



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Gediminas Keleris

LENKIAMŲ ATVIRŲJŲ ALIUMININIŲ PROFILIUOČIŲ ANALIZĖ
ANALYSIS OF OPEN CROSS-SECTION ALUMINIUM EXTRUSIONS IN BENDING

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETO
STATYBOS FAKULTETO
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

dr. prof. Antanas Šapalas

2020-06-01

(Data)

Gediminas Keleris

LENKIAMŲ ATVIRŲJŲ ALIUMININIŲ PROFILIUOČIŲ ANALIZĖ
ANALYSIS OF OPEN CROSS-SECTION ALUMINIUM EXTRUSIONS IN BENDING

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vadovas

doc. dr. Gintas Šaučiuvėnas



2020-06-01

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Lina Rutkienė

(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

BD darbas peržiūrėtas lietuvių kalbos konsultantės
L. Rutkienės.

Sigita Gribniak



Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6211EX040

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

2020-04-24

(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2020-04-24.....Nr.

Vilnius

Studentui (ei) Gediminui Keleriui

(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: LENKIAMŲ ATVIRŲJŲ ALIUMININIŲ PROFILIUOČIŲ ANALIZĖ
ANALYSIS OF OPEN CROSS-SECTION ALUMINIUM EXTRUSIONS IN BENDING

patvirtinta 2020 m. balandžio 24 d. dekanų potvarkiu Nr. Nr109st.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2020 m. birželio 01 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti mokslinės literatūros, skirtos lenkiamų aliumininių atvirųjų profiliuotųjų elgsenos analizei. Atlikti skaitinę aliumininių atvirųjų profiliuotųjų analizę ir gautus rezultatus palyginti su analitiniais metodais, LST EN 1999-1-1. Išnagrinėti aliumininių atvirųjų profiliuotųjų elgsena atsižvelgiant į medžiagos stiprio pokyčius, medžiagos sustiprėjimo poveikį, gniuždomų bei tempiamų skerspjūvio dalių plotų sumažinimą. Pateikti palyginimo išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....

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

Vadovas

.....
(Parašas)

doc. dr. Gintas Šaučiuvėnas

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

Užduotį gavau

.....
(Parašas)

Gediminas Keleris

(Vardas, pavardė)

2020-04-24

(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų
sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo
organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

GEDIMINAS KELERIS 20146286

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

STATYBOS FAKULTETAS

(Fakultetas)

STATINIŲ KONSTRUKCIJOS, LŠKSm-18

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2020 m. gegužės 31 d.

(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema Lenkiamų atvirųjų
aliumininio profilio analizė

patvirtintas 2020 m. balandžio 24 d. dekanų potvarkiu Nr. 109st,
parašytas savarankiškai. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar
netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo
mokslininkai ir specialistai: _____

Mano darbo (projekto) vadovas doc. dr. Gintas Šavčiūnas

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



(Parašas)

Gediminas Keleris

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos baigiamasis magistro darbas
Pavadinimas: **Lenkiamų atvirųjų aliumininių profiliuotųjų analizė**
Autorius: **Gediminas Keleris** Vadovas: doc. dr. **Gintas Šaučiuvėnas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjami lenkiami aliumininiai atvirieji profiliuotieji. Profiliuotieji nagrinėjami skaitiniu metodu, pasitelkiant baigtinių elementų programinį paketą „Ansys 2019 R2“ bei analitiniu metodu, remiantis LST EN 1999-1-1:2007 standartu. Analizuojama skerspjuvio elgsena priklausomai nuo skirtingų medžiagos stiprių, medžiagos stiprėjimo poveikio, gniuždomų bei tempiamų plotų sumažėjimo. Lyginami tiesiniu ir netiesiniu metodais gauti rezultatai. Taip pat lyginama laikomoji galia gauta skaitiniais metodais bei analitiniu būdu, remiantis EC9 pateiktomis rekomendacijomis.

Darbą sudaro 6 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, tiriamoji dalis, išvados, literatūros sąrašas ir priedai.

Darbo apimtis – 77 p. teksto be priedų, 66 iliustr., 8 lent., 23 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami 8 darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: Baigtinių elementų modelis, aliumininis profiliuotasis, lenkiamoji galia, klupumo koeficientas, eurokodas, vietinis klupumas, iškreipiamasis klupumas, elgsena

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

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

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

Title: **Analysis of Open Cross-section Aluminium Extrusions in Bending**

Author: **Gediminas Keleris** Academic supervisor: assoc. dr. **Gintas Šaučiuvėnas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

The final Master thesis investigates the bending analysis of open cross-section aluminium extrusions. Work was made using FE program „Ansys 2019 R2“ and analytical calculations based on LST EN 1999-1-1:2007 standard. Analysis of aluminium thin-walled open cross-sections was made depend on different material properties, affect of material hardening, decrease of compressed and tensioned section areas. Linear and non-linear results of calculations are compared with each other. All numerical results of FE calculations are compared with analytical results, calculated according to LST EN 1999-1-1:2007 recommendations.

In the end of work there are conclusions.

The thesis consists of six parts: introduction, literature review, an analytical and a numerical experiment part, conclusions, references and appendixes.

Working volume – 77 pages of text without appendixes, 66 illustrations, 8 tables, 23 bibliographic sources.

8 appendixes included.

Keywords: FE model, aluminium profile, bending resistance, buckling coefficient, Eurocode, local buckling, distortional buckling, behaviour.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	11
ĮVADAS.....	12
1. LITERATŪROS APŽVALGA	14
1.1. Bendrosios žinios apie aliumininis profiliuočius	14
1.1.1. Aliumininių profiliuochių privalumai	14
1.1.2. Aliumininių profiliuochių trūkumai	14
1.1.3. Atvirųjų aliumininis profiliuochių gamyba	14
1.1.4. Skerspjūvių įvairovė.....	16
1.2. Lenkiamų atvirųjų aliumininis profiliuochių elgsena ir projektavimo principai	18
1.2.1. Aliuminio elgsena	18
1.2.2. Skerspjūvių ribiniai būviai	21
1.2.3. Skerspjūvių klasifikacija ir elgsena, atsižvelgiant į ribinius būvius.....	21
1.2.4. 4 klasės skerspjūvio efektyviojo skerspjūvio nustatymas	26
1.2.8. Šoninis sukamasis klupumas ir jo skaičiavimo principas.....	29
1.2.9. Atvirųjų skerspjūvių sukamasis poveikis ir jo skaičiavimo principas.....	32
1.2.10. Aliumininių profiliuochių lenkiamosios bei šlyjamosios galios tikrinimo principas.....	35
1.3. Trumpa keletos ankstesnių mokslinių tyrimų, susijusių su aliumininis profiliuochių elgsena, apžvalga.....	37
1.3.1. Y. Wang'o atlikta dviejų netipinių aliumininis formų sistemos, naudojamos stiklo fasadų konstrukcijose, elgsenos analizė (Wang, 2006).....	37
1.3.2. P. Castaldo, E. Nastri'o ir V. Piluso atlikta lenkiamų RHS vamzdinių sijų stipruminės elgsenos parametrinė analizė (Castaldo et al., 2017)	39
1.3.3. J. Mennink'o atlikta ekstruzijos būdu išgautų aliumininis skerspjūvių stabilumo analizė, nustatant jų elgseną veikiant lenkimui bei netolygiam gniuždymui (Mennink, 2002) ...	39
1.3.4. Y. Kim'o atlikta lenkiamų aliumininis profiliuochių analizė (Yongwook, 2003).....	41
1.3.5. Z. Xiong'o atlikta lenkiamų aliumininis profiliuochių šoninio – sukamojo klupumo analizė (Xiong, 2015).....	42
1.3.6. Kiti atlikti tyrimai.....	43
1.4. Pirmos dalies apibendrinimas.....	44
2. TIRIAMOJI DALIS	46
2.1. Pirmasis skerspjūvis	46
2.1.1. Skerspjūvio duomenys, schema ir geometrija baigtinių elementų modelyje	46
2.1.2. Skaičiavimų, atliktų „Ansys“ programiniu paketu, rezultatai	48
2.1.3. Pirmojo skerspjūvio analitiniai skaičiavimai pagal LST EN 1999-1-1	50
2.1.4. „Ansys“ ir analitinių skaičiavimų palyginimas	52

2.2.	Antras skerspjūvis	53
2.2.1.	Skerspjūvio duomenys, schema ir geometrija baigtinių elementų modelyje	53
2.2.2.	Tiesinių ir netiesinių skaičiavimų „Ansys“ programiniu paketu rezultatai	55
2.2.3.	Skirtingų medžiagos stiprių poveikis skerspjūvio elgsenai	57
2.2.4.	Skerspjūvio elgsena naudojant įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio modelį su stiprėjimu	59
2.2.5.	Skerspjūvio elgsena priklausomai nuo gniuždomos dalies ploto sumažėjimo	61
2.2.6.	Skerspjūvio elgsena priklausomai nuo tempiamos dalies ploto sumažėjimo	65
2.2.7.	Antrojo skerspjūvio analitiniai skaičiavimai pagal LST EN 1999-1-1	68
2.2.8.	„Ansys“ ir analitinių skaičiavimų palyginimas	73
	IŠVADOS	74
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	76
	PRIEDAI	78
	A priedas. Atvirųjų plonasienių skerspjūvių konstantos (LST EN 1999-1-1:2007 J.4 ir J.5 priedai)	79
	B priedas. Pirmojo skerspjūvio konstantų skaičiavimas pagal LST EN 1999-1-1:2007 metodiką	82
	C priedas. Antrojo skerspjūvio tikrieji matmenys	83
	D priedas. Antrasis skerspjūvis su supaprastintomis sąstandomis	84
	E priedas. Antrojo skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis gniuždomų elementų, matmenys	85
	F priedas. Antrojo skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis tempiamų elementų, matmenys	86
	G priedas. Antrasis skerspjūvis su jo dalimis suteiktomis koordinatėmis ir pradine neutraliąja ašimi	87
	H priedas. Antrojo skerspjūvio konstantų skaičiavimas pagal LST EN 1999-1-1:2007 metodiką ..	88

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Ekstruzijos proceso schema (Wikipedia, 2020)	15
1.2 pav. Ekstruzijos būdu išgaunamų profiliuočių šablonai (WeltMetal, 2020).....	15
1.3 pav. Presavimo procesas (UAB „Sapa profiliai“, 2017).....	16
1.4 pav. Ekstruzijos būdu išgaunamų profiliuočių įvairovė (Mazzolani, 2003)	17
1.5 pav. Aliuminio ir plieno įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivės (GodSavesHoes, 2019)	18
1.6 pav. Rambergo-Osgudo įtempių ir deformacijų priklausomybės diagrama (Hoglund, 2008).....	19
1.7 pav. Vietinis stabilumo netekimas (Kissel, Ferry, 2002).....	20
1.8 pav. Skerspjuvio klasių palyginimas (Hoglund, 2008).....	22
1.9 pav. 1 klasės skerspjuvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008).....	23
1.10 pav. 2 klasės skerspjuvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008).....	23
1.11 pav. 3 klasės skerspjuvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008).....	24
1.12 pav. 4 klasės skerspjuvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008).....	25
1.13 pav. Skerspjuvių klasių palyginimo grafikas (Mazzolani, 2003; LST EN 1999-1-1:2008)	25
1.14 pav. 4 klasės efektyviojo skerspjuvio radimas (Hoglund, 2008)	26
1.15 pav. Skerspjuvio dalių tipai (LST EN 1999-1-1:2008).....	27
1.16 pav. Plokščiųjų sustiprintų dalių klupumo formos (LST EN 1999-1-1:2008).....	28
1.17 pav. Standartinis sustandinimas (Mazzolani, 2003)	29
1.18 pav. Skerspjuvių polinkis į šoninį klupimą atsižvelgiant į inercijos momentą apie pagrindinę ir šalutinę ašis (Kissell, Ferry, 2002).....	30
1.19 pav. Šoninis I tipo sijos klupumas. Pažymėtina tai, jog gniuždomos juostos šoninis pasislinkimas sukelia sijos susisukimą (Kissell, Ferry, 2002).	30
1.20 pav. Pataisos dėl šoninio sukamojo klupumo koeficiento kitimo grafikas (LST EN 1999-1-1:2008)	31
1.21 pav. Aplinkybės, kada šoninis sukamasis klupumas nepasireiškia (Hoglund, 2008)	32
1.22 pav. Sukamas asimetris skerspjuvis bei principinis vertikalaus įlinkio nustatymo pavyzdys (Hoglund, 2008)	32
1.23 pav. Būdai išvengti skerspjuvių sukimo (Hoglund, 2008).....	33
1.24 pav. Sukimo veikiamas elementas ir jame atsirandantys įtempiai (Kissell, Ferry, 2002).....	34
1.25 pav. Du netipiniai aliumininiai profiliuočiai ir jų sąveika, kuri buvo tiriama darbe (Wang, 2006)	37
1.26 pav. Baigtinių elementų metodu atliekama sujungtų skerspjuvių analizė ir eksperimentinis bandymas (Wang, 2006)	38
1.27 pav. Analizei atlikti naudojama skerspjuvių schema (Castaldo et al., 2017).....	39
1.28 pav. Einhovenio technologijos universitete atliekami netolygiai gniuždomų profiliuočių bandymai (Mennink, 2002).....	40
1.29 pav. Klupdomų skerspjuvių deformacijos klupimo metu, gautos su baigtinių elementų modeliais. (Mennink, 2002).....	41
1.30 pav. Atliekami I formos skerspjuvių bandymai bei sukurtas baigtinių elementų modelis. (Kim, 2003)	42
1.31 pav. Bandymo atlikimo schema bei bendras vaizdas. (Xiong, 2015)	42
1.32 pav. Šoninio sukamojo klupumo koeficiento sąryšio nuo sąlyginio liaunio kreivė (Xiong, 2015)	43
1.33 pav. Keturių taškų lenkimo bandymo schema ir bendras vaizdas. (Хирковский, Сердюк и Горемыкину, 2015).....	44
2.1 pav. Lovinio profiliuotio matmenys.....	46

2.2 pav. Sijos apkrovimo schemas.....	47
2.3 pav. Tinkleliu sudalintas pirmasis skerspjuvis iš „Ansys“ aplinkos	47
2.4 pav. Idealiai tampriai-plastinė medžiagos kreivė „Ansys“ programiniame pakete. ($f_0 = 255$ MPa)	48
2.5 pav. Pirmojo skerspjuvio A ir B apkrovimo variantų pirmosios pastovumo netekimo modos	49
2.6 pav. Tiesine ir netiesine analizėmis gautų lenkiamųjų galių palyginimo diagrama.....	49
2.7 pav. Netiesiniais skaičiavimais gautas klupumo pavidalas.....	50
2.8 pav. Skerspjuvio sektorių koordinatės ir efektyvusis skerspjuvis.....	51
2.9 pav. Analitiniu būdu ir baigtinių elementų modeliais gautų lenkiamųjų galių palyginimo diagrama	52
2.10 pav. Antrojo profiliuotio tikrasis vaizdas bei vaizdas su pakeistomis nestandartinėmis dalimis	53
2.11 pav. Antrojo profiliuotio apkrovimo bei atrėmimo sąlygų schema.....	54
2.12 pav. Tinkleliu sudalintas antrasis skerspjuvis iš „Ansys“ aplinkos	55
2.13 pav. Antrojo skerspjuvio pirmoji pastovumo netekimo moda	55
2.14 pav. Antrojo skerspjuvio tiesinės ir netiesinės analizių laikomosios galios palyginimas	56
2.15 pav. Antrojo skerspjuvio tiesinės ir netiesinės analizių didžiausių įtempių palyginimas	56
2.16 pav. Skerspjuvio lenkiamosios galios sąryšis nuo medžiagos stiprio	58
2.17 pav. Maksimalių įtempių sąryšis nuo medžiagos stiprio	59
2.18 pav. Dvitiesis įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio modelis (LST EN 1999-1-1:2007)...	60
2.19 pav. „Ansys“ programiniame pakete suvestos dvitiesės kreivės su stiprėjimu.....	61
2.20 pav. Skerspjuvis su pašalinta dalimi gniuždomų atšakų	62
2.21 pav. Skerspjuvis su pašalinta dalimi gniuždomo ploto „Ansys“ programiniame pakete.....	63
2.22 pav. Skerspjuvio, kuriam pašalinta dalis gniuždomų atšakų, tiesinės analizės pirmoji klupumo moda.....	63
2.23 pav. Skerspjuvio be gniuždomos dalies ir viso skerspjuvio lenkiamosios galios palyginimo diagrama.....	64
2.24 pav. Skerspjuvio be gniuždomos dalies ir viso skerspjuvio įtempių palyginimo diagrama	64
2.25 pav. Skerspjuvis su pašalintais keliais tempiamais elementais	65
2.26 pav. Skerspjuvis su pašalinta dalimi tempiamų elementų „Ansys“ programiniame pakete	66
2.27 pav. Skerspjuvio, kuriam pašalinta dalis tempiamų elementų, tiesinės analizės pirmoji klupumo moda.....	66
2.28 pav. Skerspjuvio be tempiamos dalies ir viso skerspjuvio lenkiamosios galios palyginimo diagrama.....	67
2.29 pav. Skerspjuvio be tempiamos dalies ir viso skerspjuvio įtempių palyginimo diagrama	68
2.30 pav. Gniuždomos liaunos skerspjuvio dalys	69
2.31 pav. Charakteringieji įtempiai iš „Ansys“ aplinkos, atliekant tiesinę skerspjuvio analizę (žr. 2.2.1. ir 2.2.2. poskyrį)	70
2.32 pav. Efektyvusis 4 klasės skerspjuvis	72
2.33 pav. Lenkiamosios galios palyginimo diagrama.....	73

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Medžiagos rodikliai, kurie suvesti „Ansys“ programiniame pakete	48
2 lentelė. Pirmojo skerspjūvio rodikliai	51
3 lentelė. Skerspjūvių su skirtingais medžiagų stipriais skaičiavimo rezultatai.	57
4 lentelė. Skirtingų stiprių skerspjūvių lenkiamoji galia	58
5 lentelė. Skirtingų stiprių skerspjūvių skaičiavimo rezultatai įvertinant medžiagos stiprėjimą.	61
6 lentelė. Pilno skerspjūvio ir skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis gniuždomų atšakų, rezultatai ir palyginimas	63
7 lentelė. Pilno skerspjūvio ir skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis tempiamų elementų, pagamintų iš EN-AW 6082 T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinio, rezultatai ir palyginimas	67
8 lentelė. Antrojo skerspjūvio rodikliai	72

IVADAS

Pirmą kartą aliuminis buvo išgautas 1825 m. danų mokslininko Hanso Oerstedo. Nuo to laiko aliuminio išgavimo technologijos sparčiai tobulėjo, o aliuminis buvo naudojamas vis plačiau. XIX a. pabaigoje austrų chemikas Karlas Džozefas Bayeris išrado būdą, kaip iš boksito išgauti gryną aliuminį. Po šio atradimo aliuminio kaina labai sumažėjo ir aliuminis buvo pradėtas plačiai naudoti kasdienėms reikmėms, juvelyrikoje, stalo įrankiams, akinių rėmeliams, elektrotechnikai, folijai ir kt. Grynas aliuminis yra sidabriškai pilkos spalvos, didelio atsparumo korozijai, bet minkštas metalas. Norint pagerinti savybes į aliuminį buvo pradėta lydyti nedidelis kiekis kitų cheminių elementų, kurie pagerindavo ne tik stiprumo, bet ir takumo, suvirinamumo savybes. Pirmojo pasaulinio karo metais aliuminio lydiniai pradėti naudoti aviacijos pramonėje kaip sąlyginai stipri ir lengva medžiaga (tankis $2,7 \text{ g/cm}^3$), iš kurios galima pagaminti lėktuvų konstrukcijas. 1930 m. pradedamas atskirų aliumininių elementų naudojimas statyboje, o 1945 m. išplito aliuminio naudojimas pastatų laikančiosioms konstrukcijoms bei fasadų apdailai. Šiuo metu aliuminio lydiniai plačiai naudojami aviacijos pramonėje, statybos pramonėje statant gyvenamuosius, pramoninius, bei rekonstruojant senus pastatus (santvaros, sijos, didelių tarpatramių stogų perdangos, išorės sienų laikantieji fasadai, stiklo fasadų rėmai ir kt. konstrukcijos), talpykloms, kelio ženklų laikančioms konstrukcijoms, laivyboje ir daug kur kitur.

Aliuminio lydiniai turi žemą lydymosi temperatūrą, - apie $660 \text{ }^\circ\text{C}$, todėl pastaruoju metu ypač išpopuliarėjo aliumininių profiliuočių gamyba ekstruzijos būdu. Šiuo būdu išgauti profiliuočiai yra kur kas funkcionalesni už plieninius, nes gali būti išspausti praktiškai bet kokio pavidalo, kas leidžia ne tik išnaudoti medžiagą efektyviau, bei ir gauti estetiškai patrauklų pavidalą. Tačiau kartais susiduriama su tokių profiliuočių nepakankama lenkiamąja galia, nes projektuojant analitiniai skaičiavimai yra gana sudėtingi, o atliktų tyrimų, pagrindžiančių nustatytas projektavimo normas įvairaus skerspjūvio profiliuočiams, nėra labai daug. Sparčiai tobulėjant skaitiniams metodams ir kompiuterinei programinei įrangai, vienas iš paprasčiausių ir greičiausių būdų nustatyti profiliuočių elgsenai – skaitinė analizė. Kadangi nesimetriškų atvirojo skerspjūvio aliumininių profiliuočių lenkiamosios galios analitiniai skaičiavimai pagal eurokodą nėra pakankamai išplėtoti, šiame darbe baigtinių elementų metodu analizuojama lenkiamų atvirųjų aliumininių profiliuočių elgsena.

Baigiamojo magistro darbo tikslai

Šio baigiamojo magistro darbo tikslas – atlikti pasirinktų aliumininių profiliuotųjų lenkiamosios galios analizę, bei išanalizuoti šių skerspjūvių elgseną, atsižvelgiant į įvairius veiksnius.

Baigiamojo magistro darbo uždaviniai

- Atlikti mokslinės literatūros, susijusios su aliuminio lydiniais bei iš jų pagamintų skerspjūvių elgseną, apžvalgą.
- Baigtinių elementų programa „Ansys“ atlikti tiesinę ir netiesinę pasirinktų profiliuotųjų analizės.
- Atlikti pasirinktų atvirųjų aliumininių profiliuotųjų analitinius skaičiavimus pagal eurokodeose pateikiamas rekomendacijas.
- Gautus analitinius skaičiavimo rezultatus palyginti su baigtinių elementų kompiuteriniu paketu „Ansys“ gautais rezultatais.
- Kompiuteriniu paketu „Ansys“ atlikti tiesinę ir netiesinę skerspjūvio analizės, priklausomai nuo medžiagos stiprių, medžiagos stiprinimo poveikio, tempiamų bei gniuždomų plotų pokyčių.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Bendrosios žinios apie aliumininis profiliuočius

1.1.1. Aliumininių profiliuočių privalumai

Padidėjęs aliumininių profiliuočių naudojimas yra glaudžiai susijęs su pačios medžiagos savybėmis bei gamybos specifika. Aliuminis, kaip medžiaga, turi daug privalumų, todėl iš jo gaminami profiliuočiai pasižymi šiomis teigiamomis savybėmis:

- Atsparumas korozijai, nereikalingas tolesnis paviršiaus padengimas
- Didelis statybinis efektyvumas (laikomosios galios ir svorio santykis)
- Lengvumas
- Skerspjūvių formų įvairovė ir funkcionalumas
- Išgaunamas lygus paviršius, nereikalaujantis tolesnio apdorojimo
- Greitas ir paprastas montavimas, įrengimas
- Kokybiški gaminiai, tikslūs matmenys
- Nesunkus formavimas
- Galimas perdirbimas ir antrinis panaudojimas
- Ilgaamžiškumas
- Mechaninių savybių stabilumas neigiamose temperatūrose

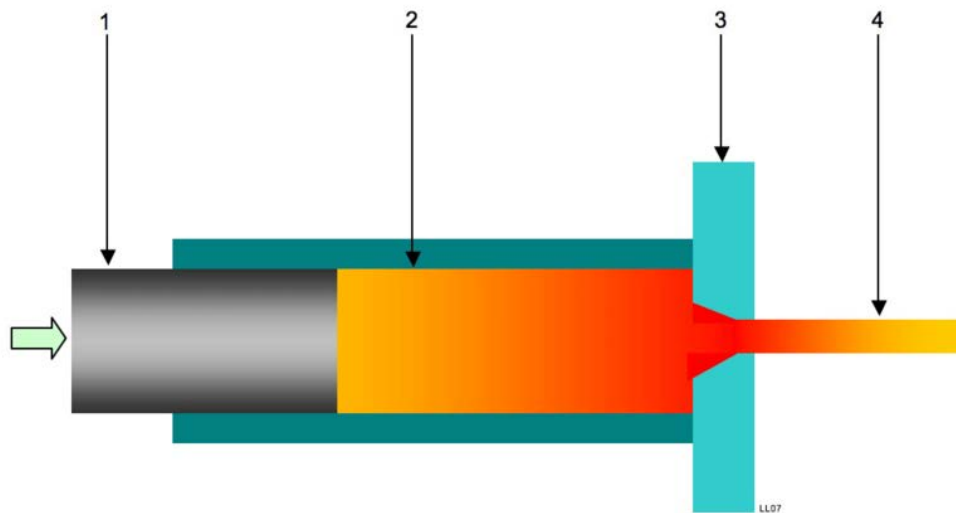
1.1.2. Aliumininių profiliuočių trūkumai

Be išvardintų privalumų, aliumininiai profiliuočiai taip pat turi ir trūkumų, kurie gali nulemti jų panaudojimo galimybes:

- Aliuminio tamprumo modulis ($E = \sim 70 \text{ GPa}$) yra tris kartus mažesnis už plieno, kas lemia padidėjusį jautrumą klupumui bei didesnius įlinkius.
- Temperatūros padidėjimas gali iš esmės sumažinti elemento stiprumą.
- Virinimo metu susidaręs karštis sumažina elemento stiprumą (HAZ).
- Didesnė kaina, lyginant su plieno gaminiais.

1.1.3. Atvirųjų aliumininių profiliuočių gamyba

Aliumininius profiliuočius galima išgauti keletu skirtingų būdų. Kartais profiliuočiai gali būti išgaunami pasitelkiant liejimo, valcavimo ar kalimo metodus. Šiuo metu pasaulyje labai išpopuliarėjusi aliumininių profiliuočių gamyba išspaudimo (ekstruzijos) būdu (žr. 1.1 pav.).



Čia: 1. – stūmoklis; 2. – ruošinys; 3. – matrica; 4. – gaminys

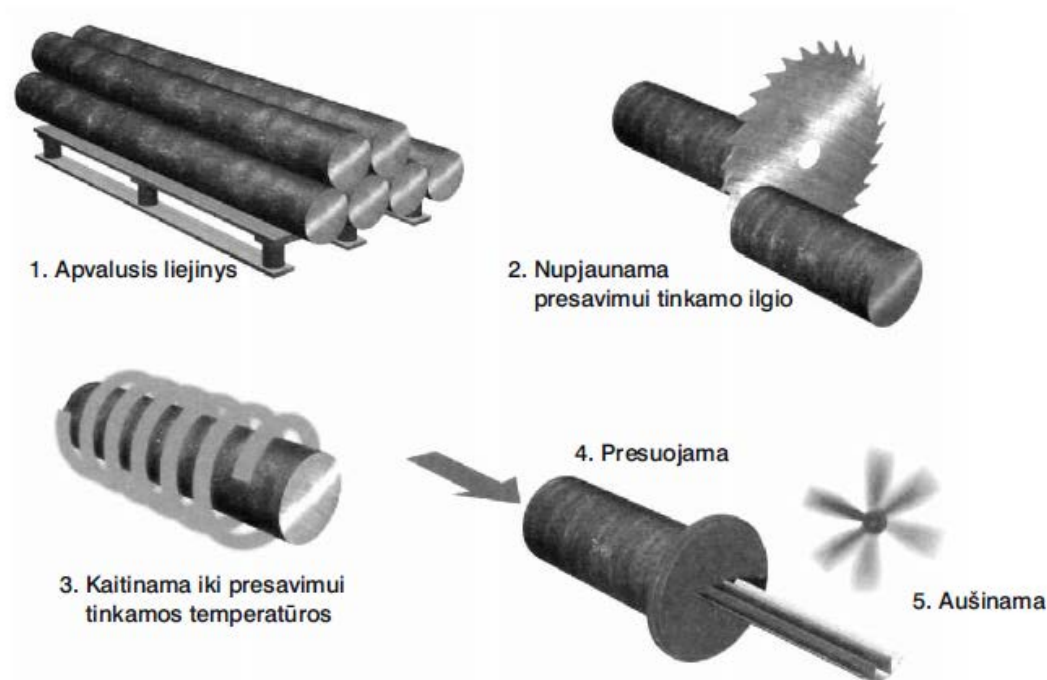
1.1 pav. Ekstruzijos proceso schema (Wikipedia, 2020)

Ekstruzija – tai pačių įvairiausių skerspjūvių aliumininių profiliuočių gamyba, kai supjaustyti aliuminio luitai įkaitinami indukcinėje krosnyje iki tinkamos ekstruzijai temperatūros ir veikiant aukštam slėgiui išstumiami pro būsimo profiliuoties formos šabloną (žr. 1.2 pav.).



1.2 pav. Ekstruzijos būdu išgaunamų profiliuočių šablonai (WeltMetal, 2020)

Išstumtas pro šabloną norimos formos profiliuotis ataušinamas ore arba vandenyje, kaip pavaizduota 1.3 paveiksle.



1.3 pav. Presavimo procesas (UAB „Sapa profiliai“, 2017)

Šiuo būdu pagaminti skerspjūviai paprastai turi liekamuosius įtempius. Šie įtempiai yra nedideli, - gniuždymo įtempiai paprastai neviršija 20 MPa, o tempimo įtempiai yra dar mažesni (Hoglund. 2008). Šios įtempių reikšmės yra profiliuočių paviršiuje. Medžiagos centre reikšmės paprastai sumažėja dėl įtempių ženklo kitimo. Skirtingi aliuminio lydiniai nedaro poveikio vidinių liekamųjų įtempių intensyvumui ir pasiskirstymui profiliuotyje. Šie vidiniai įtempiai turi neigiamą poveikį profiliuočių laikomajai galiai. Taip pat ekstruzijos būdu pagaminti gaminiai nėra visiškai tiesūs. Norint išgauti tiesų gaminį, bei sumažinti vidinius liekamuosius įtempius, gaminiai yra ištempiami. Gautos formos profiliuočiai supjaustomi reikiamu ilgiu. Norint gauti didesnių gabaritų skerspjūvius, kurių dėl ribotų profiliuočių matricų matmenų nebeįmanoma pagaminti išspaudimo būdu, keletas skerspjūvių gali būti suvirinami į vieną.

1.1.4. Skerspjūvių įvairovė

Standartiniai atvirieji profiliuočiai dažniausiai būna H, U, T, Z, L, I tipo. Labiausiai paplitusiu ekstruzijos būdu gaunamų profiliuočių įvairovė yra ženkliai didesnė, nes juos įmanoma pagaminti praktiškai bet kokios skerspjūvio formos.

Skerspjūvių geometriniai rodikliai gali būti pagerinami projektuojant nestandartines formas, kurios suteikia mažiausią svorį ir didžiausią konstrukcinį efektyvumą. Taip pat gali būti padaromos įvairios iškyšos, įdubimai, grioveliai ar užlankos, pritaikant jas

įvairiems profiliuotųjų sujungimams, pažymint gręžiamas ar pjaunamas vietas, taip pat po gamybos gali būti papildomai mechaniniu būdu padaromos įvairios įpjovos, padidinančios šlyties paviršių ar suteikiančios norimą estetinę išvaizdą. Ekstruzijos būdu išgaunamo skerspjūvio dydį ir formą gali apriboti tik ekstruzijos preso galingumas, skerspjūvio sudėtingumas, taip pat matricos kaina.



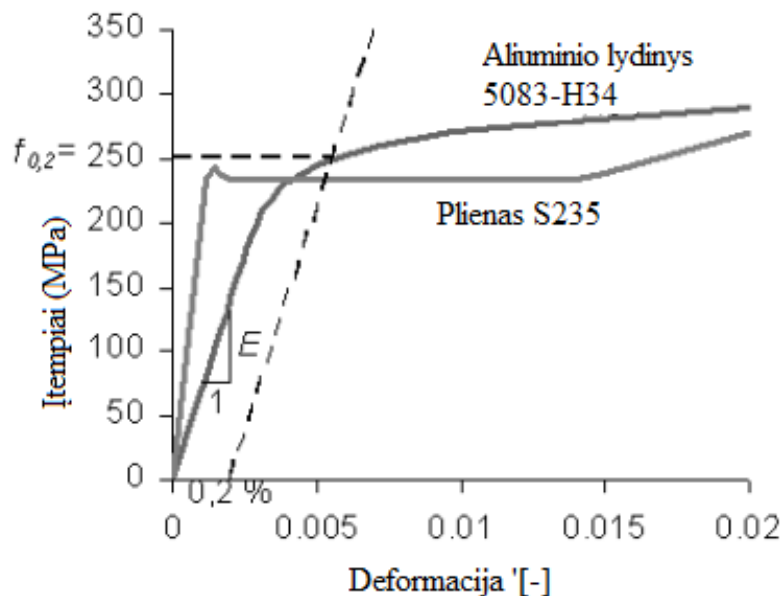
1.4 pav. Ekstruzijos būdu išgaunamų profiliuotųjų įvairovė (Mazzolani, 2003)

1.2. Lenkiamų atvirųjų aliumininių profiliuotųjų elgsena ir projektavimo principai

1.2.1. Aliuminio elgsena

Kasdieninėje praktikoje dažnai naudojami plonasieniai sudėtinio skerspjūvio profiliuotieji. Šių profiliuotųjų formų paskirtis dažniausiai būna nebūtinai konstrukcinės. Dėl to, veikiant išorinėms apkrovoms, gali pasireikšti keletas konstrukcijos nestabilumo tipų, tokių kaip bendro ir vietinio pastovumo praradimai, ar jų sąveika. Yra atlikta nemažai mokslinių tyrimų, kuriuose nagrinėjami aliumininiai profiliuotieji yra simetriški vienos ar dviejų ašių atžvilgiu, tokių kaip stačiakampiai vamzdžiai, kur skerspjūvių nestabilumas yra supaprastinamas į atskirų jo dalių (plokštelių) klupumą (Castaldo et al., 2017). Tačiau tėra labai nedaug dokumentacijos apie nesimetrinių aliumininių profiliuotųjų elgseną, ypač atvirųjų.

