



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lenkiamų plieninių elementų stiprinimo efektyvumo analizė

Baigiamasis magistro projektas

Aušra Bagdonaitė

Projekto autorė

Doc. dr. Mindaugas Augonis

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lenkiamų plieninių elementų stiprinimo efektyvumo analizė

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Aušra Bagdonaitė

Projekto autorė

Doc. dr. Mindaugas Augonis

Vadovas

Lekt. dr. Nerijus Adamukaitis

Recenzentas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Aušra Bagdonaitė

Lenkiamų plieninių elementų stiprinimo efektyvumo analizė

Akademiniio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Aušros Bagdonaitės, baigiamasis projektas tema „Lenkiamų plieninių elementų stiprinimo efektyvumo analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Bagdonaitė, Aušra. Lenkiamų plieninių elementų stiprinimo efektyvumo analizė. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Mindaugas Augonis; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijos mokslai, statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: *plieninė sija, lynai, lenkimo momentas, įlinkis.*

Kaunas, 2019. 55 p.

Santrauka

Šio magistro baigiamojo darbo tikslas yra išnagrinėti plieninių sijų elgseną po sustiprinimo ir nustatyti jos efektyvias stiprinimo parametrų vertes. Darbą sudaro trys pagrindinės dalys: literatūros duomenų analizė, stiprinimo lynais bei plieniniais lakštais skaičiavimo metodika bei rezultatai ir jų aptarimas.

Pirmojoje darbo dalyje apžvelgiami įvairūs plieninių sijų stiprinimo būdai. Analizuojant literatūroje aprašomus eksperimentinius bandymus, įvertinamas kiekvieno būdo efektyvumas.

Antroje magistro darbo dalyje sudaryta plieninės sijos stiprinimo lynais skaičiavimo metodika. Nurodomi pradiniai sistemos parametrai, sudarytos skaičiuojamosios schemos, pateikiama skaičiavimo bei tikrinimų metodika.

Trečioje šio darbo dalyje pateikiamos lyginimui naudotų stiprinimo sistemos parametrų charakteristikos, nustatyti sistemų apribojimai ir ribinės reikšmės. Grafiškai palyginama apskaičiuotų skirtingų stiprinimo sistemos parametrų įtaka sijos laikomajai galiai bei standumui. Galiausiai palyginama konstrukcijos stiprinimo įtempiamais lynais bei plieniniais lakštais sistemų įrengimo kainos.

Suformuluojamos 4 magistrinio darbo išvados.

Darbo apimtis be priedų – 55 psl., kuriuose pateikta: 27 paveikslėliai, 6 lentelės, 20 literatūros šaltinių.

Bagdonaitė, Aušra. Analysis of Flexural Steel Members Strengthening Effectiveness. Master's Final Degree Project in Civil Engineering / supervisor assoc. prof. Mindaugas Augonis. The Faculty of Civil Engineering and Architecture Kaunas University of Technology.

Research area and field: technology science, structural and building products engineering.

Keywords: *steel beam, tendon, bending moment, deflection.*

Kaunas, 2019. 55 p.

Summary

The aim of this master's thesis is to analyze the behavior of steel beams after strengthening and to determine its' most effective values for enhancement parameters. The thesis consists of three main parts: literature review, methodology for calculations of steel beam strengthened with prestressed tendons and steel sheets and discussion of their results.

The first part of the work reviews various ways of strengthening steel beams. Analyzing the experimental tests described in the literature, the effectiveness of each method is evaluated.

In the second part of the master's thesis, the method of calculation of strengthening steel beams is composed. Initial system parameters, computational schemes, calculation and verification methodology are defined.

The third part of this work presents the characteristics used for comparison of the strengthening system, the limitations of the system and the limit values. The influence of calculated different amplification system parameters on the beam load and stiffness were graphically compared. Finally, the cost of installing beam strengthening with tensioned tendons and steel sheets is compared.

4 master's thesis conclusions are given.

Thesis consists of 55 pages of text, 27 figures, 6 tables and 20 references.

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
LENTELIŲ SĄRAŠAS	9
ĮVADAS.....	10
1. LITERATŪROS ANALIZĖ	12
1.1. BENDRA APŽVALGA	12
1.2. STIPRINIMAS PLIENINIAIS LAKŠTAIS	12
1.3. STIPRINIMAS STIKLO IR ANGLIES PLUOŠTO PLOKŠTELĖMIS	13
1.3.1. Eksperimentinių bandymų apžvalga	13
1.3.2. Stiprinimo sistemos trūkumai	14
1.4. STIPRINIMAS STANDUMO BRIAUNOMIS	14
1.5. BEKONTAKTIS STIPRINIMAS ĮTEMPIAMOMIS PLOKŠTELĖMIS	15
1.5.1. Stiprinimo principas ir jo privalumai	15
1.5.2. Eksperimentinių bandymų apžvalga	15
1.6. STIPRINIMAS LIAUNOS ARMATŪROS SISTEMOMIS	17
1.6.1. Pirmasis stiprinimo metodas	17
1.6.2. Antrasis stiprinimo metodas.....	20
1.6.3. Stiprinimo įtempta armatūra privalumai	23
1.6.4. Įtemptos armatūra sistemos trūkumai	23
1.7. Literatūros analizės išvados.....	24
2. SKAIČIAVIMO METODIKA.....	25
2.1. Tiriamasis objektas.....	25
2.2. Stiprinimas lynų sistema.....	25
2.2.1. Pradiniai duomenys.....	25
2.2.2. Skaičiuojamoji schema.....	26
2.2.3. Apkrovos po padidėjimo	27
2.2.4. Stiprinimo lynais skaičiavimo metodika	27
2.2.5. Sustiprintos sijos pastovumo patikrinimas.....	31
2.3. Stiprinimas plieno lakštais (plokštelėmis).....	38
2.3.1. Pradiniai duomenys.....	38
2.3.2. Skaičiavimai.....	38
2.3.3. Stiprumo patikrinimai	39
3. TYRIMO REZULTATAI	41
3.1. Stiprinimo lynais tyrimo rezultatai	41

3.1.1.	Duomenys bei apribojimai skaičiavimams stiprinant lynais	41
3.1.2.	Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos	42
3.1.3.	Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lynų atraminių stovų aukščio	44
3.1.4.	Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lynų inkaravimo pozicijos	45
3.1.5.	Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lyno atramos taško pozicijos	47
3.2.	Stiprinimo plokšte rezultatai	49
3.3.	Stiprinimo būdų parametrų apibendrinimas	51
3.4.	Stiprinimo būdų kainų palyginimas	52
IŠVADOS		53
LITERATŪROS SĄRAŠAS		54
PRIEDAI		56

Paveikslų sąrašas

1 pav. Dvitėjo profilio stiprinimo plieninėmis plokštelėmis pavyzdžiai.....	12
2 pav. Skirtingais būdais sustiprintų sijų atsparumas įtempiams priklausomai nuo apkrovimo ciklų skaičiaus [6].....	14
3 pav. Bekontakčio stiprinimo sistemų variantai: a – trikampė, b, c – plokščiosios, d – trapecinė [12].....	15
4 pav. Skirtingais bekontakčiais būdais sustiprintų konstrukcijų vidutinės deformacijos priklausomybė nuo veikiančios apkrovos [12]	16
5 pav. Skirtingais bekontakčiais būdais sustiprintų konstrukcijų įtempių viršutinėje ir apatinėje juostoje priklausomybė nuo apkrovos [12].....	16
6 pav. Stiprinamos sijos schema įtempiant armatūros strypus sijos vidinėje dalyje [13]	17
7 pav. Stiprinamos sijos schema įtempiant armatūros strypus sijos išorinėje dalyje [13].....	17
8 pav. Jėgų pasiskirstymas sijoje [12]	18
9 pav. Sijų įlinkio priklausomybė nuo veikiančios apkrovos [13]	19
10 pav. Plieninės dvitėjo skerspjuvio sijos stiprinimas tiesaus lyno sistema [14]	21
11 pav. Poslinkių metodo skaičiavimo schema [14]	21
12 pav. Dvitėjo profilio skerspjuvio matmenys	25
13 pav. Schematiškas trapecinės stiprinimo lynais sistemos vaizdavimas: 1 – stiprinama sija, 2 – lynas, 3 – atraminiai stovai, 4 – inkaravimo (tvirtinimo) vieta, 5 – sijos atramos (pvz. G/b kolonos).....	26
14 pav. Sijos skaičiuojamoji schema.....	26
15 pav. Dvitėjo profilio, sustiprinto plokštele, pagrindiniai skerspjuvio matmenys	38
16 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos	43
17 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos	43
18 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo atraminio stovo aukščio	44
19 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo atraminio stovo aukščio	45
20 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo lynų inkaravimo pozicijos svorio centro atžvilgiu.....	46
21 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo lynų inkaravimo pozicijos svorio centro atžvilgiu	46
22 pav. Schematiškas trikampės stiprinimo lynais sistemos vaizdavimas (žymėjimus žr. 13 pav.).....	47
23 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo lyno atramos taško pozicijos	47
24 pav. Sijos įlinkio sumažėjimo priklausomybė nuo lyno atramos taško pozicijos	48
25 pav. Sijos laikomosios galios priklausomybė nuo plokštelės storio bei pločio.....	50
26 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo plokštelės storio bei pločio	50
27 pav. Stiprinimo būdų kainų palyginimas.....	52

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Bandymo rezultatai [13]	19
2 lentelė. Kontrolinės sijos bei sustiprintų sijų įtempiai ir įlinkiai [14]	22
3 lentelė. Lynų charakteristikos [19]	41
4 lentelė. Sijos skerspjūviai ir jų pagrindinės charakteristikos [20]	42
5 lentelė. Sijos laikomosios galios ir įlinkio reikšmės	49
6 lentelė. Stiprinimo sistemų parametrai ir apskaičiuota įrengimo kaina	52

IVADAS

Temos aktualumas ir mokslinė problema

Statybinių konstrukcijų stiprinimas yra aktualus sprendžiant ne tik pažeistų konstrukcijų laikomosios galios atstatymą, tačiau ir pastatų bei statinių rekonstrukciją. Dėl ilgos eksploatacijos ar pasikeitusių projektinių apkrovų, konstrukcijos per laiką praranda savo stiprumo savybes bei jose atsiranda įvairių defektų (įtrūkimų, įlinkių,...). Pastatų bei statinių stiprinimas yra ribojamas techninių galimybių, kadangi beveik visuomet nebūna galimybių juose esančias konstrukcijas išmontuoti ir pakeisti naujomis [1]. Dėl šių priežasčių, norint išvengti esamų konstrukcijų suirimo, tačiau iš esmės nekeičiant arba neturint galimybės, sąlygų ar išteklių senų konstrukcijų pakeisti naujomis, jau esamoms konstrukcijoms yra taikomi įvairūs stiprinimo būdai.

Remiantis atliktu tyrimu [2] apie Europoje esančius geležinkelio tiltus, buvo nustatyta, jog daugelio esamų tiltų eksploataavimo laikotarpis jau yra ganėtinai ilgas. Apie 22 % visų Europos geležinkelio tiltų yra metaliniai, iš kurių 40 % yra suprojektuoti ir pastatyti mažiau negu prieš 50–100 metų, 28 % pastatyti prieš daugiau nei 100 metų. Iš statistinių duomenų matoma, jog kai kurios tiltų konstrukcijos yra eksploatuojamos jau itin ilgai ir per daugelį metų prarado dalį savo pradinių stiprumo savybių. Taip pat per pastaruosius kelis dešimtmečius traukinių bei kitų transporto priemonių srautai ženkliai padidėjo bei pasunkėjo pačios transporto priemonės, todėl ir dinaminės apkrovos, tenkančios tiltams, išaugo bei viršijo apkrovas, skaičiuotas konstrukcijų projektavimo metu. Nors šie tiltai yra vis dar naudojami, juos reikia sustiprinti tam, jog atlaikytų pagal esamą situaciją perskaičiuotas apkrovas.

Plieninių konstrukcijų stiprinimas plačiai naudojamas ir pramoniniuose, komerciniuose bei kito panašaus tipo pastatuose. Atliekant pastatų rekonstrukcijas, kurių metu padidėja konstrukcijas veikiančios apkrovos, sijų stiprinimas įgauna dar didesnę reikšmę, kadangi esamų konstrukcijų keitimas funkcionuojančiame ir įrengtame pastate būna beveik neįmanomas arba reikalauja didelių medžiagų bei darbo jėgos sąnaudų.

Dėl stiprinimo sistemų poreikio eksploatuojamoms konstrukcijoms, yra reikalinga turėti vieningą projektavimo metodiką, kuria naudojantis būtų įmanoma kuo efektyviau parinkti stiprinimo sistemos parametrus individualiai kiekvienam stiprinimo atvejui.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio darbo tikslas – išnagrinėti plieninių sijų elgseną po sustiprinimo ir įvertinti optimalius stiprinimo sistemos parametrus.

Uždaviniai:

1. Atliekant literatūros analizę apžvelgti bei įvertinti plieninių sijų stiprinimo būdus ir jų efektyvumą.
2. Atlikti plieninių konstrukcijų, stiprinamų įtempiamais lynais bei papildomais plieniniais lakštais standumo bei stiprumo skaičiavimus.
3. Palyginti skirtingų stiprinimo sistemos parametrų įtaką konstrukcijos stiprinimo efektyvumui.
4. Apskaičiuoti stiprinimo įtempiamais lynais ir stiprinimo plieniniais lakštais sistemos įrengimo kainas bei jas palyginti.

1. LITERATŪROS ANALIZĖ

1.1. BENDRA APŽVALGA

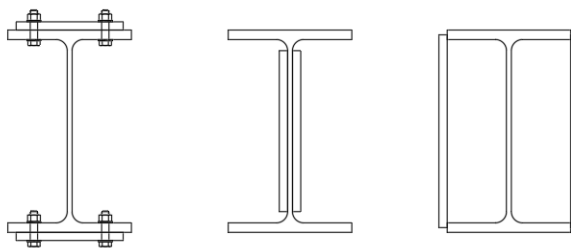
Praktikoje yra nemažai įvairių būdų, kaip galima sustiprinti ir sustandinti plienines konstrukcijas, praradusias dalį savo laikomosios galios dėl ilgo eksploatavimo laiko arba pasikeitus (padidėjus) jas veikiančioms apkrovoms. Dažniausiai išskylanti problema eksploatuojamose konstrukcijose yra ta, jog įtempių koncentracijų vietose dėl konstrukcijos nuovargio ar padidėjusių projektinių apkrovų atsiranda įvairių plyšių ir įtrūkimų, kurie yra pavojingi konstrukcijoms. Norint apsaugoti plieninius elementus nuo suirimo bei defektų atsiradimo, didžiausių lenkimo momentų veikimo vietose turi būti didinamas konstrukcijų standumas bei laikomoji galia.

Šioje darbo dalyje bus apžvelgiami keletas plačiausiai naudojamų plieninių konstrukcijų stiprinimo būdų bei aptartas jų efektyvumas.

1.2. STIPRINIMAS PLIENINIAIS LAKŠTAIS

Vienas iš paprasčiausių plieninių konstrukcijų stiprinimo būdų yra stiprinimas didinant elemento skerspjūvio plotą. Turbūt plačiausiai naudojamas būdas – papildomų plieninių plokštelių arba lakštų virinimas arba tvirtinimas varžtais prie esamo profilio.

Papildomos plieno plokštelės gali būti tvirtinamos tiek prie sijų viršutinės ar apatinės lentynų, tiek prie dvitėjo sienelių (žr. 1 pav.). Taip pritvirtintos jos padidina sijos skerspjūvio plotą, tuo pačiu inercijos momentą bei yra sumažinamas sijos įlinkį. Be to, papildomas plieno storis padidina statinį elemento momentą, o kartu ir šiek tiek padidindamas atsparumas lenkimo momentui.



1 pav. Dvitėjo profilio stiprinimo plieninėmis plokštelėmis pavyzdžiai

Yra atvejų, kai plokštelės storio nepakanka siekiant pakankamai padidinti inercijos momentą [3], todėl tokiais atvejais gali būti privirinami ir papildomi profiliai.

Tačiau šis stiprinimo metodas turi nemažai trūkumų – plokštelės arba papildomi profiliai padidina konstrukcijos savąjį svorį bei toks stiprinimo būdas gali būti sudėtingas aukštuose pastatuose. Taip

pat pats virinimo ar jungimo varžtais (gręžimo) procesas gali sukelti naujas įtempių koncentracijas skerspjuvio stiprinimo vietoje bei paspartinti konstrukcijų silpnėjimą, kadangi dažniausiai tokiais atvejais virinimas turi būti atliekamas per visą plokštelės / lakšto perimetrą [4].

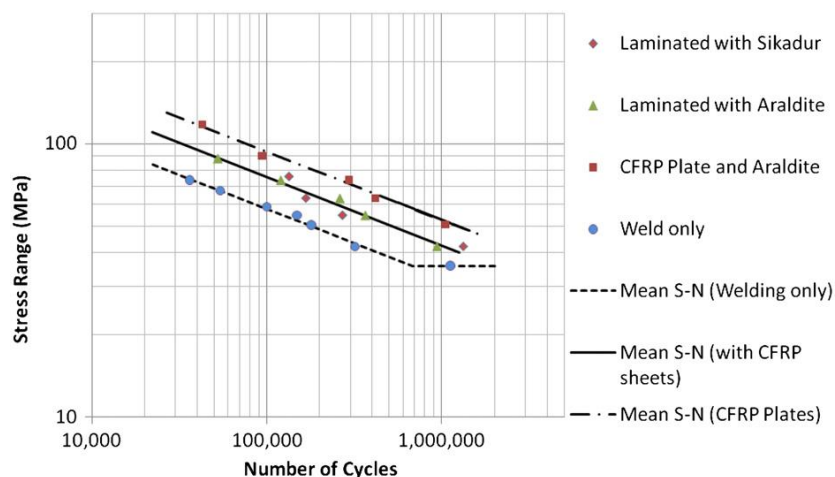
1.3. STIPRINIMAS STIKLO IR ANGLIES PLUOŠTO PLOKŠTELĖMIS

Dėl anksčiau paminėtų plieno plokštelių naudojimo trūkumų, norint pasiekti geresnį stiprinimo efektyvumą, plieno lakštai ir plokštelės yra vis dažniau keičiamos į anglies arba stiklo pluoštu sustiprinto polimero lakštus ir plokšteles.

1.3.1. Eksperimentinių bandymų apžvalga

Atlikti eksperimentiniai tyrimai [5] su iš anksto įtemptomis bei neįtemptomis anglies pluoštu sustiprinto polimero (toliau – CFRP, angl. carbon fiber reinforced polymer) juostomis (plokštelėmis). Bandyme buvo ištirti penki lenkiami elementai: kontrolinė nestiprinta sija, sija, sustiprinta neįtempta CFRP plokštele, ir trys nominalia jėga (20 %) iš anksto įtemptomis plokštelėmis sustiprintos sijos. Tyrimų rezultatai parodė, jog konstrukcijų, sustiprintų su 20 % įtemptomis CFRP plokštelėmis, nuovargio atsiradimo laikas gali pailgėti net iki 5 kartų, lyginant su neįtemptomis stiprinimo plokštelėmis stiprinamas konstrukcijas, esant tokioms pačioms sąlygoms bei apkrovai. Taip pat išankstinis įtempimas ženkliai sumažina likutinę deformaciją vykstant plyšių susidarymo dėl konstrukcijos nuovargio procesui. Remiantis suirimo mechanikos metodologija, buvo apskaičiuotas reikalingas plokštelių įtempimas, norint visiškai sustabdyti plyšių konstrukcijoje plitimą. Eksperimentiniai bandymai atitiko teorinius skaičiavimus ir buvo nustatyta, kad optimaliausia tokios sijos stiprinimo plokštelę įtempti 20 % (bandymui buvo panaudota sija su 12 mm plyšiu, apkrauta 3–30 kN apkrova) [5].

Australijos mokslininkų atliktu tyrimu [6] taip pat buvo patvirtinta CFRP plokštelių efektyvumas konstrukcijų stiprinimui. Vienas tokios plokštelės sluoksnis gali prailginti konstrukcijos nuovargio atsiradimo laiką net iki 7 kartų, lyginant jas su sijomis, kurioms taikytas tik stiprinimo virinamomis plokštelėmis metodas (žr. 2 pav.). Apatinė kreivė žymi stiprinimą plieninėmis plokštelėmis, vidurinioji – CFRP lakštais, o aukščiausiai einanti kreivė – stiprinimą CFRP plokštelėmis.



2 pav. Skirtingais būdais sustiprintų sijų atsparumas įtempiams priklausomai nuo apkrovimo ciklų skaičiaus [6]

1.3.2. Stiprinimo sistemos trūkumai

CFRP plokštelių platesnis panaudojimas stiprinimui yra vis dar ribojamas to, jog nėra iki galo ištirtas visas plokštelės – klijų – plieno sluoksnių tarpusavio veikimas. Prieš stiprinimą esamos stiprinamosios konstrukcijos paviršius turi būti itin gerai nuvalytas ir paruoštas, norint išgauti efektyviausią rezultatą. Massimiliano Bocciarelli atlikti tyrimai [7] patvirtino, jog šiuo būdu sustiprintų sijų silpniausia ir pirmiausiai nelaikanti vieta bei suirimo priežastis yra CFRP plokštelių atsiskyrimas nuo jungiamojo klijų sluoksnio arba šio sluoksnio atsiskyrimas nuo plieno profilio. Tiek teoriniai skaičiavimai, tiek eksperimentiniai bandymai nurodo beveik vienodus šios kontaktinės vietos veikimo rezultatus sijoms esant tamprioje stadijoje. Tačiau esant plastinei stadijai šių vietų tarpusavio sąveika skiriasi lyginant eksperimentinius ir teoriškai gautus duomenis, todėl tikslus sluoksnių atsiskyrimo procesas negali būti tiksliai nuspėjamas ir jam reikia išsamesnių tyrimų [7].

1.4. STIPRINIMAS STANDUMO BRIAUNOMIS

Plieninės konstrukcijos stiprinamos didinant jų standumą didelių įlinkių pasireiškimo atvejais. Šiam tikslui gali būti naudojamos standumo briaunos, kurios parenkamos iš įvairių medžiagų – plieno, anglies pluošto (CFRP) arba stiklo pluošto polimerų (GFRP).

Atlikto eksperimentinio tyrimo [8] rezultatai parodė, jog konstrukcijos, sustiprintos GFRP standumo briaunomis, pavojingiausiame sijos viduriniame pjūvyje pasiekia net 17 % didesnę laikomąją galią negu sijos, sustiprintos virinant plienines standumo briaunas. Dar didesnis (iki 25 %) laikomosios galios išaugimo efektas gali būti pasiekiamas naudojant „T“ formos standumo briaunas [9]. Tačiau vis dar šis stiprinimo būdas, naudojant GFRP medžiagas, yra mažiau paslankus bei mažiau ištirtas negu su tradicinėmis plieninėmis medžiagomis, todėl taikomas rečiau.

