



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

Giedrius Aluška

JUNGIŲ FORMOS ĮTAKA KOMPOZITINIŲ SIJŲ ELGSENAI
INFLUENCE OF SHAPES OF SHEAR CONNECTORS ON COMPOSITE
BEAMS BEHAVIOR

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvosios šiuolaikinės konstrukcijos specializacija

Statybos inžinerija 02T mokslo kryptis

Vilnius, 2015

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

METALINIŲ IR MEDINIŲ KONSTRUKCIJŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Antanas Šapalas

(Vardas, pavardė)

(Data)

Giedrius Aluška

JUNGIŲ FORMOS ĮTAKA KOMPOZITINIŲ SIJŲ ELGSENAI

**INFLUENCE OF SHAPES OF SHEAR CONNECTORS ON COMPOSITE
BEAMS BEHAVIOR**

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Lengvosios šiuolaikinės konstrukcijos specializacija

Statybos inžinerija 02T studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Antanas Šapalas

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

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantas

lekt. Lina Rutkienė

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

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2015

Vilniaus Gedimino technikos universitetas Statybos fakultetas Metalinių ir medinių konstrukcijų katedra	ISBN Egz. sk. Data-.....-.....	ISSN
Antrosios pakopos studijų Statinių konstrukcijų programos magistro baigiamasis darbas Pavadinimas Jungių formos įtaka kompozitinių sijų elgsenai Autorius Giedrius Aluška Vadovas prof. dr. Antanas Šapalas		
Kalba: lietuvių		
Anotacija Šiuolaikinėje statyboje vis dažniau ir plačiau naudojamos kompozitinės plieno-betono konstrukcijos, kurių darbo įpatumai yra sudėtingi ir nėra iki galo ištirti. Baigiamajame magistro darbe nagrinėjama šlyties jungių formos įtaka kompozitinių plieno-betono sijų elgsenai. Atlikti kompozitinių sijų stiprio ir standumo bei šlyties jungių laikomosios galios analitiniai skaičiavimai. Su SolidWorks kompiuterine programa išanalizuotos keturios kompozitinės plieno-betono sijos su skirtingomis šlyties jungėmis. Analizuojami buvo kompozitinės sijos poslinkiai, sluoksnių praslydimas, įtempių pasiskirstymas bei deformacijos. Visų sijų gauti rezultatai palyginti tarpusavyje ir nustatyta su kuriomis jungėmis kompozitinės sijos mažiausiai įlinksta bei įvyksta mažiausias praslydimas tarp sluoksnių. Darbą sudaro trys dalys: literatūros apžvalga, teoriniai skaičiavimai ir kompiuterinis modeliavimas. Pirmoje dalyje aptariama kompozitinių plieno-betono konstrukcijų elgsena. Antroje dalyje atliekami stiprio ir standumo teoriniai skaičiavimai. Trečioje dalyje atliekamas kompozitinių sijų su skirtingos formos jungėmis kompiuterinis modeliavimas ir gauti rezultatai lyginami tarpusavyje. Darbo apimtis – 73 p. teksto be priedų, 83 iliustr., 4 lent., 19 bibliografinių šaltinių. Atskirai pridedami darbo priedai.		
Prasminiai žodžiai: kompozitas, jungės, sija, plienas, betonas.		

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Civil Engineering Department of Steel and Timber Structures	ISBN _____ ISSN _____ Copies No. Date-.....-.....
---	--

Master Degree Studies Structural Engineering study programme Master Graduation Thesis	
Title	Influence of shapes of shear connectors on composite beams behavior
Author	Giedrius Aluška
Academic supervisor	Prof Dr Antanas Šapalas

Thesis language:
 Lithuanian

Annotation In modern construction composite steel-concrete structures are becoming more and more widely used, whose features are complex and not fully investigated. Thesis examines the influence of shear connectors form to composite steel-concrete beams behavior. Perform analytical calculations of composite beam strength and stiffness, bearing capacity of shear connectors. Using SolidWorks computer program analyze four composite steel-concrete beams with different shear flanges. Analyze composite beam displacements, layers slipping, distribution of stresses and deformations. All of the results for the beams were compared and connectors were determined with wich composite beams has the smallest deflections and smallest slip between the layers. The work consists of three parts: a literature review, theoretical calculations and computer simulations. The first part deals with composite steel-concrete structures behavior. In the second part theoretical calculations for strength and stiffness. The third part carried out computer simulations of composite beams with different shaped flanges and the result comparison with each other. Thesis consist of - 73 p. text without appendixes, 83 pictures., 4 tables., 19 bibliographical entries. Appendixes included.

Keywords: composite, connectors, beam, steel, concrete.
--

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	12
ĮVADAS	13
1. LITERATŪROS APŽVALGA	14
1.1. Kompozitinės plieno betono konstrukcijos.....	14
1.2. Kompozitinių plieno-betono sijų medžiagų savybės	20
1.2.1. Statybinis plienas.....	20
1.2.2. Betonas	21
1.3. Kompozitinių plieno betono sijų darbo analizė	22
1.3.1. Konstrukcijos elgsena	22
1.3.2. Šlyties jungtis.....	25
1.4. Kompozitinių plieno betono sijų skaičiavimo analizė	26
1.4.1. Laikomoji galia	26
1.4.2. Jungties stiprumas.....	32
1.4.3. Iliskis	36
1.5. Skyriaus išvados	37
2. KOMPOZITINIŲ PLIENINIŲ-BETONINIŲ SIJŲ STIPRIO IR STANDUMO TEORINIAI SKAIČIAVIMAI.....	38
2.1. Kompozitinių plieno betono sijų skaičiavimas	38
2.2. Kompozitinių plieno betono sijų teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas	42
2.3. Skyriaus išvados	43
3. KOMPOZITINIŲ PLIENINIŲ – BETONINIŲ SIJŲ KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS	44
3.1. Kompiuterinio modeliavimo metodika	44
3.2. Kompozitinių plieno-betono sijų su skirtingomis šlyties jungėmis gauti rezultatai	45
3.2.1. Kompozitinė plieno-betono sija S-1	45
3.2.2. Kompozitinė plieno-betono sija S-2	50
3.2.3. Kompozitinė plieno-betono sija S-3	55
3.2.4. Kompozitinė plieno-betono sija S-4	61
3.3. Kompozitinių plieno-betono sijų su skirtingomis šlyties jungėmis gautų rezultatų palyginimas	66
3.4. Skyriaus išvados	70
IŠVADOS IR SIŪLYMAI	71

LITERATŪRA	72
A priedas.....	74

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Kompozitinė perdanga iš plieninių valcuotų dvitėjinio profiliuoto sijų ir betono plokštės	14
1.2 pav. Kompozitinė perdanga iš metalinių santvarų ir betono plokštės.....	15
1.3 pav. Kompozitinė plieno-betono sija su plieniniu paklotu.....	15
1.4 pav. Plieninio lakšto ir betono sukibimo tipai (pagal Structural Steelwork... 2001)	16
1.5 pav. Kompozitinė sija, papildomai išramstyta laikinosiomis atramomis.....	17
1.6 pav. Kompozitinė perdanga naudojant išgaubtas plienines sijas	17
1.7 pav. Kompozitinė perdanga naudojant tiesias plienines sijas	17
1.8 pav. Šlyties jungės (pagal Johnson, 2004)	18
1.9 pav. Stiklo pluošto strypų ir armatūrinio plieno įtempių ir deformacijų diagramos (Timinskas <i>et al.</i> 2012).....	19
1.10 pav. Mažaanglio plieno tempimo diagrama (pagal Mikuckis 2008).....	20
1.11 pav. Betoninių prizmių (a), kubų (b) ir kubų panaikinus trintį (c) suirimo pobūdis.....	21
1.12 pav. Nekompozitinės ir kompozitinės sijos elgsenos palyginimas (pagal Caprani 2008).....	23
1.13 pav. Šlijamosios jungties laipsnis (pagal Structural Steelwork... 2001)	23
1.14 pav. Sudėtinės sijos be jungties ir su visa jungtimi įtempių pasiskirstymas (pagal Structural Steelwork... 2001).....	24
1.15 pav. Kompozitinės ir dviejų tipų nekompozitinių sijų palyginimas (pagal Structural Steelwork... 2001).....	24
1.16 pav. Kompozitinės sijos galimi suirimo atvejai	25
1.17 pav. Lanksčiųjų ir standžių jungčių priklausomybės tarp stiprumo ir poslinkio diagramos (Structural Steelwork... 2001)	25
1.18 pav. Betono suirimas ties šlyties jungė (pagal Rackham <i>et al.</i> 2009).....	26
1.19 pav. Efektyvusis betoninės plokštės plotis (LST EN 1994-1-1:2005).....	27
1.20 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis betono plokštėje	28
1.21 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje.....	29
1.22 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje.....	30
1.23 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje.....	31
1.24 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje.....	32
1.25 pav. Privirinta galvelinė jungė (Structural Steelwork... 2001).....	33
1.26 pav. Privirinta kampuotinė jungė (Cosenza, Zandonini 1999)	34
1.27 pav. Privirinta lovinė jungė (Cosenza, Zandonini 1999)	35
2.1 pav. Kompozitinės plieno betono sijos skerspjūvis	38

2.2 pav. Įtempių diagrama, kai neutrali ašis betono plokštėje	39
2.3 pav. Galvelinė jungė	40
2.4 pav. Kampuotinė su armatūros strypu jungė.....	40
2.5 pav. Privirinta lovinė (UPN 80) jungė	41
2.6 pav. Kompozitinių plieno-betono sijų šlyties jungių laikomųjų galių grafikas	43
3.1 pav. Kompozitinės plieno-betono sijos kompiuterinis modelis	44
3.2 pav. Kompozitinės sijos S-1 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas.....	45
3.3 pav. Kompozitinės sijos S-1 geometrinis modelis	46
3.4 pav. Kompozitinės sijos S-1 poslinkių diagrama.....	46
3.5 pav. Kompozitinės sijos S-1 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi	47
3.6 pav. Kompozitinės sijos S-1 Von Mises įtempių diagrama	47
3.7 pav. Kompozitinės sijos S-1 normalinių σ_x įtempių diagrama	48
3.8 pav. Kompozitinės sijos S-1 normalinių σ_y įtempių diagrama	48
3.9 pav. Kompozitinės sijos S-1 normalinių σ_z įtempių diagrama.....	48
3.10 pav. Kompozitinės sijos S-1 ϵ_x deformacijų diagrama	49
3.11 pav. Kompozitinės sijos S-1 ϵ_y deformacijų diagrama	49
3.12 pav. Kompozitinės sijos S-1 ϵ_z deformacijų diagrama.....	50
3.13 pav. Kompozitinės sijos S-2 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas.....	50
3.14 pav. Kompozitinės sijos S-2 geometrinis modelis	51
3.15 pav. Kompozitinės sijos S-2 poslinkių diagrama.....	51
3.16 pav. Kompozitinės sijos S-2 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi	52
3.17 pav. Kompozitinės sijos S-2 Von Mises įtempių diagrama	52
3.18 pav. Kompozitinės sijos S-2 normalinių σ_x įtempių diagrama	53
3.19 pav. Kompozitinės sijos S-2 normalinių σ_y įtempių diagrama	53
3.20 pav. Kompozitinės sijos S-2 normalinių σ_z įtempių diagrama.....	54
3.21 pav. Kompozitinės sijos S-2 ϵ_x deformacijų diagrama	54
3.22 pav. Kompozitinės sijos S-2 ϵ_y deformacijų diagrama	55
3.23 pav. Kompozitinės sijos S-2 ϵ_z deformacijų diagrama.....	55
3.24 pav. Kompozitinės sijos S-3 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas.....	56
3.25 pav. Kompozitinės sijos S-3 geometrinis modelis	56
3.26 pav. Kompozitinės sijos S-3 poslinkių diagrama.....	57
3.27 pav. Kompozitinės sijos S-3 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi	57
3.28 pav. Kompozitinės sijos S-3 Von Mises įtempių diagrama	58
3.29 pav. Kompozitinės sijos S-3 normalinių σ_x įtempių diagrama	58
3.30 pav. Kompozitinės sijos S-3 normalinių σ_y įtempių diagrama	59

3.31 pav. Kompozitinės sijos S-3 normalinių σ_z įtempių diagrama.....	59
3.32 pav. Kompozitinės sijos S-3 ε_x deformacijų diagrama	60
3.33 pav. Kompozitinės sijos S-3 ε_y deformacijų diagrama	60
3.34 pav. Kompozitinės sijos S-3 ε_z deformacijų diagrama.....	61
3.35 pav. Kompozitinės sijos S-4 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas.....	61
3.36 pav. Kompozitinės sijos S-4 geometrinis modelis	62
3.37 pav. Kompozitinės sijos S-4 poslinkių diagrama.....	62
3.38 pav. Kompozitinės sijos S-4 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi	62
3.39 pav. Kompozitinės sijos S-4 Von Mises įtempių diagrama	63
3.40 pav. Kompozitinės sijos S-4 normalinių σ_x įtempių diagrama	63
3.41 pav. Kompozitinės sijos S-4 normalinių σ_y įtempių diagrama	64
3.42 pav. Kompozitinės sijos S-4 normalinių σ_z įtempių diagrama.....	64
3.43 pav. Kompozitinės sijos S-4 ε_x deformacijų diagrama	65
3.44 pav. Kompozitinės sijos S-4 ε_y deformacijų diagrama	65
3.45 pav. Kompozitinės sijos S-4 ε_z deformacijų diagrama.....	66
3.46 pav. Kompozitinių sijų įlinkių grafikas.....	67
3.47 pav. Praslydimo tarp kompozitinių sijų sluoksnių grafikas	68
3.48 pav. Kompozitinių sijų normalinių σ_x įtempių grafikas.....	69
3.49 pav. Kompozitinių sijų deformacijų ε_x grafikas.....	69
3.50 pav. Kompozitinių sijų metalo sąnaudų jungėms palyginimo grafikas	70
A.1 pav. Kompozitinės sijos S-1 įtempių intensyvumo diagrama	74
A.2 pav. Kompozitinės sijos S-1 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama	74
A.3 pav. Kompozitinės sijos S-2 įtempių intensyvumo diagrama	75
A.4 pav. Kompozitinės sijos S-2 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama	75
A.5 pav. Kompozitinės sijos S-3 įtempių intensyvumo diagrama	75
A.6 pav. Kompozitinės sijos S-3 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama	76
A.7 pav. Kompozitinės sijos S-4 įtempių intensyvumo diagrama	76
A.8 pav. Kompozitinės sijos S-4 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama	76

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Jungių stiprumo skaičiavimas (Rankovič <i>et al.</i> 2002)	33
2 lentelė. Kompozitinių sijų teorinio įlinkio palyginimas su kompiuteriniu	67
3 lentelė. Kompozitinių sijų sluoksnių praslydimas	68
4 lentelė. Kompozitinių sijų metalo sąnaudos jungėms	70

IVADAS

Temos aktualumas. Šiuolaikinėje statyboje vis plačiau naudojamos kompozitinės plieno-betono konstrukcijos, nes tinkamai sujungus šias medžiagas gaunamos ekonomiškesnės ir efektyvesnės konstrukcijos. Kadangi kompozitinėse konstrukcijose sujungiamos dvi skirtingos medžiagos, todėl tokių konstrukcijų darbo ypatumai yra sudėtingi ir iki galo neištirti.

Mokslinė problema. Kompozitinės plieno-betono konstrukcijos yra sudarytos iš plieninių sijų ir betoninių plokščių, kurios sujungtos šlyties jungėmis. Žinant, kad betonas yra stiprus gniuždymui, bet silpnas tempimui, o plienas yra stiprus tempimui, bet ploni plieniniai elementai yra jautrūs gniuždymui, kiekviena medžiaga naudojama kompozitinėse sijose, pasinaudojant jos teigiamomis savybėmis. Kompozitinės konstrukcijos sluoksnių bendro darbo efektyvumui užtikrinti būtina gera jungtis tarp skirtingų sluoksnių. Bendras darbas tarp plieninės sijos ir betoninės plokštės užtikrinamas mechaninėmis jungėmis, bet jungės skatina pleišėjimą, o tai gali sumažinti konstrukcijos ilgaamžiškumą.

Tyrimo objektas – kompozitinės plieno-betono sijos su skirtingomis šlyties jungėmis.

Darbo uždaviniai:

1. išanalizuoti esamą literatūrą, kurioje aprašoma kompozitinės plieno-betono konstrukcijos;
2. Analitiškai apskaičiuoti kompozitinės plieno-betono sijos ir šlyties jungių laikomąją galią pagal literatūroje pateiktas metodikas;
3. Kompiuterine programa išanalizuoti kompozitinių plieno-betono sijų su skirtingomis šlyties jungėmis elgseną;
4. Palyginti gautus rezultatus.

Darbo tikslas – įvertinti plieninių jungių formos įtaką kompozitinės plieno-betono sijos bendram darbui.

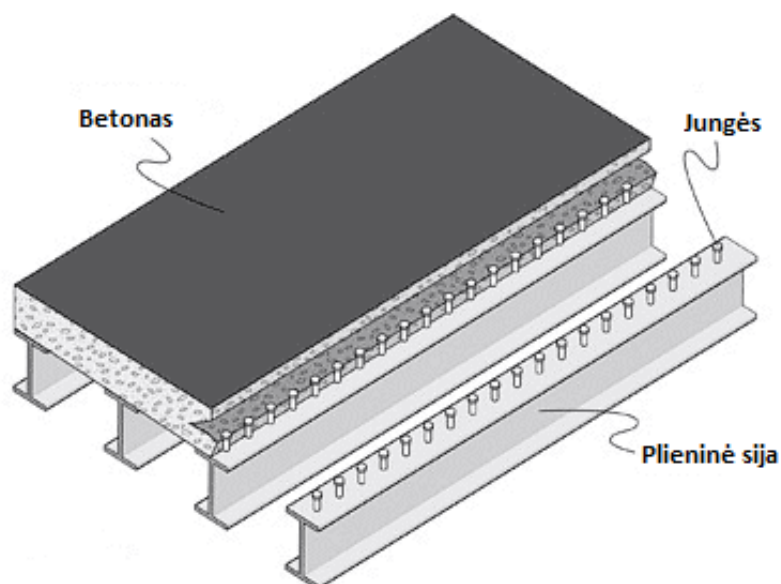
Tyrimo metodai: literatūros analizė, analitinis skaičiavimas, kompiuterinis tyrimas, gautų rezultatų palyginimas.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

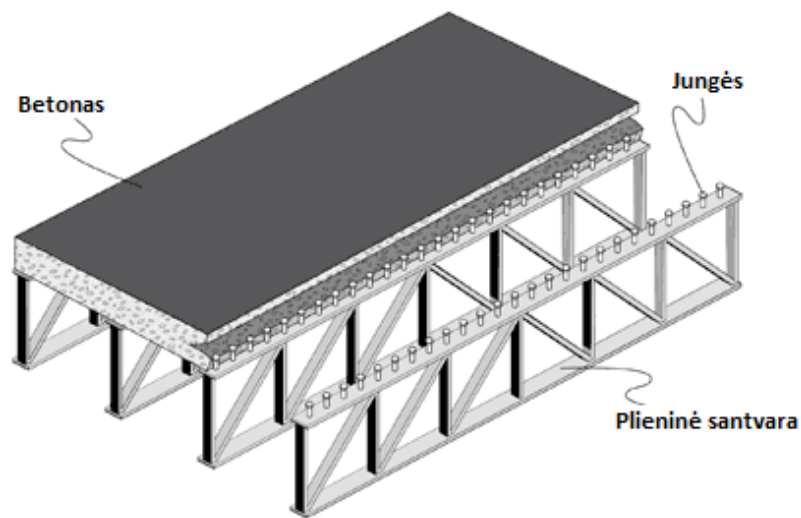
1.1. Kompozitinės plieno betono konstrukcijos

Vis dažniau pastatų statyboje naudojamos kompozitinės plieno-betono konstrukcijos, kurios medžiagų sąnaudų ir laikomosios galios atžvilgiu yra efektyvesnės ir ekonomiškesnės už įprastas gelžbetonines konstrukcijas. Kompozitinės konstrukcijos sudarytos iš plieninių ir betoninių elementų. Kad konstrukcija sąveikautų kaip kompozitinis vienalytis elementas, turi būti užtikrinta bendra sąveika tarp plieninių ir betoninių elementų. Bendra sąveika užtikrinama įrengus plieno ir betono sąlyčio paviršiuje mechanines jungtis, kurios perima šlyties deformacijas ir neleidžia paviršiams pasislinkti vienas kito atžvilgiu.

Kompozitinės sijos dažniausiai būna sudarytos iš valcuoto dvitėjinio profiliuotą (1.1 pav.) ir betoninės plokštės. Gali būti naudojamos ir perforuotos plieno sijos bei metalinės santvaros (1.2 pav.).

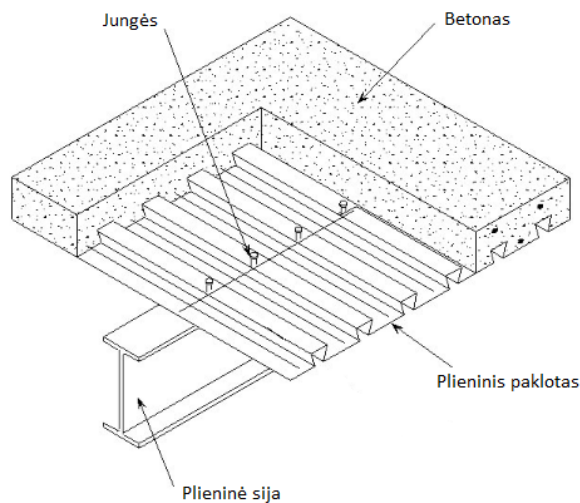


1.1 pav. Kompozitinė perdanga iš plieninių valcuotų dvitėjinio profiliuotų sijų ir betono plokštės



1.2 pav. Kompozitinė perdanga iš metalinių santvarų ir betono plokštės

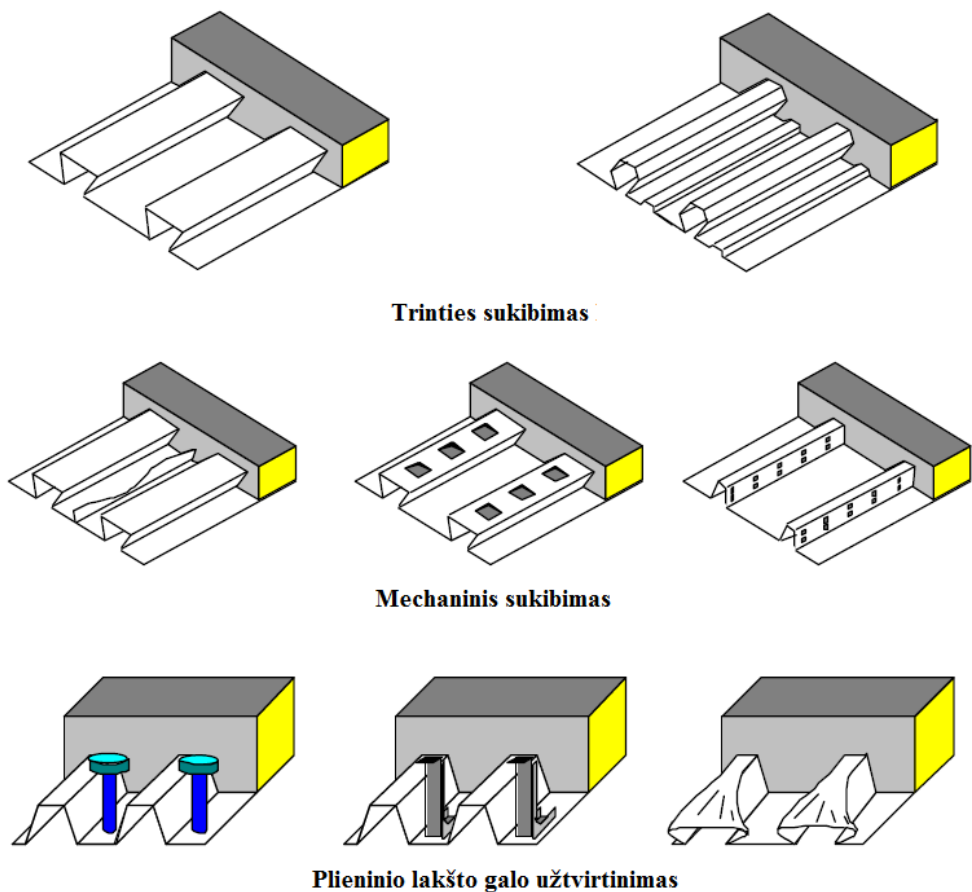
Kompozitinės plieno-betono sijos gali būti su plieniniu paklotu (1.3 pav.), kuriam naudojami plieniniai profiliuoti lakštai. Naudojant plieninį paklotą nereikalingi klojiniai, kurių įrengimas užima daug laiko ir taip pagreitinamos statybos. Įrengtas plieninis paklotas perima kompozitinėje sijoje veikiančius tempimo įtempius ir taip sumažina reikiamos armatūros kiekį.



1.3 pav. Kompozitinė plieno-betono sija su plieniniu paklotu

Norint užtikrinti bendrą darbą tarp plieninio lakšto ir betono, turi būti geras sukibimas. Sukibimas gali būti kelių tipų (Structural Steelwork... 2001):

- cheminis, kuris yra labai trapus ir nepatikimas, todėl jis negali būti vertinamas skaičiavimais;
- trinties, kuris negali atlaikyti didelių šlyties jėgų;
- mechaninis, kai sukibtis padidinama įrengiant įspaudimus plieniniame lakšte;
- lakšto galo užtvirtinimas, kai plieninio lakšto galas užtvirtinamas įrengiant įvairias junges ar deformuojant lakšto galus.

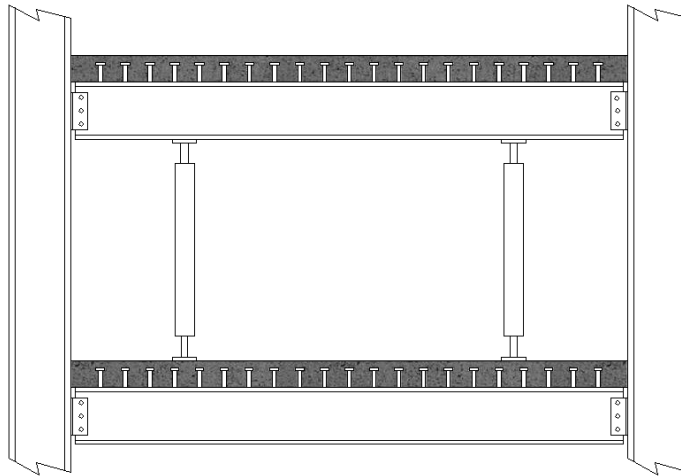


1.4 pav. Plieninio lakšto ir betono sukibimo tipai (pagal Structural Steelwork... 2001)

Plokštės tarpatramis turi standžiąją šlyjamąją jungtį, jei didėjanti išilginės šlyjamosios jungties laikomoji galia nebedidina skaičiuotinės lenkiamosios elemento galios. Kitu atveju šlyjamoji jungtis yra iš dalies standi (LST EN 1994-1-1:2005).

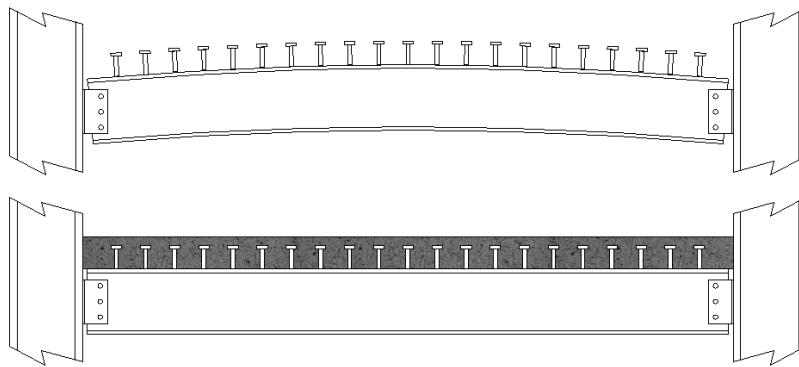
Atsižvelgiant į sijų skerspjūvį ir tarpatramio ilgį, perdangos įrengimo metu jos gali būti papildomai išramstomos laikinosiomis atramomis. Naudojant laikinas atramas, kurios įrengiamos po sijomis, išvengiama papildomo įlinkio, nes visas konstrukcines apkrovas statybos metu perima atramos (1.5 pav.). Sukietėjus užlietam betonui, plieninė sija ir betoninė perdanga įsitraukia į bendrą darbą ir pašalinus atramas perima visas apkrovas. Įrengiant laikinas atramas gali būti naudojamos mažesnio skerspjūvio plieninės sijos ir dėl mažesnio įlinkio lengviau kontroliuoti perdangos storį. Laikinių atramų įrengimas turi ir trūkumų:

- sumažinama laisva erdvė, kurioje laisvai gali judėti darbininkai;
- reikalauja papildomos darbo jėgos;
- pailginamas konstrukcijos įrengimo laikas.

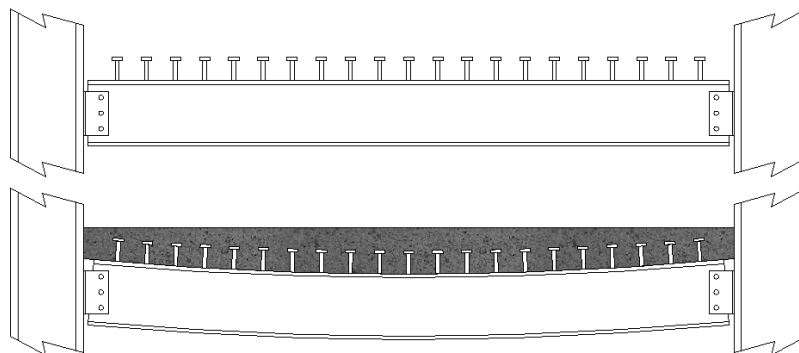


1.5 pav. Kompozitinė sija, papildomai išramstyta laikinosiomis atramomis

Nenaudojant atramų montavimo metu visas apkrovas turi atlaikyti plieninė sija, todėl sijos įlinkis bus didesnis už paremtos sijos įlinkį. Norint sumažinti įlinkį, reikia didinti plieninės sijos skerspjūvį. Galimas būdas išvengti didelio įlinkio – naudoti plienines sijas, išlenktas į priešingą pusę apkrovos veikimo kryptį, kuri užliejus perdangos betoną nuo atsiradusios apkrovos išsitiesina (1.6 pav.). Jei plieninė sija bus neišgaubta ar neišramstyta, užliejus betoną ant jos ji įlinkis ir norint išgauti lygią perdangos viršutinę dalį, betono sluoksnis ties sijos viduriu, kur įlinkis didžiausias, turės būti storesnis (1.7 pav.). Tokiu atveju betono tūris paprastai bus 10–15 % didesnis už pastovaus storio perdangos.

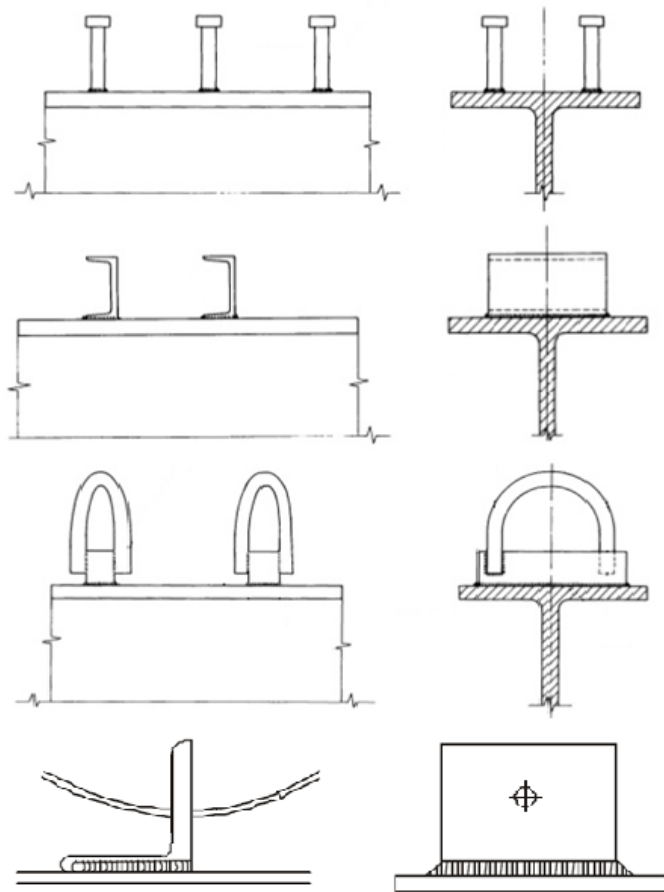


1.6 pav. Kompozitinė perdanga naudojant išgaubtas plienines sijas



1.7 pav. Kompozitinė perdanga naudojant tiesias plienines sijas

Kompozitinės sijos yra sudarytos iš plieninių sijų ir betoninių plokščių, kurios sujungtos šlyties jungėmis. Žinant, kad betonas yra stiprus gniuždymui, bet silpnas tempimui, o plienas yra stiprus tempimui, bet ploni plieniniai elementai yra jautrūs gniuždymui, kiekviena medžiaga naudojama kompozitinėse sijose, pasinaudojant jos teigiamomis savybėmis. Kompozitinės sijos medžiagų sąnaudų ir laikomosios galios atžvilgiu yra efektyvesnės ir ekonomiškesnės už įprastas gelžbetonines ar metalines sijas. Norint užtikrinti didesnę kompozitinės sijos laikomąją galią ir mažesnius įlinkius, plieninės sijos ir betono sąlyčio paviršiuje įrengiamos jungtys, kurios perima šlyties deformacijas ir neleidžia pasislinkti paviršiams vienas kito atžvilgiu. Šlyties jungės būna įvairių formų: galvelinės, kilpinės, kampuotinės ir t.t. (1.8 pav.). Jungės privirinamos prie sijos viršutinės lentynos ir sustingus užlietam betonui įsitvirtina betono plokštėje. Jungės turi būti sukonstruotos taip, kad betoną apie jungės pagrindą būtų galima tinkamai sutankinti.