Pats aliuminis, kaip medžiaga, yra kitoks lyginant su kitais metalais, tokiais kaip plienas, nes neturi plieno elgsenai įprastos takumo aikštelės. Takumo stipris yra apibrėžiamas 0,2 % tikrosios tamprumo ribos $f_{0,2}$ reikšme, nes aliuminio lydinių įtempių-deformacijų kreivė nėra visiškai tiesiška ir neparodo konkrečios takumo įtempių reikšmės (žr. 1.5 pav.).



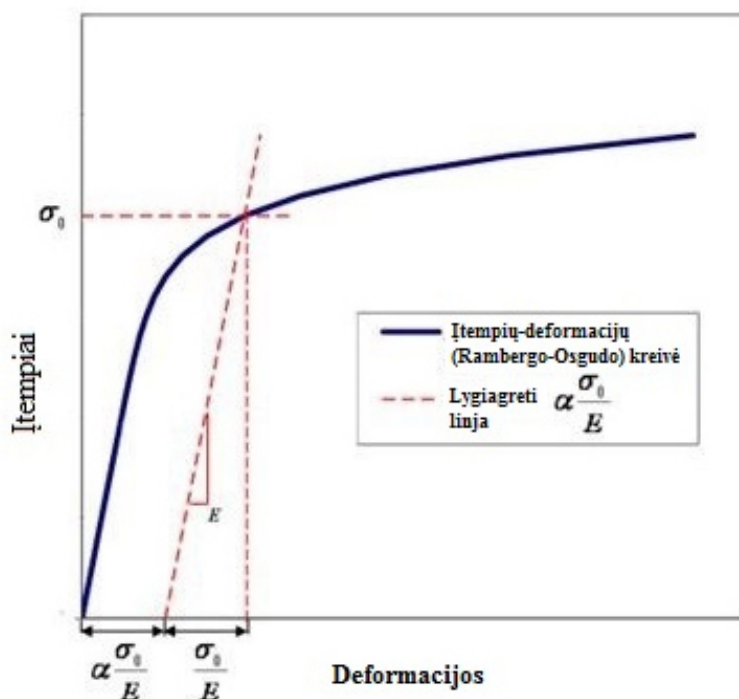
1.5 pav. Aliuminio ir plieno įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivės (GodSavesHoes, 2019)

Aliuminio elgseną lemia karščio poveikis (HAZ) bei gamybos proceso būdas. Taip pat skirtingi aliuminio lydiniai turi skirtingas mechanines savybes. Aliuminio lydinių

tamprumo modulis E varijuoja nuo 69,6 GPa iki 75,2 GPa (apie 10 % lydinių). Aliuminio tempiamasis tamprumo modulis yra maždaug 2 % mažesnis už gniuždomąjį tamprumo modulį, tačiau atliekant skaičiavimus įprasta naudoti vidutinį suapvalintą tamprumo modulį, kuris yra lygus 70,0 GPa.

Aliumininių konstrukcijų įtempių ir deformacijų priklausomybės kreivės modelis gali būti supaprastinamas į dvidesius ar tritiesius modelius, tačiau tikrąją aliuminio elgseną atspindi Rambergo-Osgudo modelis.

Rambergo-Osgudo sukurtas modelis parodo tikrąjį netiesinį įtempių ir deformacijų sąryšį, kuris nusako tipišką aliumininių profiliuotųjų elgseną. Ši aliuminio įtempių ir deformacijų diagrama parodo, jog takumo įtempių pradžios taškas yra elastinių ir plastinių deformacijų suma.

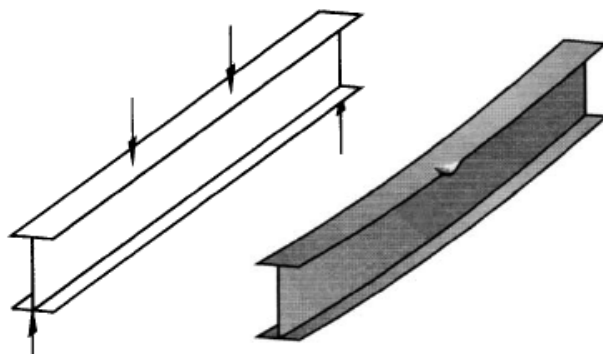


1.6 pav. Rambergo-Osgudo įtempių ir deformacijų priklausomybės diagrama (Hoglund, 2008)

Įprastai atvirojo skerspjūvio aliumininiai profiliuotieji lenkiami gali suirti esant nepakankamai elemento lenkiamajai galiai, šlyjamajai galiai, bendrajai klumpamajai galiai arba pasireiškus vietiniam arba iškreipiamajam stabilumo netekimui.

Lenkiamuose elementuose bendroji klumpamoji galia paprastai apima šoninį klupumą bei šoninį-sukamąjį klupumą.

Vietinis stabilumo netekimas - tai skerspjūvio klupimo pavidalas, kai atskiros skerspjūvio dalys netenka pastovumo, bet jungiamieji skerspjūvio mazgai iš esmės išlieka savo vietoje (žr. 1.7 pav.). Tai yra sąlyginai trumpo bangos ilgio atskirų plokštelių skerspjūvio elementų klupimas. Šie atskiri plokšteliniai elementai klumpa esant klupumui pakankamam atskirų plokštelių liaunumui veikiant gniuždomiesiems įtempiams.



1.7 pav. Vietinis stabilumo netekimas (Kissel, Ferry, 2002)

Iškreipiamasis klupumas, kaip terminas, nurodo, jog klumpant skerspjūvis išsikreivina (pasireiškia skerspjūvio distorsija). Ši pastovumo netekimo pavidalas yra susietas su skerspjūvio formos pasikeitimu, neįvertinant vietinio pastovumo. Iškreipiamojo klupimo bangos ilgis yra tarp vietinio klupimo ir bendrojo klupimo bangų ilgių.

Ekstruzijos būdu gaminamus profiliuočius galima suprojektuoti su įvairiausiomis sąstandomis, kurios gali atlikti įvairias funkcijas. Viena iš pagrindinių sąstandų funkcijų yra padidinti elemento vietinį pastovumą veikiant gniuždomosioms apkrovoms. Didinant skerspjūvių formų sudėtingumą, vietinio skerspjūvio klupimo skaičiavimai tampa vis sudėtingesni, taip pat padidėja iškreipiamojo klupimo tikimybė. Vietinis ir iškreipiamasis stabilumo netekimas gali sąveikauti tarpusavyje, kaip ir su bendroju skerspjūvio stabilumo netekimu (Dubina, 1996).

Gerardas M. van Erpas savo atliktame darbe (Erp, 1989) tyrė laisvai atremtų dviatramių sijų, sudarytų iš atvirųjų T formos profiliuochių, apkrautų koncentruota jėga sijos viduryje, klumpamosios jėgos priklausomybę nuo sijos ilgio. Jis nustatė, jog T formos sijoje įprastai pirmoji klupimo moda pasireiškia kaip skerspjūvio bendrojo pastovumo netekimas, o antroji —vietinis klupumas. Mažinant sijos ilgį, skirtumas tarp šių klupimo modų nykstamai mažėja ir, bendrojo pastovumo netekimo modeje, apkrovos pridėties vietoje skerspjūvis pradeda susisukti ir susidaro įspūdis, jog pasireiškia vietinis klupumas viduryje sijos, kartu vykstant bendrojo pastovumo netekimui. Kitaip tariant, abiejose modose vyksta skerspjūvio

iškreipiamasis pastovumo netekimas, todėl šių modų nebegalima atskirai vertinti kaip vietinio ar bendrojo pastovumo netekimu.

Projektavimo taisyklėse (eurokode) plokštelės tipo elementų klupumas bei bendras elemento stabilumo netekimas yra aprašytas remiantis teoriniais plokštelės tipo elementų klupumo sprendiniais, tipinių formų skerspjuvių bandymais, ir yra empiriškai pritaikytas tradicinių skerspjuvio formų aprašymui, tokioms kaip stačiakampiai vamzdžiai, I, U formos skerspjuviai bei simetriški loviai. Tačiau eurokode pateikti skaičiavimo metodai ir rekomendacijos gali visiškai neatspindėti kitokių, įvairesnių skerspjuvių formų elgsenos.

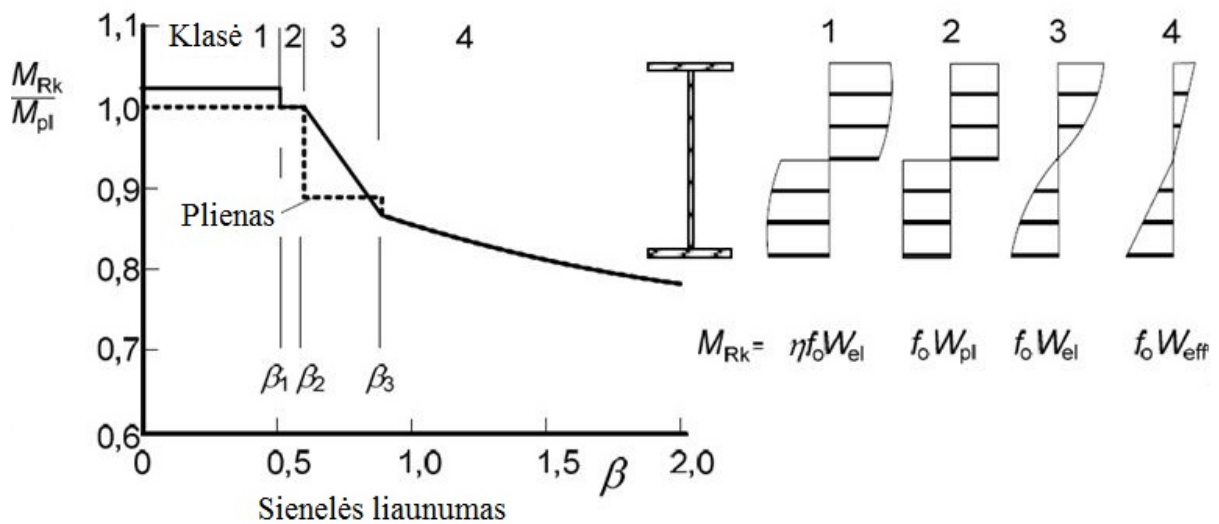
1.2.2. Skerspjuvių ribiniai būviai

Skerspjuvio elgsena ir jos idealizavimas, atliekant konstrukcijos analizę, yra susietas su skerspjuvių gebėjimu pasiekti 4 ribinius būvius, kurie atitinka konkrečią prielaidą dėl skerspjuvį veikiančių įtempių būvio. Nagrinėjant bendrąją skerspjuvio elgseną ir neatsižvelgiant į nagrinėjamą vidinį poveikį (ašinė jėga, šlyjamoji jėga, lenkiamasis momentas) išskiriami šie ribiniai būviai (Mazzolani, 2003):

- Tampriojo klupumo ribinis būvis – tai būvis, kuris susijęs su stipriu, atitinkančiu vietinio tampriojo nepastovumo reiškiniu pradžią gniuždomose skerspjuvio dalyse.
- Tamprusis ribinis būvis – tai būvis, kuris susijęs su stipriu, atitinkančiu labiausiai įtemptų skerspjuvio dalių medžiagos įprastinę tamprumo ribą f_0 .
- Plastinis ribinis būvis – tai būvis, susijęs su stipriu, įvertintu darant prielaidą, kad medžiagos elgsena yra idealiai plastiška, o ribinė reikšmė atitinka įprastą tamprumo ribą f_0 , neatsižvelgiant į kietėjimo poveikį.
- Irties ribinis būvis – tai būvis, kuris susijęs su tikrąja skerspjuvio takumo riba, įvertinta darant vidinių įtempių, nulemiančių medžiagos kietėjimo elgseną, pasiskirstymo prielaidą. Šiuo atveju apibendrintoji jėgos ir poslinkio kreivė paprastai yra kylanti, tad irties stipris atitinka tam tikrą apibendrintojo poslinkio ribą.

1.2.3. Skerspjuvių klasifikacija ir elgsena, atsižvelgiant į ribinius būvius

Lyginant plieninių konstrukcijų standartą LST EN 1993-1-1 (toliau EC3) su aliumininių konstrukcijų standartu LST EN 1999-1-1 (toliau EC9) ribinių būvių reikšmės atitinka viena kitą. Sudarant aliumininių konstrukcijų standartą EC9 buvo nutarta palikti plieninių konstrukcijų standarte gerai žinomas reikšmes, bet nustatant aliumininių skerspjuvių elgsenos ribas kitu būdu, remiantis atliktais eksperimentais. Dėl to aliumininių konstrukcijų standarte EC9 ribiniai būviai taip pat yra skirstomi į keturias klases (žr. 1.8 pav.).

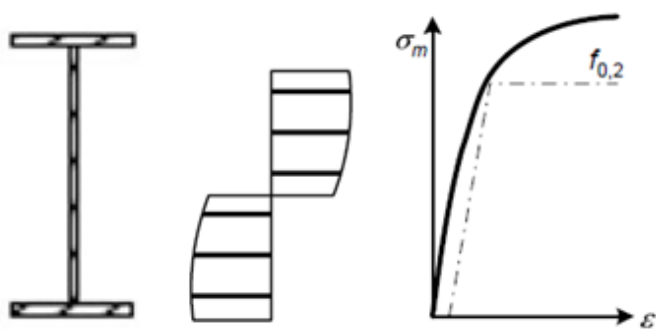


1.8 pav. Skerspjūvio klasių palyginimas (Hoglund, 2008)

Normose skerspjūviai klasifikuojami pagal gebėjimą pasiekti anksčiau aptartus ribinius būvius. Ši klasifikacija taip pat naudojama, jei reikia apibrėžti skerspjūvio gebėjimą pasiekti plastinį intervalą. Nežiūrint į masyvius ar kresnus skerspjūvius, dažnai laikomąją galią nulemia vietinis gniuždomų skerspjūvio dalių klupumas. Tačiau, elemento irties elgsena yra skirtinga, priklausant nuo skerspjūvio liaunumo parametro $\beta = b/t$, kur b yra plotumas, o t yra storumas kiekvienos atskirai nagrinėjamos gniuždomos skerspjūvio dalies. Esant tam tikroms situacijoms, tokioms kaip įtempių gradientas skerspjūvio dalyje, prie šio santykio naudojami papildomi koeficientai. Taip pat, jeigu elementą veikia grynas lenkimas, plotumas yra padauginamas iš redukcijos koeficiento, kuris lygus 0,4. Skerspjūvio liaunumo parametras β , apsprendžiantis skerspjūvio elgseną ir priklausymą tam tikrai skerspjūvio klasei yra nustatomas analogiškai kaip ir plieninėse konstrukcijose, bet naudojant skirtingas ribines santykinės vertes. Šis koeficientas nustato santykį atskiroms A ir B klasės skerspjūvių dalims: vidinėms ir išorinėms.

- 1 klasės (lankstieji) skerspjūviai – tai skerspjūviai, kurie gali sudaryti plastinei analizei reikiamą sukamosios gebos plastinį lankstą. Tai reiškia, jog ribinį būvį pasiekia su tikrąja skerspjūvio takumo riba, įvertinta darant vidinių įtempių, nulemiančių medžiagos sustiprėjimo elgseną, pasiskirstymo prielaidą. Šios klasės skerspjūviuose laikomoji galia pasiekama nespėjus atsirasti vietiniam nepastovumui.

Projektavimo normose šios klasės skerspjūvių bet kurios dalies liaunio parametras β/ϵ turi atitikti sąlygą: $\beta_{max}/\epsilon < \beta_1/\epsilon = 3$ (išsikišusioms dalims) ir $\beta_{max}/\epsilon < \beta_1/\epsilon = 11$ (vidinėms dalims). Tenkinant šioms sąlygoms elemento sukamoji geba yra pakankama lenkimo momento persiskirstymui naudojant plastinę analizę.

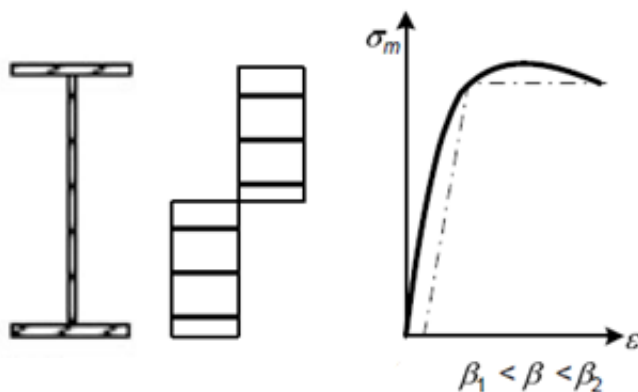


$$\beta < \beta_1$$

1.9 pav. 1 klasės skerspjūvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008)

- 2 klasės (kompaktiškieji) skerspjūviai – tai skerspjūviai, kurie pasiekia savo plastinę lenkiamąją galią, tačiau dėl vietinio klupumo jų sukamoji geba yra ribota. Šių skerspjūvių plastinės ribos laikomoji galia yra susijusi su skerspjūvio stipriu, įvertintu darant prielaidą, jog medžiagos elgsena yra idealiai plastiška, o ribinė reikšmė atitinka tamprumo ribą f_0 , neatsižvelgiant į sustiprėjimo poveikį. Prasidedantis plastinio nepastovumo reiškinyms neleidžia pilnai išnaudoti medžiagos sustiprėjimo savybių.

Projektavimo normose nurodyta, jog šių skerspjūvių liauniausios dalies liaunio parametras β/ϵ turi būti mažesnis nei β_2/ϵ , kur β_2/ϵ griežtai ne didesnis nei 4,5 (išsikišusioms dalims) ir ne didesnis už 16 (vidinėms dalims), tada skerspjūvio dalys, esančios arčiausiai neutralios ašies pasiekia tamprumo ribą f_0 .



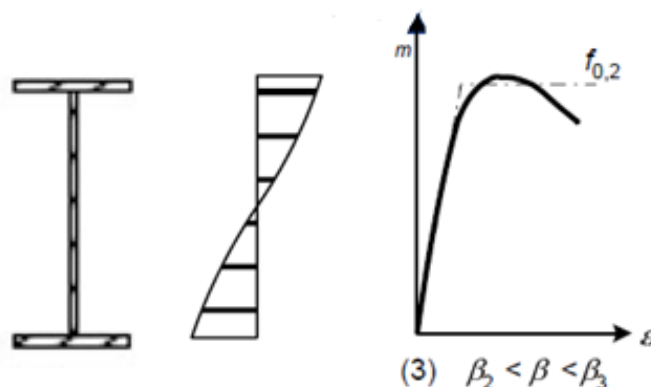
$$\beta_1 < \beta < \beta_2$$

1.10 pav. 2 klasės skerspjūvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008)

- 3 klasės (pusiau kompaktiški) skerspjūviai – tai skerspjūviai, kuriuose įtempiai aliumininio elemento kraštiniame gniuždomame sluoksnyje gali pasiekti stiprį pagal takumo ribą, tačiau vietinis klupumas neleidžia pasiekti plastinės lenkiamosios galios. Šių skerspjūvių tamprusis ribinis būvis yra susijęs su stipriu, kuris atitinka labiausiai įtemptų skerspjūvio dalių medžiagos tamprumo ribą f_0 . Šios klasės skerspjūviai dėl

nepastovumo nepasiekia netampriosios galios intervalo, todėl skerspjūvių elgsena išlieka daugiausia trapioji.

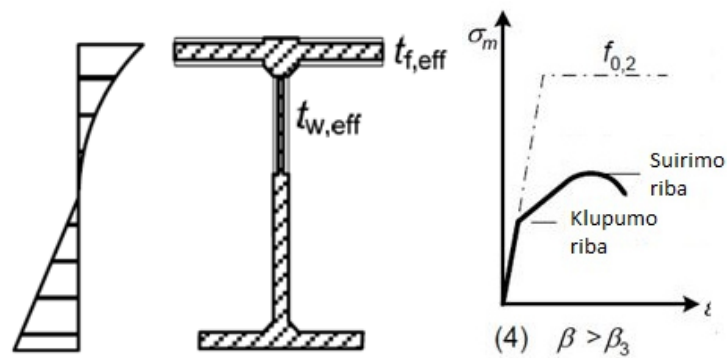
Pagal projektavimo normas, šiai klasei priskiriami skerspjūviai, kurių liauniausios dalies liaunio parametras β/ϵ tenkina šias sąlygas: $\beta/\epsilon < \beta_3/\epsilon$ ir $\beta/\epsilon > \beta_2/\epsilon$, kur β_2/ϵ griežtai ne didesnis nei 4,5 (išsikišusioms dalims) ir ne didesnis nei 16 (vidinėms dalims). Tuo tarpu β_3 griežtai ne didesnis nei 6 (išsikišusioms dalims) ir ne didesnis nei 22 (vidinėms dalims). Tenkinant šioms sąlygoms skerspjūvis priskiriamas 3 klasei. Vietinis klupumas šios klasės skerspjūviuose atsiranda ten, kur įtempiai bus lygūs ar iš dalies didesni nei tamprumo riba f_0 , ir kelete skerspjūvio dalių esančių arčiausiai neutralios ašies (sienutėje) įtempiai bus didesni už apskaičiuotus taikant linijinį įtempių pasiskirstymą.



1.11 pav. 3 klasės skerspjūvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008)

- 4 klasės (liauni) skerspjūviai – tai skerspjūviai, kuriuose pasireiškia vietinis klupimas anksčiau negu pasiekiamas stipris pagal takumo ribą vienoje ar daugiau gniuždomų skerspjūvio dalių. Šių skerspjūvių tampriojo klupumo ribinis būvis yra susijęs su stipriu, atitinkančiu vietinio tampriojo nepastovumo reiškinių pradžią gniuždomosiose skerspjūvio dalyse. Šios klasės skerspjūvių elgsena daugiausia yra trapioji.

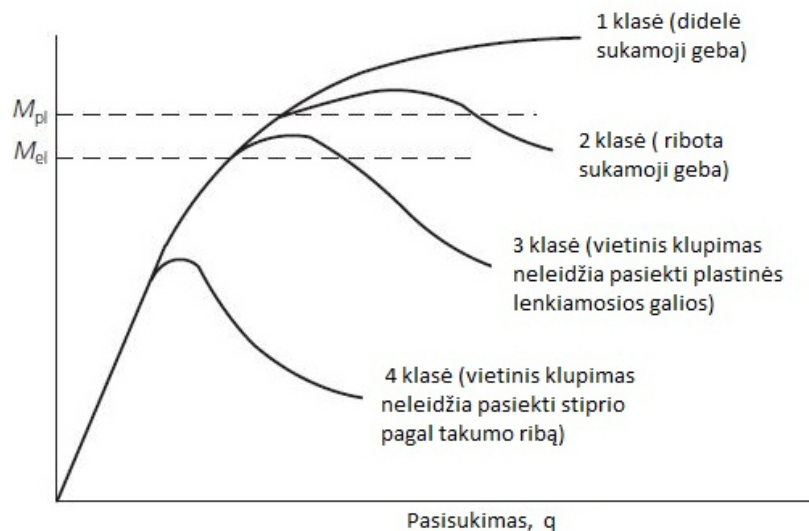
Projektavimo normose nurodyta, jog 4 klasės skerspjūviams priskiriami tokie skerspjūviai, kurių liaunio parametras β/ϵ yra didesnis už β_3/ϵ , kur β_3/ϵ yra griežtai ne didesnis už 6 (išsikišusioms dalims) ir griežtai ne didesnis už 22 (vidinėms dalims), tada vietinis klupumas pasireiškia prieš gniuždomiems įtempiams pasiekus 0,2 % tikrosios tamprumo ribos f_0 . Tokie skerspjūviai vadinami liaunais ir priskiriami 4 skerspjūvio klasei. Tinkamai įvertinant laikomosios galios sumažėjimą dėl vietinio klupumo vartojamas efektyvusis skerspjūvis.



1.12 pav. 4 klasės skerspjūvių diagrama (Hoglund, 2008; LST EN 1999-1-1:2008)

Pasireiškus vietiniam klupimui, skerspjūvyje veikiantys įtempiai persiskirsto ir elementą veikianti apkrova gali būti didinama tol, kol skerspjūvyje prasideda takumas. Ši apkrovos laikomoji galia, kai elementas yra išklupęs, labiau ryški liauniems (4 klasės) elementams, kurių skirtumas tarp M_{el} ir M_{cr} yra didelis. Dažniausiai elementų irtis neprasideda kai elemento skerspjūvio dalys pradeda klupti, tai atsitinka persiskirsčius įtempiams ir pasireiškus takumui.

Šių skirtingų skerspjūvių klasių elgseną geriausiai atspindi lenkiamosios galios bei pasisukimo priklausomybės grafikas (žr. 1.13 pav.).



1.13 pav. Skerspjūvių klasių palyginimo grafikas (Mazzolani, 2003; LST EN 1999-1-1:2008)

Būtina paminėti, jog skerspjūvio klasė priklauso nuo veikiančios apkrovos pobūdžio. Elementas gali priklausyti skirtingoms skerspjūvio klasėms, jeigu jį veikia skirtinga apkrova: lenkimas y - ašies kryptimi, z - ašies kryptimi, arba esant ašinei jėgai. Taip pat skerspjūvio liaunio koeficientu atsižvelgiama ir į įtempių gradientą bei skirtingas vietinio klupimo modas. Esant skirtingoms skerspjūvio klasėms (pvz. sieniei ir juostai), skerspjūvis

klasifikuojamas pagal aukščiausią (nepalankiausią) gniuždomų dalių klasę. Šis liaunio parametras kiekvienai klasei buvo nustatytas iš eksperimentų, atliktų pagal Ad-hoc hipotezės tyrimų programą standartiniams apvaliems, kvadratiniams ir stačiakampiems vamzdiniais profiliams, simetriškiems loviams bei kampuočiams.

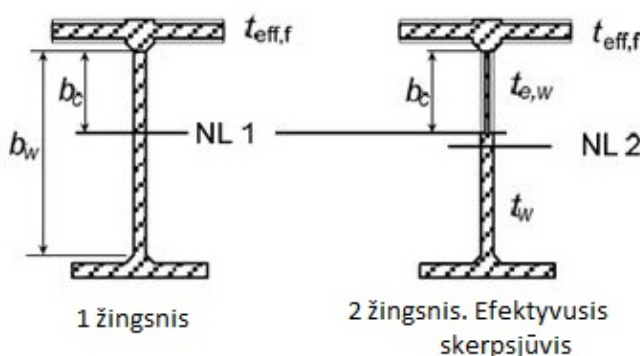
1.2.4. 4 klasės skerspjuvio efektyviojo skerspjuvio nustatymas

Apskaičiuoti 4 klasės efektyvųjį skerspjuvį lenkimo veikiamam elementui kartais nėra taip paprasta. Norint tai padaryti reikia vadovautis šiais principais:

- Vietinis klupumas pasireiškia tik gniuždomoje skerspjuvio dalyje. Lenkimo veikiamam elementui, kurio tikrasis skerspjuvis yra simetrinis, efektyvusis skerspjuvis yra asimetris.
- Efektyviojo skerspjuvio neutralioji ašis yra pastumta arčiau tempimo veikiamos dalies, taip padidinant gniuždomą skerspjuvio dalį.
- Sudėtingiems skerspjuviams apskaičiuoti efektyviojo skerspjuvio zoną naudojama iteracijos procedūra, tačiau paprastiems skerspjuviams galima supaprastinti skaičiavimą ir vietoje efektyvaus pločio pradžios ir pabaigos nustatymo naudoti efektyvųjį storį. Pavyzdžiui, I tipo skerspjuviui pirmiausia apskaičiuojamas efektyvusis gniuždomos juostos storis, po to apskaičiuojama neutraliosios ašies padėtis. Antruoju žingsniu apskaičiuojamas efektyvusis sienelės storis, atsižvelgiant į persislinkusią skerspjuvio neutraliąją ašį. Tam naudojamas redukcijos koeficientas ρ_c , kuris randamas pagal formulę:

$$\rho_c = \frac{A}{\beta/\varepsilon} - \frac{B}{(\beta/\varepsilon)^2};$$

A ir B koeficientai yra pateikti aliumininių konstrukcijų standarte EC9. Šitokiu būdu surandamas efektyvusis skerspjuvio dalies storis.



1.14 pav. 4 klasės efektyviojo skerspjuvio radimas (Hoglund, 2008)

1.2.5. Skerspjūvio dalys

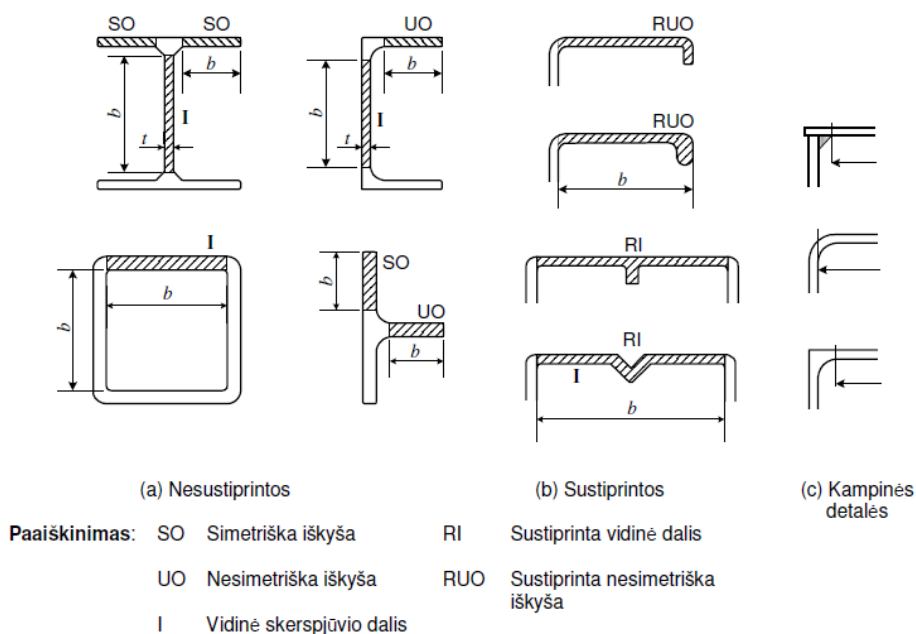
Šių laikų eurokoduose, tokiuose kaip EC3, skirto plieninėms konstrukcijoms, bei EC9, skirto aliumininėms konstrukcijoms, skerspjūvių klasifikavimo kriterijus yra grindžiamas maksimaliu skerspjūvio dalių liaunio parametru ir jų kraštinėmis sąlygomis. Galima sugalvoti ir panaudoti labai daug įvairių skerspjūvio dalių kraštinių sąlygų ir sąstandų, jų formų, ypač kai galima profiliuotųjų gamyba ekstruzijos būdu. Pavyzdžiui, elemento dalis gali būti su vienu atremtu galu, o kitu laisvu, arba gali būti vienu galu atremta, kitas galas su sąstanda, arba su sustiprinta vidine dalimi. Eurokode visi galimi profiliuotųjų dalių tipai yra supaprastinti ir apjungti (žr. 1.15 pav.).

Eurokode yra išskiriami 3 plonasieniųjų profiliuotųjų dalių tipai:

- Plokščiosios išsikišusios dalys
- Plokščiosios vidinės dalys
- Lenktos vidinės dalys

Šios skerspjūvio dalys gali būti nestiprintos, arba sustiprintos:

- išilginėmis sąstandomis
- kraštų užraitomis
- kraštų stormenimis.

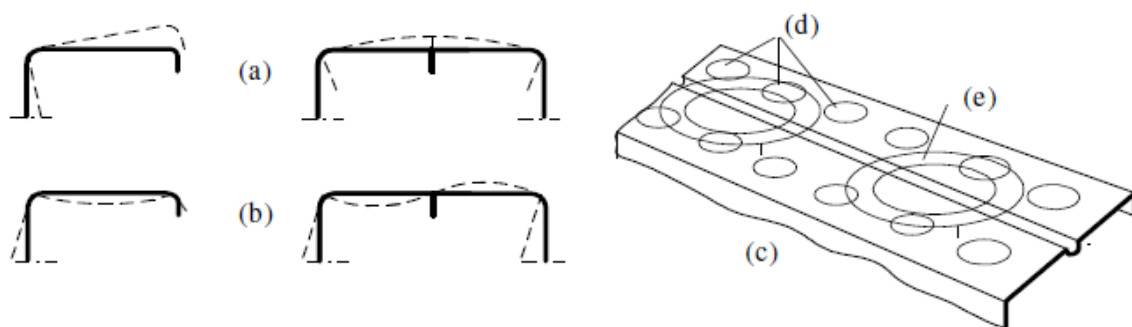


1.15 pav. Skerspjūvio dalių tipai (LST EN 1999-1-1:2008)

1.2.6. Klupumo pavidalų vertinimas

Esant skerspjūviui su sustiprinta plokščiąja dalimi, ši dalis gali klupti trimis galimais klupumo pavidalais, kuriems nustatomos atskiros β reikšmės. Šios reikšmės apskaičiuojamos pagal EC9 pateiktas skirtingas išraiškas, priklausančias nuo sustiprinamosios dalies tipo (standartinė, nestandartinė, sudėtinga), bei dalyje esančio įtempių gradiento.

- a) 1 forma: sustiprintas elementas, kuris klumpa kaip visuma, taigi tuo pačiu kreiviu kaip elementas klumpa ir sustiprinamoji dalis. Tokia klupimo forma vadinama iškreipiamuoju klupimu.
- b) 2 forma: sudedamosios dalys ir sustiprinamoji dalis išklumpa kaip atskiros dalys, o jų jungtis išlieka tiesi.
- c) 3 forma: 1-os ir 2-os klupimo formų derinys, kai sudedamųjų dalių klupimas susideda su viso elemento klupimu.