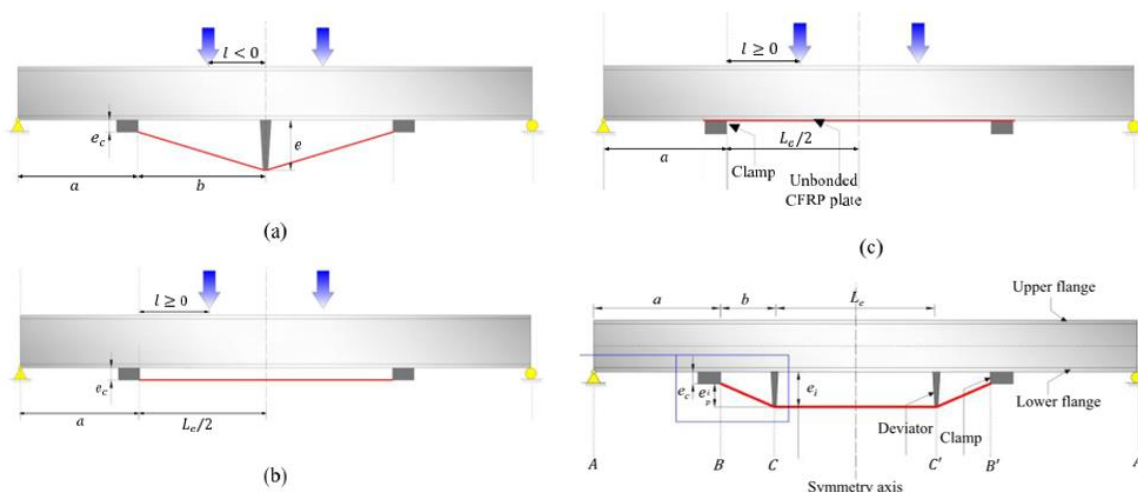
1.5. BEKONTAKTIS STIPRINIMAS ĮTEMPIAMOMIS PLOKŠTELĖMIS

1.5.1. Stiprinimo principas ir jo privalumai

Konstrukcijų stiprinimo efektyvumas daugiausia priklauso nuo pasirinkto stiprinimo elemento ir stiprinamos konstrukcijos jungties. Norint gauti efektyviausią stiprinimo rezultatą bei sumažinti riziką elementams atitrūkti vienas nuo kito, abu stiprinimo paviršiai turi būti tinkamai paruošti, o tai reikalauja daug laiko bei sąnaudų. Taip pat šią stiprinimo elemento bei konstrukcijos jungtį gali veikti ir aplinkos poveikiai (besikeičiančios temperatūros, drėgmė, ultravioletiniai spinduliai) bei įvairios dinaminės apkrovos. Dėl visų šių pavojų, konstrukcijoms sustiprinti gali būti naudojamos bekontaktės stiprinimo sistemos. Šio stiprinimo būdo esminis principas yra tas, kad stiprinama konstrukcija su pagrindiniais stiprinančiaisiais elementais sąveikauja netiesiogiai, o per papildomus elementus ir tuo pačiu per nedidelį plotą keliuose konstrukcijos taškuose arba zonose [10].

Vienas iš šio stiprinimo būdų – naudojant įtemptas CFRP juostas – plokšteles, kurios šiuo atveju nėra klijuojamos ar kitokiu būdu tiesiogiai tvirtinamos visu savo plotu prie plieninės konstrukcijos, kaip prieš tai aptartame stiprinimo būde, bet yra atremiamos ant specialių prie profilio privirtintų atramų [11]. Šios atramos turi nedidelį sąlyčio plotą su stiprinamąja konstrukcija, todėl sumažėja virinimo darbų apimtis bei mažiau veikiama pati konstrukcija. Kadangi CFRP plokštelės nėra tiesiogiai pritvirtinamos prie plieninių konstrukcijų, galimas didesnis stiprinimo būdų parinkimas [12].

1.5.2. Eksperimentinių bandymų apžvalga

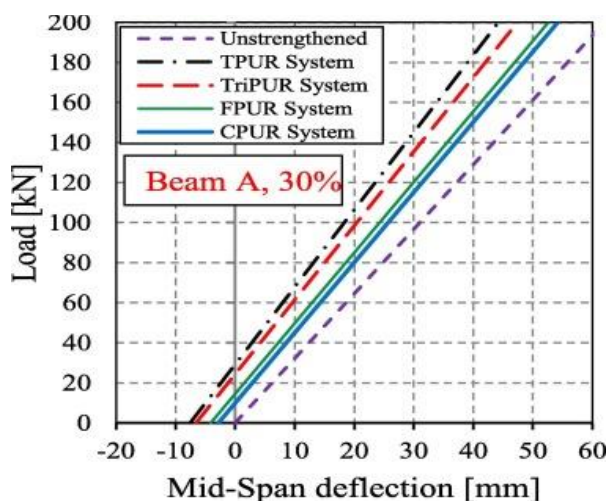


3 pav. Bekontaktio stiprinimo sistemų variantai: a – trikampė, b, c – plokščiosios, d – trapecinė

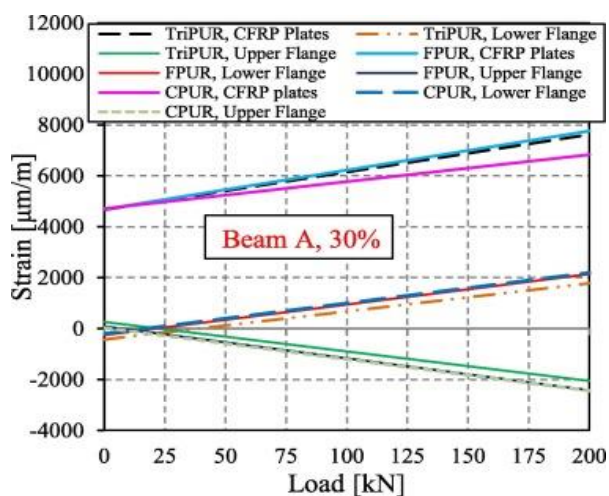
[12]

Irano mokslininkai atliko tyrimą [12], kuriame nagrinėtos keturiais skirtingais iš anksto įtemptų bekontaktių sistemų variantais (trapecinė, trikampė, plokščioji bei kontaktinė sistema) stiprinamos konstrukcijos norint įvertinti jų efektyvumą.

Visos PUR (angl.: pre-stressed un-bonded retrofit – įtemptas bekontaktis stiprinimas) sistemos naudojant CFRP plokšteles, buvo iš anksto įtemptos po 30%, o kaip stiprinamoji konstrukcija naudojami dvitėjai. Rezultatai parodė, jog naudojant trikampę arba trapecinę sistemas, stiprinama konstrukcija buvo šiek tiek standesnė nei kitais bekontaktiais būdais stiprinamos konstrukcijos bei kontrolinė nestiprinta sija (žr. 4 pav.). Nagrinėjant konstrukcijos įtempius viršutinėje ir apatinėje lentynose, juos taip pat efektyviausiai sumažina trikampė stiprinimo sistema (žr. 5 pav.). Taip yra todėl, jog palyginus su kitomis sistemomis šiuo atveju CFRP plokštelė turi didžiausią ekscentricitetą ir tai padidina sijos skerspjūvio vidutinį inercijos momentą.



4 pav. Skirtingais bekontaktiais būdais sustiprintų konstrukcijų vidutinės deformacijos priklausomybė nuo veikiančios apkrovos [12]



5 pav. Skirtingais bekontaktiais būdais sustiprintų konstrukcijų įtempių viršutinėje ir apatinėje juostoje priklausomybė nuo apkrovos [12]

1.6. STIPRINIMAS LIAUNOS ARMATŪROS SISTEMOMIS

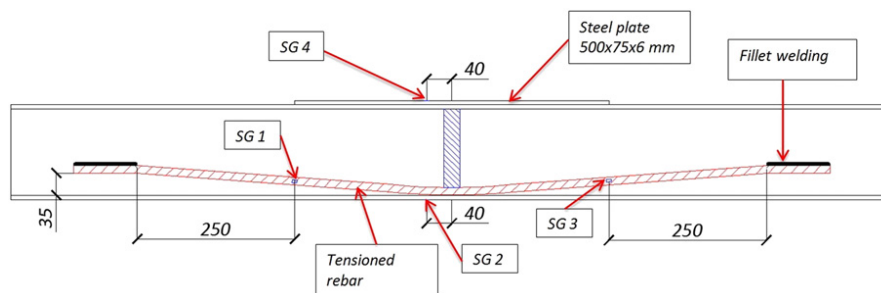
Kitas bekontakčio stiprinimo variantas – stiprinimas įtempiamų lynų ar strypų sistemomis. Šio metodo principas labai panašus į prieš tai skyriuje aptartą stiprinimą įtempiamomis CFRP plokštelėmis, tik vietoj jų naudojami įtempiami lynai / armatūra. Literatūroje galima rasti kelis tokio stiprinimo variantus.

1.6.1. Pirmasis stiprinimo metodas

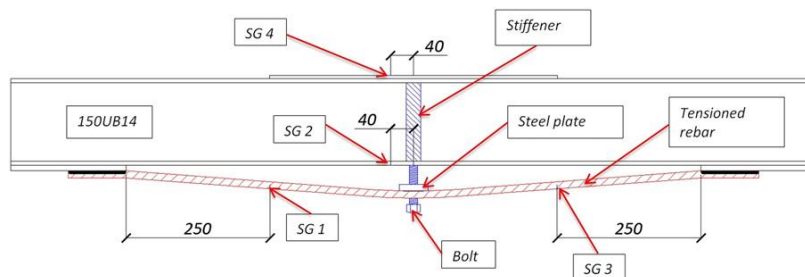
Pirmasis metodas įrengiamas pirmiausia privirinant armatūros strypus prie stiprinamojo profilio ir po to per vidurį plokštelės pagalba juos įtempiant rankiniu įtempimo prietaisu.

Atlikto eksperimentinio bandymo [13] metu buvo nagrinėjama, kokią įtaką vietinio įtempimo tipas (vidinis ar išorinis) bei armatūros strypų skersmuo turi stiprinamų plieninių sijų standumui bei didžiausiai laikomajai galiai.

Atliekant eksperimentą, du armatūros strypai buvo įtempiami simetriškai abejose sijos pusėse. Priklausomai nuo armatūros strypo tvirtinimo vietos, stiprinimo schema buvo dviejų tipų – vidinė (kai tvirtinama prie dvitėjo profilio sienelės – 6 pav.) arba išorinė (kai tvirtinama prie dvitėjo profilio apatinės lentynos išorinio paviršiaus – 7 pav.).



6 pav. Stiprinamos sijos schema įtempiant armatūros strypus sijos vidinėje dalyje [13]



7 pav. Stiprinamos sijos schema įtempiant armatūros strypus sijos išorinėje dalyje [13]

Kadangi buvo naudojama iš anksto numatyto ilgio armatūros strypai, kurie prieš įtempimą privirinami prie profilio, remiantis tamprųjų įtempių – deformacijų priklausomybe ($E = \sigma / \varepsilon$ Huko dėsnis), pagal formulę buvo nustatytas didžiausias leistinas įtempiamos armatūros aukščių skirtumas f (žr. 8 pav.):

$$f = l \sqrt{\frac{\sigma}{2E'}} \quad (1.1)$$

Čia: σ – armatūros įtempimo jėga;

l – armatūros strypo ilgis;

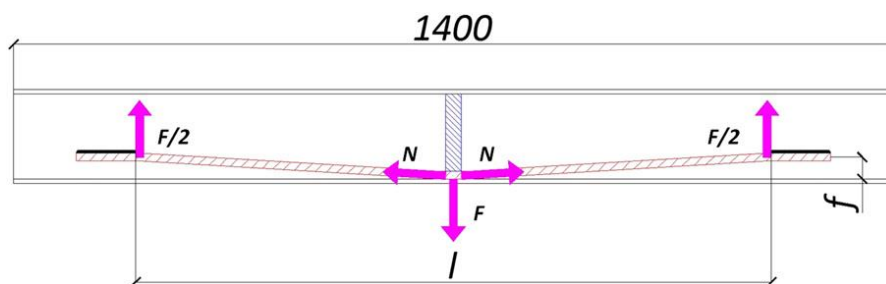
E – plieno Jungo modulis;

Tempimo jėga N tarp armatūros strypų, kuri atsiranda juos įtempinėjančiam, apskaičiuota pagal įtempius bei armatūros strypų skerspjūvį A :

$$N = \sigma A \quad (1.2)$$

Tempimo prietaiso jėga F , reikalinga įtempti armatūrą tam tikra apskaičiuota jėga N , kai įtempimas atliekamas armatūros strypo viduryje (centre), apskaičiuojama pagal formulę,:

$$F = N \sqrt{\frac{8\sigma}{E}} \quad (1.3)$$



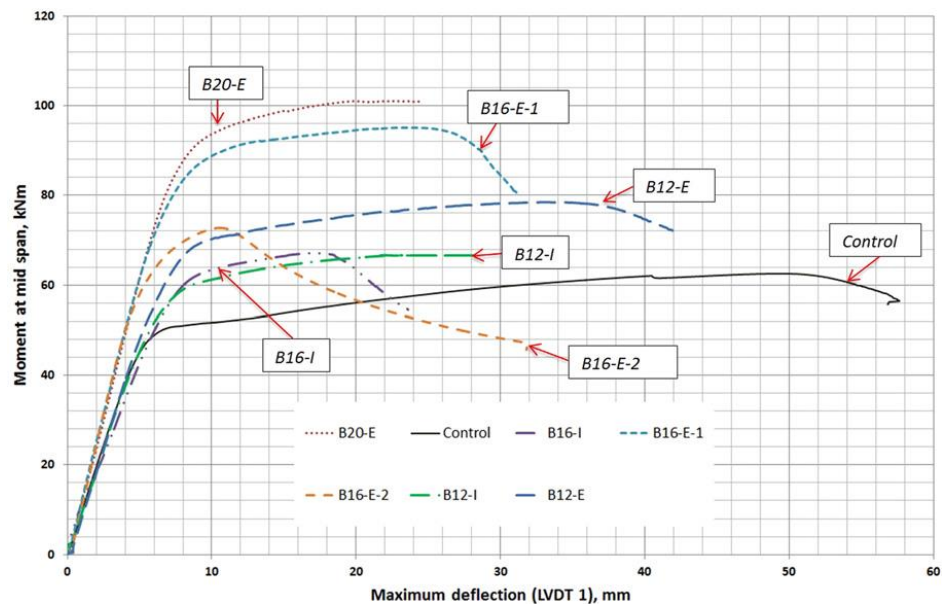
8 pav. Jėgų pasiskirstymas sijoje [12]

Eksperimentiniams bandymams buvo naudojama dvitėjo profilio 1,4 m ilgio sija, kurios aukštis 150 mm, sienelės storis 5 mm, lentynos plotis 75 mm, o storis 7 mm. Šio profilio takumo riba $f_y = 411,6 \text{ MPa}$, stiprumo riba $f_u = 541,3 \text{ MPa}$, Jungo modulis $E = 207,4 \text{ GPa}$.

Įtempiamiems strypams pasirinkti standartiniai gelžbetoninių konstrukcijų armatūros karkasams naudojami strypai, kurių $f_y = 500 \text{ MPa}$. Visų strypų ilgis – 1200 mm.

1 lentelė. Bandymo rezultatai [13]

Sijos žymėjimas	Stiprinimo schema	Armatūros strypai	Bendra strypų įtempimo jėga, kN	Takumo riba, kNm	Stiprumo riba, kNm	Stiprumo ribos prieaugis, %
B12-I	Vidinė	2Ø12	113	52,1	66,7	6,72
B12-E	Išorinė	2Ø12	113	68,6	78,5	25,6
B16-I	Vidinė	2Ø16	200	-	66,9	7,04
B16-E-1	Išorinė	2Ø16	200	83,9	95,1	52,16
B16-E-2	Išorinė	2Ø16	200	65,8	70,2	12,32
B20-E	Išorinė	2Ø20	314	87,8	100,9	61,44
Kontrolinė	-	-	-	39,1	62,5	-



9 pav. Sijų įlinkio priklausomybė nuo veikiančios apkrovos [13]

Iš eksperimento rezultatų (žr. 9 pav., 1 lent.) galime daryti kelias išvadas:

- įtemptų armatūros strypų kartu su standumo briaunomis naudojimas, norint užtikrinti plieninių sijų atsparumą lenkimo jėgoms, gali padidinti jų laikomąją galią iki 60 %;
- sijos, sustiprintos tokiu pačiu armatūros skerspjūvio strypu, tačiau naudojant išorinį įtempimą, buvo kur kas efektyvesnės padidinant tiek laikomąją galią ir takumo ribą, tiek momento reikšmes, prie kurių atsiranda sijos įlinkis;
- didėjant armatūros strypo skerspjūviui didėja sijos laikomoji galia. Tai gali būti paaiškinta tuo, jog armatūros strypai padidina tempiamosios lentynos efektyvųjį skerspjūvio plotą, tuo pačiu padidindami ir sijos stiprumą;

- stiprinamojoje sijoje nenaudojant standumo plokštelių (B16-E-2), tempiama sijos juosta turėjo daugiau laisvumo ir sukėlė didesnius pradinius gniuždymo įtempius.

Visų tiriamų sijų laikomosios galios netekimo priežastimi tapo skersinis – sukamasis klupumas. Taip pat sijos tarpatramyje kai kuriose zonose konstrukcija pasiekė savo takumo ribą, o bandomoji konstrukcija (B16–E–2), kurioje buvo nenaudota vidurinė sąstanda, viršijo sijos lenkiamąją galią viršutinėje juostoje pirmiau negu įvyko sijos klupimas.

Šie rezultatai rodo, jog įrengiant šią sistemą turi būti įvertinami ir papildomi elementai – plokštelės, standumo briaunos, kurios sustandintų konstrukciją.

1.6.2. Antrasis stiprinimo metodas

Naudojant kitą metodą, stiprinimui naudojami lynai arba armatūros strypai nėra iš karto privirinami prie profilio, bet yra įtempiami numatyta jėga ir tik po to užinkaruojami [14]. Sijų stiprinimas gali būti nagrinėjamas dviem analizės metodais: standumo arba poslinkių metodu.

Baigtinių elementų metodo taikymas

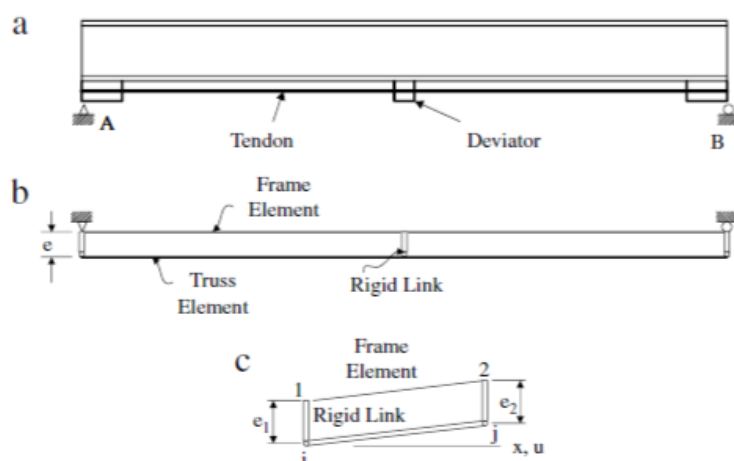
Šiuo metodu analizuojama tiesiu lynu sustiprinta sija (žr. 10 pav.), kai lynas yra laikomas strypiniu elementu standžiai pritvirtintu atramų bei įtempių išskirstymo atramos taškuose. Įtempimo jėgos skaičiavimuose yra pridamos kaip siją veikiančios atitinkamos apkrovos ir gali būti pavaizduojamos matricomis [14]:

$$\begin{pmatrix} u_i \\ w_i \\ \theta_i \end{pmatrix} = A_1 \begin{pmatrix} u_{i1} \\ w_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (1.4)$$

$$\begin{pmatrix} u_j \\ w_j \\ \theta_j \end{pmatrix} = A_2 \begin{pmatrix} u_2 \\ w_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} \quad (1.5)$$

$$\text{Čia: } A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -e_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

e_1 ir e_2 atstumai tarp neutralios sijos ašies iki atitinkamai i ir j sijos taškų (žr. 10 pav. c).



10 pav. Plieninės dvitėjo skerspjuvio sijos stiprinimas tiesaus lyno sistema [14]

Standumo matrica strypiniame elemente k_T gali būti randama iš transponavimo matricos Γ^T , kurios formulė:

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \Lambda_1 & 0 \\ 0 & \Lambda_2 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Globali standumo matrica elemente k_T taip pat gali būti gaunama iš sudėtinės transponavimo matricos:

$$k_T = \Gamma^T \cdot k_T \cdot \Gamma \quad (1.7)$$

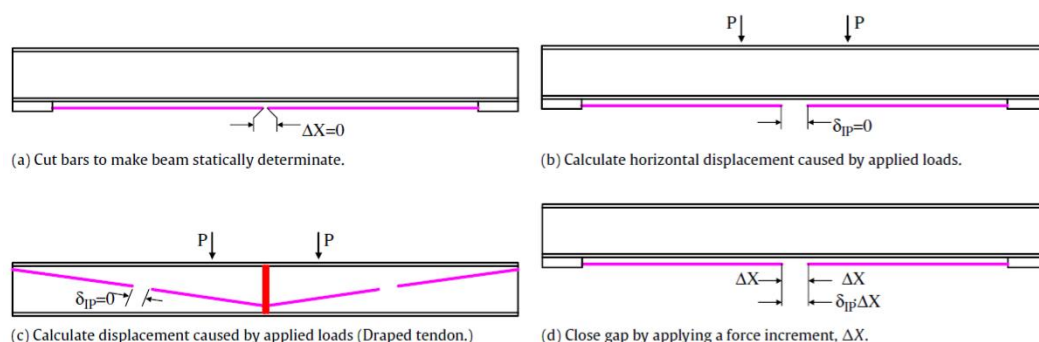
Lokalinė standumo matrica gaunama panašiu būdu, naudojantis (1.6) formule.

Šiuo metodu dažniausiai skaičiuojama stiprinant tiesiu armatūros strypu.

Poslinkius armatūroje įvertinantis metodas

Skaičiavimo eiga (žr. 11 pav.):

- įtempiami strypai nutraukiami, jog taptų statiskai išsprendžiami;
- skaičiuojamas horizontalus poslinkis nuo veikiančių jėgų;
- jei stiprinimo sistema trikampė – skaičiuojamas bendras poslinkis;
- įtempiami strypai vėl sujungiami į vieną, pridėdant lyno įtempimo jėgos padidėjimą.



11 pav. Poslinkių metodo skaičiavimo schema [14]

Bendra lyno įtempimo jėga apskaičiuojama sudedant pirminę lyno jėgą su gautu jos padidėjimu.

$$\delta_{11} \cdot \Delta X + \delta_{1P} = 0 \quad (1.8)$$

Čia: δ_{11} – pailgėjimas dėl lyno įtempimo jėgos;

δ_{1P} – pailgėjimas dėl išorinių apkrovų;

ΔX – lyno įtempimo jėgos padidėjimas.

$$\delta_{11} = \int_0^L \frac{e^2}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{EI} dx + \int_0^L \frac{1}{E_t A_t} dx \quad (1.9)$$

$$\delta_{1P} = \int_0^L \frac{e M_x}{EI} dx \quad (1.10)$$

Čia: M_x – momentas dėl išorinių jėgų;

e – lyno ekscentricitetas;

E – sijos tamprumo modulis;

E_t – lyno tamprumo modulis.

Tai įtempimo jėgos padidėjimas dėl išorinių apkrovų gali būti apskaičiuojamas formule:

$$\Delta X = \frac{\left(\frac{e}{L} \cdot \int_0^L M_x dx \right)}{e^2 + \frac{EI}{E_t A_t} + \frac{1}{A}} \quad (1.11)$$

Buvo atliktas eksperimentinis bandymas [14], kuriame nagrinėtas dvitėjo profilio 4 m ilgio sijos stiprinimo efektyvumas. Profilio matmenys parinkti tokie: aukštis 300 mm, sienelės storis 10 mm, lentynos plotis 300 mm, o jos storis 15 mm. Panaudotų įtempiamų lynų skersmuo 12,4 mm, įtempimo jėga 98 kN bei 196 kN (kai naudojami du lynai). Plieno tamprumo modulis 200 GPa.