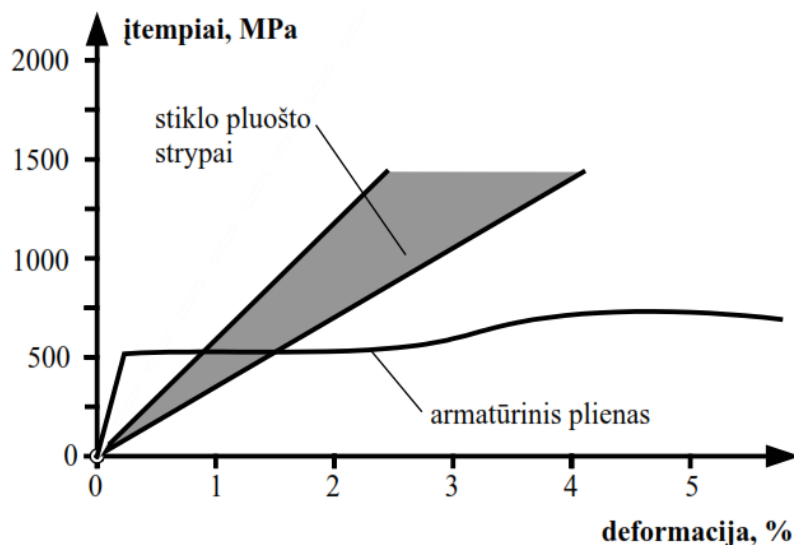
1.8 pav. Šlyties jungės (pagal Johnson, 2004)

Konstrukcijos sluoksnių bendro darbo efektyvumui užtikrinti būtina gera jungtis tarp sluoksnių. Bendras darbas tarp betoninės plokštės ir metalinės sijos užtikrinamas mechaninėmis jungėmis. Tokios jungtys turi ir trūkumų:

- jos prastai dirba, kai veikia ciklinės apkrovos, nes nuvargsta kontakto suvirinimas;
- jungės skatina pleišėjimą, nes ties jomis susidaro įtempių koncentracija.

Šie trūkumai gali žymiai sumažinti konstrukcijos ilgaamžiškumą, todėl didelę reikšmę kompozitinių sijų elgsenai turi jungių forma, nuo kurios ir priklauso išvardintų trūkumų įtakos didumas. Yra įvairių formų jungių, kurios naudojamos praktikoje, bet dažniausiai taikomos galvelinės jungės.

Kompozitinių sijų betoninė plokštė gali būti armuojama plieniniais armatūros ar stiklo pluošto strypais. Stiklo pluošto kompozitinių strypų tamprumo modulis yra kelis kartus mažesnis už plieno tamprumo modulį. Stiklo pluošto strypų ir įprasto armatūrinio plieno įtempių ir deformacijų diagramos pateiktos 1.9 pav.



1.9 pav. Stiklo pluošto strypų ir armatūrinio plieno įtempių ir deformacijų diagramos (Timinskas *et al.* 2012)

Skirtingai nuo armatūrai naudojamo plieno, turinčio takumo aikštelę, stiklo pluošto armatūra iki suirimo deformuojasi tiesiškai tamptariai, o jos suirimo pobūdis yra trapus. Siekiant užtikrinti saugos ribinį būvį, konstrukcijos būna perarmuojamos, kad suirimas prasidėtų dėl gniuždomojo betono laikomosios galios praradimo (ACI 440.IR-06 2006).

Armuoto betono konstrukcijų irimo dėl gniuždomojo betono metu pasireiškia riboto dydžio plastinės deformacijos (Timinskas *et al.* 2012). Vienas iš būdų padidinti betono plastiškumą yra dispersinis armavimas. Dispersiškai plieno plaušu armuotas betonas įgyja geresnes mechanines savybes: padidėja gniuždomasis stipris, ribinės suirimo deformacijos ir atsparumas pleišėjimui, gniuždomojo betono irimas tampa plastiškesnis (Banthia *et al.* 2000). Plieno plaušu armuoto betono irimas nėra trapus, todėl tai gali būti efektyvus sprendimas, užtikrinant patikimą kompozitiniais strypais armuotų konstrukcijų naudojimą (Timinskas *et al.* 2012).

1.2. Kompozitinių plieno-betono sijų medžiagų savybės

1.2.1. Statybinis plienas

Statybinis plienas – tai toks geležies lydinys, kuriame yra $\leq 1,7$ % anglies priedų (Marčiukaitis 2004).

Plienas puikiai perima ir atlaiko tempimo įtempius, todėl jis kompozitiniuose elementuose komponuojamas ten, kur yra tempimas.

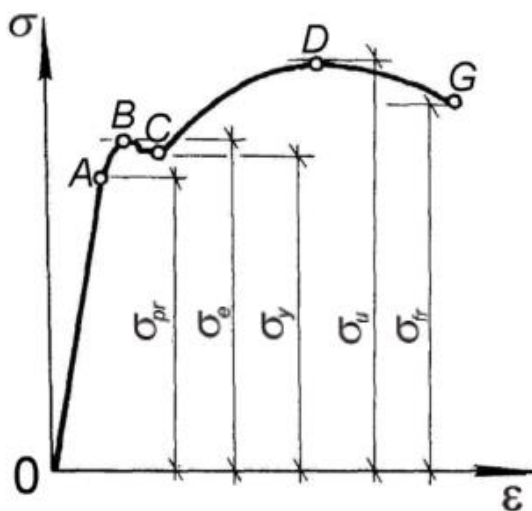
Plieno savybės (Gurskis 2008):

- tankis 7850 kg/m^3 ;
- tamprumo modulis $E \approx 210 \text{ kN/mm}^2$;
- šilumos laidumo koeficientas $\lambda = 40\text{-}60 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$;
- linijinis temperatūrinio plėtimosi koeficientas $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;
- lydymosi temperatūra $1300\text{-}1400 \text{ }^\circ\text{C}$;
- degumo klasė A1.

Plienas, atsižvelgiant į anglies kiekį, klasifikuojamas į (Gurskis 2008):

- mažaanglį (0,09-0,22% anglies);
- vidutinio anglingumo (0,25-0,5% anglies);
- daugiaanglį (0,6-1,7% anglies).

Mechaninės plieno savybės ir cheminė sudėtis yra pagrindiniai rodikliai, iš kurių sprendžiama apie plieno kokybę ir jo stiprumą. Mechaninės plieno savybės apibūdina $\sigma - \varepsilon$ diagrama (1.10 pav.).



1.10 pav. Mažaanglio plieno tempimo diagrama (pagal Mikuckis 2008)

Diagramoje yra išskiriami keli būdingi taškai, apibūdinantys pagrindines mechanines plieno savybes (Mikuckis 2008):

Proporcingumo riba (σ_{pr}) yra didžiausia įtempio reikšmė, iki kurios galioja įtempių ir deformacijų proporcingumo (Huko) dėsnis;

Tamprumo riba (σ_e) yra didžiausia įtempio reikšmė, iki kurios medžiagoje praktiškai nepastebima jokių plastinių (liekamųjų) deformacijų;

Takumo riba (σ_y) yra mažiausias įtempis, kuriam veikiant bandinys tįsta nedidėjant apkrovai;

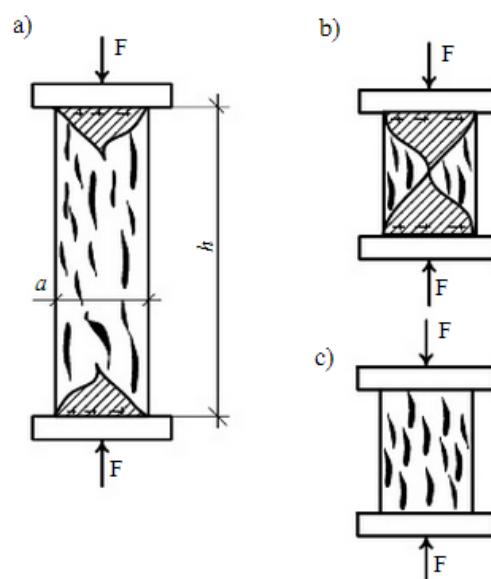
Stiprumo riba (σ_u) yra didžiausias sąlyginis įtempis, kurį atlaiko bandinys;

Trūkimo riba (σ_{tr}) yra toks įtempis, kai bandinys trūksta.

1.2.2. Betonas

Betonas yra kompozitas, kurį sudaro rišamoji medžiaga cementas ir stambieji bei smulkieji užpildai. Fizinės ir mechaninės betono savybės priklauso nuo užpildų stambumo, rišamosios medžiagos ir užpildų savybių bei kiekio, vandens ir cemento santykio, gamybos būdo, betono klojimo ir tankinimo būdų, kietėjimo sąlygų (Marčiukaitis 2004).

Vienas svarbiausių betono kokybės rodiklių yra gniuždomojo betono stipris. Centriškai gniuždant bandinį dėl betono struktūros nevienalytiškumo ir vidinių įtempių jame susidaro sudėtingas įtempių būvis. Veikiamas gniuždymo jėgos betonas deformuojasi jėgos veikimo kryptimi ir jai statmena kryptimi. Statmena kryptimi vyksta tempimo deformacijos. Kai šios deformacijos prilygsta ribinėms tempimo deformacijoms, betone atsiranda mikroplyšiai, kurie lygiagretūs jėgos veikimo kryptčiai. Kai apkrova dar padidėja, mikroplyšiai susijungia į ištisinius plyšius ir betonas suskaidomas į plonas plokšteles, kurios praranda stabilumą ir betonas pradeda irti.



1.11 pav. Betoninių prizmių (a), kubų (b) ir kubų panaikinus trintį (c) suirimo pobūdis

Betonas tempiant pleišėja esant mažai apkrovai, palyginus su gniuždymu, todėl projektuojant tempiamasis betono stipris nevertinamas.

Betono savybė deformuotis dėl ilgalaikės pastoviosios apkrovos vadinama valkšnumu. Valkšnumo deformacija priklauso nuo apkrovos didumo, apkrovos trukmės ir betono sudėties. Didžioji dalis valkšnumo deformacijos vyksta cemento akmenyje, todėl betono, turinčio daugiau cemento teslos, valkšnumo deformacija bus didesnė.

Betono susitraukimo ir valkšnumo veiksniai turi didelę įtaką ilgalaikėje apkrova veikiamų betoninių konstrukcijų įtempių ir deformacijų būviui. Ilgalaikės betono deformacijos gali keletą kartų viršyti pradines (trumpalaikes). Tokį didelį deformacijų augimą sukelia ilgalaikiai fizikiniai procesai: betono susitraukimas, valkšnumas ir pleišėjimas, atsivėrusių plyšių vystymasis ir naujų susidarymas. Šie fizikiniai procesai lemia deformacijų ir įtempių persiskirstymą betone (Kaklauskas *et al.* 2012).

Betono susitraukimu vadinamas laisvas jo tūrio mažėjimas dėl kietėjant vykstančios cemento hidratacijos ir drėgnumo kaitos. Betonai laikui bėgant traukiasi arba plečiasi neveikiant jokioms išorinėms apkrovoms, o jo susitraukimo deformacijos didėja palaipsniui ir trunką ilgą laiką.

1.3. Kompozitinių plieno betono sijų darbo analizė

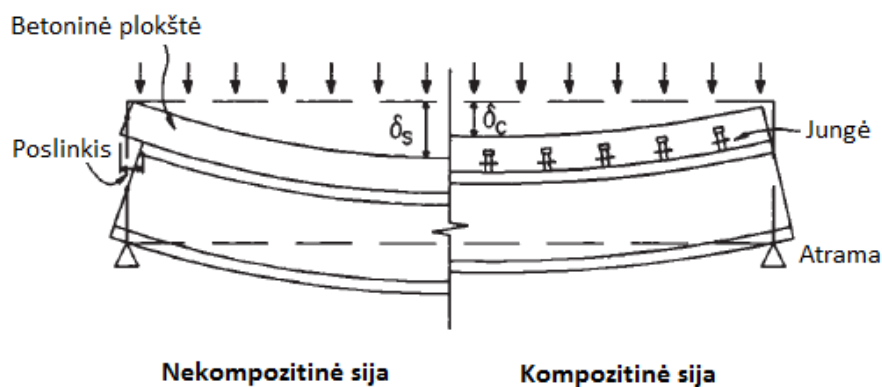
1.3.1. Konstrukcijos elgsena

Plieninės sijos su betonine perdanga gali būti projektuojamos kaip kompozitinės arba nekompozitinės konstrukcijos, priklausomai nuo tarpusavio sujungimo.

Kai konstrukcija projektuojama ne kaip kompozitinė, tada plieno sija, nesujungta su betonine plokšte, ir elementai dirba atskirai, todėl plieninė sija turi atlaikyti visas konstrukciją veikiančias apkrovas. Kadangi betono plokštė silpnai dirba lenkimui, nes ji turi atskirą neutralią ašį ir išlinksta pagal plieno siją, todėl betone atsiranda tempimo įtempiai ir jis supleišėja. Kadangi tarp betono plokštės ir plieninės sijos nėra jungties, tai jie vienas kito atžvilgiu gali judėti ir įvyksta praslydimas.

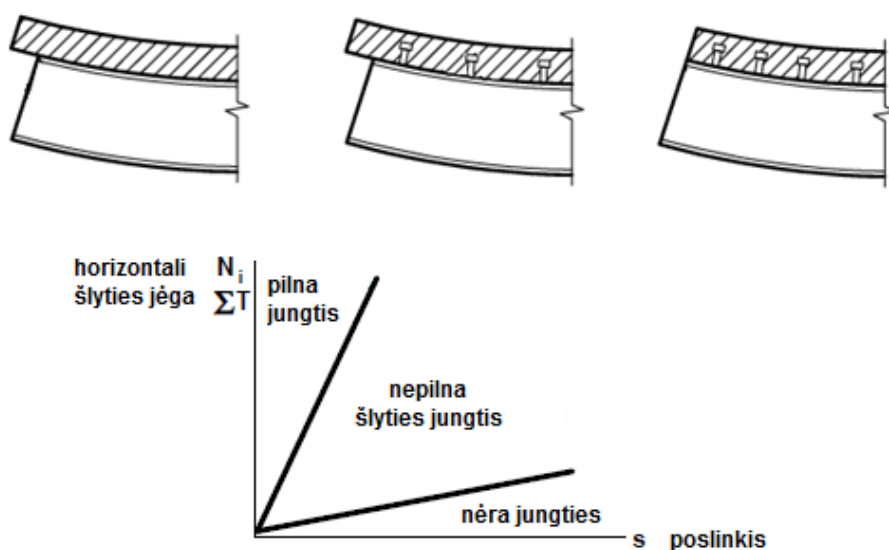
Kai konstrukcija projektuojama kaip kompozitinė, tada tarp betoninės plokštės ir plieninės sijos įrengiama jungtis, kuri suvaržo praslydimą tarp konstrukcijos elementų paviršių ir taip jie dirba kartu atlaikydami visas veikiančias apkrovas. Jungtis tarp plieno sijos ir betono plokštės gali būti įvairi, bet dažniausiai naudojamos mechaninės jungtys, kurios išdėstomos tam tikru žingsniu ant plieno sijos viršutinės lentynos.

Kompozitinės ir nekompozitinės sijos elgsenos palyginimas pateiktas 1.12 paveiksle.



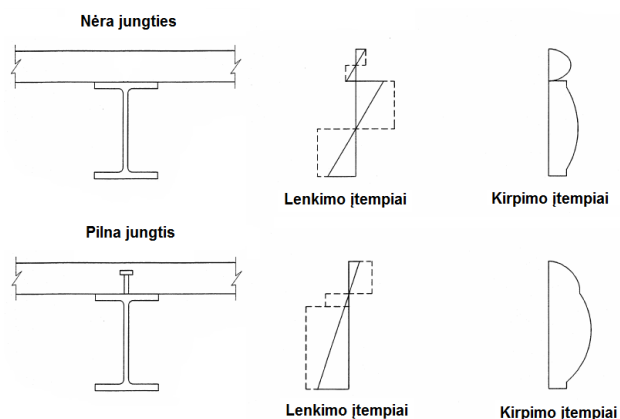
1.12 pav. Nekompozitinės ir kompozitinės sijos elgsenos palyginimas (pagal Caprani 2008)

Taip pat įtakos kompozitinių sijų elgsenai turi jungių kiekis, nuo kurio priklauso šlyjamosios jungties laipsnis. Kuo tankiau sudedamos jungės, tuo standesnė šlyjamoji jungtis gaunama tarp plieninės sijos ir betoninės perdangos. Norint įrengti visiškai standžią jungtį, reikia įrengti labai daug jungių, o tai yra ekonomiškai nepagrįsta. Dėl šios priežasties šiuo metu plačiau taikomos nevisiškai standžios jungtys tarp betono ir plieno sąvoka ir skaičiavimo metodai. Šlyjamosios jungties laipsnis pavaizduotas 1.13 paveiksle.



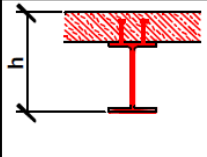
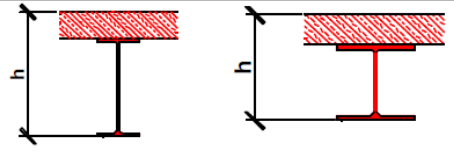
1.13 pav. Šlyjamosios jungties laipsnis (pagal Structural Steelwork... 2001)

Nekompozitinėje sijoje įtempiai pasiskirsto atskirai plieninėje sijoje ir betoninėje plokštėje, nes jie dirba kaip atskiri elementai, o kompozitinėje sijoje su visa jungtimi įtempiai pasiskirsto kaip viename elemente, nes plieninė sija ir betoninė perdanga dirba kartu kaip vienas elementas. Įtempių pasiskirstymas sudėtinėse sijose pateiktas 1.14 paveiksle.



1.14 pav. Sudėtinės sijos be jungties ir su visa jungtimi įtempių pasiskirstymas (pagal Structural Steelwork... 2001)

Kompozitinio skerspjuvio inercijos momentas yra kelis kartus didesnis nei plieninės sijos. Todėl, veikiant tai pačiai apkrovai, galima matyti, jog didžiausi įtempiai plieno sijoje yra mažesni kompozitinėje sijoje nei sijoje, kurioje sluoksniai dirba atskirai. Šis skirtumas turi įtakos sijos standumui.

				
	Kompozitinė sija		Plieno sijos be šlyties ryšių	
Plieno skerspjuvis	IPE 400		IPE 550	HE 360 B
Konstrukcijos aukštis [mm]	560		710	520
Laikomoji galia	100%		100%	100%
Plieno svoris	100%		159%	214%
Konstrukcijos aukštis	100%		127%	93%
Standumas	100%		72%	46%

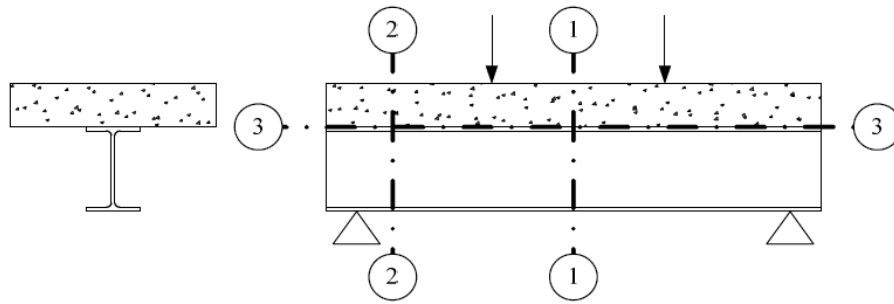
1.15 pav. Kompozitinės ir dviejų tipų nekompozitinių sijų palyginimas (pagal Structural Steelwork... 2001)

1.15 paveiksle kompozitinė sija lyginama su dviejų tipų plieninių sijų be jungčių su betonine plokšte. Laikomoji galia yra beveik tokia pati visų trijų sijų, bet standumas kompozitinės sijos yra daug didesnis. Kompozitinėje sijoje daug mažesnės medžiagų sąnaudos, todėl jos ekonomiškesnės už nekompozitines sijas.

Kompozitinės sijos stiprumui yra labai svarbus efektyvusis betono plokštės plotis, kuris dažniausiai lygus priimtam atstumui tarp plieno sijų.

Kompozitinės sijos galimi suirimo atvejai gali būti tokie (1.16 pav):

- 1 - 1 pjūvyje suirimas nuo lenkimo momento;
- 2 - 2 pjūvyje suirimas nuo skersinės jėgos;
- 3 - 3 pjūvyje suirimas nuo šlyties tarp sluoksnių.

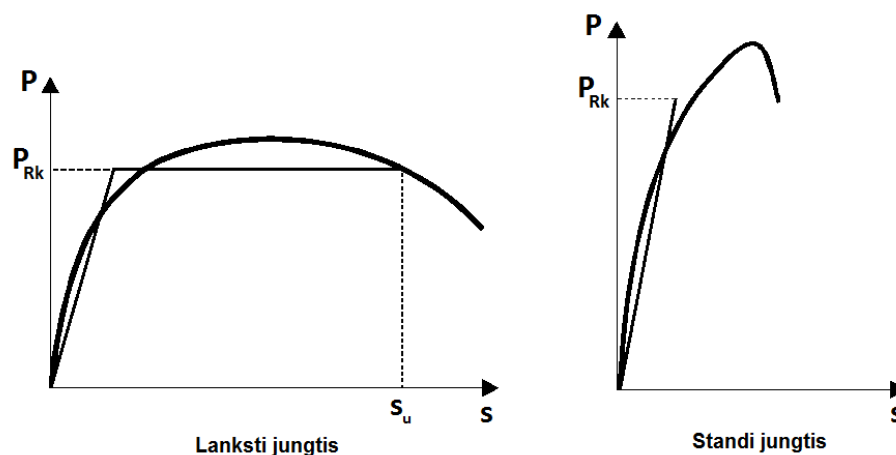


1.16 pav. Kompozitinės sijos galimi suirimo atvejai

1.3.2. Šlyties jungtis

Jungės yra vienos iš svarbiausių kompozitinės konstrukcijos elementų, nes jos perima atsiradusias horizontalias skersines jėgas ir neleidžia plieninės sijos ir betoninės plokštės paviršiams pasislinkti vienas kito atžvilgiu, taip užtikrinant bendrą konstrukcijos darbą. Jungės išdėstomos išilgai sijos taip, kad perduotų išilginę šlytį ir neleistų atsiskirti betoninei daliai ir plieninei sijai, atsižvelgiant į atitinkamą skaičiuotinės šlyjamosios jėgos pasiskirstymą (LST EN 1994-1-1:2005).

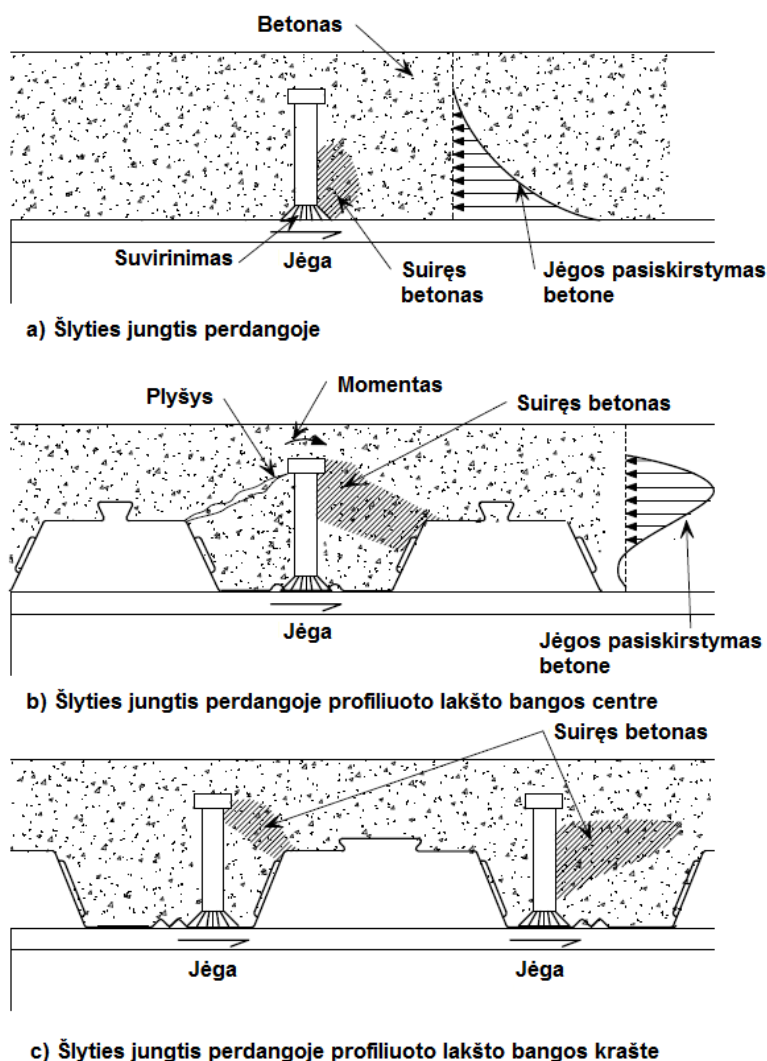
Jungės dažniausiai skirstomos į standžias ir lanksčias (Rankovič *et al.* 2002), atsižvelgiant į šlyties jėgų ir funkcinės priklausomybės pasiskirstymo tarp stiprumo ir deformacijų. Standžiosiomis jungėmis laikomos tokios jungės, kurios turi pakankamą deformacinę galią užtikrinančią šlyjamos jungties supaprastintos plastinės elgsenos modelį, o lanksčiosiomis jungėmis laikomos tokios, kurių geba deformuotis yra pakankama, kad pasiteisintų prielaida apie nagrinėjamos konstrukcijos šlyjamosios jungties idealią plastinę elgseną. Lanksčiosios jungės gali atlaikyti šlyties jėgą net esant dideliems poslinkiams tarp betono plokštės ir plieninės sijos, o standžiosioms jungėms būdingas atsiradus poslinkiui staigus suirimas. Jungčių priklausomybė tarp stiprumo ir poslinkio pateikta 1.17 paveikslo diagramose.



1.17 pav. Lanksčiųjų ir standžių jungčių priklausomybės tarp stiprumo ir poslinkio diagramos
(Structural Steelwork... 2001)

Skaičiuojant kompozitinę konstrukciją ribiniam saugos būviui, taikant plastiškumo teoriją nustatyta jog liaunos šlyties jungės yra efektyvesnės už standžias. Dėl ekonominių priežasčių naudojamos jungės su galvute, nes jas lengva privirinti, vienai jungei reikia (10-15s), o privirinimo siūlės yra kokybiškos (Rankovič *et al.* 2002).

Veikiančios šlyties jėgos pasiskirsto jungės aukštyje, todėl dėl ties jungėmis susidarantių įtempių koncentratorių, didžiausi betono įtempiai atsiranda prie jungių. Labiausiai gniuždomos betono vietos bei įtempių pasiskirstymas ties jungėmis parodytas 1.18 paveiksle.



1.18 pav. Betono suirimas ties šlyties jungė (pagal Rackham *et al.* 2009)

1.4. Kompozitinių plieno betono sijų skaičiavimo analizė

1.4.1. Laikomoji galia

Efektyvusis betoninės plokštės plotis

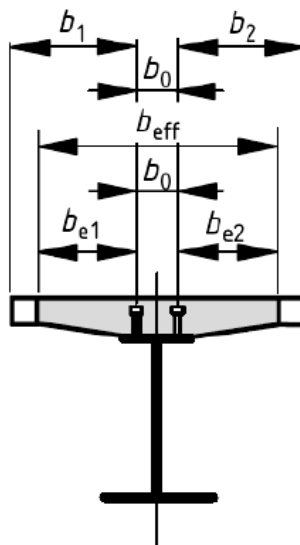
Pirmiausia turi būti apskaičiuojamas efektyvusis betoninės plokštės plotis b_{eff} . Tarpatramio viduryje arba ties tarpine atrama bendrasis efektyvusis plotis gali būti nustatomas taip:

$$b_{eff} = b_0 + \sum b_{ei};$$

čia

b_0 – atstumas tarp jungių kraštinių eilių;

b_{ei} – betoninės plokštės efektyvusis plotis lygus $L_e/8$, tačiau ne didesnis kaip lentynos plotis b_i , kuris yra atstumas nuo kraštinės jungės iki atkarpos tarp gretimų sienelių vidurio. Būdingų nekarpytųjų kompozitinių sijų, kurios projektuojamos pagal lenkiamųjų momentų gaubtinę, ilgis L_e turi būti lygus apytiksliam atstumui tarp lenkiamojo momento nulinių taškų.



1.19 pav. Efektyvusis betoninės plokštės plotis (LST EN 1994-1-1:2005)

Lenkiamoji galia

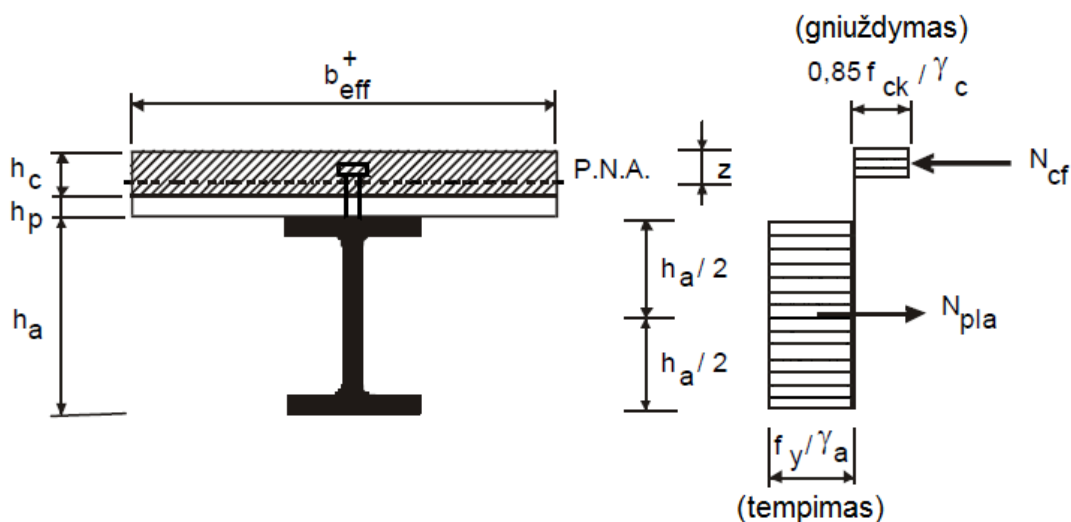
Skaiciuotinė lenkiamoji galia, kai efektyvusis sudėtinis plieno ir betono skerspjūvis yra 1 arba 2 klasės nustatoma taikant standžiąją plastiškumo teoriją. Skaiciuojant karpytoms dviatramėms kompozitinėms sijoms $M_{pl,Rd}$ taikomos tokios prielaidos:

- tarp plieno ir betono yra visiška sąveika;
- betono tempiamasis stipris yra mažas, todėl nepaisomas;
- plieninio elemento efektyviojo skerspjūvio ploto įtempiai yra lygūs skaičiuotiniam tempiamajam arba gniuždomajam stipriui pagal takumo ribą f_{yd} ;
- tempiamosios ir gniuždomosios išilginės armatūros efektyviojo skerspjūvio ploto įtempiai yra lygūs jos skaičiuotiniam tempiamajam arba gniuždomajam stipriui pagal takumo ribą f_{sd} ;
- gniuždomojo betono efektyviojo skerspjūvio ploto įtempiai yra lygūs $0,85f_{cd}$ ir pastovūs per visą aukštį tarp plastinės neutraliosios ašies ir betono labiausiai gniuždomo sluoksnio.

Plastinė lenkiamoji galia priklauso nuo plastinės neutraliosios ašies padėties. Išskiriamos trys padėtys:

- plastinė neutralioji ašis betono plokštėje;
- plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje;
- plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje.

Plastinė neutralioji ašis betono plokštėje



1.20 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis betono plokštėje

Plieninės sijos plastinė ašinė jėga (tempimas):

$$N_{pla} = A_a f_y / \gamma_a;$$

čia

A_a – plieninės sijos skerspjūvio plotas.

Betoninės plokštės ašinė jėga (gniuždymas):

$$N_{cf} = h_c b_{eff} (0,85 f_{ck} / \gamma_c);$$

čia

b_{eff} – efektyvusis betoninės plokštės plotis.

