



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių konstrukcijų stiprio tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Dovilė Smulkaitė

Projekto autorė

Asist. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Panevėžys, 2026



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių konstrukcijų stiprio tyrimas

Baigiamasis magistro studijų projektas

Integruotas projektavimo ir statybos valdymas (6211EX076)

Dovilė Smulkaitė

Projekto autorė

Asist. dr. Dainius Vaičiulis

Vadovas

Recenzentas / Recenzentė

Panevėžys, 2026



Kauno technologijos universitetas

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

Dovilė Smulkaitė

Eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių konstrukcijų stiprio tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. ataskaitą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. ataskaitoje visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šios ataskaitos dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos ataskaitoje tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už ataskaitą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs(-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o ataskaita gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Dovilė Smulkaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas
Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

TVIRTINU
TVKC vadovė
Doc. dr. Nida Kvedaraitė

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Diplomantei **Dovilei Smulkaitei**

Baigiamojo projekto tema
(lietuvių kalba)

*EISMO REGULIAVIMO PRIEMONES LAIKANČIŲ PLIENINIŲ
KONSTRUKCIJŲ STIPRIO TYRIMAS*

Baigiamojo projekto tema
(anglų kalba)

*STRENGTH ANALYSIS OF STEEL STRUCTURES SUPPORTING
TRAFFIC CONTROL DEVICES*

Patvirtinta 2025 m. lapkričio 24 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-27

Parengto baigiamojo projekto įkėlimo į Moodle aplinką terminas iki 2026 m. sausio 5 d.

Duomenys, reikalavimai ir sąlygos baigiamajam projektui

*Ištirti ne mažiau kaip tris skirtingo tipo reguliavimo priemonės laikančiąsias plienines konstrukcijas.
Darbas turi būti atliktas laikantis KTU nustatytų magistriniam darbui keliamų reikalavimų.*

Baigiamojo projekto užduotys / uždaviniai, kurie turi būti atskleisti projekte

- 1. Išanalizuoti mokslinę literatūrą, kuri yra susijusi su plieninių konstrukcijų stiprio tyrimu.*
- 2. Sudaryti eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių konstrukcijų skaitinius modelius, taikant baigtinių elementų metodą.*
- 3. Ištirti pasirinktų tipų eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių konstrukcijų stiprius.*

Vadovas

asist. dr. Dainius Vaičiulis
(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

Užduotį gavau

Dovilė Smulkaitė
(studento vardas, pavardė, parašas)

2025 m. lapkričio 27 d.

Smulkaitė, Dovilė. Eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių konstrukcijų stiprio tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas asist. dr. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų kryptių grupė): statybos inžinerija, technologijos mokslai (inžinerijos mokslai).

Reikšminiai žodžiai: plieninės konstrukcijos, lengvos plieninės atramos, šviesoforų atramos, baigtinių elementų metodas, ribinių būvių analizė, elementų išnaudojimas.

Panevėžys, 2026. 57 p.

Santrauka

Darbe nagrinėjamos plieninės konstrukcijos, skirtos eismo reguliavimo priemonėms – šviesoforams ir su jais susijusiai įrangai – montuoti. Pagrindinis darbo tikslas – ištirti šių konstrukcijų stiprį ir įvertinti jų elementų skerspjūvių mažinimo galimybes, siekiant efektyvesnio medžiagų panaudojimo. Teorinėje dalyje apžvelgiama mokslinė ir techninė literatūra apie lengvas plienines konstrukcijas, jų naudojimą šviesoforų ir kelio ženklų atramoms, aptariami galiojantys Eurokodų ir Lietuvos statybos techninių reglamentų reikalavimai bei jų taikymo ypatumai projektuojant eismo reguliavimo priemonės laikančias konstrukcijas. Metodinėje dalyje aprašomas trijų tipų atramų – rėminės santvarinės, gembinės santvarinės ir cilindrinės-kūginės gembinės – skaitinis modeliavimas „Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021“ programoje, taikant baigtinių elementų metodą. Modeliuojant įvertinamas konstrukcijos ir montuojamos įrangos savasis svoris, vėjo ir apledėjimo apkrovos, sudaromi stiprumo ribinių būvių apkrovų deriniai pagal Eurokodų ir nacionalinių norminių dokumentų nuostatas. Tiriamojoje dalyje nustatyta, kad pradinių atramų variantų elementų skerspjūvių išnaudojimo koeficientai yra santykinai maži: rėminės santvarinės atramos vidutinis išnaudojimas siekia apie 7 %, gembinės santvarinės – apie 15 %, cilindrinės-kūginės gembinės atramos – apie 47 %, todėl konstrukcijos pasižymi didele saugos atsarga ir neefektyviu plieno panaudojimu. Taikant priartėjimo metodą parinkti mažesni atramų elementų skerspjūviai: rėminei ir gembinei santvarinei konstrukcijai sumažinti strypų skersmenys, cilindrinei-kūginei gembinei atramai sumažinti vamzdžių sienelių storiai. Po profilių keitimo vidutinis elementų išnaudojimo koeficientas rėminei santvarai padidėjo iki maždaug 18 %, gembinei – apie 28 %, cilindrinės-kūginės gembinės atramos – apie 60 %, o labiausiai apkrautų elementų išnaudojimo koeficientai priartėjo prie leistinos ribos, jos neviršydami. Gauti rezultatai rodo, kad racionaliai koreguojant atramų elementų skerspjūvius ir nekeičiant konstrukcijų topologijos galima reikšmingai sumažinti plieno sąnaudas ir išlaikyti reikalaujamą konstrukcijų patikimumą.

Smulkaitė, Dovilė. Strength analysis of steel structures supporting traffic control devices. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Dainius Vaičiulis; Panevėžys faculty of Technologies and Business, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Civil Engineering, Technology Sciences (Engineering Sciences).

Keywords: steel structures, lightweight steel supports, traffic signal masts, finite element method, limit state analysis, member utilisation.

Panevėžys, 2026. 57 p.

Summary

Steel structures designed for mounting traffic control devices – traffic lights and associated equipment – are analysed in this thesis. The main aim of the work is to investigate the strength of these structures and to assess the possibilities of reducing their member cross-sections in order to achieve more efficient use of material. The theoretical part reviews scientific and technical literature on lightweight steel structures, their application to traffic light and road sign supports, and discusses the relevant requirements of Eurocodes and Lithuanian technical regulations as well as their application to the design of structures supporting traffic control devices. The methodological part describes the numerical modelling of three types of supports – a frame truss, a cantilever truss and a cylindrical-conical cantilever – using the software Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021 and the Finite Element Method. The models take into account the self-weight of the structure and the mounted equipment, wind and ice loads, and Ultimate Limit State load combinations are formed in accordance with Eurocode provisions and national regulations. In the research part it is determined that the initial support configurations are characterised by relatively low member utilisation ratios: the average utilisation of the frame truss members is about 7 %, of the cantilever truss – about 15 %, and of the cylindrical-conical cantilever – about 47 %, which indicates a high safety reserve and inefficient use of steel. Using a trial-and-error approach, smaller cross-sections of the support members are selected: bar diameters are reduced in the frame and cantilever truss structures, and tube wall thicknesses are reduced in the cylindrical-conical cantilever. After changing the profiles, the average utilisation ratio of the frame truss members increases to approximately 18 %, of the cantilever truss – to about 28 %, and of the cylindrical-conical cantilever – to about 60 %, while the utilisation ratios of the most highly loaded members approach but do not exceed the allowable limit. The results show that by rationally adjusting the cross-sections of support members without changing the topology of the structures, it is possible to significantly reduce steel consumption while maintaining the required structural reliability.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas.....	11
Įvadas	12
1. Mokslinės literatūros analizė.....	14
1.1. Lengvų plieninių konstrukcijų panaudojimo apžvalga.....	14
1.1.1. Lengvų plieninių konstrukcijų sąvoka ir jų panaudojimo sritys	15
1.1.2. Plieninių konstrukcijų privalumai ir trūkumai	16
1.2. Normatyvinių reikalavimų analizė	17
1.2.1. Konstrukcijų stiprumo ir ilgaamžiškumo reikalavimai	18
1.3. Konstrukcijų mechaninės savybės ir jas veikiantys veiksniai	19
1.3.1. Lengvų plieninių konstrukcijų mechaninės savybės: lankstumas, tempimas, gniuždymas ..	20
1.3.2. Konstrukciją veikiantys veiksniai: nuolatinės ir kintamos apkrovos, vibracijos	21
1.3.3. Konstrukcijų ilgaamžiškumą veikiantys aplinkos veiksniai.....	22
2. Tyrimo metodika	23
2.1. Apkrovos ir apkrovų deriniai.....	23
2.2. Tyrimo prielaidos	25
3. Tiriamoji dalis.....	26
3.1. Tiriamieji modeliai	26
3.2. Elementų išnaudojimas.....	42
3.3. Elementų išnaudojimo didinimas	45
Išvados	53
Literatūros sąrašas	54

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Lengvų plieninių konstrukcijų pranašumai lyginant su karštai valcuoto plieno konstrukcijomis [16].....	17
2 lentelė . Lengvų plieninių konstrukcijų pranašumai lyginant su betono konstrukcijomis [11]	17
3 lentelė. Plieninių konstrukcijų atsparumą laipsniškam griuvimui lemiantys veiksniai [23].....	19
4 lentelė. Plieno ir medžio mechaninės savybės [28]	21
5 lentelė. Vėjo apkrovos rėminei santvarinei konstrukcijai	30
6 lentelė. Vėjo apkrovos gembinei santvarinei konstrukcijai	30
7 lentelė. Vėjo apkrovos gembinei santvarinei konstrukcijai	31
8 lentelė. Apkrovų derinių sąrašas	33
9 lentelė. Rėminės santvarinės elementų vidinės jėgos	34
10 lentelė. Gembinės santvarinės elementų vidinės jėgos	36
11 lentelė. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinės jėgos.....	38
12 lentelė. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 22 mm ir 40 mm, išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės	42
13 lentelė. Gembinės santvarinės konstrukcijos išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės.....	43
14 lentelė. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės.....	44
15 lentelė. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm, išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės	46
16 lentelė. Gembinės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 14 mm ir 28 mm, išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės	48
17 lentelė. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos, kurios sienelių storiai kinta nuo 3 mm iki 5 mm, išnaudojimo rodiklių reikšmės.....	50

Paveikslų sąrašas

1 pav. Pirmasis oficialus šviesoforas pasaulyje [8].....	14
2 pav. Lengvos plieninės konstrukcijos šviesoforams ir su jais susijusiems įrenginiams montuoti, pasaulyje ir Lietuvoje: a) Panevėžys (Lietuva); b) „Intertraffic“ paroda Amsterdame (Nyderlandai); c) Turinas (Italija), d) Bradfordas (Jungtinė Karalystė), e) Panevėžys (Lietuva) [9].....	15
3 pav. Medinio stogo konstrukcija [13]	16
4 pav. Lengvo plieno stogo konstrukcija [13].....	16
5 pav. Apkrovos palyginimas su 2 mm ir 3 mm storio medžiaga.....	20
6 pav. Rėminė santvarinė konstrukcija	26
7 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos izometrija	26
8 pav. Gembinė santvarinė konstrukcija	27
9 pav. Gembinės santvarinės konstrukcijos izometrija	27
10 pav. Cilindrinė gembinė atrama	28
11 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu (vėjo, sniego ir apledėjimo apkrovos sąlyginai nepavaizduotos)	28
12 pav. Gembinės santvarinės konstrukcijos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu (vėjo, sniego ir apledėjimo apkrovos sąlyginai nepavaizduotos)	29
13 pav. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu (vėjo, sniego ir apledėjimo apkrovos sąlyginai nepavaizduotos)	29
14 pav. Apledėjimo apkrovos pasiskirstymo pobūdis ant rėminės santvarinės konstrukcijos	32
15 pav. Apledėjimo apkrovos pasiskirstymo pobūdis ant gembinės santvarinės konstrukcijos.....	32
16 pav. Apledėjimo apkrovos pasiskirstymo pobūdis ant cilindrinės-kūginės gembinės atramos ...	33
17 pav. Elemento vietinės koordinačių sistomos ašių kryptys.....	34
18 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių jėgų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių	35
19 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių	35
20 pav. Gembinės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių	37
21 pav. Gembinės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių	37
22 pav. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinių jėgų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių	39
23 pav. . Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių	39
24 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas rėminei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 22 mm ir 40 mm	40
25 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas gembinei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 22 mm ir 40 mm	41
26 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas cilindrinei-kūginei gembinei atramai, kurios sienelės storis yra 7 mm	41
27 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios skerspjūviai yra $\varnothing 22$ mm ir $\varnothing 40$ mm, išnaudojimo koeficientai	43
28 pav. Gembinės santvarinės konstrukcijos išnaudojimo rodiklių vidurkiai	44

29 pav. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos, kurios sienelės storis 7 mm, išnaudojimo koeficientai	45
30 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm, išnaudojimo koeficientai	47
31 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas rėminei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm	48
32 pav. Gembinės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 14 mm ir 28 mm, išnaudojimo koeficientai	49
33 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas rėminei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm	50
34 pav. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos, kurios sienelės storis kinta nuo 3mm iki 5 mm, išnaudojimo koeficientai.....	51
35 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas cilindrinei-kūginei gembinei atramai, kurios sienelės storis kinta nuo 3mm iki 5 mm.....	51

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ŠVS – šviesoforas;

LSF – lengvos plieninės konstrukcijos (angl. *Light Weight Steel*).

SRB – saugos ribinis būvis (angl. SLS – *Ultimate Limit State*).

TRB – tinkamumo ribinis būvis (angl. SLS – *Serviceability Limit State*).

BEM – baigtinių elementų metodas (angl. FEM – *Finite Element Modelling*).

Terminai:

Plonasienės konstrukcijos – plieninės ar gelžbetoninės konstrukcijos, kurios sudarytos iš šaltai suformuotų elementų [11, 12].

Dinaminis stiprinimo koeficientas – koeficientas, kuris naudojamas apibūdinti kaip dinaminės apkrovos padidina struktūrinę reakciją, lyginant su statine apkrova [17].

Legiruotas plienas – be geležies ir esamų priemaišų pagamintas plienas, papildytas priedais, kurie pakeičia plieno sandarą, savybes ir terminio apdirbimo sąlygas [25].

Ivadas

Sparčiai augant miestams, plečiantis jų infrastruktūrai, plečiantis miestų ir (arba) kitų teritorijų susisiekimo komunikacijoms (keliams, gatvėms) svarbu diegti patikimus, ilgaamžiškus bei tvarius sprendinius. Vienas iš tokių sprendinių – lengvų plieninių konstrukcijų panaudojimas, įgyvendinant įvairius susisiekimo komunikacijų projektus, įskaitant šviesoforų ir su jais susijusių įrenginių montavimą. Lengvų plieninių konstrukcijų panaudojimas leidžia sumažinti gamybos sąnaudas, vizualinę taršą urbanizuotose teritorijose, palengvina tokių konstrukcijų montavimo darbų procesą. Optimizuojant lengvų plieno konstrukcijų svorį, sumažinant medžiagų sąnaudas, užtikrinant šių konstrukcijų atsparumą galimiems aplinkos ir mechaniniams poveikiams atsiranda naujos galimybės susisiekimo komunikacijų infrastruktūros plėtrai.

Statybos sektoriuje naudojamoms lengvoms plieninėms konstrukcijoms yra taikomi normatyviniai reikalavimai, tačiau konstrukcijoms, skirtoms šviesoforams ir su jais susijusiems įrenginiams montuoti, nėra patvirtintų, galiojančių norminių dokumentų, reglamentuojančių tokių konstrukcijų projektavimą, montavimą; tai yra nėra nustatyta, kuo vadovaujantis turėtų būti projektuojamos ir gaminamos lengvos plieninės konstrukcijos, skirtos šviesoforams ir su jais susijusiems įrenginiams montuoti. Atsižvelgiant į aukščiau nurodytą aplinkybę, projektuotojui kyla rizika netinkamai apskaičiuoti arba visai neįvertinti tokių konstrukcijų nuolatinių ir kintamų (vėjo, apledėjimo) apkrovų poveikio, kas gali sukelti avarines situacijas ar papildomas išlaidas šių konstrukcijų eksploatacijai.

Siekiant užtikrinti ekonominį ir techninį lengvų plieninių konstrukcijų efektyvumą, reikia atlikti išsamų tyrimą, įvertinant šių konstrukcijų stiprumo charakteristikas, užtikrinant jų patikimumą, ilgaamžiškumą ir saugos reikalavimų aplinkai atitikimą, atsižvelgiant ir į tokių konstrukcijų eksploataciją, veikiant įvairioms klimato sąlygoms, sukeliančioms konstrukcijų koroziją, galimus mechaninius pažeidimus, deformacijas.

Tyrimo objektas – eismo reguliavimo priemonės laikančios plieninės konstrukcijos.

Tikslas – ištirti eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių konstrukcijų stiprį.

Uždaviniai:

1. Išanalizuoti mokslinę ir techninę literatūrą apie plienines konstrukcijas, naudojamas eismo reguliavimo priemonių ir su jomis susijusios įrangos montavimui, įvertinant taikomus normatyvinius reikalavimus ir apkrovų rūšis.
2. Sukurti trijų tipų eismo reguliavimo priemonės laikančių plieninių atramų (rėminės santvarinės, gembinės santvarinės ir cilindrinės-kūginės gembinės atramos) skaitinius modelius „Autodesk Robot Structural Analysis 2021“ programoje, taikant baigtinių elementų metodą ir Eurokodų reikalavimus.
3. Atlikti sudarytų konstrukcijų skaitinę analizę: nustatyti vidaus jėgas, įtempius, sudarant SRB apkrovų derinius ir įvertinant vėjo bei apledėjimo poveikį.
4. Įvertinti atramų elementų skerspjūvių išnaudojimo koeficientus pirminiuose konstrukcijų variantuose ir nustatyti labiausiai neefektyviai išnaudojamus elementus.
5. Mažinti pasirinktų konstrukcijos elementų skerspjūvius (keičiant profilių skersmenis ir vamzdžių sienelių storius), siekiant padidinti elementų išnaudojimo koeficientus ir sumažinti konstrukcijų masę, kartu užtikrinant stiprumo ir standumo reikalavimų tenkinimą, bei pateikti rekomendacijas racionaliam tokių atramų projektavimui.

Tyrimo metodai – mokslinės ir techninės literatūros analizė, baigtinių elementų metodas (BEM), ribinių būvių analizė (ULS).

Autoriaus publikuotų straipsnių bibliografinis sąrašas:

Smulkaitė, Dovilė. Šviesoforų atramų standžio tyrimas // Technologijų ir verslo aktualijos – 2025: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2025 m. lapkričio 21 d. / Kauno technologijos universiteto Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas. Kaunas: Kauno technologijos universitetas.

Autoriaus konferencijose skaityti pranešimai:

Smulkaitė, Dovilė. Šviesoforų atramų standžio tyrimas. Technologijų ir verslo aktualijos – 2025: studentų mokslinių darbų konferencijos pranešimų medžiaga, Lietuva, Panevėžys, 2025 m. lapkričio 21 d.

1. Mokslinės literatūros analizė

Statybose plienas naudojamas jau daugiau kaip šimtmetį, vieni pirmųjų objektų, kuriose naudojamas plienas – geležinkelio tiltai, kuriems sukonstruoti panaudota kaitinė geležis. Kowalio ir Szala [1] atliktas tyrimas apie ankstyvasias plienines konstrukcijas leidžia teigti, kad jos pasižymi geresnėmis mechaninėmis savybėmis nei šiuolaikinis plienas. Šio tyrimo istorinė perspektyva pažymi plieno, kaip statybinės medžiagos, ilgaamžiškumą ir lankstų pritaikymą skirtingose konstrukcijose. Pasitelkiant naujas technologijas, pradėtos gaminti lengvos plieninės konstrukcijos reikšmingai paveikia statybos sektorių. Pradžioje naudotos tik mažos apimties statiniam, plieninės konstrukcijos netruko išpopuliarėti dėl savo lengvos konstrukcijos, mažesnių medžiagų sąnaudų, lengvo montavimo, stiprumo bei atsparumo seisminiam aktyvumui [2].

1.1. Lengvų plieninių konstrukcijų panaudojimo apžvalga

Soodas [3] savo knygoje nagrinėja pagrindinius plieninių konstrukcijų projektavimo, gamybos ir montavimo principus, geležinkeliams. Autorius aptaria pagrindines plieno savybes, tipus ir panaudojimo būdus ne tik geležinkelių konstrukcijoms bet ir tiltams. Pasak mokslininko „*šiomis dienomis plienas naudojamas įvairioms reikmėms [...], tačiau jo pradinis panaudojimo tikslas buvo tiltams statyti*“ [3 p. 2]. Pramonei besivystant pradėta plieną maišyti su chromu. Nors chromuotas plienas jau buvo naudojamas nuo XIX a. pabaigos, tačiau tik XX a. pradžioje metalurgas H. Brearleyis pirmasis, kuris panaudojo nerūdijantį plieną komercinėse projektuose ir pagamino stalo įrankius [4].

Lengvų plieninių konstrukcijų masinė gamyba prasidėjo apie XIX a. vidurį, kuomet plienas sparčiai populiarėjo kaip statybinė medžiaga, pakeitusi medines konstrukcijas [5].

Pirmasis šviesoforas įrengtas dar 1868 m. Londone, Parlamento aikštėje [6]. Galima teigti, kad jis buvo sumontuotas ant medinės kolonos [7]. Šiam pirmajam šviesoforui susprogus kito teko laukti beveik pusamžį, kol pasaulyje pradėta naudoti elektra [6]. XX a. pradžioje keliuose daugėjo automobilių, todėl amerikietis policininkas Wireas sukūrė medinį šviesoforo prototipą, kurį sumontavo ant stulpo, o praėjus dar dvejiems metams pasaulyje įrengtas pirmasis oficialus šviesoforas (žr. 1 pav.) [8].



1 pav. Pirmasis oficialus šviesoforas pasaulyje [8]

Kadangi informacijos apie konstrukcijas, kurios naudotos pirmiesiems šviesoforams gaminti, nėra, apie jas galima spręsti tik iš internete randamų nuotraukų ar paveikslų [8]. Atsižvelgiant į prieinamą vizualinę informaciją ir istorines žinias numanoma, kad pirmieji šviesoforai buvo montuojami ant ketaus ar plieninių konstrukcijų.

Šiuolaikiniame pasaulyje, taip pat ir Lietuvoje, galima rasti įvairias konstrukcijų, kurios naudojamos šviesoforams ir su jais susijusiems įrenginiams montuoti, variacijas: viengtubė, gembinė atrama, santvarinė konstrukcija (žr. 2 pav.).



