VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

Edita Igliukaitė

VIENSTIEBIŲ ELEKTROS LINIJŲ ATRAMŲ IŠ STIKLO PLUOŠTO DAUGIAKRITERĖ ANALIZĖ
MULTICRITERION ANALYSIS OF SINGLE MAST POWER LINE TOWERS OF FIBERGLASS

(lietuvių ir anglų kalba)

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 621H21001

Specialiųjų statinių specializacija

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

STATYBOS FAKULTETAS

TILTŲ IR SPECIALIŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)
G. Kaklauskas
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Edita Igliukaitė

VIENSTIEBIŲ ELEKTROS LINIJŲ ATRAMŲ IŠ STIKLO PLUOŠTO DAUGIAKRITERĖ ANALIZĖ
MULTICRITERION ANALYSIS OF SINGLE MAST POWER LINE TOWERS OF FIBERGLASS
BAIGIAMOJO DARBO PAVADINIMAS

Baigiamasis magistro darbas

Statinių konstrukcijų studijų programa, valstybinis kodas 6240T107

Specialiųjų statinių specializacija

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Vadovas_____ _____ _____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas_____ _____ _____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Konsultantas_____ _____ _____
(Moksl. laipsnis, vardas, pavardė) (Parašas) (Data)

Vilnius, 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
STATYBOS FAKULTETAS
TILTŲ IR SPECIALŲJŲ STATINIŲ KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(parašas)

Gintaris Kaklauskas
(vardas, pavardė)

2012- _____

Technologijos mokslų sritis

Statybos inžinerijos mokslo kryptis

Statybos inžinerijos studijų kryptis

Statinių konstrukcijų studijų programa,valstybinis kodas 621H21001

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

2012-01-02 Nr. .....
Vilnius

Studentui (ei) Editą Igliukaitei
(vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema Vienstiebių elektros linijų atramų iš stiklo pluošto daugiakriterė analizė

patvirtinta 2011 m. lapkričio 4 d. dekano įsakymu Nr. _____ST

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2012 m. birželio 1 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti nagrinėjamos temos literatūros apžvalgą. Išanalizuoti stiklo plastiko projektavimo principus. Ištirti elektros linijų atramų iš stiklo pluošto elgsenos ypatumus, įvertinant skirtingus pluošto bei skerspjūvio parametrus. Suformuluoti darbo išvadas.....

.....

.....

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

(vardas, pavardė, mokslinis laipsnis ir vardas)

Vadovas..... dr. Donatas Jatulis
(parašas) (vardas, pavardė , mokslinis laipsnis ir vardas

Užduotį gavau

……..……..
(parašas)

……..
(vardas, pavardė)

……..…....
(data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų, sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011-2012 m. m.
1 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Edita Igliukaitė, 20063244

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Statybos fakultetas

(Fakultetas)

Statinių konstrukcijos, SPSTfm-10

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO) SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2012 m. gegužės 23 d.

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema „Vienstiebių elektros linijų atramų iš stiklo pluošto daugiakriterė analizė" patvirtintas 2011 m. lapkričio 4 d. dekano potvarkiu Nr. 708st, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą, mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: dr. Donatas Jatulis. Mano darbo vadovas dr. Donatas Jatulis.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs (-usi).

	Edita Igliukaitė
(Parašas)	(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Statybos fakultetas
Tiltų ir specialiųjų statinių katedra

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

Antrosios pakopos studijų **Statinių konstrukcijų** programos baigiamasis darbas
Pavadinimas **Vienstiebių elektros linijų atramų iš stiklo pluošto daugiakriterė analizė**
Autorius **Edita Igliukaitė**
Vadovas **dr. Donatas Jatulis**

Kalba: lietuvių

Anotacija

Tiriamajame darbe nagrinėjamos stiklo plastiko elektros linijų atramos. Analizuojama stiklo pluošto orientavimo įtaka kūginėms elektros linijų atramoms. Darbe išskiriami trys tyrimo etapai: žiedinio stiklo pluošto įtaka konstrukcijai, išilginio stiklo pluošto poveikis konstrukcijai ir skerspjūvio įtaka stiklo plastiko atramos elgsenai. Analizuojamos įvairių aukščių ir klasių stiklo pluošto elektros linijų atramos, pagamintos vijimo technologija. Darbe taikomas kompiuterinis modeliavimas baigtinių elementų metodu naudojant ANSYS programą.

Prasminiai žodžiai

Elektros linijų atrama, stiklo plastikas, pluošto orientavimas, vijimo technologija

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Civil Engineering
Department of Bridges and Special Structures

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

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

Title	**Multicriterion analysis of Single-Mast Power Line Towers of Fiberglass**
Author	**Edita Igliukaitė**
Academic supervisor	**Dr Donatas Jatulis**

Thesis language: Lithuanian

Annotation

In this master thesis has been investigated single mast power line towers of fiberglass. Analysis of the fiber orientation influence for tapered pole. In the work distinguishes three steps of analysis: influence circumferencial fiberglass for construction, influence longitudinal fiberglass and influence of a cross – section on the behavior of the power line tower of fiberglass. Analysis various heights and classes of poles are made filament winding technology. Analysis is performed with the finite element program ANSYS.

Keywords

Power line tower, fiberglass, fiber orientation, filament winding technology

Turinys

Paveikslų sąrašas 8
Lentelių sąrašas 11
ĮVADAS 12
1. ELEKTROS LINIJŲ ATRAMŲ KONSTRUKCIJOS 13
1.1. Gelžbetoninės, plieninės, medinės, stiklo plastiko elektros linijų atramos 13
1.2. Stiklo plastiko atramų istorinė apžvalga 15
2. STIKLO PLASTIKAS 17
2.1. Apie kompozitus 17
2.2.Stiklo plastikas. Stiklo plastiko savybės 18
2.3. Stiklo plastiko gamybos technologija. Pagrindiniai atramų gamybos būdai 20
2.3.1. Stiklo plastiko gamybos technoligija 20
2.3.2. Vijimo technologija 21
2.3.3. Pultruzija 23
2.4. Stiklo plastiko elektros linijų atramų klasės 26
2.5. Eksperimentiniai tyrimai su stiklo plastiko atramomis 27
3. STIKLO PLASTIKO MODELIAVIMO METODŲ ANALIZĖ 30
3.1. Kevalo iš stiklo plastiko medžiagų modeliavimas 30
3.2. Atramos iš stiklo plastiko, pagamintos pultruzijos būdu, savybių nustatymas ir modeliavimas 30
3.3. Atramos iš stiklo plastiko, pagamintos vijimo technologija, savybių nustatymas ir modeliavimas 36
3.4. Kompozito modeliavimas kompiuterine programa ANSYS 38
3.5. Medžiagos nepakankamumo kriterijus 42
4. STIKLO PLASTIKO ATRAMŲ DAUGIAKRITERINĖ ANALIZĖ 43
4.1. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų palyginimas 43
4.2. Stiklo plastiko atramų tyrimas 46
4.3. Žiedinio stiklo pluošto įtaka įtempių – deformacijų būviui 48
4.4. Išilginio pluošto įtaka elektros linijos atramos konstrukcijai 58
4.5. Skerspjūvio įtaka stiklo plastiko atramos elgsenai 68
IŠVADOS 77
A priedas. Atramos modeliavimo su ANSYS programa kodas 79
Literatūra 82