Plastinė neutralioji ašis yra betoninėje plokštėje kai:

$$N_{cf} > N_{pla}.$$

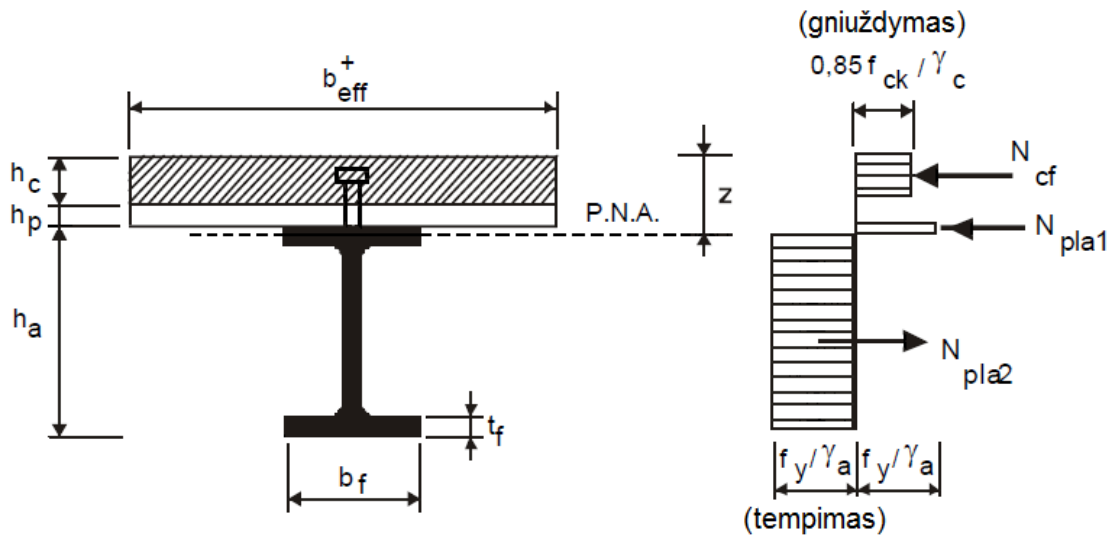
Plastinės neutraliosios ašies atstumas z nuo betoninės plokštės viršaus apskaičiuojamas taip:

$$z = N_{pla} / (b_{eff} 0,85 f_{ck} / \gamma_c) < h_c.$$

Atlaikomasis momentas:

$$M_{pl,Rd} = N_{pla} (0,5 h_a + h_c + h_p - 0,5 z).$$

Plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje



1.21 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje

Plastinė neutralioji ašis yra dvitėjo lentynoje kai:

$$N_{cf} < N_{pla}.$$

Plastinės neutraliosios ašies atstumas z nuo betoninės plokštės viršaus yra didesnis nei visos plokštės storis $(h_c + h_p)$.

Dėl plastinės neutraliosios ašies padėties plieninio dvitėjo lentynoje turi būti tenkinama ši sąlyga:

$$N_{pla1} < b_f t_f f_y / \gamma_a$$

arba

$$N_{pla} - N_{cf} < 2b_f t_f f_y / \gamma_a.$$

Statinė pusiausvyra nepasikeičia, kai dvi lygios ir priešingos jėgos N_{pla1} pridedamos į:

$$N_{cf} + N_{pla1} - N_{pla2} = 0.$$

Pridėję gauname:

$$N_{cf} + 2N_{pla1} - (N_{pla2} + N_{pla1}) = 0.$$

Pažymėjus, kad $N_{pla} = N_{pla1} + N_{pla2}$, galima daryti išvadą, kad:

$$N_{pla1} = 0,5(N_{pla} - N_{cf})$$

arba

$$N_{pla} = N_{cf} + 2N_{pla1}.$$

Gniuždomos dvitėjo lentynos dalies aukštis nustatomas taip:

$$\left[z - (h_c + h_p) \right].$$

Tada

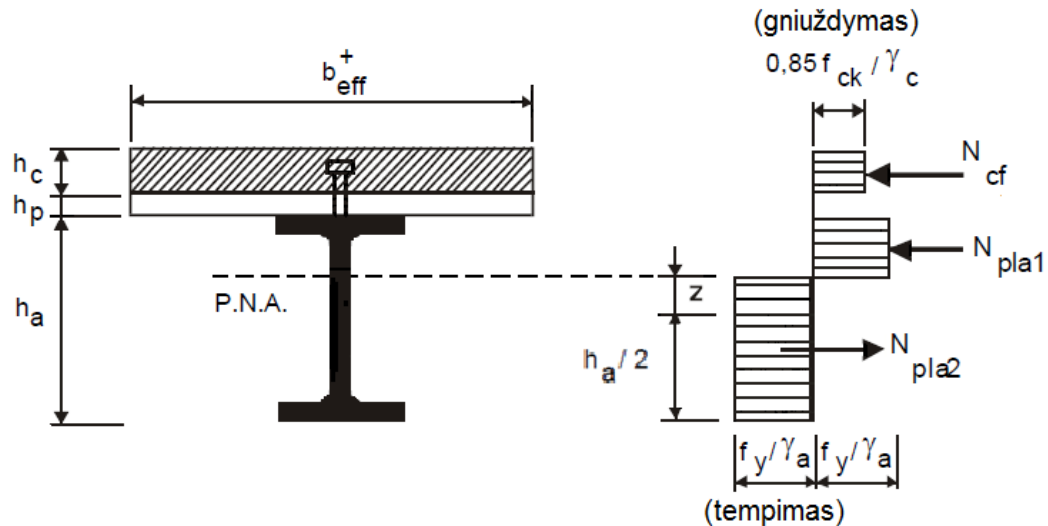
$$N_{pla1} = b_1 (z - h_c - h_p) f_y / \gamma_a;$$

$$N_{pla} = N_{cf} + 2b_1 (z - h_c - h_p) f_y / \gamma_a.$$

Atlaikomasis momentas:

$$M_{pl,Rd} = N_{pla} (0,5h_a + 0,5h_c + h_p) - 0,5(N_{pla} - N_{cf})(z + h_p).$$

Plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje



1.22 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje

Plastinė neutralioji ašis yra dvitėjo sienelėje jei tenkinamos šios sąlygos:

$$N_{cf} > N_{pla};$$

$$N_{pla} - N_{cf} > 2b_f t_f f_y / \gamma_a.$$

Atstumas tarp plastinės neutraliosios ašies ir plieninio dvitėjo centro:

$$z = N_{cf} / (2t_w f_y / \gamma_a).$$

Atlaikomasis momentas:

$$M_{pl,Rd} = M_{apl,Rd} + N_{cf} (0,5h_a + 0,5h_c + h_p) - 0,5N_{cf} z.$$

Nekarpytose kompozitinėse plieno-betono sijose ties tarpinėmis atramomis atsiranda neigiamas lenkimo momentas, todėl gniuždymo įtempius turi perimti plieninė sija, o tempimo įtempius perima betoninė plokštė ir plieninė sija priklausomai nuo plastinės neutraliosios ašies padėties. Kadangi betono tempiamasis stipris yra mažas, todėl betono plokštė papildomai armuojama.

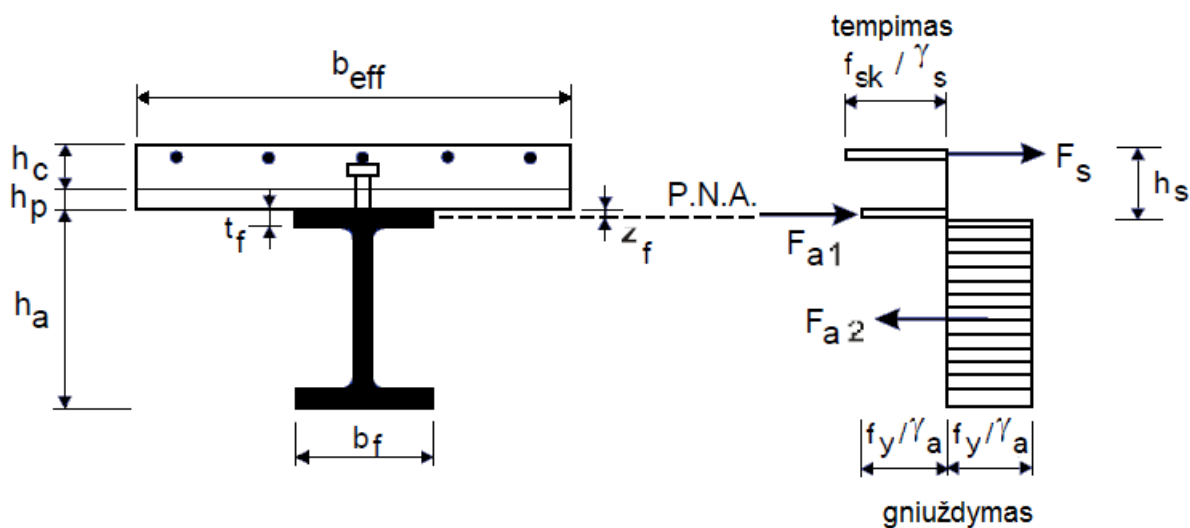
Pagrindinės prielaidos:

- tarp plieno ir betono yra visiška sąveika;
- betono tempiamasis stipris yra mažas, todėl nepaisomas.

Plastinė lenkiamoji galia priklauso taip pat nuo plastinės neutraliosios ašies padėties, tik išskiriamos dvi padėtys:

- plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje;
- plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje.

Plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje



1.23 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo lentynoje

Armatūros laikomoji galia:

$$F_s = A_s f_{sk} / \gamma_s.$$

Kad plastinė neutralioji ašis būtų plieninės sijos lentynoje turi būti tenkinamos tokios sąlygos:

$$F_a > F_s;$$

$$F_a - F_s \leq 2b_f t_f f_y / \gamma_a.$$

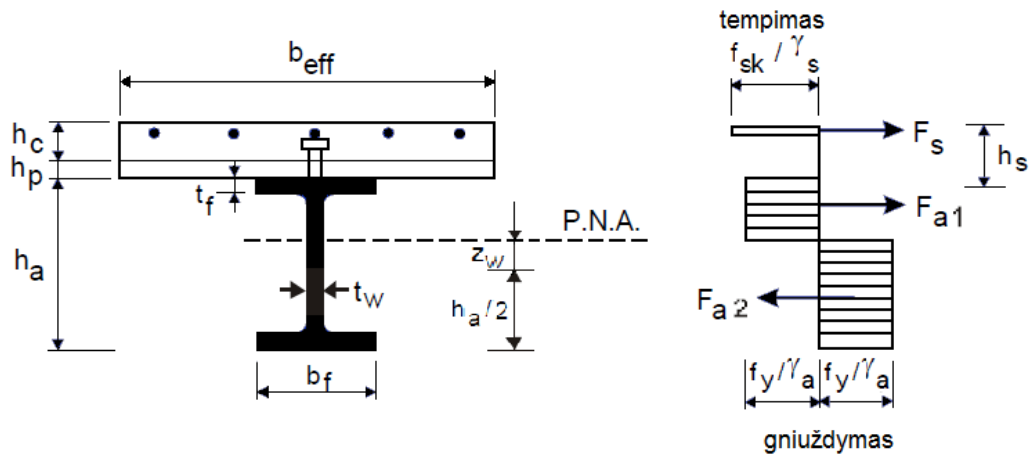
Kompozitinės sijos tempiamosios dalies laikomoji galia:

$$F_a = F_s + 2b_f z_f f_y / \gamma_a.$$

Atlaikomasis momentas:

$$M_{pl,Rd} = F_a (0,5h_a + h_s) - (F_a - F_s) (0,5z_f + h_s).$$

Plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje



1.24 pav. Įtempių diagrama, kai plastinė neutralioji ašis dvitėjo sienelėje

Plastinė neutralioji ašis bus plieninės sijos sienelėje, jei bus tenkinamos šios sąlygos:

$$F_a > F_s;$$

$$F_a - F_s > 2b_f t_f f_y / \gamma_a.$$

Atstumas z_w tarp plastinės neutraliosios ašies ir plieninės sijos skerspjūvio centro apskaičiuojamas pagal formulę:

$$z_w = \frac{\gamma_a \cdot F_s}{2t_w f_y}.$$

Atlaikomasis momentas:

$$M_{pl,Rd} = M_{apl,Rd} + F_c (0,5h_a + 0,5h_c + h_p) - 0,5F_c z_w;$$

čia

$M_{apl,Rd}$ – plastinis atsparumo momentas tik plieninės dalies.

1.4.2. Jungties stiprumas

Šlijamoji jėga T veikianti junges apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$T = \frac{V \cdot S}{I};$$

čia

V – skersinė jėga;

S – skerspjūvio statinis momentas;

I – skerspjūvio inercijos momentas.

Šlyjamoji jėga tiesiogiai priklauso nuo vertikalios skersinės jėgos, todėl labiausiai apkraunamos kraštinės jungės ir didžiausias praslydimas tarp paviršių susiformuoja sijos galuose.

Jungės laikomoji galia plastiškumo teorijos skaičiavimuose priklauso nuo dviejų kriterijų: vietinio betono gniuždymo ir šlyties jėgų jungės skerspjūvyje (Rankovič *et al.* 2002).

$$P_{Rd} = k_1 \cdot d^2 \cdot \sqrt{E_{cm} \cdot f_{ck}} \leq k_2 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4};$$

čia

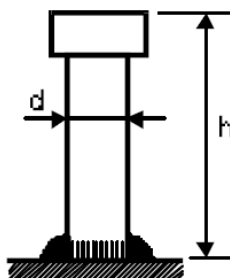
k_1 ir k_2 – koeficientai, įvertinantys skirtumą tarp skaičiuojamojo modelio ir vidutinių eksperimentinių rezultatų.

Rankovič literatūroje pateikė lentelę, kurioje yra jungių stiprumo skaičiavimo formulės suvestos iš įvairių projektavimo normų.

1 lentelė. Jungių stiprumo skaičiavimas (Rankovič *et al.* 2002)

Normos	Betono gniuždomasis stiprumas	Šlyties jungės stiprumas
SIA 161	$R_d = 0,25 \cdot d^2 \cdot \sqrt{E_b \cdot \beta_{b28}}$	$R_d = 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_u$
DIN	$R_d = \alpha \cdot 0,25 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\beta_{wk} \cdot E_b}$	$R_d \leq 0,7 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot \beta_s$
BS 5400	$R_d = 0,8 \cdot \frac{P_u}{1,1} = 0,73 \cdot P_u$	bandymais
EC4 1985	$R_d = 0,36 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{\beta_{bk} \cdot E_b} \cdot \frac{1}{\gamma_{mb}}$	$R_d = 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_u \cdot \frac{1}{\gamma_m}$
EC4 1992	$P_{Rd} = 0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} \cdot \frac{1}{\gamma_v}$	$P_{Rd} = 0,8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_v}$
JUS U.Z1.010.	$R_d = 0,25 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\beta_{b28} \cdot E_b}$	$R_d = 0,7 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_n$

Galvelinės jungės laikomoji galia



1.25 pav. Privirinta galvelinė jungė (Structural Steelwork... 2001)

Automatu privirintos galvelinės jungės skaičiuotinė šlyjamoji galia nustatoma taip:

$$P_{Rd} = \min(P_{Rd}^{(1)}; P_{Rd}^{(2)});$$

$$P_{Rd}^{(1)} = 0,8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_v};$$

$$P_{Rd}^{(2)} = 0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}} \cdot \frac{1}{\gamma_v};$$

čia

α – korekcijos koeficientas, kuris nustatomas:

$$\alpha = 0,2 \left(\frac{h}{d} + 1 \right), \text{ kai } 3 \leq \frac{h}{d} \leq 4;$$

$$\alpha = 1, \text{ kai } \frac{h}{d} > 4;$$

d – jungės skersmuo, $16\text{mm} \leq d \leq 25\text{mm}$;

f_u – nustatytasis tempiamasis ribinis jungės medžiagos stipris, bet ne didesnis kaip 500N/mm^2 ;

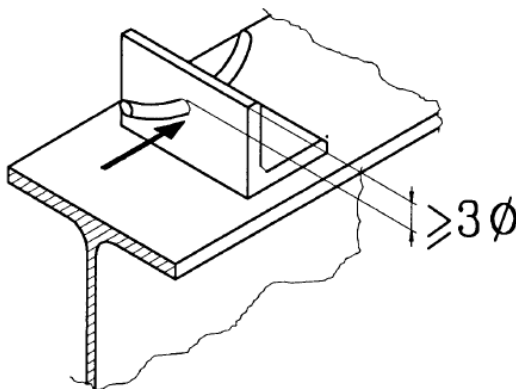
f_{ck} – charakteristinis ritininis ne mažesnio kaip 1750 kg/m^3 tankio nagrinėjamo amžiaus betono gniuždomasis stipris;

γ_v – dalinis koeficientas. Rekomenduojamoji reikšmė yra 1,25;

h – bendrasis vardinis jungės aukštis;

E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis.

Kampuotinės jungės laikomoji galia



1.26 pav. Privirinta kampuotinė jungė (Cosenza, Zandonini 1999)

Privirintos kampuotinės jungės skaičiuotinė šlyjamoji galia nustatoma taip:

$$P_{Rd} = \frac{10 \cdot b \cdot h^{3/4} \cdot f_{ck}^{2/3}}{\gamma_v};$$

čia

b – jungės plotis;

h – jungės aukštis;

f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris;

γ_v – dalinis koeficientas. Rekomenduojamoji reikšmė yra 1,25.

Strypo skersmuo turi atitikti šią sąlygą:

$$\frac{A_e \cdot f_{sk}}{\gamma_s} \geq 0,1 \cdot P_{Rd};$$

čia

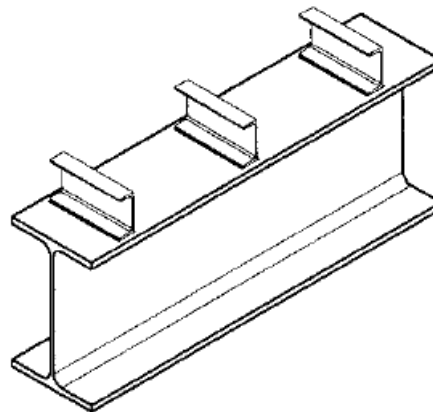
A_e – strypo skerspjūvio plotas:

$$A_e = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4};$$

f_{sk} – charakteristinis armatūros stipris pagal takumo ribą;

γ_s – armatūros dalinis koeficientas, priimamas 1,15.

Lovinės jungės laikomoji galia



1.27 pav. Privirinta lovinė jungė (Cosenza, Zandonini 1999)

Privirintos lovinės jungės skaičiuotinė šlyjamoji galia nustatoma taip:

$$P_{Rd} = \frac{0,3 \cdot (t_f + 0,5t_w) \cdot b_c \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v};$$

čia

t_f – jungės lentynos storis;

t_w – jungės sienelės storis;

b_c – jungės plotis;

f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris;

E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis;

γ_v – dalinis koeficientas. Rekomenduojamoji reikšmė yra 1,25.

1.4.3. Įlinkis

Įlinkis δ sijos viduryje, kai ji apkrauta tolygiai paskirstyta apkrova:

$$\delta = \frac{5 \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{red}};$$

čia

g – tolygiai paskirstyta apkrova į tiesinį metrą, esant tinkamumo ribiniam būviui;

L – sijos tarpatramis;

E_a – plieno tamprumo modulis, $E_a = 210 \text{ kN} / \text{mm}^2$;

I_{red} – redukuotojo skerspjūvio inercijos momentas.

Įlinkis nuo nuolatinės apkrovos ir savojo svorio įvertinamas, kai kompozitinės sijos betonas sustingsta. Europos normose priimta, jog konstrukcija dirba kaip kompozitinis elementas. Todėl betono plokštė redukuojama į atitinkamą plieninę plokštę.

$$b_t = \frac{b_{eff}}{n}.$$

Redukavimo koeficientas:

$$n = \frac{E_{steel}}{E_{c,eff}}.$$

Skaičiuojant redukuoto skerspjūvio įlinkį vietoj viso skerspjūvio inercijos momento statomas redukuotas skerspjūvio inercijos momentas.

Neparemtos konstrukcijos įlinkis nustatomas pagal formulę:

$$\delta_{total} = \delta_{constr} + \delta_{composite};$$

čia

δ_{constr} – plieninės sijos įlinkis nustatomas pagal formulę;

$\delta_{composite}$ – kompozitinės sijos įlinkis nuo tariamos nuolatinės apkrovos, kuris susideda iš nuolatinės apkrovos ir papildomos kintamos apkrovos kuri priklauso nuo konstrukcijos tipo.

1.5. Skyriaus išvados

Įrengiant perdangą vis dažniau šiuolaikinėje statyboje naudojamos metalinės sijos su gelžbetoninėmis plokštėmis. Norint efektyviau išnaudoti šių elementų darbą tikslinga juos apjungti bandram darbui. Bendras darbas užtikrinamas įrengiant plieno ir betono sąlyčio paviršiuje mechanines jungtis, kurios perima šlyties deformacijas ir neleidžia paviršiams pasislinkti vienas kito atžvilgiu. Šlyties jungės būna įvairių formų: galvelinės, kilpinės, kampuotinės, tėjinės ir t.t. Mechaninė jungtis turi ir trūkumų: ji prastai dirba, kai veikia ciklinės apkrovos, nes nuvargsta kontakto suvirinimas, taip pat jungės skatina pleišėjimą, nes ties jomis susidaro įtempių koncentracija. Šie trūkumai gali žymiai sumažinti konstrukcijos ilgaamžiškumą, todėl didelę reikšmę kompozitinių sijų elgsenai turi jungių forma, nuo kurios ir priklauso išvardintų trūkumų įtakos didumas.

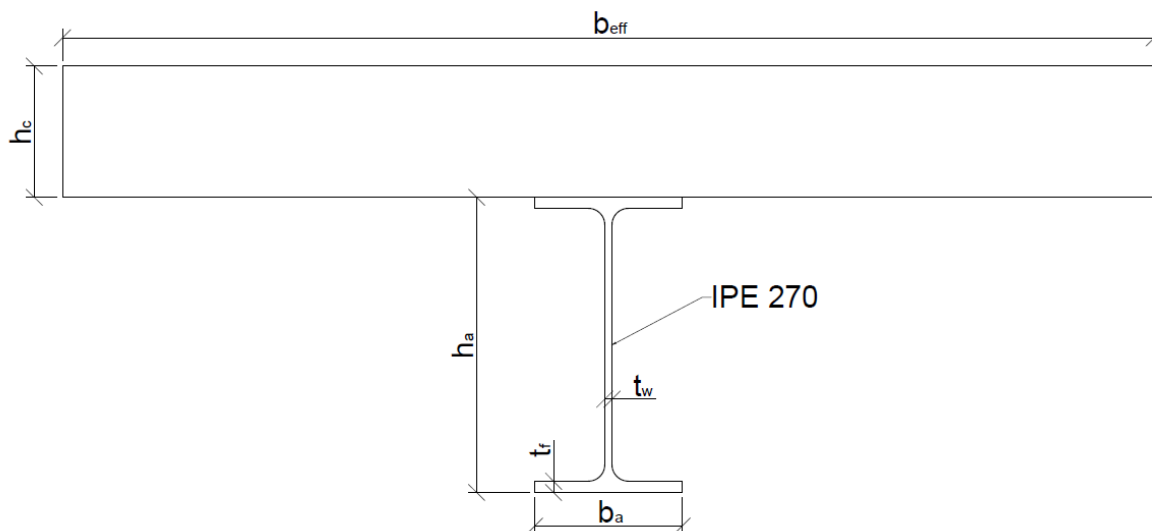
Skaičiuojant plieno-betono kompozitines konstrukcijas, reikia atsižvelgti į jų darbo pobūdį ir apkrovimą. Nuo apkrovimo tipo priklauso jungties laikomoji galia, o nuo jungties bendra sijos laikomoji galia ir įlinkis. Dėl apkrovos poveikio betono ir plieninės sijos kontakte yra sukeliama didelės šlyties jėgos. Dėl šių jėgų poveikio dažnai atsiranda horizontalūs plyšiai.

Kompozitinės sijos plastinė lenkiamoji galia priklauso nuo plastinės neutraliosios ašies padėties. Išskiriamos trys padėty: kai plastinė neutralioji ašis betono plokštėje, dvitėjo lentynoje ir dvitėjo sienelėje. Šlyjamoji jėga tiesiogiai priklauso nuo vertikalios skersinės jėgos, todėl labiausiai apkraunamos kraštinės jungės ir didžiausias praslydimas tarp paviršių susiformuoja sijos galuose. Jungės laikomoji galia skaičiavimuose priklauso nuo dviejų kriterijų: vietinio betono gniuždymo ir šlyties jėgų jungės skerspjuvyje.

2. KOMPOZITINIŲ PLIENINIŲ-BETONINIŲ SIJŲ STIPRIO IR STANDUMO TEORINIAI SKAIČIAVIMAI

2.1. Kompozitinių plieno betono sijų skaičiavimas

Kompozitinės plieno betono sijos duomenys



2.1 pav. Kompozitinės plieno betono sijos skerspjūvis

Betono klasė C20/25;

Plieno klasė S275;

$$h_c = 120mm;$$

$$b_{eff} = 1000mm.$$

Sija IPE 270:

$$h_a = 270mm;$$

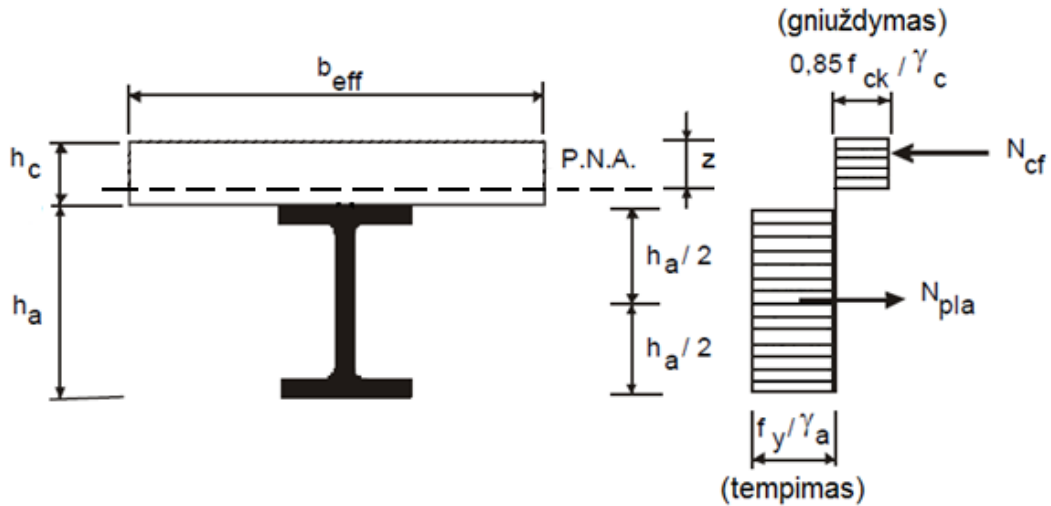
$$b_a = 135mm;$$

$$t_w = 6,6mm;$$

$$t_f = 10,2mm;$$

$$A_a = 4590mm^2.$$

Laikomosios galios skaičiavimas



2.2 pav. Įtempių diagrama, kai neutrali ašis betono plokštėje

Plieninės sijos plastinė ašinė jėga:

$$N_{pla} = \frac{A_a f_y}{\gamma_a} = \frac{0,00459 \cdot 275 \cdot 10^3}{1,0} = 1262,25 \text{ kN};$$

čia

f_y – S275 klasės plieno stipris, $f_y = 275 \text{ MPa}$.

Betoninės plokštės ašinė jėga:

$$N_{cf} = h_c b_{eff} \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} = 0,12 \cdot 1,0 \cdot \frac{0,85 \cdot 20 \cdot 10^3}{1,5} = 1360 \text{ kN};$$

čia

f_{ck} – charakteristinis C20/25 klasės betono gniuždymo stipris, $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$.

Plastinė neutralioji ašis yra betoninėje plokštėje, kai tenkinama ši sąlyga:

$$N_{cf} = 1360 \text{ kN} > N_{pla} = 1262,25.$$

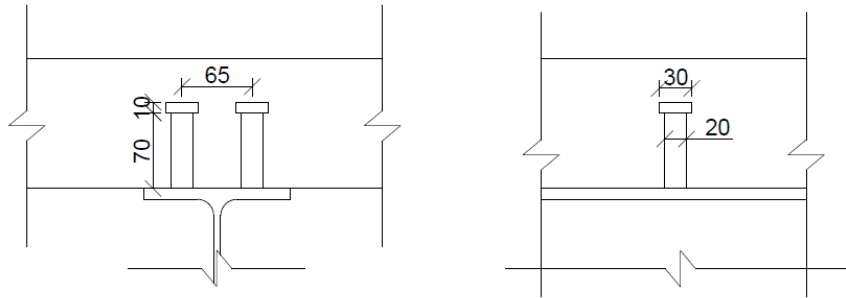
Plastinės neutraliosios ašies atstumas z nuo betoninės plokštės viršaus:

$$z = N_{pla} / \left(b_{eff} 0,85 f_{ck} / \gamma_c \right) = 1262,25 / \left(1,0 \cdot 0,85 \cdot 20 \cdot 10^3 / 1,5 \right) = 0,111 \text{ m} = 111 \text{ mm}.$$

Atlaikomas momentas:

$$M_{pl,Rd} = N_{pla} (0,5 h_a + h_c + h_p - 0,5 z) = 1262,25 (0,5 \cdot 0,27 + 0,12 - 0,5 \cdot 0,111) = 251,82 \text{ kNm}.$$

Galvelinės jungės stiprio skaičiavimas



2.3 pav. Galvelinė jungė

Jungės šlyjamoji galia:

$$P_{Rd} = \min(P_{Rd}^{(1)}; P_{Rd}^{(2)}) = \min(80,42kN; 71,88kN) = 71,88kN;$$

$$P_{Rd}^{(1)} = 0,8 \cdot f_u \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{1}{\gamma_v} = 0,8 \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4} \cdot \frac{1}{1,25} = 80,42kN;$$

$$P_{Rd}^{(2)} = \frac{0,29 \cdot \alpha \cdot d^2 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot E_{cm}}}{\gamma_v} = \frac{0,29 \cdot 1,0 \cdot 0,02^2 \cdot \sqrt{20 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^6}}{1,25} = 71,88kN;$$

čia

α – korekcijos koeficientas, kuris nustatomas:

$$\alpha = 0,2 \left(\frac{h}{d} + 1 \right) = 0,2 \left(\frac{80}{20} + 1 \right) = 1,0, \text{ kai } 3 \leq \frac{h}{d} \leq 4;$$

d – jungės skersmuo, $d = 20mm$;

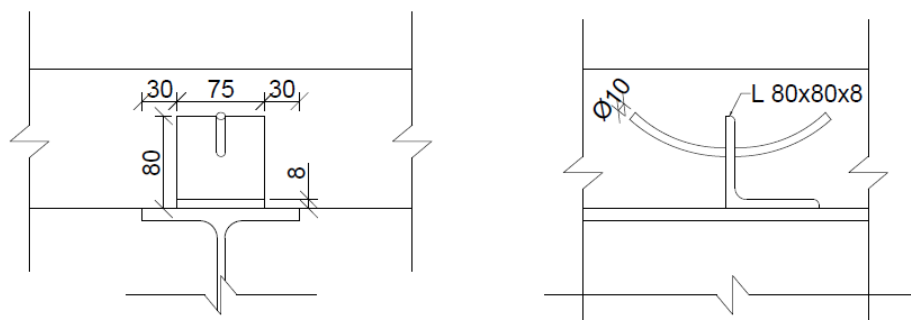
f_u – nustatytasis tempiamasis ribinis jungės medžiagos stipris, $f_u = 400MPa$;

γ_v – dalinis koeficientas. Rekomenduojamoji reikšmė yra 1,25;

h – bendrasis vardinis jungės aukštis, $h = 80mm$;

E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis, $E_{cm} = 30GPa$.

Kampuotinės su armatūros strypu jungės stiprio skaičiavimas



2.4 pav. Kampuotinė su armatūros strypu jungė

Privirintos kampuotinės jungės skaičiuotinė šlyjamoji galia nustatoma taip:

$$P_{Rd} = \frac{10 \cdot b \cdot h^{3/4} \cdot f_{ck}^{2/3}}{\gamma_v} = \frac{10 \cdot 0,075 \cdot 0,08^{3/4} \cdot (20 \cdot 10^3)^{2/3}}{1,25} = 66,5 \text{ kN};$$

čia

b – jungės plotis;

h – jungės aukštis;

f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris, $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$;

γ_v – dalinis koeficientas. Rekomenduojamoji reikšmė yra 1,25.

Strypo skersmuo turi atitikti šią sąlygą:

$$\frac{A_e \cdot f_{sk}}{\gamma_s} = \frac{0,0000785 \cdot 400 \cdot 10^3}{1,15} = 27,3 > 0,1 \cdot P_{Rd} = 0,1 \cdot 66,5 = 6,65;$$

čia

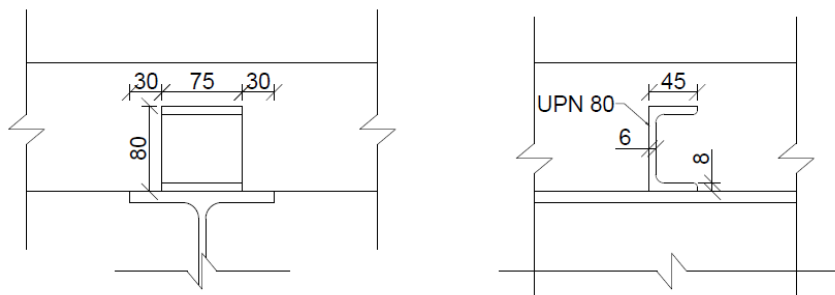
A_e – strypo skerspjūvio plotas:

$$A_e = \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} = 0,0000785 \text{ m}^2;$$

f_{sk} – charakteristinis armatūros stipris pagal takumo ribą, $f_{sk} = 400 \text{ MPa}$;

γ_s – armatūros dalinis koeficientas, priimamas 1,15.

