



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
METALINIŲ IR KOMPOZITINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Karolis Grinius

**VIRINTINIO „I“ TIPO SIJOS IR „RHS“ TIPO KOLONOS MAZGO ANALIZĖ
ĮVERTINANT PLIENO NUOVARGĮ**

**WELDED „I“ BEAM AND „RHS“ COLUMN JOINT ANALYSIS CONSIDERING
STEEL FATIGUE**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvųjų šiuolaikinių konstrukcijų specializacija

Statybos inžinerijos 02T studijų kryptis

Vilnius, 2018

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedra

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

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

Pavadinimas **Virintinio I tipo sijos ir RHS tipo kolonos mazgo analizė įvertinant plieno nuovargį**

Autorius **Karolis Grinius**

Vadovas **Kęstutis Urbonas**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Konstrukcinio plieno nuovargis yra svarbus kriterijus projektuojant virintinius mazgus, kurie patiria pasikartojančius ciklinius apkrovimus. Baigiamajame darbe yra analizuojamas virintinis „I“ tipo sijos ir „RHS“ tipo kolonos mazgas, kuris yra pokraninės konstrukcijos dalis. Literatūros apžvalgoje yra nagrinėjami šio mazgo stiprumo skaičiavimo metodai bei virintinių siūlų nuovargio skaičiavimo metodai. Praktinėje dalyje yra sudaroma reali pokraninės konstrukcijos situacija. Pagal gautas, saugos ribinio būvio įrašas, remiantis LST EN 1993-1-8, yra suprojektuojamas virintinis mazgas. Suprojektavus mazgą, pagal LST EN 1993-1-9 yra patikrinama jo varginamoji tvermė. Baigtinių elementų programa yra sumodeliuojama analizuojama situacija. Analitinių skaičiavimų rezultatai yra lyginami su skaitinės analizės metu gautais rezultatais, pateikiamos išvados ir siūlymai.

Darbą sudaro 8 dalys: įvadas, literatūros apžvalga, nagrinėjamo objekto skaičiavimo prielaidos, virintinio mazgo skaičiavimas pagal Eurokodą 3, virintinio mazgo analizė baigtinių elementų programa, analizuojamo virintinio mazgo gautų rezultatų tyrimai, išvados ir siūlymai, literatūros sąrašas.

Darbo apimtis – 77 p. teksto be priedų, 45 iliustr., 8 lent., 20 bibliografiniai šaltiniai. Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: konstrukcinio mazgo analizė, baigtinių elementų metodo analizė, virintinio I formos skerspjūvio ir RHS elemento mazgas, plieno nuovargis, virintinės siūlės nuovargis.

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

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

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

Title	Welded I beam and RHS column joint analysis considering steel fatigue
-------	--

Author	Karolis Grinius
--------	-----------------

Academic supervisor **Kęstutis Urbonas**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

Steel fatigue is an important criteria when designing welded connections that are subjected to repeated cyclic loadings. In this Thesis a welded I beam and RHS column connection that is a part of crane way structure is analyzed. In the literature review design resistance calculation methods of the connection and weld fatigue resistance calculations methods are examined. In the analysis part a real situation of a crane way structure was created. Using the received internal forces of ultimate limit state load case a welded connection was designed according to LST EN 1993-1-8. Afterwards, the designed connections' fatigue life was checked according to LST EN 1993-1-9. The analyzed connection was modeled using finite element software. Analytically received results were compared to results that were received using the finite element analysis. After analyzing the results, final conclusions and suggestions were given.

Thesis consists of 8 parts: introduction, analyzed object calculation assumptions, welded connection calculations according to Eurocode 3, welded connection analysis by finite elements, received result comparison and analysis, conclusions and suggestions.

Thesis consists of 77 p. text without appendixes, 45 pictures, 8 tables, 20 bibliographical entries. Appendixes included.

Keywords: structural connection analysis, finite element analysis, welded I beam and RHS column connection, steel fatigue, weld fatigue.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
IVADAS	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	10
1.1. Uždaro kvadratinio skerspjuvio kolonos pasirinkimas.....	10
1.2. Mazgo lenkiamasis stipris.....	10
1.3. Virintinės siūlės nuovargis	13
1.3.1. Pagrindiniai parametrai nuo kurių priklauso varginamoji tvermė.....	15
1.3.2. Nuovargio stiprio vertinimas.....	17
1.3.3. Klasifikavimo metodas.....	18
1.3.4. Varginamojo stiprio kreivės	19
1.3.5. Varginamojo stiprio kreivės įvertinant nepastovios amplitudės įtempių intervalus ..	20
1.3.6. Varginamojo stiprio kreivės pagal Eurokodą.....	22
1.3.7. Virintinę siūlę veikiančių įtempių skaičiavimas	23
1.3.8. Siūlės nuovargio skaičiavimas pagal Eurokodą	25
1.3.9. Nuovargio patikra pagal Eurokodą 3.....	28
1.4. Literatūros apžvalgos išvados.....	29
2. NAGRINĖJAMO OBJEKTO SKAIČIAVIMO PRIELAIIDOS.....	31
2.1. Nagrinėjamos situacijos aprašymas.....	31
2.2. Veikiančių apkrovų skaičiavimas	33
2.2.1. Saugaus ribinio būvio skaičiuojamosios apkrovos.....	33
2.2.2. Varginamosios skaičiuojamosios apkrovos.....	35
3. VIRINTINIO MAZGO SKAIČIAVIMAS PAGAL EUROKODĄ 3	38
3.1. Virintinio mazgo laikomosios galios skaičiavimas	38
3.1.1. Skaičiuotinė virintinio mazgo laikomoji galia	39
3.1.2. Skaičiuotinė kertinės virintinės siūlės laikomoji galia	40
3.2. Virintinio mazgo plieno nuovargio skaičiavimas	42

3.2.1	Virintinio mazgo detalės kategorija	42
3.2.2	Virintinio mazgo varginamųjų įtempių intervalas.....	43
3.2.3	Virintinio mazgo nuovargio patikra	44
3.3.	Plieno charakteristikų kitimo priklausomybės kreivės nuo ciklų skaičiaus sudarymas	46
3.3.1	Ciklų skaičiaus ir įtempių priklausomybė	46
3.3.2	Ciklų skaičiaus ir jėgų veikiančių gembę priklausomybė	47
3.3.3	Ciklų skaičiaus ir įtempių priklausomybių skirtumas priklausomai nuo nuovargio vertinimo metodo	48
3.4.	Analitinio skaičiavimo rezultatai.....	49
4.	VIRINTINIO MAZGO SKAIČIAVIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU.....	51
4.1.	BEM modelių geometrija, mazgo įtvirtinimo sąlygos.....	51
4.2.	BEM modelio suskaidymas į pasirinktus baigtinius elementus	53
4.3.	Plieno charakteristikų įvertinimas baigtinių elementų programoje	56
4.4.	Baigtinių elementų modelio analizės nustatymai	58
4.5.	Baigtinių elementų dydžio parinkimas	59
5.	NAGRINĖJAMO VIRINTINIO MAZGO TYRIMAS	63
5.1.	Mazgo laikomoji galia	63
5.2.	Mazgo varginamoji laikomoji galia.....	66
5.3.	Analizuojamo mazgo tyrimo išvados	68
	IŠVADOS IR SIŪLYMAI.....	70
	LITERATŪRA	72
	PRIEDAI.....	74

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Atliktų bandymų schemos (Lu 1997).....	11
1.2 pav. Mazgo suirimo atvejai (Lu 1997).....	11
1.3 pav. Išilginės plokštelės ir dvitėjo profiliuoto su uždaro skerspjūvio kolona mazgai (EN 1993-1-8:2005).....	12
1.4 pav. Galimos įtrūkių dėl plieno nuovargio vietos virintinėje siūlėje (IIW guideline ... 2012)...	14
1.5 pav. Siūlės priekinio paviršiaus (a) ir siūlės šaknies (b) įtrūkiai (IIW guideline ... 2012)	15
1.6 pav. Siūlę veikiančių įtempių intervalas ir liekamųjų įtempių įtaka (TGC 10, 2006)	16
1.7 pav. Pastovios amplitudės apkrovimų, mazgo nuovargio bandymo rezultatai pateikiami $\Delta\sigma - N$ diagramoje (TGC 10 2006)	19
1.8 pav. Pažaidų sumavimo metodo grafikas (Nussbaumer <i>et al.</i> 2011)	21
1.9 pav. Įtempių intervalų įtaka, esančių žemiau nuovargio ribos $\Delta\sigma D$ ir atkirtos ribos $\Delta\sigma L$ (TGC 10 2006)	22
1.10 pav. Normalinių įtempių intervalų varginamojo stiprio kreivės (EN 1993-1-9, 7.1 pav.).....	23
1.11 pav. Kertinę siūlę veikiantys įtempiai (Nussbaumer <i>et al.</i> 2011)	24
1.12 pav. Nagrinėjamo mazgo galimo plyšių susidarymo vietos (Nussbaumer <i>et al.</i> 2011).....	25
1.13 pav. Patikimumo indekso kitimas laike, priklausomai nuo nuovargio vertinimo metodo (Nussbaumer <i>et al.</i> 2011)	26
2.1 pav. Aksonometrinis analizuojamo mazgo vaizdas	31
2.2 pav. Analizuojamas tiltinis kranas	32
2.3 pav. Rekomenduojamos γ reikšmės (EN 1991-3, A.1 lentelė)	34
3.1 pav. Pavojingiausias apkrovimo derinys.....	39
3.2 pav. Įtempiai kertinės virintinės siūlės skerspjūvyje (EN 1993-1-8, 4.5 pav.)	40
3.3 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas	46
3.4 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas	47
3.5 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas	48
3.6 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas	49
4.1 pav. BEM modelių tipai: 1) modeliuojant visą prijungiamo elemento skerspjūvį; 2) modeliuojant tik tempiamą skerspjūvio lentyną	52
4.2 pav. Virintinių siūlių modelis <i>Dlubal RFEM</i> paketo aplinkoje	53
4.3 pav. Plokštuminio tipo elementas <i>Dlubal RFEM</i> aplinkoje.....	53
4.4 pav. Teisingos ir neteisingos kontaktinio paviršiaus simuliacijos, naudojant plokštuminius elementus: a) kontaktiniai elementai; b) elementų storis yra neignoruojamas; c) elementų storis yra ignoruojamas (van der Vegte <i>et al.</i> 2010).....	54
4.5 pav. Tūrinio tipo elementas (kubas) <i>Dlubal RFEM</i> aplinkoje	55

4.6 pav. Virintinės siūlės modelis, naudojant plokštuminius elementus (Miguel <i>et al.</i> 2016)	55
4.7 pav. Didelių poslinkių prielaidos iliustracija (Barauskas <i>et al.</i> 2004)	56
4.8 pav. Fizinio netiesiškumo iliustracija: a) deformuotas kūno vaizdas; b) netiesinė medžiagos diagrama (Barauskas <i>et al.</i> 2004).....	57
4.9 pav. Įtempių-deformacijų kreivė (Miguel <i>et al.</i> 2016).....	57
4.10 pav. Modifikuoto Niutono-Rafsono metodo iteracijų atlikimo schema	59
4.11 pav. Baigtinių elementų dydžio kalibravimo grafikas pirmuoju atveju.....	60
4.12 pav. Baigtinių elementų dydžio kalibravimo grafikas antruoju atveju	61
4.13 pav. Baigtinių elementų generavimas programa <i>Dlubal RFEM</i>	61
4.14 pav. Virintinės siūlės baigtinių elementų tinklelis programoje <i>Dlubal RFEM</i>	62
4.15 pav. Baigtinių elementų tinklelio sutankinimas jungiamuose taškuose, programoje <i>Dlubal RFEM</i>	62
5.1 pav. Mazgo elementų išnaudojimų palyginimų diagrama	64
5.2 pav. Kolonos elementą veikiantys įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju.....	64
5.3 pav. Virintinės siūlės įtempių palyginimų diagrama	65
5.4 pav. Virintinę siūlę veikiantys įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju.....	65
5.5 pav. Virintinės siūlės varginamųjų įtempių palyginimų diagrama	66
5.6 pav. Virintinę siūlę veikiantys, varginamieji įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju.	67
5.7 pav. Prijungiamos plokštelės varginamųjų įtempių palyginimų diagrama	67
5.8 pav. Sijos lentyną veikiantys varginamieji įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju.	68

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1. lentelė. Rekomenduojamos varginamojo stiprio dalinių koeficientų γM_f reikšmės (EN 1993-1-9, 3.1 lentelė)	26
1.2. lentelė. Rekomenduojamos dalinio patikimumo koeficiento γM_f reikšmės (Nussbaumer <i>et al.</i> 2011)	27
2.1. lentelė. CFRHS 220x10 kolonos skerspjūvio geometriniai parametrai	31
2.2. lentelė. HEA 220 gembės skerspjūvio geometriniai parametrai	32
2.3. lentelė. Krano apkrovų ψ koeficientai (EN 1991-3, A.1 lentelė)	34
2.4. lentelė. λ_i reikšmės pagal krano klasę (EN 1991-3, 2.12 lentelė)	35
2.5. lentelė. $\varphi_{2, min}$ ir β_2 reikšmės (EN 1991-3, 2.5 lentelė)	36
3.1. lentelė. Virintinio mazgo laikomoji galia	40

IVADAS

Plieniniai pastatai visame pasaulyje yra statomi daugiau nei 120 metų. Didžiąją dalį šio laiko plieno nuovargis ir įtrūkiai buvo nežinomi arba nevertinami, su tam tikromis išimtimis „akivaizdžiose“ situacijose. (Nussbaumer *et al.* 2011). Plieno nuovargis dažniausiai pasireiškia konstrukcijose, kurios patiria pasikartojančius cikliškus apkrovimus, tad tai yra aktualu tokioms statybinėms konstrukcijoms kaip: tiltai, bokštai, kranai, kaminai, vėjo turbinos, atvirose vandenyse statomos konstrukcijos. Ši problema taip pat yra itin aktuali, po avarijų, ilgai eksploatuojamuose pastatuose.

Pasaulyje pramoniniai pastatai, kuriuose yra naudojami tiltiniai kranai, yra paklausūs ir kasmet jų yra pastatoma tūkstančiai. Tiltinių kranų konstrukcija taip pat yra veikiamas pasikartojančios ciklinės apkrovos, todėl plieno nuovargis tampa aktualus faktorius projektuojant šias konstrukcijas. Yra keli variantai, kaip tiltinių kranų konstrukcija gali būti prijungiamas prie laikančiųjų kolonų, ir vienas iš šių variantų yra konsolės tiesioginis virinimas prie kolonos. Plieno nuovargio sukelti įtrūkiai retai kada pasireiškia pačioje medžiagoje, atitolęs nuo kokios nors konstrukcinės detalės, nuo sujungimo, virinimo siūlės ar kitokio tipo jungties. Net jeigu statinis jungties atsparumas yra didesnis už jungiamų elementų statinį atsparumą, jungtis ar mazgas vis tiek išlieka kritinė vieta, kai yra vertinamas plieno nuovargis (Nussbaumer *et al.* 2011). Verta paminėti, kad varginamieji apkrovimai gali sukelti konstrukcinių elementų suirimą veikiant mažesniems, negu statinio apkrovimo, įtempiams (Vainio H. 2000). Būtent todėl itin svarbus yra ne tik šio mazgo atsparumas, bet ir jo varginamasis patvarumas.

Magistro baigiamojo darbo tikslas – suprojektavus mazgą pagal stiprumo kriterijus patikrinti mazgo varginamąją tvermę bei ištirti ar šioje situacijoje, konstrukcinio mazgo nuovargio vertinimas yra aktualus ir reikalingas.

Magistro baigiamojo darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti literatūrą nagrinėjama tema;
2. Išanalizuoti nagrinėjamo mazgo stiprumo skaičiavimo metodiką bei jo elgseną;
3. Išanalizuoti nuovargio stiprumo skaičiavimo metodiką;
4. Sudaryti realios situacijos uždavinį;
5. Suprojektuoti mazgą pagal stiprumo kriterijus ir tuomet patikrinti ar suprojektuotos konfigūracijos mazgo nuovargio patvarumas yra pakankamas atlaikyti apkrovas per visą skaičiuotinę varginamąją tvermę;
6. Sumodeliuoti analogišką situaciją ir ją išanalizuoti skaitiniais metodais;
7. Palyginti analitinių ir skaitinių metodų rezultatus.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Uždaro kvadratinio skerspjuvio kolonos pasirinkimas

1952 m. „Stewarts and Lloyds“ (dabar „Corus Tubes“) sukūrė pirmuosius tuščiavidurius kvadratinius bei stačiakampius profiliuočius. Šis skerspjuvis su panašiomis charakteristikomis, kaip ir apvalūs tuščiaviduriai profiliuočiai, leido jungtis paruošti iš tiesių kraštų nuopjovų (Wardenier *et al.* 2010). Būtent nuo šio dešimtmečio, kai buvo išspręstos tokio tipo skerspjuvių suvirinimo problemos, prasidėjo šių profiliuočių naudojimo bumas. Greitai buvo pradėtos kurti mazgų skaičiavimo rekomendacijos uždariems apvaliems, kvadratiniams, stačiakampiems profiliuočiams bei buvo pradėti skirtingų konfigūracijų mazgų bandymai. Per pastaruosius dešimtmečius konstrukcinių uždarų skerspjuvių naudojimas išpopuliarėjo tarp didžiosios dalies konstrukcijų, netgi daugeliu atvejų kolonomis naudojami uždari profiliuočiai vietoj atvirų profiliuočių. Taip yra dėl privalumų, kuriais pasižymi uždari profiliuočiai (Wardenier 2000). Lyginant atvirus profiliuočius, tokius kaip HEA ar HEB, su uždaro skerspjuvio profiliuočiais, CHS, RHS ar SHS, pastarieji turi tokius privalumus:

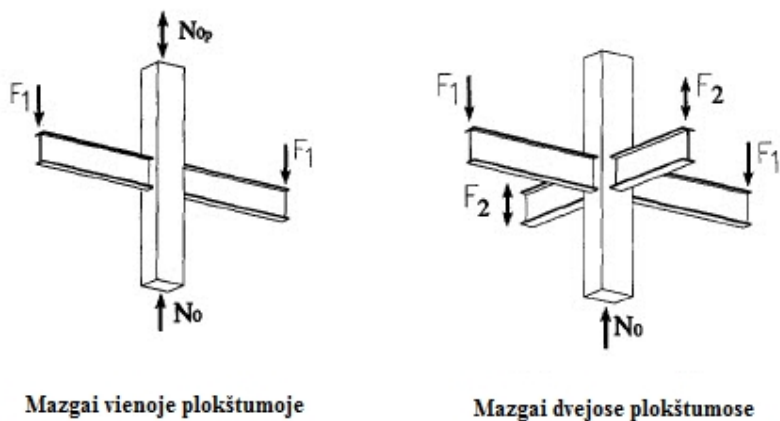
- Patogumas projektuojant ir konstruojant konstrukcinius mazgus abejose plokštumose;
- Patogesnė logistika bei montavimas, reikalauja mažiau išramstymo montavimo metu;
- Mažesnės skerspjuvio apsaugos nuo gaisro išlaidos, kadangi dažymo plotas yra mažesnis;
- Gali būti tinkamai išnaudojama ertmė skerspjuvyje:
 - o užpildoma betonu – tai padidina skerspjuvio atsparumą, padidinamas atsparumas ugniai;
 - o pripildant ertmę vandeniu ir įrengiant tinkamą cirkuliacinę sistemą galima skerspjuvį apsaugoti nuo gaisro;
 - o ertmės galima išnaudoti komunikacijoms vedžioti;
- uždari skerspjuviai yra efektyvesni, kai elementas yra veikiamas dviašio lenkimo ar sukimo;
- atviri profiliuočiai yra efektyvesni, kai elementas yra veikiamas lenkimo apie pagrindinę ašį, bet tik tuo atveju, kai atviras profiliuotis yra suvaržytas nuo sukamojo klupumo;
- estetiška išvaizda.

Nors uždaras tuščiaviduris skerspjuvis yra toks populiarus, mazgo konfigūracija, kai atviro skerspjuvio sija yra jungiama prie uždaro skerspjuvio kolonos, yra palyginti siaurai išnagrinėta.

1.2. Mazgo lenkiamasis stipris

Pirmieji nagrinėjamo mazgo eksperimentiniai bandymai buvo atlikti Japonijoje. Juos pradėjo tirti Kanatani ir kt. (1980). Tolimesni tyrimai buvo atliekami Wardenierio (Wardenier 1982) ir Davieso ir kt. (Davies *et al.* 1982). XX a. devintajame dešimtmetyje Lu (Lu 1997) ir Winkelio (de Winkel 1998) atliko

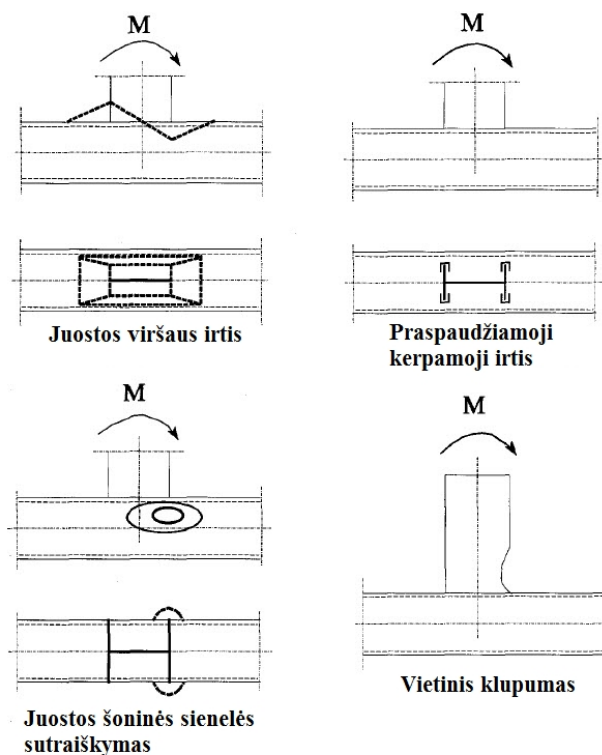
plačios apimties bandymus, kuriais tyrė nestandinto, vienoje ir dvejose plokštumose lenkimo momento veikiamo mazgo elgseną, tarp atviro skerspjūvio sijų ir uždaro skerspjūvio kolonų.



1.1 pav. Atliktų bandymų schemas (Lu 1997)

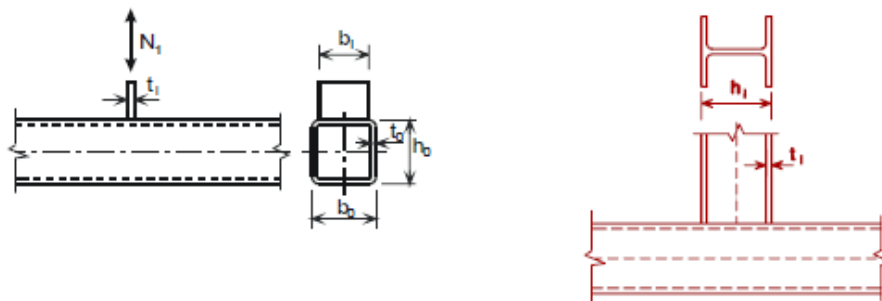
Tyrimų rezultatai pateikė naudingos informacijos mazgo elgseną. Kanatani ir kt. nurodė, kad tokiuose mazguose galima tikėtis 4 vietinių mazgo suirimo atvejų (Lu, Li Hua 1997):

1. Juostos (kolonos) viršaus irtis;
2. Juostos (kolonos) šoninių sienelių sutraiškymas;
3. Vietinis sijos juostų klumpumas;
4. Praspaudžiamoji kerpamoji irtis.



1.2 pav. Mazgo suirimo atvejai (Lu 1997)

Iš atliktų bandymų buvo gauta, kad atviro skerspjūvio sijos ir uždaro skerspjūvio kolonos, mazgo, kuris yra veikiamas lenkimo momento, stipris yra tiesiogiai susijęs su ašine jėga apkrautos plokštelės ir uždaro skerspjūvio kolonos mazgu (Lu, Li Hua 1997). Taigi, skaičiuojant nagrinėjamo mazgo laikomąją galią atviro skerspjūvio sija turi būti pakeista į skersinę plokštelę, kurios matmenys yra lygūs sijos lentynos matmenims.



1.3 pav. Išilginės plokštelės ir dvitėjo profiliuotio su uždaro skerspjūvio kolona mazgai (EN 1993-1-8:2005)

Taip pat rezultatai parodė, kad kai prijungiamos plokštelės storis yra mažesnis arba lygus kolonos sienelės storiui, plokštelės efektyviojo pločio kriterijus yra kritinis, palyginus su kitais suirimo atvejais.

Eurokode 3 (1993-1-8:2005), 7.13 lentelėje iš viso yra pateikiami trys suirimo atvejai, kuriuos reikia patikrinti skaičiuojant tokį mazgą:

1. Skaičiuotinė plokštelės laikomoji galia;
2. Juostos šoninės sienelės sutraiškymas;
3. Praspaudžiamoji kerpamoji irtis;

Papildomai, turi būti patikrinama ir virintinės siūlės laikomoji galia. Skaičiuotinė plokštelės laikomoji galia yra tikrinama visais atvejais, o likę du kriterijai yra tikrinami priklausomai nuo prijungiamos plokštelės pločio. Plokštelės laikomoji gali apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$N_{1,Rd} = f_{y1} \cdot t_1 \cdot b_{eff} / \gamma_{M5}; \quad (1.1)$$

čia

f_{y1} – plokštelės naudojamo plieno takumo riba;

t_1 – plokštelės storis;

b_{eff} – plokštelės jungties su juosta efektyvusis plotis. Apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_i \leq b_i; \quad (1.2)$$

čia

b_0 – juostos plotis;

t_0 – juostos sienelės storis;

f_{y0} – juostos naudojamo plieno takumo riba;

b_i – jungiamos plokštelės plotis.

Juostos šoninės irties bei praspaudžiamosios kerpamosios irties laikomosios galios apskaičiavimo formulės:

$$N_{1,Rd} = f_{y0} \cdot t_0 \cdot (2 \cdot t_1 + 10 \cdot t_0) / \gamma_{M5}, \text{ kai } b_1 \geq b_0 - 2t_0; \quad (1.3)$$

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3}} \cdot (2 \cdot t_1 + 2 \cdot b_{e,p}) / \gamma_{M5}, \text{ kai } b_1 \leq b_0 - 2t_0; \quad (1.4)$$

čia

$b_{e,p}$ – efektyvusis praspaudimo kerpamasis plotis. Apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$b_{e,p} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_i \leq b_i. \quad (1.5)$$

Norint naudotis pateiktomis, mazgo laikomosios galios skaičiavimo formulėmis, turi būti laikomasi EN 1993-1-8:2005, 7.8 lentelėje, pateikiamų bei tokių, papildomų, sąlygų:

$$\begin{aligned} 0,5 \leq \beta \leq 1,0; \\ b_0/t_0 \leq 30; \end{aligned} \quad (1.6)$$

čia

β – tinkelio elementų vidutinio skersmens ar pločio ir atitinkamų juostos matmenų santykis. Šiuo atveju, santykis β yra lygus:

$$\beta = \frac{b_1}{b_0}. \quad (1.7)$$

Mazgo lenkiamojo momento stipris tuomet yra lygus mažiausios apskaičiuotos laikomosios galios ir veikiančių jėgų peties sandaugai:

$$M_{i,p} = N_{1,Rd} \cdot (h_1 - t_1); \quad (1.8)$$

čia

h_1 – prijungiamos sijos aukštis;

t_1 – prijungiamos sijos lentynos storis.