Šis tyrimas apžvelgė įtempius susidarančius sijoje bei įtempiamame lyne sustiprinus konstrukcijas.

2 lentelė. Kontrolinės sijos bei sustiprintų sijų įtempiai ir įlinkiai [14]

	Strain in steel I-beam		Strain on tendon	Displacement at mid-span (mm)
	ϵ_{top}	ϵ_{bottom}	ϵ_{tendon}	
Type A	810.99	810.99	–	8.79
Type B	831.64	786.92	28.39	8.10
Type C	810.17	686.78	1029.03	7.75
Type D	780.09	657.28	1041.01	10.27
Type E	893.20	617.04	524.58	8.46
Type F	856.54	586.88	536.31	8.26

Rezultatai (žr. 12 pav.) parodė, jog kuo didesnė lyno įtempimo jėga tuo sijos tapo standesnės.

Naudojant schemą „c“ (žr. 11 pav.) konstrukcija taip pat atlaikė didesnes apkrovas nei su likusiomis schemomis, kadangi šiuo atveju ženkliai padidėjo lynų įtempimo kampas, o kartu ir lyno perduodamos jėgos sijos profiliui.

1.6.3. Stiprinimo įtempta armatūra privalumai

Šis stiprinimo metodas yra plačiai naudojamas, nes turi nemažai privalumų.

Pirmiausia, šis stiprinimo būdas yra gana ekonomiškas, kadangi naudojamos paprastos ir populiarios rinkoje medžiagos – įprasti įtemptieji lynai, inkaravimui bei atramoms skirtos standartinės plokštelės arba profiliai. Tai lemia pakankamai nedidelę šios stiprinimo sistemos įrengimo kainą [13].

Kitas privalumas yra tas, jog stiprinimo inkaravimo plokštelės / profiliai bei atramos lynams yra nesunkiai įrengiamos tiesiog virinant juos prie jau esamo profilio. Tai nereikalauja papildomų sudėtingų įrengimų ar įgūdžių. Be to, sistema tiesiogiai kontaktuoja su konstrukcija per nedidelio ploto atramas, todėl mažėja virinimo darbų apimtis, kartu sutaupomos ir stiprinimo sistemos įrengimui skirtos lėšos [15].

Ši stiprinimo sistema taip pat yra lengvai prižiūrima. Reguliarios patikros paprastumas padidina pačios konstrukcijos patikimumą, nes bet koks įtempių nuostolis ar korozijos žala lynams gali būti nustatyti paprastos išorinės patikros metu [15].

Kai kuriuose literatūros šaltiniuose [15] aptartas ir šios stiprinimo sistemos remontuojamumas. Naudojami lynai to prireikus gali būti papildomai įtempti. Tai gali būti atliekama, jei paliekamas pakankamas įtempiamojo lyno ilgis už inkaravimo taško bei jei antikorozinei lynų dangai buvo naudota tampri medžiaga, tokia kaip tam skirtas vaškas arba tepalai, kurie deformuojasi kartu su templėmis. Lynų pakartotinis įtempimas taip pat gali būti naudojamas norint nustatyti likusią pradinę įtempimo jėgą lyne.

1.6.4. Įtemptos armatūra sistemos trūkumai

Dėl lynų relaksacijos bei pasislinkimo apkrovas konstrukcijas, gali sumažėti pradinės lynų įtempimo jėgos. Tai gali ženkliai sumažinti stiprinimo sistemos efektyvumą, todėl prieš įrengiant lynus, šie nuostoliai turi būti įvertinti papildomai.

Stiprinamos sijos tarpatramyje įrengiamų lynų atramų vietose bei sijos kraštuose lynų inkaravimui skirtų atramų / plokštelių vietose yra reikalingas virinimas, o kai kuriais atvejais ir gręžimas. Šie veiksniai gali sukelti papildomas įtempių koncentracijas, todėl tvirtinimo pobūdis turi būti

parenkamas atsižvelgiant į esamos sijos būklę ir skerspjūvio silpnąsias vietas. Šiuo tikslu dažnai yra naudojamos papildomos standumo briaunos atramų tvirtinimo vietose.

Kaip jau minėta, šiam stiprinimo būdai labai svarbu suteikti pakankamą apsaugą nuo korozijos, kuri priklauso nuo koroziškumo kategorijos – stiprinimo sistemos įrengimo sąlygų ir esamos aplinkos. Ypatingas dėmesys turėtų būti skiriamas jungimo su kitais komponentais bei galimo pasislinkimo vietų apsaugai. Stiprinimo lynai prieš jų įrengimą ir įtempimą turi būti apsaugomi nuo korozijos specialiais antikoroziniais dažais bei įvelkami į polietileninius vamzdelius [15].

Konstrukcijų stiprinimo lynais panaudojimas yra ribojamas tuo, jog įrengus šią sistemą gali gerokai sumažėti patalpos aukštis. Tai aktualu mažesnio gabarito pastatams bei tokiems tiltams, po kurių konstrukcijomis įrengti automobilių keliai ir yra tikimybė, jog pravažiuojančios aukštesnės transporto priemonės gali pažeisti konstrukciją. Todėl dažniausiai ši stiprinimo sistema taikoma pramoniniams, prekybiniais, sandėlio ar panašios paskirties pastatams, kurių patalpų aukštis neriboja stiprinimo sistemos įrengimo.

Stiprinimo lynais schemas pasirinkimo galimybę gali apriboti ir aplink esančios konstrukcijos arba atramos, todėl tai sumažina sistemos lankstumą bei efektyviausio stiprinimo varianto pasirinkimą [1].

Konstrukcijos išorėje įrengti stiprinimo lynai, kaip ir kitos lyninės konstrukcijos, yra jautresnės gaisro poveikiui, todėl turi būti tinkamai papildomai apsaugotos. Tačiau net ir gaisrui paveikus lynus, pačios konstrukcijos suirimo nuo gaisro tikimybė neišauga.

1.7. Literatūros analizės išvados

Dauguma atliktų konstrukcijų tyrimų apžvelgia daugiau eksperimentinę stiprinimo efektyvumo dalį. Tačiau tokiu atveju įmanoma įvertinti tik kelių stiprinimo sistemos parametrų įtaką konstrukcijai, o to dažnu atveju nepakanka, jog būtų išsirinktas optimaliausias stiprinimo būdas.

Todėl yra svarbu gerai teoriškai išanalizuoti stiprinamų konstrukcijų efektyvumą, maksimaliai panaudojant stiprinamų ir stiprinančių medžiagų savybes bei pasirenkant optimaliausius stiprinimo sistemos parametrus.

Tolimesnėje šio baigiamojo darbo dalyje bus analizuojamas plieninės sijos stiprinimo lynais būdas ir jo efektyvumas palyginamas su sijos stiprinimu prie profilio privirinant papildomus plieno lakštus.

2. SKAIČIAVIMO METODIKA

2.1. Tiriamasis objektas

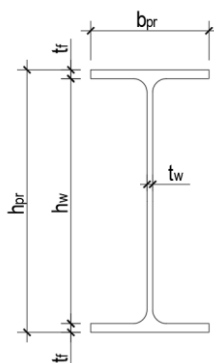
Šio tiriamojo darbo pagrindinis objektas – lenkiama plieninė dvitėjo profilio sija. Kadangi skaičiavimams buvo naudota keli skirtingi sijos skerspjūviai, jų charakteristikos apžvelgtos rezultatų skyriuje.

2.2. Stiprinimas lynų sistema

2.2.1. Pradiniai duomenys

Plieninės sijos ir stiprinimo lynais sistemos duomenys:

- skaičiavimams bei lyginimui pasirinkta naudoti karšto valcavimo dvitėjo profilio sijos, kurių ilgis tarp atramų $L = 6\text{ m}$;



12 pav. Dvitėjo profilio skerspjūvio matmenys

- atramoms, perduodančioms lyno įtempimo jėgas sijai, pasirinkta naudoti kampuočius;
- h_{atr} – atraminių stovų aukštis;
- L_{pl} – atstumas tarp atraminių stovų;
- a – atstumas nuo atraminio stovo iki sijos atramos taško;
- e – atstumas nuo sijos neutralios ašies iki lyno inkaravimo taško;
- stiprinimo lynams naudojami du (vienu iš skaičiavimo atveju – 4) simetriškai sijos abiejose pusėse įtempti lynai.

$P = P_{\max} \cdot 0,8$ – vieno lyno įtempimo jėga (ją gauname maksimalią pradinę įtempimo jėgą sumažinus 20 % dėl galimų lynų netikslumų);

$P_0 = P \cdot 2$ – bendra dviejų lynų įtempimo jėga (jei lynai 4, dauginame iš 4).

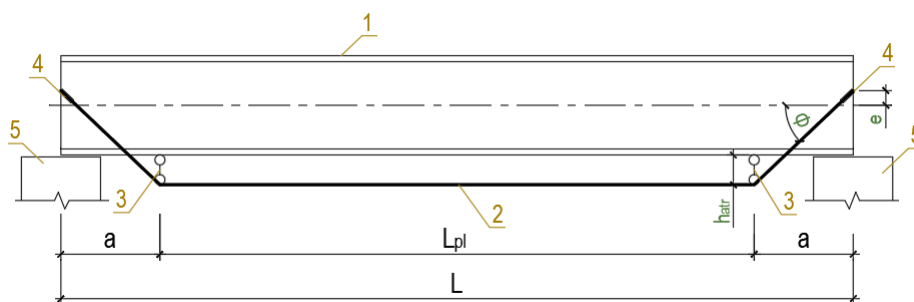
2.2.2. Skaičiuojamoji schema

Buvo sudaryta plieninio elemento, sustiprinto lynais, skaičiuojamoji schema (žr. 13 pav.), pagal kurią atliekami tolimesni skaičiavimai. Kaip pradinė pasirinkta trapecinė lynų atramų išdėstymo schema.

Stiprinant lynų sistema (laužytomis ašies templėmis), pasikeičia stiprinamo konstrukcinio elemento skaičiuojamoji schema: lenkiamas elementas tampa necentriškai gniuždomu [1].

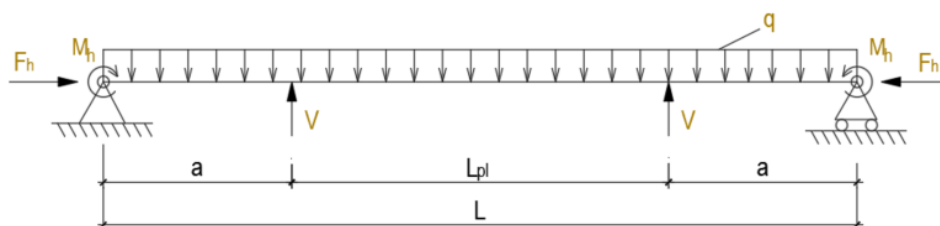
Lyno inkaravimo vietose sijos kraštuose, lyno įtempimo jėga yra perduodama sijai – atsiranda horizontali dedamoji jėga F_h . Jei lynai tvirtinami ne per skerspjūvio svorio centrą, atsiranda ekscentricitetas, kuris skaičiavimuose įvertinamas kaip papildomas momentas lyno inkaravimo vietose (šiuo atveju sijos atramose) (žr. 14 pav.).

Stiprinančiojo lyno įtempimo jėga sijai perduodama per šiam tikslui įrengtas atramas atstumu „a“ nuo sijos pagrindinių atramų. Šiose vietose atsiranda vertikali lyno dedamoji – jėga V , nukreipta į profilį (žr. 13 ir 14 pav.).



13 pav. Schematinis trapecinės stiprinimo lynais sistemos vaizdavimas: 1 – stiprinama sija, 2 – lynas, 3 – atraminiai stovai, 4 – inkaravimo (tvirtinimo) vieta, 5 – sijos atramos (pvz. g/b kolonos)

Norint kuo tiksliau įvertinti stiprinimo sistemos poveikį konstrukcijoms, pagal numatytas pradines apkrovas buvo suprojektuotas sijos skerspjūvis bei užtikrinta, jog jis tenkina visas stiprumo ir standumo sąlygas [1 priedas]. Imituojant realią situaciją buvo priimta, jog planuojama šias apkrovas didinti apie 40 %. Tokiu atveju suprojektuota plieninė sija nebetenkina reikalingų stiprumo bei standumo savybių ir jai priimtas taikyti stiprinimo lynais būdas.



14 pav. Sijos skaičiuojamoji schema

2.2.3. Apkrovos po padidėjimo

Priimama, jog užsiduotos pradinės nuolatinės apkrovos reikšmę numatoma didinti 40 %.

Perskaičiuojama sijai naujai tenkančios charakteristinė ir skaičiuotinė apkrovos:

$$p = (1,4 \cdot g_k + q_k) \cdot l_1 \quad (2.2.1)$$

$$p_d = (1,4 \cdot g_k \cdot \gamma_G + q_k \cdot \gamma_Q) \cdot l_1 \quad (2.2.2)$$

Sijos momentų skaičiuotinės ir charakteristinės reikšmės bei skersinė jėga atitinkamai skaičiuojami pagal (P.1.3), (P.1.4), (P.1.5) formules.

2.2.4. Stiprinimo lynais skaičiavimo metodika

Suprojektuota sija nebetenkina stiprumo ir įlinkio reikalavimų, todėl projektuojamas sijos stiprinimas lynų sistema.

Skaičiuojamas atstumas nuo lyno inkaravimo taško iki lyno žemiausio taško sijos viduryje:

$$h_e = h_{atr} + 0,5 \cdot h - e \quad (2.2.3)$$

Lyno posvyrio kampas:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h_e}{a}\right) \quad (2.2.4)$$

Skaičiuojamos jėgos, kurias įtemptas lynas perduoda konstrukcijai.

Vertikali lyno dedamoji:

$$V_0 = P_0 \cdot \sin \alpha \quad (2.2.5)$$

Horizontali lyno dedamoji:

$$H_0 = P_0 \cdot \cos \alpha \quad (2.2.6)$$

Momentas nuo vertikalių jėgų:

$$M_{V0} = V_0 \cdot a \quad (2.2.7)$$

Momentas nuo horizontalių jėgų dėl ekscentriciteto (priklausomai nuo lyno inkaravimo taško padėties):

$$M_{H0} = H_0 \cdot e \quad (2.2.8)$$

Suminis momentas, veikiantis konstrukciją:

$$M_{tot0} = M_{i\check{s}} - M_{V0} - M_{H0} \quad (2.2.9)$$

Skaičiuojant konstrukcijų įlinkius, formulėje naudojamas koeficientas, įvertinantis apkrovos sijai pobūdį, kuris apskaičiuojamas:

- išskirstytajai apkrovai: $k_{i\check{s}} = \frac{5}{48}$
- dviem vertikaliai sijai veikiančioms jėgoms: $k_V = 0,125 - \left(\frac{a}{L}\right)^2 / 6$
- Horizontalioms gniuždymo jėgoms: $k_H = 0,125$

Skaičiuojamas įlinkis nuo išorinės apkrovos:

$$f_{i\check{s}} = k_{i\check{s}} \cdot \frac{M_{i\check{s}}}{EI} \cdot L^2 \quad (2.2.10)$$

Įlinkis nuo vertikaliai veikiančių jėgų:

$$f_{V0} = k_V \cdot \frac{M_{V0}}{EI} \cdot L^2 \quad (2.2.11)$$

Įlinkis nuo horizontaliai veikiančių jėgų:

$$f_{H0} = k_H \cdot \frac{M_{H0}}{EI} \cdot L^2 \quad (2.2.12)$$

Suminis sijos įlinkis:

$$f_{toto} = f_{i\check{s}} - f_{V0} - f_{H0} \quad (2.2.13)$$

Kadangi konstrukcija, šiuo atveju sija, prieš stiprinimo sistemos įrengimą bei lynų įtempimą yra nukraunama, tai įrengus stiprinimą ir vėl sugrąžinus konstrukcijai tenkančią numatytą apkrovą, lynai patiria papildomas deformacijas.

Šių deformacijų pobūdis priklauso nuo to, kurioje stiprinamos sijos skerspjūvio vietoje yra lynų tvirtinimo (inkaravimo) taškas.

Sustiprintą konstrukciją vėl apkrovus jai numatyta apkrova, kraštiniai sijos taškai, esantys aukščiau profilio svorio centro, pasislenka sijos tarpatramio centro kryptimi, o esantys žemiau – į sijos išorę. Atitinkamai pasislenka ir lynų inkaravimo taškai, todėl jei stiprinimo sistemos inkaravimas įrengtas aukščiau svorio centro, lynų pradinė įtempimo jėga apkrovus konstrukciją sumažėja, jei žemiau – lynų deformacija tampa didesnė, todėl pradinė įtempimo jėga šiek tiek išauga. Šis prieaugis arba sumažėjimas turi būti įvertintas papildomais skaičiavimais.

Žinoma, ne visais atvejais konstrukcija prieš stiprinimą gali būti pilnai nukraunama. Kartais tai riboja virš jos esančios betoninės grindys, perdangos ar kiti elementai. Taip pat, siją išlieka veikiantis ir savasis svoris, todėl nukraunamos apkrovos dalis, priklausomai nuo situacijos, turi būti įvertinta kiekvienam nagrinėjamam atvejui atskirai. Tačiau sijos stiprinimo elementai efektyviausiai panaudojami tada, kai konstrukcija nukraunama ne mažiau kaip 60 % [1].

Skaičiuojamos sijos deformacijos ties lyno inkaravimo tašku.

Horizontalus poslinkis sijos krašte nuo išorinės apkrovos:

$$\begin{aligned}\Delta l_{i\check{s}} &= \frac{h}{2EI} \int_0^l \frac{q}{2} (lx - x^2) dx = \frac{qh}{4EI} \int_0^l (lx - x^2) dx = \frac{qh}{4EI} \left(\frac{lx^2}{2} - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_0^l = \\ &= \frac{qh}{4EI} \left(\frac{l^3}{2} - \frac{l^3}{3} \right) = \frac{q \cdot h \cdot l^3}{24 \cdot E \cdot I}\end{aligned}\quad (2.2.14)$$

Horizontalus poslinkis sijos krašte nuo vertikalios įtempimo jėgos dedamosios:

$$\begin{aligned}\Delta l_V &= \int_0^a \frac{V_0 x h}{2EI} dx + \int_a^{\frac{L}{2}-a} \frac{V_0 a h}{2EI} dx = \frac{V_0 h}{2EI} \cdot \frac{a^2}{2} + \frac{V_0 a h}{2EI} \left(\frac{L}{2} - a \right) = \\ &= \frac{V_0 h a^2}{4EI} + \frac{V_0 a h L}{4EI} - \frac{V_0 a^2 h}{2EI} = \frac{V_0 \cdot a \cdot h \cdot L}{4 \cdot E \cdot I} - \frac{V_0 \cdot a^2 \cdot h}{4 \cdot E \cdot I}\end{aligned}\quad (2.2.15)$$

Horizontalus poslinkis krašte nuo horizontalios įtempimo jėgos dedamosios:

$$\Delta l_H = \frac{M_{H0} \cdot h \cdot L}{2EI} \quad (2.2.16)$$

Poslinkis ties lyno inkaravimo tašku:

$$\Delta l = 2 \cdot e \cdot \frac{\Delta l_{i\check{s}}}{h} \quad (2.2.17)$$

Skaičiuojamos deformacijos, atsirandančios lyne apkrovus sustiprintą konstrukciją:

$$\Delta \varepsilon = \cos \alpha \cdot \frac{\Delta l}{L} \quad (2.2.18)$$

Lynų įtempimo jėgos prieaugis / sumažėjimas:

$$\Delta P = \Delta \varepsilon \cdot E \cdot A_s \quad (2.2.19)$$

Įtempimo jėga, įvertinus deformacijas:

$$P_{tot} = P_0 \pm \Delta P \quad (2.2.20)$$

Padidėjus lyno įtempimo jėgai tikriname ar ši neviršija lyno stiprumo jėgos ribos: $P_{tot} < P_{max}$. Jei gauname padidintą jėgą didesnę nei maksimali galima, tai toks stiprinimo variantas laikomas neleistinu.

Perskaičiuojamos konstrukciją veikiančios jėgos, momentai bei įlinkiai, įvertinus lynų įtempimo jėgų prieaugius.

Vertikali lyno dedamoji:

$$V_{tot} = P_{tot} \cdot \sin \alpha \quad (2.2.21)$$

Horizontali lyno dedamoji:

$$H_{tot} = P_{tot} \cdot \cos \alpha \quad (2.2.22)$$

Momentas nuo vertikalių jėgų:

$$M_V = V_{tot} \cdot a \quad (2.2.23)$$

Momentas nuo horizontalių jėgų dėl ekscentriciteto:

$$M_H = H_{tot} \cdot e \quad (2.2.24)$$

Suminis momentas, įvertinus lynų deformacijas:

$$M_{tot} = M_{iš} - M_V \pm M_H \quad (2.2.25)$$

Įlinkis nuo vertikalios veikiančios jėgos:

$$f_V = k_V \cdot \frac{M_V}{EI} \cdot L^2 \quad (2.2.26)$$

Įlinkis nuo horizontalios veikiančios jėgos:

$$f_H = k_H \cdot \frac{M_H}{EI} \cdot L^2 \quad (2.2.27)$$

Suminis sijos įlinkis:

$$f_{tot} = f_{iš} - f_V \pm f_H \quad (2.2.28)$$

2.2.5. Sustiprintos sijos pastovumo patikrinimas

Padidinus sustiprintos konstrukcijos apkrovas, turi būti atlieki papildomi skerspjūvio atsparumo tikrinimai. Jie atliekami analogiškai nestiprintai sijai, tačiau įvertinus parametrų pokyčius atsiradusius po stiprinimo.

Šiuo atveju siją veikia ne vien išorinis išskirstytas krūvis, tačiau ir nuo stiprinimo sistemos atsiradusios koncentruotos jėgos bei momentai.

Jeigu sijos sienelė yra sustiprinta sąstandomis, tada siją veikiančių skersinių jėgų poveikio galima nepaisyti. Jei jų nėra, turi būti tikrinama skersinių jėgų veikiamos sienelės laikomoji galia [16].

Tikrinama ar reikia tarpinių sąstandų.

Skaičiuotinė vietinė klumpamoji galia, kai veikia skersinės jėgos:

$$F_{Rd} = \frac{f_y \cdot L_{eff} \cdot t_w}{\gamma_{M1}} \quad (2.2.29)$$

Čia: L_{eff} – efektyvusis ilgis, kuris nustatomas:

$$L_{eff} = \chi_F \cdot l_y \quad (2.2.30)$$

Čia: l_y – apkrovos veikiamas efektyvusis ilgis, atitinkantis standžios atramos ilgį S_S ;

χ_F – vietinio klumpumo koeficientas, skaičiuojamas pagal formulę:

$$\chi_F = \frac{0,5}{\overline{\lambda}_F} \leq 1,0 \quad (2.2.31)$$

$$\overline{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y \cdot t_w \cdot f_y}{F_{cr}}} \quad (2.1.32)$$

$$F_{cr} = 0,9 \cdot k_F \cdot E \cdot \frac{t_w^3}{h_w} \quad (2.2.33)$$

Koeficientas k_F nustatomas pagal jėgų pridėjimo schemą [17]:

$$k_f = 6 + 2 \cdot \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \quad (2.2.34)$$

Efektyvusis apkrovos veikiamas ilgis l_y apskaičiuojamas tokia seka:

$$m_1 = \frac{b_f}{t_w} \quad (2.2.35)$$

$$m_2 = 0,02 \cdot \left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2, \text{ jei } \bar{\lambda}_F > 0,5 \quad (2.2.36)$$

$$m_2 = 0, \text{ jei } \bar{\lambda}_F \leq 0,5 \quad (2.2.37)$$

Kadangi jėgų pridėjimo schema „a“, tai l_y skaičiuojamas pagal formulę:

$$l_y = S_s + 2 \cdot t_f \cdot (1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \leq a \quad (2.2.38)$$

Atliekamas patikrinimas:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1,0 \quad (2.2.39)$$

Jei sąlyga netenkinama, siją veikiančių vertikalių jėgų vietose įrengiamos sąstandos.