Lovinės (UPN 80) jungės laikomoji galia



2.5 pav. Privirinta lovinė (UPN 80) jungė

Privirintos lovinės jungės skaičiuotinė šlyjamoji galia nustatoma taip:

$$P_{Rd} = \frac{0,3 \cdot (t_f + 0,5t_w) \cdot b_c \cdot \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v} = \frac{0,3 \cdot (0,008 + 0,5 \cdot 0,006) \cdot 0,075 \cdot \sqrt{20 \cdot 10^3 \cdot 29 \cdot 10^6}}{1,25} = 150,79 \text{ kN};$$

čia

t_f – jungės lentynos storis, $t_f = 8 \text{ mm}$;

t_w – jungės sienelės storis, $t_w = 6 \text{ mm}$;

b_c – jungės plotis, $b_c = 75 \text{ mm}$;

f_{ck} – charakteristinis betono gniuždomasis stipris, $f_{ck} = 20MPa$;

E_{cm} – kirstinis betono tamprumo modulis, $E_{cm} = 29GPa$.

γ_v – dalinis koeficientas. Rekomenduojamoji reikšmė yra 1,25.

Įlinkio skaičiavimas

Įlinkis δ sijos viduryje, kai ji apkrauta tolygiai paskirstyta apkrova:

$$\delta = \frac{5 \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{red}} + \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E_a \cdot I_{red}} = \frac{5 \cdot 3,29 \cdot 10^3 \cdot 6,0^4}{384 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 0,00021823} + \frac{5 \cdot 4,0 \cdot 10^3 \cdot 6,0^4}{384 \cdot 210 \cdot 10^9 \cdot 0,00021823} =$$
$$= 0,00121 + 0,00147 = 0,00268m = 2,68mm;$$

čia

g – savasis kompozitinės plieno-betono sijos svoris, $g = 3,29kN / m$;

q – tolygiai paskirstyta apkrova į tiesinį metrą, esant tinkamumo ribiniam būviui,

$q = 4,0kN / m$;

L – sijos tarptraimis, $L = 6,0m$;

E_a – plieno tamprumo modulis, $E_a = 210kN / mm^2$;

I_{red} – redukuoto skerspjūvio inercijos momentas:

$$I_{red} = I_a + A_a (z - y_1)^2 + I_{cs} + A_{cs} (z - y_2)^2 =$$
$$= 0,0000579 + 0,00459(0,111 - 0,255)^2 + 0,00002057 + 0,01714(0,111 - 0,06)^2 =$$
$$= 0,0000579 + 0,00009518 + 0,00002057 + 0,00004458 = 0,00021823m^4.$$

Redukuoti betono plokštės geometriniai rodikliai:

$$I_{cs} = \frac{E_c \cdot I_c}{E_a} = \frac{30 \cdot 0,000144}{210} = 0,00002057m^4;$$

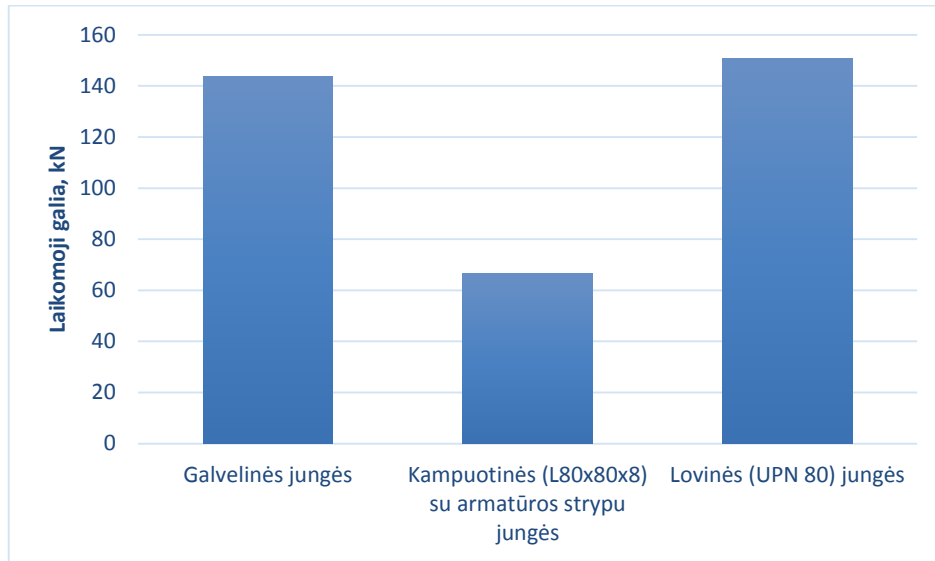
$$A_{cs} = \frac{E_c \cdot A_c}{E_a} = \frac{30 \cdot 0,12}{210} = 0,01714m^2.$$

2.2. Kompozitinių plieno betono sijų teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimas

Teoriškai apskaičiavus kompozitinių sijų šlyties jungių laikomąsias galias, gauti tokie rezultatai:

- galvelinės jungės laikomoji galia 71,88kN, bet kadangi jos modeliuojamos po dvi, tada jų laikomoji galia 143,76kN;
- kampuotinės (L 80x80x8) su armatūros strypu jungės laikomoji galia 66,5kN;
- lovinės (UPN 80) jungės laikomoji galia 150,79kN.

Šių jungių laikomųjų galių palyginimas pateiktas 2.6 paveiksle.



2.6 pav. Kompozitinių plieno-betono sijų šlyties jungių laikomųjų galių grafikas

Pagal 2.6 paveiksle pateiktą grafiką matyti, kad didžiausią laikomąją galią atlaiko lovinės (UPN 80) šlyties jungės, o mažiausia laikomoji galia kampuočių (L 80x80x8) su armatūros strypu šlyties jungių.

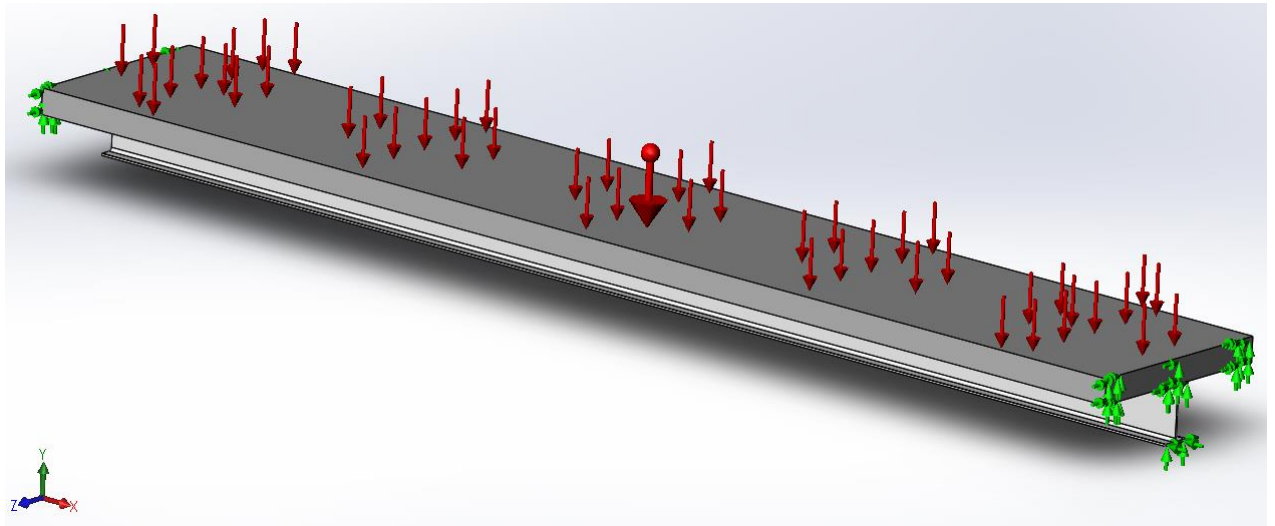
2.3. Skyriaus išvados

Nagrinėjamos kompozitinės sijos plastinė lenkiamoji galia skaičiuojama kai plastinė neutralioji ašis yra betono plokštėje, nes betoninės plokštės ašinė jėga yra didesnė už plieninės sijos ašinę jėgą. Apskaičiavus trijų skirtingų šlyties jungių laikomąsias galias, nustatyta, kad didžiausią šlyties jėgą atlaiko lovinės (UPN 80) jungės, o mažiausią – kampuočių (L 80x80x8). Įlinkis apskaičiuotas pagal Europos normas, kur priimama, kad konstrukcija dirba kaip kompozitinis elementas. Todėl betono plokštė redukuojama į atitinkamą plieninę plokštę ir skaičiuojant įlinkį vietoj viso skerspjūvio inercijos momento imamas redukuotas skerspjūvio inercijos momentas.

3. KOMPOZITINIŲ PLIENINIŲ – BETONINIŲ SIJŲ KOMPIUTERINIS MODELIAVIMAS

3.1. Kompiuterinio modeliavimo metodika

Kompozitinės plieno-betono sijos modeliuojamos su *SolidWorks* kompiuterine programa. Visos modeliuojamos sijos yra vienodos, išskyrus šlyties jungias. Kompozitinės sijos susideda iš plieninio dvitėjo profiliuotio IPE 270, kurio plieno klasė S275, bei 1 metro pločio ir 0,12 metro storio betoninės plokštės, kurios betono klasė C20/25. Kompozitinės sijos yra dviatramės ir 6 metrų ilgio, jos įtvirtinamos lanksčiai ir apkraunamos 4kN/m^2 išskirstyta apkrova po visą betono plokštės paviršių. Kompozitinės plieno-betono sijos apkrovimas ir įtvirtinimas pateiktas 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Kompozitinės plieno-betono sijos kompiuterinis modelis

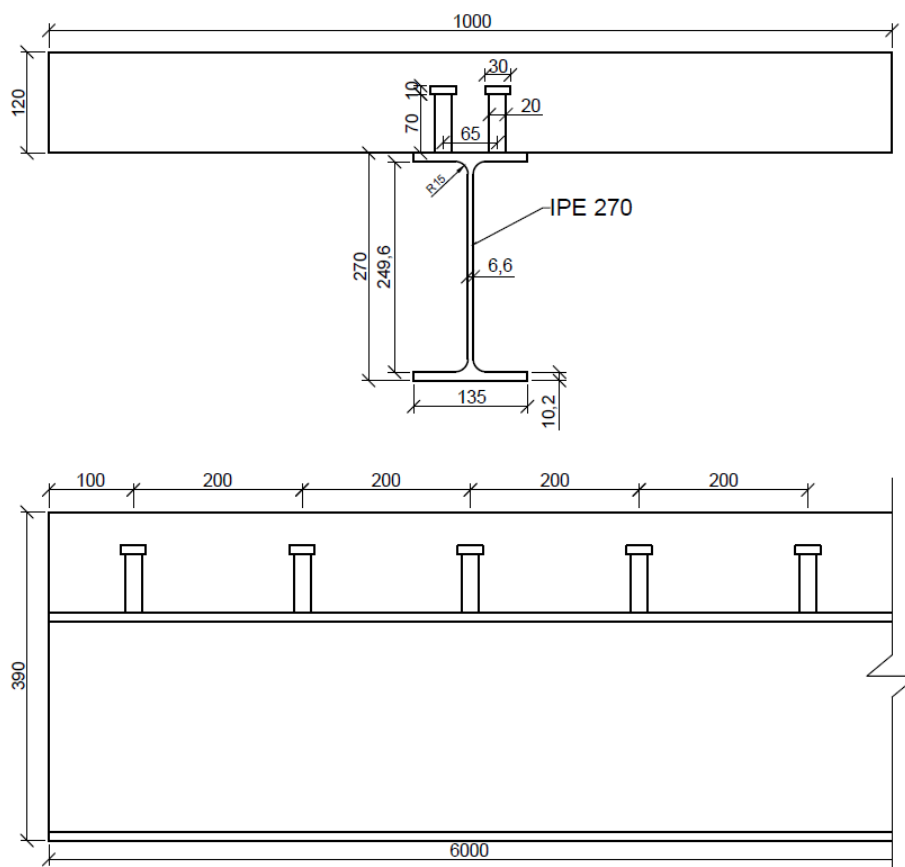
Analizuojamos kompozitinės plieno-betono sijos sužymimos priklausomai nuo šlyties jungių formos:

- S-1 – su galvelinėmis jungėmis;
- S-2 – su kampuotinėmis (L 80x80x8) ir armatūros strypo jungėmis;
- S-3 – su lovinėmis (UPN 80) jungėmis;
- S-4 – su tėjinėmis (T 80) jungėmis.

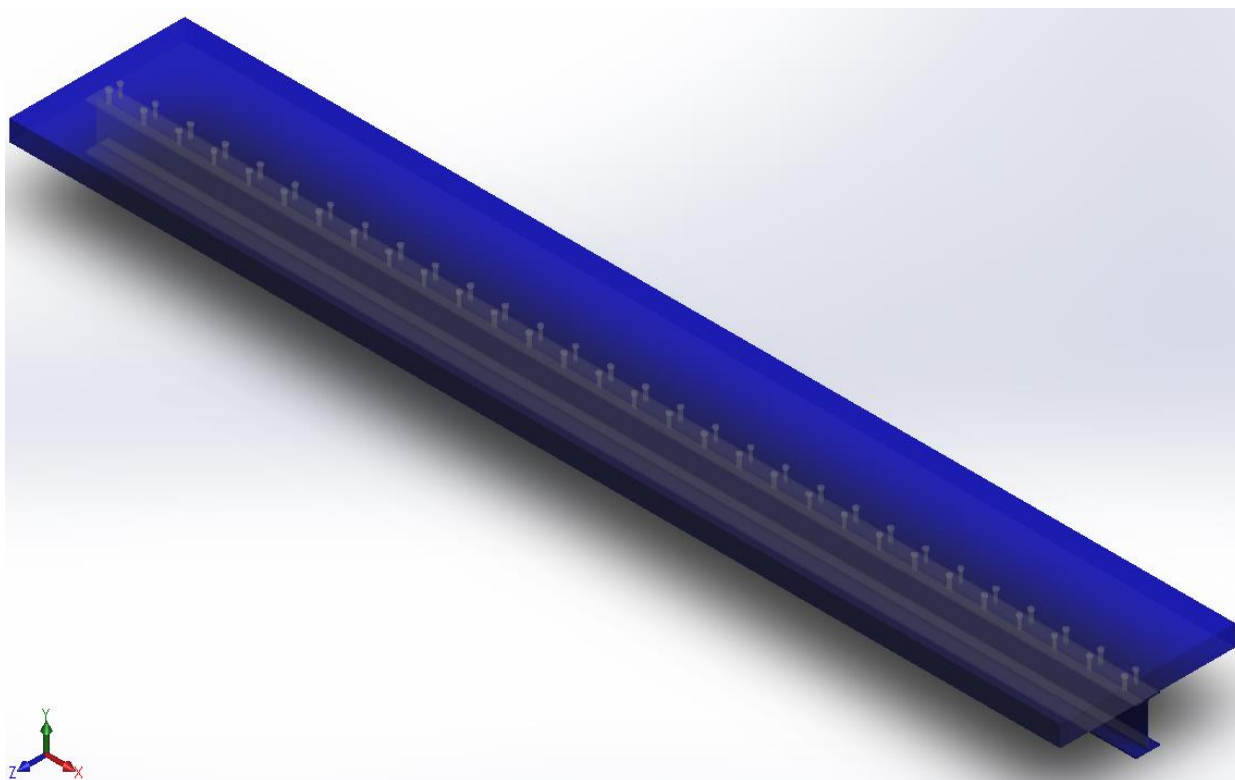
3.2. Kompozitinių plieno-betono sijų su skirtingomis šlyties jungėmis gauti rezultatai

3.2.1. Kompozitinė plieno-betono sija S-1

Kompozitinės sijos S-1 šlyties jungės susideda iš plieninio 20mm skersmens strypo su viršutinės dalies praplatėjimu. Jungės išdėstomos po dvi ant plieninės sijos viršutinės lentynos per visą jos ilgį kas 200mm. Kompozitinės sijos skerspjūvio matmenys ir jungių išdėstymas pateiktas 3.2 paveiksle.

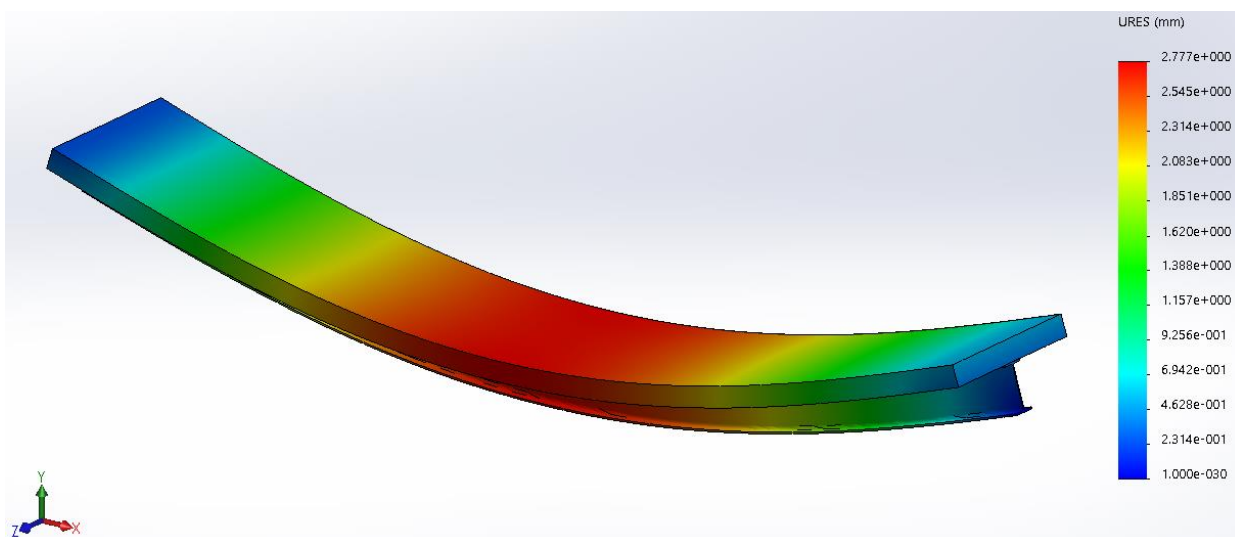


3.2 pav. Kompozitinės sijos S-1 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas

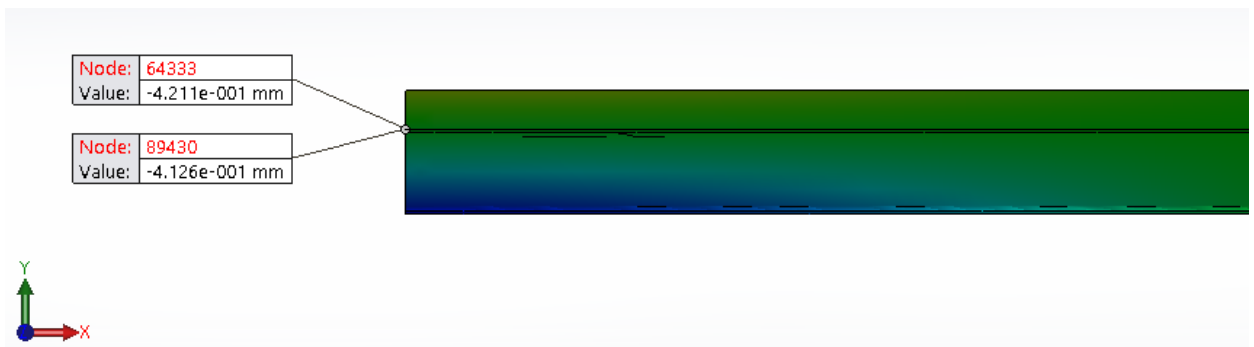


3.3 pav. Kompozitinės sijos S-1 geometrinis modelis

Kompozitinės sijos S-1 didžiausias poslinkis esant 4kN/m^2 apkrovai yra sijos viduryje ($2,777\text{mm}$) ir link kraštų mažėja, kol ties atramomis poslinkis išnyksta ir lygus 0mm . Kompozitinės sijos S-1 poslinkių diagrama pateikta 3.4 paveiksle.



3.4 pav. Kompozitinės sijos S-1 poslinkių diagrama

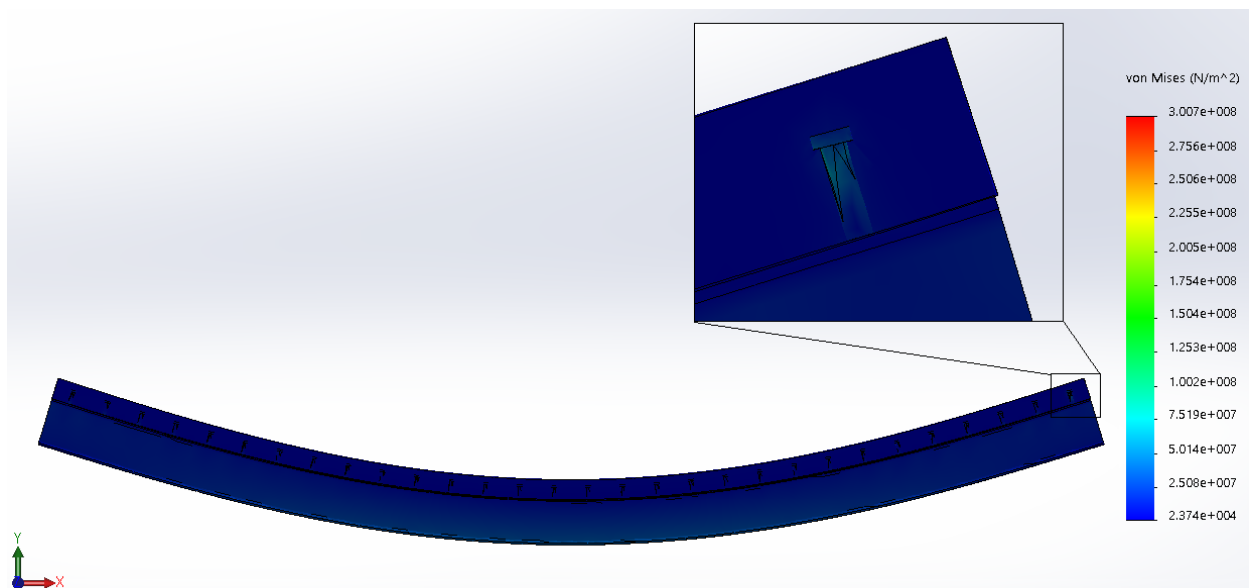


3.5 pav. Kompozitinės sijos S-1 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi

3.5 paveiksle pateikti plieninės sijos ir betoninės plokštės sąlyčio plokštumoje poslinkiai x ašies kryptimi. Plieninės sijos poslinkis – 0,4126mm, o betoninės plokštės – 0,4211mm. Praslydimas tarp kompozitinės sijos sluoksnių:

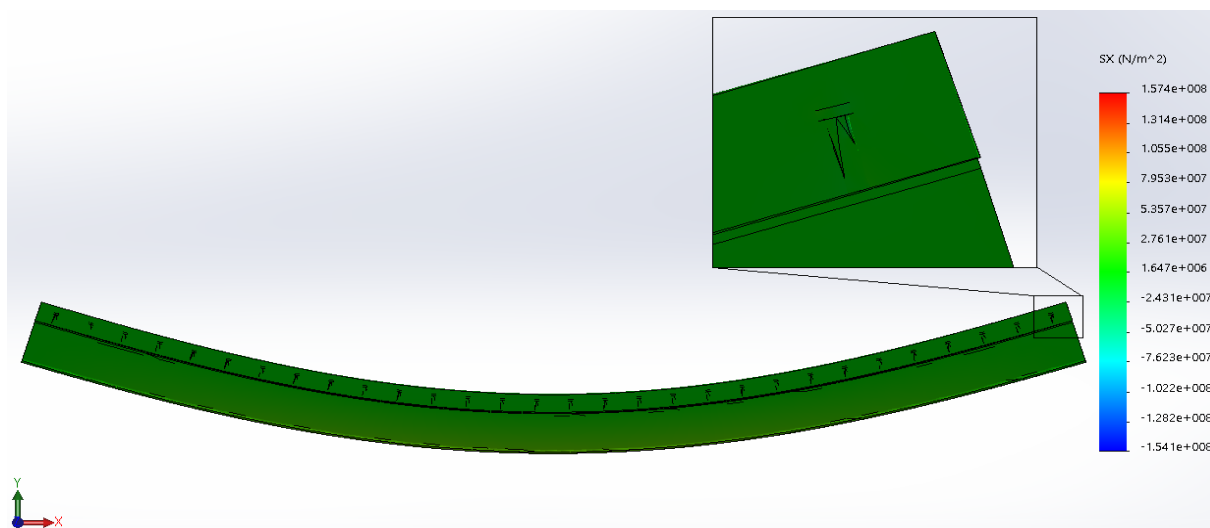
$$s_{S-1} = 0,4211 - 0,4126 = 0,0085\text{mm}.$$

Didžiausi Von Mises įtempiai yra kraštinėse šlyties jungėse, o mažiausi betoninėje plokštėje. Von Mises įtempių pasiskirstymas kompozitinėje sijoje S-1 pateiktas 3.6 paveiksle.

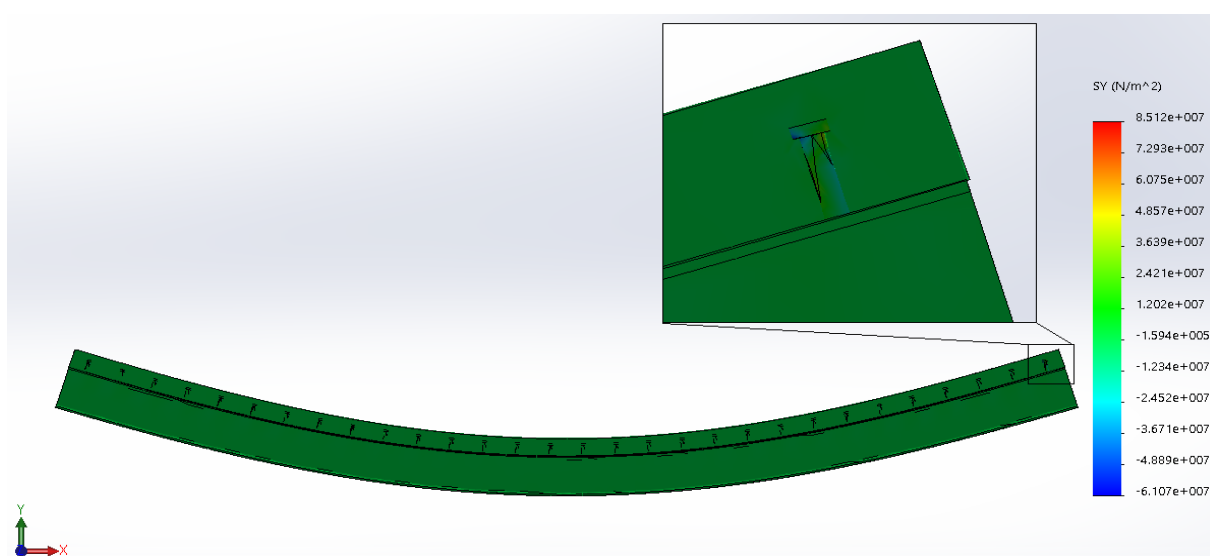


3.6 pav. Kompozitinės sijos S-1 Von Mises įtempių diagrama

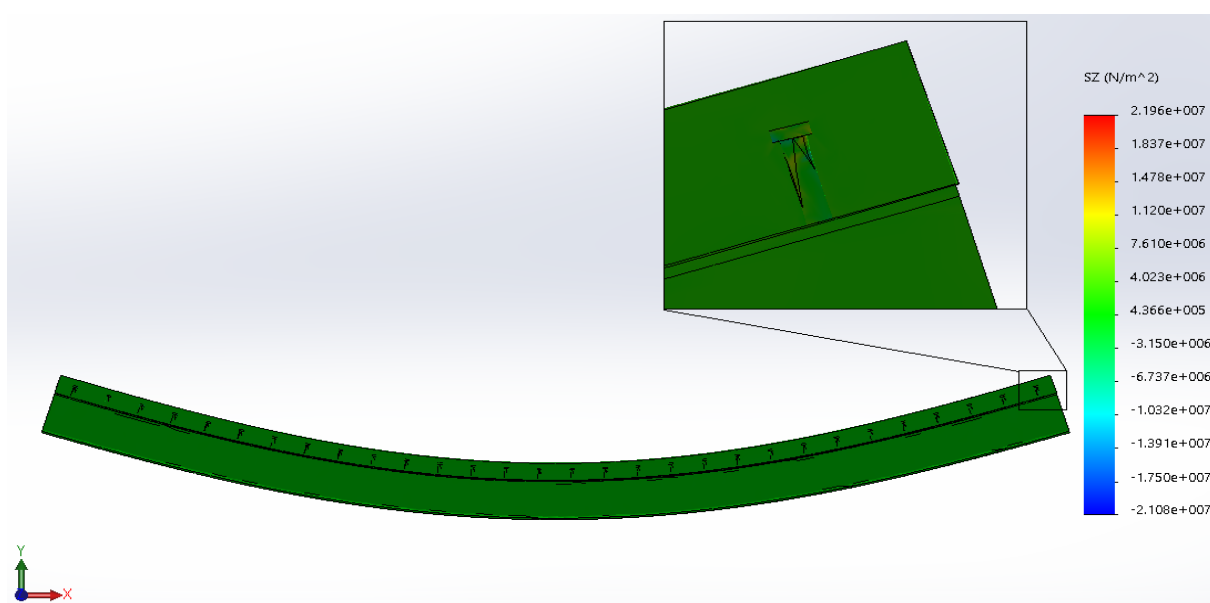
Didesni teigiami normaliniai σ_x įtempiai yra plieninės sijos apatinėje dalyje, o šlyties jungėse įtempiai panašūs kaip ir betoninėje plokštėje. Normalinių σ_x įtempių pasiskirstymas pateiktas 3.7 paveiksle. Normaliniai σ_y ir σ_z įtempiai labiausiai išsiskiria šlyties jungėse ir jų pasiskirstymas pateiktas 3.8 ir 3.9 paveiksluose.



