 pav. Juostos skersmens įtaka mazgo ašiniam standžiui	18
1.5 pav. Juostos skersmens įtaka mazgo lenkiamajam standžiui	18
1.6 pav. Pusiau standaus „T“ arba „Y“ mazgo idealizacija globalios struktūros atžvilgiu	20
1.7 pav. Pusiau standaus „K“ mazgo idealizacija globalios struktūros atžvilgiu	20
1.8 pav. Konstrukcijos modelis sudarytas iš kevalinių baigtinių elementų	21
1.9 pav. Konstrukcijos diskretinis modelis - mazgai standūs	21
1.10 pav. Konstrukcijos diskretinis modelis - mazgai pusiau standūs	21
2.1 pav. Deformuojamo kūno elementai	23
3.1 pav. Slankios lankstinės atramos skaičiuojamoji schema	26
3.2 pav. Neslankios lankstinės atramos skaičiuojamoji schema	26
3.3 pav. Santvaros diskretinis modelis	27
3.4 pav. Santvaros galimų globalinių poslinkių schema	27
3.5 pav. Projektuojami santvaros elementai	28
3.6 pav. Santvaros geometrinės charakteristikos	28
3.7 pav. Santvaros apkrovimo variantai	30
3.8 pav. Elemento E1 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	37
3.9 pav. Elemento E2 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	38
3.10 pav. Elemento E3 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	39
3.11 pav. Elemento E4 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	40
3.12 pav. Elemento E5 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	41
3.13 pav. Elemento E6 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	42
3.14 pav. Elemento E7 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	43

3.15 pav. Elemento E8 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	44
3.16 pav. Elemento E9 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	45
3.17 pav. Vamzdinio profiliuoties klasės nustatymas	49
3.18 pav. Klupumo kreivės nustatymas	50
3.19 pav. Klupumo kreivės	51
3.20 pav. Formulėse (3.32) ir (3.33) naudojamų išraiškių reikšmės	52
3.21 pav. Elemento E1 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	53
3.22 pav. Elemento E2 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	54
3.23 pav. Elemento E3 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	55
3.24 pav. Elemento E4 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	56
3.25 pav. Elemento E5 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	57
3.26 pav. Elemento E6 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	58
3.27 pav. Elemento E7 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	59
3.28 pav. Elemento E8 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	60
3.29 pav. Elemento E9 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas	61
3.30 pav. Skaičiuojamų mazgų padėtis santvaroje iš apskritų vamzdžių	64
3.31 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, viršutinės juostos mazgų (atitinkamai M1 (a) – M4 (d)) geometrinės charakteristikos	65
3.32 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, apatinės juostos mazgų (atitinkamai M5 (a) – M6 (b)) geometrinės charakteristikos	66
3.33 pav. Skaičiuojamų mazgų padėtis santvaroje iš apskritų vamzdžių	68
3.34 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993-1-1:2005 nurodymus, viršutinės juostos mazgų (atitinkamai M1 (a) – M4 (d)) geometrinės charakteristikos	69
3.35 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993-1-1:2005 nurodymus, apatinės juostos mazgų (atitinkamai M5 (a) – M6 (b)) geometrinės charakteristikos	70

4.1 pav. Kontinualios plokštės pakeitimas diskretiniu modeliu, sudarytu iš trikampių BE	76
4.2 pav. Tiesinio ir parabolinio tipo tūriniai tetraedriniai elementai	77
4.3 pav. Tiesinio ir parabolinio tipo kevaliniai trikampiniai elementai	77
4.4 pav. Plieno charakteristikos skaitiniam eksperimentui atlikti	79
4.5 pav. Apkrovos pridėjimo ruožas ant santvaros viršutinės juostos	79
4.6 pav. Santvaros kairioji nepaslanki lankstinė atrama	80
4.7 pav. Santvaros dešinioji paslanki lankstinė atrama	80
4.8 pav. BE tinklo generavimas, pritaikius tiesinio tipo kevalinius trikampinius elementus	81
4.9 pav. BE tinklo generavimas, pritaikius parabolinio tipo kevalinius trikampinius elementus.....	81
4.10 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, vidurinio taško įlinkio konvergavimo grafikas	83
4.11 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005 nurodymus, vidurinio taško įlinkio konvergavimo grafikas	83
4.12 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, įlinkių pasiskirstymas ir jos deformuota schema, nustatyta analizės metu, pritaikius kevalinius (a) ir strypinius (b) baigtinius elementus	85
4.13 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005 nurodymus, įlinkių pasiskirstymas ir jos deformuota schema, nustatyta analizės metu, pritaikius kevalinius (a) ir strypinius (b) baigtinius elementus	86
4.14 pav. Kevalinių baigtinių elementų tinklo sutankinimas	87
4.15 pav. Įtempių pasiskirstymas išilgai kevalinio elemento aukščio	88
4.16 pav. Suminių <i>Von Mizeso</i> (VP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis STR 2.05.08:2005 nurodymais	90
4.17 pav. Suminių <i>Von Mizeso</i> (AP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis STR 2.05.08:2005 nurodymais	91
4.18 pav. Suminių <i>Von Mizeso</i> (VP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis LST EN 1993:2005 nurodymais ...	93
4.19 pav. Suminių <i>Von Mizeso</i> (AP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis LST EN 1993:2005 nurodymais ...	94
4.20 pav. Stabilumo reiškinių iliustracija: nestabili struktūra	96
4.21 pav. Santvaros kraštinės sąlygos atliekant stabilumo analizę	97
4.22 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, ir veikiamos I apkrovimo varianto, išklupimo formos: 28 (a), 29(b) 30 (c), 31 (d), 32 (e)	99
4.23 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, ir veikiamos I apkrovimo varianto, išklupimo formos: 35 (a), 36(b) 37 (c), 38 (d), 39 (e)	101

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Analizuotos konstrukcijos rezultatų suvestinė	22
3.1 lentelė. Stogo apkrovą sudarančių elementų suvestinė.....	29
3.2 lentelė. Koeficiento k_{shape} reiškmės.....	35
3.3 lentelė. Santvaros elementų skaičiuojamųjų ilgių suvestinė.....	36
3.4 lentelė. Santvaros elementų ribinių liaunių suvestinė.....	36
3.5 lentelė. Gniuždymo ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 charakteristikos	37
3.6 lentelė. Gniuždymo ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 analizės santrauka	37
3.7 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 charakteristikos	38
3.8 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 analizės santrauka	38
3.9 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 charakteristikos	39
3.10 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 analizės santrauka	39
3.11 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 charakteristikos	40
3.12 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 analizės santrauka	40
3.13 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 charakteristikos	41
3.14 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 analizės santrauka	41
3.15 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 charakteristikos	42
3.16 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 analizės santrauka	42
3.17 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 charakteristikos	43
3.18 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 analizės santrauka	43
3.19 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 charakteristikos	44
3.20 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 analizės santrauka	44
3.21 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 charakteristikos	45
3.22 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 analizės santrauka	45
3.23 lentelė. Santvaros analizės, remiantis STR 2.05.08:2005, rezultatų suvestinė	46
3.24 lentelė. Gniuždymo ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 charakteristikos	53
3.25 lentelė. Gniuždymo ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 analizės santrauka	53
3.26 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 charakteristikos	54
3.27 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 analizės santrauka	54
3.28 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 charakteristikos	55
3.29 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 analizės santrauka	55
3.30 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 charakteristikos	56

3.31 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 analizės santrauka	56
3.32 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 charakteristikos	57
3.33 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 analizės santrauka	57
3.34 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 charakteristikos	58
3.35 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 analizės santrauka	58
3.36 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 charakteristikos	59
3.37 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 analizės santrauka	59
3.38 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 charakteristikos	60
3.39 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 analizės santrauka	60
3.40 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 charakteristikos	61
3.41 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 analizės santrauka	61
3.42 lentelė. Santvaros analizės, remiantis LST EN 1993-1-1:2005, rezultatų suvestinė	62
3.43 lentelė. Santvarų elementų suvestinė, įvertinus suvirinimo reikalavimus	63
3.44 lentelė. Santvaros elementų suvestinė, įvertinus tinkamumo ribas	64
3.45 lentelė. Santvaros mazgų atsparių skaičiavimų suvestinė	67
3.46 lentelė. Santvaros elementų suvestinė, įvertinus elementų tinkamumo ribas.....	68
3.47 lentelė. Santvaros mazgų atsparių skaičiavimų suvestinė	72
4.1 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, vidurio taško įlinkio priklausomybės nuo baigtinio elemento dydžio suvestinė	82
4.2 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, vidurio taško įlinkio priklausomybės nuo baigtinio elemento dydžio suvestinė	82
4.3 lentelė. Santvaros vidurinio taško įlinkių suvestinė:	84
4.4 lentelė. Santvaros, analizuotos pagal STR 2.05.08:2005, elementų plieno charakteristikos.....	89
4.5 lentelė. Santvaros tinklelio elementų stiprumo analizės rezultatų suvestinė	89
4.6 lentelė. Santvaros, analizuotos pagal LST EN 1993:2005, elementų plieno charakteristikos.....	92
4.7 lentelė. Santvaros tinklelio elementų stiprumo analizės rezultatų suvestinė	92
4.8 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, išklupimo formos ir λ_{cr}	98
4.9 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, išklupimo formos ir λ_{cr}	100

PAGRINDINIAI ŽYMĖJIMAI

A_{net} – grynasis (neto) skerspjūvio plotas,

$A_{net,d}$ – reikalingas grynasis (neto) skerspjūvio plotas,

D, d – žiedinio skerspjūvio diametras,

E – medžiagos tamprumo modulis,

F_{cr} – kritinė jėga,

I – skerspjūvio ploto inercijos momentas,

K_N – mazgo ašinis standis,

K_M – mazgo lenkiamasis standis,

$M_{i,Ed}$ – veikiantis lenkiamasis momentas,

$M_{c,Rd}$ – skaičiuotinis lenkiamasis atsparis,

$N_{i,Ed}$ – veikianti ašinė jėga,

N_{cr} – kritinė ašinė jėga,

$N_{c,Rd}$ – skaičiuotinis gniuždomasis atsparis,

$N_{t,Rd}$ – skaičiuotinis tempiamasis atsparis,

W_{el} – tamprusis atsparumo momentas,

W_{pl} – plastinis atsparumo momentas,

W_c – skerspjūvio atsparumo momentas labiausiai gniuždomo krašto atžvilgiu,

e – ekscentricitetas,

e_{rel} – santykinis ekscentricitetas,

$e_{rel,eff}$ – santykinis lyginamasis ekscentricitetas,

i – skerspjūvio ploto inercijos spindulys,

k_g – koeficientas taikomas skaičiuoti juostos praspaudžiamosios kerpamosios irties atsparį,

$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ – sąveikos koeficientai,

l_{eff}, L_{cr} – skaičiuojamasis ilgis,

k_p – koeficientas taikomas skaičiuoti juostos viršaus irties atsparį,

k_{shape} – skerspjūvio formos koeficientas,

n_p – elemento juostoje veikiančio įtempio ir metalo skaičiuotinio stiprio santykis,

s_k – sniego norminė apkrova,

z_c – atstumas nuo projektuojamo skerspjūvio centro iki jo krašto,

f_y – charakteristinis tempiamasis, gniuždomasis, lenkiamasis stipris pagal takumo ribą,

$f_{y,d}$ – charakteristinis tempiamasis, gniuždomasis, lenkiamasis stipris pagal takumo ribą,

β – tinklelio elementų vidutinio skersmens ir atitinkamų juostos matmenų santykis,

γ – juostos skersmens ir dvigubo jos sienelės storio santykis,

γ_c – darbo sąlygų koeficientas,

γ_M – bendrasis dalinis koeficientas,

γ_{Mi} – tam tikras dalinis koeficientas,

θ_i, α_i – kampas tarp elementų,

λ – elemento liaunis,

$\bar{\lambda}$ – elemento lyginamasis liaunis,

λ_{cr} – kritinės jėgos daugiklis,

λ_u – elemento ribinis liaunis,

μ – skaičiuojamojo ilgio koeficientas,

φ, χ – klupumo koeficientas,

Φ – rodiklis klupumo koeficientui nustatyti,

σ_i – įtempis,

σ_y – takumo įtempis,

$[A]$ – pusiausvyros lygčių koeficientų matrica,

$[D]$ – pasiduodamumo matrica,

$[\alpha]$ – įrašų influentinė matrica,

$[\beta]$ – poslinkių influentinė matrica,

$\{S\}$ – įrašų vektorius,

$\{F\}$ – apkrovos vektorius,

$\{u\}$ – poslinkių vektorius,

$\{\Theta\}$ – deformacijų vektorius,

1. ĮVADAS

Konstrukcijos iš apskritų vamzdžių pasaulyje naudojamos daugiau nei keturis dešimtmečius. Šių konstrukcijų populiarumą lemia jų mažas svoris, lengva gamyba, paprastas surinkimas ir graži išvaizda. Dažniausiai tokias konstrukcijas galime pamatyti tose vietose, kur reikia perdengti dideles angas: stadionai, parodų salės, lėktuvų angarai ir kiti pastatai.

Dauguma tyrėjų šiuo metu didžiausią dėmesį skiria šių konstrukcijų mazgams. Inžinerinėje praktikoje konstrukcijų iš apskritų vamzdžių mazgai gali būti standūs arba lankstūs, tai priklauso nuo to, kur bus naudojama projektuojama konstrukcija. Analizuojant mazgus, būtina atsižvelgti į ekscentriciteto įtaką mazgui, kurio nepaisyti galime tuomet, kai jis neviršija tam tikrų ribų, kurios yra skirtingos taikant skirtingus plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus.

Šiuo metu Lietuvoje oficialiai galioja du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentai: STR 2.05.08:2005 ir LST EN 1993:2005. Taigi, aktualu pažvelgti ir nustatyti, kurio reglamento plieninių konstrukcijų projektavimo algoritmas leidžia suprojektuoti ekonomišką konstrukciją. Kaip analizės objektas pasirinkta santvara iš apskritų vamzdžių, kuri dengia 20 metrų angą ir kurią veikia Vilniaus miestui būdingos sniego ir vėjo apkrovos.

Pagrindinis darbo tikslas:

- Atlikti santvaros iš apskritų vamzdžių analizę, remiantis dviem plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentais, ir jos skaitinį eksperimentą standartine baigtinių elementų programa.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

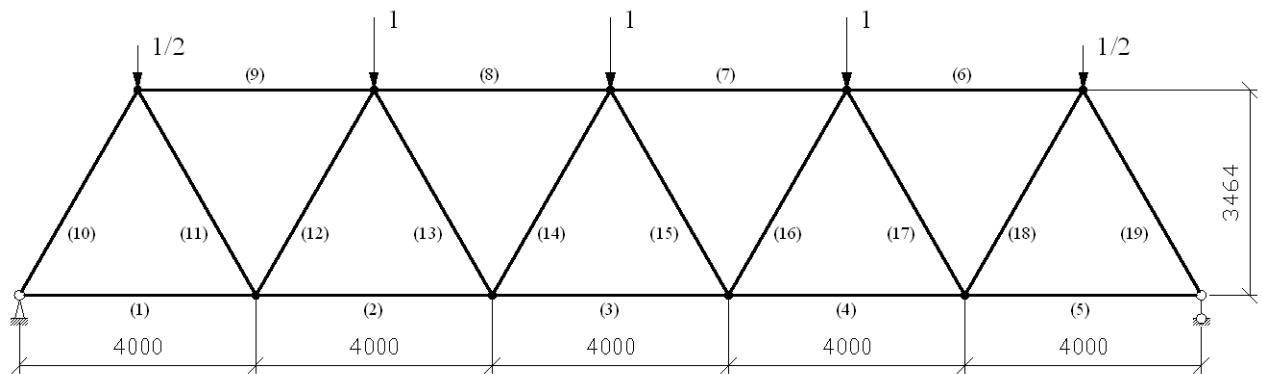
- Suprojektuoti santvarą ir jos mazgus iš apskirtų vamzdžių, remiantis STR 2.05.08:2005 nurodymais. Pateikti apibendrintą skaičiavimo algoritmą centriškai tempiamiems, gniuždomiems ir ekscentriškai gniuždomiems elementams,
- Suprojektuoti santvarą ir jos mazgus iš apskirtų vamzdžių, remiantis LST EN 1993:2005 nurodymais. Pateikti apibendrintą skaičiavimo algoritmą centriškai tempiamiems, gniuždomiems ir ekscentriškai gniuždomiems elementams,
- Nustatyti suprojektuotų santvarų ir jų mazgų iš apskirtų vamzdžių, analizuotų pagal skirtingus reglamentus, įtemptus deformuotus būvius, standartine baigtinių elementų programa. Atlikti rezultatų analizę,
- Atlikti analizuotų santvarų projektavimo rezultatų lyginamąją analizę ir palyginti juos su rezultatais, gautais konstrukciją išanalizavus standartine baigtinių elementų programa. Pateikti apibendrintas išvadas.

Literatūros apžvalga

Konstrukcijos iš apskritų vamzdžių plačiai išnagrinėtos literatūroje. Kaip jau minėta anksčiau, šiuo metu didžiausias dėmesys skiriamas tokių konstrukcijų mazgų tyrimams. Inžinerinėje praktikoje sudarant konstrukcijų iš apskirtų vamzdžių skaičiuojamąją schemą priimama prielaida, kad tinklelio elementai prie santvaros viršutinės ir apatinės juostų jungiami standžiai arba lanksčiai. Standi skaičiuojamoji schema daroma tada, kai projektuojama konstrukcija bus statoma jūroje, o lanksti – kai projektuojama konstrukcija bus pastate (Wang and Chen 2005).

Matome, kad skaičiuojamosios schemos parinkimas priklauso nuo konstrukcijos svarbumo. Tačiau nereikėtų užmiršti, kad realios santvaros mazgai visgi yra standūs. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad, standžius mazgus pakeitus lanksčiais, strypų įrašų pasiskirstymo bei mazgų poslinkių paklaidos gaunamos nedidelės ir tokią santvarą daug paprasčiau skaičiuoti (Čyras 1989). Taigi, prielaida apie lanksčius mazgus taikyta norint sumažinti uždavinio apimtį, nes to meto kompiuterių galimybės buvo ribotos.

Žvelgiant iš šių dienų pozicijų, kai kompiuterinė technika progresuoja sparčiau nei bet kada, galima bandyti taikyti standžią skaičiuojamąją schemą santvaroms. Šią prielaidą galima patvirtinti 2005 metais *Tongji* (Kinija) universitete atliktu skaitiniu eksperimentu, kurio metu buvo nustatytas santvaros iš apskritų vamzdžių (žr. 1.1 pav.) įtemptas deformuotas būvis esant skirtingoms skaičiuojamosioms schemoms.

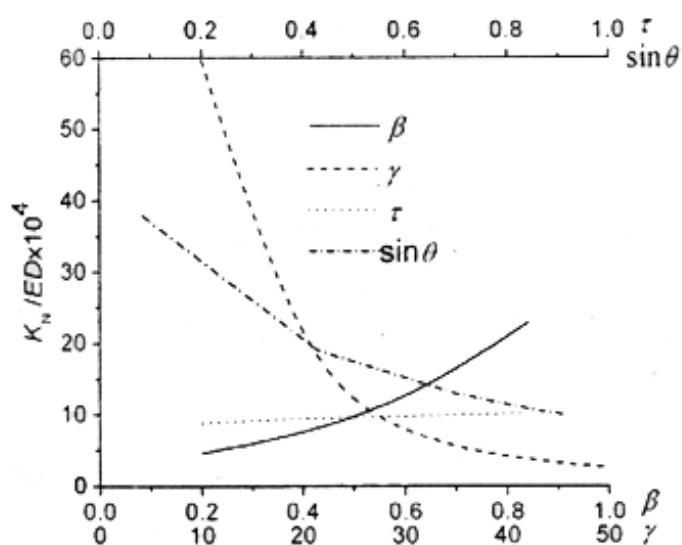


1.1 pav. Analizės objektas (Wang and Chen 2005)

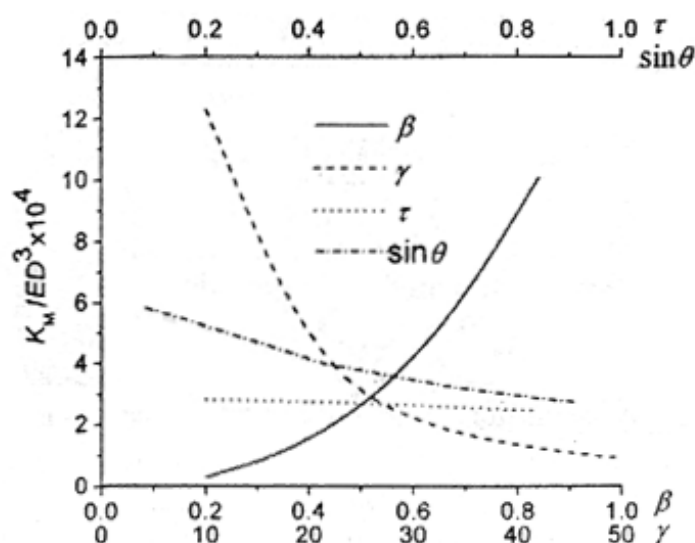
Konstrukcijos (žr. 1.1 pav.) įtempto deformuoto būvio analizė parodė, kad maksimalus įlinkis taikant lanksčią (0,066 mm) skaičiuojamąją schemą yra beveik identiškas standžios (0,067 mm) skaičiuojamosios schemos įlinkiui. Ašinių jėgų skirtumas santvaros iš apskritų vamzdžių elementuose, kai buvo taikytos skirtingos skaičiuojamosios schemos, mažesnis nei 2 %. Rezultatai rodo, kad standi skaičiuojamoji schema ašinių jėgų ir visos konstrukcijos įlinkių rezultatų neiškraipo, todėl gali būti taikoma konstrukcijos įrašų ir įlinkių nustatymui.

Apibendrinant, galima padaryti išvadą, kad santvarų iš apskritų vamzdžių mazgus galime idealizuoti kaip standžius arba lanksčius ir taip parinkti vieną iš dviejų konstrukcijos skaičiuojamųjų schemų. Tačiau, seniai žinoma, kad mazgai nėra nei idealiai standūs, nei idealiai lankstūs. Tokie, mazgai, kurių tikroji elgsena nėra artima standžių ar lanksčių mazgų elgsenai, yra pasiduodantys (Urbonas 2006).

Mazgų iš apskritų vamzdžių klasifikacijos problemą išsamiai nagrinėjo *Tongji* (Kinija) universiteto mokslininkai Wangas ir Chenas, kurie savo darbo rezultatus publikavo tarptautiniame žurnale (Wang and Chen 2005). Mazgo ašinio ir lenkiamojo standžių nustatymas buvo atliktas panaudojus standartinę baigtinių elementų programą. Apibendrinę gautus rezultatus, jie pateikė grafikus, iš kurių aiškiai matyti, kaip kinta mazgo ašinis (žr. 1.2 pav.) ir lenkiamasis (žr. 1.3 pav.) standžiai, keičiantis mazgą sudarančių apskritų vamzdžių parametrams.



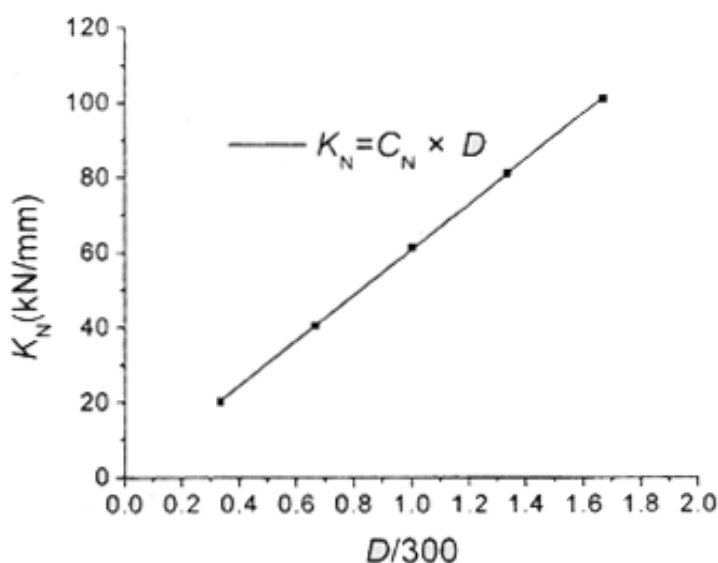
1.2 pav. Geometrinų parametų įtaka mazgo ašiniui standžiui (Wang and Chen 2005)



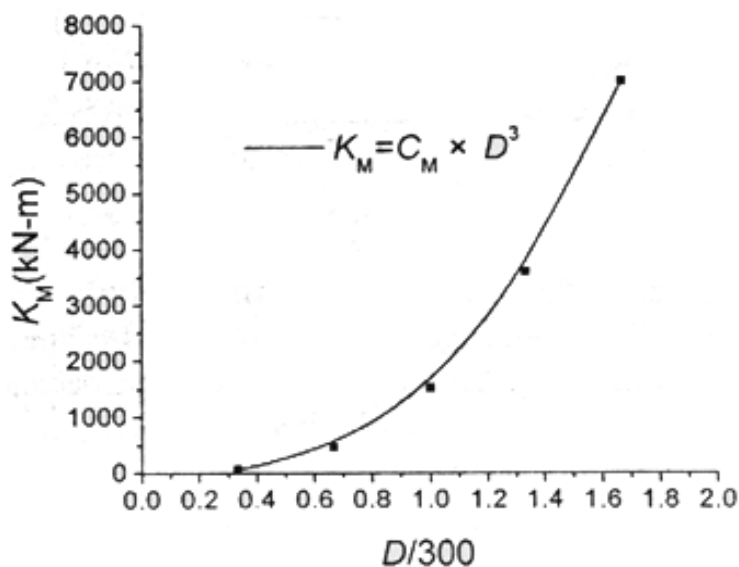
1.3 pav. Geometrinų parametų įtaka mazgo lenkiamajam standžiui (Wang and Chen 2005)

Kaip matyti iš pateiktųjų grafikų (žr. 1.2 ir 1.3 pav.), geometriniai parametrai γ ir β turi didžiausią įtaką mazgo standumui, tačiau parametras τ praktiškai nesąlygoja mazgo standumo. Virintinė siūlė turi nežymią įtaką mazgo ašiniam ir lenkiamajam standžiams, todėl jos yra nepaisoma – ji nemodeliuojama (Dexter *et al.* 1996).

Pažvelgus į mazgo, sudaryto iš apskritų vamzdžių, ašinio (žr. 1.4 pav.) ir lenkiamojo (žr. 1.5 pav.) standžių priklausomybes nuo juostos skersmens aiškiai matyti, kad ašinis mazgo standis (žr. 1.4 pav.) kinta pagal tiesinį dėsnį ir gali būti išreikštas tiesine lygtimi: $K_N = C_N \cdot D$. Lenkiamasis mazgo standis (žr. 1.5 pav.) kinta pagal kubinės parabolės dėsnį ir gali būti išreikštas kubinės parabolės lygtimi: $K_M = C_M \cdot D^3$.



1.4 pav. Juostos skersmens įtaka mazgo ašiniam standžiui (Wang and Chen 2005)



1.5 pav. Juostos skersmens įtaka mazgo lenkiamajam standžiui (Wang and Chen 2005)

Mazgo ašinį ir lenkiamąjį standžius išreiškiančios funkcijos yra nepilnos, nes į jų išraiškas neįeina mazgo geometriniai parametrai. Straipsnio autoriai į pateiktąsias mazgo standžius išreiškiančias lygtis įveda papildomą geometrinę funkciją: $Q_g = f(\theta, \gamma, \beta, \tau)$. Tuomet ašinis mazgo standis, išreiškiamas lygtimi $K_N = C_N \cdot D \cdot Q_g$, o lenkiamasis mazgo standumas aprašomas lygtimi $K_M = C_M \cdot D^3 \cdot Q_g$. Kaip žinome, mazgai yra įvairių tipų, todėl šios lygtys turės kiek kitokią išraišką skirtingo tipo mazgams.

Standartine baigtinių elementų programa buvo išnagrinėti 9 „T“ ir „Y“ mazgų modeliai bei 25 „K“ mazgo modeliai. Modeliai skaitiniam eksperimentui buvo pasirinkti taip, kad apimtų visą praktikoje naudojamą apskritų vamzdžių sortimentą. „T“ ir „Y“ mazgų modeliuose kito keturi pagrindiniai parametrai: β , γ , τ , θ , o nagrinėjant „K“ mazgą kito šie parametrai: γ , β_1 , β_2 , θ_1 , θ_2 , α/D . Apibendrinę gautus rezultatus Wangas ir Chenas pateikė tokias matematines išraiškas „T“ ir „Y“ bei „K“ mazgų ašiniams ir lenkiamajam standžiams skaičiuoti.

▪ „T“ arba „Y“ mazgas:

$$K_N = 0,105 \cdot ED \cdot (\sin \theta)^{-2,36} \cdot \gamma^{-1,90} \cdot \tau^{-0,12} \cdot e^{2,44\beta}; \quad (1.1)$$

$$K_M = 0,362 \cdot ED^3 \cdot (\sin \theta)^{-1,47} \cdot \gamma^{-1,79} \cdot \tau^{-0,08} \cdot \beta^{2,29}; \quad (1.2)$$

▪ „K“ mazgas:

$$\text{Fizikinių lygčių sistema} - \{\delta_1, \theta_{r1}, \delta_2, \theta_{r2}\}^T = [D] \cdot \{P_1, M_1, P_2, M_2\}^T; \quad (1.3)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & d_{13} & d_{14} \\ 0 & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 \\ d_{41} & d_{42} & 0 & d_{44} \end{bmatrix}; \quad (1.4)$$

$$d_{11} = \frac{1}{ED} (\sin \theta_1)^{2,11} (\sin \theta_2)^{0,12} \cdot \gamma^{1,86} \cdot \beta_1^{-0,78} \cdot \beta_2^{-0,06} \cdot e^{0,34\alpha/D}; \quad (1.5)$$

$$d_{22} = \frac{2,994}{ED^3} (\sin \theta_1)^{1,19} (\sin \theta_2)^{0,12} \cdot \gamma^{1,72} \cdot \beta_1^{-2,19} \cdot \beta_2^{0,02} \cdot e^{0,14\alpha/D}; \quad (1.6)$$

$$d_{33} = \frac{1}{ED} (\sin \theta_1)^{0,12} (\sin \theta_2)^{2,11} \cdot \gamma^{1,86} \cdot \beta_1^{-0,06} \cdot \beta_2^{-0,78} \cdot e^{0,34\alpha/D}; \quad (1.7)$$

$$d_{44} = \frac{2,994}{ED^3} (\sin \theta_1)^{0,12} (\sin \theta_2)^{1,19} \cdot \gamma^{1,72} \cdot \beta_1^{0,02} \cdot \beta_2^{-2,19} \cdot e^{0,14\alpha/D}; \quad (1.8)$$

$$d_{13} = d_{31} = \frac{0,904}{ED} (\sin \theta_1)^{0,95} (\sin \theta_2)^{1,19} \cdot \gamma^{1,80} \cdot \beta_1^{-0,38} \cdot \beta_2^{-0,45} \cdot e^{-0,13\alpha/D}; \quad (1.9)$$

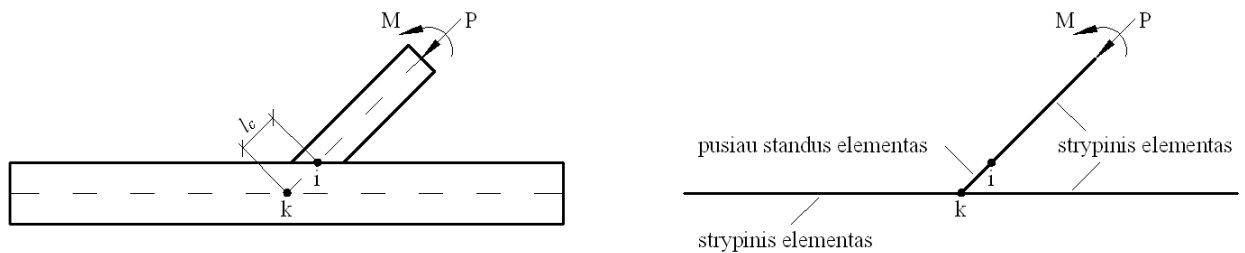
$$d_{14} = d_{41} = \frac{0,556}{ED^2} (\sin \theta_1)^{0,56} (\sin \theta_2)^{-0,08} \cdot \gamma^{1,63} \cdot \beta_1^{-0,82} \cdot \beta_2^{-0,27} \cdot e^{-0,11\alpha/D}; \quad (1.10)$$

$$d_{23} = d_{32} = \frac{0,556}{ED^2} (\sin \theta_1)^{-0,08} (\sin \theta_2)^{0,56} \cdot \gamma^{1,63} \cdot \beta_1^{-0,27} \cdot \beta_2^{-0,82} \cdot e^{-0,11\alpha/D}; \quad (1.11)$$

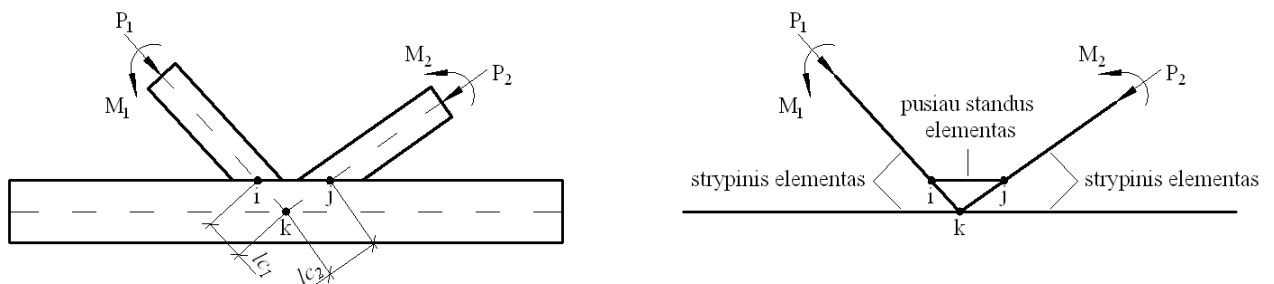
$$d_{24} = d_{42} = \frac{2,088}{ED^3} (\sin \theta_1)^{-0,22} (\sin \theta_2)^{0,12} \cdot \gamma^{1,26} \cdot \beta_1^{-0,53} \cdot \beta_2^{-0,67} \cdot e^{-0,94\alpha/D}, \quad (1.12)$$

Iš pateiktų formulių (1.1 ir 1.2) matyti, kad „T“ arba „Y“ mazgo ašinis ir lenkiamasis standžiai gali būti apskaičiuoti pagal nesudėtingas išraiškas, tačiau apie „K“ mazgo lygčių sistemą (1.3) to pasakyti negalima. „K“ mazgą sudaro juosta ir du strypai veikiami keturių skirtingo dydžio jėgų – dviejų ašinių jėgų ir lenkiamųjų momentų, skersinės jėgos poveikio nepaisoma. Norint įvertinti keturių jėgų įtaką „K“ mazgo standžiui reikia sudaryti fizikines lygtis, kurios jungia mazgo išraišas su jo deformacijomis.

Norint įvertinti mazgų iš apskritų vamzdžių ašinių ir lenkiamųjų standžius visos konstrukcijos analizės metu turim įvesti pusiau standžius elementus, kurie sujungia santvaros juostą su tinklelio elementu (Hu *et al.* 1993). Pusiau standžių „T“ arba „Y“ mazgų realizacija pateikta 1.6 paveiksle, o „K“ mazgo realizacija galima matyti 1.7 paveiksle.



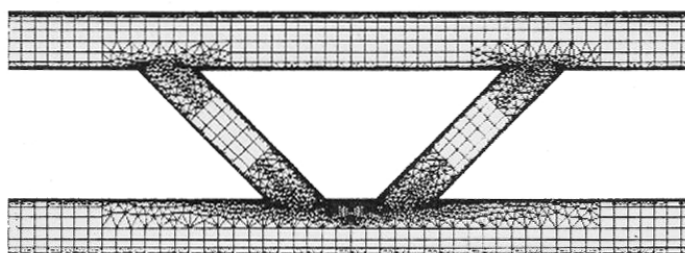
1.6 pav. Pusiau standaus „T“ arba „Y“ mazgo idealizacija globalios struktūros atžvilgiu (Wang and Chen 2005)



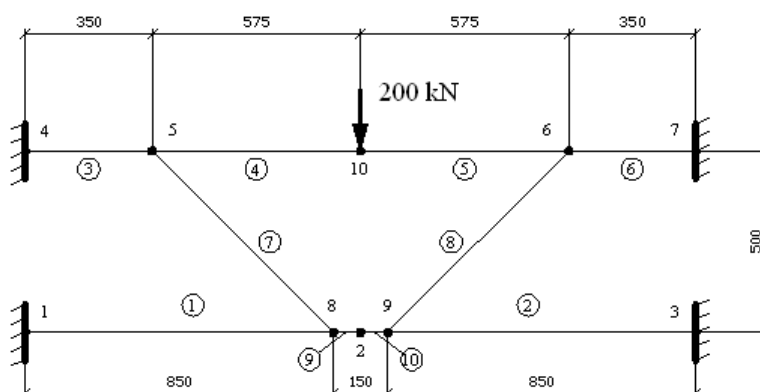
1.7 pav. Pusiau standaus „K“ mazgo idealizacija globalios struktūros atžvilgiu (Wang and Chen 2005)

Kaip minėta, galimos trys santvaros mazgų idealizacijos: standūs, pusiau standūs ir lankstūs. Standūs ir lankstūs mazgai jau seniai taikomi skaičiuoti santvarinėms konstrukcijoms. Tačiau įdomu pažvelgti kaip visgi mazgas elgiasi konkrečios konstrukcijos atveju.

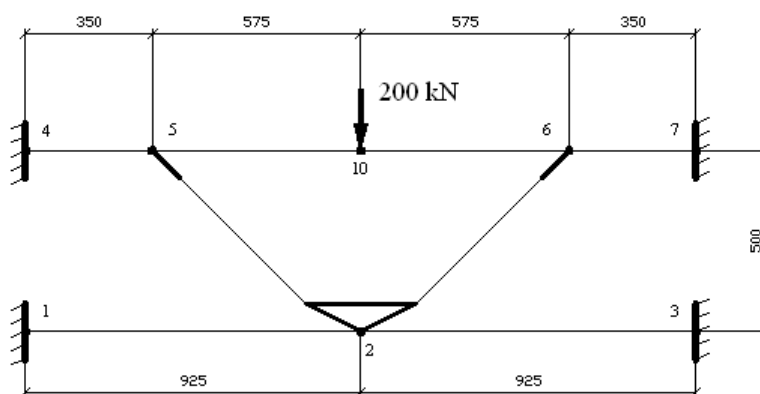
Wangas ir Chenas remdamiesi pusiau standžių mazgų skaičiavimo metodika, kuri buvo prieš tai apžvelgta, suskaičiavo 1.8 pav. parodytos konstrukcijos įlinkius ir įtempius charakteringuose taškuose. Taip pat atliko šios konstrukcijos analizę, kai tinklelio elementai prie juostos jungiami standžiai (žr. 1.9 pav.). Realios konstrukcijos bandymas nebuvo atliktas, tačiau jos virtualus modelis buvo sugeneruotas ir išanalizuotas standartine baigtinių elementų programa, panaudojus kevalinius baigtinius elementus.



1.8 pav. Konstrukcijos modelis sudarytas iš kevalinių baigtinių elementų (Wang and Chen 2005)



1.9 pav. Konstrukcijos diskretinis modelis - mazgai standūs (Wang and Chen 2005)



1.10 pav. Konstrukcijos diskretinis modelis - mazgai pusiau standūs (Wang and Chen 2005)

Gauti rezultatai parodė, kad analizuotos konstrukcijos (žr. 1.8 pav.) įlinkiai ir maksimalūs normaliniai įtempiai (žr. 1.1 lentelę) charakteringuose taškuose labiausiai sutampa su konstrukcijos, kurios mazgai buvo idealizuoti kaip pusiau standūs, rezultatais. Minėtų mazgų skirtingų realizacijų analizės rezultatai lyginami su konstrukcijos, kuri buvo analizuota kevaliniais baigtiniais elementais, analizės rezultatais.

1.1 lentelė. Analizuotos konstrukcijos rezultatų suvestinė

<i>Elementas, taškas</i>	<i>Konstrukcijos mazgai idealizuoti kaip standūs</i>	<i>Konstrukcijos mazgai idealizuoti kaip pusiau standūs</i>	<i>Konstrukcija sudalinta į kevalinius baigtinius elementus</i>
▪ <i>Vertikalūs įlinkiai</i>			
2	-0,44	-0,38	-0,46
5	-0,45	-0,39	-0,50
10	-1,50	-1,33	-1,53
▪ <i>Maksimalūs normaliniai įtempiai</i>			
1-1	-43,3	-46,9	-40,2
3-4	172,5	140,6	200,8
3-5	41,8	26,1	35,2
4-5	-70,1	-75,3	-68,3
4-10	-199,4	-175,3	-264,5

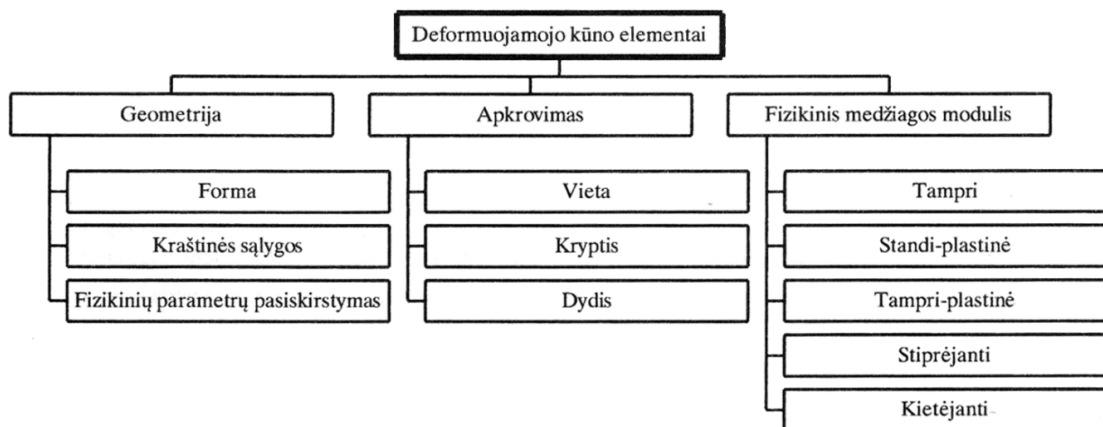
Pateiktas pusiau standžių mazgų skaičiavimo būdas yra gana komplikotas uždavinys. Populiariausios pasaulyje statybinių konstrukcijų analizės ir projektavimo programos tik minimaliai leidžia realizuoti pusiau standžius mazgus – mazgų standumas neskaiciuojamas automatiškai. Ašinių ir lenkiamųjų mazgų standžius rankiniu būdu įveda projektuotojas, apskaičiavęs juos pagal vieną iš metodikų. Galima daryti prielaidą, kad netolimoje ateityje santvarų iš apskritų vamzdžių analizė bus atliekama detaliau – įvertinant mazgų pasiduodamumą, o tai reikštų tikslesnę konstrukcijų analizę ir ekonomiškesnį jų projektavimą.

Literatūros apžvalgoje didžiausias dėmesys buvo skirtas santvaros pusiau standžių mazgų idealizacijai pagal vieną iš pasiūlytų metodikų. Wango ir Cheno pasiūlyta metodika yra nesudėtinga, tačiau jos skaičiavimo algoritmas nėra įtrauktas į statybinių konstrukcijų projektavimo ir analizės programas, todėl konstrukcijos analizei tektų pasitelkti įvairius matematinius paketus ir jais naudojantis išspręsti santvaros iš apskritų vamzdžių analizės uždavinį. Remiantis išsakytais teiginiais ir literatūros apžvalga, šio magistro darbo analizės objekto, santvaros iš apskritų vamzdžių, diskretinis modelis sudaromas atsižvelgiant į tai, kad minėtosios konstrukcijos mazgai bus idealizuoti kaip lankstūs, t. y. santvaros tinklelio elementai prie santvaros viršutinės ir apatinės juostų bus jungiami lanksčiai.

2. SANTVAROS ANALIZĖS UŽDAVINYS

2.1. Santvaros analizės uždavinio matematinis modelis

Statybos inžinerijoje pagrindinis konstrukcijos skaičiavimo tikslas – nustatyti jos stiprumą, standumą ir stabilumą. Kiekvieno šių uždavinių parametrai apibrėžia tris pagrindinius konstrukcijos elementus: apkrovą, nagrinėjamo kūno geometriją ir medžiagos modelį (žr. 2.1 pav.). Statybinės mechanikos uždavinį galima išspręsti tada, kai visi elementų parametrai yra žinomi. Tokie uždaviniai yra vadinami analizės uždaviniais. Taip jie vadinami todėl, kad sprendžiant tokį uždavinį nustatomas vien kūno įtempių ir deformacijų būvis, t. y. kūnas analizuojamas mechaniniu požiūriu: lyginant su eksploataciniais reikalavimais, įsitikinama, ar konstrukcija pakankamai stipri, standi ir stabili (Atkočiūnas ir Nagevičius 2004).



2.1 pav. Deformuojamo kūno elementai (Atkočiūnas ir Nagevičius 2004)

Magistro darbo analizės objektas yra santvara iš apskritų vamzdžių – tai strypinė konstrukcija, sudaryta iš liaunų strypų, sujungtų mazguose. Skiriamos plokščios ir erdvinės santvaros. Plokščiose santvaros pagrindinis tinklo elementas yra trikampis, o erdvinės – tetraedras. Santvara yra veikiamą išskirstytos apkrovos, paskirstytos per visą santvaros viršutinės juostos ilgį, arba koncentruotos apkrovos, pridėtos santvaros mazguose.

Santvaros skaičiuojamąją schemą sudaro tempiamųjų, gniuždomųjų ir ekscentriškai gniuždomųjų strypų ašys, sujungtos mazguose standžiai ir lanksčiai. Skaičiavimo schemas diskretinis modelis gaunamas suskaidžius skaičiuojamąją schemą į mazgus ir strypus. Strypuose veikiančios įrašos sudaro įrašų vektorių $\{S\}$, o pailgėjusių ar sutrumpėjusių strypų – deformacijų vektorių $\{\theta\}$. Šių abiejų vektorių matmenys yra vienodi. Jų komponentų skaičius žymimas n . Viso diskretinio modelio laisvumo laipsnis lygus santvaros mazgų laisvumo laipsnių sumai. Juo apibūdinamas apibendrintų poslinkių vektorių $\{u\}$, kurios komponentų matmuo žymimas m . Apibendrintą poslinkių vektorių atitinka tokio pat matmens apibendrintas išorinės apkrovos vektorių $\{F\}$.

Vektoriai $\{S\}$ ir $\{\theta\}$, taip pat $\{u\}$ ir $\{F\}$ sudaro vienodų matmenų dualius kintamuosius. Santvaros diskretiniam modeliui rašomos trijų tipų tiesinės algebrinės lygtys. Tai statikos lygtys, kuriomis išreiškiama įrašų ir išorinės apkrovos pusiausvyra, geometrinės lygtys, – ryšys tarp poslinkių ir deformacijų, fizikinės lygtys, – ryšys tarp įrašų ir deformacijų. Visos jos sudaro tokią matricinių lygčių sistemą (Čyras 1989).

$$\begin{cases} [A]\{S\} = \{F\}; \\ [A]^T \{u\} = \{\theta\}; \\ [D]\{S\} = \{\theta\}. \end{cases} \quad (2.1)$$

Šiose lygtyse matrica $[A]$ – algebrinė statikos lygčių matrica, kurios elementai gaunami užrašant diskretinio modelio mazgams pusiausvyros sąlygas. Jos matmenys $m \times n$. Matrica $[D]$ yra santvaros pasiduodamumo matrica. Ji yra diagonalinio pavidalo, o jos matmenys yra $n \times n$. Tad santvaros skaičiavimo matematiniam modeliui sudaryti pakanka turėti tik dvi išeities matricas: $[A]$ ir $[D]$. Geometrinių lygčių matrica $[A]^T$, kai poslinkių, deformacijų ir išorinės apkrovos vektoriai apibendrinti, gaunama formaliu būdu transponuojant statikos lygčių matricą (Čyras 1989).

Nagrinėjama santvara iš apskritų vamzdžių yra statiškai neišsprendžiama, todėl turime spręsti pilnąją lygčių sistemą. Patogiausia uždavinį spręsti pasirinkus pradiniais nežinomaisiais poslinkius. Tuomet pradinę lygčių sistemą galima gerokai supaprastinti panaikinus kai kuriuos nežinomuosius. Lygčių sistemos (2.1) pirmoji lygtis įrašoma į antrąją. Taigi, atlikus matematinius veiksmus gaunama nauja lygčių sistema:

$$\begin{cases} [A]\{S\} = \{F\}; \\ [A]^T \{u\} = [D]\{S\}. \end{cases} \quad (2.2)$$

Lygčių sistemos (2.2) antroji lygtis dalinama iš $[D]$, toks veiksmas galimas, nes ši matrica yra kvadratinė, ir gautoji išraiška įrašoma į lygčių sistemos (2.2) pirmąją lygtį. Taigi, atlikus matematinius veiksmus gaunama nauja lygtis:

$$[A][D]^{-1}[A]^T \{u\} = \{F\}. \quad (2.3)$$

Gautoji matricinė lygtis (2.3), kurioje nežinomas liko tik poslinkių vektorius $\{u\}$, dalinama iš nario, esančio prieš poslinkių vektorių. Toks veiksmas galimas, nes trijų minėtojo nario matricų sandauga duoda kvadratinę matricą.

$$\{u\} = ([A][D]^{-1}[A]^T)^{-1} \{F\}. \quad (2.4)$$

Narys, esantis prieš įrašų vektorių $\{F\}$, pažymimas $[\beta]$ – tai m eilės kvadratinė matrica, kuri sieja strypinės sistemos mazgų poslinkius ir išorines jėgas. Kiekvienas šios matricos elementas reiškia tam tikro mazgo poslinkį nuo vienetinės išorinės jėgos poveikio:

$$\{u\} = [\beta]\{F\}. \quad (2.5)$$

Žinant poslinkių vektorių, galima rasti ir kitus nežinomuosius – įrašus. Lygtis (2.4) įrašoma į lygčių sistemos (2.2) antrąją lygtį ir gauta naujoji lygtis dalinama iš $[D]$ matricos. Atlikus minėtus matematinius veiksmus gaunama tokia lygtis:

$$\{S\} = [D]^{-1}[A]^T \left([A][D]^{-1}[A]^T \right)^{-1} \{F\}. \quad (2.6)$$

Narys, esantis prieš apkrovų vektorių $\{F\}$, pažymimas $[\alpha]$ – tai $n \times m$ matmenų matrica, kuri rodo įrašų ir išorinės apkrovos ryšį. Kaip matyti iš išraiškos, minėtoji matrica skaičiuojama naudojantis statikos lygčių ir pasiduodamumo matricomis.

$$\{S\} = [\alpha]\{F\}. \quad (2.7)$$

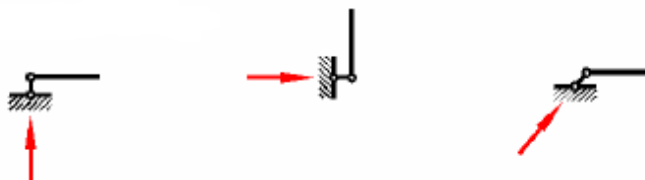
Pateiktas strypinių sistemų skaičiavimo algoritmas tinka ne tik statiškai neišsprendžiamoms sistemoms, bet ir statiškai išsprendžiamų sistemų atveju. Strypinės sistemos įrašos nustatomos pagal (2.6), o poslinkiai pagal (2.4) formules. Įrašos ir poslinkiai – sistemos įtempto deformuoto būvio analizės tikslas.