(a) 1 forma, (b) 2 forma, (c) 3 forma, (d) sudedamųjų dalių klupimas, (e) visos sustiprintos dalies klupimas.

1.16 pav. Plokščiųjų sustiprintų dalių klupumo formos (LST EN 1999-1-1:2008)

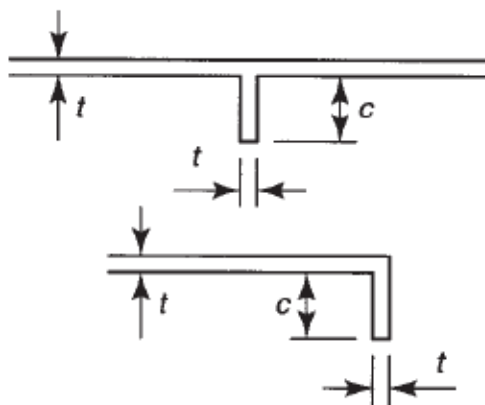
Labai mažos sąstandos praktiškai neatlieka jokio vaidmens elemento stabilumui, bet didesnės sąstandos jau yra veiksmingos. Yra daroma prielaida, jog sustandintoji plokštelė išklups 1 forma kartu su sąstanda, kai sąstanda, jeigu ją laikytume atskiru elementu, būtų bent jau proporcinga pusiau kompaktiškam elementui. Kitu atveju ji pati išklups anksčiau už standinamąjį elementą. Kitaip tariant, standinamasis elementas bus klasifikuojamas visiškai kompaktišku, jeigu ir standinantysis elementas bus visiškai kompaktiškas.

Vertinant papildomą suvaržymą elementų galuose, mokslininkas J. Rhodesas iš Glazgo universiteto (University of Glasgow) ištyrė, jog šaltai valcuoto plieno sija, su gniuždomos juostos galais užlenktais į skerspjūvio išorę, yra mažiau stabili už siją, kurios gniuždomos juostos galai užlenkti į skerspjūvio centro pusę. Kai kurios plieno projektavimo normos nurodo, jog užlankos į išorę turi būti ignoruojamos. Atsiradus galimybei aliumininis profiliuotus išgauti ekstruzijos būdu, su „stambesnėmis“ sąstandomis nei kad būtų

išgaunamos esant šaltai valcuotam plienui, sąstandų kryptis aliuminio projektavimo normose nėra apribota. Tinkamai parinkto storio stačiakampio formos sąstanda ar stormuo nebus nestabilus sukimui, todėl saugiai gali būti nukreiptas į skerspjūvio išorinę dalį. Tačiau nėra jokių duomenų, kurie nurodytų, kada į išorę nukreipta sąstanda būtų nebeefektyvi.

1.2.7. Standartinis sustandinimas

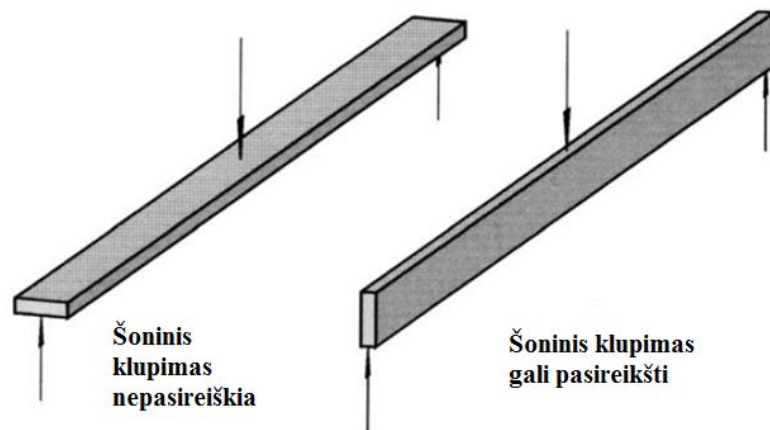
Standartinis sustandinimas apima paprastas vienpuses sąstandas su storiu t , lygiu standinamajai plokštei. Sąstandos aukštis c yra matuojamas nuo arčiausio pokštelės taško. Esant kitokiai sąstandos formai (pvz. stormeniui), teoriškai yra būtina pakeisti esančią sąstandą ekvivalentišką, kurios aukštis c ir storis t sudaro tikrajai sąstandos formai identišką inercijos momentą plokštelės atžvilgiu.



1.17 pav. Standartinis sustandinimas (Mazzolani, 2003)

1.2.8. Šoninis sukamasis klupumas ir jo skaičiavimo principas

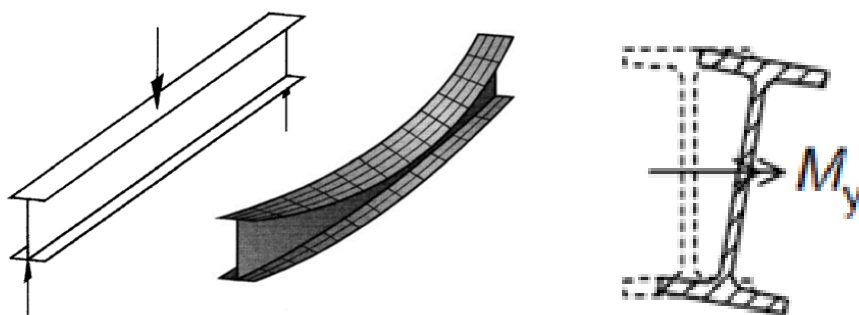
Lenkiamiems elementams gali pasireikšti bendrasis pastovumo netekimas. Šis pastovumo netekimas būna dviejų tipų: šoninis pastovumo netekimas ir šoninis-sukamasis pastovumo netekimas. Šoninis klupimas sijoje pasireiškia tada, kai skerspjūvio inercijos momentas apie pagrindinę ašį yra didesnis nei apie kitas ašis, ir sija yra lenkiama apie didesnę inercijos momentą turinčią ašį (žr. 1.18 pav.). Kvadratiniams ir apvaliems vamzdiniams profiliuochiams šoninis klupimas nepasireiškia. Kita sąlyga vykti šoniniam klupimui yra sąlyginai didelis sijos ilgis (arba ilgis tarp sijos šoninių įtvirtinimų).



1.18 pav. Skerspjūvių polinkis į šoninį klumpimą atsižvelgiant į inercijos momentą apie pagrindinę ir šalutinę ašis (Kissell, Ferry, 2002)

Vykstant bendrajam pastovumo netekimui, gniuždoma sijos dalis netenka šoninio pastovumo. Tuo tarpu tempimo jėgos tempiamoje sijos skerspjūvio dalyje linkusios išlaikyti tempiamą sijos juostą tiesiai. Visa tai pasireiškia sukimusi ir lenkimusi statmenai jėgos veikimo plokštumai. Ši skerspjūvio elgsena dažniausiai pasireiškia sijoms su mažu sukamuoju standumu ir sąlyginai nedideliu šoninio lenkimo standumu (Kissell, Ferry, 2002).

Sija, kurią veikia vienodas lenkimo momentas per visą ilgį, yra daug labiau linkusi išklupti, nei tokia pat sija, kurią veikia vienodo dydžio, bet priešingos krypties lenkimo momentai sijos galuose, kur lenkimo momentas sijos viduryje keičia ženklą (Kissell, Ferry, 2002).



1.19 pav. Šoninis I tipo sijos klumpumas. Pažymėtina tai, jog gniuždomos juostos šoninis pasislinkimas sukelia sijos susisukimą (Kissell, Ferry, 2002).

Pagal projektavimo normas EC9 simetrinių aliumininių profiliuotųjų atsparumas šoniniam sukamajam klumpumui randamas pagal formulę:

$$M_{b,LT} = \frac{\chi_{LT} \alpha W_{el,y} f_o}{\gamma_{M1}};$$

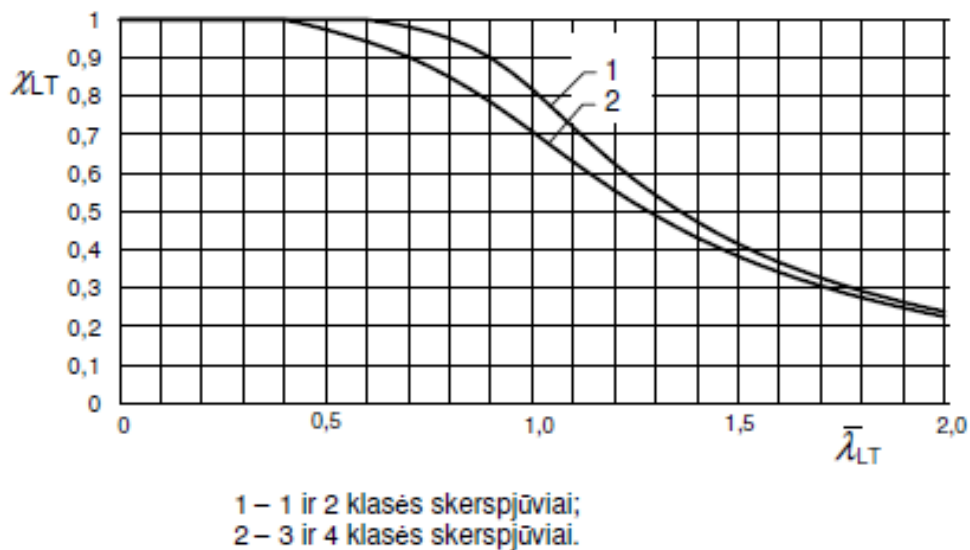
čia: χ_{LT} – pataisos dėl šoninio sukamojo klupumo koeficientas;
 α – formos koeficientas.

Pataisos dėl šoninio klupumo koeficientas randamas apskaičiavus kritinį momentą M_{cr} ir liaunumo parametą $\bar{\lambda}_{LT}$, bei panaudojant šoninio klupumo koeficiento nuo liaunumo parametro $\bar{\lambda}_{LT}$ sąryšio grafiką.

Kritinis momentas ir liaunumo parametras:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y \left(GK_v + \frac{\pi^2 EK_w}{L^2} \right)};$$

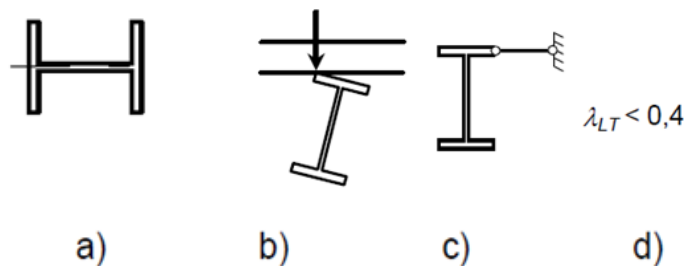
$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,y} f_o}{M_{cr}}};$$



1.20 pav. Pataisos dėl šoninio sukamojo klupumo koeficiento kitimo grafikas (LST EN 1999-1-1:2008)

Šoninis sukamasis klupumas nepasireiškia ir jo nereikia tikrinti esant tokioms aplinkybėms:

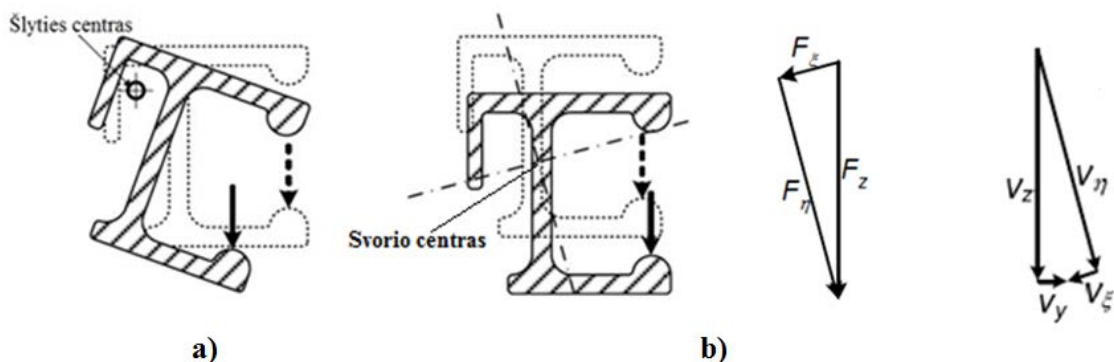
- elementas lenkiamas apie mažesnę atsparumo momentą turinčią pagrindinę ašį;
- elementas suvaržytas nuo sukimosi;
- gniuždomoji skerspjūvio juosta suvaržyta nuo pasisukimo per visą ilgį;
- liaunumo parametras $\bar{\lambda}_{LT}$ tarp šoninio sukimosi suvaržymų yra mažesnis nei 0,4.



1.21 pav. Aplinkybės, kada šoninis sukamasis klumpumas nepasireiškia (Hoglund, 2008)

1.2.9. Atvirųjų skerspjūvių sukamasis poveikis ir jo skaičiavimo principas

Ekstruzijos būdu gaminami profiliuočiai neretai turi tenkinti keletą paskirčių ar atlikti keletą funkcijų, todėl skerspjūviai būna sudėtingi, dažnu atveju nesimetriški. Tokiuose skerspjūviuose šlyties centras nesutampa su svorio centru. Atviriesiems skerspjūviams dažnu atveju šlyties centras yra už skerspjūvio ribų, todėl yra sunku apkrovą perduoti per šlyties centrą. Jeigu skerspjūvį veikia jėga, kuri yra pridėta už šlyties centro, sijoje atsiranda sukamasis momentas, kuris, jeigu sija nėra suvaržyta nuo sukimo, sukels sijos susisukimą (žr. 1.22 a pav.).



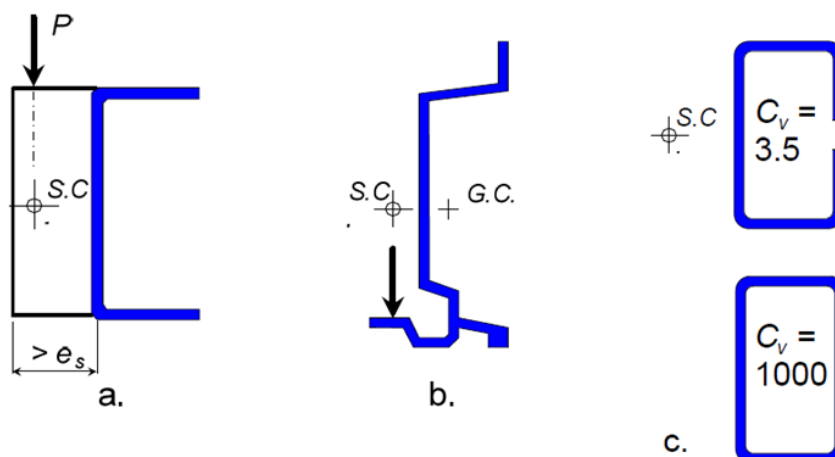
1.22 pav. Sukamas asimetris skerspjūvis bei principinis vertikalaus įlinkio nustatymo pavyzdys (Hoglund, 2008)

Skerspjūvio įlinkis veikiant sukimui bus didesnis, nei įlinkis nuo lenkiamojo momento. Veikiančioji jėga taip pat palinksta šonu, nes šoninis įlinkis, atsirandantis dėl sukimo, yra didesnis už įlinkį nuo lenkimo. Tikrasis vertikalusis įlinkis randamas taip:

- veikianti apkrova padalinama į dvi dedamąsias, veikiančias pagrindinių ašių kryptimi (žr. 1.22 b pav.);
- suskaičiuojamas įlinkis tų ašių kryptimis;
- suskaičiuojamas vertikalus įlinkis.

Plonasieniai atvirieji skerspjūviai pasižymi tuo, jog neretai jie turi nedidelį sukamąjį standumą, kuris yra labai pavojingas laikomajai galiai. Tokių profiliuotųjų naudojimas, kur juos gali veikti sukimas, turėtų būti vengiamas. Kai sukamoji skerspjūvių elgsena nepageidaujama, jos galima išvengti keletu būdų:

- pridėti sąstandų;
- pakeisti skerspjūvį tokiu, kur pridėta apkrova eitų per šlyties centrą;
- naudoti uždaruosius skerspjūvius.



čia: S.C. – šlyties centras

G.C. – svorio centras

C_v – sukamasis standumas (reliatyvus)

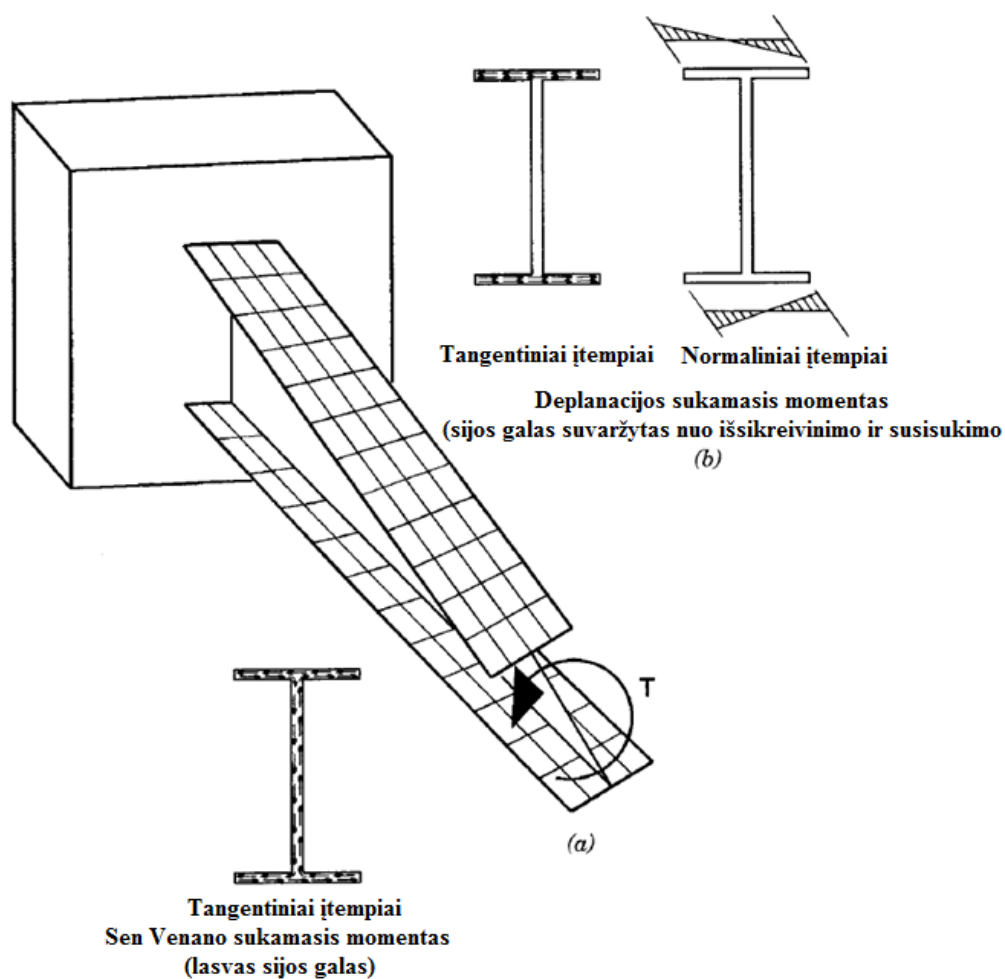
1.23 pav. Būdai išvengti skerspjūvių sukimo (Hoglund, 2008)

Kai sukimas yra suvaržytas, pavyzdžiui skerspjūvio galuose, skerspjūvyje atsiranda išilginiai įtempiai, kurių kryptis yra tokia pati kaip lenkimo sukeltų įtempių (1.24 pav. b.), todėl atliekant analizę juos reikėtų susumuoti. Skerspjūvis, kuris suprojektuotas pasiekti pilną lenkiamąją galią gali būti perkrautas, jeigu bus susumuoti suvaržytojo sukimo sukelti įtempiai. Projektuojant superpozicijos principu lenkimo, šlyties bei sukimo sukelti įtempiai neturėtų viršyti 0,2 % tikrosios tamprumo ribos f_o (Davies, 1991).

Esant sukimo veikiamiems skerspjūviams, kurių iškreipiamosios deformacijos ir deplanacijos yra nedidelės ir jų galima nepaisyti (laisvasis sijos galas), skaičiuotinė sukamojo momento (Sen Venano sukamosios galios) reikšmė T_{Ed} turi tenkinti nelygybę:

$$T_{Ed} \leq T_{Rd}, \text{ kur } T_{Rd} = \frac{W_{T,pl} f_o}{(\sqrt{3} \gamma_{M1})};$$

čia: $W_{T,pl}$ – plastinis sukimo modulis;



1.24 pav. Sukimo veikiamas elementas ir jame atsirandantys įtempiai (Kissell, Ferry, 2002).

Sukamiems elementams, kurių iškreipiamosios deformacijos galima nepaisyti, bet būtina atsižvelgti į deplanaciją, turi būti apskaičiuojamas visuminis sukamasis momentas kaip šių dviejų vidinių efektų suma (Kissell, Ferry, 2002):

- Šlyjamųjų įtempių $\tau_{t,Ed}$ dėl vidinio Sen Venano sukamojo momento $T_{t,Ed}$;
- Normalinių įtempių $\sigma_{w,Ed}$ ir tangentialinių įtempių $\tau_{w,Ed}$ dėl deplanacijos sukamojo momento $T_{w,Ed}$;

Taip pat turi būti patikrinta Mizeso takumo kriterijaus sąlygą pagal šią išraišką:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right) \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right) + 3 \left(\frac{\tau_{Ed}}{f_o / \gamma_{M1}} \right)^2 \leq C$$

čia: $C = 1,2$.

Jeigu veikianti jėga eina per šlyties centrą, tai jokio sukamojo momento nesukelia.

1.2.10. Aliumininių profiliuotųjų lenkiamosios bei šlyjamosios galios tikrinimo principas

Aliumininėse konstrukcijose, kaip ir plieninėse, taikoma plokščiųjų pjūvių hipotezė. Skerspjūvio deformacijos kinta tiesiškai tolstant nuo skerspjūvio neutraliosios ašies, nesvarbu, koks lenkimo momentas pridėtas. Projektuojant lenkiamus aliumininis profiliuotuosius pagal projektavimo normas EC9 turi būti tenkinama lenkiamosios galios sąlyga:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1;$$

čia: M_{Rd} – skerspjūvio lenkiamoji galia;

M_{Ed} – skerspjūvį veikiantis lenkiamasis momentas.

Aliumininių profiliuotųjų lenkiamoji galia yra susieta su skerspjūvių geometriniu forma, kuri skaičiavimuose įvertinama skerspjūvių klasifikavimu. Skerspjūvių formos poveikis jų elgsenai yra įvertinama elemento skerspjūvio formos koeficientu α_y , į kurį taip pat įtraukiamas, jeigu yra, suvirinimo HAZ poveikis. Skerspjūvio lenkiamoji galia apskaičiuojama pagal formulę, atsižvelgiant į skerspjūvio formą koeficientu α_y :

$$M_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} M_{u,Rd} = \frac{W_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad - \text{gryname skerspjūvyje.} \\ M_{c,Rd} = \frac{\alpha_y \cdot W_{el} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} \quad - \text{bet kuriame skerspjūvyje.} \end{array} \right.$$

Čia: W_{net} – grynojo skerspjūvio tamprumo modulis, atsižvelgiant į skyles ir HAZ suminkštėjimą, jeigu yra virinta. Pastarasis sumažinimas apskaičiuojamas vartojant sumažintąjį storį $\rho_{u, haz} t$.

W_{el} – suminio skerspjūvio tamprusis atsparumo momentas.

α_y – formos koeficientas.

Skerspjūvio formos koeficiento α_y nustatymas bei saugumo koeficientas γ_{M1} yra detalai aprašyti projektavimo normose EC9.

Dažnu atveju, vykstant elemento lenkimui, kartu pasireiškia ir skersinė jėga. Ši jėga neturi būti didesnė už skerspjūvio šlyjamąją galią:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1;$$

čia: V_{Rd} – skerspjūvio šlyjamoji galia;

V_{Ed} – skerspjūvyje veikianti skersinė jėga.

Šķerspjūvio atspardums šķersinei jēgai randamas pagal formuļē:

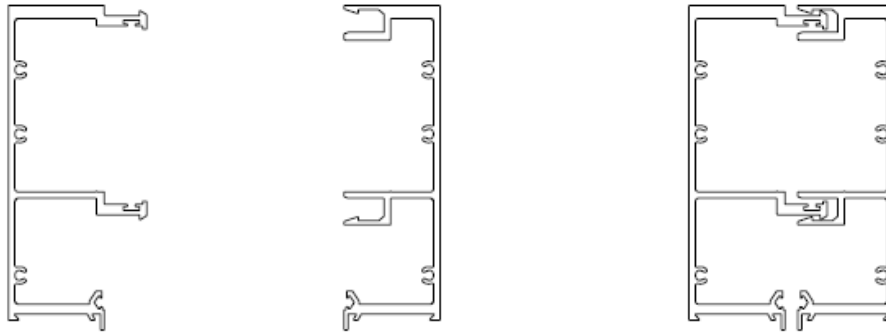
$$V_{Rd} = A_v \cdot \frac{f_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}};$$

čia: A_v – šķerspjūvio šlyjamasis plotas.

1.3. Trumpa keletos ankstesnių mokslinių tyrimų, susijusių su aliumininių profiliuotųjų elgsena, apžvalga

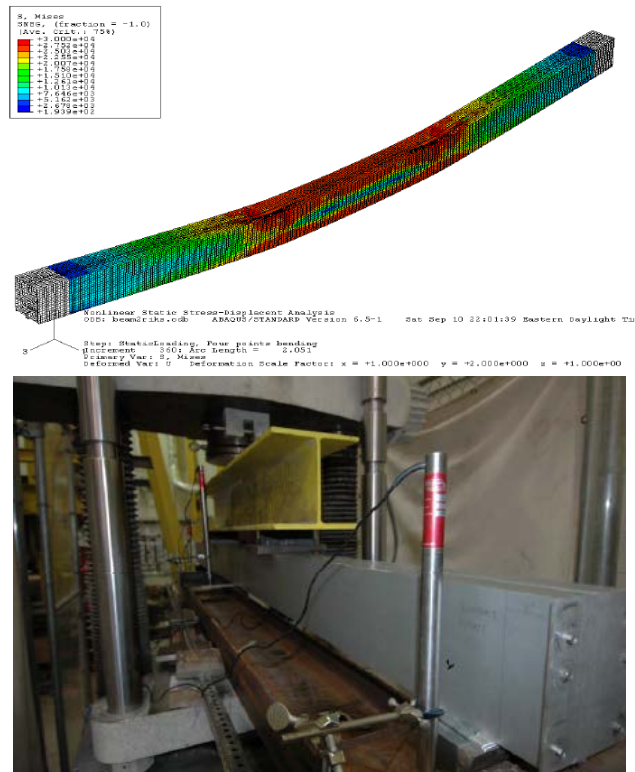
1.3.1. Y. Wang'o atlikta dviejų netipinių aliumininių formų sistemos, naudojamos stiklo fasadų konstrukcijose, elgsenos analizė (Wang, 2006)

Yongbing'as Wang'as (Wang, 2006) savo moksliniame darbe nagrinėjo sujungtų dviejų netipinių aliumininių profiliuotųjų (žr. 1.25 pav.), kurie yra naudojami stiklo fasadų konstrukcijose, bendrą tarpusavio elgseną veikiant lenkimui. Jo tyrimo objektas buvo du E - tipo ekstruzijos būdu išgauti aliumininiai profiliuotieji, kurie sujungti tarpusavyje ir sudaro daugmaž simetrišką skerspjūvį.



1.25 pav. Du netipiniai aliumininiai profiliuotieji ir jų sąveika, kuri buvo tiriama darbe (Wang, 2006)

Wang'as skerspjūvius savo darbe tyrė trimis metodais: analitiniais skaičiavimais, taikydamas mažiausio ir pilnutinio lenkimo momentų teorijas, baigtinių elementų metodu naudodamas „Abaqus FEA“ programinį paketą bei atlikdamas eksperimentinius tyrimus (žr. 1.26 pav.).



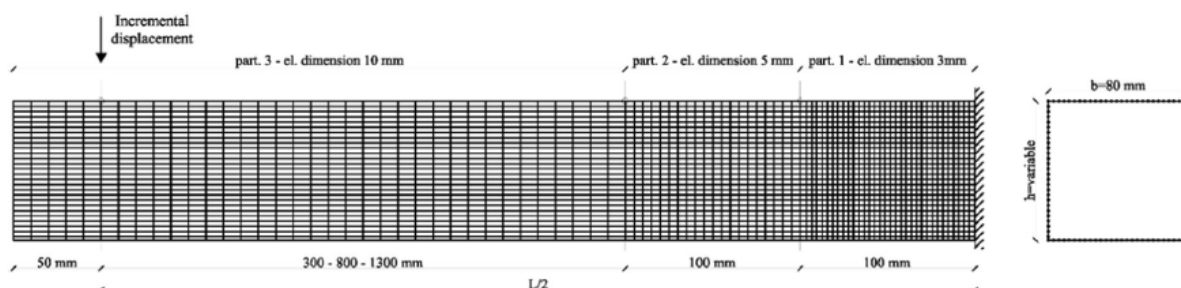
1.26 pav. Baigtinių elementų metodu atliekama sujungtų skerspjuvių analizė ir eksperimentinis bandymas (Wang, 2006)

Gautas lenkiamasis galias palygino tarpusavyje ir padarė tokias išvadas:

- BE metodu atliktos analizės galutiniai rezultatai rodo didesnę skerspjuvio stiprumą ir daug tiksliau koreliuoja su eksperimentinių bandymų rezultatais, nei su analitiniu būdu gautais rezultatais.
- Skerspjuvių lenkiamoji galia, apskaičiuota analitiniu būdu naudojant fundamentalias formules, yra labai konservatyvi, lyginant su baigtinių elementų analize bei eksperimentiniais tyrimais.
- Lyginant bendrosios lenkiamosios galios analitinius skaičiavimus su BE modeliu ir eksperimentiniu tyrimu, šis analitinių skaičiavimų metodas daug labiau atspindi tikrąją kompleksiskų plonasienių elementų elgseną, nei mažiausios lenkiamosios galios analitiniai skaičiavimai.
- BE metodu, naudojant kompiuterinius programinius paketus, galima gauti gana tikslius rezultatus, todėl šio metodo taikymas yra efektyvus, sutaupant eksperimento atlikimo sąnaudas.
- Taikyti bendrosios lenkiamosios galios analitinius metodus yra gana konservatyvus alternatyvus metodas skaičiuojant surenkamas plonasienes konstrukcijas, nors jame ir nėra išskirtų jokių specifinių formulių, skirtų būtent surenkamiems skerspjuviams.

1.3.2. P. Castaldo, E. Nistri'o ir V. Piluso atlikta lenkiamų RHS vamzdinių sijų stipruminės elgsenos parametrinė analizė (Castaldo et al., 2017)

Paolo Castaldo ir kitų autorių atliktame darbe parametriniu būdu analizuojami lenkimo veikiami RHS vamzdiniai profiliuočiai, pagaminti iš EN-AW 6082 T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinio. Jų darbo tikslas buvo skaitiškai nustatyti stipruminę RHS sijų elgseną, veikiant netolygiam lenkimui. Ši analizė buvo atliekama naudojant „Abaqus FEA“ programinį paketą ir naudojant skirtingų geometrinių parametrų skerspjūvius (žr. 1.27 pav.). Ši parametrinė analizė apėmė skirtingus juostų liaunumus, juostų – sienelių liaunumo santykį bei lenkimo momento elemente gradientą. Ši analizė buvo atliekama remiantis euro kodu 9 ir grindžiama Rambergo - Osgudo įtempių ir deformacijų priklausomybės modeliu tiriant šių bedimensinių parametrų poveikį skerspjūvio stiprumui.



1.27 pav. Analizei atlikti naudojama skerspjūvių schema (Castaldo et al., 2017)

Buvo išanalizuoti 252 baigtinių elementų modeliai su skirtingais geometriniais rodikliais. Atlikus analizes buvo pateikti empirinių parametrų sąryšiai, skirti nustatyti RHS skerspjūvių didžiausiems lenkiamiesiems stiprumams bei sukamosioms geboms, atsižvelgiant į vietinį skerspjūvių klupumą veikiant netolygiam lenkimui. Taip pat padaryta išvada, jog maksimalus lenkiamasis momentas M_{max} , kaip ir sukamoji geba R visada sumažėja, didinant sienelės liaunio parametro λ reikšmes, priklausančias nuo parametro α bei elemento pločio bei storio santykio L/b .

1.3.3. J. Mennink'o atlikta ekstruzijos būdu išgautų aliumininių skerspjūvių stabilumo analizė, nustatant jų elgseną veikiant lenkimui bei netolygiam gniuždymui (Mennink, 2002)

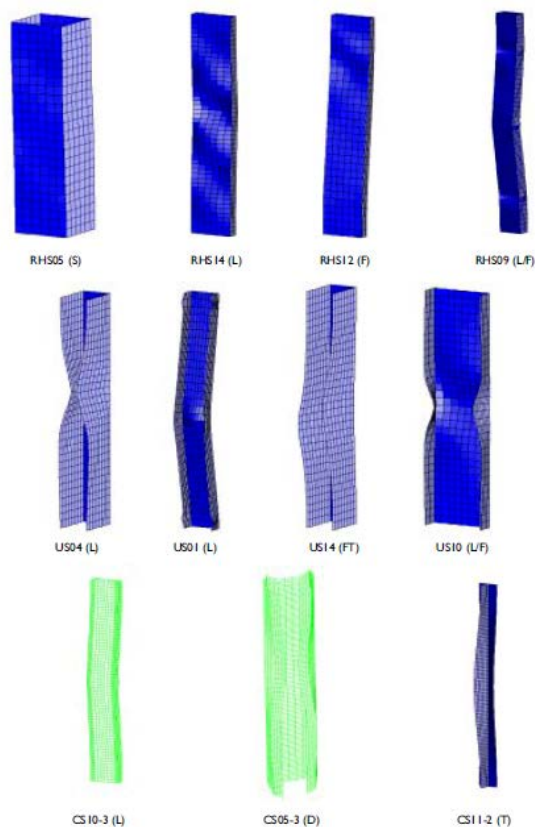
Jeroen'as Mennink'as savo 6 metus užsitęsusiame darbe analizavo ekstruzijos būdu išgautų įvairių formų profiliuočių elgseną. Analizė buvo atliekama programiniu paketu modeliuojant skerspjūvius baigtiniais elementais. Ši analizė buvo lyginama su Eindhoveno technologijos universiteto (Eindhoven University of Technology) atliktais tokių pat profiliuočių laboratoriniais bandymais, kurių metu buvo nustatomas lenkiamų bei netolygiai

gniuždomų plonasienių elementų vietinio, iškreipiamojo, lenkiamojo ir lenkiamojo-sukamojo pastovumo netekimai, bei jų sąveika. Eksperimentuojama buvo su kvadratiniais SHS vamzdžiais, U formos ir kompleksinės formos profiliuočiais, atsižvelgiant į skerspjūvių geometrinius netobulumus, kraštines sąlygas, ir medžiagų rodiklius (žr. 1.28 pav.).