Literatūros šaltiniuose aprašytų eksperimentinių tyrimų duomenimis [13], dažniausia sijų laikomosios galios netekimo priežastimi stiprinant armatūros strypais, tampa skersinis – sukamasis sijos klupimas. Atliekami jo patikrinimai stiprinamai konstrukcijai.

Skaičiuojamas momentų pasiskirstymo įtakos koeficientas:

$$\alpha_m = \frac{1,75 \cdot M_{max}}{\sqrt{(M_2^2 + M_3^2 + M_4^2)}} \leq 2,5 \quad (2.2.40)$$

Čia: M_2, M_4 – elemento ketvirčiuose lenkiamieji momentai;

M_3 – elemento vidurio lenkiamasis momentas.

Tamprusis klupamasis lenkimo momentas:

$$M_{zx} = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l_{eff}}\right) \cdot \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{l_{eff}}\right)} \quad (2.2.41)$$

Čia: I_t – skerspjūvio sukimo inercijos momentas:

$$I_t = 0,43 \cdot (2 \cdot b_f \cdot t_f^3 + h_w \cdot t_w^3) \quad (2.2.42)$$

I_w – skerspjūvio sektorinis inercijos momentas:

$$I_w = \frac{h_f^2 \cdot b_f^3 \cdot t_f}{24} \quad (2.2.43)$$

Kritinis lenkiamasis momentas:

$$M_{cr} = \alpha_m \cdot M_{zx} \quad (2.2.44)$$

Jei skerspjūvis 1 klasės, tai priimama, kad $W_y = W_{pl}$.

Sąlyginis liaunis:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (2.2.45)$$

Skersinio – sukamojo klupumo koeficientas:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (2.2.46)$$

Jei $\chi_{LT} > 1$, tai priimame $\chi_{LT} = 1,0$.

Čia: ϕ_{LT} – rodiklis klupumo koeficientui nustatyti:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (2.2.47)$$

Čia: α_{LT} – nuokrypos koeficientas, priklausantis nuo klupumo kreivės [17].

Lenkiamosios klupamosios galios skaičiuotinė reikšmė:

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.2.48)$$

Čia: $\gamma_{M1} = 1,0$ – rekomenduotina dalinio koeficiento reikšmė pagal normas [17].

Atliekamas patikrinimas, ar sija išlaikys skersinį sukamąjį klupdymą:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad (2.2.49)$$

Dažnu atveju sijoje būna reikalingos tarpinės sąstandos. Tokiu atveju tikrinamos sijos su tarpinėmis sąstandomis šlyjamasis klupamasis atsparis.

Skaičiuotinė sienelių šlyjamoji galia:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \quad (2.2.50)$$

Čia: $V_{bw,Rd}, V_{bf,Rd}$ – sienelės ir juostos galia.

Skaičiuojamas sienelės indėlis.

Liaunio parametras:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 \cdot t_w \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}} \quad (2.2.51)$$

Čia: k_τ – šlyjamojo klupumo koeficientas.

Inercijos momentas išilginei sąstandai:

$$I_{sl} = \frac{t_f \cdot b_f^3}{12} + \frac{15 \cdot \varepsilon \cdot t_w \cdot t_w^3}{12} \quad (2.2.52)$$

Koeficientas:

$$k_{\tau sl} = 9 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 \cdot \sqrt[4]{\left(\frac{I_{sl}}{t_w^3 \cdot h_w}\right)^3} \geq \frac{2,1}{t_w} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}} \quad (2.2.53)$$

Skačiuojamas šlyjamojo klupumo koeficientas:

$$k_{\tau} = 5,34 + 4 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}, \text{ kai } \frac{a}{h_w} \geq 1 \quad (2.2.54)$$

$$k_{\tau} = 4 + 5,34 \cdot \left(\frac{h_w}{a}\right)^2 + k_{\tau sl}, \text{ kai } \frac{a}{h_w} < 1 \quad (2.2.55)$$

Sienelės įtaka:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_y \cdot h_w \cdot t_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} \quad (2.2.56)$$

Skačiuojamas juostos indėlis.

Tik iš juostų sudaryto skerspjuvio laikomoji galia:

$$M_{f,Rd} = \frac{W_f \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.2.57)$$

Atsparumo momentas:

$$W_f = \frac{2 \cdot I_f}{h} \quad (2.2.58)$$

Inercijos momentas:

$$I_f = 2 \cdot \left(\frac{b_f \cdot t_f^3}{12} + b_f \cdot t_f \cdot \left(\frac{h_f}{2}\right)^2 \right) \quad (2.2.59)$$

Koeficientas:

$$c = a \cdot \left(0,25 + \frac{1,6 \cdot b_f \cdot t_f^2}{t \cdot h_w^2} \right) \quad (2.2.60)$$

Kai $M_{Ed} < M_{f,Rd}$, tai juostų indėlis šlyjamajai galiai skaičiuojamas taip:

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f \cdot t_f^2 \cdot f_y}{c \cdot \gamma_{M1}} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right) \quad (2.2.61)$$

Tikrinama, ar šlyjamoji klupamoji galia atitinka sąlygą:

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1.0, \text{ jei galioja sąlyga } \frac{h_w}{t_w} > \frac{31}{\eta} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau} \quad (2.2.62)$$

Kadangi lynų sistema sustiprintas konstrukcinis elementas tampa ne vien lenkiamu, bet ir ekscentriškai gniuždomu, turi būti skaičiuojamas sijos skerspjuvio atsparumas kai ją veikia kombinuota ašinė jėga bei lenkimo momentas. Jei išpildomos toliau pateiktos sąlygos, ašinės jėgos poveikis gali būti nepaisomas.

$$N_{Ed} \leq 0.25 N_{pl,Rd} \quad (2.2.63)$$

$$N_{Ed} \leq \frac{0.5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.2.64)$$

Tikrinama sijos klupamoji galia pagal tokias sąlygas:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.2.65)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.2.66)$$

Nesant lenkimo mažojoje ašyje, kai $M_{z,Ed} = 0$, $\Delta M_{y,Ed} = 0$, $\Delta M_{z,Ed} = 0$, šios išraiškos sumažėja iki:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.2.67)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (2.2.68)$$

Čia: $N_{Rk} = f_y \cdot A$ – charakteristinė gniuždomoji galia;

$M_{y,Rk} = f_y \cdot W_{pl,y}$ – charakteristinė lenkiamoji galia apie y–y ašį [16].

Skaičiavimams pasirenkamas 2 – asis metodas [16].

Tamprioji kritinė jėga:

$$N_{y,cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{y,cr}^2} \quad (2.2.69)$$

$$N_{z,cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{z,cr}^2} \quad (2.2.70)$$

Čia: $L_{y,cr} = \mu_y \cdot L$ – ašies y-y atžvilgiu klupamasis ilgis;

$L_{z,cr} = \mu_z \cdot L$ – ašies z-z atžvilgiu klupamasis ilgis;

$\mu_z = 1,0$, $\mu_y = 2,0$ – skaičiuojamojo ilgio koeficientai

Skaičiuojami sąlyginiai liauniai:

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{y,cr}}} \quad (2.2.71)$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{z,cr}}} \quad (2.2.72)$$

Skaičiuojami rodikliai klupumo koeficientams nustatyti:

$$\phi_y = 0,5(1 + \alpha_y(\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2) \quad (2.2.73)$$

$$\phi_z = 0,5(1 + \alpha_z(\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2) \quad (2.2.74)$$

Čia: α_y ir α_z – nuokrypos koeficientai, gaunami pagal santykį h/b bei t_f reikšmę, pagal klupumo kreivę [17].

Skaičiuojami lenkiamojo klupumo koeficientai χ_y ir χ_z :

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} \quad (2.2.75)$$

$$\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \quad (2.2.76)$$

Skaičiuojamas tamprusis klupamasis lenkimo momentas:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_T}{\pi^2 EI_z}} \quad (2.2.77)$$

Čia: C_1 – momentų pasiskirstymo tikslinamasis koeficientas [18].

Sąlyginis liaunis:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} \quad (2.2.78)$$

Skaičiuojamas koeficientas:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (2.2.79)$$

Skersinio–sukamojo klupumo koeficientas:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (2.2.80)$$

Skaičiuojami sąveikos koeficientai, kai sijos profilis 1 arba 2 klasės [17]:

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq C_{my} \cdot \left(1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (2.2.81)$$

$$k_{zy} = \left(1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \geq \left(1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (2.2.82)$$

Čia: $C_y = C_{mLT} = 0,6 + 0,4\Psi$ – lyginamasis tolygiojo momento koeficientas apie y–y ašį [EN 1993-1-1:2005 B.3 lentelė];

$\Psi = 0$.

Pagal (2.2.67) ir (2.2.68) formules tikrinamos klupumo sąlygos.

Analogiški skaičiavimai bei patikrinimai atliekami tai pačiai sijai, keičiant įvairius parametrus (atramos aukštį, lynų skerspjuvį ir kt.) bei fiksuojant jų įtaką plieninės konstrukcijos momentų bei įlinkių reikšmėms.

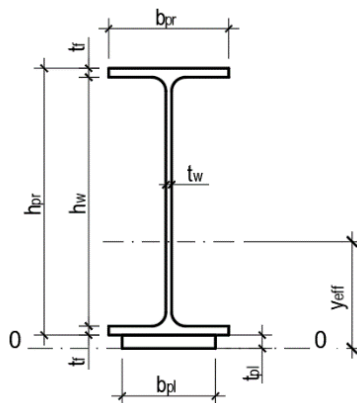
Tokiu pačiu būdu skaičiuojamas ir kitas (išorinis) lynų sistemos variantas, kai lynai tvirtinami ne prie profilio sienutės, o prie apatinės juostos apačios. Šiuo atveju keičiasi tik atstumas „a“ bei lynų posvyrio kampas.

Visi gauti rezultatai ir priklausomybės aptariami rezultatų skyriuje.

2.3. Stiprinimas plieno lakštais (plokštelėmis)

2.3.1. Pradiniai duomenys

Kaip alternatyva stiprinimo lynų sistema būdai, norint palyginti stiprinimo efektyvumą bei ekonominę naudą, skaičiuojama plieninė sija, sustiprinta privirinant papildomą plieno lakštą prie pasirinkto skerspjūvio profilio apatinės lentynos. Lyginti būtent šį būdą pasirinkta dėl gana paprasto jo įrengimo bei medžiagų ekonomiško.



15 pav. Dvitėjo profilio, sustiprinto plokšte, pagrindiniai skerspjūvio matmenys

2.3.2. Skaičiavimai

Skaičiuojamas efektyvusis skerspjūvio plotas įvertinant prie sijos apatinės lentynos privirtos papildomos plokštelės plotą:

$$A_{eff} = A_{pr} + \alpha \cdot A_{pl} \quad (2.3.1)$$

Čia: $\alpha = \frac{E_{pl}}{E_{pr}}$, kai abiejų jungiamųjų elementų medžiaga vienoda, tai $\alpha = 1$;

A_{pr} – dvitėjo profilio skerspjūvio plotas;

A_{pl} – plokštelės skerspjūvio plotas.

Statinis momentas apie 0 – 0 ašį:

$$S_{eff} = A_{pr} \cdot \left(\frac{h_{pr}}{2} + t_{pl} \right) + \alpha \cdot A_{pl} \cdot t_{pl} \cdot \frac{1}{2} \quad (2.3.2)$$

Atstumas nuo sijos neutralios ašies iki elemento krašto:

$$y_{eff} = \frac{S_{eff}}{A_{eff}} \quad (2.3.3)$$

Sijos efektyvusis inercijos momentas:

$$I_{eff} = I_{pr} + A_{pr} \cdot \left(y_{eff} - t_{pl} - \frac{h_{pr}}{2} \right)^2 + b_{pl} \cdot \frac{t_{pl}^3}{12} + \alpha \cdot A_{pl} \cdot \left(y_{eff} - \frac{t_{pl}}{2} \right)^2 \quad (2.3.4)$$

Skaičiuojamas atsparumo momentas profilio viršutinio krašto atžvilgiu:

$$W_{eff}^t = \frac{I_{eff}}{(h_{pr} + t_{pl} - y_{eff})} \quad (2.3.5)$$

Atsparumo momentas sijos apačios atžvilgiu:

$$W_{eff}^b = \frac{I_{eff}}{y_{eff}} \quad (2.3.6)$$

Įtempiai sijos viršutinėje dalyje:

$$\sigma_{pl}^b = \frac{M \cdot (y_{eff} - t_{pl})}{I_{eff}} \quad (2.3.7)$$

Įtempiai sijos apatiniame krašte:

$$\sigma_{pl}^t = \frac{M}{W_{eff}^t} \quad (2.3.8)$$

Bendras sijos įlinkis ją sustiprinus plieniniu lakštu apatinėje skerspjūvio dalyje:

$$f_{pl} = \frac{M \cdot L^2 \cdot k_{iš}}{E \cdot I_{eff}} \quad (2.3.9)$$

2.3.3. Stiprumo patikrinimai

Sustiprintos papildoma plokštele sijos laikomoji galia ir pastovumas tikrinama kaip vientisojo skerspjūvio [1]. Skaičiuojamas skerspjūvio viršutinės bei apatinės dalies atsparumas lenkimui:

$$M_{cRd}^t = \frac{W_{eff}^t \cdot f_y}{\gamma_{mo}} \quad (2.3.10)$$

$$M_{cRd}^b = \frac{W_{eff}^b \cdot f_y}{\gamma_{mo}} \quad (2.3.11)$$

Tikrinama, ar skaičiuotinės lenkiamojo momento reikšmės atitinka nelygybes:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}^t} < 1,0 \quad (2.3.12)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{cRd}^b} < 1,0 \quad (2.3.13)$$

Skaičiuojama plastinė šlyjamoji skaičiuotinė galia:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (2.3.14)$$

$$A_v = A - 2 \cdot b_f \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f - A_{pl} \quad (2.3.15)$$

Šlyties jėga kiekviename sijos pjūvyje turi atitikti nelygybę:

$$\frac{V_{Ed0}}{V_{c,Rd}} < 1,0 \quad (2.3.16)$$

Kiti sijos patikrinimai atliekami pagal 1 priede pateiktą sijos skerspjūvio tikrinimo metodiką.

3. TYRIMO REZULTATAI

3.1. Stiprinimo lynais tyrimo rezultatai

3.1.1. Duomenys bei apribojimai skaičiavimams stiprinant lynais

Skaičiavimai buvo atliekami keičiant skirtingus plieninės sijos bei stiprinimo sistemos parametrus.

Tai buvo atliekama programos „MATLAB“ bei „Excel“ pagalba.

Keičiami šie parametrai:

- lynų įtempimo jėga (tuo pačiu ir lynų skerspjūvis);
- lynų atraminių stovų aukštis;
- lynų tvirtinimo pozicija sijos neutralios ašies atžvilgiu (ekscentricitetas);
- atstumas „a“ nuo plieninės sijos atramos iki lyno atraminio stovo;
- plieninės sijos profilio tipas;
- lynų tvirtinimo schema.

Įtempiamiems lynams pasirinkta naudoti trijų skirtingų skerspjūvių Y 1860S klasės 7 vijų lynus, kurių pagrindinės charakteristikos pateiktos 3.1 lentelėje. Jų duomenys imami iš lynų sortimento [19]. Skaičiuojant pradinę lynų įtempimo jėga priimama kaip 80 % minimalios lyno trūkimo jėgos.

3 lentelė. Lynų charakteristikos [19]

Lynų tipas	Lyno Ø, mm	Metalo plotas, mm ²	Minimali trūkimo riba, kN	Minimalus krūvis, kN	Minimalus pratempimas, %	Svoris, kg/100 m
Y1860S	11,3	75	139	122	3,5	59
	12,9	100	186	163	3,5	79
	15,7	150	265	233	3,5	118

Lynų atramų į stiprinamą profilį aukštis h_{atr} buvo keičiamas nuo 0,1 m iki 0,3 m imant žingsnį 0,05 m. Jiems priimta naudoti kampuočius.

Lynų inkaravimo taško padėtis keičiama priklausomai nuo profilio tipo. Priimama, jog stiprinančiojo lyno minimalus atstumas nuo jo inkaravimo taško iki dvitėjo skerspjūvio profilio lentynų išorės krašto – 0,08 m. Šiuo atstumų apribojimu pirmiausia įvertinamas likutinis atstumas lyno inkaravimui įrengti. Taip pat, įrengiant lyno inkaravimą arčiau profilio apačios, padidiname lynų įtempimo kampą ir tuo pačiu reikalingos profilyje skylės lynams prakišti matmenis, todėl tai

tampa mažiau efektyvu. Galiausiai, po sijos atraminiais taškais turi būti įvertinta esamos kolonos padėtis ir dėl jos geometrinių rodiklių dažniausiai būna neįmanoma lyno inkaruoti prie pat sijos profilio apatinės lentynos.

Minimalus atstumas „a“ tarp atraminio stovo ir sijos atramos priimtas 0,5 m. Esant mažesniai atstumui stiprinimo lynas, priklausomai nuo atramos po sija tipo, galimai kirstų atramą. Šis atstumas keičiamas nuo 1 m iki 3 m, priimant žingsnį 0,5 m.

Skaičiavimams priimta naudoti keleto skirtingų skerspjūvių profilius, kurių techninės charakteristikos pateiktos 3.2 lentelėje.

4 lentelė. Sijos skerspjūviai ir jų pagrindinės charakteristikos [20]

Žymėjimas	Standartas	Plieno markė	Matmenys					Skerspjūvio plotas
			h	b	s	t	r	A, cm ²
			mm					
IPE 400	EN 10025	S355J2	400	180	8,6	13,5	21	84,46
IPE 500	EN 10025	S355J2	500	200	10,2	16,0	21	115,50
HEB 400	EN 10025	S355J2	400	300	13,5	24	27	197,80

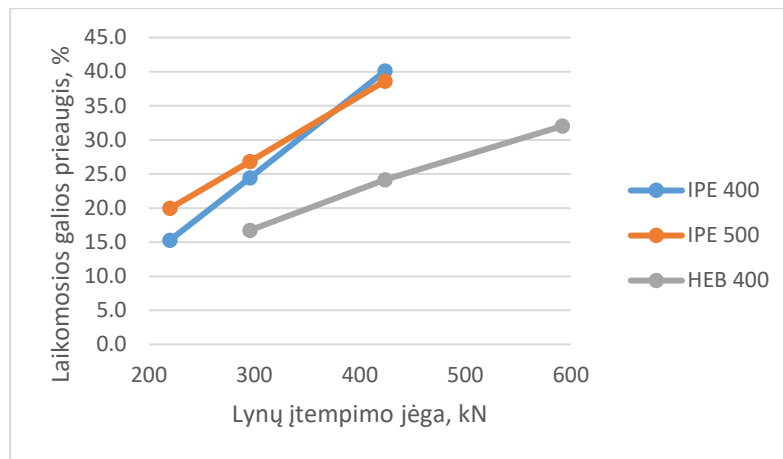
Kiekvienam sijos pradiniam skerspjūviui bei jau stiprintos sistemos variantui buvo atliekami pagal normas [17] numatyti standumo bei stiprumo patikrinimai. Neatitinkantys šių reikalavimų variantai buvo atitinkamai pažymėti rezultatų lentelėse [2 priedas].

Išorinės apkrovos priimtos pagal sijos skerspjūvio profilio tipą: kuo didesnis profilis, tuo jis veikiamas didesne išorine išskirstyta apkrova.

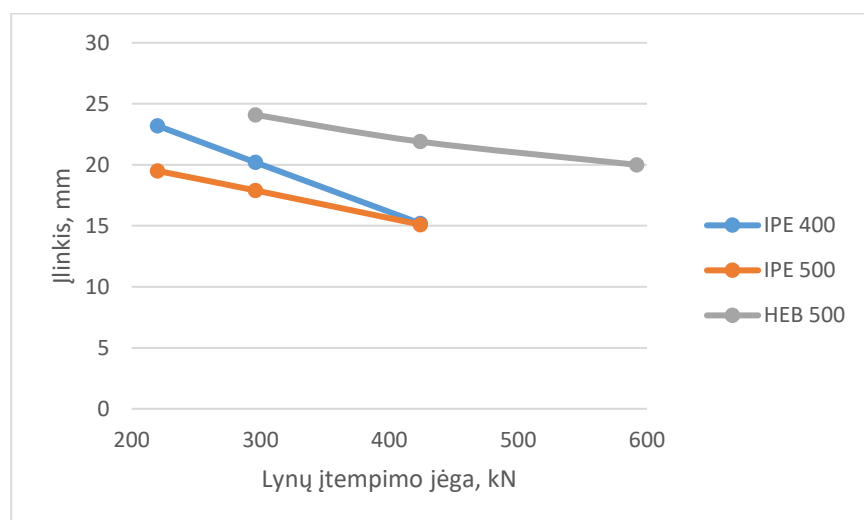
Plieninės sijos laikomosios galios bei įlinkio skaičiavimų rezultatai priimant skirtingus stiprinimo sistemos parametrus pateikti 2 priedo lentelėse.

3.1.2. Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos

Sijos lenkiamosios galios prieaugio reikšmė gaunama lyginant pradinio nestiprinto profilio skerspjūvio laikomąją galia su jau sustiprintos konstrukcijos laikomąją galia. Lyginimui priimti optimaliausi sustiprintos sijos variantai kiekvienai lyno įtempimo reikšmei užsiduotų parametru ribose.



16 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos



17 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo lyno įtempimo jėgos

Iš grafiko (žr. 16 pav.) matome, jog lynų įtempimo jėgų įtaka konstrukcijos stiprumui išsidėsčiusi beveik tiesine priklausomybe. Didėjant profilio tipui, laikomosios galios prieaugis kinta lėčiau, tai parodo kreivių posvyris. IPE 400 profiliui įtempimo jėgai didėjant kas 50 kN, laikomoji sijos galia išauga apie 6 %. IPE 500 profiliui – apie 4,5 % – 5 %. HEB 400 profiliui – apie 2,5 %.

Sijos įlinkis atitinkamai didėjant jėgai sumažėja IPE 400 profilio sijai – 5,9 % – 6,5 %, IPE 500 – apie 4 %, o HEB 400 – apie 2,4 % (žr. 17 pav.).

Tačiau pastebėta, jog IPE 400 profilio sijos stiprinimui naudojant 11,3 mm skersmens, 220 kN jėga įtemptus lynus, net ir parinkus optimaliausius sistemos parametrus, sijos lenkiamoji galia tiriamiesiems profiliams visais atvejais yra per maža, jog atlaikytų padidėjusį išorinį momentą. Priimama, jog šiam skerspjūvio tipui minimali dviejų lynų įtempimo jėga 290 kN (naudojant su simetriškai įtemptus lynus).