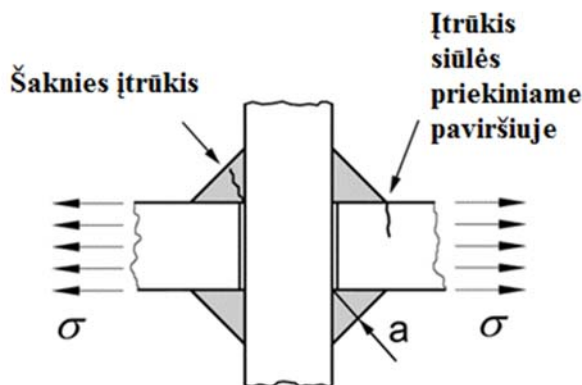
1.3. Virintinės siūlės nuovargis

Šiais laikais pats populiariausias gamyklinis mazgų sujungimo būdas įvairiose industrijos srityse yra elementų virinimas, o konstrukcijų, kurios yra veikiamos pasikartojančių ciklinių apkrovų, virintiniai

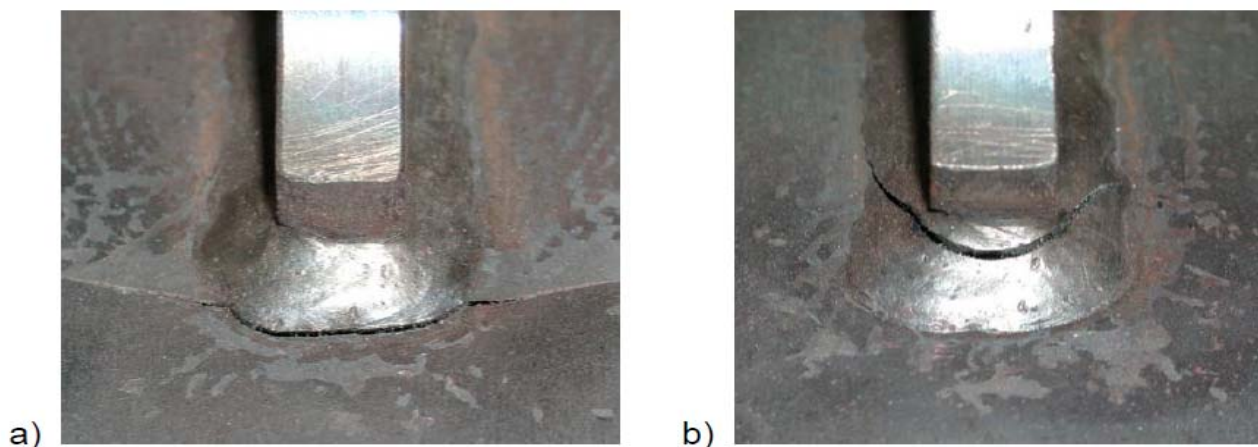
mazgai yra itin jautrūs nuovargiui. Nuovargis konstrukcijose pasireiškia įtrūkiais. Šie įtrūkiai gali labai sumažinti virintinio mazgo laikomąją galią. Buvo atlikta daug plieno nuovargio tyrimų (pvz., Wohler (1860)). Šie tyrimai atskleidė, kad kartu veikiantys konstrukciniai neatitikimai ir koncentruotų įtempių faktoriai gali sukelti nuovargio įtrūkių pradžią ir jų formavimąsi, net kai veikiami įtempiai yra ženkliai mažesni už plieno takumo ribą (Nussbaumer *et al.* 2011). Nuovargio įtrūkių atsiradimas konstrukcijose yra skirstomas į tris pagrindinius etapus: 1. Įtrūkio susiformavimas, 2. Nuovargio plyšio augimas, 3. Suirimas. Šie įtrūkiai dažniausiai atsiranda šalia siūlės, jungiamo elemento, vietose, kuriose yra didelė įtempių koncentracija. Dažniausiai įtrūkiai susiformuoja, dėl konstrukcinių neatitikimų, dėl kurių gali atsirasti įtrūkiai, kurių gylis yra itin mažas, bet jų augimas gali išsivystyti iki suirimo. Plyšio augimas labiausiai priklauso nuo naudojamų medžiagų charakteristikų, konstrukcijos ar mazgo geometrijos, aplinkos temperatūros ir skerspjūvių apkrovimo įtempių lygio. Taigi, konstrukcija ir mazgai, veikiami pasikartojančios ciklinės apkrovos, turi būti projektuojami ir gaminami taip, kad būtų išvengta suirimo dėl plieno nuovargio (Nussbaumer *et al.* 2011).

Virintiniuose mazguose, įtrūkiai dėl nuovargio gali atsirasti dvejose vietose:

1. Siūlės šaknyje;
2. Siūlės priekiniame paviršiuje.



1.4 pav. Galimos įtrūkių dėl plieno nuovargio vietos virintinėje siūlėje (IIW guideline ... 2012)



1.5 pav. Siūlės priekinio paviršiaus (a) ir siūlės šaknies (b) įtrūkiai (IIW guideline ... 2012)

Įtrūkiai siūlės priekiniame paviršiuje susidaro priekinio siūlės paviršiaus linijoje, o siūlės šaknies įtrūkis tampa pastebimas tik tuomet, kai jis prasiskverbia per visą siūlės storį. Būtent todėl šio tipo įtrūkiai yra laikomi pavojingesniais.

1.3.1. Pagrindiniai parametrai nuo kurių priklauso varginamoji tvermė

Varginamoji tvermė tai numatytasis laikotarpis, po kurio, veikiant skaičiuotiniam spektrui, dėl nuovargio įvyksta irtis. Dar varginamąją tvermę galima išreikšti varginamuoju patvarumu – ciklais išreikšta tvermė iki irties. Yra išreiškiami keturi pagrindiniai parametrai, nuo kurių priklauso mazgo varginamoji tvermė (Nussbaumer *et al.* 2011):

- Įtempių intervalas;
- Konstrukcinės jungties geometrija;
- Naudojamų medžiagų charakteristikos;
- Aplinkos veiksniai.

Įtempių intervalas

Tyrimai yra parodę, kad įtempių intervalas $\Delta\sigma$ yra pagrindinis faktorius, lemiantis virintinių mazgų varginamąją tvermę. Įtempių intervalas – algebrinis dviejų konkretaus įtempių ciklo kraštų skirtumas, gautas iš įtempių istorijos. Intervalas gali būti apibrėžiamas kaip laiko t ir pastovios amplitudės apkrovimo, kintančio tarp σ_{min} ir σ_{max} . Įtempių intervalas apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

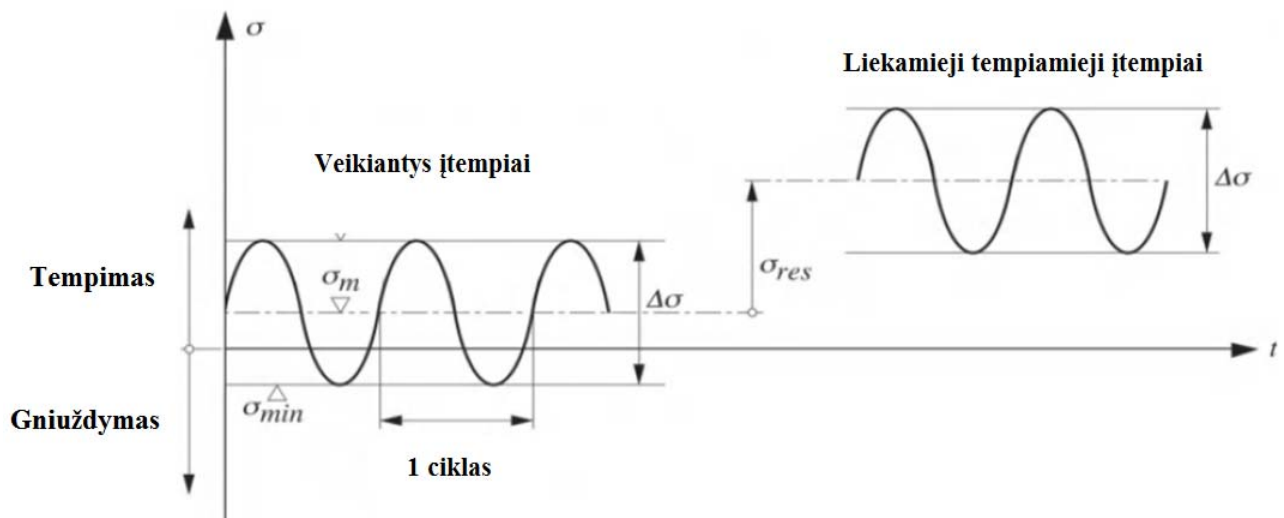
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}; \quad (1.9)$$

čia

σ_{max} – maksimali siūlę veikiančio įtempio reikšmė (su ženklais);

σ_{min} – minimali siūlę veikiančio įtempio reikšmė (su ženklais).

Taip pat tikrinant virintinės siūlės įtempių intervalą, reikia atkreipti dėmesį, kad virintinėje siūlėje susidaro liekamieji įtempiai, todėl netgi jeigu siūlė yra veikiamą gniuždymo, dėl liekamųjų įtempių poveikio po virinimo, siūlėje gali veikti tempimo įtempiai. 1.6 pav. pateiktas įtempių intervalo grafikas bei liekamųjų įtempių siūlėje įtaka. Grafiko kairėje pusėje yra pateikiamas ciklinių apkrovų svyravimo grafikas, o dešinėje, siūlėje veikiantys liekamieji įtempiai, dėl kurių virintinėje siūlėje nesusidaro gniuždomieji įtempiai.



1.6 pav. Siūlę veikiančių įtempių intervalas ir liekamųjų įtempių įtaka (TGC 10, 2006)

Konstrukcinės jungties geometrija

Šis parametras labiausiai lemia nuovargio plyšio atsiradimo vietą bei plyšio didėjimo greitį, taigi jis yra tiesiogiai susijęs su virintinio mazgo varginamąja tverme. Yra keli faktoriai, nuo kurių priklauso jungties geometrijos įtaka:

- įtempių koncentracijos vietos;
- tolerancijos ir neatitikimai virintinėje siūlėje.

Projektuojant konstrukcijas ir mazgus turi būti atsižvelgiama į šiuos faktorius ir stengiamasi jų išvengti. Įtempių koncentracijos vietų galima išvengti stengiantis nenaudoti staigių skerspjuvio pokyčių, stengtis nenaudoti perteklinio konstrukcinių mazgų kiekio. Tolerancijos nuokrypų ir neatitikimų virintinėje siūlėje galima išvengti naudojant atitinkamus gaminto ir kokybės kontrolės metodus.

Naudojamų medžiagų charakteristikos

Naudojamų medžiagų, šiuo atveju plieno, charakteristikos lemia elementų ir siūlės atsparumą įtrūkių susidarymui ir jų didėjimui. Naudojant didesnio stiprio plieną, nuovargio varginamoji tvermė, esant tam pačiam įtempių intervalui, yra didesnė, palyginti su mažesnio stiprio plienu. Taip yra todėl, kad yra pailginamas įtrūkio susidarymo etapas (etapas iki kuomet pasireiškia pirmi nuovargio įtrūkiai virintinėje siūlėje), bet nėra pailginamas įtrūkio augimo etapas (etapas, kuomet formuojasi įtrūkis). Šis faktorius negalioja virintiems mazgams, kadangi šių mazgų varginamoji tvermė yra paremta būtent įtrūkio augimo etapu.

Aplinkos veiksniai

Šis parametras nėra itin aktualus, kai yra nagrinėjamos paprastos statybinės konstrukcijos. Tai tampa aktualu, kai pastatai ar konstrukcija yra veikiami netipinių aplinkos poveikių, tokių kaip atominiai reaktoriai ar naftos platformos. Temperatūros poveikis taip pat gali būti atmetamas, kai temperatūra svyruoja normaliose ribose, bet turi būti įvertintas, kai konstrukcija yra veikiami itin aukštos ar žemos temperatūros. Žema temperatūra gali sumažinti kritinį plyšio dydį, kurį pasiekus įvyktų konstrukcijos suirimas.

1.3.2. Nuovargio stiprio vertinimas

Nuovargio stiprio vertinimas susideda iš dviejų dalių:

1. Įtempių vertinimo (nustatymo) metodo pasirinkimo.
2. Konstrukcinių mazgų nuovargio stiprio skaičiavimo metodo pasirinkimo.

Virintiniame mazge veikiančių įtempių apskaičiavimui yra pasiūlyti įvairūs įtempių vertinimo metodai (Hobbacher 2009). Šie metodų pagrindiniai skirtumai yra skirtingų įtempių parametrų vertinimas:

- **Nominalių įtempių metodas.** Paremtas įtempiais, neatsižvelgiant į jokių įtempių padidėjimą, dėl konstrukcinės jungties geometrijos ar virintinės siūlės.
- **Konstrukcinių įtempių metodas.** Paremtas įtempiais, kurie yra padidinami dėl konstrukcinės jungties geometrijos, bet ne dėl virintinės siūlės.
- **Efektinio krašto įtempių metodas.** Paremtas lokaliais įtempiais prie suapvalinto siūlės krašto arba siūlės šaknies griovelio.
- **Įtempių intensyvumo faktorius.**
- **Įtrūkio didėjimo metodas.** Naudojamas remiantis *Paris* formuliuote, kuria galima nustatyti virintinio mazgo varginamąją tvermę remiantis įtrūkio didėjimo greičiu.

Taip pat yra pateiktas ne vienas konstrukcinių virintinių mazgų varginamojo stiprio skaičiavimo metodas (Zhao *et al.* 2001):

- **Klasifikavimo metodas.** Šis metodas paremtas konstrukcinių mazgų klasifikacija į skirtingas detalių kategorijas su panašia varginamąja tverme. Kiekviena detalės kategorija atitinka nominalių įtempių ribas, kurias pasiekus konstrukcinis mazgas dėl nuovargio suirs po 2 milijonų ciklų. Šis metodas yra naudojamas Eurokode 3 (1993-1-9:2005).
- **Praspaudžiamosios šlyties metodas.** Metodas panašus į klasifikavimo metodą, tik vietoj nominalių įtempių yra naudojami šlyties įtempiai.
- **Suirimo kriterijaus metodas.** Šis metodas pateikia diagramas parodančias maksimalius įtempius ar įtempių intervalą prie 2 milijonų ciklų, atsižvelgiant į konstrukcinio mazgo geometriją ir apkrovimą.
- **Statinio stiprio metodas.** Šis metodas susieja konstrukcinio mazgo nuovargio elgseną su statine mazgo elgsena.
- **Geometrinių įtempių metodas.** Šis metodas susieja konstrukcinio mazgo varginamąją tvermę su taip vadinamu įtempių židiniu mazge. Taikant šį metodą netiesinis įtempių pasiskirstymas veikiantis perimetru apie konstrukcinį mazgą yra tiesiogiai įtraukiamas į skaičiavimus. Šis metodas taip pat yra pateikiamas Eurokode 3 (1993-1-9:2005).
- **Įtrūkio mechanikos metodas.** Šis metodas gali būti naudojamas siekiant įvertinti įtrūkio augimo etapą su jau pasireiškusiais įtrūkiiais.

1.3.3. Klasifikavimo metodas

Kaip jau minėta, šis metodas paremtas konstrukcinėmis detalėmis ir skirtingo tipo mazgais, kurie yra klasifikuojami į skirtingas detalių kategorijas. Kiekviena detalės kategorija yra susieta su nominalių įtempių intervalu ties kuriuo konstrukcinis mazgas suirs po 2 milijonų ciklų. Šis klasifikavimas išvestas remiantis atliktai tyrimų rezultatais (Noordheek *et al.* 1980, Wardenier 1982).

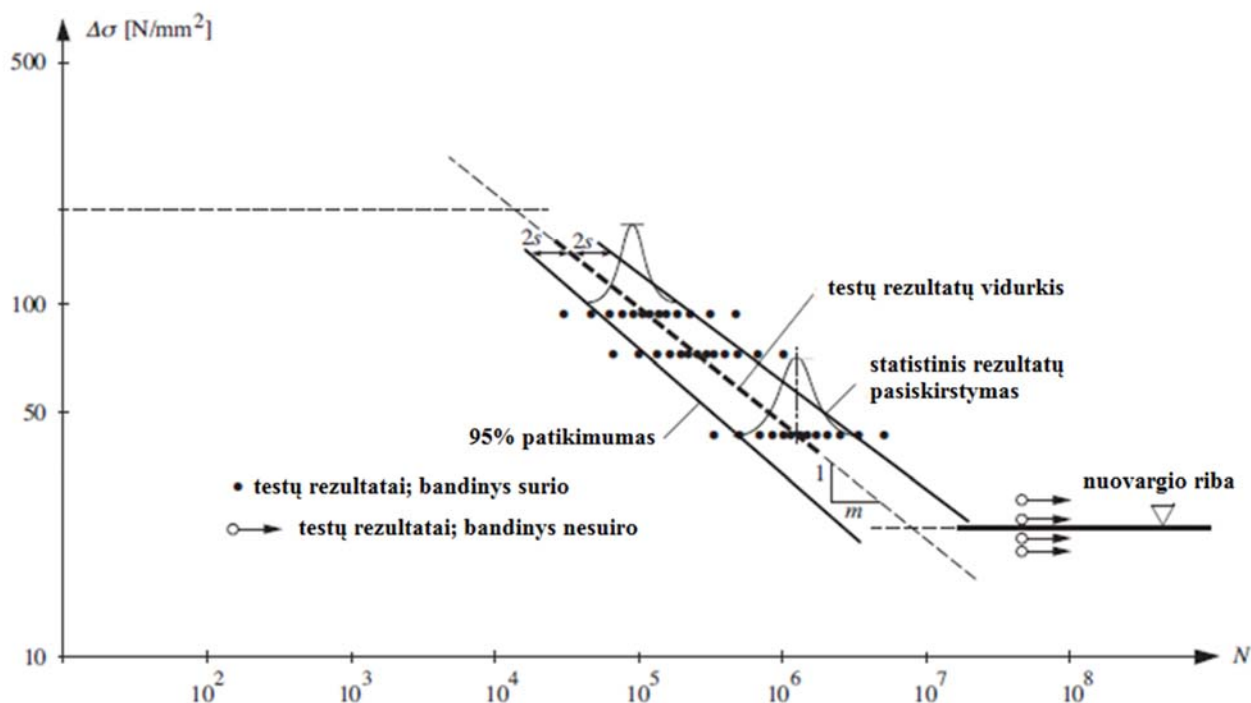
Šio metodo naudojimas gali būti apibūdinamas keliais žingsniais:

- Nustatoma detalės kategorija.
- Nustatomas konstrukcinio mazgo veikiamų įtempių intervalas.
- Remiantis įtempių intervalu, nustatomas maksimalus ciklų skaičius. Šiam nustatymui yra naudojamos varginamojo stiprio kreivės, kitaip vadinamos $\Delta\sigma - N$ kreivėmis.

Būtent šiuo metu bus remiamasi šiame baigiamajame darbe.

1.3.4. Varginamojo stiprio kreivės

Tai yra įtempių intervalo ir įtempių ciklų skaičius iki irties dėl nuovargio kiekybinis santykis, taikomas tam tikros konstrukcijos detalių kategorijos nuovargiui vertinti. Kai yra atlikinėjami konstrukcinių mazgų nuovargio bandymai, testų rezultatai dažniausiai yra pateikiami diagramoje, kurios abscisėje yra pateikiamas ciklų skaičius N iki mazgo suirimo, o ordinatėje pateikiamas nominalių įtempių intervalas $\Delta\sigma$.



1.7 pav. Pastovios amplitudės apkrovimų, mazgo nuovargio bandymo rezultatai pateikiami $\Delta\sigma - N$ diagramoje (TGC 10 2006)

Remiantis šiuo grafiku, galima rasti maksimalų ciklų skaičių prie tam tikro įtempių intervalo. Jis apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\log N = \log C - m \cdot \log(\Delta\sigma); \quad (1.10)$$

čia

N – ciklų skaičius prie tam tikro įtempių intervalo $\Delta\sigma$;

C – konstanta, kuri priklauso nuo detalės kategorijos;

$\Delta\sigma$ – pastovios amplitudės įtempių intervalas;

m – tiesės nuolydžio koeficientas.

Viršutinė horizontali linija, kuri nurodo didelį įtempių intervalą, bet nedidelį ciklų skaičių (nuo 10 iki 10^4) yra vadinama mažo ciklų skaičiaus varginamosios tvermės riba. Ši riba gali būti aktuali per žemės

drebėjimą, kai elementai patiria didelės reikšmės įtempių skirtumą, bet ciklų skaičius yra sąlyginai nedidelis (Nussbaumer *et al.* 2011).

Apatinė horizontali linija, kuri sieja mažas įtempių intervalo reikšmes su dideliu ciklų skaičiumi vadinama pastovios amplitudės nuovargio riba. Ši riba nurodo, kad apkrovimai, kurių ciklų skaičius yra labai didelis ($>10^8$), o įtempių intervalas mažas, neturi įtakos nuovargio įtrūkių susidarymui (Nussbaumer *et al.* 2011).

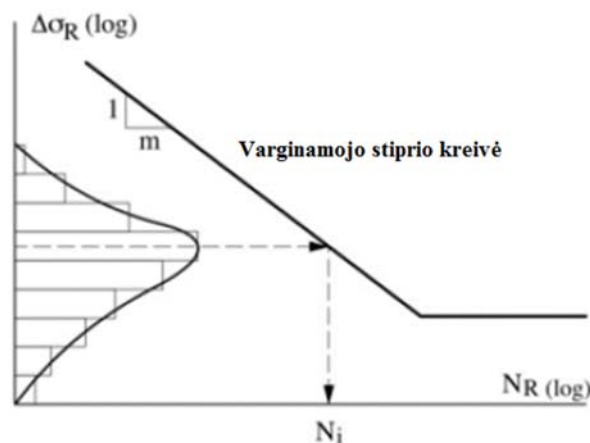
Šios dvi ribos ir diagrama galioja, kai apkrovimai yra pastovios amplitudės, bet realybėje dažniausiai pasitaiko, kad konstrukcijų apkrovimai nėra pastovios amplitudės ir tokios diagramos naudojimas tampa netikslus.

1.3.5. Varginamojo stiprio kreivės įvertinant nepastovios amplitudės įtempių intervalus

Naudojantis pažaidos sumavimo metodu, galima įvertinti nepastovios amplitudės apkrovimų įtaką konstrukcinio mazgo varginamai tvermei bei šiuos apkrovimus susieti su pastovios amplitudės apkrovimų varginamojo stiprio kreivėmis $\Delta\sigma - N$.

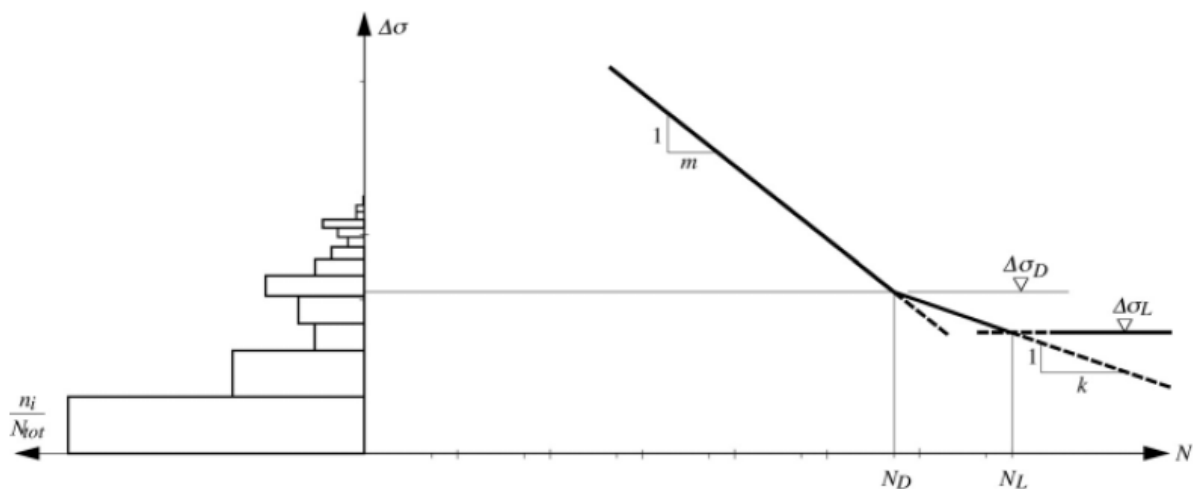
Pažaidų sumavimo metodas yra grindžiamas paprasta taisykle, kuri žinoma kaip Palmgren – Milner taisykle (Palmgren 1923, Miner 1945), arba dar trumpiau – Minerio taisykle. Remiantis šia taisykle, kai yra vertinami skirtingų įtempių intervalų apkrovimai, kiekvienas įtempių intervalas $\Delta\sigma_i$, pasikartojantis n_i kartų, padaro dalinę pažaidą, kuri gali būti išreikšta santykiu n_i/N_i , kur N_i yra ciklų skaičius iki kada įvyksta suirimas, prie $\Delta\sigma_i$ įtempių intervalo. Taigi įtempių intervalų funkcija yra žinoma, kiekvienos dalinės pažaidos sumavimas dėl skirtingų įtempių intervalo, gali būti pakeistas integravimo funkcija. Suirimas yra apibrėžiamas ir įvyksta, kai visų dalinių pažaidų suma yra $D_{tot.} = 1,0$ (Nussbaumer *et al.* 2011). Dalinių pažaidų sumavimas yra atliekamas pagal tokią formulę (1.11), o grafiškai yra pateikiama 1.8 pav.

$$D_{tot.} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{n_i}{N_i} = \int \frac{dn}{N} \leq 1,0 \quad (1.11)$$



1.8 pav. Pažaidų sumavimo metodo grafikas (Nussbaumer *et al.* 2011)

Įtempių intervalai, žemiau nuovargio ribos gali būti vertinami arba nevertinami skaičiavimuose. Pirmasis, konservatyvesnis, vertinimo variantas yra ignoruoti nuovargio ribą ir pratęsti varginamojo stiprio tiesę, kurios nuolydžio koeficientas yra m . Antrasis vertinimo variantas įvertina faktą, kad įtempių intervalai $\Delta\sigma_i$, kurie yra žemiau nuovargio ribos, teoriškai nedaro jokios įtakos varginamajai tvermei. Bet šis faktas buvo priimtas remiantis atliktai nuovargio bandymai su pastovios amplitudės apkrovimais. Naudoti šią prielaidą galima tik tokiu atveju, jeigu visų, nepastovios amplitudės, įtempių intervalų reikšmės yra žemiau nuovargio ribos. Taigi, įtempių intervalai, kurių reikšmės yra didesnės negu nuovargio riba, gali būti įvertinami naudojantis (1.11) formule. Jeigu įtempių intervalų reikšmės yra žemiau nuovargio ribos, šie įtempiai neprideda prie nuovargio įtrūkio didėjimo iki tuomet, kada įtrūkis pasiekia tam tikrą dydį. Būtent dėl šios priežasties, įtempių intervalai esantys žemiau nuovargio ribos, negali būti visiškai nevertinami, jie prisideda prie įtrūkimo augimo, kai įtrūkio dydis pasiekia tam tikrą reikšmę. Tam, kad būtų išvengta įtrūkio dydžio skaičiavimo naudojantis įtrūkio mechanikos dėsniais, įtempių intervalams $\Delta\sigma_i$, kurių reikšmės yra mažesnės už nuovargio ribą, varginamojo stiprio kreivės nuolydis yra pakeičiamas k dydžiu, kuris skiriasi nuo Wohler kreivės nuolydžio m . Taip pat kad įvertinti faktą, kad mažiausios įtempių intervalo reikšmės $\Delta\sigma_i$ neturi įtakos varginamojo įtrūkio augimui, yra įvedama atkirtos riba – $\Delta\sigma_L$ (Nussbaumer *et al.* 2011). Šis vertinimo variantas yra pateikiamas grafiškai 1.9 pav.

