



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Plieninio rėmo stiprinimo tyrimai

Magistro baigiamasis projektas

Mantas Bučys

Projekto autorius

lekt. Nerijus Adamukaitis

Vadovas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Plieninio rėmo stiprinimo tyrimai

Magistro baigiamasis projektas

Statybos inžinerija (6121EX008)

Mantas Bučys

Projekto autorius

lekt. Nerijus Adamukaitis

Vadovas

doc. prakt. Nerijus Meslinas

Recenzentas

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Mantas Bučys

Plieninio rėmo stiprinimo tyrimai

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą 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. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą 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 baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Mantas Bučys

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: STATYBINIŲ KONSTRUKCIJŲ IR GAMINIŲ INŽINERIJA

Baigiamojo projekto tematika (lietuvių k.):
PLIENINIO RĖMO STIPRINIMO TYRIMAI

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: 2021 m. gruodžio 3 d. Nr. ST18-F-09-1

(lietuvių k.):
PLIENINIO RĖMO STIPRINIMO TYRIMAI

(anglų k.):
INVESTIGATION OF STRENGTHENING OF STEEL FRAME

Pradiniai duomenys darbui:

| Baigiamojo projekto dalys: | Atlikti |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Įvadas | x |
| Literatūros apžvalga | x |
| Metodologija | x |
| Eksperimentiniai tyrimai | <input type="checkbox"/> |
| Analitiniai tyrimai | x |
| Skaitiniai tyrimai | <input type="checkbox"/> |
| Ekonominė dalis | <input type="checkbox"/> |
| Išvados | x |

Kita informacija (pagal poreikį):

Vadovas: lekt. Nerijus Adamukaitis
(indėlis 100 %) *pareigos, vardas, pavardė*

Studentas: Mantas Bučys
vardas, pavardė
Patvirtinta elektroniniu būdu

Mantas Bučys. Plieninio rėmo stiprinimo tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Nerijus Adamukaitis; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: plieninis rėmas, stiprinimas, korozija, stiprinimas plokštelėmis, stiprinimas lynais.

Kaunas, 2022. 66 p.

Santrauka

Konstrukcijų stiprinimas yra vis aktualesnis šių dienų statyboje, o metodai ir stiprinimo būdai konkrečiai konstrukcijai ne visada aiškūs.

Baigiamajame projekte analizuojama korozijos paveikta plieninė konstrukcija. Išanalizuoti korozijos tipai eksploatuojamuose pastatuose ir nustatytas sandėlio korozijos šaltinio tipas. Atlikta plieninių konstrukcijų stiprinimo būdų analizė: stiprinimas plokštelėmis ar profiliais, stiprinimas anglies pluošto medžiagomis ir stiprinimas išorėje įtempiamais lynais. Sumodeliuota standaus plieninio rėmo korozija, patikrinta projektinė ir korozijos paveikto rėmo laikomoji galia. Taip pat eksperimentiškai analitiniu būdu patikrinta rėmo laikomoji galia sustiprinto įtempiamais lynais bei papildomomis plokštelėmis ir šie metodai palyginti.

Darbo apimtis – 52 p., teksto be priedų, 66 iliustr., 28 lent., 40 bibliografinių šaltinių.

Mantas Bučys. Investigation of Strengthening of Steel Frame. Master's Final Degree Project / supervisor lect. Nerijus Adamukaitis; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: steel frame, strengthening, corrosion, plate retrofit, tendons retrofit.
Kaunas, 2022, 66.

Summary

Strengthening of structures is becoming more and more relevant in today's construction, and the methods and best ways to strengthen a particular structure are not always clear.

The final thesis analyzes the steel structure affected by corrosion. The types of corrosion in the buildings were analyzed, and the type of warehouse corrosion source identified. The analysis of the methods of retrofitting of steel structures was performed - repairing with plates or profiles, retrofitting with carbon fiber materials and strengthening with external tendons. Corrosion of the rigid steel frame was modeled and the design and bearing capacity of the corrosion-affected frame were verified. The load-bearing capacity of the frame strengthened with tension rods and additional plates was also analytically tested and these methods were compared.

Turinys

| | |
|---|-----------|
| Lentelių sąrašas | 8 |
| Paveikslų sąrašas | 9 |
| Įvadas..... | 11 |
| 1. Literatūros analizė..... | 12 |
| 1.1. Plieninių konstrukcijų pažaidos..... | 12 |
| 1.2. Korozija plieninės konstrukcijose | 14 |
| 1.3. Korozijos šalinimas nuo plieninių konstrukcijų | 20 |
| 1.4. Plieninių konstrukcijų defektavimo procesas | 21 |
| 1.5. Plieninių konstrukcijų stiprinimo būdai | 22 |
| 1.6. Plieninių konstrukcijų stiprinimas plieninėmis plokštelėmis ir papildomais profiliais..... | 23 |
| 1.7. Plieninių konstrukcijų stiprinimas didelio stiprumo anglies pluošto medžiagomis | 25 |
| 1.8. Plieninių konstrukcijų stiprinimas įtemptais lynais..... | 28 |
| 2. Trašų sandėlio duomenų analizė | 32 |
| 2.1. Projektinė informacija | 32 |
| 2.2. Apkrovų ant rėmo skaičiavimas | 34 |
| 2.3. Rėmo įrašų skaičiavimas | 35 |
| 2.4. Skerspjuvių korozijos modeliavimas..... | 37 |
| 3. Rėmo stiprinimas įtempiamais lynais | 39 |
| 3.1. Rėmo stiprinimo įtempiamais lynais metodologija | 39 |
| 3.2. Rėmo stiprinimas įtempiamais lynais rezultatų analizė | 42 |
| 4. Rėmo stiprinimas plokštelėmis..... | 53 |
| 4.1. Rėmo stiprinimo plokštelėmis metodologija..... | 53 |
| 4.2. Rėmo stiprinimo plokštelėmis rezultatų analizė..... | 56 |
| Išvados | 63 |
| Literatūros sąrašas | 64 |

Lentelių sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 lentelė. Plieninių konstrukcijų padengimas [28]..... | 15 |
| 2 lentelė. Korozijos tipai [17] | 16 |
| 3 lentelė. Plieno svorio ir kainos sumažėjimas naudojant įtemptąsias sistemas [18] | 28 |
| 4 lentelė. Plieno klasifikavimas pagal GOST 27772-88 standartą [20] | 33 |
| 5 lentelė. Konstrukcinių elementų skerspjūviai | 33 |
| 6 lentelė. Stogo perdangos apkrovos..... | 34 |
| 7 lentelė. Lauko sienos apkrovos | 34 |
| 8 lentelė. Skerspjūvio korozijos suvestinė | 37 |
| 9 lentelė. Įtempimo jėgų suvestinė , $e_{ly} = 0,525m$ | 41 |
| 10 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$ | 42 |
| 11 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$ | 43 |
| 12 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$ | 44 |
| 13 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$ | 44 |
| 14 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$ | 45 |
| 15 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$ | 46 |
| 16 lentelė. Įtempimo jėgų suvestinė , $e_{ly} = 0,725m$ | 47 |
| 17 lentelė. Įtempimo jėgų suvestinė , $e_{ly} = 0,925m$ | 47 |
| 18 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,725m$.. | 48 |
| 19 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,725m$ | 49 |
| 20 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,925m$.. | 50 |
| 21 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,925m$ | 51 |
| 22 lentelė. Rėmo stiprinto plokštelėmis modelių suvestinė | 53 |
| 23 lentelė. Horizontalios plokštelės ULS suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30% | 56 |
| 24 lentelė. Horizontalios plokštelės įlinkio suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30% | 57 |
| 25 lentelė. Vertikalios plokštelės ULS suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30% | 58 |
| 26 lentelė. Vertikalios plokštelės įlinkio suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30% | 59 |
| 27 lentelė. Horizontalios + vertikalios plokštelės ULS suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30% | 60 |
| 28 lentelė. Horizontalios+vertikalios plokštelės įlinkio suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30% | 61 |

Paveikslų sąrašas

| | |
|--|----|
| 1 pav. Trašų sandėlio pažaidos sukeltos korozijos..... | 13 |
| 2 pav. Skerspjūvio padėties ir formos įtaka korozijos greičiui [1] | 13 |
| 3 pav. Plieninio skerspjūvio elementų korozijos intensyvumas atliekant bandymus [1]..... | 14 |
| 4 pav. Trašų sandėlio plieninio rėmo padengimas | 15 |
| 5 pav. Tūrio plėtimosi koeficientas pagal geležies oksido tipą..... | 17 |
| 6 pav. Korozijos sluoksniai [31] | 17 |
| 7 pav. Standžiai įtvirtinta bandoma sija.[3] | 18 |
| 8 pav. Vertikalus poslinkis viduryje sijos: a) korozijos paveiktoje sijoje, b) korozijos paveiktoje sijoje, įvertinus ir išilginį sukamąjį klupumą.[3]..... | 18 |
| 9 pav. Vertikalus poslinkis viduryje sijos: a) korozijos paveiktoje sijoje, b) korozijos paveiktoje sijoje, įvertinus ir išilginį sukamąjį klupumą.[3]..... | 19 |
| 10 pav. Smėliavimo aparato mechanizmas [33] | 20 |
| 11 pav. Defektavimo procesas [5]..... | 21 |
| 12 pav. Stiprinimo būdai: a – skerspjūvio didinimas; b – skaič. schemas keitimas; c – keičiamas konstrukcijos įtempimų būvis [4]..... | 22 |
| 13 pav. Sijų skerspjūvio didinimas naudojant papildomus plieninius elementus [29] | 23 |
| 14 pav. Kolonų skerspjūvio didinimas naudojant papildomus plieninius elementus [29]..... | 24 |
| 15 pav. Uždaro profilio stiprinimas plokštelėmis naudojant varžtus [9] | 24 |
| 16 pav. Skirtingų CFRP laminatų savybės [12]..... | 25 |
| 17 pav. Stiprumo plieninėse konstrukcijose padidėjimas naudojant CFRP [12]..... | 26 |
| 18 pav. Stiprinimo būdai naudojant CFRP [12]..... | 26 |
| 19 pav. Plienines elementas stiprinimo FRP schema [19] | 27 |
| 20 pav. Suirimo atvejai galimi stiprinant FRP [19] | 27 |
| 21 pav. Įtemptų lynų panaudojimas tiltų plieninėse konstrukcijose | 28 |
| 22 pav. Plieninė sija įtempinama tiesiu strypu apačioje [18]..... | 29 |
| 23 pav. Plieninė sija įtempinama lynų, inkaruojamu galuose [18] | 29 |
| 24 pav. Tipas A – kontrolinės neįtempta sija, tipas C - sija įtempinama standžiu strypu, tipas D – sija įtempta standžiu strypu su standžia atrama viduryje, tipas E – sija įtempinama sijos galuose [18] ... | 29 |
| 25 pav. Pirmas variantas įtempiamos sistemos plieniniame rėme [16] | 30 |
| 26 pav. Antras variantas įtempiamos sistemos plieniniame rėme [16]..... | 30 |
| 27 pav. Laikomųjų kalių padidėjimo procentų grafikai [16] | 31 |
| 28 pav. Daugiaaukštis įtempiamas rėmas plieniniame rėme [25]..... | 31 |
| 29 pav. Priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos ir daugiaaukščio rėmo stiprumo didėjimo [25] .. | 31 |
| 30 pav. Sandėlio konstrukcijų išdėstymo tinklelis..... | 32 |
| 31 pav. Sandėlio rėmas | 32 |
| 32 pav. Vėjo apkrovos ant sienų skaičiavimas..... | 34 |
| 33 pav. Vėjo apkrovos ant stogo skaičiavimas | 35 |
| 34 pav. Skaičiuojamasis modelis | 35 |
| 35 pav. Rėmo momentų diagrama | 35 |
| 36 pav. Rėmo skersinių jėgų diagrama | 35 |
| 37 pav. Rėmo ašinių jėgų diagrama | 36 |
| 38 pav. Rėmo išnaudojimas ULS, esant projektiniam skerspjūviui | 36 |
| 39 pav. Rėmo išnaudojimas SLS, esant projektiniam skerspjūviui | 36 |
| 40 pav. Korozijos paveikto rėmo išnaudojimas ULS | 38 |

| | |
|--|----|
| 41 pav. Korozijos paveikto rėmo išnaudojimas SLS | 38 |
| 42 pav. Lyno įtempimo taškas, $e_{ly} = 0,525m$ | 39 |
| 43 pav. Rėmo sijos skaičiuojamieji ilgiai plokštumoje, atrama nutolus 10%..... | 40 |
| 44 pav. Lyno montavimo pozicija ant sijos, atrama nutolus 10% | 40 |
| 45 pav. Jėgos pridėjimo vieta, sumodeliuota „SCIA Engineering“, $e_{ly} = 0,525m$ | 41 |
| 46 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$ | 42 |
| 47 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$ | 43 |
| 48 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$ | 44 |
| 49 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$ | 45 |
| 50 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$ | 45 |
| 51 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$ | 46 |
| 52 pav. Lyno įtempimo taškas, $e_{ly} = 0,725m$ ir $e_{ly} = 0,925m$ | 47 |
| 53 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,725m$ | 48 |
| 54 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,725m$. 49 | 49 |
| 55 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,925m$ | 50 |
| 56 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,925m$. 51 | 51 |
| 57 pav. Papildoma plokštelė virinama sijos apačioje..... | 54 |
| 58 pav. Papildomos plokštelės virinamos prie sijos sienelės..... | 54 |
| 59 pav. Papildomos plokštelės virinamos prie sijos sienelės ir juostos apačioje..... | 55 |
| 60 pav. Sijos sustiprintos plokštelėmis skaičiuojamasis modelis | 55 |
| 61 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo horizontalios plokštelės storio, atitrukta 0%, 10%, 20% ir 30% | 56 |
| 62 pav. Įlinkio priklausomybė nuo horizontalios plokštelės storio, atitrukta 0%, 10%, 20% ir 30% | 57 |
| 63 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo vertikalios plokštelės storio, atitrukta 0%, 10%, 20% ir 30% | 58 |
| 64 pav. Įlinkio priklausomybė nuo vertikalios plokštelės storio, atitrukta 0%, 10%, 20% ir 30%. 59 | 59 |
| 65 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo horizontalios + vertikalios plokštelės storio, atitrukta 0%, 10%, 20% ir 30% | 60 |
| 66 pav. Įlinkio priklausomybė nuo horizontalios + vertikalios plokštelės storio, atitrukta 0%, 10%, 20% ir 30% | 61 |

Įvadas

Pastatai ir jų konstrukcijos yra visuomet veikiamos galybe fizikinių veiksnių, kurie nuolat kinta. Dėl šių veiksnių pastatų konstrukcijos gali pakisti, nusidėvėti, taip pradeda prarasti savo saugos ir tinkamumo funkcijas. Projektuojamiems pastatams kartais neatsižvelgiama kokiose sąlygose jų konstrukcijos dirbs. Tai gali įvykti dėl kelių priežasčių: informacijos stokos, projektavimo klaidų arba esamos nekompetencijos. Informacijos stoka – per mažas žinių kiekis apie esamas geologines, hidrologines ar kitas gamtines sąlygas, pastato paskirtį ir naudojimą. Dėl šių klaidų, atsirandančių dėl įvairių faktorių, atsiranda būtinybė statinio konstrukcijas stiprinti.

Stiprinimas taikomas kaip ekonomiškesnis būdas atnaujinti pastato funkcionalumą, lyginant su visų pastato konstrukcijų demontavimu, gaminimu ir permontavimu. Kartais, kai konstrukcijų demontavimas yra labai apsunkintas arba neįmanomas, vienintelis būdas - konstrukcijų stiprinimas. Norint sustiprinti konstrukciją reikia tinkamai išanalizuoti: nustatyti defektus ir jų kilmę, įvertinti jų galimą kitimą ateityje, suskaičiuoti konstrukcijų laikomąją gebą, įvertinti galimus apkrovų pasikeitimus bei parinkti optimaliausią stiprinimo būdą. Būtent tokie būdai šiame darbe pritaikomi trąšų sandėlio konstrukcijų stiprinimui, kurios per ilgus eksploatavimo metus buvo stipriai pažeistos ypač chemiškai aktyvioje aplinkoje.

Objektas. Trąšų sandėlis.

Tikslas. Parinkti optimaliausią trąšų sandėlio plieninių konstrukcijų stiprinimo būdą.

Uždaviniai:

1. Analizuojant literatūrą surasti ir aprašyti plieninių konstrukcijų pažaidų tipus, juos išanalizuoti.
2. Įvertinus trąšų sandėlio pažaidos tipus išanalizuoti stiprinimo būdus.
3. Suskaičiuoti konstrukcijos dabartinę laikomąją galią ir parinktus konstrukcijos stiprinimo būdus.
4. Atliekant skaitinius tyrimus palyginti kuris būdas optimaliausias skaičiuojamajai schemai.

1. Literatūros analizė

1.1. Plieninių konstrukcijų pažaidos

Dėl netinkamo konstrukcijų eksploatavimo, projektavimo ar gamybinių klaidų, statinio gyvavimo cikle gali atsirasti pažaidų, kurias reikia šalinti. Defektai plieninėse konstrukcijose skiriasi savo pobūdžiu ir kilmės šaknimis, todėl jos grupuojamos ir skirstomos taip [2] :

1. deformacijos;
2. mazgų pažaidos/kontakto sandarumas;
3. galvanizuotų dangų pažeidimai;
4. kitų dangų pažeidimai;
5. nuovargis;
6. įtrūkimai;
 - 6.1. plastiškieji;
 - 6.2. trapieji;
7. plyšiai;
8. ugnies poveikis;
9. korozija;
 - 9.1. vietinė;
 - 9.2. ištisinė;
 - 9.3. plyšiuose;
 - 9.4. galvaninė;
 - 9.5. įtempties;

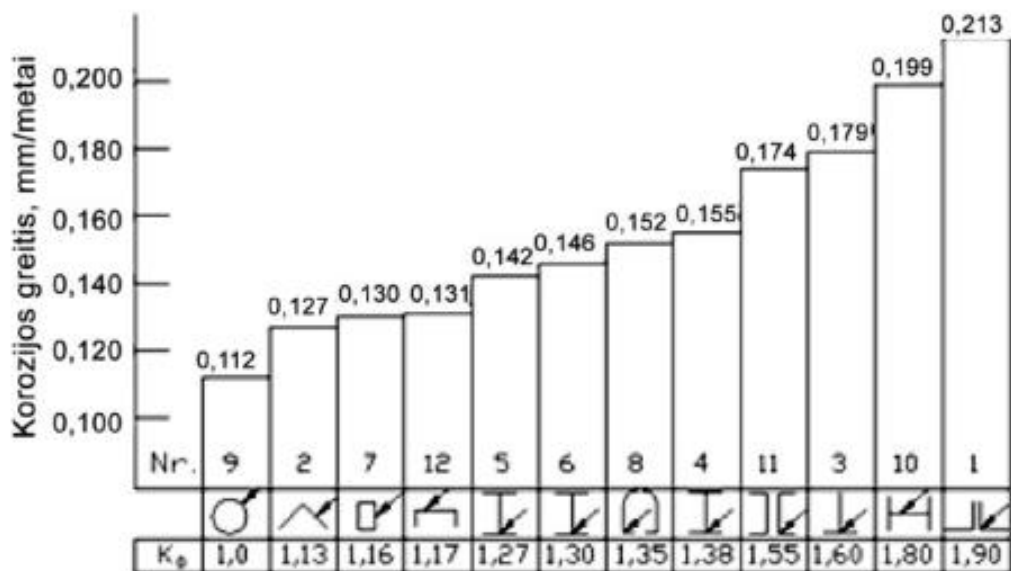
Analizuojamame pastate – trąšų sandėlyje, vyrauja korozijos pažeistos konstrukcijos, todėl daugiausia bus analizuojama korozijos pažeistos konstrukcijos laikomoji galia. Plieno korozija yra apibrėžiama kaip medžiagos irimas dėl reakcijos su aplinka ir savybių praradimu [3]. Pagrindinė korozijos problema – medžiagos praradimas nuo paviršiaus, kuris plonina laikančiuosius elementus ir dėl to silpnėja konstrukcija bei gali pradėti netenkinti saugos ir ribinių tinkamumo būvių.



1 pav. Trašų sandėlio pažaidos sukeltos korozijos

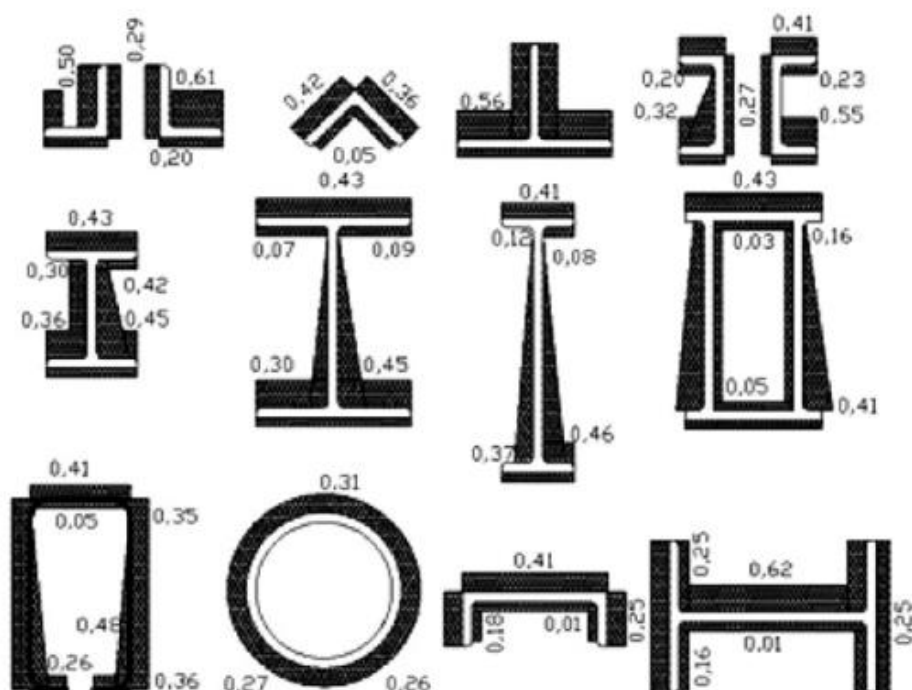
Korozija atitinkamose konstrukcijose gali būti modeliuojama ir nuspėjama naudojantis „LST EN ISO 12944-2:2019 Dažai ir lakai. Plieninių konstrukcijų apsauga nuo korozijos apsauginėmis dažų sistemomis“ [26] standarto pateikiamas lenteles. Pagal skerspjūvio tipą ir aplinkos agresyvumo klasę galima susimodeliuoti ateities skerspjūvio netektį. Tiksliai žinodami galimą pažaidą dėl korozijos galima atitinkamai padidinti skerspjūvius, kad ateityje šios problemos neįtakotų konstrukcijų darbo.

Pagal šią metodiką trašų sandėlio rėmui bus paskaičiuotas nuostolis profilių paviršiuose ir paskaičiuotas dabartinė laikomoji galia.



2 pav. Skerspjūvio padėties ir formos įtaka korozijos greičiui [1]

Pagal gautus bandymų rezultatus, galima teigti, kad dvitėjų sijų vertikaliuosiuose skyriuose netenka maždaug dvigubai mažiau masės, todėl modeliuojant koroziją sandėlyje, sienelės korozija vertinama dvigubai mažesnė.



3 pav. Plieninio skerspjūvio elementų korozijos intensyvumas atliekant bandymus [1]

1.2. Korozija plieninės konstrukcijose

Visos plieninės konstrukcijos turi atitikti dabartinius standartus ir taisykles, kadangi metalinės konstrukcijos yra viena iš lyderiaujančių medžiagų tipų šiuolaikinėje statyboje ir rinkoje. Viena iš pagrindinių sąlygų kuri apibūdina konstrukcijų kokybę ir patvarumą yra atsparumas korozijai dėl atšiaurių klimato sąlygų. Korozija gali padaryti didelę žalą metalinėms konstrukcijoms – sumažinti skerspjūvį, dėl ko mažėja laikomoji galia, pastato pastovumas ir stabilumas.

Išanalizavus „LST EN ISO 12944-5:2019 Dažai ir lakai. Padengimas.“ [28] galima teigti, kad yra išskiriami 5 aplinkos korozijos lygmenys:

- C1 – labai mažai korozija;
- C2 – maža korozija;
- C3 – vidutinė korozija;
- C4 – didelė korozija;
- C5 – labai didelė korozija.

Taip pat išskiriami šių korozijos klasių pogrupiai pagal tai, kiek laiko konstrukcija yra tiesiogiai veikiamą korozijos:

- trumpai (L);
- vidutiniškai (M);
- ilgai (H);
- labai ilgai (VH).