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Medinė elektros linijų atrama (Miestai...2011) 13
1.2 pav. Gelžbetoninės elektros linijų atramos (Energetikais...2012)..... 14
1.3 pav. Metalinė elektros linijų atrama (Latvijos...2012)..... 14
1.4 pav. Tipinė kompozitinė stiklo plastiko vienstiebė elektros linijų atrama (Sarmento 2006).. 15
2.1 pav. Kompozito struktūra (pagal Onder 2007) 18
2.2 pav. Vijimo technologijos proceso schema..... 21
2.3 pav. Žiedine linkme paskirstytas pluoštas (Sarmento 2006)..... 22
2.4 pav. Išilgine linkme paskirstytas pluoštas (Sarmento 2006)..... 22
2.5 pav. Stiklo pluošto gijos vyjimas įvairiais kampais (Sunkų...2008)..... 22
2.6 pav. Tipiška pultruzijos mašina. Pultruzijos mašinos sudedamosios princinio veikimo dalys (pagal Pultrusion industry...2011) 24
2.7 pav. Stiklo pluošto gijos, pusverpaliai (Putrusion process 2012) 24
2.8 pav. Profiliuočio geometrijos štampas (įkaitusi krosnis) (Putrusion process 2012)..... 25
2.9 pav. Bandinio suirimas gniuždomoje atramos pusėje ir apkrovos pridėjimo vietoje (pagal Slimane ir Radhouane 2007) 28
2.10 pav. Bandinio suirimas atramos suspaudimo pusėje prie atraminės bazės (pagal Slimane ir Radhouane 2007)..... 28
2.11 pav. Kūginių stiklo plastiko atramų tipinės apkrovos deformacijos kreivės (pagal Slimane ir Radhouane 2007)..... 29
3.1 pav. Stiklo plastiko kevalo sluoksnių principinė schema (pagal Chugh ir Jinrong 2006)..... 31
3.2 pav. Rovingo ir CSM sluoksnių struktūra (pagal Chugh ir Jinrong 2006) 31
3.3 pav. Kevalo iš stiklo plastiko sluoksnio principinis modeliavimas (vijimo gamybos būdas) 36
3.4 pav. Sluoksnių modeliavimo, išdėstant juos įvairiais kampais, principinė schema..... 38
3.5 pav. Baigtinis 8 mazgų ir n sluoksnių elementas (pagal Release...2012) 39
3.6 pav. Medžiagų savybių įvedimo langas 39
3.7 pav. Sluoksniuoto cilindrinio elemento globali koordinačių sistema (Takayanagi *et al.* 2001) 40
3.8 pav. Aštuonių mazgų ir n sluoksnių baigtinio elemento koordinačių sistema (Takayanagi *et al.* 2001)..... 40

3.9 pav. Sluoksnių savybių įvestiesties langas 41
4.1 pav. D. Polyzois atliktų bandymų schema (pagal Polyzois 2003) 45
4.2 pav. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas 46
4.3 pav. Atramų geometrija ir apkrovimo schema 48
4.4 pav. Atramų sienelės storio ir sluoksnių išsidėstymo priklausomybė 50
4.5 pav. Atramos santykinių poslinkių priklausomybė nuo žiedinio pluošto sluoksnių skaičiaus 51
4.6 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje be skersinio pluošto 52
4.7 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, be skersinio pluošto, tempiamoje pusėje 52
4.8 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, be skersinio pluošto, gniuždomoje pusėje 53
4.9 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, su skersiniu pluoštu54
4.10 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, su skersiniu pluoštu, tempiamoje atramos pusėje 54
4.11 pav. Tsai –Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, su skersiniu pluoštu, gniuždomoje atramos pusėje 55
4.12 pav. Įtempių X kryptimi pasiskirstymas 1 klasės 12 m atramoje, be skersinio pluošto 56
4.13 pav. Įtempių Y kryptimi pasiskirstymas 1 klasės 12 m atramoje, be skersinio pluošto 56
4.14 pav. Šlyties XY įtempių pasiskirstymas 1 klasės 12 m atramoje, be skersinio pluošto..... 57
4.15 pav. Pluošto išdėstymo kampo ir sienutės storio priklausomybė..... 59
4.16 pav. Pluošto išdėstymo kampo ir atramos masės priklausomybė 60
4.17 pav. Atramų viršūnės poslinkių priklausomybė nuo pluošto išdėstymo kampo..... 60
4.18 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 12 atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 15. 61
4.19 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 15 laipsnių 62
4.20 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 45 laipsniai. 63
4.21 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 45 laipsniai: a) gniuždomoje atramos pusėje, b) tempiamoje atramos pusėje 63
4.22 pav. Įtempių Y kryptimi pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 15 laipsnių 64

4.23 pav. Įtempių X kryptimi pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 15 laipsnių 65
4.24 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 15 laipsnių 65
4.25 pav. Įtempių Y kryptimi pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 45 laipsiai..... 66
4.26 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 45 laipsniai 67
4.27 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir sienutės storio priklausomybė 69
4.28 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir masės priklausomybė 70
4.29 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir poslinkių priklausomybė 70
4.30 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramoje, kai skersmuo 400 mm. Tsai – Wu kriterijaus pasiskirstymas giuždomoje atramos pusėje..... 71
4.31 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir sienutės storio priklausomybė 72
4.32 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir masės priklausomybė 72
4.33 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir poslinkių priklausomybė .. 73
4.34 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramoje, kai skersmuo 250 mm. Tsai – Wu kriterijaus pasiskirstymas..... 74
4.35 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir sienelės storio priklausomybė 74
4.36 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir masės priklausomybė 75
4.37 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir poslinkių priklausomybė .. 75
4.38 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramoje, kai skersmuo 300 mm, Tsai – Wu kriterijaus pasiskirstymas gniuždomoje atramos pusėje..... 76

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Atramų kainų palyginimas (pagal Ray *et al.* 2002)..... 15
2.1 lentelė. Siklo pluošto tipai (pagal Frederick *et al*. 2001)..... 20
2.2 lentelė. Pultruzijos mašinų tipai ir gamybos rodikliai (pagal Pulstrusion...2011)..... 25
2.3 lentelė. Elektros linijų atramų klasės (pagal ANSI Standart 05.1)..... 26
3.1 lentelė. *Rovingo* sluoksnio charakteristinės savybės (pagal Chugh ir Jinrong 2006)..... 34
3.2 lentelė. CSM sluoksnio parametrai ir jų reikšmės..... 36
4.1 lentelė. Stiklo pluošto ir dervos mechaninės savybės..... 43
4.2 lentelė. Stiklo pluošto atramų gamybos parametrai (pagal Polyzois 2003)..... 44
4.3 lentelė. D. Polyzois tirtų atramų bandymų rezultatai (pagal Polyzois 2003) ir teorinių rezultatų rodikliai..... 45
4.4 lentelė. Stiklo plastiko atramos elementaraus sluoksnio charakteristinės savybės..... 47
4.5 lentelė. Atramų geometrinės savybės ir pluošto išdėstymo rodikliai..... 49
4.6 lentelė. Tiriamų atramų geometrijos ir stiklo pluošto išdėstymo parametrai..... 58
4.7 lentelė. Tiriamų atramų geometriniai ir medžiagų parametrai..... 68

ĮVADAS

Elektros linijų atramos dažniausiai buvo gaminamos iš medienos, bet per pastaruosius 30 metų tapo dažniau naudojamos plieninės vamzdinės atramos. Taip pat alternatyva medinėms atramoms tapo gelžbetoninės atramos.

Medinės atramos eksploatuojant reikalauja nemažai priežiūros, reikia jas chemiškai apsaugoti ir neretai tikrinti jų būklę. Plieniniai stulpai yra stiprūs ir patvarūs, bet brangūs ir dažnai vežami dideliais atstumais, o plieninės konstrukcijos pakankamai sunkios. Betoniniai stulpai yra pigesni už plieną, nors jų gaminimo precesas sudėtingesnis. Taip pat atramų būklė per tam tikrą laiką blogėja dėl plieno armatūros korozijos ir, žinoma, dėl paties betono valkšnumo.

Didėjant elektros energijos suvartojimui, didėja ir elektros linijų atramų skaičius bei paklausa, dėl šių priežasčių pramonė ieško geresnių alternatyvų, kaip sumažinti eksploatavimo išlaidas. Pramonei reikalinga ir naudinga konstrukcija, kuri yra ekonomiškai veiksminga, ilgaamžė, paprasta gaminti ir turinti kuo mažiau trūkumų. Tiklas – ieškoti kitos alternatyvios medžiagos.