3. SANTVAROS ANALIZĖ TAIKANT NORMATYVINIUS DOKUMENTUS

3.1. Santvaros diskretinis modelis

Magistro darbo analizės objektas yra santvara iš apskritų vamzdžių (žr. 3.3 pav.). Literatūros apžvalgoje buvo aptarti trys galimi santvaros mazgų idealizacijos atvejai. Remiantis minėta apžvalga šiame darbe analizuojamos santvaros tinklelio elementai prie juostų jungiami lanksčiai. Viršutinė santvaros juosta projektuojama kaip nekarpyta – jos elementai tarpusavyje jungiami standžiai, todėl šiuose elementuose veiks ašinė jėga ir lenkiamasis momentas.

Kraštinės sąlygos daro lemiančią įtaką santvaros įtempto deformuoto būvio analizės rezultatams. Analizuojama konstrukcija dažniausiai lanksčiai remiasi į kolonas, taip sudarydama rėminę konstrukciją. Tačiau kolonos nėra įtraukiamos į konstrukcijos diskretinį modelį. Atsižvelgiant į minėtąjį supaprastinimą kairioji santvaros pusė atremiama į nepaslankią lankstinę atramą (žr. 3.1 pav.), o dešinioji – į paslankią lankstinę atramą (žr. 3.2 pav.).



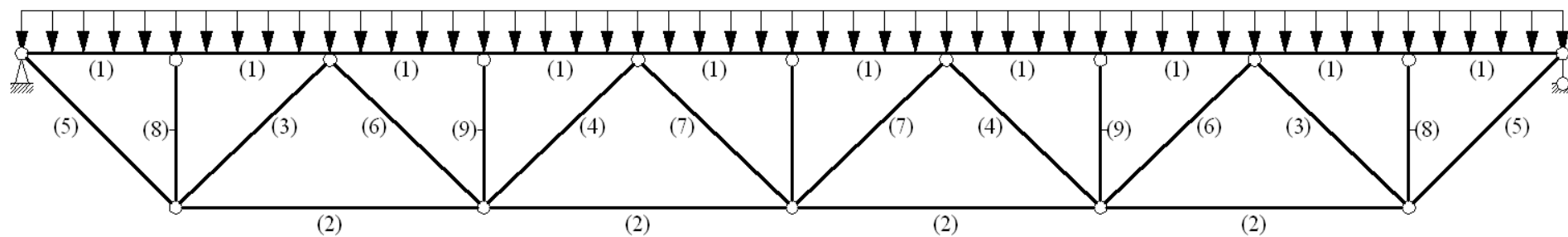
3.1 pav. Slankios lankstinės atramos skaičiuojamoji schema (Nagevičius *et al.* 2006)



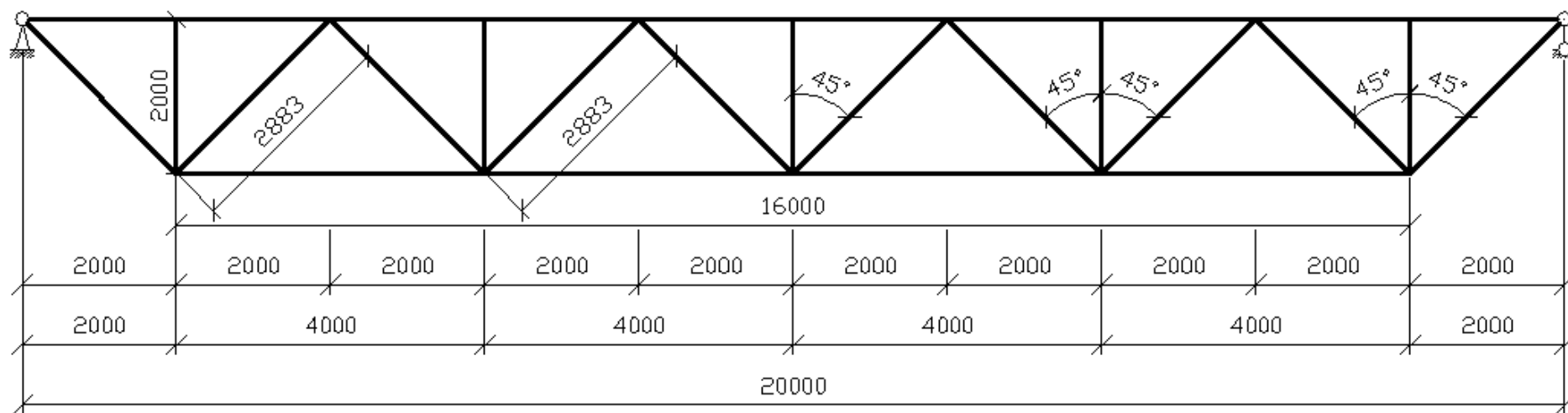
3.2 pav. Neslankios lankstinės atramos skaičiuojamoji schema (Nagevičius *et al.* 2006)

Parinkus dvi nepaslankias lankstines atramas būtų gautas neteisingas santvaros įtemptas deformuotas būvis, nes jis neatitiktų rėminės konstrukcijos, kurią suformuoja santvara lanksčiai atremta į kolonas. Atsižvelgus į išsakytas pastabas ir literatūros šaltinio (Kurobane *et al.* 1995) informaciją, parenkamas santvaros diskretinis modelis, kuris sudarytas taikant pusiausvyrų baigtinių elementų metodą pagal Kalantą (Kalanta 2007) ir pateiktas 3.3 paveiksle.

Analizuojamą santvarą iš apskirtų vamzdžių sudaro 29 elementai. Ši santvara yra 9 kartus statiskai neišsprendžiama (15 kontūrų, 36 lankstai, nes viršutinė juosta projektuojama kaip nekarpyta), ieškomasis nežinomųjų skaičius $n = 59$ (29 ašinės jėgos ir 30 lenkiamųjų momentų), galimų globalinių poslinkių skaičius $m = 50$ (24 vertikalūs poslinkiai, 15 horizontalių poslinkių ir 11 kampinių posūkių) – jų schema pateikta 3.4 paveiksle.



3.5 pav. Projektuojami santvaros elementai



3.6 pav. Santvaros geometrinės charakteristikos

3.2. Santvaros apkrovimas

Vienas iš magistro darbo uždavinių yra suprojektuoti dvi santvaras iš apskritų vamzdžių, remiantis dviem plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentais, ir atlikti rezultatų lyginamąją analizę. Kadangi santvara bus projektuojama remiantis dviem plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentais – abiem atvejais santvara bus apkrauta tokiais pačiomis apkrovomis ir bus sudaryti tokie patys apkrovimo deriniai.

Kaip minėta įvade, santvaros viršutinė juosta projektuojama kaip nekarpyta, todėl stogą veikianti apkrova bus pridėta kaip išskirstyta apkrova, tenkanti santvaros viršutinės juostos ilgio vienetui. Stogo apkrovą sudaro sniego apkrova ir stogo konstrukcijos svoris (žr. 3.1 lentelę). Sniego apkrova suskaičiuota remiantis STR 2.05.04:2003 2 priedu, įvertinant sniego sankaupos prie pastato parapeto pavojų. Vėjo apkrovos į skaičiuojamąją schemą neįtrauktos, nes jų įtaka santvaros elementams yra nežymi.

Sniego apkrova, veikianti stogą:

$$S = \mu \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,6 = 1,6 \text{ kN} / \text{m}^2. \quad (3.1)$$

Sniego apkrova prie pastato parapeto, veikianti stogą:

$$h = 0,50 < \frac{s_k}{2} = \frac{1,6}{2} = 0,80. \quad (3.2)$$

Sniego sankaupa prie pastato parapeto nevertinama.

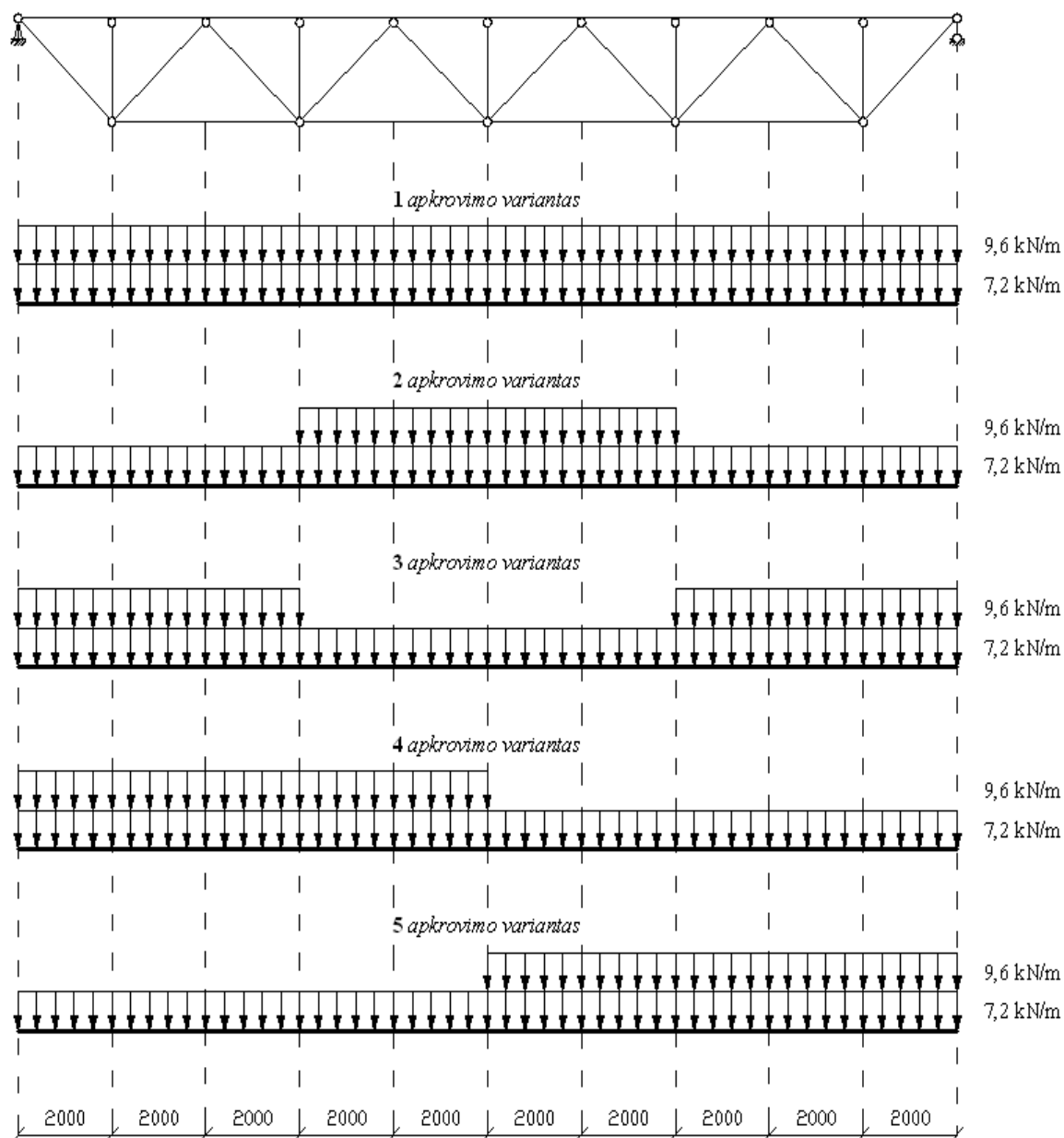
Stogo konstrukcijos apkrova:

Stogo konstrukcija turi būti ne tik stipri ir standi, tačiau ir gerai apšiltinta, t. y. turi tenkinti STR 2.05.01:2005 projektavimo reglamento pagrindinius reikalavimus. Stogo konstrukciją sudaro pirmi šeši elementai, kurie pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Stogo apkrovą sudarančių elementų suvestinė

<i>Stogo konstrukciją sudarantys komponentai</i>	<i>Norminė apkrova, N/m²</i>
1. Hidroizoliacija: t = 5 mm, g = 600 kg/m ³	30
2. Šiluminė izoliacija ROB 60: t = 20 mm, g = 200 kg/m ³	40
3. Šiluminė izoliacija ROS 30g: t = 160 mm, g = 100 kg/m ³	150
4. Garo izoliacija: t = 5 mm, g = 600 kg/m ²	30
5. Šiluminė izoliacija ROB 60: t = 20 mm, g = 200 kg/m ³	40
6. Plieninis profiliuotas lakštas: t = 2 mm	370
7. Komunikacijos	500
Iš viso:	$\Sigma = 1200$

Analizuojamą santvarą iš apskritų vamzdžių veikia šios apkrovos: nuolatinė konstrukcijos apkrova ir laikinoji sniego apkrova. Šios apkrovos – apskaičiuotos, kaip jėgos veikiančios į ploto vieneta, todėl dauginamos iš 6 metrų (užsiduotas santvarų žingsnis). Minėtos dvi pirminės apkrovos formuoja konstrukcijos apkrovimo derinius (žr. 3.7 pav.). Apkrovimo variantai suformuoti taip, kad analizuojamos santvaros elementuose atsirastų ekstreminės įrašų reikšmės.



3.7 pav. Santvaros apkrovimo variantai

Pasinaudojant dvejomis pirminėmis apkrovomis, sumodeliuojami 5 skirtingi konstrukcijos apkrovimo variantai (žr. 3.7 pav.). Santvara iš apskritų vamzdžių turi tenkinti dviejų ribinių būvių sąlygas: tinkamumo ir saugos. Skaičiuojant įrašas saugos ribiniam būviui taikomas 1,35 koeficientas ilgalaikiai apkrovai ir 1,30 kintamai apkrovai. Tikrinant tinkamumo ribinį būvį visiems 5 apkrovų deriniams taikomas 1,00 koeficientas.

3.3. Santvaros analizė remiantis STR 2.05.08:2005 reikalavimais

STR 2.05.08:2005 – tai plieninių konstrukcijų projektavimo normos galiojančios Lietuvos Respublikoje nuo 2005 metų. Šis projektavimo reglamentas buvo sukurtas vadovaujantis EN projektavimo normų reikalavimais, atsižvelgiant ir į JAV bei Kanados, Švedijos, kitų Europos šalių ir, svarbiausia, į SNiP projektavimo normų ypatumus ir jų taikymo patirtį Lietuvoje bei sukaupą avarijų ribinių būvių statistiką (Užpolevičius 2006).

Kuriant plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentą didelis dėmesys buvo skirtas jo konkurencingumui, kadangi šalies reglamentas dažnai traktuojamas kaip naujoji technologija, padedanti valstybės projektuotojams, statybininkams ir statybos pramonei sėkmingai konkuruoti Europos Sąjungos bei kitų pasaulio valstybių rinkose (SIŽ 2004).

Plieninių konstrukcijų projektavimo reglamento normatyvinių dokumentų nuostatos buvo suformuotos taip, kad jos maksimaliai sumažintų kliūtis projektavimo normavimo etape pritaikyti konstrukcijų tikimybinės analizės bei optimizacijos naujoves, ekonomiškai efektyviai garantuotų turto, kitų vertybių ir ypač žmonių saugą statiniuose (Užpolevičius 2006).

Nuo 2010 metų pabaigos Lietuvos Respublikoje galioja LST EN 1993:2005 – tai plieninių konstrukcijų projektavimo normos, kurios buvo parengtos pagal EN projektavimo normų reikalavimus. Šiuo metu šalyje oficialiai galioja abu plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentai, todėl aktualu pažvelgti, kuris plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentas leidžia suprojektuoti ekonomiškesnę konstrukciją.

Poskyrio uždaviniai:

- Suprojektuoti santvaros iš apskritų vamzdžių devynis elementus (žr. 3.5 ir 3.6 pav.) remiantis STR 2.05.08:2005 pateiktais atitinkamų elementų, kurie yra veikiami skirtingo tipo įrašų ar jų derinių, analizės algoritmais,
- Atlikti analizuotos santvaros iš apskritų vamzdžių projektavimo rezultatų analizę, remiantis LST EN 1993-1-1:2005 nuostatomis, nekeičiant pradinių sąlygų: plieno stiprio, elementų skaičiuojamojo ilgio, elemente veikiančių įrašų,
- Atlikti devynių santvaros elementų (žr. 3.5 pav.) laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjuvio ploto analizę, taikant minėtus projektavimo reglamentus, ir jos rezultatus pateikti grafikų pavidalu.

Vientisojo ar sudėtinio skerspjūvio elementai iš valcuotų, lankstytų ar virintinių skerspjūvių vadinami strypiniais elementais. Šių elementų skerspjūvis per ilgį gali būti tolygiai arba diskrečiai kintamas. Pažymėtina, kad plieninėse konstrukcijose strypu laikoma elementas ar konstrukcija, kurių ilgis 5-6 kartus didesnis už didžiausią skerspjūvio matmenį (SIŽ 2004).

Konstrukcijų elementai dabar projektuojami elementų lygmeniu. Pirmiausiai nustatomos įrašos kiekviename konstrukcijos elemente, o toliau kiekvienas elementas projektuojamas atskirai – taip, kad atlaikytų pavojingiausią įrašų elemente derinį. Projektuojant konstrukcijas elementų lygmeniu, elementai nėra traktuojami kaip visiškai atskiri. Konstrukcijos elementų sąveikos įtaka tam tikram elementui apytikriai įvertinam remiantis inžinerinėje praktikoje plačiai taikoma skaičiuojamojo ilgio koncepcija (SIŽ 2004).

Statybinių konstrukcijų elementų darbas vyksta nevienodomis sąlygomis, be to, jie gali būti skirtingai pažeisti transportuojant, montuojant ir eksploatuojant. Šie veiksniai skaičiavimuose nėra tiesiogiai įvertinami, todėl jų įtakai nustatyti taikomas darbo sąlygų koeficientas γ_c . Statybinių konstrukcijų elementų skaičiavimas atliekamas įvedant dalinį medžiagos patikimumo koeficientą γ_M . Šis koeficientas sumažina plieno skaičiuojamąjį stiprį pagal takumo ribą ir taip leidžia užtikrinti didesnę projektuojamo konstrukcijos elemento laikomosios galios atsargą.

▪ Centriškai tempiamas elementas

Statinių apkrovų veikiamų centriškai tempiamų elementų tikrinamas stiprumas. Papildomai turi būti patikrinta, ar strypo liaunis neviršija ribinės reikšmės. Paprastai į įtempių koncentratorių įtaką neatsižvelgiama. Tikrinant centriškai tempiamo elemento bet kurio skerspjūvio stiprumą, turi būti tenkinama (3.3) sąlyga.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 1,0; \quad (3.3)$$

$$N_{pl,Rd} = A_{net} \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c; \quad (3.4)$$

$$f_{y,d} = f_y / \gamma_M. \quad (3.5)$$

Nors ir elementas veikiamas ašinės tempimo jėgos, tačiau būtina patikrinti šio elemento liaunį, t. y. ar jis nėra didesnis už ribinį. Patikrinimas būtinas, nes liaunas elementas gali deformuotis kėlimo ar transportavimo į statybos aikštelę metu.

▪ Centriškai gniuždomas elementas

Tikrinamas šių elementų bendrasis ir vietinis pastovumas. Centriškai gniuždomų elementų bendrojo pastovumo skaičiavimo metodika sudaryta remiantis ekscentriškai gniuždomų elementų skaičiavimo metodika, įvertinant skerspjūvio formos ir elemento netobulumų (pradinio strypo ašies išsikreivavimo, atsitiktinio gniuždomos ašies pridėjimo ekscentriciteto) įtaką (SIŽ 2004). Praktiniams skaičiavimams centriškai gniuždomų elementų skaičiavimo metodika sudaryta taikant centriškai gniuždomų elementų pastovumo koeficientą φ . Tikrinant, centriškai gniuždomo elemento pastovumą, turi būti tenkinama (3.6) sąlyga.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0; \quad (3.6)$$

$$N_{c,Rd} = \varphi \cdot A \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c; \quad (3.7)$$

$$f_{y,d} = f_y / \gamma_m. \quad (3.8)$$

Formulėje (3.6) įvestas centriškai gniuždomo elemento pastovumo koeficientas φ , kuris priklauso nuo strypo liaunio ir plieno takumo ribos. Šio koeficiento reikšmės apskaičiuojamos pagal žemiau išreikštas formules:

kai, $0 < \bar{\lambda} \leq 2,5$;

$$\varphi = 1,0 - \left(0,073 - 5,53 \frac{f_{y,d}}{E} \right) \bar{\lambda} \sqrt{\bar{\lambda}}; \quad (3.9)$$

kai, $2,5 < \bar{\lambda} \leq 4,5$;

$$\varphi = 1,47 - 13,0 \frac{f_{y,d}}{E} - \left(0,371 - 27,3 \frac{f_{y,d}}{E} \right) \bar{\lambda} + \left(0,0275 - 5,53 \frac{f_{y,d}}{E} \right) \bar{\lambda}^2; \quad (3.10)$$

kai, $\bar{\lambda} > 4,5$;

$$\varphi = \frac{332}{\bar{\lambda}^2 (51 - \bar{\lambda})}. \quad (3.11)$$

Sąlyginis elemento liaunis priklauso nuo elemento geometrinių charakteristikų, plieno takumo ribos ir tamprumo modulio. Sąlyginis elemento liaunis skaičiuojamas pagal (3.12) išraišką, ir tuo pačiu priklauso nuo elemento liaunio, apskaičiuojamo pagal (3.13) formulę.

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{f_{y,d}}{E}}; \quad (3.12)$$

$$\lambda = \frac{l_{eff}}{i}; \quad (3.13)$$

$$l_{eff} = \mu \cdot L. \quad (3.14)$$

Remiantis STR 2.05.08:2005 nuostatomis tikrinamas centriškai gniuždomo elemento sukamojo pastovumo atsparį. Tačiau to daryti nereikia, nes analizuojamo objekto visi elementai yra apvalaus vamzdinio skerspjūvio, kuris nejautrus susisukimui.

▪ Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamas elementas

Konstrukcijose su standžiais mazgais arba veikiant elementą skersine apkrova elemente atsiranda ašinė jėga ir lenkiamasis momentas. Apskaičiuojant ekscentriškai gniuždomus ir gniuždomuosius lenkiamuosius elementus remiamasi tomis pačiomis prielaidomis kaip ir apskaičiuojant centriškai gniuždomus elementus, išskyrus tai, kad nevertinami elemento netobulumai. Pastaroji nuostata grindžiama tikimybe, kad netobulumų didžiausios skaitinės reikšmės gali sutapti su skaičiuojamojo ekscentriciteto reikšmėmis (SIŽ 2004).

Ekscentriškai gniuždomų ir gniuždomųjų-lenkiamųjų elementų pastovumas, kai momentas veikia tik vienoje plokštumoje, skaičiuojamas momento veikimo plokštumoje (plokštuminio pastovumo praradimo forma) ir iš momento veikimo plokštumos (lenkiamoj - sukamojo pastovumo praradimo forma) (SIŽ 2004). Šiame darbe analizuojama konstrukcija sudaryta iš apskritų vamzdinių profiliuotųjų, kurie yra nejautrūs lenkiamojo – sukamojo pastovumo praradimui, todėl ši sąlyga netikrinama.

Ekscentriškai gniuždomų ir gniuždomųjų-lenkiamųjų pastovaus skerspjūvio elemento pastovumas momento veikimo plokštumoje, sutampančioje su simetrijos plokštuma tikrinamas pagal (3.15) formulę.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{NM,c,Rd}} \leq 1,0; \quad (3.15)$$

$$N_{NM,c,Rd} = \varphi_e \cdot A \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c. \quad (3.16)$$

Ekscentriškai gniuždomo elemento pastovumo koeficientas φ_e vientisojo skerspjūvio strypams nustatomas pagal STR 2.05.08:2005 1 priedo 2 lentelę interpoliuojant, atsižvelgiant į sąlyginio strypo liaunį $\bar{\lambda}$ ir santykinį lyginamąjį ekscentricitetą $e_{rel,eff}$, apskaičiuojamas pagal (3.17) formulę.

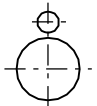
$$e_{rel,eff} = k_{shape} \cdot e_{rel}; \quad (3.17)$$

$$e_{rel} = \frac{e \cdot A}{W}; \quad (3.18)$$

$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}. \quad (3.19)$$

Nustatant elemento santykinį lyginamąjį ekscentricitetą (3.17), reikia suskaičiuoti skerspjūvio formos koeficiento k_{shape} reikšmę. Šio koeficiento reikšmė priklauso nuo santykinio elemento ekscentriciteto (3.18) ir sąlyginio elemento liaunio (3.19). Skerspjūvio formos koeficiento k_{shape} skaičiavimo formulės pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Koeficiento k_{shape} reikšmės

Skers- pjūvio tipas	Skerspjūvio schema	$\frac{A_f}{A_w}$	Koeficiento k_{shape} reikšmės			
			$0 \leq \bar{\lambda} \leq 5$		$\bar{\lambda} > 5$	
			$0,1 \leq e_{rel} \leq 5$	$5 < e_{rel} \leq 20$	$0,1 \leq e_{rel} \leq 5$	$5 < e_{rel} \leq 20$
4.		–	$(1,35 - 0,05e_{rel}) - 0,01(5 - e_{rel})\bar{\lambda}$	1,1	1,1	

Skaičiuojant ašinės jėgos N_{Ed} ir lenkiamasis momento M_{Ed} reikšmės gaunamos skaičiuojant konstrukciją, kai ji nedeformuoto būvio, ir taikant plieno tampriųjų deformacijų prielaidą. Įrašų reikšmės imamos iš to paties skaičiuotinių apkrovų situacijų derinio. Lenkiamojo momento M_{Ed} reikšmės imamos lygios: gniuždomų santvaros viršutinių juostų, apkrautų ne mazgine apkrova – didžiausiam momentui juostos tarpmazgio viduriniame trečdalyje, skaičiuojant juostą kaip tampriąją nekarpytą siją. Ašinės jėgos ir lenkiamojo momento reikšmės reikalingos nustatyti elemento ekscentricitetui pagal (3.19) formulę.

Vientisojo skerspjūvio strypų, kai $e_{rel,eff} > 20$, pastovumo skaičiuoti nereikia. Šiais atvejais elementai skaičiuojami kaip lenkiamieji (3.20), atsižvelgiama į STR 2.05.08:2005 VI skirsnio reikalavimus. Taip pat, patikrinama ar elemento liaunis neviršija ribinės reikšmės. Tačiau, nereikėtų užmiršti, kad būtina patikrinti ekscentriškai gniuždomo elemento, kai $e_{rel,eff} < 20$, stiprumą, kuris turi tenkinti 7.73 išraišką (žr. STR 2.05.08:2005 VII skirsnį).

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0; \quad (3.20)$$

$$M_{c,Rd} = W_{net,min} \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c. \quad (3.21)$$

▪ Skaičiuojamieji ilgiai

Skaičiuojamojo ilgio sąvokos taikymas leidžia strypinę sistemą sudalyti į atskirus elementus ir įvertinti nagrinėjamo elemento sąveiką su kitais elementais. Skaičiuojamuoju ilgiu laikomas sąlyginis ilgis vieno tarpatramio strypo, kurio kritinė jėga, laikant, kad strypas įtvirtintas lanksčiai, yra lygi nagrinėjamo strypo kritinei jėgai. Fizinė prasme strypo su bet kaip įtvirtintais galais skaičiuojamasis ilgis yra didžiausias atstumas tarp jo išsikreivinimo ašies perlinkio taškų (SIŽ 2004). Skaičiuojamasis ilgis nustatomas pagal formulę:

$$l_{eff} = \mu \cdot L. \quad (3.22)$$

Skaičiuojamasis ilgis priklauso nuo daugelio veiksnių: gretimų elementų, dirbančių ir tempimo, ir gniuždymo atveju, tamprumas; konstrukcinis mazgų sprendimas; plastinių deformacijų vystymasis mazge, ypač per pirmąsias apkrovų stadijas, kai sukeliamos negrįžtamos deformacijos; netobulumai ir defektai gaminant ir eksploatuojant mazgus. Visų šių veiksnių įvertinti neįmanoma, todėl ir įvedamas μ koeficientas, kuris nustatomas remiantis empirinėmis formulėmis arba randamas STR 2.05.08:2005 IX skirsnio 7.9 lentelėje.

3.3 lentelė. Santvaros elementų skaičiuojamųjų ilgių suvestinė

<i>Santvara</i>	<i>l</i>	μ_y	$l_{eff,y}$	μ_z	$l_{eff,z}$
Viršutinė juosta	-	-	2	-	2
Apatinė juosta	-	-	4	-	8
Pasvirę tinklelio elementai	2,83	0,9	2,55	0,9	2,55
Vertikalūs tinklelio elementai	2,00	1	2,00	1	2,00

▪ Ribiniai liauniai

3.4 lentelė. Santvaros elementų ribinių liaunių suvestinė

<i>Santvara</i>	<i>liaunio ribinė reikšmė</i>	<i>Strypai</i>
Viršutinė juosta	$180 - 60 \cdot \alpha$	1
Apatinė juosta	400	2
Tinklelio gniuždomi elementai	$180 - 60 \cdot \alpha$	3, 4, 8, 9
Tinklelio tempiami elementai	400	5, 6, 7

$$\alpha = \frac{N_{Ed}}{\varphi \cdot A \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c} \geq 0,5. \quad (\text{Būtiniais atvejais vietoje } \varphi \text{ imamas } \varphi_e) \quad (3.23)$$

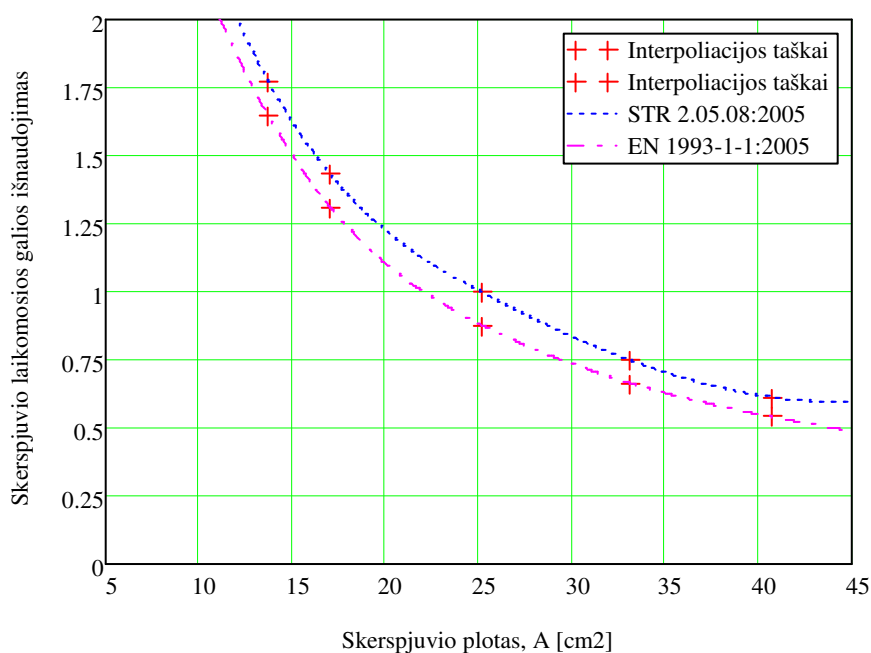
3.3.1. Elemento E1 analizė

3.5 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E1	S355	1	-572,74	-7,59 / -5,20

Santvaros elemente E1 veikia ašinė gniuždymo jėga ir lenkiamasis momentas (žr. 3.5 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra 25,11 cm² (žr. 3.6 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 139,7x6 profiliuotis (žr. 3.6 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra 25,19 cm².

Remiantis 3.8 pav. ir 3.6 lentelės duomenimis, santvaros elemento E1 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra kintamas. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrašą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.8 pav. Elemento E1 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.6 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm ²	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	139,7x3,2	13,72	4,83	1,773	1,646	-7,7
2.	x4	17,04	4,80	1,431	1,311	-9,2
3.	x6	25,19	4,73	0,997	0,877	-13,7
4.	x8	33,10	4,66	0,749	0,665	-12,6
5.	x10	40,70	4,60	0,613	0,541	-13,3

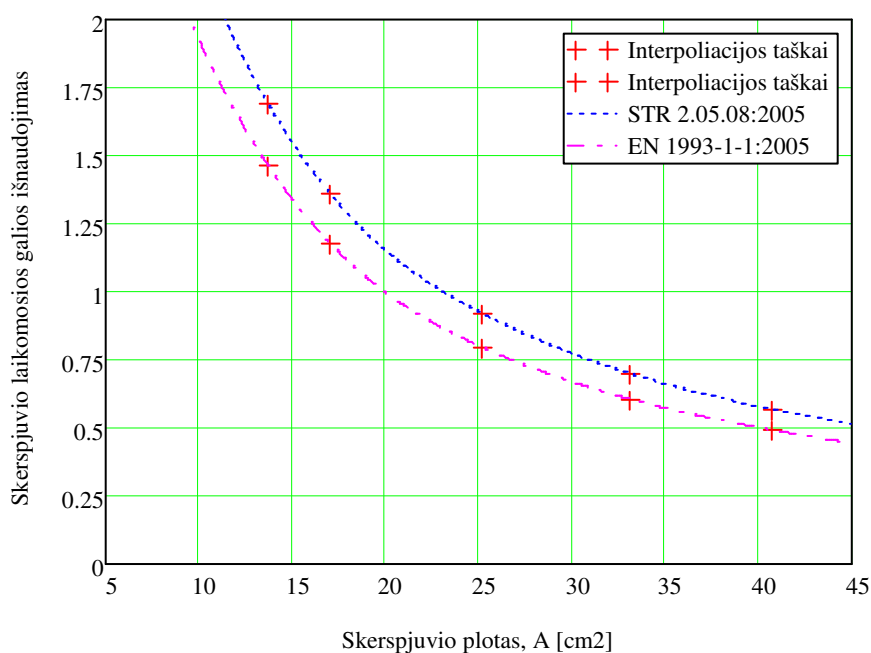
3.3.2. Elemento E2 analizė

3.7 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E2	S275	1	551,69	0

Santvaros elemente E2 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.7 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $23,10 \text{ cm}^2$ (žr. 3.9 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 139,7x6 profiliuotis (žr. 3.8 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $25,19 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.9 pav. ir 3.8 lentelės duomenimis, santvaros elemento E2 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrašą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.9 pav. Elemento E2 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.8 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	139,7x3,2	13,72	-	1,689	1,463	-15,4
2.	x4	17,04	-	1,359	1,177	-15,5
3.	x6	25,19	-	0,920	0,796	-15,6
4.	x8	33,10	-	0,700	0,606	-15,5
5.	x10	40,70	-	0,569	0,493	-15,4

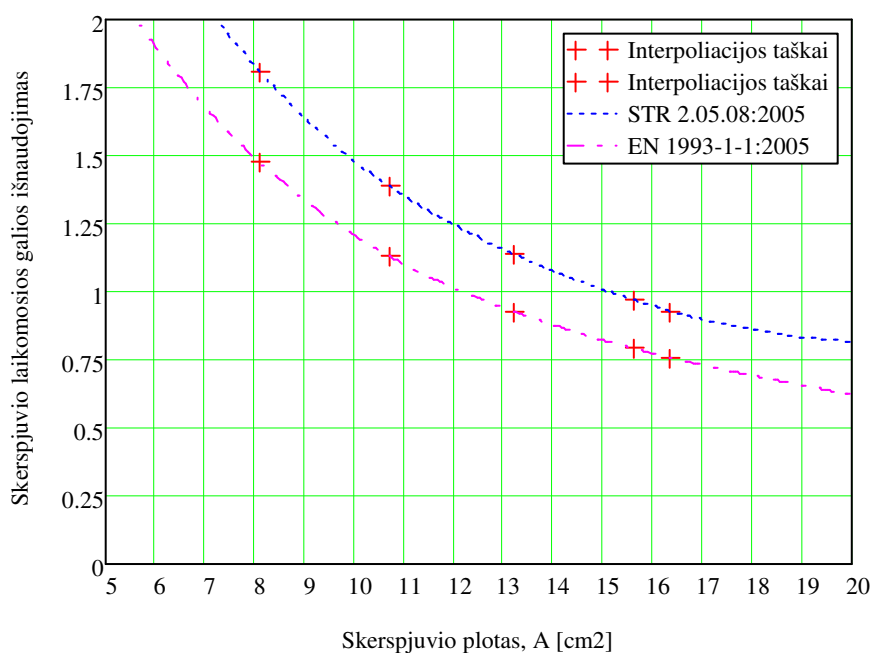
3.3.3. Elemento E3 analizė

3.9 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E3	S275	1	-226,57	0

Santvaros elemente E3 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.9 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra 15,09 cm² (žr. 3.10 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 88,9x6 profiliuotis (žr. 3.10 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra 15,62 cm².

Remiantis 3.10 pav. ir 3.10 lentelės duomenimis, santvaros elemento E3 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrašą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.10 pav. Elemento E3 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.10 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm ²	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	88,9x3	8,09	3,04	1,811	1,476	-22,7
2.	x4	10,70	3,00	1,387	1,130	-22,7
3.	x5	13,20	2,96	1,138	0,927	-22,8
4.	x6	15,62	2,94	0,969	0,791	-22,5
5.	x6,3	16,34	2,93	0,930	0,758	-22,7

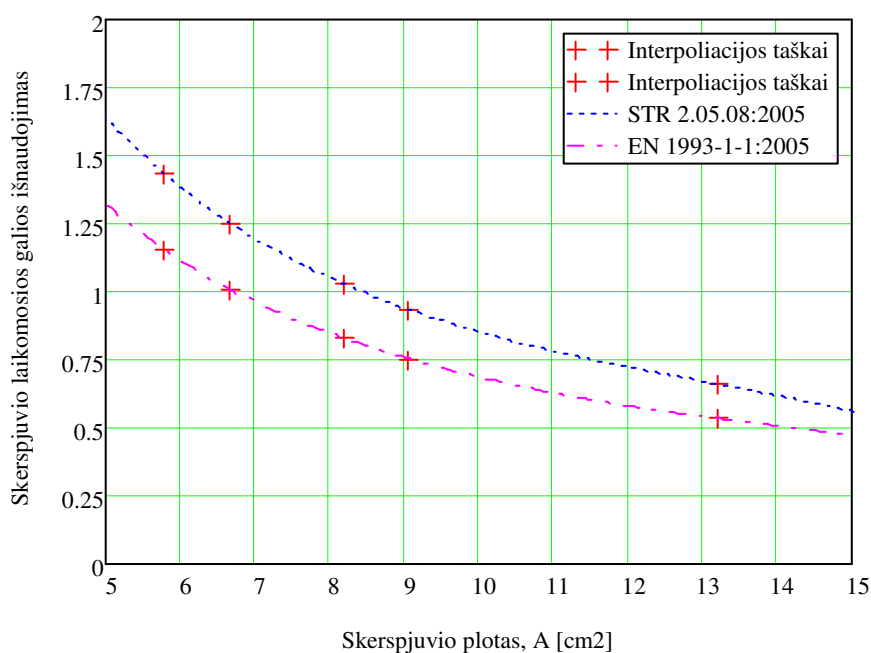
3.3.4. Elemento E4 analizė

3.11 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E4	S235	2	-99,89	0

Santvaros elemente E4 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.11 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $8,41 \text{ cm}^2$ (žr. 3.11 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 76,1x4 profiliuotis (žr. 3.12 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $9,06 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.11 pav. ir 3.12 lentelės duomenimis, santvaros elemento E4 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrašą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.11 pav. Elemento E4 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.12 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	76,1x2,5	5,78	2,60	1,434	1,155	-24,2
2.	x2,9	6,67	2,59	1,249	1,007	-24,0
3.	x3,6	8,20	2,57	1,026	0,828	-23,9
4.	x4	9,06	2,55	0,934	0,753	-24,0
5.	x6	13,21	2,49	0,659	0,534	-23,4

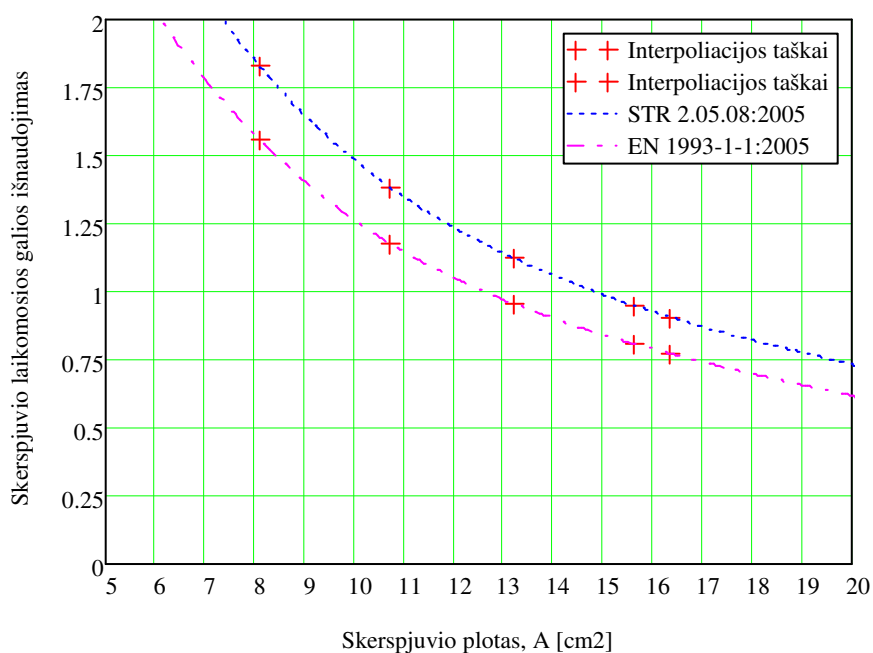
3.3.5. Elemento E5 analizė

3.13 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E5	S235	1	296,40	0

Santvaros elemente E5 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.13 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $14,83 \text{ cm}^2$ (žr. 3.12 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (*Corus Distribution* 2006), tinkamas tik CHS 88,9x6 profiliuotis (žr. 3.14 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $15,62 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.12 pav. ir 3.14 lentelės duomenimis, santvaros elemento E5 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.12 pav. Elemento E5 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.14 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	88,9x3	8,09	-	1,831	1,559	-17,5
2.	x4	10,70	-	1,385	1,179	-17,5
3.	x5	13,20	-	1,123	0,956	-17,5
4.	x6	15,62	-	0,949	0,808	-17,5
5.	x6.3	16,34	-	0,907	0,772	-17,5

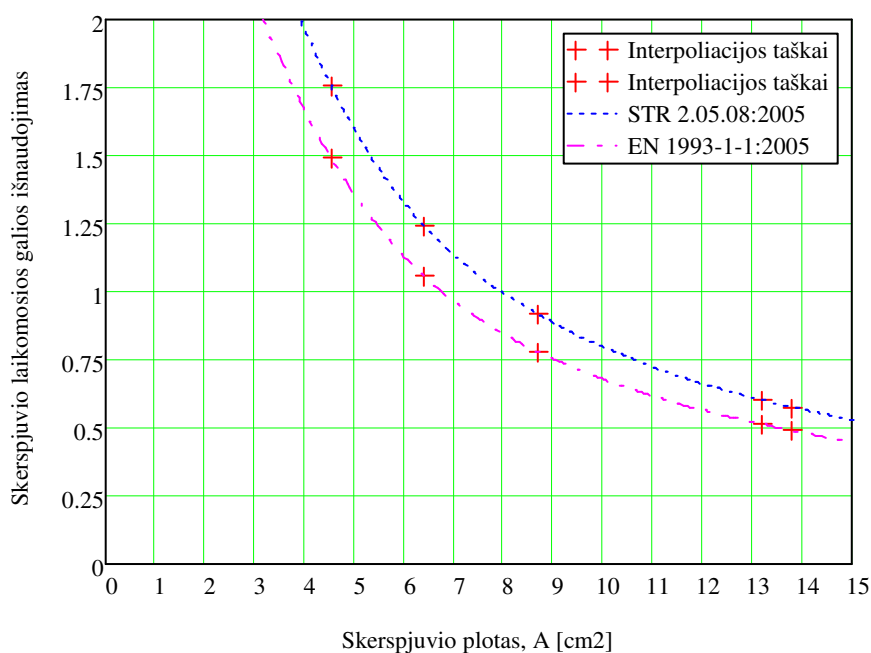
3.3.6. Elemento E6 analizė

3.15 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E6	S235	1	159,13	0

Santvaros elemente E6 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.15 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $7,94 \text{ cm}^2$ (žr. 3.13 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 60,3x5 profiliuotis (žr. 3.16 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $8,69 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.13 pav. ir 3.16 lentelės duomenimis, santvaros elemento E6 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.13 pav. Elemento E6 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.16 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	60,3x2,5	4,54	-	1,754	1,492	-17,6
2.	x3,6	6,41	-	1,241	1,056	-17,5
3.	x5	8,69	-	0,916	0,779	-17,6
4.	76,1x6	13,21	-	0,602	0,513	-17,3
5.	x6,3	13,81	-	0,576	0,490	-17,6

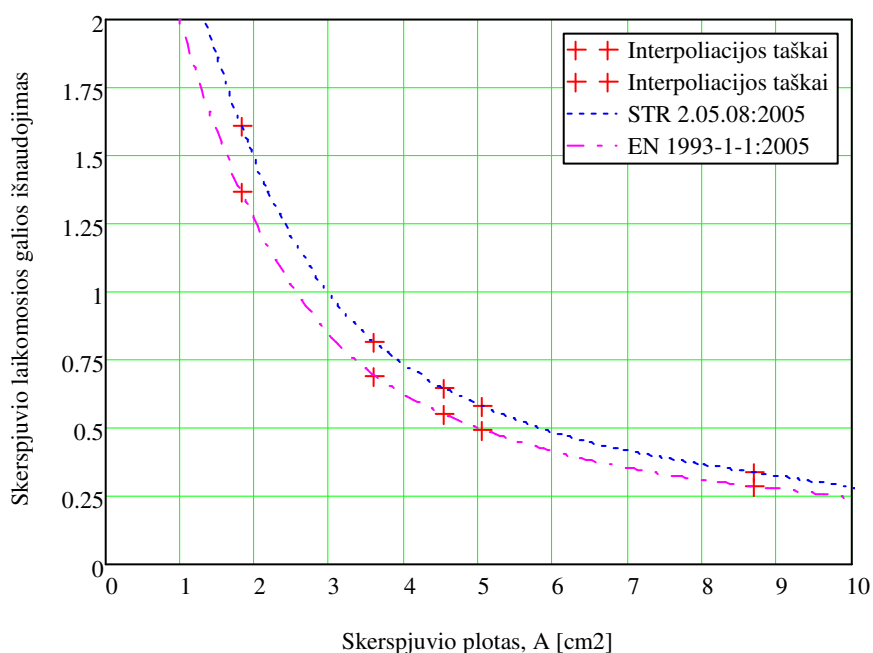
3.3.7. Elemento E7 analizė

3.17 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E7*	S235	4	58,50	0

Santvaros elemente E7 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.17 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $2,97 \text{ cm}^2$ (žr. 3.14 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 60,3x2,5 profiliuotis (žr. 3.18 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $4,54 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.14 pav. ir 3.18 lentelės duomenimis, santvaros elemento E7 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrašą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.14 pav. Elemento E7 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.18 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	21,3x3,2	1,82	-	1,607	1,368	-17,5
2.	48,3x2,5	3,60	-	0,814	0,692	-17,6
3.	x3,2	4,53	-	0,646	0,550	-17,5
4.	60,3x2,5	4,54	-	0,645	0,549	-17,5
5.	x5	8,69	-	0,337	0,286	-17,8

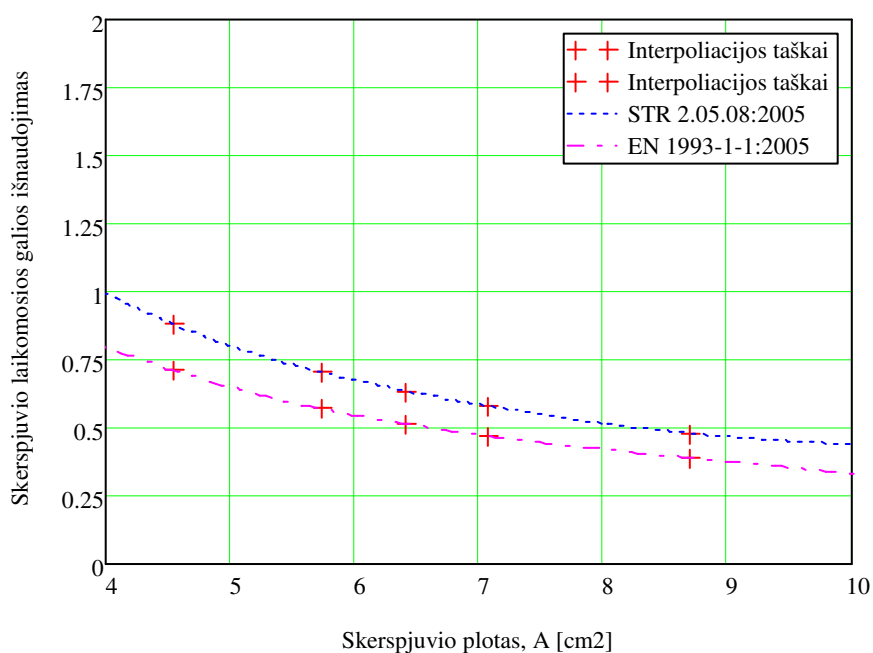
3.3.8. Elemento E8 analizė

3.19 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E8	S235	4	-48,31	0

Santvaros elemente E8 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.19 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $3,98 \text{ cm}^2$ (žr. 3.15 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 60,3x2,5 profiliuotis (žr. 3.20 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $4,54 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.15 pav. ir 3.20 lentelės duomenimis, santvaros elemento E8 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrašą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.15 pav. Elemento E8 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.20 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	60,3x2,5	4,54	2,05	0,881	0,711	-23,9
2.	x3,2	5,74	2,02	0,704	0,570	-23,5
3.	x3,6	6,41	2,01	0,636	0,514	-23,7
4.	x4	7,07	2,00	0,580	0,470	-23,4
5.	x5	8,69	1,96	0,481	0,390	-23,3

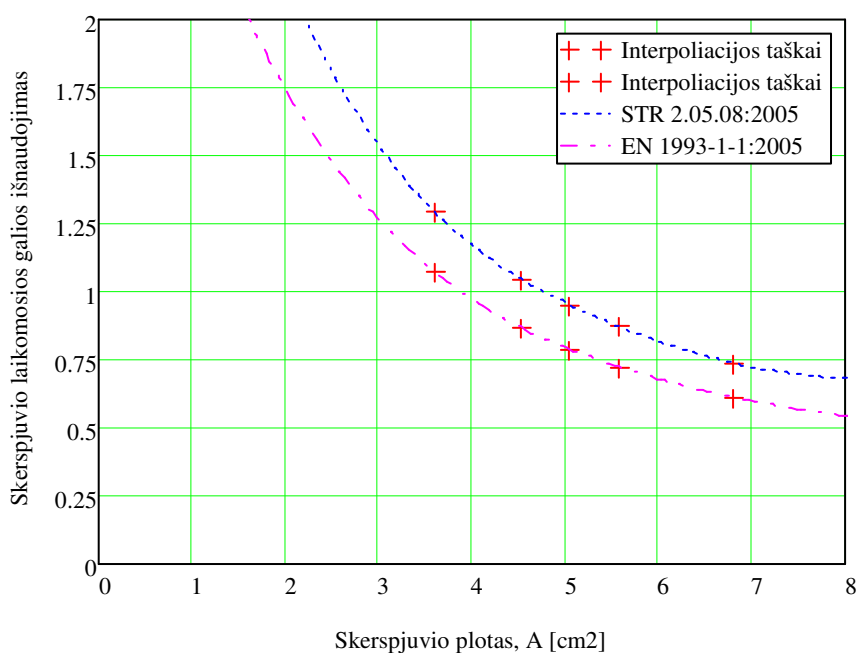
3.3.9. Elemento E9 analizė

3.21 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E9	S235	4	-41,88	0

Santvaros elemente E9 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.21 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $4,77 \text{ cm}^2$ (žr. 3.16 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 48,3x4 profiliuotis (žr. 3.22 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $5,57 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.16 pav. ir 3.22 lentelės duomenimis, santvaros elemento E9 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, būtų gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.16 pav. Elemento E9 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.22 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	48,3x2,5	3,60	1,62	1,292	1,071	-20,6
2.	x3,2	4,53	1,60	1,046	0,868	-20,5
3.	x3,6	5,05	1,59	0,952	0,789	-20,7
4.	x4	5,57	1,57	0,873	0,724	-20,6
5.	x5	6,80	1,54	0,738	0,612	-20,6

3.3.10. Analizės rezultatų apibendrinimas

Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių (žr. 3.5 ir 3.6 pav.) devynių elementų analizė remiantis STR 2.05.08:2005. Visų devynių elementų analizės rezultatas – skerspjūvio plotas, kuris atitinka sortimentą (Corus Distribution 2006) ir leidžia užtikrinti saugų visos konstrukcijos darbą, veikiant vienam iš penkių santvaros apkrovimo variantų.

Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių (žr. 3.5 ir 3.5 pav.) devynių suprojektuotų elementų analizė remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad analizuota konstrukcija galėtų būti suprojektuota ekonomiškesnė (V_{min}), nei remiantis STR 2.05.08:2005.

Sudaryti plieninių elementų, veikiamų skirtingų įrašų ar jų derinių, projektavimo algoritmai remiantis STR 2.05.08:2005. Jie pateikti A priede. Taip pat, sudarytas priedas B, kuriame pateikta analizuotų elementų, remiantis dviem plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentais, išsami analizei naudotų charakteristikų suvestinė.

3.23 lentelė. Santvaros analizės, remiantis STR 2.05.08:2005, rezultatų suvestinė

Santvara iš apskritų vamzdžių					
Elemento Nr.	Ilgis, cm	Suskaičiuotas skerspjūvio plotas, cm ²	Tūris, cm ³	Aproksimuotas skerspjūvio plotas, cm ²	Tūris, cm ³
1.	2000	CHS 139,7x6 25,19	503,80	25,11	502,20
2.	1600	CHS 139,7x6 25,19	403,04	23,10	369,60
3.	283 (2)	CHS 88,9x6 15,62	88,41	15,09	85,41
4.	283 (2)	CHS 76,1x4 9,06	51,28	8,41	47,60
5.	283 (2)	CHS 88,9x6 15,62	88,41	14,83	83,94
6.	283 (2)	CHS 60,3x5 8,69	49,19	4,94	27,96
7.	283 (2)	CHS 60,3x2,5 4,54	25,70	2,97	16,81
8.	283 (2)	CHS 60,3x2,5 4,54	18,16	3,98	15,92
9.	283 (2)	CHS 48,3x4 5,57	22,28	4,77	19,08
10.	200	CHS 48,3x4 5,57	11,14	4,77	9,54

Suprojektuota santvara iš apskritų vamzdinių profiliuotųjų (žr. 3.23 lentelę), neatsižvelgus į konstrukcinius reikalavimus (jie bus aptarti 3.5. poskyryje), sveria 990 kg. Kiekvienam analizuotos konstrukcijos elementui interpoliacijos būdu, panaudojus sudarytus skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo grafikus (žr. 3.8 – 3.16 pav.), nustatytas toks skerspjūvio plotas, kuriam esant atitinkamo elemento laikomoji galia pilnai išnaudota. Pritaikius interpoliacijos metodą analizuotos santvaros svoris lygus 925 kg. Tačiau šis svoris negali būti laikomas optimaliu, kadangi pakeitus konstrukcijos elementų skerspjūvio plotus (tokių sortimente nėra) įvyktų įrašų persiskirstymas. Norint gauti optimalią santvarą reiktų spręsti santvaros optimizavimo uždavinį.

3.4. Santvaros analizė remiantis LST EN 1993-1-1:2005 reikalavimais

LST EN 1993 Eurokodas 3 – tai plieninių konstrukcijų projektavimo standartų grupė galiojanti Lietuvos Respublikoje nuo 2010 metų, kitaip dar vadinama Eurokodu 3. Eurokodus sumanė Europos Komisija 1970 metais, kaip grupę harmonizuotų standartų statinių konstrukciniam ir geotechniniam projektavimui, bei inžineriniams darbams atlikti. Eurokodų tikslas yra pašalinti verslo barjerus Europos statybos industrijoje, kurie atsirado, dėl to, kad įvairiose šalyse konstrukciniam projektavimui buvo naudojami nacionaliniai reglamentai. Eurokodus kurti pradėta 1976 metais. 1990 metais Eurokodų kūrimo darbai buvo perkelti iš Europos Komisijos į CEN. Šiuo metu jau paruošti 9, kurie apima konstrukcijų projektavimo pagrindus, poveikius ir apkrovas į konstrukcijas ir jų projektavimą.

LST EN 1993 Eurokodas 3 standartų grupę kartu su atitinkamais nacionaliniais priedais apima visų tipų plieninių konstrukcijų ir jų elementų skaičiavimo taisykles. Ši standartų grupė suderinta su kitais eurokodais, reglamentuojančiais projektavimo pagrindus, apkrovas ir poveikius, konstrukcijų gamybą ir montavimą, produktų gamybą bei geotechninį projektavimą.

Iki Eurokodo 3 galiojančiuose Lietuvoje plieninių konstrukcijų projektavimo normose, išskyrus STR [2], nebuvo skiriama pakankamai dėmesio konstrukcijų įtemptam deformuotam būviui nustatyti. Didėjant šiuolaikinių konstrukcijų skaičiavimo metodų galimybėms ir įvairovei ir jų taikymui kompiuterinėse konstrukcijų skaičiavimo sistemose vis svarbiau tapo apibrėžti šių metodų taikymo sritis projektuojant konstrukcijas (PKISŽ 2009).

Poskyrio uždaviniai:

- Suprojektuoti santvaros iš apskritų vamzdžių devynis elementus (žr. 3.5 ir 3.6 pav.) remiantis LST EN 1993-1-1:2005 pateiktais atitinkamų elementų, kurie yra veikiami skirtingo tipo įrašų ar jų derinių, analizės algoritmais,
- Atlikti analizuotos santvaros iš apskritų vamzdžių projektavimo rezultatų analizę, remiantis STR 2.05.08:2005 nuostatomis, ir nekeičiant pradinių sąlygų: plieno stiprio, elementų skaičiuojamojo ilgio, elemente veikiančių įrašų,
- Atlikti devynių santvaros elementų (žr. 3.5 pav.) laikomosios galios priklausomybės nuo skerspjūvio ploto analizę, taikant minėtus projektavimo reglamentus, ir jos rezultatus pateikti grafikų pavidalu.

▪ Plieninių elementų analizė, remiantis LST EN 1993-1-1:2005 reikalavimais

Vientisojo ar sudėtinio skerspjūvio elementai iš valcuotų, lankstytų ar virintinių skerspjūvių vadinami strypiniais elementais. Šių elementų skerspjūvis per ilgį gali būti tolygiai arba diskrečiai kintamas. Pažymėtina, kad plieninėse konstrukcijose strypu laikomas elementas ar konstrukcija, kurių ilgis 5-6 kartus didesnis už didžiausią skerspjūvio matmenį (SIŽ 2004).

Konstrukcijos projektavimas atliekamas ją skaidant į atskirus elementus. Pirmiausiai nustatomos įrašos kiekviename konstrukcijos elemente, o toliau kiekvienas elementas projektuojamas atskirai – taip, kad atlaikytų pavojingiausią įrašų elemente derinį. Projektuojant konstrukcijas elementų lygmeniu, elementai nėra traktuojami kaip visiškai atskiri. Konstrukcijos elementų sąveikos įtaka tam tikram elementui apytikriai įvertinama remiantis inžinerinėje praktikoje plačiai taikoma skaičiuojamojo ilgio koncepcija (SIŽ 2004).

LST EN 1993 Eurokodas 3 aiškiai apibrėžia, kad įrašos gali būti skaičiuojamos taikant tampriąją arba plastinę visuminę analizę. Taikant plastinį medžiagos modelį nurodomi trys visuminės analizės atvejai.

Tampriai plastinė visuminė analizė taikant plastinių lankstų koncepciją, gerai žinoma moksliniuose tyrimuose, dabar jau įteisinta ir projektavimo normose. Čia verta paminėti, kad Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkai jau keletą dešimtmečių plačiai taiko plastinio lanksto koncepciją moksliniuose tyrimuose ir skaičiuodami konstrukcijas. Deja, tenka paminėti, kad tik nedaugelyje specializuotų konstrukcijoms skaičiuoti kompiuterinių programų šis metodas yra realizuotas (PKISŽ 2009).

Tampriai plastinė visuminė analizė taikant plastinių zonų koncepciją yra tiksliausias visuminės analizės metodas, tačiau ir imliausias darbo bei kompiuterinių išteklių požiūriu, todėl šiuo metu kol kas dažniausiai naudojamas tyrimų tikslams.

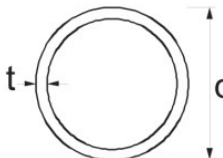
Tampriai plastinė visuminė analizė taikant standžiai plastinį medžiagos modelį ir plastinio lanksto koncepciją praktiniuose skaičiavimuose rekomenduojama naudoti tik skaičiuojant portalinius rėmus ir nekarpytąsias sijas.

Skerspjūvio klasės

Konstrukcijų elementų elgseną ir skaičiavimo metodus pirmiausia lemia elementų skerspjūvių elgsena. Vieniems skerspjūviams dėl jų dalių (sienelės, juostų ar pan.) standumo gali būti leidžiamos plastinės deformacijos, kitų skerspjūvių dalys yra gana liaunos ir gali netekti vietinio pastovumo jau tamprios būklės. Siekiant apibūdinti skerspjūvių elgseną, esant įvairiam įtempių būviui, visi skerspjūviai Eurokode 3 grupuojami į 4 skerspjūvių klases.

Skerspjūvio priklausomybė vienai ar kitai grupei lemia plieno stipris pagal takumo ribą ir skerspjūvio dalių pločio ir storio santykis. Vamzdiniai profiliuočiai grupuojami į tris skerspjūvių klases (žr. 3.17 pav.):

- *Pirmosios klasės skerspjūviai* – tai skerspjūviai, kurie gali sudaryti analizei pagal plastiškąjį modelį reikiamą sukamosios gebos plastinį lankstą, kai bendroji galia nesumažėja;
- *Antros klasės skerspjūviai* – tai skerspjūviai, kurie pasiekia savo plastinę lenkiamąją galia, tačiau dėl vietinio klupumo jų sukamoji geba yra ribota;
- *Trečios klasės skerspjūviai* – tai skerspjūviai, kuriuose įtempiai plieninio elemento kraštiniame gniuždomame sluoksnyje, kai daroma tampriojo įtempių pasiskirstymo prielaida, gali pasiekti stiprį pagal takumo ribą, tačiau vietinis klupumas neleidžia pasiekit plastinės lenkiamosios galios.

Vamzdiniai profiliuočiai						
						
Klasė	Lenkimo ir (arba) gniuždymo veikiamas skerspjūvis					
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$					
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$					
3	PASTABA Santykį $d/t > 90\varepsilon^2$ žr. EN 1993-1-6.					
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ε^2	1,00	0,85	0,66	0,56	0,51

3.17 pav. Vamzdinio profiliuotio klasės nustatymas (LST EN 1993-1-1:2005)

Centriškai tempiamas elementas

Statinių apkrovų veikiamų centriškai tempiamų elementų tikrinamas stiprumas. Tikrinant centriškai tempiamo elemento, bet kurio skerspjūvio stiprumą, turi būti tenkinama (3.24) sąlyga. Jei būtinas plastinės galios projektavimas, žiūrėti LST EN 1998:2005.

$$\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} \leq 1,0; \quad (3.24)$$

$$N_{pl,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (3.25)$$

Centriškai gniuždomas elementas

Tikrinamas šių elementų bendrasis ir vietinis pastovumas. Centriškai gniuždomų elementų bendrojo pastovumo skaičiavimo metodika sudaryta remiantis ekscentriškai gniuždomų elementų skaičiavimo metodika, įvertinant skerspjūvio formos ir elemento netobulumų (pradinio strypo ašies išsikreivavimo, atsitiktinio gniuždomos ašies pridėjimo ekscentriciteto) įtaką (PKISŽ 2009). Praktiniams skaičiavimams centriškai gniuždomų elementų skaičiavimo metodika sudaryta taikant centriškai gniuždomų elementų pastovumo koeficientą χ . Tikrinant centriškai gniuždomo elemento pastovumą turi būti tenkinama (3.26) sąlyga:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0; \quad (3.26)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}. \quad (3.27)$$

Formulėje (3.27) įvestas klupumo koeficientas χ , kuris priklauso nuo strypo liaunio ir centriškai gniuždomo elemento klupumo kreivės ir kuri priklauso nuo analizuojamo elemento metalo stiprio bei profilio pagaminimo būdo, ir nustatomo pagal X lentelę. Klupumo koeficiento χ reikšmės apskaičiuojamos pagal (3.28) formules:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0; \quad (3.28)$$

$$\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]; \quad (3.29)$$

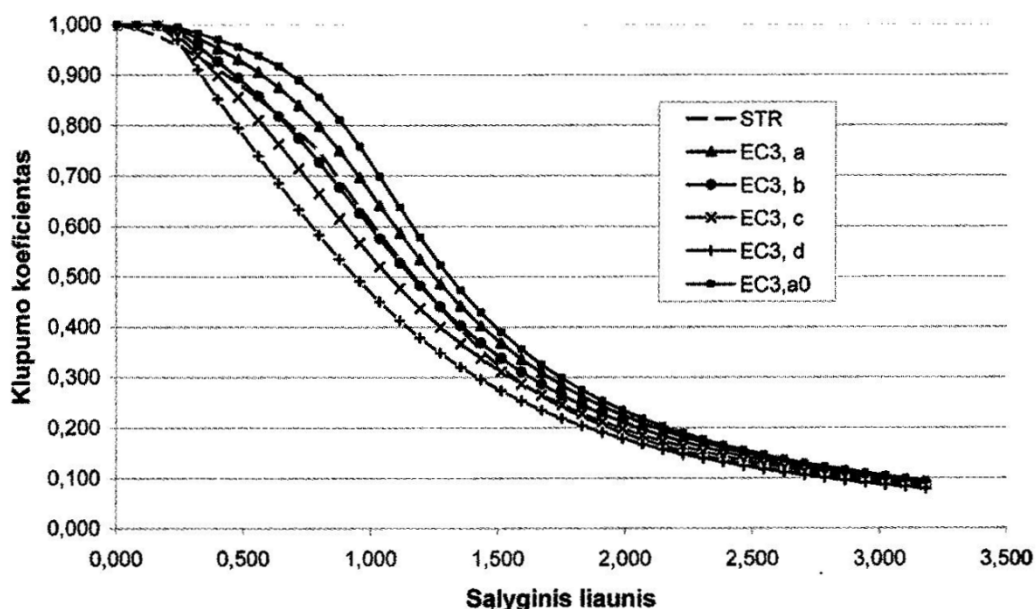
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}; \quad (3.30)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2}. \quad (3.31)$$

Skerspjūvis	Ribos	Klupumas aplink ašį	Klupumo kreivė	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
	karštai apdoroti	aplink bet kurią	a	a ₀
	šaltai formuoti	aplink bet kurią	c	c

3.18 pav. Klupumo kreivės nustatymas (LST EN 1993-1-1:2005)

3.19 pav. parodo, kaip kinta klupumo koeficientas priklausomai nuo elemento sąlyginio liaunio, esant įvairioms klupumo kreivėms. Kaip matyti iš minėtojo grafiko STR klupumo kreivę geriausia atitinka EC3, b kreivė, tačiau tokia kreivė žiediniams skerspjūviams nėra taikoma. 3.18 pav. parodo, kad žiediniams skerspjūviams gali būti pritaikoma *a* arba *c* kreivės. Kreivės pasirinkimas priklauso nuo profilio gamybos būdo. Šiame magistro darbe santvaros iš apskritų vamzdžių bus projektuojamos naudojant karštai valcuotus profilius (Corus Distribution 2006).



3.19 pav. Klupumo kreivės (PKISŽ 2009)

Lyginant 3.19 pav. pateiktą STR ir EC3, a kreivių kitimo dėsnius, matomas žymus klupumo koeficiento skirtumas, kai jis kinta ribose nuo 0,300 iki 0,900. Atlikus centriškai ir ekscentriškai gniuždomų elementų lyginamąją analizę, kai buvo taikyti du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentai, gauti neatitikimai – lyginant minėtų elementų laikomąją klūpomąją galią, esant tom pačiom projektavimo sąlygom, keičiant skerspjūvio plotą.

Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamas elementas

Elementų, lenkiamų dviejose plokštumose ar vienoje plokštumoje ir gniuždomų ašinės jėgos, elgsena yra labai sudėtinga. Pirmos eilės lenkiamuosius momentus elemente sukelia skersinis lenkimas ir elemento galuose veikiantys momentai. Ašinis gniuždymas sukelia ne tik ašinę jėgą, bet ir antros eilės momentus apie svarbiausias ašis ($P - \delta$ efektas). Taip pat atsiranda papildomų momentų dėl šoninio elemento galų persislinkimo ($P - \Delta$ efektas). Lenkimo ir ašinio gniuždymo veikiami elementai turi atitikti (3.32) ir (3.33) sąlygas:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1; \quad (3.32)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1. \quad (3.33)$$

Klasė	1	2	3
A_1	A	A	A
W_y	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$
W_z	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$
$\Delta M_{y,Ed}$	0	0	0
$\Delta M_{z,Ed}$	0	0	0

3.20 pav. Formulėse (3.32) ir (3.33) naudojamų išraiškių reikšmės (LST EN 1993-1-1:2005)

Sąveikos koeficientai $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ apskaičiuojami pagal vieną iš dviejų alternatyvių metodų, pateiktų Eurokodo 3 A ir B prieduose. Šie metodai, pagal Eurokodą 3, yra lygiaverčiai ir yra pasiūlyti ES prancūzakalbių ir vokiečiųkalbių ir leidžia skaičiuoti gniuždomuosius ir lenkiamuosius elementus nevienodu tikslumu, lyginant su tiksliais skaičiavimais, ir todėl nacionaliniame priede gali būti nurodoma, kurį metodą pasirinkti atitinkamam elementui.

Apžvelgus abu metodus, taip pat užsienio šalyse atliktus skaičiavimus, pasirinktas B metodas, kuris yra lengviau suprantamas ir jo skaičiavimo rezultatas pasiekiamas greičiau nei taikant A metodą, kurio kai kuriose šalyse taikyti nerekomenduoja.

Ribiniai elementų liauniai ir jų skaičiuojamieji ilgiai

Projektuojant santvarą iš apskritų vamzdžių (žr. 3.5 ir 3.6 pav.) pagal Eurokodą 3 skaičiuojamieji projektuojamų elementų ilgiai priimami tokie pat kaip projektuojant minėtą konstrukciją pagal STR 2.05.08:2005 reglamentą ir randami 3.3 lentelėje.

Eurokode 3 nėra pateikiamos ribinių liaunių reikšmės, todėl reiktų naudotis nacionaliniu priedu, kuris šiuo metu dar nėra paruoštas. Apžvelgus senesnės redakcijos Eurokodus pastebėta, kad tik angliškajame variante (DD ENV 1993-1-1:1992) yra pateiktos ribinių liaunių reikšmės. Ši reikšmė gniuždomiems elementams neturėtų viršyti 210.

Esant informacijos trūkumui ir norint kuo detaliau palyginti dviejų skirtingų plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus naudojamas STR 2.05.08:2005 išreikšos ribinių liaunių reikšmės. Taigi, ribinių liaunių reikšmės nustatomas remiantis 3.4 lentelėje pateiktomis išraiškomis ir priimant, kad koeficientas α lygus 0,5.

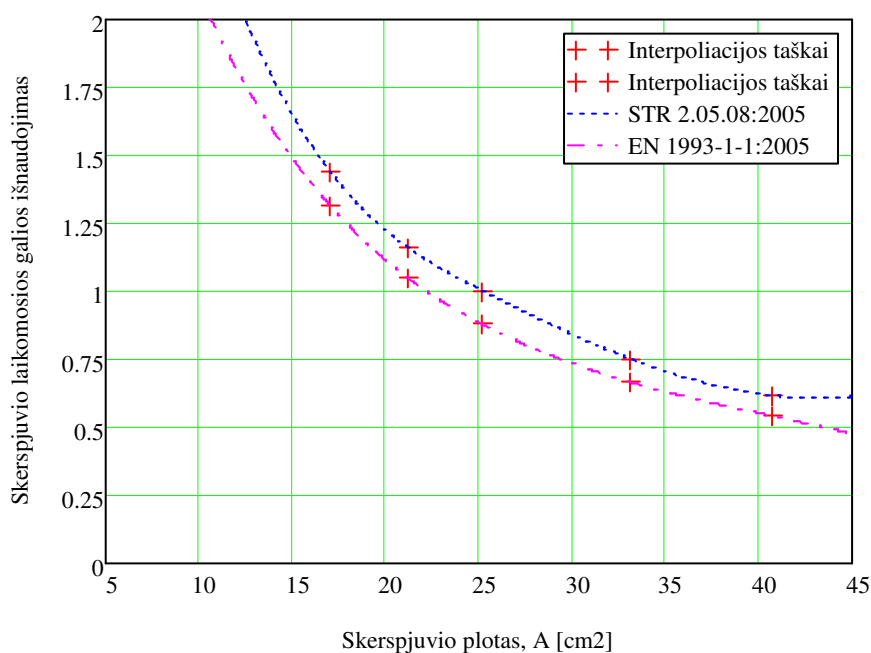
3.4.1. Elemento E1 analizė

3.24 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E1	S355	1	-571,50	-7,23 / -5,41

Santvaros elemente E1 veikia ašinė gniuždymo jėga ir lenkiamasis momentas (žr. 3.24 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra 23,18 cm² (žr. 3.21 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 139,7x6 profiliuotis (žr. 3.25 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra 25,19 cm².

Remiantis 3.21 pav. ir 3.25 lentelės duomenimis, santvaros elemento E1 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra kintamas. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.21 pav. Elemento E1 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.25 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento E1 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm ²	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	139,7x4	17,04	4,80	1,439	1,314	-9,5
2.	x5	21,20	4,76	1,162	1,049	-10,8
3.	x6	25,19	4,73	1,003	0,879	-14,1
4.	x8	33,10	4,66	0,753	0,667	-12,9
5.	x10	40,70	4,60	0,617	0,542	-13,8

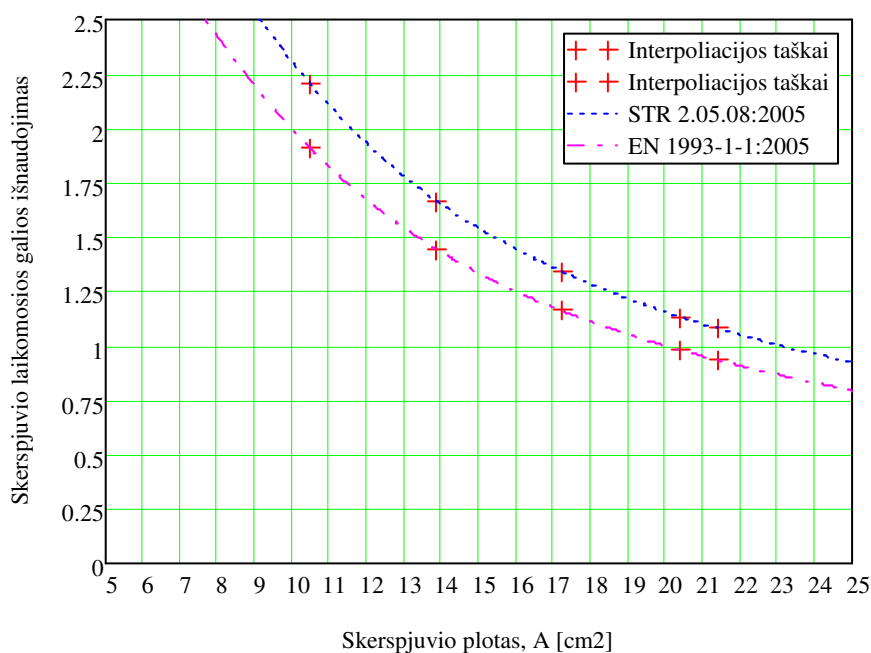
3.4.2. Elemento E2 analizė

3.26 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E2	S275	1	550,32	0

Santvaros elemente E1 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.26 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra 20,01 cm² (žr. 3.22 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 114,3x6 profiliuotis (žr. 3.27 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra 20,40 cm².

Remiantis 3.22 pav. ir 3.27 lentelės duomenimis, santvaros elemento E2 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.22 pav. Elemento E2 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.27 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E2 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm ²	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	114,3x3	10,48	-	2,205	1,909	-15,5
2.	x4	13,85	-	1,668	1,445	-15,4
3.	x5	17,20	-	1,344	1,163	-15,6
4.	x6	20,40	-	1,133	0,981	-15,6
5.	x6,3	21,40	-	1,080	0,935	-15,5

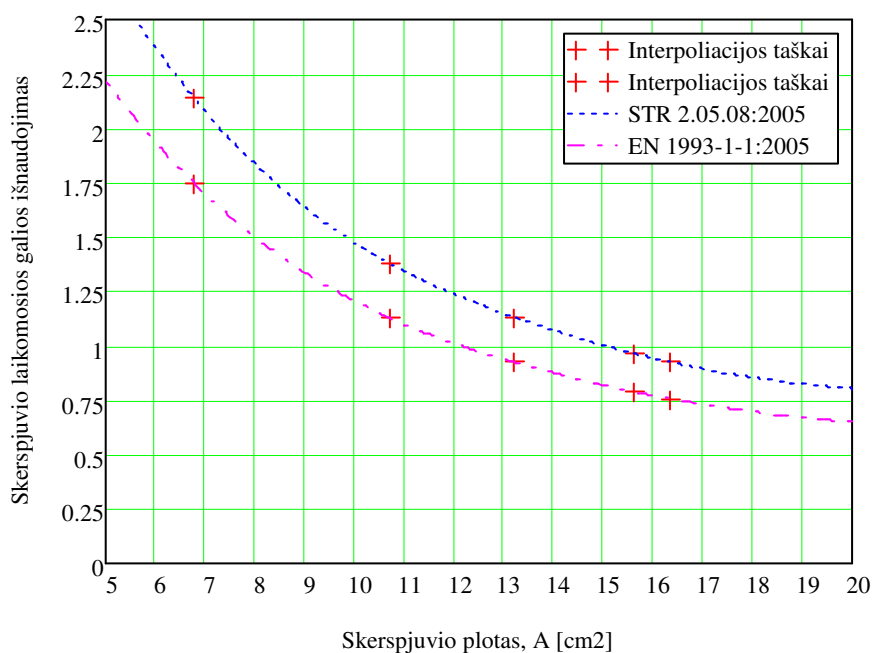
3.4.3. Elemento E3 analizė

3.28 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E3	S275	1	-225,96	0

Santvaros elemente E3 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.28 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $12,14 \text{ cm}^2$ (žr. 3.23 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 88,9x5 profiliuotis (žr. 3.29 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $13,20 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.23 pav. ir 3.29 lentelės duomenimis, santvaros elemento E3 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.23 pav. Elemento E3 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.29 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E3 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	88,9x2,5	6,78	3,06	2,138	1,747	-22,4
2.	x4	10,70	3,00	1,380	1,128	-22,3
3.	x5	13,20	2,96	1,132	0,925	-22,4
4.	x6	15,62	2,94	0,965	0,789	-22,3
5.	x6,3	16,34	2,93	0,926	0,757	-22,3

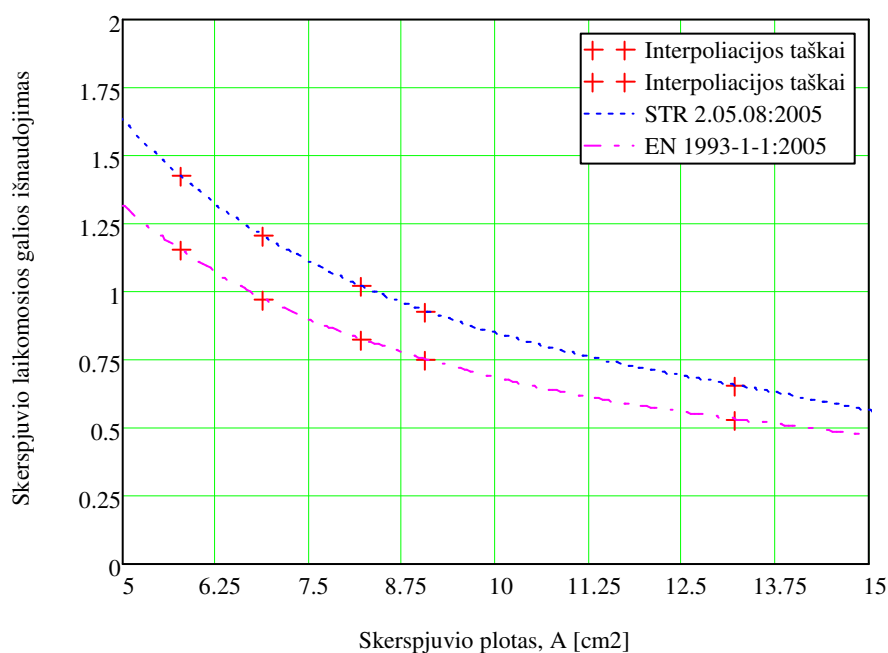
3.4.4. Elemento E4 analizė

3.30 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E4	S235	2	-99,54	0

Santvaros elemente E4 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.30 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $6,70 \text{ cm}^2$ (žr. 3.24 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 76,1x3 profiliuotis (žr. 3.31 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $6,89 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.24 pav. ir 3.31 lentelės duomenimis, santvaros elemento E4 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.24 pav. Elemento E4 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.31 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E4 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	76,1x2,5	5,78	2,60	1,425	1,152	23,7
2.	x3	6,89	2,59	1,204	0,974	23,6
3.	x3,6	8,20	2,59	1,020	0,826	23,5
4.	x4	9,06	2,55	0,928	0,751	23,6
5.	x6	13,21	2,49	0,656	0,532	23,3

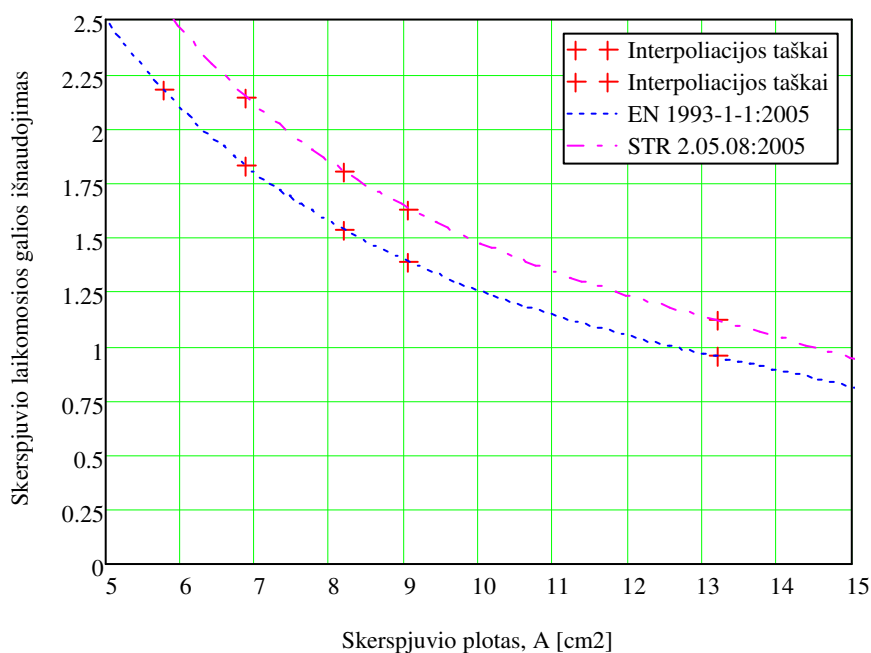
3.4.5. Elemento E5 analizė

3.32 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E5	S235	1	295,59	0

Santvaros elemente E5 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.23 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $12,60 \text{ cm}^2$ (žr. 3.25 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 76,1x6 profiliuotis (žr. 3.33 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $13,21 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.25 pav. ir 3.33 lentelės duomenimis, santvaros elemento E5 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.25 pav. Elemento E5 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.33 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E5 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	76,1x2,5	5,78	-	2,558	2,177	-17,5
2.	x2,9	6,67	-	2,146	1,827	-17,5
3.	x3,6	8,20	-	1,803	1,535	-17,5
4.	x4	9,06	-	1,631	1,388	-17,5
5.	x6	13,21	-	1,119	0,952	-17,5

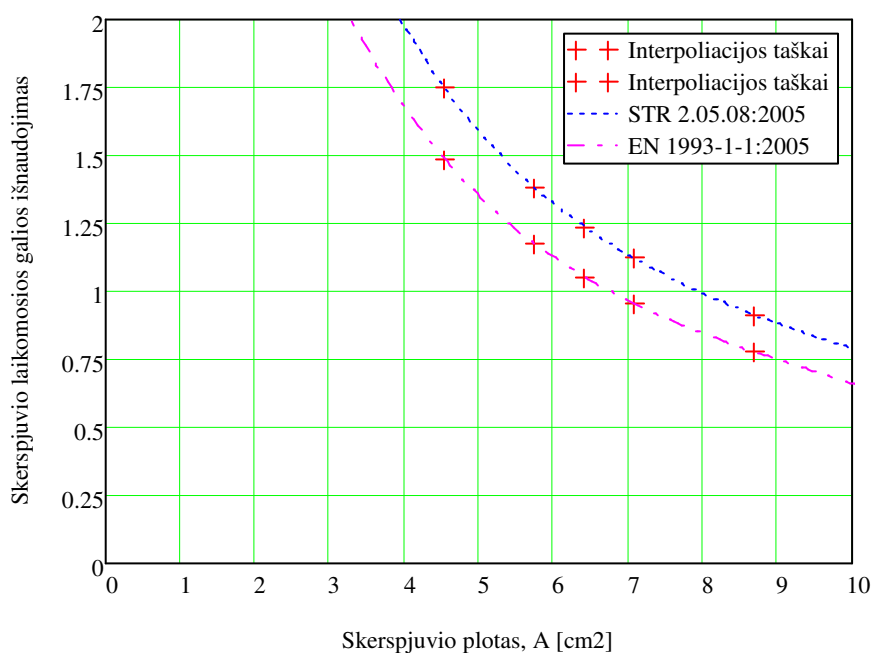
3.4.6. Elemento E6 analizė

3.34 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E6	S235	1	158,66	0

Santvaros elemente E6 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.34 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $6,75 \text{ cm}^2$ (žr. 3.26 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 60,3x4 profiliuotis (žr. 3.35 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $7,07 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.26 pav. ir 3.35 lentelės duomenimis, santvaros elemento E6 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.26 pav. Elemento E6 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.35 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E6 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	60,3x2,5	4,54	-	1,748	1,488	-17,5
2.	x3.2	5,74	-	1,382	1,176	-17,5
3.	x3.6	6,41	-	1,238	1,053	-17,6
4.	x4	7,07	-	1,122	0,955	-17,5
5.	x5	8,69	-	0,913	0,777	-17,5

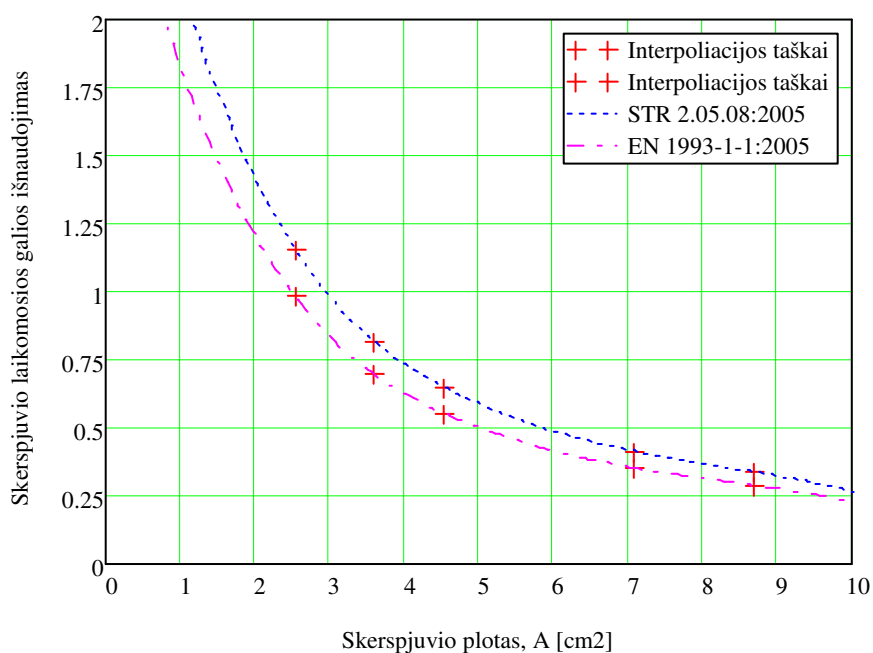
3.4.7. Elemento E7 analizė

3.36 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E7*	S235	5	58,72	0

Santvaros elemente E7 veikia ašinė tempimo jėga (žr. 3.36 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $2,50 \text{ cm}^2$ (žr. 3.27 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 60,3x2,5 profiliuotis (žr. 3.37 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $4,54 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.27 pav. ir 3.37 lentelės duomenimis, santvaros elemento E7 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.27 pav. Elemento E7 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.37 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento E7 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	33,7x2,6	2,54	-	1,156	0,984	-17,5
2.	48,3x2,5	3,60	-	0,817	0,695	-17,6
3.	60,3x2,5	4,54	-	0,647	0,551	-17,4
4.	x4	7,07	-	0,415	0,353	-17,6
5.	x5	8,69	-	0,338	0,288	-17,4

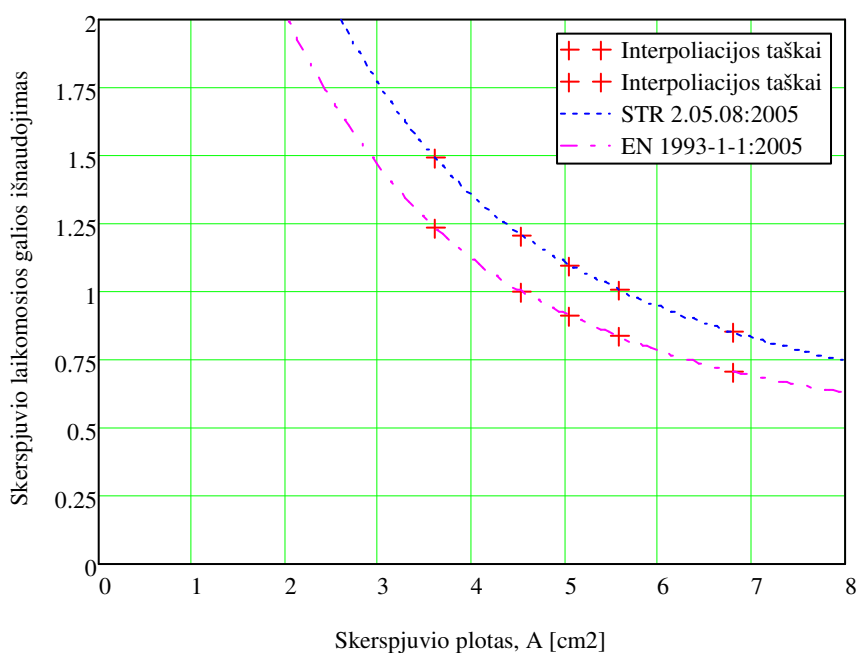
3.4.8. Elemento E8 analizė

3.38 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E8	S235	4	-48,35	0

Santvaros elemente E8 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.38 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $4,54 \text{ cm}^2$ (žr. 3.28 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 48,3x3,6 profiliuotis (žr. 3.39 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $5,05 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.28 pav. ir 3.39 lentelės duomenimis, santvaros elemento E8 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.28 pav. Elemento E8 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.39 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E8 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	48,3x2,5	3,60	1,62	1,492	1,236	-20,7
2.	x3,2	4,53	1,60	1,208	1,002	-20,6
3.	x3,6	5,05	1,59	1,098	0,911	-20,5
4.	x4	5,57	1,57	1,008	0,836	-20,6
5.	x5	6,80	1,54	0,851	0,707	-20,4

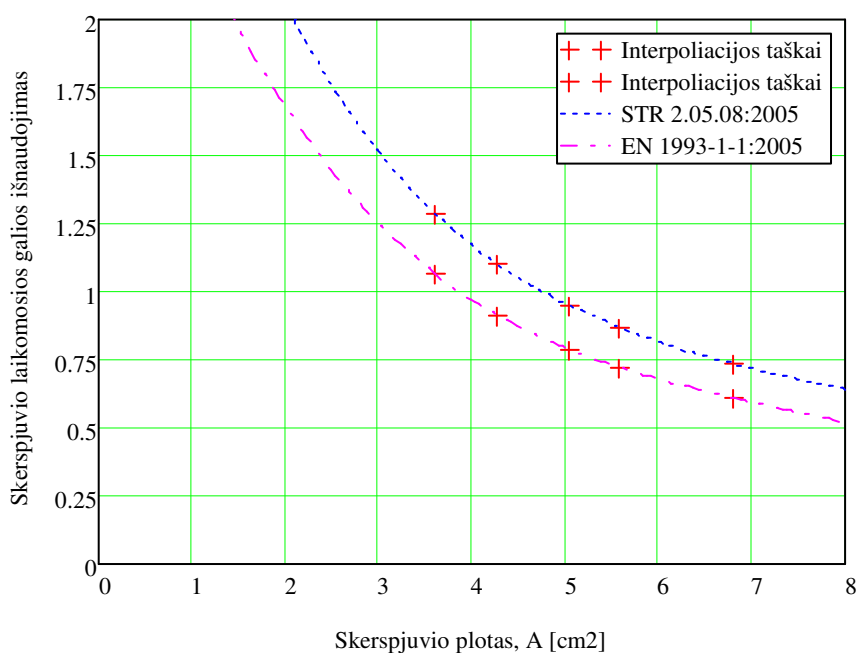
3.4.9. Elemento E9 analizė

3.40 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 charakteristikos

Elementas	Plieno markė	Apkrovimo var.	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
E9	S235	5	-41,72	0

Santvaros elemente E9 veikia ašinė gniuždymo jėga (žr. 3.40 lentelę). Šio elemento analizė atlikta remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Analizės metu nustatyta, kad elemento laikomoji galia pilnai išnaudota, kai jo skerspjūvio plotas yra $3,86 \text{ cm}^2$ (žr. 3.29 pav.). Tačiau, atsižvelgus į apskritų vamzdžių sortimentą (Corus Distribution 2006), tinkamas tik CHS 48,3x3 profiliuotis (žr. 3.29 lentelę), kurio skerspjūvio plotas yra $4,27 \text{ cm}^2$.

Remiantis 3.31 pav. ir 3.41 lentelės duomenimis, santvaros elemento E9 analizės rezultatų skirtumas, pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, kiekviename iš penkių žingsnių yra pastovus. Taigi, skerspjūvio plotas, reikalingas perimti elemente veikiančią įrąžą, gautas mažesnis taikant LST EN 1993-1-1:2005.



3.29 pav. Elemento E9 skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo palyginamasis grafikas

3.41 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento E9 analizės santrauka

Eil. Nr.	Skerspjūvio geometrinės charakteristikos			Skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimas		Skirtumas, %
	Žymuo	A, cm^2	i, cm	STR 2.05.08:2005	LST EN 1993-1-1:2005	
1.	48,3x2,5	3,60	1,62	1,287	1,066	20,7
2.	x3	4,27	1,61	1,101	0,913	20,6
3.	x3,6	5,05	1,59	0,948	0,786	20,6
4.	x4	5,57	1,57	0,870	0,722	20,5
5.	x5	6,80	1,54	0,735	0,610	20,5

3.4.10. Analizės rezultatų apibendrinimas

Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių (žr. 3.5 ir 3.6 pav.) devynių elementų analizė remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Visų devynių elementų analizės rezultatas – skerspjūvio plotas, kuris atitinka sortimentą (Corus Distribution 2006) ir leidžia užtikrinti saugų visos konstrukcijos darbą, veikiant vienam iš penkių santvaros apkrovimo variantų.

Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių (žr. 3.5 ir 3.6 pav.) devynių suprojektuotų elementų analizė remiantis STR 2.05.08:2005. Analizės metu nustatyta, kad analizuota konstrukcija yra suprojektuota ekonomiškesnė (V_{min}), nei remiantis LST EN 1993-1-1:2005.

Sudaryti plieninių elementų, veikiamų skirtingų įrašų ar jų derinių, projektavimo algoritmai remiantis LST EN 1993-1-1:2005. Jie pateikti C priede. Taip pat, sudarytas priedas D, kuriame pateikta analizuotų elementų, remiantis dviem plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentais, išsami analizei naudotų charakteristikų suvestinė.

3.42 lentelė. Santvaros analizės, remiantis LST EN 1993-1-1:2005, rezultatų suvestinė

<i>Santvara iš apskritų vamzdžių</i>					
<i>Elemento Nr.</i>	<i>Ilgis, cm</i>	<i>Suskaičiuotas skerspjūvio plotas, cm²</i>	<i>Tūris, cm³</i>	<i>Aproksimuotas skerspjūvio plotas, cm²</i>	<i>Tūris, cm³</i>
1.	2000	CHS 139,7x6 25,19	503,80	23,18	463,60
2.	1600	CHS 114,3x6 20,40	326,40	20,01	320,16
3.	283 (2)	CHS 88,9x5 13,20	74,71	12,14	68,71
4.	283 (2)	CHS 76,1x3 6,89	39,00	6,70	37,92
5.	283 (2)	CHS 76,1x6 13,21	74,77	12,60	71,32
6.	283 (2)	CHS 60,3x4 7,07	40,02	6,75	38,21
7.	283 (2)	CHS 60,3x2,5 4,54	25,70	2,50	14,15
8.	283 (2)	CHS 48,3x3,6 5,05	20,20	4,54	18,16
9.	283 (2)	CHS 48,3x3 4,27	17,08	3,86	15,44
10.	200	CHS 48,3x3 4,27	8,54	3,86	7,72

Suprojektuota santvara iš apskritų vamzdinių profiliuotųjų (žr. 3.42 lentelę), neatsižvelgus į konstrukcinius reikalavimus (jie bus aptarti 3.5. poskyryje), sveria 888 kg. Kiekvienam analizuotos konstrukcijos elementui interpoliacijos būdu, panaudojus sudarytus skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo priklausomybės nuo skerspjūvio ploto kitimo grafikus (žr. 3.21 – 3.29 pav.), nustatytas toks skerspjūvio plotas, kuriam esant atitinkamo elemento laikomoji galia pilnai išnaudota. Pritaikius interpoliacijos metodą analizuotos santvaros svoris lygus 828 kg. Tačiau šis svoris negali būti laikomas optimaliu, kadangi pakeitus konstrukcijos elementų skerspjūvio plotus (tokių sortimente nėra) įvyktų įrašų persiskirstymas. Norint gauti optimalią santvarą reiktų spręsti santvaros optimizavimo uždavinį.

3.5. Santvaros mazgai

Analizuojamos santvaros tinklelio elementai prie juostų jungiami be papildomų antdėklių detalių naudojant sudurtines virintines jungtis. Mazgus formuojantys elementai turi tenkinti suvirinimo ir konstrukcinius reikalavimus.