2 pav. Lengvos plieninės konstrukcijos šviesoforams ir su jais susijusiems įrenginiams montuoti, pasaulyje ir Lietuvoje: a) Panevėžys (Lietuva); b) „Intertraffic“ paroda Amsterdame (Nyderlandai); c) Turinas (Italija), d) Bradfordas (Jungtinė Karalystė), e) Panevėžys (Lietuva) [9]

Dauguma šių konstrukcijų, priešingai nei XX a. – lengvos plieninės konstrukcijos.

1.1.1. Lengvų plieninių konstrukcijų sąvoka ir jų panaudojimo sritys

Lengvos plieninės konstrukcijos arba plonasienės konstrukcijos apibūdinamos, kaip šaltai suformuotos konstrukcijos, kurių sienelės storis svyruoja nuo 0,378 mm iki 6,35 mm [10]. Kiti mokslininkai apibūdina, kad lengvos plieninės konstrukcijos yra taip pat šaltai valcuotas cinkuotas plienas, tačiau sienelės storis svyruoja nuo 0,5 mm iki 3 mm [11].

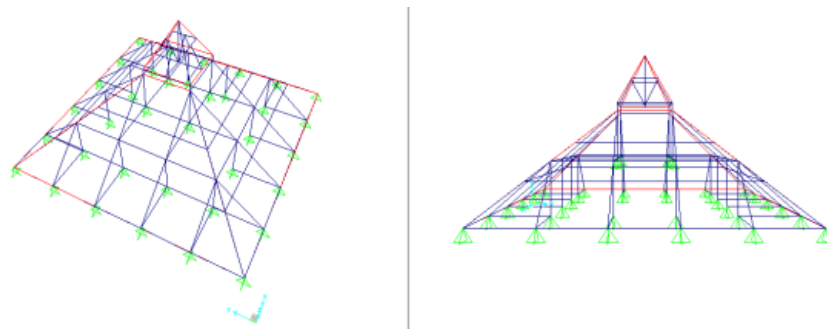
Statybose naudojamos gelžbetoninės ar karštai valcuoto plieno konstrukcijos yra neefektyvios, kadangi gamyba reikalauja daug laiko ir didelių gamybos sąnaudų. Taip pat tokioms konstrukcijoms įrengti reikalinga didesnė darbo jėga nei montuojant lengvas plienines konstrukcijas [11]. Šios konstrukcijos pamėgtos statybų sektoriuje dėl jų formų įvairovės, prieinamos kainos ir lengvo

montavimo. Jos plačiai naudojamos gyvenamųjų, komercinių ar pramoninių namų statyboje, dėl lengvo svorio, lyginant su gelžbetonu, kas palengvina bei pagreitina montavimo ir įrengimo procesus.

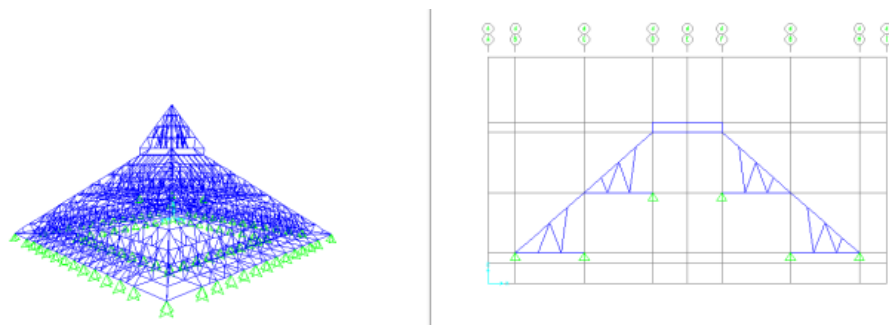
Pasaulinės nelaimės, tokios kaip karas, epidemijos ar pražūtingos gamtos stichijos dažnu atveju paskatina mokslininkus kurti naujas technologijas ar medžiagas. Gatheeshgaras kartu su kolegomis [12] tyrė nebrangių modulinį pastatų, pagamintų iš lengvų plieninių konstrukcijų, skirtų ekstremalioms situacijoms, tokioms kaip COVID-19 epidemija, statybą. Šie pastatai yra lengvai transportuojami, gali patenkinti skubius infrastruktūros poreikius, nesukelia didelių trikdžių statybvietėje bei yra ekonomiškesni už tradicinės statybos metodus esant ekstremaliai situacijai. Tyrime nustatyta, kad optimizavus šaltai formuoto plieno (angl. *Cold Formed Steel*, CFS) sijas yra sumažinamas svoris, nesumažinant konstrukcijos stiprumo. Taip pat panaudojant optimizuotus sigmos lankstinių profilius, konstrukcijos svorį galima sumažinti iki 24 proc.

1.1.2. Plieninių konstrukcijų privalumai ir trūkumai

Plieninės konstrukcijos išpopuliarėjo ir tapo viena iš pagrindinių medžiagų, naudojamų statybos pramonėje. Ypatingai lengvos plieninės konstrukcijos, kurios pasižymi didesniu stiprumo ir svorio santykiu nei paprastos plieninės konstrukcijos, todėl jos yra patrauklesnis pasirinkimas tokiems projektams, kuriuose svarbu sumažinti transportavimo ir montavimo išlaidas [10]. Putris [13] atliko tyrimą, kuriame palygino medinio ir lengvų plieninių konstrukcijų stogo įrengimo išlaidas. Pateikiama tyrinėjamo medinio ir lengvų plieninių konstrukcijų stogo vizualizacija (žr. 3 pav. ir 4 pav.)



3 pav. Medinio stogo konstrukcija [13]



4 pav. Lengvo plieno stogo konstrukcija [13]

Atlikto tyrimo rezultatai pabrėžia, kad lengvo plieno stogo konstrukcijos yra 17,93 proc. pigesnės ir 25,11 proc. lengvesnės nei medinio stogo konstrukcijos.

Bakare [14] savo darbe apžvelgė lengvų plieninių konstrukcijų, naudojamų sienoms, pranašumus ir trūkumus palyginti su surenkamo betono konstrukcijomis. Pagrindiniu privalumu išskirtas lengvas konstrukcijų svoris, kuris yra tris kartus mažesnis už betoninę ir penkis kartus mažesnis už plytų sieną. Manimaran [15] atliktame tyrime nustatyta, kad šalto formavimo plieno profilis, kurio storis yra 1,00 mm, gali išlaikyti galutinę apkrovą siekiančią 56,38 kN. Taip pat Fango ir kolegų [2] atliktas tyrimas apie žemės drebėjimams atsparias plienines konstrukcijas, parodė, kad jos gali būti projektuojamos su specialiais elementais, kurie yra lengvai keičiami atsiradus pažeidimai dėl žemės drebėjimų ar kitų aplinkos veiksnių. Pritaikant šią praktiką yra sumažinamas remonto laikas ir sąnaudos. Taip pat konstrukcijas galima suprojektuoti ir iš anksto pagaminti gamykloje, taip mažinant medžiagų atliekas ir spartinant konstrukcijų surinkimą statybų aikštelėje.

Mandala ir Nayaka [16] savo tyrime apie šiuolaikinius statybos metodus, taikomus įperkama būstui statyti, pažymi lengvų plieninių konstrukcijų pranašumus, lyginant su karštai valcuoto plieno konstrukcijomis (žr. 1 lentelė).

1 lentelė. Lengvų plieninių konstrukcijų pranašumai lyginant su karštai valcuoto plieno konstrukcijomis [16]

Privalumai	Skaitinė išraiška, %
Išlaidų sumažinimas	26–45
Svorio sumažinimas	32
Išlaidų sumažinimas	24–54
Konstrukcijų įrengimo greitis (lyginant su tradiciniais metodais)	75

Palvai ir kolegų [11] tyrime, kuriame dėmesys skiriamas lengvų plieninių konstrukcijų palyginimui su tradiciniais statybos metodais pateikiami dar keli lengvų plieninių konstrukcijų privalumai lyginant su betono konstrukcijomis (žr. 2 lentelė).

2 lentelė . Lengvų plieninių konstrukcijų pranašumai lyginant su betono konstrukcijomis [11]

Privalumai	Skaitinė išraiška, %
Mažesnės betono sąnaudos pamatams	7
Mažesnės pamatų įrengimo sąnaudos	18
Mažesnės gamybos sąnaudos	24
Mažesnės medžiagų tvarkymo išlaidos	38
Mažesnės montavimo išlaidos	26
Mažesnės bendros statybos sąnaudos	2

Nors plienas ir yra populiari statybinė medžiaga, tačiau turi vieną esminį trūkumą, kad nėra pakankamo, lyginant su betonu, atsparumo ugniai. Baleshan ir Mahendran [17] tyrime apie lengvų plieninių konstrukcijų grindų sistemos atsparumą ugniai, nustatyta, kad įrengiant išorinę izoliaciją galima padidinti konstrukcijų atsparumą ugniai. Iš išorės izoliuota konstrukcija atspari ugniai 139 minutes, o tuo tarpu kai konstrukcija yra izoliuota tik ertmėse, atsparumas – 99 minutės.

1.2. Normatyvinių reikalavimų analizė

Reikalavimai lengvoms plieninėms konstrukcijoms Lietuvoje ir Europoje reglamentuojami pagal Eurokodą ir statybos techninius reglamentus, taip užtikrinant konstrukcijų patikimumą, saugumą,

ilgalaikį naudojimą bei atsparumą aplinkos poveikiams. Europos sąjungoje pagrindinis dokumentas, kuriuo vadovaujasi projektuojant plienines konstrukcijas yra LST EN 1993 arba kitaip Eurokodas 3 „Plieninių konstrukcijų projektavimas“. Šis standartas yra vienas iš Eurokodo standartų serijos, skirtų konstrukcijų projektavimui. Jame pateikiami plieninių konstrukcijų stiprumo, stabilumo, ilgaamžiškumo ir saugumo reikalavimai. Galima išskirti svarbiausią informaciją, pateikiamą Eurokodo standarte:

- konstrukcijų projektavimo principai;
- apkrovų tipai ir jų poveikis;
- konstrukcijų stiprumo užtikrinimas;
- stabilumo analizė;
- korozijos poveikis ir apsauga;
- nuovargio ir dinaminių apkrovų poveikis;
- ugnies atsparumas [18].

Kartu su Eurokodu Lietuvoje yra taikomi statybos techniniai reglamentai. STR 2.05.08:2005 nurodo pagrindines plieninių konstrukcijų projektavimo ir statybų gaires. Aprašomas skirtingų rūšių plieno panaudojimas, jungčių projektavimas, analizuojama konstrukcijos elgsena veikiant apkrovoms. Taip pat pateikiami konkretūs reikalavimai tokioms konstrukcijoms, kaip pastatai, bokštai ar tiltai [19]. Konstrukcijas veikiantys poveikiai ir apkrovos aprašomi STR 2.05.04:2003. Šiame teisės akte pateikiama informacija apie apkrovas (naudojimo, vėjo, sniego ir kt.), įlinkius ir poslinkius, klimato temperatūros poveikius, poveikių klasifikaciją ir skaičiuotinas situacijas [20].

Be taikomų techninių reglamentų ir Eurokodo reikalavimų yra svarbu atsižvelgti ir į standartus. Vieni plačiausiai taikomų standartų yra LST EN ISO 9001, LST EN ISO 45001 ir LST EN ISO 14001, kurie apibrėžia kokybės, aplinkos apsaugos bei darbo saugos ir sveikatos vadybos sistemą. Įmonės, kurios yra įsidiegusios šiuos standartus užtikrina kokybiškus gamybos, projektavimo ar montavimo procesus, saugią aplinką darbuotojams, taip pat ir taiko aplinkai draugiškus procesus.

1.2.1. Konstrukcijų stiprumo ir ilgaamžiškumo reikalavimai

Lengvų plieninių konstrukcijų stiprumo ir ilgaamžiškumo reikalavimai yra itin svarbūs siekiant užtikrinti jų patikimumą, saugumą ir ekonomiškumą eksploatacijos metu. Tyrimai [21, 22] rodo, kad konstrukcijų gebėjimas atlaikyti tiek statines, tiek dinamines apkrovas priklauso nuo plieno mechaninių savybių ir jo apdorojimo būdų. Lotfyis [21] atliko eksperimentinius bandymus su šaltai formuotais plieniniais profilių elementais, nustatydamas, kad papildomas lengvo betono sluoksnis gali padidinti konstrukcijų ašinį stiprį iki 20 proc., taip pagerinant jų ilgaamžiškumą ir atsparumą pažeidimams. Li kartu su kolegomis [22] tirdami plieninių konstrukcijų laipsniško griuvimo elgseną, kuomet konstrukcija veikiama ekstremalių sąlygų, tokių kaip sprogimas, gaisras ar kt., nurodė pagrindinius veiksnius, kurie paveikia konstrukcijų stabilumą ir stiprumą. Šie veiksniai aprašomi 3 lentelė.

3 lentelė apibendrinami pagrindiniai veiksniai, lemiantys konstrukcijų atsparumą griūčiai, pabrėžiant dinaminių apkrovų poveikį, kolonų griūties laiką, likutinę laikomąją galią ir antrinių mechanizmų vaidmenį apkrovų perskirstyme bei konstrukcijos stabilumo užtikrinimą.

Nassr ir kolegos [23] atliko plieninių sijų, kolonų stiprumo ir stabilumo, kuomet jas veikia sprogimo apkrovos, eksperimentus. Tyrimo metu atskleisti tradicinių projektavimo metodų trūkumai, kai jie

taikomi plieninėms konstrukcijoms, veikiamoms ekstremalių sąlygų. Tradicinės sąveikos formulės gali iki 47 proc. pervertinti plieninių kolonų pajėgumą, veikiant sprogimo apkrovoms, ypač kai plastiškumo koeficientas (didžiausios deformacijos ir tamprumo deformacijos santykis) yra didesnis nei 1,0.

3 lentelė. Plieninių konstrukcijų atsparumą laipsniškam griuvimui lemiantys veiksniai [23]

Veiksny	Aprašymas	Skaitinė išraiška
Dinaminio didinimo koeficientas	Apibūdina staigių apkrovų poveikį konstrukcijoms.	1,34, 1,10, 1,19 (pagal atliktus eksperimentus)
Kolonų griūties laikas	Laikas, per kurį kolona sugriūva dėl ekstremalių apkrovų. Ilgesnė griūties trukmė sumažina konstrukcijos poslinkius ir pagerina bendrą stabilumą.	60 ms
Likutinė laikomoji galia	Pažeistos kolonos vis dar gali išlaikyti dalį apkrovos. Ši likutinė laikomoji galia padeda konstrukcijai atsispirti tolesnei progresyviai griūčiai.	0 kN, 500 kN, 1 000 kN, 2 000 kN, 8 000 kN (pagal atliktas simuliacijas)
Antriniai apkrovos laikymo mechanizmai	Sijos grandininis veikimas ir tempiamasis membraninis plokščių efektas gali ženkliai padidinti konstrukcijos atsparumą griūčiai, esant didelėms deformacijoms. Šie mechanizmai perskirsto apkrovą ir pagerina bendrą konstrukcijos stabilumą.	70–75 %

Plieninių konstrukcijų ilgaamžiškumas gali sutrumpėti dėl korozijos poveikio. Liu [24] analizuoja korozijos poveikį mažai legiruotam plienui, kuris yra naudojamas inžineriniams statiniams atviroje jūroje. Straipsnyje išskiriama, kad korozija tiesiogiai paveikia konstrukcijų tarnavimo laikotarpį, jį sutrumpinant. Kai konstrukcija yra veikiama jūros vandens ir deguonies įvyksta cheminė reakcija, kuri sukelia koroziją, kuri ardo konstrukcijos medžiagų paviršių, atsiranda plyšiai, o tai paveikia konstrukcijos gebėjimą atlaikyti apkrovas ir padidina gedimo tikimybę. Taip pat inžineriniai statiniai atviroje jūroje yra nuolatos veikiami dinaminėmis apkrovomis (vėjas, bangos), kurios gali sukelti įtrūkimus nuo konstrukcijos nuovargio, o korozija šį nuovargį tik padidina. Dėl to yra taikomi reikalavimai plienui nuo korozijos apsaugoti, padengiant jį cinko danga ar kitais rekomenduojamais dažais, lakais, kurie pateikiami LST EN ISO 12944-2:2000 standarte.

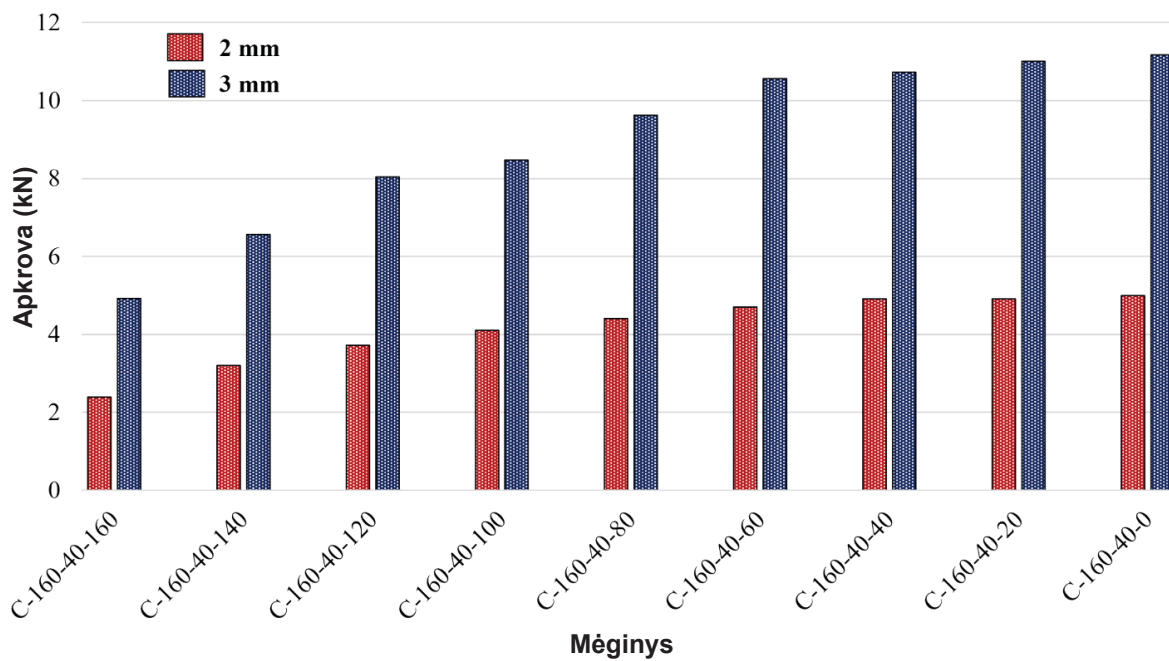
Apibendrinant, moksliniai tyrimai rodo, kad stiprumo ir ilgaamžiškumo užtikrinimas reikalauja tinkamo medžiagų parinkimo, efektyvių sujungimų projektavimo ir atsparumo aplinkos poveikiams kontrolės, kad lengvos plieninės konstrukcijos būtų patikimos ir ilgaamžės net sudėtingiausiomis sąlygomis.

1.3. Konstrukcijų mechaninės savybės ir jas veikiantys veiksniai

Lengvų plieninių konstrukcijų mechaninės savybės ir jas veikiantys veiksniai – tai kritiniai rodikliai, kurie nulemia konstrukcijų naudojimo tinkamumą. Tokios savybės kaip lankstumas, atsparumas tempimui ir gniuždymui užtikrina konstrukcijų gebėjimą sėkmingai atlaikyti tiek statinius, tiek dinامينius krūvius. Be to, jų eksploatacinės savybės stipriai priklauso nuo išorinių veiksnių, tokių kaip nuolatinės ir kintamos apkrovos, vibracijos bei aplinkos sąlygos, įskaitant koroziją ir temperatūros svyravimus. Šiame skyriuje nagrinėjami naujausi tyrimai, jų taikyti metodai ir gautos išvalgos, siekiant pateikti išsamią apžvalgą apie šias savybes ir veiksniai.

1.3.1. Lengvų plieninių konstrukcijų mechaninės savybės: lankstumas, tempimas, gniuždymas

Lengvų plieninių konstrukcijų lankstumas – viena svarbiausių jų savybių, leidžiančių konstrukcijoms prisitaikyti prie apkrovų be rimtų struktūrinių pažeidimų. Prabakaran ir Akhas [26] moksliniame darbe naudojant baigtinių elementų analizę, tyrė perforuoto lengvojo plieno aktyvų sijų lenkiamąjį stiprį. Atliekant tyrimą buvo keičiamas kiaurymės skersmuo (0–160 mm) ir sijos storis (2 ir 3 mm), siekiant nustatyti jų įtaką lenkimo galiai, veikiant trijų taškų apkrovai (žr. 5 pav.).



5 pav. Apkrovos palyginimas su 2 mm ir 3 mm storio medžiaga

Rezultatai rodo, kad didėjantis skylės skersmuo mažina ribinį stiprį, o 3 mm storis pasižymi didesne laikomąja galia, palyginti su 2 mm storio.

Zhang ir Xu [27] savo tyrime nustatė, kad automobiliams naudojami modernūs plieno lydiniai pasižymi tempimo stipriu nuo 270 MPa iki daugiau kaip 700 MPa, priklausomai nuo konkrečios rūšies ir mikrostruktūros. Pan [28] tyrė plieninių-medinių kompozicinių sijų lenkimo savybes. Tyrime nagrinėjamos medžiagų mechaninės savybės pateikiamos 4 lentelė.

Lentelėje (žr. 4 lentelė) parodyta, kaip plienas ir medis papildo vienas kitą: plienas užtikrina didelį tempimo stiprį ir standumą dėl aukšto tamprumo modulio, o medis pasižymi geru lenkimo stipriu lygiagrečiai pluoštui, todėl kartu jie gali sukurti tvirtas ir lanksčias kompozicines konstrukcijas. Tyrimo metu nustatyta, kad storesnės (10 mm) plokštelės padidino lenkimo standumą 18 proc., o tai pagerino struktūros stabilumą nuo $2,017 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ iki $2,380 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$.

4 lentelė. Plieno ir medžio mechaninės savybės [28]

Savybė	Plienas	Medis
Tamprumo riba (N/mm^2)	280	-
Tempimo stipris (N/mm^2)	432	-
Lenkimo stipris (N/mm^2)	-	14,3
Lenkimo tamprumo modulis ($\times 10^5 N/mm^2$)	2,017	0,112

Tempimo savybių (tempimo stiprio ir tamprumo modulio) rodikliai lemia lengvų plieninių konstrukcijų patikimumą ir efektyvumą įvairiose statybos srityse. Moon ir kolegų [29] darbe atliktas tyrimas su Fe-Mn-Al-C lydiniu, kuris skirtas lengvoms plieninėms konstrukcijoms. Tyrimo rezultatai nustatė, kad lydinio tempimo stipris pasiekė 810 MPa, o pailgėjimas – 27,4 proc. Tai parodo gerą stiprumo ir plastiškumo derinį, kuris tinka dinaminėms apkrovoms. Kiti mokslininkai kartu su Sun [30] atliko tyrimą, kuriame daugiausiai dėmesio skyrė TWIP (angl. *Twinning-Induces Plasticity*) plieno kompozitui, kuris sustiprintas keramikos strypais. Tyrimo rezultatai parodė, kad TWIP plieną sustiprinus keramikos strypais, jo lenkimo stipris padidėjo iki 805 MPa, t. y. daugiau nei du kartus, palyginti su grynu TWIP plieniu, kurio lenkimo stipris siekė 388 MPa. Tai rodo, kad keramikos ir plieno derinimas yra perspektyvus sprendimas didelio stiprumo reikalaujančioms konstrukcijoms.