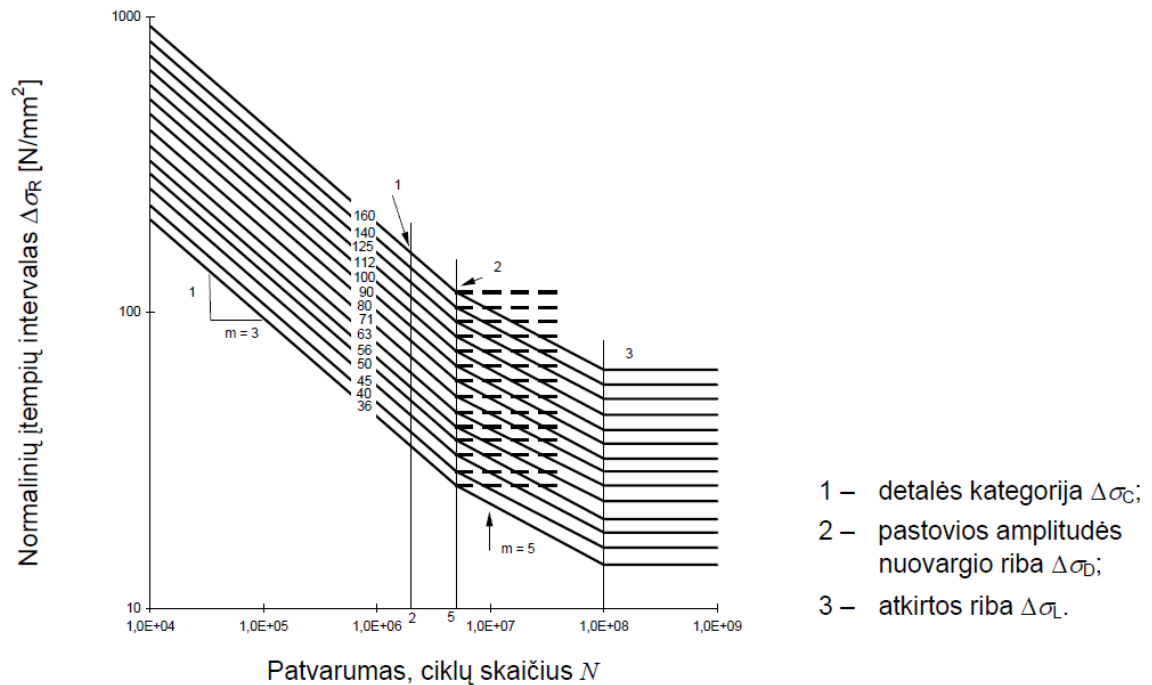


1.9 pav. Įtempių intervalų įtaka, esančių žemiau nuovargio ribos $\Delta\sigma_D$ ir atkirtos ribos $\Delta\sigma_L$ (TGC 10 2006)

1.3.6. Varginamojo stiprio kreivės pagal Eurokodą

Kiekvienai skirtingai mazgo konfigūracijai gali būti nubrėžta atskira varginamojo stiprio kreivė, bet kadangi jų gali būti be galo daug, buvo nuspręsta mazgus suklasifikuoti ir kiekvienai mazgų grupei priskirti atitinkamą varginamojo stiprio kreivę. Atlikus daug skirtingų detalių nuovargio bandymų, buvo pastebėta, kad varginamojo stiprio kreivės yra panašios, t.y. kintančios paralelei. Taip yra dėl to, kad pagal (1.10) formulę, galima matyti, kad šį pokytį lemia konstanta C , kuri kiekvienam mazgui ar detalei yra atskira. Eurokode 1993-1-9:2005 yra pateikiamos 14 standartinių $\Delta\sigma_R - N$ kreivių. Šio kreivės buvo pateiktos dar 1985 metais ir iki šiol nekinta. Kiekviena kreivė yra sunumeruota pagal ją atitinkančią detalės kategoriją. Detalės kategorija yra lygi $\Delta\sigma_C$ (varginamoji tvermė po 2 milijonų ciklų, išreikšta N/mm²). Kiekviena kreivė, turi pastovios amplitudės nuovargio ribą $\Delta\sigma_D$, ties 5 milijonų ciklų riba, kuri yra lygi 74 % detalės kategorijos $\Delta\sigma_C$ reikšmės bei atkirtos ribą $\Delta\sigma_L$. Jeigu tikrinama detalė, yra pateikta nuovargio Eurokodo pateikiamose lentelėse, tuomet ši detalės varginamoji tvermė, gali būti skaičiuojama remiantis pateiktomis nuovargio stiprio kreivėmis. Taip pat nustatant šias kreives buvo atsižvelgta į tokius efektus:

- Įtempių koncentraciją dėl detalės geometrijos;
- Lokalią įtempių koncentraciją dėl virinimo siūlės;
- Įtempių pasiskirstymą;
- Tikėtiną nuovargio įtrūkio atsiradimo vietą;
- Liekamuosius įtempius;
- Virinimo ir siūlės padirbimo procedūras.



1.10 pav. Normalinių įtempių intervalų varginamojo stiprio kreivės (EN 1993-1-9, 7.1 pav.)

Kelių detalių varginamoji tvermė visgi nevysiškai atitinka standartinę varginamojo stiprio kreivę, dėl to buvo pasiūlytos modifikuotos varginamojo stiprio kreivės. Jos žymimo, prie detalės kategorijos pridedant „*“ ženklą. Pagrindinis šių detalių skirtumas yra pastovios amplitudės nuovargio ribos vieta – vietoj standartinės vietos ties 5 milijonų ciklų vieta, nuolydžio pokytis yra fiksuojamas ties 10 milijonų ciklų vieta. (Nussbaumer *et al.* 2011). Pagal Eurokodą 3, galimi du variantai, kaip reikia tikrinti šias detalių kategorijas:

- Tikrinti naudojant standartines varginamojo stiprio kreives. Jeigu detalės bus tikrinama ties 2 milijonų ciklų riba, bus priimamas konservatyvus skaičiavimas, tačiau jeigu bus tikrinama pagal pastovios amplitudės nuovargio ribą, tikrinamas bus ne konservatyvus. Šis pasirinkimas nėra rekomenduojamas.
- Imama aukštesnės detalės kategorija ir skaičiuojama pastovios amplitudės nuovargio reikšmė $\Delta\sigma_D$ ties 10 milijonų ciklų. Rekomenduojama naudoti šį metodą. $\Delta\sigma_D$ ties 10 milijonų ciklų gali būti apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

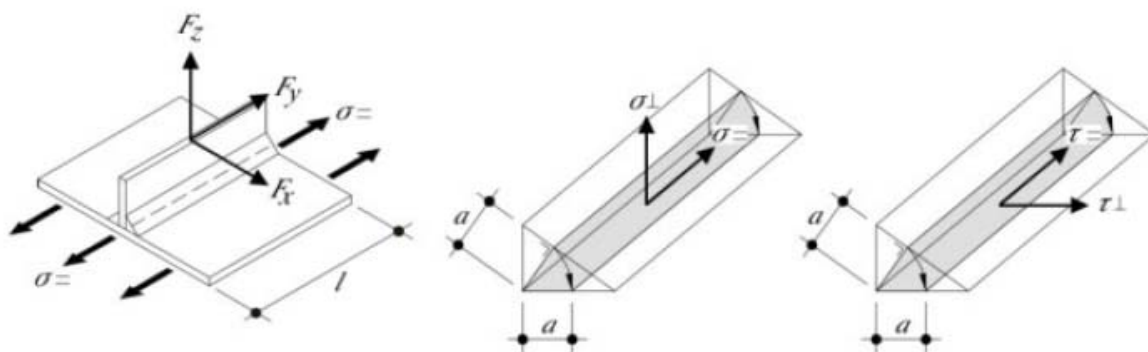
$$\Delta\sigma_D(\text{ties } 10 \text{ milijonų ciklų}) = \left(\frac{2}{10}\right)^{1/3} \cdot 1,12 \cdot \Delta\sigma_C^*. \quad (1.12)$$

1.3.7. Virintinė siūlę veikiančių įtempių skaičiavimas

Virintiniai mazgai yra skirstomi į dvi kategorijas:

- Laikantieji virintiniai mazgai;
- Nelaikantieji virintiniai mazgai.

Šiame baigiamajame darbe bus analizuojamas laikantysis virintinis mazgas. Šio mazgo siūlių įtempių skaičiavimas nuo varginamųjų apkrovų skiriasi nuo saugos ribinio būvio įtempių skaičiavimo pateikiamo mazgų projektavimo Eurokode (1993-1-8:2005). Siūlės nuovargio įtempių skaičiavimas yra paremtas siūlės efektyviojo ploto skaičiavimu, bei verta paminėti, kad turi būti skaičiuojami tinkamumo ribinio būvio įtempiai. Priklausomai nuo tikrinamos detalės kategorijos, turi būti apskaičiuojami reikalingi siūlėje veikiantys įtempiai. Galimi siūlę veikiantys įtempiai pateikiami 1.11 paveiksle, o 1.13 - 1.15 pateikiamos įtempių apskaičiavimo formulės.



1.11 pav. Kertinę siūlę veikiantys įtempiai (Nussbaumer *et al.* 2011)

- Normaliniai įtempiai

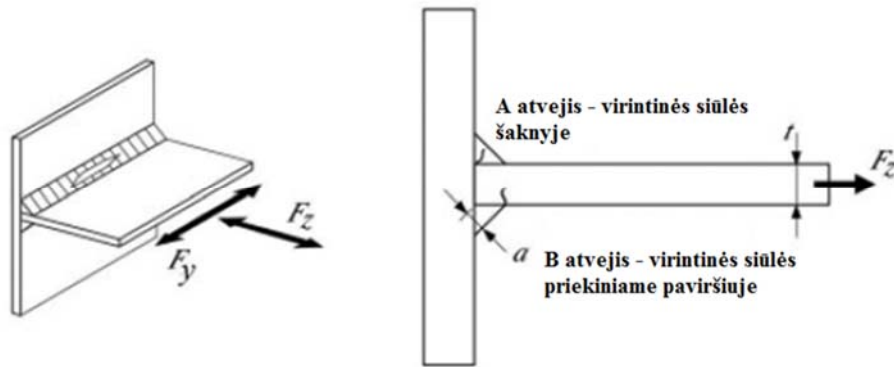
$$\sigma_w = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2} = \sqrt{\frac{F_z}{a_{eff} \cdot l} + \sigma_{\parallel}^2}. \quad (1.13)$$

- Tangentiniai įtempiai

$$\tau_w = \tau_{\parallel} = \frac{F_y}{a_{eff} \cdot l}. \quad (1.14)$$

$$\tau_w = \tau_{\perp} = \frac{F_x}{a_{eff} \cdot l}. \quad (1.15)$$

Nagrinėjant pasirinktą mazgą, turi būti patikrinti du nuovargio plyšių susidarymo atvejai. Kiekvienu atveju, turi būti apskaičiuoti siūlės veikiantys įtempiai nuo varginamųjų apkrovų. 1.12 pav. pateikiamos plyšių atsiradimo vietos bei veikiančių apkrovų kryptys.



1.12 pav. Nagrinėjamo mazgo galimo plyšių susidarymo vietos (Nussbaumer *et al.* 2011)

Įtempių skaičiavimas „A“ atveju:

$$\sigma_w = \sqrt{\frac{F_z}{2a_{eff} \cdot l} + \sigma_{\parallel}^2}.$$

$$\tau_w = \tau_{\parallel} = \frac{F_y}{2a_{eff} \cdot l}.$$

Įtempių skaičiavimas „B“ atveju:

$$\sigma = \frac{F_z}{t \cdot l}; \quad (1.16)$$

čia

F_z – ašinė jėga, veikianti privirintą plokštelę;

F_y – tangentinė jėga veikianti privirintą plokštelę;

l – siūlės ilgis;

a_{eff} – efektyvusis siūlės aukštis;

t – privirintos plokštelės storis.

1.3.8. Siūlės nuovargio skaičiavimas pagal Eurokodą

Plieninių konstrukcijų nuovargio patikrinimas, turi būti atliekamas remiantis Euokode 1993-1-9:2005 pateikta metodika ir laikantis nurodytų sąlygų. Eurokode yra pateikiami du nuovargio vertinimo metodai:

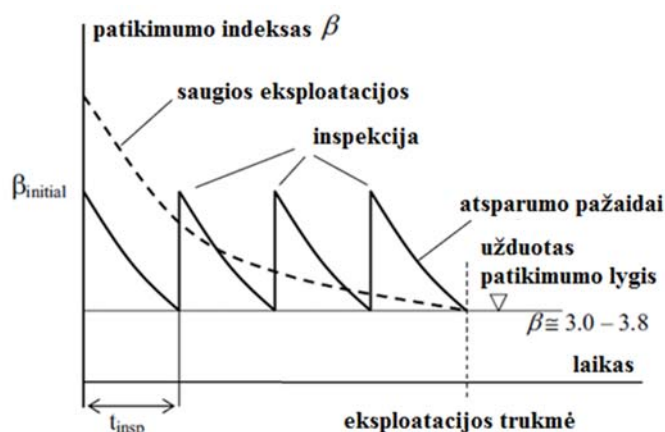
- Atsparumo pažaidai metodas
- Saugaus eksploataavimo metodas

Atsparumo pažaidai metodas turi pakankamai patikimai užtikrinti, kad konstrukcija tinkamai funkcionuoja per savo skaičiuotinę varginamąją tvermę, jei visą tą laiką yra laikomasi nustatyto kontrolės

ir techninės priežiūros režimo pažaidai dėl nuovargio aptikti ir pašalinti. Taikant šį metodą, pradinis patikimumo indeksas yra žemesnis negu taikant saugios eksploatacijos metodą, bet jis yra vis pakoreguojamas atlikus techninę priežiūrą.

Saugios eksploatacijos metodas turi pakankamai patikimai užtikrinti, kad konstrukcija tinkamai funkcionuoja per savo skaičiuotinę varginamąją tvermę be reguliarios eksploatacinės kontrolės, skirtos pažaidai dėl nuovargio aptikti. Saugios eksploatacijos metodas turi būti taikomas tais atvejais, kai vietinis plyšių atsiradimas viename komponente gali greitai sukelti konstrukcijos elemento ar konstrukcijos irtį. Šio metodo pradinis konstrukcijos patikimumo indeksas yra aukštas, jis mažėja su laiku ir pasiekia minimalią reikšmę ties pastato gyvavimo trukmės pabaiga.

1.13 pav. schematiškai palygina abiejų metodų patikimumo indekso kitimą per laiką:



1.13 pav. Patikimumo indekso kitimas laike, priklausomai nuo nuovargio vertinimo metodo (Nussbaumer *et al.* 2011)

Skaičiuojant varginamąją detalės tvermę, turi būti tinkamai pasirinkti varginamojo stiprio daliniai koeficientai γ_{Mf} . Šis koeficientas priklauso nuo detalės irties pasekmių ir nuovargio vertinimo metodo. Stiprio daliniai koeficientai yra pateikiami Eurokodo (1993-1-9:2005) 3.1 lentelėje. Jos reprezentacija yra pateikiama 1.1 lentelėje.

1.1. lentelė. Rekomenduojamos varginamojo stiprio dalinių koeficientų γ_{Mf} reikšmės (EN 1993-1-9, 3.1 lentelė)

Vertinimo metodas	Irties pasekmės	
	Nereikšmingos	Reikšmingos
Atsparumo pažaidai	1,00	1,15
Saugios eksploatacijos	1,15	1,35

Kadangi, irties pasekmės apibrėžtos gana abstrakčiai, literatūroje galima rasti šios lentelės papildymų, įvedant pasekmių klases. Pateikiamos reikšmės turi būti traktuojamos, kaip rekomendacinės, kadangi Eurkode 3 šios sąsajos nėra pateikiamos.

1.2. lentelė. Rekomenduojamos dalinio patikimumo koeficiento γ_{Mf} reikšmės (Nussbaumer *et al.* 2011)

Vertinimo metodas	Irties pasekmės	
	CC1 ir CC2*	CC3*
	Nereikšmingos	Reikšmingos
Atsparumo pažeidai	1,00	1,15
Saugios eksploatacijos	1,15	1,35

* CC1, CC2 ir CC3 yra pasekmių klasės, kurios yra pateikiamos EN 1990, B priede, B.1 lentelėje

Pagal Eurokodą (1993-1-9:2005) įtempių intervalų vertinimas turi būti atliekamas taikant vieną iš trijų galimų variantų:

- vardinių įtempių intervalus;
- patikslintų vardinių įtempių intervalus;
- geometrinių įtempių intervalus.

Vardinių įtempių intervalo reikšmė yra nustatoma pagal EN 1993-1-9:2005, 6.1 formulę:

$$\begin{aligned}\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} &= \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \dots \lambda_n \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k); \\ \gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2} &= \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \dots \lambda_n \cdot \Delta\tau(\gamma_{Ff}Q_k);\end{aligned}\tag{1.17}$$

čia

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k), \Delta\tau(\gamma_{Ff}Q_k)$ – EN 1991 nurodytų varginamųjų apkrovų sukeltų įtempių intervalas;

λ_1 – lygiavertės pažeidos koeficientai, priklausantys nuo spektrų, kaip nustatyta atitinkamose EN 1993 dalyse.

Skaičiuotinė patikslintųjų vardinių įtempių intervalo reikšmė yra nustatoma pagal EN 1993-1-9:2005, 6.2 formulę:

$$\begin{aligned}\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} &= k_f \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \dots \lambda_n \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff}Q_k); \\ \gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2} &= k_f \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \dots \lambda_n \cdot \Delta\tau(\gamma_{Ff}Q_k);\end{aligned}\tag{1.18}$$

čia

k_f – įtempių koncentracijos koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į vietinių įtempių padidėjimą dėl detalės geometrijos, neįtrauktos į standartinę $\Delta\sigma_R - N$ kreivę.

Skaičiuotinė geometrinių (židinių) įtempių intervalo reikšmė yra nustatoma pagal EN 1993-1-9:2005, 6.4 formulę:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2} = k_f \cdot (\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}^*); \quad (1.19)$$

čia

k_f – įtempių koncentracijos koeficientas.

1.3.9. Nuovargio patikra pagal Eurokodą 3

Nuovargio patikra pagal Eurokodą 3 (1993-1-9:2005) yra atliekama remiantis nominalių įtempių vertinimo metodu. Tai reiškia, kad nominalių įtempių intervalo reikšmės $\Delta\sigma_{Ed}$ arba $\Delta\tau_{Ed}$, kurias sukelia varginamosios apkrovos, yra lyginami su varginamąja galia $\Delta\sigma_{Rd}$ arba $\Delta\tau_{Rd}$ (Nussbaumer *et al.* 2011). Galimi trys nuovargio patikros variantai:

1. Patikra naudojant pastovios amplitudės nuovargio ribą;
2. Patikra naudojant lygiavertės pažaidos koeficientus (patikra atliekama naudojant varginamuosius įtempius ties 2 milijonais ciklų);
3. Patikra naudojant pažaidų sumavimo metodą.

Kadangi bus naudojami 1 ir 2 patikros metodai, jie yra aptariami plačiau.

Atlikti nuovargio tyrimai su nepastovios amplitudės įtempių intervalais parodė, kad konstrukcinio plieno varginamoji tvermė, galima sakyti, yra begalinė, jeigu visos įtempių intervalų reikšmės $\Delta\sigma_{Ed,i}$ yra žemiau apskaičiuotos varginamosios galios $\Delta\sigma_D/\gamma_{Mf}$ (Nussbaumer *et al.* 2011). Ši sąlyga yra pateikiama (1.20) formule:

$$\max(\Delta\sigma_{Ed,i}) \leq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}; \quad (1.20)$$

čia

$\Delta\sigma_{Ed,i}$ – maksimali skaičiuotinė įtempių intervalo reikšmė iš įtempių intervalo spektro;

$\Delta\sigma_D$ – varginamasis stipris, kurio reikšmė lygi pastovios amplitudės nuovargio ribos reikšmei, priklausomai nuo detalės kategorijos;

γ_{Mf} – dalinis nuovargio stiprio pataisos koeficientas.

Šis tikrinimas nėra tiesiogiai aprašytas Eurokode 3. Jis kyla, kaip logiška prielaida, priimant varginamojo stiprio reikšmę, ties 5 milijonų ciklų riba. Ši patikra yra laikoma konservatyvia, ir gali būti taikoma tokiais atvejais:

- Kai nėra nustatyta tiksli detalės varginamoji stiprio kreivė;
- Kai nėra žinoma tiksli pastato naudojimo trukmė;

- Kai apkrovų ciklų skaičius yra itin didelis, dažniausiai virš 100 milijardų;
- Įtempių intervalo spektras nėra žinomas;
- Atliekant preliminarų konstrukcinių detalių projektavimą.

Nuovargio patikra naudojant lygiavertės pažaidos koeficientus yra standartinė patikros procedūra pagal Eurokodą 3. Skaičiuotinė varginamoji apkrova, $\Delta\sigma_{E,2}$ arba $\Delta\tau_{E,2}$, yra siejama su 2 milijonų ciklų riba ir yra lyginama su skaičiuotine, detalės kategorijos, laikomąja galia. Šis santykis yra pateikiamas atitinkamai 1.21 ir 1.22 formulėse:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0; \quad (1.21)$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} \leq 1,0. \quad (1.22)$$

Atitinkamai $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}$ ir $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}$ yra apskaičiuojami pagal (1.17) formulę.

Pagal Eurokodą 3, taip pat gali būti atlikta patikra, nuo dažninių apkrovų $\psi_1 Q_k$ sukeltų vardinių, patikslintųjų vardinių ar geometrinių įtempių, kurių intervalai turi neviršyti tokių sąlygų:

$$\text{normalinių įtempių intervalai} - \Delta\sigma \leq 1,5 \cdot f_y; \quad (1.23)$$

$$\text{tangentinė įtempių intervalai} - \Delta\sigma \leq 1,5 \cdot f_y/\sqrt{3}. \quad (1.24)$$

Visų konstrukcijų detalių bei mazgų klasifikacija yra pateikta Eurokode 1993-1-9:2005, 8.1 – 8.10 lentelėse.

1.4. Literatūros apžvalgos išvados

Apžvelgus analizuojamo mazgo stiprumo bei nuovargio skaičiavimo literatūrą, galima daryti tokias prielaidas:

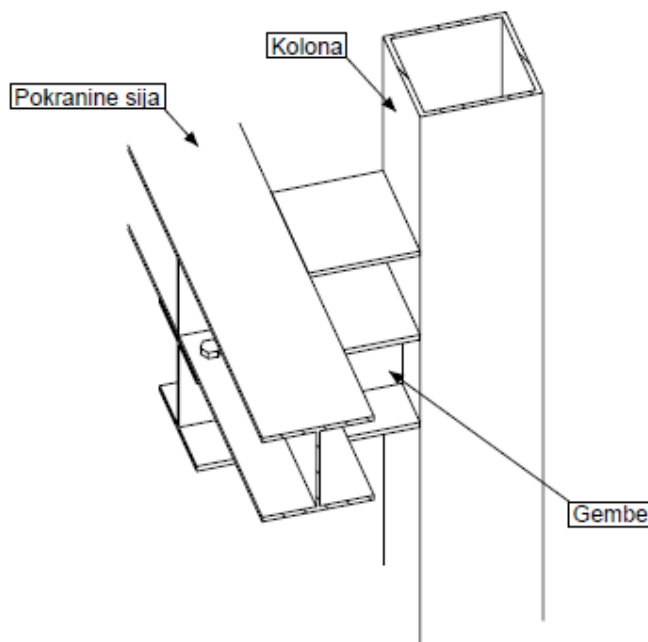
1. Tikrinant mazgo stiprumą, dvitėjis profiliuotis yra pakeičiamas į dvi prijungiamas plokšteles, kurių dydis yra lygus dvitėjo lentynų dydžiui;
2. Mazgo laikomoji galia yra lygi prijungtos skersinės plokštelės laikomajai galiai;
3. Tikrinant analizuojamo mazgo nuovargį, kritinės mazgo vietos, kuriose labiausiai tikėtina, kad susidarys varginamieji plyšiai yra laikomosios virintinės siūlės;
4. Pavojingiausias nuovargio plyšio susidarymo atvejis – plyšio susidarymas virintinės siūlės šaknyje. Tuomet plyšys gali būti pastebimas tik, kai būna prasiskverbęs per visą virintinę siūlę;

5. Svarbiausias varginamąją tvermę lemiantis veiksnys yra įtempių intervalas;
6. Teoriškai, visi įtempių intervalai esantys žemiau pastovios amplitudės įtempių ribos galėtų būti atmetami kaip neturintys įtakos, bet jeigu bent vienas intervalas yra aukščiau šios ribos, jis gali sukelti plyšių atsiradimo procesą ir tuomet jau visi intervalai turi įtakos plyšio augimui. Todėl šie intervalai, negali būti atmetami ir turi būti įvertinami;
7. Konstrukcinės detalės yra klasifikuojamos į atitinkamas varginamojo stiprio kreives, pagal kurias yra nustatoma detalių varginamoji tvermė arba varginamasis patvarumas;
8. Pasirenkant nuovargio vertinimo metodą, nuo kurio priklauso daliniai patikimumo koeficientai, yra pateikiamos rekomendacijos atsižvelgiant į pasekmių klases.