Atsižvelgus į suvirinimo reikalavimus, kurie pateikti VII skyriaus 4 dalyje (SIŽ 2004), koreguojami suprojektuotų santvarų, pagal du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, elementų profiliai (žr. 3.43 lentelė.). Įvertinus suvirinimo reikalavimus suprojektuotų santvarų bendrieji svoriai padidėja. Elementai, kurių skerspjūviai pakito, 3.43 lentelėje pabraukti.

3.43 lentelė. Santvarų elementų suvestinė, įvertinus suvirinimo reikalavimus

<i>Santvaros elemento numeris</i>	<i>Projektavimo rezultatas STR 2.05.08:2005</i>	<i>Įvertinus suvirinimo reikalavimus</i>	<i>Projektavimo rezultatas LST EN 1993-1-1:2005</i>	<i>Įvertinus suvirinimo reikalavimus</i>
1.	CHS 139,7x6	CHS 139,7x6	CHS 139,7x6	CHS 139,7x6
2.	CHS 139,7x6	CHS 139,7x6	CHS 114,3x6	CHS 114,3x6
3.	CHS 88,9x6	CHS 88,9x6	CHS 88,9x5	CHS 88,9x5
4.	CHS 76,1x4	<u>CHS 76,1x5</u>	CHS 76,1x3	<u>CHS 76,1x5</u>
5.	CHS 88,9x6	CHS 88,9x6	CHS 76,1x6	CHS 76,1x6
6.	CHS 60,3x5	CHS 60,3x5	CHS 60,3x4	<u>CHS 60,3x5</u>
7.	CHS 60,3x2,5	<u>CHS 60,3x5</u>	CHS 60,3x2,5	<u>CHS 60,3x5</u>
8.	CHS 60,3x2,5	<u>CHS 60,3x5</u>	CHS 48,3x3,6	<u>CHS 48,3x5</u>
9.	CHS 48,3x4	<u>CHS 48,3x5</u>	CHS 48,3x3	<u>CHS 48,3x5</u>
10.	CHS 48,3x4	<u>CHS 48,3x5</u>	CHS 48,3x3	<u>CHS 48,3x5</u>

Magistro darbe santvarų iš apskritų vamzdžių virintinių jungčių analizė apsiriboja tik jungties suvirinimo reikalavimų išpildymu. Suvirinimo reikalavimai, kurie pateikti VII skyriaus 4 dalyje (SIŽ 2004), buvo pritaikyti abejoms santvaroms, nors jos ir buvo projektuotos pagal skirtingus plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus.

Konstrukcinių reikalavimų įvertinimas – sudėtingesnis uždavinys. Šio darbo 3.3. ir 3.4. poskyriuose buvo aptarti du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentai. Šie reglamentai turi savo virintinių tinklelio iš apskritų vamzdžių ir juostų iš apskritų vamzdžių mazgų tinkamumo ribas. Santvaros iš apskritų vamzdžių, suprojektuotos pagal:

- STR 2.05.08:2005, mazgų tinkamumo ribos vertintos pagal minėto reglamento 8 priedo 4.2 lentelės reikalavimus (atsižvelgta į suvirinimo reikalavimus),
- LST EN 1993:2005, mazgų tinkamumo ribos vertintos pagal minėto reglamento 8 dalies 7.1 lentelės reikalavimus (atsižvelgta į suvirinimo reikalavimus).

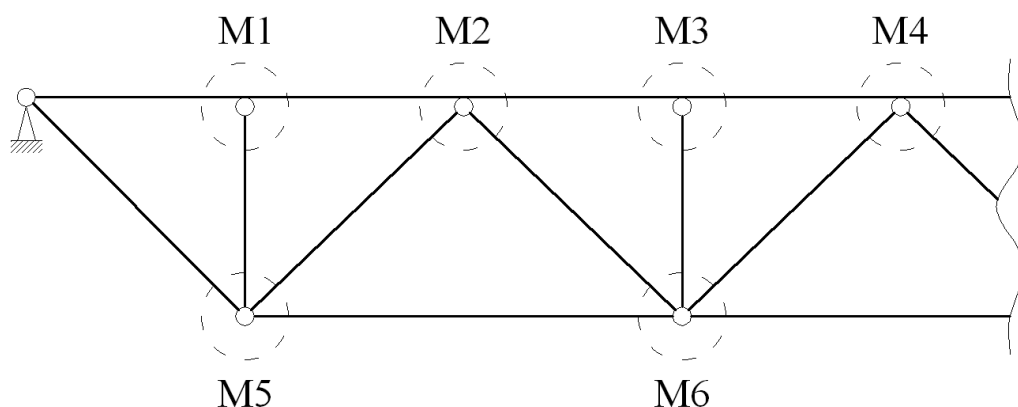
3.5.1. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, mazgų analizė

Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių mazgus sudarančių elementų tinkamumo ribų analizė pagal STR 2.05.08:2005 8 priedo 4.2 lentelėje nurodytas dvi sąlygas. 3.44 lentelėje jos pateiktos kaip *Sąlyga 1* ir *Sąlyga 2*. Tačiau lentelėje 3.44 yra ir *Sąlyga 3* (Paulauskas 1977).

3.44 lentelė. Santvaros elementų suvestinė, įvertinus tinkamumo ribas

Elemento numeris	Elemento profiliuotis	Sąlyga Nr. 1 $d_j/t_j \leq 30 \dots 35$	Sąlyga Nr. 2 $d_t/t_t \leq 80 \dots 90$	Sąlyga Nr. 3 $d_t \geq 0,333 \cdot d_j$	
1.	CHS 139,7x6	$23 < 30 \dots 35$	-	$0,333 \cdot d_j = 46,6$	
2.	CHS 139,7x6	$23 < 30 \dots 35$	-	$0,333 \cdot d_j = 46,6$	
3.	CHS 88,9x6	-	$15 < 80 \dots 90$	$88,9 >$	$88,9 >$
4.	CHS 76,1x5	-	$15 < 80 \dots 90$	$76,1 >$	$76,1 >$
5.	CHS 88,9x6	-	$15 < 80 \dots 90$	$88,9 >$	$88,9 >$
6.	CHS 60,3x5	-	$12 < 80 \dots 90$	$60,3 >$	$60,3 >$
7.	CHS 60,3x5	-	$12 < 80 \dots 90$	$60,3 >$	$60,3 >$
8.	CHS 60,3x5	-	$12 < 80 \dots 90$	$60,3 >$	$60,3 >$
9.	CHS 48,3x5	-	$10 < 80 \dots 90$	$48,3 >$	$48,3 >$
10.	CHS 48,3x5	-	$10 < 80 \dots 90$	$48,3 >$	$48,3 >$

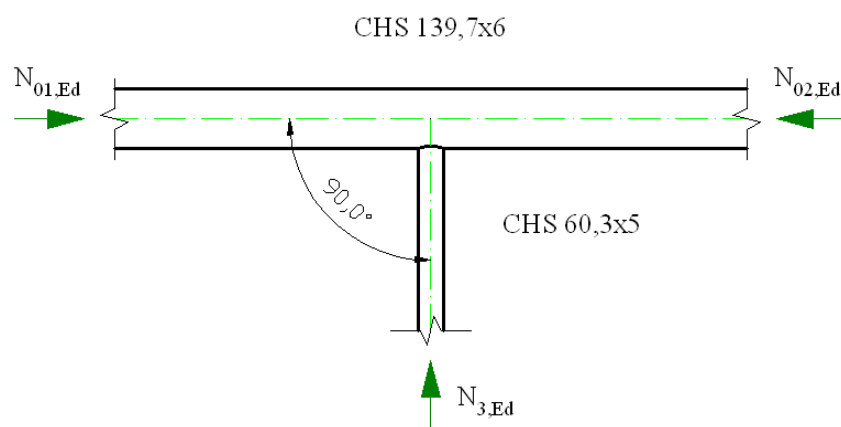
Atlikta santvaros mazgus sudarančių elementų tinkamumo ribų analizė parodė, kad parinkti skerspjūviai (jau buvo atsižvelgta į suvirinimo reikalavimus (žr. 3.43 lentelę)), yra tinkami konstruoti mazgus ir skaičiuoti jų atsparį.



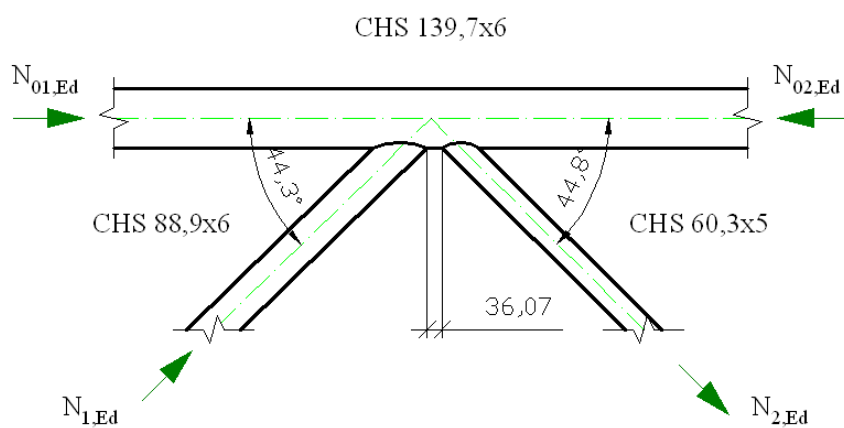
3.30 pav. Skaičiuojamų mazgų padėtis santvaroje iš apskritų vamzdžių

Pastaba: skaičiuojamieji santvaros mazgų modeliai pateikti kitame lape su visomis skaičiavimui reikalingomis charakteristikomis. Mazgai modeliuojami stengiantis išvengti ekscentriciteto – jo reikšmė būtų nulinė arba tenkintų leistinas ribas.

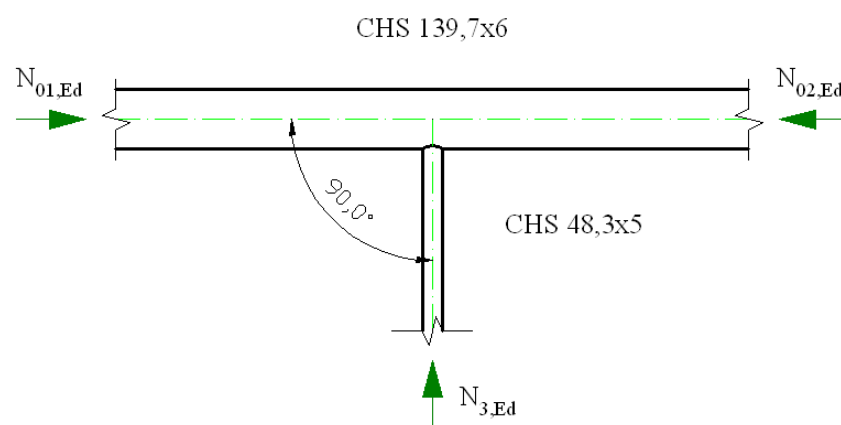
a)



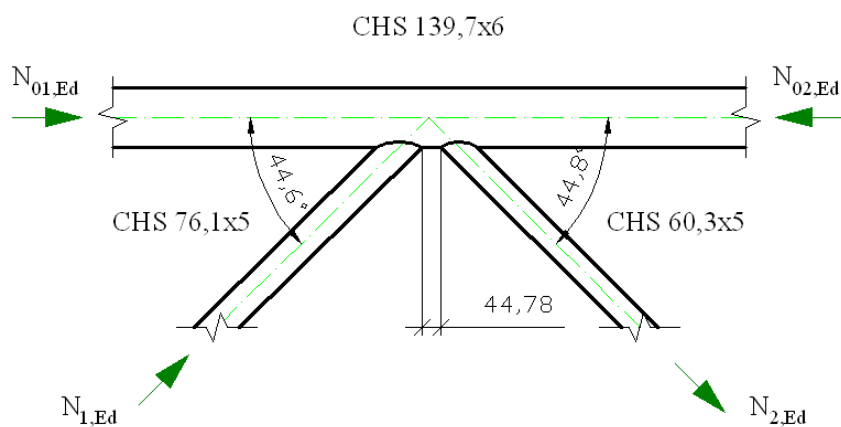
b)



c)

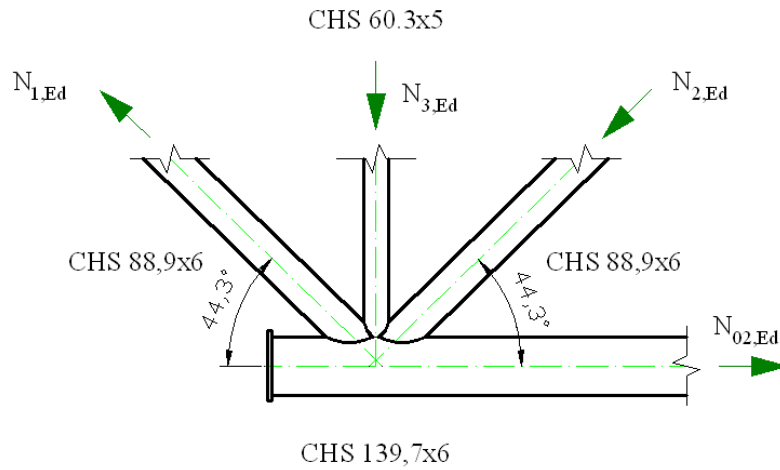


d)

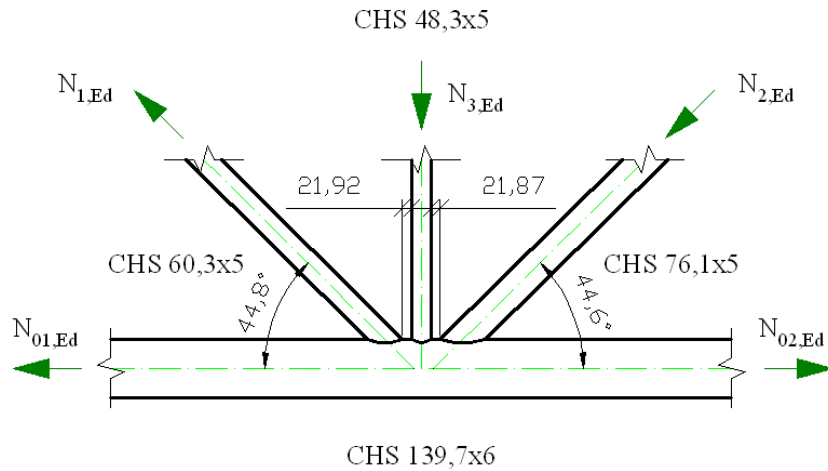


3.31 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, viršutinės juostos mazgų (atitinkamai M1 (a) – M4 (d)) geometrinės charakteristikos

a)



b)



3.32 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, apatinės juostos mazgų (atitinkamai M5 (a) – M6 (b)) geometrinės charakteristikos

3.31 ir 3.32 paveiksluose pateikti šeši analizuojami santvaros mazgai: 2 mazgai „K“ tipo be užlaidos, 2 mazgai „T“ tipo, 1 mazgas „KT“ tipo su užlaida, 1 mazgas „KT“ tipo be užlaidos. Visi mazgai sukonstruoti taip, kad atsirandančio ekscentriciteto nereikėtų vertinti.

Mazgų atspario skaičiavimas pateiktas STR 2.05.08:2005 8 priedo VIII skirsnyje. Norint užtikrinti mazgo atsparį reikia patikrinti (2.34), (2.35) ir (2.36) sąlygas. Juostos praspaudimas tikrinamas pagal (2.34) ir (2.35) išraiškas, kai juostos skersmens ir sienelės storio santykis yra didesnis nei 20 ir mažesnis nei 60. Tinklelio elementų atsparis turi atitikti (2.36) sąlygą.

$$\left| \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij} \mu_i N_{i,Ed} \frac{\sin \theta_i}{\psi_i} \right| \leq \gamma_{0j} \gamma_{rj} N_{0,Rd} \quad (2.34)$$

$$\left| N_{j,Ed} \right| \frac{\sin \alpha_j}{\psi_j} \leq 2 \cdot N_{0,Rd} \quad (2.35)$$

$$\frac{N_{Ed} (1 + \chi \delta)}{A_t \gamma_d \gamma_{cd} f_{y,d}} \leq 1 \quad (2.36)$$

Pateiktos mazgo atspario skaičiavimo formulės modifikuojamos taip, kad galutinis išraiškos atsakymas būtų mazge veikiančios įrąžos ir mazgo laikomosios galios santykis, kuris negali būti didesnis už vienetą. Modifikuotos formulės pateiktos (2.37), (2.38) ir (2.39) išraiškomis.

$$\frac{\left| \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ij} \mu_i N_{i,Ed} \frac{\sin \theta_i}{\psi_i} \right|}{\gamma_{0,j} \gamma_{rj} N_{0,Rd}} \leq 1 \quad (2.37)$$

$$\frac{\left| N_{j,Ed} \right| \frac{\sin \theta_j}{\psi_j}}{2 \cdot N_{0,Rd}} \leq 1 \quad (2.38)$$

$$\frac{N_{Ed} (1 + \chi \delta)}{A_i \gamma_d \gamma_{cd} f_{y,d}} \leq 1 \quad (2.39)$$

3.45 lentelė. Santvaros mazgų atsparių skaičiavimų suvestinė

„T“ mazgai							
Eil. Nr.	Mazgo žymuo	Pavojingiausias apkrovimo variantas	Formulė (2.37)	Formulė (2.38)		Formulė (2.39)	
1.	M1	1 apkr. variantas	0,508	0,245		0,237	
2.	M3	1 apkr. variantas	0,643	0,264		0,260	
„K“ mazgai							
Eil. Nr.	Mazgo žymuo	Pavojingiausias apkrovimo variantas	Formulė (2.37)	Formulė (2.38)		Formulė (2.39)	
3.	M2	1 apkr. variantas	0,031	0,552	0,570	0,610	0,969
4.	M4	1 apkr. variantas	0,048	0,283	0,109	0,376	0,185
„KT“ mazgai							
Eil. Nr.	Mazgo žymuo	Pavojingiausias apkrovimo variantas	Formulė (2.37)	Formulė (2.38)		Formulė (2.39)	
5.	M5	1 apkr. variantas	0,094	0,913	0,846	1,127	0,836
6.	M6	1 apkr. variantas	0,031	0,723	0,506	1,089	0,597

▪ Apibendrinimas

Suprojektuotos santvaros mazgų analizė parodė (žr. 3.45 lentelę), kad mazgo M5 atsparis nėra pakankamas. Šis mazgas stiprinamas 4 mm storio juostos plokšte. Detalūs mazgų skaičiavimai pateikti E priede. Programinio paketo „MathCAD“ (Lapisnkas 2006) terpėje parašytos skaičiuoklės, skirtos mazgų analizei, pateiktos K priede. Įvertinus mazgų analizės rezultatus, santvarą iš apskritų vamzdžių sudarančių elementų profiliuotųjų (žr. 3.44 lentelę) bendroji masė – 1038 kg.

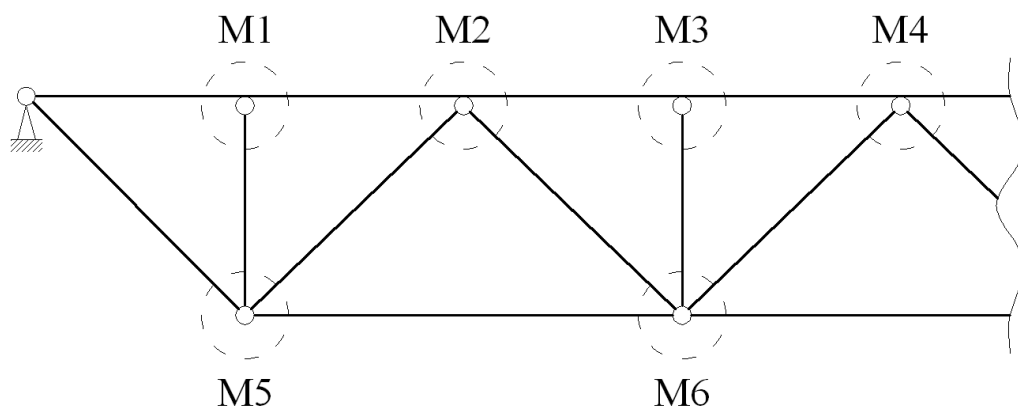
3.5.2. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993-1-1:2005, mazgų analizė

Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių mazgus sudarančių elementų tinkamumo ribų analizė pagal LST EN 1993-1-8:2005 7.1 lentelėje nurodytas sąlygas. Elementų tinkamumo ribų patikrinimo suvestinė, pagal dvi sąlygas, pateikta 3.46 lentelėje.

3.46 lentelė. Santvaros elementų suvestinė, įvertinus elementų tinkamumo ribas

Elemento numeris	Elemento profiliuotis	Sąlyga Nr. 1 $0,2 \leq d_i/d_0 \leq 1,0$		Sąlyga Nr. 2 $10 \leq d_i/t_i \leq 50$
1.	CHS 139,7x6	-		$10 \leq 23,28 \leq 50$
2.	CHS 114,3x6	-		$10 \leq 19,05 \leq 50$
3.	CHS 88,9x5	$0,2 \leq 0,63 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,78 \leq 1,0$	$10 \leq 17,78 \leq 50$
4.	CHS 76,1x5	$0,2 \leq 0,54 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,67 \leq 1,0$	$10 \leq 15,22 \leq 50$
5.	CHS 76,1x6	$0,2 \leq 0,54 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,67 \leq 1,0$	$10 \leq 15,22 \leq 50$
6.	CHS 60,3x5	$0,2 \leq 0,43 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,53 \leq 1,0$	$10 \leq 12,06 \leq 50$
7.	CHS 60,3x5	$0,2 \leq 0,43 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,53 \leq 1,0$	$10 \leq 12,06 \leq 50$
8.	CHS 48,3x5 → 60,3x5	$0,2 \leq 0,35 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,42 \leq 1,0$	$9,66 < 10 \rightarrow 12,06 < 10$
9.	CHS 48,3x5 → 60,3x5	$0,2 \leq 0,35 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,42 \leq 1,0$	$9,66 < 10 \rightarrow 12,06 < 10$
10.	CHS 48,3x5 → 60,3x5	$0,2 \leq 0,35 \leq 1,0$	$0,2 \leq 0,42 \leq 1,0$	$9,66 < 10 \rightarrow 12,06 < 10$

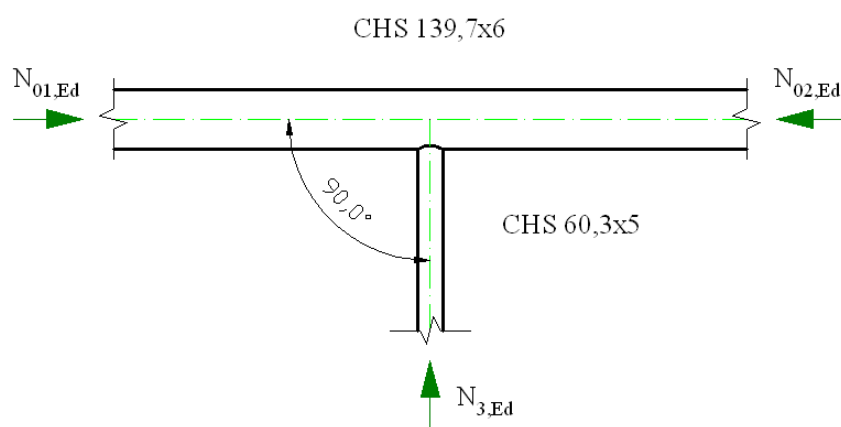
Atlikta santvaros mazgus sudarančių elementų tinkamumo ribų analizė parodė, kad nevysi parinkti skerspjūviai (jau buvo atsižvelgta į suvirinimo reikalavimus (žr. 3.43 lentelę)), yra tinkami konstruoti mazgus ir skaičiuoti jų atsparį. Elementų 8 – 10 profiliuočiai (žr. 3.46 lentelė) nėra tinkami, todėl šių elementų profiliuočius *CHS 48,3x5* keičiu į *CHS 60,3x5* profiliuočius.



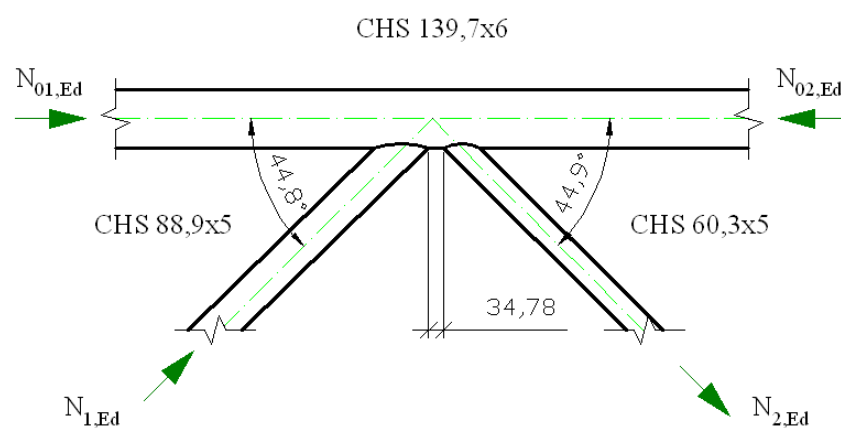
3.33 pav. Skaičiuojamų mazgų padėtis santvaroje iš apskritų vamzdžių

Pastaba: skaičiuojamieji santvaros mazgų modeliai pateikti kitame lape su visomis skaičiavimui reikalingomis charakteristikomis. Mazgai modeliuojami stengiantis išvengti ekscentriciteto – jo reikšmė būtų nulinė arba tenkintų leistinas ribas.

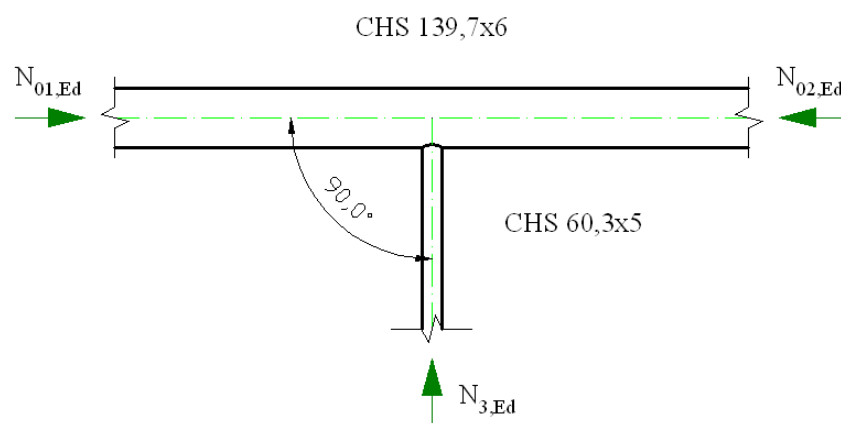
a)



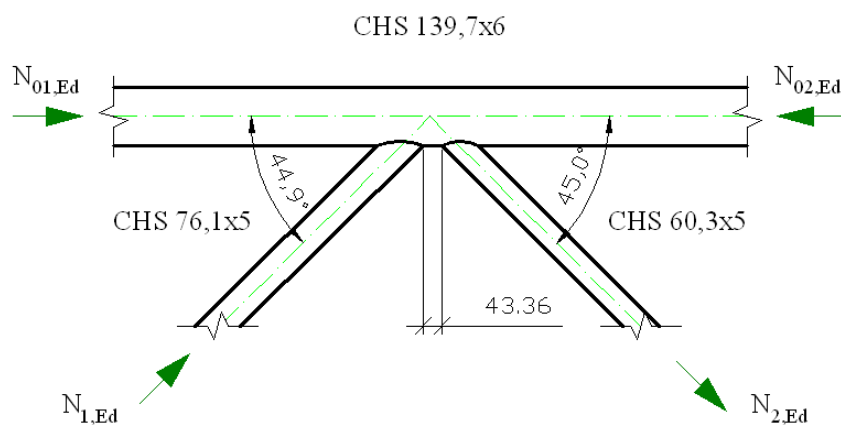
b)



c)

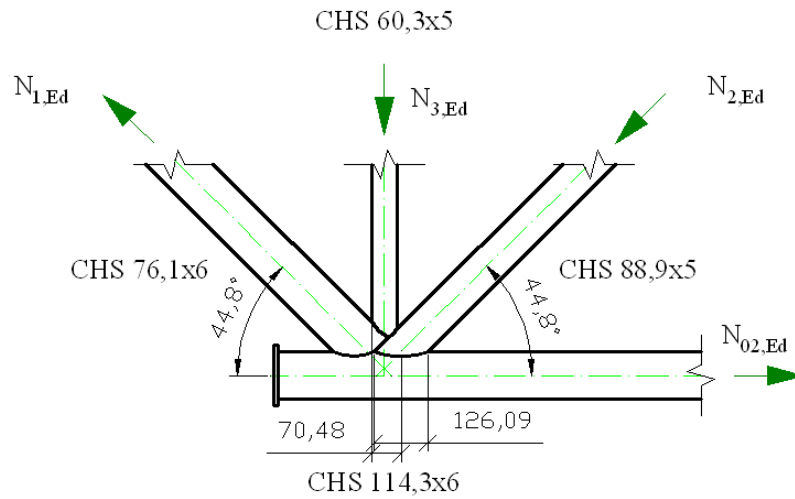


d)

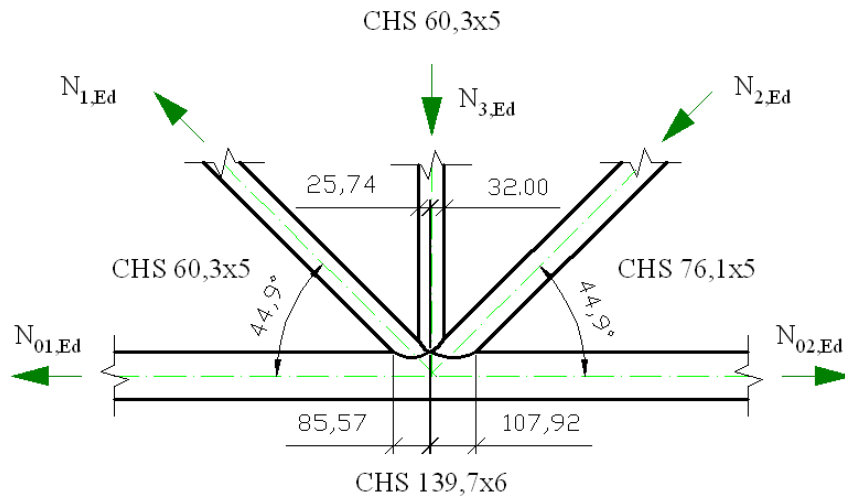


3.34 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993-1-1:2005 nurodymus, viršutinės juostos mazgų (atitinkamai M1 (a) – M4 (d)) geometrinės charakteristikos

a)



b)



3.35 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993-1-1:2005 nurodymus, apatinės juostos mazgų (atitinkamai M5 (a) – M6 (b)) geometrinės charakteristikos

3.33 ir 3.35 paveiksluose pateikti šeši analizuojami santvaros mazgai: 2 mazgai „K“ tipo be užlaidos, 2 mazgai „T“ tipo, 2 mazgai „KT“ tipo su užlaida, kuri turi tenkinti LST EN 1993-1-8:2005 7.1 lentelės reikalavimą – koeficientas $\lambda \geq 25\%$. Apibendrinus, visi aptarti mazgai sukonstruoti taip, kad atsirandančio ekscentriciteto nereikėtų vertinti.

Mazgų atspario skaičiavimas aptartas LST EN 1993-1-8:2005 7 skirsnyje. Remiantis minėto šaltinio 7.2 lentele, praspaudžiamoji kerpamoji irtis mazgams „K“, „T“ bei „KT“ su tarpu – tikrinama pagal (2.40) išraišką, tik tuo atveju kai tenkinama ši sąlyga: $d_i \leq d_0 - 2 \cdot t_0$.

$$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \cdot \pi \cdot d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i} / \gamma_{M5} \quad (2.40)$$

▪ Juostos viršaus irtis – „T“ mazgas

$$N_{1,Ed} \leq N_{1,Rd} = \frac{\gamma^{0,2} k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} (2,8 + 14,2 \beta^2) / \gamma_{M5} \quad (2.41)$$

▪ Juostos viršaus irtis – „K“ mazgas

$$N_{1,Ed} \leq N_{1,Rd} = \frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5} \quad (2.42)$$

$$N_{2,Ed} \leq N_{2,Rd} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd} \quad (2.43)$$

▪ Juostos viršaus irtis – „KT“ mazgas

$$N_{1,Ed} \sin \theta_1 + N_{3,Ed} \sin \theta_3 \leq N_{1,Rd} \sin \theta_1 \quad (2.44)$$

$$N_{2,Ed} \sin \theta_2 \leq N_{1,Rd} \sin \theta_1 \quad (2.45)$$

Pateiktas mazgo atspario skaičiavimo formules modifikuoju taip, kad galutinis išraiškos atsakymas būtų mazge veikiančios įrašos ir mazgo laikomosios galios santykis, kuris negali būti didesnis už vienetą. Modifikuotos formulės pateiktos (2.46) – (2.51) išraiškomis.

▪ Praspaudžiamoji kerpamoji irtis

$$\frac{N_{i,Ed}}{\frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \cdot \pi \cdot d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i} / \gamma_{M5}} \leq 1,0 \quad (2.46)$$

▪ Juostos viršaus irtis – „T“ mazgas

$$\frac{N_{1,Ed}}{\frac{\gamma^{0,2} k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} (2,8 + 14,2 \beta^2) / \gamma_{M5}} \leq 1,0 \quad (2.47)$$

▪ Juostos viršaus irtis – „K“ mazgas

$$\frac{N_{1,Ed}}{\frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5}} \leq 1,0 \quad (2.48)$$

$$\frac{N_{2,Ed}}{\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd}} \leq 1,0 \quad (2.49)$$

▪ Juostos viršaus irtis – „KT“ mazgas

$$\frac{N_{1,Ed} \sin \theta_1 + N_{3,Ed} \sin \theta_3}{N_{1,Rd} \sin \theta_1} \leq 1,0 \quad (2.50)$$

$$\frac{N_{2,Ed} \sin \theta_2}{N_{1,Rd} \sin \theta_1} \leq 1,0 \quad (2.51)$$

3.47 lentelė. Santvaros mazgų atsparių skaičiavimų suvestinė

„T“ mazgai							
Eil. Nr.	Mazgo žymuo	Pavojingiausias apkrovimo variantas	Formulė (2.46)			Formulė (2.47)	
1.	M1	1 apkr. variantas	0,211			0,474	
2.	M3	1 apkr. variantas	0,185			0,506	
„K“ mazgai							
Eil. Nr.	Mazgo žymuo	Pavojingiausias apkrovimo variantas	Formulė (2.46)		Formulė (2.48)	Formulė (2.49)	
3.	M2	1 apkr. variantas	0,384	0,403	0,892	0,636	
4.	M4	1 apkr. variantas	0,194	0,080	0,530	0,173	
„KT“ mazgai							
Eil. Nr.	Mazgo žymuo	Pavojingiausias apkrovimo variantas	Formulė (2.46)			Formulė (2.50)	Formulė (2.51)
5.	M5	1 apkr. variantas	-	-	-	1,227	1,231
6.	M6	1 apkr. variantas	-	-	-	0,736	0,741

▪ Apibendrinimas

Suprojektuotos santvaros mazgų analizė parodė (žr. 3.47 lentelę), kad mazgo M5 atsparis nėra pakankamas. Šis mazgas stiprinamas 4 mm storio juostos plokšte. Detalūs mazgų skaičiavimai pateikti F priede, o galimi mazgų ir apskritų vamzdžių irties pobūdžiai pateikti G priede. Įvertinus mazgų analizės rezultatus, santvarą iš apskritų vamzdžių sudarančių elementų profiliuotųjų (žr. 3.46 lentelę) bendroji masė – 965 kg.

3.6. Išvados ir palyginimai

Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių projektavimo rezultatų, kai buvo taikyti du plieninių konstrukcijų projektavimo algoritmai, lyginamoji analizė. Šios analizės metu nustatyta, kad analizuotą konstrukciją (žr. 3.5 – 3.6 pav.) pavyko suprojektuoti ekonomiškėnę ($V_{\min}$) remiantis LST EN 1993:2005 (*konstrukciją sudarančių profiliuotų bendra masė 888 kg*), o ne taikant STR 2.05.08:2005 (*konstrukciją sudarančių profiliuotų bendra masė 990 kg*). Skirtumas tarp projektavimo rezultatų 10,3 procento.

Atsižvelgus į konstrukcinius ir mazgų konstravimo reikalavimus, analizuotų santvarų iš apskritų vamzdžių profiliuotų bendrieji svoriai padidėja: projektuotos pagal LST EN 1993:2005 nuo 888 kg iki 965 kg; projektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nuo 999 kg iki 1038 kg. Skirtumas tarp projektavimo rezultatų 7,0 procentai.

Apibendrinus visus analizės etapus daroma išvada, kad santvaros iš apskritų vamzdžių ekonomiškėnis projektavimo rezultatas pasiekiamas taikant LST EN 1993-1-1:2005 plieninių konstrukcijų projektavimo algoritmą. Skirtumas tarp projektavimo rezultatų susidaro dėl atskirų elementų projektavimo ypatumų:

▪ Tempiamas elementas

Skirtumas atsiranda, nes projektuojant centriškai tempiamą elementą pagal STR 2.05.08:2005 plieno stipris mažinamas 1,1 karto, o projektuojant tą patį elementą pagal LST EN 1993-1-1:2005 stiprio mažinimo koeficientas lygus 1,0. Taip pat, STR 2.05.08:2005 centriškai tempiamo elemento analizės (3.7) formulėje yra darbo sąlygų koeficientas γ_c , kuris sąlygoja galutinį rezultatą.

▪ Gniuždomas elementas

Skirtumas atsiranda, nes projektuojant centriškai gniuždomą plieninį elementą pagal STR 2.05.08:2005 plieno stipris mažinamas 1,1 karto, o projektuojant tą patį elementą pagal LST EN 1993-1-1:2005 stiprio mažinimo koeficientas lygus 1,0. Tačiau, jei analizės metu būtų panaudoti tie patys skaičiuotini plieno stipriai, galutinis centriškai gniuždomo elemento, kuris bus apskrito vamzdinio profiliuotų, projektavimo rezultatas būtų palankėnis projektuojant jį pagal LST EN 1993-1-1:20005, nes a klupumo kreivė (žr. 3.19 pav.) yra palankėnė nei STR (žr. 3.19. pav.) – didėnis klupumo koeficientas $\varphi(\chi)$ prie tos pačios lyginamojo liaunio $\bar{\lambda}$ reikėmės. Taip pat, STR 2.05.08:2005 gniuždomo elemento analizės (3.7) formulėje yra darbo sąlygų koeficientas γ_c , kuris įtakoja galutinį rezultatą.

▪ Ekscentriškai gniuždomas – lenkiamas elementas:

Skirtumas atsiranda, nes projektuojant ekscentriškai gniuždomą – lenkiamą elementą pagal STR 2.05.08:2005 plieno stipris mažinamas 1,1 karto, o projektuojant tą patį elementą pagal LST EN 1993-1-1:2005 stiprio mažinimo koeficientas lygus 1,0 – skirtingos plieno stiprio reikšmės sąlygoja klupumo koeficientų reikšmes, kurios sąlygoja elemento klupamąją galią. Išraiškose (3.32) ir (3.33) esantiems sąveikos koeficientams $k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$ suskaičiuoti naudojami du priedai (A arba B), nuo kurių pasirinkimo priklauso galutinis projektavimo rezultatas.

Skiriasi elemente veikiančių pavojingiausio įrašų derinio nustatymas: analizuojant elementą remiantis STR 2.05.08:2005 taikomi du ribinių momentų dydžiai – vienas elemento sukamajam atspariui tikrinti. Šis momentas skaitine reikšme yra mažesnis už momentą, kuris naudojamas patikrinti elemento stiprumui. Tačiau, analizuojant šį elementą, remiantis LST EN 1993-1-1:2005, taikoma tik viena lenkiamojo momento reikšmė – maksimali, veikianti tame elemente.

Paveiksluose 3.8 ir 3.23 pateiktuose grafikuose matyti, kad mažėjant skerspjūvio plotui mažėja ir skirtumas tarp skerspjūvio laikomosios galios išnaudojimo rezultatų, kai buvo taikyti du plieninių konstrukcijų projektavimo algoritmai.

4. SANTVAROS ANALIZĖ TAIKANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ

4.1 Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodas yra labiausiai paplitęs matematinių modelių skaitmeninio skaičiavimo įrankis, plačiai taikomas visose srityse, kur uždaviniai aprašomi diferencialinėmis lygtimis, o ypač stipriai įsitvirtino struktūrinės inžinerijos bei kitose panašiose disciplinose. Taikant šį metodą sprendžiami mechaniniai, šiluminiai, hidrauliniai, elektromagnetiniai ir kitokių fizinių sistemų uždaviniai, taip pat labai sėkmingai modeliuojami dinaminiai procesai. Baigtinių elementų metodo algoritmas yra universalus sprendžiant įvairių fizinių sistemų uždavinius, todėl nebereikia gilintis į daugelį tradicinių analitinių lygčių sprendimo būdų, kurių didžiausias trūkumas yra tas, kad jie dažnai yra specifiniai kiekvienai atskirai uždavinių klasei (Barauskas *et al.* 2004).

Baigtinių elementų metodo istorinė apžvalga

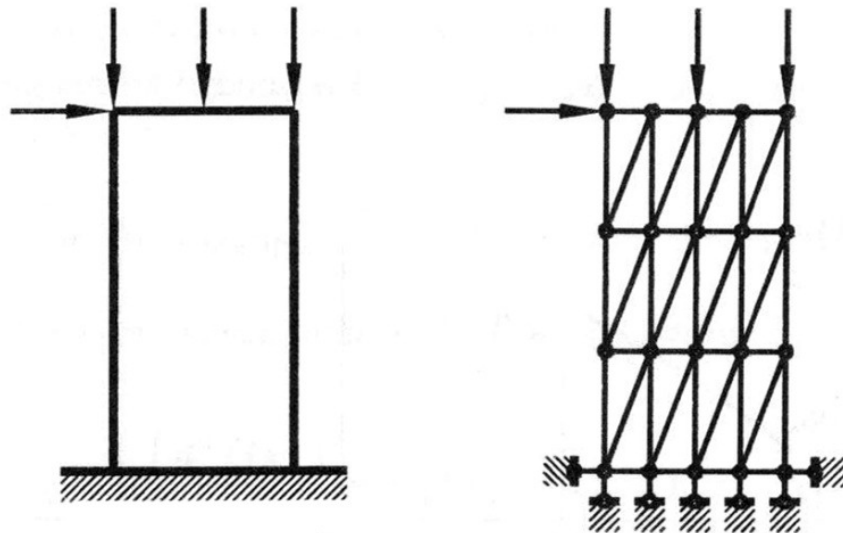
Idėją pateikti vienalytę sritį kaip baigtinio dydžio elementų sistemą XIX a. pradžioje iškėlė prancūzų matematikas Poissonas. Tačiau šio metodo raidos pradžia galime laikyti tik praėjusio amžiaus penktąjį dešimtmetį, kai Hrennikoffas (1941 m.) ir Courantas (1942 m.) savo darbuose pateikė skirtingas metodo interpretacijas, tačiau abudu išsakė tą pačią idėją, jog vienalytė sritis turi būti sudalinta į elementus. Vieną pirmųjų straipsnių baigtinių elementų metodo tema šeštajame dešimtmetyje kartu su bendraautoriais parašė Turneris (1956 m.), o besibaigiant septintajam dešimtmėčiui pasirodė pirmosios knygos, skirtos baigtinių elementų metodui.

Iš pradžių baigtinių elementų metodo teorijos plėtrą veikė dvi skirtingos matematinio ir inžinerinio požiūrio pozicijos. Vieni mokslininkai – J. Odenas, K. J. Batheas, T. Belytchko, L. A. Rozinas ir kiti – vystė šį metodą kaip atskirą skaitinį diferencialinių lygčių sprendimo metodą, visus teiginius grįsdami griežtais įrodymais. Tačiau antroji grupė, inžinerinės krypties atstovai – O. Zienkiewiczus, A. V. Aleksandrovas ir kiti – daugiau dėmesio skyrė mechaninei metodo interpretacijai, baigtinių elementų metodą siejo su klasikine statybine mechanika, su strypinių sistemų skaičiavimo algoritmų kūrimu. Dabar šios dvi tendencijos yra susiliejusios ir sudaro vieną matematinę baigtinių elementų metodo teoriją (Atkočiūnas ir Nagevičius 2004).

Lietuvoje skaitinio modeliavimo klausimai, sprendžiant įvairias mechanikos problemas, pradėti tyrinėti akad. A. Čyro ir jo mokslinės mokyklos atstovų darbuose. Skaitiniai metodai, pritaikyti inžinerijos uždaviniams spręsti, paplito pradėjus plačiau naudoti kompiuterius. Lietuvoje skaitinių metodų srityje vaisingai dirba LMA narys korespondentas M. Sapagovas, prof. habil. dr. R. Barauskas ir kiti; VGTU profesoriai habil. dr. R. Čiegis, R. Belevičius, R. Baušys, M. Bogdevičius, R. Kačianauskas, S. Kalanta ir kiti (Atkočiūnas ir Nagevičius 2004).

Baigtinių elementų metodo esmė

Perėjimas nuo begalinio tampraus deformuojamo kūno laisvumo laipsnių kiekio prie baigtinio, sudalinant sritį į baigtinius elementus ir darant prielaidą, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomasis kinta pagal nesudėtingą dėsnį, ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų algebrinių lygčių sistemas gaunama bendra sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas.



4.1 pav. Kontinualios plokštės pakeitimas diskretiniu modeliu, sudarytu iš trikampių BE (Atkočiūnas ir Nagevičius 2004)

Baigtinių elementų metodo privalumai:

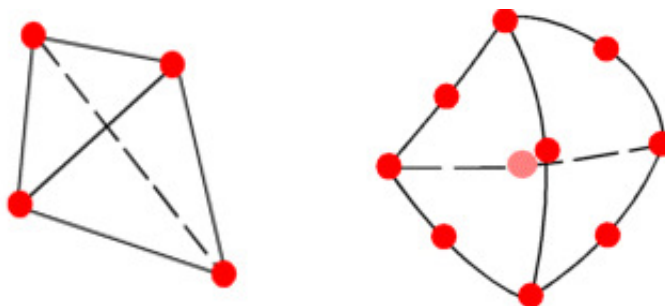
- Aiški metodo fizinė interpretacija,
- Gausu universalių programų įvairiems uždaviniams spręsti,
- Galimybė įvertinti medžiagos fizinių ir kūno geometrinių netiesiškumus,
- Tame pačiame modelyje galima naudoti įvairios formos elementus,
- Metodas leidžia įvertinti įvairias kraštines sąlygas.

Baigtinių elementų metodo trūkumai:

- Metodo rezultatai netinkami analitinei analizei,
- Būtinas galingas kompiuteris ir specializuota programinė įranga,
- Programinė įranga lydimą plačios dokumentacijos, kuria būtina perskaityti,
- Būtina patirtis ir inžinerinė nuovoka diskretiniam modeliui sudaryti,
- Reikalingas didelis žinių kiekis uždavinio formulavimui.

4.1.1. Tūriniai baigtiniai elementai

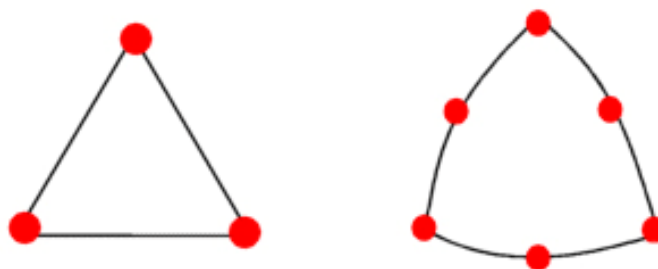
Magistro darbe santvaros iš apskritų vamzdžių analizė atliekama standartine BEM programa „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011), kurioje sumodeliuota konstrukcija skaidoma į tūrinius tetraedro formos baigtinius elementus, kurie gali būti dviejų tipų: tiesinis – tai tetraedro formos tūrinis (3D) elementas (žr. 4.2 pav.) aprašomas keturiais mazgais, kurie tarpusavyje sujungti tiesiomis linijomis; Parabolinis – tai tetraedro formos tūrinis (3D) elementas (žr. 4.2 pav.) aprašomas keturiais kampiniais mazgais, kurie sujungti parabolinėmis linijomis, ir šešiais papildomais mazgais, kurie suformuoti tarp dviejų taškų esančių parabolinių linijų centruose. Abiejų tipų tūriniai tetraedro formos elementų mazgai turi po tris laisvės laipsnius.



4.2 pav. Tiesinio ir parabolinio tipo tūriniai tetraedriniai elementai (Kurowski 2011)

4.1.2. Kevaliniai baigtiniai elementai

Magistro darbe santvaros iš apskritų vamzdžių analizė atliekama standartine BEM programa „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011), kurioje sumodeliuota konstrukcija skaidoma į kevalinius trikampio formos baigtinius elementus, kurie gali būti dviejų tipų: tiesinis – tai trikampio formos kevalinis (2D) elementas (žr. 4.3 pav.) aprašomas trimis mazgais, kurie tarpusavyje sujungti tiesiomis linijomis; Parabolinis – tai trikampio formos kevalinis (2D) elementas (žr. 4.3 pav.) aprašomas trimis kampiniais mazgais, kurie sujungti parabolinėmis linijomis, ir trimis papildomais mazgais, kurie suformuoti tarp dviejų taškų esančių parabolinių linijų centruose. Abiejų tipų kevaliniai trikampio formos elementų mazgai turi po šešis laisvės laipsnius – trys poslinkiai ir trys posūkiai. Minėto tipo elementai gali priešintis membraninėms ir lenkimo apkrovoms.



4.3 pav. Tiesinio ir parabolinio tipo kevaliniai trikampiniai elementai (Kurowski 2011)

4.2. Baigtinių elementų metodo sprendiniai

Kaip jau minėta ankstesniuose skyriuose, santvaros įtempto deformuoto būvio nustatymui gali būti taikomi įvairūs metodai. Pats populiariausias ir tiksliausias būdas – realus eksperimentas. Deja, jis yra ir pats brangiausias. Kaip alternatyva šiam būdai siūlomi kiti įvairūs metodai. Viena iš alternatyvų – skaitinis santvaros eksperimentas. Didėjant kompiuterių galimybėms skaitinis eksperimentas, skirtas nustatyti santvaros įtemptą deformuotą būvį, atliekamas baigtinių elementų metodu. Šio metodo įvairios interpretacijos plačiai paplitusios tarp inžinierių sprendžiančių mechaninių, šiluminių, hidraulinių, elektromagnetinių ir kitokių fizinių sistemų probleminius uždavinius.