Kuomet konstrukcija veikiama didelių ašinių jėgų ar ekstremalių sąlygų, tokių kaip aukštos temperatūros, tam kad būtų užtikrintas stabilumas ir patikimumas svarbu įvertinti gniuždymą ir jo savybes. Rusli ir Setiawan [31] atliko išsamų plieninių sijų, sustiprintų papildomais konstrukciniais elementais, tyrimą, daugiausia dėmesio skirdami jų elgsenai gniuždymo apkrovų metu. Tyrimo metu analizuojamas ne tik lenkimo pajėgumas, kuris padidėjo 36,81 proc., bet ir gniuždymo geba bei ašinė laikomoji talpa. Rezultatai atskleidė, kad sustiprintos sijos demonstruoja reikšmingą pagerėjimą ašinės talpos srityje – ji padidėjo net 60,78 proc., palyginti su įprastinėmis sijomis. Šie rezultatai rodo, kad papildomi sutvirtinimai ne tik didina konstrukcijos atsparumą lenkimui, bet ir ženkliai pagerina jos gniuždymo savybes, leidžiant konstrukcijai efektyviau atlaikyti ašines apkrovas, kurios dažnai yra kritinės vertikaliosioms sijoms.

1.3.2. Konstrukciją veikiantys veiksniai: nuolatinės ir kintamos apkrovos, vibracijos

Konstrukcijas, tokias kaip šviesoforų atramos, veikia tiek nuolatinės, tiek kintamos apkrovos bei vibracijos, kurios daro reikšmingą įtaką jų patvarumui ir nuovargio atsiradimui.

Tsai [32] atliko tyrimą, kurio metu šviesoforo konstrukcijai su 20,42 metro ilgio svirtimi nustatyta, kad plokštumoje vykstančias vibracijas konstrukcija slopina sunkiau nei išorines. Pirmojo išorinio režimo natūralus dažnis – 0,531 Hz, o slopinimo koeficientas siekė 1,604 proc., tuo tarpu antrojo vidinio režimo dažnis – 0,597 Hz, o slopinimo koeficientas – tik 0,315 proc. Tai lemia didesnę nuovargio įtampos kaupimąsi plokštumoje. Stebint vėjo poveikį, nustatyta, kad vėjas, pučiantis iš šviesoforo nugaros pusės, sukėlė didesnes vibracijas nei iš priekio: esant 5 m/s greičiui, inercijos pagreičio standartinis nuokrypis atitinkamai siekė 0,03 g ir 0,02 g. Be to, stebėtas didžiausias įtampos diapazonas masto svirties pagrinde paprastai neviršijo 15 MPa, o 90 proc. reikšmės buvo mažesnės nei 5 MPa, kas rodo, kad nuovargio pažeidimų rizika dėl vėjo sukeltųjų vibracijų yra minimali. Tačiau esant aukštesniems vėjo greičiams, kai įtampos diapazonas viršija 18 MPa, nuovargio pažeidimai gali tapti reikšmingi, ypač regionuose, kuriuose būdingos didelės vėjo apkrovos.

Gedrimas ir Sabaliauskas [33] savo tyrime analizavo kelio ženklų remines (santvarinės) konstrukcijos stiprumą, siekiant sumažinti jų svorį, tačiau išlaikant gebėjimą atlaikyti apkrovas. Naudojant kompiuterinio projektavimo ir analizės programas, įvertinti stačiakampio, kvadratinio, apvalaus skerspjūvio bei kampuočio profiliai. Tyrimo rezultatai parodė, kad tinkamiausias sprendimas – konstrukcija, kurios svoris siekė 2 100 kg, Šiuo atveju didžiausios gautos įtampos siekė 159 MPa, kas yra mažiau nei leistinos – 235 MPa, o maksimalūs poslinkiai siekė 60 mm – 50 proc. mažesni nei leistina riba (120 mm).

1.3.3. Konstrukcijų ilgaamžiškumą veikiantys aplinkos veiksniai

Aplinkos veiksniai, tokie kaip temperatūros pokyčiai, korozija, drėgmė ir ultravioletinė (UV) spinduliuotė, daro reikšmingą poveikį lengvų plieninių konstrukcijų ilgaamžiškumui. Šie veiksniai lemia konstrukcijų medžiagų mechaninių savybių pokyčius, greitina nusidėvėjimą ir mažina konstrukcijos saugumą bei patikimumą.

Drėgmė – vienas svarbiausių veiksnių, skatinančių koroziją. Muhammad [34] tyrė anglinio ir legiruotojo plieno korozijos greitį drėgnomis sąlygomis, naudojant 5 proc. tūrio druskos rūgšties tirpalą. Eksperimentuose su 5 proc. tūrio druskos rūgšties tirpalu per 60 dienų nustatyta, kad plienas, kurio anglies kiekis 0,64 proc., korozijos greitis siekė apie 70 milimetrų per metus (mpy). Tuo tarpu plienui su 0,11 proc. anglies kiekio nustatytas žymiai mažesnis korozijos greitis – apie 16 mpy. Šie rezultatai akcentuoja, kad didesnės anglies koncentracijos plienai yra jautresni korozijai, ypač agresyviose cheminėse terpėse.

Zhu [35] atliko tyrimą, nagrinėdamas Q345 plieno savybes po kaitinimo iki įvairių temperatūrų, nuo 250 °C iki 750 °C, ir leidžiant jam natūraliai atvėsti. Tyrimo metu nustatyta, kad 500 °C yra kritinė temperatūra, nuo kurios prasideda reikšmingi mechaninių savybių pokyčiai. Iki šios ribos, tiek tempimo, tiek takumo stipris išliko stabilūs, pokytis neviršijo 5 proc. lyginant su kambario temperatūra. Tačiau viršijus 500 °C, tempimo stipris sumažėjo 20,7 proc., o takumo stipris – 16,41 proc., kai temperatūra pasiekė 750 °C. Nepaisant šių pokyčių, tamprumo modulis liko beveik nepakitęs per visą temperatūrų diapazoną, o didžiausias jo pokytis siekė vos 1,04 proc. Be to, pastebėta, kad plienas tapo lankstesnis – pailgėjimas didėjo kylant temperatūrai, rodančiai didesnę deformavimosi gebėjimą aukštesnėse temperatūrose.

Aplinkos veiksniai, tokie kaip korozija, drėgmė ir temperatūros pokyčiai, reikšmingai veikia lengvų plieninių konstrukcijų ilgaamžiškumą, skatindami jų degradaciją ir mažindami mechaninių savybių stabilumą. Tyrimai pabrėžia būtinybę naudoti tinkamas medžiagas ir apsaugos priemones, siekiant išlaikyti konstrukcijų patikimumą ekstremaliomis sąlygomis.

2. Tyrimo metodika

Atliekamas tyrimas, siekiant įvertinti trijų skirtingų atramų – rėminės santvarinės, gembinės santvarinės, cilindrinės kūginės gembės – konstrukcinius skirtumus ir jų elgseną veikiant tom pačioms apkrovoms. Visos konstrukcijos nagrinėjamos identiškomis skaičiavimo sąlygomis, kad gauti rezultatai būtų tarpusavyje palyginami. Skaičiavimai atliekami taikant Eurokodų ir Lietuvos normatyvinių dokumentų reikalavimus.

Tyrimo eiga susideda iš kelių pagrindinių etapų. Pirmajame etape sudaromi kiekvienos nagrinėjamos atramos modeliai, naudojant „Autodesk Robot Structural Analysis 2021” programą. Modeliuose apibrėžiami medžiaginiai parametrai, įtvirtinimai, elementų skerspjūviai, geometriniai matmenys, montuojamos įrangos išdėstymas ir apkrovų veikimo vietos.

Antruoju etapu nustatomos konstrukcijas veikiančios apkrovos – savasis svoris, montuojamos įrangos apkrova, vėjo apkrova ir apledėjimo apkrova. Sukuriamos apkrovų kombinacijos pagal saugos ribinį būvį (SRB; angl. ULS – *Ultimate Limit State*) ir tinkamumo ribinį būvį (TRB; angl. SLS – *Serviceability Limit State*). Skaičiavimai atliekami taikant baigtinių elementų metodą (BEM; angl. FEM – *Finite Element Method*), kuris leidžia įvertinti įtempių pasiskirstymą, deformacijas ir atramų reakcijas.

Trečiajame etape atliekama gautų rezultatų analizė. Vertinamas konstrukcijų efektyvumas, atsižvelgiant į pagrindinius rodiklius:

- Atramos savąjį svorį.
- Atramos viršūnės poslinkį.
- Maksimalų įtempį pavojingiausiuose skerspjūviuose.
- Saugos ribinio būvio išnaudojimą.

Šie rodikliai leis įvertinti kiekvienos konstrukcijos stiprį, standį ir stabilumo lygį, taip pat nustatyti, kuris konstrukcinis sprendimas yra racionaliausias nagrinėjamomis sąlygomis.

Tyrimo metu naudojamos šios kompiuterinės programos ir priemonės:

- „Autodesk AutoCAD 2024” – konstrukcijų brėžinius sudaryti, geometrinius modelius sukurti ir jų eksportui į analizės aplinką „Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021” per DXF formatą.
- „Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021” – pagrindiniam konstrukcijų stiprumo, standumo ir stabilumo skaičiavimui taikant baigtinių elementų metodą (BEM).
- „Microsoft Excel” – gautų skaičiavimo rezultatų sisteminimui, palyginimui ir grafiniam rezultatų pateikimui.
- „Microsoft Word” – darbo rengimui, teksto struktūravimui, rezultatų aprašymui ir išvadų pateikimui.

2.1. Apkrovos ir apkrovų deriniai

Tyrime konstrukcijas veikiančias apkrovos sudaro:

1. Savasis svoris.
2. Montuojamos įrangos savasis svoris ir galimos įrangos apledėjimo apkrovos.
3. Vėjo apkrova.
4. Apledėjimo apkrova.

Konstrukcijos (elementų) savasis svoris [38]:

$$g_k = \rho_{plieno} \cdot V \cdot g; \quad (1)$$

čia $\rho_{plieno} = 7850 \text{ kg/m}^3$ – plieno tankis; V – konstrukcijos tūris, m^3 ; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – laisvo kritimo pagreitis.

Montuojamos įrangos savasis svoris modeliuojamas kaip koncentruotos jėgos konstrukcijos mazguose. Montuojamos įrangos svorio jėgos pridedamos ant atramų ašies, t. y. nuo šių jėgų atsirandantys momentai nevertinami. Įrangos apkrova [38]:

$$F_k = m \cdot g; \quad (2)$$

čia m – įrangos masė; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – laisvo kritimo pagreitis.

Faktinis ledo sluoksnis $t_{ledo} = 22 \text{ mm}$. Apledėjimo apkrovos intensyvumas [39]:

$$q_{ledo} = \rho_{ledo} \cdot g \cdot t_{ledo}; \quad (3)$$

čia $\rho_{ledo} = 900 \text{ kg/m}^3$ – ledo tankis; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – laisvo kritimo pagreitis.

Gauta, kad apledėjimo apkrovos intensyvumas $q_{ledo} = 0,195 \text{ kN/m}^2$

Vėjo apkrovos skaičiuojamos pagal EN 1991-1-4, įvertinant konstrukcijos aukštį, atstojamąjį aerodinaminį plotą ir formos koeficientus [40]. Dinaminis vėjo slėgis:

$$q_p(z) = 0,5 \cdot \rho \cdot v_m(z)^2; \quad (4)$$

čia $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$; $v_m(z)$ – vidutinis vėjo greitis.

Vėjo jėga konstrukcijai skaičiuojama:

$$F_w = q_p(z) \cdot c_f \cdot A_{ref}; \quad (5)$$

čia c_f – aerodinaminis formos koeficientas; A_{ref} – atstojamasis aerodinaminis plotas.

Santvarinėms konstrukcijoms aerodinaminis koeficientas nustatomas pagal ST 188710638.08:2004 [36]:

$$c_{x,s} = (1/A_k) \sum c_{x,i} A_i; \quad (6)$$

čia A_k – santvaros kontūro plotas, $\sum A_i$ – strypų projekcijų suma.

Normaliniai įtempiai lenkiamuose elementuose skaičiuojami pagal:

$$\sigma = M_y / W_y; \quad (7)$$

čia M_y – lenkimo momentas; W_y – skerspjūvio atsparumo momentas.

Stiprumo įvertinimui naudojamas saugos ribinio būvio išnaudojimo koeficientas:

$$\eta = \sigma / f_y; \quad (8)$$

čia $f_y = 235$ MPa – plieno S235 takumo riba.

Tinkamumo ribinio būvio metu tikrinami atramų viršūnių poslinkiai. Leistinas didžiausias poslinkis:

$$\delta_{max} \leq L / 250; \quad (9)$$

čia L – atstumo, nuo atramos įtvirtinimo ašies iki toliausiai nutolusio atramos taško, projekcija X ašyje.

Konstrukcijų saugumas tikrinamas pagal stiprumo ribinio būvio (SRB) principus. Apkrovų deriniai sudaromi remiantis EN 1990 nuostatomis [41]. SRB atveju projektinė apkrova skaičiuojama:

$$E_{SRB} = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k; \quad (10)$$

čia G_k – charakterinė nuolatinė apkrova; Q_k – kintamoji apkrova (vėjas, įranga); $\gamma_G = 1,35$, $\gamma_Q = 1,50$ – daliniai saugos koeficientai.

2.2. Tyrimo prielaidos

Šiame tyrime daromos prielaidos:

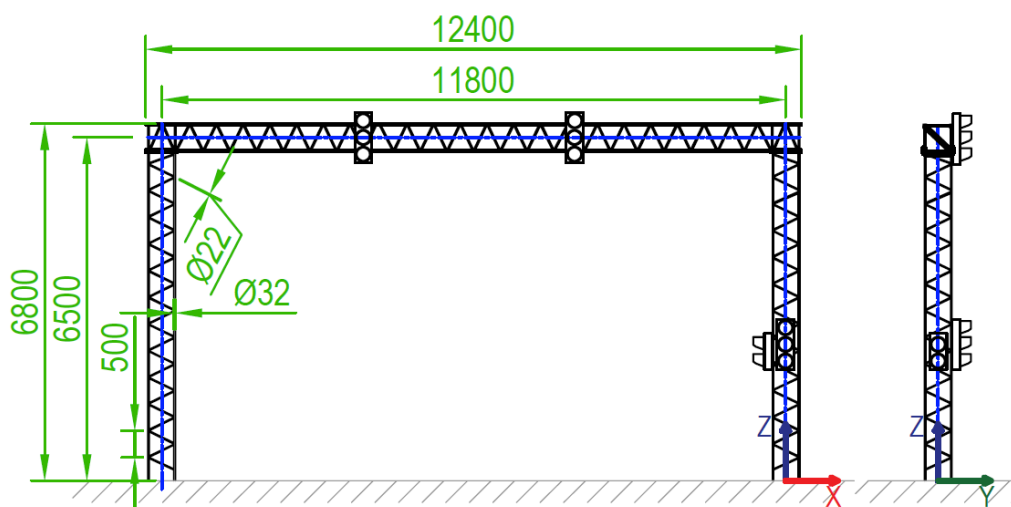
1. Konstrukcijos deformuojasi tik tampriai.
2. Taikomas mažų deformacijų linijinis modelis, ryšys tarp poslinkių ir deformacijų – tiesinis.
3. Atramų įtvirtinimas yra absoliučiai standus, tai yra nevertinamas grunto standumas.
4. Cilindrinės-kūginės konstrukcijos jungtis, jungianti cilindrinę koloną ir kūginę gembę, yra absoliučiai standi.
5. Laikoma, kad medžiagos mechaninės charakteristikos nuo temperatūros nepriklauso.
6. Montuojamos įrangos svorio jėgos pridamos ant atramų ašies, t. y. nuo šių jėgų atsirandantys momentai nevertinami.

3. Tiriamoji dalis

3.1. Tiriamieji modeliai

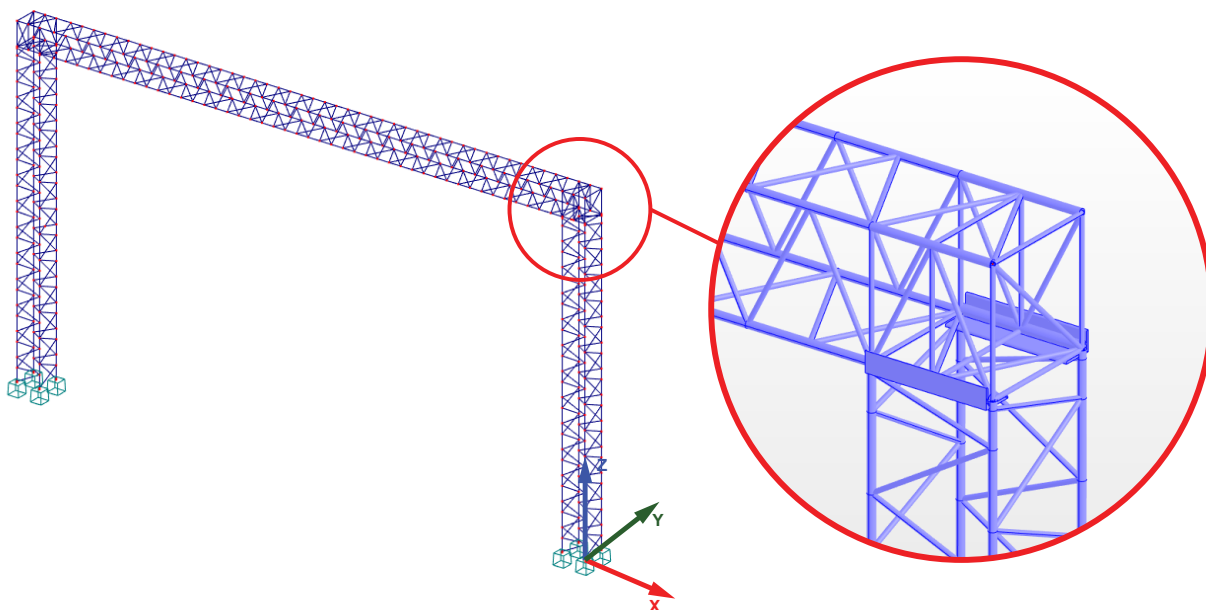
Šiame darbe nagrinėjamos trys praktikoje plačiai naudojamos plieninių atramų konstrukcijos, skirtos šviesoforams, su jais susijusiems įrenginiams bei kelio ženklams montuoti. Šios konstrukcijos bus statomos ir nagrinėjamos Panevėžio mieste, todėl analizei taikomos II vėjo zonos sąlygos pagal STR 2.05.04:2003. Toks atramų pasirinkimas leidžia įvertinti skirtingų konstrukcinių schemų – rėminės, santvarinės ir vamzdinės – elgseną veikiant realioms Lietuvos klimato apkrovoms [20].

Pirmasis variantas – rėminė santvarinė konstrukcija, sudaryta iš dviejų vertikalių santvarinių kolonų ir santvarinės horizontalios sijos, įrengiamos virš važiuojamosios dalies (žr. 6 pav.). Konstrukcijos santvarų išilginiai kampiniai strypai – $\varnothing 32$; įstrižiniai strypai – $\varnothing 22$, medžiaga – S 235 EN 10025 klasės plienas.



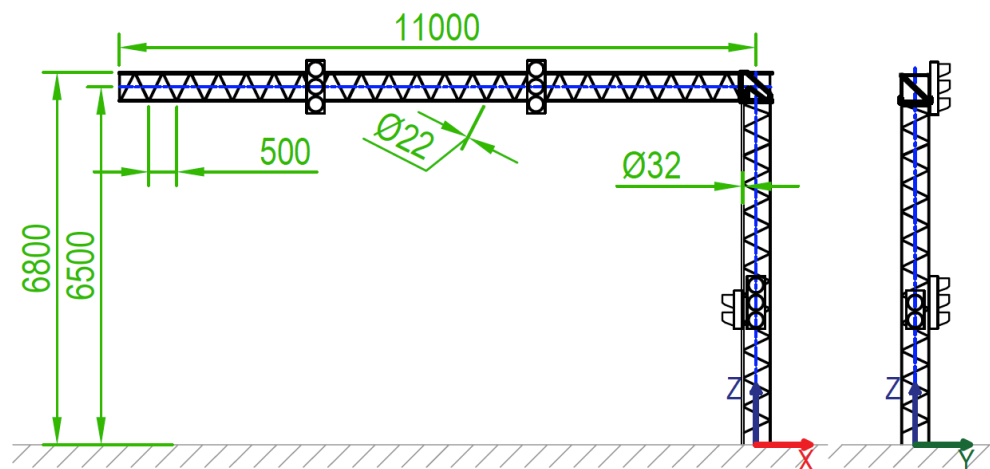
6 pav. Rėminė santvarinė konstrukcija

Rėminės santvarinės konstrukcijos izometrija pateikiama 7 pav.