1.28 pav. Eindhoveno technologijos universitete atliekami netolygiai gniuždomų profiliuočių bandymai (Mennink, 2002)

Mennink'as šiame darbe remdamasis Eindhoveno technologijos universiteto atliktais eksperimentiniais tyrimais bandė susikalibruoti baigtinių elementų modelius taip, jog jie kuo tiksliau nustatytų labiausiai tikėtiną ekstruzijos būdu išgautų plonasienių profiliuočių elgseną atsižvelgiant į vietinį ir iškreipiamąjį stabilumo netekimus ir taip galėtų lengviau prognozuoti kitų formų ir matmenų profiliuočių elgseną.

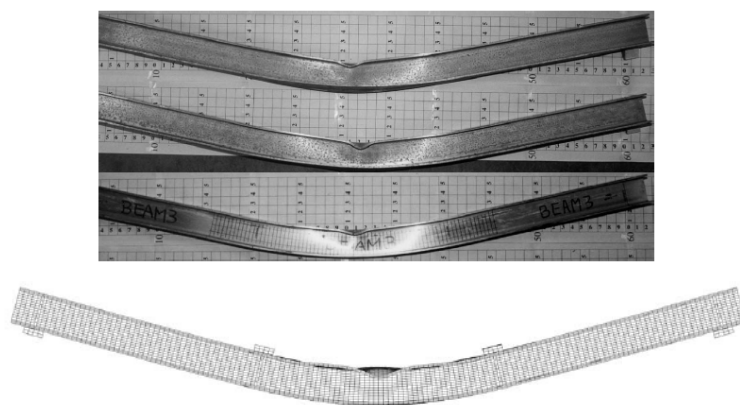


1.29 pav. Klupdomų skerspjūvių deformacijos klupimo metu, gautos su baigtinių elementų modeliais. (Mennink, 2002)

Gautomis išvalgomis buvo sukurtas tikimybinis modelis, kuriuo nustatyta įvairių įprastai naudojamų formų aliumininių profiliuotųjų laikomoji galia, atsižvelgiant į vietinio klupimo poveikį.

1.3.4. Y. Kim'o atlikta lenkiamų aliumininių profiliuotųjų analizė (Yongwook, 2003)

Yongwook'as Kim'as atliko darbą, kuriame skaitiniu būdu ir eksperimentiniais bandymais tyrė lenkiamus aliumininius profiliuotuosius, kurie suvaržyti nuo šoninio pastovumo netekimo. Taip pat tyrė lenkiamų kintamo storio simetriškų I formos bei simetriškų sudėtingos formos skerspjūvių elgseną, didelį dėmesį skirdamas „saugaus“ dalinio patikimumo koeficiento nustatymui. Atlikdamas parametrinę analizę baigtinių elementų metodu ir ją pagrįsdamas bandymais, autorius norėjo patikslinti amerikiečių nacionalines aliumininių skerspjūvių projektavimo normas „AA Specification“.

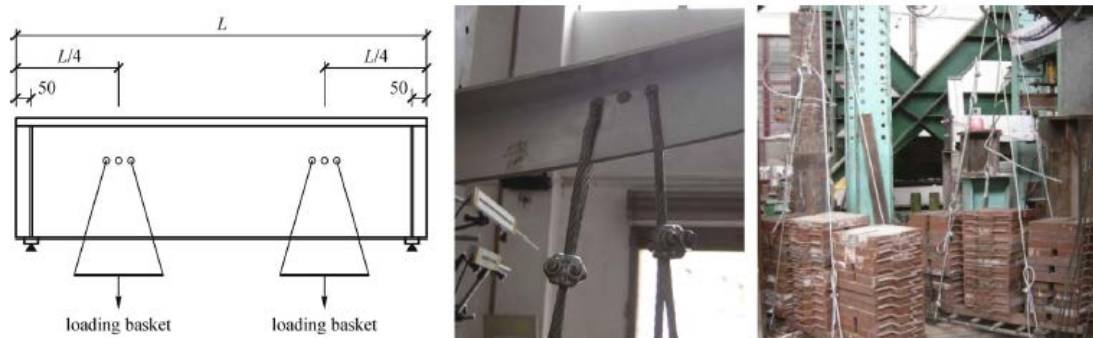


1.30 pav. Atliekami I formos skerspjūvių bandymai bei sukurtas baigtinių elementų modelis. (Kim, 2003)

Atlikęs šį darbą mokslininkas nustatė, jog yra tikslinga eksperimentinius bandymus pakeisti skaitiniais metodais (BE modeliais), nes jais gauti rezultatai nedaug skiriasi nuo eksperimentinių rezultatų. Taip galima atlikti daug daugiau „virtualių eksperimentų“ sumažinant tiek pačių tyrimų kainą, tiek laiko sąnaudas. Taip pat autorius teigia, jog naudoti vienodą dalinį saugumo koeficientą lydiniams, kaip numato amerikiečių nacionalinės aliumininių skerspjūvių projektavimo normos, kurie turi dideles takumo ir stiprumo stiprio vertes yra per daug konservatyvu. Todėl autorius pasiūlė taikyti skirtingus dalinius patikimumo koeficientus skirtingiems takumo stipriams, bet išlaikant vienodą koeficientą stiprumo ribai.

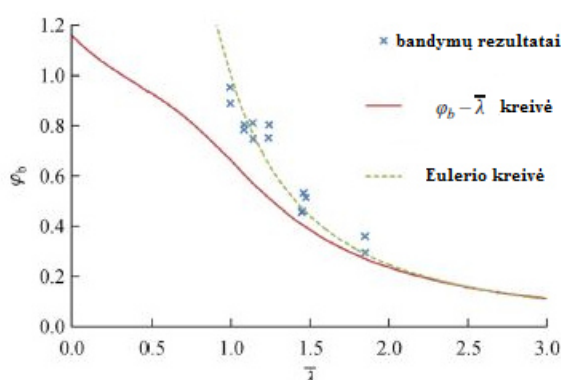
1.3.5. Z. Xiong'o atlikta lenkiamų aliumininių profiliuotųjų šoninio – sukamojo klupumo analizė (Xiong, 2015)

Zhe Xiong'as atliko šoninio – sukamojo klupumo analizę sijoms, pagamintoms iš aliuminio lydinio (Xiong, 2015). Autorius atliko tipinių simetriškų I, T ir C formos sijų trijų taškų lenkimo laboratorinius bandymus, taip pat skaitinę BE šoninio - sukamojo klupumo analizę (žr. 1.31 pav.).



1.31 pav. Bandymo atlikimo schema bei bendras vaizdas. (Xiong, 2015)

Atlikę laboratorinius bandymus, kuriuose visiems bandiniams pasireiškė šoninis - sukamasis pastovumo netekimas, ištyrė, jog skerspjuvio sąlyginis liaunis bei apkrovos pridėties vieta nulemia skerspjuvio šoninės – sukamosios galios dydį. Kuo mažesnis sąlyginis liaunis – tuo didesnė klumpamoji galia. O kuo aukščiau yra apkrovos pridėties vieta skerspjuvyje, tuo greičiau pasireiškia skerspjuvio pastovumo netekimas, nes apkrova sukelia šoninį pasisukimą. Iš atliktų laboratorinių bandymų ir 14 skaitinių eksperimentų autorius išsiaiškino, jog sukurti BE modeliai gana tiksliai atspindi laboratorijoje tirtų skerspjuvių elgseną. Įtraukiant skerspjuvių geometrinių netobulumų poveikį, medžiagiškumą bei apkrovos pridėties schemų poveikį, autorius BE metodu ištyrė dar 480 skirtingų skerspjuvių ir sudarė šoninio – sukamojo klumpumo koeficiento bei sąlyginio liaunio sąryšio kreivę (žr. 1.32 pav.).



1.32 pav. Šoninio sukamojo klumpumo koeficiento sąryšio nuo sąlyginio liaunio kreivė (Xiong, 2015)

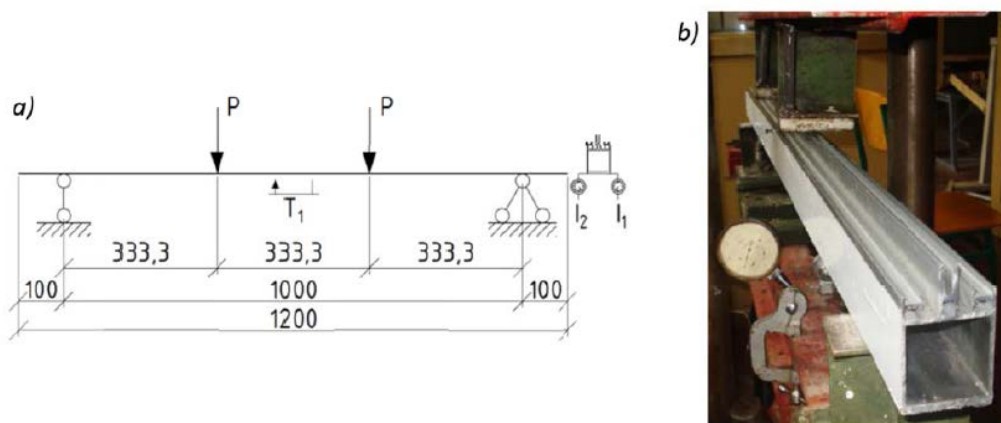
1.3.6. Kiti atlikti tyrimai

Vincentas Piluso, Alessandro Pisapia bei kitų autorių kolektyvas skaitiniais metodais parametriškai tyrė netolygaus lenkimo veikiamų dvitėjinių sijų, pagamintų iš nedidelę takumo ribą ir didelį stiprį turinčių aliumininių lydinių (T4 ir T5 terminio apdirbimo lydiniai) lenkiamąją galią bei sukamąją gebą (Piluso et al., 2019).

Mei-Ni Su, Benas Young'as ir Lerojus Gardneris analizavo literatūroje randamus anksčiau atliktus laboratorinius tyrimus ir kitą medžiagą, susijusią su gniuždomais bei lenkiamais kvadratiniais bei stačiakampiais (SHS ir RHS) vamzdžiais, I formos profiliais, loviais bei kampuočiais. Jie išanalizavę profiliuotųjų elgseną nustatė ir pasiūlė naujas, tikslesnes skerspjuvių dalių liaunio ribas, pagal kurias europinėse projektavimo normose EC9 yra klasifikuojami skerspjuviai. (Su et al. 2017).

Taip pat yra darbų, kurie iš pirminės pažiūros atrodytų jau nebėra aktualūs, bet daro didelį poveikį aliumininių profiliuotųjų elgsenos ir įvairių projektavimo normų suvokimui

bei šių normų tobulinimui. Vienas tokių darbų yra A. Hirkovskio, D. Serdjukso ir kitų autorių laikančiųjų aliumininių konstrukcijų elgsenos analizė (Хирковский, Сердюк и Горемыкин 2015). Šiame moksliniame darbe buvo tiriamos lenkimo bei lenkimo ir gniuždymo veikiamos dvitėjinės ir simetriškos uždarojo skerspjūvio sijos (žr. 1.33 pav.). Sijos buvo analizuojamos analitiniais metodais pagal EN 1999-1-1 bei SNiP 2.03.06-85 projektavimo normas bei laboratoriniais bandymais. Rezultatai buvo lyginami tiek tarpusavyje pagal abi projektavimo metodikas, tiek su eksperimentiniais bandymais, bei atsižvelgiant į gautus rezultatus, buvo sukurti skaitiniai modeliai ir atliekama parametrinė analizė, siekiant rasti optimalius aliumininės kupolo arkos matmenis.



1.33 pav. Keturių taškų lenkimo bandymo schema ir bendras vaizdas. (Хирковский, Сердюк и Горемыкин, 2015)

Be anksčiau aprašytų mokslininkų darbų, galima paminėti F. Mazzolani, kurio moksliniai tyrimai įdėjo didelį indėlį aliumininių konstrukcijų eurokodo (EC9) sukūrimui, bet yra daug daugiau ne ką mažiau svarbių darbų, kurie būtų verti paminėjimo, tačiau visų paminėti nėra galimybės.

1.4. Pirmos dalies apibendrinimas

Visiškai suvokti aliumininių skerspjūvių elgseną, lyginant su plieniniais skerspjūviais, yra daug sudėtingiau dėl didelės aliumininių skerspjūvių bei pačių lydinių įvairovės su skirtingomis įtempių ir deformacijų priklausomybėmis. Išsamus aliumininių sijų elgsenos įvertinimas, dėl galybės skirtingų aliuminio lydinių savybių bei skerspjūvių formų gausos reikalauja didelio kiekio eksperimentinių tyrimų. Tačiau pagrindiniais tyrimo objektais paprastai tampa tipiniai I formos skerspjūviai. (Piluso et al., 2019). Todėl ir pats eurokodas yra paremtas tipinių, dažnu atveju simetriškų profiliuotųjų eksperimentiniais rezultatais, kurie ne visada gali atspindėti kitokių formų profiliuotųjų elgseną.

Lenkiamosios galios nustatymas aliuminio profiliuochiams yra sudėtingas ne tik dėl skerspjūvių įvairovės, bet ir dėl didžiulio skirtingomis mechaninėmis savybėmis pasižyminčių lydinių skaičiaus. Taip pat medžiagos sustiprėjimas atlieka svarbų vaidmenį ir sukamajai gebai (Piluso et al. 2019). Eurokodo taikymas netipinių formų bei skirtingų elementų storių ekstruzijos būdu išgautiems profiliuochiams, kurie dar pasižymi įvairiomis mechaninėmis savybėmis, yra labai komplikotas bei reikalaujantis priimti nemažai eurokode pateiktų, bet iki galo neapibrėžtų rekomendacijų, dėl ko analitiniu būdu gauti rezultatai gali labai daug skirtis nuo tikrosios elementų elgsenos.

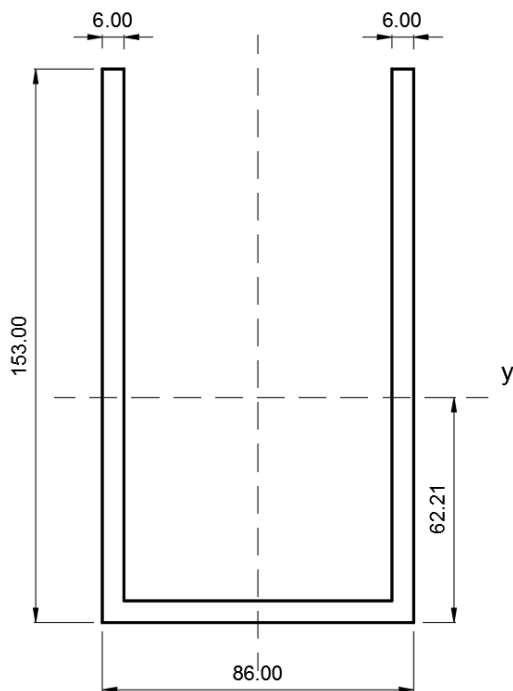
Skerspjūvių modeliavimas baigtinių elementų metodais gali kompensuoti atsiradusį žinių trūkumą dėl riboto skaičiaus atliktų eksperimentinių tyrimų. Tačiau dauguma mokslininkų yra modeliavę tik lenkimo veikiamus I, H, L bei T formos atvirose skerspjūvius. Tad šiame darbe bus modeliuojami įvairesnės formos skerspjūviai ir analizuojama jų elgsena atsižvelgiant į įvairius faktorius bei lyginama su LST EN-1999-1-1 pateikta analitinių skaičiavimų metodika ir rekomendacijomis.

2. TIRIAMOJI DALIS

2.1. Pirmasis skerspjūvis

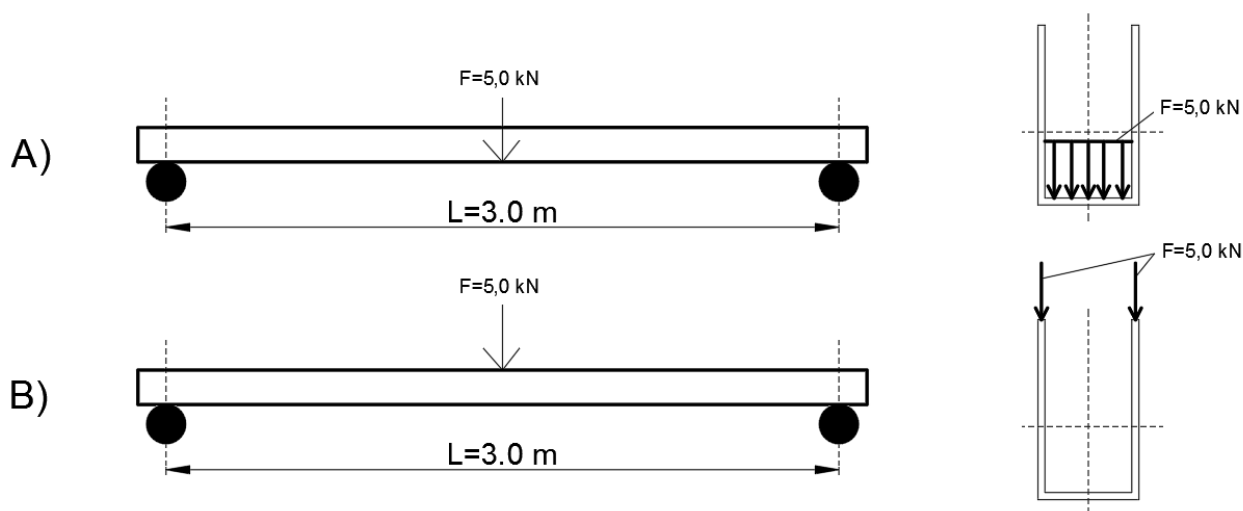
2.1.1. Skerspjūvio duomenys, schema ir geometrija baigtinių elementų modelyje

Norint įsitikinti analitinių skaičiavimų algoritmo teisingumu, sudarytu pagal LST EN 1999-1-1:2008 standartą, sukuriamas pirmojo skerspjūvio baigtinių elementų (toliau BE) modelis. Šis modelis yra sudaromas su „Ansys 2019 R2“ (toliau „Ansys“) programiniu paketu. Pirmasis skerspjūvis yra pagamintas iš EN-AW 6082 T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinio. Lydinio 0,2 % tikrosios tamprumo ribos reikšmė $f_0 = 255$ MPa, stiprumo riba $f_u = 300$ MPa. Sijai naudojamas 4 klasės U formos 153x86x6 lovinis profiliuotis su aukšta sienute (žr. 2.1 pav.).



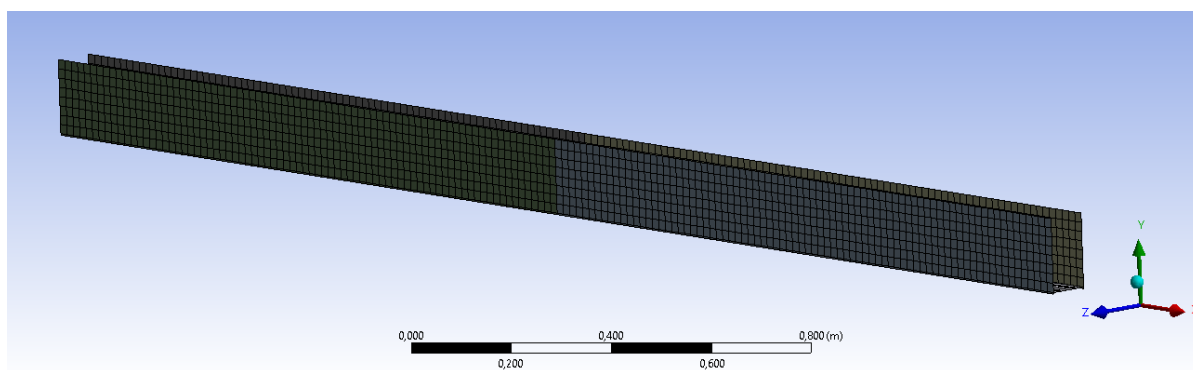
2.1 pav. Lovinio profiliuoties matmenys

BE modelyje profiliuotis apkraunamas kaip laisvai atremta 3,0 metrų ilgio sija su vertikalia 5,0 kN dydžio apkrova viduryje tarpatramio. Kitaip tariant, atliekamas trijų taškų lenkimo bandymas. Nagrinėjami du apkrovos pridėjimo variantai: A variantas – kai apkrova pridėta per sijos apatinės lentynos plotį (žr. 2.2 pav. A); B variantas – apkrova pridėta ant skerspjūvio sienučių viršaus (žr. 2.2 pav. B). Taip pat sija suvaržoma nuo šoninio pasislinkimo, taip išvengiant šoninio-sukamojo klupumo ir supaprastinant tolesnius analitinius skaičiavimus.



2.2 pav. Sijos apkrovimo schemas

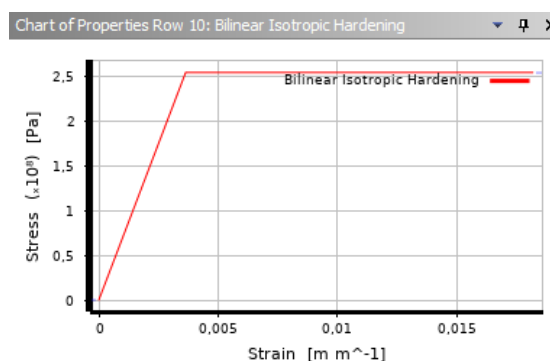
Programiniame pakete „Ansys“ sijai priskiriamas 4-taškų SHELL181 kevalinis tinkelis su 6 laisvės laipsniais taškuose. Tinklelio dydis priskiriamas automatiškai, programai atsižvelgiant į skerspjūvio matmenis ir elementų storius (žr. 2.3 pav.). Rezultatams palyginti atliekamos tiesinė ir netiesinė analizės. Analizėms atlikti į programą įvedami reikiami medžiagiškumo duomenys, kurie pateikti 1 lentelėje. Netiesiniam skaičiavimui naudojamas idealiai tampriai-plastinis medžiagos modelis (Prandtlio modelis), kuris pateiktas 2.4 pav. Netiesinei analizei atlikti pasirenkamas apkrovos kontrolės Newtono-Raphsono metodas, didinant apkrovą kas 5,0 kN. Programiniu paketu atliekamos tiek tiesinės, tiek netiesinės klupumo analizės ir gaunami atitinkami klupumo modų koeficientai, kurie charakterizuoja labiausiai tikėtiną klupumo pavidalą prie mažiausios apkrovos. Iš šių klupumo koeficientų apsiskaičiuojama kritinė apkrova, kai sija netenka pastovumo. Esant 4 klasės skerspjūviui, kuris suvaržytas nuo šoninio pasislinkimo sijos viduryje, tikėtina, jog pasireikš vietinis pastovumo netekimas.



2.3 pav. Tinkleliu sudalintas pirmasis skerspjūvis iš „Ansys“ aplinkos

1 lentelė. Medžiagos rodikliai, kurie suvesti „Ansys“ programiniame pakete

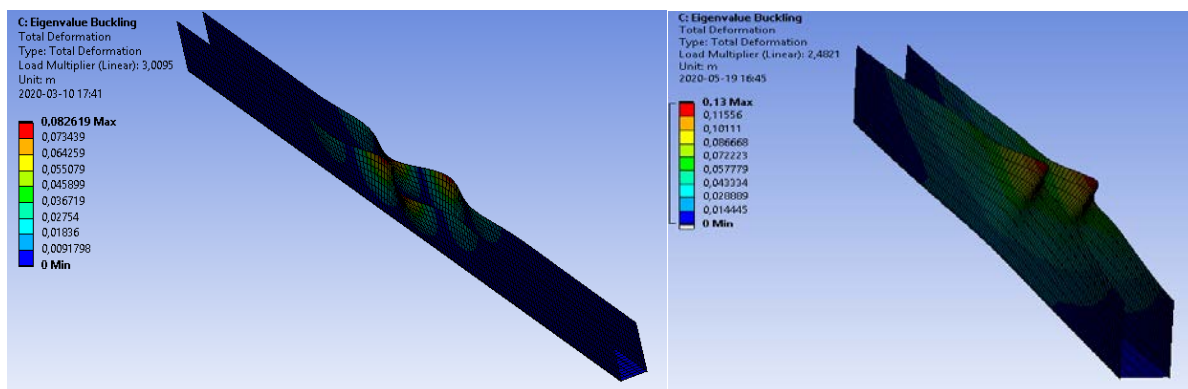
Tamprumo modulis	70 GPa
Puasono koeficientas	0,3
Tempiamasis takumo stipris	255 MPa
Gniuždomasis takumo stipris	255 MPa
Tempiamoji stiprumo riba	300 MPa
Tankis	2770 kg/m ³



2.4 pav. Idealiai tampriai-plastinė medžiagos kreivė „Ansys“ programiniame pakete. ($f_0 = 255$ MPa)

2.1.2. Skaičiavimų, atliktų „Ansys“ programiniu paketu, rezultatai

Atlikus tiesinę analizę pastebėta, kad skerspjūvyje abiem apkrovimo variantais pasireiškia vietinis pastovumo netekimas. Tiesinės analizės pirmosios pastovumo netekimo modos pateikiamos 2.5 pav. Gautas klupumo koeficientas nuo 5,0 kN apkrovos, kai apkrova pridėta į skerspjūvio lentyną, yra 3,0095. Iš šio koeficiento apskaičiuota sijos lenkiamoji galia $M_{Rd} = 11,29$ kNm. To paties apkrovimo varianto antroji pastovumo netekimo moda nuo pirmosios modos savo forma nesiskiria, tik jos klupimo koeficientas yra nežymiai didesnis — 3,0305. Kai apkrova pridėta ant skerspjūvio sienučių viršaus, gautas klupumo koeficientas yra 2,4821. Iš šio koeficiento apskaičiuota sijos lenkiamoji galia $M_{Rd} = 9,31$ kNm. Šio apkrovimo antrosios klupumo modos pavidalas toks pat kaip A apkrovimo varianto, o klupumo koeficientas yra 2,7793.



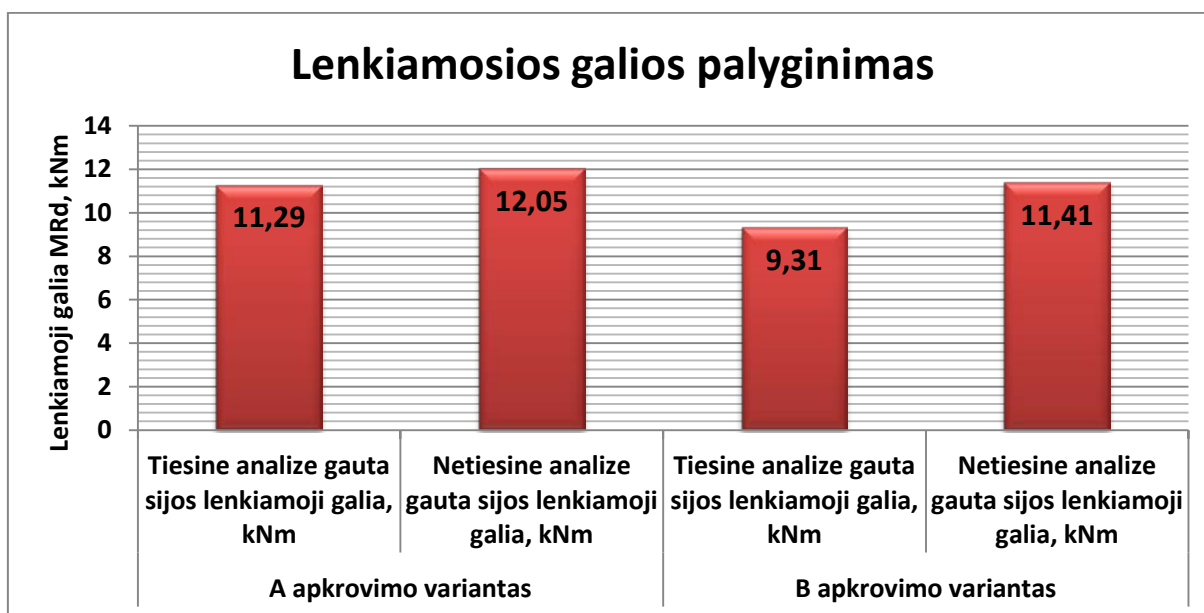
A apkrovimo variantas

B apkrovimo variantas

2.5 pav. Pirmojo skerspjūvio A ir B apkrovimo variantų pirmosios pastovumo netekimo modos

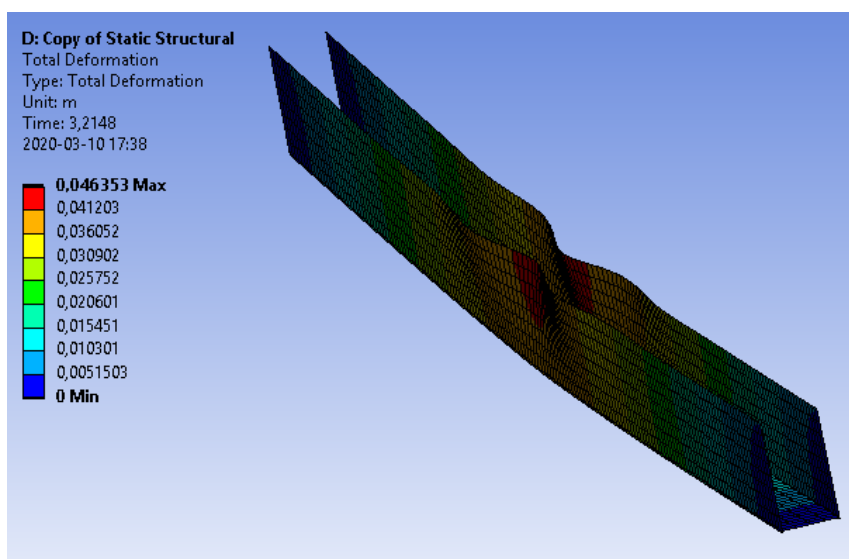
Atlikus netiesinę analizę, gauti šiek tiek didesni klupumo koeficientas, kurie lygūs: A apkrovimo variantui — 3,2148 (+6,08 % nuo tiesine analize gauto koeficiento); B apkrovimo variantui – 3,0439 (+22,63 % nuo tiesine analize gauto koeficiento). Pagal šį koeficientą apskaičiuota sijos lenkiamoji galia: A apkrovimo varianto - $M_{Rd} = 12,05$ kNm; B apkrovimo varianto - $M_{Rd} = 11,41$ kNm.

Lyginant tarpusavyje A ir B apkrovimo variantus matyti, jog tiesinės analizės atveju B apkrovimo varianto sijos lenkiamoji galia sumažėjo -17,54 % lyginant su A apkrovimo varianto sija, o netiesinės analizės atveju sumažėjo -5,31 %.



2.6 pav. Tiesine ir netiesine analizėmis gautų lenkiamųjų galių palyginimo diagrama

Iš netiesinės analizės A ir B apkrovimo variantų pirmųjų pastovumo netekimo modų pastebima, jog elemente pasireiškė identiškas tiesinio skaičiavimo A apkrovimo varianto vietinio pastovumo netekimas (žr. 2.7 pav.).



2.7 pav. Netiesiniais skaičiavimais gautas klupumo pavidalas

2.1.3. Pirmojo skerspjūvio analitiniai skaičiavimai pagal LST EN 1999-1-1

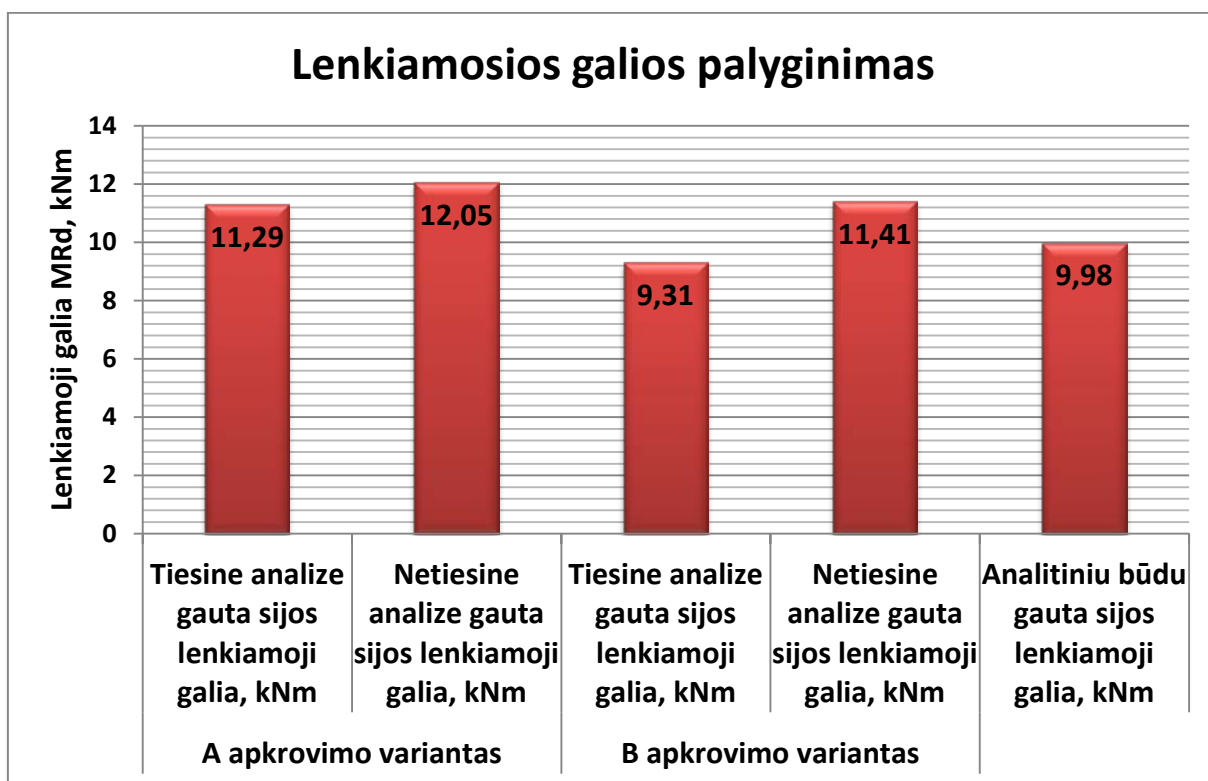
Kad būtų galima palyginti programiniu paketu „Ansys“ gautus rezultatus su analitiniais skaičiavimais, visų pirma reikia susirasti 4 klasės skerspjūvio efektyvųjį atsparumo momentą apie lenkiamojo momento veikiamą ašį. Šiam reikalui naudojamos LST EN 1999-1-1:2007 J.4 ir J.5 prieduose (A priedas) pateikiamos atvirųjų plonasienių skerspjūvių konstantų skaičiavimo išraiškos.