2. NAGRINĖJAMO OBJEKTO SKAIČIAVIMO PRIELAIIDOS

2.1. Nagrinėjamos situacijos aprašymas

Norint patikrinti bei įvertinti plieno nuovargio įtaką analizuojam mazgui, yra sudaroma reali situacija, kai mazgas yra veikiamas dinaminių apkrovų. Dažniausiai pramoniniuose pastatuose pasitaikanti situacija, kai sukeliamos dinaminės apkrovos yra tiltiniai kranai. Darbe analizuojamas RHS tipo kolonos ir dvitėjo ar H tipo sijos virintinis mazgas, yra laikomas pokraninės konstrukcijos dalimi ir, ant dvitėjo ar H tipo sijos, remsis pokraninė sija. Mazgas yra gembinis, o mazgą veikiančios įrašos yra lenkimo momentas bei skersinė jėga. Aksonometrinis analizuojamo mazgo vaizdas yra pateikiamas 2.1 paveiksle.



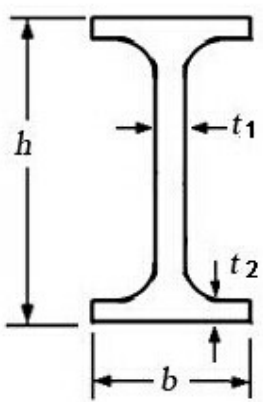
2.1 pav. Aksonometrinis analizuojamo mazgo vaizdas

Kadangi baigiamajame magistro darbe pagrindinis tyrimo objektas yra konstrukcinis mazgas, 2.1 – 2.2 lentelėse pateikiami, jau apskaičiuotų pagrindinių jungiamųjų elementų, geometriniai parametrai. Šie skerspjūviai buvo parinkti įvertinus tiltinio kraną sukeliamas apkrovas.

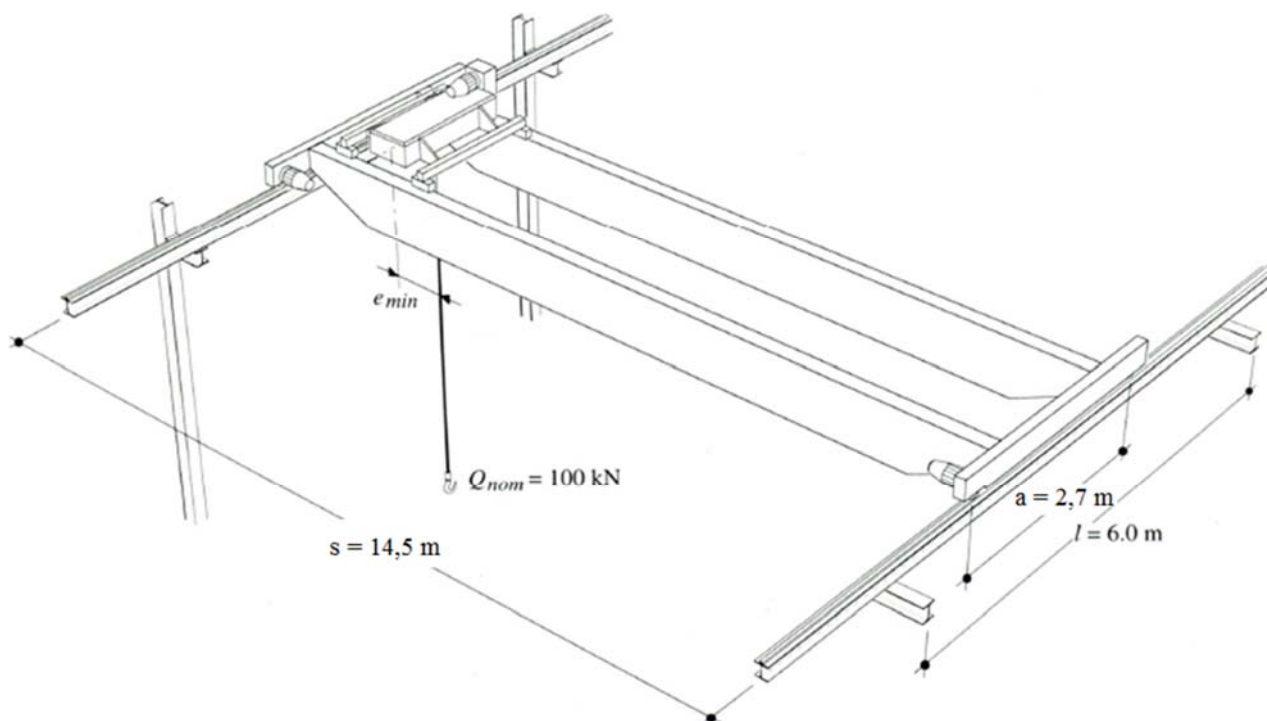
2.1. lentelė. CFRHS 220x10 kolonos skerspjūvio geometriniai parametrai

	Aukštis $h_c = 220 \text{ mm}$
	Plotis $b_c = 220 \text{ mm}$
	Sienele storis $t_c = 10 \text{ mm}$
	Skerspjūvio klasė – 1

2.2. lentelė. HEA 220 gembės skerspjūvio geometriniai parametrai

	Aukštis $h_b = 210 \text{ mm}$
	Plotis $b_b = 220 \text{ mm}$
	Sienelės storis $t_w = 7,0 \text{ mm}$
	Lentynos storis $t_f = 11,0 \text{ mm}$
	Skerspjūvio klasė – 2
	Atstumas tarp lentynos centrų $z = 199 \text{ mm}$

Tiltinio kranų apkrovos bei svoriai yra naudojami iš realaus kranų specifikacijų, kurios yra pateikiamos prieduose. Bendroji kranų schema pateikiama 2.2 pav.



2.2 pav. Analizuojamas tiltinis kranas

Pagrindiniai tiltinio kranų parametrai:

- Vardinė keltuvo apkrova – $Q_{nom} = 100 \text{ kN}$;
- Didžiausioji vieno kranų su kroviniu rato apkrova – $Q_{r,max} = 59,3 \text{ kN}$;
- Mažiausioji vieno kranų su kroviniu rato apkrova – $Q_{r,min} = 56,8 \text{ kN}$;
- Apkrovų spektro klasė – Q4;

- Bendro ciklų skaičiaus klasė – U7;
- Krano apkrovų klasė pagal LST EN 1991-3:2006, kai kranas naudojamas sandėliuose, krano minimali krano klasė rekomenduojama S6, kėlimo klasė – HC3.

2.2. Veikiančių apkrovų skaičiavimas

Baigiamajame darbe, vienas iš tikslų yra patikrinti analizuojamo mazgo stiprumo laikomąją galią, bei varginamąją tvermę. Charakteristinės apkrovos, abiem atvejais yra vienodos, bet skaičiuotinių apkrovų skaičiavimas skiriasi, todėl yra pateikiami, abiejų, skaičiuotinių apkrovų, nustatymo metodai.

2.2.1. Saugaus ribinio būvio skaičiuojamosios apkrovos

Saugaus ribinio būvio apkrovos yra skaičiuojamos remiantis LST EN 1990:2004 Euro kodu. Pagal šio standarto, 6.4.1(1) reikia patikrinti „STR“ ribinį būvį. Tikrinant pjūvio, elemento ar sandūros trūkimo arba pernelyg didelių deformacijų ribinį būvį (STR), reikia patikrinti ar poveikiai atitinka tokią sąlygą:

$$E_d \leq R_d; \quad (2.1)$$

čia

E_d – poveikių, tokių kaip vidinės jėgos, momento arba kelių vidinių jėgų ar momentų atstojamojo vektoriaus, efekto skaičiuotinė reikšmė;

R_d – atitinkamo atsparumo skaičiuotinė reikšmė.

Kiekvieno kritiško apkrovų atvejo skaičiuotines poveikių efektų reikšmes reikia nustatyti derinant reikšmes poveikių, kurie yra vertinami, jog gali veikti tuo pačiu metu. Kiekviename poveikių derinyje turi būti vyraujantis poveikis. STR ribinio būvio poveikių derinimas gali būti sudaromas pagal LST EN 1990:2004 (6.10) formulę:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_p P + \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}; \quad (2.2)$$

čia

$\gamma_{G,j}$ – nuolatinių poveikių derinio koeficientas;

$G_{k,j}$ – nuolatinių poveikių efekto charakteristinė reikšmė;

γ_p – ypatingojo poveikio derinio koeficientas;

P – ypatingojo poveikio efekto charakteristinė reikšmė;

$\gamma_{Q,1}$ – vyraujančio poveikio derinio koeficientas;

$\psi_{0,1}$ – vyraujančio poveikio apkrovos koeficientas;

$Q_{k,1}$ – vyraujančio poveikio efekto charakteristinė reikšmė;

$\gamma_{Q,i}$ – kartu veikiančių kintamųjų poveikių derinio koeficientas;

$\psi_{0,i}$ – kartu veikiančių kintamųjų poveikių apkrovos koeficientas;

$Q_{k,i}$ – kartu veikiančių kintamųjų poveikių efekto charakteristinė reikšmė;

" + " – reiškia *derinamas su*;

Σ – reiškia *derinantis efektas*.

Kranų sukeliamos apkrovos yra skaičiuojamos pagal LST EN 1991-3:2006. Charakteristinės tiltinių kranų sukeliamos apkrovos yra skaičiuojamos pagal minėtame standarte pateikta formulė.

$$F_{\varphi,k} = \varphi_i \cdot F_k; \quad (2.3)$$

čia

$F_{\varphi,k}$ – charakteristinė kranų poveikio reikšmė;

φ_i – dinaminis koeficientas;

F_k – charakteristinė statinė kranų poveikio komponentė.

Dinaminiai koeficientai yra pateikiami LST EN 1991-3:2006 2.1 lentelėje, o kokie dinaminiai koeficientai turi būti vertinami priklausomai nuo vertinamos apkrovos yra pateikti 2.2 lentelėje. Skaičiuotinės situacijos turi būti nustatomos remiantis jau pateikta (2.2) formule pagal LST EN 1990:2004. Kranų poveikių derinimo koeficientai yra pateikiami minėto standarto A priede bei yra pateikiami 2.3 pav. bei 2.3 lentelėje.

Poveikis	Simbolis	Situacija	
		P/T	A
Nuolatiniai kranų poveikiai:			
– nepalankūs;	γ_G^{sup}	1,35	1,00
– palankūs.	γ_G^{inf}	1,00	1,00
Kintamieji kranų poveikiai:			
– nepalankūs;	γ_Q^{sup}	1,35	1,00
– palankūs;	γ_Q^{inf}		
kranas yra;		1,00	1,00
kranas nėra.		0,00	0,00
Kiti kintamieji poveikiai:	γ_a		
– nepalankūs;		1,50	1,00
– palankūs.		0,00	0,00
Ypatingieji poveikiai	γ_A		1,00

P – nuolatinė situacija; T – laikinoji situacija; A – ypatingoji situacija

2.3 pav. Rekomenduojamos γ reikšmės (EN 1991-3, A.1 lentelė)

2.3. lentelė. Kranų apkrovų ψ koeficientai (EN 1991-3, A.1 lentelė)

Poveikis	Simbolis	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Vieno kranų arba kranų grupės apkrova	Q_r	ψ_0	ψ_1	ψ_2

Rekomenduojamos šios ψ reikšmės:

- $\psi_0 = 1,0$;
- $\psi_1 = 0,9$;
- ψ_2 – tai nuolatinio krano poveikio ir suminio krano poveikio santykis.

Šiame baigiamajame darbe bus vertinama tik krano apkrova. Taigi derinyje, savas svoris susidarys iš krano nuolatinės apkrovos, o vyraujantis kintamasis poveikis bus krano kintamoji apkrova.

2.2.2. Varginamosios skaičiuojamosios apkrovos

Skaičiuojant pokranines konstrukcijas, nuovargio patikrai skirtus varginamuosius apkrovos modelius reikia tikrinti pagal LST EN 1991-3:2006, 2.12 skyrių. 2.12(4) punktas teigia, kad varginamoji apkrova, gali būti apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$Q_e = \varphi_{fat} \cdot \lambda_i \cdot Q_{max}; \quad (2.4)$$

čia

φ_{fat} – lygiavertės pažaidos dinaminis smūgio koeficientas;

Q_{max} – didžiausia charakteristinė i -tosios vertikaliosios ratų apkrovos reikšmė;

λ_i – lygiavertės pažaidos koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į atitinkama standartizuotą varginamųjų apkrovų spektrą ir absoliučiojo apkrovų skaičiaus santykį su $N = 2,0 \cdot 10^6$ ciklų. λ reikšmės gali būti imamos iš LST EN 1991-3:2006, 2.12 lentelės, kuri priklauso nuo krano klasės. Šio lentelės reprezentacija pateikiama 2.4 lentelėje.

2.4. lentelė. λ_i reikšmės pagal krano klasę (EN 1991-3, 2.12 lentelė)

S klasės	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
Normaliniai įtempiai	0,198	0,250	0,315	0,397	0,500	0,630	0,794	1,00	1,260	1,587
Tanegentiniai įtempiai	0,379	0,436	0,500	0,575	0,660	0,758	0,871	1,00	1,149	1,320

Kranų S klasės yra pateikiamos LST EN 1991-3:2006, B priede, B.1 lentelėje. Ši lentelė pateikia kranų apkrovų klasių rekomendacijas, kuomet yra tikrinamas konstrukcinis plieno nuovargis. Šios klasės priklauso nuo tikrinamo krano tipo.

Iprastomis sąlygomis, lygiavertės pažaidos dinaminis smūginis koeficientas φ_{fat} , gali būti apskaičiuojamas pagal LST EN 1991-3:2006, (2.19) formulę. φ_{fat} yra prilyginamas didžiausiai iš gautų dviejų reikšmių.

$$\varphi_{fat,1} = \frac{1 + \varphi_1}{2} \text{ ir } \varphi_{fat,2} = \frac{1 + \varphi_2}{2}; \quad (2.5)$$

čia

φ_1 – dinaminis koeficientas, kuris įvertina krano konstrukcijos sužadinimą dėl keltuvo krovinio kėlimo nuo žemės;

φ_2 – dinaminis koeficientas, kuriuo įvertinami dinaminiai keltuvo krovinio kėlimo nuo žemės iki krano poveikiai.

Dinaminiai koeficientai φ_1 ir φ_2 apskaičiuojami pagal LST EN 1991-3:2006, 2.4 lentelėje pateikiamas formules.

$$0,9 < \varphi_1 < 1,1; \quad (2.6)$$

Reikšmės 0,9 ir 1,1 atitinka viršutinę ir apatinę virpesių impulsų reikšmes.

$$\varphi_2 = \varphi_{2,min} + \beta_2 \cdot v_h; \quad (2.7)$$

čia

v_h – pastovus kėlimo greitis, m/s;

$\varphi_{2,min}$ ir β_2 imami iš LST EN 1991-3:2006, 2.5 lentelės, kurios reprezentacija pateikiama 2.5 lentelėje.

2.5. lentelė. $\varphi_{2,min}$ ir β_2 reikšmės (EN 1991-3, 2.5 lentelė)

Įrenginio kėlimo klasė	β_2	$\varphi_{2,min}$
HC1	0,17	1,05
HC2	0,34	1,10
HC3	0,51	1,15
HC4	0,68	1,20

Šioje lentelėje, įrenginio kėlimo klasė yra parenkama iš LST EN 1991-3:2006, B priede pateikiamos, B.1 lentelės. Lentelėje pateikiamos kranų apkrovų klasių rekomendacijos, kuomet yra vertinamas plieno nuovargis.

Žinant analizuojamo krano apkrovų klases (jos yra aprašomos ties pagrindiniai tiltinio krano parametrais), iš lentelių yra parenkamos atitinkamos reikšmės ir įstatomos į (2.4) – (2.7) formules. Taip yra gaunama vertikali varginamoji apkrova į pokranines sijas.

Pagal Eurokodą 3 (1993-6:2007) 9.1(3) punktą, nuovargio tikrinimas atliekamas tiems pokraninių konstrukcijų komponentams, kurie yra veikiami vertikalių apkrovų sukeltamų įtempių svyravimų. Įtempių svyravimai, nuo krano horizontalių apkrovų dažniausiai yra atmetami ir yra nevertinami šiame baigiamajame darbe.

3. VIRINTINIO MAZGO SKAIČIAVIMAS PAGAL EUROKODĄ 3

3.1. Virintinio mazgo laikomosios galios skaičiavimas

Nagrinėjamo mazgo laikomoji galia yra tikrinama pagal LST EN 1993-1-8:2006 dalyje pateikiamas nuostatas. Pagal šias nuostatas bus tikrinami šie mazgo komponentai:

- Skaičiuotinė virintinio mazgo laikomoji galia;
- Skaičiuotinė kertinės virintinės siūlės laikomoji galia.

Baigiamajame darbe pasirinkta tikrinti virintinę siūlę, kuri jungia sijos viršutinę lentyną su kolonos sienele. Taip pasirinkta dėl to, kad kai gembė bus apkrauta kranu veikiančiomis apkrovomis, ši siūlė bus veikiamą tempimo, kuris susidaro nuo gembės veikiančio lenkimo momento. Jeigu ši siūlė neatlaikys veikiančių apkrovų – mazgas suirs. Visą mazgą veikiančią skersinę jėgą, yra tariama, perima vertikali, sijos sienelės su kolonos sienele, virintinė siūlė. Šis atvejis, nėra tikrinamas, kadangi dažniausiai, ši siūlė turi užtektingai rezervo.

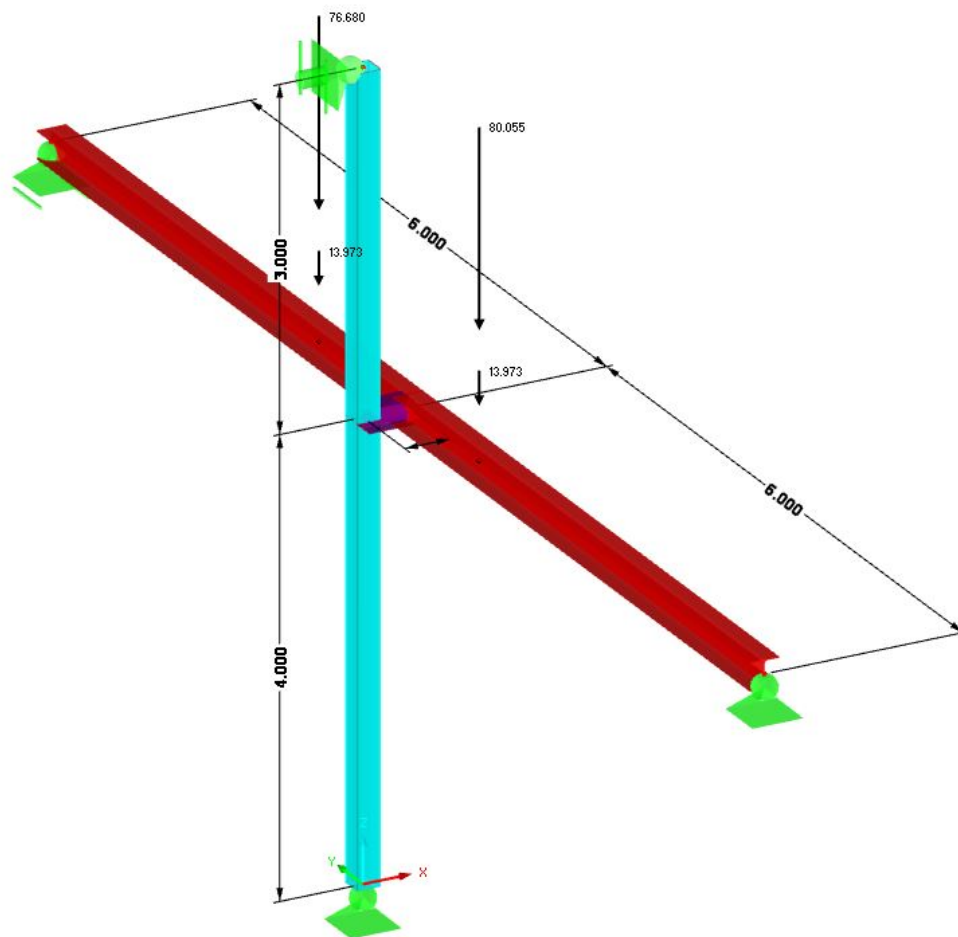
Virintinį mazgą veikiančios apkrovos buvo skaičiuojamos programiniu paketu *Dubal RSTAB*. Kadangi kraną apkrova į pokranines sijas yra perduodama per du ratus, buvo sudarytas rėmo modelis bei buvo nustatyta kranų vieta, kurioje, esant kranui, yra gaunamas didžiausias lenkimo momentas bei skersinė jėga gembėje. Buvo išskirtos 4 kranų pozicijos, kurios buvo naudojamos sudaryti apkrovimo deriniams (LC):

- LC1 – didžiausios įrašos gembėje, kai veikia tik kranų savasis svoris;
- LC2 – didžiausios įrašos gembėje, kai kranų ratai apkrauti tolygia maksimalia apkrova;
- LC3 – kranų savojo svorio apkrovimo vieta derinama su LC2 apkrovimu;
- LC4 – kranų kintamo apkrovos apkrovimo vieta derinama su LC1.

Patikrinus gautas įrašas nuo kranų padėties, buvo gauti rezultatai, kad kranui esant toje pačioje vietoje, gaunamos didžiausios įrašos, tiek nuo savojo kranų svorio, tiek nuo kintamo kranų apkrovimo. Taigi buvo sudarytas tik vienas apkrovimo derinys, kadangi kranų pozicija buvo suderinta. Skaičiuojamsis apkrovimo derinys (CO) buvo sudarytis remiantis 2.3 paveiksle pateikiamais derinių koeficientais:

- $CO1 = 1,35 * LC1 + 1,35 * LC2$

Šio apkrovimo kranų padėtis bei veikiančios apkrovos pateiktos 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Pavojingiausias apkrovimo derinys

Pagal šio derinio, gautas maksimalias apkrovas gembėje, bus tikrinama paties konstrukcinio mazgo bei virintinės siūlės laikomoji galia. Gautų įrašų ataskaita iš programinio paketo *Dlubal RSTAB* yra pateikiama prieduose.

3.1.1. Skaičiuotinė virintinio mazgo laikomoji galia

Virintinio mazgo laikomoji galia yra skaičiuojama pagal LST EN 1993-1-8:2005 7.13 lentelėje pateikiamas formules. Pagal gautus jungiamuosius elementus, į (1.1) – (1.8) formules yra įrašomi reikšmės, o gautos laikomosios galios skaičiavimo rezultatai yra pateikti 3.1 lentelėje. Skaičiavimo algoritmas yra pateiktas prieduose.

3.1. lentelė. Virintinio mazgo laikomoji galia

Tikrinama sąlyga	Laikomoji galia
Skaičiuotinė laikomoji galia	355 kN
Juostos šoninės sienelės sutraiškymas	433 kN
Praspaudžiamoji kerpamoji irtis	0 kN (nereikia tikrinti šios sąlygos)

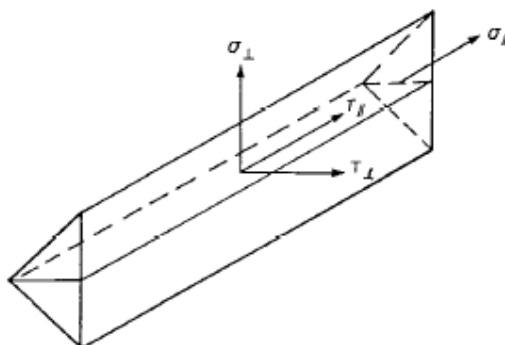
Iš šių laikomųjų galių yra išrenkama mažiausia laikomoji gali ir ji yra įrašoma į (1.8) formule, pagal kurią apskaičiuojama nagrinėjamo mazgo lenkiamoji galia. Šiuo atveju lenkiamoji galia yra lygi 71 kNm. Pagal 2.1 sąlygą, mazgo lenkiamoji galia turi būti didesnė už kranų poveikio sukeltą lenkiamąją galią. Tikrinama ši sąlyga:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Ed}} = \frac{68 \text{ kNm}}{71 \text{ kNm}} = 0,96 < 1,0.$$

Sąlyga yra tenkinama, todėl galima teigti, kad virintinio mazgo laikomoji galia yra pakankama atlaikyti jį veikiančias apkrovas.

3.1.2. Skaičiuotinė kertinės virintinės siūlės laikomoji galia

Virintinės kertinės siūlės laikomoji galia yra tikrinama pagal LST EN 1993-1-8:2005 4 skyriuje pateikiamas nuostatas. Ji yra tikrinama kryptiniu metodu, pagal kurį virintinės siūlės ilgio vieneto perduodamos jėgos yra suskaidomos į su siūlės išilgine ašimi lygiagrečias ir jai statmenas dedamąsias bei siūlės plokštumai statmeną ir skersinę dedamąsias. Pagal 4.5.3.2(4) punktą yra daroma prielaida, kad virintinės siūlės įtempiai pasiskirstę tolygiai siūlės skerspjūvyje. Taip yra gaunami normaliniai ir šlyjamieji įtempiai. Šie kertinę virintinę siūlę veikiantys įtempiai yra pateikti 3.2 pav.



3.2 pav. Įtempiai kertinės virintinės siūlės skerspjūvyje (EN 1993-1-8, 4.5 pav.)

čia

$\sigma_{\perp}$ – siūlei statmeni normaliniai įtempiai;

$\sigma_{\parallel}$ – su siūlės ašimi lygiagretūs normaliniai įtempiai;

$\tau_{\perp}$ – šlyjamieji įtempiai siūlės plokštumoje ir statmeni siūlės ašiai;

$\tau_{\parallel}$ – šlyjamieji įtempiai siūlės plokštumoje ir lygiagretūs su siūlės ašimi.

Taip pat pagal LST EN 1993-1-8:2006, 4.5.3.2(5) punktą, su siūlės ašimi lygiagretūs normaliniai įtempiai $\sigma_{\parallel}$, tikrinant siūlės skaičiuotinę laikomąją galią, yra nenagrinėjami. Kertinės virintinės siūlės laikomoji gali yra pakankama, jei yra tenkinamos abi šios sąlygos:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}; \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}}; \quad (3.2)$$

čia

f_u – vardinė silpnesnės iš sujungtų dalių tempiamojo stiprio riba;

β_w – atitinkamas koreliacijos koeficientas.