Trąšų sandėlio standus rėmas yra veikiamas didelės korozijos aplinkoje – C4, ir pagal laikotarpį, aplinka tiesiogiai veikė rėmą ilgai (H). Galima daryti išvadą, kad rėmas yra C4H korozijos veikiamoje aplinkoje.

1 lentelė. Plieninių konstrukcijų padengimas [28]

| Kodas pagal LST EN ISO 12944-5:2019 | Padengimas | Sluoksnių skaičius | Sauso sluoksnio storis, mikronais |
|-------------------------------------|------------|--------------------|-----------------------------------|
| C4L | EP, PUR | 2 | 120 |
| C4M | EP, PUR | 2 | 180 |
| C4H | EP, PUR | 3 | 240 |
| C4VH | EP, PUR | 4 | 300 |

Trąšų sandėlio plieninės konstrukcijos pagal pateiktą lentelę turėtų minimaliai būti padengtos 3 sluoksniais EP, PUR dažų, kurie turėtų sudaryti minimalų 240 mikronų storį, kad konstrukcija būtų tinkamai eksploatuojama tokiomis sąlygomis.







4 pav. Trąšų sandėlio plieninio rėmo padengimas

Pagal pateiktą informaciją apie sandėlio konstrukcijų būklę, padengimas vietomis neegzistuoja – vietomis visiškai atsilupęs, vietomis padengimas atšokęs su oro ertmėmis, kitose būklė yra nebloga, tačiau atsižvelgiant į bendrą konstrukcijos vaizdą – ji yra padengta netinkamai ir jeigu bus reikalingi stiprinimo skaičiavimai tolimesnėse stadijose, plieninės konstrukcijos sandėlyje taip pat turės būti padengtos pagal naujausius standartus.

Pagrindiniai korozijos šaltiniai yra išskiriami šie:

2 lentelė. Korozijos tipai [17]

| Korozijos tipas | Priežastys | Pavyzdžiai |
|--------------------------|---|--|
| Cheminė korozija | Metalo elemento paviršius reaguoja su oru ir jame esančiomis neorganinėmis ir organinėmis medžiagomis, dėl ko vyksta oksidacija ir metalo paviršius redukuojasi | Dažniausiai pasitaiko laikančiuosiose konstrukcijose, pamatai, kolonos, stogai, tvirtinimo elementai  |
| Požeminė korozija | Aplinkos nevienalytiškumas, netolygus deguonies ir drėgmės kontaktas su metalo konstrukcijų paviršiais | Dažniausiai pasitaiko laikančiuosiose konstrukcijose, tvirtinimo elementuose, inkariniuose varžtuose, pamatuose, kolonų bazėse  |
| Elektros srovių korozija | Elektros srovės nuotekiai, kurie veikia laidžius metalus, dėl ko pagerėja metalo cheminis aktyvumas | Dažniausiai pasitaiko inkariniuose varžtuose, pamatuose, kolonose  |
| Atmosferinės korozija | Aplinkiniame ore esanti didelė drėgmė kondensuojasi ir vyksta atmosferinė korozija | Dažniausiai pasitaiko laikančiuosiose konstrukcijose, sijose, santvarose, kolonose, tvirtinimo elementuose  |

Pagal šiuos tipus, plieninių konstrukcijų rėme, trąšų sandėlyje vyrauja cheminė korozija, metalo paviršiai reaguoja su šarmų ir rūgščių jonais, dėl ko netinkamai padengtas paviršius redukuojasi.

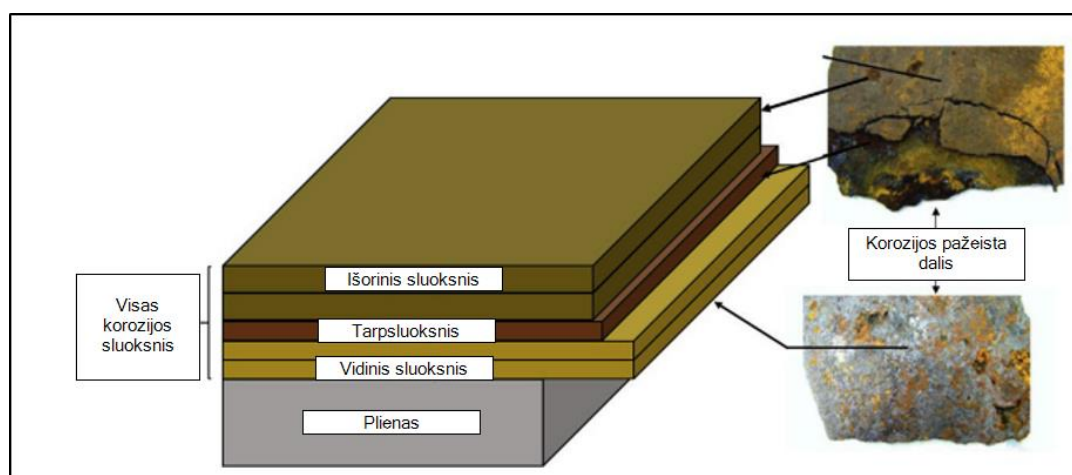
Pagal atliktus korozijos plieninėse konstrukcijose tyrimus, nustatyta, kad korozijos produkto – rudžių tūris yra didesnis nei plieno. Kai metalas oksiduojasi paviršiuje, sudaro geležies oksido junginius, laikui bėgant ir drėgmei nenykstant, geležies oksidai oksiduojasi toliau bei prisijungia hidroksidų jonus. Toliau oksiduojantis metalui, jo savybės prastėja, rudžių, t.y. geležies oksidas, plečiasi, taip didindamas korozijos zoną metale ir plėsdamas tūrį. Šie plėtimosi koeficientai yra išanalizuoti pagal oksidacijos lygį [31]:

| Formulė | FeO | Fe ₃ O ₄ | α-Fe ₂ O ₃ | γ-Fe ₂ O ₃ | δ-FeOOH | α-FeOOH | γ-FeOOH | β-FeOOH | Fe(OH) ₂ | Fe(OH) ₃ | Fe(OH) ₃ ·3H ₂ O |
|-------------------------------------|------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------------------|---------------------|--|
| Plėtimosi koeficientas pagal metalą | 1.95 | 2.29 | 2.32 | 2.41 | 3.11 | 3.21 | 3.49 | 3.81 | 4.14 | 4.57 | 7.07 |

5 pav. Tūrio plėtimosi koeficientas pagal geležies oksido tipą

Šie geležies oksidai yra linkę sluoksniuotis, sudarydami skirtingus sluoksnius. Yra išskiriami pagrindiniai 4 sluoksniai [31]:

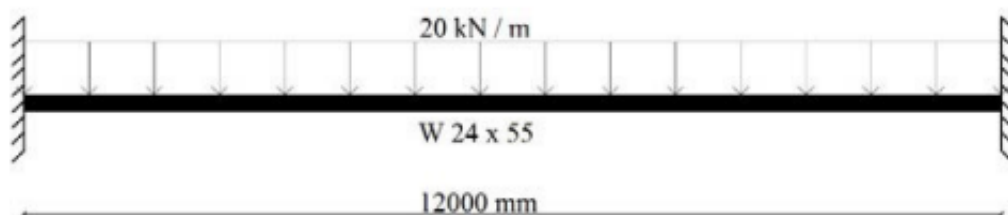
- išorinis sluoksnis;
- tarp sluoksnis;
- vidinis sluoksnis;
- nepažeistas metalo sluoksnis.



6 pav. Korozijos sluoksniai [31]

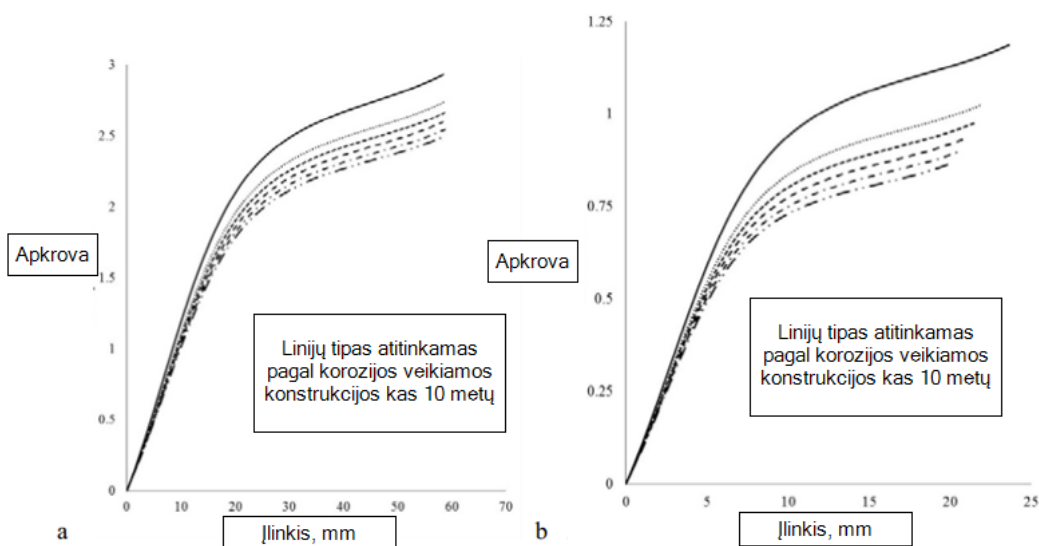
Laikui bėgant neapsaugotas metalas redukuojasi ir virsta vidiniu korozijos sluoksniu, vidinis į tarp sluoksnį sluoksnį, buvęs tarp sluoksnis sluoksnis tampa išoriniu sluoksniu, o išorinis – visiškai suyra ir pasišalina nuo konstrukcijos paviršiaus.

Kaip ir anksčiau aptarta, korozijos paveikti plieniniai elementai gali neketi laikomosios galios, pastovumo ir stabilumo. Atliktame tyrime analizuojama standžiai įtvirtinta sija [3]:



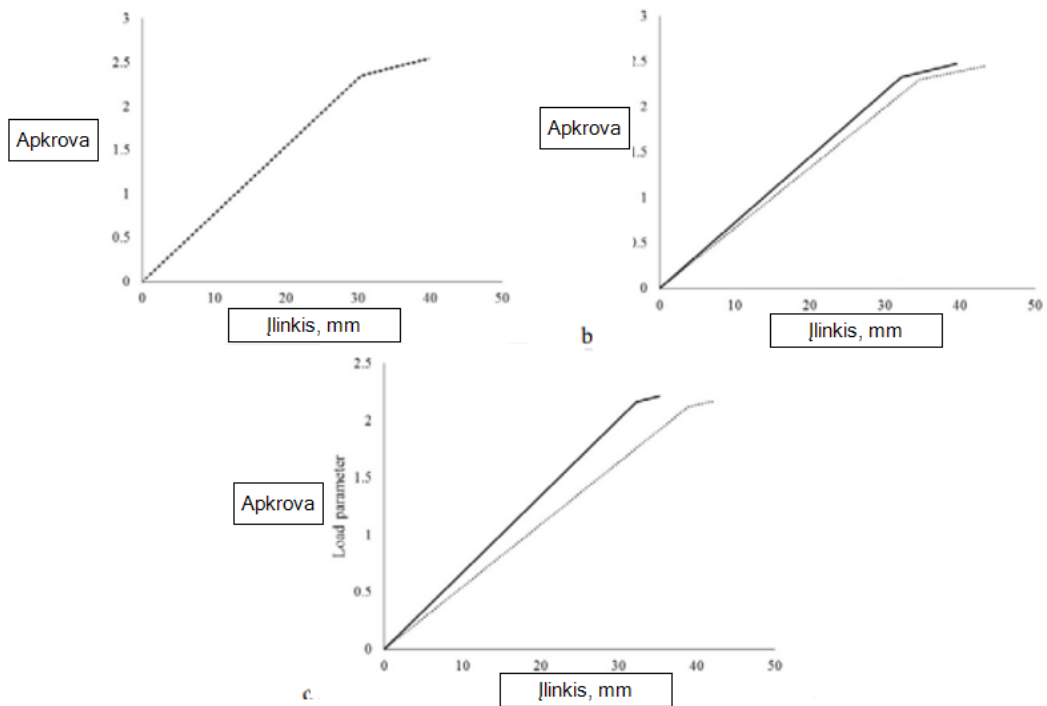
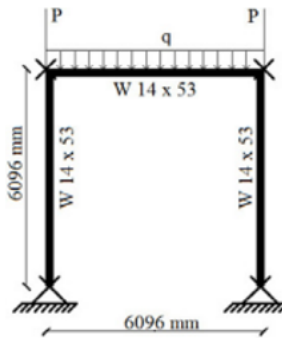
7 pav. Standžiai įtvirtinta bandoma sija.[3]

Plieninės sijos korozijos lygis ir skerspjūvio mažėjimas buvo prognozuojamas remiantis „EN ISO 9226 Corrosion of metals and alloys“ [27] ir sumodeliuoti skerspjūviai atitinkamai praėjus 10, 20, 30, 40, 50 metų eksploatuojant konstrukciją, esant vidutinėms koroziškumo sąlygoms.



8 pav. Vertikalūs poslinkis viduryje sijos: a) korozijos paveiktoje sijoje, b) korozijos paveiktoje sijoje, įvertinus ir išilginį sukamąjį klupumą.[3]

Pagal pateiktas diagramas galima teigti, jog korozija stipriai paveikia konstrukcijos darbą, ypač po pirmųjų 10 metų. Laikomoji sijos galia sumažėjo nuo 6,5% iki 65,2%. Ypač konstrukcija silpnėja, kai yra įvertinamas ir sijos išilginis sukamasis klupumas.



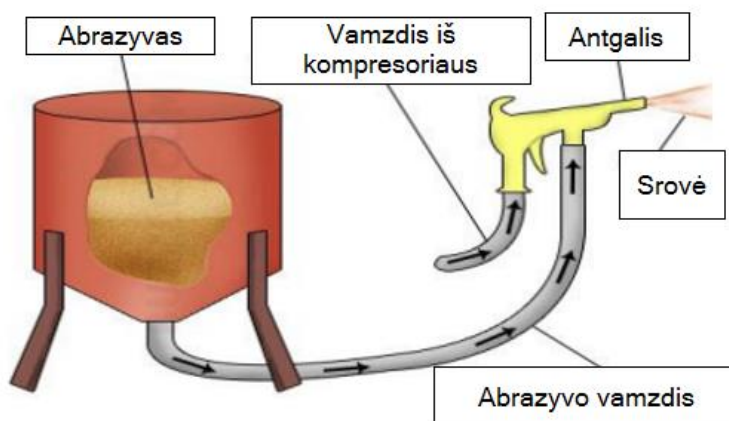
9 pav. Vertikalus poslinkis viduryje sijos: a) korozijos paveiktoje sijoje, b) korozijos paveiktoje sijoje, įvertinus ir išilginį sukamąjį klupumą.[3]

Panaši išvada galėtų būti pritaikoma ir standžiam vienaaukščiui rėmui – bėgant metams rėmo stiprumas mažėja, o įvertinus išilginį sukamąjį klupumą – jis dar prastesnis.

1.3. Korozijos šalinimas nuo plieninių konstrukcijų

Korozijos šalinimo metodų šiais laikais yra nemažai, viskas priklauso nuo to, kaip greitai turi būti atliktas darbas, kiek kainuos korozijos šaltinių ir padarinių šalinimas bei kokybė. Literatūroje yra išskiriami keli žingsniai rūdims panaikinti, kurie yra efektyvūs ir plačiai naudojami [32]:

1. Bendras valymas – tai rankiniu metodu atliekamas valymas, kai nuo korozijos paviršiaus yra pašalinami nešvarumai, riebalai ir kitos pašalinės medžiagos, kurios gali paveikti korozijos plėtojimąsi konstrukcijos paviršiuje.
2. Korozijos padarinių šalinimas
 - 2.1. Srovinis abrazyvinis apdribimas arba smėliavimas – tai metodas, kai suspaustas oras dideliu greičiu pučia abrazyvinę medžiagą į metalinės konstrukcijos paviršių, taip šalinant rūdį arba senus dažus. Tai vienas greičiausių ir paprasčiausių būdų kaip paruošti korozijos paveiktą paviršių [33].



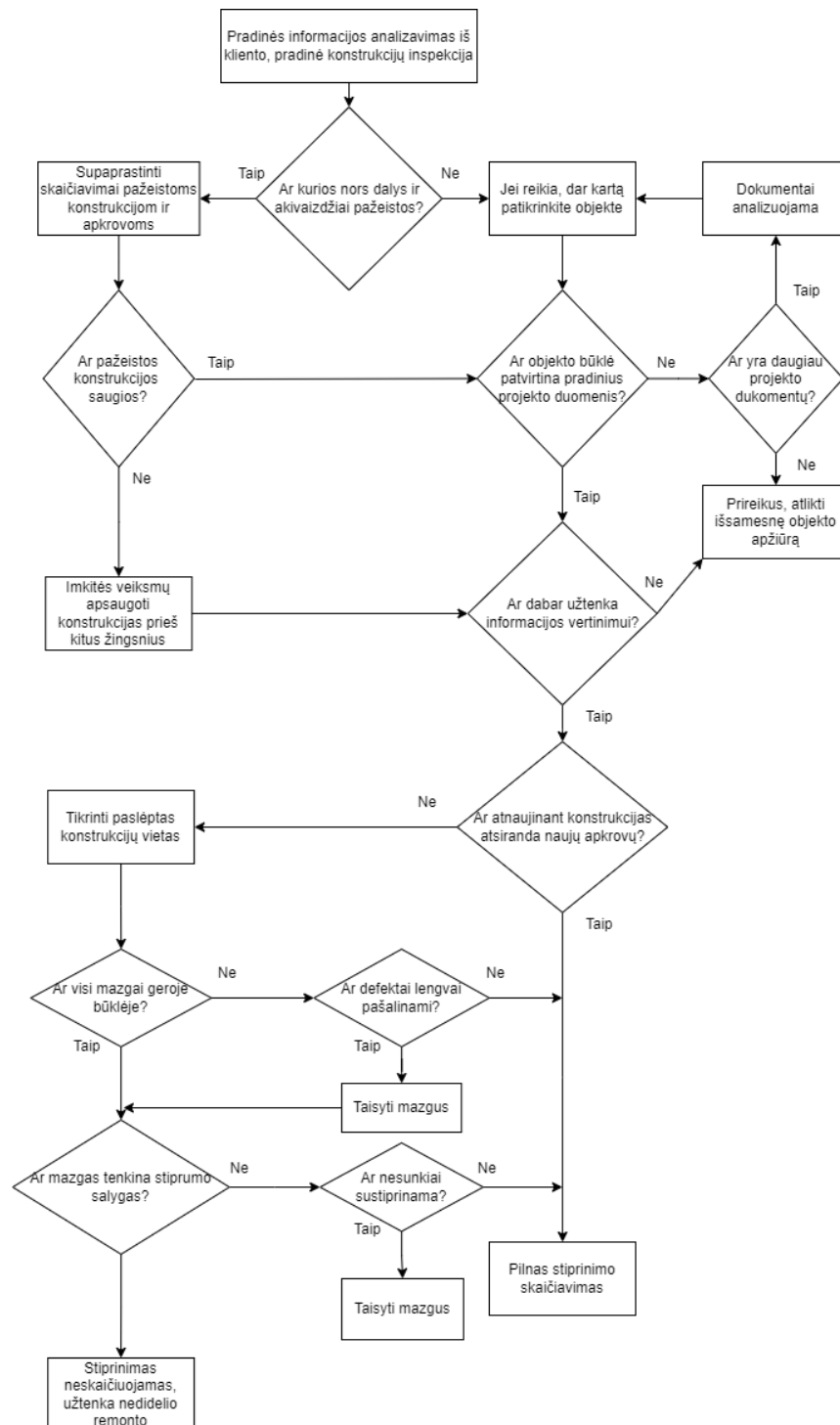
10 pav. Smėliavimo aparato mechanizmas [33]

- 2.2. Paviršiaus šveitimas abrazyviniu ar švitrinu popieriumi – tai metodas, kai skirtingo šiurkštumo popierius, padengtas mineralinėmis medžiagomis, naudojamas šveisti paviršiams [34]. Šiam metodui reikalinga didesnė darbo jėga, procesas užtrunka ilgiau. Tačiau pranašesnis už smėliavimą, kai reikia prieiti prie siaurų tarpų ir švarinamas plotas nėra didelis.
- 2.3. Cheminiai valikliai – tai purškiamą ar tepamą cheminę medžiagą, kuri reaguoja su senais dažais, rūdimis ir skaido jas, palikdama švarų plieno paviršių. Labai svarbu, kad cheminiai valikliai būtų suderinami su ateityje planuojama medžiaga, kuria bus dengiama švarus konstrukcijos paviršius. Šio metodo pranašumas - nesukelia dulkių, yra pakankamai pigus variantas kai yra dideli ir nesudėtingi paviršiai [35].

Kai konstrukcijos paviršius yra tinkamai paruošiamas, pagal vieną iš šių metodų, turi būti tinkamai padengtas pagal prieš tai išanalizuoto standarto reikalavimus ir koroziškumo aplinką.

1.4. Plieninių konstrukcijų defektavimo procesas

Visa gauta informacija apie konstrukcijas turėtų būti išstudijuota ir analizuota [5]. Per konstrukcijos inspekciją, turėtų būti apžiūrima viskas, kas galėtų kelti nerimą dėl jos darbo ir įsivertinti kokio rimtumo pažeidimai yra. Reikėtų atskirti kokiam elementui užtenka paprasto remonto, be detalesnių skaičiavimų ir kokie elementų defektai gali trukdyti konstrukcijai ateityje atlikti savo darbą. Jeigu paskaičiavus, kad esama konstrukcija nėra pakankama, tada turėtų būti vykdomas išsamus stiprinimo skaičiavimas. Detalus procesas kokie žingsniai turėtų būti atliekami yra pateikiami 11 pav.



11 pav. Defektavimo procesas [5]

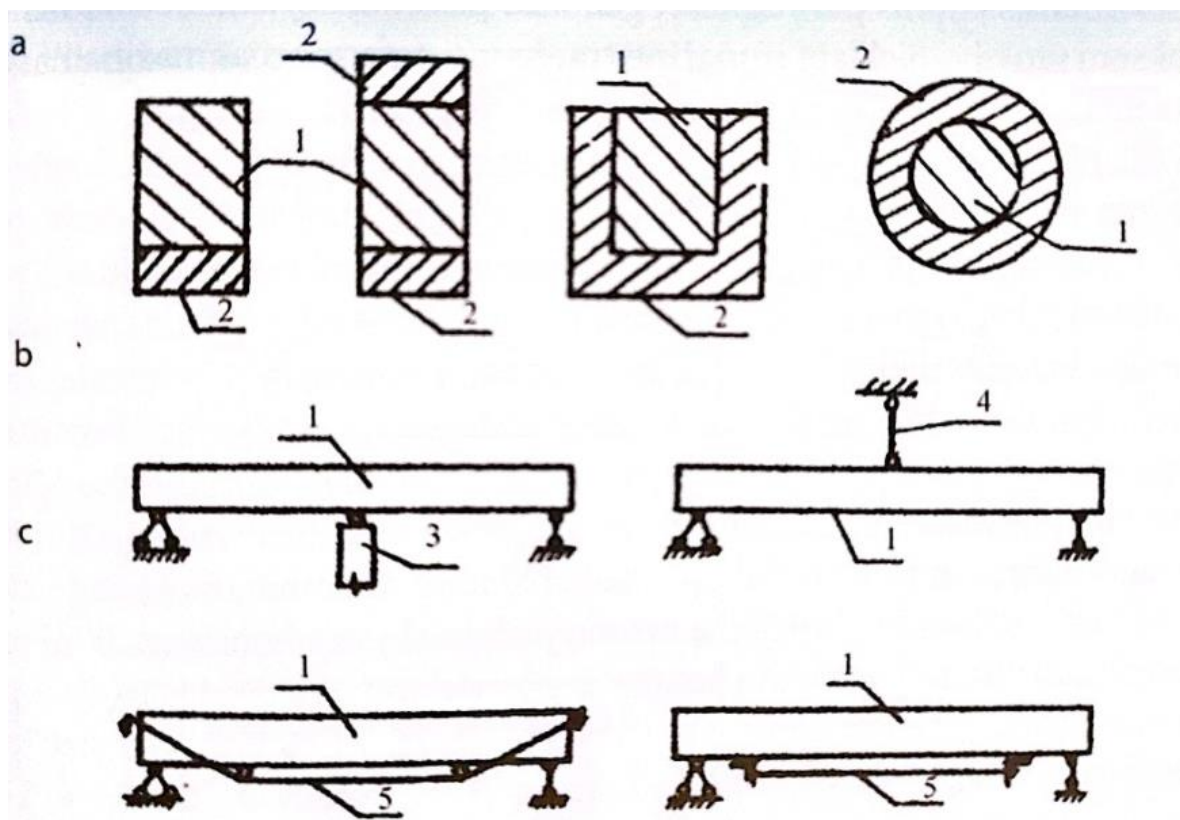
1.5. Plieninių konstrukcijų stiprinimo būdai

Konstrukcijų stiprinimas nėra rekomenduojamas jeigu [6]:

1. Papildoma medžiaga stiprinimui yra 40% didesnio svorio, negu esama konstrukcija;
2. Rekonstravimas elemento brangesnis negu jos visiškas pakeitimas.