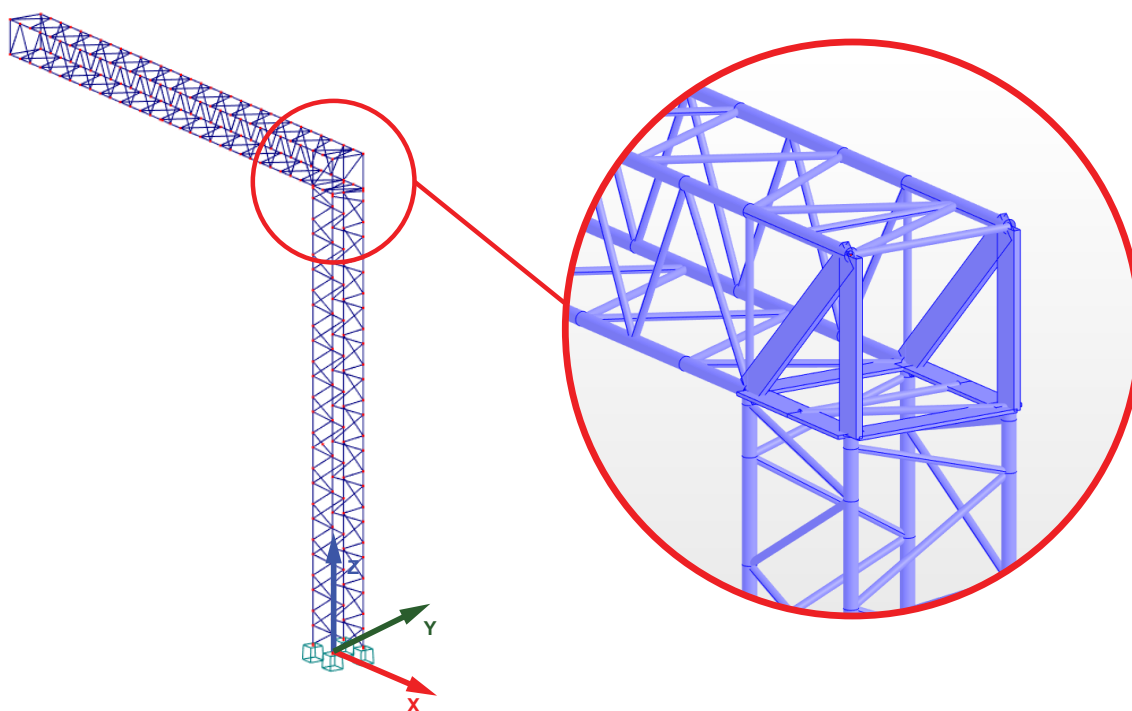
7 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos izometrija

Antrasis variantas – gėbinė santvarinė konstrukcija, kuri sudaryta iš vienos santvarinės kolonos ir santvarinės sijos (ėr. 8 pav.). Konstrukcijos santvarų išilginiai kampiniai strypai – $\varnothing 32$; įstriėiniai strypai – $\varnothing 22$, medėiaga – S 235 EN 10025 klasės plienas.



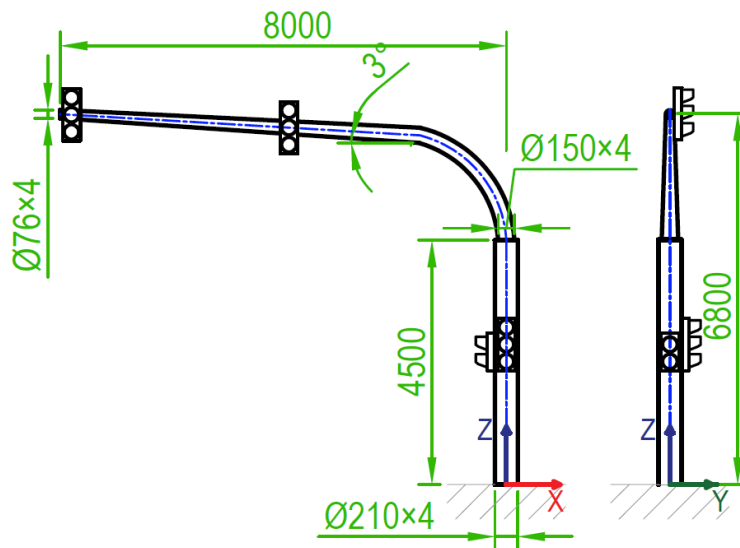
8 pav. Gėbinė santvarinė konstrukcija

Gėbinės santvarinės konstrukcijos izometrija pateikiama 9 pav.



9 pav. Gėbinės santvarinės konstrukcijos izometrija

Treėiasis variantas – cilindrinė-kūginė gėbinė atrama (ėr. 10 pav.). Ji formuojama iš cilindrinio-kūginio tuėėiavidurio (sienlės storis 4 mm) vamzdėio. Atramos medėiaga – S 235 EN 10025 klasės plienas.

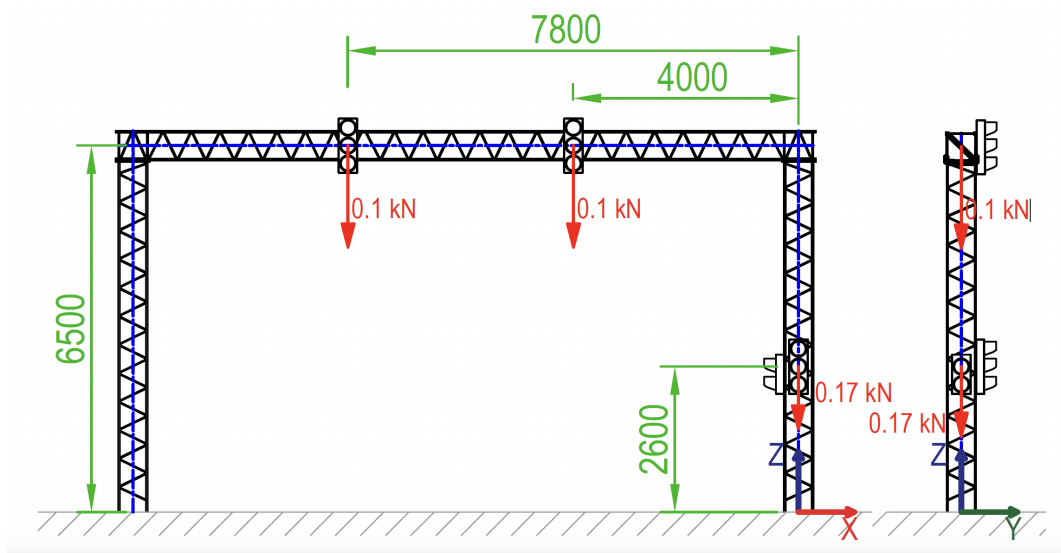


10 pav. Cilindrinė geminė atrama

Visos trys nagrinėjamos konstrukcijos tvirtinamos standžiai į pamatą. Tokie pamatų sprendiniai atitinka ST 188710638.08:2004 reikalavimus ir yra dažniausiai taikomi Lietuvoje [36].

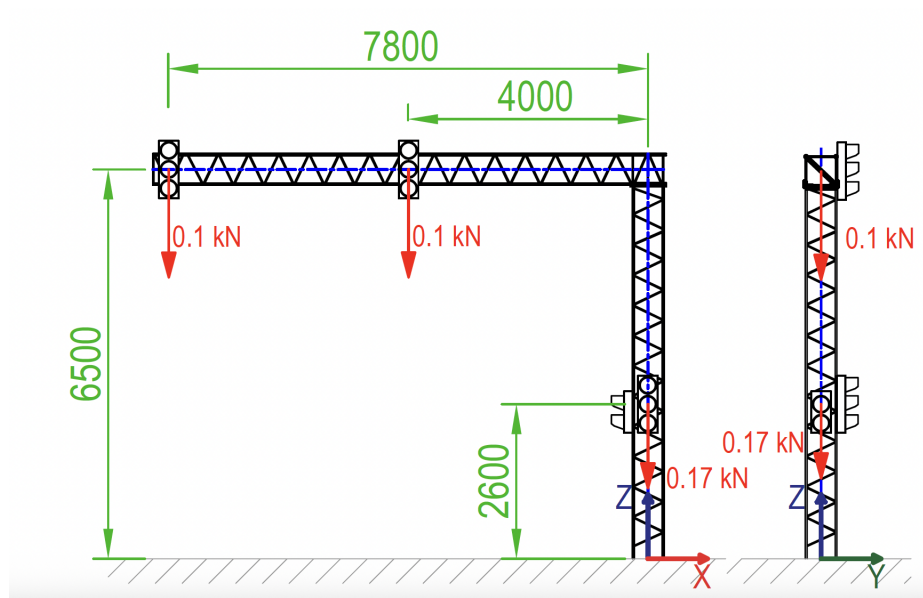
Tiriamų konstrukcijų aukštis priimamas 6,5–7,0 m, siekiant užtikrinti šviesoforų signalų matomumą virš važiuojamosios dalies pagal Šviesoforų įrengimo taisykles [42]. Konsolės ilgis arba tarpatramis priklauso nuo konstrukcijos tipo ir svyruoja nuo 8,0 iki 12,4 m.

Rėminės santvarinės konstrukcijos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu nurodyta 11 pav.



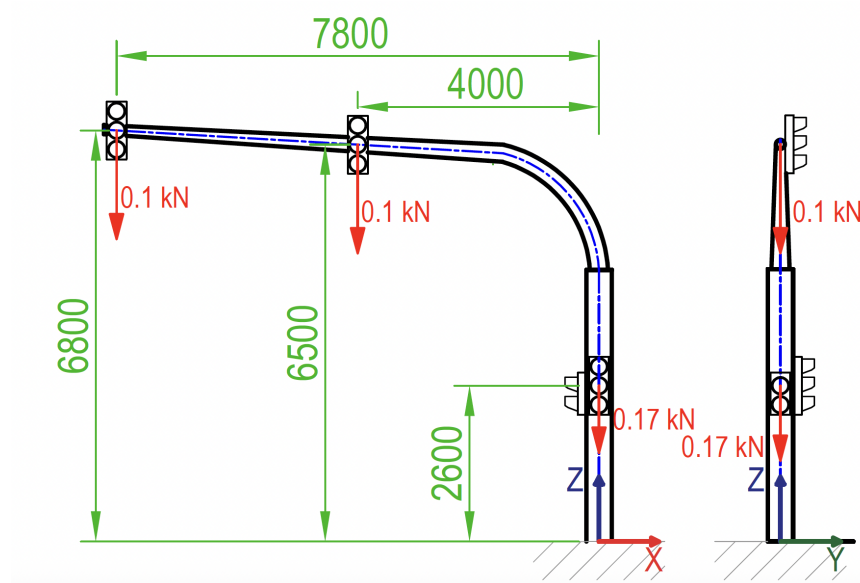
11 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu (vėjo, sniego ir apledėjimo apkrovos sąlyginai nepavaizduotos)

Geminės santvarinės konstrukcijos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu nurodyta 12 pav.



12 pav. Geminės santvarinės konstrukcijos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu (vėjo, sniego ir apledėjimo apkrovos sąlyginai nepavaizduotos)

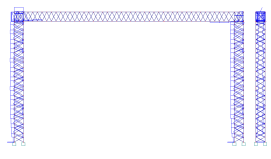
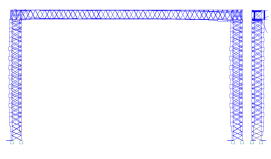
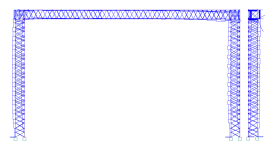
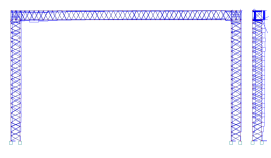
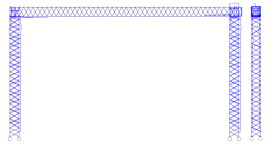
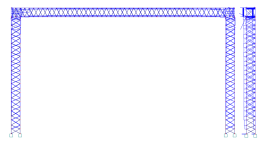
Cilindrinės-kūginės geminės atramos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu nurodyta 13 pav.



13 pav. Cilindrinės-kūginės geminės atramos skaičiuojamoji schema su montuojamos įrangos svoriu (vėjo, sniego ir apledėjimo apkrovos sąlyginai nepavaizduotos)

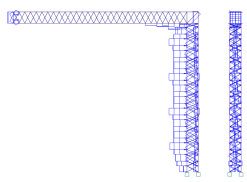
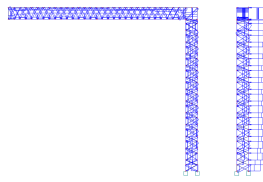
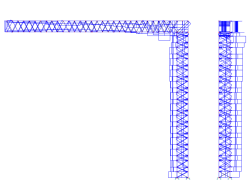
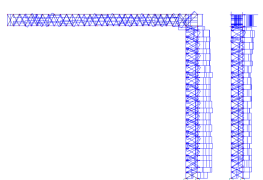
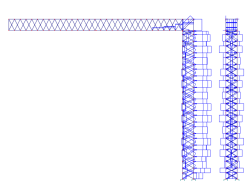
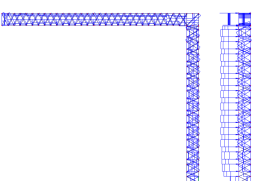
Vėjo apkrova modeliuojama „Autodesk Robot Structural Analysis 2021“ programoje. Modeliuojamos aštuonios vėjo kryptys, kurių apkrovų suvestinė rėminei santvarinei konstrukcijai pateikiama 5 lentelėje.

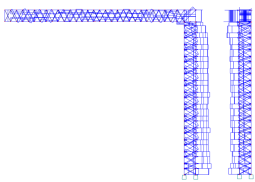
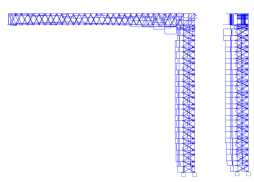
5 lentelė. Vėjo apkrovos rėminei santvarinei konstrukcijai

Vėjo kryptis	Didžiausia apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas	Vėjo kryptis	Didžiausi a apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas
X+ (šiaurės)	0,013 0,029		Y- (rytų)	0,021 0,038	
X+Y- (šiaurės rytų)	0,027 0,035		X-Y- (pietryčių)	0,024 0,036	
X- (pietų)	0,013 0,029		Y+ (vakarų)	0,021 0,038	
X-Y+ (pietvakarių)	0,027 0,035		X+Y+ (šiaurės vakarų)	0,024 0,036	

Gombinei santvarinei konstrukcijai modeliujamų vėjo apkrovų suvestinė pateikiama 6 lentelė

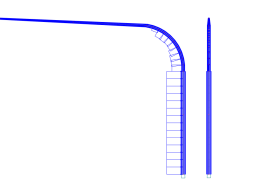
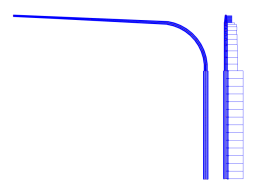
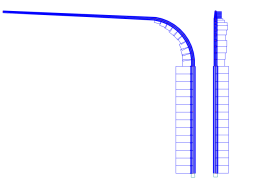
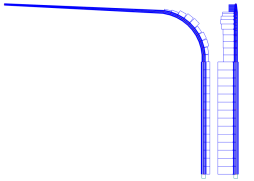
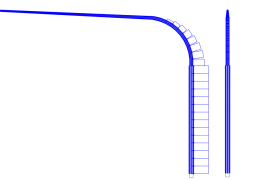
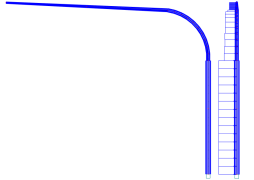
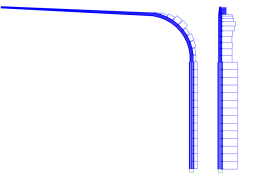
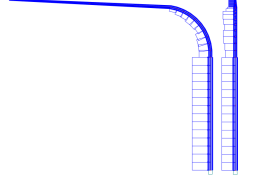
6 lentelė. Vėjo apkrovos gombinei santvarinei konstrukcijai

Vėjo kryptis	Didžiausia apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas	Vėjo kryptis	Didžiausi a apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas
X+ (šiaurės)	0,016 0,016		Y - (rytų)	0,021 0,040	
X+Y- (šiaurės rytų)	0,015 0,036		X-Y- (pietryčių)	0,019 0,022	
X- (pietų)	0,013 0,025		Y+ (vakarų)	0,021 0,038	

Vėjo kryptis	Didžiausia apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas	Vėjo kryptis	Didžiausia apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas
X-Y+ (pietvakarių)	0,017 0,027		X+Y+ (šiaurės vakarų)	0,017 0,029	

Cilindrinei-kūginei gombinei atramai modeliuojamų vėjo apkrovų suvestinė pateikiama 7 lentelė

7 lentelė. Vėjo apkrovos gombinei santvarinei konstrukcijai

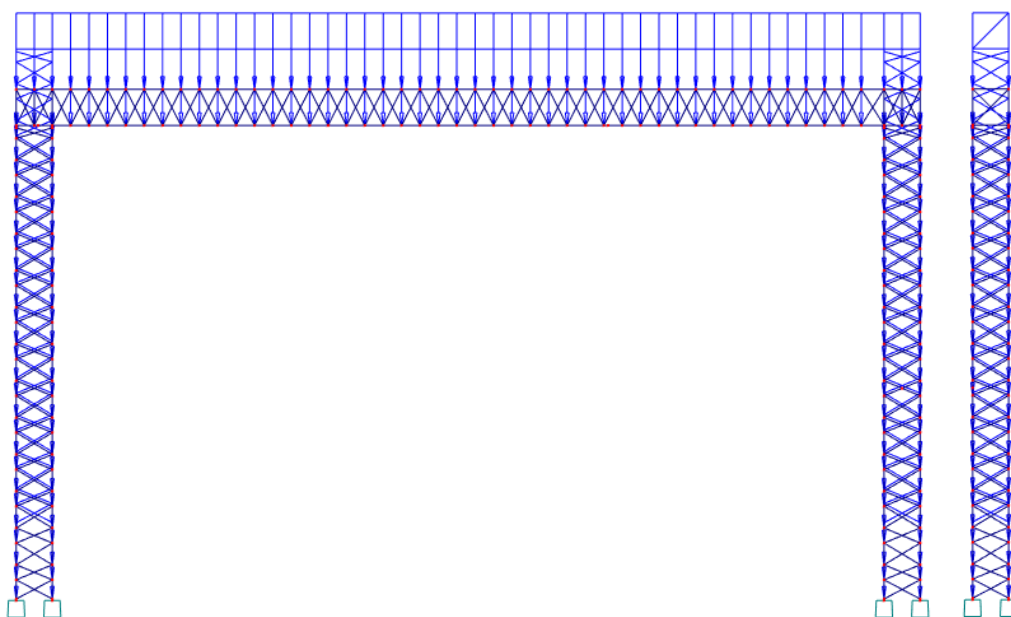
Vėjo kryptis	Didžiausia apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas	Vėjo kryptis	Didžiausia apkrova, MPa	Vėjo apkrovos pasiskirstymas
X+ (šiaurės)	0,066 0,002		Y - (rytų)	0,006 0,065	
X+Y- (šiaurės rytų)	0,056 0,043		X-Y- (pietryčių)	0,016 0,046	
X- (pietų)	0,070 0,001		Y+ (vakarų)	0,006 0,065	
X-Y+ (pietvakarių)	0,017 0,046		X+Y+ (šiaurės vakarų)	0,056 0,042	

Apledėjimo apkrova įvertinta pagal STR 2.01.12:2024 reikalavimus [39]. Panevėžio regione vyrauja II apledėjimo rajonas, kur $t_n = 20$ mm. Atsižvelgiant į tai, kad atramų aukštis yra nuo 6,5 m iki 7 m, gautas faktinis ledo sluoksnis – $t_{ledo} = 22$ mm. Apledėjimo apkrovos intensyvumas apskaičiuojamas pagal (3 formulę.

$$q_{ledo} = \rho_{ledo} \cdot g \cdot t_{ledo} \quad (3)$$

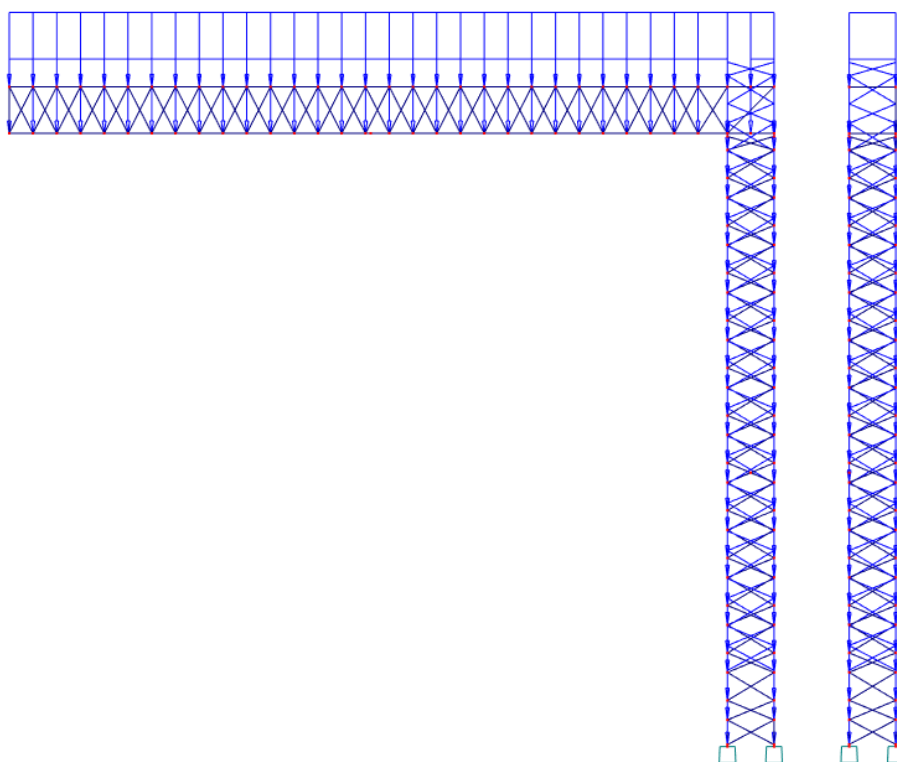
čia: $\rho_{ledo} = 900 \text{ kg/m}^3$ – ledo tankis; $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ – laisvo kritimo pagreitis.

Gautas apledējimo apkroves intensyvumas – $q_{ledo} = 0,195 \text{ kN/m}^2$. 14 pav. pateikiamas apledėjimo apkroves pasiskirstymo pobūdis ant rėminės santvarinės konstrukcijos.



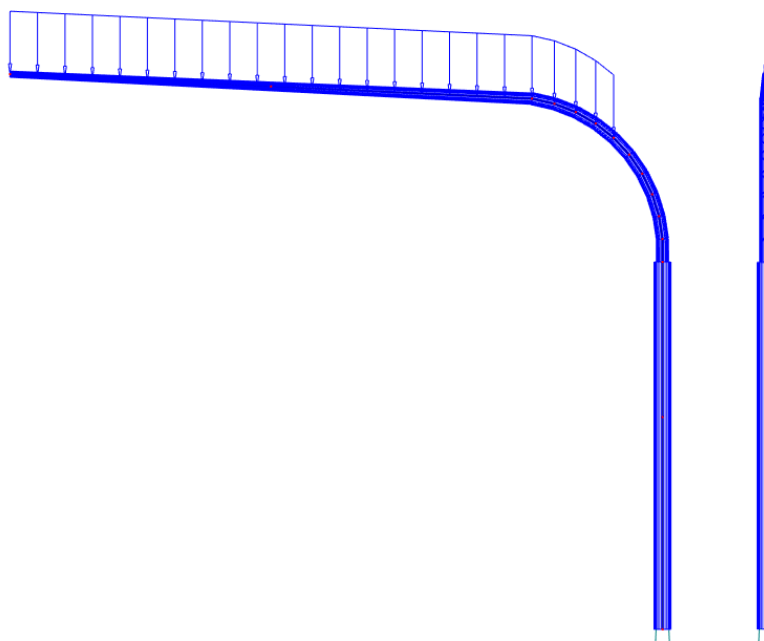
14 pav. Apledėjimo apkroves pasiskirstymo pobūdis ant rėminės santvarinės konstrukcijos

15 pav. pateikiamas apledėjimo apkroves pasiskirstymo pobūdis ant gembinės santvarinės konstrukcijos.