Kertinių virintinių siūlių koreliacijos koeficientas β_w yra imamas iš LST EN 1993-1-8:2006 pateikiamos 4.1 lentelės. Siūlės laikomosios galios skaičiavime yra priimama, kad siūlę veikia įtempiai, kuriuos sukelia ašinės jėgos nuo lenkimo momentas. Siūlę veikianti tempimo jėga yra apskaičiuojama pagal (3.3) formulę:

$$F_{w,Ed} = \frac{M_{Ed}}{z} = \dots = 342 \text{ kN}; \quad (3.3)$$

čia

$F_{w,Ed}$ – siūlę veikianti tempimo jėga;

M_{Ed} – gembę veikiantis lenkimo momentas;

z – atstumas tarp dvitėjo ar H formos profilio lėntynų centrų (jėgų petys).

Pagal parinktų skerspjūvių charakteristikas yra parenkamas siūlės storis a bei apskaičiuojamas efektyvusis siūlės ilgis:

$$a = 9 \text{ mm};$$

$$l_{eff} = L - 2 \cdot a = 220 - 2 \cdot 9 = 202 \text{ mm}.$$

čia

a – virintinės siūlės storis;

L – dydis lygus prijungiamos sijos pločiui.

Kai siūlė yra veikiamą tokio apkrovimo, šlyjamieji įtempiai siūlės plokštumoje ir lygiagretūs su siūlės ašimi yra lygūs $\tau_{\parallel} = 0$, o siūlę veikiantys įtempiai yra apskaičiuojami pagal (3.4) formulę:

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F_{w,Ed}/2}{\sqrt{2} \cdot l_{eff} \cdot a} = \dots = 66,52 \text{ MPa}. \quad (3.4)$$

Apskaičiavus virintinę siūlę veikiančius įtempius yra tikrinamos 3.1 ir 3.2 sąlygos:

$$[66,52^2 + 3 \cdot 66,52^2]^{0,5} = 113,04 \text{ MPa} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \dots = 453,3 \text{ MPa};$$

$$66,52 \text{ MPa} \leq \frac{0,9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \dots = 367,2 \text{ MPa}.$$

Sąlygos yra tenkinamos. Kertinės virintinės siūlės laikomoji galia yra pakankama atlaikyti ją veikiančius įtempius.

3.2. Virintinio mazgo plieno nuovargio skaičiavimas

3.2.1 Virintinio mazgo detalės kategorija

Nagrinėjamoje situacijoje, gembė yra tiesiogiai privirinama prie kolonos, ir visos gembę veikiančios apkrovos į koloną yra perduodamos būtent virintinėmis siūlėmis. Tokiu atveju nagrinėjamas mazgas yra priskiriamas prie lakančiųjų virintinių mazgų. Pagal LST EN 1993-1-9:2006 tokio tipo mazgų kategorijos yra pateikiamos minėto standarto 8.5 lentelėje. Kaip jau buvo minėta 1.3 skyriuje, visi virintiniai mazgai turi būti patikrinti dviems, nuovargio plyšių susidarymo atvejams (žr. 1.5 pav.):

- **A atvejis** – plyšio susidarymas virintinės siūlės šaknyje;
- **B atvejis** – plyšio susidarymas virintinės siūlės priekiniame paviršiuje.

Šiuo atveju turi būti atlikti 3 nuovargio patikrinimai, atitinkamai pagal pateikiamas detalių kategorijas bei skirtingas plyšių susidarymo vietas:

1. Nominalių normalinių įtempių intervalas virintinėje siūlėje $\Delta\sigma_w$, kai detalės kategorija yra 36* (plyšio susidarymo vieta siejama su „A“ atveju);
2. Nominalių šlyjamųjų įtempių intervalas virintinėje siūlėje $\Delta\tau_w$, kai detalės kategorija yra 80 (plyšio susidarymo vieta siejama su „A“ atveju);
3. Nominalių įtempių intervalas virintinės siūlės priekiniame paviršiuje (skaičiuojamas jungiamajame elemente), $\Delta\sigma$, kai detalės kategorija yra 80 (plyšio atsiradimas siejamas su „B“ atveju).

Kadangi yra tariama, kad šlyjamieji siūlę veikiantys įtempiai nėra vertinami, tuomet turi būti atlikti patikrinimai tik 1 ir 3 atvejams.

3.2.2 Virintinio mazgo varginamųjų įtempių intervalas

Kaip jau buvo aptarta 1 skyriuje, varginamieji įtempių intervalai gali būti pastovios ir nepastovios amplitudės. Nepastovios amplitudės įtempių intervalo skaičiavimas yra gana sudėtingas ir reikalauja papildomų duomenų. Kadangi nagrinėjamas yra gembės ir kolonos virintinis mazgas, priimama, kad jį veikia pastovios amplitudės įtempių intervalas. Intervalo ribos yra skaičiuojamos tarp tokių apkrovimo atvejų:

1. Kai kranio ratai nėra užvažiuavę ant pokraninė sijos, kuri tiesiogiai remiasi ant gembės. Tokiu atveju įtempiai mazge yra lygūs 0 MPa;
2. Kai kranio pozicija ir apkrovimas yra toks, kad sukeltų maksimalias varginamąsias apkrovas.

Kaip jau buvo nurodyta 2 skyriuje, varginamoji apkrova yra skaičiuojama nuo maksimalios charakteristinės vieno kranio rato apkrovos. Pagal (2.3) – (2.7) formules yra apskaičiuojama varginamoji apkrova, nuo kurios ir bus skaičiuojamas maksimalus lenkimo momentas, kuris sukels maksimalius įtempius nagrinėjamoje virintinėje siūlėje.

Maksimali apskaičiuota varginamoji apkrova yra 51,8 kN. Kai gembę veikia ši apkrova, susidaręs lenkimo momentas yra lygus $M_1 = 20,82 \text{ kNm}$. Pagal (3.3) formulę, žinant veikiantį lenkimo momentą ir jėgų petį, apskaičiuojama ašinė jėga veikianti virintinę siūlę:

$$F_1 = \frac{\Delta M}{z} = \dots = 104,6 \text{ kN}.$$

Pagal 1.9 formulę yra apskaičiuojama jėga, nuo kurios ir bus skaičiuojami sukeliamų įtempių intervalai:

$$\Delta F = F_1 - F_2 = 104,6 - 0 = 104,6 \text{ kN}.$$

Žinant ašinę jėgą, kuri veikia virintinę siūlę bei sijos viršutinę lentyną, galima skaičiuoti įtempių intervalus (1.3.7 skyrius), kiekvienu tikrinamuoju atveju.

1 – uoju atveju įtempių intervalas yra nustatomas pagal (1.13) formulę:

$$\Delta\sigma_{w,E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta F}{2 \cdot a_{eff} \cdot l}\right)^2 + \sigma_{\parallel}^2} = \dots = 28,77 \text{ MPa};$$

čia

l_2 – virintinės siūlės efektyvusis ilgis, kuri yra sijos lentynos apačioje (be sienelės storio bei suapvalinimų).

2 – uoju atveju, įtempių intervalas yra nustatomas pagal (1.16) formulę:

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta F}{t \cdot l} = \dots = 43,22 \text{ MPa}.$$

3.2.3 Virintinio mazgo nuovargio patikra

Atliekant virintinio mazgo nuovargio patikrą, reikia pasirinkti nuovargio vertinimo metodą, nuo kurios priklausys daliniai patikimo koeficientai. Šiuo atveju yra pasirenkamas saugios eksploatacijos vertinimo metodas, priimant prielaidą, kad reguliari eksploatacinė kontrolė, per visą pastato gyvavimo trukmę, nebus atliekama. Šios virintinės siūlės irties pasekmės yra reikšmingos, nes suirus šiai siūlei, mazgas suirs. Tuomet pagal 1.1 lentelę, yra parenkamas varginamojo stiprio dalinis koeficientas γ_{Mf} , kuris šiuo atveju yra lygus 1,35. Lygiaverčių pastovios amplitudės įtempių intervalų dalinis koeficientas γ_{Ff} yra lygus 1,0.

Iš pradžių, prieš atliekant patikrą, kuri yra nurodoma Eurokode 3, yra patikrinama, ar A ir B atveju (šie atvejai aprašomi 3.2.1 skyriuje), sukeliami įtempių intervalai nėra mažesni už pastovios amplitudės nuovargio ribą. Jeigu abiem atvejais, intervalai yra mažesnis, galima teigti, kad krano sukeltos ciklinės apkrovos nesukels varginamųjų plyšių.

A atveju, nustatyta detalės kategorija yra 36*, tuomet pagal LST EN 1993-1-9:2005, 7.1 paveikslą, $\Delta\sigma_C^* = 36 \text{ MPa}$. Kaip jau minėta anksčiau, detalės kategorijos, kurios yra pažymėtos „*“ ženklu, pastovios amplitudės nuovargio riba $\Delta\sigma_D$ yra skaičiuojama ties 10 milijonų ciklų riba, naudojant aukštesnę detalės kategoriją, pagal (1.12) formulę:

$$\Delta\sigma_D(\text{ties } 10 \text{ milijonų ciklų}) = \left(\frac{2}{10}\right)^{1/3} \cdot 1,12 \cdot \Delta\sigma_C^* = \dots = 23,6 \text{ MPa}.$$

B atveju, nustatyta detalės kategorija yra 80, taigi pagal LST EN 1993-1-9:2005, 7.1 paveikslą, $\Delta\sigma_C = 80 \text{ MPa}$. Kadangi jokio papildomo ženklinimo prie detalės kategorijos nėra, pastovios amplitudės nuovargio riba yra apskaičiuojama LST EN 1993-1-9:2005, 7.1(2) punkte pateikiamą išraišką:

$$\Delta\sigma_D = 0,737 \cdot \Delta\sigma_C = \dots = 59,2 \text{ MPa}. \quad (3.5)$$

Tikrinamos sąlygos pagal (1.20) formulę:

$$\text{A atveju} - \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{w,E} = 1,0 \cdot 28,77 = 26,15 \text{ MPa} < \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} = \frac{23,6}{1,35} = 17,5 \text{ MPa};$$

$$\text{B atveju} - \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma = 1,0 \cdot 43,22 = 43,22 \text{ MPa} < \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} = \frac{59,2}{1,35} = 43,85 \text{ MPa}.$$

„A“ atveju, sąlyga nėra tenkinama, tai reiškia, kad įtempių intervalas yra aukščiau pastovios amplitudės nuovargio ribos ir nuovargio įtrūkiai gali atsirasti.

Kadangi, viena iš sąlygų nėra tenkinama, toliau yra atliekama virintinės siūlės nuovargio patikra remiantis Eurokode 3 pateikiama metodika. Pagal (1.21) formulę, yra tikrinamos sąlygos abejiems nuovargio plyšio susidarymo atvejams. „A“ atveju:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 28,77}{36/1,35} = 1,08 > 1,0.$$

„B“ atveju:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 43,22}{80/1,35} = 0,73 < 1,0.$$

„A“ atveju sąlygą nėra tenkinama, tai reiškia, kad siūlės varginamasis patvarumas yra mažesnis negu nustatyta atskaitinė nuovargio ciklų riba – 2 milijonai ciklų. Pagal Eurokode 3 pateikiamas formules apskaičiuojamas tikrinamos siūlės varginamasis patvarumas. Formulė yra išreiškiama iš LST EN 1993-1-9:2005 7.1.(2) punkte pateikiamų formulių:

$$\Delta\sigma_R^m \cdot N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \rightarrow N_R = \frac{\Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6}{\Delta\sigma_R^m} = \dots = 1,59 \cdot 10^6 \text{ ciklų} \quad (3.6)$$

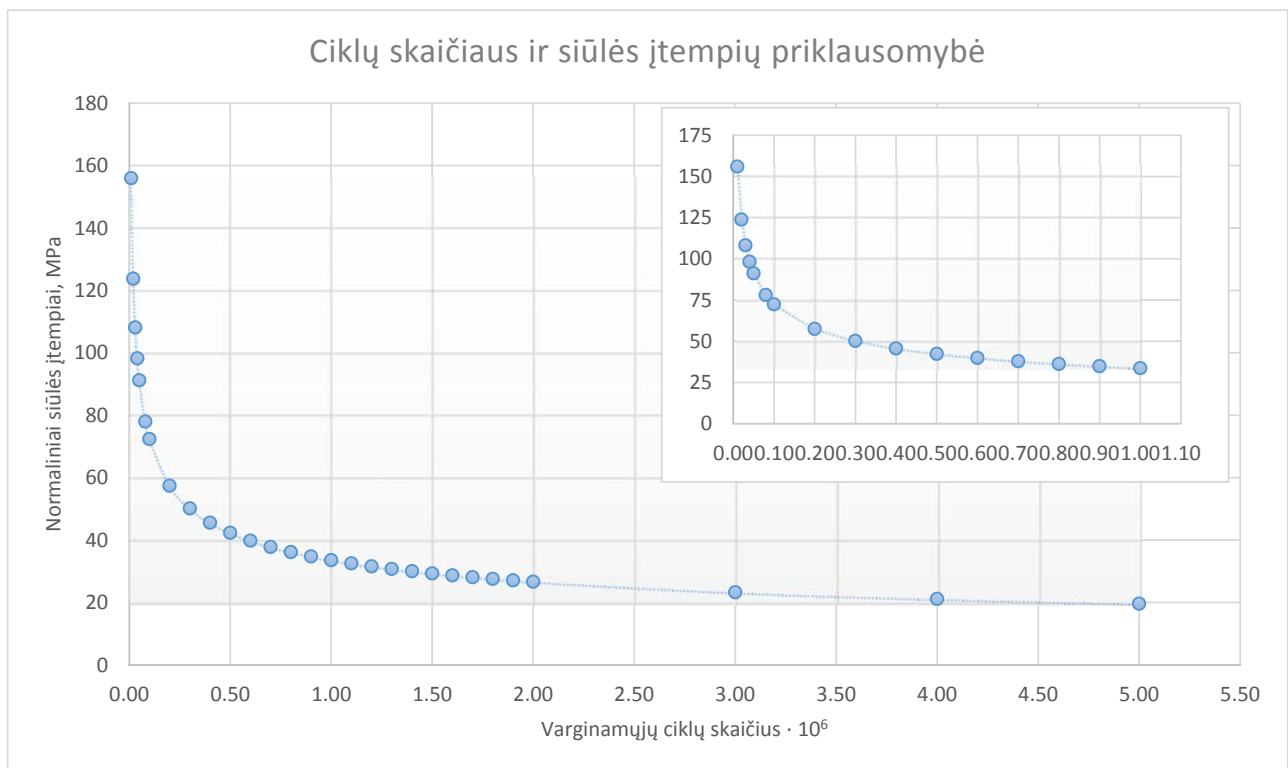
Atlikus skaičiavimus, yra nustatyta, kad ši virintinė siūlė atlaikys $1,59 \cdot 10^6$ ciklų, po kurių, joje galimai pradės vertis varginamasis plyšis. Jeigu ši ciklų riba niekada taip ir nebus viršyta, nuovargis neturės įtakos konstrukcinio mazgo gyvavimo trukmei, bet jeigu ciklų skaičius bus viršytas, tai gali sukelti varginamąjį įtrūkį, kuris gali sukelti konstrukcinio mazgo suirimą. Taip pat šis rezultatas parodo, kad siūlė, parinkta pagal saugos ribinio būvio apkrovas bei skaičiavimo formules, nebūtinai tenkins varginamąsias apkrovas ir kad situacijose, kuriose tai yra aktualu, tai turi būti įvertinama.

3.3. Plieno charakteristikų kitimo priklausomybės kreivės nuo ciklų skaičiaus sudarymas

Kaip jau minėta ankstesniuose skyriuose, plieno nuovargio įtrūkiai yra ciklinių apkrovų, kurios veikia konstrukciją ar konstrukcijos mazgą, padarinys. Kitaip tariant, per tam tikrą ciklų skaičių, plieno charakteristikos, šiuo atveju, plieno takumo riba arba laikomoji galia, sumažėja iki tokio lygio, kad minėtosios apkrovos, kurios prieš tai konstrukcijai nesukeldavo kritinių įtempių, sukelia įtrūkius virintinėje siūlėje. Analizuojamu atveju, normalinių įtempių intervalas, abiem tikrinimo atvejais, susideda tik iš vienos dedamosios – įtempių, kurie atsiranda virintinėje siūlėje arba sijos juostoje, kai konstrukcija yra maksimaliai apkraunama. Kadangi, pagal Eurokode 3 pateikiamas formules, konstrukcinės detalės patvarumas bei įtempių intervalas vienas nuo kito yra tiesiogiai priklausomi, galima išsireikšti formules, tiek vieno tiek kito apskaičiavimui. Susidarius skaičiavimo algoritmą (pateikiamas prieduose), grafiškai yra išreiškiamos priklausomybės. Detaliai analizuojamas yra „A“ atvejis, kadangi, pagal 3.2.3 skyriuje atliktus skaičiavimus, buvo nustatyta, kad jis yra pavojingesnis ir tikimybė, kad nuovargio įtrūkiai atsiras virintinėje siūlėje yra didesni, negu, kad jie atsiras pagrindiniame elemente.

3.3.1 Ciklų skaičiaus ir įtempių priklausomybė

Kadangi įtempių intervalas susideda tik iš vieno įtempio – siūlėje atsirandančios maksimalaus įtempio, kai konstrukcija yra maksimaliai apkrauta – ši priklausomybė yra tiesioginis varginamosios kreivės atspindys. Ši priklausomybė pateikiama 3.3 pav.

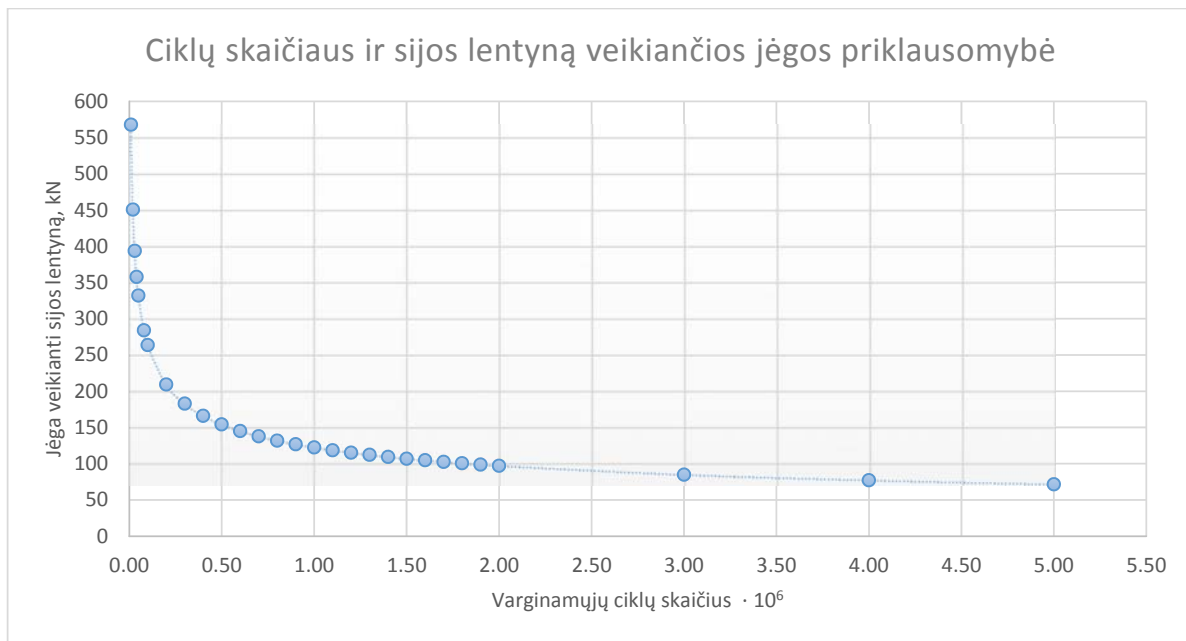


3.3 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas

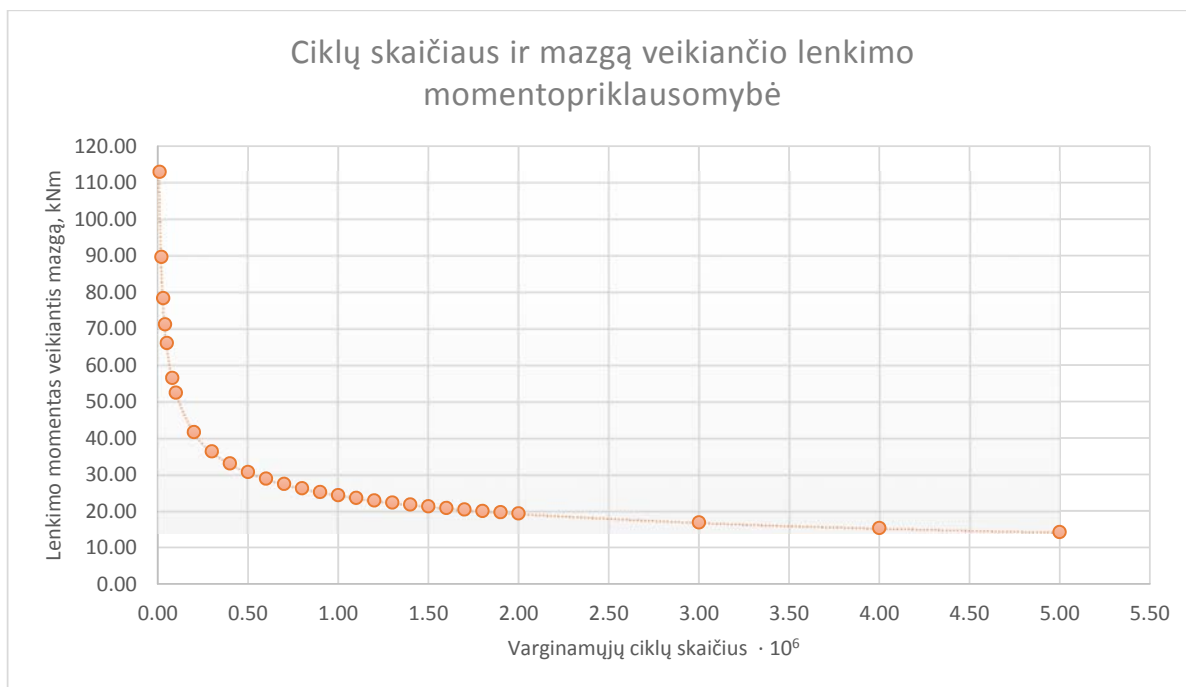
Iš grafiko matyti, kad esant itin mažam apkrovų ciklų skaičiui, virintę siūlę gali veikti dideli įtempiai, bet jie neturės įtakos varginamųjų įtrūkių susidarymui. Ši dalis tampa aktuali tik vykstant žemės drebėjimui, kai ciklų skaičius itin mažas, bet įtempių šuolis didelis. Didėjant ciklų skaičiui nuo 10 000 iki 500 000, kreivė kinta netiesiškai, šis kitimas pateikiamas mažesniu masteliu. Vėliau kreivė išsitiesina ir primena standartinę varginamojo stiprio kreivę, kuri parodo, kad didėjant varginamųjų ciklų skaičiui, proporcingai mažėja galimi įtempiai siūlėje, kurie nesukeltų varginamųjų įtrūkimų.

3.3.2 Ciklų skaičiaus ir jėgų veikiančių gembę priklausomybė

Kadangi yra nustatytos virintinės siūlės įtempių reikšmės, kurios nesukelia varginamųjų įtrūkių virintinėje siūlėje prie tam tikrų ciklų skaičiaus, iš šių įtempių reikšmių galima išsireikšti maksimalią jėgą, kuri gali veikti konstrukcinį mazgą. Žinant virintinės siūlės įtempių apskaičiavimo formulę, bei priimant sąlygą, kad virintinės siūlės efektyvieji parametrai nekinta, yra išreiškiama maksimalios jėgos, veikiančios sijos lentynas, priklausomybė bei lenkimo momento, veikiančio konstrukcinį mazgą priklausomybė. Atitinkamai, šios priklausomybės grafiškai yra išreiškiamos 3.4 bei 3.5 pav.



3.4 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas



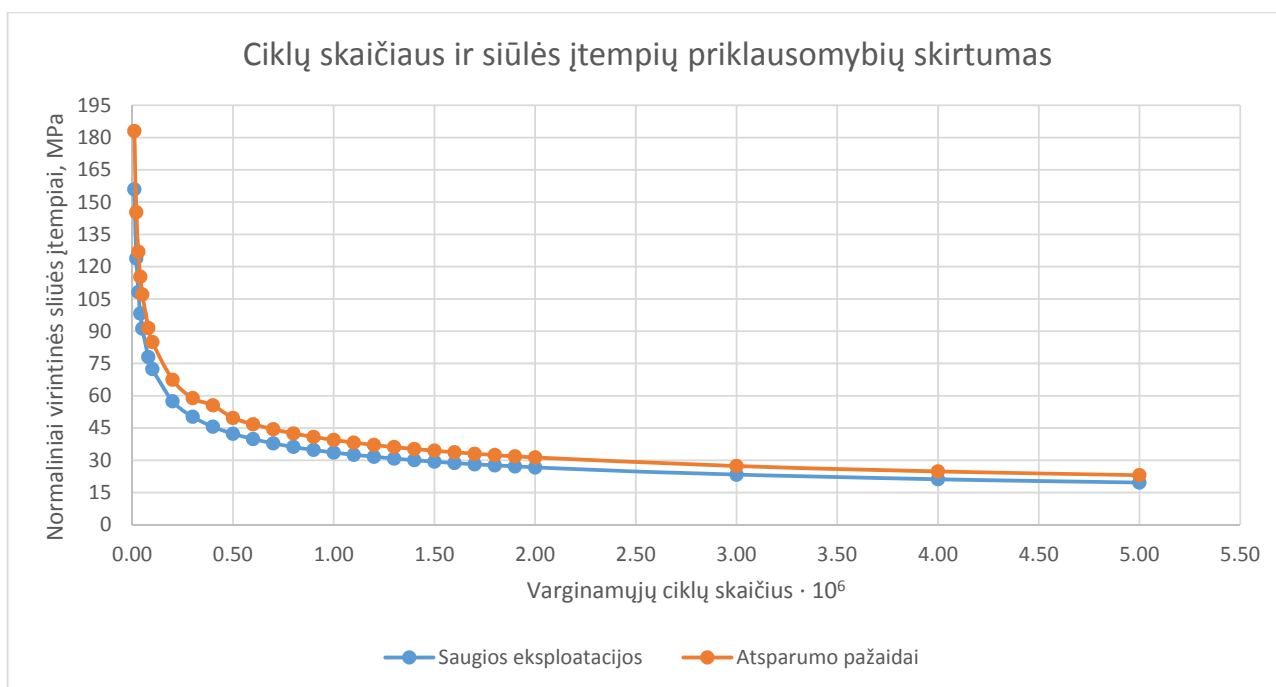
3.5 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas

Iš abiejų grafikų matyti, kad jų pobūdis yra identiškas ciklų skaičius ir siūlę veikiančių įtempių priklausomybės grafiko pobūdžiui. Taip yra todėl, nes siūlę veikiantys įtempiai yra tiesiogiai proporcingi nuo mazgą ir siūlę veikiančių jėgų. Iš šių grafikų, žinant maksimalų tiltinio krano veikimo ciklų skaičių, būtų galima nusistatyti maksimalią jėgą, kuri gali veikti analizuojamos geometrijos konstrukcinę mazgą bei virintinę siūlę.