Esant 4 klasės skerspjūviui, kuriame pasireiškia vietinis pastovumo netekimas, reikalinga surasti efektyvius storius gniuždomiems elementams. Jiems surasti naudojamos LST EN 1999-1-1:2007 6.1.4.3 bei 6.1.5 skyriuose pateikiamos išraiškos. Pirmiausia, naudojantis A priede pateiktomis išraiškomis, surandama skerspjūvio neutralioji ašis y_0 , neatsižvelgiant į skerspjūvio klasę. Esant tiesiškam įtempių pasiskirstymui skerspjūvio plokštumoje ir turint pradinę neutraliąją ašį y_0 , pagal tiesišką įtempių pasiskirstymą ir 6.1.4.3 skyrelyje pateikiamas liaunio parametro apskaičiavo formules, surandami skerspjūvio dalių parametrai β .

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{4,30611 \cdot 10^{-5} \cdot 255 \cdot 10^6}{1,1} = 9,9823 \text{ kNm};$$

2.1.4. „Ansys“ ir analitinių skaičiavimų palyginimas

Iš analitinių skaičiavimų nustatyta sijos lenkiamoji galia $M_{Rd} = 9,98 \text{ kNm}$. Programiniu paketu „Ansys“ atliktais skaičiavimais gauti tiesinės ir netiesinės analizės rezultatai abiemis apkrovimo atvejams. A apkrovimo atveju tiesine analize gauta sijos laikomoji galia yra $M_{Rd} = 11,28 \text{ kNm}$. Tai yra +13,05 % daugiau už analitiniu metodu gautą rezultatą. Netiesine analize gauta dar didesnė laikomoji galia – $M_{Rd} = 12,05 \text{ kNm}$, o tai yra +20,76 % daugiau už analitiniu būdu gautą laikomąją galią. B apkrovimo atveju gauti rezultatai dar panašesni į analitiniu būdu gautus rezultatus. B apkrovimo atveju tiesine analize gauta sijos lenkiamoji galia $M_{Rd} = 9,31 \text{ kNm}$, o tai yra -6,71 % mažiau už analitiniu būdu gautą rezultatą. B apkrovimo atveju netiesine analize gauta sijos lenkiamoji galia $M_{Rd} = 11,41 \text{ kNm}$ yra didesnė +14,33 % už analitiniu būdu gautą lenkiamąją galią. Iš gautų sąlyginai panašių rezultatų tarp analitinių skaičiavimų ir baigtinių elementų modelio daroma išvada, jog analitinių skaičiavimų algoritmas yra teisingas.

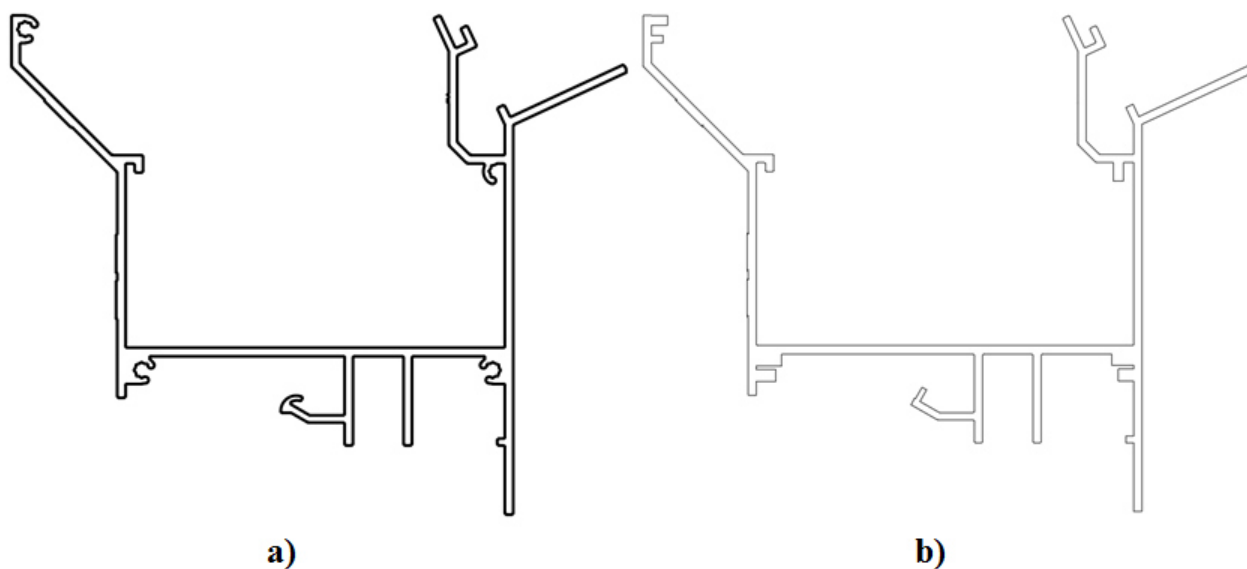


2.9 pav. Analitiniu būdu ir baigtinių elementų modeliais gautų lenkiamųjų galių palyginimo diagrama

2.2. Antras skerspjūvis

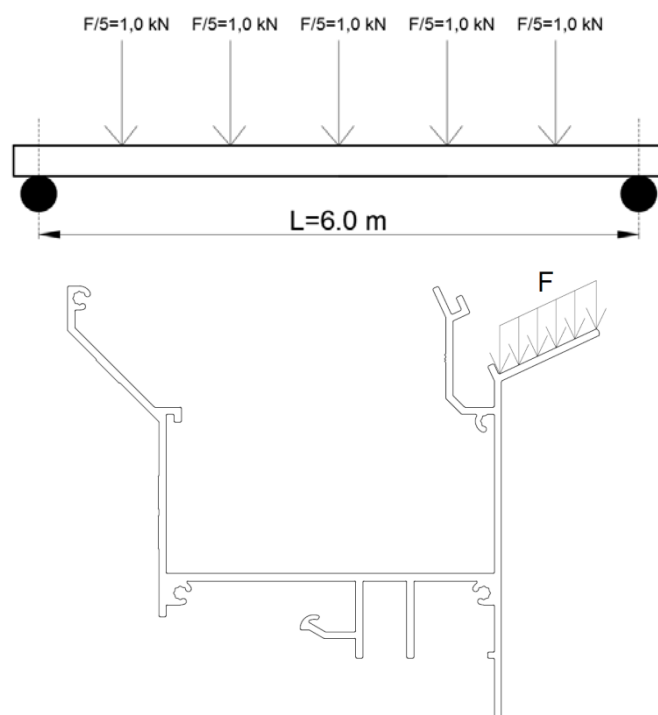
2.2.1. Skerspjūvio duomenys, schema ir geometrija baigtinių elementų modelyje

Detalesnėms analizėms atlikti sukuriamas antrasis skerspjūvis, taip pat naudojant „Ansys 2019 R2“ programinį paketą. Šis skerspjūvis yra 4 klasės, sudėtingesnės formos, su įvairiomis sąstandomis ir iškyšomis, skirtingais elementų storiais. Šis profiliuotis naudojamas kaip sija-latakas. Šis profiliuotis pavaizduotas 2.10 a pav. Detalesni matmenys pateikti C priede. Esant nestandartinės formos iškyšoms ar sąstandoms, jos pakeičiamos standartiniais, stačiakampio formos elementais su artimu pakeičiamajai daliai storio t bei sustiprinamosios dalies skerspjūvio ploto inercijos momentu aplink plokščiosios dalies vidurio plokštumą. Taip supaprastintas skerspjūvis pavaizduotas 2.10 b pav. Detalesni matmenys pateikti D priede.



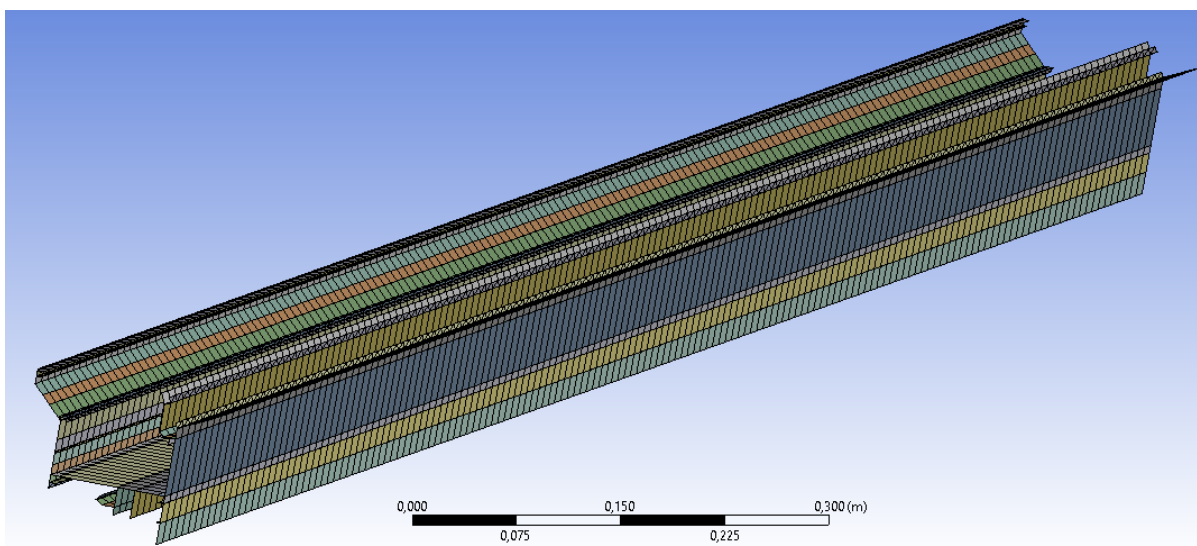
2.10 pav. Antrojo profiliuoties tikrasis vaizdas bei vaizdas su pakeistomis nestandartinėmis dalimis

„Ansys“ baigtinių elementų modelyje šis profiliuotis apkraunamas kaip laisvai atremta 6,0 m ilgio sija su vertikalia $F = 5,0$ kN dydžio apkrova, išdalinta į 5 dalis ir apkrauta kas 1 metrą. Apkrovimo vietose ši apkrova išskirstyta per skerspjūvio elemento plotį, taip imituojuant ilginiais į siją perduodamą apkrovą (žr. 2.11 pav.). Taip pat sija suvaržoma apkrovos pridėties vietose nuo šoninio pasislinkimo, taip atsižvelgiant į ilginių poveikį sijai ir suvaržant ją nuo šoninio-sukamojo klupimo bei supaprastinant analitinius skaičiavimus.



2.11 pav. Antrojo profiliuotio apkrovimo bei atrėmimo sąlygų schema.

Programiniame pakete „Ansys“, kaip ir pirmajam skerspjūviui, automatiškai priskiriamas 4-taškų SHELL181 kevalinis tinklelis, su 6 laisvės laipsniais taškuose. Jo dydis taip pat parenkamas programiškai, programai atsižvelgiant į optimalius elementų matmenis ir storius (žr. 2.12 pav.). Pirminiams skaičiavimams sijai priskiriamas EN-AW 6082 T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinys. Lydinio 0,2 % tikrosios tamprumo ribos reikšmė $f_0 = 255$ MPa, stiprumo riba $f_u = 300$ MPa. Rezultatams palyginti atliekama tiesinė ir netiesinė analizės. Pirminiai medžiagiškumo duomenys, kurie įvesti į programinį paketą nekeičiami ir yra pateikti 1 lentelėje. Netiesiniam skaičiavimui atlikti taip pat naudojamas dvitiesis Prandtlis medžiagiškumo modelis, kuris pateiktas 2.4 pav. Analizėje naudojamas Newtono-Raphsono apkrovos kontrolės metodas, apkrovą kiekviename žingsnyje tiesiškai didinant kas 2,5 kN. Atliekamos tiek tiesinė, tiek netiesinė analizės ir gaunami atitinkami klupumo modų koeficientai, kurie charakterizuoja labiausiai tikėtinus klupumo pavidalus prie mažiausių apkrovų. Iš šių klupumo koeficientų apskaičiuojama kritinė apkrova, kai sija netenka pastovumo. Esant sudėtingos formos 4 klasės skerspjūviui, suvaržytam 1,0 m atstumu nuo šoninio pasislinkimo, turėtų pasireikšti vietinis arba iškreipiamasis pastovumo netekimai.

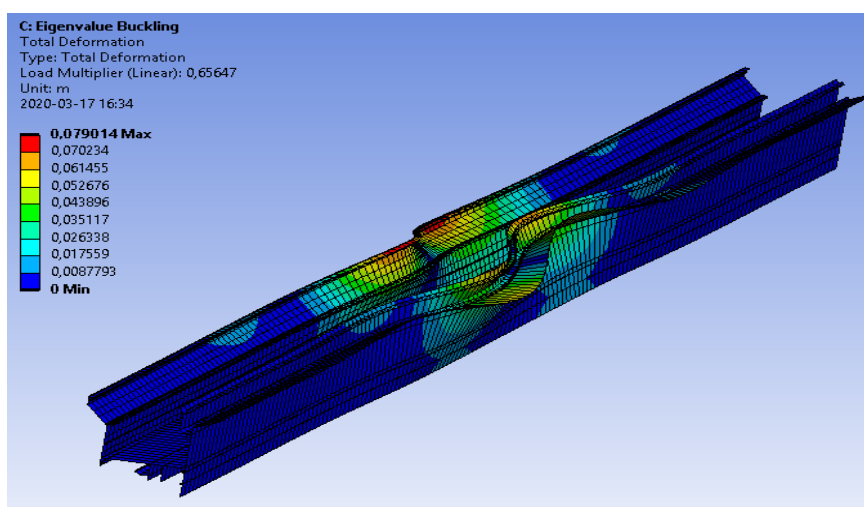


2.12 pav. Tinkleliu sudalintas antrasis skerspjūvis iš „Ansys“ aplinkos

2.2.2. Tiesinių ir netiesinių skaičiavimų „Ansys“ programiniu paketu rezultatai

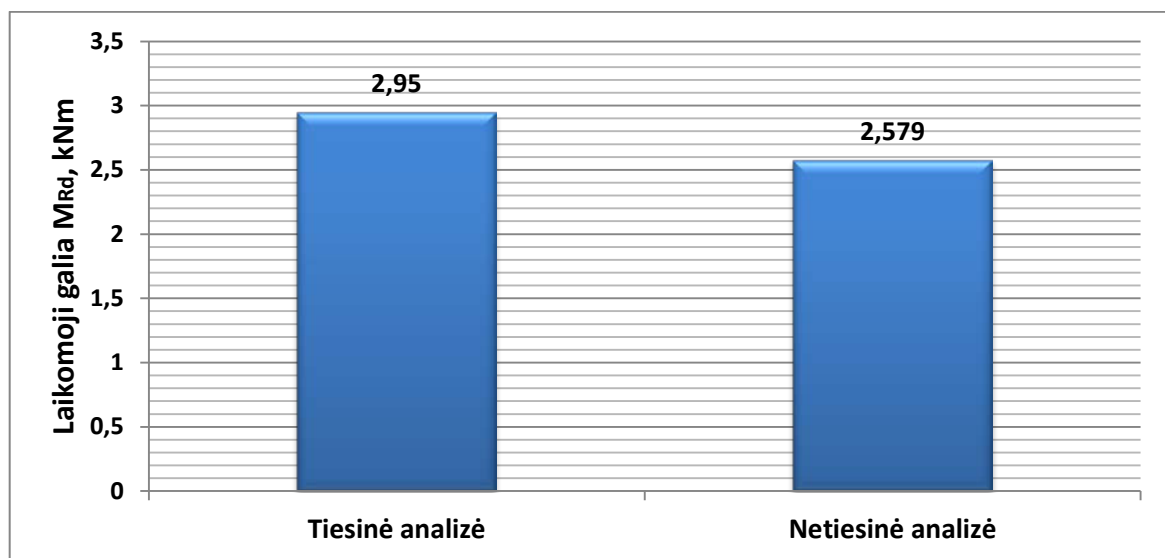
Atlikus tiesinę analizę pastebėta, jog skerspjūvyje, kaip ir buvo tikėtasi, tiek pirmojoje, tiek antrojoje modoje, pasireiškė iškreipiamasis pastovumo netekimas abiejuose skerspjūvio šonuose. Pirmosios, labiausiai tikėtinos modos klupimo koeficientas yra 0,656. Ši klupimo moda pateikiama 2.13 pavyzdyje. Pagal gautą klupimo koeficientą, apskaičiavus gauta šios lenkiamoji galia $M_{Rd}=2,95$ kNm. Antroji klupimo moda nuo pirmosios skiriasi tuo, jog iškreipiamasis klupimas pasireiškia tik vienoje skerspjūvio pusėje. Jos klupimo koeficientas yra 0,691.

Tiesiniame skaičiavime, iškreipiamasis klupimas vyksta tamprioje stadijoje. Klupimo metu įtempimai siekia: 239,87 MPa (gniuždomieji), 229,72 MPa (tempiamieji).

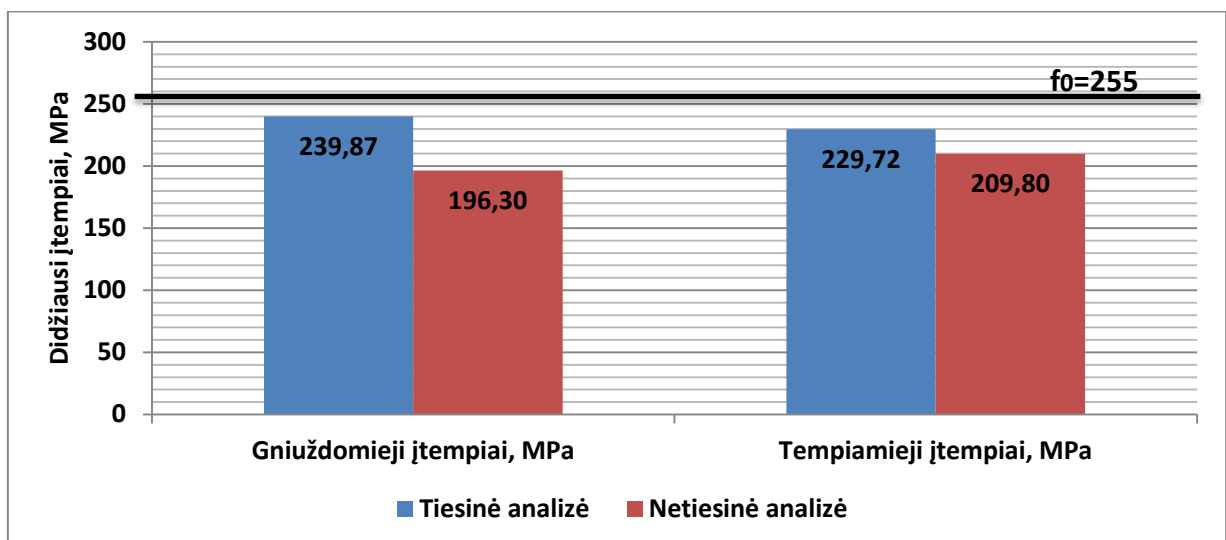


2.13 pav. Antrojo skerspjūvio pirmoji pastovumo netekimo moda

Atlikus netiesinę analizę, priešingai nei pirmajame skerspjūvyje, gautas mažesnis klupumo koeficientas, kuris prie užsiduotos apkrovos didėjimo kreivės lygus 1,146. Pagal šį koeficientą apskaičiuota skerspjūvio lenkiamoji galia $M_{Rd}=2,579$ kNm (-12,68 % lyginant su tiesine analize gautu rezultatu). Klupimo momentu skerspjūvyje įtempiai, kaip ir tiesinės analizės metu, taip pat yra tampriojoje stadijoje, bet plačiau pasiskirstę skerspjūvyje ir siekia: 196,3 MPa (gniuždomieji), 209,8 MPa (tempiamieji). Dėl tolygesnio įtempių paskirstymo, maksimalūs gniuždomieji įtempiai sumažėja -18,16%, o maksimalūs tempiamieji įtempiai sumažėja -8,67%.



2.14 pav. Antrojo skerspjūvio tiesinės ir netiesinės analizių laikomosios galios palyginimas



2.15 pav. Antrojo skerspjūvio tiesinės ir netiesinės analizių didžiausių įtempių palyginimas

2.2.3. Skirtingų medžiagos stiprių poveikis skerspjuvio elgsenai

Norint geriau įvertinti skerspjuvio elgseną, priklausomai nuo medžiagos stiprio, atliekama detalesnė analizė su skirtingais 6-tos ir 7-tos serijos aliuminio lydiniais. Palyginimui naudojami T6 terminio apdirbimo (grūdinti ir dirbtinai sendinti) aliuminio lydiniai. Palyginimui pasirenkami EN-AW6082, EN-AW6060, EN-AW6063, EN-AW6005A, EN-AW7020, EN-AW6061, EN-AW6106 lydiniai, kurių stipriai pateikti 3 lentelėje.

Naudojami 2.2.1. poskyryje aprašyti „Ansys“ modeliai, keičiant tik medžiagų 0,2 % tikrosios tamprumo ribos f_0 ir stiprumo ribos f_u reikšmes. Atliekama tiesinė ir netiesinė klupumo analizės. Netiesinei analizei naudojama dvitiesė Prandtlis medžiagiškumo diagrama. Gauti rezultatai pateikiami 3 lentelėje. Iš gautų rezultatų apskaičiuojama sijų laikomoji galia M_{Rd} .

3 lentelė. Skerspjuvių su skirtingais medžiagų stipriais skaičiavimo rezultatai.

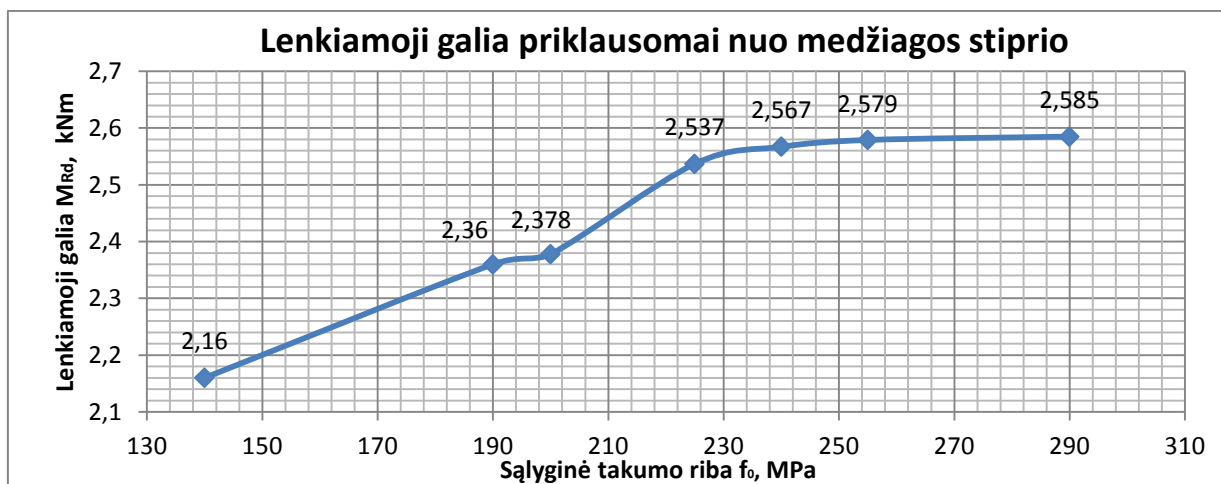
Lydinys EN-AW	f_0 / f_u , MPa	Klupumo koeficientas		Maksimalūs įtempiai, MPa			
		Tiesinis	Netiesinis	Tiesinis		Netiesinis	
				Gniužd.	Temp.	Gniužd.	Temp.
6060	140 / 170	0,65647	0,47997	239,87	229,72	140,0	140,0
6063	190 / 220	„—“	0,5245	„—“	„—“	168,46	189,9
6106	200 / 250	„—“	0,5285	„—“	„—“	176,32	200,0
6005A	225 / 270	„—“	0,5638	„—“	„—“	192,33	206,49
6061	240 / 260	„—“	0,5704	„—“	„—“	193,32	208,99
6082	255 / 300	„—“	0,5730	„—“	„—“	196,30	209,80
7020	290 / 350	„—“	0,5745	„—“	„—“	197,59	209,90

Iš gautų rezultatų matoma, jog atliekant tiesinę analizę, nepriklausomai koks yra medžiagos lydinio stipris, pastovumo netekimo koeficientas bei maksimalūs tempiamieji ir gniuždomieji įtempiai nesikeičia. Iš to galima daryti išvadą, jog skaičiavimo rezultatai nėra teisingi. Atsižvelgiant į tai, jog atliekant skaičiavimus su skerspjuviais iš sąlyginai nestiprių lydinių (EN-AW 6060, EN-AW 6063), maksimalūs įtempiai klupumo metu viršija ne tik sąlyginę 0,2% tamprumo ribą, bet ir stiprumo ribą, todėl gauti tiesinės analizės rezultatai ne tik yra netikslūs, bet ir fiziškai neįmanomi. Dėl šios priežasties daroma išvada, jog tiesinė analizė netinkama tokių skerspjuvių klumpamajai galiai nustatyti.

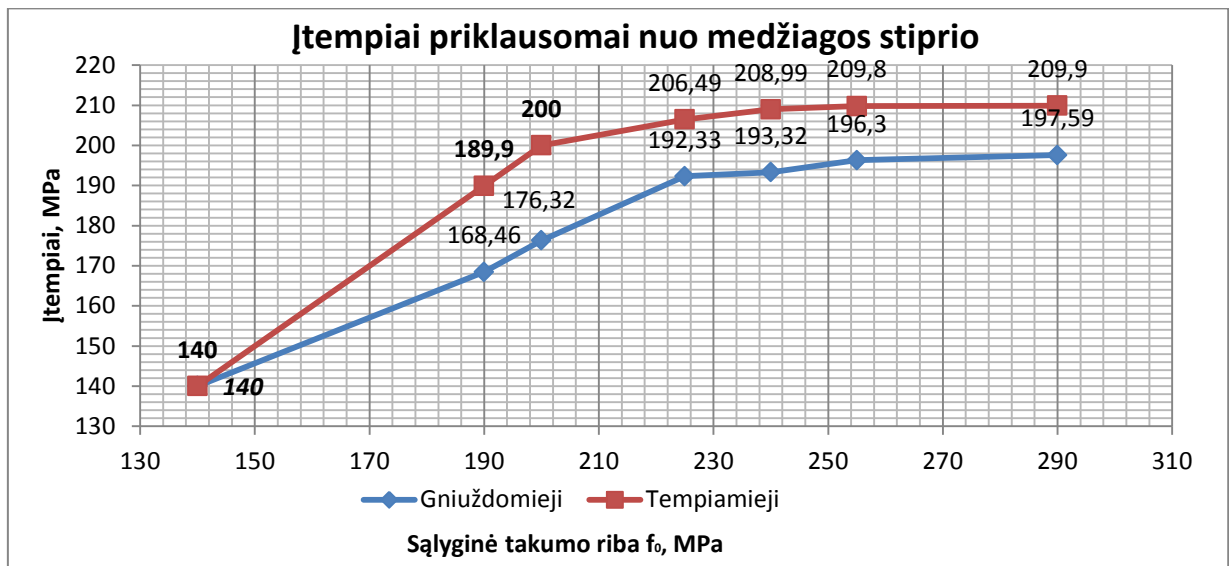
Atlikus netiesines analizes pastebėta, jog su silpnais lydiniais ($f_0=140-200$ MPa) klupumas pasireiškia jau plastinėje skerspjuvio elgsenos fazėje. Sąlyginai labai silpname 6 serijos lydinyje EN-AW 6060, kurio 0,2 % tikrosios tamprumo ribos reikšmė $f_0=140$ MPa, pastovumo netekimas įvyksta pasiekus skerspjuvio plastiškumą tiek tempiamoje tiek gniuždomoje skerspjuvio dalyse. Stipresniuose lydiniuose, kurių 0,2 % tikrosios takumo ribos reikšmė f_0 yra 190-200 MPa, skerspjuviai klumpa taip pat pasiekus plastinę stadiją, bet plastiškumas pasireiškia tik tempiamojoje skerspjuvio dalyje. Pasireiškiant skerspjuvio klupumui plastinėje stadijoje, šių rezultatų negalima lyginti su analitiniais skaičiavimais pagal A priede pateiktą algoritmą, nes šiomis išraiškomis apskaičiuotos konstantos yra skirtos skerspjuvio elgsenai tampriojoje stadijoje. Iš analizėse gautų rezultatų apskaičiuotos šių lenkiamosios galios pateikiamos 4 lentelėje.

4 lentelė. Skirtingų stiprių skerspjuvių netiesinės analizės lenkiamoji galia

Lydinys EN-AW	f_0 / f_u , MPa	Lenkiamoji galia M_{Rd} , kNm
6060	140 / 170	2,160
6063	190 / 220	2,360
6106	200 / 250	2,378
6005A	225 / 270	2,537
6061	240 / 260	2,567
6082	255 / 300	2,579
7020	290 / 350	2,585



2.16 pav. Skerspjuvio lenkiamosios galios sąryšis nuo medžiagos stiprio



2.17 pav. Maksimalių įtempių sąryšis nuo medžiagos stiprio

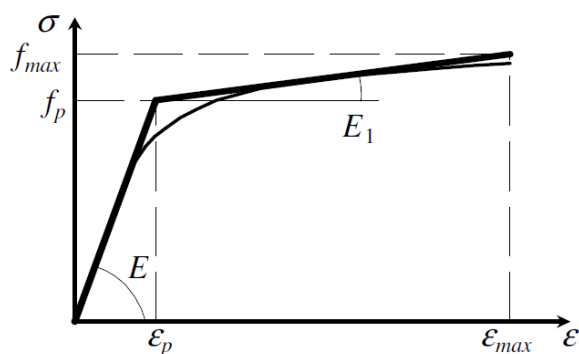
Iš grafikų matoma, jog nedidelio ($f_0 = 140$ MPa) 0,2 % tamprumo ribos 6 serijos aliuminio lydinio skerspjuvis, kurio tiek tempiama tiek gniuždoma dalis pasiekia plastinę stadiją, išklumpa nuo sąlyginai daug mažesnės apkrovos ($M_{Rd} = 2,16$ kNm), nei kad klumpa skerspjuviai, kuriuose plastinė stadija pasireiškia tik tempiamojoje dalyje ($M_{Rd} = 2,36-2,38$ kNm). Iš atliktos analizės matoma, jog šiame skerspjuvyje plastinė stadija pasiekama naudojant 200 MPa ir mažesnės 0,2% tikrosios tamprumo ribos aliuminio lydinius (įtempiai, siekiantys 0,2% tikrosios tamprumo ribos reikšmę grafike paryškinti).

Skerspjuvių, kurių klupumas vyksta tamprioje stadijoje, maksimalūs įtempiai klupimo metu beveik nebekinta, nebeprisiklausomai nuo to, kokio stiprio lydinys naudojamas. Lenkiamoji galia taip pat praktiškai nesikeičia. Iš šios diagramos daroma išvada, jog naudojant aliuminio lydinius, kuriuose vietinis klupumas vyksta tamprioje stadijoje, nebeprisiklausomai nuo jo stiprio, lenkiamoji galia išlieka tokia pati.

2.2.4. Skerspjuvio elgsena naudojant įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio modelį su stiprėjimu

Šiame darbe buvo naudotas dvitiesis Prandtlis įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio modelis, kuris galbūt nevisiškai atspindi tikrąją medžiagos elgseną. Norint palyginti skerspjuvio elgseną naudojant sudėtingesnę už Prandtlis metodą bei gauti tikslesnius rezultatus, reikalinga sudaryti įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio modelį įvertinant medžiagos stiprėjimo įtaką. LST EN 1999-1-1:2007 (E) priede yra aprašomi dvitiesiai, tritiesiai ir ištisiniai modeliai. Kadangi ankstesnėse šio darbo dalyse buvo naudojamas dvitiesis Prandtlis modelis, norint palyginti aliuminio lydinio stiprėjimo poveikį skerspjuvio laikomajai galiai bus naudojamas dvitiesis modelis su stiprėjimu (2.18 pav.) pagal LST EN

1999-1-1:2007 E priede aprašytą metodiką. Tiriami du skerspjūviai iš skirtingų 6-tos serijos EN-AW 6060 ($f_0 = 140$ MPa) ir EN-AW 6082 ($f_0 = 255$ MPa) aliuminio lydinių. Norint į programinį paketą įvesti dvitieses diagramas įvertinant medžiagos stiprėjimą, reikalinga apsiskaičiuoti kiekvieno lydinio stiprėjimo modulius E_1 , kuriuos suvedus į „Ansys“ programinį paketą gaunamos 2.19 pav. pavaizduotos įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio kreivės.