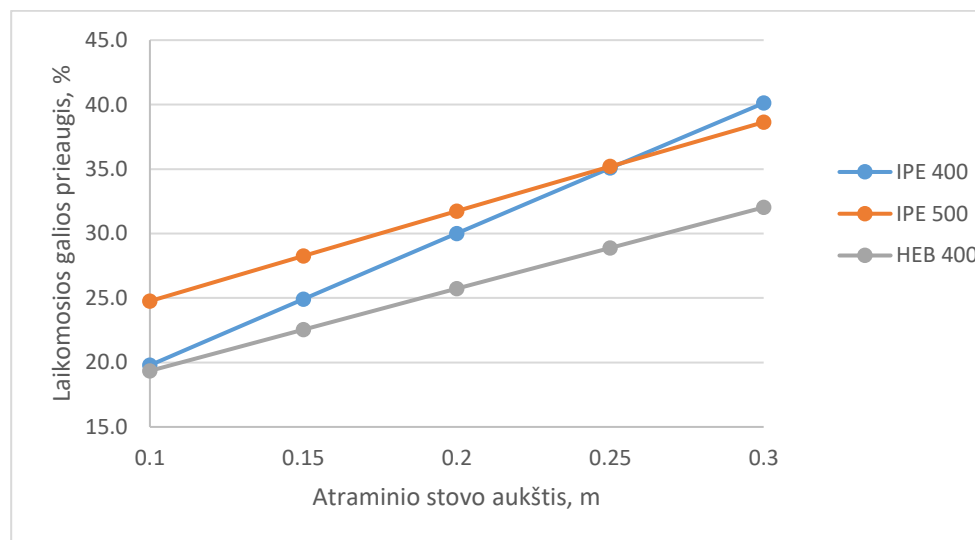
Dėl tos pačios priežasties, IPE 500 bei HEB 400 tipo profiliams minimalus įtempimas parenkamas lygiam 424 kN.

HEB 400 profiliui naudojant maksimalaus stiprumo du simetriškai sijos abiejose pusėse įtemptus strypus, sijos laikomoji galia daugumoje atveju gaunama mažesnė nei išorinė veikianti jėga. Dėl šios priežasties bei įvertinus faktą, jog HEB profilių lentynos plotis yra sąlyginai didelis, jai stiprinti priimta naudoti po du 12,9 mm skersmens strypus, įtemptus abiejose sijos pusėse. Šiuo atveju bendroji visų strypų įtempimo jėga priimama 592 kN (žr. 16, 17 pav.)

3.1.3. Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lynų atraminių stovų aukščio

Skačiuojami sijos lenkimo momento bei įlinkio pokyčiai keičiant tik atraminių stovų aukštį kaip priimta nuo 0,1 m iki 0,3 m.

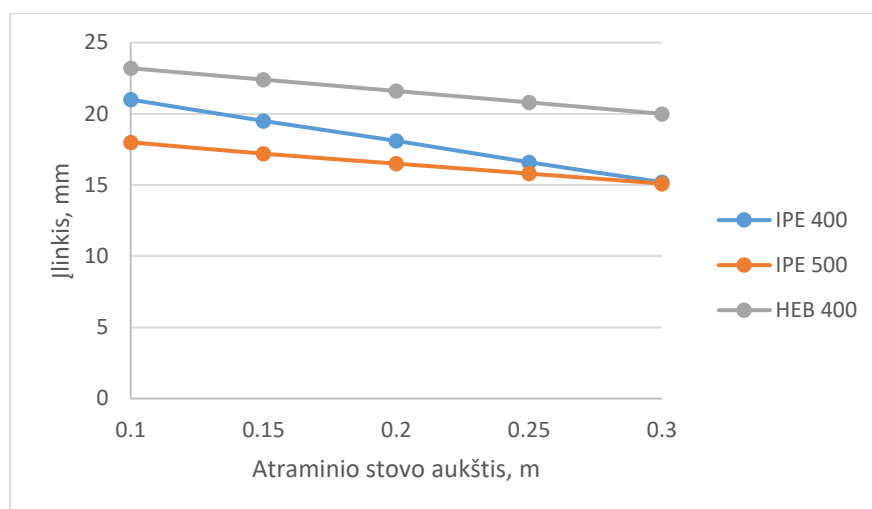
Didinant atraminių stovų aukštį, didėja ir lynų įtempimo kampas, o tai turi įtakos lyno perduodamų jėgų sijai reikšmėms, kurios savo ruožtu taip pat išauga, taip padidindamos sijos laikomosios galios reikšmę bei sumažindamos konstrukcijos įlinkį.



18 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo atraminio stovo aukščio

Didinant atraminio stovo aukštį kas 0,05 m, IPE 400 sijos profilio laikomoji galia didėja tiesine priklausomybe po 5 %, IPE 500 sijai – didėja po 3,5 %, o profilio HEB 400 sijos laikomoji galia didėja po 3,2 % (žr. 18 pav.).

Optimaliausiais nagrinėjamais atvejais IPE 400 profilio sijai gautas ~20,3 % laikomosios galios skirtumas tarp užsiduotų ribinių lynų atramų aukščių (tarp 0,1 m ir 0,3 m). IPE 500 sijai – 14 %, o HEB 400 profilio tipo sijai – 12,5 %.



19 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo atraminio stovo aukščio

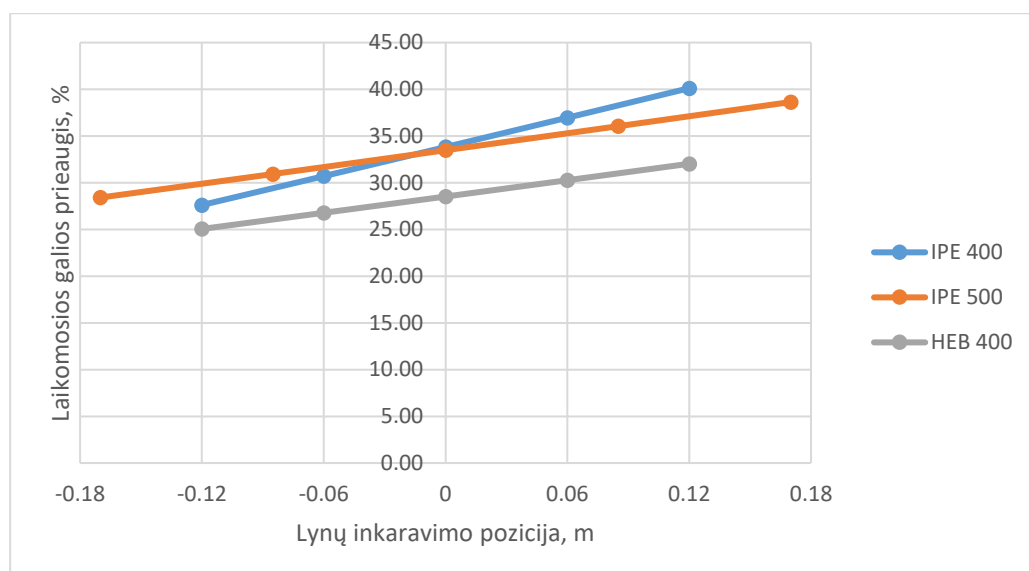
Iš grafiko (žr. 19 pav.) matoma, jog atraminio stovo aukštį didinant po 0,05 m, stiprinamų sijų įlinkio reikšmės mažėja taip pat tiesinėmis priklausomybėmis. IPE 400 profilio sijai, įlinkis mažėja po 4,5 % kiekvienam aukščio intervalui, IPE 500 sijai – 3 %, o HEB 400 sijai – 2,7 %. Didžiausi įlinkių skirtumai tarp 0,1 m ir 0,3 m aukščio atraminių stovų atitinkamai kiekvieno profilio sijai gauti 18,3 %, 12 % ir 11 %.

3.1.4. Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lynų inkaravimo pozicijos

Įtvirtinant įtempiamus lynus arčiau profilio viršutinės dalies padidinamas lyno posvyrio kampas, tuo pačiu padidėja ir lyno vertikalios dedamosios, kurių jėgos per tam įrengtas atramas (profilus arba plokšteles) yra perduodamos tiesiogiai stiprinamajam profiliui. Tačiau tokiu būdu nuo horizontaliųjų lyno dedamųjų atsiradęs ekscentricitetas sukelia momentą, kurio kryptis sutampa su apkrovimo veikiamomis jėgomis ir taip yra padidinamas išorinis siją veikiantis neigiamas momentas.

Be to, nukrovus konstrukciją, ją sustiprinus bei vėl grąžinus numatytas padidintas apkrovas, dėl inkaravimo taškų poslinkio (jei lynai tvirtinami viršutinėje dalyje) sumažėja lyno įtempimo jėga.

Grafikuose (žr. 20 ir 21 pav.) lynų ekscentriciteto neigiamos reikšmės – tai atstumai nuo lyno inkaravimo taško atstumas iki profilio svorio centro ašies kai tvirtinama aukščiau svorio centro, o reikšmės su pliuso ženklu – kai tvirtinama žemiau svorio centro ašies.

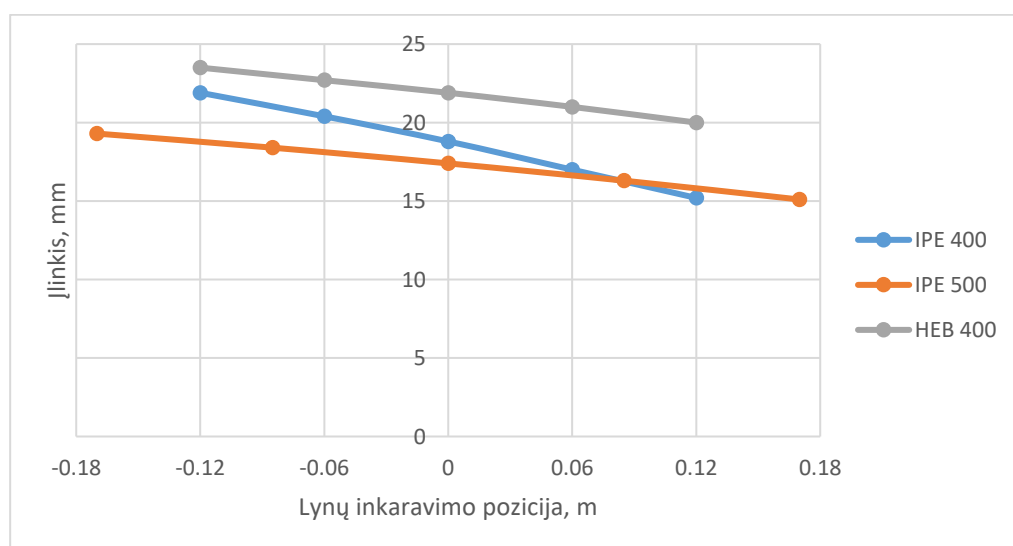


20 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo lynų inkaravimo pozicijos svorio centro atžvilgiu

Gauti rezultatai parodo, jog visų sijų laikomoji galia didėja lyno inkaravimo taškui leidžiantis link sijos apatinės juostos.

IPE 400 profilio sijai inkaravimo taško atstumui keičiantis kas 0,06 m, sijos laikomoji galia padidėja po 3,1 %, HEB 400 sijos laikomoji galia didėja po 1,7 %. Profilio IPE 500 sijos atstumui keičiantis kas 0,085 m, laikomosios galios reikšmės didėja kas 2,6 %.

IPE 400 profilio sijai gautas apie 12,5 % laikomosios galios skirtumas tarp nagrinėjamų kraštinių lyno inkaravimo taškų pasirinkimo, IPE 500 sijai – 10,2 %, HEB 400 apie 7 %.



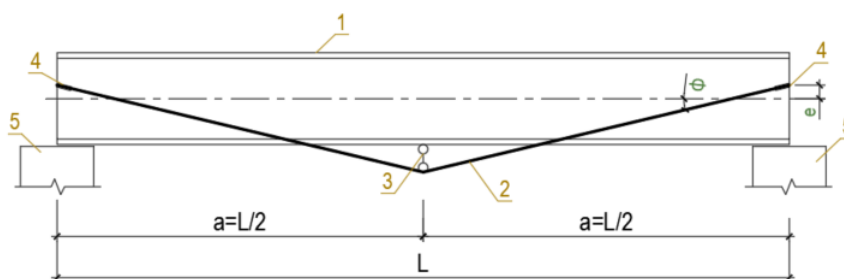
21 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo lynų inkaravimo pozicijos svorio centro atžvilgiu

Stiprinamos konstrukcijos įlinkis (žr. 21 pav.) lyno inkaravimo tašką leidžiant kas 0,06 m nuo aukščiausio tvirtinimo taško IPE 400 sijai mažėja po 5–5,6 %, sijai HEB 400 – po 3–3,8 %. IPE 500 profilio sijos inkaravimo atstumams kintant kas 0,085 m, jos įlinkis mažėja apie 4,2–5 %.

Didžiausias įlinkių skirtumas tarp kraštinių lyno inkaravimo taškų gautas apie 21,4 % IPE 400 sijai, apie 17 % IPE 500 sijai bei 12 % HEB 400 sijai.

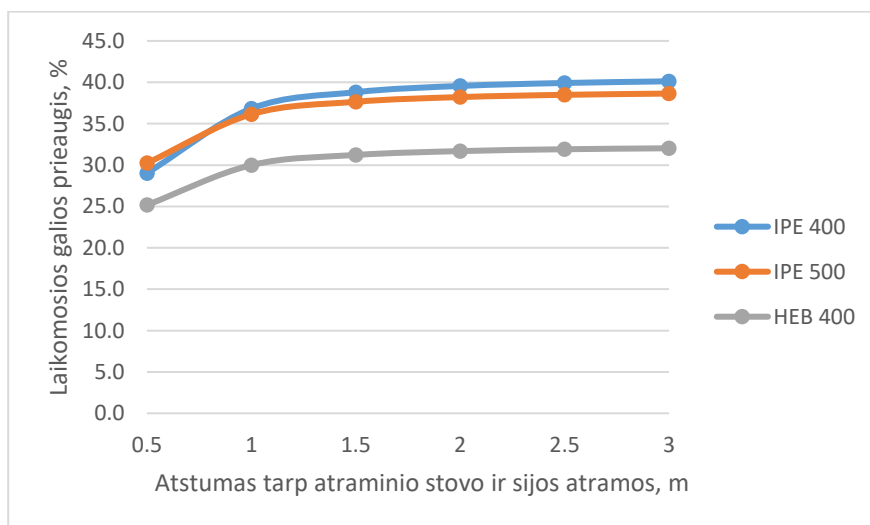
3.1.5. Laikomosios galios ir įlinkio priklausomybė nuo lyno atramos taško pozicijos

Kintant lyno atramos taško atstumui (žr. 13 pav., dydis „a“) iki pagrindinės sijos atramos, taip pat kaip ir kintant inkaravimo taško padėčiai bei atraminių stovų aukščiui, keičiasi lynų posvyrio kampas. Tai turi įtakos lynų perduodamų jėgų profiliui dydžiams. Tačiau kadangi nustatyta, jog efektyviausia yra lyną tvirtinti kuo arčiau apatinės profilio dalies, gerokai sumažėja lynų posvyrio kampas ir atstumas nuo sijos pagrindinės atramos iki lyno atraminio stovo turi mažiau įtakos sijos stiprumo bei standumo parametrams.



22 pav. Schematinis trikampės stiprinimo lynais sistemos vaizdavimas (žymėjimus žr. 13 pav.)

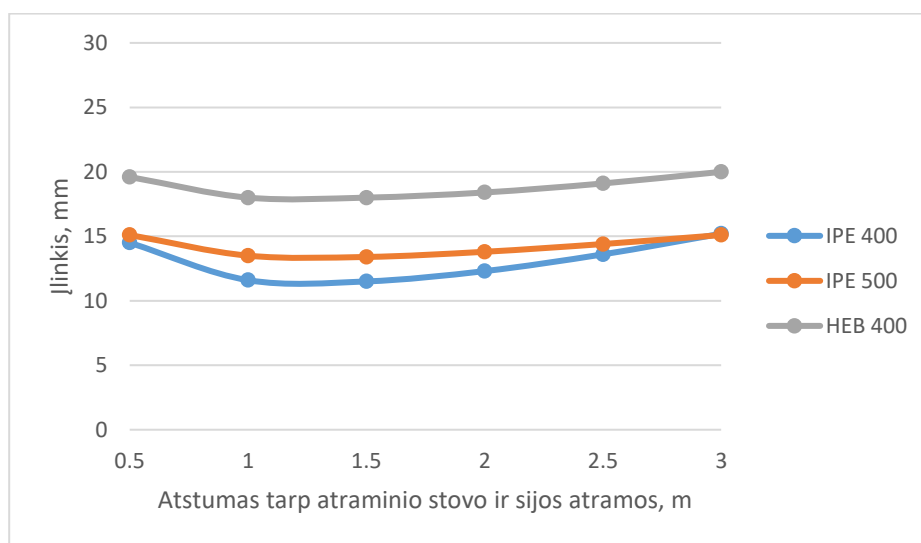
Priimta, jog atstumas tarp atramos ir atraminio stovo gali būti ir 3 m, šiuo atveju pasikeičia ir sijos stiprinimo schema, kadangi du atraminiai stovai pakeičiami vienu (žr. 22 pav.). Skaičiavimai išlieka identiški ir tokios stiprinimo schemas rezultatai įtraukiami į bendrą palyginimą.



23 pav. Sijos laikomosios galios prieaugio priklausomybė nuo lyno atramos taško pozicijos

Iš 22 paveikslo matyti, jog atstumui „a“ didėjant nuo 0,5 m iki 1 m, sijos laikomoji galia auga: IPE 400 profilio sijai apie 7,8 %, IPE 500 sijai – 6 %, o HEB 400 profiliui apie 5 %. Atstumui pasikeitus nuo 1 m iki 1,5 m, laikomoji galia pradeda augti lėčiau, IPE 400 sijai išauga apie dar apie 2 %, tačiau toliau didinant šį atstumą kas 0,5 m, kreivė beveik išsitiesina bei pokytis artėja link 0 %. Identiškai kinta ir sijų IPE 500 ir HEB 400 laikomoji galia.

Naudojant optimaliausius sijos pasirinktus parametrus, laikomoji galia, lyginant atstumo „a“ reikšmes tarp 0,5 m ir 3 m, IPE 400 profilio sijai padidėjo 11,1 %, IPE 500 – 8,4 %, HEB 500 – 6,9 %. Galime daryti išvadą, jog šio parametro keitimas arčiau stiprinamos sijos atramos dar turi įtakos sijos stiprumui, tačiau artėjant link profilio centro jis įtakos beveik nebedaro.



24 pav. Sijos įlinkio sumažėjimo priklausomybė nuo lyno atramos taško pozicijos

Kaip matyti iš 23 paveikslo, lyno atramos taško pozicija sijos įlinkiui turi šiek tiek kitokią priklausomybę. Atstumui „a“ pakitus nuo 0,5 iki 1 m, sijos įlinkis mažėja, tačiau atramoms toliau artėjant sijos centro link, įlinkio reikšmės vėl pradeda augti. IPE 400 sijai pradinis sijos įlinkio sumažėjimas fiksuojamas apie 9 %, IPE 500 sijai – 6,6 %, o HEB 400 profiliui apie 5,5 %.

Lyno atramos reikšmei atsidūrus maksimalioje padėtyje (sijos centre), įlinkis fiksuojamas beveik toks pats ar neženkliai besiskiriantis nuo įlinkio kai atrama tvirtinama 0,5 m nuo pagrindinės sijos atramos. Taip vyksta todėl, jog artėjant sijos centro link, mažėja lynų vertikali dedamoji.

Optimalus nagrinėjamas sijos stiprinimo atvejis gaunamas tada, kai pasiekiamas geriausias santykis tarp sijos laikomosios galios bei įlinkio padidėjimo. Šiuo atveju priimama, kad efektyviausia lynų atramas tvirtinti 1,5 m nuo sijos atramos. Didžiausias skirtumas tarp ribinių atstumų įtakos įlinkiui IPE 400 sijai gaunamas ~11,7 %, IPE 500 sijai 7 %, o HEB 400 – 6,9 %.

3.2. Stiprinimo plokštele rezultatai

IPE 400 skerspjūvio sijai buvo taip pat taikytas stiprinimo plieniniais lakštais būdas, kuriuos priimta virinti prie sijos apačios.

Skaičiuojant stiprinimą privirinant papildomą plokštelę, plieninio lakšto maksimalus plotis apskaičiuojamas: $b_{pl} = b_f - 2 \cdot 20$, priimant, jog paliekamas minimalus atstumas reikalingam suvirinimui $d_s \geq 20 \text{ mm}$ iš abiejų pusių [1]. Maksimalus lakšto storis priimtas pagal rinkoje siūlomų lakštų matmenis. Naudoti lakštai, kurių storis vyraavo nuo 10 mm iki 50 mm, o plotis nuo 120 mm iki maksimaliai galimo 140 mm, paliekant vietos suvirinimo siūlėms virinant iš apačios.

Kadangi stiprinant virinimo būdu patartina vengti palubinio virinimo [1], skaičiuojami variantai ir su lakštais, kurių plotis didesnis nei stiprinamosios sijos lentynos plotis. Šiuo atveju lakšto plotį taip pat apriboja sąlyga: $b_{pl} \leq t_{pl} \cdot 50$ ir $d_s \geq 15 \text{ mm}$. Kitu atveju susidaro didelė įtempių koncentracija sijos briaunose [1].

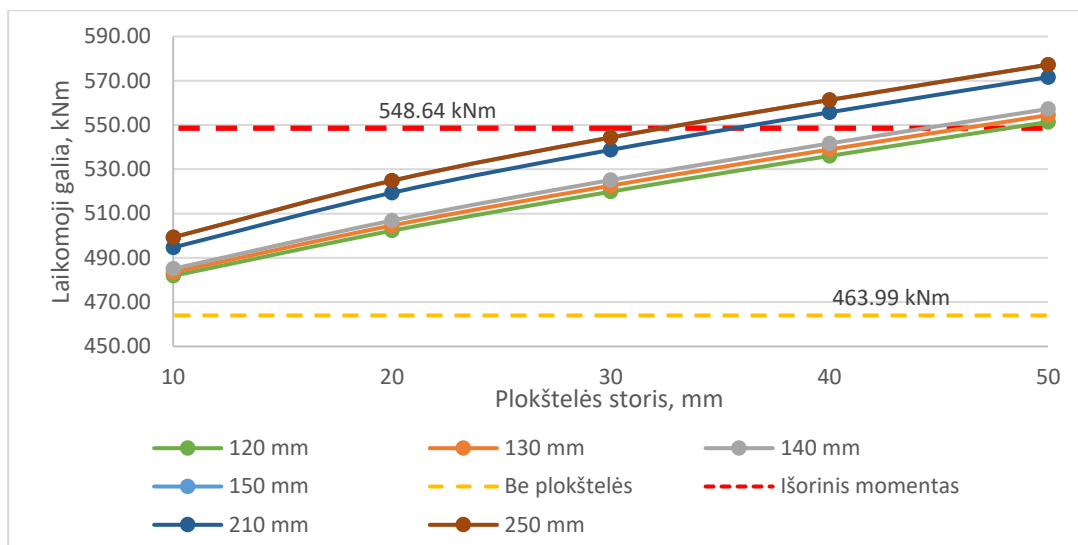
Sustiprintos sijos laikomoji galia bei įlinkio reikšmės naudojant skirtingus lakšto parametrus pateiktos 5 lentelėje

5 lentelė. Sijos laikomosios galios ir įlinkio reikšmės

Lakšto plotis, mm	Lakšto storis, mm	Sijos laikomoji galia, kNm	Įlinkis, mm
-	-	463,99	31,6
120	10	481,87	26,6
	20	502,25	23,3
	30	519,89	21,0
	40	536,04	19,3
	50	551,39	17,8
130	10	483,50	26,3
	20	504,61	22,9
	30	522,61	20,6
	40	538,97	18,9
	50	554,46 *	17,5
140	10	485,07	26,0
	20	506,83	22,6
	30	525,14	20,2
	40	541,66	18,5
	50	557,26 *	17,1
210	10	494,69	24,3
	20	519,39	20,6
	30	538,76	18,4
	40	555,74 *	16,8
	50	571,64 *	15,6
250	10	499,28	23,5
	20	524,85	19,8
	30	544,36	17,7
	40	561,32*	16,2
	50	577,24*	15,0

Čia: * pažymėtos reikšmės, tenkinančios sijos stiprumo sąlygas nuo išorinių apkrovų.