3.7 pav. Kompozitinės sijos S-1 normalinių σ_x įtempių diagrama

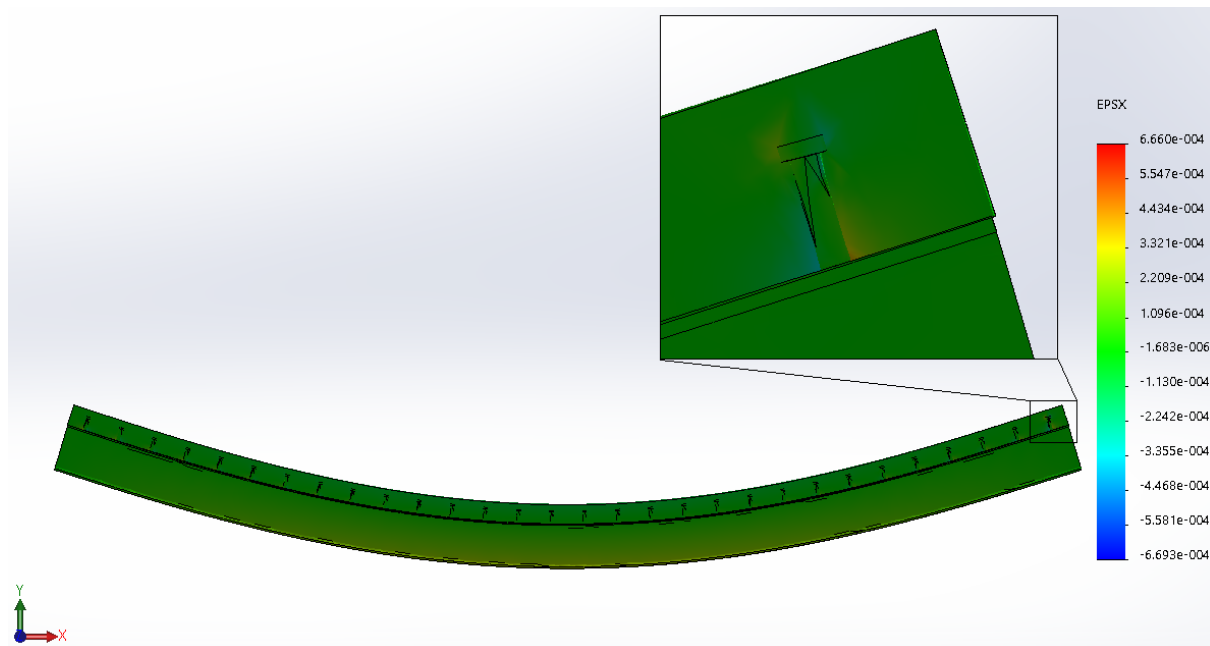


3.8 pav. Kompozitinės sijos S-1 normalinių σ_y įtempių diagrama

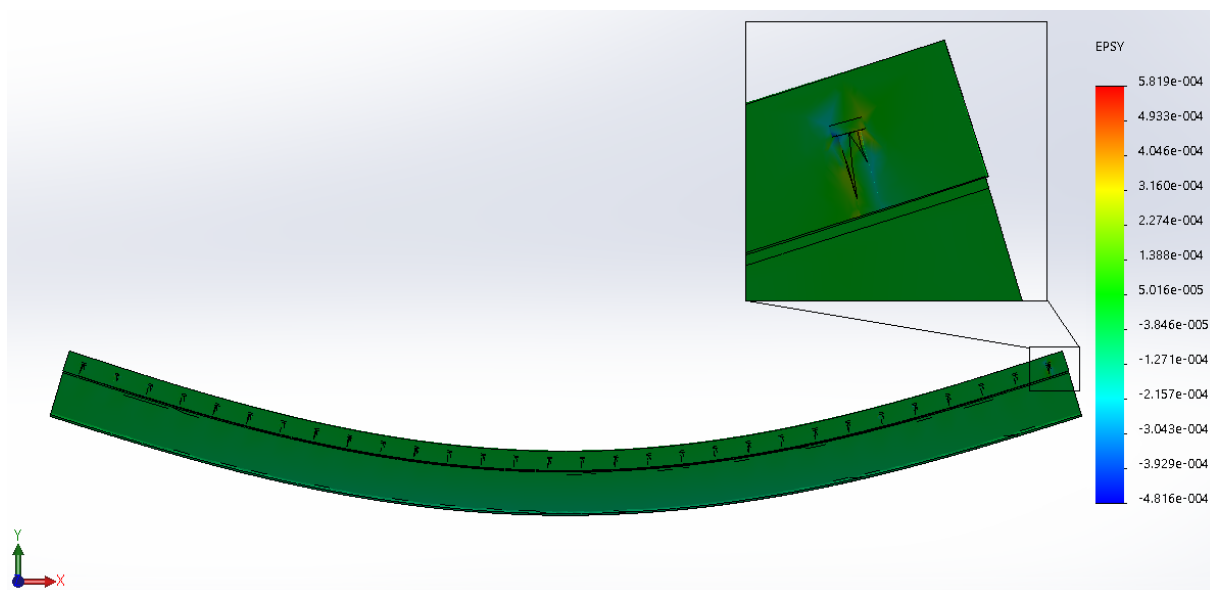


3.9 pav. Kompozitinės sijos S-1 normalinių σ_z įtempių diagrama

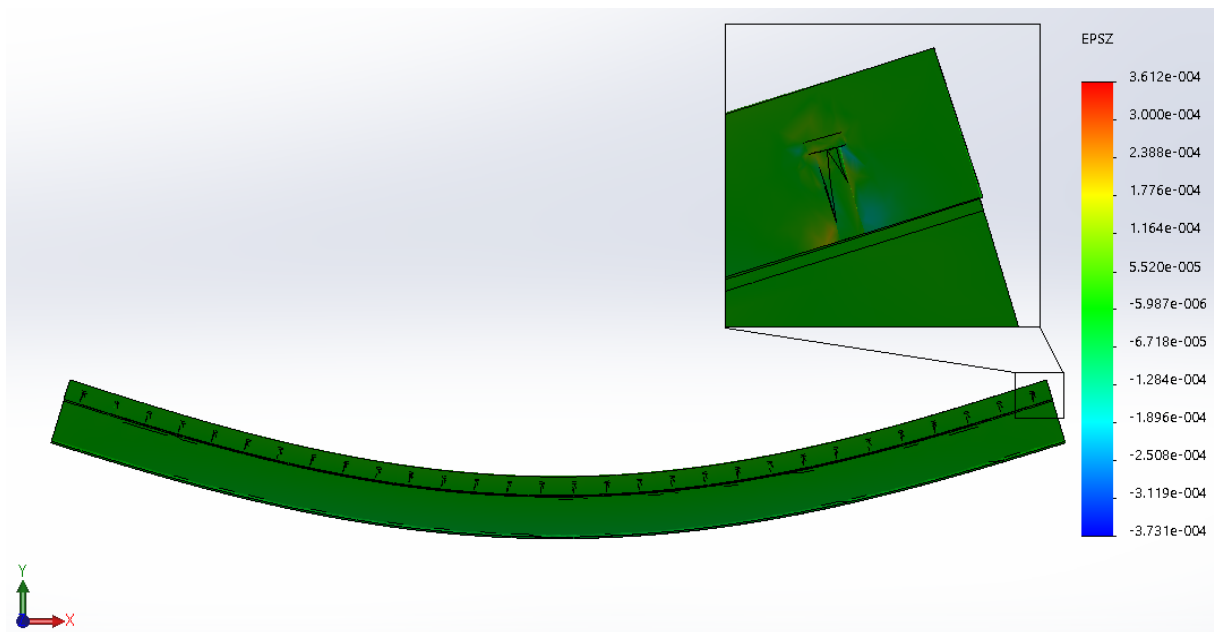
Labiausiai išsiskiria ε_x , ε_y ir ε_z deformacijos ties šlyties jungėmis, kuriomis plieninė sija ir betoninė plokštė sujungiama bendram darbui. Visų šių deformacijų pasiskirstymas kompozitinėje sijoje pateiktas 3.10–3.12 paveiksluose.



3.10 pav. Kompozitinės sijos S-1 ε_x deformacijų diagrama



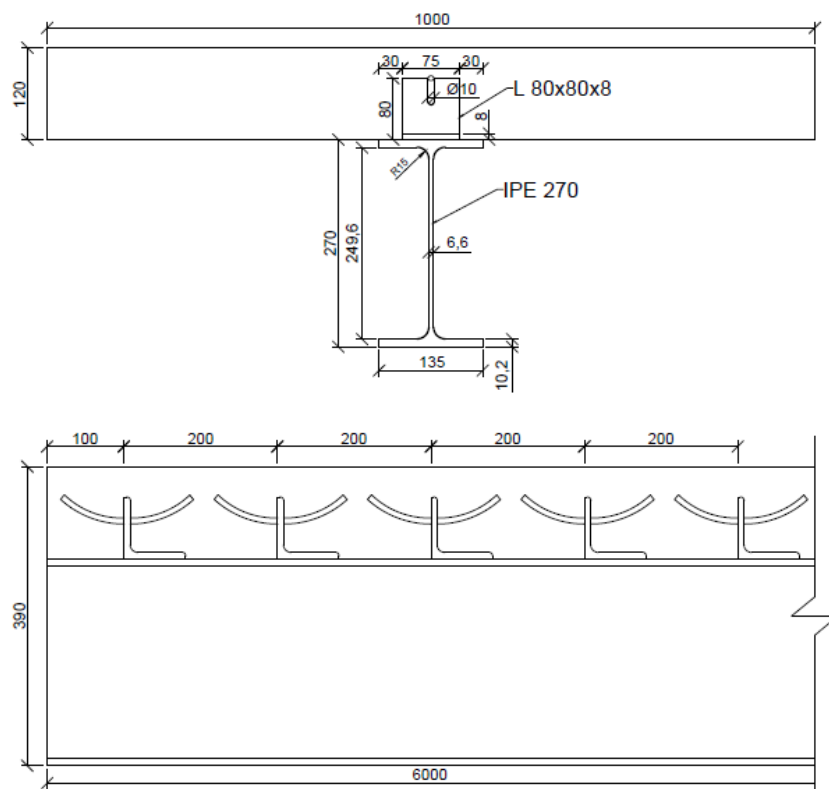
3.11 pav. Kompozitinės sijos S-1 ε_y deformacijų diagrama



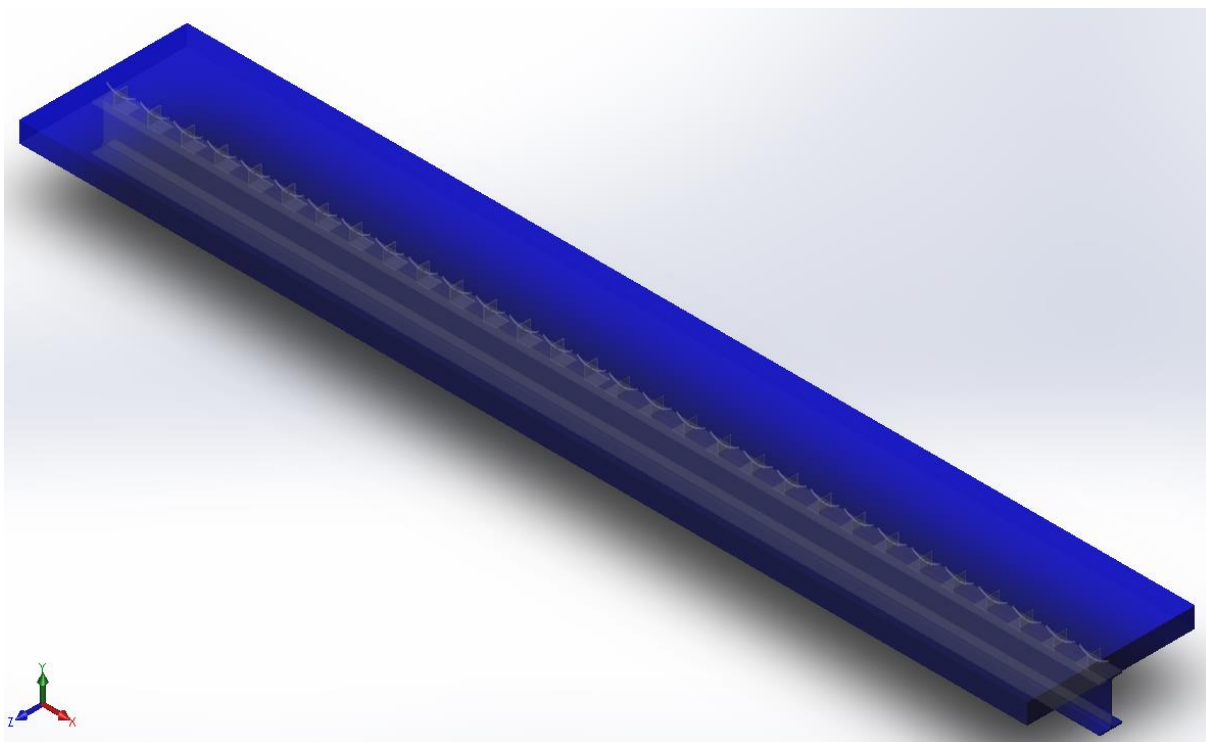
3.12 pav. Kompozitinės sijos S-1 ε_z deformacijų diagrama

3.2.2. Kompozitinė plieno-betono sija S-2

Kompozitinės sijos S-2 šlyties jungės susideda iš plieninio kampuočio L 80x80x8 ir 10mm skersmens armatūros strypo. Jungės išdėstomos ant viršutinės plieninės sijos lentynos per visą jos ilgį kas 200mm. Kompozitinės sijos skerspjūvio matmenys ir jungių išdėstymas pateiktas 3.13 paveiksle.

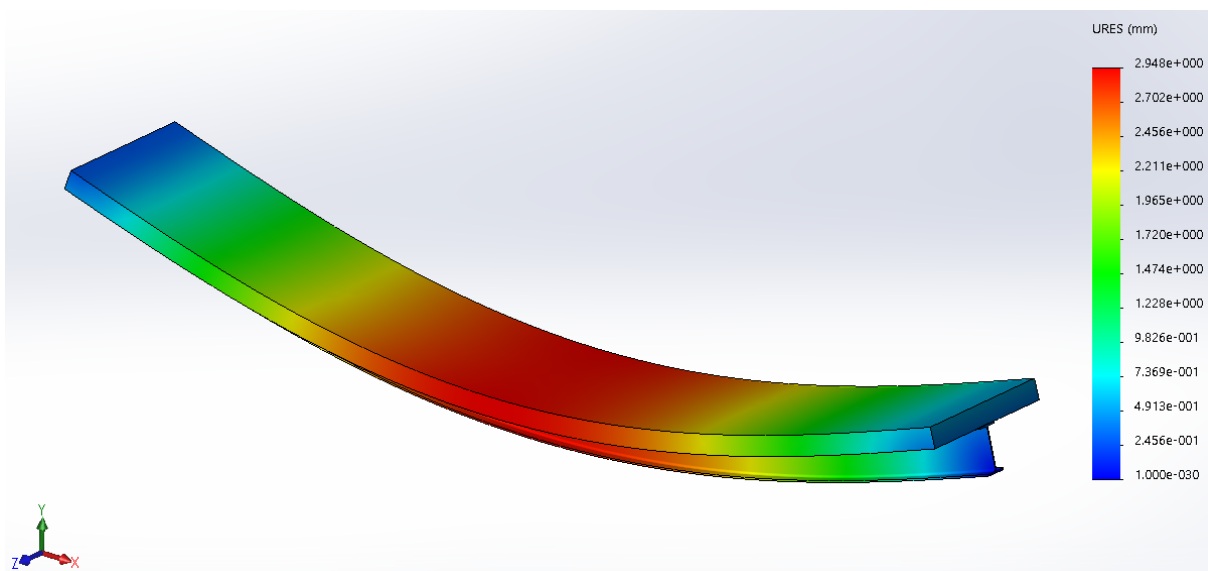


3.13 pav. Kompozitinės sijos S-2 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas

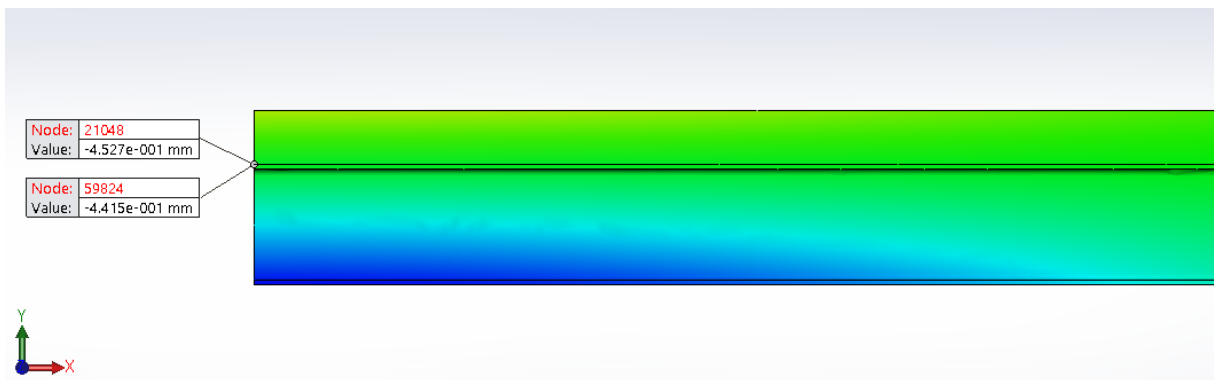


3.14 pav. Kompozitinės sijos S-2 geometrinis modelis

Kompozitinės sijos S-2 didžiausias poslinkis esant 4kN/m^2 apkrovai yra sijos viduryje (2,948mm) ir link kraštų mažėja, kol ties atramomis poslinkis išnyksta ir lygus 0mm. Kompozitinės sijos S-2 poslinkių diagrama pateikta 3.15 paveiksle.



3.15 pav. Kompozitinės sijos S-2 poslinkių diagrama

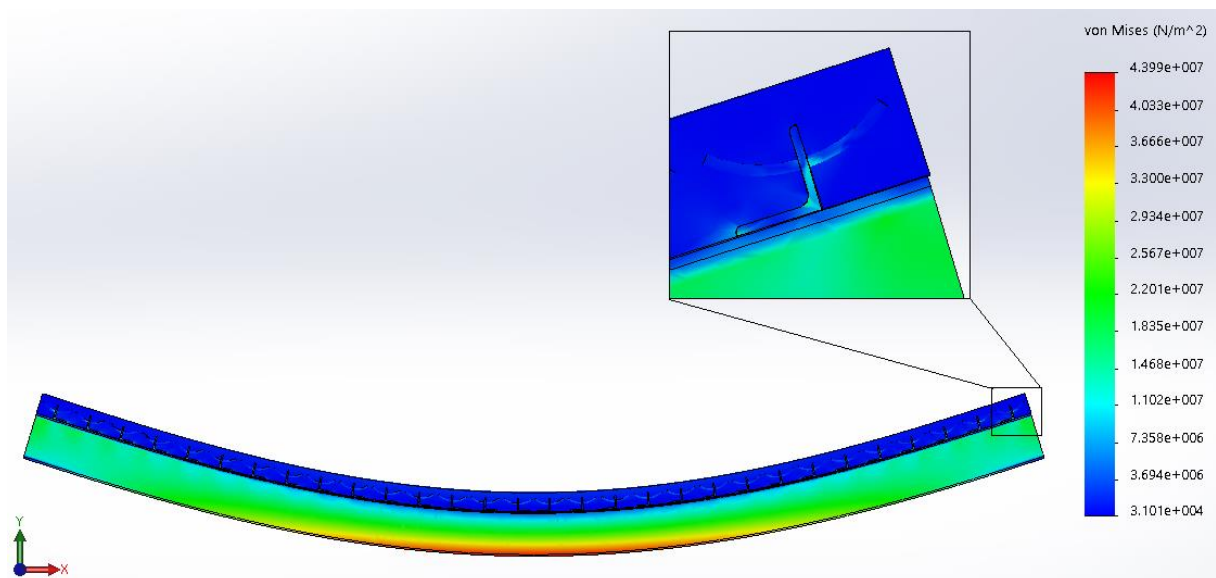


3.16 pav. Kompozitinės sijos S-2 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi

3.16 paveiksle pateikti plieninės sijos ir betoninės plokštės sąlyčio plokštumoje poslinkiai x ašies kryptimi. Plieninės sijos poslinkis – 0,4415mm, o betoninės plokštės – 0,4527mm. Praslydimas tarp kompozitinės sijos sluoksnių:

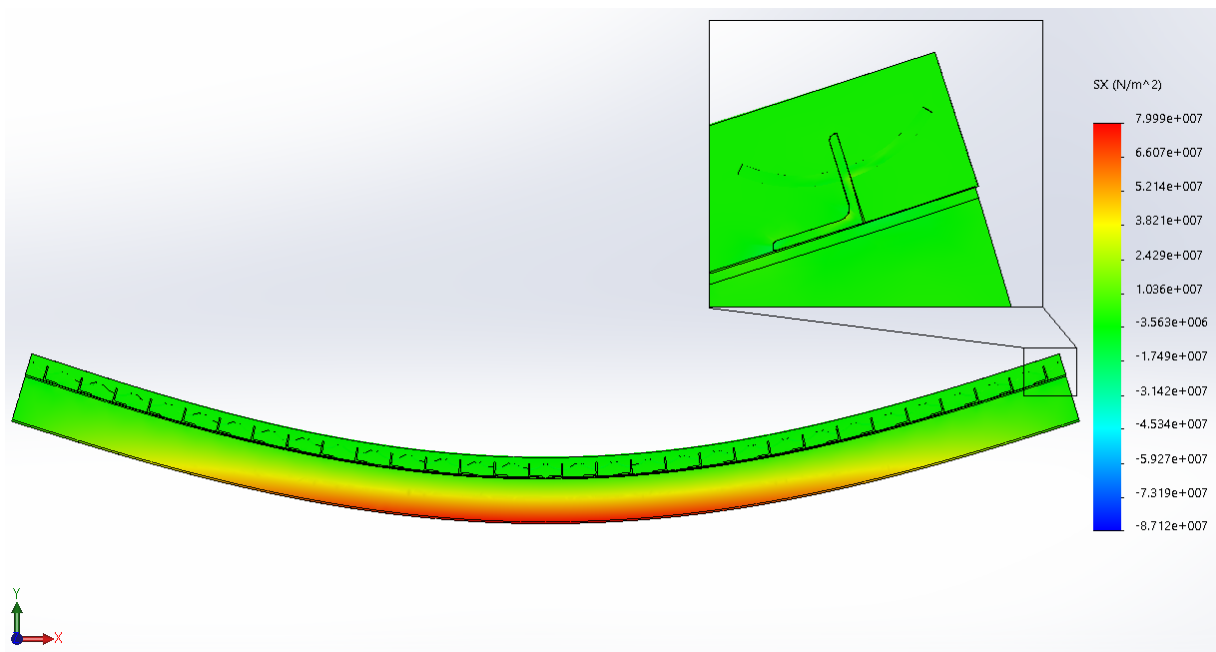
$$s_{S-2} = 0,4527 - 0,4415 = 0,0112mm.$$

Didžiausi Von Mises įtempiai yra plieninėje sijoje ir kraštinėse šlyties jungėse, o mažiausi betoninėje plokštėje. Von Mises įtempių pasiskirstymas kompozitinėje sijoje S-2 pateiktas 3.17 paveiksle.

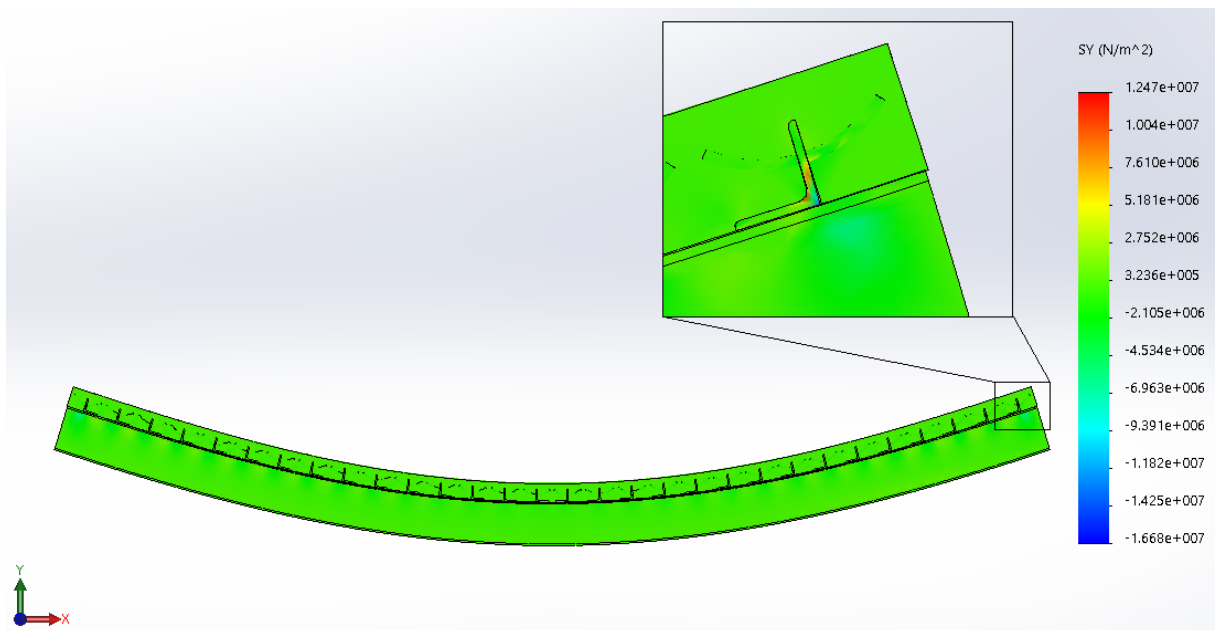


3.17 pav. Kompozitinės sijos S-2 Von Mises įtempių diagrama

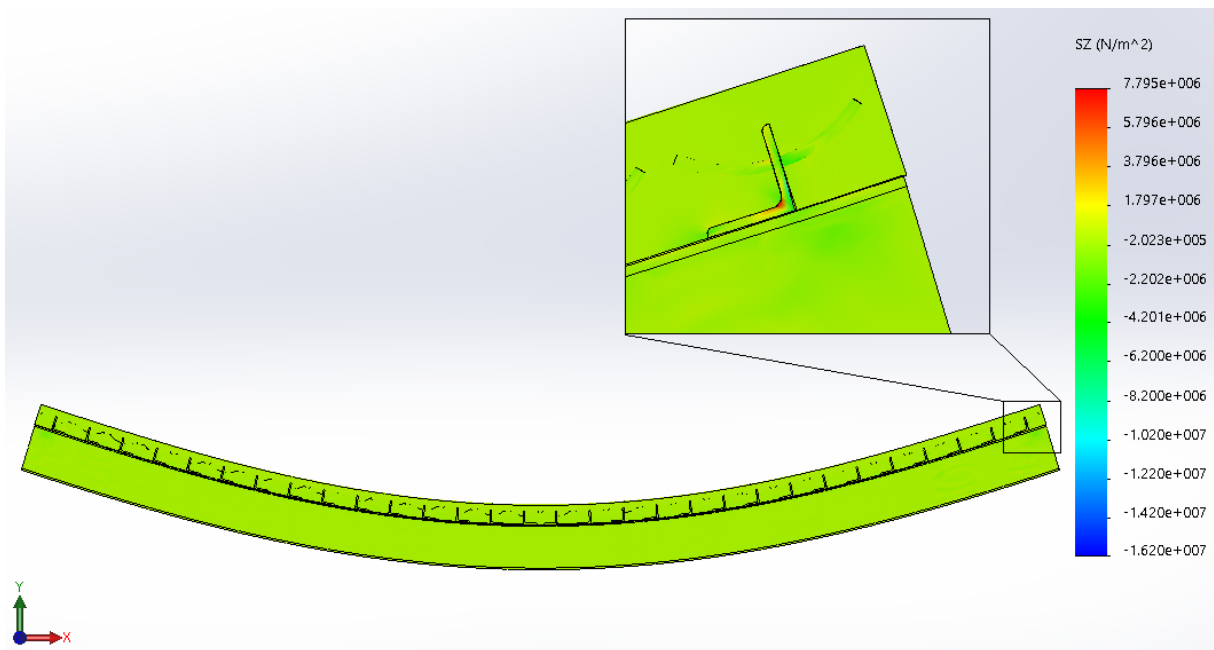
Didžiausi teigiami normaliniai σ_x įtempiai yra plieninės sijos apatinėje dalyje, o šlyties jungėse įtempiai panašūs kaip ir betoninėje plokštėje. Normalinių σ_x įtempių pasiskirstymas pateiktas 3.18 paveiksle. Normaliniai σ_y ir σ_z įtempiai labiausiai išsiskiria šlyties jungėse ir jų pasiskirstymas pateiktas 3.19 ir 3.20 paveiksluose.



3.18 pav. Kompozitinės sijos S-2 normalinių σ_x įtempių diagrama

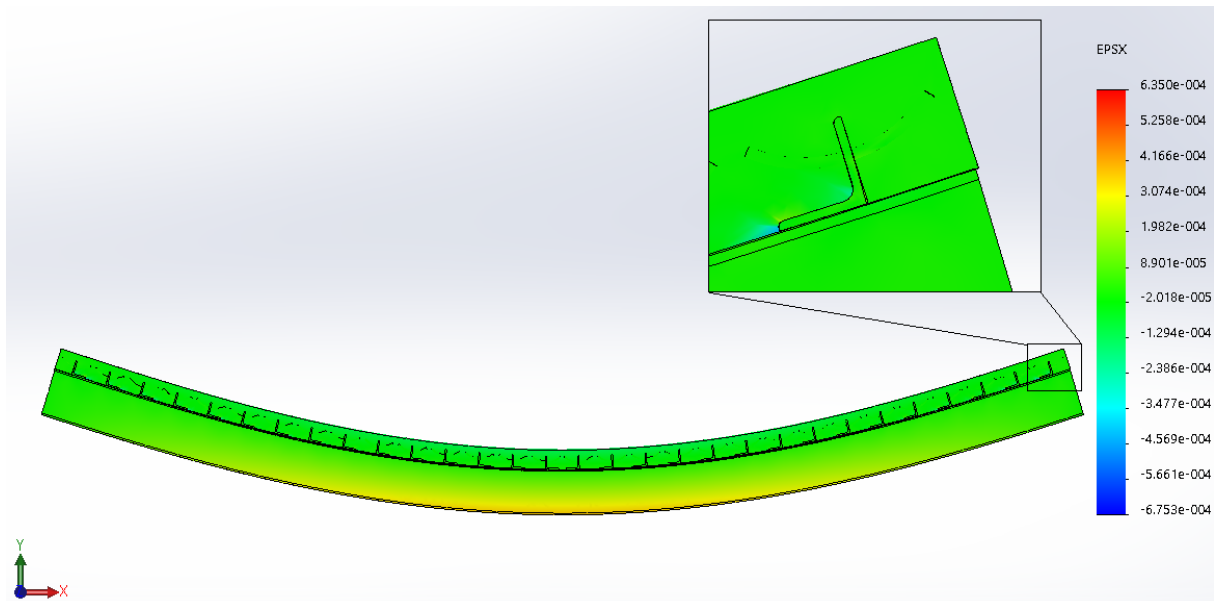


3.19 pav. Kompozitinės sijos S-2 normalinių σ_y įtempių diagrama

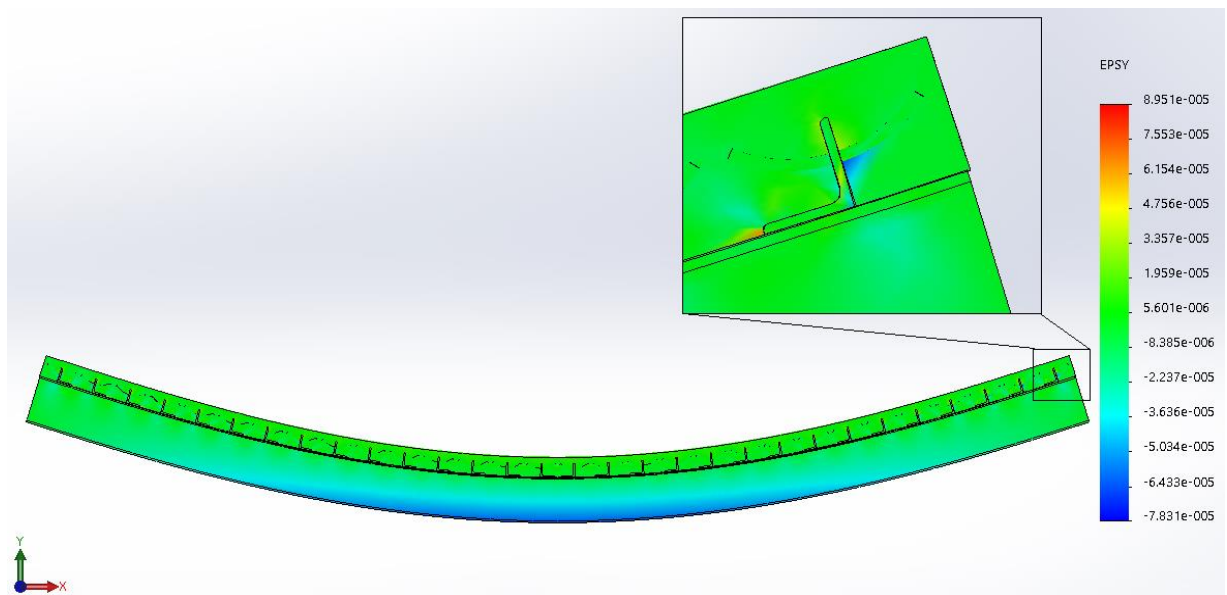


3.20 pav. Kompozitinės sijos S-2 normalinių σ_z įtempių diagrama

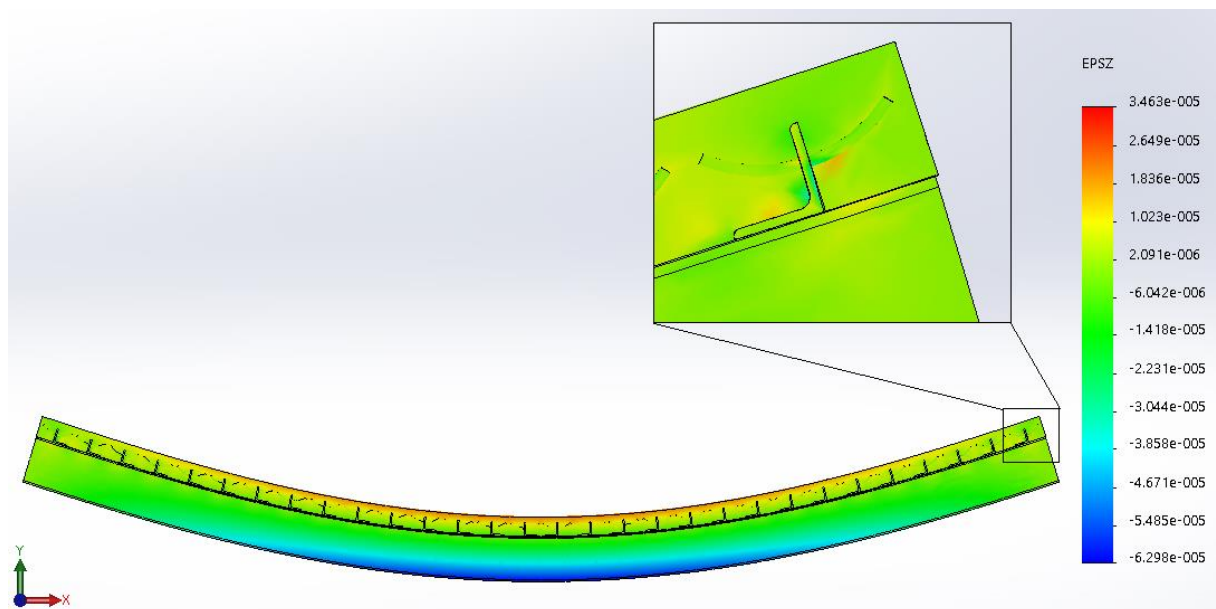
Didžiausios ϵ_x ir ϵ_y deformacijos yra plieninės sijos apatinėje dalyje ir betone ties jungėmis, o deformacijos ϵ_z dar ir viršutinėje betoninės plokštės dalyje. Visų šių deformacijų pasiskirstymas kompozitinėje sijoje pateiktas 3.21–3.23 paveiksluose.