Įvertinus konstrukcijos būklę ir gavus rezultatą, jog jai reikia stiprinimo, kitas žingsnis būtų parinkti stiprinimo būdą [1]. Bendrai visų laikančiųjų konstrukcijų tipų stiprinimo būdus būtų galima klasifikuoti taip [4]:

1. Didinant konstrukcijos skerspjūvio matmenis – tai būdas, kai prie esamo skerspjūvio pridedama papildoma medžiaga, siekiant pagerinti skerspjūvio savybes ir laikomąją galią;
2. Keičiant konstrukcijos skaičiuojamąją schemą – tai būdas, kai keičiama schema pridedant papildomas atramas, siekiant sumažinti įrašas tenkančias esamoms konstrukcijoms nuo esamų apkrovų;
3. Keičiant konstrukcijos įtempimų būvį – tai būdas, kai konstrukcija yra stiprinama įtempiamais lynais, siekiant pakeisti konstrukcijos įtempimų būvį ir jį nukrauti.



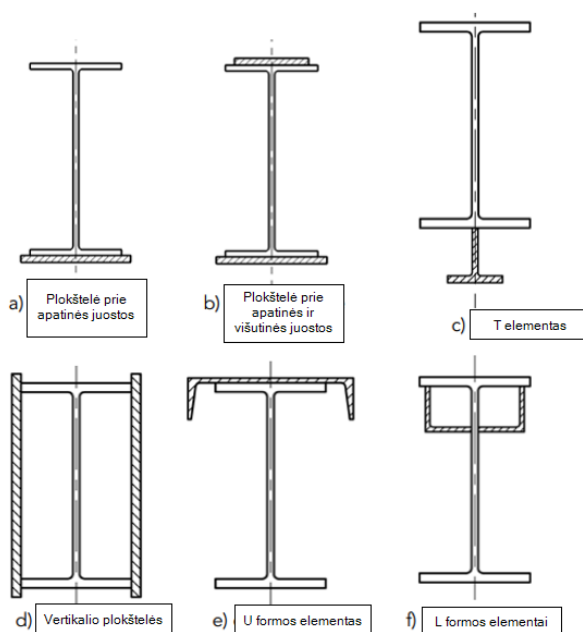
12 pav. Stiprinimo būdai: a – skerspjūvio didinimas; b – skaič. schemas keitimas; c – keičiamas konstrukcijos įtempimų būvis [4]

1.6. Plieninių konstrukcijų stiprinimas plieninėmis plokštelėmis ir papildomais profiliais

Stiprinimas plieninėmis plokštelėmis ir papildomais profiliais yra populiarus metodas dėl savo paprastumo, pigumo, vienodų medžiagų savybių, darbo paprastumo [7]. Prie esamos konstrukcijos lakštai ar profiliai gali būti privirinti arba gali būti išgręžiamos skylės pritvirtinti varžtais.

Papildomas stiprinimas plieniu yra pakankamai efektyvus. Sustiprintas skerspjūvis gaunamas iš vientisos medžiagos, taip gerinamos jo savybės. Taip padidinamas skerspjūvio plotas, ypač aktualu gniuždomiems elementams, atsparumo momentas lenkiamiems elementams, bei inercijos momentas įlinkiui apriboti.

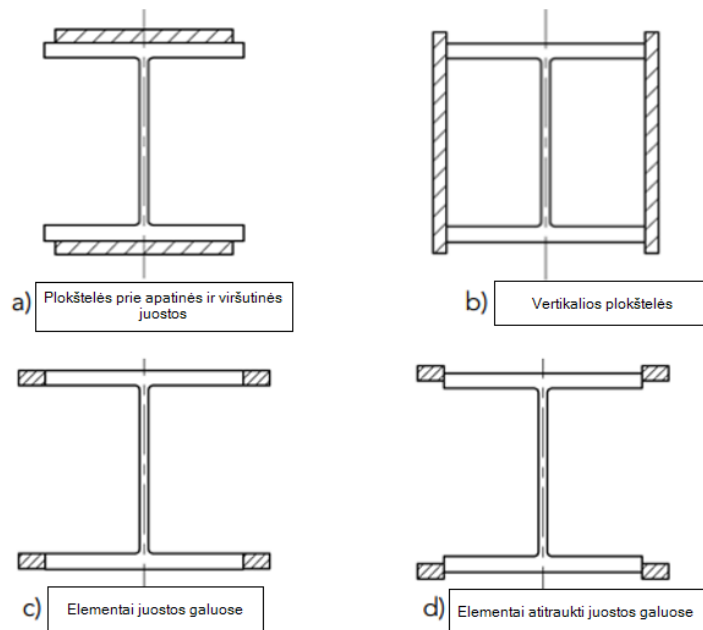
Kita vertus, toks tradicinis stiprinimo būdas turi ir minusų – naudojamas plienas yra sunkus, kai kuriose situacijose sunku sumontuoti, naujas plienas iš savęs taip pat gali būti paveiktas korozijos ir nuovargio. Sumontuoti tokias plokšteles ar profilius reikia kranu, nes ne visos vietos objektuose yra paprastai pasiekiamos. Taip pat toks stiprinimo būdas apkrauna jau pažeistą konstrukciją, kas kenkia jau pažeistos konstrukcijos patvarumui [8]. Dėl varžtų skylių gręžimo ar virinimo gali silpnėti skerspjūvis ar pati medžiaga, todėl darbai turi būti atliekami kvalifikuotai ir tiksliai.



13 pav. Sijų skerspjūvio didinimas naudojant papildomus plieninius elementus [29]

Kaip galima matyti iš šaltinio nuotraukos, plieninės sijos gali būti stiprinamos keliais būdais:

- Plokštelė pritvirtinta prie sijos apatinės juostos;
- Plokštelė pritvirtinta prie apatinės ir viršutinės juostos;
- T formos elementas pritvirtintas prie apatinės sijos juostos;
- Dvi vertikalios plokštelės pritvirtintos prie apatinės ir viršutinės juostos;
- U formos elementas pritvirtintas prie viršutinės juostos;
- L formos elementai pritvirtinti prie viršutinės juostos.



14 pav. Kolonų skerspjūvio didinimas naudojant papildomus plieninius elementus [29]

Plieninės kolonos taip pat gali būti stiprinamos keliais būdais:

- a) plokštelė pritvirtinta prie apatinės ir viršutinės juostos;
- b) dvi vertikalios plokštelės pritvirtintos prie apatinės ir viršutinės juostos;
- c) keturi elementai pritvirtinti juostos galuose;
- d) keturi atitraukti elementai pritvirtinti juostos galuose

Toks stiprinimo būdas pritaikomas beveik visuose plieninių konstrukcijų tipuose: virintose ir profilinėse sijose, plieninėse kolonose ir visose kitose atviro H, U, uždaro kvadratinio ir stačiakampio tipo konstrukcinių tipų elementuose.



15 pav. Uždaro profilio stiprinimas plokštelėmis naudojant varžtus [9]

1.7. Plieninių konstrukcijų stiprinimas didelio stiprumo anglies pluošto medžiagomis

Pluoštu sustiprinti polimerai (toliau – FRP) vis daugiau naudojami stiprinti plienines konstrukcijas. FRP mechaninės ir fizinės savybės stipriai lenkia kitas stiprinimo medžiagas, nes tai yra daug žadančios medžiagos [10]. Iki šiol, stiklo pluošto polimerai (toliau - CFRP) ir anglies pluošto polimerai (toliau – CFRP) buvo plačiai naudojami stiprinti gelžbetoninių konstrukcijų tiltus ir kitus statinius. FRP medžiagos yra formuojamos kaip lakštai ar plokštelės, priklijuotos prie betono paviršiaus, siekiant padidinti laikančiojo elemento laikomąsias savybes.

FRP medžiagos plienui pirmiausia buvo naudojamos mechaniniuose prietaisuose. CFRP laminatai pirmą kartą sėkmingai buvo panaudoti taisyti plienines oro transporto konstrukcijas [11]. Apibendrinant, stiprinimas naudojant CFRP ženkliai sumažina montavimo laiką, ir technologinis procesas paprastesnis. CFRP yra aktualūs, nes jų tamprumo modulis yra aukštas, tempiamasis charakteristinis stipris gali pasiekti net iki 3800 MPa.

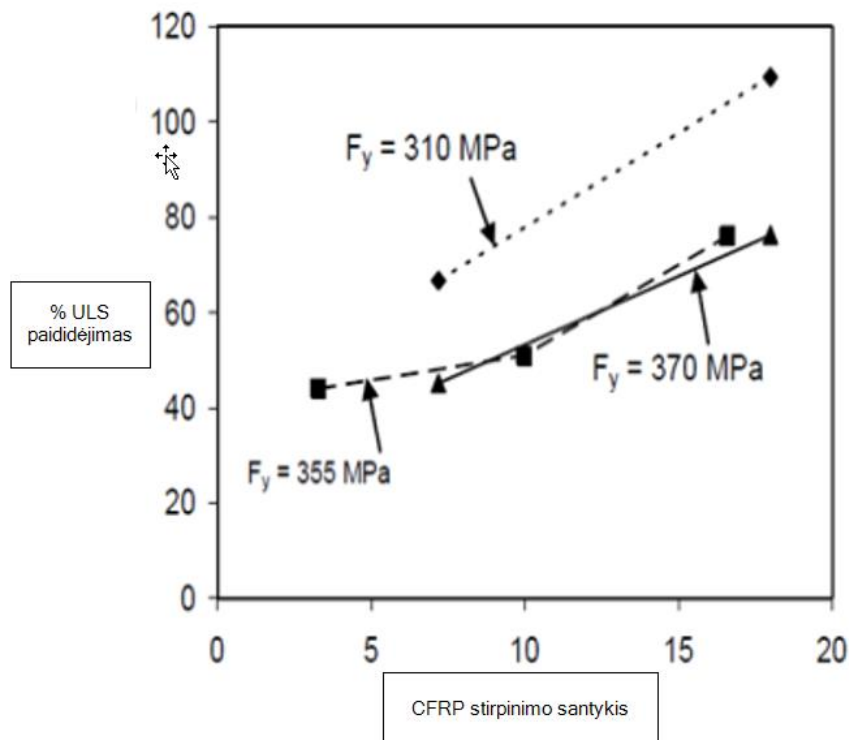
| CFRP plokštės tipas | Jungo modulis, GPa | Tempiamasis stiprumas, MPa | Ilgėjimo koeficientas |
|---|--------------------|----------------------------|-----------------------|
| Unidirectional pultruded Sika Carbodur strips [2] | >200 | >280 | >0.0135 |
| High modulus unidirectional sheets [3] | 640 | 2650 | 0.004 |
| M Brace CF 130 sheets [4] | 240 | 3800 | 0.0155 |
| M Brace CF 530 sheets [4] | 640 | 2650 | 0.004 |
| Sika Carbodur M 914 pultruded plates [5] | 125 | 1914 | |
| Sika Carbodur H 514 pultruded plates [5] | 313 | 1475 | |
| H S strips [6] | 155 | 2790 | 0.018 |

16 pav. Skirtingų CFRP laminatų savybės [12]

Vienas svarbiausių stiprinimo CFRP laminatais punktų yra tinkamas paviršiaus paruošimas ir adhezijos užtikrinimas [13]. Tik užtikrinus gerą sukibimą galima pasiekti norimus rezultatus – perimti įtempimus ir padidinti plieninės konstrukcijos standumą. Kadangi CFRP medžiaga yra anizotropinė, varžtinis prijungimas atkrenta, todėl lamintas turi būti klijuojamas. Kad klijai veiktų, turi būti užtikrintas ypač švarus paviršius: šveitimas, pašalinimas įsisenėjusių paviršių, nuriebalavimas ir visų kitų nešvarumų pašalinimas [14]. Tinkamas paviršių paruošimas, adhezijos užtikrinimas, izoliavimas nuo drėgmės patekimo, užtikrina funkciją, atliekamą CFRP. Toks stiprinimo metodas taip pat naudojamas, kai prie konstrukcijos yra sunkus priėjimas, stiprinti papildomomis plokštelėmis sudėtinga, nėra priėjimo išgręžti skylės ar virinti arba nėra priėjimo naudoti įtempiamas sistemas [36].

CFRP laminatai pagal gamintojus gali būti kelių tipų [40]:

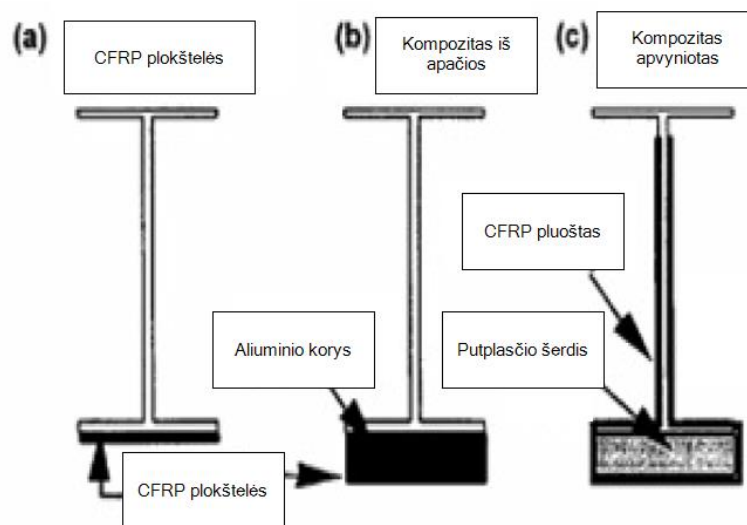
1. Lamintas sudarytas iš viena kryptimi išdėlioto pluošto;
2. Lamintas sudarytas iš dviem kryptimis išdėlioto pluošto;
3. Lamintas sudarytas iš įvairiomis kryptimis išdėlioto pluošto.



17 pav. Stiprumo plieninėse konstrukcijose padidėjimas naudojant CFRP [12]

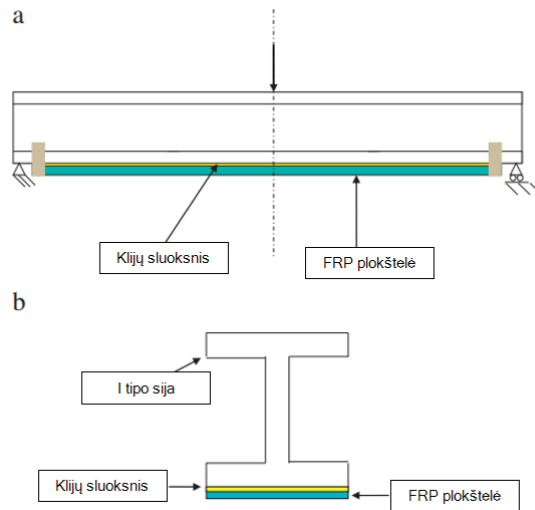
Eksperimentiškai, sustiprinus CFRP medžiagomis, galima padidinti konstrukcijos laikomąją galią net iki 60%.

Kita vertus, CFRP laminatai turi ir minusų. Anglies pluoštas yra aukštos kokybės medžiaga, kuri turi didelę savikainą. Tokios medžiagos gamyba yra kompliktuotas procesas, naudojama aukštų technologijų įranga. Kilogramas anglies pluošto gali kainuoti net iki 80 Eur/kg, tai yra žymiai daugiau nei įprastiniai stiprinimo būdai. Taip pat CFRP yra trapi medžiaga, lengvai pažeidžiama smūgių. Nors ir gavus smūgį medžiaga vizualiai nepasikeičia, tačiau vidinė struktūra pasikeičia bei nebeatlieka savo funkcijos.



18 pav. Stiprinimo būdai naudojant CFRP [12]

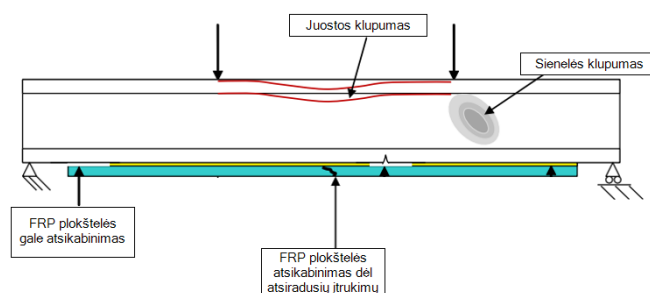
Kaip ir gelžbetoninėse konstrukcijose, plieninės konstrukcijos gali būti sustiprintos naudojant CPRP. Dažniausiai CFRP lakštai yra klijuojami tempiamoje elemento zonoje. Pagal atliktus tyrimus, geriausi rezultatai stiprinant anglies pluošto medžiagomis gaunami, kai plieninis dvitėjis profilis yra stiprinamas iš apačios, t.y. apatinės juostos ir ant sienelės abiejų pusių [37]. CFRP laminatai ne tik padidina bendrą elemento laikomąją galią, bet ir elementą sustandina [38]. Vadinasi įtempimai plieniniame elemente mažėja ir takumo riba žymiai išauga.



19 pav. Plienines elementas stiprinimo FRP schema [19]

Naudojant FRP laminatus labai svarbus tobulas paviršių paruošimas, adhezinių medžiagų paruošimas ir tinkamos aplinkos sąlygos, norint pasiekti geriausius stiprinimo rezultatus [39]. Tačiau taip sustiprintuose elementuose galimi ir specifiniai suirimo atvejai. Šie suirimo atvejai tampa aktualūs, nes elementas sustiprintas tempiamoje zonoje perima didesnius gniuždymo įtempius viršuje, todėl reikia didesnės apkrovos kad elementas suirtų globaliai, dėl to gali lokalūs suirimo atvejai pasireikšti anksčiau. Jie yra išskiriami į tokius [19]:

1. Išilginis klupumas;
2. FRP plokštės galo atsikabinimas;
3. FRP plokštės atsikabinimas dėl atsiradusių įtrukimų;
4. Lokalus lentynos klupumas;
5. Lokalus sienelės klupumas.



20 pav. Suirimo atvejai galimi stiprinant FRP [19]

1.8. Plieninių konstrukcijų stiprinimas įtemptais lynais

Išorinis konstrukcijos įtempimas - tai metodas, kai lynai montuojami išorėje elemento ir įtempimo jėgos į elementą yra perduodamos per inkarines ar kitas tvirtinimo sistemas [15]. Šio stiprinimo principas – konstrukcijos įtempimas pasiekimas naudojant ypač stiprius lynus, kurie užinkaruojami abiejuose lenkiamos konstrukcijos galuose. Tuomet užinkaruoti lynai įtempiami, taip konstrukcijoje sumažinami tempimo įtempimai ir padidinami gniuždymo įtempimai. Labai svarbu lynus inkaruoti centriškai, siekiant išvengti dviašio lenkimo. Toks metodas dažniausiai naudojamas lenkiamiems elementams. Pradėtas naudoti kaip efektyvus būdas stiprinti gelžbetonines tiltų konstrukcijas, kurių tempiamus sluoksnius siekiama nukrauti. Vis plačiau naudojama stiprinti ir plienines konstrukcijas.



21 pav. Įtemptų lynų panaudojimas tiltų plieninėse konstrukcijose

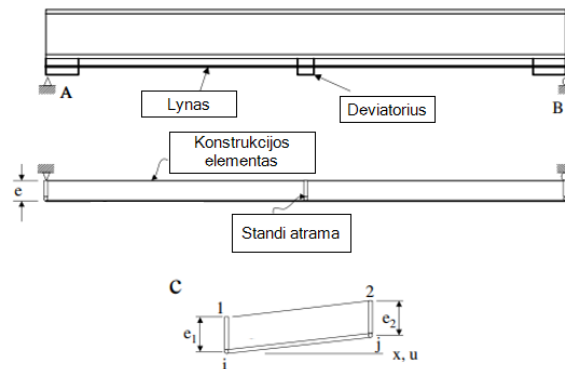
Naudojant įtempiamas sistemas nereikia demontuoti konstrukcijų ir tai yra pakankamai pigi alternatyva kitiems stiprinimo būdams. Templės įtempiamos mechaniniu būdu – naudojant varžtus ar su domkratais, kartais naudojami ir elektroniniai įtaisai. Šis stiprinimo metodas taip pat pranašus, nes gali būti analizuojamas tradiciniu konstrukcinių elementų skaičiavimu.

Plieniniuose lenkiamuose elementuose, tokiuose kaip sijos, šis metodas naujoms konstrukcijoms gali padėti sutaupyti net iki 12% procentų konstrukcijos svorio ir 12% kainos sumažėjimo. Kitose konstrukcijose galima sutaupyti net iki 50% svorio ir 30% kainos.

3 lentelė. Plieno svorio ir kainos sumažėjimas naudojant įtemptąsias sistemas [18]

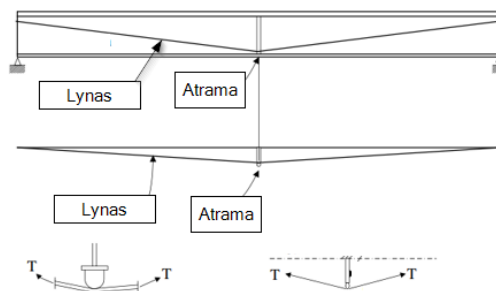
| Konstrukcijos tipas | Svorio sumažėjimas (%) | Kainos sumažėjimas (%) |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| Virintinės sijos | 10-12 | 8-12 |
| Santvaros iki 30m | 5-10 | 2-5 |
| Stogo santvaros 30-40m | 10-20 | 5-10 |
| Stogo santvaros 40-60m | 10-45 | 7-20 |
| Rėmai ir arkos 30-60m | 20-50 | 10-30 |

Įtempiamąsias sistemas lenkiamuose elementuose galima naudoti keliais būdais. Laikančiaja sija galima įtempti naudojant standumo metodą. Šis būdas pasižymi tuo, kad įtempiamas elementas yra tiesus, sijos apačioje ir yra analizuojamas kaip standus strypas.



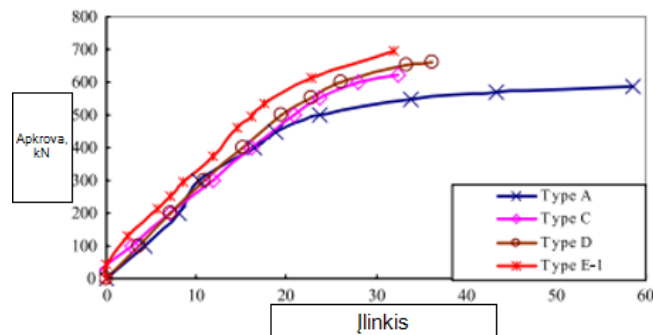
22 pav. Plieninė sija įtempama tiesiu strypu apačioje [18]

Kitas metodas - įtempti lenkiamąjį elementą – lankstumo metodas. Tai metodas, kai įtempimas elementas yra inkaruojamas sijos galuose. Įtempiamas elementas šiame metode dažniausiai naudojamas kaip lynas.



23 pav. Plieninė sija įtempama lynų, inkaruojamu galuose [18]

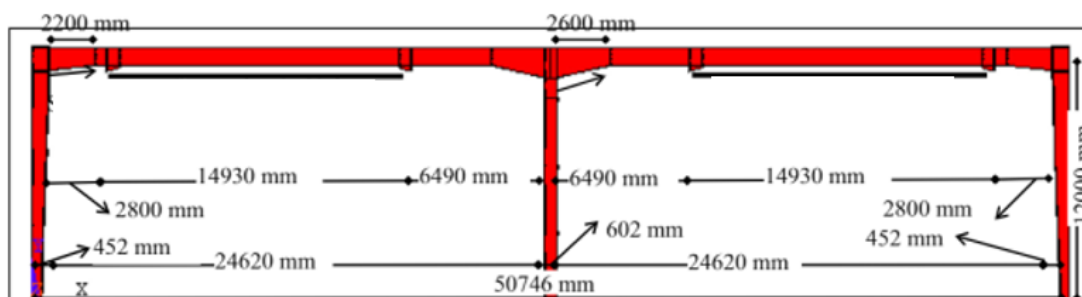
Pagal atliktus eksperimentinius tyrimus, galima matyti, kad lankstumo metodas yra efektyviausias, po jo pagal efektyvumą būtų standumo metodas.