15 pav. Apledėjimo apkroves pasiskirstymo pobūdis ant gembinės santvarinės konstrukcijos

16 pav. pateikiamas apledėjimo apkroves pasiskirstymo pobūdis ant cilindrinės-kūginės gembinės atramos.



16 pav. Apledėjimo apkrovos pasiskirstymo pobūdis ant cilindrinės-kūginės gėminės atramos

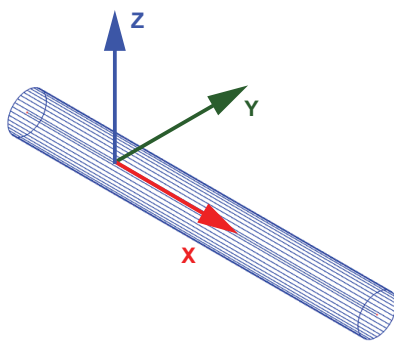
Apkrovų deriniai sudaryti vadovaujantis LST EN 1990:2002 ir STR 2.05.08:2005 [43] reikalavimais. Sudarant saugos ribinio būvio (SRB; angl. ULS – *Ultimate Limit State*) apkrovų derinius dalinis saugos koeficientas priimamas $\gamma_G = 1,35$ – nuolatinėms apkrovoms ir $\gamma_Q = 1,50$ – kintamoms apkrovoms.

Tyrime taikomų apkrovų deriniai pateikiami 8 lentelė.

8 lentelė. Apkrovų derinių sąrašas

Apkrovų derinio pavadinimas	Vertinamos apkrovos*
AD1 X+	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(X+) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
AD2 X+Y-	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(X+Y-) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
AD3 Y-	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(Y-) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
AD4 X-Y-	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(X-Y-) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
AD5 X-	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(X-) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
AD6 X-Y+	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(X-Y+) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
AD7 Y+	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(Y+) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
AD8 X+Y+	$1,35 \cdot 1(Z-) + 1,35 \cdot 2(Z-) + 1,50 \cdot 3(X+Y+) + 1,50 \cdot 4(Z-)$
* apkrovų numeriai: 1 – savasis svoris; 2 – montuojamos įrangos svoris; 3 – vėjo apkrova; 4 – apledėjimo apkrova. Skliausteliuose nurodytos apkrovų kryptys koordinatinių sistemos, pavaizduotos 6 pav. pav., atžvilgiu.	

Atlikus konstrukcijų erdvinį baigtinių element modeliavimą programoje „Autodesk Robot Structural Analysis 2021“ gautos pagrindinės vidinės jėgos (angl. NTM – *Normal-Transverse-Moment*): ašinės jėgos (N), kirpimo jėgos (T), lenkimo momentai (M). Ašinės jėgos neigiamas ženklas nurodo, kad elementas yra gniuždomas, o pliuso ženklas, kad – tempiamas. Kitų apkrovos dedamųjų ženklai nurodo ar jų kryptys sutampa su elemento vietinės koordinatinių sistemos ašių kryptimis. Pavyzdinis elementas su vietinės koordinatinių sistemos ašių kryptimis nurodytas 17 pav. paveiksle.



17 pav. Elemento vietinės koordinatės sistemos ašių kryptys

Rėminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinės jėgos pateikiamos 9 lentelė.

9 lentelė. Rėminės santvarinės elementų vidinės jėgos

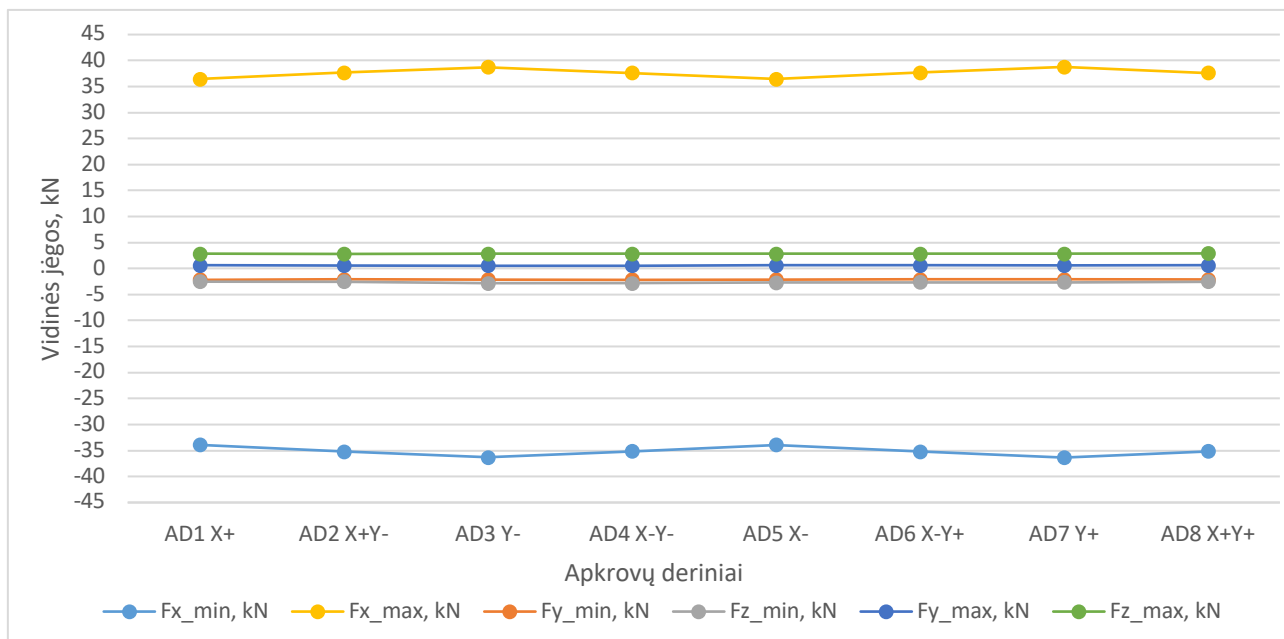
Apkrovos derinys	Ašinė jėga F_x , kN		Išilginė jėga F_y , kN		Skersinė jėga F_z , kN		Sukimo momentas M_x , kN·m		Lenkimo momentas M_y , kN·m		Lenkimo momentas M_z , kN·m	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
AD1 X+	-33,920	36,460	-2,127	0,593	-2,524	2,814	-0,016	0,010	-0,544	0,146	-0,133	0,381
AD2 X+Y-	-35,228	37,674	-2,120	0,574	-2,549	2,806	-0,015	0,010	-0,542	0,126	-0,132	0,381
AD3 Y-	-36,334	38,742	-2,138	0,577	-2,813	2,850	-0,015	0,010	-0,551	0,148	-0,132	0,386
AD4 X-Y-	-35,171	37,633	-2,137	0,577	-2,812	2,855	-0,015	0,010	-0,552	0,149	-0,132	0,387
AD5 X-	-33,932	36,460	-2,138	0,595	-2,688	2,848	-0,016	0,010	-0,551	0,148	-0,133	0,386
AD6 X-Y+	-35,225	37,680	-2,119	0,601	-2,630	2,841	-0,016	0,011	-0,549	0,148	-0,133	0,385
AD7 Y+	-36,358	38,772	-2,118	0,606	-2,639	2,833	-0,017	0,012	-0,547	0,148	-0,133	0,384
AD8 X+Y+	-35,166	37,643	-2,102	0,598	-2,546	2,909	-0,016	0,010	-0,539	0,145	-0,133	0,380

Atlikus rėminės santvarinės konstrukcijos erdvinį skaičiavimo modeliavimą, nustatyta, kad skirtingi apkrovų deriniai sukelia nevienodas vidaus jėgų reikšmes elementuose. Analizė parodė, jog konstrukcija jautriausiai reaguoja į horizontalias apkrovas, veikiančias apkrovų derinyje AD3 Y–, kur sukėlė didžiausias ašines jėgas F_x : maksimali teigiama reikšmė siekė +38,742 kN, o didžiausia neigiama –36,334 kN.

Vertinant skersines jėgas F_y ir F_z nustatyta, kad didžiausia F_y neigiama skersinė jėga susidaro deriniuose, AD3 Y- ir AD5 X- deriniuose – 2,138 kN, o didžiausia teigiama F_y reikšmė gauta esant AD7 Y+ deriniui – +0,606. Tuo tarpu maksimali neigiama F_z reikšmė gaunama derinyje AD3 Y- ir yra lygi – 2,813, o didžiausia teigiama lygi +2,909 kN ir susidaro derinyje AD8 (X+Y+) derinyje.

Momentų analizė parodė, kad sukimo momentai M_x konstrukcijoje yra nežymūs ir konstrukcijos darbo pobūdžio nepakeičia. Tačiau lenkimo momentai M_y ir M_z pasižymi didesne priklausomybe nuo apkrovų krypties. Didžiausia neigiama M_y reikšmė –0,552 kN·m ir teigiama +0,149 kN·m gauta AD4 X–Y– derinyje. Vertinant lenkimo momentus M_z didžiausia neigiama M_z reikšmė –0,133 kN·m susidaro deriniuose AD1 X+, AD5 X-, AD6 X-Y+, AD7 Y+, AD8 X+Y+ o maksimali teigiama reikšmė – +0,387 kN·m, gaunama AD4 X–Y– derinyje.

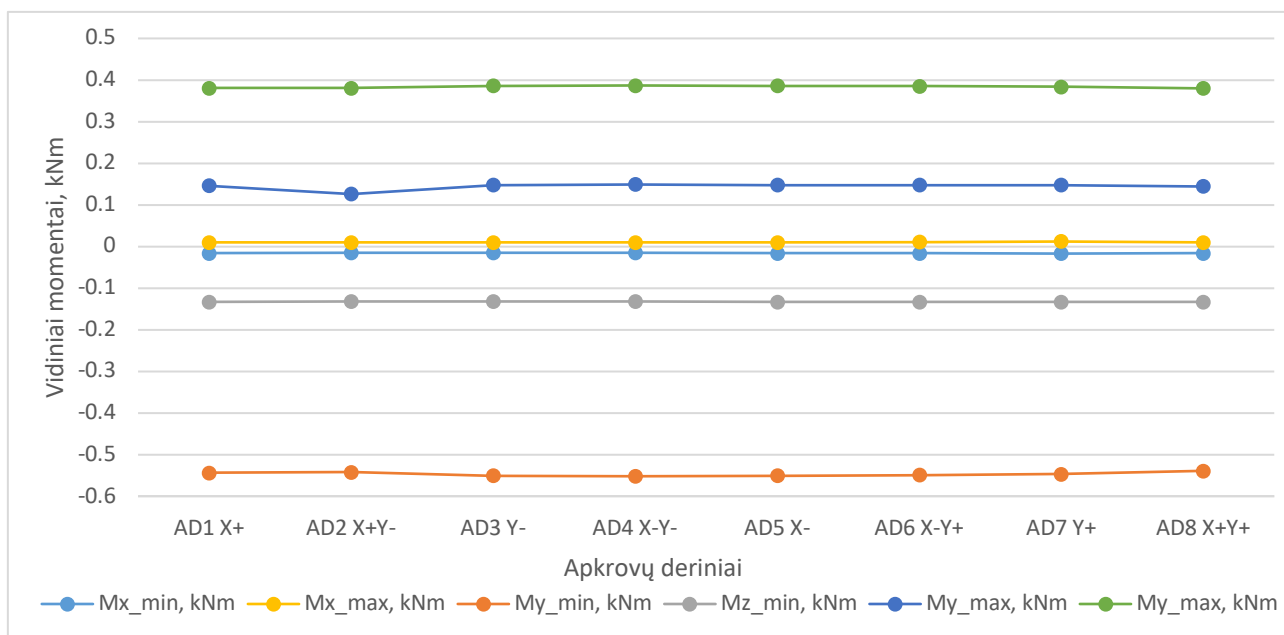
Siekiant aiškiau įvertinti skirtingų apkrovų derinių poveikį rėminės santvarinės konstrukcijos elementams ir lentelėse pateiktų rezultatų palyginimą, vidinių jėgų ekstremaliosios reikšmės papildomai pateikiamos grafiškai.



18 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių jėgų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių

Iš pateikto grafiko matyti, kad skirtingų apkrovų derinių poveikis rėminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių jėgų ekstremaliosioms reikšmėms nėra esminis, kadangi reikšmės tarp atskirų derinių kinta nežymiai. Tai rodo, jog konstrukcijos elgsena nagrinėjamų apkrovų derinių atžvilgiu išlieka stabili.

Vertinant apkrovų derinių įtaką rėminės santvarinės konstrukcijos elementų vidiniams momentams, jų ekstremaliosios reikšmės papildomai pateikiamos grafiškai.



19 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių

Grafinė analizė patvirtina, kad apkrovų derinių kaita sukelia tik nežymius vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių pokyčius, o konstrukcijos darbo pobūdis nagrinėjamų derinių atžvilgiu išlieka stabilus.

Gembinės santvarinės konstrukcijos elementų vidinės jėgos pateikiamos **10** lentelė.

10 lentelė. Gembinės santvarinės elementų vidinės jėgos

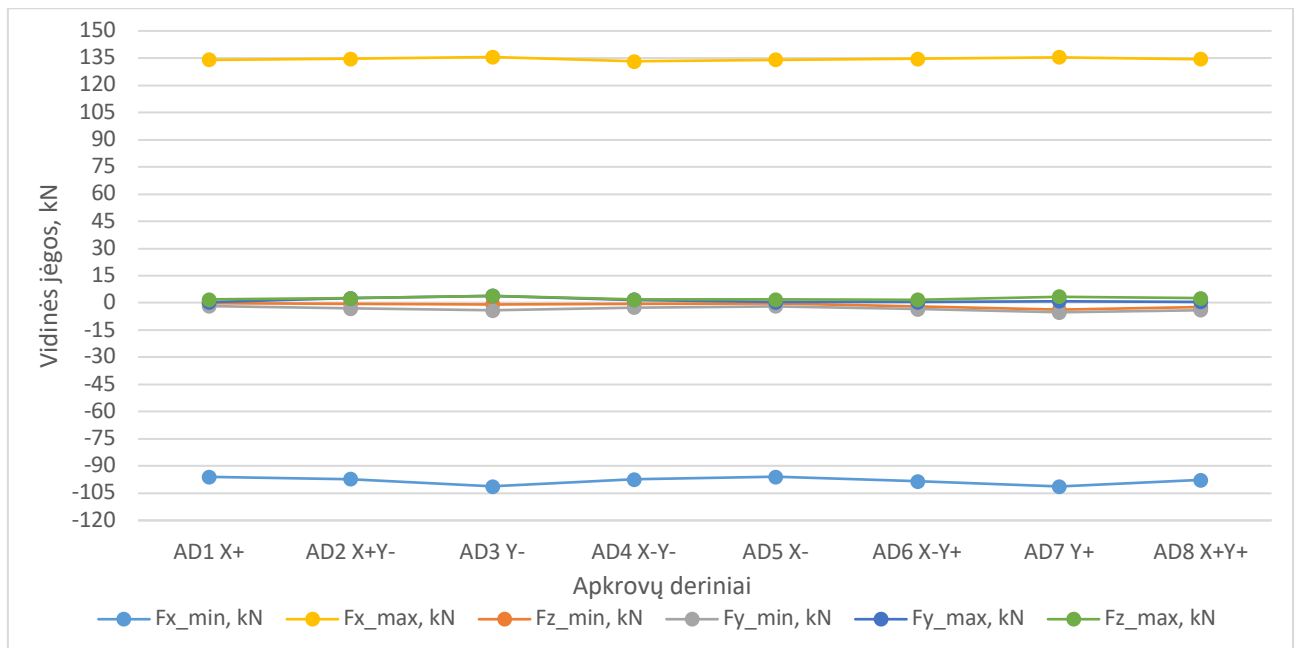
Apkrovos derinys	Ašinė jėga F_x , kN		Išilginė jėga F_y , kN		Skersinė jėga F_z , kN		Sukimo momentas M_x , kN·m		Lenkimo momentas M_y , kN·m		Lenkimo momentas M_z , kN·m	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
AD1 X+	-95,981	134,028	-0,346	0,408	-1,774	1,802	-0,014	0,009	-0,417	0,349	-0,038	0,075
AD2 X+Y-	-97,222	134,600	-0,444	2,496	-3,155	2,483	-0,019	0,009	-0,399	0,373	-0,191	0,149
AD3 Y-	-101,194	135,616	-0,740	3,814	-4,174	3,856	-0,024	0,009	-0,393	0,386	-0,232	0,282
AD4 X-Y-	-97,319	133,275	-0,394	1,750	-2,510	1,901	-0,018	0,007	-0,402	0,362	-0,097	0,134
AD5 X-	-96,009	134,088	-0,344	0,420	-1,80	1,79	-0,015	0,009	-0,417	0,349	-0,040	0,078
AD6 X-Y+	-98,420	134,605	-1,788	0,500	-3,39	1,67	-0,011	0,011	-0,429	0,332	-0,130	0,120
AD7 Y+	-101,273	135,458	-3,729	0,950	-5,19	3,51	-0,011	0,021	-0,442	0,356	-0,242	0,247
AD8 X+Y+	-97,793	134,469	-2,362	0,644	-3,97	2,53	-0,012	0,014	-0,432	0,325	-0,165	0,161

Gembinės santvarinės konstrukcijos didžiausios ašinės jėgos F_x neigiama reikšmė yra -101,273 kN derinyje AD7 Y+, o teigiama yra +135,616 kN derinyje AD3 Y-.

Skersinių jėgų F_y didžiausia neigiama reikšmė – -3,729 kN derinyje AD7 Y+, o teigiama – +3,814 kN. AD3 Y- derinyje. F_z didžiausia neigiama reikšmė – -5,19 kN derinyje AD7 Y+, o teigiama – +3,86kN.

Momentų analizė parodė, kad sukimo momentai M_x konstrukcijoje yra nežymūs ir konstrukcijos darbo pobūdžio nepakeičia. Didžiausia neigiama M_y reikšmė – -0,442kN·m derinyje AD7 Y+ ir teigiama – +0,386 kN·m gauta AD3 Y- derinyje. Vertinant lenkimo momentus M_z didžiausia neigiama M_z reikšmė – -0,242 kN·m susidaro derinyje AD7 Y + o maksimali teigiama reikšmė – +0,282 kN·m, gaunama AD3 Y- derinyje.

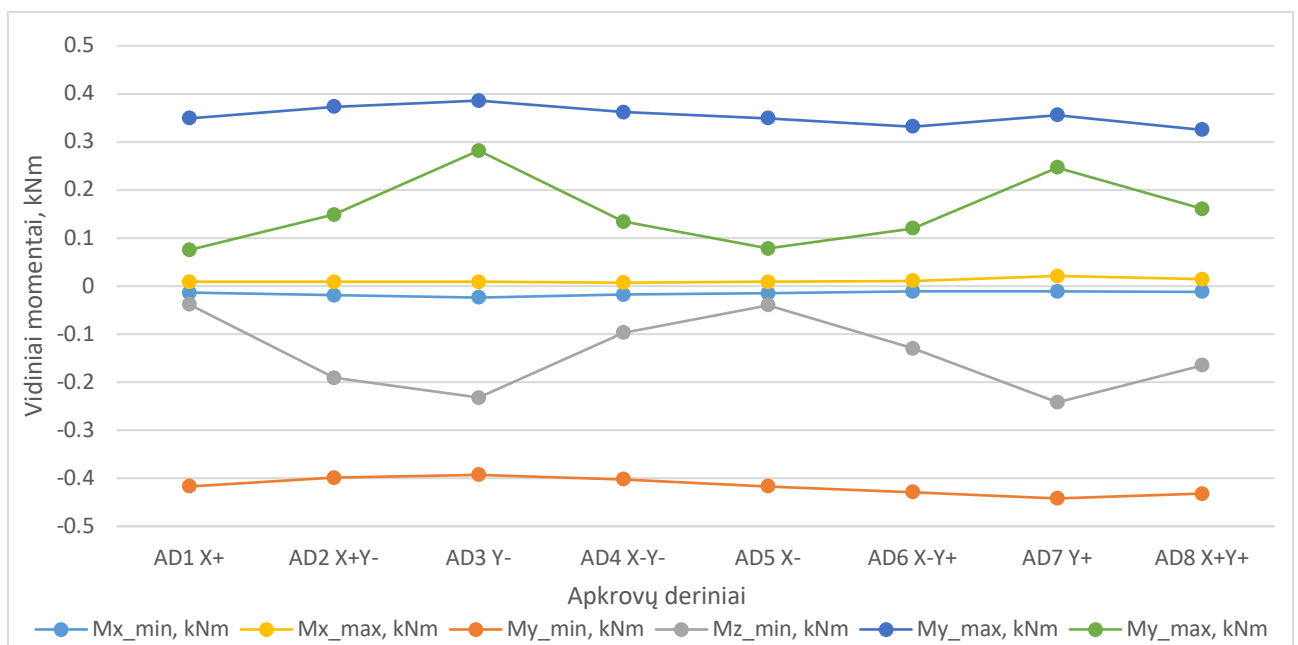
Vertinant gembinės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių jėgų ekstremaliųjų reikšmių pasiskirstymą skirtinguose apkrovų deriniuose, pateikiama jų grafinė analizė.



20 pav. Geminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių

Pateiktas grafikas parodo, kad, nors atskiruose apkrovų deriniuose susidaro skirtingos ekstremaliosios vidaus jėgų reikšmės, bendros jų kitimo tendencijos išlieka panašios, o apkrovų derinių įtaka konstrukcijos elgsenai nėra esminė.

Geminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių momentų ekstremaliosios reikšmės, priklausomai nuo apkrovų derinių, pateikiamos grafiniu pavidalu.



21 pav. Geminės santvarinės konstrukcijos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių

Pateiktas grafikas rodo, kad geminės santvarinės konstrukcijos sukimo momentai M_x visuose nagrinėjamuose apkrovų deriniuose išlieka nežymūs. Didžiausi pokyčiai stebimi lenkimo momentų

M_{z_min} ir M_{y_max} reikšmėse, kurios yra jautresnės apkrovų krypties pasikeitimui, tačiau jų kitimas tarp atskirų apkrovų derinių išlieka ribotas. Tai leidžia teigti, kad apkrovų derinių įtaka konstrukcijos momentiniam darbui nėra esminė.

Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinės jėgos pateikiamos **11 lentelė**.

11 lentelė. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinės jėgos

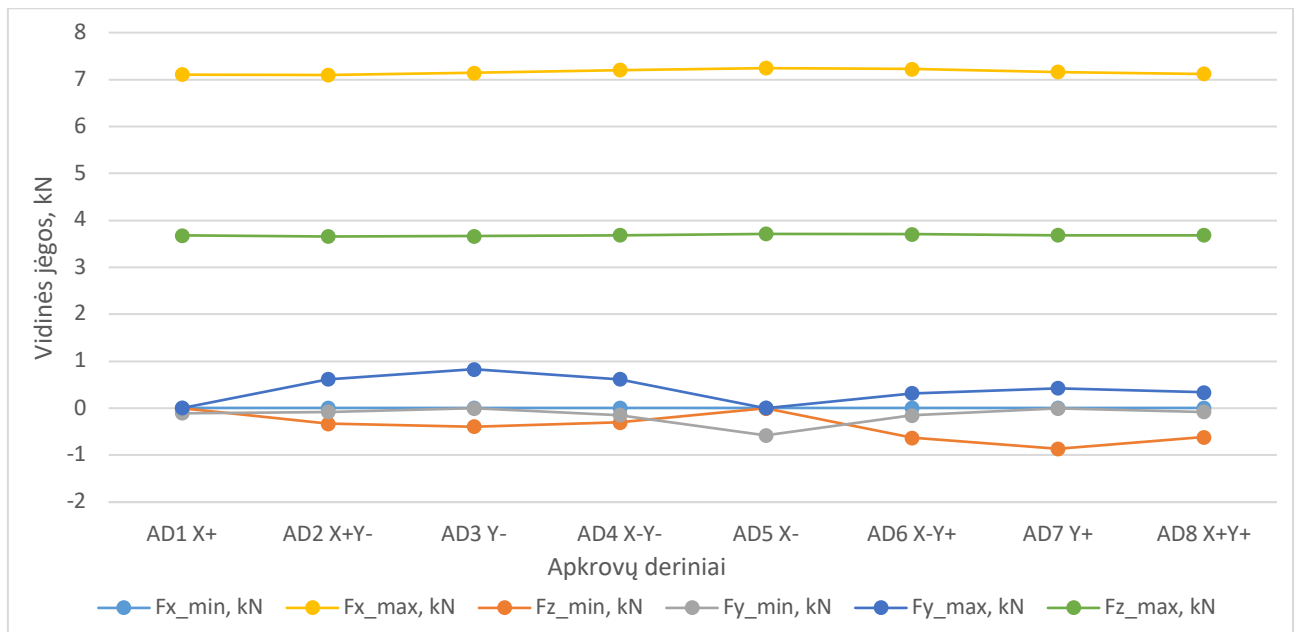
Apkrovos derinys	Ašinė jėga F_x , kN		Išilginė jėga F_y , kN		Skersinė jėga F_z , kN		Sukimo momentas M_x , kN·m		Lenkimo momentas M_y , kN·m		Lenkimo momentas M_z , kN·m	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
AD1 X+	0,006	7,106	-0,005	0,001	-0,103	3,680	-0,013	0,000	-17,967	17,940	-0,010	0,005
AD2 X+Y-	0,006	7,097	-0,331	0,620	-0,077	3,657	-0,984	0,000	-17,886	17,867	-0,728	2,718
AD3 Y-	0,006	7,141	-0,395	0,831	-0,004	3,664	-1,146	0,000	-17,969	17,968	-0,848	3,436
AD4 X-Y-	0,006	7,203	-0,301	0,614	-0,146	3,687	-0,832	0,000	-18,147	18,572	-0,614	2,574
AD5 X-	0,006	7,243	-0,001	0,006	-0,578	3,712	-0,001	0,000	-18,317	19,858	-0,001	0,016
AD6 X-Y+	0,006	7,226	-0,629	0,318	-0,154	3,708	0,000	0,910	-18,257	18,707	-2,681	0,674
AD7 Y+	0,006	7,164	-0,864	0,426	-0,003	3,685	0,000	1,309	-18,076	18,075	-3,650	0,971
AD8 X+Y+	0,006	7,123	-0,620	0,339	-0,077	3,683	0,000	1,020	-18,011	17,992	-2,750	0,755

Cilindrinės-kūginės gembinės atramos didžiausios ašinės jėgos F_x neigiama reikšmė yra 0,006 kN visuose nagrinėtuose deriniuose, o teigiama yra +7,243 kN derinyje AD5 X-.

Skersinių jėgų F_y didžiausia neigiama reikšmė – -3,73 kN derinyje AD7 Y+, o teigiama – +3,81 kN. F_z didžiausia neigiama reikšmė – -5,19 kN derinyje AD7 Y+, o teigiama – +3,86 kN.

Momentų analizė parodė, kad sukimo momentai M_x konstrukcijoje yra nežymūs ir konstrukcijos darbo pobūdžio nepakeičia. Didžiausia neigiama M_y reikšmė – -0,442 kN·m derinyje AD7 Y+ ir teigiama – +0,386 kN·m gauta AD3 Y- derinyje. Vertinant lenkimo momentus M_z didžiausia neigiama M_z reikšmė – -0,242 kN·m susidaro derinyje AD7 Y+ o maksimali teigiama reikšmė – +0,282 kN·m, gaunama AD3 Y- derinyje.

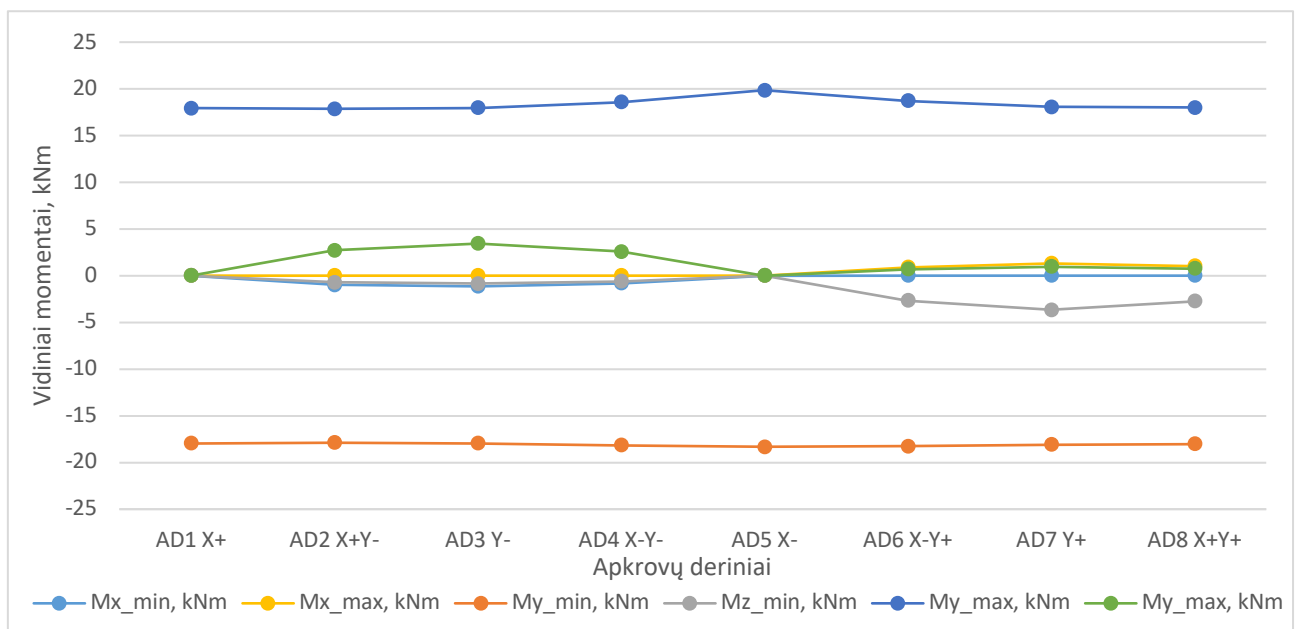
Siekiant aiškiau pavaizduoti cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinių jėgų ir momentų ekstremaliųjų reikšmių pasiskirstymą tarp skirtingų apkrovų derinių, gauti rezultatai pateikiami grafiniu pavidalu.



22 pav. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinių jėgų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių

Iš grafiko matyti, kad nagrinėjamų apkrovų derinių įtaka cilindrinės-kūginės gembinės atramos vidinių jėgų pasiskirstymui yra palyginti nedidelė, o ekstremaliosios reikšmės tarp atskirų derinių kinta nežymiai. Tai patvirtina, kad konstrukcijos darbas išlieka stabilus ir jautriausiai reaguoja tik į apkrovų krypties pasikeitimą, tačiau esminių vidaus jėgų šuolių nepasireiškia.

Cilindrinės-kūginės gembinės atramos lenkimo ir sukimo momentų ekstremaliųjų reikšmių kitimas, priklausomai nuo skirtingų apkrovų derinių, papildomai pateikiamas grafiškai.

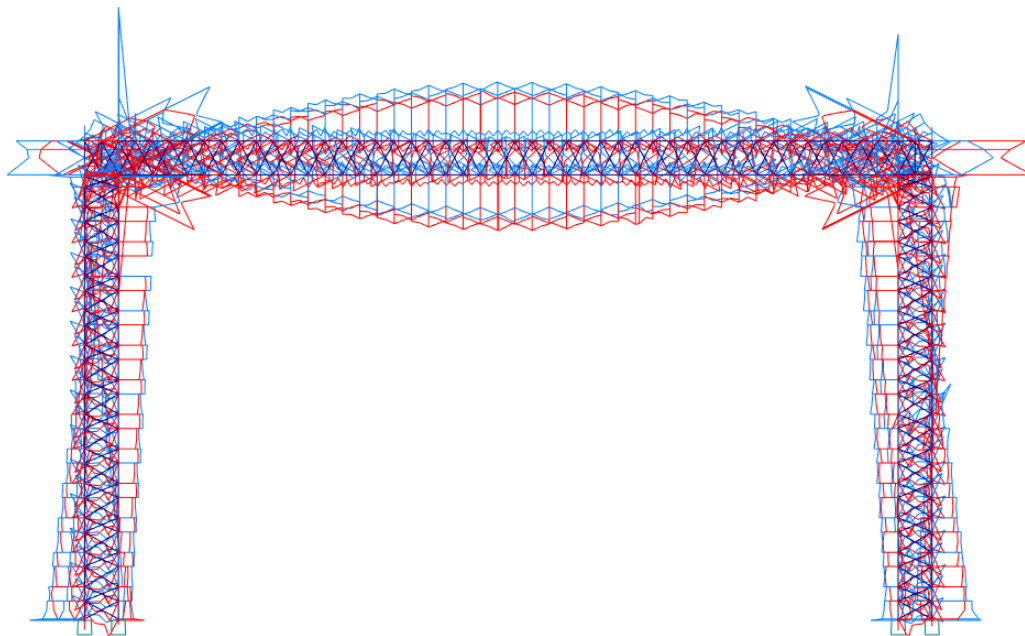


23 pav. . Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų vidinių momentų ekstremaliųjų reikšmių priklausomybė nuo apkrovų derinių

Iš grafiko matyti, kad sukimo momentai M_x visuose apkrovų deriniuose išlieka labai maži ir artimi nuliui, todėl neturi reikšmingos įtakos konstrukcijos darbui. Tuo tarpu lenkimo momentai M_y ir M_z

pasižymi didesniu jautrumu apkrovų krypties pasikeitimui: M_y reikšmės išlieka stabilios ir kinta nežymiai, o M_z rodo aiškesnius pokyčius, ypač esant apkrovų deriniams su vertikalia apkrovos dedamąja.

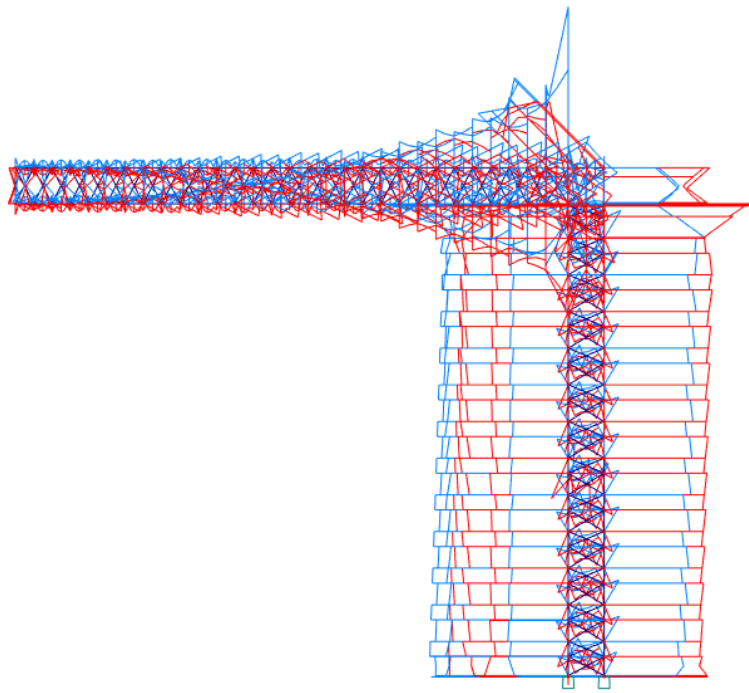
24 pav. paveiksle pateikiamas nagrinėjamos rėminės santvarinės konstrukcijos įtempių pasiskirstymas.



24 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas rėminei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 22 mm ir 40 mm

Pateiktoje įtempių diagramoje matyti, kad didžiausios įtempių reikšmės susidaro horizontaliosios sijos centrinėje dalyje, kur elementai patiria didžiausius lenkimo momentus dėl vertikalųjų ir horizontaliųjų apkrovų poveikio.

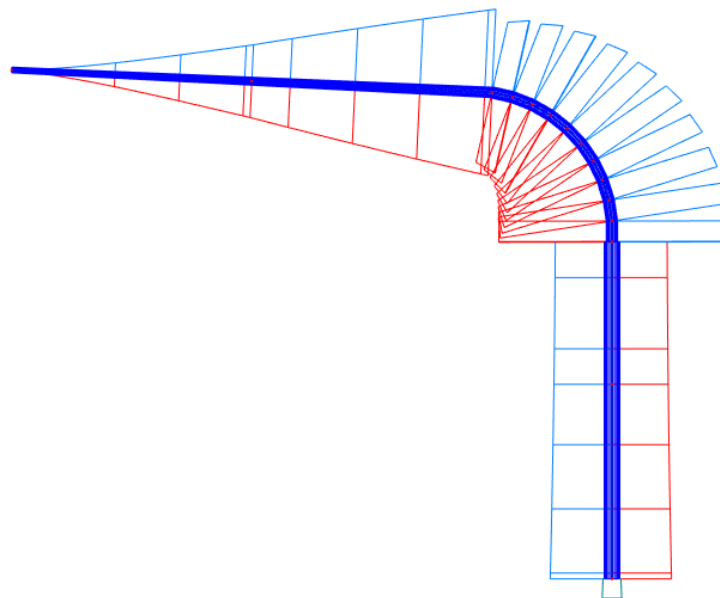
Gembinės santvarinės konstrukcijos įtempių pasiskirstymas pateikiamas 25 pav.



25 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas gombinei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 22 mm ir 40 mm

Iš pateiktos įtempių schemos matyti, kad didžiausios įtempių reikšmės susiformuoja kolonos įtvirtinimo į pamatą srityje ir konsolės bei kolonos sandūroje, kur susidaro didžiausi lenkiamieji momentai dėl vertikalųjų ir horizontaliųjų apkrovų poveikio.

Cilindrinės-kūginės gembinės atramos įtempių pasiskirstymas pateikiamas 26 pav.



26 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas cilindrinei-kūginei gombinei atramai, kurios sienelės storis yra 7 mm

Pateiktoje įtempių diagramoje matyti, kad didžiausios įtempių reikšmės susidaro lenktoje atramos dalyje – stiebo ir horizontaliosios sijos perėjimo zonoje, kur dėl geometrinio išlinkimo ir apkrovų poveikio formuojasi didžiausi lenkiamieji momentai.

3.2. Elementų išnaudojimas

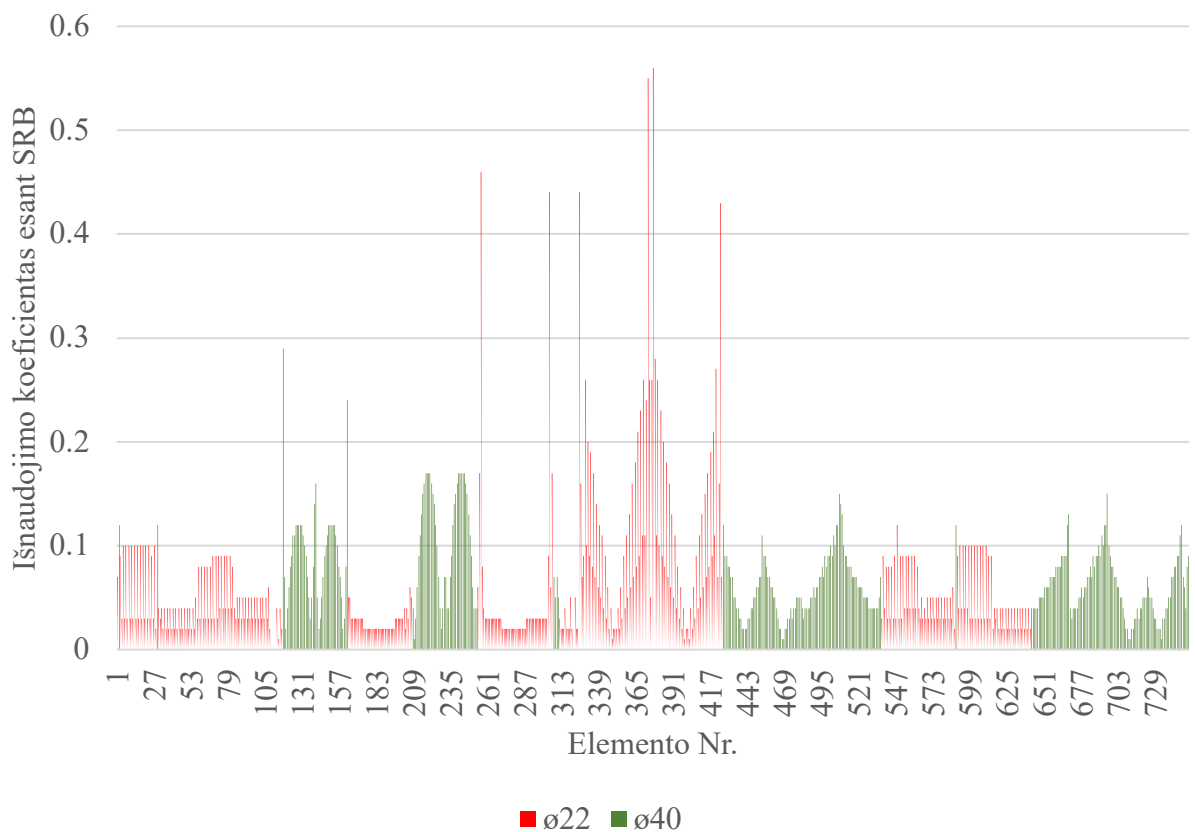
Atliekant elementų išnaudojimo analizę „Autodesk Robot Structural Analysis 2021” programoje sudaroma lentelė, kurioje pateikiamos strypų išnaudojimo reikšmės. Mažiausios išnaudojimo reikšmės parodo elementus, kuriuose medžiagos naudojimas yra nepakankamai efektyvus, o didžiausios leidžia įvertinti konstrukcijos artėjimą prie ribinių būvių. Bendras visų elementų išnaudojimo vidurkis naudojamas konstrukcijos racionalumui vertinti: kuo vidurkis artimesnis leistinai ribai (1,0), tuo medžiaga konstrukcijoje panaudojama efektyviau.

Toliau pateikiami elementų apkrovimo (išnaudojimo) koeficientai rėminei santvarinei konstrukcijai, apskaičiuoti pagal STR ir EN 1993-1-1 reikalavimus. 12 lentelė nurodomi skirtingų profilių santvaros ir rėmo elementų (strypų) panaudojimo mažiausi ir didžiausi rodikliai, kurie parodo, kokią dalį leistino stiprio kiekvienas elementas išnaudoja ir kuriam deriniui veikiant.

12 lentelė. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 22 mm ir 40 mm, išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės

Elementas		Elemento skersmuo, mm	Išnaudojimo koeficientas	Apkrovų derinys
min.	321	22	0,000	AD3 Y-
	209	40	0,010	AD3 Y-
	109/112	LOV 120x80x10	0,030	AD8 X+Y+/AD7 Y+
max.	377	22	0,560	AD8 X+Y+
	117	40	0,290	AD4 X-Y-
	111	LOV 120x80x10	0,080	AD4 X-Y-

Analizė parodė, kad apkrovos pasidalina tolygiai ir didžioji dalis santvaros elementų, ypač 22 mm skersmens strypai, pasižymi nedideliais išnaudojimo koeficientais, svyruojančiais nuo 0,000 iki 0,560. Elementų, kurių skersmuo yra 40 mm, išnaudojimo reikšmės vyrauja nuo 0,010 iki 0,290. Elementai LOV 120×80×10, naudojami mazgų vietose, taip pat pasižymi nedideliais panaudojimo koeficientais — nuo 0,030 iki 0,080. Išnaudojimo koeficientų diagrama pateikta 27 pav.paveiksle.