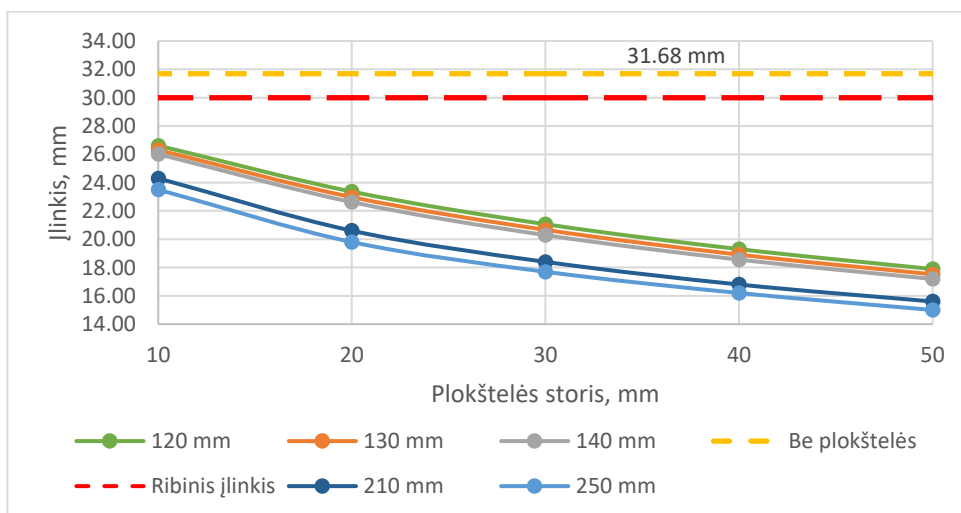
Toliau pateiktuose grafikuose (žr. 24 ir 25 pav.) atskiros kreivės vaizduoja skirtingo pločio privirinamus lakštus ir kiekvienam jų – sijos laikomosios galios priklausomybė nuo lakšto storio.



25 pav. Sijos laikomosios galios priklausomybė nuo plokštelės storio bei pločio

Kaip matyti iš 24 paveikslo, lakšto plotis sijos laikomajai galiai įtakos turi nedaug – jam didėjant kas 10 mm, laikomoji galia išauga per ~0,5 % – 0,7 %. Lakštų storiui didėjant kas 10 mm, laikomoji galia auga kas 5 %.

Tačiau iš grafiko nustatyta, jog jei suvirinimas atliekamas iš apačios, sijos laikomąją galią pakankamai padidina tik lakštai, kurių storis 50 mm arba daugiau, o jam optimaliausias plotis nuo 130 mm iki 140 mm. Jei naudojami už profilio lentyną platesni lakštai, tai stiprumo sąlygas tenkina 40 mm arba 50 mm storio lakštai, kurių plotis 210 – 250 mm.



26 pav. Sijos įlinkio priklausomybė nuo plokštelės storio bei pločio

Iš 26 paveikslo matyti, jog visos plokštelės, naudotos stiprinimui buvo efektyvios sumažinant sijos įlinkį. Kaip ir sijos stiprumo atveju, lakšto storis turi nedaug įtakos standumui – pločiui keičiantis kas 10 mm, sijos įlinkis mažėja kas 1 %. Lakšto storiui didėjant kas 10 mm, įlinkis mažėja išlenkta kreive nuo 10 % iki 4,5 %.

Daugiausia, sijos laikomoji galia lyginant su pradine nestiprinta sija padidėjo naudojant 40 mm storio ir 250 mm pločio lakštą – pokytis apie 24,4 %, o įlinkis sumažėjo apie 52,6 %.

Tačiau pagal numatytas apkrovas, stiprumo savybes tenkina ir mažesnių matmenų lakštai, šiuo atveju efektyviausiai būtų išnaudojamas lakštas, kurio storis 50 mm, o plotis 140 mm.

Pagal momentų diagramą priimta, jog lakšto ilgis turi būti 2800 mm.

3.3. Stiprinimo būdų parametrų apibendrinimas

Apskaičiavus bei ištyrus įvairių sijos stiprinimo parametrų įtaką bendram sijos stiprumui bei standumui, buvo padarytos tokios išvados:

- augant lynų įtempimo jėgai, didėja ir sijos laikomoji galia. Kuo mažesnė skerspjūvio atsparumo klasė, tuo šis didėjimas yra spartesnis;
- didėjant lyno atraminio stovo aukščiui, sijos laikomoji galia didėja;
- lyno inkaravimo taško pasirinkimas žemiau profilio neutralios ašies padidina sijos skerspjūvio laikomąją galią. Kuo didesnio atsparumo profilis, tuo ši įtaka yra mažesnė.
- lyno atraminio stovo atstumo kitimas nuo sijos atramos beveik neturi įtakos sijos stiprumo reikšmių augimui. Tuo tarpu sijos įlinkis kinta netolygiai – atstumui didėjant nuo 0,5 m iki 1 m sumažėja, o pasiekus 1 m atstumą ir didėjant iki sijos vidurio – vėl pradeda augti;
- privirinamo lakšto storio didėjimas turi daugiau įtakos laikomosios galios augimui negu lakšto pločio didėjimas;
- visi tiriamajame darbe naudoti stiprinimo sistemų parametrai efektyviai sumažina sijos įlinkį iki leistino.

3.4. Stiprinimo būdų kainų palyginimas

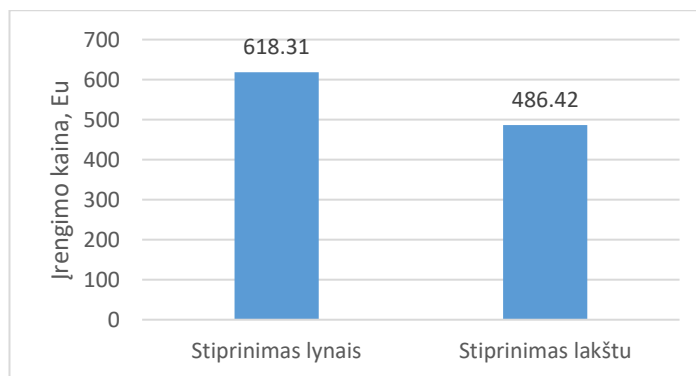
Norint palyginti stiprinimo sistemų efektyvumą, programa „Sistela“ buvo apskaičiuotos preliminarios stiprinimo lynais bei stiprinimo privirinant plieninį lakštą sistemų įrengimo kainos [3 priedas].

Lyginimams pasirinkta naudoti tokie stiprinimo sistemų parametrai, su kuriais abiem stiprinimo atvejais gaunama panaši plieninės sijos laikomoji galia. Duomenys pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. Stiprinimo sistemų parametrai ir apskaičiuota įrengimo kaina

Stiprinimo būdas	Sustiprintos sijos laikomoji galia, kNm	Stiprinimo sistemos įrengimo kaina, Eu*
Lynais	554,46	618,31
Lakštu	561,07	486,42

Čia: *Pateikiama vienos 6 m IPE 400 profilio sijos stiprinimo sistemos įrengimo kaina



27 pav. Stiprinimo būdų kainų palyginimas

Iš gautų rezultatų (žr. 6 lent.) matoma, jog plieninės sijos stiprinimo lakštu sistemos įrengimo kaina yra apie 21,3 % mažesnė nei stiprinimo lynų sistema kaina. Šiam skirtumui įtakos turi tai, jog stiprinimui lynais naudojama daugiau papildomų elementų, kurių paruošimas ir pritvirtinimas reikalauja daugiau darbo laiko bei medžiagų sąnaudų.

Tačiau siją stiprinant plieniniais lakštais, jos laikomosios galios augimas yra ribotas – šiuo atveju buvo priimtas jau ribinio rinkoje plačiau randamo storio lakštas ($t = 50\text{mm}$), todėl norint daugiau didinti sijos laikomąją galią gali būti didinamas tik lakšto plotis. Iš aptarto grafiko (žr. 25 pav.) galima daryti išvadą, jog toliau didinant lakšto plotį, sijos laikomosios galios prieaugis vis mažėja. Todėl norint daugiau padidinti sijos laikomąją galią efektyviau yra naudoti lynų sistemą.

IŠVADOS

1. Atlikta literatūros analizė, kurioje išnagrinėti pagrindiniai plieninės sijos stiprinimo būdai bei pastebėta, jog nėra metodikos, teoriškai įvertinančios skirtingų stiprinimo sistemos parametrų įtaką konstrukcijos stiprinimo lynais efektyvumui.
2. Atlikus skaičiavimų palyginimus nustatyta, jog didėjant lynų įtempimo jėgai, atraminio stovo aukščiui bei atstumui nuo sijos atramos iki lynų atraminio stovo pozicijos, sijos laikomoji galia didėja. Optimalių pasirinktų parametrų atveju IPE 400 sijai ji gali išaugti iki 40,1 %, IPE 500 sijai apie 38,6 %, o HEB 400 sijai apie 33 %. Įlinkis atitinkamai sumažinamas 52 %, 38 % ir 31 %.
3. Lyno inkaravimo tašką pasirinkus viršutinėje profilio dalyje padidėja įtempiamų lynų kampas bei tuo pačiu vertikali jėgos dedamoji. Tačiau laikomosios sijos galios augimas, apkrovus konstrukciją, yra iki 13 % didesnis lynus inkaruojant apatinėje profilio dalyje. Taip yra dėl didesnės horizontalios jėgos dedamosios bei įtempimo jėgos prieaugio įtakos.
4. Apskaičiavus IPE 400 sijos stiprinimo plieniniu lakštu bei lynų sistema kainas buvo nustatyta, jog konstrukcijos stiprinimo plieniniu lakštu kaina yra apie 21,3 % mažesnė nei stiprinimo lynų sistema kaina.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. VENCKEVIČIUS, Vytautas ir Romualdas ŽILINSKAS. *Statinių rekonstrukcija ir remontas: vadovėlis*. Kaunas, 2000. 316 p. ISBN 998613871
2. OLOFSSON, Ingvar ir kt. Assessment of European railway bridges for future traffic demands and longer lives – EC project "Sustainable Bridges". *Structure and Infrastructure Engineering*. 2005, vol.1(2), pp.93–100. ISSN 1573-2479.
3. YU, Qian-Qian, Yu-Fei WU. Fatigue durability of cracked steel beams retrofitted with high-strength materials. *Construction and Building materials*. 2017, vol.155, pp. 1188-1197. ISSN 0950-0618.
4. COLOMBI, Pierlugi, Carlo POGGI. An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips. *Composites Part B*. 2006, Vol.37(1), pp. 64–73. ISSN 1359–8368.
5. GHAFORI, E., A. SCHUMACHER and M. MOTAVALLI. Fatigue behavior of notched steel beams reinforced with bonded CFRP plates: Determination of prestressing level for crack arrest. *Engineering Structures*. December 2012, vol.45, pp.270–283. ISSN 0141–0296.
6. JIAO, Hui, F. MASHIRI and X. ZHAO. A comparative study on fatigue behaviour of steel beams retrofitted with welding, pultruded CFRP plates and wet layup CFRP sheets. *Thin-Walled Structures*. October 2012, vol.59, pp.144–152. ISSN 0263–8231.
7. BOCCIARELLI, Massimiliano, ir kt. Prediction of debonding strength of tensile steel/CFRP joints using fracture mechanics and stress based criteria. *Eng. Fracture Mechanics*. 2009, vol.76(2), pp.299–313. ISSN 0013–7944.
8. ULGER, Tuna, and A.M. OKEIL. Analysis of thin-walled steel beams retrofitted by bonding GFRP stiffeners. Numerical model and investigation of design parameters. *Engineering Structures*. 15 December 2017, vol.153, pp.166–179. ISSN 0141–0296.
9. OKEIL, Ayman M., Yilmaz BINGOL and Rubiat FERDOUS. Novel technique for inhibiting buckling of thin-walled steel structures using pultruded glass FRP sections. *Journal of Composites for Construction*. 2009, vol.13(6), pp. 547–57. ISSN 1090-0268.

10. GHANNAM, Mohamed, ir kt. Effect of post tensioning on strengthening different types of steel frames. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. October 2017, vol.29(4), pp.329-338. ISSN 1018-3639.
11. NARMASHIRI, Kambiz, ir kt. Strengthening of steel I-beams by using CFRP strips. *Int. J. Phys. Sci.* 6 (2011) 1620–1627. ISSN 1369-4332.
12. KIANMOFRAD, F., ir kt. Strengthening of metallic beams with different types of pre-stressed un-bonded retrofit systems. *Composite Structures*. 2017, Vol.159, pp.81–95. ISSN 0263–8223.
13. TAOUM, Assaad, Hui JIAO and Damien HOLLOWAY. Upgrading steel I-beams using local post-tensioning. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015, Vol.113, pp.127–134. ISSN 0143–974X.
14. PARK, Sunkyu, ir kt. Flexural behavior of steel I-beam prestressed with externally unbonded tendons. *Journal of Constructional Steel Research*. 2010, Vol.66(1), pp.125–132. ISSN 0143–974X.
15. DALY, A.F., W.WITARNAWAN. Strengthening of bridges using external post-tensioning. *EASTS '97*. Seoul, 29 - 31 October 1997.
16. ŠAPALAS, Vaidotas, Kęstutis URBONAS ir Konstantin RASIULIS. *Plieninių sijų ir kolonų projektavimas pagal EC3: kursinio projekto metodikos nurodymai*. Vilnius: Technika, 2011, 194 p. ISBN 978-609-457-008-7.
17. LIETUVOS STANDARTAS LST EN 1993-1-1+AC *Eurokoda 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas*. LIETUVIŠKOJI VERSIJA. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2011.
18. GARDNER, Leroy, David A. NETHERCOT. *Designers' guide to EN 1993–1–1: Eurocode 3: design of steel structures: general rules and rules for buildings*. London: T.Telford, 2005. ISBN 0727731637.
19. *Lynų techninės charakteristikos* [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-10-10].
Prieiga per: <https://www.certex.lt/produktai/plieniniai-lynai/itempimo-ir-tvirtinimo-trosas/pratampytas-plieno-lynas-standartinis-p59106>
20. *Plieninių profilių sortimentas*. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-10-04].
Prieiga per: <https://www.serfas.lt/katalogas/metalo-produkcija/dvitejiniai-profiliai.html>

PRIEDAI

1 priedas. Sijos projektavimas ir patikrinimai

Apkrovos

Skaičiuojama sijai tenkanti charakteristinė ir skaičiuotinė apkrovos.

Tinkamumo ribiniam būviui:

$$p_0 = (g_k + q_k) \cdot l_1 \quad (\text{P.1.1})$$

Saugos ribiniam būviui:

$$p_{0d} = (g_k \cdot \gamma_G + q_k \cdot \gamma_Q) \cdot l_1 \quad (\text{P.1.2})$$

Čia: g_k – nuolatinė apkrova;

q_k – naudojimo apkrova;

l_1 – apkrovos veikimo plotis.

Charakteristinis ir skaičiuojamasis sijos lenkimo momentai:

$$M_{E0} = p_0 \cdot \frac{L^2}{8} \quad (\text{P.1.3})$$

$$M_{Ed0} = p_{0d} \cdot \frac{L^2}{8} \quad (\text{P.1.4})$$

Čia: L – sijos ilgis;

Skaičiuotinė sijos skersinė jėga:

$$V_{Ed0} = p_{0d} \cdot \frac{L}{2} \quad (\text{P.1.5})$$

Sijos skerspjūvio projektavimas

Reikalingas skerspjūvio atsparumo momentas:

$$W_d = M_{Ed0} \cdot \frac{\gamma_{M0}}{f_y} \quad (\text{P.1.6})$$

Čia: $\gamma_{M0} = 1,0$ – rekomenduotina dalinio koeficiento reikšmė pagal [13].

f_y – stipris pagal takumo ribą, imama MPa.

Pagal reikiamą atsparumo momentą iš sortimento parenkamas profilis, kad būtų tenkinama nelygybė:

$$W_x > W_d.$$

Nustatoma sijos skerspjūvio klasė. Tikrinamas santykis sijos sienelėi:

$$\frac{c_w}{t_w} < 72 \cdot \varepsilon \quad (\text{P.1.7})$$

Čia: $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ – koeficientas, priklausantis nuo plieno stiprio.

c_w – efektyvusis sienelės aukštis

Tikrinama juostos skerspjūvio klasė:

$$\frac{c_f}{t_f} < 9 \cdot \varepsilon \quad (\text{P.1.8})$$

Pagal gautas klases priimame visos sijos bendrą skerspjūvio klasę.

Skaičiuotinė lenkiamoji sijos galia atsižvelgiant į skerspjūvio klasę [13]:

- jei skerspjūvis 1 arba 2 klasės:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{P.1.9})$$

- jei skerspjūvis 3 klasės:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{P.1.10})$$

- jei skerspjūvis 4 klasės:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{P.1.11})$$

Čia: W_{pl} – plastinis atsparumo momentas (iš sortimento);

$W_{el,min}$ – tamprusis atsparumo momentas (iš sortimento);

$W_{eff,min}$ – efektyvaus skerspjūvio atsparumo momentas.

Tikrinama, ar skaičiuotinė lenkiamoji momento reikšmė atitinka nelygybę:

$$\frac{M_{Ed0}}{M_{c,Rd}} < 1,0 \quad (\text{P.1.12})$$

Skaičiuojama plastinė šlyjamoji skaičiuotinė galia:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (\text{P.1.13})$$

A_v – šlyjamasis plotas.

$$A_v = A - 2 \cdot b_f \cdot t_f + (t_w + 2 \cdot r) \cdot t_f \quad (\text{P.1.14})$$

Šlyties jėga kiekviename sijos pjūvyje turi atitikti nelygybę:

$$\frac{V_{Ed0}}{V_{c,Rd}} < 1,0 \quad (\text{P.1.15})$$

Dažnai elementuose kartu veikia ir lenkiamasis momentas, ir šlyties jėga, todėl turi būti patikrintas jos poveikis skerspjūviui. Kai šlyties jėga sudaro mažiau nei pusę plastinės šlyjamosios galios reikšmės, jos poveikio galima nepaisyti.

$$0,5 \cdot V_{pl,Rd} > V_{Ed0} \quad (\text{P.1.16})$$

Tikrinamas sijos vidurio įlinkis.

$$f = \frac{k_{iš} \cdot M_{E0} \cdot L^2}{I_y} < f_{lim} \quad (\text{P.1.17})$$

Čia: $k_{iš}$ – koeficientas, nustatomas pagal apkrovos pobūdį, imamas iš normų [13];

f_{lim} – ribinis įlinkis. Žinant sijos tarpatramį leistinas (ribinis) sijos vidurio įlinkis skaičiuojamas pagal normas [13].

Tikrinama sienelių tik su atraminėmis sąstandomis (be tarpinių sąstandų) šlyjamoji klupamoji galia:

$$\eta_2 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} \leq 1,0, \text{ jei galioja sąlyga } \frac{h_w}{t_w} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta}$$

Gniuždoma juosta gali sukaupti sienelės plokštumoje, todėl turi būti patikrinta sąlyga:

$$\frac{h_w}{t_w} \leq k \cdot \frac{E}{f_y} \cdot \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (\text{P.1.18})$$

Čia: A_w – sienelės skerspjūvio plotas;

A_{fc} – efektyvusis gniuždomosios juostos plotas;

k – koeficientas. Kai nustatoma plastinė lenkiamoji galia $k = 0,4$, kai tamprioji lenkiamoji galia, tai $k = 0,55$.

Kadangi priimame, jog sijos gniuždomoji juosta nėra suvaržyta, tai turi būti patikrinta ar sija atspari skersiniam–sukamajam klupumui.

Skaičiuojamas momentų pasiskirstymo įtakos koeficientas:

$$\alpha_m = \frac{1,75 \cdot M_{max}}{\sqrt{(M_2^2 + M_3^2 + M_4^2)}} \leq 2,5 \quad (\text{P.1.19})$$

Čia: M_2, M_4 – elemento ketvirčiuose lenkiamieji momentai;

M_3 – elemento vidurio lenkiamasis momentas.

Tamprusis klupamasis lenkimo momentas:

$$M_{zx} = \sqrt{\left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l_{eff}}\right) \cdot \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{l_{eff}}\right)} \quad (\text{P.1.20})$$

Čia: I_t – skerspjūvio sukimo inercijos momentas:

$$I_t = 0,43 \cdot (2 \cdot b_f \cdot t_f^3 + h_w \cdot t_w^3) \quad (\text{P.1.21})$$

I_w – skerspjūvio sektorinis inercijos momentas:

$$I_w = \frac{h_f^2 \cdot b_f^3 \cdot t_f}{24} \quad (\text{P.1.22})$$

Kritinis lenkiamasis momentas:

$$M_{cr} = \alpha_m \cdot M_{zx} \quad (\text{P.1.23})$$

Jei skerspjūvis 1 klasės, tai priimama, kad $W_y = W_{pl}$.

Sąlyginis liaunis:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}} \quad (\text{P.1.24})$$

Skersinio – sukamojo klupumo koeficientas:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (\text{P.1.25})$$

Jei $\chi_{LT} > 1$, tai priimame $\chi_{LT} = 1,0$.

Čia: ϕ_{LT} – rodiklis klupumo koeficientui nustatyti:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (\text{P.1.26})$$

Čia: α_{LT} – nuokrypos koeficientas pagal A priedo 5 lent., priklausantis nuo klupumo kreivės [13].

Lenkiamosios klupamosios galios skaičiuotinė reikšmė:

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} \cdot W_{y} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (\text{P.1.27})$$

Čia: $\gamma_{M1} = 1,0$ – rekomenduotina dalinio koeficiento reikšmė pagal normas [13].