24 pav. Tipas A – kontrolinės neįtempta sija, tipas C - sija įtempama standžiu strypu, tipas D – sija įtempta standžiu strypu su standžia atrama viduryje, tipas E – sija įtempama sijos galuose [18]

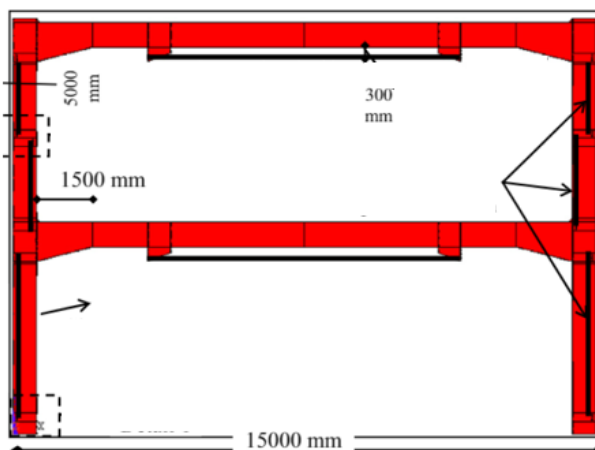
Remiantis šiais tyrimais, įrodyta kad įtemptos sijos laikomoji galia, standumas didėjo, didinant įtempimo jėgas. Šis metodas taip pat gali būti pritaikomas ir jau egzistuojančioms konstrukcijoms, kurių laikomoji galia yra sumažėjusi ir reikiamas stiprinimas.

Yra keli būdai kaip galima panaudoti įtemptąsias sistemas plieniniuose rėmuose. Vienas iš jų, kai lynai įtempiami tik rėmo sijos apačioje, siekiant sumažinti momentą sijoje.



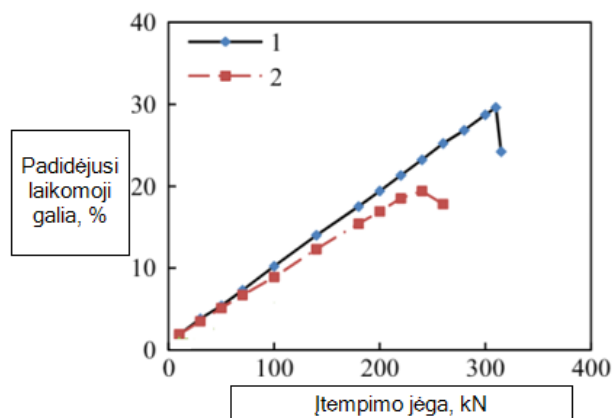
25 pav. Pirmas variantas įtemptosios sistemos plieniniame rėme [16]

Antras būdas labai panašus į pirmąjį – sija taip pat įtempinama apačioje, tačiau šį kartą papildomai įtempiamos lynais ir kolonos, momento plokštumoje.



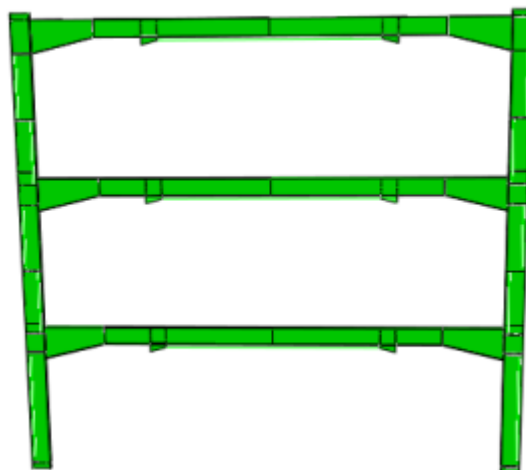
26 pav. Antras variantas įtemptosios sistemos plieniniame rėme [16]

Palyginus šiuos metodus, efektyvesnis yra antrasis. Tačiau ne visuomet geresnė laikomoji galia yra lemiamasis faktorius parenkant stiprinimo būdus. Galimas variantas, kad pilnai pakanka ir paprastesnio stiprinimo būdo ir stiprinimas tampa ženkliai ekonomiškai efektyvesnis.



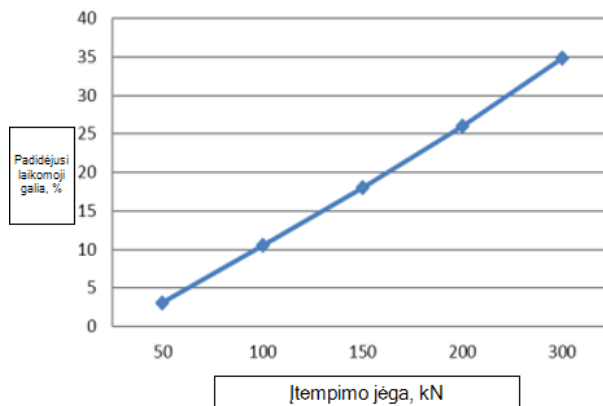
27 pav. Laikomųjų kalių padidėjimo procentų grafikai [16]

Įtempimą lynais galima pritaikyti ir daugiaaukščiuose plieniniuose rėmuose. Analizuojamame pavyzdyje, tyrimo objektas yra standus trijų aukštų rėmas, kiekvienas aukštas – 5m, rėmo tarpatramis 15m ir žingsnis tarp rėmų – 6m.



28 pav. Daugiaaukštis įtempiamas rėmas plieniniame rėme [25]

Galutinis rezultatas, kai daugiaaukštis rėmas yra palaipsniui apkraunamas didėjančia įtempimo jėga, yra gaunamas teigiamas – maksimaliai sustiprintas rėmas yra 34,84% stipresnis už nestiprintą rėmą.



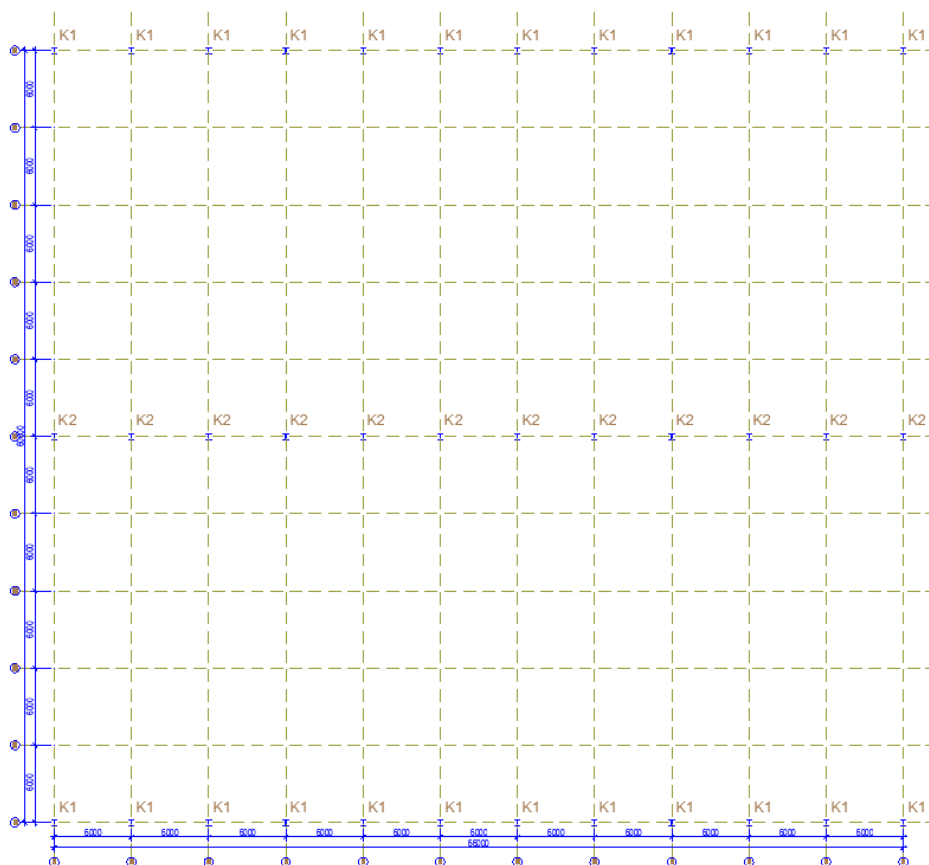
29 pav. Priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos ir daugiaaukščio rėmo stiprumo didėjimo [25]

2. Trašų sandėlio duomenų analizė

2.1. Projektinė informacija

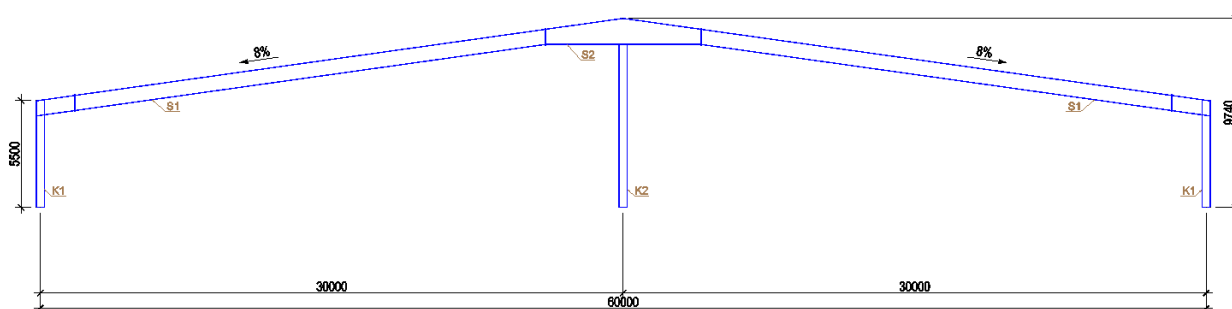
Trašų sandėlis šiuo metu yra eksploatuojamas, tačiau jo konstrukcijos stipriai pažeistos korozijos, todėl reikia atlikti esamų konstrukcijų analizę ir įvertinti ar jas reikia stiprinti.

Pastato konstrukcinė schema ir 6m x 6m tinklelis, viso pastato matmenys 66m x 60m.



30 pav. Sandėlio konstrukcijų išdėstymo tinklelis

Analizuojama pasirinktinai – 60m standus rėmas, kuris susideda iš trijų laikančiųjų kolonų ir dviejų 30m tarpatriamio sijų.



31 pav. Sandėlio rėmas

Sandėlio plieninės konstrukcijos buvo projektuotos iš C245 klasės plieno pagal GOST standartą.

4 lentelė. Plieno klasifikavimas pagal GOST 27772-88 standartą [20]

| Plieno markė | Lakšto storis | Takumo riba (MPa) | Stiprumo riba (MPa) | Tamprumo modulis (GPa) |
|--------------|---------------|-------------------|---------------------|------------------------|
| C245 | 4-20 mm | 245 | 370 | 200 |
| | 20-25 mm | 235 MPa | 370 | 200 |
| | 25-30 mm | 235 MPa | 370 | 200 |

Rėmo konstrukcija sudaryta iš virintinių dvitėjų profilių.

5 lentelė. Konstrukcinių elementų skerspjūviai

| Konstruktinis elementas | Skerspjūvis |
|-------------------------|-------------|
| K1 - kolona | |
| K2 - kolona | |
| S1 - sija | |
| S2 - sija | |

2.2. Apkrovų ant rėmo skaičiavimas

Nuolatinės apkrovos ant stogo

Stogo perdangos apkrovos:

6 lentelė. Stogo perdangos apkrovos

| Sluoksnis | Storis, t (mm) | Svoris (kg/m ²) | Char. Apkrova (kN/m ²) | Skaič. Apkrova (kN/m ²) |
|-----------------------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Orą ir garus izoliuojanti plėvelė | 0.2 | 0.15 | 0.0015 | 0.002 |
| Profiliuoti lakštai | 1 | 12.66 | 0.124 | 0.17 |
| Suma: | | | 0.126 | 0.172 |

Lauko sienos apkrovos:

7 lentelė. Lauko sienos apkrovos

| Sluoksnis | Storis, t (mm) | Svoris (kg/m ²) | Char. Apkrova (kN/m ²) | Skaič. Apkrova (kN/m ²) |
|------------------------------|----------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Sieninės plokštės „Sandwich“ | 100 | 14.05 | 0.14 | 0.186 |
| Suma: | | | 0.14 | 0.186 |

Kintamos apkrovos ant stogo

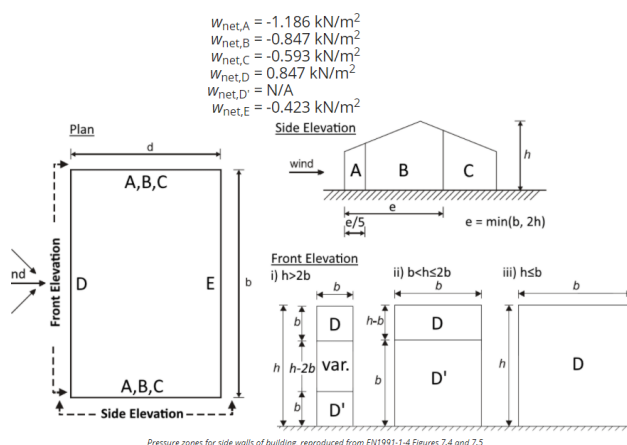
Sniego apkrova ant stogo

Pagal STR 2.05.04:2003 „Poveikiai ir apkrovos“ [23] Kaunas priskiriamas I sniego apkrovos rajonui su sniego antžeminės apkrovos charakteristinė apkrovos reikšme 1,2 kN/m².

Vėjo apkrovos

Pagal STR 2.05.04:2003 „Poveikiai ir apkrovos“ [23] Kaunas priskiriamas I vėjo apkrovos rajonui su vėjo greičio pagrindinės atskaitinės reikšmės $v_{ref,01}=24$ m/s.

Vėjo vertikali apkrova skaičiuojama pagal „EN 199-1-1 Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms“ [24].



32 pav. Vėjo apkrovos ant sienų skaičiavimas

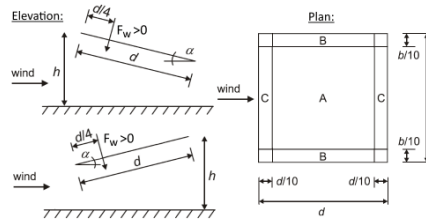
$$W_{net,A} = (-1.135 \text{ or } +0.881) \text{ kN/m}^2$$

$$W_{net,B} = (-1.592 \text{ or } +1.931) \text{ kN/m}^2$$

$$W_{net,C} = (-1.677 \text{ or } +1.253) \text{ kN/m}^2$$

$$F_w = (-0.694 \text{ or } +0.390) \cdot c_s c_d \cdot b d \text{ kN}$$

$$e = d/4$$

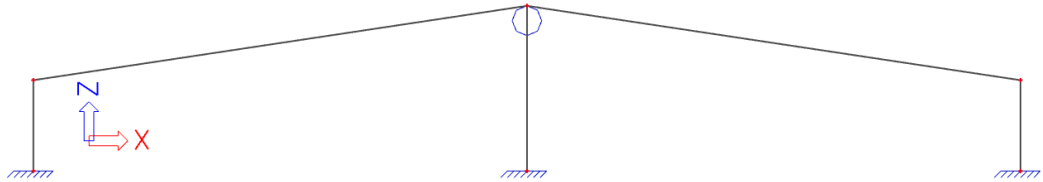


Pressure zones for monopitch canopy roofs, reproduced from EN1991-1-4 Table 7.6 and Figure 7.16

33 pav. Vėjo apkrovos ant stogo skaičiavimas

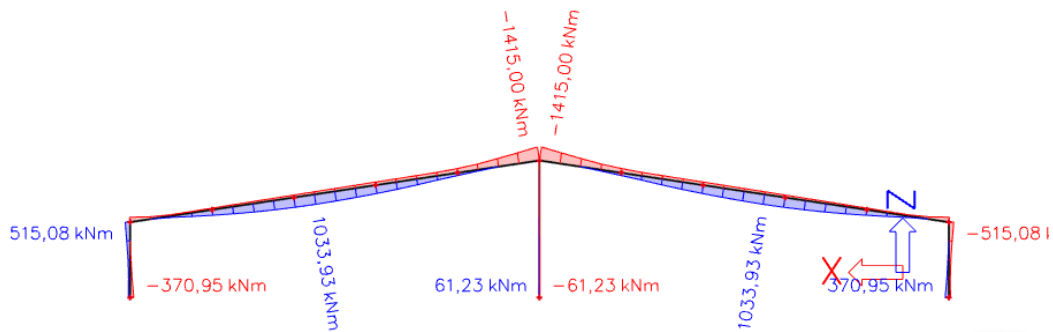
2.3. Rėmo įrašų skaičiavimas

Sudaromas skaičiuojamasis modelis baigtinių elementų programoje „SCIA Engineering“

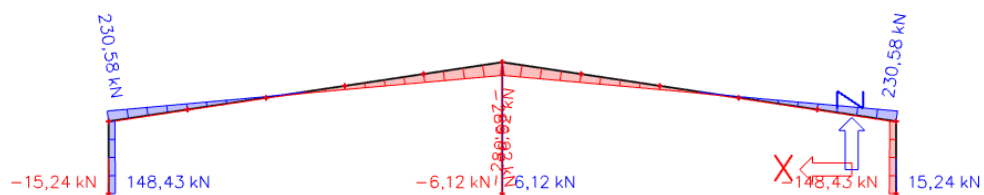


34 pav. Skaičiuojamasis modelis

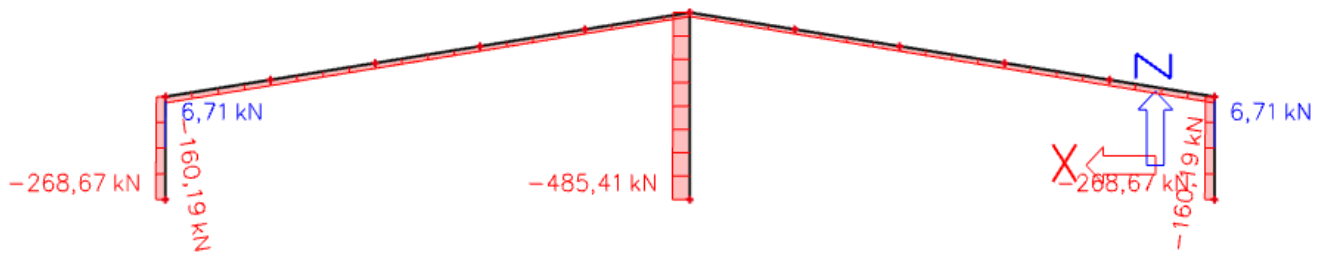
Sudarius saugos ribinių būvių ir tinkamumo ribinių būvių derinius gaunamos kritinės įrašos skaičiuojamame rėme.



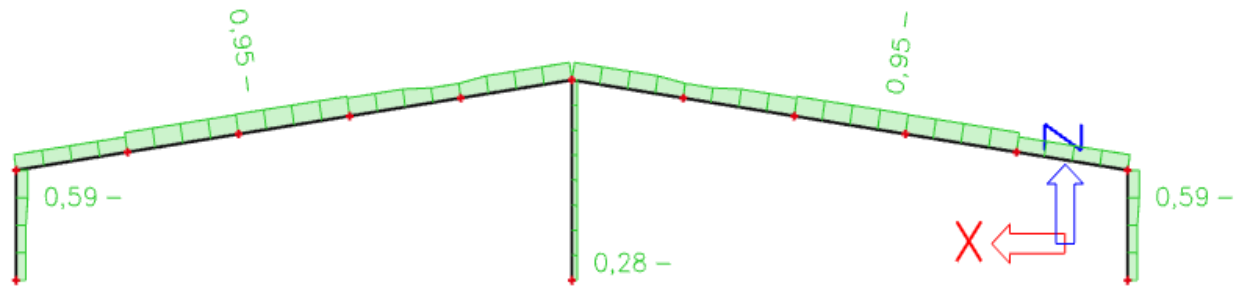
35 pav. Rėmo momentų diagrama



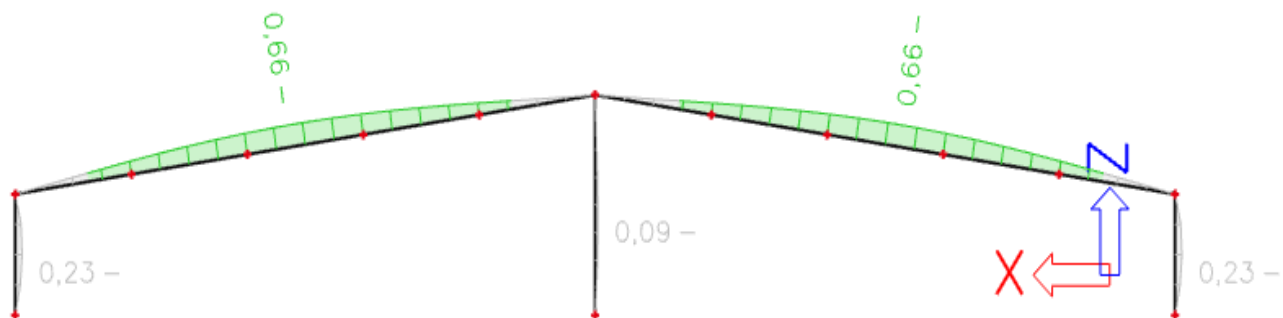
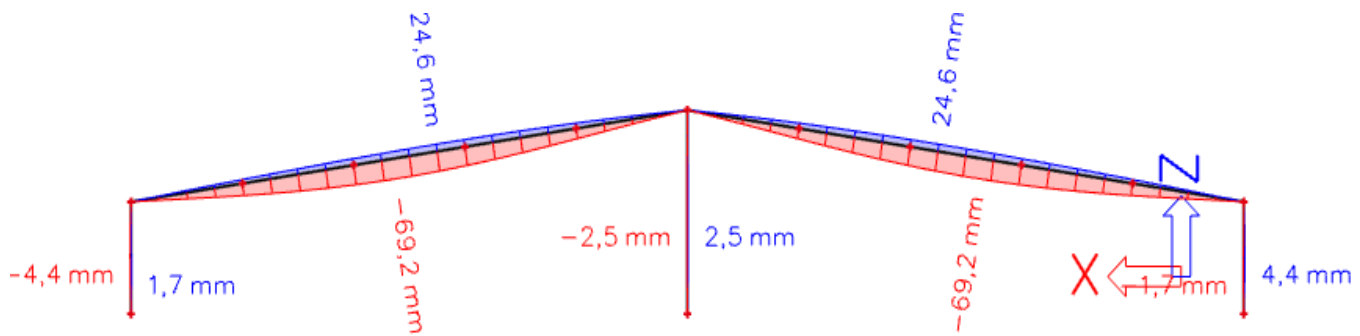
36 pav. Rėmo skersinių jėgų diagrama



37 pav. Rėmo ašinių jėgų diagrama



38 pav. Rėmo išnaudojimas ULS, esant projektiniam skerspjūviui



39 pav. Rėmo išnaudojimas SLS, esant projektiniam skerspjūviui

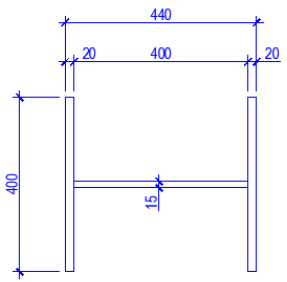
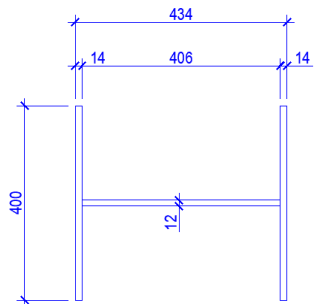
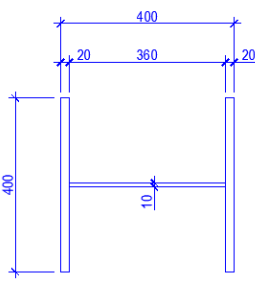
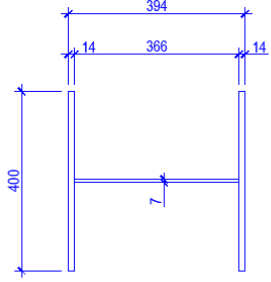
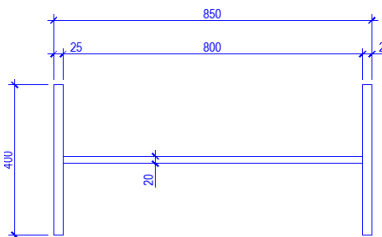
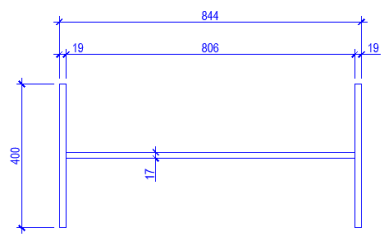
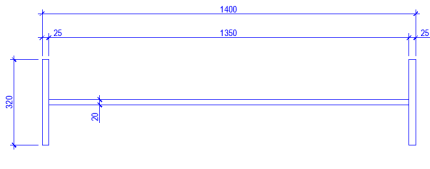
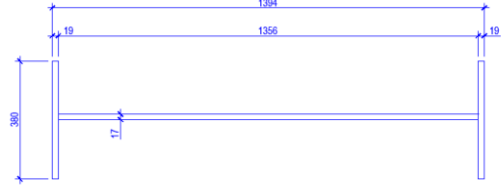
2.4. Skerspjūvių korozijos modeliavimas

Kaip ir minėta literatūros analizėje, korozija atitinkamose konstrukcijose bus modeliuojama ir nuspėjama pagal „LST EN ISO 12944-2:2000 Dažai ir lakai. Plieninių konstrukcijų apsauga nuo korozijos apsauginėmis dažų sistemomis.“ standarto pateikiamas lenteles.