Stiklo pluoštas – ypač dažnai naudojama medžiaga aviacijos, automobilių, laivų gamybos pramonėje dėl išskirtinio tvirtumo, atsparumo korozijai ir lengvumo, gaminamos net toksinių chemikalų taros, taip pat vonios, dušo kabinos, vandentiekio vamzdžiai ar meškerykočiai. Statybų pramonėje stiklo pluoštas tapo plačiai naudojamas jau nuo XX a. vidurio – pavyzdžiui, kabamuosiuose tiltuose plieninius lynus pakeitus stiklo kompozito pluošto lynais, konstrukcijos tapo daug lengvesnės, tačiau Lietuvos statybų aikštelėse ši medžiaga vis dar laikoma naujiena, o jos privalumai neretai lieka nepastebėti dėl įsisenėjusio požiūrio bei savotiškos naujovių baimės.

Elektros linijos iš stiklo plastiko dėl savo santykinai mažos masės ir stiprumo savybių yra puiki alternatyva gelžbetononėms ir plieninėms elektros linijų atramoms. Ilgą laiką atramų gamybą iš šios medžiagos varžė techninės galimybės ir tyrimų stoka šioje srityje. Šio darbo tikslas apžvelgti elektros linijų atramų konstruojamų iš stiklo plastiko gamybos technologijas ir nuo jų priklausančius projektavimo principus, taip pat išanalizuoti stiklo pluošto medžiagos savybes ir jų įtaką elektros linijų atramos konstrukcijai. Šiame darbe nagrinėjama stiklo pluošto sluoksnių orientavimo įtaka atramos elgsenai, ieškoma elektros linijų iš stiklo plastiko optimalių geometrinių rodiklių naudojant ANSYS kompiuterinę programą.

1. ELEKTROS LINIJŲ ATRAMŲ KONSTRUKCIJOS

1.1. Gelžbetoninės, plieninės, medinės, stiklo plastiko elektros linijų atramos

Elektros perdavimo ir paskirstymo linijoms statyti Lietuvoje paprastai naudojamos tradicinės medžiagos: plienas, betonas, mediena praktiškai jau nebenaudojama.

Medinių atramų trumpa eksploatavimo trukmė, todėl dėl įvairių aplinkos problemų elektros tiekimo paslaugų įmones skatina ieškoti ekonomiškai alternativių sprendimų. Medinių atramų (1.1 pav.) nuolat veikiamų įvairių oro sąlygų, grybų, medžių graužikų, laikui bėgant labai pablogėja laikomoji galia. Jų eksploatavimo trukmė 30 – 40 metų, o bet koks eksploatavimo laiko pratęsimas reikalauja nuolatinės priežiūros ir remonto (Vanderbuilt and Criswell 1988).



1.1 pav. Medinė elektros linijų atrama (Miestai...2011)

Daugelyje Europos šalių naudojami betoniniai stulpai. Pagrindinis betoninių atramų trūkumas yra jų svoris, kuris žymiai padidina transportavimo ir montavimo išlaidas. Dėl aplinkos poveikio cheminių veiksnių ilgalaikis veikimas daro įtaką betoniniam paviršiui bei pačios elektros linijos atramos laikomąjai galiai. Kaip ir kitų betoninių konstrukcijų, gelžbetoniniai stulpai (1.2 pav.) veikiami armatūros korozijos, todėl sumažėja stiprumas, o tai padidina eksploatavimo išlaidas.



1.2 pav. Gelžbetoninės elektros linijų atramos (Energetikais...2012)

Plienas yra labiausiai paplitusi medžiaga statant elektros linijų atramas Šiaurės Amerikoje. Tačiau šios atramos yra labai brangios. Pagrindinis rūpestis naudojant plienines atramas (1.3 pav.) – apsauga nuo korozijos; jos turi būti cinkuojamos arba dažomos, o tai ne visada garantuoja ilgalaikę apsaugą.



1.3 pav. Metalinė elektros linijų atrama (Latvijos...2012)

Dėl aplinkos apsaugos ir gamtos išteklių ieškoma alteranatyvų, kaip pakeisti medines, plienines ar betonines elektros linijų atramas, nes investicijos ir reguliari techninė priežiūra būtina, norint pratęsti elektros atramų iš tradicinių medžiagų eksploatavimo laikotarpį.



1.4 pav. Tipinė kompozitinė stiklo plastiko vienstiebė elektros linijų atrama (Sarmento 2006)

Stiklo plastiko atramos (angl. *Glass - fiber reinforced plastic* arba *GFRP* – stiklo pluoštu armuotas plastikas) (1.4 pav.) yra lengvos ir atsparios korozijai. Stiklo plastiko lengvumas yra pagrindinis privalumas, tokias elektros linijų atramas lengva transportuoti ir montuoti kalnų vietovėse, pelkėse ar kitose sunkiai prieinamose vietose. Nors pradinė stiklo plastiko atramų kaina yra didesnė nei tradicinių atramų, tačiau jų privalumai verčia susimąstyti apie jų naudą ir atsiperkamumą.

1.1 lentelė. Atramų kainų palyginimas (pagal Ray *et al.* 2002)

	Medinė atrama	Gelžbetoninė atrama	Plieninė atrama	Stiklo plastiko atrama
Kaina (Lt)	750	850	920	1400

Stiklo plastiko atramos yra naudojamos, nemažai įmonių jau gamina tokias atramas, tačiau mokslinių tyrimų šioje srityje nėra labai daug.

1.2. Stiklo plastiko atramų istorinė apžvalga

Pirmosios žinomos stiklo plastiko elekros paskirstymo atramos buvo pagamintos Gar Wood gamykloje, 1954 metais (Derrick 1996). Per šį laikotarpį buvo didelis susidomėjimas stiklo pluošto atramų technologija.

1960 m. pradžioje Havajuose, Maui saloje, pirmą kartą buvo pastatytos stiklo plastiko atramos. Po beveik 45 metų ekspoatavimo šios atramos buvo pakeistos, ir ne dėl struktūrinių priežasčių: jos nebuvo padengtos tinkama apsauga nuo ultravioletinių spindulių ir turėjo „pluošto žydėjimo“ (angl. fiber blooming) problemų, t.y. stiklo pluoštas atsiskyrė nuo dervos, taip atsitinka kai paviršinis dervos sluoksnis skyla.

1981 metais, Šiaurės Amerikoje, Kalifornijoje, buvo pakeistos antrinio paskirstymo elektros linijų atramos į GFRP atramas. Naudojant tuo metu turimas technologijas, buvo įdiegta daugiau nei 800 stiklo plastiko polių, kurių mechaninės savybės vis dar yra geros (Derrick 1996).

Po pirmųjų stiklo plastiko elektros linijų atramų įdiegimo, buvo padaryta reikšmingų tyrimų ir pažanga gamybos technologijoje, todėl dabar stiklo plastiko produktai lengvesni, tvirtesni, saugesni, ilgalaikiai.

Dauguma GFRP atramų gamintojų naudoja apsaugines dangas nuo UV spindulių, todėl stiklo plastiko atramų eksploatavimo trukmė paprastai įvertinama maždaug 65 metais.

Naujausi pasiekimai su poliuretano dervomis, leidžia sukurti apsaugos „sistemas“ nuo UV spinduolių, todėl GFRP polių eksploatavimo laikas šiuo metu viršyja 65 metus ir galbūt artėja prie 100 metų (Sarmento ir Lacoursiere 2006).

Stiklo plastiko atramų gamybos procesai yra automatizuoti. Pavyzdžiui: pultruzija, gijų vyniojimo gamybos technologijos. Gijų vyniojimo technologija yra patraukli dėl mažų gamybos sąnaudų, projektavimo lankstumo, kontroliuojamos pluošto orientacijos ir pluošto kiekio.

Gijų vyniojimo procesas pirmą kartą buvo išbandytas 1947 metais, kai M. W. Kellogg sukonstravo pirmąją specialią gijų vyniojimo mašiną (Munro 1988). Pirmasis pagamintas produktas buvo antgalis raketų variklio blokui, pagamintas 1948 metais, naudojant E - stiklo, epoksidines dervas aukštoje temperatūroje. Pirmasis registruotas komercinis gijų vyniojimas buvo panaudotas žiedų gamybai 1954 metais. Pirmosios komercinės kaitinamosios vyniojimo mašinos buvo suprojektuotos ir pagamintos pagal McClean Anderson 1960 (Murphy 1998)

2. STIKLO PLASTIKAS

2.1. Apie kompozitus

Šiuolaikinių technologijų plėtrą įvairiose srityse daugiausia lemia naujų efektyvių konstrukcijų patikimumas. Šiame amžiuje vis sparčiau besivystanti ekonomika reikalauja maksimaliai didinti medžiagų ir įvairių konstrukcijų patikimumą bei ilgaamžiškumą.