Verta paminėti, kad šios reikšmės atitinka analizuojamą situaciją, bet lenkimo momentą bei sijos lentyną veikiančią jėgą galima koreguoti, t.y. lenkimo momentą, galima sumažinti maksimaliai sumažinant gembės ilgį (maksimaliai prispaudžiant pokraninę siją prie kolonos). Net jeigu tuomet norima sumažinti jėgą, kuri veikia sijos lentynas, tai padaryti galima didinant jėgos veikimo petį – įvedant papildomas stormenas.

3.3.3 Ciklų skaičiaus ir įtempių priklausomybių skirtumas priklausomai nuo nuovargio vertinimo metodo

Tikrinant konstrukcijos ar konstrukcinės detalės nuovargio laikomąją galią yra būtina pasirinkti nuovargio vertinimo metodą – atsparumo pažadai arba saugios eksploatacijos. Nuo vertinimo metodo pasirinkimo, priklauso detalės varginamojo stiprio dalinių koeficientų reikšmės. Kai irties pasekmės yra reikšmingos, skirtumas tarp ciklų skaičiaus ir įtempių priklausomybių yra pateikiamas grafiškai 3.6 pav.



3.6 pav. Ciklų skaičiaus ir siūlės įtempių priklausomybės grafikas

Iš grafiko matyti, kad pasirinkus atsparumo pažaidai vertinimo metodą, ribiniai įtempiai, kurie nesukelia varginamųjų įtrūkių yra didesnis, negu saugios eksploatacijos vertinimo metodo atveju. Visi įtempiai skiriasi 1,17 karto. Pasirinkus atsparumo pažaidai metodą, galima sutaupyti pradinio projektavimo metodu, t.y. siūlių, konstrukcinių mazgų laikomoji galia neturi būti tokia didelė, bet tuomet turi būti atliekama reguliari konstrukcijų apžiūra ir užfiksavus pradinį nuovargio įtrūkių atvejus, jie turi būti šalinami. Pasirinkus saugios eksploatacijos metodą yra atvirkščiai – iš pat pradžių, turi būti užtikrinta didesnė siūlų ir mazgų laikomoji galia, tam, kad viso pastato gyvavimo metu, neatlikinėjant konstrukcijų apžiūros, juose neatsirastų varginamieji įtrūkiai, kurie galėtų sukelti konstrukcijos ar konstrukcijos mazgo irtį (Nussbaumer *et al.* 2011). Šį skirtumą puikiai reprezentuoja, anksčiau pateiktas, 1.13 pav.

3.4. Analitinio skaičiavimo rezultatai

Atlikus analizuojamo konstrukcinio mazgo analitinius skaičiavimus pagal Eurokodą 3, galima daryti tokias išvadas:

- Buvo patikrinta konstrukcinio mazgo laikomoji galia saugos ribiniam būviui. Mazgo laikomoji galia yra pakankama atlaikyti jį veikiančias apkrovas;
- Buvo patikrinta virintinė siūlė tarp sijos viršutinės lentynos bei kolonos sienelės. Ši siūlė bus veikiamą tempimo, taigi jos, pakankamas laikomosios galios užtikrinimas yra itin svarbus. Siūlės laikomoji galia yra pakankama atlaikyti ją veikiančias, saugaus ribinio būvio, jėgas;

- Suprojektavus mazgą pagal saugos ribinį būvį, buvo atlikta konstrukcinio mazgo nuovargio patikra. Buvo nustatyta, kad virintinė siūlė, kurios laikomoji galia yra pakankama atlaikyti saugaus ribinio būvio apkrovas, yra per mažos laikomosios galios atlaikyti varginamąsias apkrovas;
- Pagal analitinius skaičiavimus buvo nustatyta, kad siūlė gali atlaikyti 1 590 000 varginamųjų ciklų. Viršijus šią ribą, siūlėje gali pradėti formuotis varginamieji įtrūkiai, kurie gali sukelti siūlės irtį;
- Virintinės siūlės patvarumas yra mažesnis negu atskaitinis (2 milijonų ciklų) patvarumas pateikiamas Eurokode 3.

4. VIRINTINIO MAZGO SKAIČIAVIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU

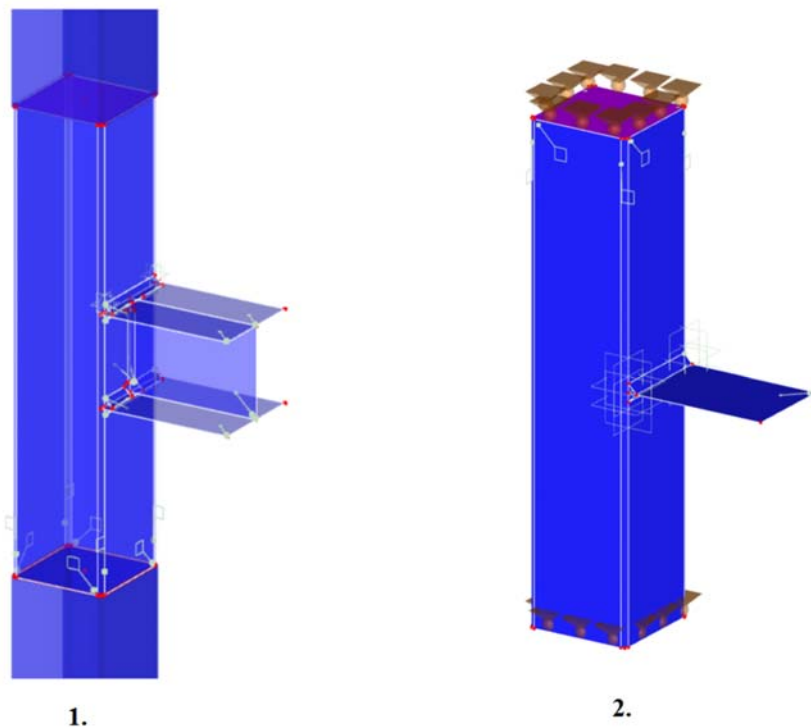
Analizuojamo konstrukcinio mazgo skaitinė analizė bus atliekama *Dlubal RFEM* programiniu paketu. Šioje programoje sudaryti skaičiuojamieji modeliai yra analizuojami baigtinių elementų metodu. Baigtinių elementų metodas (BEM), tai skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikslius diferencialinių lygčių dalinėmis išvestinėmis ar integralinių lygčių sprendinius. Metodo esmė – sritis, kurioje ieškomas sprendimas, suskaidoma į dalis (baigtinius elementus). Tada daroma prielaida, kad kiekviename elemente nagrinėjamas nežinomasis kinta nesudėtingu dėsniu ir diferencialinė lygtis jame pakeičiama į algebrinių lygčių sistemą. Sujungus visų elementų sistemas gaunama sistema, kurią išsprendus gaunamas atsakymas (Barauskas *et al.* 2004). Baigtinių elementų metodas yra plačiai naudojamas tokiose srityse, kaip statybos inžinerija, šilumos inžinerijoje, skysčių dinamikoje, elektromagnetikos srityje. *Dlubal RFEM* aplinkoje, kaip ir kitose baigtinių elementų programose, yra galimybė elementus modeliuoti tiek kaip tūrinius (angl. *solid*) tiek kaip plokštuminius elementus (angl. *shell*).

4.1. BEM modelių geometrija, mazgo įtvirtinimo sąlygos

Modeliuojant analizuojamą konstrukcinį mazgą, buvo nuspręsta sudaryti dviejų tipų modelius:

1. RHS tipo kolonos ir atviro profilio sijos virintinis mazgas, modeliuojant visą prijungiamo elemento skerspjūvį;
2. RHS tipo kolonos ir atviro profilio sijos virintinis mazgas, modeliuojant prijungiamo elemento tik tempiamą lentynos dalį.

Šių modelių reprezentacija ir skirtumai pateikti 4.1 pav. Taip pat skirtusi ir apkrovos pridėjimas – modeliuojant 1 atveju, apkrova būtų išskirstyta į viršutinės lentynos plotą, kuris būtų lygus pokraninės sijos atrėmimo plotui. 2 atveju, iš žinomo lenkimo momento ir jėgų peties, yra apskaičiuojama tempimo jėga, kuri veikia sijos lentyną. Būtent šia jėga būtų apkrauta plokštelė.



4.1 pav. BEM modelių tipai: 1) modeliuojant visą prijungiamo elemento skerspjūvį; 2) modeliuojant tik tempiamą skerspjūvio lentyną

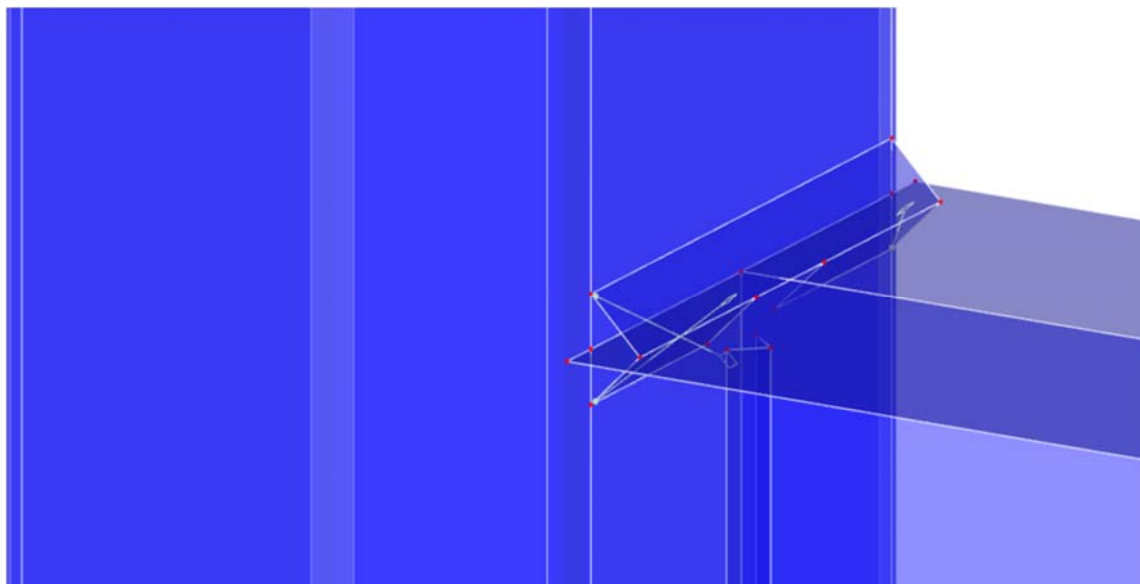
Kaip jau minėta 2 bei 3 skyriuose, varginamųjų apkrovų, bei įtempių siūlėje nuo varginamųjų apkrovų skaičiavimai skiriasi nuo skaičiavimų, tikrinant saugos ribinį būvį, todėl bus tikrinami abu apkrovimo atvejai. Taip yra daroma, tam, kad patikrinti analitiškai apskaičiuotus įtempius su skaitinės analizės metu gautais įtempiais.

Modeliuojant pirmąjį atvejį, kolona yra modeliuojama viso ilgio. Kolona yra padalinama į atskiras dalis, 0,5 m žemiau ir virš prijungiamos sijos. Iš viso 1 m kolonos yra sudalinamas į plokštuminius elementus, o likusi dalis, paliekama kaip įprastinis, 1D tipo elementas. Ties šiais perėjimais, yra sumodeliuojamas standus plokštuminis elementas, tam, kad juo būtų sklandžiai perduodamos apkrovos. Kolona yra įtvirtina lanksčiai tiek pamato vietoje, tiek ties stogu.

Antruoju atveju, nėra modeliuojamas visas analizuojamos kolonos aukštis, kadangi pridėta tempimo iš tikrųjų veikia ne koloną, o siją ir virintines siūles, pridėjus apkrovą į koloną, ši netenka stabilumo. Tam, kad to būtų išvengta, kolona yra modeliuojama po 0,5 m į viršų ir į apačią nuo prijungiamos plokštelės. Kolonos viršus ir apačia įtvirtinama standžiai. Daugiau jokių papildomų atramų skaičiavimo modelyje nėra įvedama, kadangi analizuojamas mazgas yra gembinis.

Sija bei plokštelė su kolonos yra sujungiama ne kontaktiniu paviršių nustatymais, bet modeliuojant virintines siūles (4.2 pav.). Taip yra daroma todėl, nes remiantis atliktai tyrimais, norint gauti adekvatų realaus konstrukcinio mazgo elgsenos modelį, būtina elementus jungti virintinėmis siūlėmis. Priešingu

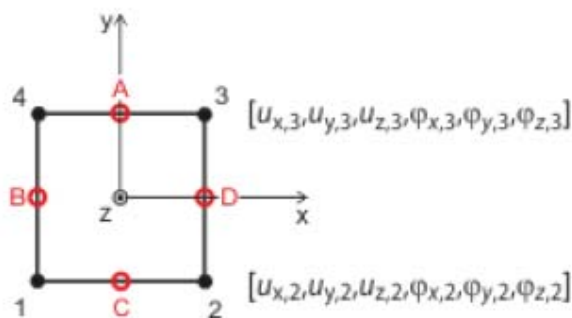
atveju, analizuojamo mazgo rezultatai gali skirtis iki 20 % (Serrano-Lopez *et al.* 2016). Taip pat atliekant varginamojo apkrovimo analizę, būtent siūlėje veikiantys įtempiai yra pagrindinis parametras, nustatinėjant šio konstrukcinio mazgo varginamąjį patvarumą.



4.2 pav. Virintinių siūlių modelis *Dlubal RFEM* paketo aplinkoje

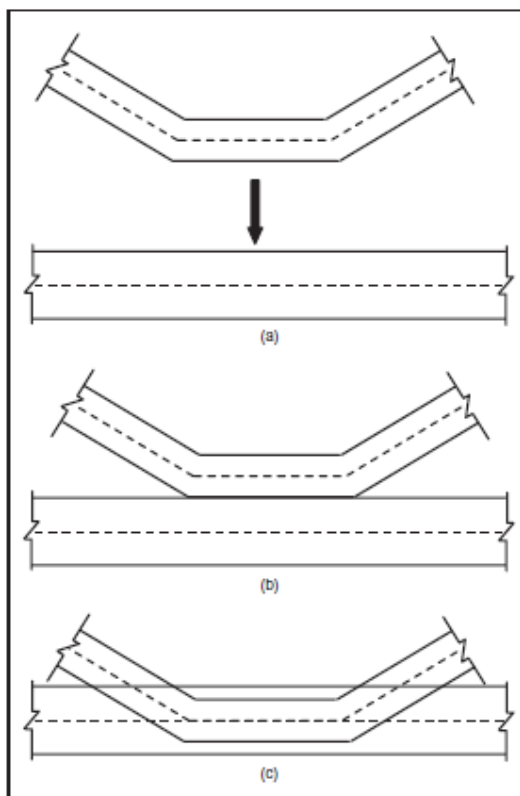
4.2. BEM modelio suskaidymas į pasirinktus baigtinius elementus

Dauguma tyrimų, atliktų devyniasdešimtaisiais, kuriuose buvo naudojama baigtinių elementų analizė, buvo analizuojami naudojant plokštuminius elementus. Viena iš pagrindinių to priežasčių buvo trumpesnis skaičiavimo laikas lyginant su tūrinio tipo baigtiniais elementais (van der Vegte *et al.* 2010). *Dlubal RFEM* programiniame pakete, skaidant modelį į plokštuminius baigtinius elementus, modelis yra sudalinamas į 2D, kvadrato tipo elementus (trikampiai elementai yra pridedami automatiškai, tose vietose, kur kvadratiniai elementai yra negalimi). Kiekvienas elemento mazgas turi po 6 laisvės laipsnius. Šio elemento reprezentacija yra pateikiama 4.3 pav.



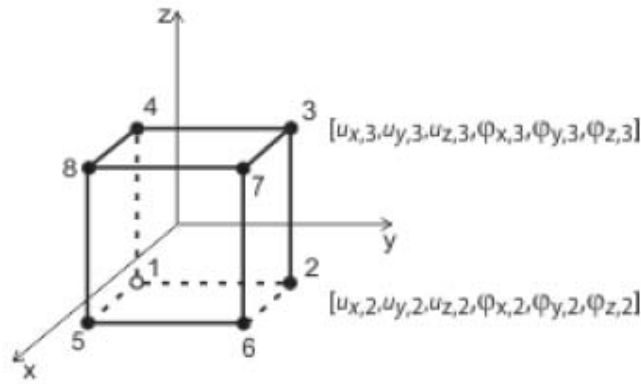
4.3 pav. Plokštuminio tipo elementas *Dlubal RFEM* aplinkoje

Nors plokštuminiai tipo elementai yra tinkami daugumai skaičiavimo atvejų, didžiausias šių elementų trūkumas yra kontaktinio paviršiaus sukūrimas. Norint, kad modelis skaičiuotų ir pateiktų rezultatus, elementų vidurio linijos turi būti sujungtos viena su kita, taip ignoruojant elementų storį ir leidžiant vienam elementui įsiskverbti į kitą elementą (4.4 pav.) (van der Vegte *et al.* 2010).



4.4 pav. Teisingos ir neteisingos kontaktinio paviršiaus simuliacijos, naudojant plokštuminius elementus: a) kontaktiniai elementai; b) elementų storis yra neignoruojamas; c) elementų storis yra ignoruojamas (van der Vegte *et al.* 2010)

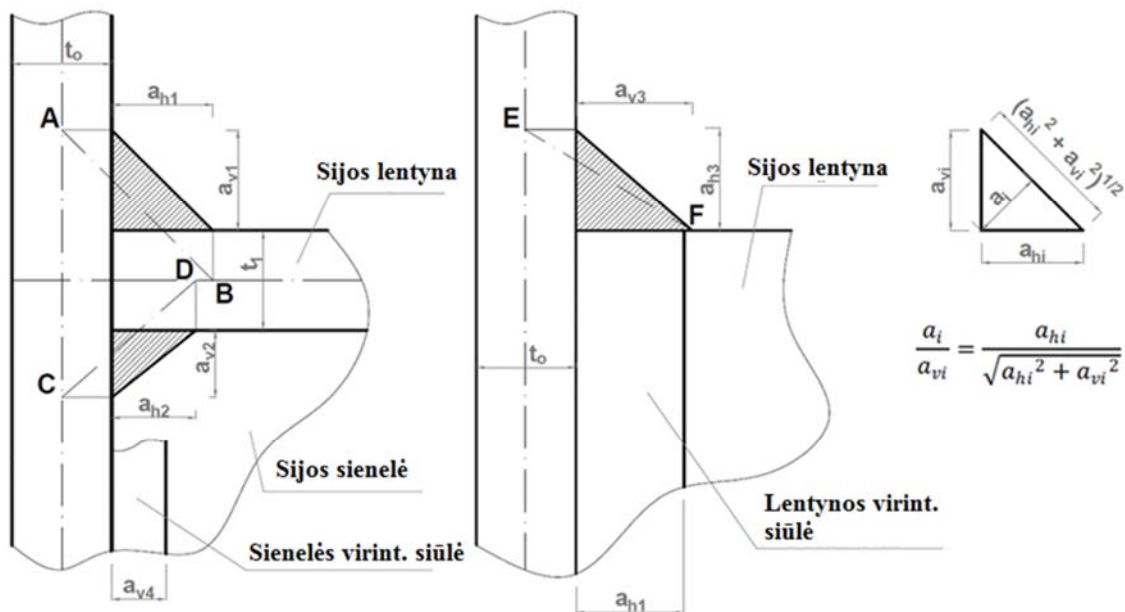
Dlubal RFEM programinėje įrangoje naudojami tūriniai baigtiniai elementai yra tetraedro, pentahedro (prizmės, piramidės) arba kubo formos (4.5 pav.). Visi elementų mazgai, taip pat turi po 6 laisvės laipsnius, bet kadangi tai yra tūriniai elementai, mazgų skaičius yra didesnis negu plokštuminiuose elementuose ir dėl šios priežasties, skaičiavimo trukmė tampa didesnė.



4.5 pav. Tūrinio tipo elementas (kubas) *Dlubal RFEM* aplinkoje

Visgi šiame baigiamajame darbe yra nuspręsta mazgą modeliuoti plokštuminio tipo baigtiniais elementais. Šio tipo elementų naudojimas sutrumpina baigtinių elementų programos skaičiavimo trukmę, bei tinkamai sumodeliuotas modelis duoda pakankamai tikslūs rezultatus.

Virintinė siūlė buvo modeliuojama atsižvelgiant į jau atliktus tyrimus. Pagal pasirinktą metodiką, tikslas yra sumodeliuoti siūlę taip, kad jos modelis atitiktų skaičiuojamos siūlės storį. Geometrinis modelis buvo modeliuojamas atsižvelgiant į vidurinių paviršių pozicijas taip siekiant užtikrinti tinkamą siūlės storį bei tinkamą sujungimą tarp sijos/plokštelės ir kolonos (Miguel *et al.* 2016). Siūlės modeliavimo schema yra pateikiama 4.6 pav. Punktyrinės linijos reprezentuoja vidurinius elementų paviršius. Taip pat linijos AB bei CD reprezentuoja virintinių siūlių paviršius, kurios jungia sijos lentynas/sienelę su kolonos sienele.



4.6 pav. Virintinės siūlės modelis, naudojant plokštuminius elementus (Miguel *et al.* 2016)

Žinant virintinės siūlės storį, galima apsiskaičiuoti vertikalų ir horizontalių siūlės parametrus. Jų santykis pateikiamas (4.1) formulėje:

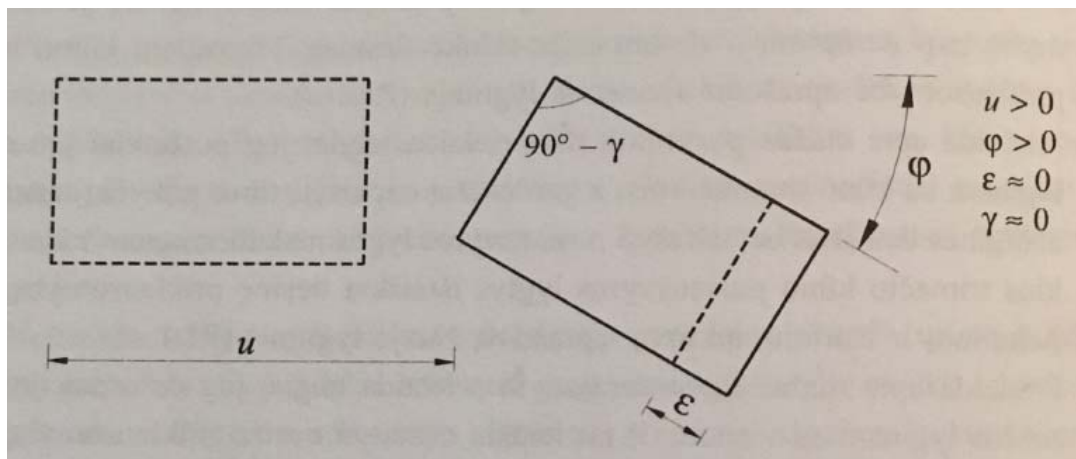
$$\frac{a_i}{a_{vi}} = \frac{a_{hi}}{\sqrt{a_{hi}^2 + a_{bi}^2}} \quad (4.1)$$

Žinant reikalingus parametrus, galima tinkamai sumodeliuoti virintinę siūlę, naudojant plokštuminius (*shell*) tipo baigtinius elementus.

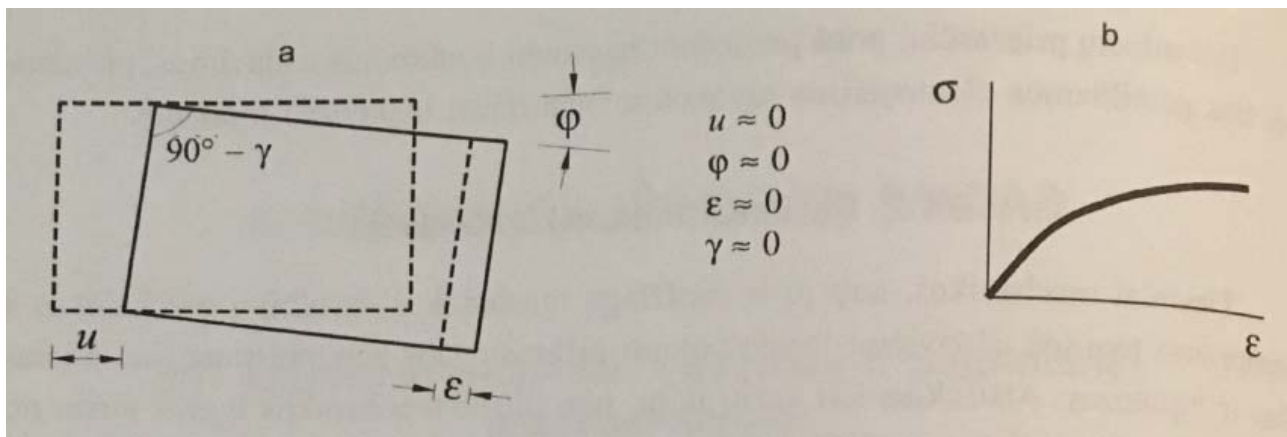
4.3. Plieno charakteristikų įvertinimas baigtinių elementų programoje

Analizuojant konstrukcinį mazgą *Dlubal RFEM* programiniu paketu yra atliekama netiesinė konstrukcijos analizė. Atliekant netiesinę analizę yra įvertinami du netiesiškumai – geometrinis ir fizinis. Šiuos netiesiškumus pasirinkta vertinti remiantis jau atliktų bandymų rezultatais (Miguel *et al.* 2016).

- **Geometrinis netiesiškumas** esant dideliems poslinkiams. Yra įvertinami dideli poslinkiai u , o deformacija ε laikoma maža (4.7 pav.);
- **Fizinis (medžiagos) netiesiškumas**. Įvertinamas tik netiesinis įtempių ir deformacijų ryšys, o linijiniai poslinkiai u ir kampiniai posūkiai φ bei linijinės deformacijos ε ir kampinės deformacijos γ laikomos mažomis (4.8 pav.).