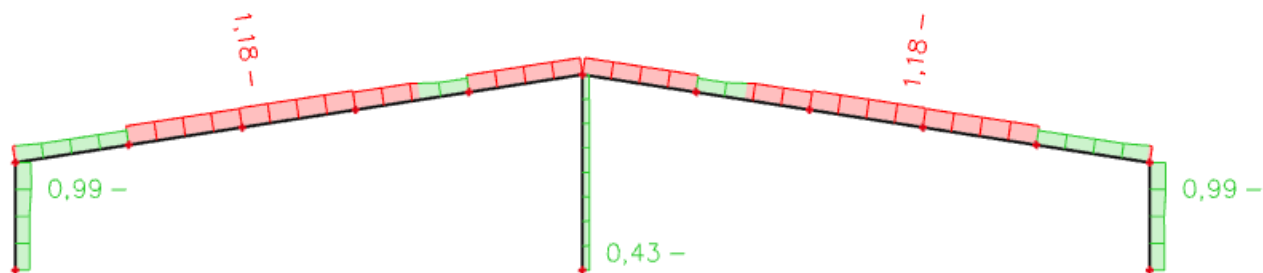
Pagal skerspjūvio tipą, dvitėjų virintinių elementų skerspjūvių elementų paviršinė horizontali netektis yra 0,146mm/metai, o vertikali – 0,073mm/metai. Sandėlis yra eksploatuojamas 30 metų, bet pradinis epoksidinis gruntas, kuriuo buvo padengtos konstrukcijos visiškai sunyko ir pastatas veikiamas aktyvios korozijos 20 metų, todėl atliekami atitinkami skaičiavimai: $t_{kor,hor} = 20 * 0,142 = 2,92mm.$

$$t_{kor,ver} = 20 * 0,073 = 1,46mm.$$

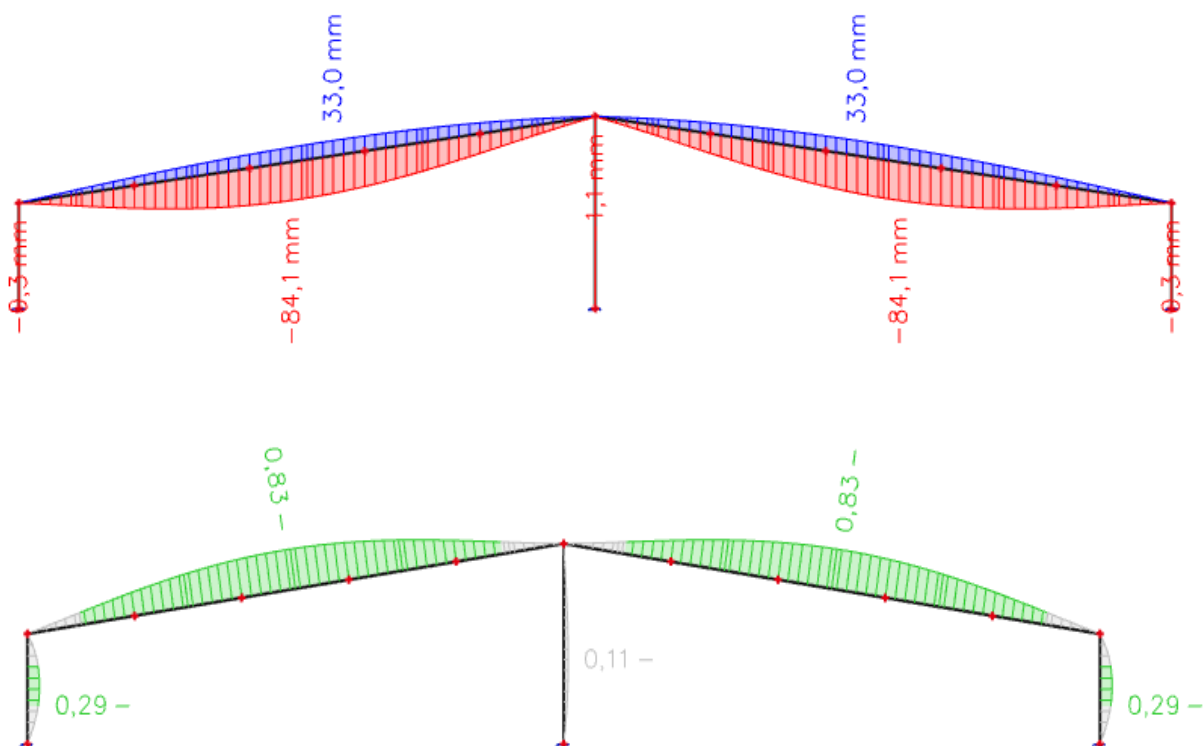
8 lentelė. Skerspjūvio korozijos suvestinė

| Konstruktinis elementas | Projektinis skerspjūvis | Korozijos paveiktas skerspjūvis |
|-------------------------|---|---|
| K1 - kolona |  |  |
| K2 - kolona |  |  |
| S1 - sija |  |  |
| S2 - sija |  |  |

Sumodeliavus korozijos paveiktus skerspjūvius ir atlikus baigtinių elementų analizę gauti elementų išnaudojimai. Galima daryti išvadas, kad paveiktas korozijos rėmas neatitinka šiuolaikinių europinių keliamų projektavimo reikalavimų. Sija yra išnaudojama 118%, kraštinės kolonos 99%, todėl visam plieniniam rėmui stiprinimas yra būtinas.



40 pav. Korozijos paveikto rėmo išnaudojimas ULS



41 pav. Korozijos paveikto rėmo išnaudojimas SLS

Lyginant projektinio rėmo ir korozijos paveikto rėmo deformacijas vertikalia kryptimi prieaugis yra ~15mm, kas yra ženklus pokytis. Tačiau lyginant įlinkius su leidžiamais, plieninis rėmas atitiktų dabartinius statybos reglamentų reikalavimus, išnaudojimas yra 83%. Taip atsitinka todėl, kad sija išlieka pakankamai standi, nors ir skerspjūvis pakankamai stipriai paveiktas korozijos. Tačiau sija netenkina saugos ribinių būvių sąlygų, tikrinant sijos pastovumą. Stiprinimas yra būtinas, tačiau deformacijos esamo rėmo yra patenkinamos.

3. Rėmo stiprinimas įtempiamais lynais

3.1. Rėmo stiprinimo įtempiamais lynais metodologija

Sija projektuojama naudojantis „EN 1993-1-1:2005 Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas“ pagrindinėmis nuostatomis. Naudojantis baigtinių elementų skaičiavimo programa „SCIA Engineering“, tikrinami sijos saugos ribiniai būviai [22]:

Skerspjūvio laikomoji galia:

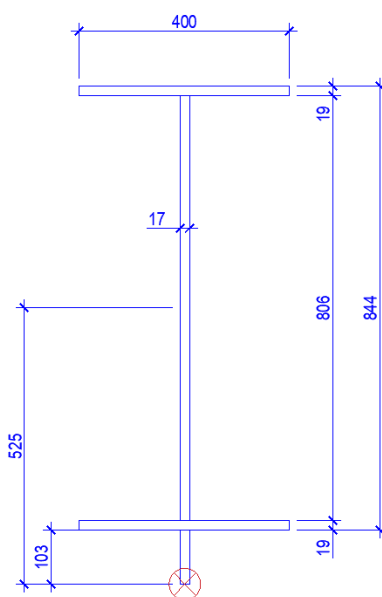
1. Sijos skerspjūvio savybės;
2. Sijos tempimas;
3. Sijos gniuždymas;
4. Sijos lenkiamasis momentas;
5. Sijos šlytis;
6. Sijos kombinuotas lenkimas ir šlytis;
7. Sijos kombinuotas lenkimas ir ašinė jėga;
8. Sijos kombinuotas lenkimas, šlyties ir ašinė jėga.

Skerspjūvio klumpamoji galia:

1. Sija veikiama gniuždymo;
2. Sija veikiama lenkimo;
3. Sija veikiama lenkimo ir ašinio gniuždymo;
4. Sija veikiama skersinio ir skersinio sukamojo klumpumo.

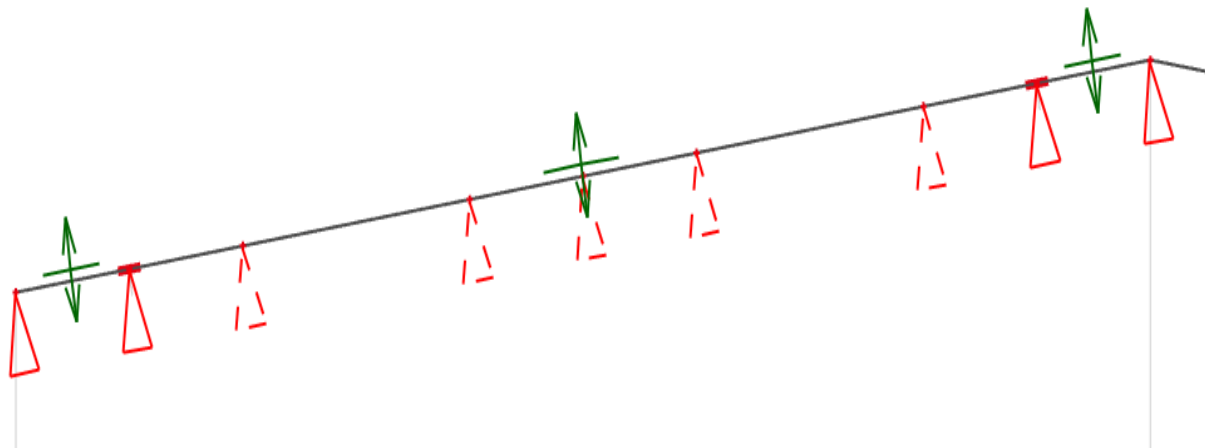
Rėmo įtempimui lynais naudojami Y1770S klasės įtempiamieji lynai, kurių charakteristikos: $f_{pk} = 1770 \text{ N/mm}^2$; $f_{p0,1k} = 1520 \text{ N/mm}^2$; $f_{p0,1d} = 1250 \text{ N/mm}^2$; $E_s = 195000 \text{ N/mm}^2$; $\epsilon_{uk} = 3,5 \%$ [21]. Jėgos, kuriomis lynas įtempiamas, didinamos palaipsniui siekiant atrasti optimaliausią rėmo sijos įtempimą. Jėga yra pridedama jau atmetus nuostolius, todėl skaičiavimuose yra gaunami realūs atsakymai.

Rėmo sija yra įtempinama apačioje – lynas pritvirtinamas dviejuose taškuose ir įtempiamas ašine jėga, taip sukeldamas papildomas gniuždymo jėgas sijoje ir sukeldamas neigiamą momentą.



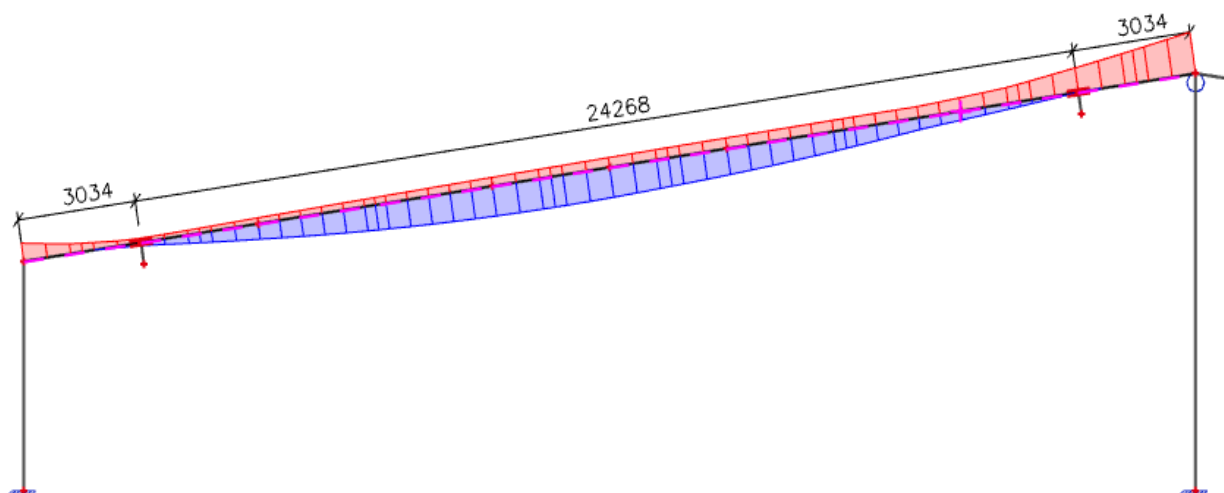
42 pav. Lyno įtempimo taškas, $e_{ly} = 0,525\text{m}$

Kai lynas įtempiamas apačioje, rėmo sija tampa gniuždoma necentriškai, todėl tai įtakoja ir sijos stabilumo skaičiavimus. Tačiau yra ir teigiama stiprinimo lynais pusė – sijos skaičiuojamasis ilgis plokštumoje sutrumpėja – kadangi atsiranda menamos atramos lynų montavimo ir jėgos pridėjimo vietose.



43 pav. Rėmo sijos skaičiuojamieji ilgiai plokštumoje, atrama nutolus 10%

Lyno montavimo vieta ir kartu jėgos pridėjimo taškas yra parenkamas pagal rėmo sijos lenkimo momentų gaubtinę, todėl priimtas optimalus taškas yra apytiksliai 10% sijos ilgio, pridėdamas atitraukus nuo atramos. Sijos bendras ilgis su nuolydžiu yra 30,3m, todėl apytikslė jėgos pridėjimo vieta ant sijos yra $30,3\text{m} \times 0,1 = 3,03\text{m}$.

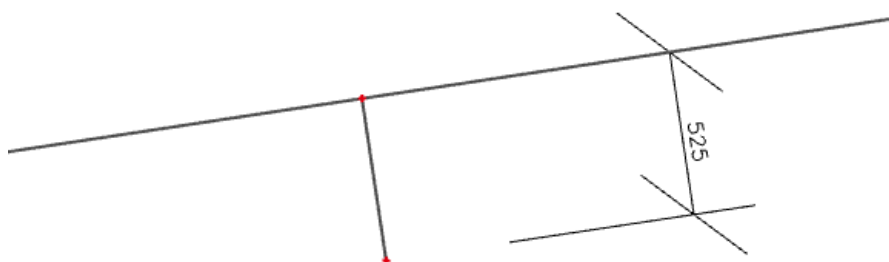


44 pav. Lyno montavimo pozicija ant sijos, atrama nutolus 10%

Taip pat tikrinami sijos ir rėmo sijos tinkamumo ribiniai būviai. Tačiau įlinkiai skaičiuojami ne analitiniu būdu, o naudojantis „SCIA Engineering“ baigtinių elementų paketu, taip gaunant horizontalius projektinius įlinkius ir juos priliginant su leidžiamus taip gaunant T.R.B iš naudojimą.

Apibendrinus sijos projektavimą lynais – sijos stiprumas ir pastovumas skaičiuojamas analitiniu metodu, taip gaunant rėmo sijos skerspjūvio laikomąją galią ir prilyginant su esamomis įrąžomis kurios susidaro nuo apkrovų ir lynų įtempimo jėgų.

Kaip ir ankščiau minėta, jėga pridėdama sijos apačioje, todėl susidaro neigiamas momentas. Lenkimo momentas apskaičiuojamas įtempimo jėgą F_{ly} padauginus iš jėgos pridėjimo ekscentriciteto e_{ly} . Jėgos pridėjimo aukštis pasirinktas 525mm nuo sijos centro, kad būtų patogus lynų montavimas ir įrengimas.



45 pav. Jėgos pridėjimo vieta, sumodeliuota „SCIA Engineering“, $e_{ly} = 0,525\text{m}$

Momento, kuris susidaro dėl jėgos pridėjimo ekscentriciteto, formulė: $M_{ly} = F_{ly} * e_{ly}$.

9 lentelė. Įtempimo jėgų suvestinė , $e_{ly} = 0,525\text{m}$

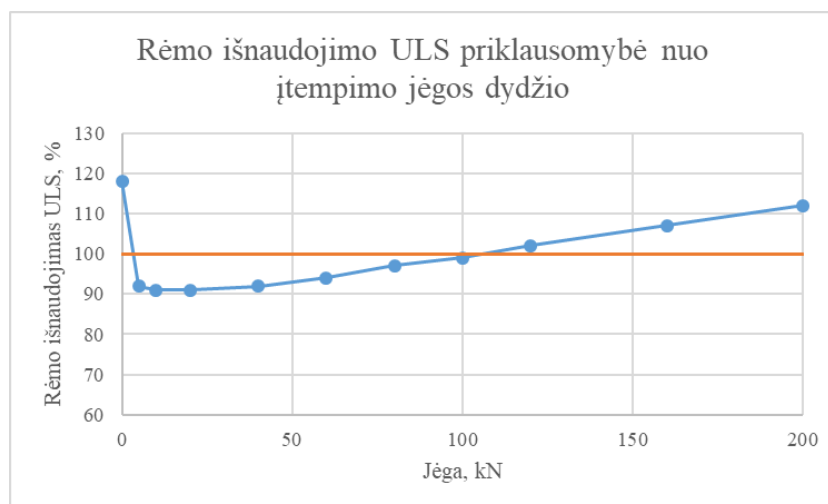
| Jėgos pridėjimo ekscentricitetas e_{ly} , m | Jėga F_{ly} , kN | Susidaręs lenkimo momentas dėl ekscentrinės jėgos M_{ly} , kNm |
|---|--------------------|--|
| 0,525 | 5 | 2,6 |
| 0,525 | 10 | 5,3 |
| 0,525 | 20 | 10,5 |
| 0,525 | 40 | 21 |
| 0,525 | 60 | 31,5 |
| 0,525 | 80 | 42 |
| 0,525 | 100 | 52,5 |
| 0,525 | 120 | 63 |
| 0,525 | 160 | 84 |
| 0,525 | 200 | 105 |

3.2. Rėmo stiprinimas įtempiamais lynais rezultatų analizė

Apkrovus rėmą didėjančia apkrova, skaičiuojamajame modelyje „SCIA Engineering“ gauname rezultatus:

10 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$

| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo išnaudojimas ULS, % |
|--------------------|--------------------------|
| 0 | 118 |
| 5 | 92 |
| 10 | 91 |
| 20 | 91 |
| 40 | 92 |
| 60 | 94 |
| 80 | 97 |
| 100 | 99 |
| 120 | 102 |
| 160 | 107 |
| 200 | 112 |

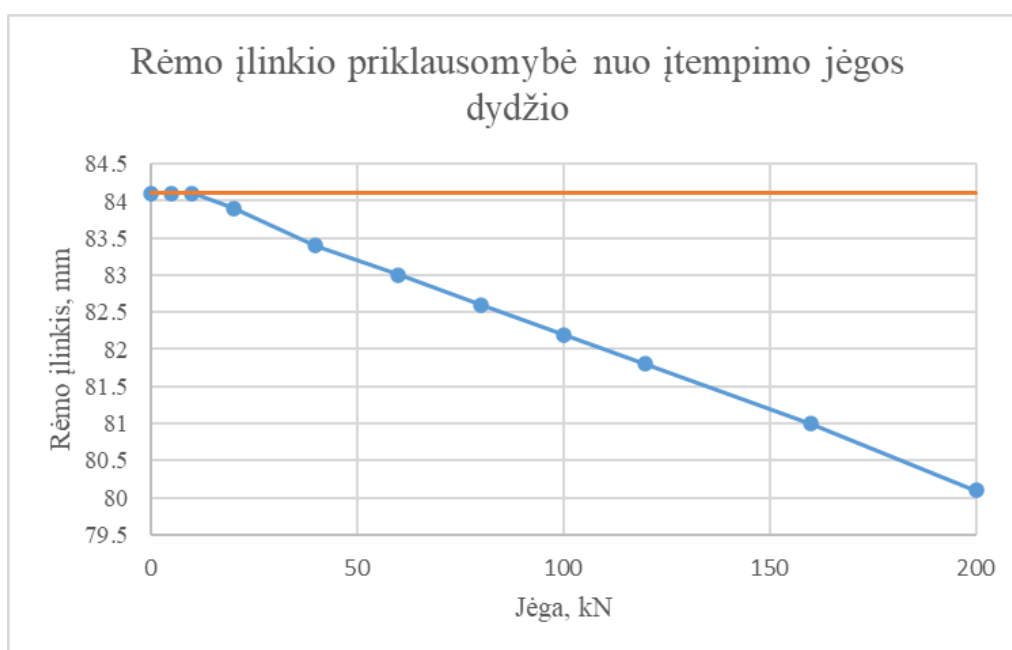


46 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$

Pagal pateiktą grafiką (žr. 36 pav.) galima matyti tai, kad plieninio standaus rėmo konstrukcijos išnaudojimas stiprumo atžvilgiu, kreivė kinta parabolės forma. Matoma tai, kad pridėjus ir mažiausią įtempimo jėgą 5kN, rėmo išnaudojimas tampa teigiamas, t.y. 92%, kas yra priimtas rezultatas. Toks rezultatas yra todėl, kad sijos klumpamasis ilgis sutrumpėja ties įtempiamojo lyno pridėjimo vietomis. Palaipsniui didinant jėgą nuo 5kN iki 20kN rezultatas gerėja, pasiekiamas 91% ULS išnaudojimas, kuris yra geriausias. Palyginus su pradinius 118% išnaudojimu, sijos darbas stiprumo atžvilgiu pagerėjęs 27%. Tačiau galime pastebėti kad didinant įtempimo jėgas nuo 20kN iki 200kN išnaudojimas pradeda prastėti nuo 92% iki 112%. Toks rezultatas yra todėl, kad didinant ašinę jėgą sijoje, skaičiuojant sijos pastovumą ašinės jėgos įtaka didėja skerspjuvio stiprumo skaičiavimuose, tikrinant kombinuotą lenkimo, šlyties ir ašinės jėgos stiprumą. Todėl galima teigti, jog optimaliausia lynų įtempimo jėga yra nuo 5kN iki 20kN esant tokio tipo standžiam 30m rėmui.

11 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$

| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo įlinkis, mm |
|--------------------|------------------|
| 0 | 84,1 |
| 5 | 84,1 |
| 10 | 84,1 |
| 20 | 83,9 |
| 40 | 83,4 |
| 60 | 83 |
| 80 | 82,6 |
| 100 | 82,2 |
| 120 | 81,8 |
| 160 | 81 |
| 200 | 80,1 |



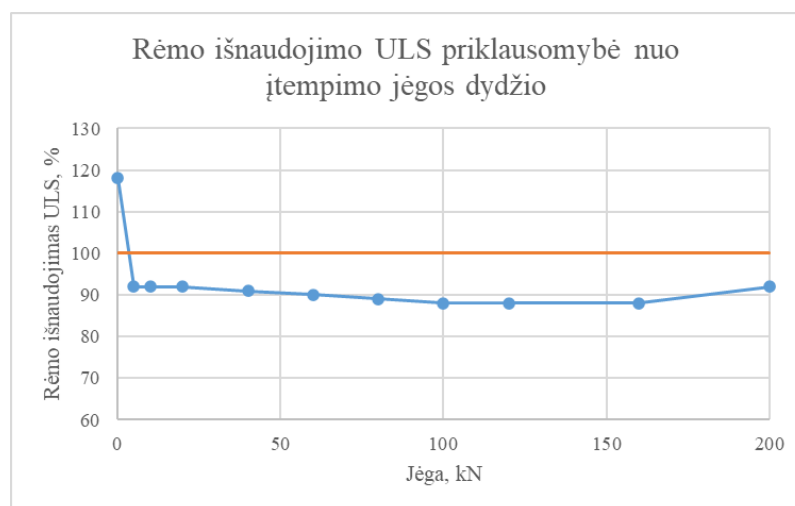
47 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, $e_{ly} = 0,525m$

Pagal grafiką, kuriame pateiktas rėmo įlinkis, kuris priklauso nuo pridėtos lyno įtempimo jėgos, galime matyti kad rezultatai kinta tiesiškai. Pradinis korozijos paveikto rėmo įlinkis 84,1 mm yra tenkinamas pagal tinkamumo ribinius būvius (išnaudojimas 83%), bet rėmo įlinkis palaipsniui mažėja, dėl ko tai yra teigiamas rezultatas. Prie maksimalios 200kN įtempimo jėgos pasiekiamas geriausias 80,1 mm įlinkis. Pagal ULS išnaudojimą, kuris yra optimaliausias ties 5-20kN riba, pasiekiamas 83,9 mm įlinkis.