Besiplečianti dangoraižių, šiltesnių ir greičiau pastatomų gyvenamųjų namų, tiltų statyba, augantys poreikiai pakelti didelius erdvėlaivius į kosmosą lėmė būtinybę naudoti lengvesnes ir stipresnes medžiagas – kompozitus, tobulinti jų struktūrą, taupant energiją ir sąnaudas (pagal Klovą 2005).

Norint pasiekti optimalias konstrukcijų savybes, dažniausiai naudojamos kompozitinės medžiagos. Jau nuo XIX a. vidurio prasidėjo tokių medžiagų moksliniai tyrimai, o kompozitų teorijos pradžia laikomi 1887 m. vokiečių mokslininko J.Foighto paskelbti darbai (Marčiukaitis 1998).

Konstrukcijų patikimumo didėjimo sparta pastebima jau medžiagų atsparumo istorijos kontekste. Pavyzdžiui, dėl sunkių monolitinių perdangų ir virš jų esančių mūro sienų 1890 m. Čikagoje pastatyto aukščiausio pasaulyje (18 aukštų) pastato „Garrick Building“ pirmųjų aukštų mūro sienų storis buvo 1,8 m, o 1 m^2 sienos svėrė apie 4 tonas. Dabar gerokai aukštesnių dangoraižių 1 m^2 sienos, įskaitant laikantįjį karkasą, nesveria net 300 kg (Klova 2005).

Naudojant kompozitines konstrukcijas 1972 m. buvo pastatytas 110 aukštų 411 m aukščio tarptautinio prekybos centro pastatas. Be to, labai pagerėjo termoizoliacinės ir akustinės savybės. Naudojant sluoksniuotasias konstrukcijas pastatų perdangų ir ypač denginių svorį galima sumažinti 3 – 4 kartus, pamatų apkrovas – 4 – 10 kartų. Tai leidžia ženkliai atpiginti konstrukcijos statybą, ypač kai reikia įrengti pastatą ant silpnų gruntų arba didinti jo aukštį (pagal Klovą 2005).

Didinti konstrukcijų patvarumą, stiprumą bei ilgaamžiškumą – vienos svarbiausių nagrinėjamų problemų.

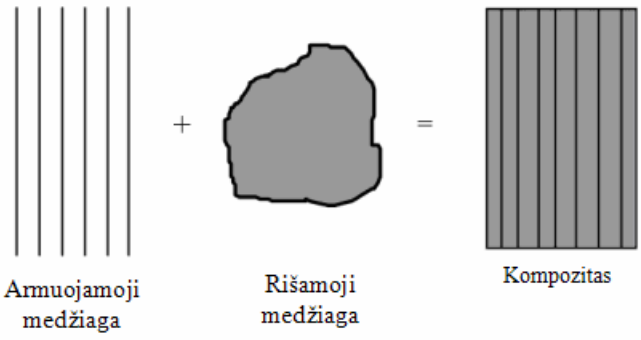
Žodis „kompozitas“ (lot. *Compositus* – sudėtinis, susidedantis iš keleto elementų) technikoje pradėtas vartoti XIX a. pabaigoje, kai imtos tyrinėti sudėtinės medžiagos siekiant sukurti lengvesnes ir stipresnes konstrukcijas.

Kompozitinė medžiaga tai vienalytė medžiaga, sudaryta iš dviejų ar daugiau visiškai skirtingų medžiagų, kurios būdamos atskirai negalėtų atlikti funkcijų, kurias gali atlikti būdamos kartu

Kompozitinę medžiagą sudaro:

1. Armuojamoji medžiaga stiklas, anglies, aramido ar kitoks pluošto audinys, siūlai (rovingas) ir t.t.

2. Rišamoji medžiaga (epoksidinė, poliesterinė, vinilesterinė dervos ir t.t.).



2.1 pav. Kompozito struktūra (pagal Onder 2007)

Kompozite pagrindinę apkrovą priima armuojanti medžiaga, o rišamoji medžiaga tiesiog suriša armuojamąją medžiagą, suteikia detalei ar profiliuočiui stabilią formą. Tačiau rišamoji medžiaga yra labai svarbi ir turi didelę įtaką galutinėms kompozito charakteristikoms (Bendrai...2012).

2.2.Stiklo plastikas. Stiklo plastiko savybės

Stiklo plastikas, kitaip dar vadinamas stiklaplastikis (angl. *glass – reinforced plastic*) – tai kompozitas iš stiklo pluošto ar stiklo audinio ir termoreaktyviosios dervos (Stiklaplastikis 2011). Stiklo pluoštas yra medžiaga iš labai plonų stiklo siūlelių. Ji naudojama kaip sustiprinanti medžiaga daugeliui plastiko produktų. Toks plastikas vadinasi stiklaplastikis.

Stiklo plastiko konstrukcija yra labai paklausi visame pasaulyje. Tai yra todėl, kad stiklo plastikas yra universali medžiaga. Net ir šiandien jis sudaro daugiau kaip 60 % visų konstrukcijų (Fiberglass...2012).

Tokią paradoksalią padėtį, kaip dažnai nutinka su moderniomis į mūsų šalį atkeliaujančiomis statybinėmis medžiagomis, didžia dalimi lemia vyraujantys mitai, jog metalas yra savotiškai tauresnė bei patikimesnė medžiaga. Jo kaina laikoma pagrįsta ir visiems

suprantama, todėl į panašią stiklo pluošto gaminių kainą bei pačią medžiagą žiūrima su tam tikru nepasitikėjimu. Tačiau, specialistų tvirtinimu, stiklo pluošto konstrukcijos, kurios gerokai pranoksta savo konkurentes, negali būti pigesnės nei cinkuoto ar juodo metalo gaminiai, nes jos pasižymi daugybe pranašumų: stiklo pluošto gaminiams būdingas didelis mechaninis atsparumas, atsparumas korozijai bei įvairiems chemikalams, antimagnetinės ypatybės, nesukelia radijo trukdžių. Stiklo pluoštas – efektyvus dielektrikas (medžiaga, nelaidi elektros srovei, nes neturi laisvų elektros krūvių), o šiluminė jo izoliacija prilygsta medienai (pagal Fiberglass...2012).

Stiklo pluošto konstrukcijos atsparios šalčiui ir karščiui, jos atsparios temperatūrų svyravimams nuo -100 °C iki +180 °C. Metalas, veikiamas aukštos temperatūros išsiplečia, žemos temperatūros veikiamas – susitraukia. Stiklo pluoštas į tokias deformacijas reaguoja penkis kartus mažiau. Esant ypač žemai temperatūrai, medžiaga nekietėja ir nesitraukia, dėl to netampa trapi, nepraranda savo tvirtumo, o ypač aukštos temperatūros, neretai susidarančios pietiniuose pastatų fasadų paviršiuose, sąlygomis išlaiko stabilią formą – nepasidaro plastiška ir išlaiko itin mažą terminio plėtimosi koeficientą (Fiberglass...2012).

Stiklo plastikas unikaliai stabili medžiaga. Kaip ir kitos kompozicinės medžiagos ji tarsi „atsimena“ savo formą, todėl gaminiai iš jos praktiškai nesideformuoja.

Stiklaplastikis nebijo ir ultravioletinių spindulių. Įkaitus, jis neskleidžia nuodingų medžiagų, kaip kiti profiliai. Absoliutus ekologiškas švarumas – dar vienas šios medžiagos pranašumas. Stiklo plastikui spalva (pagal RAL spalvų paletę) suteikiama gamybos metu į dervą įmaišant reikiamo atspalvio pigmentą, todėl skirtingai nei metalo gaminiai profilio spalva neblunka. Dėl šių ypatybių stiklo pluošto konstrukcijos nesudėtingai gali būti derinamos prie kitų estetinių pastato sprendimų. Profiliuočii gaminami iš stiklo pluošto: ekologiški, patvarūs bei ilgalaikiai (pagal Fiberglass...2012).