Baigtinių elementų metodo analizės rezultatų tikslumą sąlygoja modelio geometrija, baigtinių elementų tinklelio tankis, kraštinės sąlygos, bei realios konstrukcijos atitikmuo. Šio metodo privalumai ir trūkumai buvo aptarti 4.1. poskyryje. Metodo pagrindinis privalumas – mažos skaitinių eksperimentų atlikimo materialinės ir laiko sąnaudos, lyginant su realiu eksperimentu. Rezultatas pasiektas baigtinių elementų metodu savo tikslumu nenusileidžia realaus eksperimento rezultatams.

Santvaros modeliavimas – gana sudėtingas uždavinys, nes jame įvertinamas kontaktas tarp santvaros elementų. Santvaros elementai turi būti sumodeliuoti iš tokių baigtinių elementų, kuriems gali būti priskirtos reikiamos savybės. Kaip jau minėta anksčiau, baigtinių elementų metodo rezultatų tikslumas priklauso nuo baigtinių elementų kiekio. Didelis baigtinių elementų kiekis reikalauja sparčios skaičiavimo technikos.

Išnagrinėti Stupak (Stupak 2004) ir Vasiliauskaitės (Vasiliauskaitė 2006) šaltiniuose pateikti panašaus tipo uždaviniai, kurie buvo spęsti taikant baigtinių elementų metodą. Remiantis minėtais šaltiniais atlieku analizuojamos konstrukcijos baigtinių elementų tinklo tankio analizę.

Poskyrio uždavinys:

- Atlikti suprojektuotos santvaros iš apskritų vamzdžių įtempto deformuoto būvio analizę, kuris nustatomas skaitiniu eksperimentu, standartine baigtinių elementų programa. Gautą įtemptą deformuotą būvį, kuris buvo gautas išsprendus konstrukciją taikant kevalinius baigtinius elementus, palyginti su įtemptu deformuotu būviu, kuris buvo gautas išsprendus konstrukciją taikant strypinius baigtinius elementus.

▪ Santvaros įtempto deformuoto būvio nustatymas taikant baigtinių elementų metodą

Santvaros įtempto deformuoto būvio nustatymas, taikant baigtinių elementų metodą, nėra paprastas uždavinys. Būtina teisingai aprašyti analizuojamos konstrukcijos kraštines ir apkrovimo sąlygas, parinkti teisinga baigtinių elementų tipą, jų dydį ir kiekį.

Skaidant santvarą į tūrinius baigtinius elementus – jų kiekis bus didesnis, nei konstrukciją suskaidžius į kevalinius baigtinius elementus. Esant tam pačiam baigtinių elementų kiekiui tikslesnis rezultatas bus gautas naudojant kevalinius, nei tūrinius baigtinius elementus. Taigi, dėl šios priežasties santvara bus skaidoma į kevalinius baigtinius elementus (žr. 4.1.2. skirsnį).

Baigtinių elementų metodu skaitiniams eksperimentams atlikti naudota programa „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011), veikianti ant „SolidWorks“ (Lombard 2010) grafinės platformos. Tai gerai žinomos programos „Cosmos/M“ naujausia interpretacija, tačiau patobulinta ir labiau pritaikyti vartotojui.

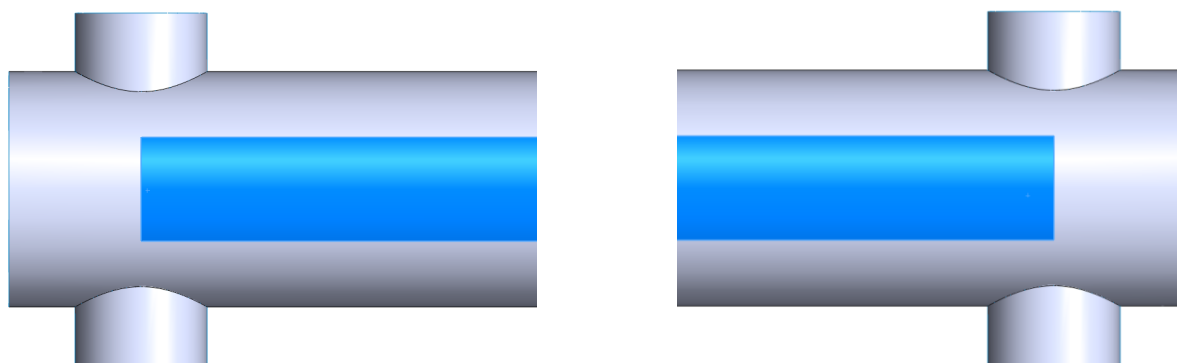
Analizės objekto skaitinis eksperimentas standartine baigtinių elementų programa atliekamas, priimant prielaidą, kad konstrukcijos medžiaga dirba idealiai tampriai (žr. 4.4 pav.), t. y. tokiai medžiagai galioja Huko dėsnis.

Property	Value	Units
Elastic modulus	2.1e+011	N/m ²
Poisson's ratio	0.3	N/A
Shear Modulus in XY		N/m ²
Mass density	7850	kg/m ³

4.4 pav. Plieno charakteristikos skaitiniam eksperimentui atlikti

Apkrovimo sąlygos

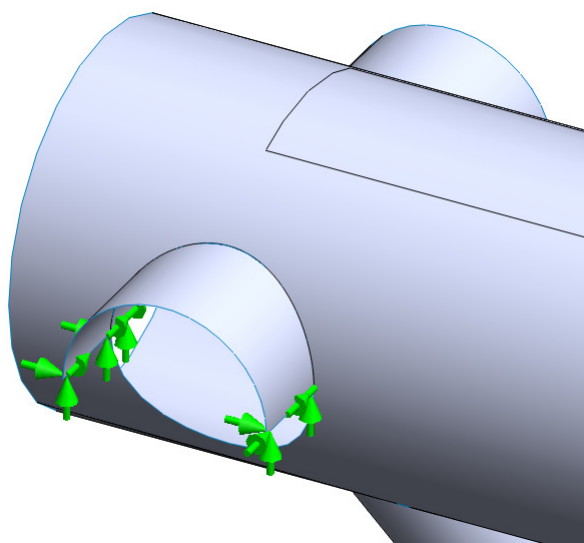
Santvaros viršutinė juosta apkraunama slėgine apkrova, kurios pridėjimo plotas 4.5 pav. pažymėtas mėlynai. Šio tipo apkrova pasirinkta, nes leidžia išvengti įtempių koncentracijos ten kur pridedama jėga, tenkanti santvaros viršutinės juostos ilgio vienetui. Slėginės apkrovos reikšmės: nuolatinė ir kintamoji, suskaičiuotos 3.2. poskyryje.



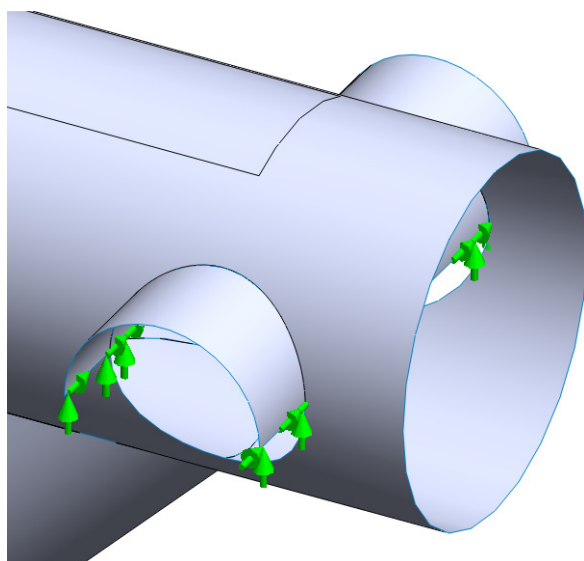
4.5 pav. Apkrovos pridėjimo ruožas ant santvaros viršutinės juostos

Kraštinės sąlygos

Kraštinės sąlygos daro lemiančią įtaką santvaros įtempto deformuoto būvio analizės rezultatams. 3.1. poskyryje buvo aptartas kraštinių sąlygų parinkimas santvaros iš apskritų vamzdžių strypiniam modeliui. Šio tipo atramos – kraštinės sąlygos, modeliuojamos ir santvaroje sudarytoje iš kevalinių baigtinių elementų: kairiosios nepaslankios atramos idealizacija pateikta 4.6 pav., o dešinėsios paslankios atramos idealizacija pateikta 4.7 pav. Abu minėti paveikslai papildyti „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011) atramų valdymo langais, kurių pagalba galima atlaisvinti ar suvaržyti dominantę poslinkį u_i ar kampinį posūkį θ_i .



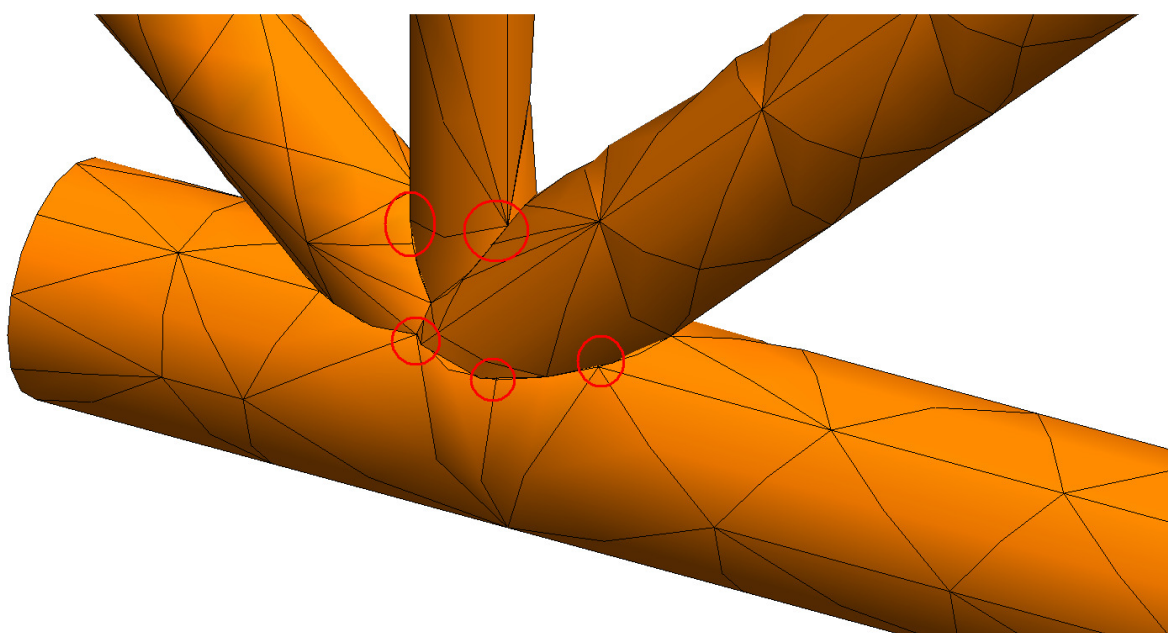
4.6 pav. Santvaros kairioji nepaslanki lankstinė atrama



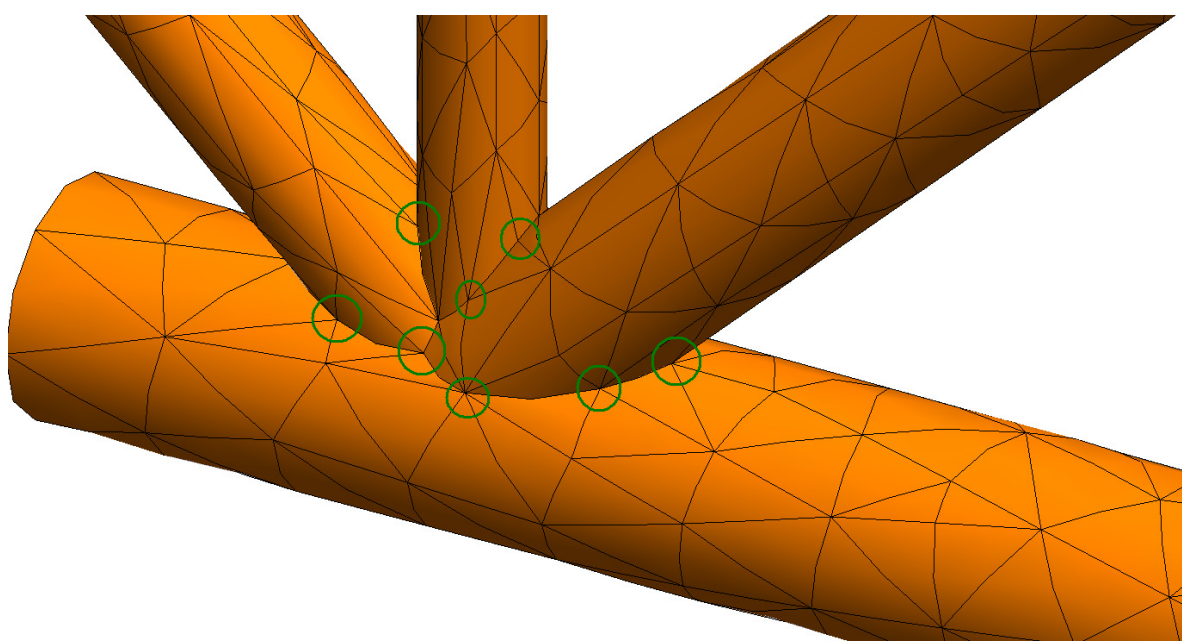
4.7 pav. Santvaros dešinioji paslanki lankstinė atrama

Kevalinių baigtinių elementų tinklo generavimas

Analizuojama santvara iš apskritų vamzdžių, kuri buvo sumodeliuota „SolidWorks“ (Lombard 2010) grafinėje aplinkoje, skaidoma į parabolinio tipo kevalinius trikampinius baigtinius elementus. Šio tipo kevaliniai trikampiniai baigtiniai elementai pasirinkti todėl, kad jie leidžia sugeneruoti baigtinių elementų tinklą, kuris tarpusavyje yra susirišęs t. y. atitinkamų baigtinių elementų mazgai sueina į vieną ir tą patį tašką (žr. 4.9 pav.). Tačiau, analizės objekto skaidymas į tiesinio tipo kevalinius trikampinius baigtinius elementus (žr. 4.8 pav.) neužtikrina elementų mazgų susirišimo. Šio problemos išspręsti nepadaeda ir elementų tinklo tankinimas.



4.8 pav. BE tinklo generavimas, pritaikius tiesinio tipo kevalinius trikampinius elementus



4.9 pav. BE tinklo generavimas, pritaikius parabolinio tipo kevalinius trikampinius elementus

Kaip jau minėta šio poskyrio pradžioje, įtempto deformuoto būvio analizės rezultatai taip pat stipriai priklauso nuo baigtinių elementų tinklo tankio. Norint pasiekti kuo tikslesnį rezultatą, atliekama vidurinio santvaros taško įlinkio priklausomybės nuo baigtinių elementų skaičiaus analizė. Remiantis šios analizės rezultatais ir Barausko (Barauskas *et al.* 2004) šaltinio 7.5 poskyrio informacija, buvo parinktas optimalus baigtinių elementų skaičius konstrukcijai.

Baigtinių elementų tinklo analizė atliekama iteraciniu būdu. Santvaros iš apskritų vamzdžių modelis „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011) aplinkoje skaidomas į fiksuoto dydžio baigtinius elementus, kurių kiekį ir mazgų skaičių automatiškai suskaičiuoja programa. Minėtoji analizės programa gali savarankiškai parinkti optimalų baigtinių elementų tinklą, atsižvelgdama į analizuojamo elemento dydį, kontakto vietas ir geometrinę formos netobulumą.

Magistro darbo 3 skyriuje buvo suprojektuotos dvi santvaros iš apskritų vamzdžių pritaikius du plieninių konstrukcijų projektavimo algoritmus. Šioms suprojektuotoms santvaroms (jau įvertinus konstrukcinius reikalavimus), atlikta baigtinių elementų tinklo analizė, kurios rezultatai pateikti 4.1 ir 4.2 lentelėse.

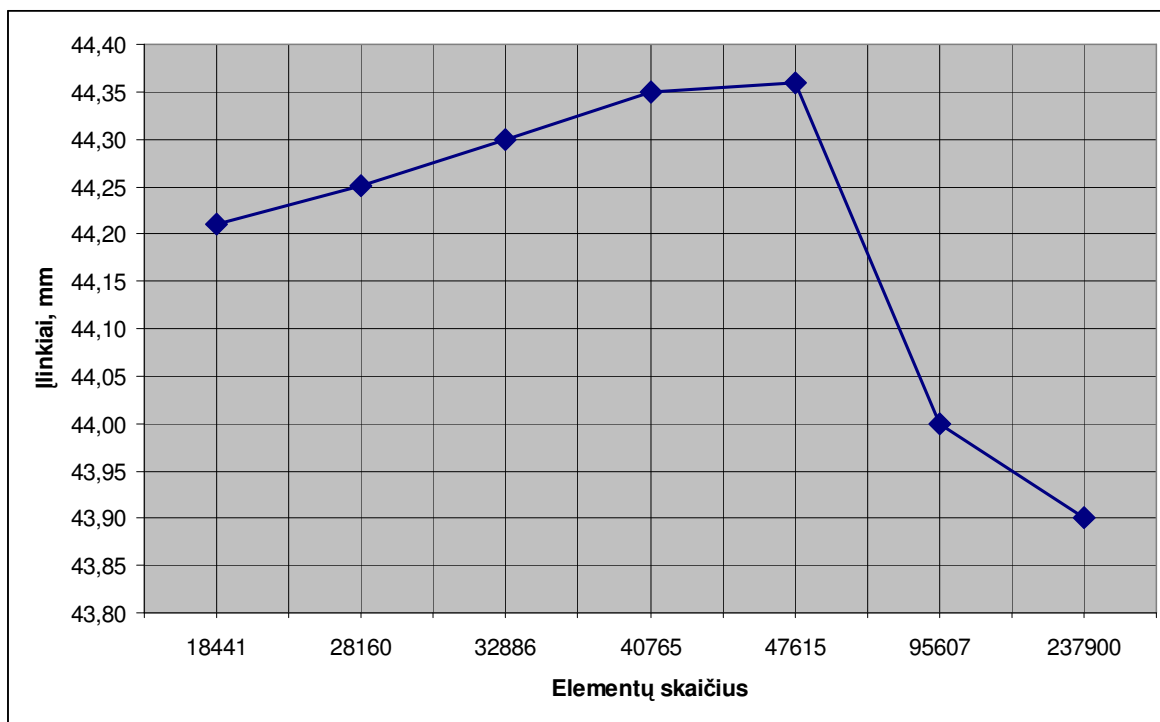
4.1 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, vidurio taško įlinkio priklausomybės nuo baigtinio elemento dydžio suvestinė

<i>Iteracijos numeris</i>	<i>Didžiausias elemento dydis</i>	<i>Mažiausias elemento dydis</i>	<i>Sugeneruotų elementų skaičius</i>	<i>Sugeneruotų mazgų skaičius</i>	<i>Maksimali įlinkio reikšmė</i>
1.	200	66,67	18441	36683	44,21
2.	190	63,37	19014	37828	44,22
3.	150	50,00	28160	56110	44,25
4.	100	33,33	32886	65548	44,30
5.	75	20,00	40765	81299	44,35
6.	50	16,67	47615	94981	44,36
7.	25	8,33	95607	190977	44,00
8.	15	5,00	237900	475512	43,90

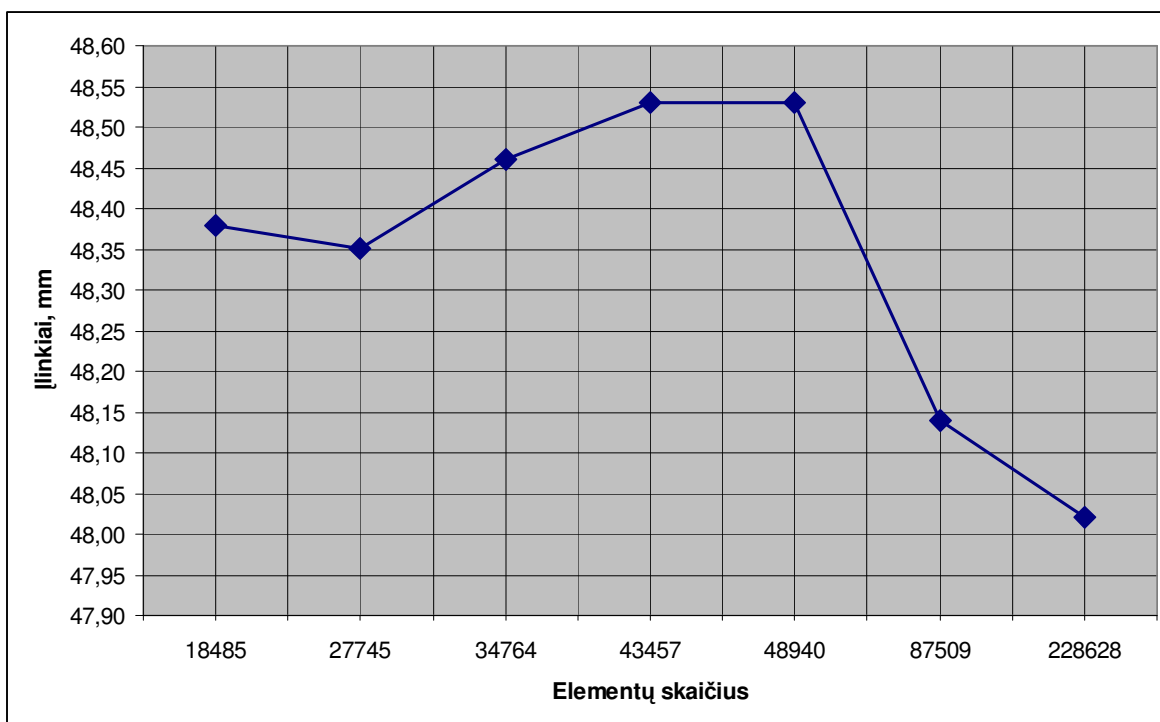
4.2 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, vidurio taško įlinkio priklausomybės nuo baigtinio elemento dydžio suvestinė

<i>Iteracijos numeris</i>	<i>Didžiausias elemento dydis</i>	<i>Mažiausias elemento dydis</i>	<i>Sugeneruotų elementų skaičius</i>	<i>Sugeneruotų mazgų skaičius</i>	<i>Maksimali įlinkio reikšmė</i>
1.	200	66,67	18485	36780	48,38
2.	185	61,62	19373	38556	48,40
3.	150	50,00	27745	55301	48,35
4.	100	33,33	34764	69320	48,46
5.	75	20,00	43457	86699	48,53
6.	50	16,67	48940	97646	48,53
7.	25	8,33	87509	174777	48,14
8.	15	5,00	228628	456962	48,02

4.1 ir 4.2 lentelėse antros iteracijos rezultatai yra pajuodinti, nes jie gauti pasinaudojus analizės programos funkcija, kuri automatiškai sugeneruoja baigtinių elementų tinklą. Dėl ribotų kompiuterinės technikos galimybių santvaros modelį suskaidyti į didesnę kiekį baigtinių elementų, nei nurodytas jų kiekis 8 iteracijoje, negalima.



4.10 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, vidurinio taško įlinkio konvergavimo grafikas



4.11 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005 nurodymus, vidurinio taško įlinkio konvergavimo grafikas

Sudaryti santvaros vidurinio taško įlinkio priklausomybės nuo elementų skaičiaus grafikai, kurie pateikti 4.10 ir 4.11 paveiksluose, rodo, kad įlinkio konvergavimo pasiekti nepavyko. Remiantis Barausko (Barauskas *et al.* 2004) šaltinio 7.19 pav. ir Urbono (Urbonas 2007) šaltinio 4.11 pav. – įlinkio reikšmės, didinant baigtinių elementų skaičių, turėtų nusistovėti.

Teoriškai sprendinys yra tikslesnis, kai elementų yra daugiau, tačiau didinant elementų skaičių, daugėja nežinomųjų skaičius, o kartu ir didėja naudojama kompiuterio atmintis bei sprendimo laiko sąnaudos, kaupiasi skaičiavimo paklaidos. Dėl šių priežasčių baigtinių elemento tinklo tankumas beveik visada yra pasiekiamas kompromiso būdu, tankinant tinklą tik įtempių koncentracijos zonose (Barauskas *et al.* 2004).

▪ Apibendrinimas

Santvaros iš apskritų vamzdžių įtempto deformuoto būvio analizė atliekama taikant tokį baigtinių elementų kiekį, kuris buvo gautas 6 iteracijos metu (žr. 4.1 ir 4.2 lentelės). Taip pat pasinaudojama Barausko (Barauskas *et al.* 2004) šaltinio 2.3.5 skirsnyje aptartais praktiniais sprendimo aspektais ir pasiūlytais patarimais. Kaip jau minėta šiame skyriuje, tankesnio baigtinių elemento tinklo generavimą riboja turimos kompiuterinės technikos galimybės.

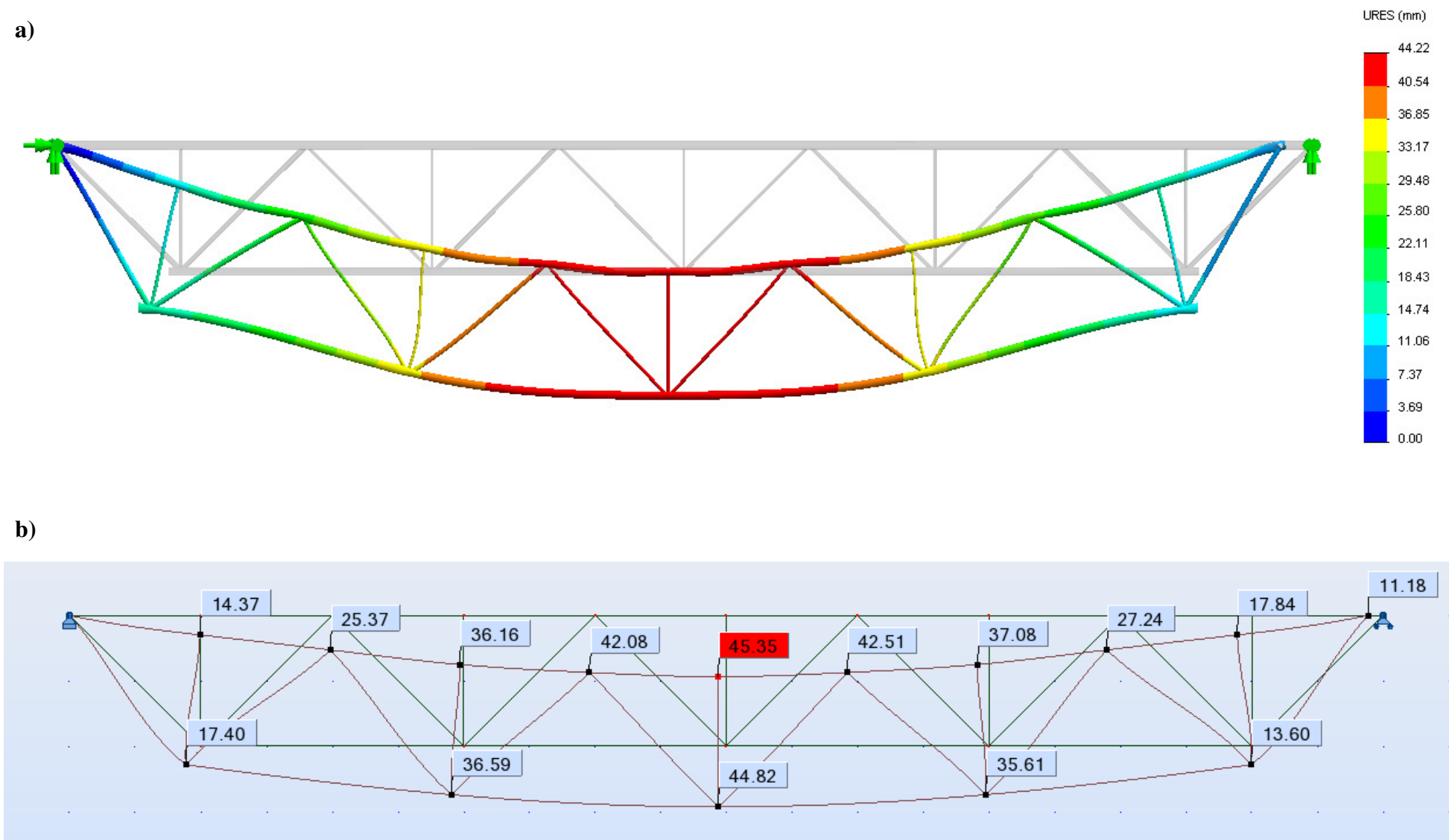
Santvaros modelis „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011) aplinkoje sprendžiamas baigtinių elementų metodu, naudojant geometriškai darnius baigtinius elementus, pagrindiniais nežinomaisiais priimant poslinkius baigtinių elementų mazguose. Tik nustačius analizės objekto poslinkius – ieškomi ir kiti dydžiai: įrašos ir įtempiai.

Skirtingas baigtinių elementų tipų taikymas tos pačios konstrukcijos įtemptam deformuotam būviui nustatyti duoda panašius analizės rezultatus. Norint įrodyti kraštinių ir apkrovimo sąlygų modeliavimo teisingumą, atliktas santvaros maksimalių įlinkių palyginimas (žr. 4.3 lentelę), kai analizė atlikta taikant strypinius ir kevalinius baigtinius elementus.

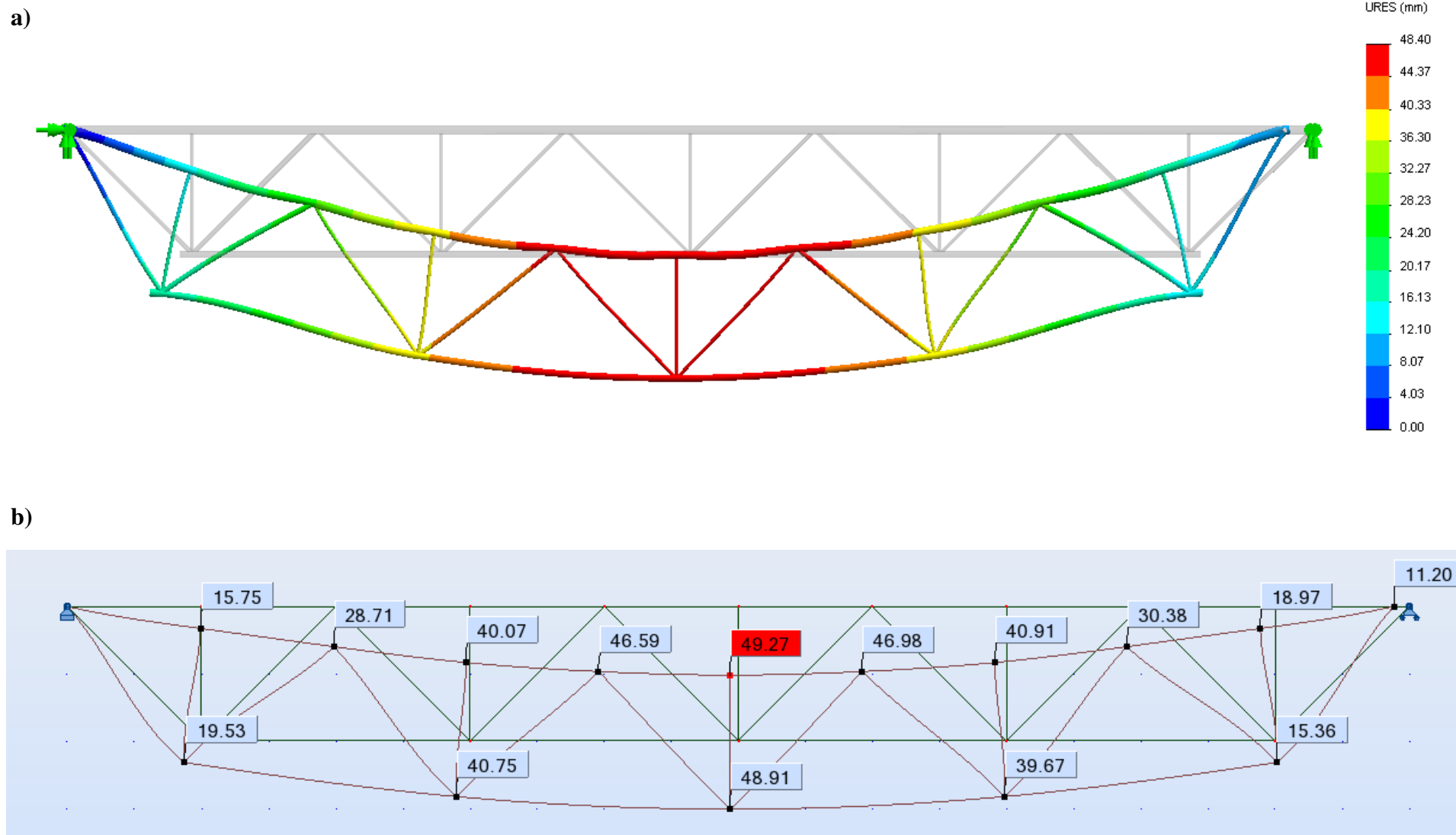
Maksimalių įlinkių skirtumas (žr. 4.3 lentelę), nustatytas taikant dviejų tipų baigtinius elementus, yra mažesnis nei 2,5 % . Toks mažas rezultatų skirtumas rodo, kad kraštinės ir apkrovimo sąlygos yra sumodeliuotos tinkamai, ir galima nagrinėti konstrukcijos įtemptą deformuotą būvį.

4.3 lentelė. Santvaros vidurinio taško įlinkių suvestinė:

<i>Reglamentas, kuriuo remiantis projektuotas analizės objektas</i>	<i>Analizės objekto vidurio taško įlinkis taikant strypinius baigtinius elementus</i>	<i>Analizės objekto vidurio taško įlinkis taikant kevalinius baigtinius elementus</i>	<i>Skirtumas, %</i>
STR 2.05.08:2005	45,35 (žr. 4.12 pav.)	44,22 (žr. 4.12 pav.)	2,49
LST EN 1993:2005	49,27 (žr. 4.13 pav.)	48,40 (žr. 4.13 pav.)	1,77



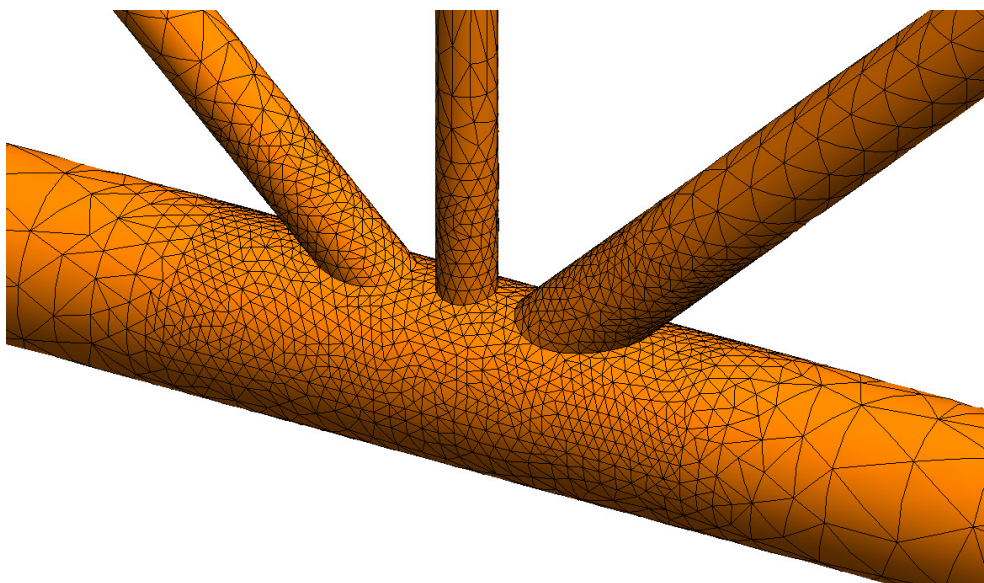
4.12 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus, įlinkių pasiskirstymas ir jos deformuota schema, nustatyta analizės metu, pritaikius kevalinius (a) ir strypinius (b) baigtinius elementus



4.13 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005 nurodymus, įlinkių pasiskirstymas ir jos deformuota schema, nustatyta analizės metu, pritaikius kevalinius (a) ir strypinius (b) baigtinius elementus

4.3 Santvaros stiprumo analizė

Ankstesniame poskyryje buvo aptarti baigtinių elementų metodo sprendiniai taikomi santvaros iš apskritų vamzdžių analizei. Remiantis 4.2. poskyrio informacija modeliuojama santvara „SolidWorks“ (Lombard 2010) aplinkoje, kuri vėliau apkraunama išskirstyta apkrova, užsiduodamos kraštinės sąlygos. Atlikus šiuos veiksmus analizės objektas skaidomas į kevalinius trikampinius baigtinius elementus. Šių elementų skaičius yra padidinamas tose vietose, kur santvaros tinklelio elementai jungiasi prie santvaros viršutinės ir apatinės juostos. Baigtinių elementų tinklo sutankinimas (žr. 4.14 pav.) šiose vietose reikalingas tam, kad būtų pasiektas taisyklingas įtempių pasiskirstymas.



4.14 pav. Kevalinių baigtinių elementų tinklo sutankinimas

Analizės objekto mazgai modeliuojami naudojant tuos pačius geometrinius duomenis, kurie buvo panaudoti jų atspario skaičiavimui pagal normatyvinius dokumentus. Atlikus modeliavimo procesą ir suskaidžius konstrukciją į baigtinius elementus sprendžiamas analizės uždavinys skirtas nustatyti santvaros įtempiams ir deformacijoms. Šios analizės metu domina *Von Mizeso* įtempiai, kuriais remiantis galima daryti prielaidas ir išvadas apie santvarą sudarančių elementų ir jų mazgų laikomąją galią.

Poskyrio uždavinys:

- Panaudojant baigtinių elementų metodą nustatyti dviejų santvarų, kurios buvo suprojektuotos taikant du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, įtemptą deformuotą būvį ir palyginti šios analizės rezultatus su rezultatais, kurie buvo gauti analizuojant santvarą ir jos mazgus, remiantis normatyvinių dokumentų reikalavimais.

Suprojektuotą santvarą iš apskritų vamzdžių (3.5 ir 3.6 pav.) sudaro dešimt skirtingo diametro profiliuotųjų, kurie pagaminti iš skirtingos markės plieno (žr. 4.4 ir 4.6 lenteles). Žinant plieno, iš kurio pagamintas elementas, takumo ribą ir kerpamąjį stiprį, galima spręsti apie analizės objekto elementų ir jo mazgų laikomąją galią.

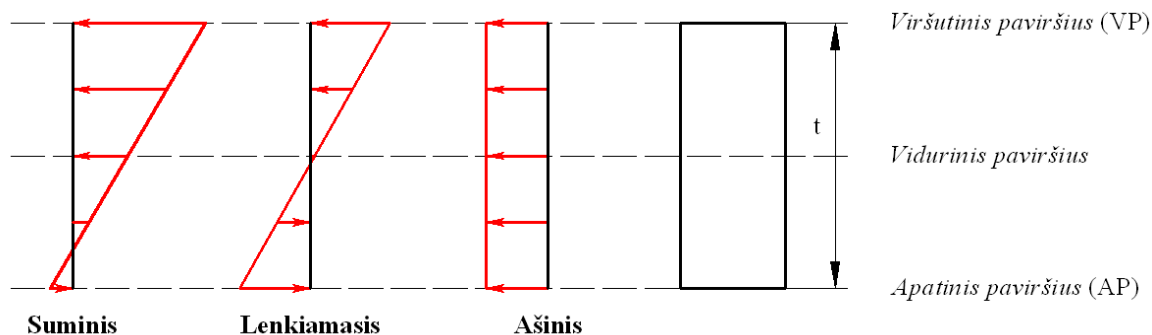
Plastiškumo teorijoje dažnai vartojama įtempių intensyvumo $\sigma_i = \sqrt{3} \cdot \tau_i$ sąvoka. Šioje teorijoje žinoma vadinamoji Hubero ir Mizeso plastinių deformacijų atsiradimo sąlyga. Ji teigia: *plastinis deformavimasis įmanomas tuomet, kai įtempių intensyvumas σ_i yra lygus medžiagos takumo įtempiui σ_y tempimo metu*. Įtempių intensyvumas σ_i apibūdina įtempių lygį ties kūno tašku (Čyras 1989). Šis dydis apskaičiuojamas pagal (4.1) arba (4.2) formules:

$$\sigma_i = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 \leq 2\sigma_y^2; \quad (4.1)$$

$$\sigma_i = (\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2) \leq 2\sigma_y^2. \quad (4.2)$$

Remiantis potencinės energijos sąvoka, pirmasis šias sąlygas 1904 m. sudarė lenkų mokslininkas M. Huberis. Vėliau, remdamasis kitais samprotavimais, šias sąlygas gavo 1913 m. R. Mizesas, o 1924 m. H. Henkis. Teisingiau būtų vadinti šią takumo sąlygą (4.1) trijų autorių pavardėmis (Hubero – Mizeso – Henkio). Nesunku pastebėti, kad kairioji (4.1) pusė reiškia tangentinių įtempių intensyvumą. Taigi Mizeso takumo sąlyga pagrįsta tangentinių įtempių intensyvumo maksimumo hipoteze (Čyras 1989).

Kaip minėta 4.1.2. skirsnyje kevalinis trikampinis baigtinis elementas gali priešintis lenkimo ir membraninėms apkrovoms. Taigi, nustatius analizės objekto įtemptą deformuotą būvį, galime matyti netik suminį įtempį, veikiantį viršutiniame ar apatiniame elemento paviršiuje, tačiau ir išskirti lenkiamojo įtempio ar membraninio įtempio dalis. Aptartų įtempių pasiskirstymas išilgai kevalinio elemento aukščio pateiktas 4.15 pav. Tačiau, nereikėtų užmiršti, kad santvaros analizės uždavinio matematinis modelis sudarytas priimant prielaidą, jog konstrukcijos mazgai yra lankstūs ir tik viršutinėje santvaros juostoje galimas lenkiamasis momentas. Visi kiti analizės objekto elementai perima tik ašinę tempimo arba gniuždymo jėgą.



4.15 pav. Įtempių pasiskirstymas išilgai kevalinio elemento aukščio (Kurowski 2011)

4.3.1. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, stiprumo analizė

Santvaros iš apskritų vamzdžių (žr. 3.5 pav.) įtempto deformuoto būvio analizė parodė, jog konstrukcijos elementuose veikiantys *Von Mizeso* įtempiai (į įtempių koncentraciją elementų kontakto vietose neatsižvelgta), neviršija atitinkamo elemento plieno ribinio takumo įtempio reikšmės (žr. 4.4 lentelę). Minėtų įtempių pasiskirstymas, santvaros apatiniame ir viršutiniame paviršiuose, pateiktas 4.16 – 4.17 pav. Šių įtempių pasiskirstymo pobūdis atitinka analitiniais skaičiavimais nustatytą konstrukcijos įrašų pasiskirstymo pobūdį.

4.4 lentelė. Santvaros, analizuotos pagal STR 2.05.08:2005, elementų plieno charakteristikos

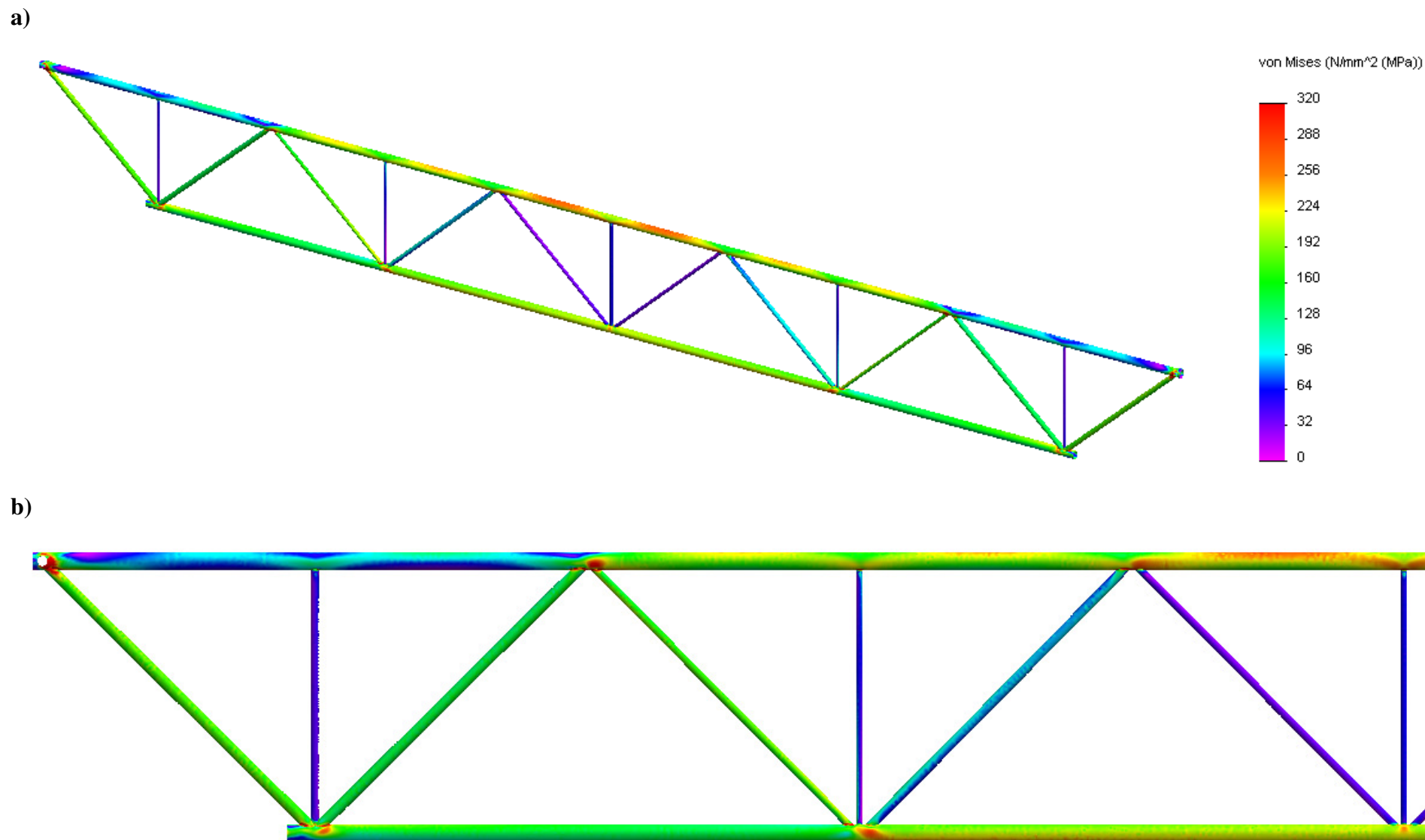
<i>Elemento Nr.</i>	<i>Plieno markė</i>	<i>Skaičiuotinis plieno stipris pagal takumo ribą, MPa</i>	<i>Skaičiuotinis plieno kerpamasis stipris, MPa</i>
1.	S355	320	185
2. – 3.	S275	250	144
4. – 10.	S235	210	121

Remiantis 4.16 ir 4.17 paveikslais, santvaros viršutinės ir apatinės juostų didžiausi įtempiai (į įtempių koncentraciją, elementų kontakto vietose, neatsižvelgta) atitinkamai apytikriai neviršija 275 MPa ir 230 MPa. Taigi, šių elementų laikomosios galios, pagal stiprumą, išnaudojimas atitinkamai yra 0,859 ir 0,920. Aptartas rodiklis parodo, kad elementų laikomoji galia yra užtikrinta. Atlikti šių elementų analitiniai skaičiavimai parodė, jog aptartų elementų laikomosios galios, pagal stiprumą, išnaudojimo koeficientai atitinkamai yra 0,889 (žr. B priedo B.1 lentelę) ir 0,922 (žr. B priedo B.2 lentelę). Kituose analizuotos konstrukcijos elementuose veikiančių didžiausių *Von Mizeso* įtempių reikšmės (į įtempių koncentraciją, elementų kontakto vietose, neatsižvelgta) ir šių elementų laikomosios galios, pagal stiprumą (*neįvertintas klupumas*), išnaudojimo koeficientai, pateikti 4.5 lentelėje. Konstrukcijos tinkelio elementų analizės rezultatai, taikant analitinius metodus, pateikti B priedo B.3 – B.6 lentelėse.