Čia: f_p – įprastinė tamprioji proporcingumo riba;
 ϵ_p – įtempius f_p atitinkanti santykinė deformacija;
 E_{max} – įtempius f_{max} atitinkanti santykinė deformacija;
 E – tamprumo modulis;
 E_1 – stiprėjimo modulis

2.18 pav. Dvitiesis įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio modelis (LST EN 1999-1-1:2007)

Esant $f_0 < 400$ N/mm²:

$$\epsilon_u = 0,3 - 0,22 \cdot \frac{f_0 \left(\frac{N}{mm^2} \right)}{400};$$

$$\epsilon_p = f_0/E;$$

$$E_1 = (f_u - f_0)/(0,5 \cdot \epsilon_u - \epsilon_p);$$

f_p – vardinė f_0 reikšmė.

EN-AW6060 ($f_0=140$ MPa, $f_u=170$ MPa)

$$\epsilon_u = 0,3 - 0,22 \cdot \frac{140}{400} = 0,223;$$

$$\epsilon_p = \frac{140}{70 \cdot 10^3} = 0,002;$$

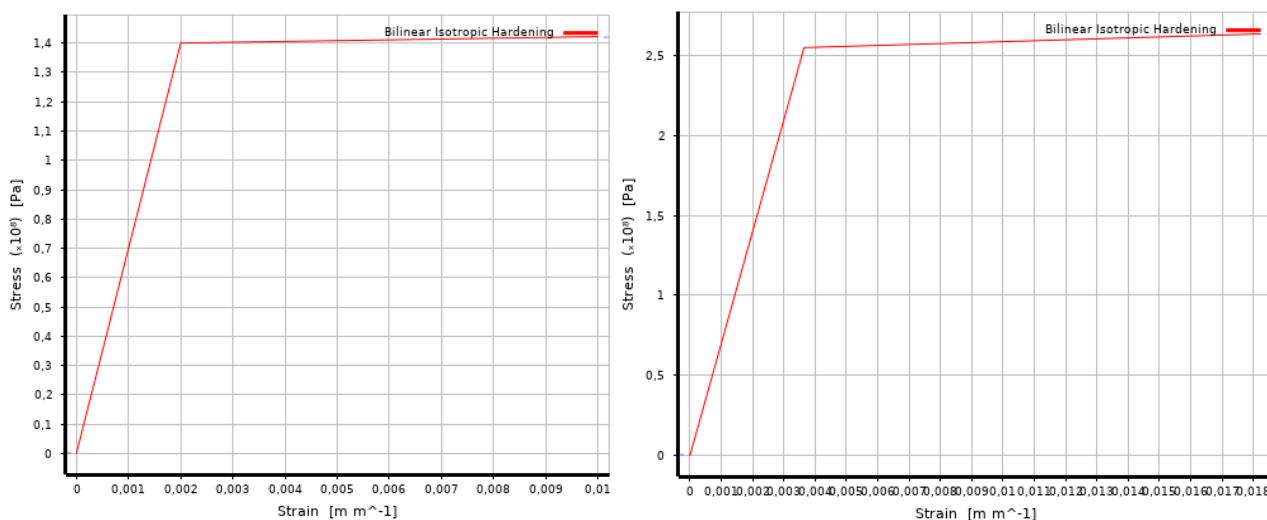
$$E_1 = \frac{(170-140)}{(0,5 \cdot 0,223 - 0,002)} = 2,7397 \cdot 10^8 \text{ Pa.}$$

EN-AW6082 ($f_0=255$ MPa, $f_u=300$ MPa)

$$\epsilon_u = 0,3 - 0,22 \cdot \frac{255}{400} = 0,15975;$$

$$\epsilon_p = \frac{255}{70 \cdot 10^3} = 0,003643;$$

$$E_1 = \frac{(300-255)}{(0,5 \cdot 0,15975 - 0,003643)} = 5,903 \cdot 10^8 \text{ Pa.};$$



2.19 pav. „Ansys“ programiniame pakete suvestos dvitiesės kreivės su stiprėjimu

Atlikus netiesines analizes, įvertinant medžiagos stiprėjimą, gauti rezultatai pateikiami 5 lentelėje.

5 lentelė. Skirtingų stiprių skerspjuvių skaičiavimo rezultatai įvertinant medžiagos stiprėjimą.

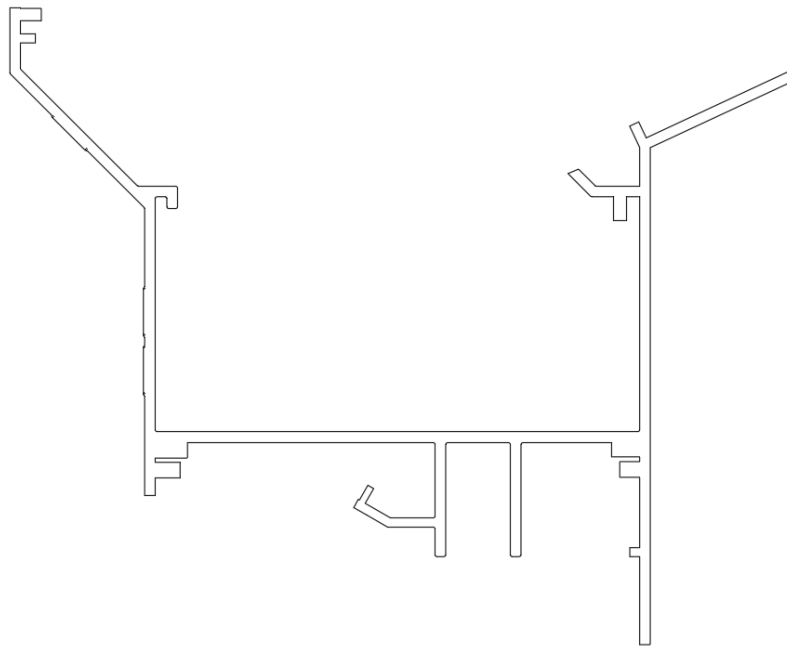
Lydinys EN-AW	f_0 / f_u , MPa	Klupumo koeficientas	Maksimalūs įtempiai, MPa	
			Tempiamieji	Gniuždomieji
6060	140 / 170	0,4799	140,29	140,0
6082	255 / 300	0,5732	209,81	196,36

Palyginus gautus rezultatus, įvertinant medžiagos stiprėjimą (žr. 5 lent.), su rezultatais, gautais naudojant Prandtliaus medžiagiškumo modelį (žr. 3 lent.) matyti, jog medžiagos stiprėjimo įvertinimas nedavė jokios naudos ir abu skerspjuviai išklupo prie lygiai tokios pat apkrovos. Tiek sąlyginai nedidelės takumo ribos ($f_0 = 140$ MPa) aliuminio lydinio, kurio tempiamojoje ir gniuždomojoje skerspjuvio dalyse pasireiškia plastinė būseną, tiek kito lydinio, kuris klumpa tampriojoje stadijoje ($f_0 = 255$ MPa), klupimo metu maksimalūs įtempiai išliko visiškai tokie patys kaip ankstesniuose modeliuose neįvertinant medžiagos sustiprėjimo. Iš to daroma išvada, jog atliekant skerspjuvių klupimo analizes nėra tikslinga naudoti daugiatisius įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio modelius su medžiagos sustiprėjimu, o visiškai užtenka naudoti idealiai tampriai-plastinį (Prandtliaus) modelį.

2.2.5. Skerspjuvio elgsena priklausomai nuo gniuždomos dalies ploto sumažėjimo

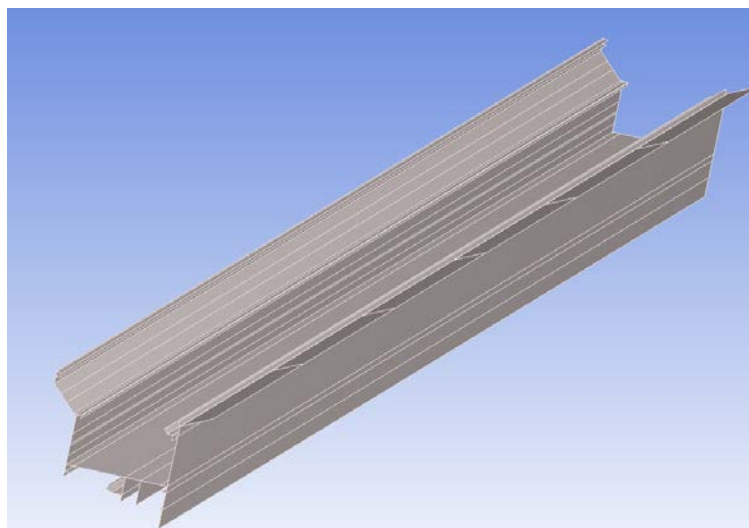
Iš 2.1.2 ir 2.2.2 poskyriuose aprašytų analizių rezultatų matoma, jog skerspjuvio klumpamoji galia siejasi su labiausiai nuo skerspjuvio neutraliosios ašies nutolusių

gniuždomų elementų kluptimi. Iš to daroma prielaida, kad kuo toliau nutolusios nuo neutraliosios linijos išsikišusios gniuždymo veikiamos bet kokios skerspjuvio atšakos ženkliai anksčiau sukelia skerspjuvio kluptį. Norint nustatyti, kaip skerspjuvis elgiasi priklausomai nuo šių išsikišusių gniuždomų dalių, atliekama analizė su skerspjuviu, iš kurio pašalinama dalis labiausiai gniuždomų išsikišusių atšakų (žr. 2.20 pav.). Detalesni skerspjuvio matmenys pateikti E priede. Programiniu paketu „Ansys“ atliekama tiesinė ir netiesinė analizės pagal anksčiau aprašytas metodikas. Naudojamas EN-AW 6082 ($f_0 = 255 \text{ MPa}$, $f_u = 300 \text{ MPa}$) T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinys. Netiesinėje analizėje naudojamas dvitiesis Prandtlis modelis.

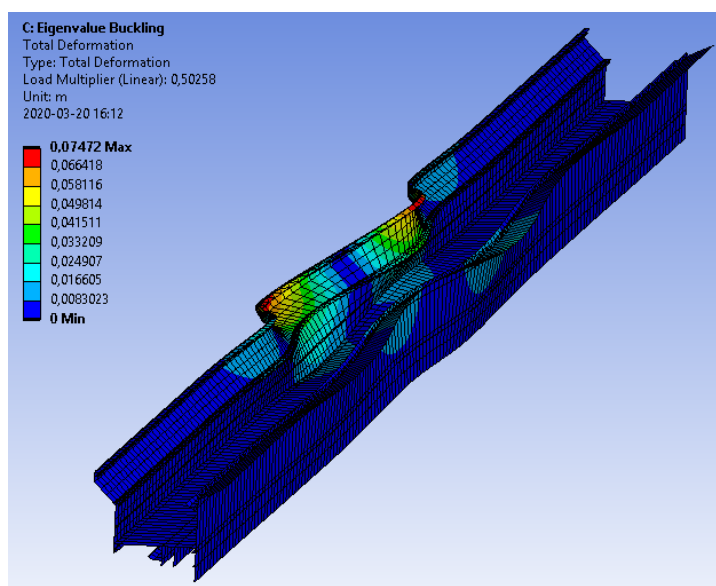


2.20 pav. Skerspjuvis su pašalinta dalimi gniuždomų atšakų

Programiniame pakete „Ansys“ sukurtas BE modelis pateikiamas 2.21 pavyzdyje. Atliekamos analizės ir gauti rezultatai pateikiami 6 lentelėje. Tiesinės analizės pirmoji pastovumo praradimo moda pateikta 2.22 pavyzdyje.



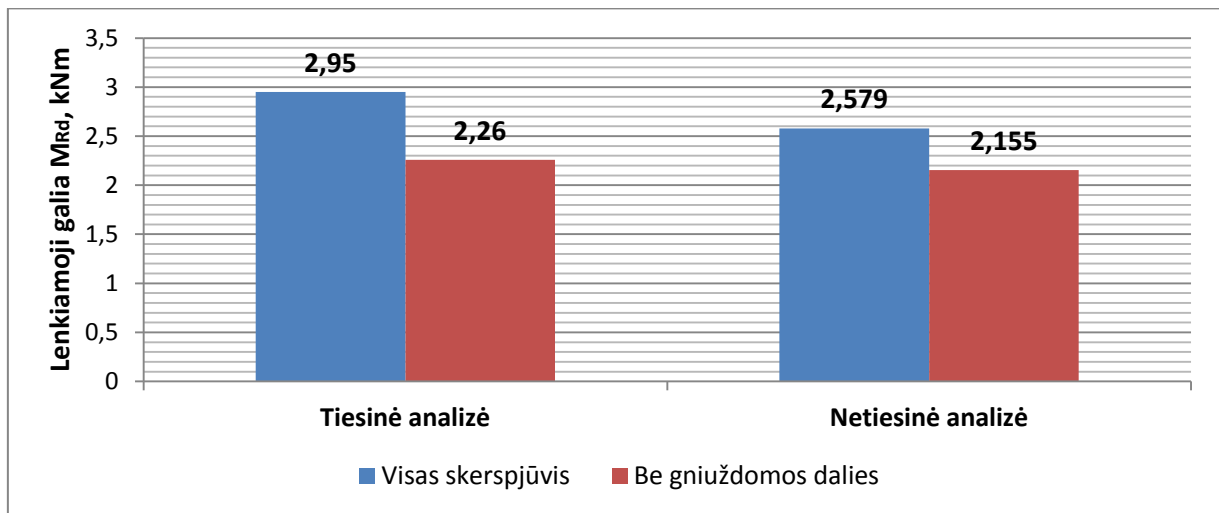
2.21 pav. Skerspjūvis su pašalinta dalimi gniuždomo ploto „Ansys“ programiniame pakete



2.22 pav. Skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis gniuždomų atšakų, tiesinės analizės pirmoji klumpo moda

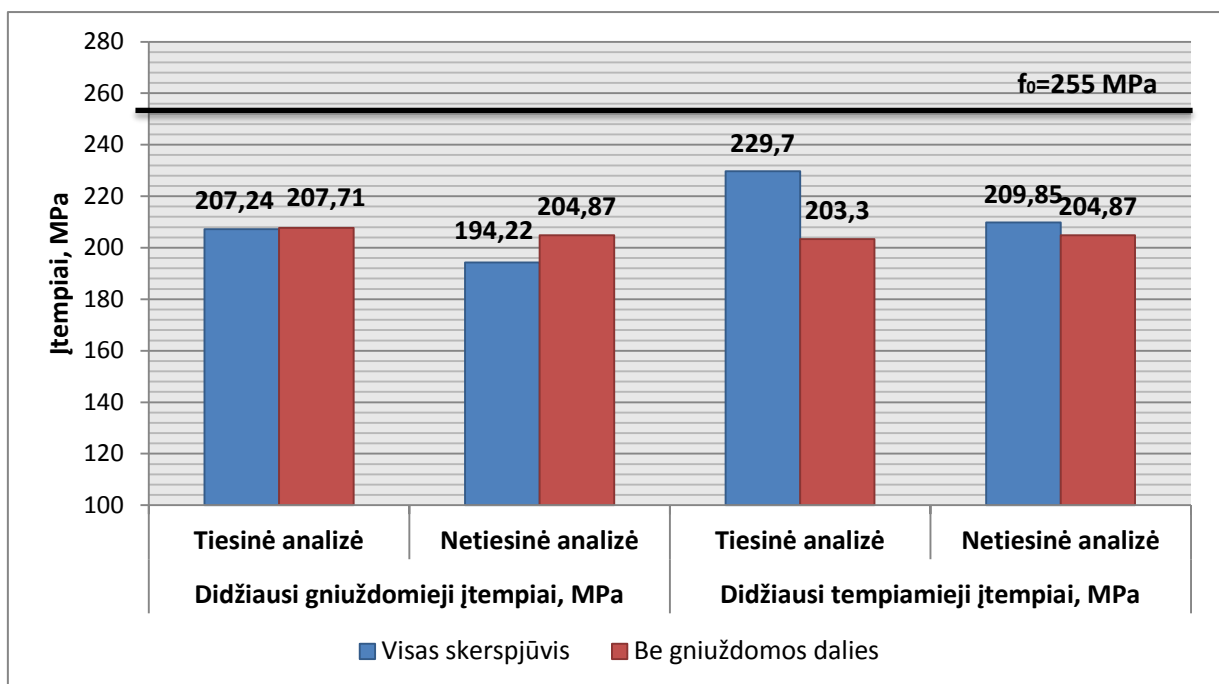
6 lentelė. Pilno skerspjūvio ir skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis gniuždomų atšakų, rezultatai ir palyginimas

	Atstumas iki neutraliosios ašies Z_{gc} , mm	Gniuždomi plotai, mm^2	Lenkiamoji galia M_{Rd} , kNm		Didžiausi gniuždomieji įtempiai, MPa		Didžiausi tempiamieji įtempiai, MPa	
			Tiesinė analizė	Netiesinė analizė	Tiesinė analizė	Netiesinė analizė	Tiesinė analizė	Netiesinė analizė
Visas skerspjūvis	53,78	350,1	2,95	2,58	207,24	194,22	229,70	209,85
Be gniuždomos dalies	50,39	300,78	2,26	2,16	207,71	204,87	203,30	204,87
Skirtumas, %	-6,30	-14,08	-23,39	-16,44	+0,23	+5,48	-11,49	-2,37



2.23 pav. Skerspjūvio be gniuždomos dalies ir viso skerspjūvio lenkiamosios galios palyginimo diagrama

Iš atliktos analizės matyti, jog pašalinus dalį labiausiai gniuždomų skerspjūvio elementų, skerspjūvio neutralioji ašis persislinko -6,3 % ir gniuždoma skerspjūvio dalis sumažėjo apie -14,0 %. Taip sumažėjus skerspjūvio gniuždomajam plotui, atlikus tiesinę analizę, skerspjūvio lenkiamoji galia sumažėjo -23,39 %, netiesinę analizę -16,44 %. Iš netiesinės analizės rezultatų matyti, jog skerspjūvio lenkiamoji galia turi glaudų ryšį su gniuždomos dalies plotu. Skirtumas tarp lenkiamosios galios pokyčio ir skerspjūvio gniuždomosios dalies pokyčio yra labai nedidelis.

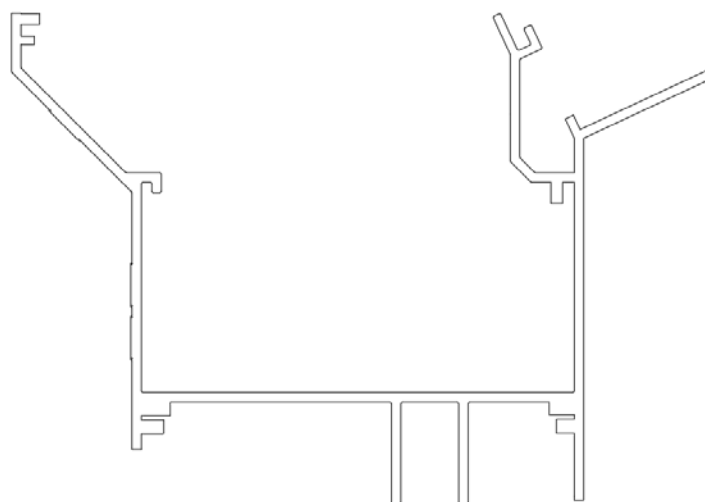


2.24 pav. Skerspjūvio be gniuždomos dalies ir viso skerspjūvio įtempių palyginimo diagrama

Atlikus analizę matyti, jog abiejų skerspjūvių klupumas įvyksta tamprioje stadijoje - 0,2% tikrosios tamprumo ribos reikšmė f_0 nepasiekiamą. Vertinant įtempių pasiskirstymą skerspjūvyje klupumo metu pastebėta, jog tiesinėje analizėje didžiausi gniuždomieji įtempiai nesuvaržytame skerspjūvio krašte praktiškai nesikeičia, o tempiamieji sumažėja. Tai galima paaiškinti tuo, jog tiesinėje analizėje vertinamas tiesiškas įtempių pasiskirstymas, o neutralioji ašis persislenka arčiau tempiamo krašto. Atliekant tikslesnę netiesinę analizę matyti, jog skerspjūvio vietinio pastovumo netekimo metu įtempiai klumpamojoje dalyje yra panašūs tiek pilname skerspjūvyje, tiek skerspjūvyje su pašalinta dalimi gniuždomų elementų. Gniuždomų įtempių skirtumas siekia +5,48 %, o tempiamų įtempių -2,37 %. Tiriant skerspjūvį su pašalinta dalimi gniuždomų elementų, iškreipiamasis klupumas įvyksta nesuvaržytame krašte, kurio laisvas galas yra toliausiai nutolęs nuo neutraliosios linijos.

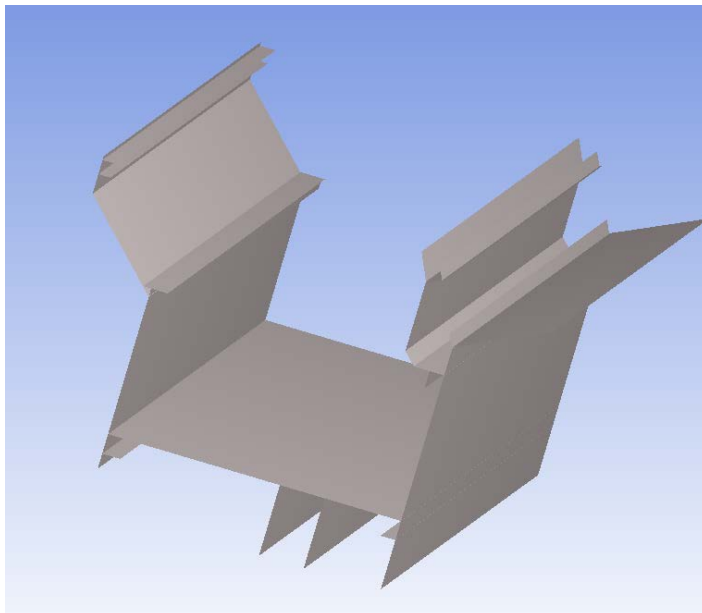
2.2.6. Skerspjūvio elgsena priklausomai nuo tempiamos dalies ploto sumažėjimo

Iš ankstesniame poskyryje atliktos analizės, kurios metu buvo tiriama profiliuoto elgsena, kuriam pašalinta dalis labiausiai gniuždomų skerspjūvio dalių, daroma kita prielaida: tempiamą zoną neturi didelio poveikio skerspjūvio klumpamajai galiai, nes skerspjūvio klupumas pasireiškia gniuždomoje dalyje. Manoma, jog panaikinus keletą nedidelių tempiamų skerspjūvio elementų, nebus didelio poveikio skerspjūvio klumpamajai galiai. Norint patikrinti šią prielaidą atliekama analizė su skerspjūviu, iš kurio pašalinama dalis tempiamų skerspjūvio elementų (2.25 pav.). Detalesni matmenys pateikti F priede. Programiniu paketu „Ansys“ atliekama tiesinė ir netiesinė analizės pagal anksčiau aprašytas metodikas. Naudojamas EN-AW6082 ($f_0 = 255 \text{ MPa}$, $f_u = 300 \text{ MPa}$) T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinys. Netiesinėje analizėje naudojamas Prandtlis modelis.

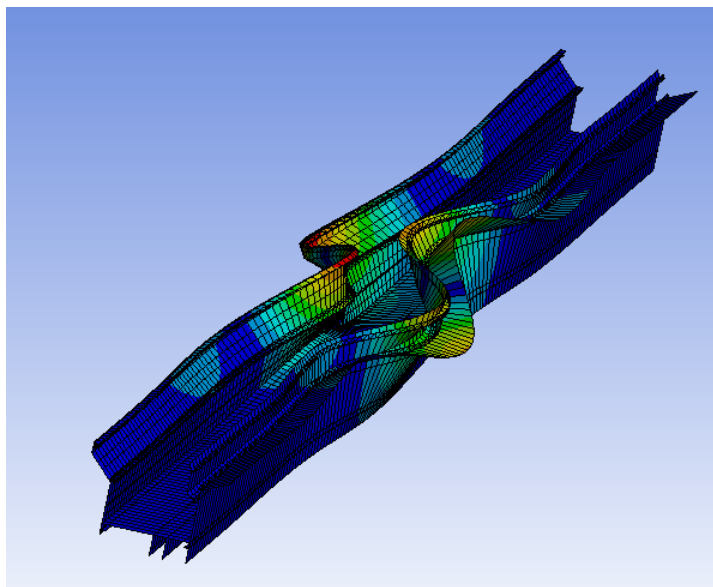


2.25 pav. Skerspjūvis su pašalintais keliais tempiamais elementais

Programiniame pakete „Ansys“ sukurtas BE modelis pateikiamas 2.26 pavyzdyje. Atliekamos tiesinės ir netiesinės analizės ir gauti rezultatai pateikiami 7 lentelėje. Tiesinės analizės pirmoji pastovumo praradimo moda pateikta 2.27 pavyzdyje. Pastebima, jog skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis tempiamų elementų, tiesinės analizės pirmasis klumpo pavidalas yra toks pat kaip ir pradinio skerspjūvio (žr. 2.13. pav.).



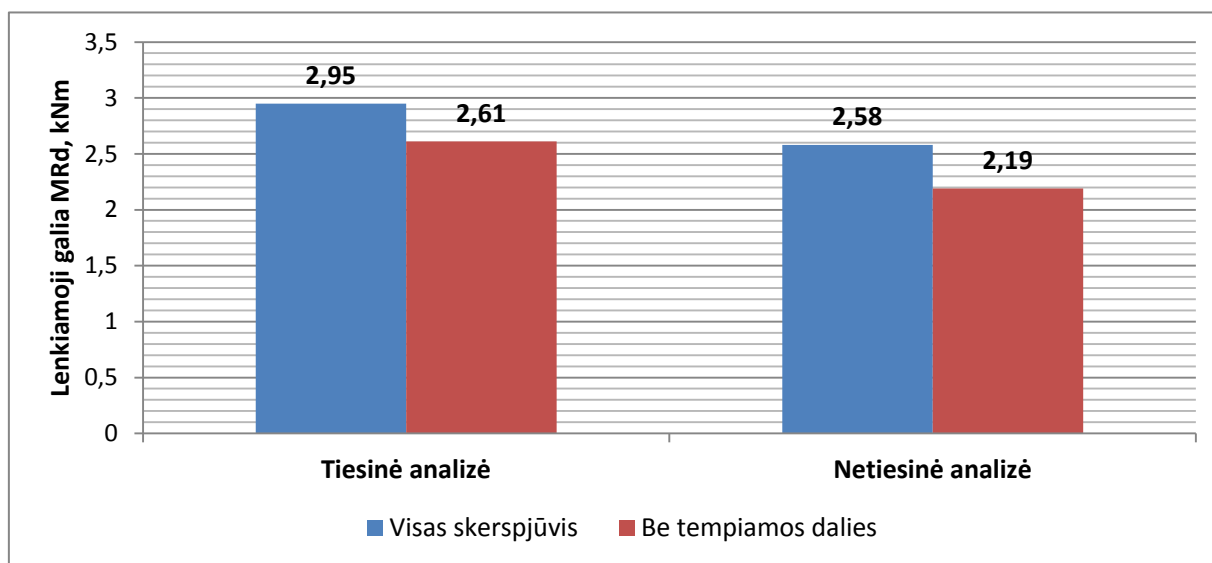
2.26 pav. Skerspjūvis su pašalinta dalimi tempiamų elementų „Ansys“ programiniame pakete



2.27 pav. Skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis tempiamų elementų, tiesinės analizės pirmoji klumpo moda

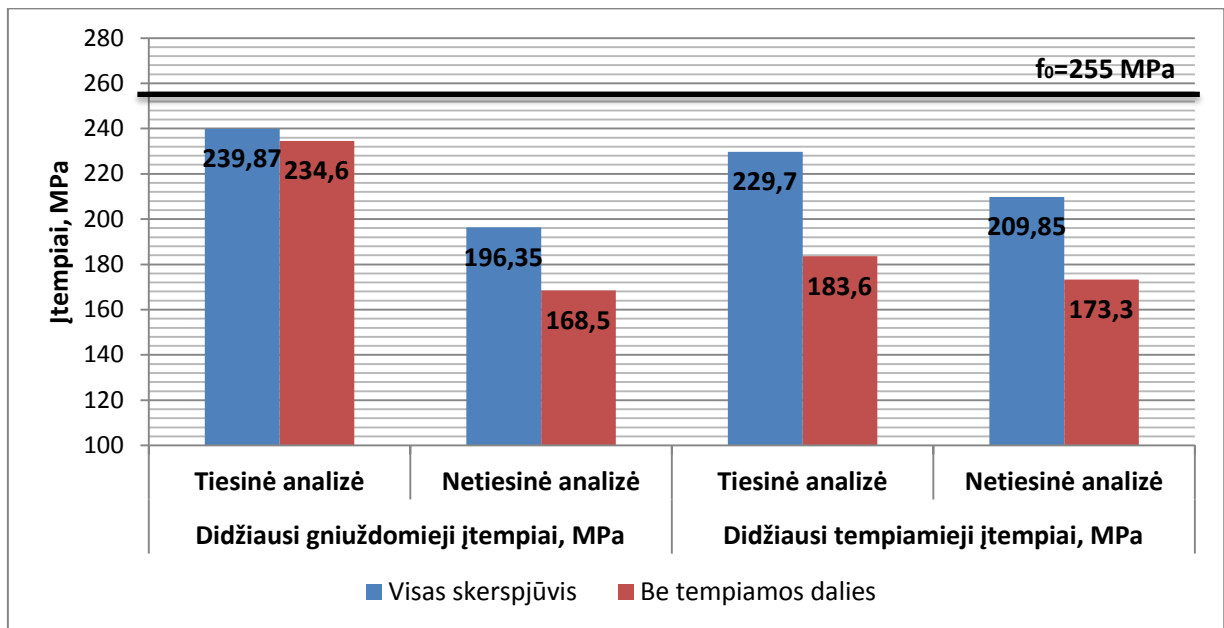
7 lentelė. Pilno skerspjūvio ir skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis tempiamų elementų, pagamintų iš EN-AW 6082 T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinio, rezultatai ir palyginimas

Lydinys EN-AW 6082 T6 $f_0=255$ MPa	Gniuždomi plotai, mm ²	Tempiami plotai, mm ²	Lenkiamoji galia M_{Rd} , kNm		Didžiausi gniuždomieji įtempiai, MPa		Didžiausi tempiamieji įtempiai, MPa	
			Tiesinė analizė	Netiesinė analizė	Tiesinė analizė	Netiesinė analizė	Tiesinė analizė	Netiesinė analizė
Visas skerspjūvis	350,1	497,08	2,95	2,58	239,87	196,35	229,70	209,85
Be dalies tempiamų elementų	338,96	448,99	2,61	2,19	234,60	168,50	183,60	173,30
Skirtumas, %	-3,18	-9,67	-11,52	-15,16	-2,19	-14,18	-20,07	-17,42



2.28 pav. Skerspjūvio be tempiamos dalies ir viso skerspjūvio lenkiamosios galios palyginimo diagrama

Iš atliktos analizės matyti, jog pašalinus dalį tempiamų elementų, skerspjūvio neutralioji ašis persislinko 2,93 mm. link gniuždomos dalies krašto ir gniuždoma skerspjūvio dalis sumažėjo apie -3,18 %, o tempiamas plotas sumažėjo -9,67 %. Atlikus tiesinę analizę, skerspjūvio lenkiamoji galia sumažėjo -11,52 %, netiesinę analizę -15,16 %. Iš netiesinės analizės rezultatų matyti, jog skerspjūvio lenkiamoji galia, nors ji, kaip manyta anksčiau, sieta tik su gniuždomų dalių klupimu, glaudžiai siejasi ir su tempiamos skerspjūvio dalies ploto sumažėjimu.



2.29 pav. Skerspjuvio be tempiamos dalies ir viso skerspjuvio įtempių palyginimo diagrama

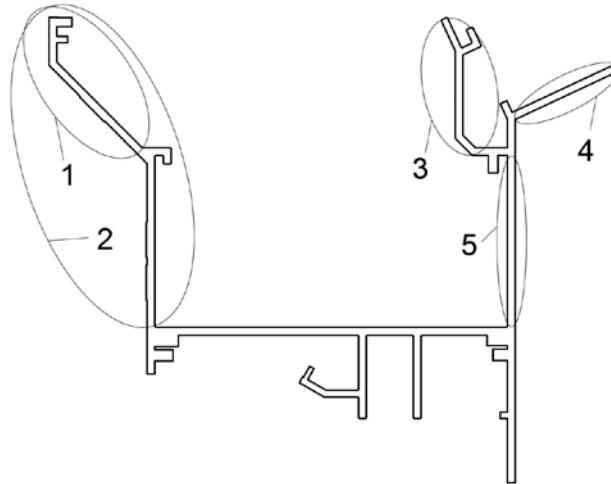
Atlikus analizę matyti, jog abiejų skerspjuvių klupumas įvyksta tamproje stadijoje - 0,2 % tikrosios tamprumo ribos reikšmė f_0 nepasiekiamas. Vertinant įtempių pasiskirstymą skerspjuvyje klupimo metu pastebėta, jog tiesinėje analizėje maksimalūs gniuždomieji įtempiai praktiškai nesikeičia, o tempiamieji sumažėja apie -20,0 %. Atliekant tikslesnę netiesinę analizę matyti, jog laikomosios galios sumažėjimas yra proporcingas skerspjuvyje veikiančių įtempių sumažėjimui klupimo metu. Lenkiamoji galia sumažėja -15,16 %, o gniuždomų įtempių sumažėjimas siekia -14,18 %, o tempiamų įtempių -17,42 %.