27 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios skerspjūviai yra $\varnothing 22$ mm ir $\varnothing 40$ mm, išnaudojimo koeficientai

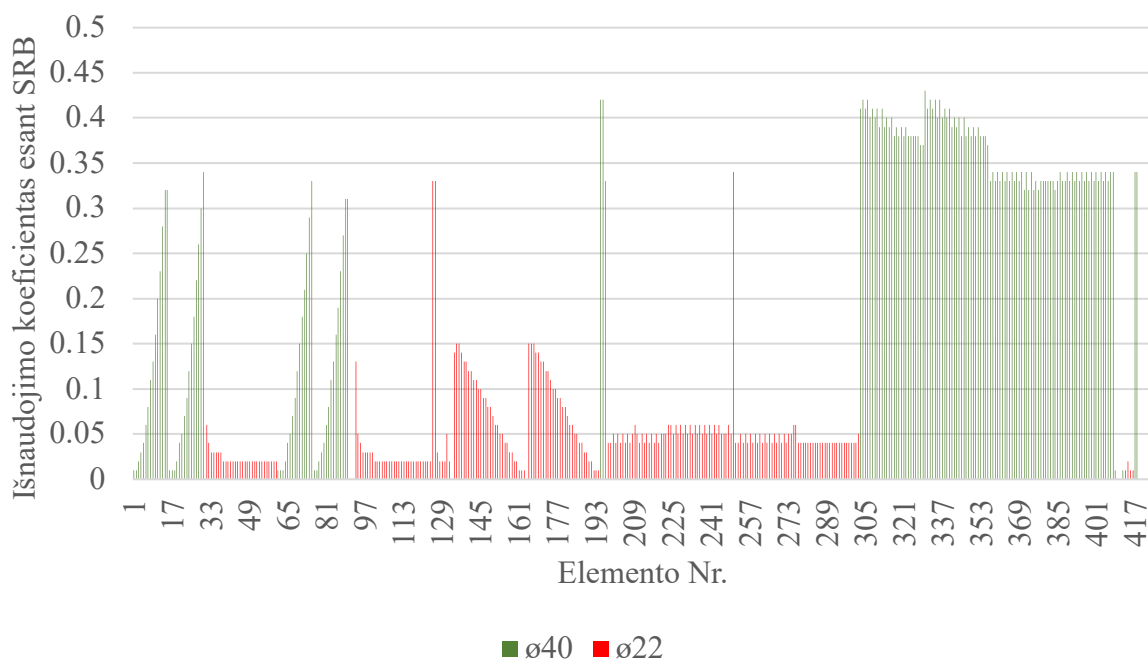
Vertinant rėminės santvarinės konstrukcijos elementų išnaudojimo koeficientus, matyti, kad nė vienas elementas neviršija leistinos stiprio ribos: didžiausia užfiksuota koeficiento reikšmė yra apie 0,55 (55 %), o daugumos elementų panaudojimas neviršija 0,1. Apskaičiuotas vidutinis išnaudojimo koeficientas sudaro tik apie 7 % leistino stiprio.

Gembinės santvarinės konstrukcijos mažiausi ir didžiausi elementų išnaudojimo rodikliai pateikiami 13 lentelė.

13 lentelė. Gembinės santvarinės konstrukcijos išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės

Elementas		Elemento skersmuo, mm	Išnaudojimo koeficientas	Apkrovų derinys
min.	410/411	40	0,000	AD1 X+/AD7 Y+
	161	22	0,010	AD3 Y-
	421	PLOKST1	0,050	AD3 Y-
	91/92	PLOKST2	0,260	AD3 Y-/AD7 Y+
max.	330	40	0,430	AD3 Y-
	133/164	PLOKST2	0,400	AD3 Y-/AD7 Y+
	423	PLOKST1	0,140	AD3 Y-/AD7 Y+
	135	22	0,150	AD7 Y+

Gembinės santvarinės konstrukcijos elementų išnaudojimo rodikliai rodo, kad mažiausiai apkrauti yra 22 mm skersmens strypai, kurių išnaudojimo koeficientai siekia nuo 0,010–0,150, todėl šie elementai naudojami ypač neefektyviai. 40 mm skersmens elementai, kurių išnaudojimas nuo 0,000–0,430 taip pat pasižymi mažu apkrovimu. Šiek tiek didesnę išnaudojimą demonstruoja elementai iš plokščiųjų profilių PLOKST1 ir PLOKST2, kurių išnaudojimo koeficientai svyruoja nuo 0,050 iki 0,400. Visų labiausiai apkrautų elementų kritinis apkrovų derinys yra AD3 Y–, o tai rodo, kad didžiausią įtaką konstrukcijos darbui turi rytų krypties vėjas. Išnaudojimo koeficientų diagrama pateikta 28 pav. paveiksle.



28 pav. Gembinės santvarinės konstrukcijos išnaudojimo rodiklių vidurkiai

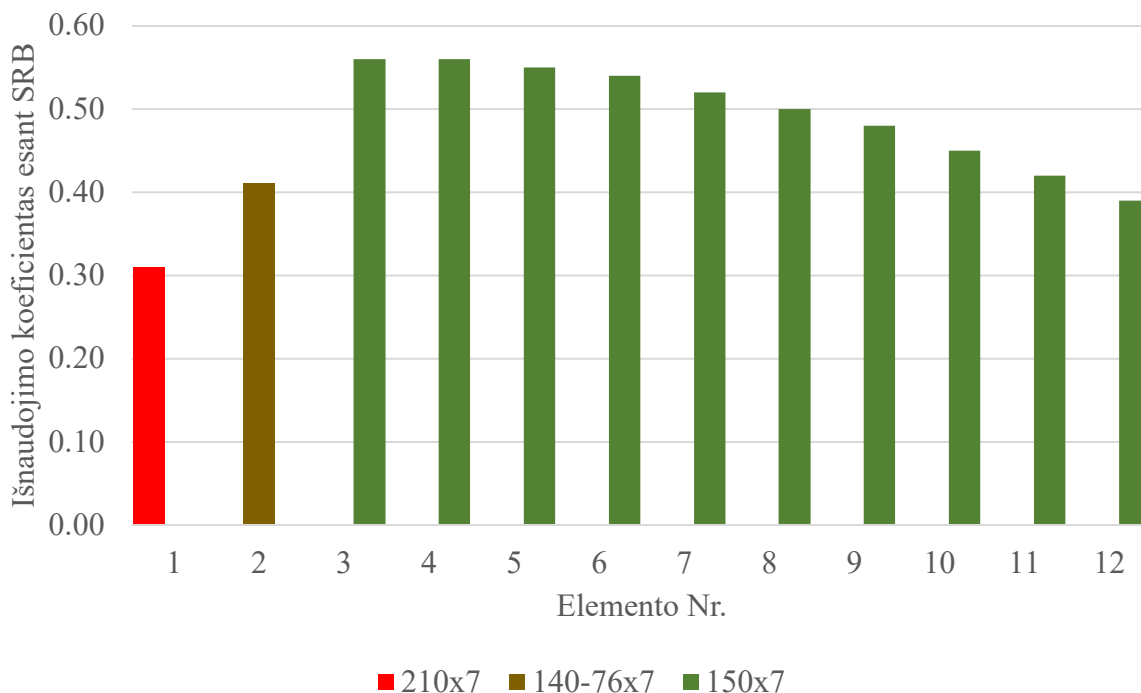
Išnaudojimo rodiklių analizė gembinei santvarinei konstrukcijai rodo, kad elementai neviršija leistino stiprio ribos: didžiausias užfiksuotas išnaudojimo koeficientas 40 mm skersmens elementui siekia apie 0,42 (42 %), o didžiausias apskaičiuotų išnaudojimo koeficientų vidurkis sudaro maždaug 15 %.

Cilindrinės-kūginės gembinės atramos mažiausi ir didžiausi elementų išnaudojimo rodikliai pateikiami 14 lentelė.

14 lentelė. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės

Elementas	Elemento skersmuo, mm	Išnaudojimo koeficientas	Apkrovų derinys
1	210	0,310	AD6 X-Y+
12	150	0,390	AD7 Y+
2	140-76	0,410	AD7 Y+
3/4	150	0,560	AD6 X-Y+

Cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementų išnaudojimo rodikliai rodo, kad mažiausiai apkrautas yra 210 mm skersmens vamzdis, kurio išnaudojimo koeficientas yra 0,310. 150 mm skersmens vamzdžio išnaudojimas vyrauja nuo 0,390 iki 0,560, o kūginio vamzdžio, kurio skersmuo yra 140-76 mm išnaudojimo koeficientas lygus 0,410. Didžiausią išnaudojimą sukelia AD6 X-Y+ ir AD7 Y+ apkrovų deriniai ir tai rodo, kad didžiausią įtaką atramos elementų darbui turi vakarų ir pietvakarių krypties vėjas. Išnaudojimo koeficientų diagrama pateikta 29 pav. paveiksle.



29 pav. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos, kurios sienelės storis 7 mm, išnaudojimo koeficientai

Diagramoje matyti, kad cilindrinės-kūginės gembinės atramos elementai taip pat neviršija leistinos stiprio ribos. Šios atramos išnaudojimo vidurkis siekia apie 47%.

3.3. Elementų išnaudojimo didinimas

Kadangi nagrinėtų konstrukcijų elementų išnaudojimo rodikliai yra maži (0–56 %) ir rodo neefektyvų medžiagos panaudojimą, konstrukcija toliau analizuojama taikant priartėjimo būdą. Šiuo metodu sistemingai keičiami elementų profilių skersmenys ir vertinama, kaip kinta konstrukcijos stiprumo, masės ir išnaudojimo charakteristikos. Tokiu būdu siekiama nustatyti, kuriuos elementus galima sumažinti neprarandant saugos ir rasti skerspjuvių derinius, užtikrinančius didžiausią konstrukcijos efektyvumą. Siekiant rasti racionalesnį sprendinį nekeičiant konstrukcijų topologijos, analizuojami tik elementų skerspjuvių matmenys, t. y. strypų ir vamzdžių skersmenys bei sienelių storiai. Proporcingai didinant arba mažinant šiuos parametrus, vertinama jų įtaka konstrukcijos masei ir stiprumui, siekiant sumažinti medžiagų sąnaudas ir kartu išlaikyti reikiamas stiprio atsargas.

Skaičiavimuose siekiama, kad didžiausias elementų išnaudojimas neviršytų vieneto, o vidutinis išnaudojimas būtų kuo didesnis, nepažeidžiant stiprumo reikalavimų. Tai užtikrina konstrukcijos efektyvų ir racionalų medžiagų panaudojimą.

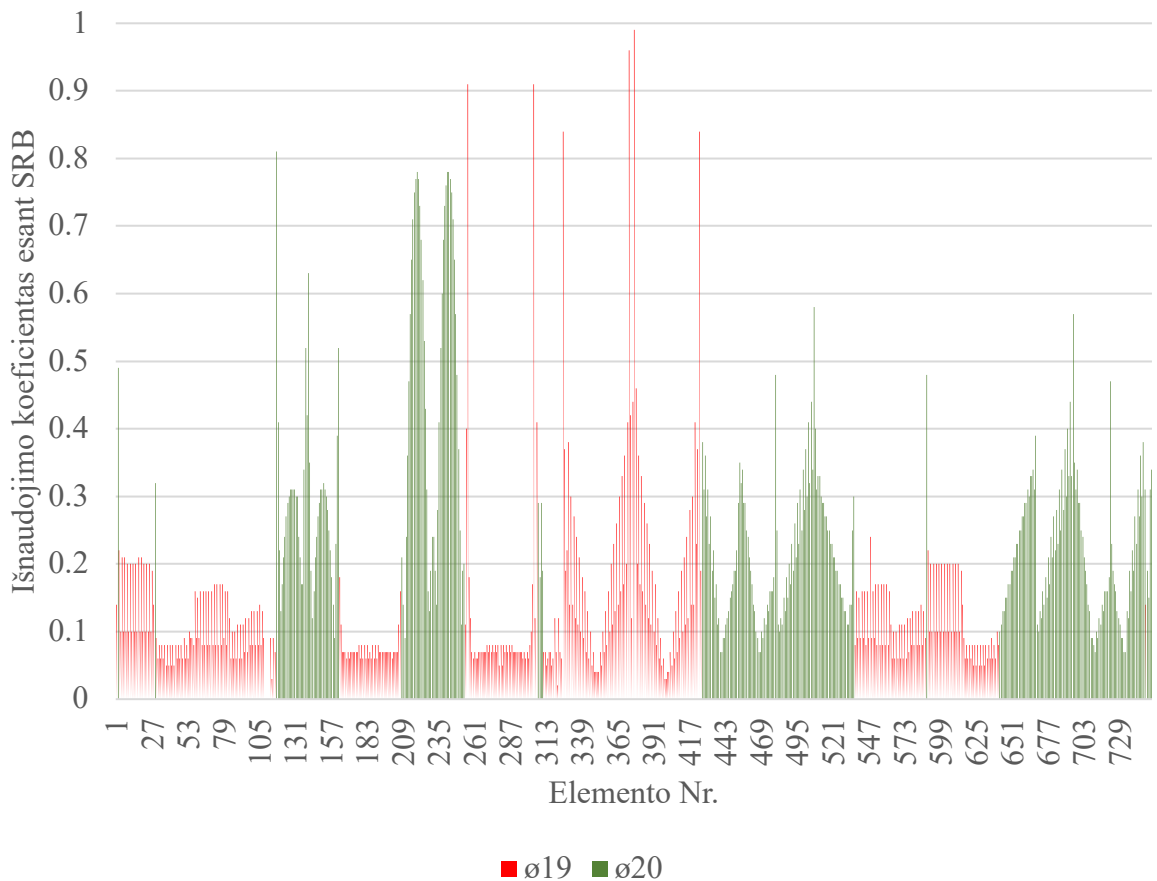
Rėminės santvarinės konstrukcijos pirminiai profiliai yra mažiausiai išnaudojami iš visų trijų nagrinėjamų konstrukcijų. Programoje „Autodesk Robot Structural Analysis 2021“ esami profiliai,

kurių skersmenys 22 mm ir 40 mm, priartėjimo būdu pakeisti atitinkamai į 19 mm ir 20 mm skersmens profilius. 15 lentelė pateiktos mažiausios ir didžiausios išnaudojimo koeficientų reikšmės.

15 lentelė. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm, išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės

Elementas		Elemento skersmuo, mm	Išnaudojimo koeficientas	Apkrovų derinys
min.	109	LOV 120x80x10	0,020	AD3 Y-
	321	19	0,020	AD7 Y+
	439	20	0,070	AD7 Y+
max.	377	19	0,990	AD8 X+Y+
	117	20	0,810	AD3 Y-
	110	LOV 120x80x10	0,040	AD7 Y+

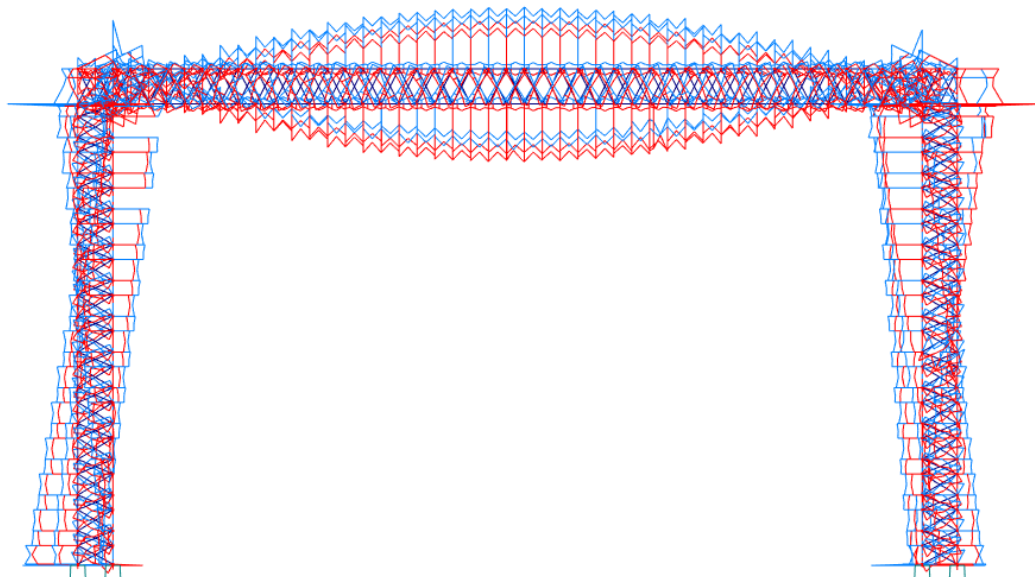
Palyginus 12 ir 15 lentelių, pateikiančių pradinės ir optimizuotos konstrukcijos išnaudojimo koeficientų duomenis, matyti, kad sumažinus strypinių elementų skersmenis smarkiai padidėjo ribinių elementų skerspjūvių išnaudojimas. Kritinio elemento 377 išnaudojimo koeficientas padidėjo nuo 0,56 iki 0,99, t. y. maždaug 1,8 karto, o elemento 117 – nuo 0,29 iki 0,81, tai yra apie 2,8 karto. Tuo tarpu lovinio profilio LOV120×80×10 parametrai nebuvo keičiami, tačiau elementų išnaudojimas sumažėjo: minimalus išnaudojimo koeficientas sumažėjo nuo 0,03 iki 0,02 (apie 0,7 karto), o didžiausias – nuo 0,08 iki 0,04, t. y. maždaug perpus. Tai rodo, kad po optimizacijos didesnę apkrovų dalį perima sumažinto skersmens strypiniai elementai, o loviniai profiliai išnaudojami mažiau, o maksimalus išnaudojimo koeficientas (0,99) praktiškai pasiekia leistiną ribą, todėl tolesnis skersmenų mažinimas būtų nesuderinamas su stiprumo reikalavimais. Išnaudojimo koeficientų diagrama pateikta 30 pav.



30 pav. Rėminės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm, išnaudojimo koeficientai

Šioje diagramoje pavaizduotas visų konstrukcijos elementų skerspjūvių išnaudojimo koeficientų pasiskirstymas pagal elementų numerius. Matyti, kad didžioji dalis 19 mm ir 20 mm skersmens profilių dirba labai toli nuo ribinio būvio – jų išnaudojimo koeficientas nesiekia 0,2, tik pavieniai profiliai priartėja prie 0,8–1,0. Vidutinis visų elementų išnaudojimas yra apie 18 %, todėl galima teigti, kad konstrukcija apskritai pasižymi didele saugos atsarga, o tolesnį profilių mažinimą riboja ne bendra konstrukcija, o keli lokalūs, labiausiai apkrauti elementai.

Pavojingiausi įtempiai fiksuojami apkrovų derinyje AD7 Y-, įtempių pasiskirstymo dėsningumas pateikiamas 31 pav.



31 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas rėminei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm

Pakeistų profilių konstrukcijos įtempių diagramoje matyti, kad didžiausios įtempių reikšmės, taip pat kaip ir pirminėje diagramoje, susidaro horizontaliosios sijos centrinėje dalyje.

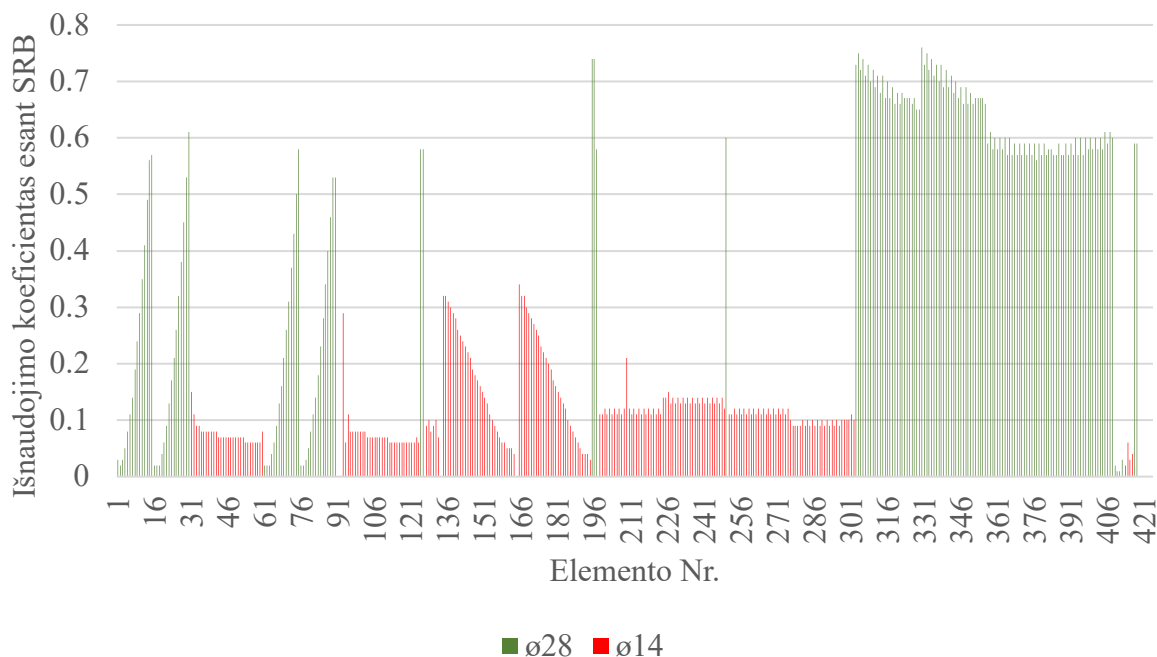
Gembinės santvarinės konstrukcijos pradiniai 22 mm ir 40 mm profiliai pakeisti į 14 mm ir 28 mm profilius. 16 lentelė pateiktos mažiausios ir didžiausios išnaudojimo koeficientų reikšmės.

16 lentelė. Gembinės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 14 mm ir 28 mm, išnaudojimo rodiklių mažiausios ir didžiausios reikšmės

Elementas		Elemento skersmuo, mm	Išnaudojimo koeficientas	Apkrovų derinys
min.	410	28	0,010	AD7 Y+
	413	14	0,010	AD3 Y-
	420	PLOKST1	0,070	AD3 Y-
	91/92	PLOKST2	0,220	AD3 Y-/AD7 Y+
max.	330	28	0,760	AD3 Y-
	133	PLOKST2	0,360	AD3 Y-
	419/423	PLOKST1	0,150	AD3 Y-/AD7 Y+
	165	14	0,340	AD7 Y+

Palyginus 13 ir 16 lentelių duomenis matyti, kad sumažinus strypų skersmenis daugumos elementų skerspjūvių išnaudojimas padidėjo nežymiai. Didžiausias pokytis stebimas elemento 330 atveju: jo išnaudojimo koeficientas padidėjo nuo 0,43 iki 0,76, t. y. maždaug 1,8 karto. Kito ribinio elemento 165 išnaudojimo koeficientas išaugo nuo 0,15 iki 0,34, tai yra apie 2,3 karto. Plokštinių profilių PLOKST1 ir PLOKST2 geometrija nebuvo keičiama, tačiau strypinių elementų skersmens mažinimas turėjo įtakos ir plokštinių elementų išnaudojimo rodikliams: PLOKST1 plokštės mažiausio išnaudojimo reikšmė padidėjo nuo 0,05 iki 0,07 (apie 1,4 karto), o PLOKST2 plokštės

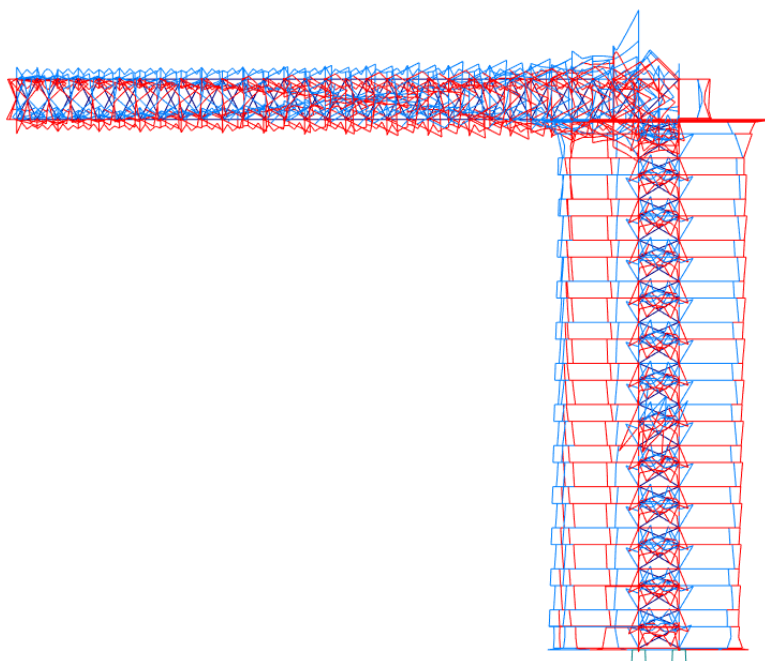
minimalus išnaudojimas sumažėjo nuo 0,26 iki 0,22 apie 0,85 karto, maksimalus – nuo 0,40 iki 0,36 apie 0,9 karto, kas rodo tolygesnį apkrovų pasiskirstymą tarp strypinių ir plokštinių elementų. Išnaudojimo koeficientų diagrama pateikta 32 pav.