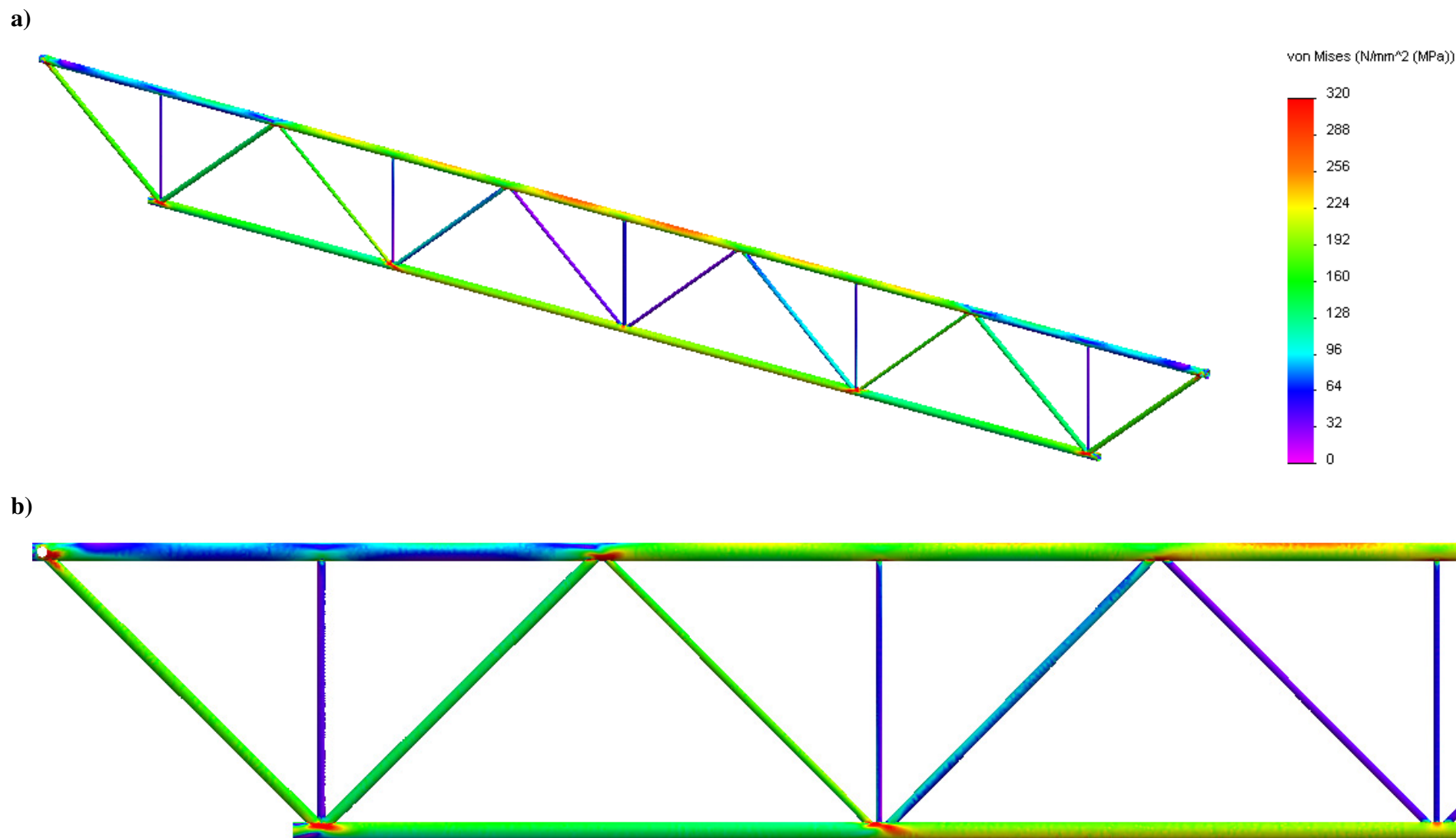
4.5 lentelė. Santvaros tinkelio elementų stiprumo analizės rezultatų suvestinė

<i>Eil. Nr.</i>	<i>Elemento Nr.</i>	<i>Plieno markė</i>	<i>Maksimalus Von Mizeso įtempis, MPa</i>	<i>Laikomosios galios koeficientas, nustatytas skaitiniu eksperimentu</i>	<i>Laikomosios galios koeficientas, nustatytas analitiniais metodais</i>
1.	3	S275	145	0,580	0,610*
2.	4	S235	100	0,476	0,553*
3.	5	S235	195	0,928	0,949
4.	6	S235	185	0,881	0,916
5.	7	S235	45	0,214	0,814
6.	8	S235	70	0,333	0,533*
7.	9	S235	60	0,285	0,416*

Pastaba: nereikėtų užmiršti, kad lenkimo ir ašinės jėgos, arba tik ašinės jėgos, veikiamiems elementams atliekama ir stabilumo analizė (žr. 4.4.1. skirsnį).



4.16 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis STR 2.05.08:2005 nurodymais



4.17 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis STR 2.05.08:2005 nurodymais

4.3.2. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, stiprumo analizė

Santvaros iš apskritų vamzdžių (žr. 3.5 pav.) įtempto deformuoto būvio analizė parodė, jog konstrukcijos elementuose veikiantys *Von Mizeso* įtempiai (į įtempių koncentraciją, elementų kontakto vietose, neatsižvelgta), neviršija atitinkamo elemento plieno ribinio takumo įtempio reikšmės (žr. 4.4 lentelę). Minėtų įtempių pasiskirstymas, santvaros apatiniame ir viršutiniame paviršiuose, pateiktas 4.18 – 4.19 pav. Šių įtempių pasiskirstymo pobūdis atitinka analitiniais skaičiavimais nustatytą konstrukcijos įrašų pasiskirstymo pobūdį.

4.6 lentelė. Santvaros, analizuotos pagal LST EN 1993:2005, elementų plieno charakteristikos

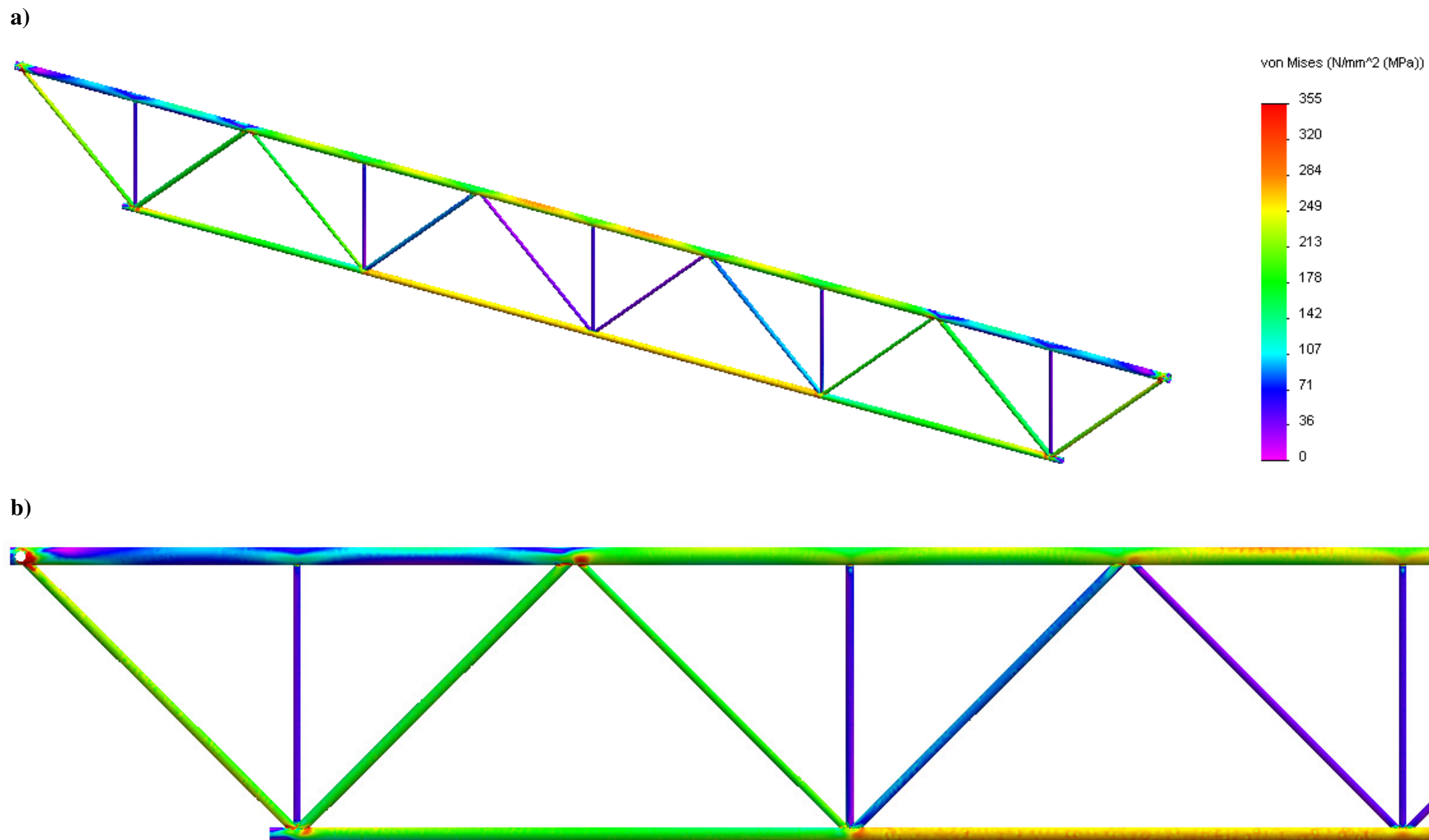
<i>Elemento Nr.</i>	<i>Plieno markė</i>	<i>Skaičiuotinis plieno stipris pagal takumo ribą, MPa</i>	<i>Skaičiuotinis plieno kerpamasis stipris, MPa</i>
1.	S355	355	205
2. – 3.	S275	275	159
4. – 10.	S235	235	136

Remiantis 4.18 ir 4.19 paveikslais, santvaros viršutinės ir apatinės juostų didžiausi įtempiai (į įtempių koncentraciją, elementų kontakto vietose, neatsižvelgta) atitinkamai apytikriai neviršija 285 MPa ir 265 MPa. Taigi, šių elementų laikomosios galios, pagal stiprumą, išnaudojimas atitinkamai yra 0,803 ir 0,963. Aptartas rodiklis parodo, kad elementų laikomoji galia yra užtikrinta. Atlikti šių elementų analitiniai skaičiavimai parodė, jog aptartų elementų laikomosios galios, pagal stiprumą, išnaudojimo koeficientai atitinkamai yra 0,829 (žr. D priedo D.1 lentelę) ir 0,981 (žr. D priedo D.2 lentelę). Kituose analizuotos konstrukcijos elementuose veikiančių didžiausių *Von Mizeso* įtempių reikšmės (į įtempių koncentraciją, elementų kontakto vietose, neatsižvelgta) ir šių elementų laikomosios galios, pagal stiprumą (*neįvertintas klupumas*), išnaudojimo koeficientai, pateikti 4.7 lentelėje. Konstrukcijos tinkelio elementų analizės rezultatai, taikant analitinius metodus, pateikti D priedo D.3 – D.6 lentelėse.

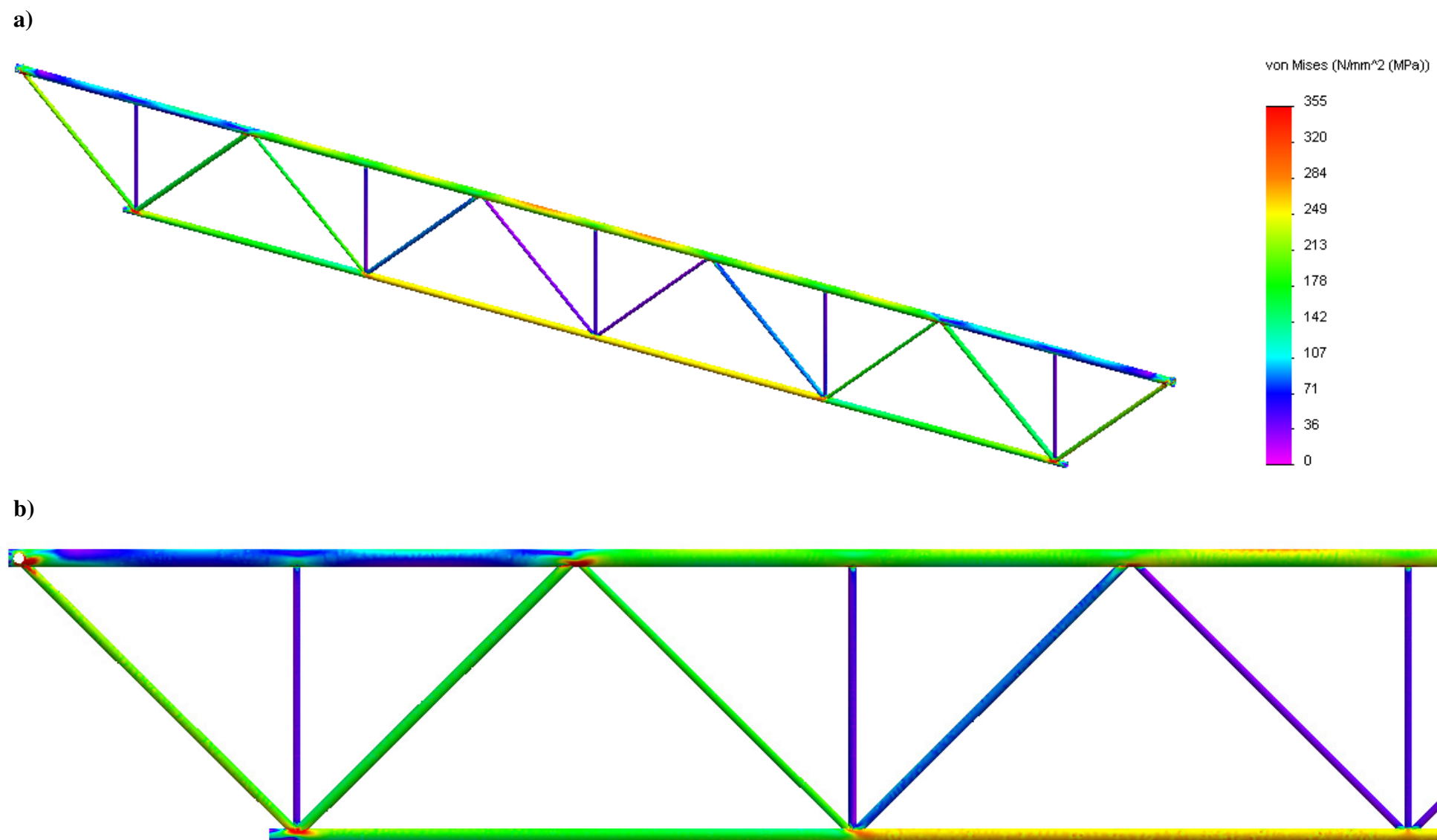
4.7 lentelė. Santvaros tinkelio elementų stiprumo analizės rezultatų suvestinė

<i>Eil. Nr.</i>	<i>Elemento Nr.</i>	<i>Plieno markė</i>	<i>Maksimalus Von Mizeso įtempis, MPa</i>	<i>Laikomosios galios koeficientas, nustatytas skaitiniu eksperimentu</i>	<i>Laikomosios galios koeficientas, nustatytas analitiniais metodais</i>
1.	3	S275	140	0,595	0,622*
2.	4	S235	105	0,447	0,615*
3.	5	S235	220	0,936	0,952
4.	6	S235	200	0,851	0,955
5.	7	S235	50	0,213	0,984
6.	8	S235	60	0,255	0,407*
7.	9	S235	55	0,234	0,416*

Pastaba: nereikėtų užmiršti, kad lenkimo ir ašinės jėgos, arba tik ašinės jėgos, veikiamiems elementams atliekama ir stabilumo analizė (žr. 4.4.2. skirsnį).



4.18 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis LST EN 1993:2005 nurodymais



4.19 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas santvaroje (a), ir jos kairėje pusėje (b), veikiamoje 1 apkrovimo varianto ir suprojektuotoje remiantis LST EN 1993:2005 nurodymais

▪ Apibendrinimas

Atliekant skaitinio eksperimento rezultatų analizę, nebuvo atsižvelgta į įtempių koncentracija elementų kontakto vietose, nes pagal Šaučiuvėną (Šaučiuvėnas 2006) elementus veikiant statinėms apkrovomis ir esant normaliai aplinkos temperatūrai, įtempių koncentracija neturi įtakos iš plastiško plieno pagamintų elementų stiprumui. Tai paaiškinama tuo, kad didžiausiems įtempiamos pasiekus takumo ribą, šie nebedidėja, o plieno takumo įtempiai pasiskirsto ir kitose skerspjūvio dalyse. Todėl skaičiuojant statiškai apkrautas plienines konstrukcijas ir elementus įtempių koncentracijos įtaka atspariui nevertinama.

Galima daryti išvadą, kad aptartų elementų laikomosios galios nustatymas, pagal stiprumą, atliktas teisingai ir gautas rezultatas, atlikus konstrukcijos skaitinį eksperimentą standartine baigtinių elementų programa, yra tikslesnis. Tačiau nereikėtų užmiršti, kad analizės objektas, dėl ribotų kompiuterio galimybių, nebuvo suskaidytas į optimalų baigtinių elementų tinklą. Šis faktorius sąlygoja rezultatų tikslumą.

Kaip minėta 4.2. poskyryje, optimalus baigtinių elementų tinklas pasiekiamas tada, kai santvaros vidurio taško įlinkio reikšmės konverguoja. Taip pat, apie baigtinių elemento tinklo optimalumą, galima spręsti, remiantis ERR (*Energy Norm Error*) koeficientu (Zienkiewicz 1987) – kuo minėtas koeficientas mažesnis, tuo analizės objekto baigtinių elementų tinklas optimalesnis. Kaip matyti iš H priede pateiktų paveikslų, ERR koeficiento reikšmių pasiskirstymas santvaros elementuose, neįvertinus kontakto vietų, yra sąlyginai didelis – tai rodo, kad šiose vietose baigtinių elementų tinklas nėra optimalus. Taigi, ERR koeficientas (Zienkiewicz 1987) įrodo 4.11 ir 4.12 pav. apibendrinančios išvados teisingumą apie baigtinių elementų tinklo neoptimalumą.

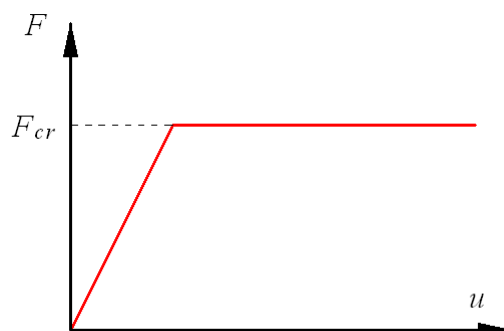
ERR koeficiento (Zienkiewicz 1987) reikšmių pasiskirstymas santvaros mazguose yra tolygus ir šios reikšmės artimos nuliui (žr. H priedo H.1 – H.2 pav.). Tačiau, optimalesnis baigtinių elementų tinklas labiau įvertina lokalinį efektą kontakto vietose (Atkočiūnas ir Nagevičius 2004). Minėtas efektas trukdo kokybiškai įvertinti santvaros mazgų laikomąją galią, remiantis skaitinio eksperimento rezultatais (žr. I ir J priedus.).

4.4 Santvaros stabilumo analizė

Reiškinys, kai konstrukcija ar atskiros jos dalys praranda gebėjimą priešintis išorinėms apkrovoms, vadinamas stabilumo praradimu. Stabilumas sistemai yra ne mažiau svarbi savybė, kaip stiprumas ir standumas. Medžiagų mechanikos kurse buvo nagrinėtas atskiras stabilumo praradimo atvejis – atskirtų strypų klūpdymas. Sudėtingose struktūrose stabilumo praradimas gali pasireikšti įvairiomis formomis.

Sistemos nestabilumas pasireiškia tuomet, kai konstrukcijai, esančiai pusiausvyros būsenoje, suteikiamas labai mažas poslinkis ir jina staigiai pereina iš vieno pusiausvyros būvio į kitą. Taškas kuriame įvyksta šis perėjimas vadinamas bifurkacijos tašku. Sistemos darbas iki bifurkacijos taško vadinamas ikikritiniu, o darbas už šio taško – pokritinis (Barauskas *et al.* 2004).

Inžinerinėje praktikoje nagrinėjant konstrukcijų stabilumą sprendžiamas pradinio stabilumo uždavinys, kuriame apsiribojama tik pirmojo bifurkacijos taško ir struktūros elgsenos jo aplinkoje nustatymu. Minėtasis uždavinys modeliuojamas supaprastina ištiesinamąja diagrama (žr. 4.20 pav.), kurioje iki kritinės jėgos F_{cr} sistemos elgsena buvo tiesinė, o pasiekus šią jėgą sistema prarado stabilumą – perėjo iš vieno pusiausvyros būvio į kitą.



4.20 pav. Stabilumo reiškinių iliustracija: nestabili struktūra

Formuojant stabilumo uždavinio, skirtą nustatyti pirmąjį bifurkacijos tašką, matematinį modelį, taikoma prielaida apie proporcingą apkrovą (4.3). Stabilumo netekimas tokiu atveju yra apibūdinamas kritine apkrova $\{F_{cr}\}$, kuri nusakoma daugikliu λ_{cr} .

$$\{F(t)\} = \lambda(t)\{F_0\}; \quad (4.3)$$

$$\{F_{cr}\} = \lambda_{cr}\{F_0\}. \quad (4.4)$$

Neatsižvelgiant į dideles deformacijas, t. y. laikant $[K_{LD}] = [0]$, ir taikant apkrovos apibrėžimą (4.3), pusiausvyros lygtis (4.5) gali būti užrašyta (4.6) lygtimi:

$$\left[K(\{U(t)\}) \right] \{U(t)\} = \{F(t)\}; \quad (4.5)$$

$$([K_0] - \lambda(t)[K_{Geom}])\{U(t)\} = \lambda(t)\{F_0\}. \quad (4.6)$$

Bifurkacijos taško mechaninė interpretacija reiškia, jog struktūra netenka stabilumo, esant labai mažiems poslinkių pokyčiams, kai išorinės apkrovos išlieka pastovios. Poslinkiui padidėjus dydžiu $\{\delta U\}$, šį pokytį atitinka situacija apibūdinama (4.7) lygtimi:

$$([K_0] - \lambda_{cr}[K_{Geom}])\{\delta U\} = \{0\}. \quad (4.7)$$

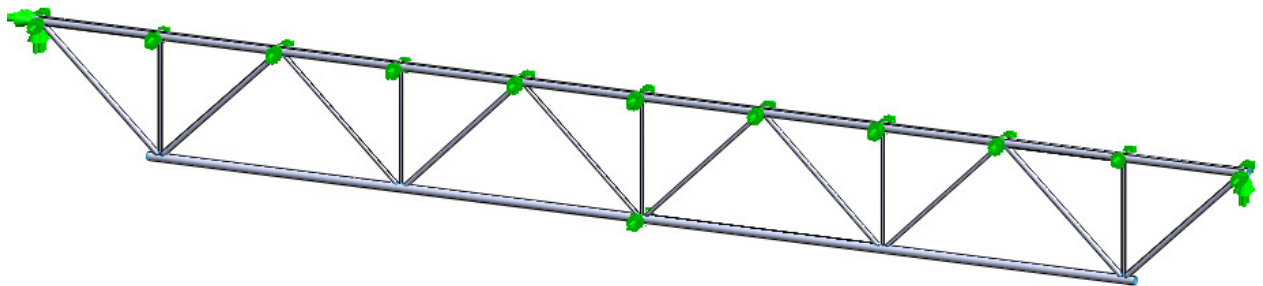
Matome, jog išorinė apkrova prilyginama nuliui. Šis uždavinys gali būti perrašytas kaip tikrinių reikšmių uždavinys:

$$([K_0] - \lambda_{cr}[K_{Geom}])\{Z\} = \{0\}. \quad (4.8)$$

Lygtyje (4.8) tikrinė reikšmė λ_{cr} atitinka kritinės jėgos daugiklį, o tikrinė forma $\{Z\}$ yra sistemos stabilumo forma, arba jos deformavimosi forma prieš prarandant stabilumą. Aptartoji lygtis gali būti gauta ir energiniais metodais.

Poskyrio uždaviniai:

- Paruošti analizės objekto, kuris buvo suprojektuotas taikant du plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentus, modelius (žr. 4.21 pav.) „SolidWorks“ (Lombard 2010) aplinkoje stabilumo analizei atlikti. Šie modeliai turi atitikti santvaros iš apskritų vamzdžių skaičiuojamąsias schemas, taikytas 3.3. ir 3.4. poskyriuose, t. y. poslinkiai iš plokštumos suvaržyti viršutinėse juostose kas 2 m, o apatinėse juostose per vidurį,
- Atlikti aptartų konstrukcijų stabilumo analizę, taikant baigtinių elementų metodą. Analizės metu nustatytos santvarų išklupimo formas ir kritinių apkrovų dydžiai, kurioms veikiant santvaros iš apskritų vamzdžių taptų nestabilios.



4.21 pav. Santvaros kraštinės sąlygos atliekant stabilumo analizę

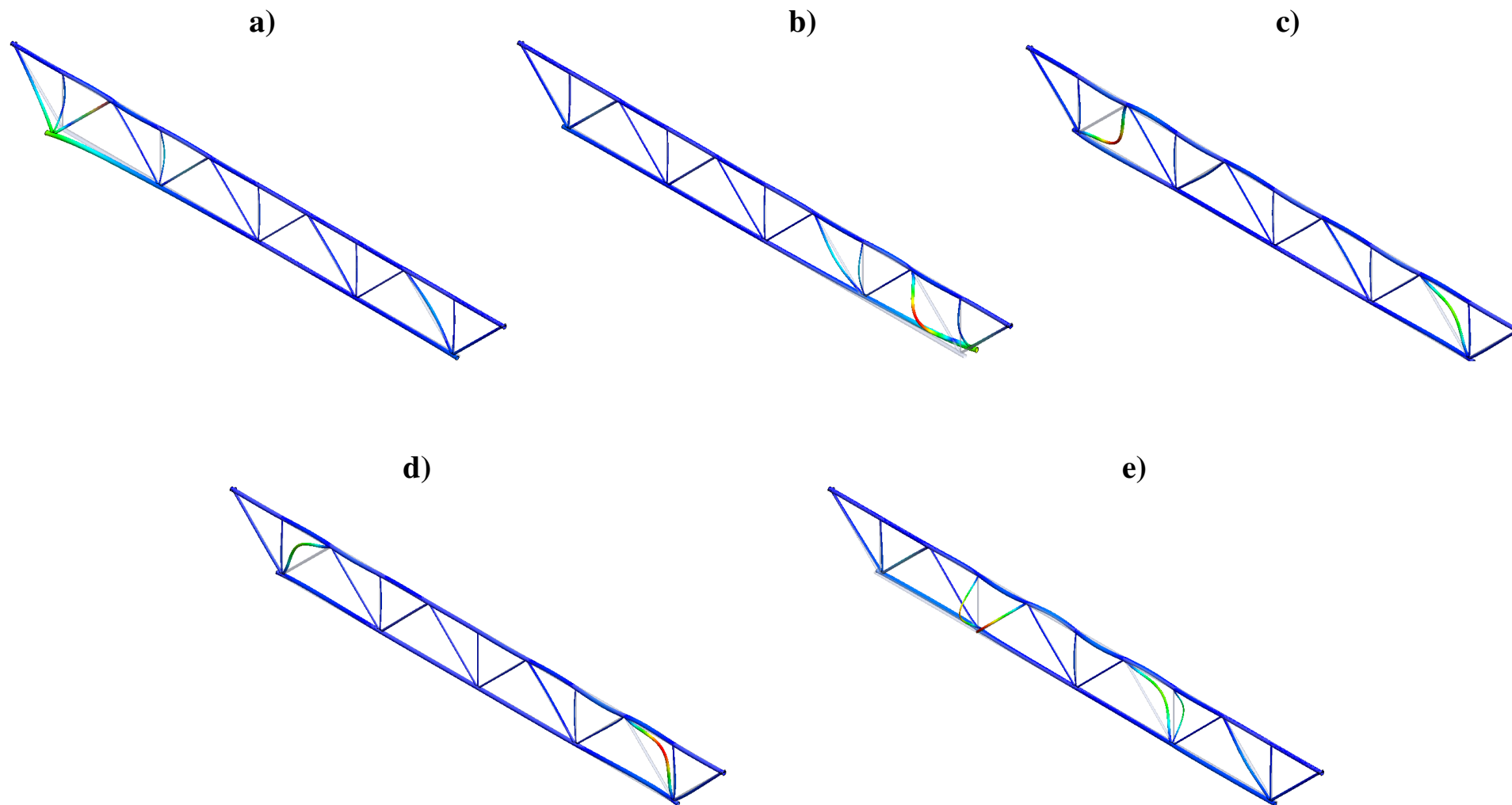
4.4.1. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, stabilumo analizė

Suprojektuotos santvaros iš apskritų vamzdžių modelis, kuris panaudotas stabilumo analizei atlikti, sukurtas remiantis 4.2. ir 4.4. poskyriuose pateikta informacija. Stabilumo analizė atlikta suskaidžius santvaros modelį į kevalinius parabolinio tipo trikampinius baigtinius elementus, kurių kraštinės dydis svyruoja nuo 16,67 mm iki 50 mm. Norint pasiekti platesnę rezultatų gamą, „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011) programai užduota rasti 40 išklupimo formų ir suskaičiuoti išklupimo formas charakterizuojančio koeficiento λ_{cr} reikšmes.

Santvaros stabilumo analizės rezultatai pateikti 4.8 lentelėje. Konstrukcijos išklupimo formos nuo 1 iki 27 gali būti atmestos kaip negalimos ($\lambda_{cr} < 0$), nes santvaros viršutinę juostą veikiantis apkrovų derinys negali pakeisti veikimo krypties. Tačiau, išklupimo formos nuo 27 iki 40 galimos ($\lambda_{cr} > 0$) tik tuo atveju jeigu analizuotą konstrukciją veikianti apkrova bus didesnė λ_{cr} karto, nei veikianti dabar. Taigi, santvara pereis iš vieno pusiausvyros būvio į kitą (žr. 4.22 pav.), kai veikianti apkrova bus 3,872 karto didesnė nei veikianti dabar (žr. 3.2. poskyrį).

4.8 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, išklupimo formos ir λ_{cr}

Išklupimo forma	λ_{cr} reikšmės, veikiant atitinkamam santvaros apkrovimo variantui				Išklupimo forma	λ_{cr} reikšmės, veikiant atitinkamam santvaros apkrovimo variantui			
	1 var.	2 var.	3 var.	4 var.		1 var.	2 var.	3 var.	4 var.
1.	-7,368	-8,756	-10,157	-9,719	21.	-2,127	-2,680	-3,562	-3,160
2.	-6,742	-8,706	-9,846	-9,280	22.	-2,024	-2,394	-3,394	-2,919
3.	-6,483	-8,609	-9,297	-8,799	23.	-1,853	-2,367	-2,844	-2,900
4.	-5,543	-8,486	-8,277	-7,924	24.	-1,792	-2,224	-2,778	-2,770
5.	-5,469	-7,426	-8,256	-7,593	25.	-1,662	-2,037	-2,501	-2,516
6.	-4,867	-7,303	-7,879	-6,617	26.	-1,329	-1,994	-1,920	-2,474
7.	-4,598	-6,411	-7,792	-6,331	27.	-0,843	-1,727	-1,244	-2,252
8.	-4,461	-5,951	-7,393	-6,200	28.	3,872	-1,078	5,564	-1,827
9.	-4,354	-5,521	-7,380	-6,186	29.	3,878	4,985	5,572	-1,142
10.	-4,118	-5,142	-6,477	-5,985	30.	4,947	4,994	7,166	4,772
11.	-4,038	-5,079	-6,209	-5,662	31.	4,965	5,447	7,189	5,709
12.	-3,922	-5,015	-5,404	-5,560	32.	5,067	5,447	7,826	5,834
13.	-3,555	-4,758	-4,944	-5,483	33.	5,115	6,134	7,936	6,133
14.	-3,519	-4,657	-4,811	-5,284	34.	5,651	6,265	8,919	6,311
15.	-3,306	-4,408	-4,553	-5,156	35.	5,922	6,484	8,949	7,223
16.	-3,100	-4,390	-4,395	-4,660	36.	6,041	6,525	10,075	7,433
17.	-2,954	-4,103	-4,390	-4,540	37.	6,296	6,619	10,373	7,682
18.	-2,436	-3,814	-4,087	-3,960	38.	6,499	7,367	11,114	8,028
19.	-2,306	-3,295	-3,679	-3,956	39.	6,572	7,599	11,526	8,311
20.	-2,181	-2,840	-3,582	-3,509	40.	7,139	8,241	12,098	8,319



4.22 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal STR 2.05.08:2005, ir veikiamos I apkrovimo varianto, išklupimo formos:
28 (a), 29(b) 30 (c), 31 (d), 32 (e)

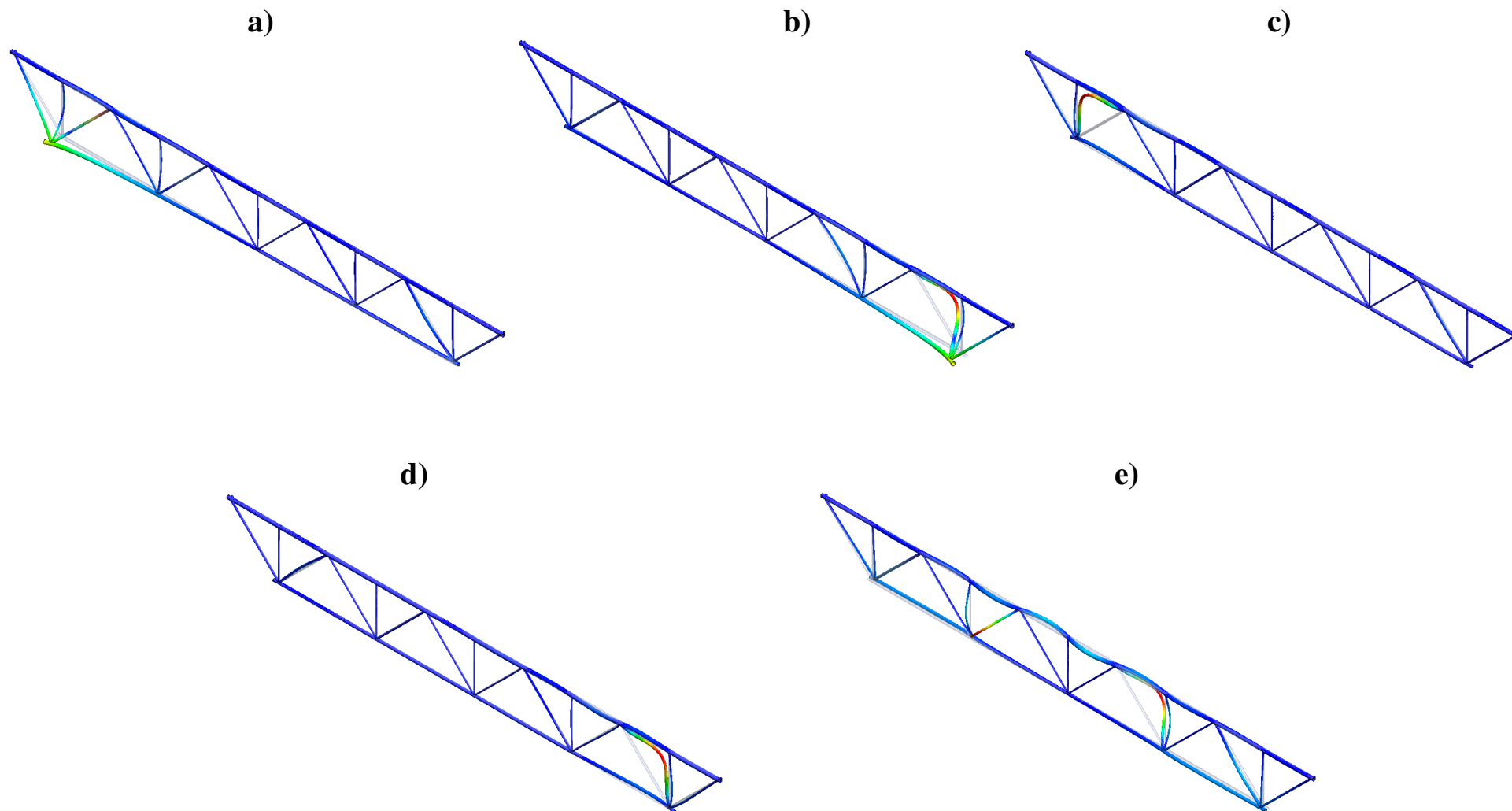
4.4.2. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, stabilumo analizė

Suprojektuotos santvaros iš apskritų vamzdžių modelis, kuris panaudotas stabilumo analizei atlikti, sukurtas remiantis 4.2. ir 4.4. poskyriuose pateikta informacija. Stabilumo analizė atlikta suskaidžius santvaros modelį į kevalinius parabolinio tipo trikampinius baigtinius elementus, kurių kraštinės dydis svyruoja nuo 16,67 mm iki 50 mm. Norint pasiekti platesnę rezultatų gamą, „SolidWorks Simulation“ (Kurowski 2011) programai užduota rasti 40 išklupimo formų ir suskaičiuoti išklupimo formas charakterizuojančio koeficiento λ_{cr} reikšmes.

Santvaros stabilumo analizės rezultatai pateikti 4.9 lentelėje. Konstrukcijos išklupimo formos nuo 1 iki 35 gali būti atmestos kaip negalimos ($\lambda_{cr} < 0$), nes santvaros viršutinę juostą veikiantis apkrovų derinys negali pakeisti veikimo krypties. Tačiau, išklupimo formos nuo 36 iki 40 galimos ($\lambda_{cr} > 0$) tik tuo atveju jeigu analizuotą konstrukciją veikiant apkrova bus didesnė λ_{cr} karto, nei veikianti dabar. Taigi, santvara pereis iš vieno pusiausvyros būvio į kitą (žr. 4.23 pav.), kai veikianti apkrova bus 3,325 karto didesnė nei veikianti dabar (žr. 3.2. poskyrį).

4.9 lentelė. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, išklupimo formos ir λ_{cr}

Išklupimo forma	λ_{cr} reikšmės, veikiant atitinkamam santvaros apkrovimo variantui				Išklupimo forma	λ_{cr} reikšmės, veikiant atitinkamam santvaros apkrovimo variantui			
	1 var.	2 var.	3 var.	4 var.		1 var.	2 var.	3 var.	4 var.
1.	-6,130	-8,486	-8,753	-7,873	21.	-2,214	-3,088	-3,589	-3,115
2.	-5,975	-8,206	-8,534	-7,643	22.	-2,189	-2,982	-3,359	-3,003
3.	-5,427	-7,932	-8,162	-6,822	23.	-2,107	-2,798	-3,294	-2,922
4.	-5,415	-7,616	-7,926	-6,768	24.	-2,093	-2,657	-3,024	-2,783
5.	-5,260	-7,435	-7,746	-6,298	25.	-2,042	-2,595	-2,989	-2,718
6.	-4,954	-7,320	-7,421	-6,192	26.	-1,923	-2,386	-2,932	-2,650
7.	-4,784	-6,791	-7,348	-6,007	27.	-1,868	-2,340	-2,782	-2,534
8.	-4,528	-6,083	-7,158	-5,843	28.	-1,710	-2,268	-2,485	-2,312
9.	-4,423	-5,902	-7,046	-5,800	29.	-1,686	-2,122	-2,371	-2,261
10.	-4,256	-5,072	-6,774	-5,782	30.	-1,322	-2,057	-1,904	-1,816
11.	-4,136	-4,949	-6,598	-5,448	31.	-1,200	-1,691	-1,809	-1,629
12.	-3,943	-4,931	-6,079	-5,315	32.	-1,061	-1,511	-1,554	-1,471
13.	-3,821	-4,739	-5,628	-5,269	33.	-0,882	-1,368	-1,267	-1,205
14.	-3,633	-4,587	-5,291	-5,081	34.	-0,625	-1,156	-0,923	-0,847
15.	-3,176	-4,446	-4,484	-4,581	35.	3,325	-0,802	4,772	4,109
16.	-3,169	-4,286	-4,477	-4,361	36.	3,329	4,367	4,777	5,141
17.	-2,840	-4,232	-4,139	-3,923	37.	4,404	4,373	6,376	5,459
18.	-2,676	-3,861	-3,952	-3,657	38.	4,434	5,521	6,420	6,328
19.	-2,463	-3,568	-3,879	-3,524	39.	5,348	5,561	8,924	6,850
20.	-2,279	-3,403	-3,705	-3,264	40.	5,538	5,768	9,100	7,354



4.23 pav. Santvaros, suprojektuotos pagal LST EN 1993:2005, ir veikiamos I apkrovimo varianto, išklupimo formos:
35 (a), 36(b) 37 (c), 38 (d), 39 (e)

▪ Apibendrinimas

Atlikta santvaros stabilumo analizė parodė, jog konstrukcijai reiktų suteikti daug didesnę apkrovą nei jiniai gali atlaikyti remiantis rezultatais, kurie buvo gauti atliekant santvaros analizę, taikant analitinius metodus, t. y. analizuojant konstrukciją pagal plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentų nurodymus (žr. 3.3. ir 3.4. poskyrius)

Atlikta santvaros, kuri buvo suprojektuota pagal STR 2.05.08:2005, stabilumo analizė parodė, kad konstrukcijai reiktų suteikti 3,872 karto didesnę apkrovą nei veikianti dabar (žr. 3.2. poskyrį), kad ji pereitų iš vieno pusiausvyros būvio į kitą. Tai pat nustatyta, kad pirmiausia išklups gniuždomi analizės objekto tinklelio elementai.

Atlikta santvaros, kuri buvo suprojektuota pagal LST EN 1993:2005, stabilumo analizė parodė, kad konstrukcijai reiktų suteikti 3,325 karto didesnę apkrovą nei veikianti dabar (žr. 3.2. poskyrį), kad ji pereitų iš vieno pusiausvyros būvio į kitą. Tai pat nustatyta, kad pirmiausia išklups gniuždomi analizės objekto tinklelio elementai.

4.5 Skyriaus išvados

Šiame skyriuje pateikti baigtinių elementų metodu atliktų santvarų iš apskritų vamzdžių skaitinių eksperimentų duomenys ir rezultatai. Gauti analizės rezultatai sulyginami su rezultatais, gautais konstrukciją analizuojant pagal normatyvinių dokumentų reikalavimus.

Rezultatų lyginamoji analizė parodė, kad konstrukcijos įtemptas deformuotas būvis, nustatytas taikant kevalinius baigtinius elementus, nedaug skiriasi nuo santvaros iš apskritų vamzdžių elementų analizės rezultatų taikant normatyvinių dokumentų reikalavimus.

Atskirtų elementų projektavimas, remiantis gautais įtempių laukais negalimas, nes atsiranda įvairūs įtempių koncentratoriai. Šie įtempių koncentratoriai ignoruojami plastiškiems plienams, tačiau labai svarbūs analizuojant konstrukcijos nuovargį.

Išanalizavus stabilumo analizės rezultatus daroma prielaida jog abiejų plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentų siūloma skaičiuojamųjų ilgių koncepcija neleidžia teisingai įvertinti gniuždomų elementų elgsenos visos konstrukcijos atžvilgiu,

Analizės rezultatų tikslumas labiausiai priklauso nuo baigtinių elementų tinklo tankio. Didelio tūrio konstrukcijoms pasiekti optimalų baigtinių elementų tinklą yra ganėtinai sunku. Šios problemos sprendimą varžo ribotos kompiuterio galimybės.

Konstrukcijos analizė neturėtų apsiriboti vien tik jos skaitiniu eksperimentu ar analitinių metodų taikymu. Nekvalifikuotai sudarytas analizės objekto skaičiuojamasis modelis gali duoti klaidingus rezultatus, todėl bet kokios konstrukcijos analizė turėtų būti paremta ir eksperimentiniais tyrimais. Taip pat labai svarbu, kad skaitinių ir realių eksperimentų rezultatai būtų sutikrinti su panašių eksperimentų rezultatais.

5. BAIGIAMOSIOS DARBO IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

- Iš literatūros apžvalgos nustatyta, kad santvaros mazgai gali būt lankstūs, standūs ir pusiau standūs (pasiduodantys), tačiau pastarųjų mazgų realizacija globalios struktūros atžvilgiu yra gana sudėtingas uždavinys.
- Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių analizė, remiantis dviem plieninių konstrukcijų projektavimo reglamentais, kurios metu nustatyta, kad LST EN 1993:2005 leidžia suprojektuoti ekonomiškesnes konstrukcijas, nei STR 2.05.08:2005.
- Nustatyta, kad STR 2.05.08:2005 neleidžia suprojektuoti ekonomiškesnės konstrukcijos, nes elementų analizės algoritmų formulėse yra įvedami elemento darbo sąlygų ir medžiagos patikimumo koeficientai, kurie sumažina skaičiuotinį plieno stiprį.
- Nustatyta, kad LST EN 1993-1-1:2005 geriau įvertina ašinės gniuždymo jėgos veikiamų elementų iš apskritų vamzdžių darbą, nes klupumo kreivė šio tipo elementams yra palankesnė, nei pateiktoji STR 2.05.08:2005.
- Atlikta santvaros iš apskritų vamzdžių mazgų analizė, remiantis STR 2.05.08:2005 8 priedu ir LST EN 1993-1-8 nurodymais. Šios analizės metu nustatyta, kad mazgų konstravimo tinkamumo ribos STR 2.05.08:2005 yra liberalesnės.
- Pastebėta, kad STR 2.05.08:2005 8 priede nėra pateiktą nurodymų kaip atlikti „KT“ tipo mazgo, kuris gali būti su užlaida arba be jos, analizę. Tačiau, pasinaudojus papildoma literatūra, šio tipo mazgų analizė buvo atlikta.
- Aprašyti ir pritaikyti du skirtingi baigtinių elementų tinklo optimalumo nustatymo metodai. Taip pat, remiantis šiais metodais, įvertintas analizuotos konstrukcijos baigtinių elementų tinklo optimalumas.
- Nustatyta, kad didelių gabaritų konstrukcijos skaitininį eksperimentą, standartine baigtinių elementų programa, tikslingiau atlikti, kai analizės objektas yra skaidomas į kevalinius parabolinio tipo trikampinius elementus, bet ne į tūrinius.
- Atliktas konstrukcijos skaitinis eksperimentas, standartine baigtinių elementų programa, parodė, jog skaitinio eksperimento rezultatai yra artimi konstrukcijos analizės rezultatams, taikant analitinius metodus.
- Pastebėta, jog įtempių staigus šuolis, jų koncentracija, pasireiškia analizuotos konstrukcijos elementų kontaktų vietose. Lokalinis efektas, tankinant baigtinių elementų tinklą (siekiant jo optimalumo), yra labiau įvertinamas.
- Nustatyta, kad kritinės jėgos dydis konstrukcijai, remiantis skaitinio eksperimento rezultatais, yra didesnis nei analizuotos santvaros elementai iš apskritų vamzdžių gali atlaikyti remiantis analitinių skaičiavimų rezultatais.

LITERATŪRA

- Atkočiūnas J., Karkauskas R. 2010. *Tamprųjų plastinių strypinių konstrukcijų optimizavimas*. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 376 p.
- Atkočiūnas J., Nagevičius J. 2004. *Tamprumo teorijos pagrindai*. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 515 p.
- Barauskas R., Belevičius R., Kačianauskas R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 612 p.
- Čižas A., Viršilas V., Žekevičius J. 2000. *Aiškinamasis medžiagų atsparumo uždavinynas*. Antras pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: TEV. 296 p.
- Corus Distribution. 2006. *Stock range & specifications*. General steel products. West Midlands: Lianwern Works. 103 p.
- Čyras A. 1990 *Statybinė mechanika*. Vadovėlis aukštųjų mokyklų statybos specialybės studentams. Vilnius: Mokslas. 448 p.
- DD ENV 1993-1-1:1992 Eurocode 3. *Design of steel structure. Part 1.1*. General rules and rules for buildings (together with United Kingdom National Application Document). Authority of Standards Board.
- Dexter E. M., Lee M. K., Kirkwood M. G. 1996. Overlapped K joints in circular hollow sections under axial loading. *J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 118, No 2. p 53 – 61.
- Earls C. J., Kozy B. 2005 Finite element modeling of tubular truss bearings. *Steel and Composite Structure*, Vol. 5, No. 1 p. 49 - 70.
- SIŽ –*Statybos inžinieriaus žinynas*. 2004. Sudarytojas Gajauskas J. ir kt. Lietuvos statybos inžinierių sąjunga. Vilnius: Technika. 1095 p.
- PKISŽ – *Pastatų konstruktoriaus ir statybininko žinynas*. 2009. Sudarytojas Gajauskas J. ir kt. Kaunas: Naujasis lankas. 1520 p.
- Garcia Nieto P. J., Coz Diaz J. J., Suarez Sierra J. L. ir kt. 2007. Non - linear analysis of the tubular „heart“ joint by FEM and experimental validation. *Journal of Constructional Steel Research* 63. p. 1077 - 1099.
- Gardner L., Nethercot D. A. 2005. *Designer‘ Guide to EN 1993-1-1*. Eurocode 3: Design of steel structures general rules and rules for buildings. London: Thomas Telford. 165 p.

- Gerdžiūnas P., Plakys V. 2005. *Bendrieji akademinių darbų įforminimo reikalavimai*. Vilnius: Technika. 75 p.
- Gimbutas M. 2007. *Lenkiamų plieninių elementų skaičiavimo metodų pagal projektavimo normas STR 2.05.08:2008 ir Eurokodą 3 lyginamoji analizė*. Magistro darbas. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius. 108 p.
- Yongo-Bo S., Tjhen L. S. 2005. Parametric equation of stress intensity factor for tubular K-joint under balanced axials loads. *International Journal of Fatigue* 27. p. 666 - 679.
- Jurkša A., Popov V. 2003. *Statybinių konstrukcijų skaičiavimo programa STAAD.Pro: programos apžvalga, komandos, skaičiavimo pavyzdžiai*. Mokomoji knyga. 2-asis leidimas. Vilnius: Technika. 325 p.
- Kalanta S. 2007. *Taikomosios optimizacijos pagrindai*. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 480 p.
- Krutinis A. 2007. *Konstrukcijų ant tampriojo pagrindo skaičiavimo teorija ir metodai*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 161 p.
- Kurobane Y., Wardenier J. ir kt. 1995. *Design Guide 1. For Circular Hollow Section (CHS) Joints Under Predominantly Static Loading*. Zoetermeer: TUV-Verlag. 149 p.
- Kurowski P. 2011. *Engineering Analysis with SolidWorks® Simulation 2011*. Mokomoji knyga. Mission, Kansas: Copyright. 455 p.
- Lapinskas, A. 2006. *Matematikos praktikumas su MathCAD*. Mokomoji knyga. Kaunas: Akademija. 35 p.
- Lombard M. 2011. *SolidWorks® 2010 Bible*. Mokomoji knyga. Indianapolis: Wiley Publishing Inc. 1130 p.
- LST EN 1993-1-1:2005 Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas*. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės. Lietuvos standartizacijos departamentas.
- LST EN 1993-1-8:2005 Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas*. 1-8 dalis. Mazgų projektavimas. Lietuvos standartizacijos departamentas.
- Misiūnaitė I. 2008. *Analitiniai modeliai santvaros iš kvadratinių vamzdžių tiesioginio jungimo mazgų skaičiavimo algoritmai sudaryti pagal EC3*. 11-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas - Lietuvos ateitis“, įvykusios Vilniuje 2008 m. balandžio 2-4 d., straipsnių rinkinys: statyba. Vilnius: Technika. p. 197 - 208.