Palyginus su klasikinėmis, statybose naudojamomis, medžiagomis vidutiniškai sutaupoma apie 30 – 40 % įprastai statyboms skiriamų lėšų, nes nereikia sunkių pamatų, jos greitai montuojamos, lengvai gabenamos. Stiklo pluošto konstrukcijos net keturis kartus lengvesnės nei plieninės, todėl didelį profiliuotį, kurį įprastai kelia kranas, gali pakelti žmogus. Dėl paprasto ir greito paruošimo bei montavimo sutaupomos nemažos lėšos, kurios būna išleidžiamos sunkiajai keliamajai technikai išsinuomoti (Konstrukcijos...2012).

Stiklo pluoštai skirstomi į dvi kategorijas: bendrosios paskirties pluoštai ir aukščiausios kokybės specialios paskirties pluoštai. Daugiau nei 90 % visų stiklo pluoštų yra bendrosios paskirties produktai, likusieji specialios paskirties. Stiklo pluošto pavadinimas pvz.: E – stiklo pluoštas nusako pačio pluošto savybes (žiūr. 2.1 lentelę) (pagal Frederick *et al*. 2001).

2.1 lentelė. Siklo pluošto tipai (pagal Frederick *et al*. 2001)

Pluoštas	Savybės
E – stiklo pluoštas	**mažas elektrinis laidumas**
S – stiklo pluoštas	**didelis stiprumas**
C – stiklo pluoštas	**aukštas cheminis atsparumas**
M – stiklo pluoštas	**didelis standumas**
A – stiklo pluoštas	**aukštas šarminis atsparumas**
D – stiklo pluoštas	**aukštas elektrinis laidumas**

Stiklo pluoštai gaminami iš išlydyto stiklo, kuris yra pagaminamas tiesiogiai, arba iš stiklo gabaliukų. Išlydytas stiklas yra pilamas į rezervuarą ir laikomas pastovioje temperatūroje išlaikant pastovią klampą. Tekėjimu formuojmos stiklo pluošto gijos, kurių skersmuo gali svyruoti nuo $1 \cdot 10^{e-6}$ iki $25 \cdot 10^{e-6}$ m. (pagal Frederick *et al*. 2001).

2.3. Stiklo plastiko gamybos technologija. Pagrindiniai atramų gamybos būdai

2.3.1. Stiklo plastiko gamybos technoligija

Kompozitai, kurių pagrindinės sudedamosios medžiagos yra pluoštas ir dervos (polimerai,) yra gaminami mechaniškai ar rankiniu būdu. Praktikoje yra daug įvairių kompozitų gamybos metodų, kurių kiekvienas turi savo privalumus, apribojimus ir galimybes gaminti konkrečius produktus, tokius kaip armatūra, įvairūs porfiliuočiai, automobilių dalys, stulpai, lėktuvų dalys ir kiti.

Priklausomai nuo gamybos proceso, pluoštas yra sudrėkinamas ir „konservuojamas“ dervomis įvairiais metodais. Gamybos metu derva sumaišoma su įvairiais priedais ir modifikatoriais (pvz., katalizatoriai, pigmentai, UV spindulių inhibitoriai, antipirenai ir kt.) norint pasiekti tinkamas kietėjimo savybes, klampumą, ilgaamžiškumą, spalvą ar išvaizdą (Hota *et al.* 2006).

Svarbūs parametrai, kurie turi įtakos trumpalaikėms ir ilgalaikėms kompozito savybėms, yra šie:

1. Pluošto savybės ir pasiskirstymas;
2. Dervų savybės;

3. Priedų savybės;
4. Pluošto ir dervos tūrio santykis;
5. Gamybos parametrai: temperatūra, slėgis, kietėjimo laikas ir paviršiaus padengimas ir kt.

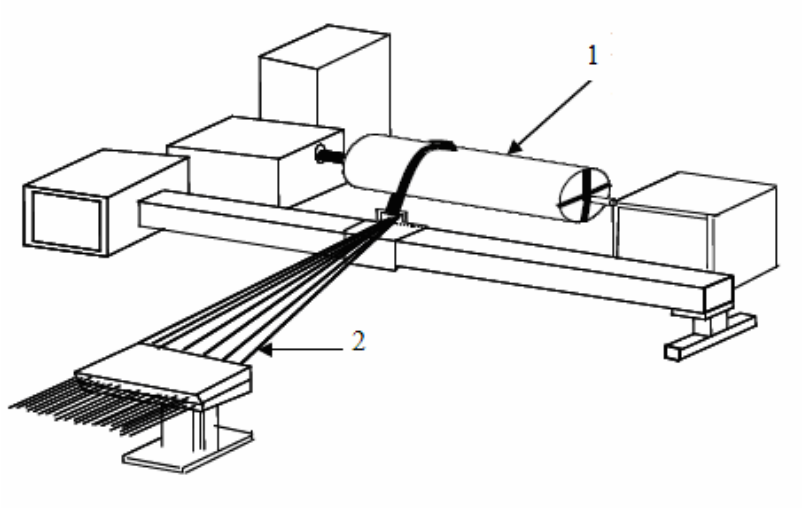
Šiandien gijų vijimas ir pultruzija yra du labiausiai paplitę technologiniai procesai, naudojami gaminti kompozitines stiklo plastiko atramas. Toliau pateikiami kiekvieno iš šių dviejų procesų aprašymai ir schemos.

2.3.2. Vijimo technologija

Vijimas (angl. filament winding) – gijų vyniojimo technologija dažniausiai naudojama tuščiaviduriams, apvaliems ar ovalios formos produktams gaminti.

Šio proceso metu impregnuota (arba gali būti sausa) audinio juosta ar pluošto gija su įtempimu ir tam tikru kampu yra vyniojama ant reikiamo skersmens bei ilgio besisukančios gaminio formos (žiūrėti 2.2 pav.) (Williams 2000).

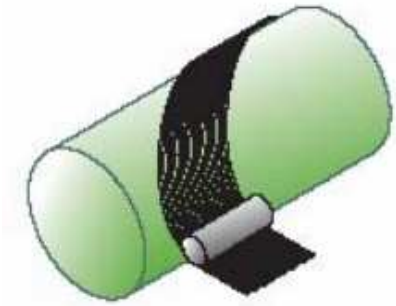
Gaminiui sukietėjus, jo viduje esanti forma išardoma ir išimama. Kad greičiau sukietėtų stiklo pluošto gaminys, kartais naudojami infraraudonųjų spindulių šildytuvai ar kitos priemonės, kuriomis šildoma iš vidaus arba iš išorės (Williams 2000).



1 – gaminio forma, 2 – stiklo pluošto gijos, pusverpaliai

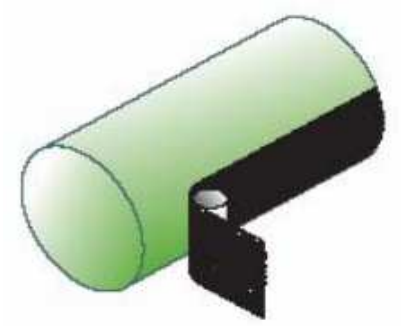
2.2 pav. Vijimo technologijos proceso schema

Tradicinės stiklo pluošto vijimo technologinės mašinos gamina tik žiedine linkme arba įvairiu kampu vijamus pluošto gaminius, atžvilgiu sudaromosios, kaip parodyta 2.3 pav.



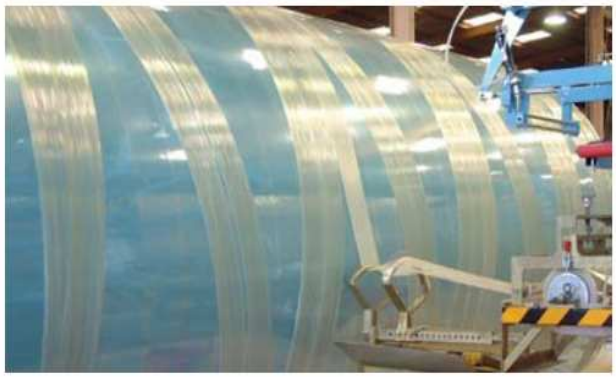
2.3 pav. Žiedine linkme paskirstytas pluoštas (Sarmento 2006)

Naujos modernios gijų vyniojimo mašinos leidžia pluoštą paskirstyti 0^o kampu, atžvilgiu išilginės gaminio ašies (žiūr. 2.4 pav.).