Atliekamas patikrinimas, ar sija išlaikys skersinį sukamąjį klupdymą:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{P.1.28})$$

2 priedas. Skaičiavimų rezultatų lentelės

IPE 400, kai $M_{i\bar{s}} = 548,55 \text{ kNm}$, $M_{cRd} = 463,99 \text{ kNm}$, $f_{i\bar{s}} = 31,7 \text{ mm}$

P.2.1 lentelė. IPE 400, kai $P = 220 \text{ kN}$, $a = 3 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminių stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Ilinkis, mm	Ilinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	468.79	1.0	28.9	8.8
	0.15	478.15	3.1	28.3	10.7
	0.2	487.46	5.1	27.7	12.6
	0.25	496.70	7.0	27.1	14.5
	0.3	505.88	9.0	26.6	16.1
-0.06	0.1	473.12	2.0	28.3	10.7
	0.15	483.20	4.1	27.7	12.6
	0.2	493.22	6.3	27.0	14.8
	0.25	503.18	8.4	26.4	16.7
	0.3	513.06	10.6	25.8	18.6
0	0.1	477.47	2.9	27.6	12.9
	0.15	488.28	5.2	27.0	14.8
	0.2	499.03	7.6	26.3	17.0
	0.25	509.70	9.9	25.6	19.2
	0.3	520.30	12.1	25.0	21.1
0.06	0.1	481.83	3.8	26.9	15.1
	0.15	493.38	6.3	26.2	17.4
	0.2	504.86	8.8	25.5	19.6
	0.25	516.27	11.3	24.8	21.8
	0.3	527.60	13.7	24.1	24.0
0.12	0.1	486.19	4.8	26.2	17.4
	0.15	498.48	7.4	25.4	19.9
	0.2	510.70	10.1	24.7	22.1
	0.25	522.86	12.7	23.9	24.6
	0.3	534.93	15.3	23.2	26.8

P.2.2 lentelė. IPE 400, kai $P = 220 \text{ kN}$, $a = 2,5 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminių stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Ilinkis, mm	Ilinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	468.58	1.0	28.1	11.4
	0.15	477.85	3.0	27.5	13.2
	0.2	487.04	5.0	26.8	15.5
	0.25	496.15	6.9	26.2	17.4
	0.3	505.16	8.9	25.5	19.6
-0.06	0.1	472.94	1.9	27.6	12.9
	0.15	482.94	4.1	26.9	15.1
	0.2	492.84	6.2	26.2	17.4
	0.25	502.65	8.3	25.5	19.6
	0.3	512.37	10.4	24.8	21.8
0	0.1	477.33	2.9	27.0	14.8
	0.15	488.06	5.2	26.3	17.0
	0.2	498.69	7.5	25.5	19.6
	0.25	509.23	9.8	24.7	22.1
	0.3	519.60	12.0	24.0	24.3
0.06	0.1	481.73	3.8	26.4	16.7
	0.15	493.20	6.3	25.6	19.2
	0.2	504.59	8.8	24.8	21.8
	0.25	515.87	11.2	24.0	24.3
	0.3	527.04	13.6	23.2	26.8
0.12	0.1	486.12	4.8	25.8	18.6
	0.15	498.35	7.4	24.9	21.5
	0.2	510.50	10.0	24.0	24.3
	0.25	522.54	12.6	23.2	26.8
	0.3	534.46	15.2	22.3	29.7

P.2.3 lentelė. IPE 400, kai $P = 220 \text{ kN}$, $a = 2 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	468.21	0.9	27.5	13.2
	0.15	477.32	2.9	26.8	15.5
	0.2	486.31	4.8	26.1	17.7
	0.25	495.16	6.7	25.4	19.9
	0.3	503.89	8.6	24.7	22.1
-0.06	0.1	472.62	1.9	27.1	14.5
	0.15	482.45	4.0	26.3	17.0
	0.2	492.16	6.1	25.5	19.6
	0.25	501.72	8.1	24.8	21.8
	0.3	511.13	10.2	24.0	24.3
0	0.1	477.07	2.8	26.5	16.4
	0.15	487.65	5.1	25.7	18.9
	0.2	498.09	7.3	24.9	21.5
	0.25	508.39	9.6	24.1	24.0
	0.3	518.52	11.8	23.3	26.5
0.06	0.1	481.54	3.8	26.0	18.0
	0.15	492.88	6.2	25.1	20.8
	0.2	504.09	8.6	24.2	23.7
	0.25	515.95	11.2	23.3	26.5
	0.3	526.02	13.4	22.5	29.0
0.12	0.1	486.00	4.7	25.4	19.9
	0.15	498.13	7.4	24.5	22.7
	0.2	510.11	9.9	23.5	25.9
	0.25	521.95	12.5	22.6	28.7
	0.3	533.60	15.0	21.7	31.5

P.2.4 lentelė. IPE 400, kai $P = 220 \text{ kN}$, $a = 1,5 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	467.44	0.7	27.1	14.5
	0.15	476.21	2.6	26.4	16.7
	0.2	484.78	4.5	25.7	18.9
	0.25	493.15	6.3	24.9	21.5
	0.3	501.31	8.0	24.2	23.7
-0.06	0.1	471.94	1.7	26.7	15.8
	0.15	481.44	3.8	25.9	18.3
	0.2	490.73	5.8	25.1	20.8
	0.25	499.79	7.7	24.3	23.3
	0.3	508.61	9.6	23.6	25.6
0	0.1	476.52	2.7	26.2	17.4
	0.15	486.79	4.9	25.3	20.2
	0.2	496.83	7.1	24.5	22.7
	0.25	506.62	9.2	23.6	25.6
	0.3	516.16	11.2	22.8	28.1
0.06	0.1	481.13	3.7	25.7	18.9
	0.15	492.20	6.1	24.7	22.1
	0.2	503.04	8.4	23.8	24.9
	0.25	513.61	10.7	22.9	27.8
	0.3	523.90	12.9	22.1	30.3
0.12	0.1	485.75	4.7	25.2	20.5
	0.15	497.64	7.3	24.2	23.7
	0.2	509.31	9.8	23.2	26.8
	0.25	520.70	12.2	22.2	30.0
	0.3	531.80	14.6	21.3	32.8

P.2.5 lentelė. IPE 400, kai $P = 220 \text{ kN}$, $a = 1 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	465.39	0.3	27.0	14.8
	0.15	473.33	2.0	26.3	17.0
	0.2	480.91	3.6	25.6	19.2
	0.25	488.14	5.2	24.9	21.5
	0.3	495.01	6.7	24.3	23.3
-0.06	0.1	470.12	1.3	26.5	16.4
	0.15	478.78	3.2	25.7	18.9
	0.2	487.05	5.0	25.0	21.1
	0.25	494.91	6.7	24.3	23.3
	0.3	502.36	8.3	23.6	25.6
0	0.1	475.02	2.4	26.0	18.0
	0.15	484.48	4.4	25.2	20.5
	0.2	493.51	6.4	24.4	23.0
	0.25	502.08	8.2	23.6	25.6
	0.3	510.19	10.0	22.9	27.8
0.06	0.1	480.01	3.5	25.6	19.2
	0.15	490.35	5.7	24.6	22.4
	0.2	500.22	7.8	23.8	24.9
	0.25	509.59	9.8	22.9	27.8
	0.3	518.45	11.7	22.1	30.3
0.12	0.1	485.03	4.5	25.1	20.8
	0.15	496.30	7.0	24.0	24.3
	0.2	507.10	9.3	23.1	27.1
	0.25	517.36	11.5	22.2	30.0
	0.3	527.06	13.6	21.3	32.8

P.2.6 lentelė. IPE 400, kai $P = 296 \text{ kN}$, $a = 3 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	488.58	5.3	27.9	12.0
	0.15	501.19	8.0	27.1	14.5
	0.2	513.73	10.7	26.3	17.0
	0.25	526.18	13.4	25.6	19.2
	0.3	538.54	16.1	24.8	21.8
-0.06	0.1	494.36	6.5	27.1	14.5
	0.15	507.93	9.5	26.3	17.0
	0.2	521.42	12.4	25.4	19.9
	0.25	534.82	15.3	24.6	22.4
	0.3	548.12	18.1	23.8	24.9
0	0.1	500.16	7.8	26.2	17.4
	0.15	514.70	10.9	25.3	20.2
	0.2	529.16	14.0	24.4	23.0
	0.25	543.53	17.1	23.5	25.9
	0.3	557.79	20.2	22.7	28.4
0.06	0.1	505.97	9.0	25.3	20.2
	0.15	521.50	12.4	24.3	23.3
	0.2	536.94	15.7	23.4	26.2
	0.25	552.28	19.0	22.4	29.3
	0.3	567.52	22.3	21.5	32.2
0.12	0.1	511.78	10.3	24.3	23.3
	0.15	528.30	13.9	23.3	26.5
	0.2	544.73	17.4	22.2	30.0
	0.25	561.07	20.9	21.2	33.1
	0.3	577.30	24.4	20.2	36.3

P.2.7 lentelė. IPE 400, kai $P = 296 \text{ kN}$, $a = 2,5 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	488.30	5.2	26.9	15.1
	0.15	500.79	7.9	26.0	18.0
	0.2	513.17	10.6	25.1	20.8
	0.25	525.44	13.2	24.2	23.7
	0.3	537.58	15.9	23.4	26.2
-0.06	0.1	494.12	6.5	26.2	17.4
	0.15	507.57	9.4	25.2	20.5
	0.2	520.90	12.3	24.3	23.3
	0.25	534.12	15.1	23.3	26.5
	0.3	547.19	17.9	22.4	29.3
0	0.1	499.97	7.8	25.4	19.9
	0.15	514.40	10.9	24.4	23.0
	0.2	528.71	13.9	23.4	26.2
	0.25	542.89	17.0	22.4	29.3
	0.3	556.93	20.0	21.4	32.5
0.06	0.1	505.83	9.0	24.6	22.4
	0.15	521.26	12.3	23.5	25.9
	0.2	536.57	15.6	22.4	29.3
	0.25	551.74	18.9	21.3	32.8
	0.3	566.76	22.1	20.3	36.0
0.12	0.1	511.70	10.3	23.7	25.2
	0.15	528.13	13.8	22.5	29.0
	0.2	544.45	17.3	21.4	32.5
	0.25	560.64	20.8	20.2	36.3
	0.3	576.66	24.3	19.1	39.7

P.2.8 lentelė. IPE 400, kai $P = 296 \text{ kN}$, $a = 2 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	487.80	5.1	26.1	17.7
	0.15	500.07	7.8	25.1	20.8
	0.2	512.17	10.4	24.2	23.7
	0.25	524.11	13.0	23.2	26.8
	0.3	535.85	15.5	22.3	29.7
-0.06	0.1	493.68	6.4	25.4	19.9
	0.15	506.92	9.3	24.4	23.0
	0.2	519.98	12.1	23.4	26.2
	0.25	532.85	14.8	22.4	29.3
	0.3	545.52	17.6	21.4	32.5
0	0.1	499.62	7.7	24.8	21.8
	0.15	513.85	10.7	23.6	25.6
	0.2	527.90	13.8	22.5	29.0
	0.25	541.75	16.8	21.4	32.5
	0.3	555.38	19.7	20.4	35.6
0.06	0.1	505.58	9.0	24.0	24.3
	0.15	520.83	12.3	22.8	28.1
	0.2	535.90	15.5	21.6	31.9
	0.25	550.76	18.7	20.5	35.3
	0.3	565.39	21.9	19.3	39.1
0.12	0.1	511.53	10.2	23.3	26.5
	0.15	527.83	13.8	22.0	30.6
	0.2	543.94	17.2	20.7	34.7
	0.25	559.85	20.7	19.5	38.5
	0.3	575.51	24.0	18.2	42.6

P.2.9 lentelė. IPE 400, kai $P = 296 \text{ kN}$, $a = 1,5 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	486.76	4.9	25.6	19.2
	0.15	498.57	7.5	24.5	22.7
	0.2	510.12	9.9	23.6	25.6
	0.25	521.39	12.4	22.6	28.7
	0.3	532.37	14.7	21.7	31.5
-0.06	0.1	492.77	6.2	24.9	21.5
	0.15	505.56	9.0	23.8	24.9
	0.2	518.06	11.7	22.8	28.1
	0.25	530.26	14.3	21.7	31.5
	0.3	542.13	16.8	20.7	34.7
0	0.1	498.88	7.5	24.3	23.3
	0.15	512.69	10.5	23.1	27.1
	0.2	526.20	13.4	22.0	30.6
	0.25	539.38	16.2	20.8	34.4
	0.3	552.21	19.0	19.8	37.5
0.06	0.1	505.03	8.8	23.6	25.6
	0.15	519.92	12.1	22.4	29.3
	0.2	534.49	15.2	21.1	33.4
	0.25	547.71	18.0	19.9	37.2
	0.3	562.55	21.2	18.7	41.0
0.12	0.1	511.19	10.2	22.9	27.8
	0.15	527.18	13.6	21.6	31.9
	0.2	542.86	17.0	20.3	36.0
	0.25	558.18	20.3	19.0	40.1
	0.3	573.10	23.5	17.7	44.2

P.2.10 lentelė. IPE 400, kai $P = 296 \text{ kN}$, $a = 1 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	483.99	4.3	25.3	20.2
	0.15	494.68	6.6	24.4	23.0
	0.2	504.90	8.8	23.5	25.9
	0.25	514.63	10.9	22.6	28.7
	0.3	523.88	12.9	21.8	31.2
-0.06	0.1	490.31	5.7	24.7	22.1
	0.15	501.97	8.2	23.7	25.2
	0.2	513.10	10.6	22.7	28.4
	0.25	523.68	12.9	21.8	31.2
	0.3	533.71	15.0	20.9	34.1
0	0.1	496.86	7.1	24.1	24.0
	0.15	509.58	9.8	23.0	27.4
	0.2	521.73	12.4	21.9	30.9
	0.25	533.27	14.9	20.8	34.4
	0.3	544.18	17.3	19.9	37.2
0.06	0.1	503.53	8.5	23.4	26.2
	0.15	517.43	11.5	22.2	30.0
	0.2	530.70	14.4	21.0	33.8
	0.25	543.31	17.1	19.9	37.2
	0.3	555.21	19.7	18.8	40.7
0.12	0.1	510.22	10.0	22.8	28.1
	0.15	525.38	13.2	21.4	32.5
	0.2	539.89	16.4	20.1	36.6
	0.25	553.69	19.3	18.9	40.4
	0.3	566.73	22.1	17.7	44.2

P.2.11 lentelė. IPE 400, kai $P = 424 \text{ kN}$, $a = 3 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminių stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Ilinkis, mm	Ilinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	521.02	12.3	26.3	17.0
	0.15	538.97	16.2	25.2	20.5
	0.2	556.81	20.0	24.1	24.0
	0.25	574.53	23.8	23.0	27.4
	0.3	592.12	27.6	21.9	30.9
-0.06	0.1	529.68	14.2	25.1	20.8
	0.15	549.06	18.3	23.9	24.6
	0.2	568.32	22.5	22.7	28.4
	0.25	587.45	26.6	21.6	31.9
	0.3	606.45	30.7	20.4	35.6
0	0.1	538.37	16.0	23.9	24.6
	0.15	559.20	20.5	22.6	28.7
	0.2	579.91	25.0	21.3	32.8
	0.25	600.49	29.4	20.0	36.9
	0.3	620.92	33.8	18.8	40.7
0.06	0.1	547.08	17.9	22.5	29.0
	0.15	569.38	22.7	21.1	33.4
	0.2	591.56	27.5	19.7	37.9
	0.25	613.60	32.2	18.4	42.0
	0.3	635.49	37.0	17.0	46.4
0.12	0.1	555.79	19.8	21.0	33.8
	0.15	579.57	24.9	19.5	38.5
	0.2	603.24	30.0	18.1	42.9
	0.25	626.76	35.1	16.6	47.6
	0.3	650.13	40.1	15.2	52.1

P.2.12 lentelė. IPE 400, kai $P = 424 \text{ kN}$, $a = 2,5 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminių stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Ilinkis, mm	Ilinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	520.64	12.2	24.9	21.5
	0.15	538.40	16.0	23.6	25.6
	0.2	556.02	19.8	22.3	29.7
	0.25	573.48	23.6	21.1	33.4
	0.3	590.76	27.3	19.9	37.2
-0.06	0.1	529.34	14.1	23.8	24.9
	0.15	548.54	18.2	22.5	29.0
	0.2	567.59	22.3	21.1	33.4
	0.25	586.45	26.4	19.7	37.9
	0.3	605.12	30.4	18.4	42.0
0	0.1	538.09	16.0	22.7	28.4
	0.15	558.77	20.4	21.2	33.1
	0.2	579.27	24.8	19.8	37.5
	0.25	599.58	29.2	18.3	42.3
	0.3	619.68	33.6	16.9	46.7
0.06	0.1	546.88	17.9	21.5	32.2
	0.15	569.04	22.6	19.9	37.2
	0.2	591.03	27.4	18.3	42.3
	0.25	612.82	32.1	16.8	47.0
	0.3	634.39	36.7	15.3	51.7
0.12	0.1	555.66	19.8	20.2	36.3
	0.15	579.33	24.9	18.5	41.6
	0.2	602.83	29.9	16.9	46.7
	0.25	626.13	34.9	15.2	52.1
	0.3	649.21	39.9	13.6	57.1

P.2.13 lentelė. IPE 400, kai $P = 424 \text{ kN}$, $a = 2 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	519.93	12.1	23.7	25.2
	0.15	537.39	15.8	22.4	29.3
	0.2	554.62	19.5	21.0	33.8
	0.25	571.60	23.2	19.7	37.9
	0.3	588.33	26.8	18.3	42.3
-0.06	0.1	528.72	14.0	22.8	28.1
	0.15	547.62	18.0	21.3	32.8
	0.2	566.27	22.0	19.8	37.5
	0.25	584.66	26.0	18.4	42.0
	0.3	602.75	29.9	16.9	46.7
0	0.1	537.59	15.9	21.8	31.2
	0.15	557.98	20.3	20.1	36.6
	0.2	578.11	24.6	18.6	41.3
	0.25	597.95	28.9	17.0	46.4
	0.3	617.47	33.1	15.5	51.1
0.06	0.1	546.51	17.8	20.7	34.7
	0.15	568.42	22.5	19.0	40.1
	0.2	590.07	27.2	17.2	45.7
	0.25	611.41	31.8	15.6	50.8
	0.3	632.42	36.3	13.9	56.2
0.12	0.1	555.43	19.7	19.6	38.2
	0.15	578.89	24.8	17.7	44.2
	0.2	602.09	29.8	15.9	49.8
	0.25	624.99	34.7	14.1	55.5
	0.3	647.54	39.6	12.3	61.2

P.2.14 lentelė. IPE 400, kai $P = 424 \text{ kN}$, $a = 1,5 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	518.45	11.7	23.0	27.4
	0.15	535.27	15.4	21.5	32.2
	0.2	551.72	18.9	20.1	36.6
	0.25	567.78	22.4	18.8	40.7
	0.3	583.42	25.7	17.4	45.1
-0.06	0.1	527.41	13.7	22.0	30.6
	0.15	545.68	17.6	20.5	35.3
	0.2	563.54	21.5	19.0	40.1
	0.25	580.96	25.2	17.5	44.8
	0.3	597.92	28.9	16.1	49.2
0	0.1	536.53	15.6	21.1	33.4
	0.15	556.32	19.9	19.4	38.8
	0.2	575.67	24.1	17.8	43.8
	0.25	594.55	28.1	16.2	48.9
	0.3	612.92	32.1	14.6	53.9
0.06	0.1	545.73	17.6	20.1	36.6
	0.15	567.10	22.2	18.3	42.3
	0.2	588.03	26.7	16.5	47.9
	0.25	608.46	31.1	14.8	53.3
	0.3	628.33	35.4	13.1	58.7
0.12	0.1	554.93	19.6	19.1	39.7
	0.15	577.95	24.6	17.1	46.1
	0.2	600.52	29.4	15.2	52.1
	0.25	622.57	34.2	13.4	57.7
	0.3	644.05	38.8	11.5	63.7

P.2.15 lentelė. IPE 400, kai $P = 424 \text{ kN}$, $a = 1 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Laikomoji galia, kNm	Laikomosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	514.56	10.9	22.7	28.4
	0.15	529.79	14.2	21.3	32.8
	0.2	544.35	17.3	20.0	36.9
	0.25	558.23	20.3	18.8	40.7
	0.3	571.42	23.2	17.6	44.5
-0.06	0.1	523.92	12.9	21.8	31.2
	0.15	540.58	16.5	20.3	36.0
	0.2	556.48	19.9	18.9	40.4
	0.25	571.61	23.2	17.5	44.8
	0.3	585.94	26.3	16.2	48.9
0	0.1	533.64	15.0	20.8	34.4
	0.15	551.87	18.9	19.2	39.4
	0.2	569.27	22.7	17.6	44.5
	0.25	585.79	26.3	16.2	48.9
	0.3	601.42	29.6	14.8	53.3
0.06	0.1	543.56	17.1	19.8	37.5
	0.15	563.52	21.5	18.1	42.9
	0.2	582.58	25.6	16.4	48.3
	0.25	600.68	29.5	14.7	53.6
	0.3	617.77	33.1	13.2	58.4
0.12	0.1	553.53	19.3	18.8	40.7
	0.15	575.34	24.0	16.9	46.7
	0.2	596.23	28.5	15.0	52.7
	0.25	616.09	32.8	13.3	58.0
	0.3	634.84	36.8	11.6	63.4

IPE 500, kai $M_{i\bar{s}} = 873,9 \text{ kNm}$, $M_{cRd} = 685,15 \text{ kNm}$, $f_{i\bar{s}} = 24,2 \text{ mm}$

P.2.16 lentelė. IPE 500, kai $P = 296 \text{ kN}$, $a = 3 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminų stovų aukštis, m	Lenkiamoji galia, kNm	Lenkiamosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.17	0.1	773.26	12.86	22.20	8.26
	0.15	785.60	14.66	21.90	9.50
	0.2	797.86	16.45	21.50	11.16
	0.25	810.02	18.23	21.10	12.81
	0.3	822.08	19.99	20.80	14.05
-0.085	0.1	780.63	13.94	21.70	10.33
	0.15	794.02	15.89	21.30	11.98
	0.2	807.32	17.83	20.90	13.64
	0.25	820.52	19.76	20.50	15.29
	0.3	833.60	21.67	20.10	16.94
0	0.1	788.05	15.02	21.20	12.40
	0.15	802.51	17.13	20.70	14.46
	0.2	816.88	19.23	20.30	16.12
	0.25	831.14	21.31	19.90	17.77
	0.3	845.28	23.37	19.50	19.42
0.085	0.1	795.48	16.10	20.50	15.29
	0.15	811.03	18.37	20.10	16.94
	0.2	826.49	20.63	19.60	19.01
	0.25	841.84	22.87	19.20	20.66
	0.3	857.07	25.09	18.70	22.73
0.17	0.1	802.90	17.19	19.90	17.77
	0.15	819.55	19.62	19.40	19.83
	0.2	836.11	22.03	18.90	21.90
	0.25	852.57	24.44	18.40	23.97
	0.3	868.91	26.82	17.90	26.03

Kai	2.5 m		
868.19	26.72	17.4	28.10
Kai	2 m		
866.9	26.53	17	29.75
Kai	1.5 m		
864.2	26.13	16.7	30.99
Kai	1 m		
857.08	25.09	16.8	30.58

P.2.17 lentelė. IPE 500, kai $P = 424 \text{ kN}$, $a = 3 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminių stovų aukštis, m	Lenkiamoji galia, kNm	Lenkiamosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.17	0.1	810.42	18.28	21.40	11.6
	0.15	827.97	20.85	20.90	13.6
	0.2	845.40	23.39	20.40	15.7
	0.25	862.70	25.91	19.80	18.2
	0.3	879.85	28.42	19.30	20.2
-0.085	0.1	821.45	19.89	20.70	14.5
	0.15	840.56	22.68	20.10	16.9
	0.2	859.54	25.45	19.50	19.4
	0.25	878.38	28.20	19.00	21.5
	0.3	897.07	30.93	18.40	24.0
0	0.1	832.55	21.51	19.80	18.2
	0.15	853.26	24.54	19.20	20.7
	0.2	873.84	27.54	18.60	23.1
	0.25	894.27	30.52	18.00	25.6
	0.3	914.53	33.48	17.40	28.1
0.085	0.1	843.68	23.14	18.90	21.9
	0.15	866.02	26.40	18.30	24.4
	0.2	888.22	29.64	17.60	27.3
	0.25	910.27	32.86	17.00	29.8
	0.3	932.15	36.05	16.30	32.6
0.17	0.1	854.78	24.76	18.00	25.6
	0.15	878.77	28.26	17.20	28.9
	0.2	902.62	31.74	16.50	31.8
	0.25	926.33	35.20	15.80	34.7
	0.3	949.87	38.64	15.10	37.6