2.2.7. Antrojo skerspjuvio analitiniai skaičiavimai pagal LST EN 1999-1-1

Norint palyginti „Ansys“ programiniu paketu gautus antrojo skerspjuvio, pagaminto iš EN-AW6082 T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinio, rezultatus su analitinių skaičiavimų rezultatais, reikia susirasti 4 klasės skerspjuvio efektyvųjį atsparumo momentą apie lenkiamojo momento veikiamą ašį. Tam naudojamos LST EN 1999-1-1:2007 J.4 ir J.5 prieduose (A priedas) pateikiamos atvirųjų plonasienių skerspjuvių konstantų skaičiavimo išraiškos. Šios išraiškos skaičiuojamos skerspjuviui, kurio nestandartinės formos sustiprinamosios dalys pakeistos ekvivalentiškais stačiakampėmis dalimis (žr. D priedą).

Pirmiausia, visas skerspjuvis suskaidomas į atskirus elementus. Šiems elementams, kaip ir mazgams jungiantiems juos, suteikiami numeriai. Norint apskaičiuoti skerspjuvio konstantas, mazgams suteikiamos koordinatės (žr. G priedą). Pagal A priede pateiktas išraiškas apskaičiavus skerspjuvio konstantas surandama neutralioji ašis y_0 , neatsižvelgiant į skerspjuvio dalių klases.

Esant 4 klasės skerspjūviui, kuriame pasireiškia vietinis pastovumo netekimas, reikalinga gniuždomoms dalims surasti efektyviusius elementų storius. Jiems surasti naudojamos LST EN 1999-1-1:2007 6.1.4.3 bei 6.1.5 skyriuose pateikiamos išraiškos ir rekomendacijos. Daroma prielaida, kurios skerspjūvio liaunos dalys gali klupti (žr 2.30 pav.).

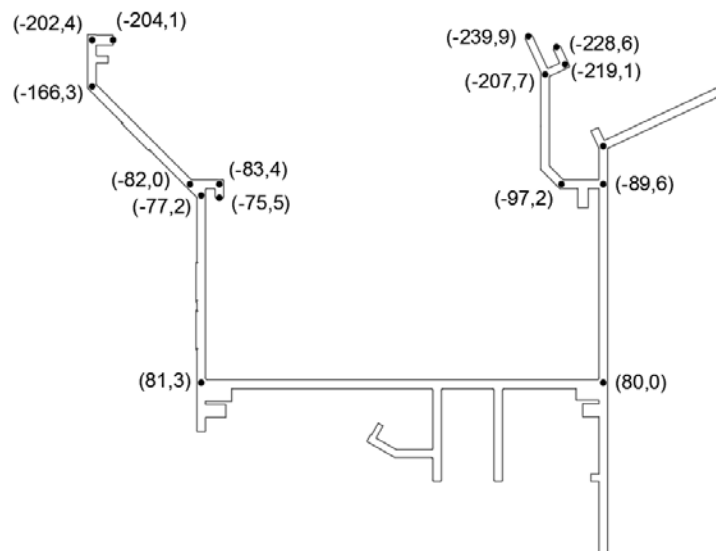


2.30 pav. Gniuždomos liaunos skerspjūvio dalys

Kadangi skerspjūvis lenkiamas, todėl esant skerspjūvio dalyse įtempių gradientui, β reikšmė nustatoma pagal LST EN 1999-1-1:2007 pateikiamą 6.8. formulę, kurioje σ_{cr} ir σ_{cr0} atitinka įtempius labiau gniuždomame dalies krašte.

$$\beta = \frac{b}{t} \cdot \left(\frac{\sigma_{cr0}}{\sigma_{cr}} \right)^{0,4} ;$$

Žinant, jog įvairūs išsikišę sustandinimai pritraukia prie savęs dalį įtempių, skaičiavimams reikalingus jų dydžius paimame iš „Ansys“ programiniu paketu atliktos tiesinės analizės, kuri aprašyta 2.2.1 ir 2.2.2 poskyriuose. Įtempiai pavaizduoti 2.31 pav.



2.31 pav. Charakteringieji įtempiai iš „Ansys“ aplinkos, atliekant tiesinę skerspjūvio analizę
(žr. 2.2.1. ir 2.2.2. poskyrį)

Esant kintamo storio gniuždomoms dalims (1,8 ir 2,0 mm) konservatyviai naudojamas mažiausias elemento storis – 1,8 mm.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = \sqrt{\frac{250}{255}} = 0,99;$$

$$1.) \beta_1 = \frac{b}{t} \cdot \left(\frac{\sigma_{cr0}}{\sigma_{cr}} \right)^{0,4} = \frac{10,39+28,0}{1,8} \cdot \left(\frac{-202,4}{-204,1} \right)^{0,4} = \frac{38,39}{1,8} \cdot 0,996 = 21,32 ;$$

Iš pagal šią formulę apskaičiuoto įtempių santykio (0,996) matoma, jog sąstanda neduoda jokios naudos. Elementas skaičiuojamas kaip nestandintas, naudojant tiesinį įtempių pasiskirstymą pagal pirminę neutraliąją ašį (žr. G priedą).

$$\beta_1 = \frac{\eta b}{t} = \frac{(0,7 + 0,3\eta)b}{t} = \left(\frac{23,2}{54,71} \cdot 0,3 + 0,7 \right) \cdot \frac{10,39 + 28,0}{1,8} = 17,64 > \beta_3 = 5,94;$$

Skerspjūvio elementas 4 klasės.

Nesimetriškame skerspjūvyje gali pasireikšti iškreipiamasis pastovumo netekimas visai iškyšai (2.30 pav., numeris 2). Taip pat, atsižvelgiant į tai, jog viršutinė sąstanda neduoda jokios naudos, o funkcinė sąstanda elemento viduryje yra netoli pirminės skerspjūvio neutraliosios ašies, kur gniuždomieji įtempiai dar nėra dideli, teigiama, jog ji taip pat neturi didelės reikšmės elemento vietiniam standumui, todėl ji nevertinama.

$$2.) \beta_2 = \frac{\eta b}{t} = \frac{(0,7 + 0,3\eta)b}{t} = \left(\frac{-17,48}{54,71} \cdot 0,3 + 0,7 \right) \cdot \frac{10,39 + 32,2 + 38,3}{1,8} = 27,14 > \beta_3 = 5,94;;$$

Skerspjuvio elementas 4 klasės

Kadangi $\beta_2 > \beta_1$, visos iškyšos efektyviajam storiui rasti bus naudojama β_2 reikšmė.

$$3.) \beta_3 = \frac{b}{t} \cdot \left(\frac{\sigma_{cro}}{\sigma_{cr}} \right)^{0,4} = \frac{7,8+20,4+4,8}{1,8} \cdot \left(\frac{-228,6}{-239,9} \right)^{0,4} = 17,98 > \beta_3 = 5,94;;$$

Skerspjuvio elementas 4 klasės

$$4.) \beta_4 = \frac{\eta b}{t} = \frac{(0,7+0,3\eta)b}{t} = \left(\frac{31,0}{11,75+31,0} \cdot 0,3 + 0,7 \right) \cdot \frac{27,6}{1,8} = 14,0 > \beta_3 = 5,94;; \text{ (skaičiuota per atstumus nuo pradinės neutraliosios ašies).}$$

Skerspjuvio elementas 4 klasės.

$$5.) \beta_5 = \frac{\eta b}{t} = \frac{(0,7+0,3\eta)b}{t} = \left(\frac{80,0}{-89,6} \cdot 0,3 + 0,7 \right) \cdot \frac{40}{1,8} = 9,6 < \beta_1 = 10,89;$$

Skerspjuvio elementas 1 klasės.

Pagal LST EN 1999-1-1:2007 6.1.5 skyriuje pateikiamas efektyviojo skerspjuvio storio apskaičiavimo formules surandami vietinio klupimo koeficientai ρ_c storiui sumažinti.

$$\rho_{c2} = \frac{C_1}{(\beta_2/\varepsilon)} - \frac{C_2}{\left(\frac{\beta_2}{\varepsilon} \right)^2} = \frac{10}{\frac{27,14}{0,99}} - \frac{24}{\left(\frac{27,14}{0,99} \right)^2} = 0,333;$$

$$\rho_{c3} = \frac{C_1}{(\beta_3/\varepsilon)} - \frac{C_2}{\left(\frac{\beta_3}{\varepsilon} \right)^2} = \frac{10}{\frac{17,98}{0,99}} - \frac{24}{\left(\frac{17,98}{0,99} \right)^2} = 0,48;$$

$$\rho_{c4} = \frac{C_1}{\left(\frac{\beta_4}{\varepsilon} \right)} - \frac{C_2}{\left(\frac{\beta_4}{\varepsilon} \right)^2} = \frac{10}{\frac{14,0}{0,99}} - \frac{24}{\left(\frac{14,0}{0,99} \right)^2} = 0,59$$

Esant nesimetriškai išsikišusiai plokščiajai daliai ρ_c turi būti ne didesnis nei:

$$\rho_{c2} = \frac{120}{\left(\frac{\beta_2}{\varepsilon} \right)^2} = \frac{120}{\left(\frac{27,14}{0,99} \right)^2} = 0,16;$$

Taigi: $\rho_{c2} = 0,16$.

$$\rho_{c3} = \frac{120}{\left(\frac{\beta_3}{\varepsilon} \right)^2} = \frac{120}{\left(\frac{17,97}{0,99} \right)^2} = 0,36;$$

Taigi: $\rho_{c3} = 0,36$.

$$\rho_{c4} = \frac{120}{\left(\frac{\beta_4}{\varepsilon} \right)^2} = \frac{120}{\left(\frac{14,0}{0,99} \right)^2} = 0,6;$$

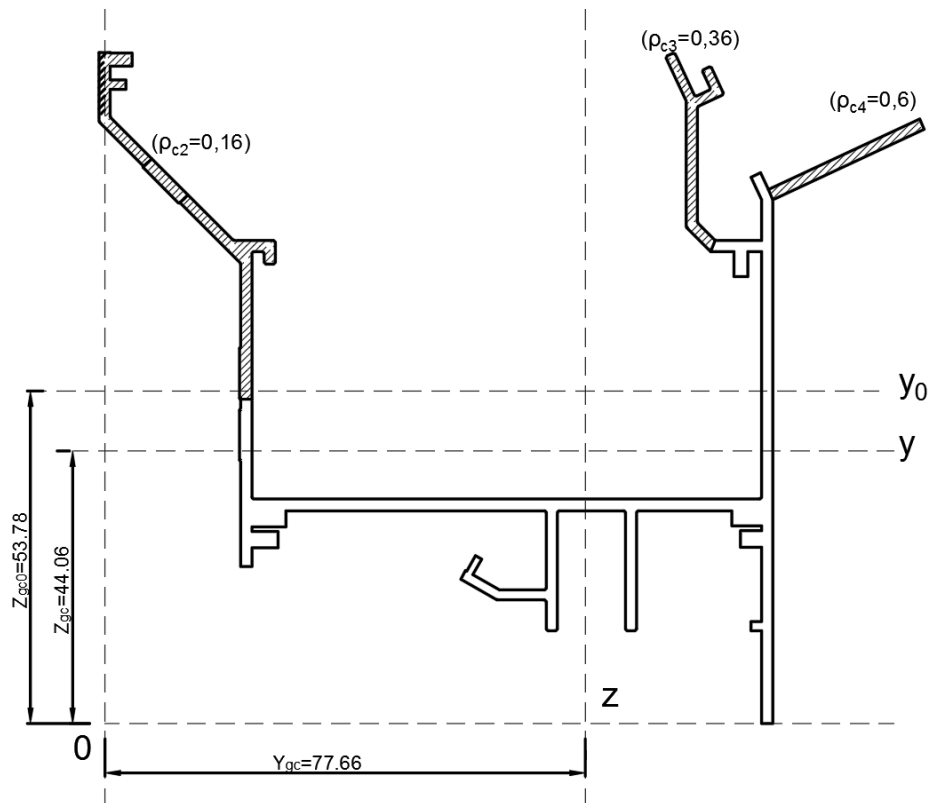
Taigi: $\rho_{c4} = 0,6$.

Suvedus gautus elemento storio mažinimo koeficientus į sudarytą analitinių skaičiavimų lentelę, surandamos 4 klasės efektyvaus skerspjuvio konstantos. Šių konstantų

skaičiavimo daliniai rezultatai pateikiami H priede. Gauti galutiniai aktualūs skerspjūvių rodikliai pateikiami 8 lentelėje. Skerspjūvis, kuriame pažymėtos efektyviosios dalys bei neutralioji ašis pateikiamas 2.32 pavyzdyje.

8 lentelė. Antrojo skerspjūvio rodikliai

S_{y0}, mm^3	$2,8664 \cdot 10^{-4}$
A, mm^2	650,56
Z_{gc}, mm	44,06
I_y, m^4	$3,7597 \cdot 10^{-7}$



2.32 pav. Efektyvusis 4 klasės skerspjūvis

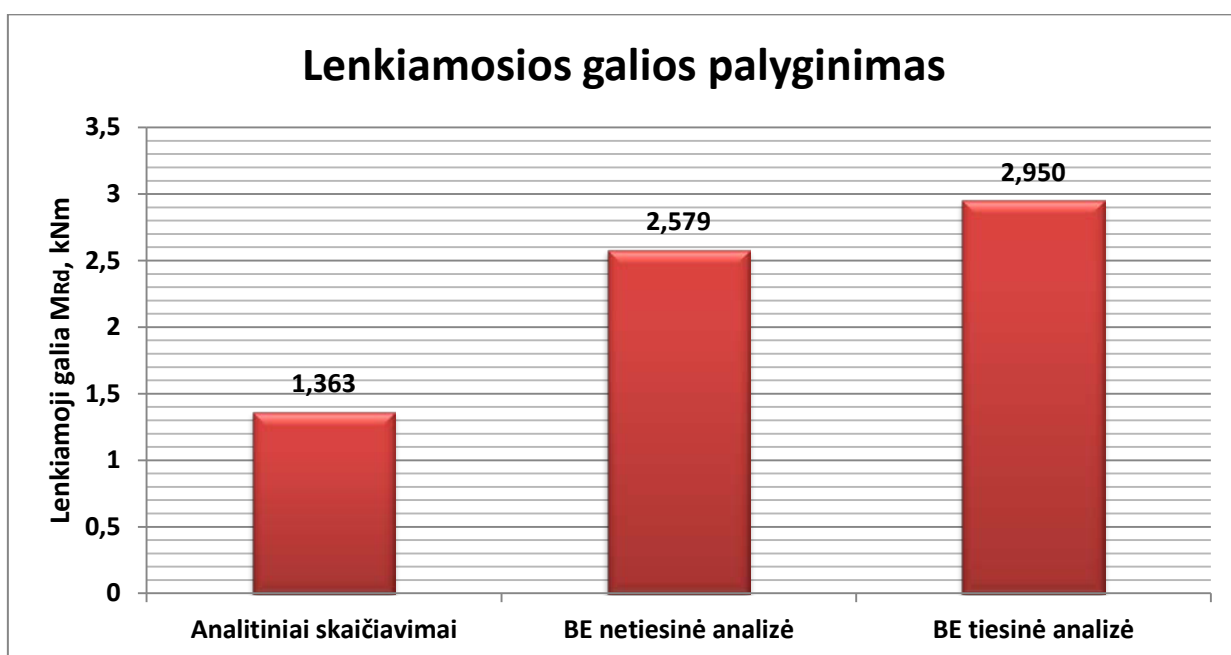
Pagal 8 lentelėje pateiktus rodiklius apskaičiuojamas skerspjūvio efektyvusis atsparumo momentas bei lenkiamoji galia.

$$W_{eff} = \min \begin{cases} W_{ue} = \frac{I_y}{Z_{max} - Z_{gc}} = \frac{375972,46}{108 - 44,06} = 5880,22 \text{ mm}^3 \\ W_{be} = \frac{I_y}{Z_{gc}} = \frac{375972,46}{44,06} = 8533,19 \text{ mm}^3 \end{cases} = 5880,22 \text{ mm}^3;$$

$$M_{Rd} = \frac{W_{eff} \cdot f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{5,88 \cdot 10^{-6} \cdot 255 \cdot 10^6}{1,1} = 1,363 \text{ kNm};$$

2.2.8. „Ansys“ ir analitinių skaičiavimų palyginimas

Iš analitinių skaičiavimų nustatyta sijos laikomoji galia $M_{Rd} = 1,363$ kNm. Programiniu paketu „Ansys“ atliktais skaičiavimais gauti tiesinės ir netiesinės analizės rezultatai. Netiesine analize gauta sijos laikomoji galia yra $M_{Rd} = 2,579$ kNm. Tai yra beveik du kartus (+89,2 %) didesnis rezultatas nei kad gautas su baigtinių elementų modeliu. Tiesine analize gauta daugiau nei 2 kartus didesnė laikomoji galia – $M_{Rd} = 2,95$ kNm. Iš analitinių skaičiavimų rezultatų matoma, jog šis algoritmas naudojant sudėtingiems ir nesimetriniams skerspjuviams nelabai tikslus, o gauti atsakymai labai konservatyvūs. Rezultatai, neatsižvelgiant nei į nesimetriško skerspjuvio sukimą ar šlytį, gaunami beveik du kartus mažesni nei baigtinių elementų metodu.



2.33 pav. Lenkiamosios galios palyginimo diagrama

IŠVADOS

Šiame baigiamajame magistro darbe atlikta dviejų pasirinktų lenkiamų atvirųjų aliumininių profiliuotųjų analizė skaitiniu metodu, panaudojant programinį paketą „Ansys 2019 R2“, ir analitiniu metodu, remiantis EC9 rekomendacijomis. Išnagrinėjus skerspjūvius ir palyginus gautus rezultatus galima suformuluoti tokias išvadas:

1. Tirtiems 4 klasės aliumininiam skerspjūviams, kaip ir buvo tikėtasi, pasireiškė vietinis ir iškreipiamasis klupumai.
2. Atlikus tiesines ir netiesines 4 klasės skerspjūvių analizes gauti rezultatai skyrėsi: U formos simetriškam loviniam skerspjūviui su aukšta sienute - 6,08 %, o kompleksinės formos sijai-latakui – 12,68 %.
3. Atliekant 4 klasės kompleksinės formos sijos-latakų netiesinę analizę pastebėta, jog įtempiai pasiskirsto plačiau ir yra mažesni, nei atliekant tiesinę analizę. Maksimalūs kritiniai gniuždomieji įtempiai yra – 18,16 %, o tempiamieji - 8,68 % mažesni.
4. Tiriant skerspjūvių, pagamintų iš skirtingų 6-tos ir 7-tos serijos T6 terminio apdirbimo aliuminio lydinų, turinčių skirtingas stiprumines savybes, klupumo analizes pastebėta:
 - Tiesinės analizės rezultatai ne tik nėra tikslūs, bet ir logiškai neįmanomi, nes keičiant medžiagos stiprumines savybes tiek sijų laikomoji galia, tiek kritiniai įtempiai nesikeičia, o naudojant sąlyginai silpnus ($f_0=140-190$ MPa) lydinius, kritiniai įtempiai yra didesni net už stiprumo ribą. Dėl šios priežasties tiesinės analizės rezultatais tiriant skerspjūvių klupumą toliau remtis negalima.
 - Atliekant netiesinę analizę naudojant 6 serijos silpnesnius lydinius ($f_0=140-200$ MPa) skerspjūvių klupumas pasireiškia anksčiau.
 - Esant labai silpniems 6 serijos lydiniam, tokiems kaip EN-AW 6060 ($f_0=140$ MPa), klupumas netiesinėje analizėje pasireiškia visiškai plastinėje stadijoje, kai tempiamos ir gniuždomos skerspjūvio dalys pasiekia 0,2 % tikrosios tamprumo ribos reikšmę.
 - Atliekant netiesinę analizę su 6 serijos stipresniais ($f_0=170-200$ MPa) lydiniais, skerspjūvio klupumas vyksta kai tempiama skerspjūvio dalis pasiekia 0,2 % tikrosios tamprumo ribos reikšmę, tačiau gniuždoma dalis šios reikšmės nespėja pasiekti.
 - Naudojant 6 arba 7 serijos sąlyginai stiprius aliuminio lydinius ($f_0=225-290$ MPa), 0,2 % tikrosios tamprumo ribos reikšmė klupumo metu nebepasiekama ir klupumas vyksta tik tamprioje stadijoje. Naudojant aliuminio lydinius,

kuriuose vietinis klumpumas vyksta tamprioje stadijoje, nebepriklausomai nuo lydinių stiprio, klumpamoji galia praktiškai nesiskiria.

5. Atlikus netiesines analizes įvertinant aliuminio lydinių sustiprėjimo poveikį, apskaičiuotą pagal EC9 normų pateikiamas išraiškas, pastebėta, jog dvitiesės įtempių ir santykinės deformacijos sąryšio kreivės, įvertinant aliuminio lydinių sustiprėjimo poveikį, vietoje prieš tai naudotos Prandtlio kreivės, įvedimas baigtinių elementų modelyje buvo nenaudingas. Gauta sijos laikomoji galia naudojant dvitiesį modelį su medžiagos sustiprėjimo poveikiu visiškai nesiskyrė nuo laikomosios galios, kuri buvo gauta naudojant Prandtlio modelį, nepriklausomai, ar skerspjūvis išklupo tamprioje, ar plastinėje stadijoje.
6. Atlikus netiesinę analizę su skerspjūviu, kuriam pašalinta keletas toliausiai išsikišusių ir labiausiai gniuždomų dalių, kurios kaip buvo manoma, ženkliai anksčiau sukelia skerspjūvio kluptį, pastebėta, jog gniuždomo ploto sumažėjimas glaudžiai siejasi su lenkiamosios galios sumažėjimu, todėl ši hipotezė nepasitvirtino. Gniuždomam plotui sumažėjus -14,08 %, lenkiamoji galia sumažėjo -16,44 %, kai tuo tarpu kritiniai įtempiai keitėsi nežymiai. (gniuždomieji +5,48 %, tempiamieji -2,37%).
7. Netiesinėje analizėje, pašalinus dalį tempiamo ploto, kuris, kaip buvo manoma, neturi didelio poveikio skerspjūvio klumpamajai galiai, skerspjūvio laikomoji galia sumažėjo labiau, nei pašalinus dalį gniuždomo ploto. Sumažinus tempiamą plotą – 9,67 %, kai tuo tarpu dėl neutraliosios ašies persislinkimo -3,18 % sumažėja gniuždomas plotas, lenkiamoji galia sumažėja – 15,16 %. Proporcingai lenkiamajai galiai sumažėja ir maksimalūs kritiniai įtempiai: gniuždomieji – 14,18 %, tempiamieji – 17,42 %.
8. Lyginant baigtinių elementų modeliais gautus netiesinių analizių rezultatus su analitiniais skaičiavimais, remiantis EC9 pateikta skaičiavimų metodika ir rekomendacijomis, gauti rezultatai ženkliai skyrėsi. Esant simetriškam plonasieniui 4 klasės U pavidalo loviniam profiliuociui su aukšta sienute, baigtinių elementų modeliu gauta laikomoji galia yra didesnė +20,78 % už analitiniu būdu gautus rezultatus, o nesimetriško abiejų pagrindinių ašių atžvilgiu kompleksiškos formos 4 klasės sijos-latakų baigtinių elementų modeliu gauti rezultatai didesni daugiau nei 2 kartus už analitinių skaičiavimų rezultatus, net neįvertinant skerspjūvį veikiančios šlyties bei sukimo. Todėl, remiantis atliktu tyrimu bei literatūros apžvalgoje aprašytais kitų mokslininkų atliktų darbų išvadomis, konstatuojama, jog projektavimo normos yra labai konservatyvios.

Gediminas Keleris 
2020.05.31

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Castaldo, P., Nastri, E. and Piluso, V. (2017). Ultimate behaviour of RHS temper T6 aluminium alloy beams subjected to non-uniform bending: Parametric analysis. In Loughlan, J., *Thin-Walled Structures*. Turin.
- Davies, J.M. (1991). Connections for cold-formed steelwork. In: *Design of Cold-Formed Steel Members*. (Rhodes, J., Editor), Elsevier Applied Science, London and New York.
- Dubina, D., Rondal, J. and Gioncu, V. (1996). Coupled instabilities in bar members. In: *CISM'96, - Coupled Instabilities in Metal Structures*. (pp. 119-132.). London: Eds. Imperial College Press.
- Dubina, D., Ungureanu, V. and Landolfo, R. (2012). *Design of Cold-formed Steel Structures. 1st Edition*. Portugal: Multicomp Lda.
- Dwight, J. (1999). *Aluminium Design and Construction*. London: E & FN Spon.
- Erp, van, G. M. (1989). Advanced buckling analyses of beams with arbitrary cross sections. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- GodSavesHoes (2019). Stress – strain diagram for mild steel and aluminium. [žiūrėta 2019 m. vasario 19 d.]. Prieiga per internetą: <http://godsaveshoes.com/stress-strain-diagram-for-mild-steel-pdf.html>.
- Hoglund, T. (2008). Design of Members. TALAT Lecture 2301. Stockholm.
- Kim, Y. (2003). Behavior and design of aluminum members in bending. Cornell: University of Cornell. NY. USA.
- Kim, Y. and Pekoz, T. (2010). Ultimate flexural strength of aluminum sections. Cornell: University of Cornell. NY. USA.
- Kissell, J. R. and Ferry, R. L. (2002). *Aluminum Structures. A Guide to Their Specifications and Design. Second Edition*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2008). *LST EN 1999-1-1. Eurokodas 9. Aliumininių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios konstrukcijų taisyklės*.
- Mazzolani, F. M. (2003). *Aluminium Structural Design*. New York: Springer-Verlag Wien.
- Mazzolani, F. M. (2008). *Design of Aluminium Structures*. Naples: University of Naples.

Mennink, J. (2002). Cross-sectional stability of aluminium extrusions : prediction of the actual local buckling behaviour. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

Piluso, V., Pisapia, A., Rosario M. and Nastri E. (2019). Ultimate resistance and rotation capacity of low yielding high hardening aluminium alloy beams under non-uniform bending. Italy.

Su, M., Young, B. and Gardner, L. (2017). Classification of Aluminium Alloy Cross-sections. In: *Engineering Structures*, 141: 29-40.

UAB „Sapa profiliai“. (2017). Standartinių aliuminio profilių ir sprendimų katalogas.

Wang, Y. (2006). Structural Behaviour and Design of Two Custom Aluminum Extruded Shapes in Custom Unitized Curtain Wall Systems. M.S. Thesis. Cincinnati.

WeltMetal (2020). Aluminum. [žiūrėta 2020 m. kovo 29 d.]. Prieiga per internetą: <http://weltmetall.es/en/aluminum/>.

Wikipedia (2020). Extruderen. [žiūrėta 2020 m. kovo 29 d.]. Prieiga per internetą: <https://nl.wikipedia.org/wiki/Extruderen>.

Xiong, Z. (2015). Flexural – torsional buckling behaviour of aluminum alloy beams. In: *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. June 2015.

Хирковский А., Сердюк Д.О., Горемыкин В.В. (2015). Анализ работы несущих элементов из алюминиевых сплавов. На: *Инженерно-строительный журнал*, №5, (86-96 стр.).

PRIEDAI

A priedas. Atvirųjų plonasienių skerspjūvių konstantos (LST EN 1999-1-1:2007 J.4 ir J.5 priedai)

J.4 Atvirųjų plonasienių skerspjūvių konstantos

(1) Skerspjūvis padalijamas į n dalių. Dalys sunumeruojamos nuo 1 iki n . Tarp dalių įterpiami mazgai. Jie sunumeruojami nuo 0 iki n . Tuomet i dalį apibrėžia mazgai $i - 1$ ir i . Mazgams suteikiamos koordinatės ir (efektyvusis) storis.

Mazgai ir dalys $j = 0..n$ $i = 1..n$.

Skerspjūvio dalių plotas:

$$dA_i = \left[t_i \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \right]. \quad (J.5)$$

Skerspjūvio plotas:

$$A = \sum_{i=1}^n dA_i. \quad (J.6)$$

Skerspjūvio ploto statinis inercijos momentas aplink y ašį ir sunkio centro koordinatės:

$$S_{y0} = \sum_{i=1}^n (z_i + z_{i-1}) \frac{dA_i}{2}; \quad z_{gc} = \frac{S_{y0}}{A}. \quad (J.7)$$

Skerspjūvio ploto inercijos momentas aplink pradinę y ašį ir naująją y ašį, einančią per sunkio centrą:

$$I_{y0} = \sum_{i=1}^n \left[(z_i)^2 + (z_{i-1})^2 + z_i z_{i-1} \right] \frac{dA_i}{3}; \quad I_y = I_{y0} - A z_{gc}^2. \quad (J.8)$$

Skerspjūvio ploto statinis inercijos momentas aplink z ašį ir sunkio centro koordinatės:

$$S_{z0} = \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i-1}) \frac{dA_i}{2}; \quad y_{gc} = \frac{S_{z0}}{A}. \quad (J.9)$$

Skerspjūvio ploto inercijos momentas aplink pradinę z ašį ir naująją z ašį, einančią per sunkio centrą:

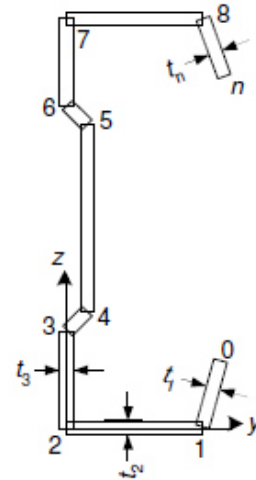
$$I_{z0} = \sum_{i=1}^n \left[(y_i)^2 + (y_{i-1})^2 + y_i y_{i-1} \right] \frac{dA_i}{3}; \quad I_z = I_{z0} - A y_{gc}^2. \quad (J.10)$$

Mišrusis skerspjūvio ploto inercijos momentas aplink pradines y ir z ašis ir naujasias ašis, einančias per sunkio centrą:

$$I_{yz0} = \sum_{i=1}^n \left[2y_{i-1}z_{i-1} + 2y_i z_i + z_i y_{i-1} + y_i z_{i-1} \right] \frac{dA_i}{6}; \quad I_{yz} = I_{yz0} - \frac{S_{y0} S_{z0}}{A}. \quad (J.11)$$

Pagrindinė ašis:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2I_{yz}}{I_z - I_y} \right), \text{ jei } (I_z - I_y) \neq 0, \text{ kitais atvejais } \alpha = 0; \quad (J.12)$$



**J.3 paveikslas.
Skerspjūvio mazgai**

$$I_{\xi} = \frac{1}{2} \left[I_y + I_z + \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4I_{yz}^2} \right]; \quad (\text{J.13})$$

$$I_{\eta} = \frac{1}{2} \left[I_y + I_z - \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4I_{yz}^2} \right]. \quad (\text{J.14})$$

Sektorių koordinatės:

$$\omega_0 = 0; \quad \omega_{0i} = z_i y_{i-1} - y_i z_{i-1}; \quad \omega_i = \omega_{i-1} + \omega_{0i}. \quad (\text{J.15})$$

Sektoriaus koordinatinių vidurkis:

$$I_{\omega} = \sum_{i=1}^n (\omega_i + \omega_{i-1}) \frac{dA_i}{2}; \quad \omega_{\text{mean}} = \frac{I_{\omega}}{A}. \quad (\text{J.16})$$

Sektorių konstantos:

$$I_{y\omega 0} = \sum_{i=1}^n [2y_{i-1}\omega_{i-1} + 2y_i\omega_i + \omega_i y_{i-1} + y_i \omega_{i-1}] \frac{dA_i}{6}; \quad I_{y\omega} = I_{y\omega 0} - \frac{S_{z0} I_{\omega}}{A}; \quad (\text{J.17})$$

$$I_{z\omega 0} = \sum_{i=1}^n [2z_{i-1}\omega_{i-1} + 2z_i\omega_i + \omega_i z_{i-1} + z_i \omega_{i-1}] \frac{dA_i}{6}; \quad I_{z\omega} = I_{z\omega 0} - \frac{S_{y0} I_{\omega}}{A}; \quad (\text{J.18})$$

$$I_{\omega\omega 0} = \sum_{i=1}^n [(\omega_i)^2 + (\omega_{i-1})^2 + \omega_i \omega_{i-1}] \frac{dA_i}{3}; \quad I_{\omega\omega} = I_{\omega\omega 0} - \frac{I_{\omega}^2}{A}. \quad (\text{J.19})$$

Šlyties centras:

$$y_{sc} = \frac{I_{z\omega} I_z - I_{y\omega} I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2}; \quad z_{sc} = \frac{-I_{y\omega} I_y - I_{z\omega} I_{yz}}{I_y I_z - I_{yz}^2}; \quad (I_y I_z - I_{yz}^2 \neq 0). \quad (\text{J.20})$$

Deplanacijos konstanta:

$$I_w = I_{\omega\omega} + z_{sc} I_{y\omega} - y_{sc} I_{z\omega}. \quad (\text{J.21})$$

Sukimo konstantos:

$$I_t = \sum_{i=1}^n dA_i \frac{(r_i)^2}{3}; \quad W_t = \frac{I_t}{\min(r)}. \quad (\text{J.22})$$

Sektoriaus koordinatė šlyties centro atžvilgiu:

$$\omega_{sj} = \omega_j - \omega_{\text{mean}} + z_{sc} (y_j - y_{gc}) - y_{sc} (z_j - z_{gc}). \quad (\text{J.23})$$

Didžiausioji sektoriaus koordinatė ir deplanacijos modulis:

$$\omega_{\text{max}} = \max(|\omega_s|); \quad W_w = \frac{I_w}{\omega_{\text{max}}}. \quad (\text{J.24})$$

Atstumas tarp šlyties centro ir sunkio centro:

$$y_s = y_{sc} - y_{gc}; \quad z_s = z_{sc} - z_{gc}. \quad (J.25)$$

Poliarinis skerspjūvio ploto inercijos momentas šlyties centro atžvilgiu:

$$I_p = I_y + I_z + A(y_s^2 + z_s^2). \quad (J.26)$$

Nesimetriškumo koeficientai z_i ir y_i :

$$z_j = z_s - \frac{0,5}{I_y} \sum_{i=1}^n \left[(z_{ci})^3 + z_{ci} \left[\frac{(z_i - z_{i-1})^2}{4} + (y_{ci})^2 + \frac{(y_i - y_{i-1})^2}{12} \right] + y_{ci} \frac{(y_i - y_{i-1})(z_i - z_{i-1})}{6} \right] dA_i; \quad (J.27)$$

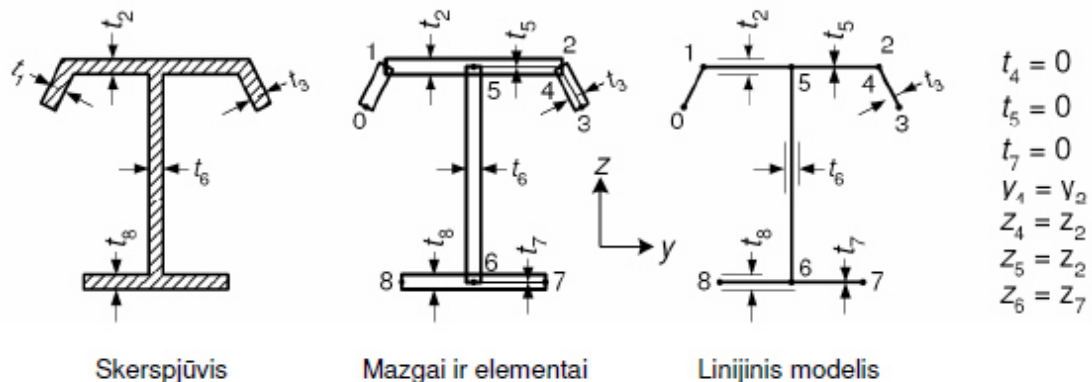
$$y_j = y_s - \frac{0,5}{I_z} \sum_{i=1}^n \left[(y_{ci})^3 + y_{ci} \left[\frac{(y_i - y_{i-1})^2}{4} + (z_{ci})^2 + \frac{(z_i - z_{i-1})^2}{12} \right] + z_{ci} \frac{(z_i - z_{i-1})(y_i - y_{i-1})}{6} \right] dA_i; \quad (J.28)$$

čia skerspjūvio dalių centro koordinatės šlyties centro atžvilgiu:

$$y_{ci} = \frac{y_i + y_{i-1}}{2} - y_{gc}; \quad z_{ci} = \frac{z_i + z_{i-1}}{2} - z_{gc}. \quad (J.29)$$

PASTABA Kai skerspjūvių y ašis (z ašis) yra simetrijos ašis, $z_i = 0$ ($y_i = 0$), žr. J.3 paveikslą.