3.21 pav. Kompozitinės sijos S-2 ϵ_x deformacijų diagrama



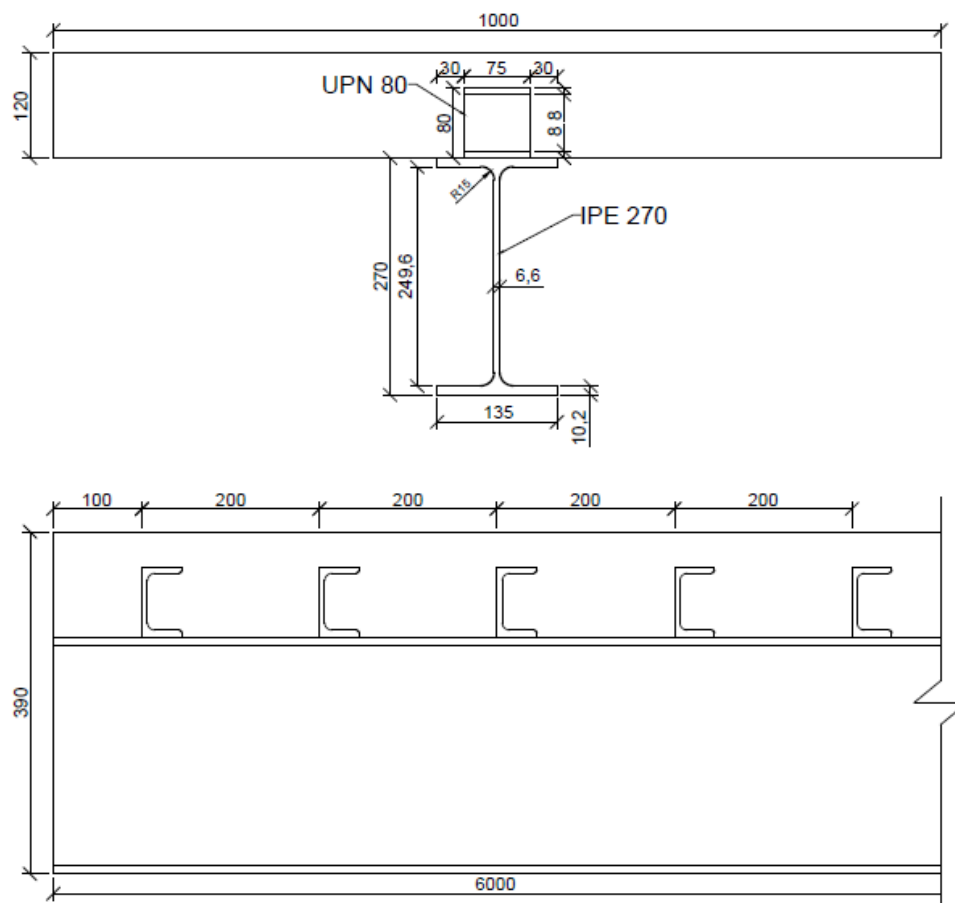
3.22 pav. Kompozitinės sijos S-2 ϵ_y deformacijų diagrama



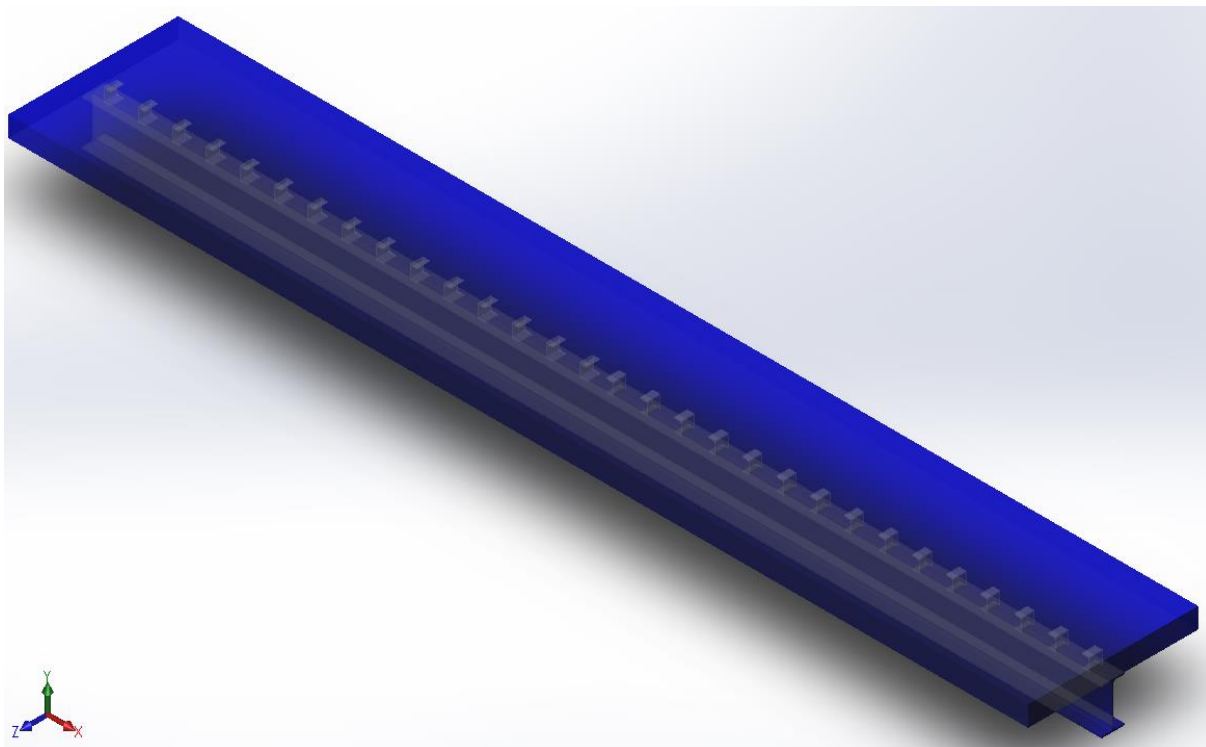
3.23 pav. Kompozitinės sijos S-2 ϵ_z deformacijų diagrama

3.2.3. Kompozitinė plieno-betono sija S-3

Kompozitinės sijos S-3 šlyties jungės susideda iš plieninio lovio UPN 80. Jungės išdėstomos ant plieninės sijos viršutinės lentynos per visą jos ilgį kas 200mm. Kompozitinės sijos skerspjūvio matmenys ir jungių išdėstymas pateiktas 3.24 paveiksle.

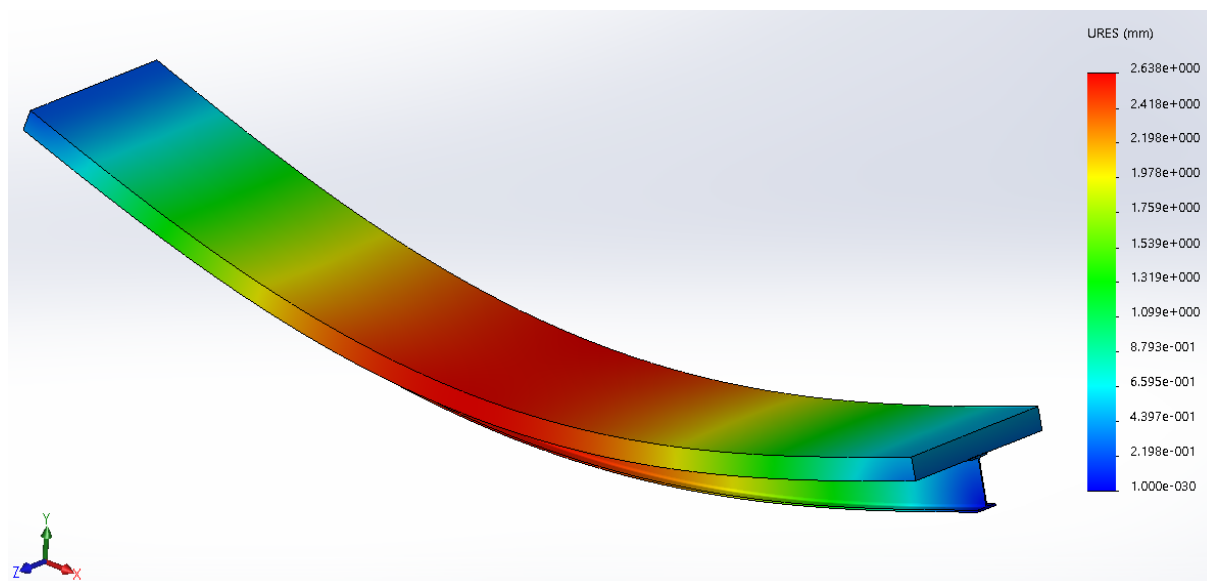


3.24 pav. Kompozitinės sijos S-3 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas

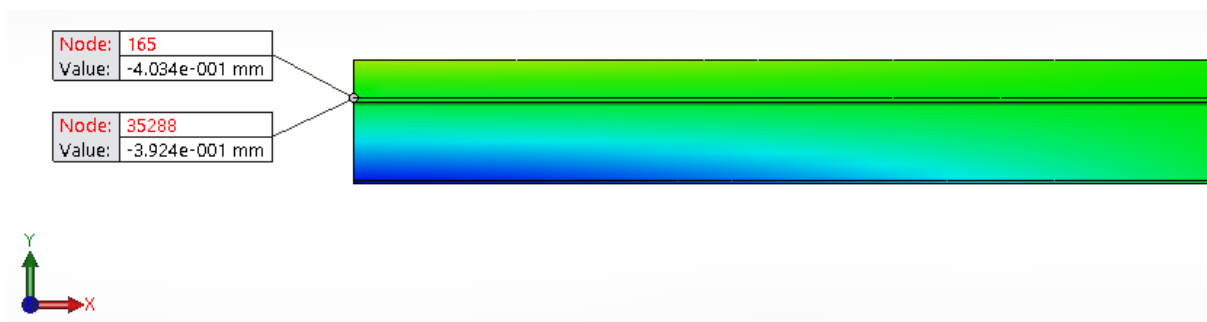


3.25 pav. Kompozitinės sijos S-3 geometrinis modelis

Kompozitinės sijos S-3 didžiausias poslinkis esant 4kN/m^2 apkrovai yra sijos viduryje ($2,638\text{mm}$) ir link kraštų mažėja, kol ties atramomis poslinkis išnyksta ir lygus 0mm . Kompozitinės sijos S-3 poslinkių diagrama pateikta 3.26 paveiksle.



3.26 pav. Kompozitinės sijos S-3 poslinkių diagrama

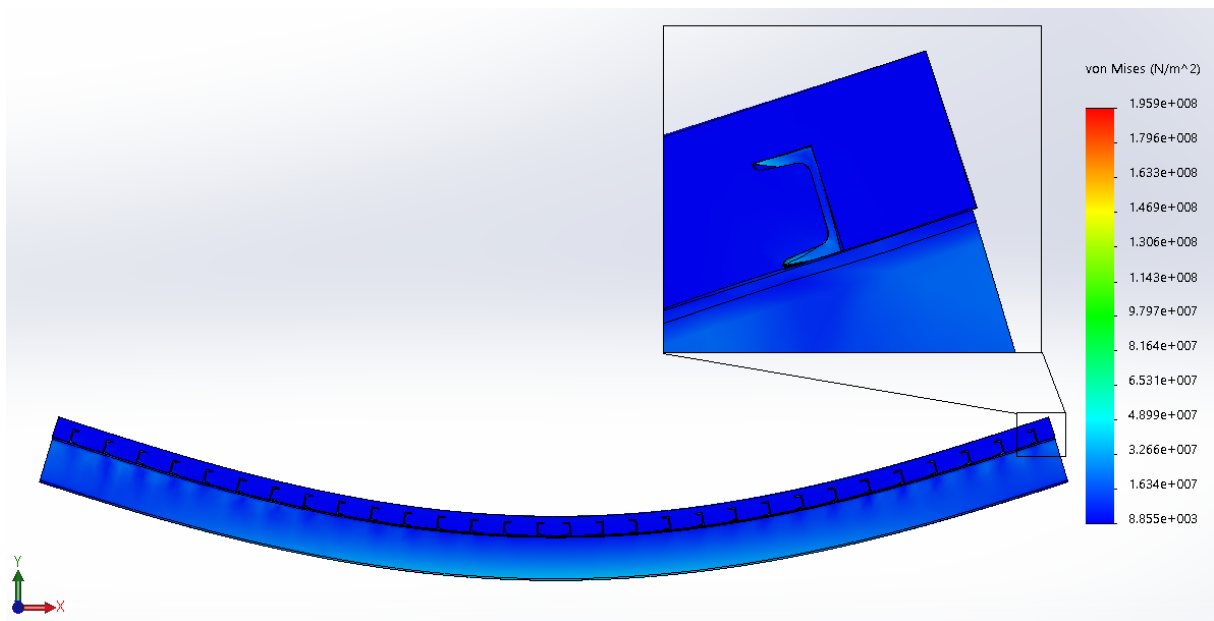


3.27 pav. Kompozitinės sijos S-3 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi

3.27 paveiksle pateikti plieninės sijos ir betoninės plokštės sąlyčio plokštumoje poslinkiai x ašies kryptimi. Plieninės sijos poslinkis – $0,3924\text{mm}$, o betoninės plokštės – $0,4034\text{mm}$. Praslydimas tarp kompozitinės sijos sluoksnių:

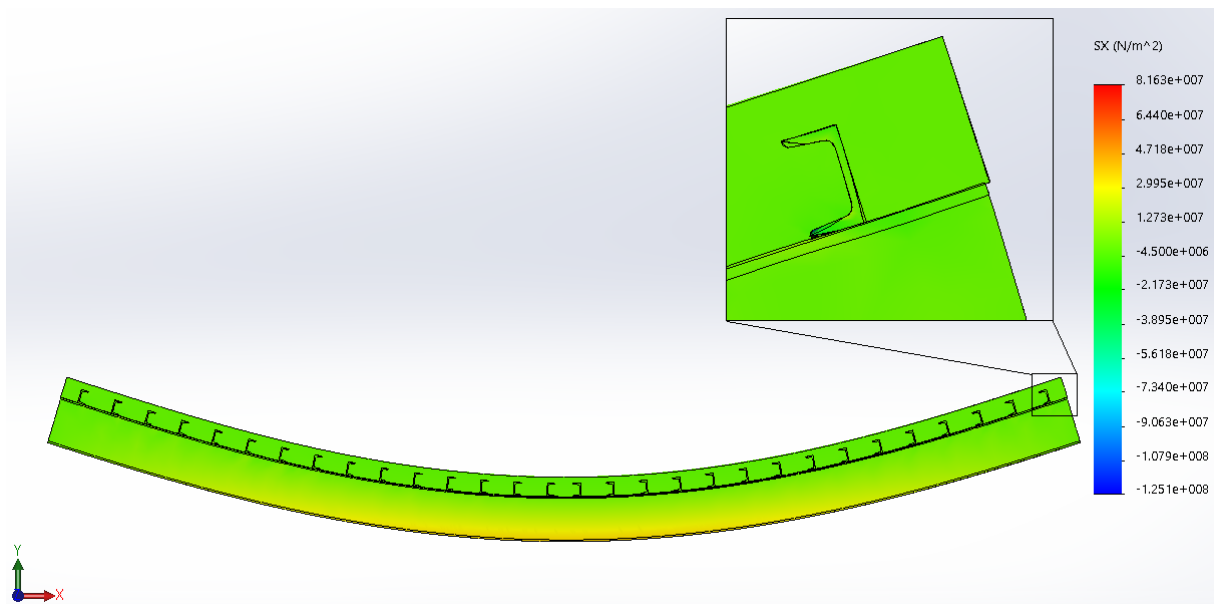
$$s_{S-3} = 0,4034 - 0,3924 = 0,011\text{mm}.$$

Didžiausi Von Mises įtempiai yra plieninėje sijoje ir kraštinėse šlyties jungėse, o mažiausi betoninėje plokštėje. Von Mises įtempių pasiskirstymas kompozitinėje sijoje S-3 pateiktas 3.28 paveiksle.

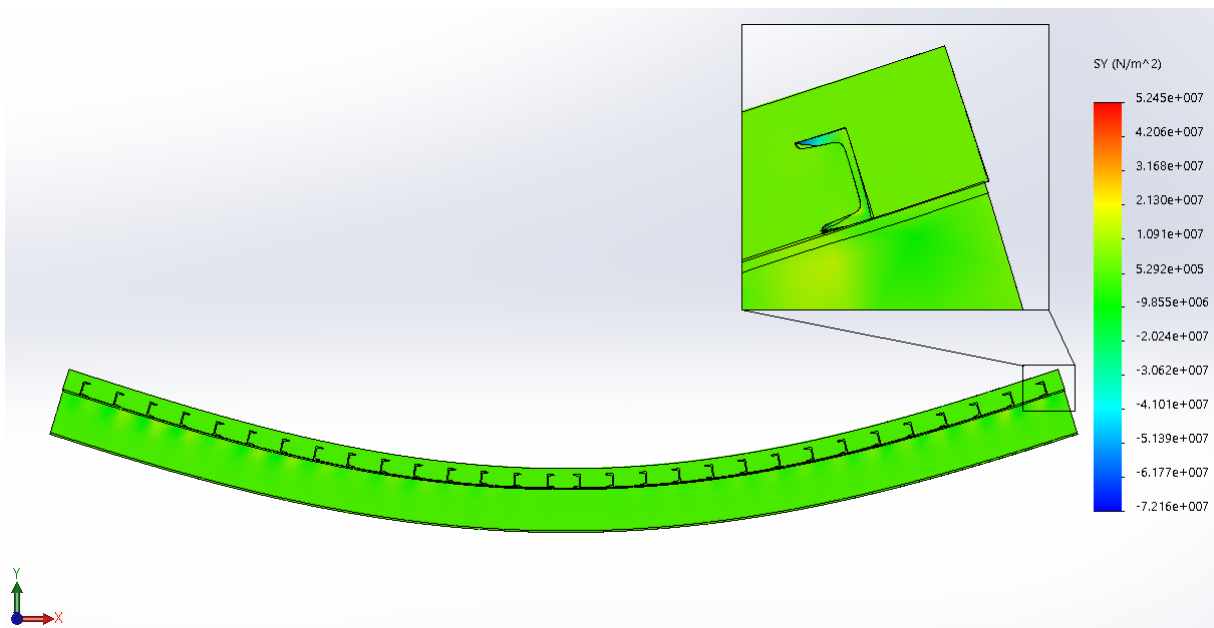


3.28 pav. Kompozitinės sijos S-3 Von Mises įtempių diagrama

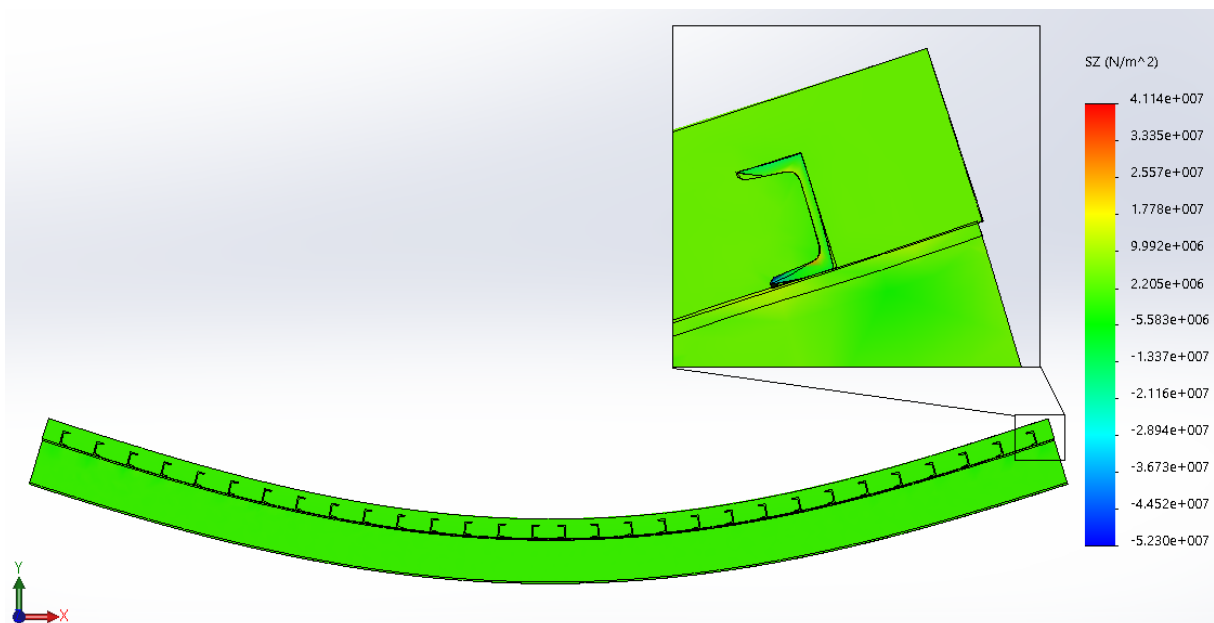
Didžiausi teigiami normaliniai σ_x įtempiai yra plieninės sijos apatinėje dalyje, o šlyties jungėse įtempiai panašūs kaip ir betoninėje plokštėje. Normalinių σ_x įtempių pasiskirstymas pateiktas 3.29 paveiksle. Normaliniai σ_y ir σ_z įtempiai labiausiai išsiskiria šlyties jungėse ir jų pasiskirstymas pateiktas 3.30 ir 3.31 paveiksluose.



3.29 pav. Kompozitinės sijos S-3 normalinių σ_x įtempių diagrama

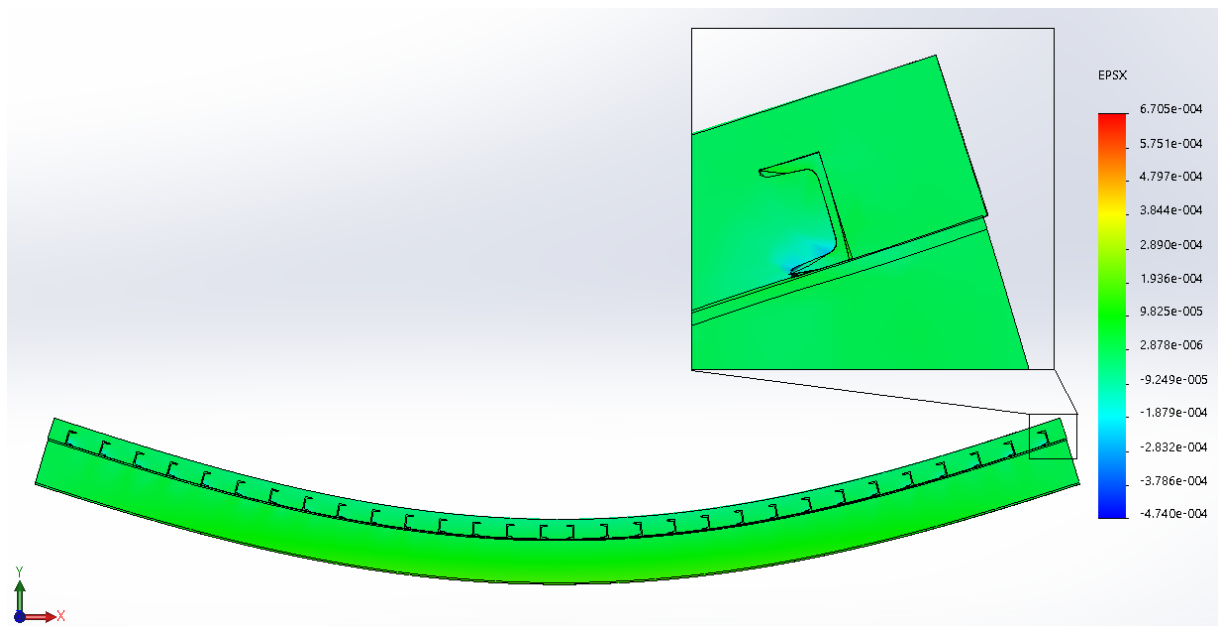


3.30 pav. Kompozitinės sijos S-3 normalinių σ_y įtempių diagrama

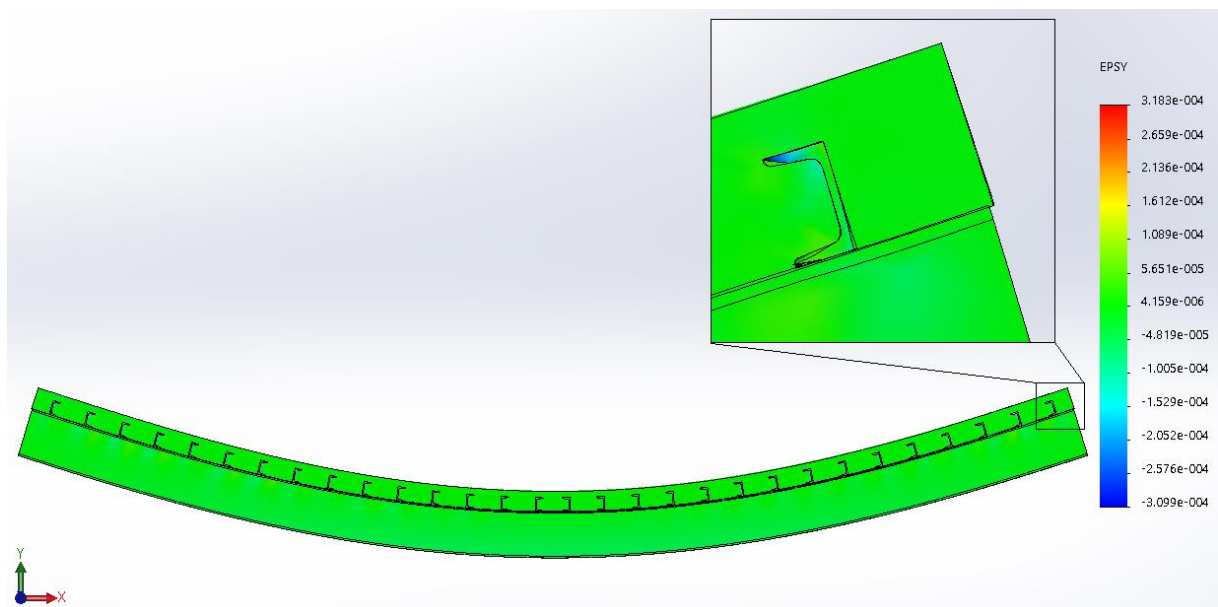


3.31 pav. Kompozitinės sijos S-3 normalinių σ_z įtempių diagrama

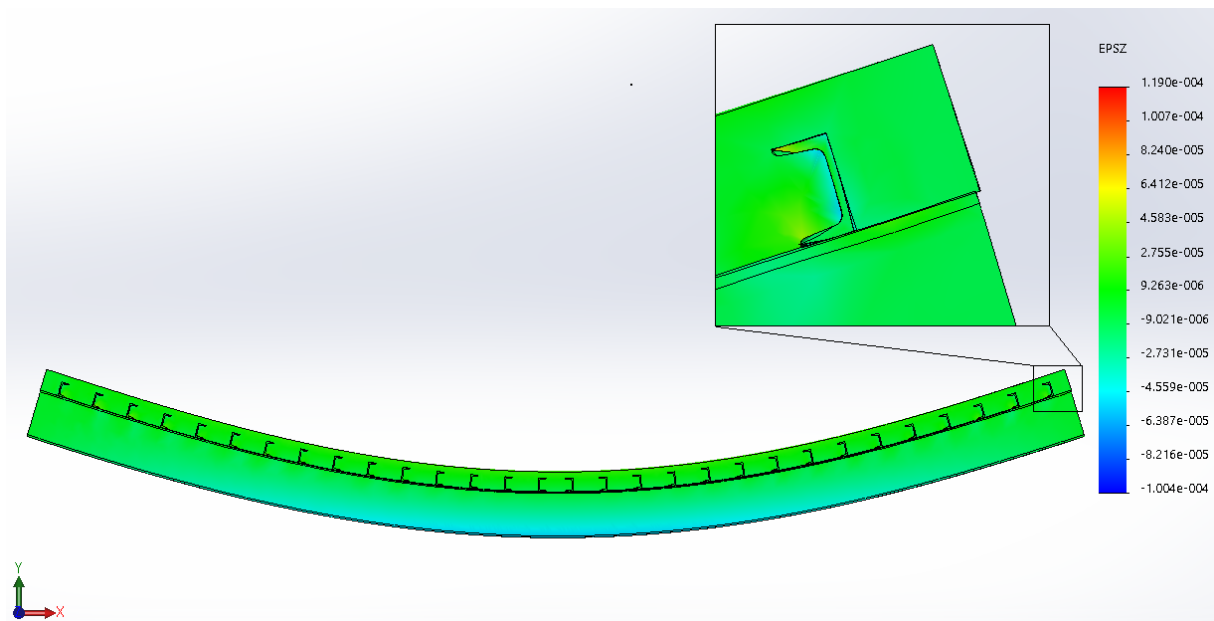
Didžiausios ε_x deformacijos yra betone ties šlyties jungėmis, o ε_y pačiose junėse. Deformacijos ε_z didžiausios ties jungėmis ir apatinėje plieninės sijos dalyje. Visų šių deformacijų pasiskirstymas kompozitinėje sijoje pateiktas 3.32–3.34 paveiksluose.



3.32 pav. Kompozitinės sijos S-3 ϵ_x deformacijų diagrama



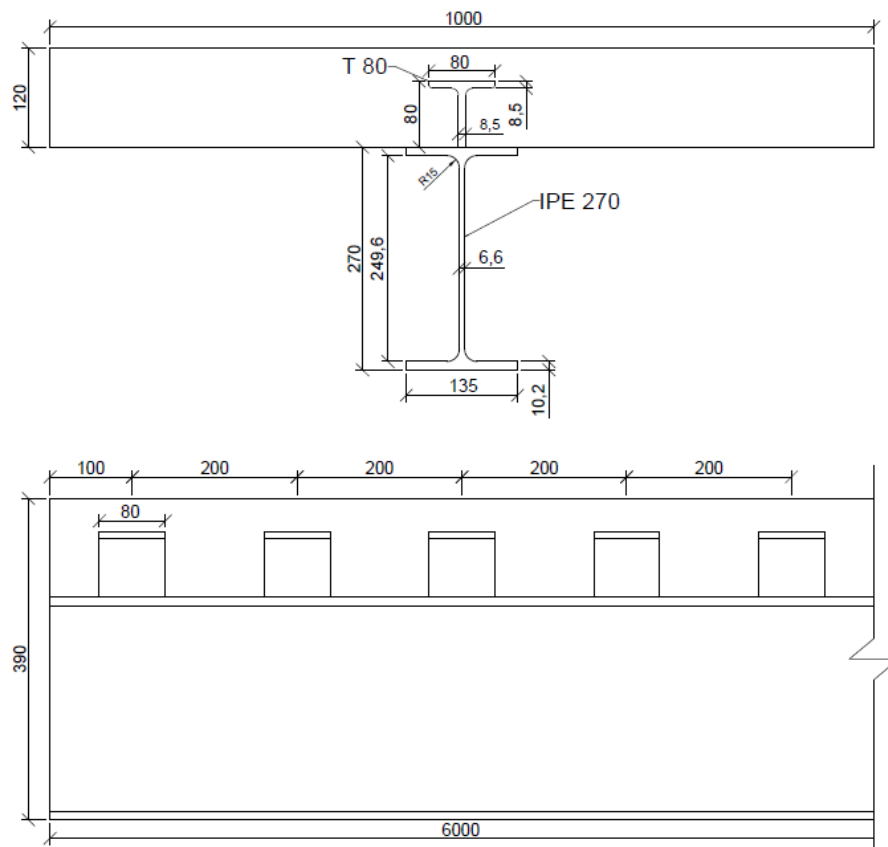
3.33 pav. Kompozitinės sijos S-3 ϵ_y deformacijų diagrama



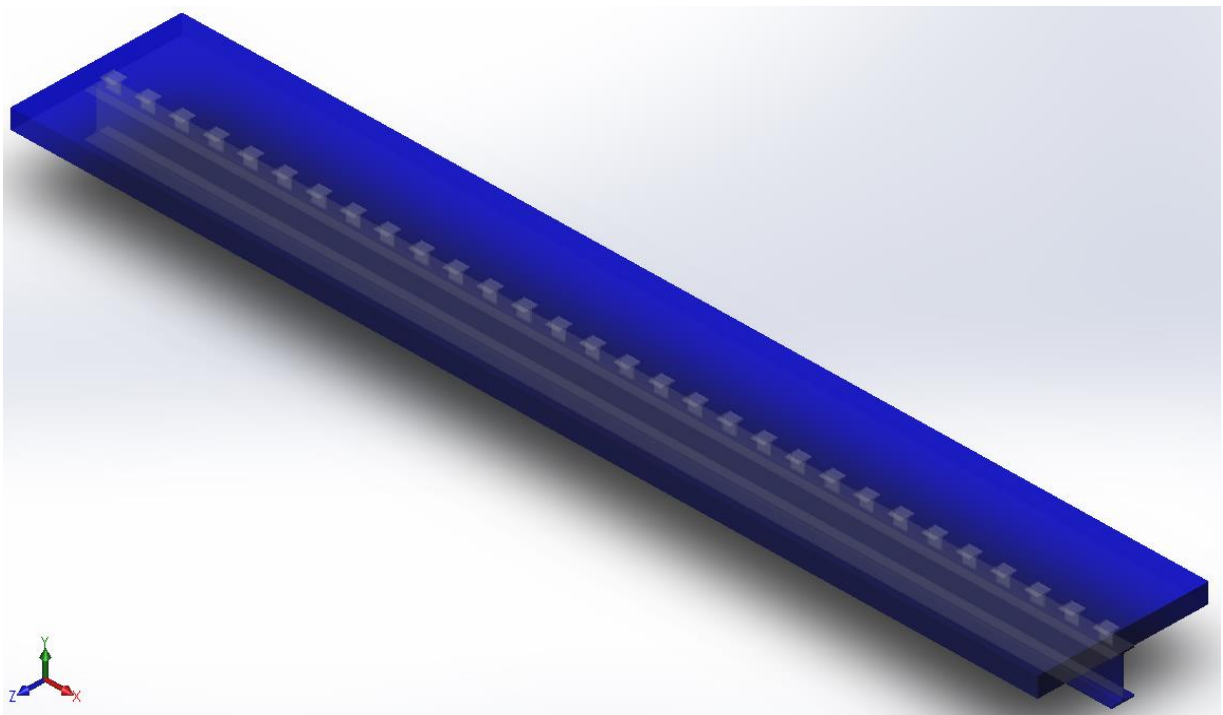
3.34 pav. Kompozitinės sijos S-3 ϵ_z deformacijų diagrama

3.2.4. Kompozitinė plieno-betono sija S-4

Kompozitinės sijos S-4 šlyties jungės susideda iš plieninio tėjinio profiliuotio T 80. Jungės išdėstomos ant plieninės sijos viršutinės lentynos per visą jos ilgį kas 200mm. Kompozitinės sijos skerspjūvio matmenys ir jungių išdėstymas pateiktas 3.35 paveiksle.