32 pav. Geminės santvarinės konstrukcijos, kurios profiliai yra 14 mm ir 28 mm, išnaudojimo koeficientai

Bendras konstrukcijos elementų skerspjūvių išnaudojimo vidurkis siekia apie 28 %. Tai rodo didelę konstrukcijos saugos atsargą ir gana konservatyvų profilių parinkimą. Tolesnis skerspjūvių mažinimas nebegalimas, nes ribiniai elementai, sumažinus jų matmenis, viršytų plieno takumo ribą. Taigi konstrukcijos racionalumą riboja ne vidutinės, o lokalsios įtempimų reikšmės, o didesnis efektyvumas galėtų būti pasiektas didinant skirtingų profilių skaičių konstrukcijoje, o ne tik koreguojant dviejų profilių matmenis. Vis dėlto didinant skirtingų profilių kiekį, konstrukcija tampa technologiškai sudėtingesnė (gamybės ir surinkimo požiūriu).

Geminei santvarinei konstrukcijai pavojingiausi įtempiai fiksuojami apkrovų AD7 Y- derinyje, įtempių pasiskirstymo dėsningumas pateikiamas 33 pav.



33 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas rėminei santvarinei konstrukcijai, kurios profiliai yra 19 mm ir 20 mm

Cilindrinės-kūginės gembinės atramos vamzdžių profilių parinkimas atliekamas keičiant profilių sienelės storius, o efektyvumas vertintas pagal medžiagos išnaudojimo rodiklius (*angl. utilization ratio*), kurie apskaičiuoti pagal saugos ribinio būvio (SRB) kriterijus. „Autodesk Robot Structural Analysis 2021” aplinkoje parinkti profiliai: 210 mm; 150 mm ir 140-76 mm skersmens vamzdžiai, kurių sienelės storis kinta nuo 3 mm iki 7 mm.

Įvertinus skaičiuotinius įtempius ir stiprumo sąlygas, galutinai parinkti profiliai, tenkinantys stiprumo reikalavimus: 140–76 mm ir 150 mm skersmens vamzdžiams parinkta 5 mm storio sienelė, o 210 mm skersmens vamzdžiui – 3 mm storio sienelė. Toks profilių pasirinkimas užtikrina, kad didžiausi normaliniai įtempiai neviršija S235 klasės plieno takumo ribos ir vidutiniškai siekia apie 190-205 MPa.

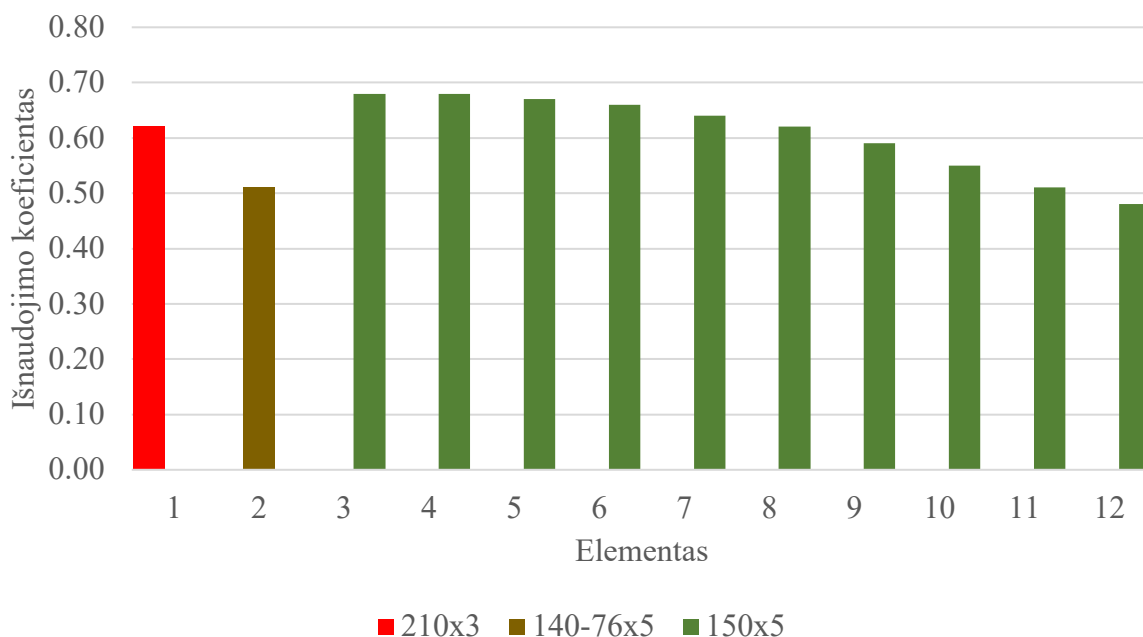
Naujai atliktos elementų išnaudojimo analizės, kurioje nagrinėjami vamzdžių profiliai su pakeistais sienelės storiais, rezultatai pateikiami 17 lentelė.

17 lentelė. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos, kurios sienelių storiai kinta nuo 3 mm iki 5 mm, išnaudojimo rodiklių reikšmės

Elementas	Elemento skersmuo, mm	Išnaudojimo koeficientas	Apkrovų derinys
1	210	0,860	AD7 Y+
2	140-76	0,510	AD7 Y+
13–22	150	0,48–0,68	AD6 X-Y+/AD7 Y+

Palyginus 14 **lentelė** ir 17 lentelių duomenis matyti, kad pakeitus profilių sienelių storius elementų išnaudojimas padidėjo: 210 mm skersmens elemento išnaudojimo koeficientas padidėjo nuo 0,31 iki 0,86, t. y. maždaug 2,8 karto; 140–76 mm – nuo 0,41 iki 0,51, tai yra apie 1,24 karto; 150 mm

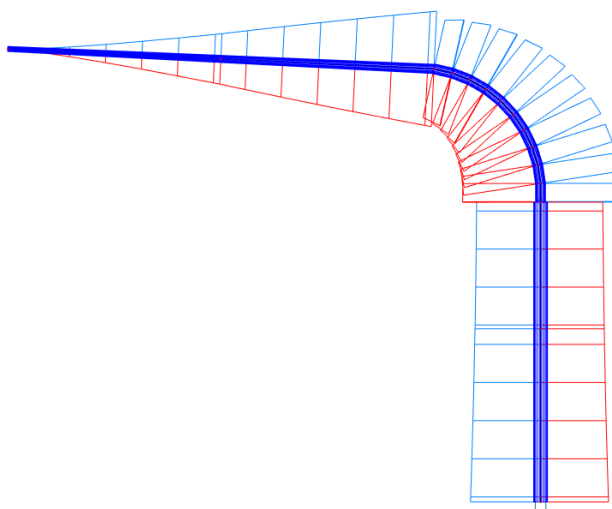
skersmens elementų grupėje pradinis išnaudojimo intervalas 0,39–0,56 po sumažinto sienelės storio išnaudojimas yra 0,48–0,68: mažiausio išnaudojimo reikšmė išaugo nuo 0,39 iki 0,48 apie 1,23 karto, o didžiausias išnaudojimas kinta nuo 0,56 iki 0,68 apie 1,21 karto. Išnaudojimo koeficientų diagrama pateikta 34 pav.



34 pav. Cilindrinės-kūginės gembinės atramos, kurios sienelės storis kinta nuo 3mm iki 5 mm, išnaudojimo koeficientai

Iš pateiktos diagramos matyti, kad bendras atramos elementų išnaudojimo vidurkis yra 60 %. Sumažinus vamzdžių sienelės storius bendras konstrukcijos išnaudojimo koeficientų vidurkis padidėjo apie 1,3 karto.

Cilindrinei-kūginei gembinei atramai pavojingiausi įtempiai fiksuojami apkrovų AD5 X- derinyje, įtempių pasiskirstymo dėsningumas pateikiamas 35 pav.



35 pav. Įtempių pasiskirstymo dėsningumas cilindrinei-kūginei gembinei atramai, kurios sienelės storis kinta nuo 3mm iki 5 mm

Analizuojant pateiktą įtempių pasiskirstymo dėsninę matyti, kad didžiausios įtempių reikšmės koncentruojasi lenktoje atramos dalyje – stiebo ir horizontaliosios sijos sandūroje, kur dėl veikiančių apkrovų susidaro didžiausi lenkiamieji momentai.

Apibendrinant galima teigti, kad atliktas elementų skerspjūvių mažinimas siekiant padidinti išnaudojimo koeficientą parodė realias galimybes padidinti atramų elementų išnaudojimo koeficientus ir kartu sumažinti konstrukcijų masę, nepažeidžiant stiprumo ir standumo reikalavimų. Sistemingas strypų skersmenų ir vamzdžių sienelių storių mažinimas, pagrįstas ribinių būvių analize, leido pasiekti racionalų kompromisą tarp konstrukcijų saugos ir medžiagų sąnaudų. Gautos priklausomybės ir palyginamieji rezultatai gali būti taikomi kaip praktinės rekomendacijos projektuojant panašaus tipo atramas bei sudaro prielaidas tolesniems lengvų plieninių konstrukcijų optimizavimo tyrimams.

Išvados

1. Pradinė skaitinė analizė parodė, kad nagrinėtos atramos pasižymi didelėmis saugos atsargomis: rėminės santvarinės atramos vidutinis elementų išnaudojimo koeficientas sudaro apie 7 %, gembinės santvarinės – apie 15 %, o cilindrinės-kūginės gembinės atramos – apie 47 %, kas rodo neefektyvų plieno panaudojimą pradinėse konstrukcinėse schemose.
2. Nustatyta, kad visoms nagrinėtoms atramoms kritinės įtempių būsenas lemia vėjo apkrovos kryptis: rėminei ir gembinei santvaroms pavojingiausi yra šoninių vėjo komponentų deriniai (AD7 Y–, AD3 Y+), kuriuose susidaro didžiausios ašinės jėgos iki 38,7 kN rėminėje ir iki 135,6 kN gembinėje konstrukcijose. Cilindrinei-kūginei gembinei atramai pavojingiausi deriniai sukelia didžiausius lenkimo momentus atramos viršutinėje dalyje, kurių reikšmės siekia iki 0,28–0,39 kN·m, todėl konstrukcijos elgsena yra labiausiai jautri vėjo krypties pokyčiui.
3. Optimizavus rėminės santvarinės konstrukcijos skerspjūvius (profilų skersmenis sumažinus nuo 22 mm ir 40 mm iki 19 mm ir 20 mm), labiausiai apkrautų elementų išnaudojimo koeficientai padidėjo iki 0,8–1,0, o vidutinis konstrukcijos išnaudojimas išaugo iki maždaug 18 %, išlaikant stiprumo ribinio būvio reikalavimus.
4. Gembinės ir cilindrinės-kūginės atramų optimizavimo rezultatai parodė reikšmingą medžiagos panaudojimo efektyvumo padidėjimą: gembinėje santvaroje pakeitus profilius į 14 mm ir 28 mm, elementų išnaudojimo koeficientai padidėjo 1,8–2,3 karto, o vidutinis išnaudojimas siekė apie 28 %; cilindrinėje-kūginėje gembinėje atramoje sumažinus sienelių storius iki 3–5 mm, įtempiai išliko mažesni už plieno S235 takumo ribą (190–205 MPa), o vidutinis išnaudojimo koeficientas padidėjo iki maždaug 60 %.

Literatūros sąrašas

1. KOWAL, M., SZALA, M. Diagnosis of the microstructural and mechanical properties of over century-old steel railway bridge components. *Engineering Failure Analysis* [interaktyvus]. 2020, 110, 104447 [žiūrėta 2024-10-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104447>.
2. FANG, C., WANG, W., QIU, C., HU, S., MACRAE, G. A., EATHERTON, M. R. Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research* [interaktyvus]. 2022, 191, 107172 [žiūrėta 2024-10-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107172>.
3. SOOD, V. B. *Railway Steel Structures: Fabrication and Erection* [interaktyvus]. 2024 [žiūrėta 2024-10-31]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1201/9781003349327>.
4. COBB, H. M. *The History of Stainless Steel* [interaktyvus]. 2010 [žiūrėta 2024-10-31]. Prieiga per: <https://ebookcentral-proquest-com.ezproxy.ktu.edu/lib/ktu-ebooks/detail.action?docID=3002444>.
5. FOREHAND, L. *Building Construction and Materials: An Open Educational Resource Textbook* [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2024-10-31]. Prieiga per: <https://lbcc.pressbooks.pub/buildingconstruction/>.
6. *1869-2019: A Brief History of Traffic Lights* [interaktyvus]. 2019 [žiūrėta 2024-10-22]. Prieiga per: <https://www.inclusivecitymaker.com/1868-2019-a-brief-history-of-traffic-lights/#:~:text=December%2010%2C%201868%3A%20the%20official,at%20Parliament%20Square%20in%20London>.
7. *Here's What The World's First Traffic Lights, In Westminster, Looked Like* [interaktyvus]. 2023 [žiūrėta 2024-10-22]. Prieiga per: <https://londonist.com/london/history/here-s-what-the-world-s-first-traffic-lights-in-westminster-looked-like>.
8. *Tiny Techs Club* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2024-10-22]. Prieiga per: <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=1956536081058136&id=181457545232674&set=a.375456742499419>.
9. *Google Maps: Street View* [interaktyvus]. 2024 [žiūrėta 2024-10-22]. Prieiga per: <https://www.google.com/maps/>.
10. BARI, A., VIGNESHKANNAN, S., EASWARAN, P. A General study of light gauge steel structures – A review. *International Journal of Advanced Research Methodology in Engineering & Technology* [interaktyvus]. 2017, 1(4) [žiūrėta 2024-11-01]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/322384064_A_General_Study_of_Light_Gauge_Steel_Structures_-_A_Review.
11. PALVAI, H., VENKAT DAS, T., REDDY, K. R. K., BORUSU, V. Modelling and design analysis of light gauge steel systems against conventional structural systems. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2021, 47, 5164–5171. [žiūrėta 2024-11-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.505>.
12. GATHEESHGAR, P., POOLOGANATHAN, K., GUNALAN, S., SHYLA, I., SHERLOCK, P., RAJANAYAGAM, H., NAGARATNAM, B. Development of affordable steel-framed modular buildings for emergency situations (COVID-19). *Structures* [interaktyvus]. 2021, 31, 862–875 [žiūrėta 2024-11-03]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.004>.

13. PUTRI, S. O., FIRMANSYAH. The efficiency of steel material as building construction. *Materials Science and Engineering* [interaktyvus]. 2020, 879 [žiūrėta 2024-11-03]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/879/1/012148>.
14. BAKARE, H. A. *An Investigation on Comparative Use of Light Gauge Steel Construction over Concrete Works* [interaktyvus]. 2018 [žiūrėta 2024-11-07]. Prieiga per: https://www.academia.edu/download/62111376/LGS_Techology_in_Nigeria20200216-73338-gzc15w.pdf.
15. MANIMARAN, A., SATHISH, L., RAVICHANDRAN, P. T. Study on Ultimate Strenght and Buckling Modes of Cold Formed Steel Structures. *Materials Science and Engineering*. [interaktyvus]. 2020, 912(6), 062060 [žiūrėta 2024-11-28]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/912/6/062060>.
16. MANDALA, R. S. K., NAYAKA, R. R. A state of art review on time, cost and sustainable benefits of modern construction techniques for affordable housing. *Construction Innovation* [interaktyvus]. 2023, 1471–4175 [žiūrėta 2024-11-23]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1108/CI-03-2022-0048>.
17. BALESHAN, B., MAHENDRAN, M. Experimental study of light gauge steel framing floor systems under fire conditions. *Advances in Structural Engineering* [interaktyvus]. 2017, 20(3), 426–445 [žiūrėta 2024-11-23]. Prieiga per: doi:10.1177/1369433216653508.
18. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 1993. *Plieninių konstrukcijų projektavimas*.
19. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.08:2005. *Plieninių konstrukcijų projektavimas. Pagrindinės nuostatos* [interaktyvus]. 2007 [žiūrėta 2024-11-04]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.250900/asr>.
20. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.04:2003. *Poveikiai ir apkrovos* [interaktyvus]. 2003 [žiūrėta 2024-11-04]. Prieiga per: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.E5D5DC3C496B/QggipAbUWC>.
21. LOTFY, O. M., GAAWAN, S. M., YEHIA, M. M. Experimental investigation of the behaviour of perforated steel cold-formed column encased in lightweight concrete. *Engineering Research Journal* [interaktyvus]. 2024, 183(3), 165–190 [žiūrėta 2024-12-03]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.21608/erj.2024.377299>.
22. LI, G. O., ZHANG, J. Z., LI, L. L., JIANG, B. H., YANG, T. C., JIANG, J. Progressive collapse resistance of steel framed buildings under extreme events. *Advanced Steel Construction*. [interaktyvus]. 2021, 17(3), 318–330 [žiūrėta 2024-11-04]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.18057/IJASC.2021.17.3.10>.
23. NASSR, A. A., RAZAQPUR, A. G., TAIT, M. J., CAMPIDELLI, M., FOO, S. Strenght and stability of steel beam columns under blast load. *International Journal of Impact Engineering*. [interaktyvus]. 2013, 55, 34–48 [žiūrėta 2024-11-25]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.11.010>.
24. LIU, D., LIU, J., WU, S., HUANG, F. Corrosion fatigue-cracking behaviors of low alloy steels in seawater for offshore engineering structures. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science* [interaktyvus]. 2022, 53(7), 2369–2382 [žiūrėta 2024-11-04]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11661-022-06693-3>.
25. *Visuotinė lietuvių enciklopedija: legiruotas plienas* [interaktyvus]. 2024 [žiūrėta 2024-11-04]. Prieiga per <https://www.vle.lt/straipsnis/legiruotasis-plienas/>.

26. PRABAHARAN, V., AKHAS, P. K. Performance evaluations of perforated light gauge steel cellular beams under flexural loading. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. 2024 [žiūrėta 2024-11-25]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.118>.
27. ZHANG, W., XU, J. Advanced lightweight materials for automobiles: A review. *Materials & Design* [interaktyvus]. 2022, 221, 110994 [žiūrėta 2024-11-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>.
28. PAN, F., WANG, Y., HUANG, C., ZHANG, L. Analysis of flexural performance of steel-timber composite cantilever beam. *Material Science and Engineering* [interaktyvus]. 2020, 964, 012002 [žiūrėta 2024-11-28]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/964/1/012002>.
29. MOON, J., HA, HY., KIM, KW. et al. A new class of lightweight, stainless steels with ultra-high strength and large ductility. *Scientific Reports* [interaktyvus]. 2020, 20, 12140 [žiūrėta 2024-12-05]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69177-7>.
30. SUN, G. J., QI, W., MIAOYU, H. Discussion of ceramic bar reinforced TWIP steel composite structure. *Science and Engineering of Composite Materials* [interaktyvus]. 2022, 29(1), 481–487. Prieiga per: <https://doi.org/10.1515/secm-2022-0173>.
31. RUSLI, M. A., SETIAWAN, P. The axial capacity of a full height rectangular opening castellated steel beam with steel reinforcement stiffeners. *Advanced Civil and Environmental Engineering* [interaktyvus]. 2021, 4(1), 51–59 [žiūrėta 2024-12-10]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.30659/jacee.4.1.51-59>.
32. TSAI, L. W., ALIPOUR, A. Studying the wind-induced vibrations of a traffic signal structure through long term health monitoring. *Engineering Structures* [interaktyvus]. 2021, 247, 112837 [žiūrėta 2024-12-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112837>.
33. GEDRIMAS, G., SABALIAUSKAS, A. Kelio ženklų rėminės konstrukcijos stiprumo tyrimas. *Jaunųjų mokslininkų darbai* [interaktyvus]. 2021, 51(1), 88–93 [žiūrėta 2024-12-30]. Prieiga per: <https://doi.org/10.15388/JMD.2021.8>.
34. MUHAMMAD A. A. et al. Corrosion of carbon steel and alloy steel: Effect of humidity and hydrochloric acid. *Material Science and Engineering* [interaktyvus]. 2021, 1173 [žiūrėta 2024-12-15]. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1173/1/012061>.
35. ZHU, F., ZHANG, Y., ZHANG, C. Experimental study on mechanical properties of Q345 steel after high temperature cooling. *World Journal of Engineering and Technology* [interaktyvus]. 2020, 8(3), 257–265 [žiūrėta 2024-12-10]. Prieiga per: <https://doi.org/10.4236/wjet.2020.83021>.
36. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [ST 188710638.08:2004]. Automobilių kelių ženklų tipinės atramos. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
37. *Google Maps: Street View* [interaktyvus]. 2025 [žiūrėta 2025-09-29]. Prieiga per: <https://www.google.com/maps/>.
38. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. LST EN 1991. *Poveikiai konstrukcijoms*.
39. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.01.12:2024. *Statybu klimatologija* [interaktyvus]. 2024 [žiūrėta 2025-03-17]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/60c1acd17f6311ef84ff9693ecd03ff5>
40. EUROKODAS 1. LST EN 1991-1-4:2005+A1:2010. *Statybinių konstrukcijų apkrovos*. 1–4 dalis: Bendrosios apkrovos – Vėjo apkrova. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2010.

41. LIETUVOS STANDARDIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1990:2007]. Eurokodas. Statinio projektavimo pagrindai (EN 1990:2002+A1:2005). Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
42. LIETUVOS RESPUBLIKOS SUSISIEKIMO MINISTERIJA. *Kelių šviesoforų įrengimo taisyklės* [interaktyvus]. 2012 [žiūrėta 2025-10-01]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.418375/asr>.
43. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.08:2005 *Plieninių konstrukcijų projektavimas. Pagrindinės nuostatos* [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2025-10-01]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.418375/asr>.