2.4 pav. Išilgine linkme paskirstytas pluoštas (Sarmento 2006)

Kompozicinės atramos dabar gali būti komponuojamos su optimalaus derinio žiedinių ir išilginių pluoštų paskirstymu (žiūr. 2.5 pav.)



2.5 pav. Stiklo pluošto gijos vyjimas įvairiais kampais (Sunkų...2008)

Gaminio formos gaminamos iš įvairių rūšių medžiagų, priklausomai nuo profiliuočio tipo (Filament... 2011*)*:

• plieninės didelio tūrio dažnai naudojamiems profiliuočiams;

• vienkartinės formos: faneros, aliuminio lakštai ir kiti nedideliems produktams, ribotos gamybos dalims ar prototipams;

• oro slėgio butelis (lanksti pūslė) naudojamas uždaroms dalims ar profiliuočiams.

Vijimo technologijos privalumai:

1. Greitas procesas;
2. Mažos žaliavų kainos, nes pluoštų nereikia apdoroti (t.y. nereikia pluošto austi į audinį);
3. Struktūrinės savybės gali būti labai geros, nes pluoštas gali būti pakankamai tiksliai formuojamas pritaikant apkrovas, t.y. įtempius;
4. Šiuolaikinės vyniojimo mašinos programinio valdymo būdu leidžia nustatyti tikslų armuojančios medžiagos kampą;
5. Kontroliuojamas dervos kiekis mechanizmais, tai leidžia nustatyti tikslų dervos kiekį.

2.3.3. Pultruzija

Pultruzija viena iš sparčiausiai besiplečiančių ir sudėtingesnių stiklo plastiko gaminių gamybos technologijų.

Pultruzija (angl. pultrusion) – pavadinimas kildinamas iš žodžio „pull" (angl. pull traukti) ir žodžio „trusion", bei žodžio „ekstrusion" (angl. extrusion išspaudimas). Ekstruzija tai vienodo profilio gaminių (vamzdžių, plėvelių, strypų, juostų, siūlų) gavimas išspaudimu (ekstruderiu arba ekstruziniu presu) per štampą.

Nors pultruzijos ir ekstruzijos procesai turi kai kurių panašumų, tačiau pagrindiniai skirtumai tarp šių procesų yra tie, jog ektruzijos metu yra suformuojamas profiliuotis iš išlydytos medžiagos, o pultruzijos metu stiklo pluoštas impregnuojamas derva ir, veikiamas tam tikros traukos jėgos, juda per štampą, kuris suformuoja stiklo pluošto profiliuotį (Hota *et al*. 2006). Tipinė pultruzijos mašina pavaizduota 2.6 paveiksle.



1 stiklo pluošto ritiniai; 2 stiklo pluošto orientavimas (kreiptuvas); 3 stiklo pluošto audinys; 4 dervos vonia – impregnatorius; 5 apsauginis medžiagos sluoksnis; 6 formos paruošimas; 7 formavimas – štampas (medžiagos kietinimas); 8 traukos greičio kontrolė; 9 traukos mechanizmai; 10 pjautuvai.

2.6 pav. Tipiška pultruzijos mašina. Pultruzijos mašinos sudedamosios principinio veikimo dalys (pagal Pultrusion industry...2011)

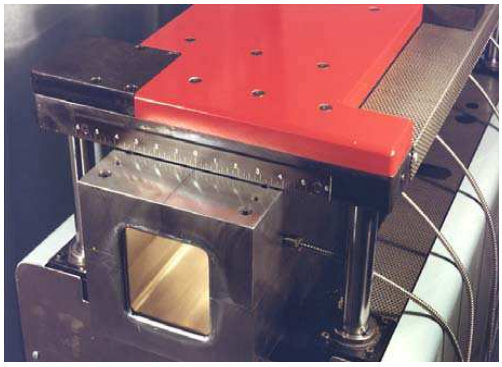
Pultruzijos technologija pasižymi nenutrūkstamu procesu, kurio metu stiklo pluošto siūlų matrica impregnuojama termoaktyviomis dervomis, o dervoje impregnuotas stiklo pluoštas toliau tiekiamas į įkaitintą klišę, kuri parinkta pagal formuojamo produkto geometrines ypatybes (žiūrėti 2.8 pav.). Iš esmės visi profiliuočiai skersai sustiprinti stiklo pluošto audiniu (žiūrėti 2.7 pav.) . Profiliuočio centre išdėstytas stiklo siūlų pluoštas, kuris atlaiko išilgines jėgas. Tokia sandara leidžia atlaikyti didesnes apkrovas (Apie stiklo...2011).



2.7 pav. Stiklo pluošto gijos, pusverpaliai (Putrusion process 2012)

Kietinimo procesas vyksta įkaitusioje krosnyje, kuri sukietina dervas (žiūrėti 2.8 pav.). Suformuotas stiklo pluošto profiliuotis supjaustomas reikiamais ilgiais. Pultruzijos technologija

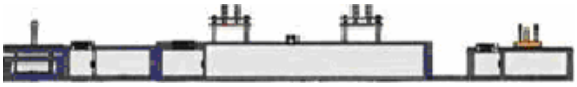
leidžia per trumpą laiką įgyvendinti užsibrėžtus tikslus, o ir pačios konstrukcijos yra puikių fizinių charakteristikų, mobilios bei ergonomiškos. Stiklo pluošto profiliuočių paviršiai padengti papildomu pluošto audiniu, kad būtų garantuotas UV ir oro sąlygų atsparumas.



2.8 pav. Profiliuočio geometrijos štampas (įkaitusi krosnis) (Putrusion process 2012)

Pultruzijos mašinos šiuo metu yra nemažai pažengusios pasiekta gana didelė gamybos sparta, traukos jėga, galimybė pasirinkti įvairios geometrijos pagal individualius užsakymus profiliuočius (žiūrėti 2.2 lentelę).

2.2 lentelė. Pultruzijos mašinų tipai ir gamybos rodikliai (pagal Pulstrusion...2011)

Mašinos tipas	Mašinos schema	Maks. spaudimo jėga (kg)	Maks. galimas profiliuočio aukštis (mm)	Maks. galimas profiliuočio plotis (mm)	Maks. traukimo greitis (cm/min)	Šilumos zonos (max/min)
RIMP 5		2268	76.2	203.2	185/308	4/6
RIMP 10		4536	101.6	304.8	185/308	6/8
RIMP 20		9072	203.2	609.6	246	8/12
RIMP 25		11340	254	660.4	246	10/16
RIMP 30		11340	254	914.4	216	12/16
RIMP 40		18144	304.8	1016	185	12/20

Pagal pultruzijos mašinų rodiklius matyti, kad profilių galimas dižiausias profiliuočių aukštis $\approx 305\ mm$, skirtingai nei stikloplastikio profiliuočių vijimo metu – atramų skersmenų dydžiai neribojami.

2.4. Stiklo plastiko elektros linijų atramų klasės

Laikomoji galia elektros linijų atramų priklauso nuo naudojamos medžiagos. Laikomoji galia gali būti nustatyta eksperimentiškai, per konstrukcijų bandymus įvairiomis apkrovų sąlygomis arba galima nustatyti teoriškai iš medžiagų specifikacijų ir standartų.

Amerikos normose ANSI Standart 05.1 (1992) medinės atramos skirstomos į klases pagal laikomąją galią. Medinių atramų klasė nustatoma atsižvelgiant į skersmenį ir atramos aukštį, darant prielaidą, kad atrama vienodai siaurėja ir yra apkrauta viena skersine jėga 0.6 m atstumu nuo viršūnės. Amerikoje stiklo plastiko atramų klasės analogiškai skirstomos kaip ir medinių atramų klasės. Atramų klasės pateiktos 2.3 letelėje.