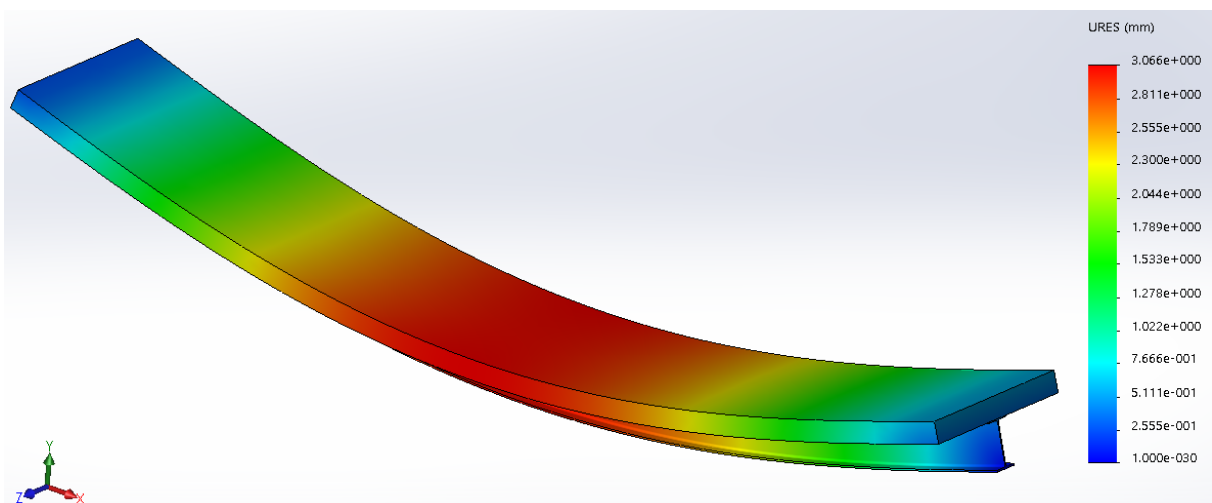


3.35 pav. Kompozitinės sijos S-4 matmenys ir šlyties jungių išdėstymas

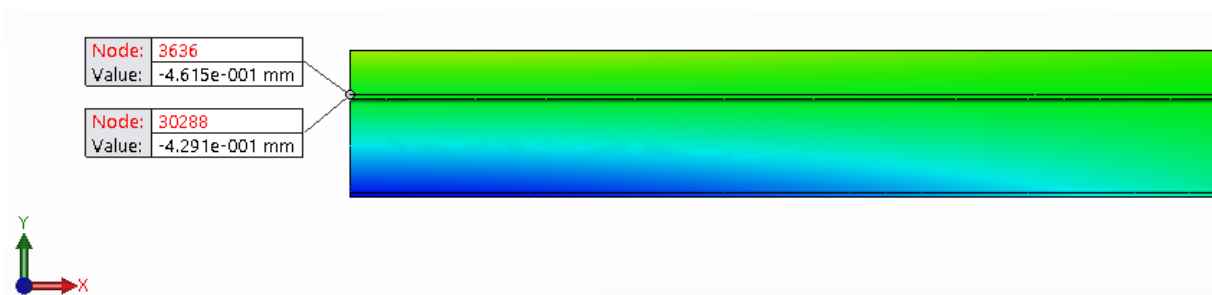


3.36 pav. Kompozitinės sijos S-4 geometrinis modelis

Kompozitinės sijos S-4 didžiausias poslinkis esant 4kN/m^2 apkrovai yra sijos viduryje ($3,066\text{mm}$) ir link kraštų mažėja, kol ties atramomis poslinkis išnyksta ir lygus 0mm . Kompozitinės sijos S-4 poslinkių diagrama pateikta 3.37 paveiksle.



3.37 pav. Kompozitinės sijos S-4 poslinkių diagrama

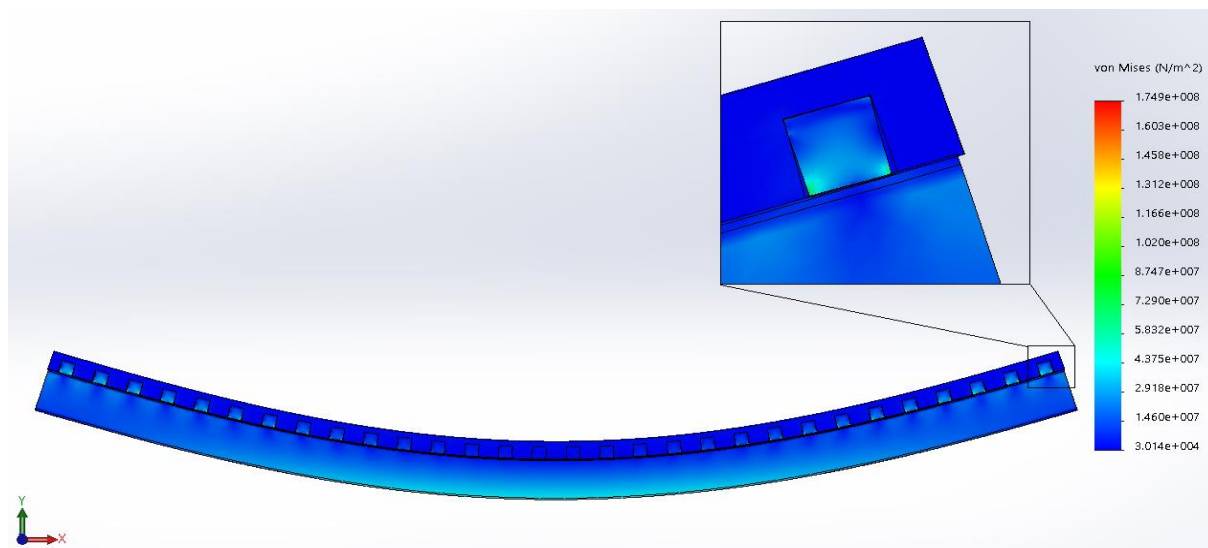


3.38 pav. Kompozitinės sijos S-4 sluoksnių poslinkis x ašies kryptimi

3.38 paveiksle pateikti plieninės sijos ir betoninės plokštės sąlyčio plokštumoje poslinkiai x ašies kryptimi. Plieninės sijos poslinkis – 0,4291mm, o betoninės plokštės – 0,4615mm. Praslydimas tarp kompozitinės sijos sluoksnių:

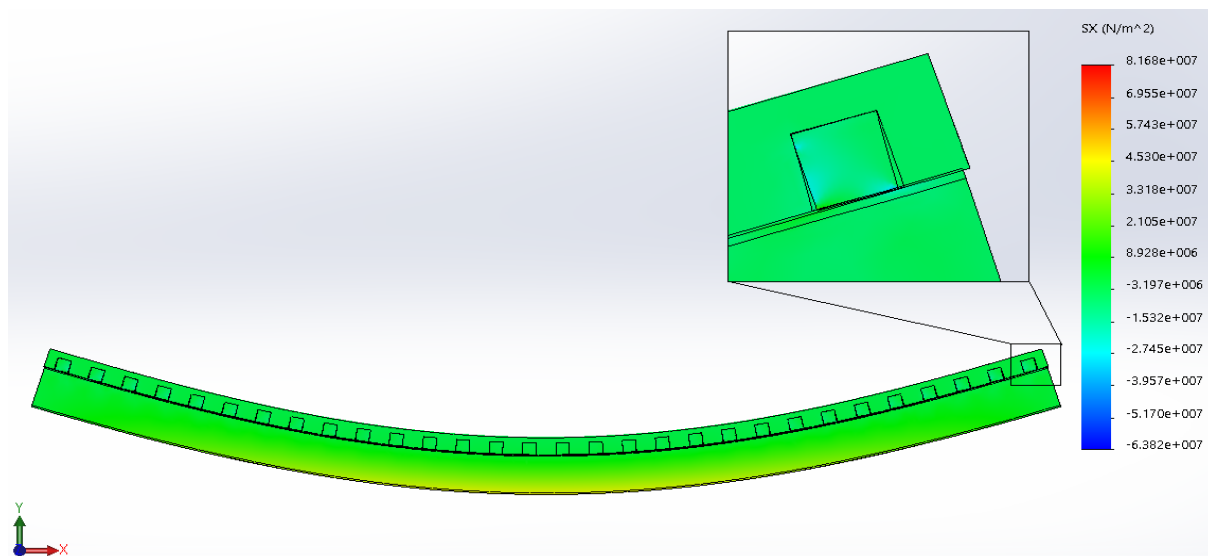
$$s_{S-4} = 0,4615 - 0,4291 = 0,0324mm.$$

Didžiausi Von Mises įtempiai yra plieninės sijos apatinėje dalyje ir kraštinėse šlyties jungėse, o mažiausi betoninėje plokštėje. Von Mises įtempių pasiskirstymas kompozitinėje sijoje S-4 pateiktas 3.39 paveiksle.

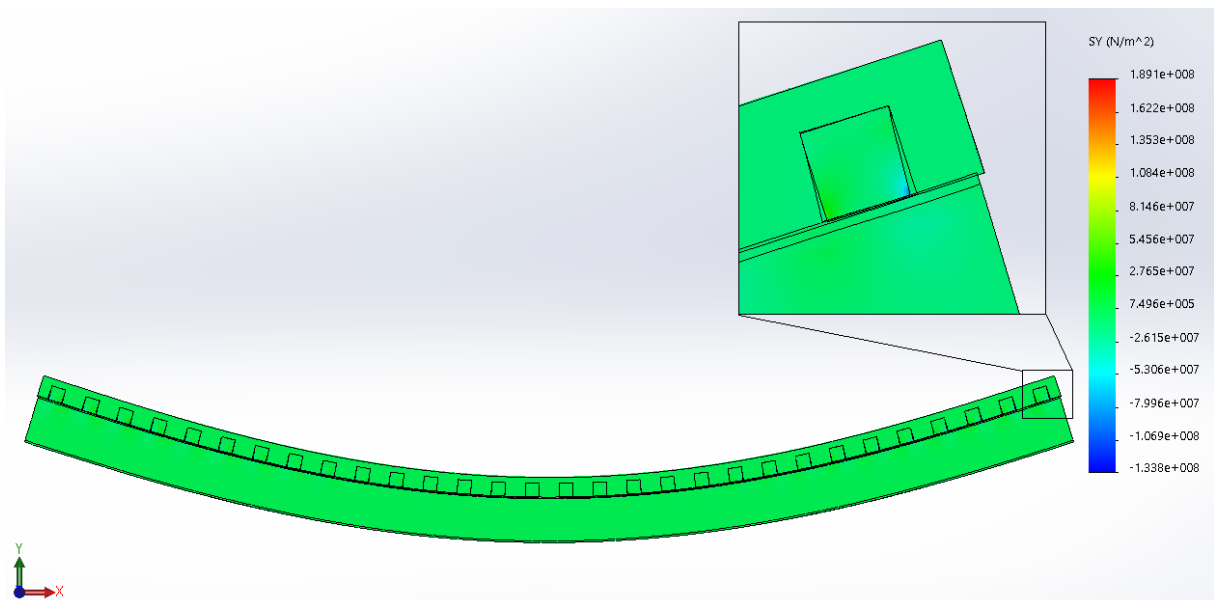


3.39 pav. Kompozitinės sijos S-4 Von Mises įtempių diagrama

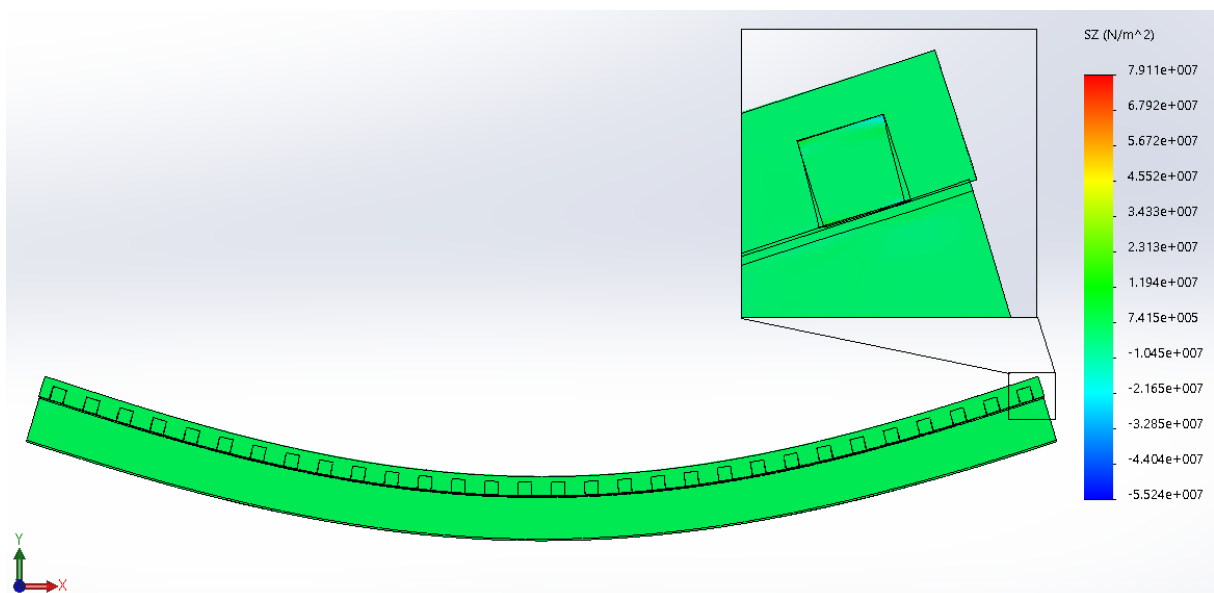
Didžiausi teigiami normaliniai σ_x įtempiai yra plieninės sijos apatinėje dalyje, o šlyties jungėse įtempiai panašūs kaip ir betoninėje plokštėje, tik kraštuose truputį išsiskiria. Normalinių σ_x įtempių pasiskirstymas pateiktas 3.40 paveiksle. Normaliniai σ_y ir σ_z įtempiai labiau išsiskiria šlyties jungių kampuose ir jų pasiskirstymas pateiktas 3.41 ir 3.42 paveiksluose.



3.40 pav. Kompozitinės sijos S-4 normalinių σ_x įtempių diagrama

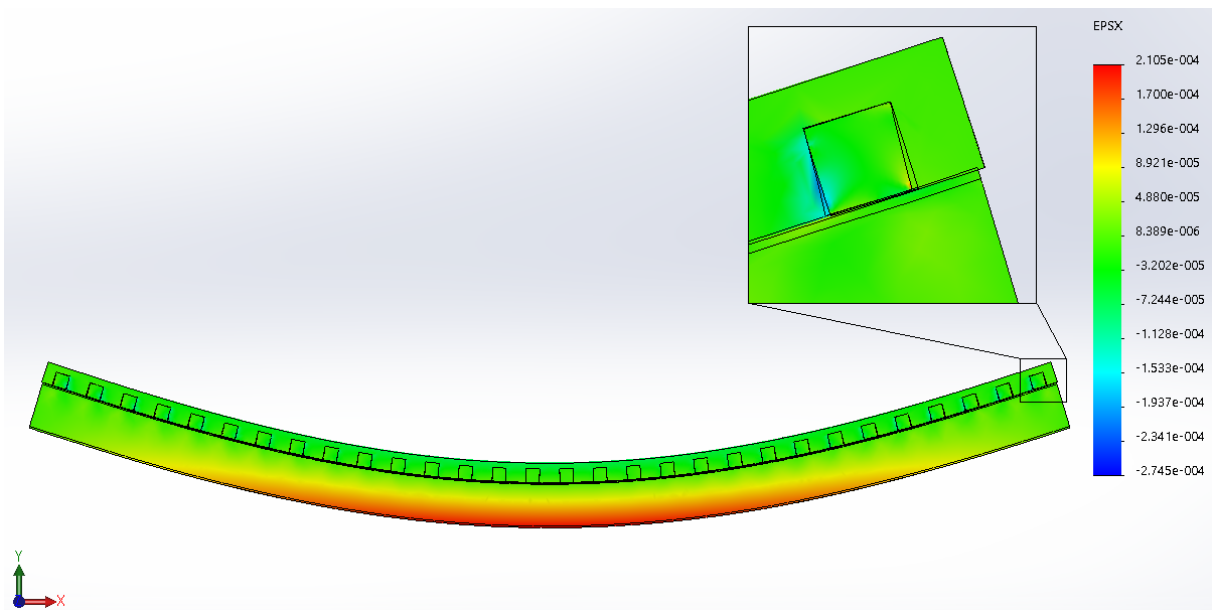


3.41 pav. Kompozitinės sijos S-4 normalinių σ_y įtempių diagrama

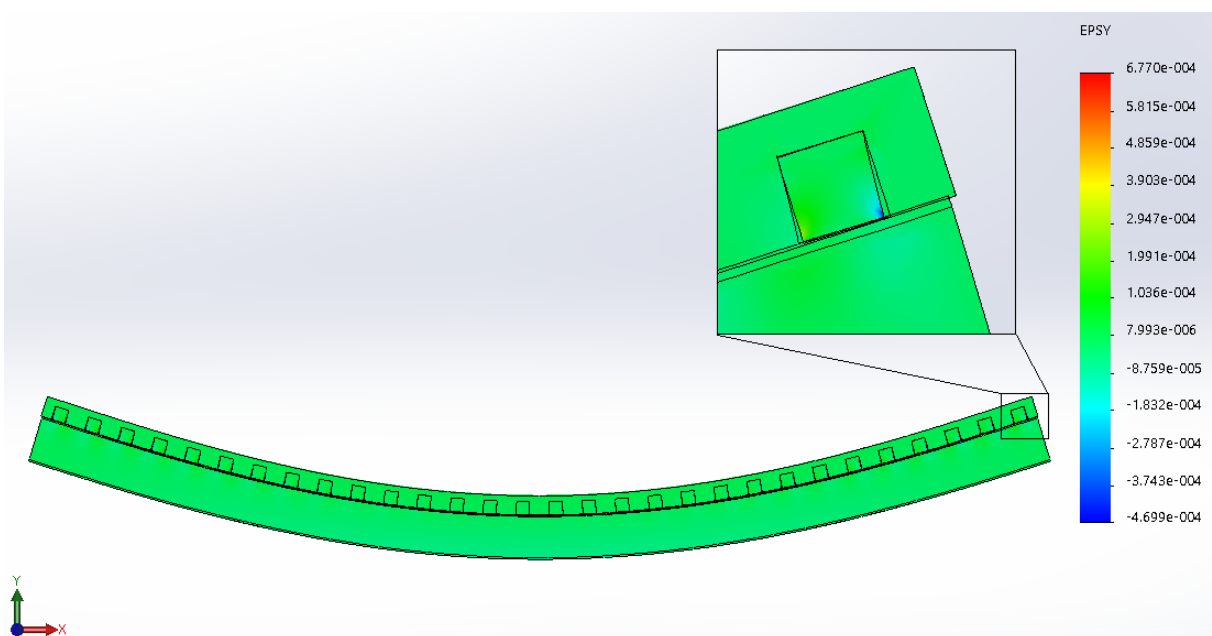


3.42 pav. Kompozitinės sijos S-4 normalinių σ_z įtempių diagrama

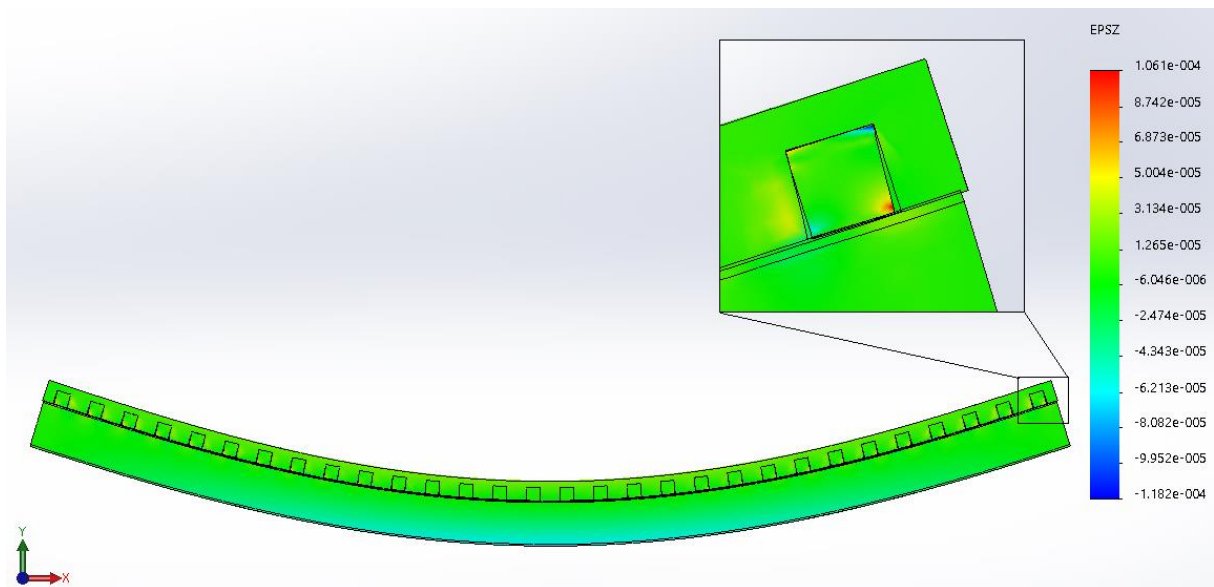
Didžiausios teigiamos ϵ_x deformacijos yra apatinėje sijos dalyje ir šlyties jungės krašte, kur yra tempimas, o labiausiai išsiskiria neigiamos deformacijos ties jungės ir betono sąlyčiu kur vyrauja gniuždymas. Deformacijos ϵ_y ir ϵ_z labiausiai išsiskiria šlyties jungės kampuose. Visų šių deformacijų pasiskirstymas kompozitinėje sijoje pateiktas 3.43–3.45 paveiksluose.



3.43 pav. Kompozitinės sijos S-4 ϵ_x deformacijų diagrama



3.44 pav. Kompozitinės sijos S-4 ϵ_y deformacijų diagrama

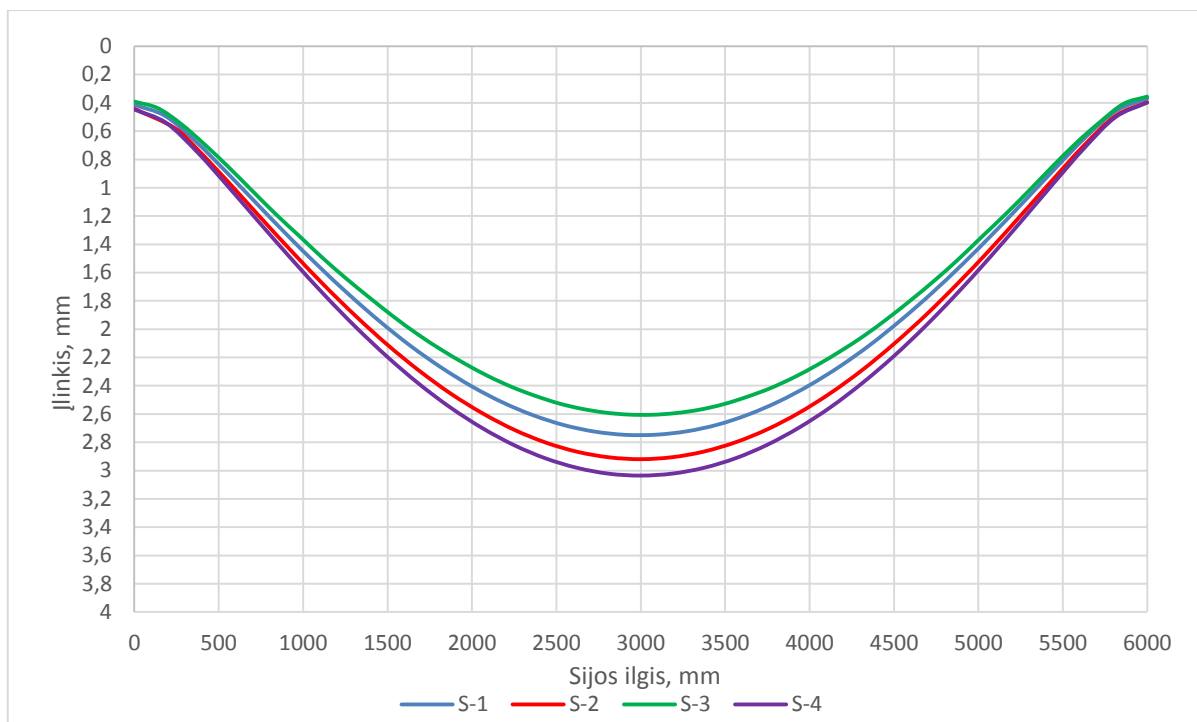


3.45 pav. Kompozitinės sijos S-4 ϵ_z deformacijų diagrama

3.3. Kompozitinių plieno-betono sijų su skirtingomis šlyties jungėmis gautų rezultatų palyginimas

Išanalizuotos keturios kompozitinės plieno-betono sijos su skirtingomis šlyties jungėmis. Analizuojami buvo kompozitinės sijos poslinkiai, sluoksnių praslydimas, įtempių pasiskirstymas bei deformacijos. Pagal gautus duomenis nubraižytos visų analizuojamų kompozitinių sijų diagramos ir palygintos tarpusavyje. Nustatyta, su kuriomis jungėmis kompozitinės plieno-betono sijos mažiausiai įlinksta, įvyksta mažiausias praslydimas tarp sluoksnių. Gauti visų kompozitinių sijų įlinkiai palyginti su teoriniu įlinkiu, kuris apskaičiuotas pagal Europos normas.

Visų sumodeliuotų kompozitinių sijų įlinkiai nuo tos pačios išskirstytos apkrovos skiriasi priklausomai nuo šlyties jungių formos. Didžiausias įlinkis S-4 sijos, kurios jungės yra tęjinės (T 80), o mažiausiai įlinksta S-3 sija su lovinėmis (UPN 80) jungėmis. Sijų įlinkiai pateikti grafiškai 3.46 paveiksle.



3.46 pav. Kompozitinių sijų įlinkių grafikas

Visų keturių kompozitinių plieno-betono sijų su skirtingomis šlyties jungėmis įlinkio palyginimas su teoriniu pagal Europos normas apskaičiuotu įlinkiu pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Kompozitinių sijų teorinio įlinkio palyginimas su kompiuteriniu

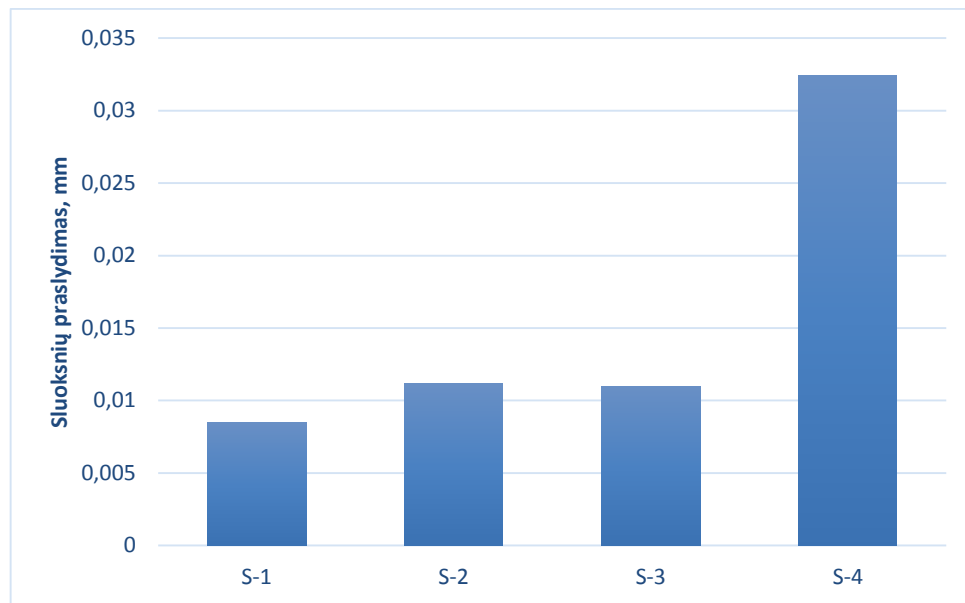
Kompozitinė sija	Kompiuterinis įlinkis, mm	Teorinis įlinkis, mm	Įlinkio skirtumas, %
S-1	2,777	2,68	3,62 %
S-2	2,948	2,68	10,0 %
S-3	2,638	2,68	-1,57 %
S-4	3,066	2,68	14,40 %

Iš pateiktos 2 lentelės matyti, kad sijos S-3 įlinkis yra artimiausias apskaičiuotam pagal Europos normas, kuris skiriasi 1,57 %. Labiausiai įlinkis skiriasi nuo teorinio S-4 sijos, kurio skirtumas 14,4 %.

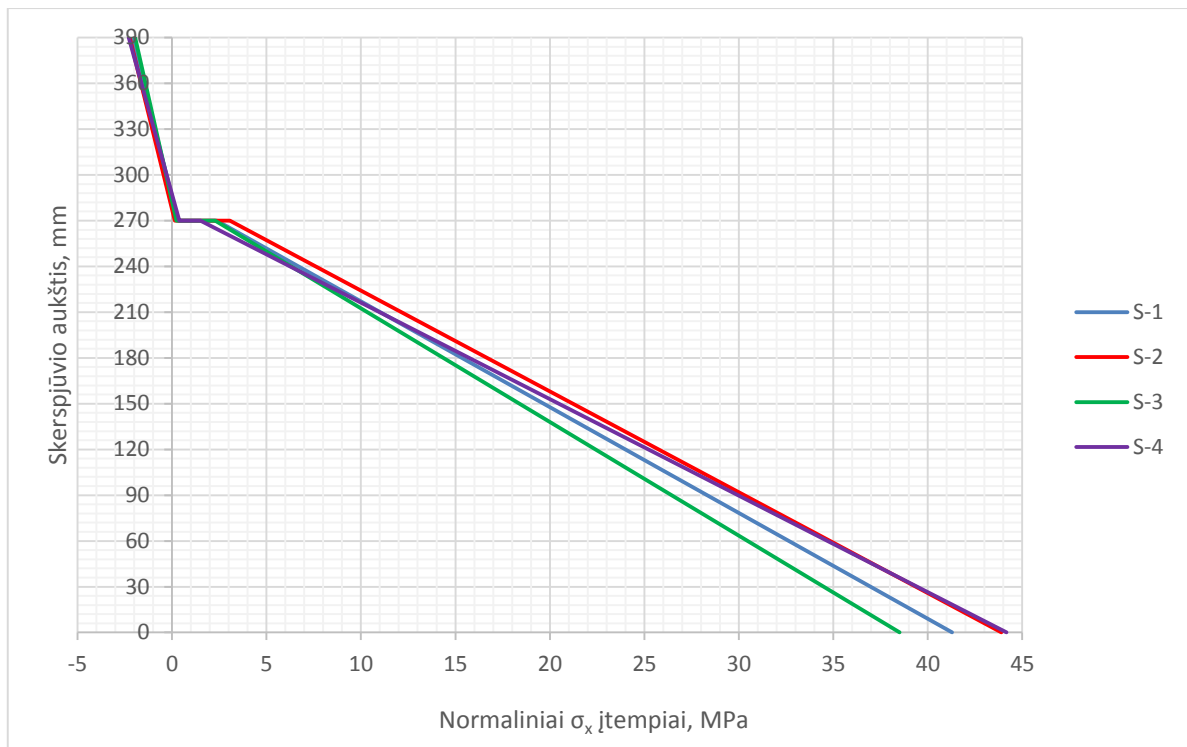
Kompozitinių sijų elgsenai didelę įtaką turi plieninės sijos ir betoninės plokštės tarpusavio sujungimas, kuris priklauso nuo šlyties jungių kiekio ir formos. Kuo standesnės jungės ir didesnis jų gniuždomasis plotas, tuo mažesnis praslydimas tarp plieno sijos ir betono plokštės. 3 lentelėje pateiktas nagrinėjamų kompozitinių plieno-betono sijų sluoksnių praslydimas. Mažiausias praslydimas tarp plieninės sijos ir betoninės plokštės įvyksta kompozitinėje sijoje S-1. Didžiausias praslydimas įvyksta S-4 sijoje, nes šios sijos šlyties jungių mažiausias plotas kuriuo veikiant apkrovai gniuždomas betonas. Praslydimų tarp plieno sijos ir betono plokštės palyginimas pateiktas 3.47 paveikslo grafike.