Norint surasti optimaliausią rėmo stiprinimo lynais tašką ant sijos, atliekami skaičiavimai pakeičiant jėgos pridėjimo vietą ant sijos. F_{ly} pridėjimo vieta bus keičiama į 20% nuo krašto, kas yra $30,3m \times 0,2 = 6,06m$. ir 30% - $30,3m \times 0,3 = 9,09m$. Pridėjimo taškas iš esmės keičiamas, norint sužinoti ar jėgos pridėjimo taškas įtakoja momentą ir analizuojama sija, kurios vidurinės dalies klupumo ilgis sumažėja atitinkamai 10% ir 20%.

12 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$

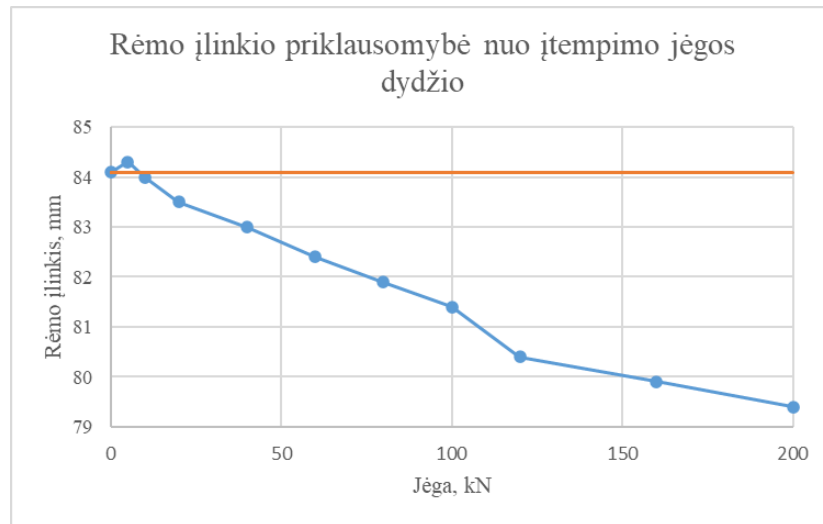
| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo išnaudojimas ULS, % |
|--------------------|--------------------------|
| 0 | 118 |
| 5 | 92 |
| 10 | 92 |
| 20 | 92 |
| 40 | 91 |
| 60 | 90 |
| 80 | 89 |
| 100 | 88 |
| 120 | 88 |
| 160 | 88 |
| 200 | 92 |



48 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$

13 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$

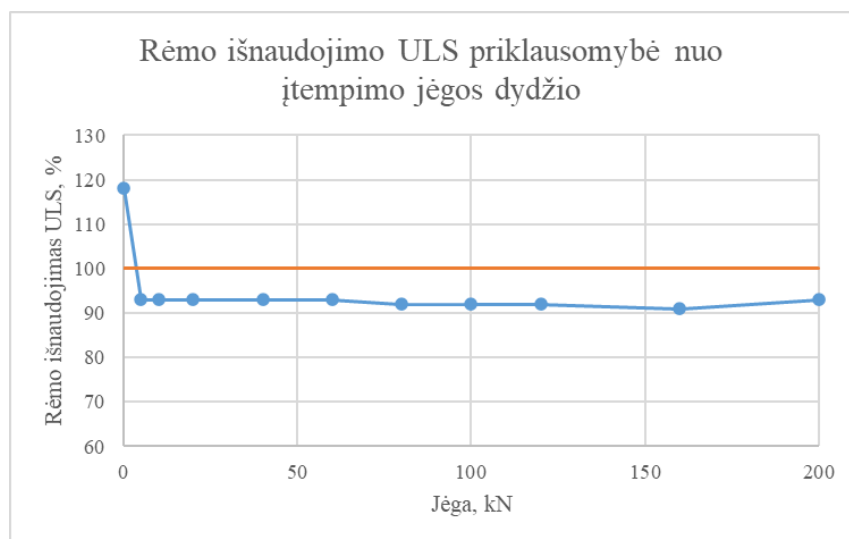
| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo įlinkis, mm |
|--------------------|------------------|
| 0 | 84,1 |
| 5 | 84,3 |
| 10 | 84,0 |
| 20 | 83,5 |
| 40 | 83,0 |
| 60 | 82,4 |
| 80 | 81,9 |
| 100 | 81,4 |
| 120 | 80,4 |
| 160 | 79,9 |
| 200 | 79,4 |



49 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 20%, $e_{ly} = 0,525m$

14 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$

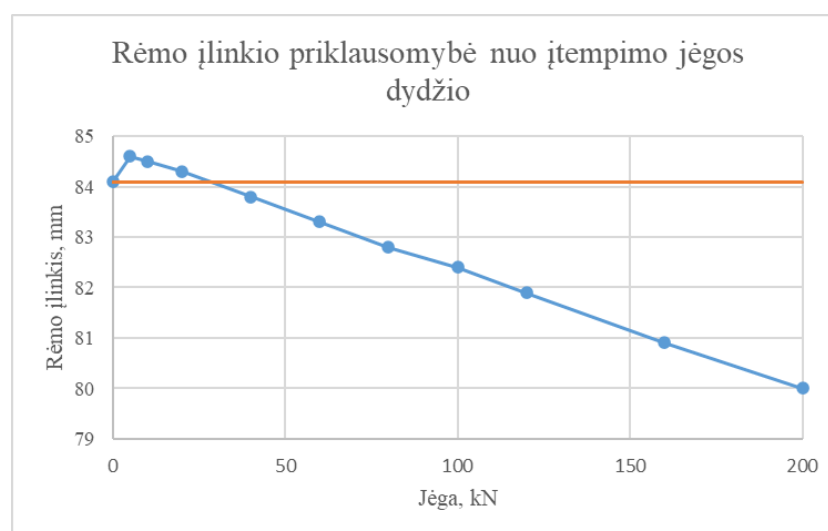
| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo išnaudojimas ULS, % |
|--------------------|--------------------------|
| 0 | 118 |
| 5 | 93 |
| 10 | 93 |
| 20 | 93 |
| 40 | 93 |
| 60 | 93 |
| 80 | 92 |
| 100 | 92 |
| 120 | 92 |
| 160 | 91 |
| 200 | 93 |



50 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$

15 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$

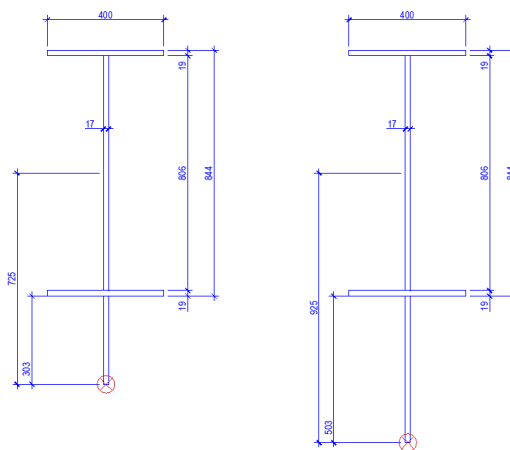
| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo įlinkis, mm |
|--------------------|------------------|
| 0 | 84,1 |
| 5 | 84,6 |
| 10 | 84,5 |
| 20 | 84,3 |
| 40 | 83,8 |
| 60 | 83,3 |
| 80 | 82,8 |
| 100 | 82,4 |
| 120 | 81,9 |
| 160 | 80,9 |
| 200 | 80 |



51 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 30%, $e_{ly} = 0,525m$

Kaip galima matyti iš pateiktų suvestinių ir diagramų, gaunami skirtingi rezultatai priklausomai nuo lyno jėgos pridėjimo vietos. 20% taške, palankiausias rezultatas pasiekimas 100kN ir 160kN apkrovimo jėgos tarpe, kas yra 88% išnaudojimas ULS, o 30% - 80kN – 160kN tarpe, 91% išnaudojimas ULS. Lyginant rezultatus vertikalaus įlinkio atžvilgiu, 20% atstumu tarpe 100kN – 160kN sija mažiausiai linksta 79,9mm, o 30% sija linksta 80,9mm. Vertinant rezultatus, kai $e_{ly} = 0,525m$ ir atstumai atitinkamai 10%, 20% ir 30% optimaliausias yra 20%, kur gaunamas geriausias rezultatas tiek saugos ribiniame būvyje, tiek tinkamumo ribiniame būvyje.

Taip pat siekiant visiškai optimaliai sustiprinti plieninį rėmą įtempiamais lynais, galima keisti ir įtempimo jėgos pridėjimo ekscentricitetą e_{ly} . Bandymas atliekamas atitinkamai su $e_{ly} = 0,725m$ ir $e_{ly} = 0,925m$ ir taip pat kaičiant jėgos pridėjimo poziciją ant sijos atstumu 10%, 20% ir 30% sijos ilgio.



52 pav. Lyno įtempimo taškas, $e_{ly} = 0,725\text{m}$ ir $e_{ly} = 0,925\text{m}$

16 lentelė. Įtempimo jėgų suvestinė, $e_{ly} = 0,725\text{m}$

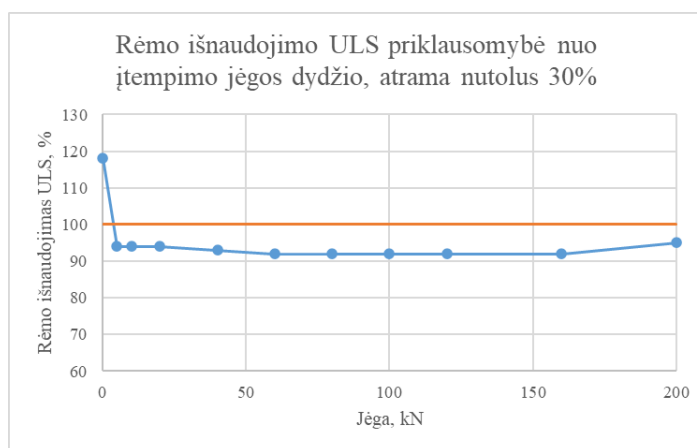
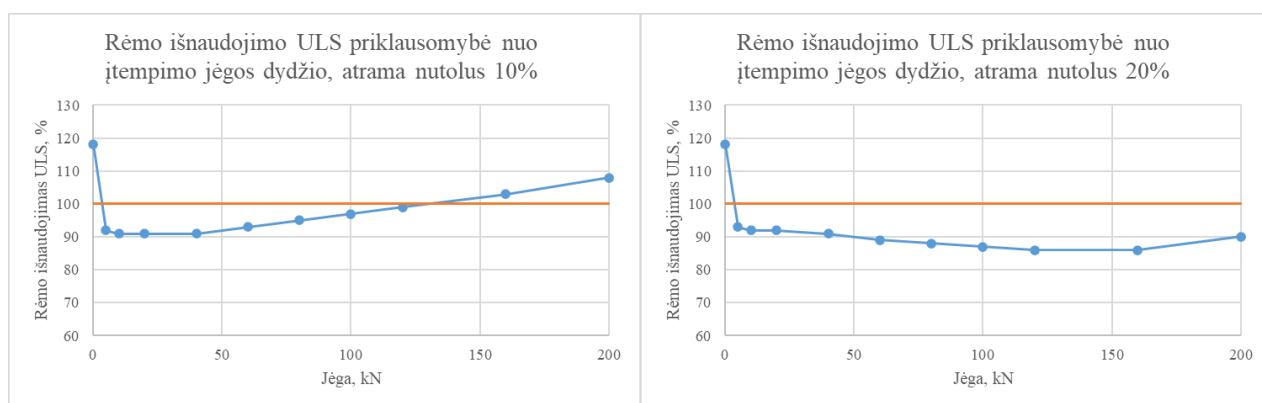
| Jėgos pridėjimo ekscentricitetas e_{ly} , m | Jėga F_{ly} , kN | Susidaręs lenkimo momentas dėl ekscentrinės jėgos M_{ly} , kNm |
|---|--------------------|--|
| 0,725 | 5 | 3,6 |
| 0,725 | 10 | 7,3 |
| 0,725 | 20 | 14,5 |
| 0,725 | 40 | 29 |
| 0,725 | 60 | 43,5 |
| 0,725 | 80 | 58 |
| 0,725 | 100 | 72,5 |
| 0,725 | 120 | 87 |
| 0,725 | 160 | 116 |
| 0,725 | 200 | 145 |

17 lentelė. Įtempimo jėgų suvestinė, $e_{ly} = 0,925\text{m}$

| Jėgos pridėjimo ekscentricitetas e_{ly} , m | Jėga F_{ly} , kN | Susidaręs lenkimo momentas dėl ekscentrinės jėgos M_{ly} , kNm |
|---|--------------------|--|
| 0,925 | 5 | 4,6 |
| 0,925 | 10 | 9,3 |
| 0,925 | 20 | 18,5 |
| 0,925 | 40 | 37 |
| 0,925 | 60 | 55,5 |
| 0,925 | 80 | 74 |
| 0,925 | 100 | 92,5 |
| 0,925 | 120 | 111 |
| 0,925 | 160 | 148 |
| 0,925 | 200 | 185 |

18 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,725m$

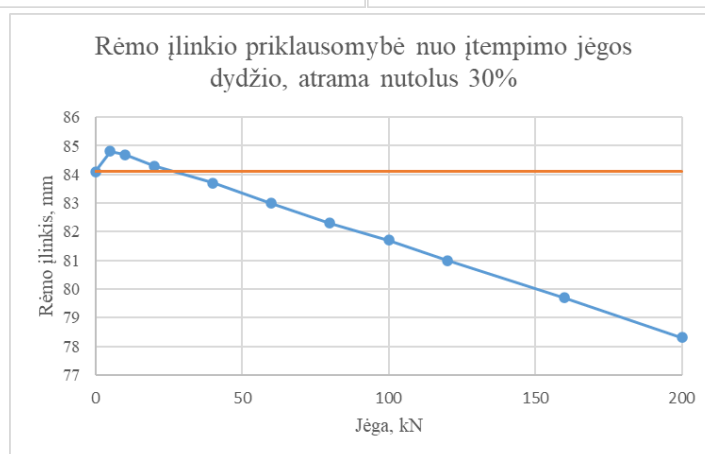
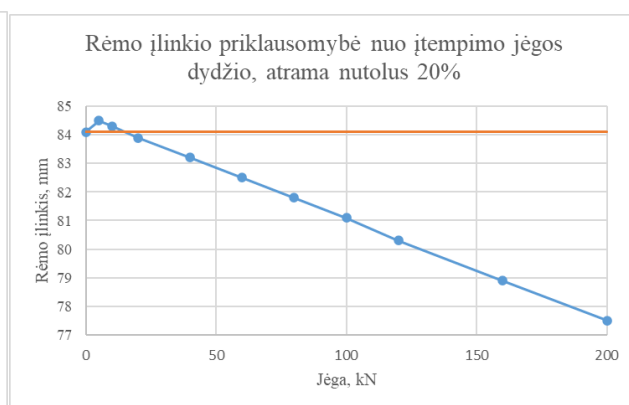
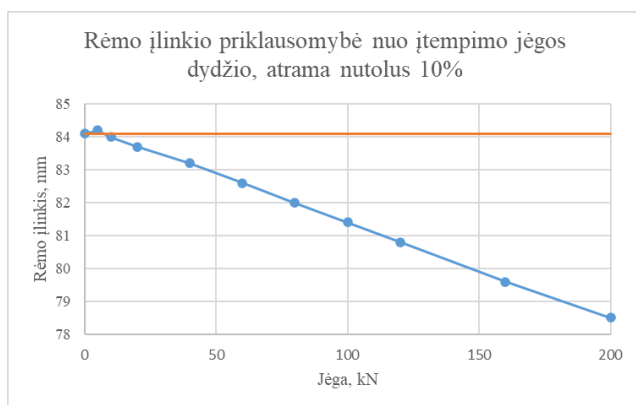
| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 10%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 20%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 30%), % |
|--------------------|---|---|---|
| 0 | 118 | 118 | 118 |
| 5 | 92 | 93 | 94 |
| 10 | 91 | 92 | 94 |
| 20 | 91 | 92 | 94 |
| 40 | 91 | 91 | 93 |
| 60 | 93 | 89 | 92 |
| 80 | 95 | 88 | 92 |
| 100 | 97 | 87 | 92 |
| 120 | 99 | 86 | 92 |
| 160 | 103 | 86 | 92 |
| 200 | 108 | 90 | 95 |



53 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,725m$

19 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,725m$

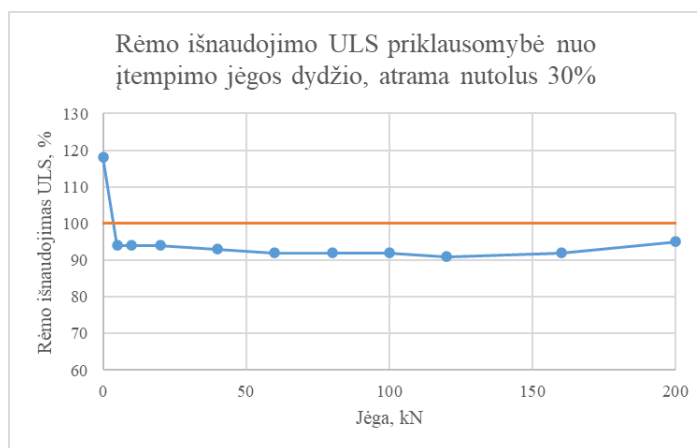
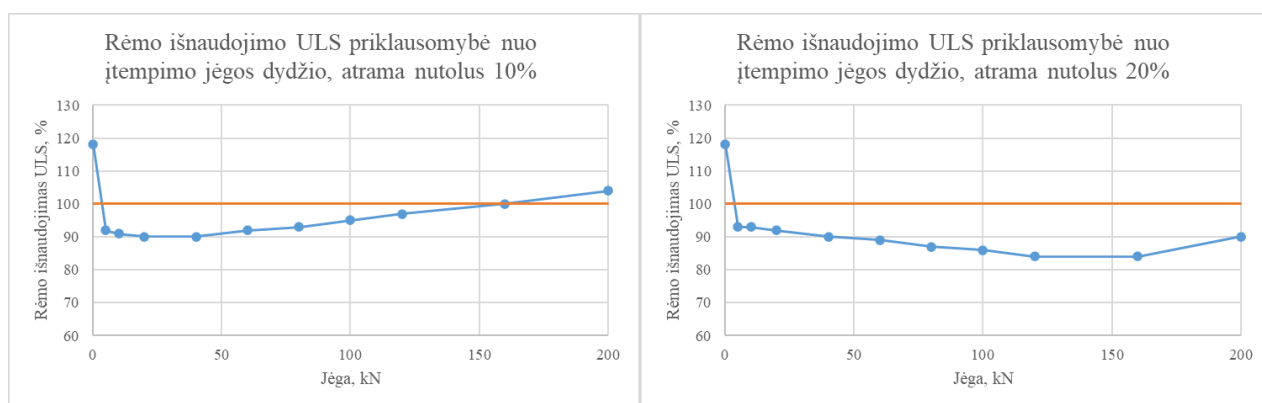
| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo įlinkis (atstumas 10%), mm | Rėmo įlinkis (atstumas 20%), mm | Rėmo įlinkis (atstumas 30%), mm |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 84,1 | 84,1 | 84,1 |
| 5 | 84,2 | 84,5 | 84,8 |
| 10 | 84 | 84,3 | 84,7 |
| 20 | 83,7 | 83,9 | 84,3 |
| 40 | 83,2 | 83,2 | 83,7 |
| 60 | 82,6 | 82,5 | 83 |
| 80 | 82 | 81,8 | 82,3 |
| 100 | 81,4 | 81,1 | 81,7 |
| 120 | 80,8 | 80,3 | 81 |
| 160 | 79,6 | 78,9 | 79,7 |
| 200 | 78,5 | 77,5 | 78,3 |



54 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,725m$

20 lentelė. Jėgų ir rėmo išnaudojimo ULS suvestinė, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,925m$

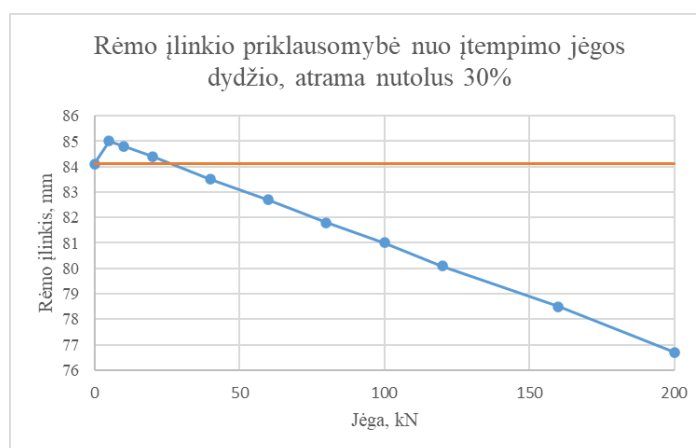
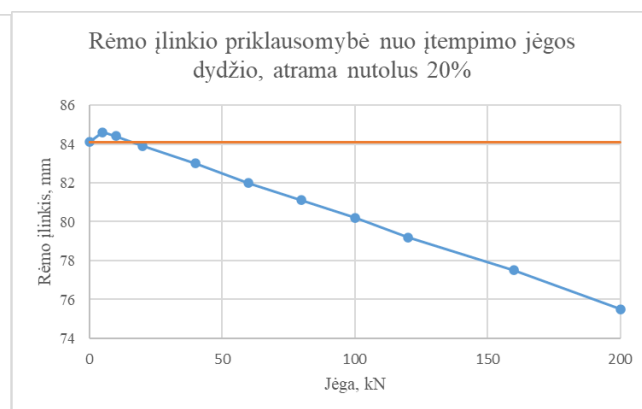
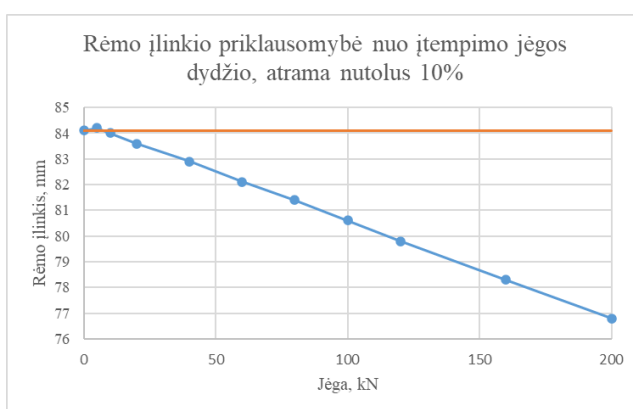
| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 10%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 20%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 30%), % |
|--------------------|---|---|---|
| 0 | 118 | 118 | 118 |
| 5 | 92 | 93 | 94 |
| 10 | 91 | 93 | 94 |
| 20 | 90 | 92 | 94 |
| 40 | 90 | 90 | 93 |
| 60 | 92 | 89 | 92 |
| 80 | 93 | 87 | 92 |
| 100 | 95 | 86 | 92 |
| 120 | 97 | 84 | 91 |
| 160 | 100 | 84 | 92 |
| 200 | 104 | 90 | 95 |



55 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%,20%,30%, $e_{ly}=0,925m$

21 lentelė. Jėgų ir rėmo įlinkio suvestinė, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,925m$

| Jėga F_{ly} , kN | Rėmo įlinkis (atstumas 10%), mm | Rėmo įlinkis (atstumas 20%), mm | Rėmo įlinkis (atstumas 30%), mm |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 84,1 | 84,1 | 84,1 |
| 5 | 84,2 | 84,6 | 85 |
| 10 | 84 | 84,4 | 84,8 |
| 20 | 83,6 | 83,9 | 84,4 |
| 40 | 82,9 | 83 | 83,5 |
| 60 | 82,1 | 82 | 82,7 |
| 80 | 81,4 | 81,1 | 81,8 |
| 100 | 80,6 | 80,2 | 81 |
| 120 | 79,8 | 79,2 | 80,1 |
| 160 | 78,3 | 77,5 | 78,5 |
| 200 | 76,8 | 75,5 | 76,7 |



56 pav. Įlinkio priklausomybė nuo jėgos dydžio, atrama nutolus 10%, 20% ir 30%, $e_{ly} = 0,925m$

Analizuojant gautus duomenis, kai lynų ekscentricitetas yra 0,725m, galima teigti, kad geriausias rezultatas sijos stiprumo atžvilgiu pasiektas, kai atrama yra nutolusi 20%, t. y. 6m. Tarp 100kN ir 160kN apkrovimo jėgos yra pasiekiamas 86% išnaudojimas. Lyginant kai atrama yra įrengiama atstumu 10% ir 30%, 10% geriausias rezultatas gaunamas 91% tarpe 10kN ir 60kN, o 30% - 92% išnaudojimas ULS, kuris yra 60kN-100kN įtempimo jėgos ruože.