2.3 lentelė. Elektros linijų atramų klasės (pagal ANSI Standart 05.1)

Klasės	Skersinė jėga (kN)
H6	**50.7**
H5	**44.5**
H4	**38.7**
H3	**33.4**
H2	**28.5**
H1	**24.0**
1	**20.0**
2	**16.5**
3	**13.3**
4	**10.7**
5	**8.5**
6	**6.7**
7	**5.3**
9	**3.3**
10	**1.6**

2.5. Eksperimentiniai tyrimai su stiklo plastiko atramomis

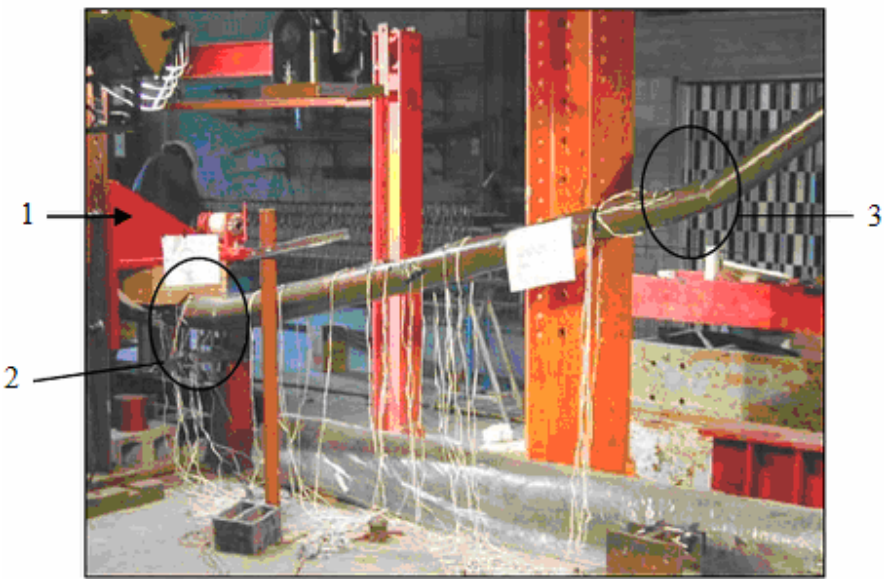
Martin ir Richter (1974) atliko bandymus su aliuminio ir stiklo plastiko poliais. Bandymų rezultatai parodė, kad stiklo pluošto atramų „apkrovos – įlinkio“ kreivė iki pleišėjimo buvo beveik tiesinė, o nepakankamumas atsirado dėl vietinių poveikių. Martinas ir Richteris taip pat padarė išvadą, kad stiklo pluošto atramos galėtų būti sukomponuotos taip, kad jų standumas ir stiprumas būtų lygus aliuminio atramoms. Tačiau iš šių tyrimų autoriai padarė išvadą, kad šie rezultatai gali būti pasiekti tik tinkamai suderinus armatūros, t.y. stiklo pluošto orientaciją ir pačios atramos matmenis (pagal Martin ir Richter 1974).

1988 metais Bell pradėjo GFRP atramų tyrimą. Bandymams buvo naudojama smailėjantys tuščiavidurio skerspjūvio profiliuočiai. Bandymai parodė, kad GFRP atramos galėtų saugiai atlaikyti skersines apkrovas, kaip ir atlaiko mediniai stulpai panašiomis sąlygomis. GFRP profiliuočių bandymų metu buvo nustatyta, kad medžiaga tikrai elastinga, net ir esant dideliems įlinkiams (McClure *et al.* 1992).

Panašūs eksperimentiniai tyrimai su stiklo pluošto atramomis buvo atlikti Shakespeare įmonės 1993 metais (Derrick 1996). 4 klasės GFRP atramos buvo tiriamos Kolorado valstijoje, JAV. Bandymai parodė, kad kiekviena tirta atrama atitiko arba šiek tiek viršijo stiprumo reikalavimus lyginant su medininėmis atramomis.

2007 m. Slimane Metiche ir Radhouane Masmoudi atliko eksperimentinius tyrimus su stiklo plastiko atramomis. Šie mokslininkai tyrė atramas pagamintas vijimo technologija. Jų bandinių sąraše buvo su įvairias kampais išsidėsčiusiu stiklo pluoštu pagaminti kūginiai profiliuočiai.

Pagal Slimane Metiche ir Radhouane Masmoudi atliktus bandymus buvo nustatyta du tipiniai stiklo plastiko atramų suirimo tipai, t.y. stiklo plastiko poliai suiro ties įtvirtinimu ir apkrovos pridėjimo vietoje. Atramų lenkimo bandymai pavaizduoti 2.9 ir 2.10 paveiksluose.



1 – atrama, 2 – nepakankamumas gniuždomoje pusėje, 3 vietinis klupumas

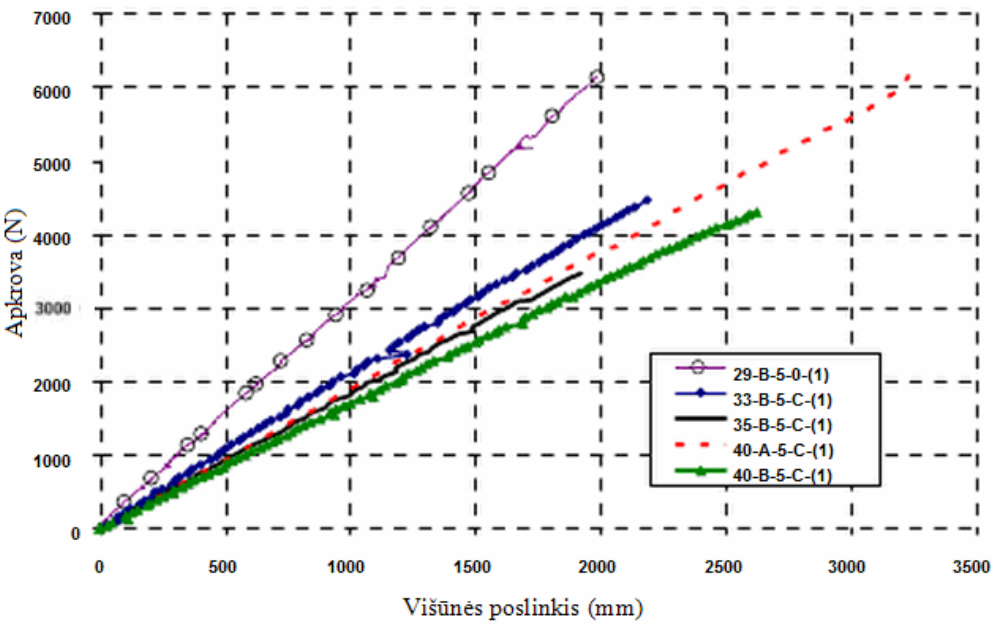
2.9 pav. Bandinio suirimas gniuždomoje atramos pusėje ir apkrovos pridėjimo vietoje (pagal Slimane ir Radhouane 2007)

2.10 paveiksle galime pamatyti atramos suirimą apkrovos pridėjimo vietoje, o 2.11 paveiklse – atramos suirimą prie atraminės bazės.



2.10 pav. Bandinio suirimas atramos suspaudimo pusėje prie atraminės bazės (pagal Slimane ir Radhouane 2007)

Tyrimų lenkimo rezultatai pavaizduoti 2.11 paveiksle.



2.9 pav. Kūginių stiklo plastiko atramų tipinės apkrovos deformacijos kreivės (pagal Slimane ir Radhouane 2007)

2.11 pav. galime pamatyti viršūnės poslinkių tiesinį kitimą didėjant apkrovai.

3. STIKLO PLASTIKO MODELIAVIMO METODŲ ANALIZĖ

3.1. Kevalo iš stiklo plastiko medžiagų modeliavimas

Tyrimo procese išskiriami du pagrindiniai etapai:

1. Kevalo iš kompozitinės medžiagos – stiklo plastiko modeliavimas;
2. Konstrukcijos - kūginio kevalo tyrimas.

Kevalas konstruojamas iš sudėtinių medžiagų, t.y dervų ir stiklo pluošto. Šioje srityje dabartiniu metu nemažai pasiekta: kompiuterinėmis programomis modeliuojamos kompozitinės medžiagos, jų išdėstymo pozicijos, pluošto formavimas iš kelių įvairiais kampais armuotų sluoksnelių ir pan.