J.5 Atvirųjų skerspjūvių su atšakomis konstantos



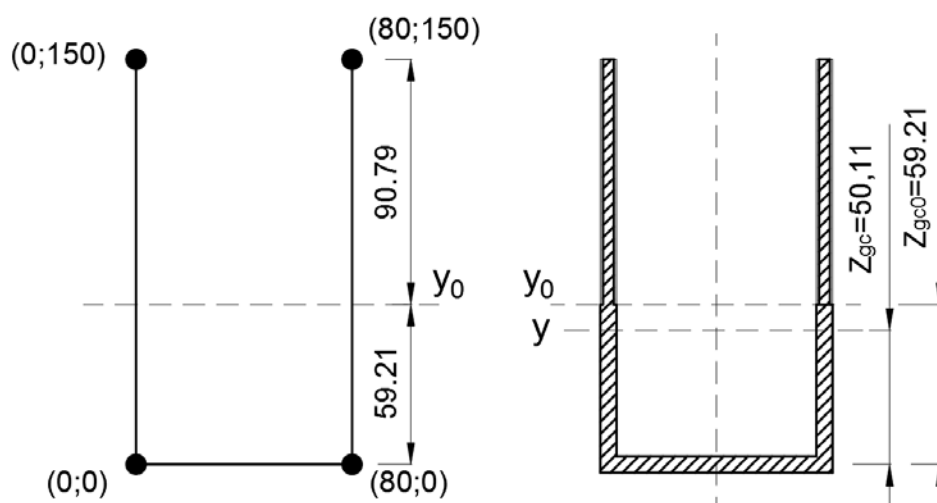
J.4 paveikslas. Skerspjūvių su atšakomis mazgai ir dalys

(1) Skerspjūviams su atšakomis gali būti vartojamos J.4 pateiktos formulės. Tačiau atšakomis (kurių storis $t = 0$) **sekama** iki kitos $t \neq 0$ storio dalies, žr. 3-4-5 ir 6-7 atšakas J.4 paveiksle.

B priedas. Pirmojo skerspjūvio konstantų skaičiavimas pagal LST EN 1999-1-1:2007 metodiką

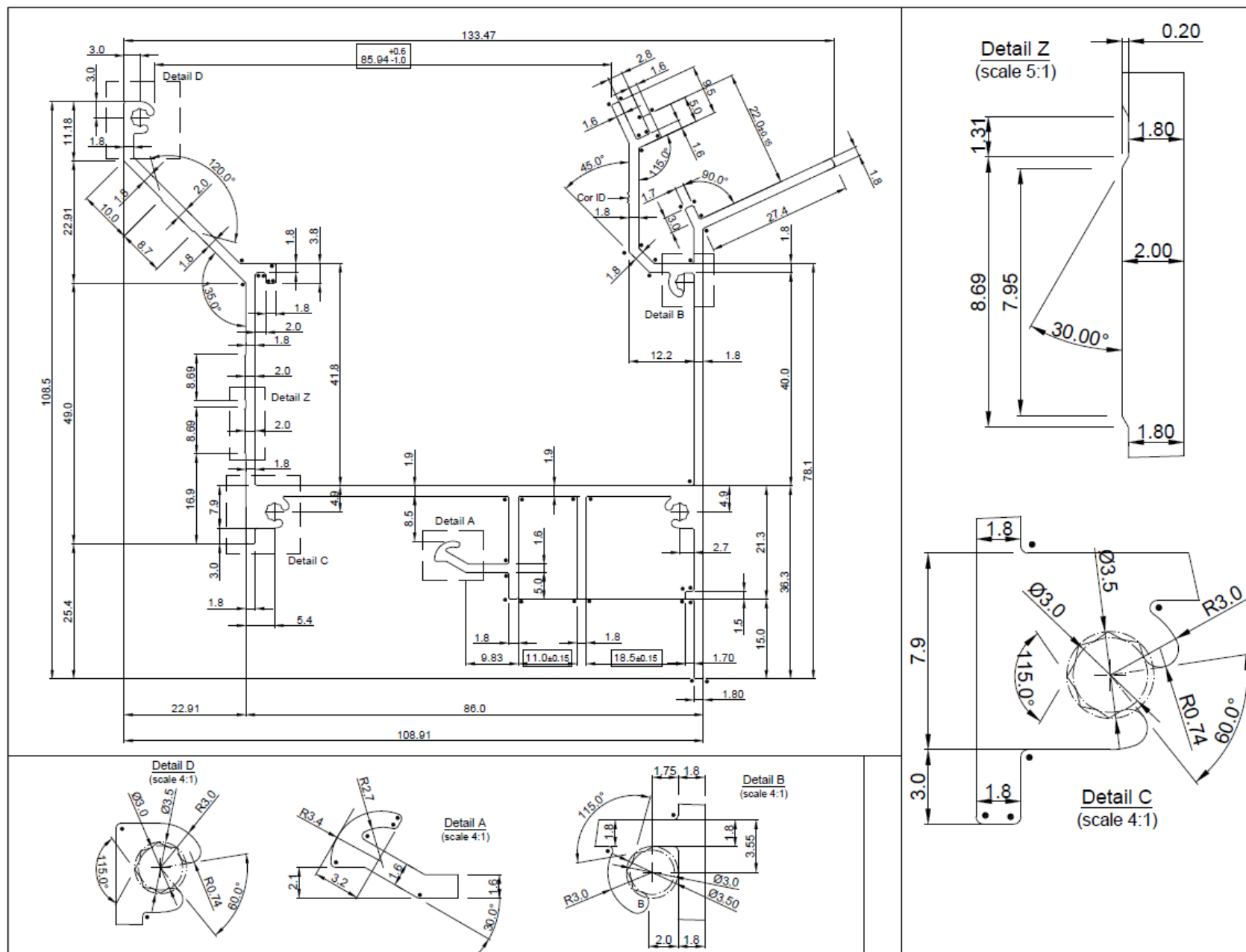
B.1 lentelė. Pirmojo skerspjūvio konstantų ir laikomosios galios skaičiavimo lentelė

El. Nr.	Mazgo Nr.	Y koord., mm	Z koord., mm	Storis t, mm	dA _i	$(z_i+z_{i-1}) \cdot dA_i/2$	Min t, mm	3,9
1	0	0	150	3,9	351	36855	A, mm ² :=	1902
	1	0	60				S _{y0} , m ³ :=	$9,53 \times 10^{-5}$
2	1	0	60	6	360	10800	Z _{gc} , mm:=	50,11
	2	0	0				I _{y0} , m ⁴ :=	$9,077 \times 10^{-6}$
3	2	0	0	6	480	0	I _y , m ⁴ :=	$4,301 \times 10^{-6}$
	3	80	0				W _{ue} , m ³ :=	$4,306 \times 10^{-5}$
4	3	80	0	6	360	10800	W _{be} , m ³ :=	$8,099 \times 10^{-5}$
	4	80	60				W _{eff} , m ³ :=	$4,306 \times 10^{-5}$
5	4	80	60	3,9	351	36855	f ₀ , MPA:=	255
	5	80	150				M _{Rd} , kNm:=	9,98

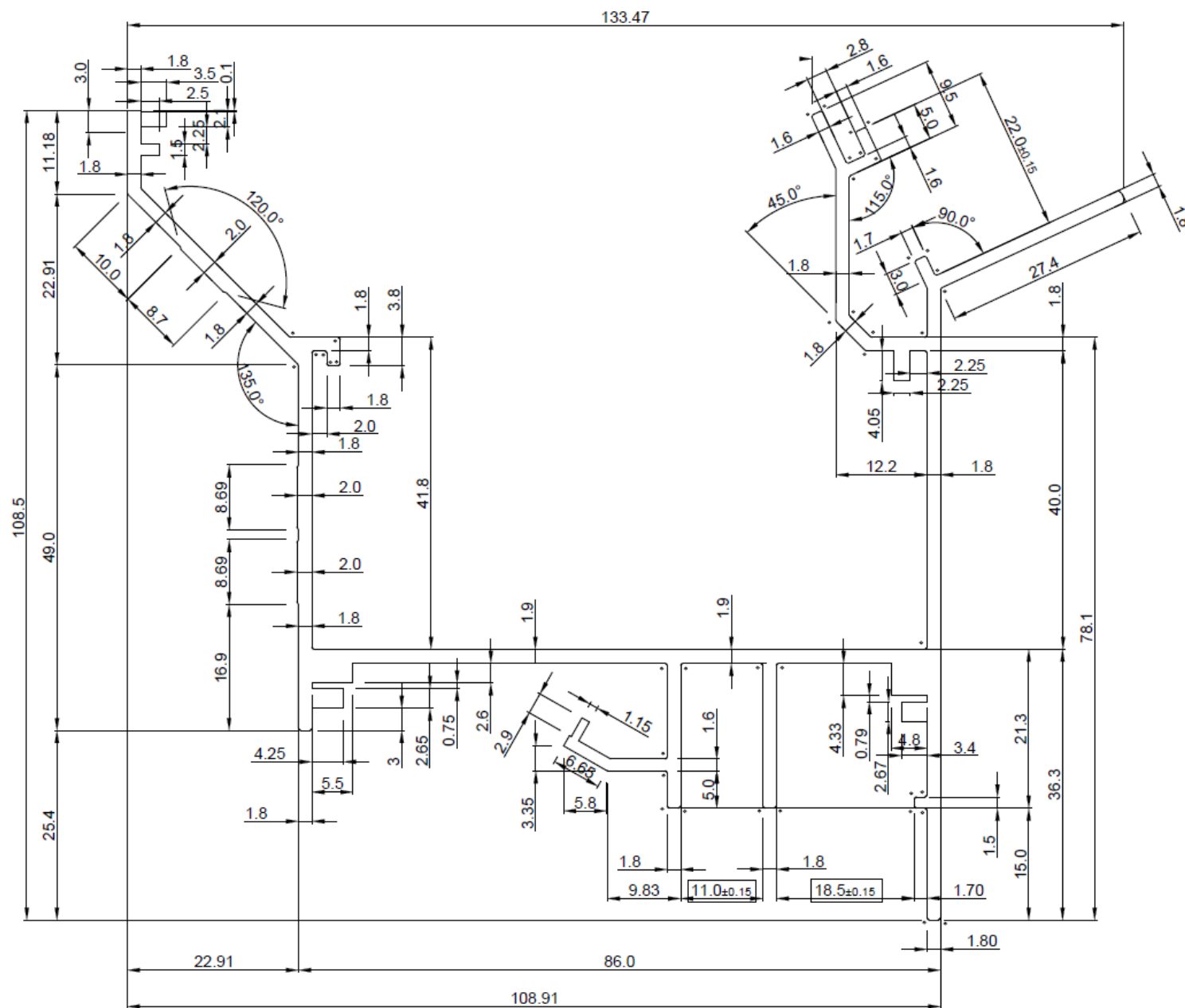


B. 1 pav. Skerspjūvio sektorių koordinatės ir efektyvusis skerspjūvis

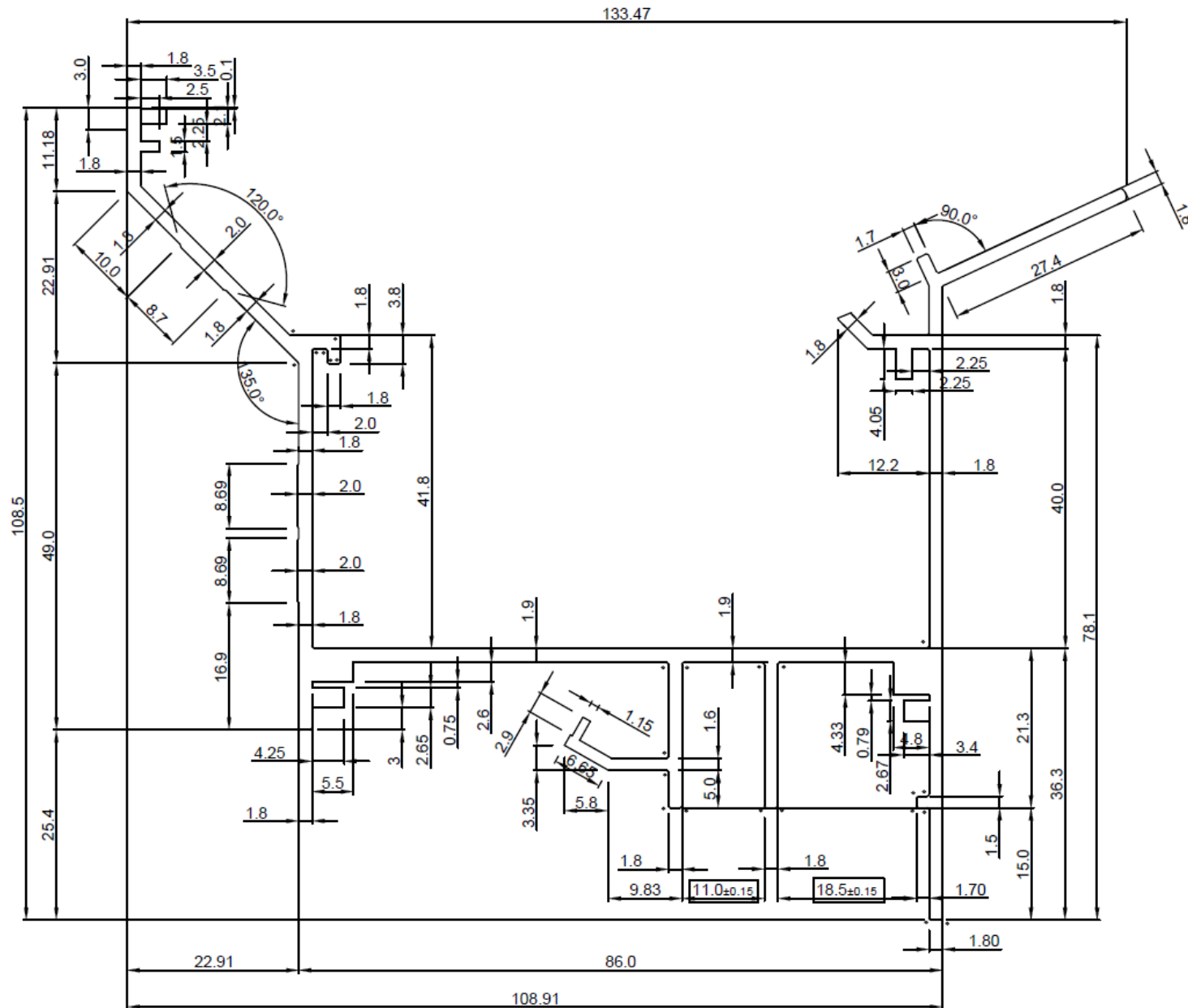
C priedas. Antrojo skerspjūvio tikrieji matmenys



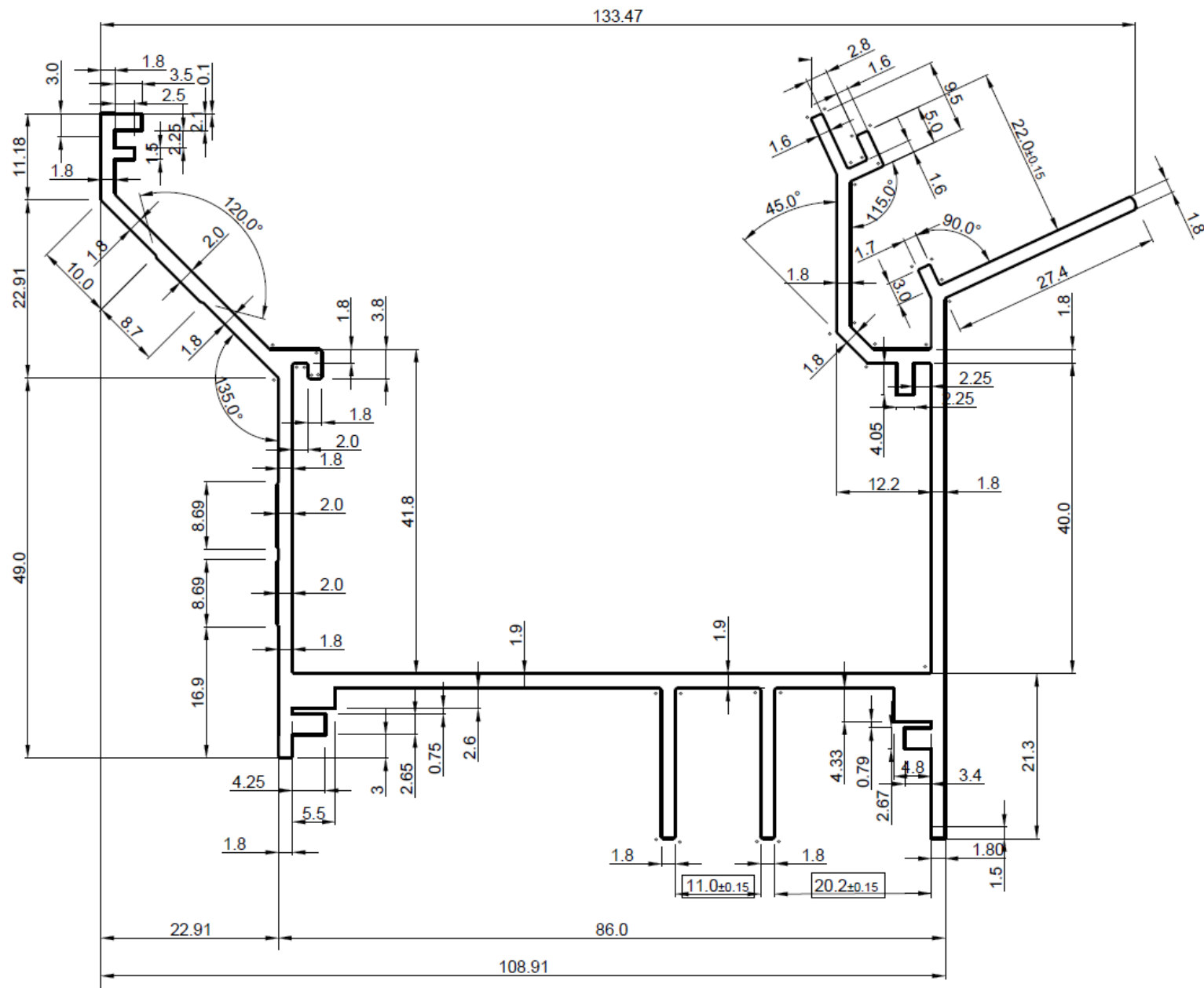
D priedas. Antrasis skerspējūvis su supaprastintomis sastādomis



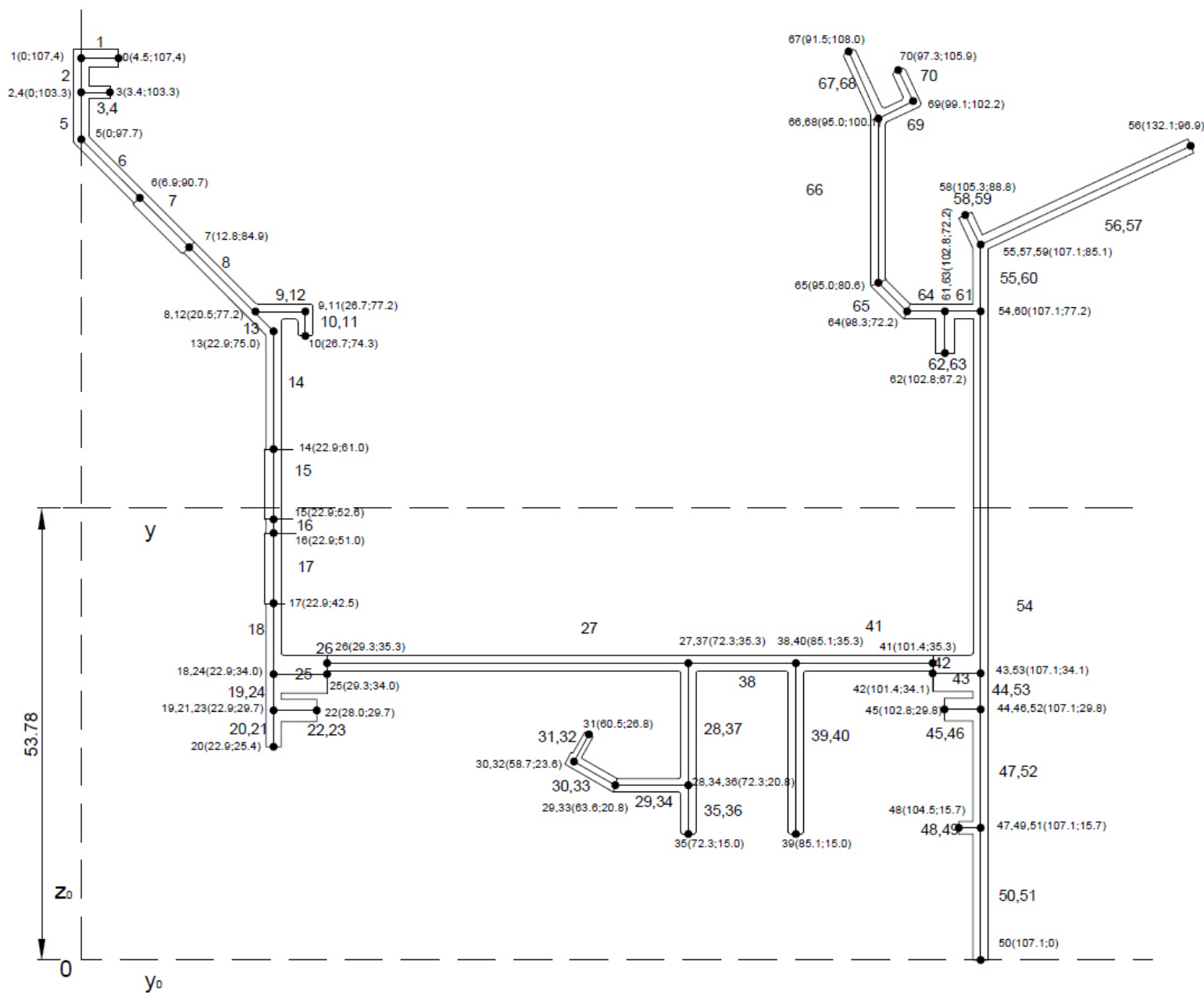
E priedas. Antrojo skerspjuvio, kuriam pašalinta dalis gniuždomų elementų, matmenys



F priedas. Antrojo skerspjūvio, kuriam pašalinta dalis tempiamų elementų, matmenys



G priedas. Antrasis skerspjūvis su jo dalimis suteiktomis koordinatēm ir pradine neutraliāja ašimi



H priedas. Antrojo skerspjūvio konstantų skaičiavimas pagal LST EN 1999-1-1:2007 metodiką.

H.1 lentelė. Antrojo skerspjūvio konstantų skaičiavimo lentelė

El. Nr.	Mazgo Nr.	Y koord., mm	Z koord., mm	Storis t, mm	dAi	$(z_i + z_{i-1}) * d_{Ai} / 2$
1	0	4,5	107,4	0,336	1,512	162,3888
	1	0	107,4			
2	1	0	107,4	0,288	1,1808	124,39728
	2	0	103,3			
3	2	0	103,3	0,24	0,816	84,2928
	3	3,4	103,3			
4	3	3,4	103,3	0	0	0
	4	0	103,3			
5	4	0	103,3	0,288	1,6128	162,0864
	5	0	97,7			
6	5	0	97,7	0,288	2,83076	266,6578859
	6	6,9	90,7			
7	6	6,9	90,7	0,32	2,6475	232,4508938
	7	12,8	84,9			
8	7	12,8	84,9	0,288	3,13616	254,1857677
	8	20,5	77,2			
9	8	20,5	77,2	0,288	1,7856	137,84832
	9	26,7	77,2			
10	9	26,7	77,2	0,288	0,8352	63,2664
	10	26,7	74,3			
11	10	26,7	74,3	0	0	0
	11	26,7	77,2			
12	11	26,7	77,2	0	0	0
	12	20,5	77,2			
13	12	20,5	77,2	0,288	0,93766	71,35593105
	13	22,9	75			
14	13	22,9	75	0,288	4,032	274,176
	14	22,9	61			
15	14	22,9	61	0,32	2,688	152,6784
	15	22,9	52,6			
16	15	22,9	52,6	1,8	2,88	149,184
	16	22,9	51			
17	16	22,9	51	2	17	794,75
	17	22,9	42,5			
18	17	22,9	42,5	1,8	15,3	585,225
	18	22,9	34			

H.1 lentelės tęsinys

19	18	22,9	34	1,8	7,74	246,519
	19	22,9	29,7			
20	19	22,9	29,7	1,8	7,74	213,237
	20	22,9	25,4			
21	20	22,9	25,4	0	0	0
	21	22,9	29,7			
22	21	22,9	29,7	2,65	13,515	401,3955
	22	28	29,7			
23	22	28	29,7	0	0	0
	23	22,9	29,7			
24	23	22,9	29,7	0	0	0
	24	22,9	34			
25	24	22,9	34	4,5	28,8	979,2
	25	29,3	34			
26	25	29,3	34	0	0	0
	26	29,3	35,3			
27	26	29,3	35,3	1,9	81,7	2884,01
	27	72,3	35,3			
28	27	72,3	35,3	1,8	26,1	732,105
	28	72,3	20,8			
29	28	72,3	20,8	1,6	13,92	289,536
	29	63,6	20,8			
30	29	63,6	20,8	1,6	9,02973	200,4599767
	30	58,7	23,6			
31	30	58,7	23,6	1,15	4,22224	106,4004163
	31	60,5	26,8			
32	31	60,5	26,8	0	0	0
	32	58,7	23,6			
33	32	58,7	23,6	0	0	0
	33	63,6	20,8			
34	33	63,6	20,8	0	0	0
	34	72,3	20,8			
35	34	72,3	20,8	1,8	10,44	186,876
	35	72,3	15			
36	35	72,3	15	0	0	0
	36	72,3	20,8			
37	36	72,3	20,8	0	0	0
	37	72,3	35,3			
38	37	72,3	35,3	1,9	24,32	858,496
	38	85,1	35,3			
39	38	85,1	35,3	1,8	36,54	918,981
	39	85,1	15			

H.1 lentelės tęsinys

40	39	85,1	15	0	0	0
	40	85,1	35,3			
41	40	85,1	35,3	1,9	30,97	1093,241
	41	101,4	35,3			
42	41	101,4	35,3	0	0	0
	42	101,4	34,1			
43	42	101,4	34,1	6,2	35,34	1205,094
	43	107,1	34,1			
44	43	107,1	34,1	1,8	7,74	247,293
	44	107,1	29,8			
45	44	107,1	29,8	2,67	11,481	342,1338
	45	102,8	29,8			
46	45	102,8	29,8	0	0	0
	46	107,1	29,8			
47	46	107,1	29,8	1,8	25,38	577,395
	47	107,1	15,7			
48	47	107,1	15,7	1,5	3,9	61,23
	48	104,5	15,7			
49	48	104,5	15,7	0	0	0
	49	107,1	15,7			
50	49	107,1	15,7	1,8	28,26	221,841
	50	107,1	0			
51	50	107,1	0	0	0	0
	51	107,1	15,7			
52	51	107,1	15,7	0	0	0
	52	107,1	29,8			
53	52	107,1	29,8	0	0	0
	53	107,1	34,1			
54	53	107,1	34,1	1,8	77,58	4317,327
	54	107,1	77,2			
55	54	107,1	77,2	1,8	14,22	1153,953
	55	107,1	85,1			
56	55	107,1	85,1	1,08	29,8565	2716,93989
	56	132,1	96,9			
57	56	132,1	96,9	0	0	0
	57	107,1	85,1			
58	57	107,1	85,1	1,7	6,99483	608,2007996
	58	105,3	88,8			
59	58	105,3	88,8	0	0	0
	59	107,1	85,1			

H.1 lentelės tęsinys

60	59	107,1	85,1	0	0	0
	60	107,1	77,2			
61	60	107,1	77,2	1,8	7,74	597,528
	61	102,8	77,2			
62	61	102,8	72,2	2,25	11,25	784,125
	62	102,8	67,2			
63	62	102,8	67,2	0	0	0
	63	102,8	72,2			
64	63	102,8	72,2	1,8	8,1	584,82
	64	98,3	72,2			
65	64	98,3	72,2	0,648	5,84818	446,8007658
	65	95	80,6			
66	65	95	80,6	0,648	12,636	1141,6626
	66	95	100,1			
67	66	95	100,1	0,576	4,97699	517,8554614
	67	91,5	108			
68	67	91,5	108	0	0	0
	68	95	100,1			
69	68	95	100,1	0,576	2,65335	268,3867432
	69	99,1	102,2			
70	69	99,1	102,2	0,576	2,37001	246,5999857
	70	97,3	105,9			

H.2 lentelė. Antrojo skerspjūvio laikomosios galios skaičiavimo lentelė

Min t , mm	0,24
A , mm ² : =	650,56
S_{y0} , m ³ : =	2.866×10^{-5}
Z_{gc} , mm=	44,06
I_{y0} , mm ⁴ : =	$1,638 \times 10^{-6}$
I_y , mm ⁴ =	3.760×10^{-7}
W_{ue} , m ³ : =	5.888×10^{-6}
W_{be} , m ³ : =	8.532×10^{-6}
W_{eff} , m ³ : =	5.888×10^{-6}
f_0 , MPA: =	255
M_{Rd} , kNm: =	1,36

SUTIKIMAS DĖL ASMENS DUOMENŲ NAUDOJIMO

2020-05-31

(Data)

Šiuo sutikimu aš, Gediminas Keleris (toliau – Duomenų subjektas) sutinku, kad Vilniaus Gedimino technikos universitetas, juridinio asmens kodas 111950243, adresas Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius (toliau – Duomenų valdytojas), tvarkytų mano asmens duomenis kitų studentų mokymosi tikslu. T. y. tvarkytų (*pažymėkite tinkamą*):

- ☐ vardą, pavardę, bakalauro baigiamąjį darbą;
- ☐ bakalauro baigiamąjį darbą, nenurodant vardo, pavardės;
- ☒ vardą, pavardę, magistro baigiamąjį darbą;
- ☐ magistro baigiamąjį darbą nenurodant vardo, pavardės.

Šiuo tikslu tvarkomų asmens duomenų Duomenų valdytojas neperduos jokiems tretiesiems asmenims, studentams su baigiamaisiais darbais bus leidžiama susipažinti vidinėje informacinėje sistemoje. Duomenų subjekto asmens duomenys šiuo tikslu bus naudojami ne ilgiau nei 5 metai.

Šiuo sutikimu Duomenų subjektas patvirtina, kad yra supažindintas su šiomis teisėmis:

- Susipažinti su savo duomenimis ir kaip jie yra tvarkomi (teisė susipažinti);
- Reikalauti ištaisyti arba, atsižvelgiant į asmens duomenų tvarkymo tikslus papildyti asmens neišsamius asmens duomenis (teisė ištaisyti);
- Savo duomenis sunaikinti arba sustabdyti savo duomenų tvarkymo veiksmus (išskyrus saugojimą) (teisė sunaikinti ir teisė „būti pamirštam“);
- Reikalauti, kad asmens duomenų valdytojas apribotų asmens duomenų tvarkymą (teisė apriboti);
- Teisė į duomenų perkėlimą (teisė perkelti);
- Nesutikti, kad būtų tvarkomi asmens duomenys, kai šie duomenys tvarkomi ar ketinami tvarkyti kitais tikslais;
- Pateikti skundą Valstybinei duomenų apsaugos inspekcijai;

Duomenų subjektas turi teisę bet kuriuo metu atšaukti savo sutikimą.

Gediminas Keleris

[Duomenų subjekto vardas, pavardė, parašas]



Duomenų valdytojo rekvizitai:
Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Juridinio asmens kodas: 111950243
Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius
Tel. (8 5) 274 5030
Faks. (8 5) 270 0112
El. paštas: vgtu@vgtu.lt

PVM mokėtojo kodas: LT119502413

Duomenų apsaugos pareigūno tel. (8 5) 251 2191, el. paštas: dap@vgtu.lt