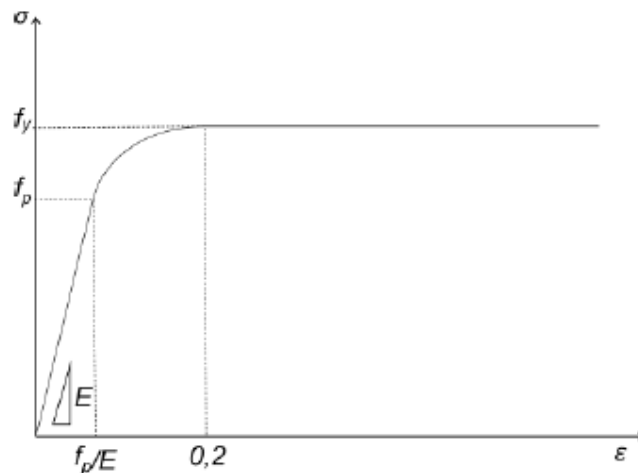


4.7 pav. Didelių poslinkių prielaidos iliustracija (Barauskas *et al.* 2004)



4.8 pav. Fizinio netiesiškumo iliustracija: a) deformuotas kūno vaizdas; b) netiesinė medžiagos diagrama (Barauskas *et al.* 2004)

Norint įvertinti fizinį netiesiškumą, programiniame pakete *Dlubal RFEM* yra aprašoma įtempių-deformacijų diagrama pateikiama 4.9 pav. Ši diagrama buvo aprašoma kaip daugiatisė diagrama, kurios perėjimą iš tiesinės stadijos į tamprią stadiją sudaro 10 atskirų tiesių.



4.9 pav. Įtempių-deformacijų kreivė (Miguel *et al.* 2016)

Plieno įtempių-deformacijų kreivė, pasiūlyta Europos standartuose nurodo, kad kambario temperatūroje, plienas veikia, kaip elastiškai-plastiška medžiaga. Bet norėdami tinkamai sumodeliuoti pereinamąją kreivės vietą, uždaruose kvadratinuose skerspjūviuose, tiesinės plieno stadijos riba f_p yra nustatoma lygi 85 % plieno takumo ribos f_y . Ši riba buvo nustatyta atlikus tempimo testus su RHS tipo skerspjūviais (Outlinen *et al.*, 2001). Pereinamoji kreivė tarp tiesinės plieno stadijos ribos f_p ir plieno tamprumo ribos f_y yra modeliuojama elipsės formos ir jos apskaičiavimas yra priimamas lygus Eurokode 3 (1993-1-2) pateikiamoje kreivėje, kai plieną veikia aukšta temperatūra (Miguel *et al.*, 2016).

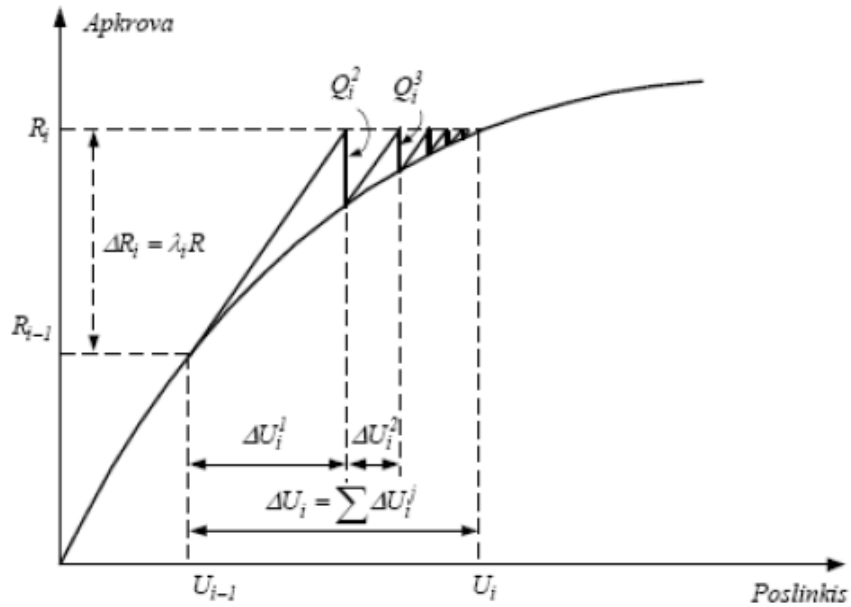
Šis, fizinio netiesiškumo įvertinimas, buvo pasirinktas remiantis baigtinių elementų analizės tyrimais, kuriuose rezultatai buvo gauti artimi eksperimentiniams. Tai parodo, kad toks medžiagos netiesiškumas yra artimas realybei. Taip pat virintinės siūlės plieno klasė yra priliginama jungiamų elementų plieno klasei. Pagal atliktus tyrimus, didesnės plieno klasės priėmimas, pastebimų pokyčių rezultatams neturi (Migueal *et al.*, 2016). Kitos, skaičiavimuose naudojamos, plieno charakteristikos:

- Tamprumo modulis $E = 210 \text{ GPa}$;
- Puasono koeficientas $\nu = 0,3$;
- Plieno takumo riba $f_y = 355 \text{ MPa}$;
- Plieno tankis $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

4.4. Baigtinių elementų modelio analizės nustatymai

Netiesinės analizės skaičiavimui yra pasirinkta naudoti prieaugių metodą. Formuluoatė prieaugis traktuoja netiesinį uždavinį kaip uždavinį, aprašantį netiesinį procesą tarp laiko momentų t ir $t + \Delta t$. Toks požiūris padeda suvokti ir aprašyti visą laiką kintantį procesą, kuriame struktūros būvi laike aprašomas seka būvių, užfiksuotų konkrečiuose laiko taškuose (Barauskas *et al.*, 2004). Kitaip tariant, sprendžiant prieaugių metodu, yra priimami psiaudolaiko nustatymai, kurių paskirtis yra nustatytos apkrovos nustatymui atitinkamame žingsnyje. Šiuo atveju, psiaudo laiko pradžios taškas pasirenkama „0“, o pabaigos taškas pasirenkamas „1“. Žingsnių skaičius priklauso nuo užduoto pradinio laiko žingsnio, kuris kis nuo psiaudo laiko pradžios iki psiaudo laiko pabaigos taškų. Tokiu būdu, skaičiavimo programa automatiškai keičia laiko bei apkrovos kėlimo žingsnį.

Analizuojant šį mazgą, buvo pasirinkta naudoti modifikuotą Niutono-Rafsono metodą. Šis metodas priklauso *liestinių* metodų grupei. Šio skaičiavimo metodo iteracijų atlikimo iliustracija pateikiama 4.10 pav. Taikant šį metodą, standumo matrica yra apskaičiuojama tik apkrovos žingsnio pirmos iteracijos metu, ir ji išlieka vienoda visose to žingsnio iteracijose. Iteracijos, kiekviename žingsnyje, yra daromos tam, kad būtų panaikintos nesubalansuotos jėgos (Q_i^j). Šios jėgos atsiranda, kai netiesinio uždavinio lygtys yra pakeičiamos tiesinėmis lygtimis.



4.10 pav. Modifikuoto Niutono-Rafsono metodo iteracijų atlikimo schema

Pirmojoje iteracijoje, nesubalansuoto jėgos visada lygios nuliui. Tuomet pusiausvyros lygtis gali būti užrašoma taip:

$$[K_i^0]\{\Delta U_i^1\} = \{\Delta R_i^1\}; \quad (4.2)$$

čia

$[K_i^0]$ – prieš tai buvusios iteracijos standumo matrica;

$\{\Delta U_i^1\}$ – i-tojo apkrovos prieaugio, pirmos iteracijos poslinkio pokyčio vektorius;

$\{\Delta R_i^1\}$ – i-tojo apkrovos prieaugio, pirmos iteracijos apkrovos pokyčio vektorius.

Iš šios lygčių sistemos, gaunamas poslinkio pokyčio vektorius, kuris tolimesnėse iteracijose yra tikslinamas, sudarant lygti nesubalansuotoms jėgoms:

$$[K_i^{j-1}]\{\Delta U_i^j\} = \{Q_i^j\}. \quad (4.3)$$

Apkrovos prieaugio iteracijos yra baigiamos, kai nesubalansuotų jėgų $\{Q_i^j\}$ ar poslinkių pokyčio $\{\Delta U_i^j\}$ vektoriai tampa be galo maži.

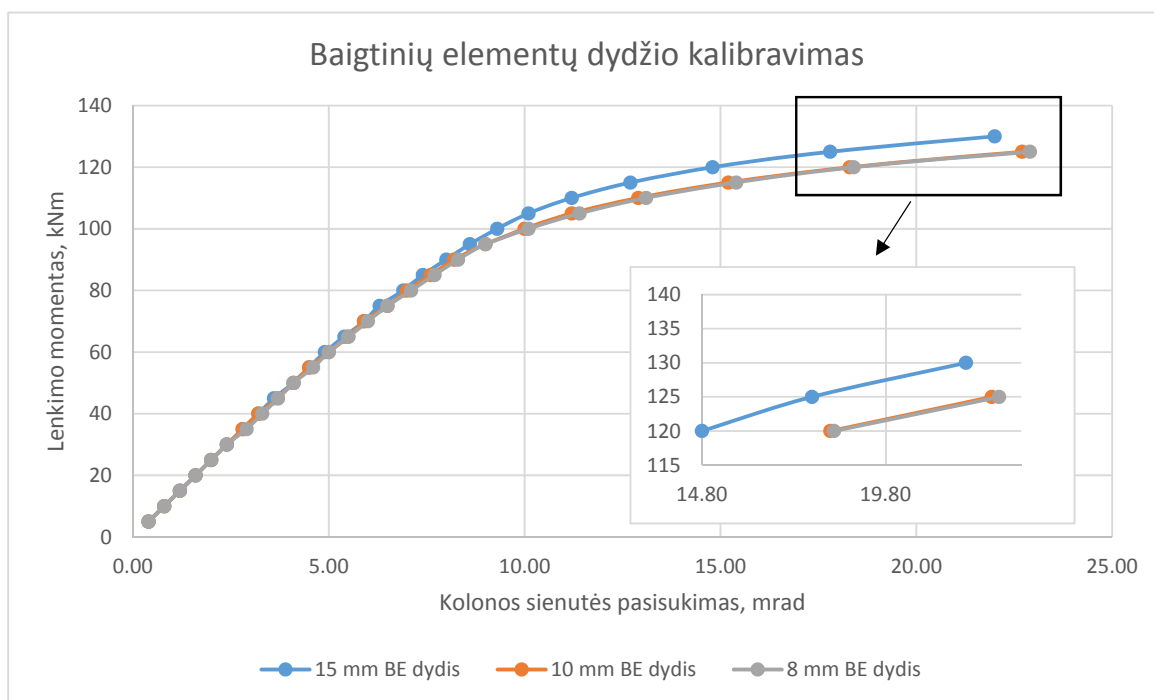
4.5. Baigtinių elementų dydžio parinkimas

Analizuojant konstrukcinį mazgą baigtinių elementų programa *Dlubal RFEM*, rezultatų tikslumui, didelę įtaką turi baigtinių elementų tinklėlio tankis. Kuo baigtiniai elementai yra mažesni, tuo rezultatai yra tikslesni. Bet naudojant itin tankų tinklėlį, skaičiavimo laikas drastiškai išauga. Tam, kad rezultatai būtų

pakankamai tikslūs, o skaičiavimo laikas ne toks ilgas, yra atliekama, racionalaus baigtinio elemento dydžio analizė.

Analizė atliekama įvertinant abu modeliuojamus atvejus, t.y. kai modeliuojamas visas prijungiamos sijos skerspjūvis ir kai modeliuojama tik atskira plokštelė, reprezentuojanti prijungtos sijos juostą. Nustatinėjant racionaliausią baigtinių elementų dydį, yra pasirenkami 3 dydžiai, kurie bus tikrinami, ir iš jų bus išrinktas optimaliausias variantas. Baigtinių elementų dydžių variantai: 15 mm, 10 mm ir 8 mm. Tikslas yra išrinkti tokį baigtinių elementų dydį, su kuriuo būtų sumažintas skaičiavimo laikas, bet rezultatai būtų pakankamai tikslūs.

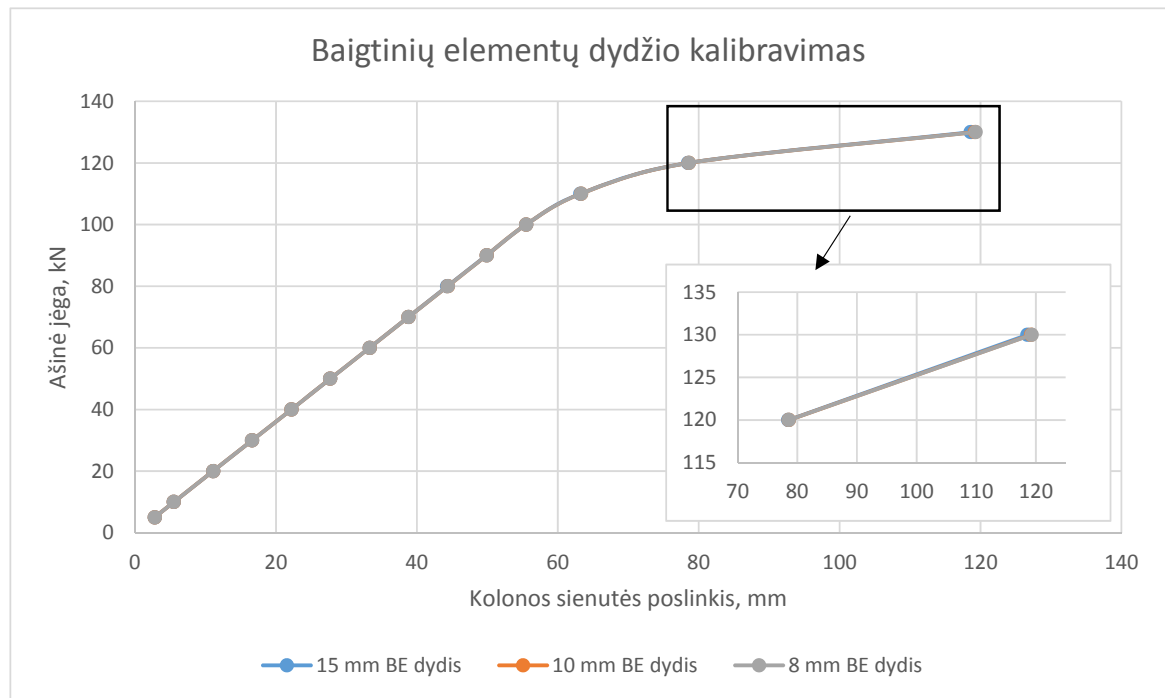
Analizuojant pirmojo modelio atvejį, su kiekvienu baigtinių elementų dydžio variantu, yra sudaroma priklausomybė tarp veikiančio lenkimo momento bei kampinio kolonos sienelės pasisukimo φ . Atlikus šio modelio analizę, buvo sudarytas grafikas (4.11 pav.), kuriame pateikiama ši priklausomybė.



4.11 pav. Baigtinių elementų dydžio kalibravimo grafikas pirmuoju atveju

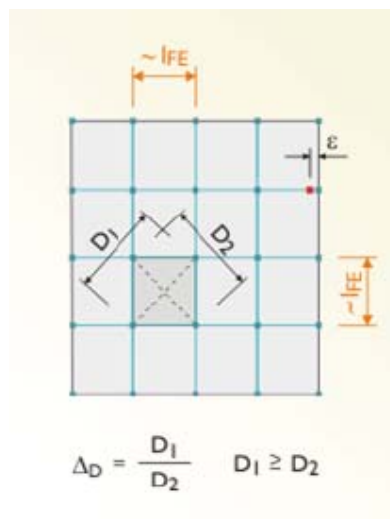
Iš grafiko rezultatų, galima daryti išvadas, kad 15 mm baigtinių elementų dydis yra kiek per didelis, ir rezultatai nėra tokie tikslūs, kai lenkimo momentas yra didesnis negu 80 kNm. Rezultatų skirtumas tarp 10 mm ir 8 mm baigtinių elementų, nėra toks ženklus, bet skaičiavimo trukmė, naudojant 8 mm baigtinius elementus yra didesnė. Galima teigti, kad šiuo atveju 10 mm baigtinių elementų dydis yra pakankamas, kad būtų sutaupoma skaičiavimų trukmė, bet rezultatai būtų pakankamai tikslūs.

Antruoju atveju yra sudaroma veikiančios ašinės jėgos ir kolonos sienelės poslinkio Δu priklausomybė. Atlikus šio modelio analizę, buvo sudarytas grafikas (4.12 pav.), kuriame yra pateikiama ši priklausomybė.



4.12 pav. Baigtinių elementų dydžio kalibravimo grafikas antruoju atveju

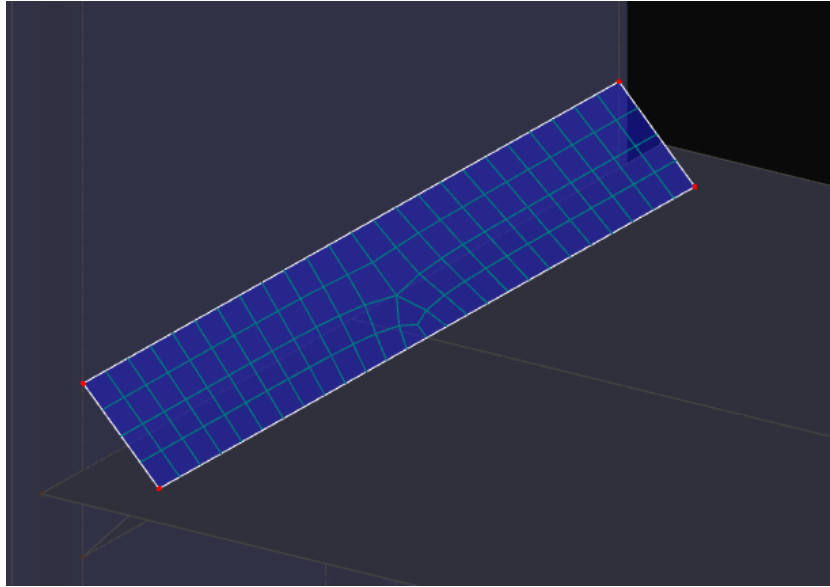
Iš gauto grafiko galima teigti, kad pastebimo skirtumo tarp baigtinių elementų dydžio nėra, tad baigiamajame darbe, baigtinių elementų dydžiai bus nustatomi pagal pirmojo kalibravimo atvejį ir naudojamas dydis bus 10 mm. Kadangi skaičiuojant baigtiniu elementų programa *Dlubal RFEM* yra pasirenkama, kad tinklelis būtų generuojamas iš kvadratų, pasirinktas dydis reiškia būtent baigtinių elementų kraštinės ilgį l_{FE} (4.13 pav.).



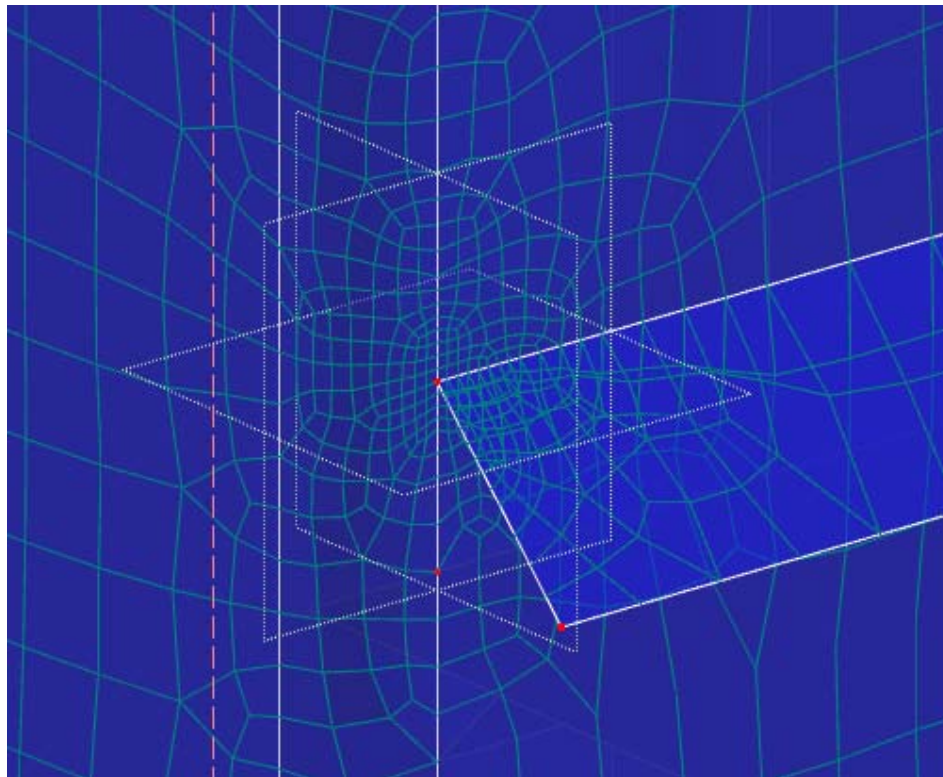
4.13 pav. Baigtinių elementų generavimas programa *Dlubal RFEM*

Taip pat tam tikrose vietose, kad rezultatai būtų tikslesni, baigtinių elementų tinklelis turi būti sutankinamas:

- Virintinės siūlės plokštumoje būtų bent 3 baigtiniai elementai (4.14 pav.);
- Kampiniuose plokštelės ir kolonos jungimo taškuose tinkelis sutankinamas iki 5 mm baigtinių elementų dydžio (4.15 pav.).



4.14 pav. Virintinės siūlės baigtinių elementų tinkelis programoje *Dlubal RFEM*



4.15 pav. Baigtinių elementų tinkelio sutankinimas jungiamuose taškuose, programoje *Dlubal RFEM*

5. NAGRINĖJAMO VIRINTINIO MAZGO TYRIMAS

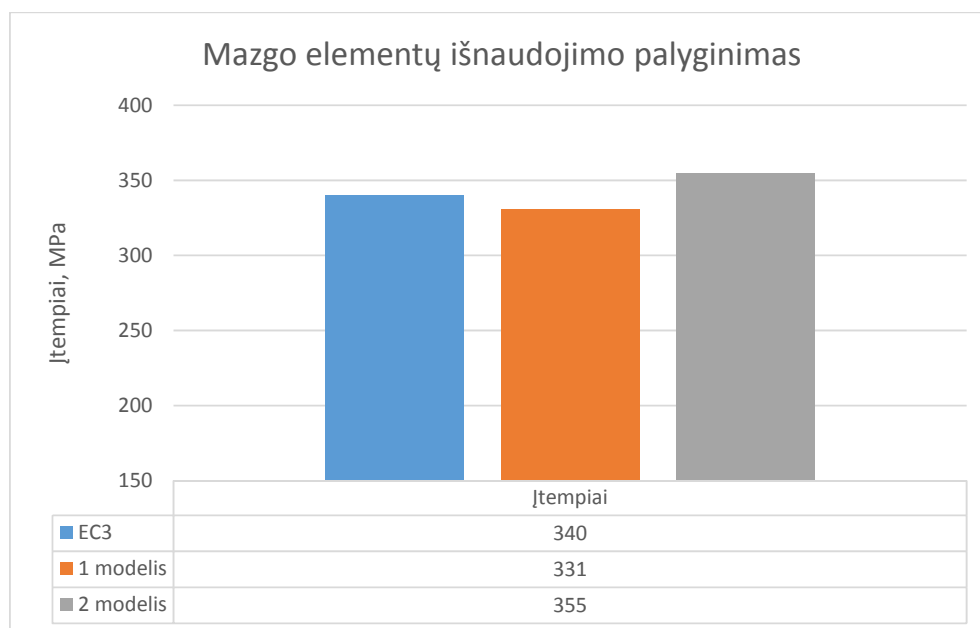
Atlikus visus analizuojamo konstrukcinio mazgo analitinius skaičiavimus bei atlikus mazgo analizę skaitiniais metodais buvo atlikti šie tyrimai:

- Atlikti mazgo stiprumo skaičiavimai pagal Eurokode 3 (EN 1993-1-8:2005) pateikiamą metodiką, rezultatai gaunami sudarius skaičiavimų algoritmą programa *VCmaster*;
- Atlikti mazgo nuovargio analitiniai skaičiavimai pagal Eurokode 3 (EN 1993-1-9:2005) pateikiamą metodiką, rezultatai gaunami sudarius skaičiavimų algoritmą programa *VCmaster*;
- Pirmame baigtinių elementų modelyje buvo tikrinami siūlėje veikiantys įtempiai, kai prijungiama sija modeliuojama viso skerspjūvio;
- Antrame baigtinių elementų modelyje buvo tikrinami siūlėje veikiantys įtempiai, kai prie kolonos yra prijungiama tik plokštelė, kuri reprezentuoja prijungiamos sijos lentyną.

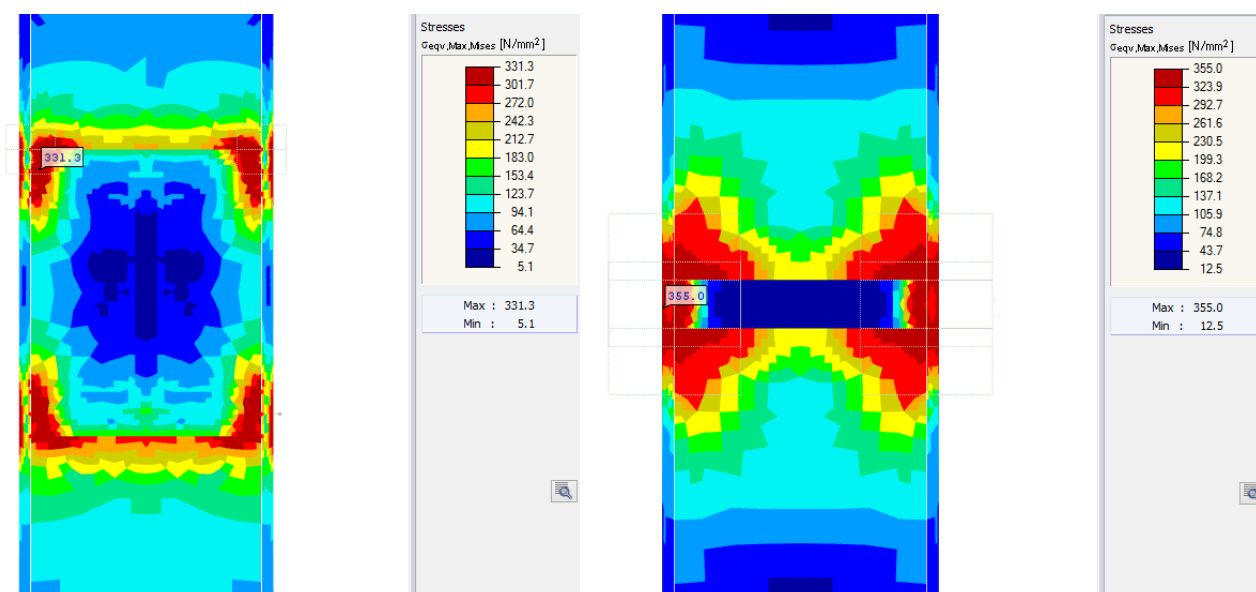
Pirmame baigtinių elementų modelyje prijungiama sija yra apkraunama išskirstyta apkrova, kuri veikia sijos sienelę. Antrajame baigtinių elementų modelyje plokštelė bus apkraunama ašine jėga, šiuo atveju tempimu, kuris yra apskaičiuotas iš siją veikiančio lenkimo momento. Visos apkrovos yra priimanos vienodos, kaip ir analitiniuose skaičiavimuose. Abiejuose baigtinių elementų modeliuose yra sudaromi du apkrovimo deriniai: veikianti apkrova, tikrinant saugos ribinį būvį ir veikianti apkrova tikrinant konstrukcinio mazgo varginamąjį patvarumą. Taškas, kuriame yra tikrinami virintinę siūlę veikiantys įtempiai yra ketvirčiu ilgio nutolęs nuo virintinės siūlės krašto bei yra virintinės siūlės modeliuojamo paviršiaus viduryje. Šiame taške gauti įtempiai yra priimami lygūs virintinę siūlę veikiantiems įtempiams. Taip siekiama gauti vidutinius įtempius veikiančius virintinę siūlę.