3 lentelė. Kompozitinių sijų sluoksnių praslydimas

Kompozitinė sija	Betono plokštės poslinkis, mm	Plieno sijos poslinkis, mm	Poslinkių skirtumas, mm
S-1	0,4211	0,4126	0,0085
S-2	0,4527	0,4415	0,0112
S-3	0,4034	0,3924	0,011
S-4	0,4615	0,4291	0,0324

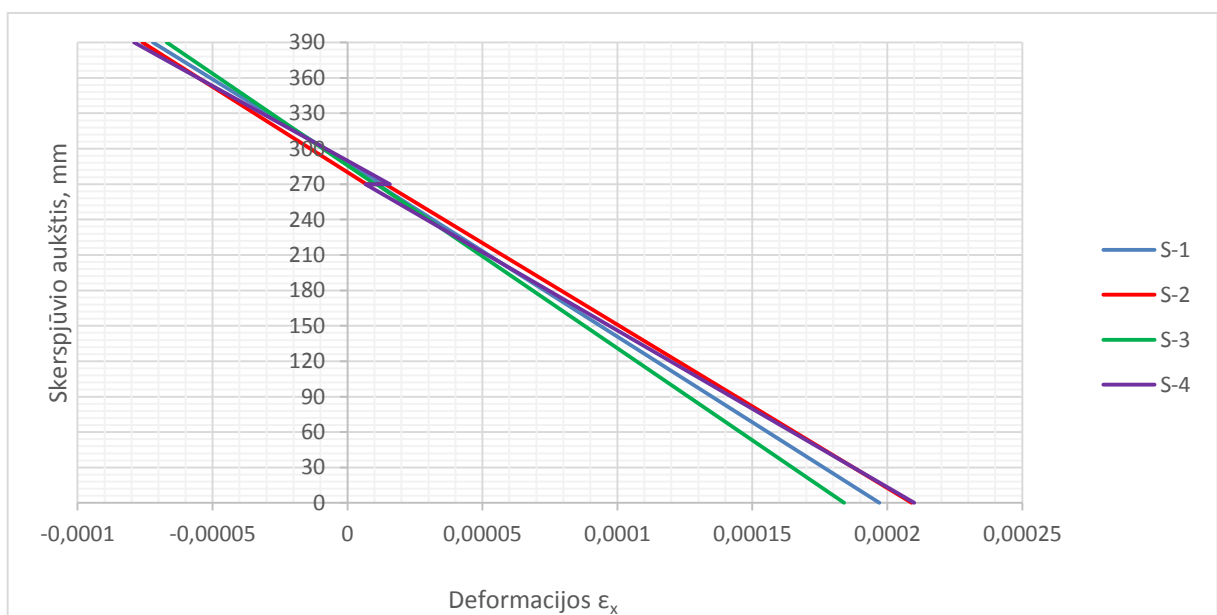
**3.47 pav.** Praslydimo tarp kompozitinių sijų sluoksnių grafikas

3.48 paveiksle pateikti visų nagrinėjamų sijų normalinių σ_x įtempių grafikai. Iš grafikų matoma, kad visų sijų betono plokštėje įtempiai neigiami, tik pačioje plokštės apačioje atsiranda teigiami įtempiai. Ties plieninės sijos ir betoninės plokštės sujungimu matomas staigus įtempių padidėjimas, nes plieninėje sijoje yra tik teigiami ir daug didesni įtempiai. Pagal įtempių pasiskirstymo grafikus matyti, kad visų kompozitinių sijų neutralioji ašis yra betono plokštėje. Mažiausi įtempiai yra S-3 sijoje su lovinėmis UPN 80 jungėmis, o didžiausi S-4 sijoje, kurios jungės yra iš tėjinio profiliuoto.



3.48 pav. Kompozitinių sijų normalinių σ_x įtempių grafikas

3.49 paveiksle pateikti nagrinėjamų sijų deformacijų ϵ_x grafikai. Iš grafikų matoma, kad visų sijų sluoksniai dirba bendrai, o neutralioji ašis betono plokštėje. Kompozitinių sijų betono plokštėje deformacijos neigiamos, tik pačioje plokštės apačioje atsiranda teigiamos. Ties plieninės sijos ir betoninės plokštės sujungimu pastebimas staigus deformacijų pasikeitimas. Plieninėje sijoje yra tik teigiamos deformacijos. Mažiausios deformacijos yra S-3 sijoje su lovinėmis UPN 80 jungėmis, o didžiausios S-4 sijoje, kurios jungės yra iš tęjinio T 80 profiliuotio.



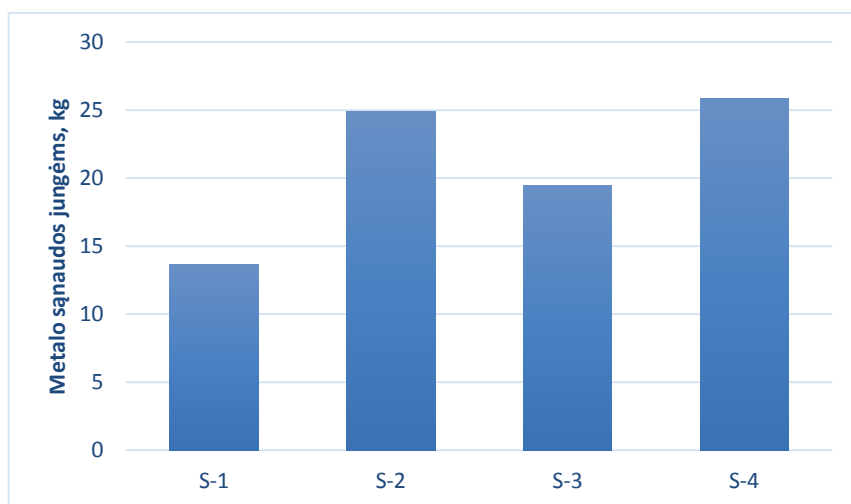
3.49 pav. Kompozitinių sijų deformacijų ϵ_x grafikas

4 lentelėje pateikiamos visų analizuojamų kompozitinių sijų metalo sąnaudos šlyties jungėms.

4 lentelė. Kompozitinių sijų metalo sąnaudos jungėms

Kompozitinė sija	Jungės	Metalo sąnaudos jungėms, kg
S-1	Galvelinės	13,69
S-2	Kampuotinės (L 80x80x8) su armatūros strypu	24,88
S-3	Lovinės (UPN 80)	19,44
S-4	Tėjinės (T 80)	25,85

Kaip matome 4 lentelėje mažiausios metalo sąnaudos šlyties jungėms (13,69 kg.) yra S-1 kompozitinės sijos, o daugiausia metalo reikia S-4 sijos jungėms (25,85 kg.). Kompozitinių sijų metalo sąnaudų šlyties jungėms palyginimas pateiktas 3.50 paveikslo grafike.



3.50 pav. Kompozitinių sijų metalo sąnaudų jungėms palyginimo grafikas

3.4. Skyriaus išvados

Kompiuterinis modeliavimas parodė, kad šlyties jungių forma turi įtakos kompozitinės plieno-betono sijos įlinkiui bei jungties užtikrinimui tarp plieninės sijos ir betoninės plokštės. Kuo jungės standesnės ir didesniu paviršiaus plotu statmenu paviršių poslinkiui remiasi į betoną, tuo geresnis bendras konstrukcijos darbas. Visų nagrinėjamų kompozitinių sijų sluoksniai dirba bendrai, o neutralioji ašis betono plokštėje.

Didžiausias įlinkis atsiranda S-4 sijoje, kurios jungės yra tėjinės (T 80), o mažiausiai įlinksta S-3 sija su lovinėmis (UPN 80) jungėmis. Iš visų nagrinėjamų kompozitinių sijų įlinkių, gautų sumodeliavus kompiuterine programa, artimiausias apskaičiuotam teoriškai pagal Europos normas yra sijos S-3, kurios įlinkis skiriasi 1,57 % nuo teorinio įlinkio.

Mažiausios metalo sąnaudos (13,69 kg.) yra S-1 kompozitinės sijos galvelinėms šlyties jungėms, o daugiausia metalo reikia S-4 sijos tėjinėms (T 80) jungėms (25,85 kg.)

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

1. Kompiuterinis modeliavimas parodė, kad šlyties jungių forma turi įtakos kompozitinės plieno-betono sijos įlinkiui bei jungties tarp plieninės sijos ir betoninės plokštės užtikrinimui. Kuo jungės standesnės ir didesniu paviršiaus plotu, statmenu paviršių poslinkiui, remiasi į betoną, tuo geresnis bendras konstrukcijos darbas.
2. Didžiausias įlinkis atsiranda S-4 sijoje, kurios jungės yra tęjinės (T 80), o mažiausiai įlinksta S-3 sija su lovinėmis (UPN 80) jungėmis. Iš visų nagrinėjamų kompozitinių sijų įlinkių, gautų sumodeliavus kompiuterine programa, artimiausias apskaičiuotam teoriškai pagal Europos normas yra sijos S-3, kurios įlinkis skiriasi 1,57 % nuo teorinio įlinkio.
3. Šlyjamoji jėga tiesiogiai priklauso nuo vertikalios skersinės jėgos, todėl labiausiai apkraunamos kraštinės jungės ir didžiausias prasislinkimas tarp paviršių susiformuoja sijos galuose. Iš keturių sumodeliuotų kompozitinių sijų mažiausias prasislinkimas (0,0085mm) įvyksta S-1 sijoje, kuri yra su galvelinėmis jungėmis, o didžiausias prasislinkimas (0,0324mm) S-4 sijos su tęjinėmis (T 80) jungėmis.
4. Jungės laikomoji galia skaičiavimuose priklauso nuo dviejų kriterijų: vietinio betono gniuždymo ir šlyties jėgų jungės skerspjūvyje. Apskaičiavus trijų skirtingų (galvelinių, kampuotinių ir lovinių) šlyties jungių laikomąsias galias, nustatyta, kad didžiausią šlyties jėgą atlaiko lovinės (UPN 80) jungės, o mažiausią – kampuotinės (L 80x80x8) su armatūros strypu.
5. Mechaninės šlyties jungės prastai dirba, kai veikia ciklinės apkrovos, nes nuvargsta kontakto suvirinimas. Kuo didesni jungėse įtempiai, tuo mažiau ciklų jos atlaiko. Iš išanalizuotų kompozitinių sijų didžiausi įtempiai jungėse pasiekiami sijoje S-1. Taip pat jungės skatina pleišėjimą, nes ties jomis susidaro įtempių koncentracija. Šie trūkumai sumažina konstrukcijos ilgaamžiškumą, todėl didelę reikšmę kompozitinių sijų elgsenai turi jungių forma, nuo kurios ir priklauso išvardintų trūkumų įtakos didumas.
6. Kompozitinės sijos plastinė lenkiamoji galia priklauso nuo plastinės neutraliosios ašies padėties. Išskiriamos trys padėty: kai plastinė neutralioji ašis betono plokštėje, dvitėjo lentynoje ir dvitėjo sienelėje. Visų analizuojamų kompozitinių sijų sluoksniai dirba bendrai ir plastinė neutralioji ašis yra betoninėje perdangoje.
7. Kompozitinių sijų įlinkių skaičiavimo nuokrypos tarp kompiuterinių modelių ir apskaičiuoto pagal Europos normas kinta nuo -1,57 % iki 14,4 %, todėl kompozitinių sijų modelius reikėtų kalibruoti taikant laboratorinius bandymus.

LITERATŪRA

- ACI 440.1R-06: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*. Michigan: American Concrete Institute. 2006. 44p. ISBN 9780870312106.
- Banthia, N.; Dubey, A. 2000. Measurement of flexural toughness of fiber-reinforced concrete using a novel technique – part 2: performance of various composites, *ACI Materials Journal* 97(1): 3-11.
- Caprani, C. 2008. *Composite Construction and Design*. 23 p.
- Cosenza, E.; Zandonini, R. 1999. *Composite Construction*. Structural Engineering Handbook. 122 p.
- Gurskis, V. 2008. *Statybinės medžiagos*. Mokomoji knyga. Kaunas: Ardiva. 136 p.
- Kaklauskas, G.; Bačinskas, D.; Gribniak, V.; Jakubovskis, R.; Ulbinas, D.; Gudonis, E.; Meškėnas, A.; Timinskas, E.; Sokolov, A. 2012. *Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos*. Vadovėlis. Vilnius: Technika. 300 p.
- Lawson, M. R.; Chung, K. F. 1994. *Composite Beam Design to Eurocode 4*. The Steel Construction Institute. 135 p.
- LST EN 1992-1-1:2005. Eurokodas 2. *Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. 1-1 dalis. *Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
- LST EN 1993-1-1:2005. Eurokodas 3. *Plieninių konstrukcijų projektavimas*. 1-1 dalis. *Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
- LST EN 1994-1-1:2005. Eurokodas 4. *Kompozitinių plieninių-betoninių konstrukcijų projektavimas*. 1-1 dalis. *Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
- Marčiukaitis, G. 2004. *Pastatai ir jų konstrukcijos*. Mokomoji knyga. Vilnius: Technika. 134 p.
- Martin, L. H.; Purkiss, J. A. 2008. *Structural Design of Steelwork to EN 1993 and EN 1994*. Third edition. 472 p.
- Mikuckis, F. 2008. *Medžiagų atsparumas*. Metodiniai patarimai. Kaunas: Ardiva. 52 p.
- R. P. Johnson, 2004. *Composite Structures of Steel and Concrete*. University of Warwick. 250 p.
- Rackham, J. W.; Couchman, G. H.; Hicks, S. J. 2009. *Composite Slabs and Beams using Steel Decking: Best Practice for Design and Construction*. The Metal Cladding & Roofing Manufacturers Association. 110 p.

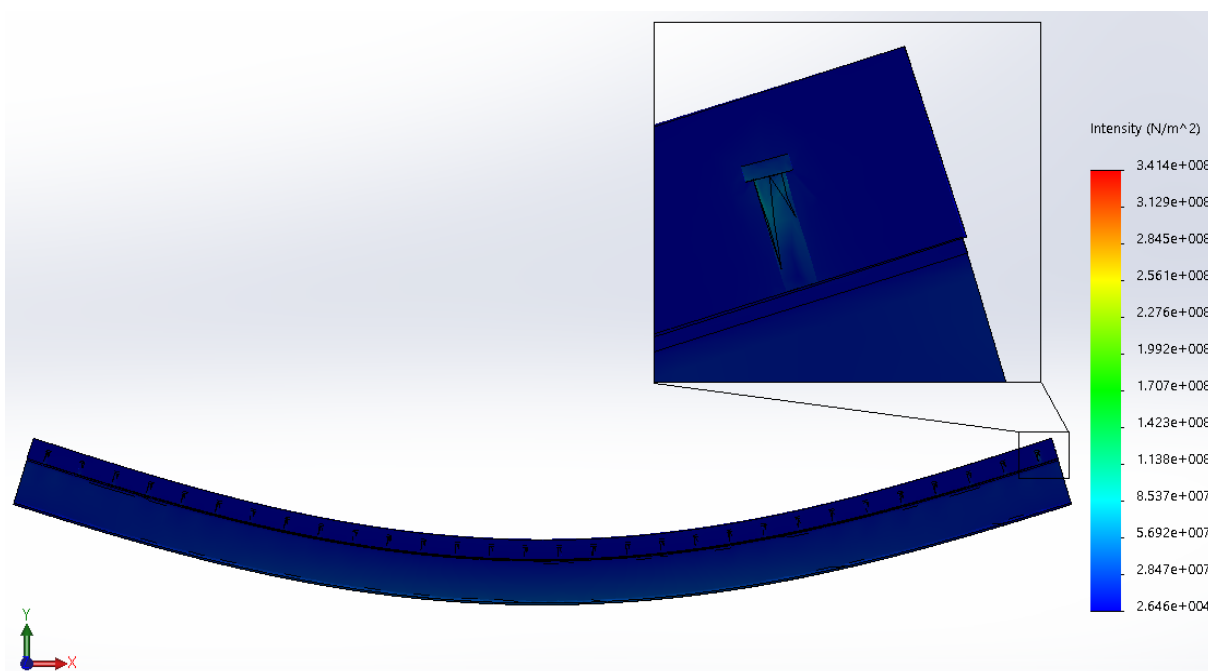
Ranković, S.; Drenić D. 2002. Static strength of the shear connectors in steel – concrete composite beams regulations and research analysis. *Architecture and Civil Engineering*, Vol. 2, N° 4, pp. 251–259.

Structural Steelwork Eurocodes Development of a Trans-National Approach. 2001. 420 p.

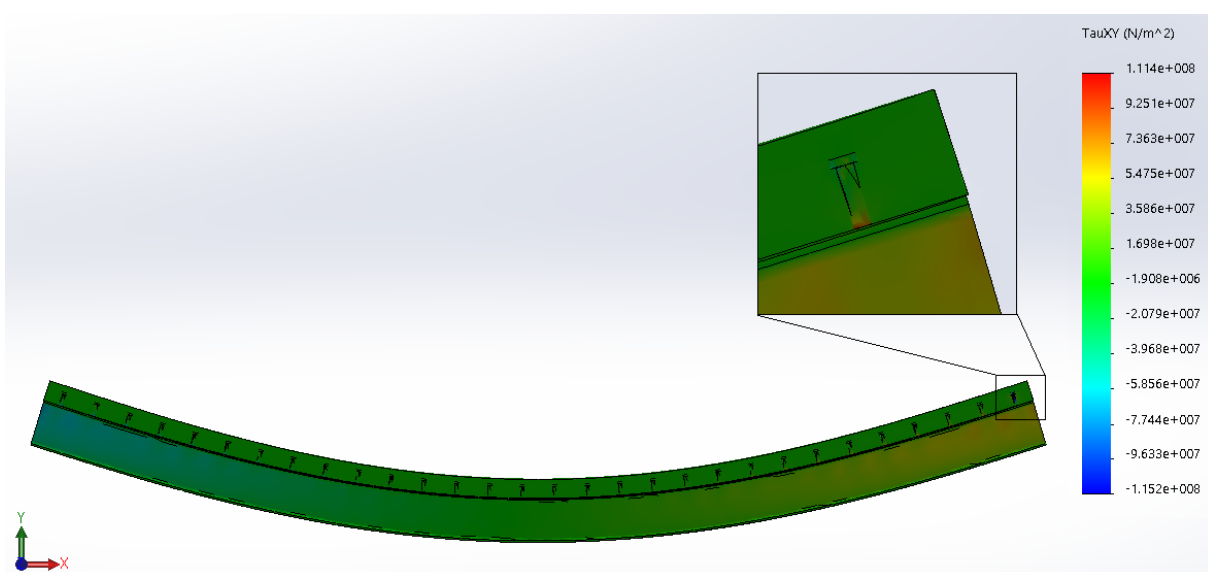
Szabo, B. 2006. *Influence of shear connectors on the elastic behaviour of composite girders*. Doctoral dissertation. Helsinki University of Technology Publications in Bridge Engineering. 119 p.

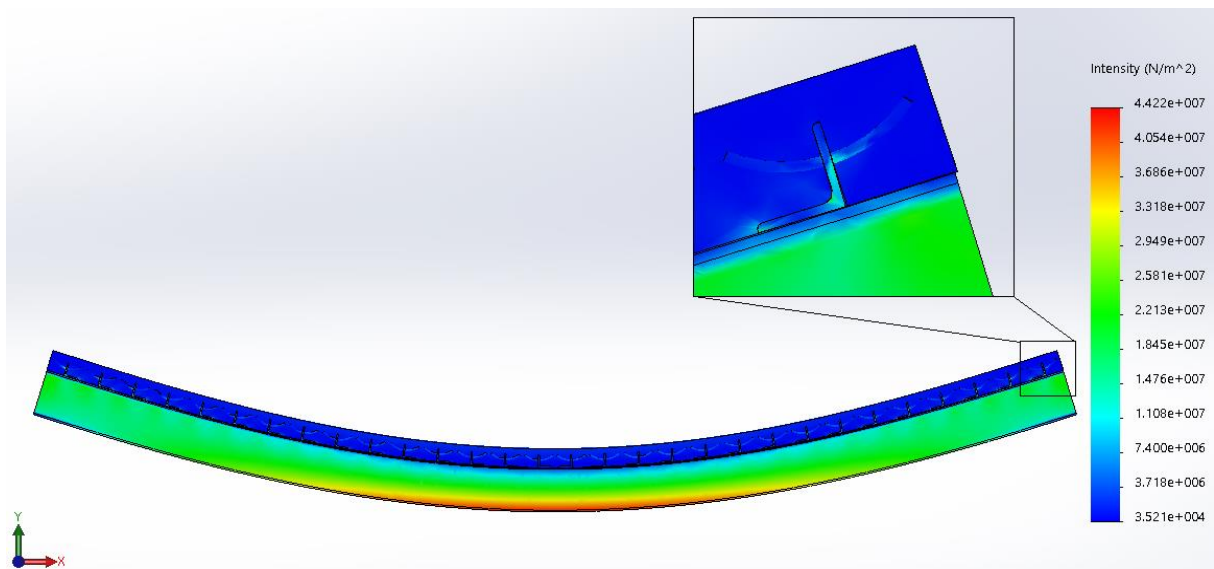
Timinskas, E.; Jakubovskis, R.; Meškėnas, A.; Gudonis, E. 2012. *Kompozitiniais strypais armuotų sijų pleišėjimo ir deformacijų analizė*. Vilnius. Mokslas – Lietuvos ateitis. 346-350 p.

Kompiuterinio modeliavimo grafikai

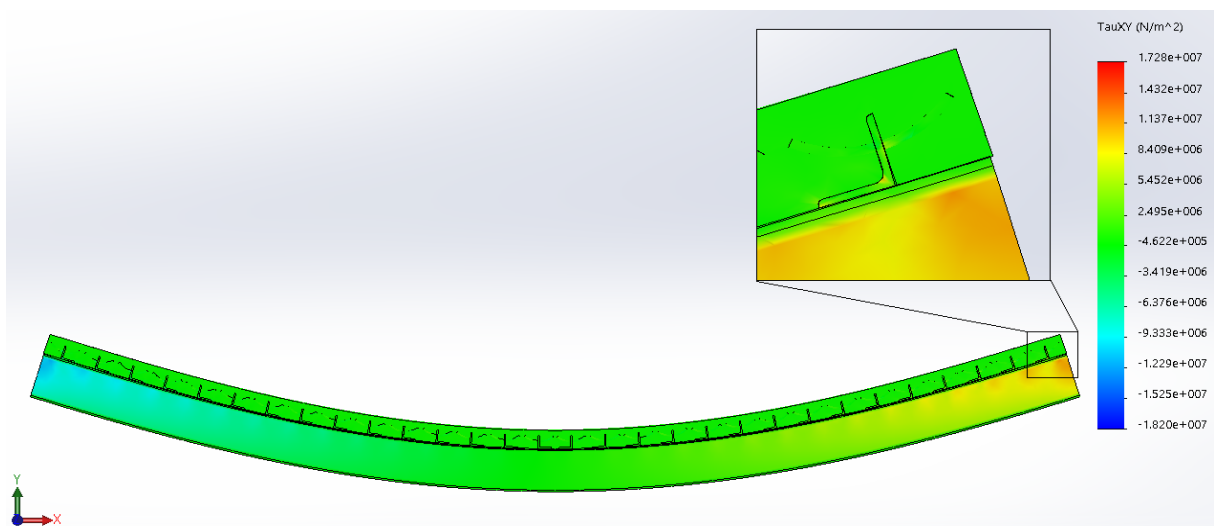


A.1 pav. Kompozitinės sijos S-1 įtempių intensyvumo diagrama

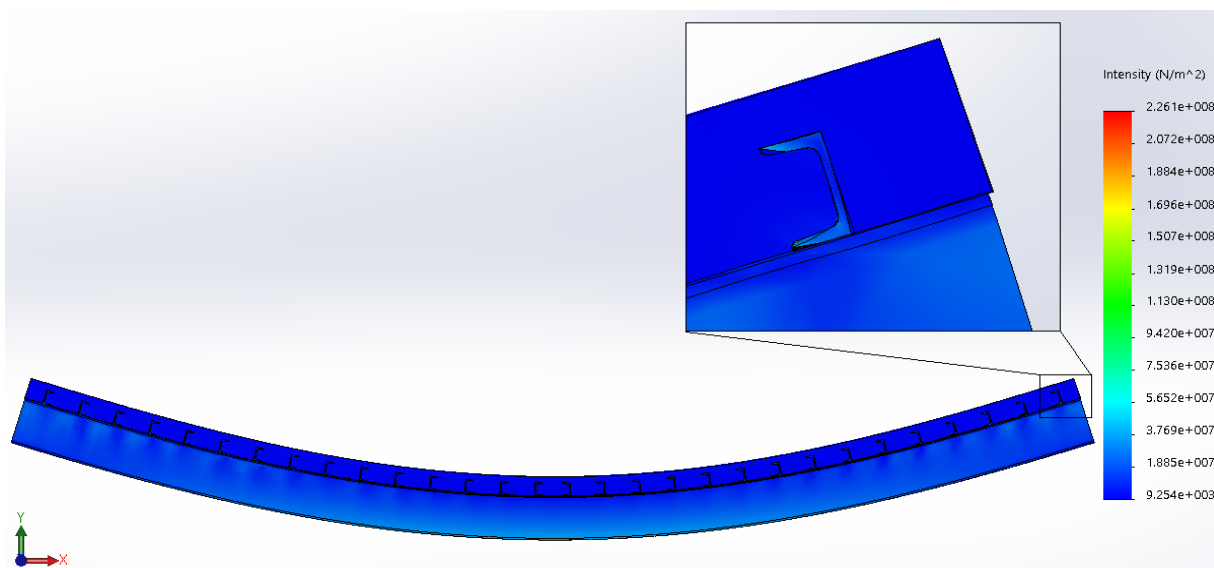
A.2 pav. Kompozitinės sijos S-1 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama



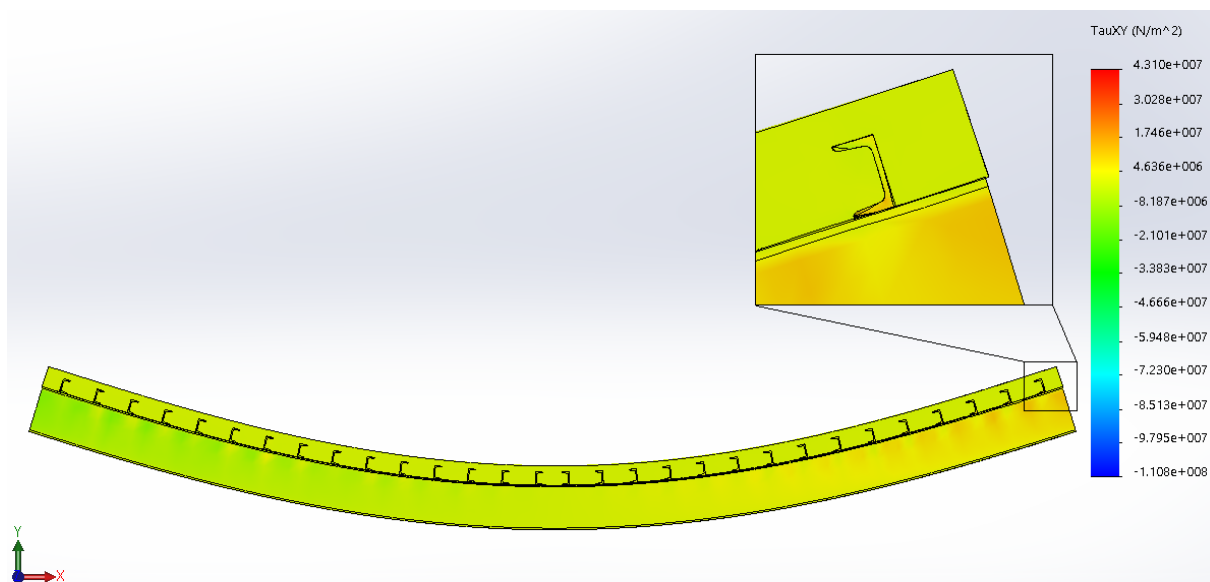
A.3 pav. Kompozitinės sijos S-2 įtempių intensyvumo diagrama



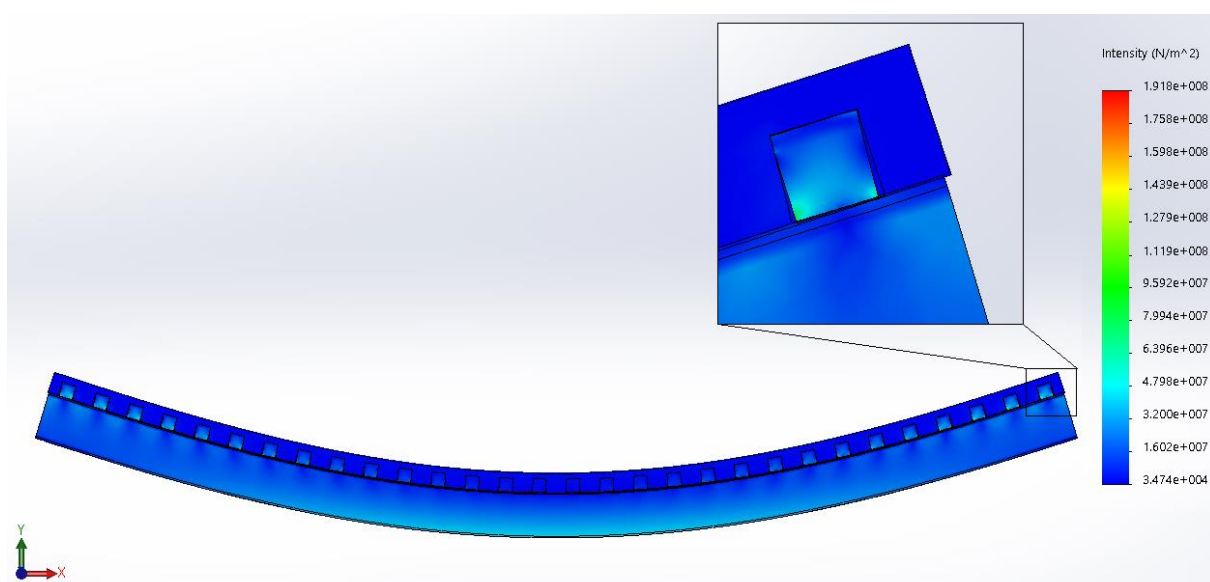
A.4 pav. Kompozitinės sijos S-2 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama



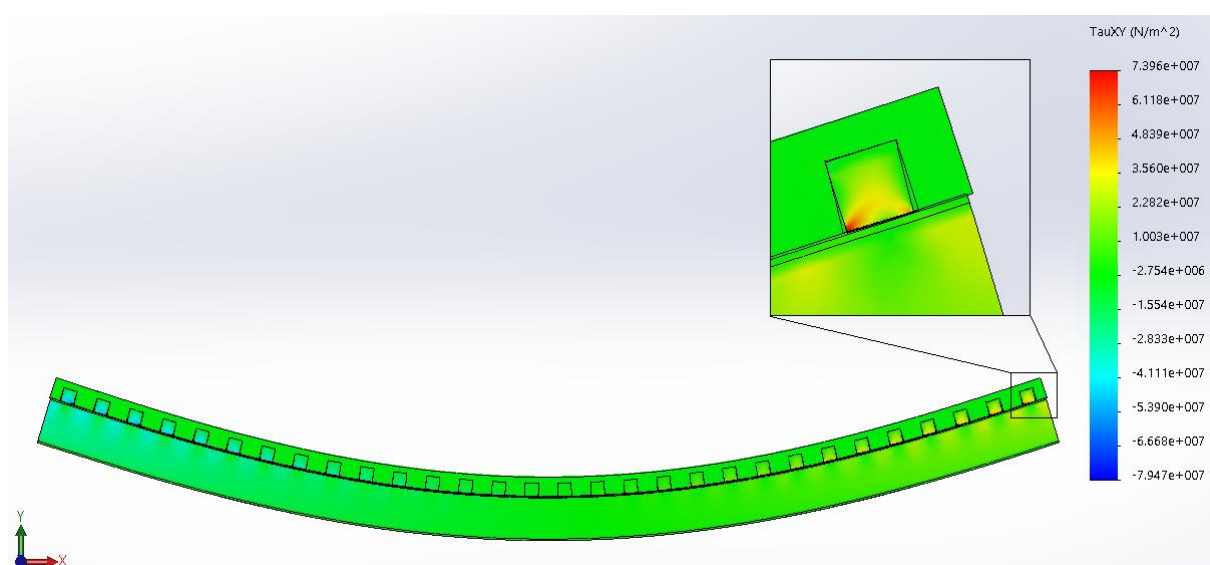
A.5 pav. Kompozitinės sijos S-3 įtempių intensyvumo diagrama



A.6 pav. Kompozitinės sijos S-3 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama



A.7 pav. Kompozitinės sijos S-4 įtempių intensyvumo diagrama



A.8 pav. Kompozitinės sijos S-4 tangentinių τ_{xy} įtempių diagrama