Lyginant vertikalias deformacijas, priimtinausias rezultatas pasiekiamas taip pat kai atrama yra nutolusi 20% - gaunamas 77,5mm įlinkis. Kai atrama nutolusi 10% - 78,5mm, prie 30% - 78,3mm. Šie rezultatai, nepriklausomai nuo įtvirtinimo, gaunami prie didžiausio eksperimentinės įtempimo jėgos – 200kN.

Žiūrint į rezultatus, kai jėgos ekscentricitetas yra 0,925m, optimaliausias rezultatas pasiekiamas, kai atrama taip pat nutolusi 20%. Ruože 120kN -160kN, matoma kad rėmo išnaudojimas saugos ribiniame būvyje yra 84%. Kai jėga pridėjama 3m atstumu, matome kad pasiekiamas 90% rėmo išnaudojimas, kai jėga 10kN – 60kN, o atstumu 9m – 91%, kai jėga 100kN – 160kN.

Su tokiu pačiu ekscentricitetu, geriausias vertikalus įlinkis taip pat pasiekiamas kai atrama nutolusi 6m. – 75,5mm. Kai pridėjimo taškas yra 3m – pasiekimas 76,8mm įlinkis, 9m – 76,7mm įlinkis.

Bendrai palyginus, kai atrama yra nutolusi 10%, galima matyti, kad 90% išnaudojimas ULS yra pasiekiamas su 0,925m ekscentricitetu, kai atrama nutolusi 20% - 84% procentai pasiekiami tai pat su 0,925m ekscentricitetu ir kai atrama nutolusi 30% - 91% pasiekiamas prie 0,525m ir 0,925m jėgos peties.

Apibendrinant visus gautus eksperimentinius rezultatus, galima matyti, kad optimaliausias atramos pridėjimo taškas yra 20% atstumu nuo bendro sijos ilgio, su ekscentricitetu 0,925m. Šis rezultatas pasiekiamas esant 120kN – 160kN pridėtai išorinei jėgai. Korozijos paveikto rėmo išnaudojimas saugos ribiniame būvyje yra 118%, o šiame taške – 84%, kas yra 34% rezultatų pagerėjimas. Šiame tarpe yra pasiekiamas 77,5mm vertikalus įlinkis. Visi pateikti sijos išnaudojimai kinta parabole, o vertikalus įlinkis – tiesiškai.

4. Rėmo stiprinimas plokštelėmis

4.1. Rėmo stiprinimo plokštelėmis metodologija

Sustiprinta plokštelėmis sija taip pat projektuojama naudojantis „EN 1993-1-1:2005 Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas“ pagrindinėmis nuostatomis. Naudojantis baigtinių elementų skaičiavimo programa „SCIA Engineering“, tikrinami sijos saugos ribiniai būviai [22]:

Skerspjūvio laikomoji galia:

5. Sijos skerspjūvio savybės;
6. Sijos tempimas;
7. Sijos gniuždymas;
8. Sijos lenkiamasis momentas;
9. Sijos šlytis;
10. Sijos kombinuotas lenkimas ir šlytis;
11. Sijos kombinuotas lenkimas ir ašinė jėga;
12. Sijos kombinuotas lenkimas, šlyties ir ašinė jėga.

Skerspjūvio klumpamoji galia:

13. Sija veikiamą gniuždymo;
14. Sija veikiamą lenkimo;
15. Sija veikiamą lenkimo ir ašinio gniuždymo;
16. Sija veikiamą skersinio ir skersinio sukamojo klumpumo.

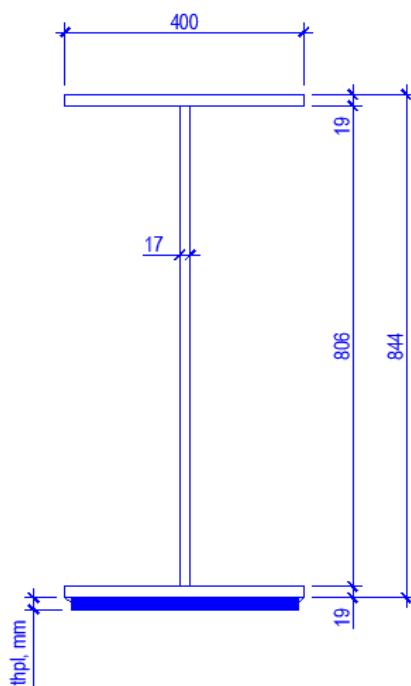
Baigtinių elementų pagalba gaunami vertikalūs sijos įlinkiai ir taip patikrinimas sijos išnaudojimas tinkamumo ribiniame būvyje.

Rėmo stiprinimui plokštelėmis naudojamas panašaus stiprumo lakštinis plienas S235J2+N, kurio charakteristikos: $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$, kai $t < 16\text{mm}$; $f_y = 225 \text{ N/mm}^2$, kai $16\text{mm} < t < 40\text{mm}$; $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$; $G_s = 81000 \text{ MPa}$ [30]. Plokštelės, kuriomis yra stiprinimas rėmas yra pilnai privirinamos prie tinkamai paruoštos esamos metalinės konstrukcijos, taip užtikrinamas pilnai standžią jungtį tarp naujo ir esamo elemento, panaikinant šlytį.

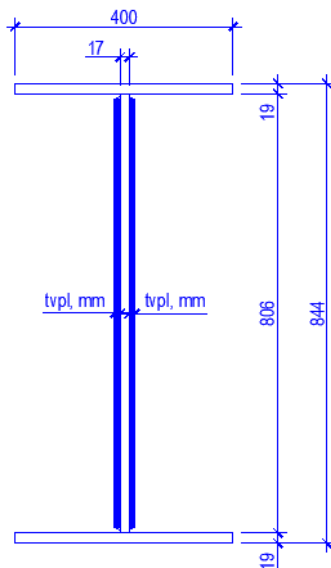
22 lentelė. Rėmo stiprinto plokštelėmis modelių suvestinė

| 1 modelis, horizontalios plokštelės storis, thpl, mm | 2 modelis, vertikalios plokštelės storis, tvpl, mm | 3 modelis, horizontalios plokštelės storis + vertikalios plokštelės storis, thpl, mm + tvpl, mm |
|--|--|---|
| h4 | v2 | h4 + v4 |
| h6 | v4 | h6 + v4 |
| h8 | v6 | h8 + v4 |
| h10 | v8 | h10 + v4 |
| h12 | v10 | h12 + v4 |
| h15 | v12 | h15 + v4 |
| h20 | | h20 + v4 |
| h25 | | h25 + v4 |

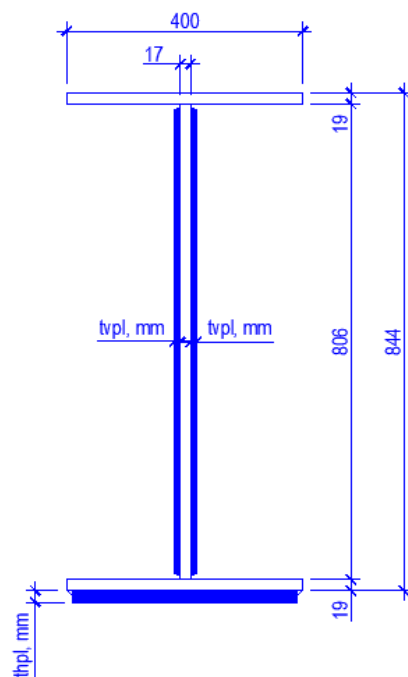
Sija plokštelėmis stiprinama trimis būdais – horizontali plokštelė privirinama juostos apačioje, vertikalios plokštelės privirintos iš abiejų pusių sienelės ir kombinuotas – horizontali plokštelė juostos pačioje kartu su vertikaliomis plokštelėmis privirintomis iš abiejų pusių.



57 pav. Papildoma plokštelė virinama sijos apačioje

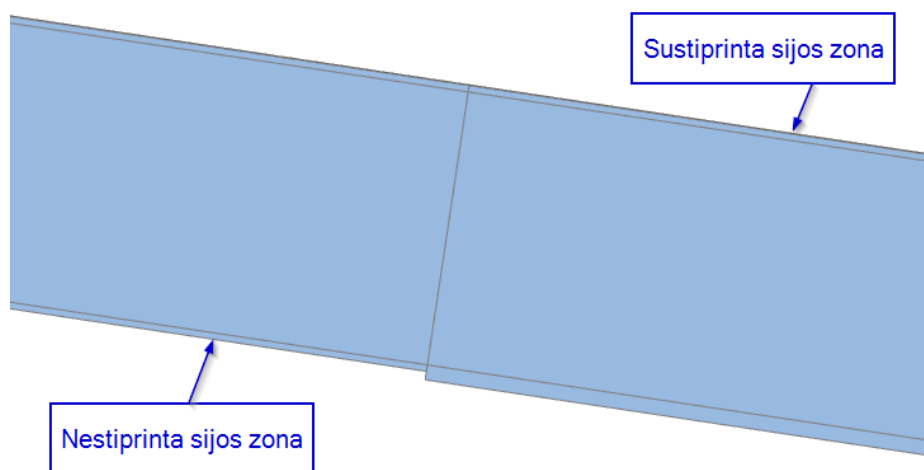


58 pav. Papildomos plokštelės virinamos prie sijos sienelės



59 pav. Papildomos plokštelės virinamos prie sijos sienelės ir juostos apačioje

Panašiai kaip ir su įtempiamais lynais, bus analizuojama zona, kurioje yra privirintos plokštelės. Analizuojamas variantas, kai plokštelės yra privinamos visu sijos ilgiu, kai plokštelės yra atitraukiamos 10% t.y. 3m, 20% - 6m ir 30% - 9m nuo sijos pradžios taško.



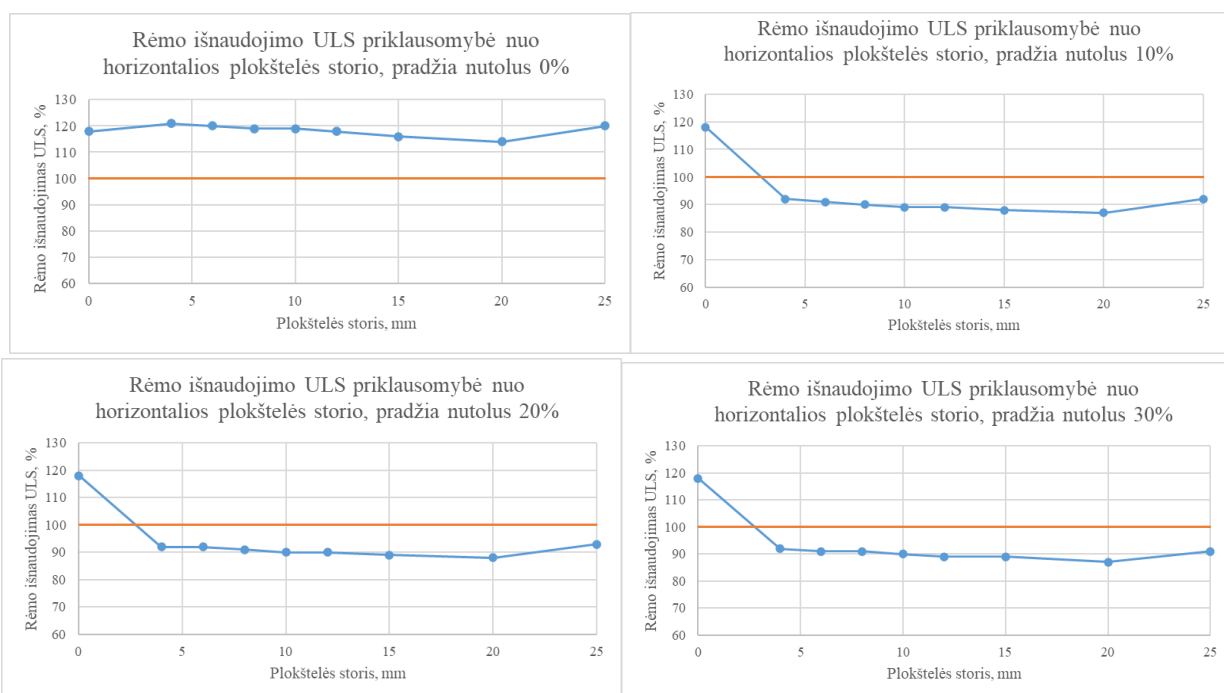
60 pav. Sijos sustiprintos plokštelėmis skaičiuojamasis modelis

4.2. Rėmo stiprinimo plokštelėmis rezultatų analizė

Sustiprinus rėmą plokštelėmis pagal visus modelius, skaičiuojamajame modelyje „SCIA Engineering“ gauname rezultatus:

23 lentelė. Horizontalios plokštelės ULS suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30%

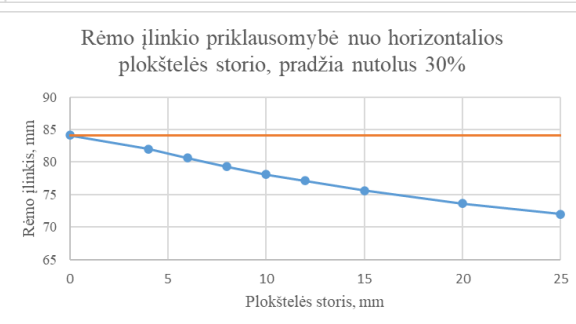
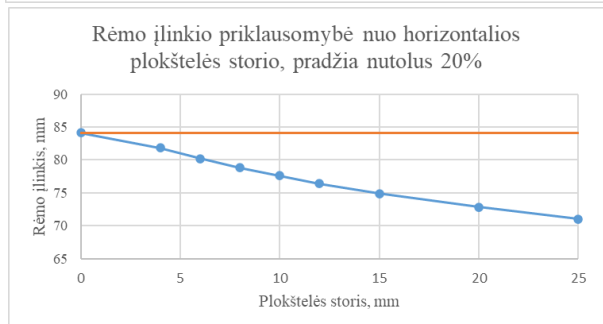
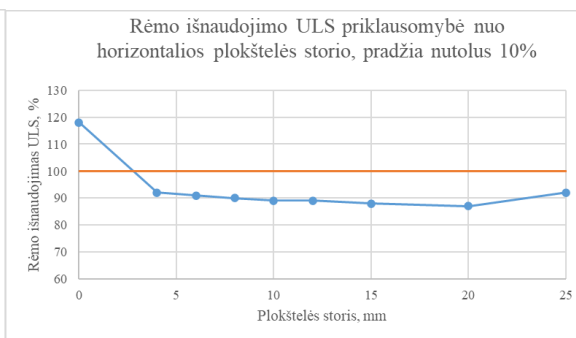
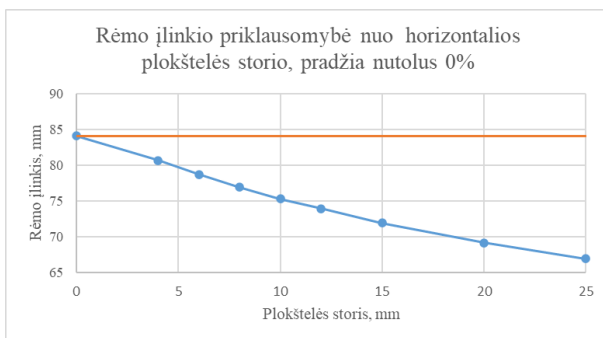
| Plokštelės storis, mm | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 0%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 10%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 20%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 30%), % |
|-----------------------|--|---|---|---|
| 0 | 118 | 118 | 118 | 118 |
| 4 | 121 | 92 | 92 | 92 |
| 6 | 120 | 91 | 92 | 91 |
| 8 | 119 | 90 | 91 | 91 |
| 10 | 119 | 89 | 90 | 90 |
| 12 | 118 | 89 | 90 | 89 |
| 15 | 116 | 88 | 89 | 89 |
| 20 | 114 | 87 | 88 | 87 |
| 25 | 120 | 92 | 93 | 91 |



61 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo horizontalios plokštelės storio, atitaukta 0%, 10%, 20% ir 30%

24 lentelė. Horizontalios plokštelės įlinkio suvestinė, atitaukta 0% 10%, 20% ir 30%

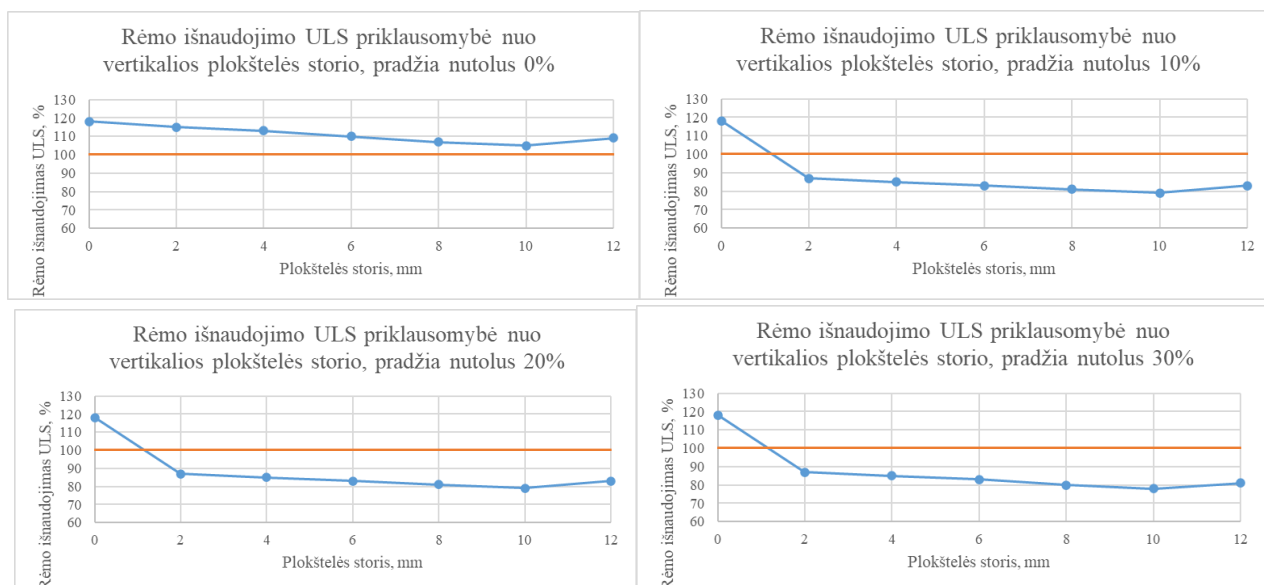
| Plokštelės storis, mm | Rėmo įlinkis (atstumas 0%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 10%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 20%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 30%), % |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 84,1 | 84,1 | 84,1 | 84,1 |
| 4 | 80,7 | 81,5 | 81,8 | 82,0 |
| 6 | 78,7 | 79,8 | 80,2 | 80,6 |
| 8 | 76,9 | 78,3 | 78,8 | 79,3 |
| 10 | 75,3 | 77,0 | 77,6 | 78,1 |
| 12 | 73,9 | 75,7 | 76,4 | 77,1 |
| 15 | 71,9 | 74,1 | 74,9 | 75,6 |
| 20 | 69,1 | 71,8 | 72,8 | 73,6 |
| 25 | 66,9 | 69,9 | 71,0 | 72 |



62 pav. Įlinkio priklausomybė nuo horizontalios plokštelės storio, atitaukta 0%, 10%, 20% ir 30%

25 lentelė. Vertikalios plokštelės ULS suvestinė, atitrukta 0% 10%, 20% ir 30%

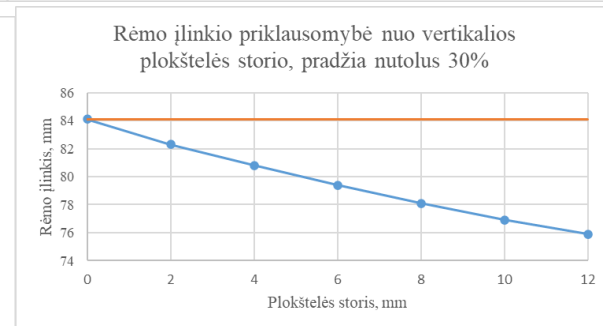
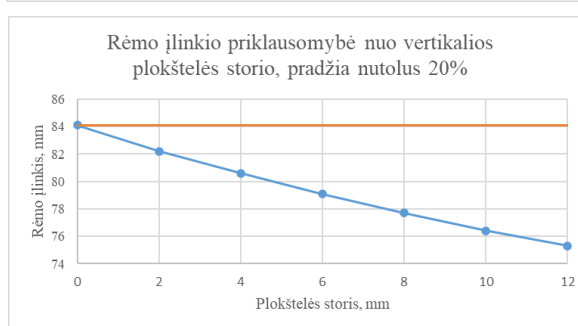
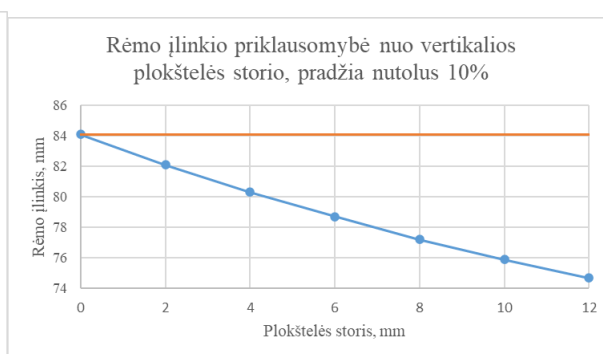
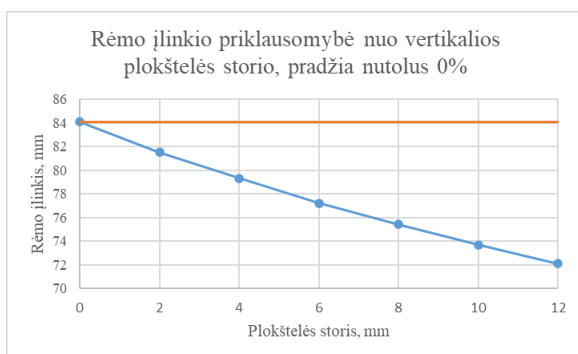
| Plokštelės storis, mm | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 0%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 10%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 20%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 30%), % |
|-----------------------|--|---|---|---|
| 0 | 118 | 118 | 118 | 118 |
| 2 | 115 | 87 | 87 | 87 |
| 4 | 113 | 85 | 85 | 85 |
| 6 | 110 | 83 | 83 | 83 |
| 8 | 107 | 81 | 81 | 80 |
| 10 | 105 | 79 | 79 | 78 |
| 12 | 109 | 83 | 83 | 81 |



63 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo vertikalios plokštelės storio, atitrukta 0%, 10%, 20% ir 30%

26 lentelė. Vertikalios plokštelės įlinkio suvestinė, atitraukta 0% 10%, 20% ir 30%