- Nagevičius J., Karkauskas R., Norkus A. 2006. *Modulio „Statybinė mechanika 1“ paskaitų iliustracinė medžiaga*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 435 p.
- Paliulis N. ir kt. 1998. *Magistratūros studijų baigiamasis darbas*. Metodikos nurodymai. Vilnius: Technika. 24 p.
- Paulauskas J., Kvedaras A. 1977. *Metalinės konstrukcijos*. Vadovėlis pramoninės ir civilinės statybos specialybei. Vilnius: Mokslo. 460 p.
- Puzinas J. 2007. *Plieninių ekscentriškųjų elementų skaičiavimo pagal projektavimo normų EC3 ir STR 2.05.08 metodikas lyginamoji analizė*. Magistro darbas. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius. 67 p.
- Shao Y. B., Liet S. T. ir kt. 2005. Mesh modelling and analysis of cracked uni-planar tubular K-joints. *Journal of Constructional Steel Research* 61. p. 235 - 264.
- SNiP II-23-81*. 1989. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций. Москва: Госстрой. 148 с.
- STR 2.05.08:2005 8 priedas. (2005) *Praktinio taikymo vadovas*. Jungčių skaičiavimas ir reikalavimai konstrukcijom projektuoti. Vilnius. LR Aplinkos ministerija 57 p.
- STR 2.05.08:2005. 2005. *Plieninių konstrukcijų projektavimas*. Pagrindinės nuostatos. Vilnius: LR Aplinkos ministerija. 106 p.
- Stupak E. 2004. *Dvimačių struktūrų irimo modeliavimas naudojant prisitaikančius baigtinių elementų tinklus*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius. 87 p.
- Šaučiuvėnas G. 2006. *Metalinės konstrukcijos*. Laboratorinių darbų metodikos nurodymai. Vilnius: Technika. 144 p.
- Urbonas K. 2006. *Plieninių rėminių konstrukcijų pasiduodančių mazgų modeliavimo ir projektavimo metodų kūrimas*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius: 113 p.
- Užpolevičius B. 2006. *Statinių tyrinėjimas, bandymas ir vertinimas*: Mokomoji knyga. 2-asis pataisytas ir papildytas leidimas. Vilnius: Technika. 135 p.
- Vainio H., Oyj I. 2000. *Design Handbook for Rautaruukki Structural Hollow Sections*. Projektavimo vadovas. Keuruu: Otava Book Printing Ltd. 345 p.

Vasiliauskaitė L. 2006. *Prisitaikančiosios baigtinių elementų strategijos plokštuminiams tamprumo teorijos uždaviniams*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas. Vilnius: 99 p.

Wang J., Chen Y. 2005. Modelling and classification of tubular joint rigidity and its effect on the global response of CHS lattice girders. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 21, No. 6. p. 677 - 698.

Zienkiewicz O. C. 1975 *The Finite Element Method in Engineering Science*. Mokomoji knyga. London: McGraw-Hill. 271 p.

Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. 2000-2002. *The finite element method*. Mokomoji knyga. 5-asis leidimas. Oxford: Butterworth-Heinemann. 725 p.

Zienkiewicz O. C., Zhu J. Z. 1987. A Simple Error Estimator and Adaptive Procedure for Practical Engineering Analysis. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 24. p. 337-357.

PRIEDAI

A priedas. Elementų analizės algoritmai pagal STR 2.05.08:2005

A.1. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento analizė

A.1 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento charakteristikos

Derinys	Plieno markė	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
1	S235	296,40	0

- 1. Nustatomas elemento plieno skaičiuotinis stipris pagal takumo ribą:

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{235}{1,1} = 210 \text{ MPa}$$

- 2. Nustatomas reikalingas skerspjūvio plotas atlaikyti veikiančiai įrąžai:

$$A_{net,d} \geq \frac{N_{Ed}}{f_{y,d} \cdot \gamma_c} = \frac{296,40}{215 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 14,51 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 14,51 \text{ cm}^2$$

- 3. Nustatomi elemento skaičiuojamieji ilgiai abiejų ašių atžvilgiu:

$$l_{y,eff} = 0,9 \cdot 2,83 = 2,55 \text{ m}$$

$$l_{z,eff} = 0,9 \cdot 2,8 = 2,55 \text{ m}$$

- 4. Parenkamas elemento profiliuotis iš apvalių vamzdžių sortimento:

$$CHS 88,9 \times 6, \text{ kurio: } A = 15,62 \text{ cm}^2, i_y = i_z = 2,94 \text{ cm}$$

- 5. Tikrinamas parinkto elemento profiliuoties tempiamasis atsparis:

$$N_{t,Rd} = A \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c = 15,62 \cdot 10^{-4} \cdot 210 \cdot 10^3 \cdot 0,95 = 311,62 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{296,40}{311,62} = 0,949$$

- 6. Tikrinami parinkto elemento liauniai:

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{y,eff}}{i_y} = \frac{255}{2,94} = 86,74 \leq \lambda_u = 400$$

- 7. Atliekama 5 ir 6 punktuose gautų rezultatų analizė:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} > 1,0 \\ \lambda_{y,z} > \lambda_u \end{array} \right\} - \text{didiname skerspjūvio plotą ir skaičiavimus tęsiame nuo 4 punkto,}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} < 1,0 \\ \lambda_{y,z} < \lambda_u \end{array} \right\} - \text{elemento pastovumas užtikrintas: skaičiavimas baigtas.}$$

A.2. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento analizė

A.2 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento charakteristikos

Derinys	Plieno markė	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
1	S275	-226.57	0

- 1. Nustatomas elemento plieno skaičiuotinis stipris pagal takumo ribą:

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{275}{1,1} = 250 \text{ MPa}$$

- 2. Nustatomas reikalingas skerspjūvio plotas atlaikyti veikiančiai įrąžai:

$$A_{net,d} \geq \frac{N_{Ed}}{f_{y,d} \cdot \gamma_c} = \frac{226,57}{250 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 9,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 9,54 \text{ cm}^2$$

- 3. Nustatomi elemento skaičiuojamieji ilgiai abiejų ašių atžvilgiu:

$$l_{y,eff} = 0,9 \cdot 2,83 = 2,55 \text{ m}$$

$$l_{z,eff} = 0,9 \cdot 2,8 = 2,55 \text{ m}$$

- 4. Parenkamas elemento liaunis ir skaičiuojamas jo inercijos spindulys:

$$i_{y,d} = i_{z,d} = \frac{l_{y,eff}}{\lambda} = \frac{255}{110} = 2,32 \text{ cm}$$

- 5. Parenkamas elemento profiliuotis iš apvalių vamzdžių sortimento:

$$CHS 88,9 \times 6, \text{ kurio: } A = 15,62 \text{ cm}^2, i_y = i_z = 2,94 \text{ cm}$$

- 6. Tikrinamas parinkto elemento profiliuoties gniuždomasis atsparis:

$$N_{c,Rd} = \varphi_z \cdot A_{net} \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c = 0,630 \cdot 15,62 \cdot 10^{-4} \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 0,95 = 233,71 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{226,57}{233,71} = 0,978$$

- 7. Tikrinami parinkto elemento liauniai:

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{y,eff}}{i_y} = \frac{255}{2,94} = 86,74 \leq \lambda_u = 180 - 60 \cdot 0,978 = 121,33$$

- 8. Atliekama 5 ir 6 punktuose gautų rezultatų analizė:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} > 1,0 \\ \lambda_{y,z} > \lambda_u \end{array} \right\} - \text{didiname skerspjūvio plotą ir skaičiavimus tęsiame nuo 5 punkto,}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} < 1,0 \\ \lambda_{y,z} < \lambda_u \end{array} \right\} - \text{elemento pastovumas užtikrintas – skaičiavimas baigtas.}$$

A.3. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento analizė

A.3 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento charakteristikos

Derinys	Plieno markė	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
1	S355	-572.74	5,20

- 1. Nustatomas elemento plieno skaičiuotinis stipris pagal takumo ribą:

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{355}{1,1} = 320 \text{ MPa}$$

- 2. Nustatomas elemento skaičiuojamasis ilgis apie y ašį:

$$l_{y,eff} = 2,00 \text{ m}$$

- 3. Pasirenkamas elemento liaunis ir skaičiuojamas jo inercijos spindulys:

$$i_{y,d} = i_{z,d} = \frac{l_{y,eff}}{\lambda} = \frac{200}{70} = 2,86 \text{ cm}$$

- 4. Nustatomas elemento lyginamasis liaunis:

$$\bar{\lambda} = \lambda \sqrt{\frac{f_{y,d}}{E}} = 70 \sqrt{\frac{320 \cdot 10^6}{210 \cdot 10^9}} = 2,73$$

- 5. Nustatomas elemento lyginamasis ekscentricitetas:

$$e_{rel,eff} = k_{shape} \frac{M_{y,Ed} \cdot z_c}{N_{Ed} \cdot i_z^2} = 1,0 \cdot \frac{5,20 \cdot 0,05}{572,74 \cdot (2,86 \cdot 10^{-2})^2} = 0,555$$

- 6. Nustatomas reikalingas skerspjūvio plotas atlaikyti veikiančiai įrąžai:

$$A_{net,d} \geq \frac{N_{Ed}}{\phi_e \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c} = \frac{572,74}{0,546 \cdot 320 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 34,51 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 34,51 \text{ cm}^2$$

- 7. Parenkamas elemento profiliuotis iš apvalių vamzdžių sortimento:

$$CHS 139,7 \times 6, \text{ kurio: } A = 25,19 \text{ cm}^2, i_y = i_z = 4,73 \text{ cm}$$

- 8. Nustatomas parinkto elemento ekscentricitetas:

$$e_{rel} = \frac{e \cdot A}{W_c} = \frac{(5,20/572,74) \cdot 25,19 \cdot 10^{-4}}{80,74 \cdot 10^{-6}} = 0,283$$

- 9. Nustatomas parinkto elemento sąlyginis liaunis:

$$\bar{\lambda} = \lambda_y \sqrt{\frac{f_{y,d}}{E}} = \frac{200}{4,73} \cdot \sqrt{\frac{320}{210 \cdot 10^3}} = 1,65$$

- 10. Nustatomas parinkto elemento sąlyginis lyginamasis ekscentricitetas:

$$k_{shape:1,0} = (1,35 - 0,05 \cdot e_{rel}) - 0,01 \cdot (5 - e_{rel}) \cdot \bar{\lambda}$$

$$k_{shape:1,0} = (1,35 - 0,05 \cdot 0,283) - 0,01 \cdot (5 - 0,283) \cdot 1,65 = 1,26$$

$$e_{rel,eff} = k_{shape} \cdot e_{rel} = 1,26 \cdot 0,283 = 0,356$$

- 11. Nustatomi elemento skaičiuojamieji ilgiai abiejų ašių atžvilgiu:

$$l_{y,eff} = 0,1 \cdot 20 = 2,00 \text{ m}$$

- 12. Tikrinamas parinkto elemento profiliuotio pastovumo atsparis lenkimo plokštumoje:

$$N_{NM,c,Rd} = \varphi_e \cdot A \cdot f_{y,d} \cdot \gamma_c = 0,748 \cdot 25,19 \cdot 10^{-4} \cdot 320 \cdot 10^3 \cdot 0,95 = 572,80 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{NM,c,Rd}} = \frac{572,74}{572,80} = 0,997$$

- 13. Tikrinamas parinkto elemento liaunis:

$$\lambda_y = \frac{l_{eff,y}}{i_y} = \frac{200}{4,73} = 42,28 \leq \lambda_u = 180 - 60 \cdot 0,997 = 120,18$$

- 14. Atliekama 12 ir 13 punktuose gautų rezultatų analizė:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{NM,c,Rd}} > 1,0 \\ \lambda_{y,z} > \lambda_u \end{array} \right\} - \text{didiname skerspjūvio plotą ir skaičiavimus tęsiame nuo 6 punkto,}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{NM,c,Rd}} < 1,0 \\ \lambda_{y,z} < \lambda_u \end{array} \right\} - \text{elemento pastovumas užtikrintas: skaičiavimas baigtas.}$$

B priedas. Elementų analizės, pagal STR 2.05.08:2005, charakteristikų suvestinė

B.1 lentelė. Elemento E1 analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN	$M_{Rd}^{(1)}$, kN·m	$M_{Rd}^{(2)}$, kN·m	A , cm ²	I , cm ⁴	W_{el} , cm ³	W_{pl} , cm ³	i , cm	f_y , MPa	$L_{eff,y}$, cm	$L_{eff,z}$, cm	λ_y			
1.	139,7x3,2	-572,74	-7,59	5,20	13,72	319,61	45,76	59,63	4,83	355	200	100*	41,43			
2.	x4				17,04	392,66	56,21	73,68	4,80				41,67			
3.	x6				25,19	563,97	80,74	107,33	4,73				42,27			
4.	x8				33,10	720,00	103,08	138,93	4,66				42,88			
5.	x10				40,70	862,00	123,41	168,55	4,60				43,46			
	STR 2.05.08:2005							LST EN 1993-1-1:2005								
	$\gamma_M = 1,0$; $\gamma_c = 0,95$; $c_y = 1,26$; $n = 1,5$							Skerspjūvių klasė: 1 ; $\gamma_{M0} = 1,0$; $\chi_{LT} = 1,0$; $c_{my} = 0,735$; $\lambda_u = 150,00$								
Eil. Nr.	$\bar{\lambda}_y$	e_{rel}	k_{shape}	$e_{rel,eff}$	φ_e	λ_u	$STPR_{RT}$	$STBL_{RT}$	$\bar{\lambda}_y$	χ_y	k_{yy}	$n_{6.2.9}$	$M_{pl,Rd}$	$M_{N,Rd}$	$STPR_{RT}$	$STBL_{RT}$
1.	1,62	0,236	1,261	0,298	0,773	120,00	2,036	1,773	0,542	0,911	0,987	1,176	21,17	-	1,663	1,646
2.	1,63	0,239	1,261	0,301	0,770	120,00	1,510	1,431	0,545	0,910	0,930	0,947	26,16	2,33	1,340	1,311
3.	1,65	0,283	1,258	0,356	0,748	128,14	0,889	0,997	0,553	0,907	0,855	0,640	38,10	20,24	0,910	0,877
4.	1,67	0,253	1,258	0,318	0,758	140,40	0,620	0,749	0,561	0,904	0,818	0,487	49,32	34,78	0,695	0,665
5.	1,70	0,260	1,257	0,326	0,753	147,69	0,474	0,613	0,569	0,901	0,795	0,396	59,84	47,43	0,567	0,541

Pastabos: remiantis STR 2.05.08:2005 lenkiamasis momentas $M_{Rd}^{(1)}$ naudojamas tikrinti elemento stiprumą (reglamento formulė 7.73), o lenkiamasis momentas $M_{Rd}^{(2)}$ naudojamas tikrinti elemento pastovumą (reglamento formulė 7.76); remiantis LST EN 1993-1-1:2005 lenkiamasis momentas $M_{Rd}^{(1)}$ naudojamas tikrinti elemento stiprumą (reglamento formulė 6.2) ir pastovumą (reglamento formulė 6.61).

B.2 lentelė. Elemento E2 analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN	A , cm ²	I , cm ⁴	I , cm	f_y , MPa	$\lambda_z < 400$	STR 2.05.08:2005		LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
								γ_M / γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}$, kN	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}$, kN	
1.	139,7x3,2	551,69	13,72	319,61	4,83	275	165,72	1,1 / 0,95	325,85	1,0	377,30	1,16
2.	x4		17,04	392,66	4,80				404,70		468,60	1,16
3.	x6		25,19	563,97	4,73				598,26		692,73	1,16
4.	x8		33,10	720,00	4,66				786,13		910,25	1,16
5.	x10		40,70	862,00	4,60				966,63		1119,25	1,16

B.3 lentelė. Elemento **E3** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm		L_{eff} , cm		$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$
1.	88,9x3	-226,57		8,09		74,73		3,04		275	283		255		1,23
2.	x4			10,70		96,30		3,00							1,23
3.	x5			13,20		116,00		2,96							1,23
4.	x6			15,62		134,87		2,94							1,23
5.	x6,3			16,34		140,16		2,93							1,23
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005						
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u	
1.	1,1	0,95	83,77	2,89	0,651	125,08	120,00	1	1,0	83,77	0,965	0,690	153,55	150,00	
2.			84,85	2,93	0,643	163,40	120,00	1		84,85	0,977	0,681	200,49		
3.			85,87	2,96	0,635	199,07	120,00	1		85,87	0,989	0,673	244,37		
4.			86,63	2,99	0,630	233,71	121,94	1		86,63	0,998	0,667	286,54		
5.			86,92	3,00	0,628	243,71	124,32	1		86,92	1,001	0,665	298,73		

B.4 lentelė. Elemento **E4** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm	L_{eff} , cm	$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$		
1.	76,1x2,5	-99,89		5,78		39,17		2,60		235	283	255	1,24		
2.	x2,9			6,67		44,70		2,59					1,24		
3.	x3,6			8,20		53,98		2,57					1,24		
4.	x4			9,06		59,10		2,55					1,24		
5.	x6			13,21		81,72		2,49					1,24		
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005						
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u	
1.	1,1	0,95	97,77	3,09	0,604	69,65	120,00	1	1,0	97,77	1,04	0,637	86,47	150,00	
2.			98,33	3,11	0,601	79,97	120,00	1		98,33	1,05	0,633	99,17		
3.			99,19	3,14	0,595	97,34	120,00	1		99,19	1,06	0,626	120,62		
4.			99,67	3,15	0,592	107,00	124,12	1		99,69	1,06	0,623	132,59		
5.			102,34	3,24	0,575	151,54	140,53	1		102,34	1,09	0,603	187,17		

B.5 lentelė. Elemento **E5** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed}, kN	A, cm^2	f_y, MPa	STR 2.05.08:2005			LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
					γ_M	γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}, kN$	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}, kN$	
1.	88,9x3	296,40	8,09	235	1,1	0,95	161,40	1,0	190,12	1,18
2.	x4		10,70				213,47		251,45	1,18
3.	x5		13,20				263,34		310,20	1,18
4.	x6		15,62				311,62		367,07	1,18
5.	x6.3		16,34				325,98		383,99	1,18

B.6 lentelė. Elemento **E6** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed}, kN	A, cm^2	f_y, MPa	STR 2.05.08:2005			LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
					γ_M	γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}, kN$	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}, kN$	
1.	60,3x2,5	159,13	4,54	235	1,1	0,95	90,57	1,0	106,69	1,18
2.	x3,6		6,41				127,88		150,64	1,18
3.	x5		8,69				173,37		204,22	1,18
4.	76,1x6		13,21				263,54		310,44	1,18
5.	x6,3		13,81				275,51		324,54	1,18

B.7 lentelė. Elemento **E7** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed}, kN	A, cm^2	f_y, MPa	STR 2.05.08:2005			LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
					γ_M	γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}, kN$	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}, kN$	
1.	21,3x3,2	58,50	1,82	235	1,1	0,95	36,31	1,0	42,77	1,18
2.	48,3x2,5		3,60				71,82		84,60	1,18
3.	x3,2		4,53				90,37		106,46	1,18
4.	60,3x2,5		4,54				90,57		106,69	1,18
5.	x5		8,69				173,37		204,22	1,18

B.8 lentelė. Elemento **E8** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm	L_{eff} , cm	$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$		
1.	60,3x2,5	-48,31		4,54		18,98		2,05		235	200	200	1,24		
2.	x3,2			5,74		23,50		2,02					1,24		
3.	x3,6			6,41		25,86		2,01					1,24		
4.	x4			7,07		28,20		2,00					1,24		
5.	x5			8,69		33,50		1,96					1,24		
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005						
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u	
1.	1,1	0,95	97,78	3,09	0,604	54,71	127,15	1	1,0	97,78	1,04	0,637	67,90	150,00	
2.			98,85	3,13	0,597	68,36	137,74	1		98,85	1,05	0,629	84,83		
3.			99,57	3,15	0,593	75,83	141,85	1		99,57	1,06	0,623	93,91		
4.			100,14	3,17	0,589	83,08	145,19	1		100,14	1,07	0,619	102,88		
5.			101,86	3,22	0,578	100,21	150,00	1		101,86	1,09	0,607	123,87		

B.9 lentelė. Elemento **E9** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm	L_{eff} , cm	$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$	
1.	48,3x2,5	-41,88		3,60		9,46		1,62		235	200	200	1,21	
2.	x3,2			4,53		11,60		1,60					1,21	
3.	x3,6			5,05		12,70		1,59					1,21	
4.	x4			5,57		13,80		1,57					1,21	
5.	x5			6,80		16,20		1,54					1,21	
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005					
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u
1.	1,1	0,95	123,33	3,90	0,451	32,39	120,00	1	1,0	123,33	1,31	0,463	39,12	150,00
2.			124,98	3,95	0,442	39,95	120,00	1		124,98	1,33	0,453	48,27	
3.			126,14	3,99	0,436	43,93	120,00	1		126,14	1,34	0,447	53,05	
4.			127,06	4,02	0,431	47,89	127,62	1		127,06	1,35	0,442	57,81	
5.			129,58	4,10	0,418	56,71	135,75	1		129,58	1,38	0,428	68,38	

C priedas. Elementų analizės algoritmai pagal LST EN 1993-1-1:2005

C.1. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento analizė

C.1 lentelė. Ašinės tempimo jėgos veikiamo elemento charakteristikos

<i>Derinys</i>	<i>Plieno markė</i>	<i>Ašinė jėga (kN)</i>	<i>Lenkiamasis momentas (kN·m)</i>
1	S235	295,59	0

- 1. Nustatomas reikalingas skerspjūvio plotas atlaikyti veikiančiai įrašai:

$$A_{net,d} \geq \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_{y,d}} = \frac{295,59 \cdot 1,0}{235 \cdot 10^3} = 12,59 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 12,58 \text{ cm}^2$$

- 2. Nustatomi elemento skaičiuojamieji ilgiai abiejų ašių atžvilgiu:

$$l_{y,eff} = 0,9 \cdot 2,83 = 2,55 \text{ m}$$

$$l_{z,eff} = 0,9 \cdot 2,8 = 2,55 \text{ m}$$

- 3. Parenkamas elemento profiliuotis iš apvalių vamzdžių sortimento:

$$CHS 76, 1 \times 6, \text{ kurio: } A = 13,21 \text{ cm}^2, i_y = i_z = 2,49 \text{ cm}$$

- 4. Tikrinamas parinkto elemento profiliuoties tempiamasis atsparis:

$$N_{t,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 13,21 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{235 \cdot 10^3}{1,0} = 310,44 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{295,59}{310,44} = 0,952$$

- 5. Tikrinami parinkto elemento liauniai:

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{y,eff}}{i_y} = \frac{255}{2,49} = 102,41 \leq \lambda_u = 400$$

- 6. Atliekama 5 ir 6 punktuose gautų rezultatų analizė:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} > 1,0 \\ \lambda_{y,z} > \lambda_u \end{array} \right\} - \text{didiname skerspjūvio plotą ir skaičiavimus tęsiame nuo 3 punkto,}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} < 1,0 \\ \lambda_{y,z} < \lambda_u \end{array} \right\} - \text{elemento pastovumas užtikrintas: skaičiavimas baigtas.}$$

C.2. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento analizė

C.2 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos veikiamo elemento charakteristikos

<i>Derinys</i>	<i>Plieno markė</i>	<i>Ašinė jėga (kN)</i>	<i>Lenkiamasis momentas (kN·m)</i>
1	S275	-226.57	0

- 1. Nustatomas reikalingas skerspjūvio plotas atlaikyti veikiančiai įrąžai:

$$A_{net,d} \geq \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_y} = \frac{226,57}{275 \cdot 10^3} = 8,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 8,24 \text{ cm}^2$$

- 2. Nustatomi elemento skaičiuojamieji ilgiai abiejų ašių atžvilgiu:

$$l_{y,eff} = 0,9 \cdot 2,83 = 2,55 \text{ m}$$

$$l_{z,eff} = 0,9 \cdot 2,8 = 2,55 \text{ m}$$

- 3. Parenkamas elemento liaunis ir skaičiuojamas jo inercijos spindulys:

$$i_{y,d} = i_{z,d} = \frac{l_{y,eff}}{\lambda} = \frac{255}{110} = 2,32 \text{ cm}$$

- 4. Parenkamas elemento profiliuotis iš apvalių vamzdžių sortimento:

$$CHS 88,9 \times 5, \text{ kurio: } A = 13,20 \text{ cm}^2, i_y = i_z = 2,96 \text{ cm}$$

- 5. Nustatoma parinkto elemento profiliuotio skerspjūvio klasė:

$$\frac{d}{t} = \frac{88,9}{5} = 17,78 < 42,5 - \text{I skerspjūvio klasė.}$$

- 6. Nustatoma parinkto elemento tamprioji kritinė jėga:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 116 \cdot 10^{-8}}{2,55^2} = 369,74 \text{ kN}$$

- 7. Nustatomas parinkto elemento lyginamasis liaunis:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{13,20 \cdot 10^{-4} \cdot 275 \cdot 10^3}{369,74}} = 0,990$$

- 8. Nustatomas parinkto elemento bendrasis pradinis nesuvaržytas perkrypis:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,990 - 0,2) + 0,990^2] = 1,07$$

- 9. Nustatomas parinkto elemento klupumo koeficientas:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = \frac{1}{1,07 + \sqrt{1,07^2 - 0,990^2}} = 0,673$$

- 10. Tikrinamas parinkto elemento profiliuotio gniuždomasis atsparis:

$$N_{c,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,673 \cdot 13,20 \cdot 10^{-4} \cdot 275 \cdot 10^3}{1,00} = 244,30 \text{ kN}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{225,96}{244,30} = 0,925$$

- 11. Tikrinami parinkto elemento liauniai:

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{l_{y,eff}}{i_y} = \frac{255}{2,94} = 86,74 \leq \lambda_u = 180 - 60 \cdot 1,0 = 120$$

- 12. Atliekama 5 ir 6 punktuose gautų rezultatų analizė:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} > 1,0 \\ \lambda_{y,z} > \lambda_u \end{array} \right\} - \text{didiname skerspjūvio plotą ir skaičiavimus tęsiame nuo 4 punkto,}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} < 1,0 \\ \lambda_{y,z} < \lambda_u \end{array} \right\} - \text{elemento pastovumas užtikrintas – skaičiavimas baigtas.}$$

C.3. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento analizė

C.3 lentelė. Ašinės gniuždymo jėgos ir lenkiamojo momento veikiamo elemento charakteristikos

Derinys	Plieno markė	Ašinė jėga (kN)	Lenkiamasis momentas (kN·m)
1	S355	-571,50	7,23

- 1. Parenkamas elemento profiliuotis iš apvalių vamzdžių sortimento:

$$CHS\ 139,7 \times 6, \text{ kurio: } A = 25,19 \text{ cm}^2, i_y = i_z = 4,73 \text{ cm}$$

- 2. Nustatoma parinkto profiliuoties skerspjūvio klasė:

$$\frac{d}{t} = \frac{139,7}{6} = 23,28 < 42,5 - \text{I skerspjūvio klasė.}$$

- 3. Nustatomas elemento skaičiuojamasis ilgis apie y ašį:

$$l_{y,eff} = 2,00 \text{ m}$$

- 4. Nustatoma parinkto elemento tamprioji kritinė jėga:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 563,97 \cdot 10^{-8}}{2,00^2} = 2922,23 \text{ kN}$$

- 5. Nustatomas parinkto elemento lyginamasis liaunis:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{25,19 \cdot 10^{-4} \cdot 355 \cdot 10^3}{2922,23}} = 0,553$$

- 6. Nustatomas parinkto elemento bendrasis pradinis nesuvaržytas perkrypis:

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,21 \cdot (0,553 - 0,2) + 0,553^2] = 0,690$$

- 7. Nustatoma parinkto elemento klupumo koeficientas:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,690 + \sqrt{0,690^2 - 0,553^2}} = 0,907$$

- 8. Nustatomi parinkto elemento sąveikos koeficientai pagal reglamento B priedą:

$$C_{my} = 0,735$$

$$k_{yy} = 0,918$$

- 9. Nustatomas parinkto elemento skersinio sukamojo klupumo koeficientas:

$$\chi_{LT} = 1,00$$

- 10. Tikrinamas parinkto elemento profiliuoties atsparis:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{f_y}{\gamma_{M1}} A} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{f_y}{\gamma_{M1}} W_{pl,y}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\frac{f_y}{\gamma_{M1}} W_{pl,z}} \leq 1,0$$

$$\frac{571,50}{0,907 \cdot \frac{355 \cdot 10^3}{1,0} \cdot 25,19 \cdot 10^{-4}} + 0,918 \frac{7,23}{1,00 \cdot \frac{355 \cdot 10^3}{1,0} \cdot 107,33 \cdot 10^{-6}} + 0 = 0,879 \leq 1,0$$

- 11. Tikrinamas parinkto elemento liaunis:

$$\lambda_y = \frac{l_{eff,y}}{i_y} = \frac{200}{4,73} = 42,28 \leq \lambda_u = 180 - 60 \cdot 1,0 = 120$$

- 12. Atliekama 10 ir 11 punktuose gautų rezultatų analizė:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} > 1,0 \\ \lambda_{y,z} > \lambda_u \end{array} \right\} - \text{didiname skerspjūvio plotą ir skaičiavimus tęsiame nuo 6 punkto,}$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} < 1,0 \\ \lambda_{y,z} < \lambda_u \end{array} \right\} - \text{elemento pastovumas užtikrintas: skaičiavimas baigtas.}$$

D priedas. Elementų analizės, pagal LST EN 1993-1-1:2005, charakteristikų suvestinė

D.1 lentelė. Elemento **E1** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN	$M_{Rd}^{(1)}$, kN·m	$M_{Rd}^{(2)}$, kN·m	A , cm ²	I , cm ⁴	W_{el} , cm ³	W_{pl} , cm ³	i , cm	f_y , MPa	$L_{eff,y}$, cm	$L_{eff,z}$, cm	λ_y			
1.	139,7x4	-571,50	-7,23	5,41	17,04	392,66	56,21	73,68	4,80	355	200	100*	41,67			
2.	x5				21,20	481,00	68,86	90,76	4,76				42,01			
3.	x6				25,19	563,97	80,74	107,33	4,73				42,27			
4.	x8				33,10	720,00	103,08	138,93	4,66				42,88			
5.	x10				40,70	862,00	123,41	168,55	4,60				43,46			
	STR 2.05.08:2005							LST EN 1993-1-1:2005								
	$\gamma_M = 1,0$; $\gamma_c = 0,95$; $c_y = 1,26$; $n = 1,5$							Skerspjuvių klasė: 1 ; $\gamma_{M0} = 1,0$; $\chi_{LT} = 1,0$; $c_{my} = 0,735$; $\lambda_u = 150,00$								
Eil. Nr.	$\bar{\lambda}_y$	e_{rel}	k_{shape}	$e_{rel,eff}$	φ_e	λ_u	$STPR_{RT}$	$STBL_{RT}$	$\bar{\lambda}_y$	χ_y	k_{yy}	$n_{6.2.9}$	$M_{pl,Rd}$	$M_{N,Rd}$	$STPR_{RT}$	$STBL_{RT}$
1.	1,63	0,251	1,260	0,317	0,765	120,00	1,489	1,439	0,545	0,910	1,000	0,945	26,16	2,42	1,221	1,314
2.	1,64	0,255	1,259	0,321	0,762	120,00	1,105	1,162	0,550	0,908	0,950	0,759	32,22	12,04	0,984	1,049
3.	1,65	0,295	1,258	0,371	0,743	128,25	0,875	1,003	0,553	0,907	0,918	0,639	38,10	20,30	0,829	0,879
4.	1,67	0,266	1,257	0,335	0,752	140,48	0,609	0,753	0,561	0,904	0,878	0,486	49,32	34,84	0,633	0,667
5.	1,70	0,273	1,256	0,343	0,747	147,76	0,465	0,617	0,569	0,901	0,855	0,396	59,84	47,47	0,516	0,542

Pastabos: remiantis STR 2.05.08:2005 lenkiamasis momentas $M_{Rd}^{(1)}$ naudojamas tikrinti elemento stiprumą (reglamento formulė 7.73) , o lenkiamasis momentas $M_{Rd}^{(2)}$ naudojamas tikrinti elemento pastovumą (reglamento formulė 7.76) ; remiantis LST EN 1993-1-1:2005 lenkiamasis momentas $M_{Rd}^{(1)}$ naudojamas tikrinti elemento stiprumą (reglamento formulė 6.2) ir pastovumą (reglamento formulė 6.61).

D.2 lentelė. Elemento **E2** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN	A , cm ²	I , cm ⁴	I , cm	f_y , MPa	$\lambda_z < 400$	STR 2.05.08:2005		LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
								γ_M / γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}$, kN	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}$, kN	
1.	114,3x3	550,32	10,48	162,47	3,94	275	101,52	1,1 / 0,95	248,90	1,0	288,32	1,16
2.	x4		13,85	210,96	3,90				328,94		380,98	1,16
3.	x5		17,20	257,00	3,87				408,50		473,00	1,16
4.	x6		20,40	300,06	3,83				484,50		561,10	1,16
5.	x6,3		21,40	313,00	3,82				508,25		588,50	1,16

D.3 lentelė. Elemento **E3** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm	L_{eff} , cm	$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$	
1.	88,9x2,5	-225,96		6,78		63,34		3,06		275	283	255	1,23	
2.	x4			10,70		96,30		3,00					1,23	
3.	x5			13,20		116,00		2,96					1,23	
4.	x6			15,62		134,87		2,94					1,23	
5.	x6,3			16,34		140,16		2,93					1,23	
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005					
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u
1.	1,1	0,95	83,30	2,87	0,654	105,31	120,00	1	1,0	83,30	0,959	0,694	129,40	150,00
2.			84,85	2,93	0,643	163,40	120,00	1		84,85	0,977	0,681	200,49	150,00
3.			85,87	2,96	0,635	199,07	120,00	1		85,87	0,989	0,673	244,37	150,00
4.			86,63	2,99	0,630	233,71	122,09	1		86,63	0,998	0,667	286,54	150,00
5.			86,92	3,00	0,628	243,71	124,47	1		86,92	1,001	0,665	298,73	150,00

D.4 lentelė. Elemento **E4** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm	L_{eff} , cm	$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$		
1.	76,1x2,5	-99,54		5,78		39,17		2,60		235	283	255	1,24		
2.	x3			6,89		44,70		2,59					1,24		
3.	x3,6			8,20		53,98		2,59					1,24		
4.	x4			9,06		59,10		2,55					1,24		
5.	x6			13,21		81,72		2,49					1,24		
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005						
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u	
1.	1,1	0,95	97,70	3,09	0,604	69,65	120,00	1	1,0	97,77	1,04	0,637	86,47	150,00	
2.			98,41	3,11	0,600	82,47	120,00	1		98,41	1,05	0,632	102,28	150,00	
3.			99,19	3,14	0,595	97,34	120,00	1		99,19	1,06	0,626	120,62	150,00	
4.			99,67	3,15	0,592	107,00	124,12	1		99,67	1,06	0,623	132,59	150,00	
5.			102,34	3,24	0,575	151,54	140,53	1		102,34	1,09	0,603	187,17	150,00	

D.5 lentelė. Elemento **E5** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN	A , cm ²	f_y , MPa	STR 2.05.08:2005			LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
					γ_M	γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}$, kN	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}$, kN	
1.	76,1x2,5	295,59	5,78	235	1,1	0,95	115,31	1,0	135,77	1,18
2.	x2,9		6,67				133,07		156,74	1,18
3.	x3,6		8,20				163,59		192,59	1,18
4.	x4		9,06				180,75		212,91	1,18
5.	x6		13,21				263,54		310,36	1,18

D.6 lentelė. Elemento **E6** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN	A , cm ²	f_y , MPa	STR 2.05.08:2005			LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
					γ_M	γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}$, kN	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}$, kN	
1.	60,3x2,5	158,66	4,54	235	1,1	0,95	90,57	1,0	106,69	1,18
2.	x3,2		5,74				114,51		134,89	1,18
3.	x3,6		6,41				127,88		150,64	1,18
4.	x4		7,07				141,05		166,15	1,18
5.	x5		8,69				173,37		204,22	1,18

D.7 lentelė. Elemento **E7** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN	A , cm ²	f_y , MPa	STR 2.05.08:2005			LST EN 1993-1-1:2005		$N_{t,Rd}^{(2)} / N_{t,Rd}^{(1)}$
					γ_M	γ_c	$N_{t,Rd}^{(1)}$, kN	γ_{M0}	$N_{t,Rd}^{(2)}$, kN	
1.	33,7x2,6	58,72	2,54	235	1,1	0,95	50,67	1,0	59,69	1,18
2.	48,3x2,5		3,60				71,82		84,60	1,18
3.	60,3x2,5		4,54				90,57		106,69	1,18
4.	x4		7,07				141,05		166,15	1,18
5.	x5		8,69				173,37		204,22	1,18

D.8 lentelė. Elemento **E8** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm	L_{eff} , cm	$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$		
1.	48,3x2,5	-48,35		3,60		9,46		1,62		235	200	200	1,21		
2.	x3,2			4,53		11,60		1,60					1,21		
3.	x3,6			5,05		12,70		1,59					1,21		
4.	x4			5,57		13,80		1,57					1,21		
5.	x5			6,80		16,20		1,54					1,21		
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005						
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u	
1.	1,1	0,95	123,33	3,90	0,451	32,39	120,00	1	1,0	123,33	1,31	0,463	39,12	150,00	
2.			124,98	3,95	0,442	39,95	120,00	1		124,98	1,33	0,453	48,27	150,00	
3.			126,14	3,99	0,436	43,93	120,00	1		126,14	1,34	0,447	53,05	150,00	
4.			127,06	4,02	0,431	47,89	120,00	1		127,06	1,35	0,442	57,81	150,00	
5.			129,58	4,10	0,418	56,71	128,91	1		129,58	1,38	0,428	68,38	150,00	

D.9 lentelė. Elemento **E9** analizės charakteristikų suvestinė

Eil. Nr.	Profiliuotis	N_{Ed} , kN		A , cm ²		I , cm ⁴		i , cm		f_y , MPa	L , cm	L_{eff} , cm	$N_{c,Rd}^{(2)}/N_{c,Rd}^{(1)}$		
1.	48,3x2,5	-41,72		3,60		9,46		1,62		235	200	200	1,21		
2.	x3			4,27		10,99		1,61					1,21		
3.	x3,6			5,05		12,70		1,59					1,21		
4.	x4			5,57		13,80		1,57					1,21		
5.	x5			6,80		16,20		1,54					1,21		
	STR 2.05.08:2005								LST EN 1993-1-1:2005						
Eil. Nr.	γ_M	γ_c	λ	$\bar{\lambda}$	φ	$N_{c,Rd}^{(1)}$, kN	λ_u	Klasė	γ_{M0}	λ	$\bar{\lambda}$	χ	$N_{c,Rd}^{(2)}$, kN	λ_u	
1.	1,1	0,95	123,33	3,90	0,451	32,39	120,00	1	1,0	123,33	1,31	0,463	39,12	150,00	
2.			124,60	3,94	0,444	37,82	120,00	1		124,60	1,33	0,456	45,69	150,00	
3.			126,14	3,99	0,436	43,93	123,13	1		126,14	1,34	0,447	53,05	150,00	
4.			127,06	4,02	0,431	47,89	127,83	1		127,06	1,35	0,442	57,81	150,00	
5.			129,58	4,10	0,418	56,71	135,92	1		129,58	1,38	0,428	68,38	150,00	

E priedas. Mazgų analizės, pagal STR 2.05.08:2005, charakteristikų suvestinė

E.1 lentelė. Mazgo M1 analizės suvestinė

Derinys	$N_{1,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_1, cm^2	d_0, mm	d_1, mm	t_0, mm	θ_1, deg	γ_c	γ_{z1}	γ_r	
1	-210,04	-48,78	355	1,1	25,18	8,69	139,7	60,3	6,0	90,0	1,0	1,0	1,0	$T_{qsa} \rightarrow$
2	-145,42	-21,64												
3	-160,18	-48,80												
4	-178,90	-48,94												
5	-126,70	-21,49												
	γ_{cd}	ζ_1	χ	g_{ij}	$\varepsilon_{1,2}$	γ_{d1}	γ_0	μ_1	$N_{0,Rd}, kN$	β_1	ψ_1	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.39
$T_{qsa} \rightarrow$	1,0	0,6	0,015	0	1,0	1,0	0,984	1,0	219,50	0,432	0,453	0,508	0,245	0,237
												0,221	0,109	0,105
												0,500	0,245	0,237
												0,504	0,246	0,237
												0,219	0,108	0,104

E.2 lentelė. Mazgo M3 analizės suvestinė

Derinys	$N_{1,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_1, cm^2	d_0, mm	d_1, mm	t_0, mm	θ_1, deg	γ_c	γ_{z1}	γ_r	
1	-482,75	-42,01	355	1,1	25,18	6,80	139,7	48,3	6,0	90,0	1,0	1,0	1,0	$T_{qsa} \rightarrow$
2	-369,92	-29,99												
3	-332,67	-30,65												
4	-389,40	-42,11												
5	-313,19	-18,53												
	γ_{cd}	ζ_1	χ	g_{ij}	$\varepsilon_{1,2}$	γ_{d1}	γ_0	μ_1	$N_{0,Rd}, kN$	β_1	ψ_1	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.39
$T_{qsa} \rightarrow$	1,0	0,6	0,015	0	1,0	1,0	0,821	1,0	219,50	0,346	0,363	0,643	0,264	0,260
												0,421	0,188	0,186
												0,420	0,192	0,190
												0,598	0,264	0,261
												0,252	0,116	0,115

E.3 lentelė. Mazgo M2 analizės suvestinė

Derinys	$N_{1,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_1, cm^2	d_0, mm	d_1, mm	t_0, mm	θ_1, deg	γ_c	γ_{z1}	γ_r	
1	-225,84	-482,75	355	1,1	25,18	6,80	139,7	88,9	6,0	45,8	1,0	1,0	1,0	$T_{qsa} \rightarrow$
2	-173,00	-369,92												
3	-155,45	-332,67												
4	-181,63	-389,40												
5	-146,81	-313,19												
	γ_{cd}	γ_{d1}	γ_0	μ_1	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_1	ψ_1	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.39
$T_{qsa} \rightarrow$	1,0	1,0	0,821	1,0	219,50	36	0,879	0,133	0,015	0,636	0,668	0,031	0,552	0,610
												0,003	0,423	0,467
												0,037	0,380	0,420
												0,034	0,444	0,490
												0,008	0,359	0,396
Derinys	$N_{2,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_2, cm^2	d_0, mm	d_2, mm	t_0, mm	θ_2, deg	γ_c	γ_{z2}	γ_r	
1	159,77	-482,75	355	1,1	25,18	8,69	139,7	60,3	6,0	45,2	1,0	1,0	1,0	$T_{qsa} \rightarrow$
2	144,42	-369,92												
3	88,42	-332,67												
4	115,99	-389,40												
5	116,85	-313,19												
	γ_{cd}	γ_{d2}	γ_0	μ_2	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_2	ψ_2	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.39
$T_{qsa} \rightarrow$	1,0	0,8	0,821	0,8	219,50	36	0,879	0,133	0,015	0,432	0,453	0,031	0,570	0,969
												0,003	0,515	0,876
												0,037	0,315	0,536
												0,034	0,414	0,703
												0,008	0,414	0,703

E.4 lentelē. Mazgo M4 analizēs suvestinē

<i>Derinys</i>	$N_{1,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_1, cm^2	d_0, mm	d_1, mm	t_0, mm	θ_1, deg	γ_c	γ_{z1}	γ_r	
1	-98,43	-574,29	355	1,1	25,18	11,2	139,7	76,1	6,0	45,4	1,0	1,0	1,0	$T_{qsa} \rightarrow$
2	-99,81	-462,09												
3	-43,08	-373,64												
4	-54,52	-417,86												
5	-88,37	-417,86												
	γ_{cd}	γ_{d1}	γ_0	μ_1	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_1	ψ_1	Salyga 2.37	Salyga 2.38	Salyga 2.39
$T_{qsa} \rightarrow$	1,0	1,0	0,746	1,0	219,50	44	0,912	0,100	0,015	0,545	0,572	0,052	0,279	0,371
												0,048	0,283	0,376
												0,018	0,122	0,162
												0,049	0,155	0,205
												0,019	0,251	0,333
<i>Derinys</i>	$N_{2,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_2, cm^2	d_0, mm	d_2, mm	t_0, mm	θ_2, deg	γ_c	γ_{z2}	γ_r	
1	31,00	-574,29	355	1,1	25,18	8,69	139,7	60,3	6,0	45,2	1,0	1,0	1,0	$T_{qsa} \rightarrow$
2	30,51	-462,09												
3	14,84	-373,64												
4	-14,29	-417,86												
5	59,63	-417,86												
	γ_{cd}	γ_{d2}	γ_0	μ_2	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_2	ψ_2	Salyga 2.37	Salyga 2.38	Salyga 2.39
$T_{qsa} \rightarrow$	1,0	0,8	0,746	0,8	219,50	44	0,912	0,100	0,015	0,432	0,453	0,052	0,111	0,188
												0,048	0,109	0,185
												0,018	0,053	0,090
												0,049	0,051	0,069
												0,019	0,213	0,362

E.5 lentelē. Mazgo M5 analizēs suvestinē

<i>Derinys</i>	$N_{1,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_1, cm^2	d_0, mm	d_1, mm	t_0, mm	θ_1, deg	γ_c	γ_{z1}	γ_r		
1	296,88	369,84	275	1,1	25,18	8,69	139,7	88,9	6,0	44,8	1,0	1,0	1,0	$T_qsa \rightarrow$	
2	205,50	267,87													
3	226,36	270,21													
4	252,84	307,45													
5	179,02	230,63													
	γ_{cd}	γ_{d1}	γ_0	μ_1	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_1	ψ_1	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.39	
$T_qsa \rightarrow$	1,0	0,8	1,0	0,8	171,48	0	0,600	0,408	0,008	0,636	0,668	0,094	0,913	1,127	
												0,077	0,632	0,780	
												0,059	0,696	0,860	
												0,072	0,777	0,960	
												0,064	0,550	0,680	
<i>Derinys</i>	$N_{2,Ed}, kN$	$N_{3,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_2, cm^2	d_0, mm	d_2, mm	t_0, mm	θ_2, deg	γ_c	γ_{z2}	γ_r	
1	-226,16	-48,96	369,84	275	1,1	25,18	8,69	139,7	88,9	6,0	44,8	1,0	1,0	1,0	$T_qsa \rightarrow$
2	-173,32	-21,82	267,87												
3	-155,77	-48,98	270,21												
4	-181,96	-49,12	307,45												
5	-147,14	-21,68	230,63												
	γ_{cd}	γ_{d2}	γ_0	μ_2	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_2	ψ_2	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.39	
$T_qsa \rightarrow$	1,0	1,0	1,0	1,0	171,48	0	0,600	0,408	0,008	0,636	0,668	0,094	0,846	0,836	
												0,077	0,600	0,593	
												0,059	0,630	0,622	
												0,072	0,711	0,702	
												0,064	0,519	0,513	

E.6 lentelē. Mazgo M6 analizēs suvestinē

<i>Derinys</i>	$N_{1,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_1, cm^2	d_0, mm	d_1, mm	t_0, mm	θ_1, deg	γ_c	γ_{z1}	γ_r		
1	159,59	552,43	275	1,1	25,18	8,69	139,7	60,3	6,0	45,2	1,0	1,0	1,0	$T_qsa \rightarrow$	
2	144,24	440,58													
3	88,24	363,21													
4	115,80	428,03													
5	116,67	375,76													
	γ_{cd}	γ_{d1}	γ_0	μ_1	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_1	ψ_1	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.38	
$T_qsa \rightarrow$	1,0	0,8	1,0	0,8	171,48	21	0,792	0,219	0,008	0,432	0,545	0,031	0,723	1,089	
												0,025	0,658	0,985	
												0,024	0,403	0,602	
												0,032	0,529	0,790	
												0,017	0,533	0,796	
<i>Derinys</i>	$N_{2,Ed}, kN$	$N_{3,Ed}, kN$	$N_{0,Ed}, kN$	f_y, MPa	γ_M	A_0, cm^2	A_2, cm^2	d_0, mm	d_2, mm	t_0, mm	θ_2, deg	γ_c	γ_{z2}	γ_r	
1	-98,66	-42,15	552,43	275	1,1	25,18	11,2	139,7	76,1	6,0	45,4	1,0	1,0	1,0	$T_qsa \rightarrow$
2	-100,04	-30,13	440,58												
3	-43,32	-30,79	363,21												
4	-54,75	-42,25	428,03												
5	-88,60	-18,67	375,76												
	γ_{cd}	γ_{d2}	γ_0	μ_2	$N_{0,Rd}, kN$	g_{ij}	ζ_1	$\varepsilon_{1.2}$	χ	β_2	ψ_2	Sąlyga 2.37	Sąlyga 2.38	Sąlyga 2.39	
$T_qsa \rightarrow$	1,0	1,0	1,0	1,0	171,48	21	0,792	0,219	0,008	0,453	0,572	0,031	0,506	0,597	
												0,025	0,471	0,551	
												0,024	0,268	0,314	
												0,032	0,351	0,411	
												0,017	0,388	0,454	

F priedas. Mazgų analizės, pagal LST EN 1993-1-8:2005, charakteristikų suvestinė

F.1 lentelė. Mazgo M1 analizės suvestinė

Derinys	N_{Ed} , kN	$N_{1,Rd}^{(2.41)}$, kN	$N_{1,Rd}^{(2.40)}$, kN	f_{y0} , MPa	γ_{M5}	n_p	k_p	θ_1 , deg	d_0 , mm	d_1 , mm	t_0	γ	β
1	-49,22	103,83	232,96	355	1,0	0,235	0,913	90,0	139,7	60,3	6,0	11,64	0,432
2	-21,99	107,28				0,163	0,943						
3	-26,41	106,52				0,178	0,937						
4	-49,30	105,54				0,200	0,928						
5	-21,78	108,21				0,140	0,952						

F.2 lentelė. Mazgo M2 analizės suvestinė

Derinys	$N_{1,Ed}$, kN	$N_{1,Rd}^{(2.42)}$, kN	$N_{1,Rd}^{(2.40)}$, kN	f_{y0} , MPa	γ_{M5}	n_p	k_p	θ_1 , deg	d_0 , mm	d_1 , mm	t_0 , mm	γ	g , mm	k_g
1	-225,12	252,28	586,32	355	1,0	0,235	0,913	44,8	139,7	88,9	6,0	11,64	35	1,844
2	-172,34	260,65				0,163	0,943							
3	-154,85	258,82				0,178	0,937							
4	-180,99	256,42				0,200	0,928							
5	-146,20	262,91				0,140	0,952							
Derinys	$N_{2,Ed}$, kN	$N_{2,Rd}^{(2.42)}$, kN	$N_{2,Rd}^{(2.40)}$, kN	f_{y0} , MPa	γ_{M5}	n_p	k_p	θ_2 , deg	d_0 , mm	d_2 , mm	t_0 , mm	γ	g , mm	k_g
1	160,43	252,28	397,69	355	1,0	0,235	0,913	44,9	139,7	60,3	6,0	11,64	35	1,844
2	144,82	260,65				0,163	0,943							
3	88,78	258,82				0,178	0,937							
4	116,50	256,42				0,200	0,928							
5	117,10	262,91				0,140	0,952							