Kai	2.5 m		
948.84	38.49	14.4	40.50
Kai	2 m		
946.97	38.21	13.8	42.98
Kai	1.5 m		
943.07	37.64	13.4	44.63
Kai	1 m		
932.77	36.14	13.5	44.21
Kai	0.5 m		
892.31	30.24	15.1	37.60

HEB 400, kai $M_{i\check{s}} = 1253,7 \text{ kNm}$, $M_{cRd} = 1023,8 \text{ kNm}$, $f_{i\check{s}} = 29,1 \text{ mm}$

P.2.18 lentelė. HEB 400, kai $P = 424 \text{ kN}$, $a = 3 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminių stovų aukštis, m	Lenkiamoji galia, kNm	Lenkiamosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	1134.40	10.80	26.90	7.6
	0.15	1152.60	12.58	26.40	9.3
	0.2	1170.70	14.35	26.00	10.7
	0.25	1188.60	16.10	25.60	12.0
	0.3	1206.40	17.84	25.10	13.7
-0.06	0.1	1142.40	11.58	26.40	9.3
	0.15	1161.90	13.49	26.00	10.7
	0.2	1181.30	15.38	25.50	12.4
	0.25	1200.50	17.26	25.00	14.1
	0.3	1219.60	19.12	24.50	15.8
0	0.1	1150.40	12.37	26.00	10.7
	0.15	1171.20	14.40	25.40	12.7
	0.2	1191.90	16.42	24.90	14.4
	0.25	1212.50	18.43	24.40	16.2
	0.3	1232.90	20.42	23.90	17.9
0.06	0.1	1158.40	13.15	25.40	12.7
	0.15	1180.60	15.32	24.90	14.4
	0.2	1202.60	17.46	24.30	16.5
	0.25	1224.60	19.61	23.80	18.2
	0.3	1246.30	21.73	23.20	20.3
0.12	0.1	1166.40	13.93	24.90	14.4
	0.15	1189.90	16.22	24.30	16.5
	0.2	1213.40	18.52	23.70	18.6
	0.25	1236.70	20.80	23.10	20.6
	0.3	1259.80	23.05	22.50	22.7

Kai	2.5 m		
1258.9	22.96	21.9	24.74
Kai	2 m		
1257.3	22.81	21.4	26.46
Kai	1.5 m		
1253.8	22.47	21.1	27.49
Kai	1 m		
1244.8	21.59	21.1	27.49
Kai	0.5 m		
1209.1	18.10	22.3	23.37

P.2.19 lentelė. HEB 400, kai $P = 592 \text{ kN}$, $a = 3 \text{ m}$

Ekscentricitetas, m	Atraminių stovų aukštis, m	Lenkiamoji galia, kNm	Lenkiamosios galios prieaugis, %	Įlinkis, mm	Įlinkio mažėjimas, %
-0.12	0.1	1179.20	15.18	26.00	10.7
	0.15	1204.80	17.68	25.40	12.7
	0.2	1230.10	20.15	24.70	15.1
	0.25	1255.30	22.61	24.10	17.2
	0.3	1280.30	25.05	23.50	19.2
-0.06	0.1	1189.90	16.22	25.40	12.7
	0.15	1217.20	18.89	24.70	15.1
	0.2	1244.30	21.54	24.00	17.5
	0.25	1271.20	24.16	23.40	19.6
	0.3	1298.00	26.78	22.70	22.0
0	0.1	1200.50	17.26	24.70	15.1
	0.15	1229.60	20.10	24.00	17.5
	0.2	1258.50	22.92	23.30	19.9
	0.25	1287.30	25.74	22.60	22.3
	0.3	1315.80	28.52	21.90	24.7
0.06	0.1	1211.20	18.30	24.00	17.5
	0.15	1242.10	21.32	23.20	20.3
	0.2	1272.80	24.32	22.50	22.7
	0.25	1303.40	27.31	21.70	25.4
	0.3	1333.70	30.27	21.00	27.8
0.12	0.1	1221.90	19.35	23.20	20.27
	0.15	1254.60	22.54	22.40	23.02
	0.2	1287.20	25.73	21.60	25.77
	0.25	1319.50	28.88	20.80	28.52
	0.3	1351.70	32.03	20.00	31.27

Kai a	2.5 m		
1350.5	31.91	19.1	34.36
Kai a	2 m		
1348.2	31.69	18.4	36.77
Kai a	1.5 m		
1343.4	31.22	18	38.14
Kai a	1 m		
1330.9	30.00	18	38.14
Kai a	0.5 m		
1281.5	25.17	19.6	32.65

3 priedas. Lokalinės sąmatos

LOKALINĖ SĄMATA						
Sudaryta pagal 2018.03 kainas						
Statinių grupė 1212 Plieninės sijos						
Statinyš 2 1						
Žiniaraštis 1 Stiprinimas plieniniais lynais						
2019.01.02				Suma žiniaraščiui 618.31 EUR		
Sąm. eil.	Darbų ir išlaidų aprašymai	Mato vnt	Norma	Kiekis	Kaina EUR	Iš viso EUR
1	1					
1	H74T-33	t		0.049		
	Atraminų konstrukcijų montavimas ir lynų įtempimas k8=1.17					
	Darbo sąn. kateg. 4.95	žm.val.	189.1	9.2659	16.54	153.26
120021	Plieniniai lynai, d 4-12,9mm	m	285.71429	14.0	2.07	28.98
1120038	Elektrodai	kg	1.8	0.0882	5.88	0.52
1230002	Cinko lydinys	kg	30.0	1.47	20.0	29.4
1269034	Plieninės konstrukcijos	t	1.0	0.049	664.46	32.56
1488160	Suvirinimo elektra agregatas	maš.val	2.2	0.1078	8.37	0.9
1489043	Montažinis kranas (65t)	maš.val	7.73	0.37877	66.7	25.26
1489044	Reversyvinė gervė	maš.val	3.26	0.15974	2.93	0.47
1489045	Kėlimo mechanizmas	maš.val	10.7	0.5243	30.0	15.73
H74T-33	Darbo užm. 153.26 Medžiagos 91.46			Mechanizmai 42.36		Iš viso 287.08
2	N13-203	m2		0.747		
	Metalinių paviršių padengimas ugniai atspariais dažais 2150 mikronų sluoksniu teptuku k8=1.17					
	Darbo sąn. kateg. 4.0	žm.val.	0.59	0.44073	6.11	2.69
230436	Gruntas Pyroprotect	kg	0.2	0.1494	6.3	0.94
230437	Dažai Pyroprotect	kg	3.5	2.6145	8.26	21.6
N13-203	Darbo užm. 2.69 Medžiagos 22.54			Mechanizmai		Iš viso 25.23
3	R23-92	100vnt		0.04		
	Skylių gręžimas elektr. rankiniu grąžtu metalo konstrukcijose, kai gręžimo gylis iki 14 mm					
	Darbo sąn. kateg. 3.0	žm.val.	3.1	0.124	17.0	2.11
390049	Elektrinis grąžtas	maš.val	2.5	0.1	0.91	0.09
R23-92	Darbo užm. 2.11 Medžiagos			Mechanizmai 0.09		Iš viso 2.20
4	N13-146-1	10m2		0.08		
	Įvairių metalinių paviršių valymas mechaniniais įrankiais pagal St3 paruošimo laipsnį					
	Darbo sąn. kateg. 4.0	žm.val.	1.76	0.1408	6.11	0.86
489244	Smulkūs mechanizmai su el. varikliu	maš.val	1.76	0.1408	0.71	0.1
N13-146-1	Darbo užm. 0.86 Medžiagos			Mechanizmai 0.10		Iš viso 0.96
5	N28P-3112	km		0.014		
	Lanksčių arba standžių plieninių lynų antikorozinis padengimas					
	Darbo sąn. kateg. 4.4	žm.val.	60.0	0.84	6.24	5.24
230251	Spiritinis skiediklis N 649	t	0.013	0.000182	1678.03	0.31
230400	Elektrotechninė, apsauginė mastika	kg	30.0	0.42	2.02	0.85
N28P-3112	Darbo užm. 5.24 Medžiagos 1.16			Mechanizmai		Iš viso 6.40
Iš viso skyriuje 1 Darbo užm. 164 Medžiagos 115				Mechanizmai 43		Iš viso 322
Viso žiniaraštyje 1 Darbo užm. 164 Medžiagos 115				Mechanizmai 43		Iš viso 322
	Papildomų medžiagų vertė 3.00%			3		
	Papildomų mechanizmų vertė 3.00%				1	
	Sezoniniai darbai 15.00% (0)					
	Specifiniai darbai 17.00%		26			
	Papildomas darbo užmokestis 8.00%(164+26)		15			
	Viso:		205	118	44	367
	Soc.draudimo išlaidos 31.00%(164+26+15)		64			
	Statinio statybos išlaidos	Viso:	269	118	44	431
	Iš viso tiesioginės išlaidos					470
	Pridėtinės išlaidos 27.00%(164+26+15)					55
	Pelnas 5.00%(470+55)					26
	Iš viso netiesioginės išlaidos					81
					Bendra vertė be PVM	511
	Pridėtinės vertės mokestis 21.00%					107.31
					Bendra vertė su PVM	618.31

P.3.1 pav. stiprinimo lynais lokalinė sąmata

LOKALINĖ SĄMATA						
Sudaryta pagal 2018.03 kainas						
Statinių grupė 1212 Plieninės sijos						
Statinsys 1 1						
Žiniaraštis 2 Stiprinimas plieniniu lakštu						
2019.01.02			Suma žiniaraščiui		486.42 EUR	
Sąm. eil.	Darbų ir išlaidų aprašymai	Mato vnt	Norma	Kiekis	Kaina EUR	Iš viso EUR
1	1					
1	N46-18-3	t		0.153		
	Ištisinio skersp. plieninių sijų ir rygelių apatinės juostos k-jų sustiprinimas, kai anga iki 12m k8=1.07					
	Darbo sąn. kateg. 4.0	žm.val.	10.0	1.53	6.11	9.35
20040	Propano-butano mišinys	m3	0.4	0.0612	1.84	0.11
120038	Suvirinimo elektrodai	kg	25.0	3.825	5.88	22.49
210004	Dujinis deguonis (techninis)	m3	3.0	0.459	1.41	0.65
260012	Metalinės konstrukcijos	t	1.0	0.153	1659.63	253.92
520392	Pagalbinės plieninės montažinės konstrukcijos	t	0.002	0.00306	1659.63	0.51
534013	Apipjauta mediena (spygliuočių, 1-3 rūš.)	m3	0.1	0.0153	203.89	3.12
310185	Gervė elektros reversinė	maš.val	0.8	0.1224	2.93	0.36
380004	Suvirinimo transformatorius	maš.val	6.9	1.0557	2.93	3.09
489041	Kranas ant vikšrinės važiuoklės 16 t keliamosios galios	maš.val	0.01	0.00153	32.65	0.5
N46-18-3 Darbo užm. 9.35 Medžiagos 280.80		Mechanizmai 3.50		Iš viso 293.65		
2	N13-146-1	10m2		0.52		
	Ivairių metalinių paviršių valymas mechaniniais įrankiais pagal St3 paruošimo laipsnį					
	Darbo sąn. kateg. 4.0	žm.val.	1.76	0.9152	6.11	5.59
489244	Smulkūs mechanizmai su el. varikliu	maš.val	1.76	0.9152	0.71	0.65
N13-146-1 Darbo užm. 5.59 Medžiagos		Mechanizmai 0.65		Iš viso 6.24		
3	N13-201	m2		0.686		
	Metalinių didelių (ištisinių) paviršių padengimas ugniai atspariais dažais 2150 mikronų sluoksniu teptuku k8=1.17					
	Darbo sąn. kateg. 4.0	žm.val.	0.27	0.18522	6.11	1.13
230436	Gruntas Pyrotect	kg	0.2	0.1372	6.3	0.86
230437	Dažai Pyrotect	kg	3.5	2.401	8.26	19.83
N13-201 Darbo užm. 1.13 Medžiagos 20.69		Mechanizmai		Iš viso 21.82		
Iš viso skyriuje 1 Darbo užm. 16 Medžiagos 301		Mechanizmai 4		Iš viso 321		
Viso žiniaraštyje 1 Darbo užm. 16 Medžiagos 301		Mechanizmai 4		Iš viso 321		
	Papildomų medžiagų vertė 3.00%			9		
	Papildomų mechanizmų vertė 3.00%					
	Sezoniniai darbai 15.00% (0)					
	Specifiniai darbai 17.00%		1			
	Papildomas darbo užmokestis 8.00%(16+1)		1			
	Viso:		18	310	4	332
	Soc.draudimo išlaidos 31.00%(16+1+1)		6			
	Statinio statybos išlaidos	Viso:	24	310	4	348
	Iš viso tiesioginės išlaidos					378
	Pridėtinės išlaidos 27.00%(16+1+1)					5
	Pelnas 5.00%(368+5)					19
	Iš viso netiesioginės išlaidos					24
					Bendra vertė be PVM	402
	Pridėtinės vertės mokestis 21.00%					84.42
					Bendra vertė su PVM	486.42

P.3.2 pav. stiprinimo plieniniu lakštu lokalinė sąmata

4 priedas. Skaičiavimo pavyzdys „MATLAB“ programa

```
clear;
Ss=1860000; %lyno stipris tempiant
P=424;%lynu itempimo jega
As=0.0003; %lynu skerspjuvio plotas
hatr=0.3;%atraminio stovo aukstis nuo profilio apacios
a=2.5;%atstumas nuo atramos iki atraminio stovo
L=6;%sijos tarpatramio ilgis
qd=91.2;%isorinis isskirstytas kruvis charakteristinis
q=121.9;%isorinis isskirstytas kruvis skaiciuotinis
Misd=qd*L^2/8
Visd=qd*L/2;

Mis=q*L^2/8 %isorinis lenkimo momentas
Vis=q*L/2; %isorine skersine jega
bf=0.18;%tejinio skerpsjuvio juostos plotis
tf=0.0135;%tejinio skerpsjuvio juostos storis

tw=0.0086;%tejinio skerpsjuvio sieneles storis
hs=0.4;%tejinio skerpsjuvio aukstis
h=hs;
Afc=bf*tf;%gniuzdomos lentynos plotas
Aft=bf*tf;%tempiamos lentynos plotas
Aw=(hs-2*tf)*tw;%sieneles plotas
%A=Afc+Aft+Aw; %skerspjuvio plotas
A=0.00845
%I=2*bf*tf^3/12+2*Aft*(0.5*hs-0.5*tf)^2+tw*(hs-2*tf)^3/12 %inercijos
momentas
I=0.0002313;
W=0.001160;
fy=355;
McRd=W*fy/1*1000

E=2100000000;%tamprumo modulis
EI=E*I;
ha=0.15;%atstumas nuo profilio svorio centro iki lyno inkaravimo tasko
(-ha-inkaravimas virs svorio centro, +ha - inkaravimas zemiau svorio
centro)
hk=hatr+0.5*h-ha;%atstumas nuo lyno inkaravimo tasko iki lyno
zemiausio tasko sijos viduryje
kampas=atan(hk/a)% lyno posvirio su horizontale kampas
V=P*sin(kampas)%vertikali lyno dedamoji
H=P*cos(kampas)%horizontali lyno dedamoji
Mv=V*a;
Mh=H*ha;
kis=5/48; %ilinkio koeficientai
kv=0.125-(a/L)^2/6;
kh=0.125;

fisd=kis*(Misd/EI)*L^2
```

```

fis=kis*(Mis/EI)*L^2; %ilinkis nuo isorines jegos
fv(kv*(Mv/EI)*L^2;%ilinkis nuo vertikalios dedamosios
fh=kh*(Mv/EI)*L^2;%nuo horizontalios
f=fis-fv-fh; %suminis ilinkis
fd=fisd-fv-fh
%*****
%ciklas keiciant ha nuo 0.15 iki -0.15m
%*****
for i=1:5;
    if i==1;
        haa(i)=0.12;
    end;
    if i>1;
        haa(i)=haa(i-1)-0.06;
    end;
    hkk(i)=hatr+0.5*h-haa(i);
    kamp(i)=atan(hkk(i)/a);
    (sin(kamp(i)))^2+(cos(kamp(i)))^2;
    VV(i)=P*sin(kamp(i));
    HH(i)=P*cos(kamp(i));
    Mvv(i)=VV(i)*a;
    Mhh(i)=HH(i)*haa(i);
    MM(i)=Mis-Mvv(i)-Mhh(i);

    St(i)=HH(i)/A+Mhh(i)*0.5*hs/I-(Mis-Mvv(i))*0.5*hs/I;%gniuzdymas,
- -tempimas
    Sc(i)=HH(i)/A-Mhh(i)*0.5*hs/I+(Mis-Mvv(i))*0.5*hs/I;
    fvv(i)=kv*(Mvv(i)/EI)*L^2;
    fhh(i)=kh*(Mhh(i)/EI)*L^2;
    ff(i)=fis-fvv(i)-fhh(i);
    ffd(i)=fisd-fvv(i)-fhh(i);
end;
%*****
%ciklo pabaiga
%*****

%ciklas deformacijos ties lyno inkaravimo tasku apskaiciuoti
%*****
for i=1:5;

    deis=-q*h*L^3/(24*EI);%horizontalus poslinkis kraste nuo Mis
    dev(i)=VV(i)*a*h*L/(4*EI)-VV(i)*a^2*h/(4*EI);%nuo V
    deh(i)=HH(i)*haa(i)*h*L/(2*EI);%nuo H
    dl(i)=deis;%suminis poslinkis
    % dl(i)=deis+dev(i)+deh(i)%suminis poslinkis
    dla(i)=2*(haa(i))*dl(i)/h;%poslinkis ties lyno inkaravimu
    deps(i)=cos(kamp(i))*dla(i)/L;%deformacija lyne
    dP(i)=deps(i)*E*As;
    PP(i)=P-dP(i);%jega ivertinus deformacijas
end;

```

```

%momentai ivertinus jegu prieaugius
%*****
    for i=1:5;
        if i==1;
            haa(i)=0.12;
        end;
        if i>1;
            haa(i)=haa(i-1)-0.06;
        end;
        hkk(i)=hatr+0.5*h-haa(i);
        kamp(i)=atan(hkk(i)/a);
        (sin(kamp(i)))^2+(cos(kamp(i)))^2;
        VVp(i)=PP(i)*sin(kamp(i));
        HHp(i)=PP(i)*cos(kamp(i));
        Mvvp(i)=VVp(i)*a;
        Mhhp(i)=HHp(i)*haa(i);
        MMp(i)=Mis-Mvvp(i)-Mhhp(i);%suminis momentas ivertinus lynu
deformacijas nuo momentu
        MMtot(i)=McRd+Mvvp(i)+Mhhp(i); %laikomoji galia
        fvvp(i)=kv*(Mvvp(i)/EI)*L^2;
        fhhp(i)=kh*(Mhhp(i)/EI)*L^2;
        ffp(i)=fis-fvvp(i)-fhhp(i);
        ffpd(i)=fisd-fvvp(i)-fhhp(i);
    end;
%*****
%ciklo pabaiga

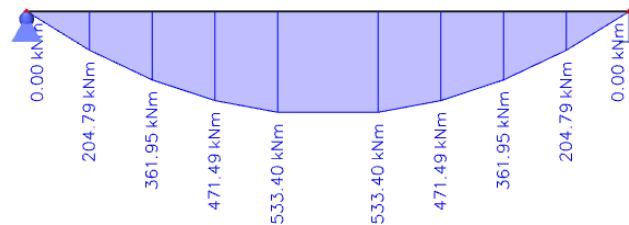
```

5 priedas. Įrašų diagramos (pavyzdys)

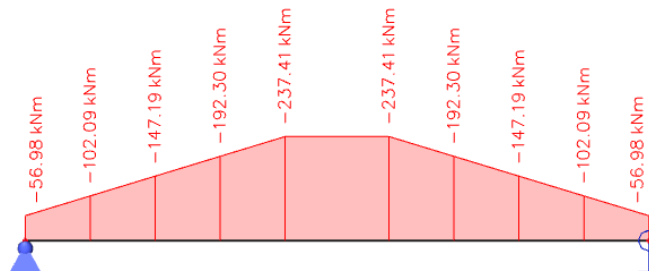
Įrašos vaizduojamos IPE 400 profilio 6 m ilgio sijai, kai ji sustiprinta 424 kN jėga įtemptais lynais. Atraminio stovo aukštis 0,3 m, atstumas nuo sijos atramos iki atraminio stovo 2,5 m, nuolatinė apkrova 8 kPa, naudojimo 4 kPa. Lyno įtvirtinimo taškas – 0,12 m žemiau sijos neutralios ašies.



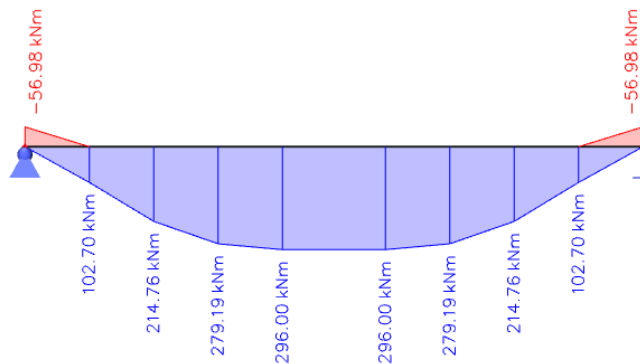
P.5.1 pav. Siją veikiančios jėgos bei momentai nuo stiprinimo sistemos poveikio



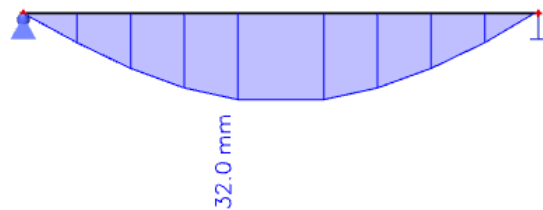
P.5.2 pav. Momentų diagrama nuo išorinių apkrovų



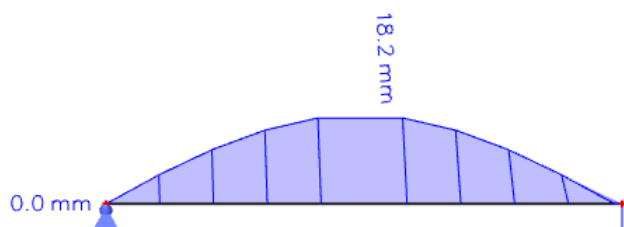
P.5.3 pav. Momentų diagrama nuo stiprinimo sistemos jėgų poveikio



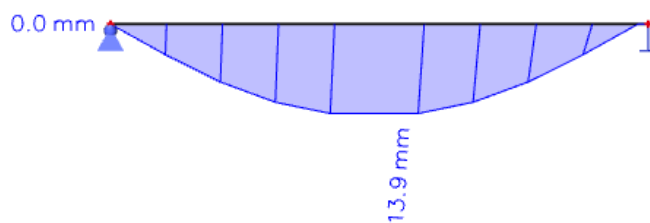
P.5.4 pav. Sustiprintos konstrukcijos momentų diagrama



P.5.5 pav. Įlinkio diagrama nuo išorinių apkrovų



P.5.6 pav. Įlinkių diagrama nuo stiprinimo sistemos jėgų poveikio



P.5.7 pav. Sustiprintos konstrukcijos įlinkio diagrama