5.1. Mazgo laikomoji galia

Mazgo laikomoji galia baigiamajame darbe buvo apskaičiuota remiantis Eurokodu 3 (EN 1993-1-8:2006). Buvo patikrinta elementų laikomoji galia mazgo vietoje bei patikrinta virintinė siūlė, jungianti viršutinę sijos lentyną su kolona. Patikrinus mazgą pagal elementų galios skaičiavimus mazgo vietoje, buvo gautas išnaudojimas 0,96. Šis išnaudojimas gali būti paverčiamas veikiančiais įtempiais bei palygintas su skaitinio modeliavimo metu gautais rezultatais. Palyginimas pateikiamas 5.1 - 5.2 pav.



5.1 pav. Mazgo elementų išnaudojimų palyginimų diagrama

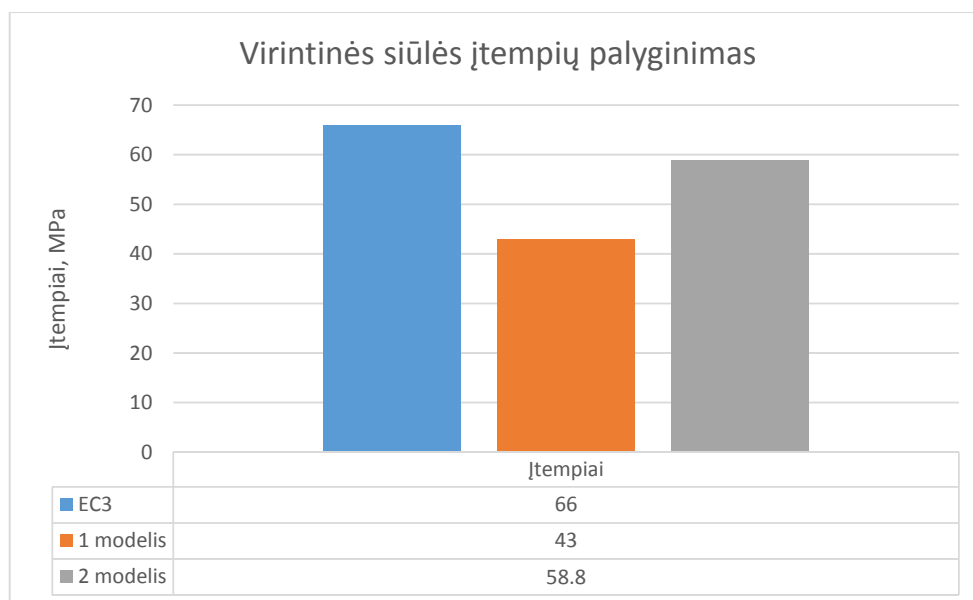


5.2 pav. Kolonos elementą veikiantys įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju

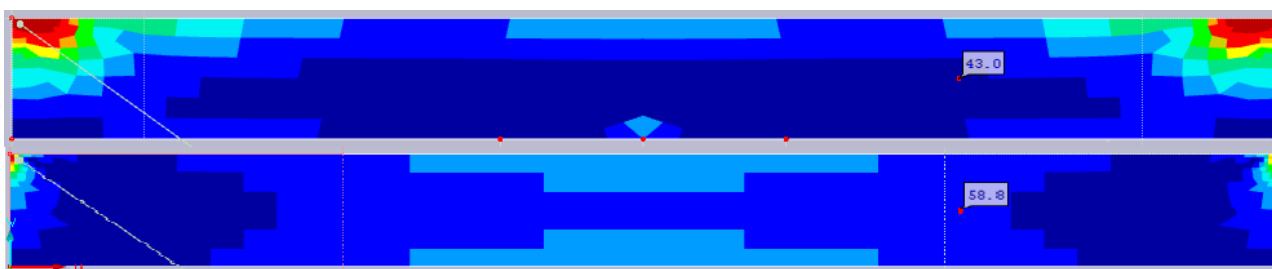
1 modelyje gauti rezultatai beveik nesiskiria nuo rezultatų apskaičiuotų analitiškai, skirtumas ~3 %. 2 modelyje įtempiai yra 4 % didesnis už analitinius rezultatus ir yra lygūs 355 MPa. Abiem atvejais, įtempių pasiskirstymas yra simetrinis bei pastebima, kad didžiausi įtempiai veikiantys kolonos skerspjūvį susidaro ties virintinės siūlės kampais. Būtent per šias vietas apkrova yra perduodama į kolonos skerspjūvio sienelės.

Atlikus analitinius skaičiavimus, pagal veikiančias apkrovas, buvo apskaičiuoti veikiantys įtempiai suprojektuotoje virintinėje siūlėje. Šie įtempiai yra pagrindinis šio baigiamojo darbo aspektas. Per šią

virintinę siūlę yra perduodamos visos jėgos į koloną, be to, ji yra tempiama, šiai suirus – mazgas suirtų. Analitiškai apskaičiuotų ir skaitiniame modelyje gautų įtempių rezultatai yra pateikiami 5.3 – 5.4 pav.



5.3 pav. Virintinės siūlės įtempių palyginimų diagrama



5.4 pav. Virintinę siūlę veikiantys įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju.

Įtempių grafinis pasiskirstymas 1 modelio atveju pastebima įtempių koncentraciją ties virintinės siūlės kraštais. Šie atsiranda, kadangi per šią vietą yra perduodama apkrova į kolonos sienelę. Įtempiai nuo krašto link siūlės vidurio pradeda mažėti bei tampa tolygus ties siūlės ketvirčiu. Nuo siūlės ketvirčio link virintinės siūlės vidurio kiek padidėja. Tai galima paaiškinti dėl apkrovos pridėjimo pobūdžio ant prijungiamos sijos. Vidutiniai siūlės įtempiai yra 35 % mažesni už įtempius apskaičiuotus pagal Eurokodą 3. 2 modelio atveju, taip pat yra pastebima įtempių koncentracija ties virintinės siūlės kampais, per kuriuos yra perduodama apkrova į koloną. Įtempiai virintinėje siūlėje yra pasiskirstę tolygiau, tik ties virintinės siūlės vidurio viršutiniu ir apatiniu kraštu įtempiai padidėja. Vidutiniai siūlės įtempiai yra 11 % mažesni už įtempius gautus analitinio skaičiavimo metu.

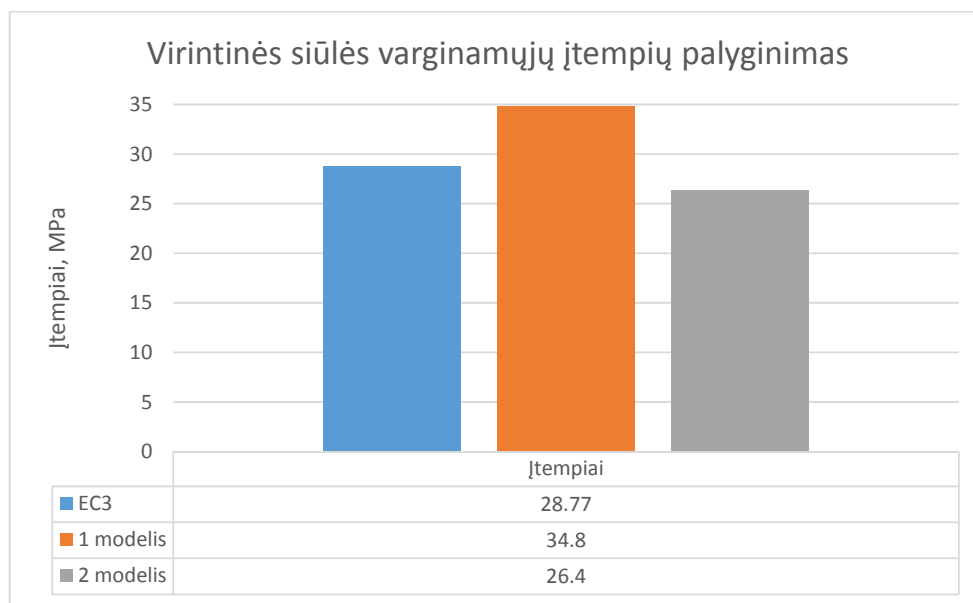
Remiantis gautais rezultatais, modeliuojant atskirą plokštelę ir pridant veikiančią ašinę jėgą, rezultatai yra panašesni su analitiniais siūlės skaičiavimais. Be to, 2-ojo modelio sudarymas yra greitesnis, baigtinių elementų skaičius modelyje yra mažesnis bei skaičiavimo trukmė yra trumpesnė.

5.2. Mazgo varginamoji laikomoji galia

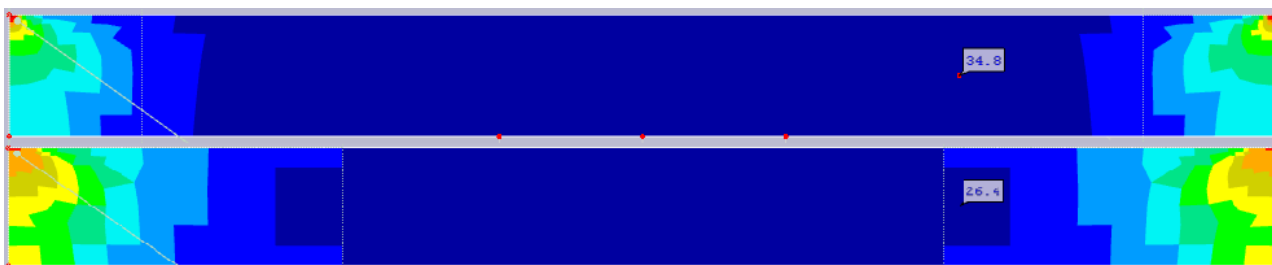
Virintinio mazgo nuovargio patikra buvo atlikta remiantis Eurokode 3 (EN 1993-1-9:2006) pateikiama metodika. Remiantis šia metodika, norint patikrinti šio mazgo varginamąjį patvarumą, reikėjo analitiškai apskaičiuoti šiuos elementus veikiančius įtempius:

- Virintinė siūlės;
- Jungiamosios plokštelės įtempius ties virintine siūle.

Tikrinant varginamuosius įtempius virintinėje siūlėje, yra patikrinama, ar varginamieji plyšiai nesusidarys būtent virintinėje siūlėje. Šie plyšiai, kaip jau minėta 1.3 skyriuje, yra patys pavojingiausi, kadangi jie yra pastebimi, tik tuomet, kai plyšys jau būna prasiskverbęs per visą siūlės storį. Atlikus virintinės siūlės veikiančių įtempių, nuo varginamųjų apkrovų, analitinius skaičiavimus, rezultatai buvo palyginti su abiejų skaitinių modelių gautais rezultatais. Jie yra pateikiami grafiškai 5.5 – 5.6 pav.



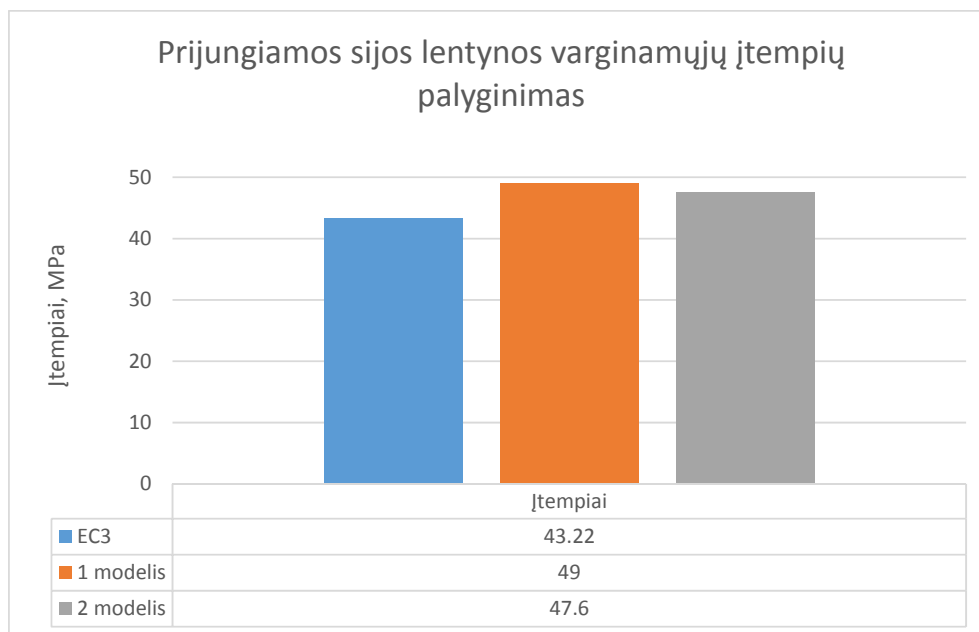
5.5 pav. Virintinės siūlės varginamųjų įtempių palyginimų diagrama



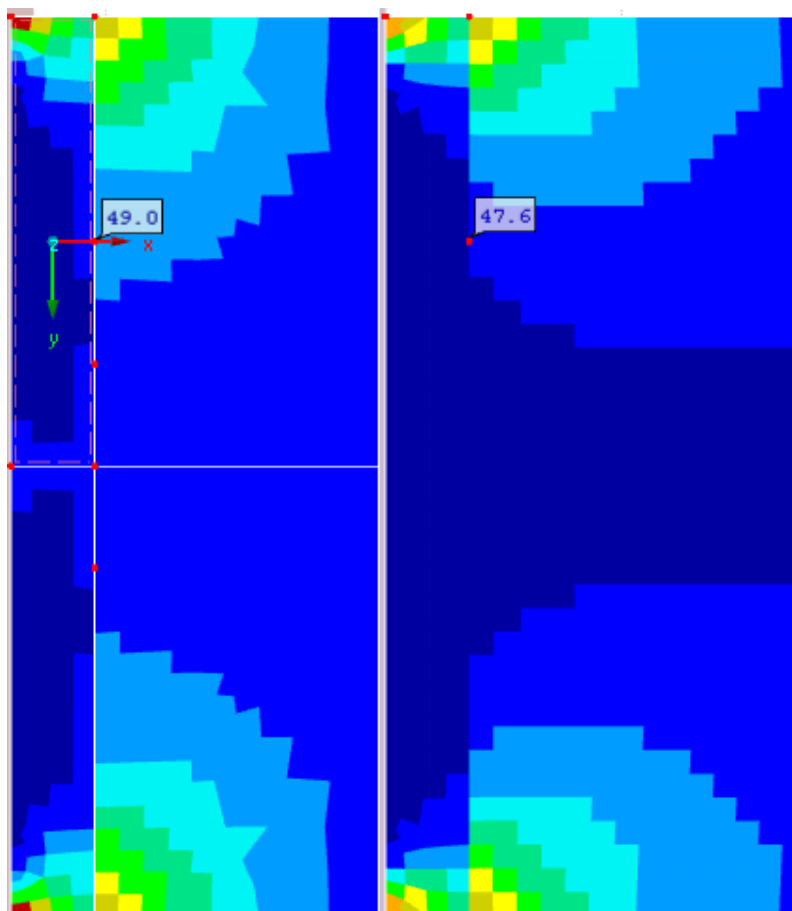
5.6 pav. Virintinę siūlę veikiantys, varginamieji įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju.

Iš įtempių grafinio pasiskirstymo matyti, kad abiejų modelių atveju, virintinės siūlės kampuose yra pastebima įtempių koncentracija. 1 modelio atveju, vidutiniai virintinės siūlės įtempiai yra didesni ir skiriasi 20 % nuo analitiškai apskaičiuotų įtempių. Įtempiai siūlėje yra pasiskirstę tolygiai, tik ties kraštais pradeda didėti. 2 modelio atveju, vidutiniai virintinę siūlę veikiantys įtempiai yra mažesni už analitiškai apskaičiuotus įtempius ir skiriasi tik 8 %. Įtempių pasiskirstymas šiuo atveju irgi yra tolygus, tik pradeda didėti link virintinės siūlės krašto. Galima daryti išvadą, kad modeliuojant analizuojamą mazgą 2 modelio principu, vidutiniai virintinę siūlę veikiantys varginamieji įtempiai yra artimesni analitinio skaičiavimo rezultatams.

Tikrinant įtempius plokštelėje prieš pat virintinę siūlę, yra patikrinama ar nuovargio plyšys nesusidarys prijungiamame elemente. Apskaičiavus įtempius analitiškai, buvo gauta, kad plokštelę veikia 43,22 MPa. Atlikus skaitinę analizę, rezultatai yra pateikiami grafiškai 5.7 – 5.8 pav.



5.7 pav. Prijungiamos plokštelės varginamųjų įtempių palyginimų diagrama



5.8 pav. Sijos lentyną veikiantys varginamieji įtempiai: a) 1 modelio atveju; b) 2 modelio atveju.

Įtempių pasiskirstymas prijungiamoje sijos lentynoje, abiejų modelių atveju yra panašaus pobūdžio. Ties virintinės siūlės kampais, yra pastebima įtempių koncentracija. Įtempiai link plokštelės vidurio palaipsniui mažėja ir pasiskirsto tolygiai. 1 modelio atveju vidutiniai plokštelę veikiantys įtempiai yra 13 % didesni už įtempius apskaičiuotus atliekant analitinius skaičiavimus. 2 modelio atveju vidutiniai įtempiai yra artimesni analitiškai apskaičiuotiems įtampiems – didesni 10 %. Galima daryti išvadą, kad 2 modelio atveju, rezultatai yra gaunami artimesni analitiniams rezultatams.

5.3. Analizuojamo mazgo tyrimo išvados

Atlikus analizuojamo mazgo analitinių skaičiavimų ir skaitinės analizės tyrimą, galima daryti tokias išvadas:

- Pasirinktas baigtinių elementų tinklelio dydis duoda pakankamai artimus rezultatus lyginant su analitinio skaičiavimo rezultatais;
- Elementų išnaudojimas visais atvejais yra labai panašus, didžiausias skirtumas iki 4 %, bet įtempiai neviršija plieno takumo ribos;

- Vidutiniai virintinės siūlės įtempiai atlikus skaitinę analizę buvo artimesni analitiniams rezultatams 2 modelio atveju. Šie skiriasi apie 11 %. 1 modelio atveju rezultatų skirtumas yra didesnis – 35 %;
- Vidutiniai varginamieji virintinės siūlės įtempiai 2 modelio atveju buvo artimesni analitiniams rezultatams, skiriasi 8 %, 1 modelio atvejų yra gaunamas 20 % skirtumas;
- Sijos lentyną veikiantys vidutiniai varginamieji įtempiai abiejų modelių atvejais skiriasi iki 13 %. 2 modelio atveju rezultatai yra artimesni analitiniams rezultatams;
- Atlikus gautų rezultatų tyrimą, galima teigti, kad 2 modelio tipas yra pranašesnis už 1 modelio tipą. Rezultatai yra pakankamai artimi analitiniam skaičiavimui, o modeliavimo bei skaičiavimo trukmė yra ženkliai mažesnė.

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

Baigiamajame darbe atlikti darbai

Baigiamajame darbe, pagal Eurokode 3 pateikiamą metodiką, buvo suprojektuotas gembinis, I tipo sijos ir RHS tipo kolonos virintinis mazgas. Suprojektavus mazgą pagal saugos ribinį būvį, buvo patikrinta mazgo laikomoji galia įvertinant konstrukcinio plieno nuovargį nuo pasikartojančių ciklinių apkrovų. Atlikti analitiniai skaičiavimai, atlikta konstrukcinio mazgo skaitinio modeliavimo analizė, gauti rezultatai palyginti su analitiniais skaičiavimais. Atlikus analizuojamo mazgo literatūros apžvalgą, skaitinės analizės metu buvo nuspręsta mazgą modeliuoti dviem atvejais: 1) kuomet yra modeliuojamas visas prijungiamos sijos skerspjūvis; 2) kuomet yra modeliuojama plokštelė, kurio geometrija yra lygi prijungiamos sijos lentynos geometrijai.

Išvados

1. Virintiniuose mazguose, kritinė vieta, kurioje labiausiai tikėtina, kad susidarys varginamieji įtrūkiai, yra virintinės siūlės.
2. Atlikus skaitinę analizę, nustatyta, kad kolonos skerspjūvio išnaudojimas nuo analitiškai apskaičiuoto skiriasi nuo 3 iki 4 %. Galima daryti išvadą, kad tiek visos sijos modeliavimas, tiek sijos suskaidymas į plokšteles, duoda patikimus rezultatus.
3. Vidutiniai virintinę siūlę veikiantys įtempiai nuo analitiškai apskaičiuotų įtempių, kuomet buvo modeliuojamas visas sijos skerspjūvis, skyrėsi nuo 20 iki 35 %, modeliuojant tik plokštelę – nuo 8 iki 11 %.
4. Atlikus skaitinį modeliavimą bei palyginus gautus rezultatus su analitiniais skaičiavimais, galima teigti, kad skaitinis modelis, kai modeliuojama tik prijungiama sijos plokštelė, pateikia pakankamai tikslus rezultatus bei ženkliai sumažina skaičiavimo trukmę.
5. Atlikus skaitinį modeliavimą bei palyginus gautus rezultatus su analitiniais skaičiavimais, galima teigti, kad pasirinktas virintinės siūlės modeliavimas plokštuminiais (*shell*) elementais, duoda patikimus rezultatus bei sumažina skaičiavimo trukmę, palyginus su erdviniais (*solid*) tipo baigtiniais elementais.
6. Pagal Eurokode 3 pateikiamą metodiką, atskaitinis nagrinėjamo mazgo patvarumas yra 2 milijonai apkrovimo ciklų, pagal saugos ribinio būvio apkrovas suprojektuotas konstrukcinis mazgas atlaiko 79 % šio kiekio – 1,59 mln. ciklų. Konstrukcinio mazgo varginamoji patikra, kai mazgas yra apkrautas pasikartojančiomis ciklinėmis apkrovomis, gavus tyrimo rezultatus, yra būtina. Eurokode 3 pateikiama, konservatyvi, virintinių mazgų nuovargio patikra, nereikalauja detalių skaitinių modelių ar įtempių tyrimų, todėl ja gana paprasta naudotis, esant tipiniams mazgams bei pastovios amplitudės ciklinėms apkrovomis. Bet atlikus šią patikrą, projektuotojas

bus užtikrintas, kad esant normaliomis konstrukcijos naudojimosi sąlygomis, mazguose neatsiras varginamieji plieno įtrūkiai, o tai gali užkirsti kelią pastato ar konstrukcijos irėčiai.

Būsimų tyrimų uždaviniai

Šiame baigiamajame darbe konstrukcinio mazgo nuovargio patikra buvo atliekama pagal paprasčiausią, konservatyvią, įtempių patikrą, pateikiamą Eurokode 3. Atlikus tyrimą, buvo apsvarstyti galimi, ateities tyrimo tikslai:

1. Atlikti realaus analizuojamo konstrukcinio mazgo nuovargio bandymus;
2. Atlikti analizuojamo mazgo nuovargio patikrą geometrinių (židinių) įtempių metodu, kuriame įtempiai apskaičiuojami skaitiniu modeliavimu;
3. Palyginti gautus praktinio bandymo, normalinių įtempių metodo bei geometrinių (židinių) įtempių metodo rezultatus.

LITERATŪRA

- Barauskas R.; Belevičius R.; Kačianauskas R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Technika, Vilnius. 612 p.
- Fricke W. 2012. *IIW Guideline for the assessment of weld root fatigue*. Germany. 57p.
- Hobbacher A. 2009. *Recommendations for fatigue design of welded joints and components*. IIW doc. 1823-07, Welding research council bulletin 520, New York.
- Kurobane Y.; Packer J.A.; Wardenier J.; Yeomans N. 2004. *Design guide for structural hollow section column connections*. Germany. 215 p.
- LST EN 1990:2004. *Eurokodas. Konstrukcijų projektavimo pagrindai*. Vilnius, 2004.
- LST EN 1991-3:2006. *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms. 3 dalis. Kranų ir mašinų sukelti poveikiai*. Vilnius, 2006.
- LST EN 1993-1-2:2005+AC:2006 *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-2 dalis. Bendrosios taisyklės. Konstrukcijų elgsenos ugnyje skaičiavimas*. Vilnius, 2006.
- LST EN 1993-1-8:2005+AC:2006. *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-8 dalis. Mazgų projektavimas*. Vilnius, 2006.
- LST EN 1993-1-9:2005+AC:2006. *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-9 dalis. Nuovargis*. Vilnius, 2006.
- LST EN 1993-6:2007/NA:2010. *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 6 dalis. Kranus laikančios konstrukcijos*. Vilnius, 2010.
- Lu, L.H. 1997. *The static strength of I-beam to rectangular hollow section column connections*. Netherlands. 206 p.
- Nussbaumer A.; Borges L.; Davaine L. 2011. *Fatigue Design of Steel and Composite Structures*. Portugal. 311 p.
- Pakandam F. 2009. *Fatigue damage and life assessment of welded joints based on energy methods*: daktaro disertacija: taikomieji mokslai, mechanikos inžinerija. Ryerson universitetas. Torontas, Kanada.
- Serrano Lopez M.A.; Lopez-Colina C.; Gonzalez J.; Lopez-Gayarre F. 2016. *A Simplified FE Simulation of Welded I Beam-to-RHS Column Joints*. *International Journal of Steel Structures*. 16(4), p. 1095-1105.
- TGC 10, 2006. Hirt M., Bez R., Nussbaumer A. *Construction Metallique – Notions fondamentales et methods de dimensionnement*, PPUR Lausanne.
- Vainio H. 2000. *Design handbook for rautaruukki structural hollow sections*. Finland. 345 p.
- van der Vegte G.J.; Wardenier J.; Puthli R.S. 2010. *FE analysis for welded hollow-section joints and bolted joints*. *Structures and Buildings*. 427-437 p.
- Wardenier J.; Packer J.A.; Zhao X.-L.; van der Vegte G.J. 2010. *Hollow sections in structural applications*. Netherlands. 232 p.

Wardenier J. 2000. *Hollow sections in structural applications*. CIDECT.

Zhao X.-L.; Herion S.; Packer J. A.; Puthli R. S.; Sadlacek G.; Wardenier J.; Weynand K.; van Wingerde A. M.; Yeomans N. F. 2001. *Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading*. Germany. 121 p.

PRIEDAI