F.3 lentelė. Mazgo M3 analizės suvestinė

<i>Derinys</i>	N_{Ed}, kN	$N_{1,Rd}^{(2.41)}, kN$	$N_{1,Rd}^{(2.40)}, kN$	f_{y0}, MPa	γ_{M5}	n_p	k_p	θ_1, deg	d_0, mm	d_1, mm	t_0	γ	β
1	-43,17	85,38	232,96	355	1,0	0,539	0,751	90,0	139,7	60,3	6,0	11,64	0,432
2	-30,90	93,80				0,413	0,825						
3	-31,44	96,33				0,372	0,847						
4	-43,08	92,42				0,435	0,813						
5	-19,25	97,62				0,349	0,859						

F.4 lentelė. Mazgo M4 analizės suvestinė

<i>Derinys</i>	$N_{1,Ed}, kN$	$N_{1,Rd}^{(2.42)}, kN$	$N_{1,Rd}^{(2.40)}, kN$	f_{y0}, MPa	γ_{M5}	n_p	k_p	θ_1, deg	d_0, mm	d_1, mm	t_0, mm	γ	g, mm	k_g
1	-97,50	184,07	501,90	3555	1,0	0,539	0,751	44,9	139,7	76,1	6,0	11,64	44	1,844
2	-99,09	202,21				0,413	0,825							
3	-42,39	207,68				0,372	0,847							
4	-53,70	199,24				0,435	0,813							
5	-87,78	210,45				0,349	0,859							
<i>Derinys</i>	$N_{2,Ed}, kN$	$N_{2,Rd}^{(2.42)}, kN$	$N_{2,Rd}^{(2.40)}, kN$	f_{y0}, MPa	γ_{M5}	n_p	k_p	θ_2, deg	d_0, mm	d_2, mm	t_0, mm	γ	g, mm	k_g
1	31,77	184,07	397,69	355	1,0	0,539	0,751	45,0	139,7	60,3	6,0	11,64	44	1,844
2	31,17	202,21				0,413	0,825							
3	15,24	207,68				0,372	0,847							
4	-13,76	199,24				0,435	0,813							
5	60,16	210,45				0,349	0,859							

F.5 lentelē. Mazgo M5 analizēs suvestinē

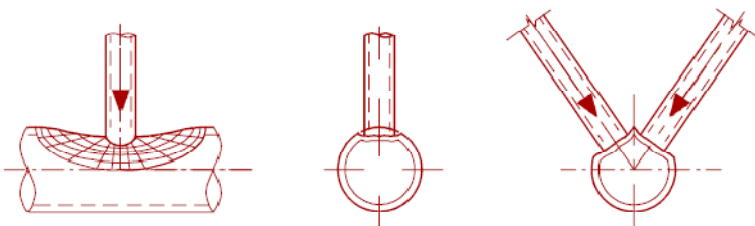
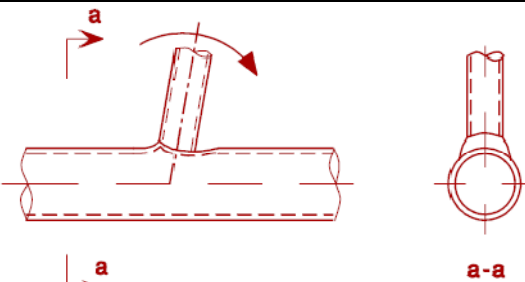
<i>Derinys</i>	<i>N_{1,Ed}, kN</i>	<i>N_{2,Ed}, kN</i>	<i>N_{3,Ed}, kN</i>	<i>f_{y0}, MPa</i>	<i>γ_{M5}</i>	<i>θ₁, deg</i>	<i>θ₂, deg</i>	<i>θ₃, deg</i>	<i>d₀, mm</i>	<i>d₁, mm</i>	<i>d₂, mm</i>	<i>d₃, mm</i>	<i>β</i>	
1	296,34	-225,39	-49,40	275	1,0	44,8	44,8	90,0	114,3	76,1	88,9	60,3	0,657	<i>T_{qsa} →</i>
2	204,96	-172,61	-22,17											
3	225,79	-155,12	-49,27											
4	252,28	-181,26	-49,48											
5	178,47	-146,47	-21,96											
	<i>k_p</i>	<i>t₀, mm</i>	<i>γ</i>	<i>g, mm</i>	<i>k_g</i>	<i>N_{2,Ed} · sin (θ₂)</i>		<i>N_{3,Ed} · sin (θ₃)</i>		<i>N_{2,Rd}^(F1), kN</i>				
<i>T_{qsa} →</i>	1,0	6,0	9,53	-70	2,015	-159,38		-49,40		239,90				
						-122,05		-22,17						
						-109,69		-49,27						
						-128,17		-49,48						
						-103,57		-21,96						

F.6 lentelē. Mazgo M6 analizēs suvestinē

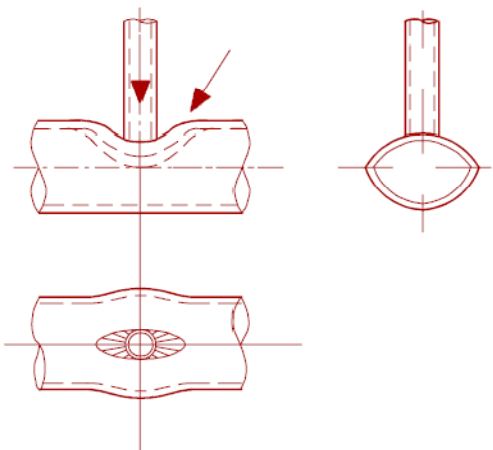
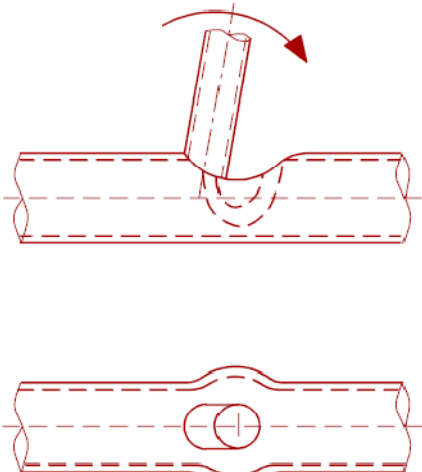
<i>Derinys</i>	<i>N_{1,Ed}, kN</i>	<i>N_{2,Ed}, kN</i>	<i>N_{3,Ed}, kN</i>	<i>f_{y0}, MPa</i>	<i>γ_{M5}</i>	<i>θ₁, deg</i>	<i>θ₂, deg</i>	<i>θ₃, deg</i>	<i>d₀, mm</i>	<i>d₁, mm</i>	<i>d₂, mm</i>	<i>d₃, mm</i>	<i>β</i>	
1	160,25	-97,73	-43,35	275	1,0	44,9	44,9	90,0	114,3	60,3	76,1	60,3	0,574	<i>T_{qsa}</i> →
2	144,64	-99,32	-31,08											
3	88,60	-42,62	-31,62											
4	116,32	-53,93	-43,26											
5	116,92	-88,02	-19,43											
	<i>k_p</i>	<i>t₀, mm</i>	<i>γ</i>	<i>g, mm</i>	<i>k_g</i>	<i>N_{2,Ed} · sin (θ₂)</i>		<i>N_{3,Ed} · sin (θ₃)</i>		<i>N_{2,Rd}^(F1), kN</i>				
<i>T_{qsa}</i> →	1,0	6,0	9,53	0	2,015	-69,11		-43,35		215,90				
						-70,23		-31,08						
						-30,14		-31,62						
						-42,38		-43,26						
						-62,24		-19,43						

G priedas. Mazgų iš apskritų vamzdžių irties pobūdžiai

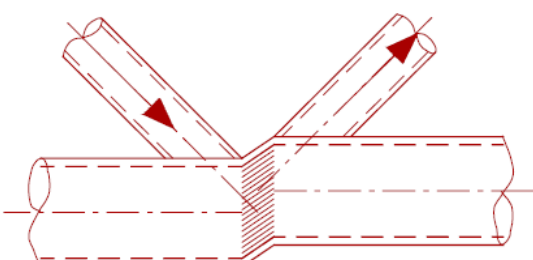
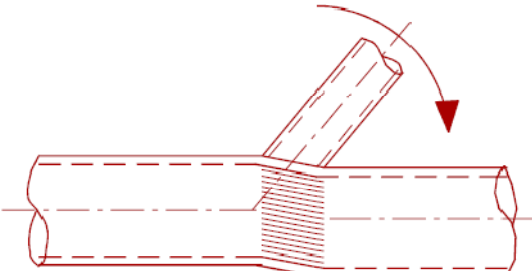
G.1 lentelė. Mazgo įrties pobūdis A: juostos plastinė irtis

<i>Ašinė apkrova</i>	
	
<i>Lenkiamasis momentas</i>	
	

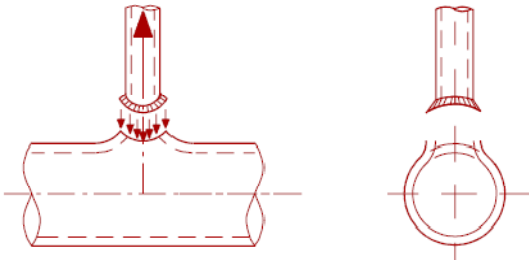
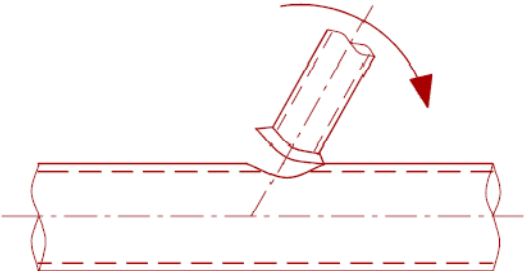
G.2 lentelė. Mazgo įrties pobūdis B: juostos sienelės išklupimas

<i>Ašinė apkrova</i>	<i>Lenkiamasis momentas</i>
	

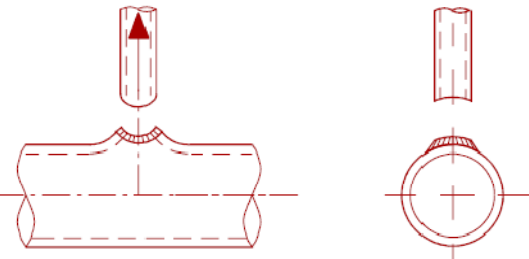
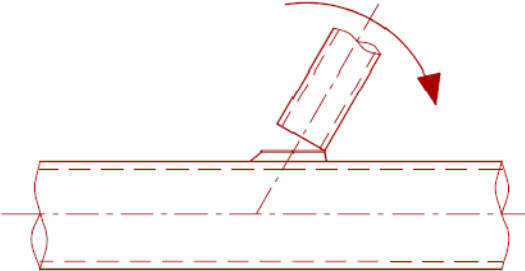
G.3 lentelė. Mazgo įrties pobūdis C: juostos šlyjamoji irtis

<i>Ašinė apkrova</i>	<i>Lenkiamasis momentas</i>
	

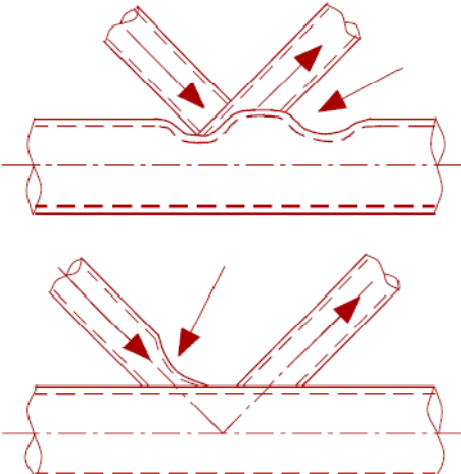
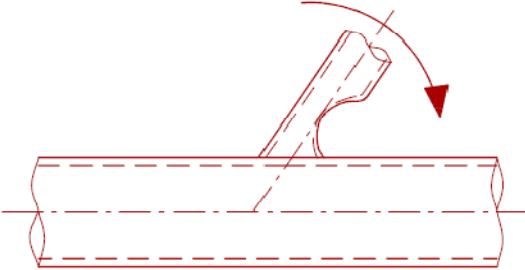
G.4 lentelė. Mazgo įrties pobūdis D: *juostos išplėšimas*

<i>Ašinė apkrova</i>	<i>Lenkiamasis momentas</i>
 Two diagrams showing failure mode D under axial load. The left diagram shows a cross-section of a pipe with a vertical rod passing through it, with red arrows indicating tensile force. The right diagram shows a top-down view of the pipe with a red circle indicating the failure zone around the rod.	 A diagram showing failure mode D under bending moment. A horizontal pipe is shown with a vertical rod passing through it. A red arrow indicates a bending moment applied to the pipe, and a red circle indicates the failure zone around the rod.

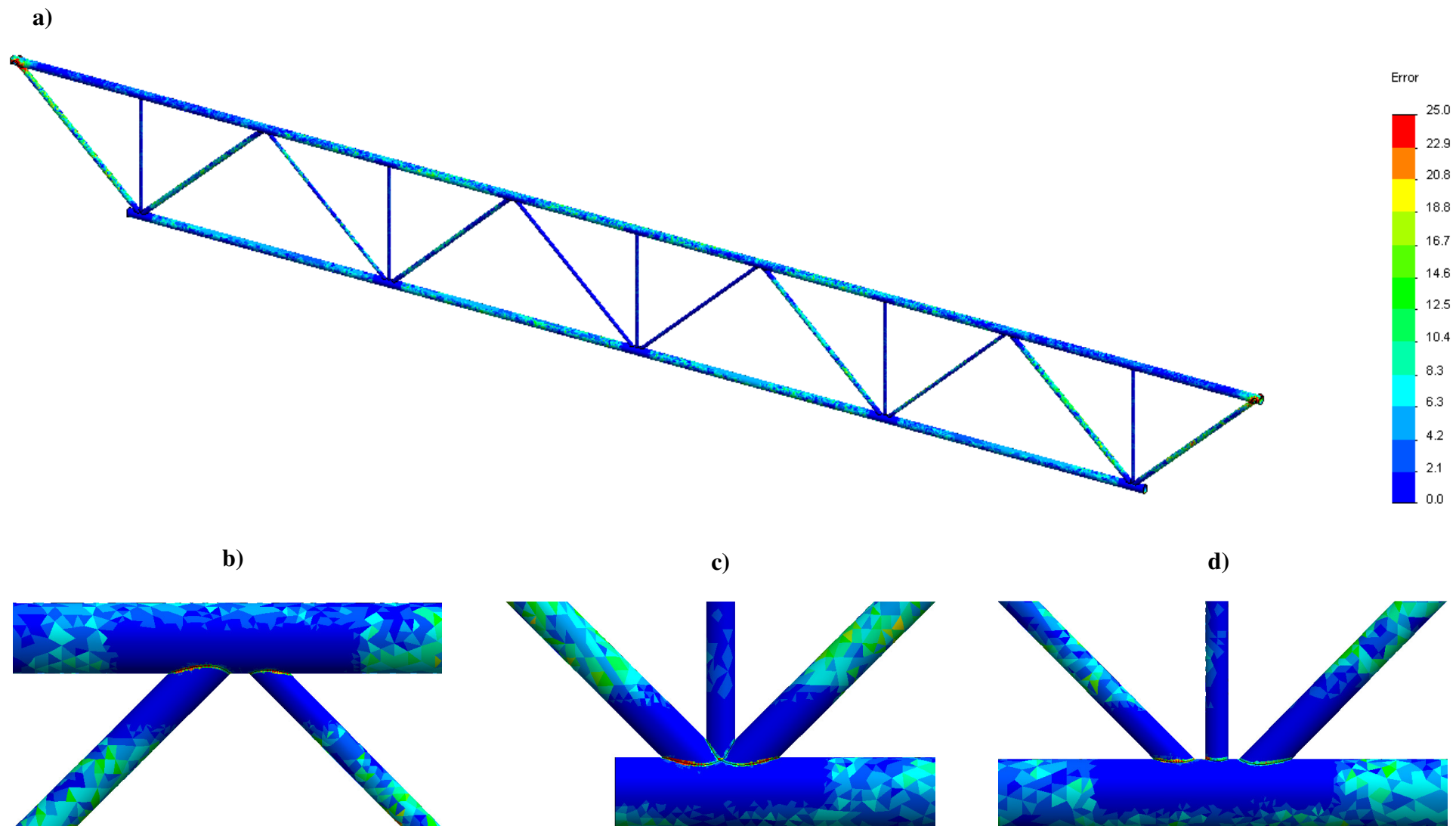
G.5 lentelė. Mazgo įrties pobūdis E: *tinklelio elemento irtis*

<i>Ašinė apkrova</i>	<i>Lenkiamasis momentas</i>
 Two diagrams showing failure mode E under axial load. The left diagram shows a cross-section of a pipe with a vertical rod passing through it, with red arrows indicating tensile force. The right diagram shows a top-down view of the pipe with a red circle indicating the failure zone around the rod.	 A diagram showing failure mode E under bending moment. A horizontal pipe is shown with a vertical rod passing through it. A red arrow indicates a bending moment applied to the pipe, and a red circle indicates the failure zone around the rod.

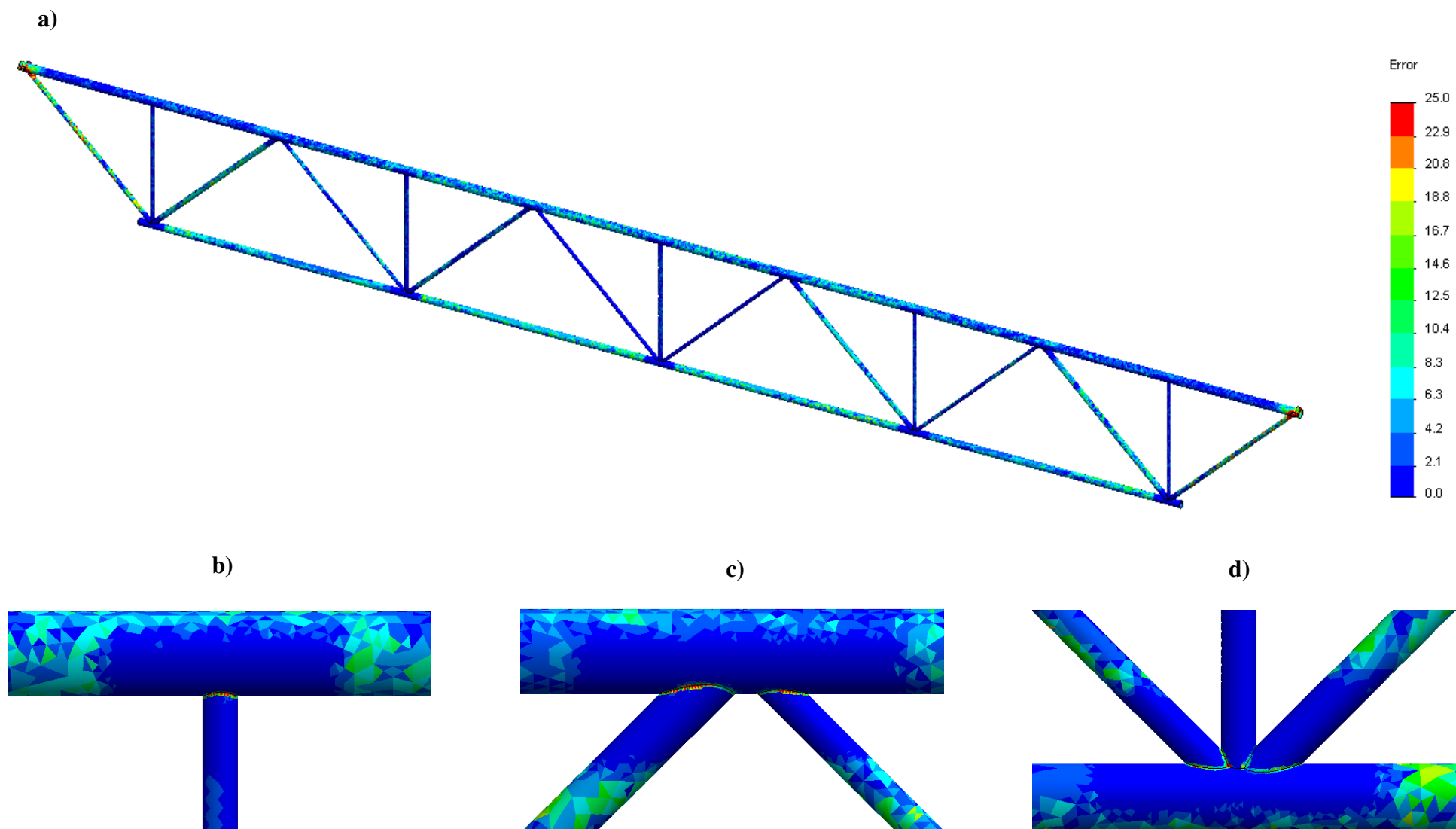
G.6 lentelė. Mazgo įrties pobūdis F: *juostos lokalinis išklupimas*

<i>Ašinė apkrova</i>	<i>Lenkiamasis momentas</i>
 Two diagrams showing failure mode F under axial load. The top diagram shows a cross-section of a pipe with a vertical rod passing through it, with red arrows indicating tensile force. The bottom diagram shows a top-down view of the pipe with a red circle indicating the failure zone around the rod.	 A diagram showing failure mode F under bending moment. A horizontal pipe is shown with a vertical rod passing through it. A red arrow indicates a bending moment applied to the pipe, and a red circle indicates the failure zone around the rod.

H priedas. Koeficiento ERR (*Energy Norm Error*) pasiskirstymas santvaroje



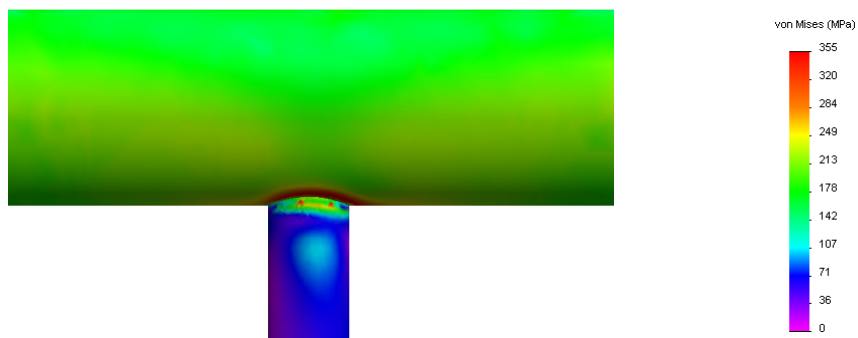
H.1 pav. ERR (*Energy Norm Error*) koeficiento pasiskirstymas santvaroje (a), suprojektuotoje remiantis STR 2.05.08:2005, ir jos mazguose: M2 (b), M5 (c) ir M6 (d)



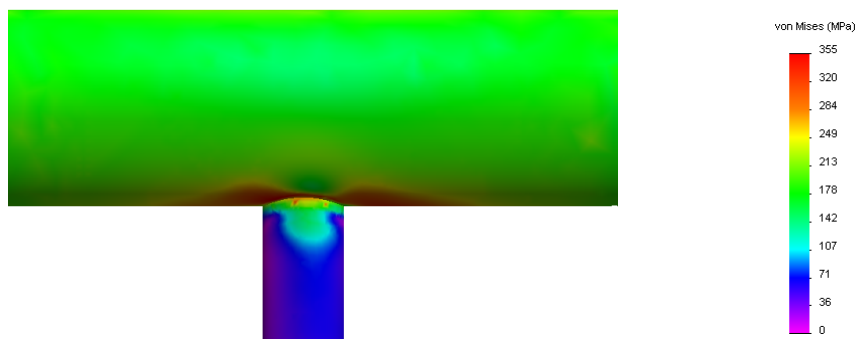
H.2 pav. ERR (*Energy Norm Error*) koeficiento pasiskirstymas santvaroje (a), suprojektuotoje remiantis LST EN 1993:2005, ir jos mazguose: M1 (b), M2 (c) ir M6 (d)

I priedas. Von Mizeso įtempių pasiskirstymas santvaros, kuri buvo suprojektuota remiantis STR 2.05.08:2005, mazguose.

▪ Mazgas M2

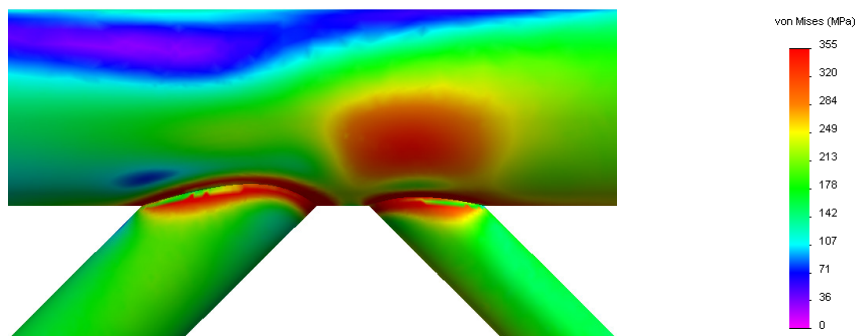


I.1 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M2

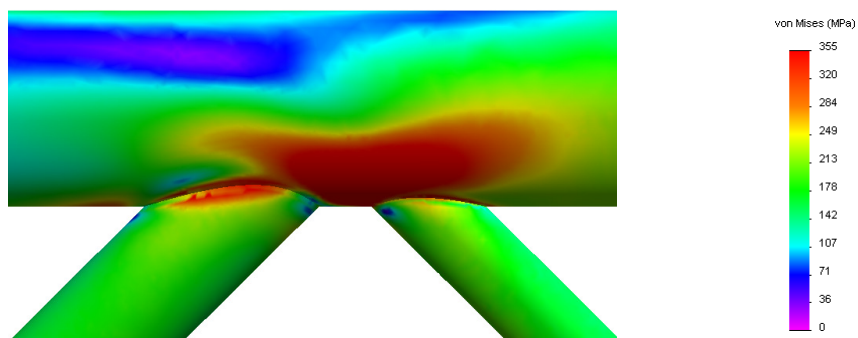


I.2 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M2

▪ Mazgas M3

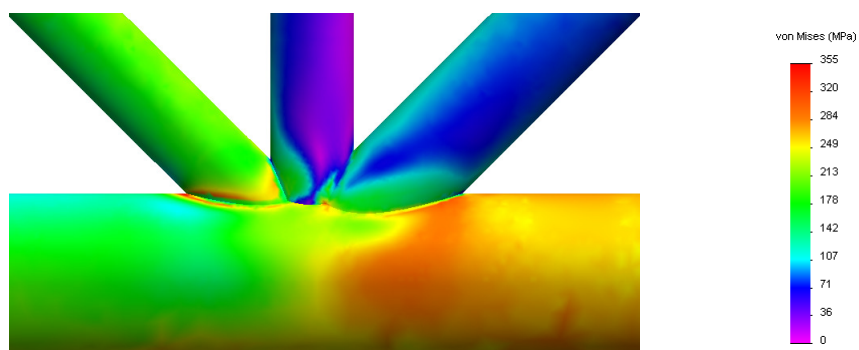


I.3 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M3

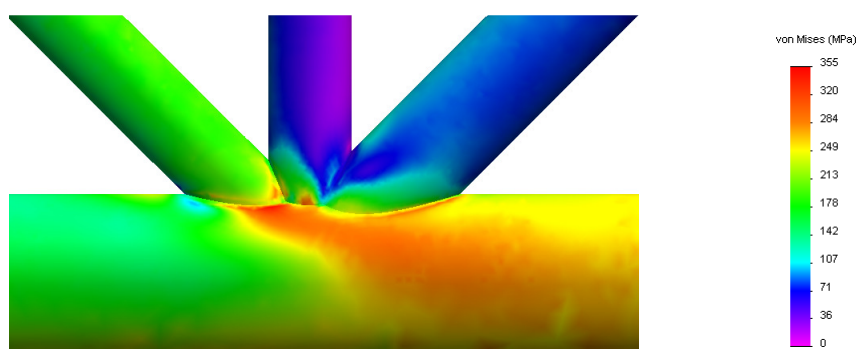


I.4 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M3

▪ Mazgas M5

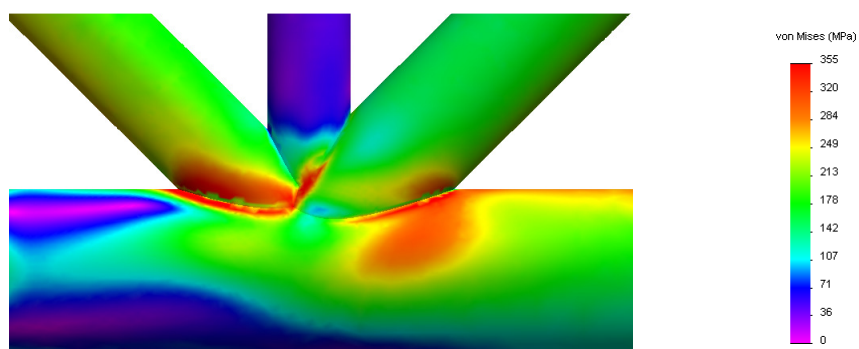


I.5 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M5

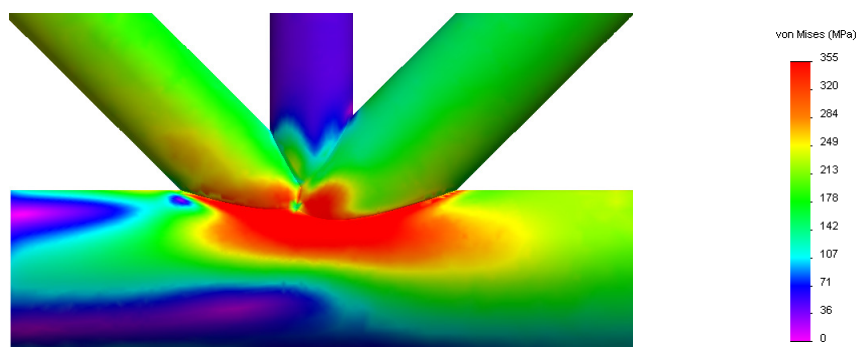


I.6 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M5

▪ Mazgas M6



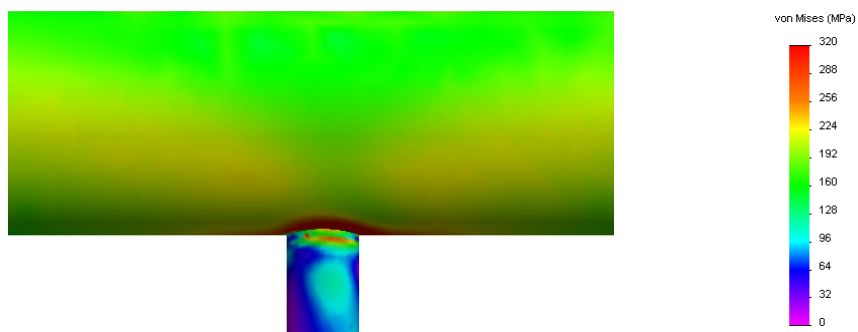
I.7 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M6



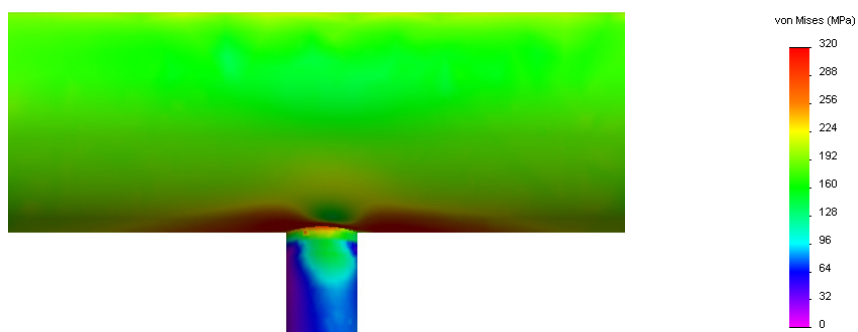
X.1 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M6

J priedas. *Von Mizeso* įtempių pasiskirstymas santvaros, kuri buvo suprojektuota remiantis LST EN 1993:2005, mazguose.

▪ Mazgas M2

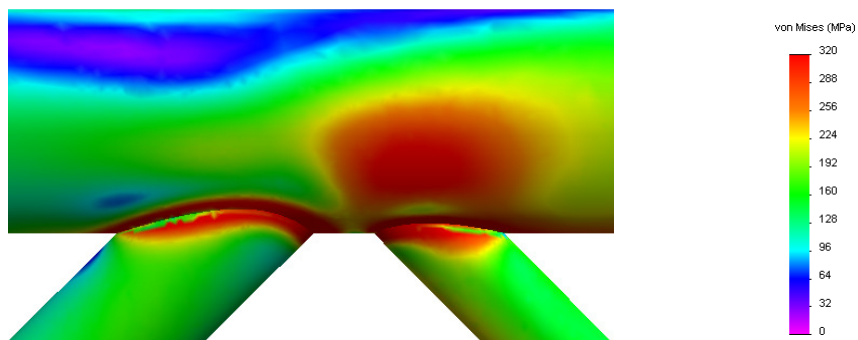


J.1 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M2

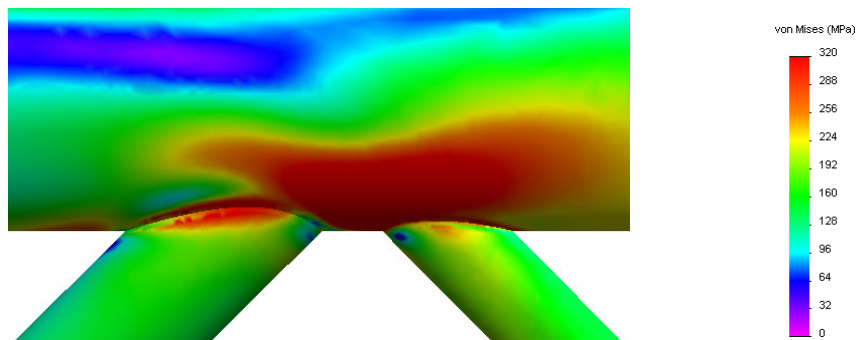


J.2 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M2

▪ Mazgas M3

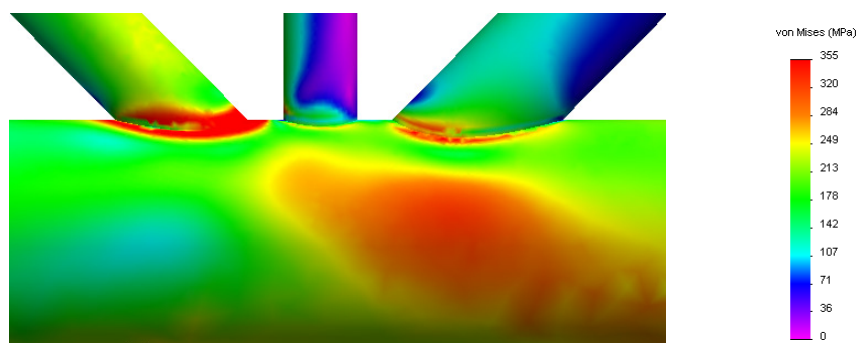


J.3 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M3

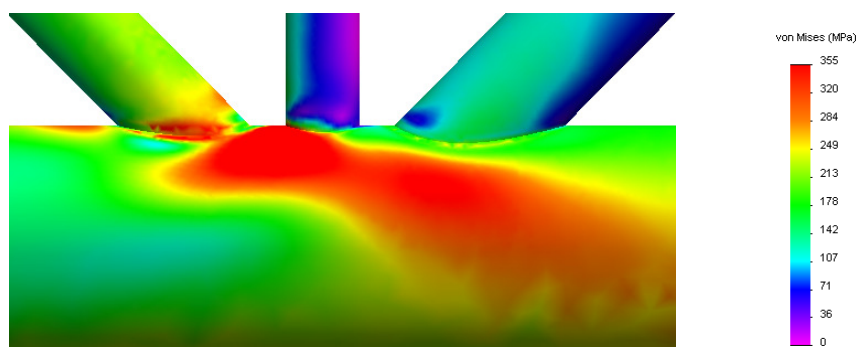


J.4 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M3

▪ Mazgas M5

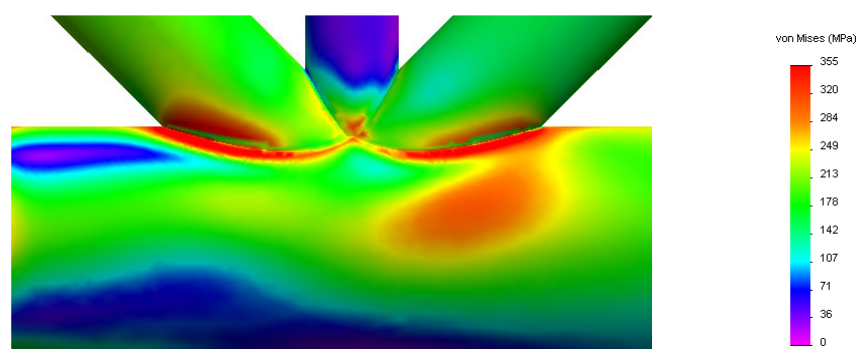


J.5 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M5

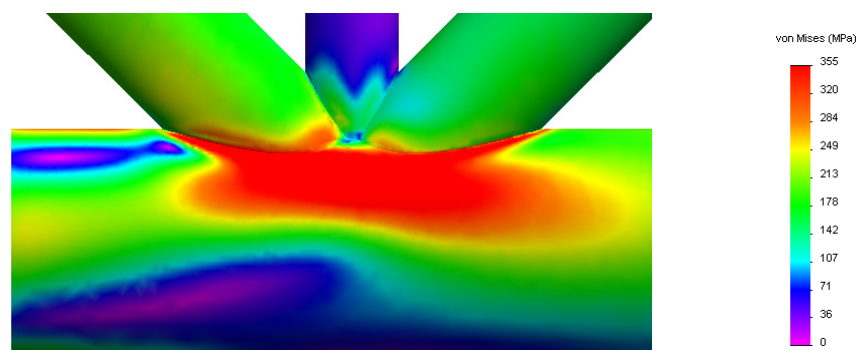


J.6 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M5

▪ Mazgas M6



J.7 pav. Suminių *Von Mizeso* (VP) įtempių pasiskirstymas mazge M6



J.8 pav. Suminių *Von Mizeso* (AP) įtempių pasiskirstymas mazge M6

K priedas. Mazgų skaičiuoklės programinio paketo „MathCAD“ aplinkoje

K.1. Skaičiuoklė, skirta analizuoti „T“ tipo mazgą pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus

Duomenų įvedimo blokas

Santvaros juostos metalo stipris:

$$f_{yd} := 320$$

Santvaros juostos geometrinės charakteristikos:

$$A_0 := 40.3 \cdot 10^{-4} \quad d_0 := 168.3 \cdot 10^{-3} \quad t_0 := 8 \cdot 10^{-3}$$

Santvaros tinklelio elemento geometrinės charakteristikos:

$$A_1 := 8.69 \cdot 10^{-4} \quad d_1 := 60.3 \cdot 10^{-3}$$

Veikiančios įrašos:

$$N_{0.Ed} := -713.851 \quad N_{1.Ed} := -58.211 \quad M_{1.Ed} := 0$$

Nekintančių parametrų blokas

Darbo sąlygų koeficientas:

$$\gamma_c := 1.0$$

Kampas tarp santvaros juostos ir tinklelio elementų:

$$\alpha_1 := 90 - \frac{\pi}{180}$$

Necilindrinės formos nagrinėjamo elemento sąlyčio ruožo ilgio įtakos koeficientas:

$$\gamma_{z1} := 1$$

Koeficientas, įvertinantis jungties sustiprinimą skersinėmis sąstandomis:

$$\gamma_r := 1$$

Darbo sąlygų koeficientas:

$$\gamma_{cd} := 1$$

Koeficientai:

$$\zeta_1 := 0.6 \quad \chi := 0.01$$

Mažiausias atstumas tarp nagrinėjamo ir gretutinio prijungiamų prie juostos....:

$$g_{ij} := 0$$

Kitų tinklelio elementų (i-tūjų) išdėstymo jungtyje atžvilgiu nagrinėjamo tinklelio:

$$\varepsilon_{1,2} := 1$$

Skaičiavimų blokas

Įrašos nagrinėjamame prijungiamajame elemente ženklo koeficientas:

$$\gamma_{d1} := \begin{cases} 0.8 & \text{if } N_{1.Ed} > 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 1$$

Gniuždomosios įrašos juostoje įtakos koeficientas:

$$\gamma_0 := \begin{cases} 1 - 0.5 \left(\frac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{yd} \cdot 10^3} \right)^2 & \text{if } N_{0.Ed} < 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 0.847$$

Apvaliųjų profiliuotųjų sąlyčio ruožo ilgis:

$$l_{z1} := \frac{d_1}{\sin(\alpha_1)} = 60.3 \times 10^{-3}$$

Koeficientas:

$$\mu_1 := \frac{\gamma_{d1}}{\gamma_{z1}} + \frac{1}{N_{1.Ed}} \left(\frac{1.7 \cdot M_{1.Ed}}{l_{z1} \cdot \sin(\alpha_1)} + \frac{2.5 \cdot M_{1.Ed}}{d_1} \right) = 1$$

Santvaros juostos atsparis:

$$N_{0.Rd} := 13 \cdot \left(1 + 0.02 \frac{d_0}{t_0} \right) \cdot t_0^2 \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c \cdot 10^3 = 378.26$$

Koeficientas:

$$\beta_1 := \frac{d_1}{d_0} = 0.358$$

$$\psi_1 := \begin{cases} 1.05 \beta_1 & \text{if } \beta_1 \leq 0.7 \\ 1.05 \beta_1 \cdot (1 + 0.15 \beta_1) & \text{if } \beta_1 > 0.7 \end{cases} = 0.376$$

Mazgo atspario tikrinimo, pagal atitinkamas formules, blokas

Sąlyga (2.37)

$$\left| \varepsilon_{1.2} \mu_1 \cdot N_{1.Ed} \cdot \frac{\sin(\alpha_1)}{\psi_1} \right| = 154.733$$

$$\frac{\left| \varepsilon_{1.2} \mu_1 \cdot N_{1.Ed} \cdot \frac{\sin(\alpha_1)}{\psi_1} \right|}{(\gamma_0 \gamma_r \cdot N_{0.Rd})} = 0.483$$

Sąlyga (2.38)

$$\left| N_{1.Ed} \right| \cdot \frac{\sin(\alpha_1)}{\psi_1} = 154.733$$

$$\frac{\left(\left| N_{1.Ed} \right| \cdot \frac{\sin(\alpha_1)}{\psi_1} \right)}{(2 \cdot N_{0.Rd})} = 0.205$$

Sąlyga (2.39)

$$\frac{\left| N_{1.Ed} \right| \cdot \left(1 + \chi \cdot \frac{d_0}{t_0} \right)}{A_1 \cdot \gamma_{d1} \cdot \gamma_{cd} \cdot f_{yd} \cdot 10^3} = 0.275$$

K.2. Skaičiuoklė, skirta analizuoti „K“ tipo mazgą pagal STR 2.05.08:2005 nurodymus

Duomenų įvedimo blokas

Santvaros juostos metalo stipris:

$$f_{yd} := 320$$

Santvaros juostos geometrinės charakteristikos:

$$A_0 := 30.6 \cdot 10^{-4} \quad d_0 := 168.3 \cdot 10^{-3} \quad t_0 := 6 \cdot 10^{-3}$$

Santvaros tinkelio elemento geometrinės charakteristikos:

$$A_1 := 30.6 \cdot 10^{-4} \quad d_1 := 168.3 \cdot 10^{-3}$$

$$A_2 := 21.2 \cdot 10^{-4} \quad d_2 := 139.7 \cdot 10^{-3}$$

Tarpelis:

$$c_{ij} := 25 \cdot 10^{-3}$$

Kampas tarp santvaros juostos ir tinkelio elementų:

$$\alpha_1 := 44 \cdot \frac{\pi}{180} \quad \alpha_2 := 46 \cdot \frac{\pi}{180}$$

Veikiančios įrašos:

$$N_{0.Ed} := -632 \quad N_{1.Ed} := -521 \quad N_{2.Ed} := 416$$

$$M_{1.Ed} := 0 \quad M_{2.Ed} := 0$$

Nekintančių parametrų blokas

Darbo sąlygų koeficientas:

$$\gamma_c := 1.0$$

Necilindrinės formos nagrinėjamo elemento sąlyčio ruožo ilgio įtakos koeficientas:

$$\gamma_{z1} := 1 \quad \gamma_{z2} := 1$$

Koeficientas, įvertinantis jungties sustiprinimą skersinėmis sąstandomis:

$$\gamma_r := 1$$

Darbo sąlygų koeficientas:

$$\gamma_{cd} := 1$$

Skaičiavimų blokas

Įrašos nagrinėjamame prijungiamajame elemente ženklų koeficientas:

$$\gamma_{d1} := \begin{cases} 0.8 & \text{if } N_{1.Ed} > 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 1 \quad \gamma_{d2} := \begin{cases} 0.8 & \text{if } N_{2.Ed} > 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 0.8$$

Gniuždomosios įrašos juostoje įtakos koeficientas:

$$\gamma_{00} := \begin{cases} 1 - 0.5 \left(\frac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{yd} \cdot 10^3} \right)^2 & \text{if } N_{0.Ed} < 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} = 0.792$$

Apvaliųjų profiliuotųjų sąlyčio ruožo ilgis:

$$l_{z1} := \frac{d_1}{\sin(\alpha_1)} = 242 \times 10^{-3} \quad l_{z2} := \frac{d_2}{\sin(\alpha_2)} = 194 \times 10^{-3}$$

Koeficientas:

$$\mu_1 := \frac{\gamma_{d1}}{\gamma_{z1}} + \frac{1}{N_{1.Ed}} \left(\frac{1.7 \cdot M_{1.Ed}}{l_{z1} \cdot \sin(\alpha_1)} + \frac{2.5 \cdot M_{1.Ed}}{d_1} \right) = 1$$
$$\mu_2 := \frac{\gamma_{d2}}{\gamma_{z2}} + \frac{1}{N_{2.Ed}} \left(\frac{1.7 \cdot M_{2.Ed}}{l_{z2} \cdot \sin(\alpha_2)} + \frac{2.5 \cdot M_{2.Ed}}{d_2} \right) = 0.8$$

Santvaros juostos atsparis:

$$N_{0.Rd} := 13 \cdot \left(1 + 0.02 \frac{d_0}{t_0} \right) \cdot t_0^2 \cdot f_{yd} \cdot \gamma_c \cdot 10^3 = 233.775$$

Koeficientas:

$$\zeta_1 := 1 - 0.4 \left(1 - \frac{c_{ij}}{d_0} \right)^4 = 0.790$$

Kitų tinklėlio elementų (i-tūjų) išdėstymo jungtyje atžvilgiu nagrinėjamo tinklėlio ...:

$$\varepsilon_{1.2} := 1 - \frac{1.3 \cdot \zeta_1 \cdot \left(1 + 0.02 \frac{d_0}{t_0} \right)}{1 + 0.04 \frac{d_0}{t_0}} = 0.245$$

Koeficientas:

$$\chi := \begin{cases} 0.008 & \text{if } \zeta_1 < 0.85 \\ 0.015 & \text{otherwise} \end{cases} = 8 \times 10^{-3}$$

Koeficientas:

$$\beta_1 := \frac{d_1}{d_0} = 1 \quad \beta_2 := \frac{d_2}{d_0} = 0.83$$

$$\psi_1 := \begin{cases} 1.05 \beta_1 & \text{if } \beta_1 \leq 0.7 \\ 1.05 \beta_1 \cdot (1 + 0.15 \beta_1) & \text{if } \beta_1 > 0.7 \end{cases} = 1.208$$

$$\psi_2 := \begin{cases} 1.05 \beta_2 & \text{if } \beta_2 \leq 0.7 \\ 1.05 \beta_2 \cdot (1 + 0.15 \beta_2) & \text{if } \beta_2 > 0.7 \end{cases} = 0.980$$

Mazgo atspario tikrinimo, pagal atitinkamas formules, blokas

Sąlyga (2.37)

$$X_1 := \varepsilon_{1.2} \mu_1 \cdot N_{1.Ed} \cdot \frac{\sin(\alpha_1)}{\psi_1} = -73.354$$

$$X_2 := \varepsilon_{1.2} \mu_2 \cdot N_{2.Ed} \cdot \frac{\sin(\alpha_2)}{\psi_2} = 59.78$$

$$\frac{|X_1 + X_2|}{(\gamma_{00} \gamma_r \cdot N_{0.Rd})} = 0.073$$

Sąlyga (2.38)

$$|N_{1.Ed}| \cdot \frac{\sin(\alpha_1)}{\psi_1} = 299.724$$

$$\frac{\left(|N_{1.Ed}| \cdot \frac{\sin(\alpha_1)}{\psi_1} \right)}{(2 \cdot N_{0.Rd})} = 0.641$$

$$|N_{2.Ed}| \cdot \frac{\sin(\alpha_2)}{\psi_2} = 305.325$$

$$\frac{\left(|N_{2.Ed}| \cdot \frac{\sin(\alpha_2)}{\psi_2} \right)}{(2 \cdot N_{0.Rd})} = 0.653$$

Sąlyga (2.39)

$$\frac{|N_{1.Ed}| \cdot \left(1 + \chi \cdot \frac{d_0}{t_0} \right)}{A_1 \cdot \gamma_{d1} \cdot \gamma_{cd} \cdot f_{yd} \cdot 10^3} = 0.651$$

$$\frac{|N_{2.Ed}| \cdot \left(1 + \chi \cdot \frac{d_0}{t_0} \right)}{A_2 \cdot \gamma_{d2} \cdot \gamma_{cd} \cdot f_{yd} \cdot 10^3} = 0.939$$

Pastaba: mazgo „KT“ analizei atlikti naudojama „K“ tipo mazgo analizei parašyta skaičiuoklė programinio paketo „MathCAD“ (Lapinskas 2006) aplinkoje. Analizuojant „KT“ tipo mazgą, vertikalios elemento ašinės jėga yra pridedama prie pasvirusio elemento (gniuždomas), ašinės jėgos reikšmės. Jeigu minėtas mazgas yra su užlaida, tai skaičiuoklėje keičiasi tik χ koeficiento reikšmė, kuri turi būti lygi 0,6. Analizuojant mazgą su užlaida, niekas skaičiuoklėje nekeičiama, tačiau būtina teisingai parinkti tarpelio c_{ij} reikšmę.