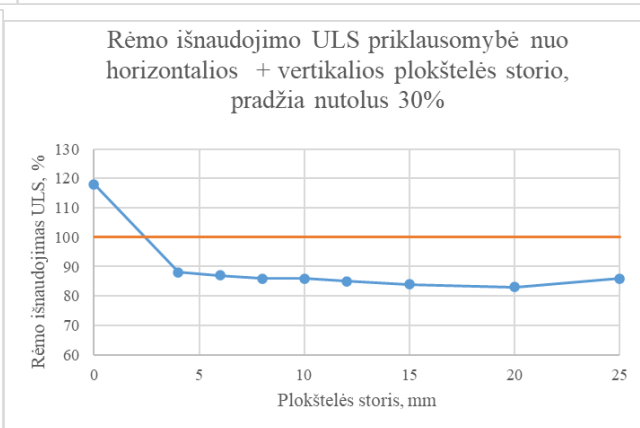
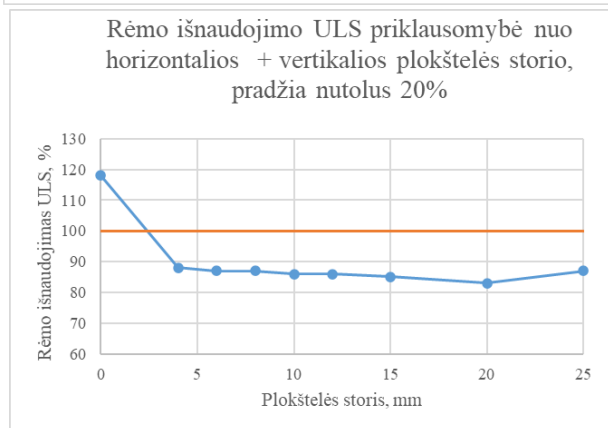
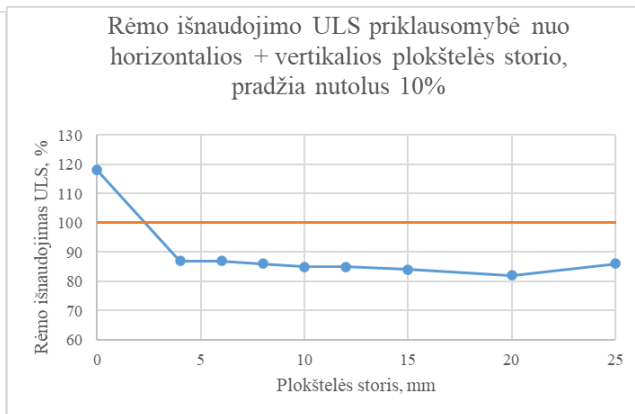
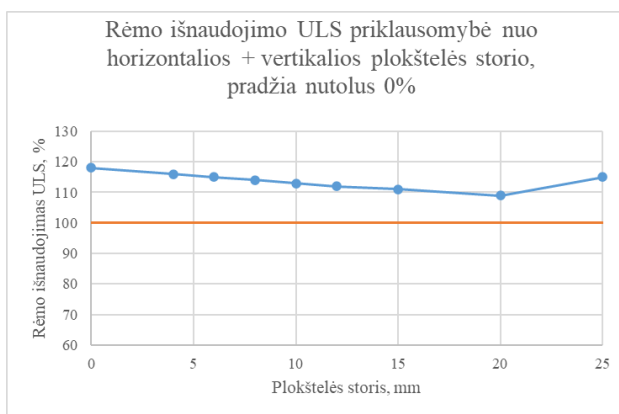
| Plokštelės storis, mm | Rėmo įlinkis (atstumas 0%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 10%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 20%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 30%), % |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 84,1 | 84,1 | 84,1 | 84,1 |
| 2 | 81,5 | 82,1 | 82,2 | 82,3 |
| 4 | 79,3 | 80,3 | 80,6 | 80,8 |
| 6 | 77,2 | 78,7 | 79,1 | 79,4 |
| 8 | 75,4 | 77,2 | 77,7 | 78,1 |
| 10 | 73,7 | 75,9 | 76,4 | 76,9 |
| 12 | 72,1 | 74,7 | 75,3 | 75,9 |



64 pav. Įlinkio priklausomybė nuo vertikalios plokštelės storio, atitraukta 0%, 10%, 20% ir 30%

27 lentelė. Horizontalios + vertikalios plokštelės ULS suvestinė, atitraukta 0% 10%, 20% ir 30%

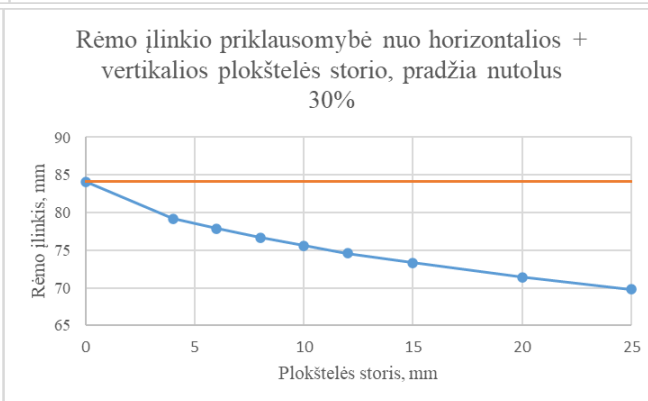
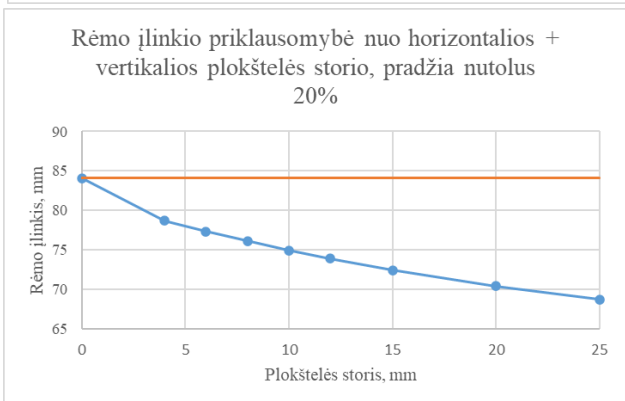
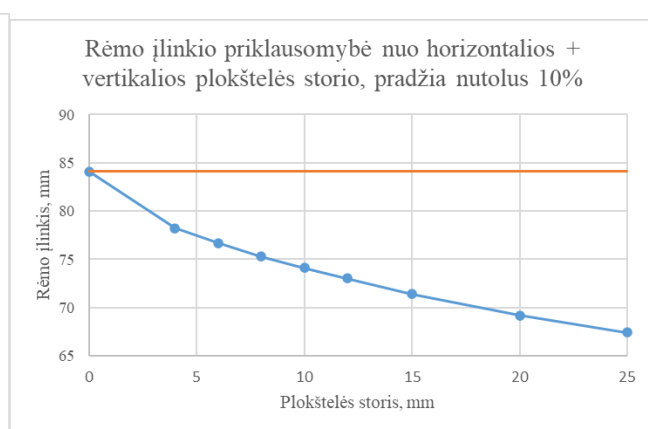
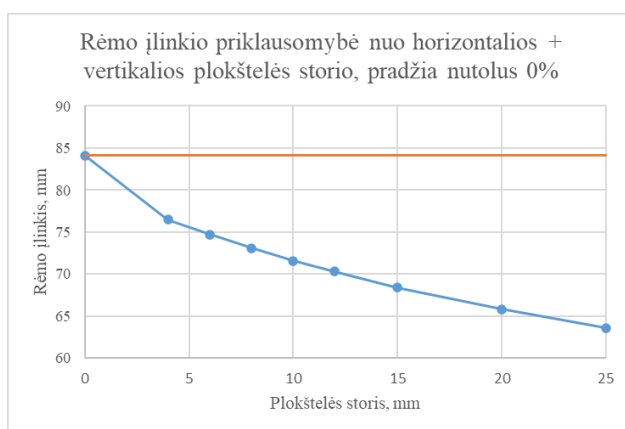
| Plokštelės storis, mm | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 0%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 10%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 20%), % | Rėmo išnaudojimas ULS (atstumas 30%), % |
|-----------------------|--|---|---|---|
| 0 | 118 | 118 | 118 | 118 |
| 4+4 | 116 | 87 | 88 | 88 |
| 6+4 | 115 | 87 | 87 | 87 |
| 8+4 | 114 | 86 | 87 | 86 |
| 10+4 | 113 | 85 | 86 | 86 |
| 12+4 | 112 | 85 | 86 | 85 |
| 15+4 | 111 | 84 | 85 | 84 |
| 20+4 | 109 | 82 | 83 | 83 |
| 25+4 | 115 | 86 | 87 | 86 |



65 pav. Išnaudojimo ULS priklausomybė nuo horizontalios + vertikalios plokštelės storio, atitraukta 0%, 10%, 20% ir 30%

28 lentelė. Horizontalios+vertikalios plokštelės įlinkio suvestinė, atitraukta 0% 10%, 20% ir 30%

| Plokštelės storis, mm | Rėmo įlinkis (atstumas 0%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 10%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 20%), % | Rėmo įlinkis (atstumas 30%), % |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0 | 84,1 | 84,1 | 84,1 | 84,1 |
| 4+4 | 76,5 | 78,2 | 78,7 | 79,2 |
| 6+4 | 74,7 | 76,7 | 77,3 | 77,9 |
| 8+4 | 73,1 | 75,3 | 76,1 | 76,7 |
| 10+4 | 71,6 | 74,1 | 74,9 | 75,6 |
| 12+4 | 70,3 | 73,0 | 73,9 | 74,6 |
| 15+4 | 68,4 | 71,4 | 72,4 | 73,3 |
| 20+4 | 65,8 | 69,2 | 70,4 | 71,4 |
| 25+4 | 63,5 | 67,4 | 68,7 | 69,8 |



66 pav. Įlinkio priklausomybė nuo horizontalios + vertikalios plokštelės storio, atitraukta 0%, 10%, 20% ir 30%

Pagal atliktus eksperimentinius skaičiavimus, galime matyti, kai plieninio rėmo sija yra stiprinama tik plokštele iš apačios saugos ribiniame būvyje priimtinausias rezultatas yra pasiekiamas, kai plokštelė yra nutolusi nuo atramos 10%, t.y. 3m ir 30% t.y. 9m – 87% išnaudojimas, abu variantai, kaip plokštelė yra 20mm storio. Palyginus kai plokštelė yra nutolusi 0% ir 20%, kai 0% geriausias rezultatas yra gaunamas 114%, kai plokštelė yra 20mm storio, o 20% - 88% išnaudojimas S.R.B, kuris yra taip pat kai stiprinama 20mm storio plokštele.

Palyginant vertikalų įlinkį, geriausias rezultatas yra pasiekiamas kai sija yra stiprinama visu ilgiu – 66,9mm įlinkis. Kai plokštelė yra virinama 3m atstumu nuo atramos įlinkis 69,9mm, kai atstumas 6m – 71mm, o 9m – 72mm. Visi geriausi rezultatai pasiekiami kai plokštelė yra 25mm.

Nagrinėjant sijos stiprinimą vertikaliomis plokštelėmis iš abiejų pusių, geriausią rezultatą parodo sija, kuri sustiprinta 10mm plokštelėmis iš abiejų pusių ir kaip plokštelės yra nutolusios 9m nuo atramos – 78% išnaudojimas stiprumo atžvilgiu. Kai plokštelės yra nutolusios 3m, išnaudojimas 79%, kai 6m – taip pat 79%, o visu ilgiu – 105%, visi rezultatai su 10mm plokštelėmis.

Apdorojant vertikalios įlinkio duomenis, pastebėta, kad mažiausias įlinkis yra kai stiprinama vertikaliai visu ilgiu – 72,1mm.

Kombinuotame modelyje kai stiprinimą horizontaliomis plokštelėmis ir vertikaliomis 4mm plokštelėmis iš abiejų pusių, priimtinausias rezultatas pasiekimas kai plokštelė yra 3m nuo atramos ir privirinta 20mm plokštelė – 82% ULS. Palyginus kai plokštelė yra atitraukiama 6m – 83% išnaudojimas, 9m – taip pat 83%, o kai stiprinama visu ilgiu – 109% išnaudojimas.

Kaip ir ankstesniuose skaičiavimo modeliuose vertikali deformacija palankiausia pasiekama kai stiprinama visu ilgiu – 63,6mm.

Reziumuojant visus gautus tyrimo rezultatus, matome, kad optimaliausias stiprinimo plokštelėmis tokios tipo plieninio rėmo sijoms yra stiprinimas vertikaliomis 10mm plokštelėmis privirintomis prie sienelės iš abiejų pusių ir kai plokštelės yra atitrauktos 30% nuo atramos – 78%. Lyginant su pradiniu korozijos paveikto rėmo išnaudojimu yra 40% stiprumo pagerėjimas. Prie tokio stiprinimo varianto sijos įlinkis – 76,9mm.

Išvados

1. Išanalizavus trąšų sandėlio laikančiąsias plienines konstrukcijas, buvo nustatyta, kad pagrindinė problema yra cheminė korozija ir plieninių konstrukcijų skerspjūvio mažėjimas, todėl išskirti ir išanalizuoti geriausi stiprinimo būdai, esant tokio tipo defektams ir pažeidimams.
2. Išanalizavus literatūros šaltinius ir įvertinus pagrindines plieninio rėmo pažaidas, buvo surasti optimaliausi konstrukcijos stiprinimo būdai tokio tipo konstrukcijai – stiprinimas aukšto stiprumo anglies plaušo medžiagomis, stipinimas papildomomis plokštelėmis ar profiliais juos privirinant arba tvirtinant varžtais ir stiprinimas išorėje įtempiamais lynais.
3. Surinkta ir išanalizuota sandėlio techninės informacija, medžiagiškumas, apkrovos, sudaryta skaičiuojamoji schema ir gautos įrašos bei gautas projektinis išnaudojimas saugos ribiniuose būviuose – 95% ir tinkamumo ribiniuose būviuose – 66%, todėl projektinis rėmo stiprumas tenkina šių dienų projektavimo reglamentus. Sumodeliuota standaus rėmo korozija ir skerspjūvio netektis per 20 metų – horizontalios plokštumos medžiagos netekti 2,92mm, o vertikalios 1,46mm. Suskaičiuota korozijos paveikto rėmo laikomoji galia ULS – 118% ir SLS – 83%, rėmui yra būtinas stiprinimas.
4. Sustiprinus rėmą įtempiamai lynais, gauta, jog maksimaliai rėmo laikomoji galia stiprumo atžvilgiu pagerėja iki 84%, kai atrama atitrukta 20% ir įtempiamo lyno ekscentricitetas 0,925m, kas yra 27% geriau negu nestiprintas skerspjūvis, įlinkis – 75,5 mm. Sustiprinus rėmą plieninėmis plokštelėmis, geriausias rezultatas gautas, kai 10 mm plokštelės vertikalčiai privirinamos prie sijos sienelė iš abiejų pusių, kai plokštelė atitrukta 30% nuo atramos. Pasiiektas 78% išnaudojimas, ir įlinkis – 76,9mm. Palyginus abu stiprinimo metodus, stiprinimas plokštelėmis pasiekė geresnius rezultatus saugos ribiniame būvyje, tačiau lynais tinkamumo ribiniame būvyje – įlinkis neženkliai mažesnis. Nepaisant to, kad ULS plokštelės atžvilgiu keliais procentais laimėjo, rėmui stiprinti parenkamas lynas – tai yra patikimesnis stiprinimo būdas, atsižvelgiant į visus rezultatus – visi variantai stiprinant lynais buvo teigiami, o stiprinant plokštelėmis kai kuriuose modeliuose išnaudojimas viršydavo leistinus 100%. Tai yra technologiškai paprastesnis ir mažiau žmogiškųjų išteklių reikalaujantis stiprinimo būdas.

Literatūros sąrašas

1. JOKŪBAITIS, Vidmantas ir Gintas ŠAUČIUVĖNAS. *Statinių konstrukcijų techninės būklės vertinimas*. Vilnius „Technika“, 2012. ISBN 9786094571787
2. KEVIN K. L. So, MOE M. S. Cheung, ir ERIC X. Q. Zhang. *Life-Cycle Management Strategy on Steel Girders in Bridges*. [interaktyvus] 2012, Kinija DOI:10.1155/2012/643543 [žiūrėta 2021-03-21]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/258386151_Life-Cycle_Management_Strategy_on_Steel_Girders_in_Bridges
3. MUTLU S., ERTUGRUL T. U. *Corrosion damage analysis of steel frames considering lateral torsional buckling*. [interaktyvus] 2017, 1234-1241, [žiūrėta 2021-03-21] . Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817304253>
4. LIETUVOS STATYBOS INŽINIERIŲ SAJUNGA. *Pastatų konstruktoriaus ir statybininko žinynas*. Leidykla „Naujasis lankas“, 2009. ISBN 9789955035657
5. THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. *Appraisal of existing structures*. 2010. ISBN 9781906335045
6. RADU D., ANAMRIA F. *Refurbishment of Existing Steel Structures – an Actual Problem*. [interaktyvus] 2017, Vengrija DOI:10.3311/PPci.9140 [žiūrėta 2021-03-21]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/314230176_Refurbishment_of_Existing_Steel_Structures_-_an_Actual_Problem
7. YOSSEF. N. M. *Strengthening Steel I-Beams by Welding Steel Plates before or While Loading*. [interaktyvus] 2015, [žiūrėta 2021-03-21] . Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/283054754_Strengthening_Steel_I-Beams_by_Welding_Steel_Plates_before_or_While>Loading
8. KIANMOFRAD F., GHAFORI E. *Strengthening of metallic beams with different types of prestressed unbonded retrofit systems*. . [interaktyvus] 2017, 81-95, [žiūrėta 2021-03-29] . Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822316304081>
9. AL-SHAAR A. *Performance of Retrofitted Self-Compacting Concrete-Filled Steel Tube Beams Using External Steel Plates*. [interaktyvus] 2018, Turkija DOI:10.1155/2018/3284745 [žiūrėta 2021-03-29]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/324064569_Performance_of_Retrofitted_Self-Compacting_Concrete-Filled_Steel_Tube_Beams_Using_External_Steel_Plates
10. SHAAT A., *Experimental testing of cfrp-retrofitted steel girders and columns*. [interaktyvus] 2015, [žiūrėta 2021-03-29] . Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/297902419_EXPERIMENTAL_TESTING_OF_CFRP-RETROFITTED_STEEL_GIRDERS_AND_COLUMNS
11. KARBHARI, V. M., and SHULLEY, S. B. *Use of Composites for Rehabilitation of Steel Structures – Determination of Bond Durability*. [interaktyvus] 1995, 239-245, JAV DOI:10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(239) [žiūrėta 2021-04-10] . Prieiga per: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%281995%297%3A4%28239%29>
12. QAIDAR H. Tawfik. *Use of CFRP for Rehabilitation of Steel Structures: a Review*., [interaktyvus] 2010, Australija [žiūrėta 2021-04-10] . Prieiga per: <https://eprints.usq.edu.au/9310/>

13. KARIMIAN M. *Structural behaviors of deficient steel CHS short columns strengthened using CFRP*. [interaktyvus] 2017, 555-564, [žiūrėta 2021-04-15] . Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X16304035>
14. DAWOOD M., *Bond Behavior of CFRP Strengthened Steel Structures*. [interaktyvus] 2006, JAV DOI:10.1260/136943306779369464 [žiūrėta 2021-04-18]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/228761049> Bond Behavior of CFRP Strengthened Steel Structures
15. RASHEED M., *Flexural Behavior of Steel Beam Strengthening by Prestressing Strands*. [interaktyvus] 2018, Irakas DOI:10.14419/ijet.v7i4.20.26421 [žiūrėta 2021-04-25]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/332681476> Flexural Behavior of Steel Beam Strengthening by Prestressing Strands
16. GHANNAM M., *Effect of post tensioning on strengthening different types of steel frames*. [interaktyvus] 2016, Egiptas DOI:10.1016/j.jksues.2016.07.001 [žiūrėta 2021-04-25]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/305415865> Effect of post tensioning on strengthening different types of steel frames
17. MOHANNAD H. A. *Corrosion as a source of destruction in construction* . [interaktyvus] 2018, 306-314, [žiūrėta 2021-05-01] . Prieiga per: <https://www.researchgate.net/publication/325381296> Corrosion as a Source of Destruction in Construction
18. PARK S., *Flexural behavior of steel I-beam prestressed with externally unbonded tendons*. [interaktyvus] 2010, 125-132, [žiūrėta 2021-05-10] . Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X0900162X>
19. TENG J.G., *Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites*. [interaktyvus] 2012, 131-143, [žiūrėta 2021-05-15]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143974X12001423>
20. INTERSTATE STANDART. GOST 27772-88, *Rolled products for structural steel constructions. General specification*, [interaktyvus] 1989 [žiūrėta 2021-05-20]. Prieiga per: <https://docs.cntd.ru/document/1200003192>
21. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.05:2005 *Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. 2005 m. sausio 26 d. įsakymu Nr. D1-44 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-09-10]. Prieiga per: <https://eseimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.249853?jfwid=rivwzvvpvg>
22. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1993-1-1] *Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius: LSD, 2005.
23. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. STR 2.05.04:2003 *Poveikiai ir apkrovos*. 2003 m gegužės 15 d. įsakymu Nr. 233 [interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-09-10]. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.213447>
24. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN 1991-1-1] *Eurokodas 1. Poveikiai konstrukcijoms*. Vilnius: LSD, 2009.
25. RINSHA P S, *Numerical Analysis of Strengthening Steel Frames using Post Tensioned Cables*. [interaktyvus] 2020, [žiūrėta 2021-10-10]. Prieiga per: <https://www.academia.edu/44846256/IRJET> Numerical Analysis of Strengthening Steel Frames using Post Tensioned Cables?from=cover_page

26. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 12944-2:2019] *Dažai ir lakai. Plieninių konstrukcijų apsauga nuo korozijos apsauginėmis dažų sistemomis.*“. Vilnius: LSD, 2019.
27. INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. [ISO 9226:2012] *Corrosion of metals and alloys*, 2012.
28. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [LST EN ISO 12944-5:2019] *Dažai ir lakai. Apsauginės dažų sistemos.*“. Vilnius: LSD, 2019.
29. DOWSELL B., *Reinforcing the Point*, [interaktyvus] 2014, [žiūrėta 2021-10-10]. Prieiga per: <https://studylib.net/doc/18276940/reinforcing-the-point---modern-steel-construction>
30. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. [EN 10025:2004] *Karštai valcuoti konstrukcinio plieno gaminiai*, Vilnius: LSD, 2004.
31. GUO S., *A critical review of corrosion development and rust removal techniques on the structural/environmental performance of corroded.* [interaktyvus] 2019, 126-146, [žiūrėta 2021-10-20]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619319766>
32. GULFSTREAM IV, *Structural repair manual. Corrosion removal and preventive procedures*, [interaktyvus] 2004, [žiūrėta 2021-10-20]. Prieiga per: https://seb.noaa.gov/pub/engineering/N49RF/SRM/pdf/51-13-10_0pb.pdf
33. PARASHAR S., *Presurface treatment of all material by sandblasting*, [interaktyvus] 2015, [žiūrėta 2021-10-25]. Prieiga per: http://www.ijaerd.com/papers/finished_papers/PRESURFACE%20TREATMENT%20OF%20ALL%20MATERIALS%20BY%20%20%20SANDBLASTING-28938.pdf
34. OBOT M.U., *An Assessment on the Production of Abrasive Sandpaper from Locally Sourced Materials*, [interaktyvus] 2016, 176-185, [žiūrėta 2021-10-25]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/305266155_An_Assessment_on_the_Production_of_Abrasive_Sandpaper_from_Locally_Sourced_Materials
35. RUST BULLET, *Chemical Stripping of Organic Coatings From Steel Structures*, [interaktyvus] [žiūrėta 2021-10-25]. Prieiga per: <https://www.rustbullet.com.au/technical/sspc-the-society-for-protective-coatings/technology-updates/chemical-stripping-of-organic-coatings-from-steel-structures/>
36. MIYASHITA T., *CFRP Repair Method for Corroded Steel Girder Ends*, [interaktyvus] 2016, DOI:10.2749/222137815815775277 [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: https://www.researchgate.net/publication/282238796_CFRP_Repair_Method_for_Corroded_Steel_Girder_Ends
37. FAIKHA V.P. *Flexural Strengthening of Steel Beams using CFRP Sheets*, [interaktyvus] 2019, [žiūrėta 2021-10-29]. Prieiga per: https://www.academia.edu/40043484/IRJET-Flexural_Strengthening_of_Steel_Beams_using_CFRP_Sheets
38. JAGTAP P. R., *Shear Strengthening Of Steel I-Beam With Cfrp Composites*, [interaktyvus] 2020, [žiūrėta 2021-11-15]. Prieiga per: <https://www.ijstr.org/paper-references.php?ref=IJSTR-0120-29253>
39. ASCIONE L., *Design Guidelines for the Strengthening of Existing Structures with FRP in Italy*, [interaktyvus] 2004, [žiūrėta 2021-11-20]. Prieiga per: <https://quakewrap.com/frp%20papers/DesignGuidelinesfortheStrengtheningofExistingStructurewithFRPinItaly.pdf>
40. MAPEI, *Structural strengthening manual*, [interaktyvus] 2014, [žiūrėta 2021-11-20]. Prieiga per: <https://www.mapei.com/id/en/tools-and-downloads/technical-documentation?page=2>