Priklausomai nuo atramų gamybos būdo (pultruzijos ar gijų vijimo), skirtingai modeliuojamas medžiagų išsidėstymas kevale. Modeliavimo principai pateikti sekančiuose skyriuose.

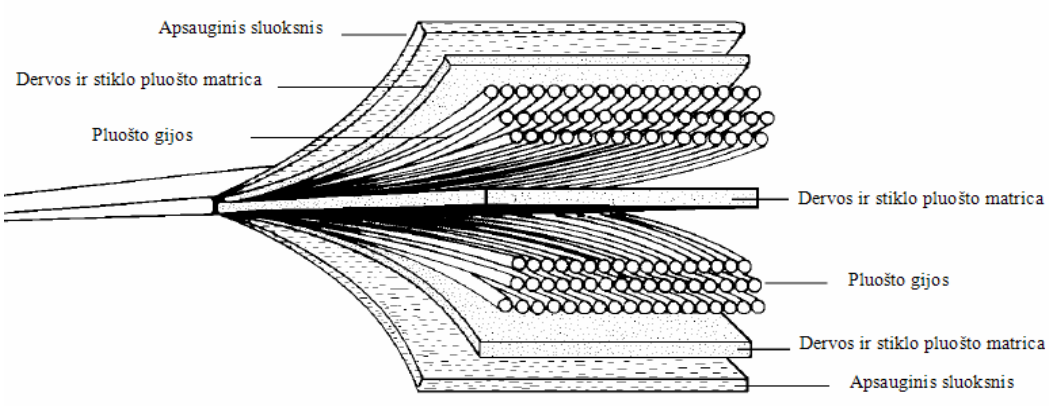
3.2. Atramos iš stiklo plastiko, pagamintos pultruzijos būdu, savybių nustatymas ir modeliavimas

Modeliuojant atramą pagamintą pultrūzijos būdu išskiriami trys kevalo medžiagų sluoksniai (žiūr. į 3.1 ir 3.2 pav.) :

1) Apsauginis sluoksnis (angl. surface veil – paviršiaus apsauga). Šį sluoksnį paprastai sudaro smulkintas pluoštas, kuriuo padengtas paviršius. Šio gausiai derva prisotinto sluoksnio paskirtis saugoti vidinius sluoknius nuo ultravioletinių spindulių ir agresyvios aplinkos poveikio. Skaičiavimuose šio sluoksnio įtaka nevertinama.

2) Dervos ir stiklo pluošto matrica (angl. Continuous Strand Mats (CSM) – vientiso suvijimo matrica). Ji sudaryta iš santykinio ilgio stiklo pluošto vijų, atsitiktinai orentuotų plokštumoje. Šis sluoksnis naudojamas kaip kelių krypčių sustiprinimas, kuris užtikrina medžiagos vientisumą ir stiprį skersine kryptimi.

3) Stiklo gijų sluoksnis (angl. roving). Rovingas – tai nesuktos gijos, susidedančios iš kelių kompleksinių siūlų. Rovingas apibūdinamas jų kiekiu ir elementaraus siūlo skersmeniu. Šiame sluoksnyje stiklo gijos orientuojamas išilgine kryptimi profiliuočio atžvilgiu. Šis sluoksnis labiausiai lemia medžiagos išilginį stiprumą ir standumą.



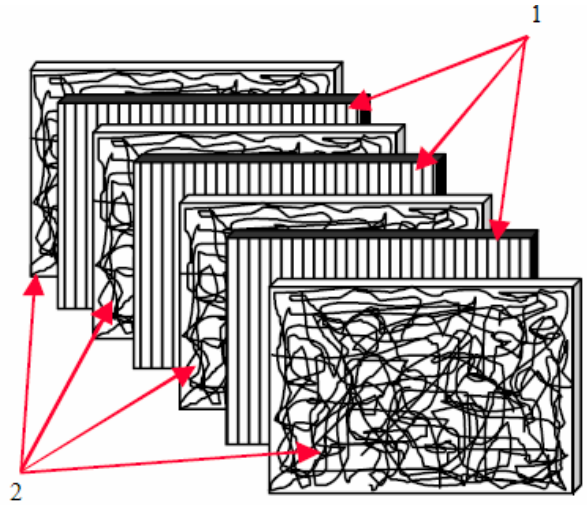
3.1 pav. Stiklo plastiko kevalo sluoksnių principinė schema (pagal Chugh ir Jinrong 2006)

Sluoksnių savybių nustatymas

Atliekant kevalų formavimo projektus, būtini pradiniai duomenys, įvertinantys esminius medžiagų parametrus:

- Armuojamosios ir rišamosios medžiagos tamprumo moduliai;
- Puasono koeficientai;
- Armavimo medžiagos tūrinis koeficientas.

Kaip jau buvo minėta, stiklo plastiko kevalo modeliavime išskiriami 2 parindiniai sluoksniai: rovingas ir CSM. Rovingo ir CSM sluoksnių struktūra pavaizduota 3.2 paveiksle.



1 rovingo sluoksniai, 2 CSM sluoksniai

3.2 pav. Rovingo ir CSM sluoksnių struktūra (pagal Chugh ir Jinrong 2006)

Rovingo sluoksnio savybių nustatymas:

Nustatomos šios savyės:

- E_1 – tamprumo modulis pluošto kryptimi;
- E_2 – tamprumo modulis statmena pluoštui kryptimi;
- G12 – šlyties modulis plokštumoje;
- G23 – šlyties modulis iš plokštumos;
- μ_{12} – Pausono koeficientas.

Savybės yra išvedamos naudojantis stiklo pluošto tūrio dalimi, paties pluošto ir užpildo mechaninėmis savybėmis. Priimama, kad deformacijos sluoksnio kryptimi yra tokios pačios kaip ir užpilde (Chugh ir Jinrong 2006):

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f); \tag{3.1}$$

čia E_f – pluošto tamprumo modulis;

E_m – užpildo tamprumo modulis;

V_f – pluošto tūrio dalis.

Tamprumo modulis statmena pluoštui kryptimi E_2 gaunamas pagal (3.2) formulę:

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{E_m V_f + E_f \left(1 - V_f\right)}; \tag{3.2}$$

čia E_f – pluošto tamprumo modulis;

E_m – užpildo tamprumo modulis;

V_f – pluošto tūrio dalis.

Pausono koeficientas plokštumoje μ_{12} gaunamas pagal (3.3) formulę:

$$\mu_{12} = \mu_f V_f + \mu_m (1 - V_f); \tag{3.3}$$

čia μ_f - pluošto Puasono koeficientas;
μ_m - užpildo Puasono koeficientas.

Šlyties modulis plokštumoje G_{12} (Chugh ir Jinrong 2006):

$$G_{12} = G_m \left[\frac{(1 + V_f) + (1 - V_f) G_m / G_f}{(1 + V_f) + (1 - V_f) G_m / G_f} \right]. \tag{3.4}$$

Šlyties modulis iš plokštumos G_{23} (Chugh ir Jinrong 2006):

$$G_{23} = G_m \left[\frac{V_f (1-V_f)\eta_{23}}{(1-V_f)\eta_{23} + V_f G_m / G_f} \right]; \tag{3.5}$$

$$\eta_{23} = \frac{3 - 4\mu_m + G_m / G_f}{4(1-\mu_m)}. \tag{3.6}$$

Stipruminės *rovingo* sluoksnio savybės nustatomos sunkiau nei tamprumo sąvybės. Nustatomi šie stipriai:

1) F_{1t} –išilginis tempimo
2) F_{1c} – išilginis gniuždymo stipris;
3) F_{2t} – skersinis tempimo stipris;
4) F_{2c} – skersinis gniuždymo stipris;
5) F_{12} – šlyties stipris plokštumoje.

Vienakrypčiai kompozitai pasižymi šia savybe: didesnę dalį įtempimų išilgine kryptimi perima pluoštas. Kitų tipų kompozituose apkrova vienodai tenka pluoštui ir užpildui.

Išilginis tempimo stipris F_{1t} nustatomas pagal (3.7) formulę:

$$F_{1t} = \sigma_{fu} \left[V_f + (1-V_f) E_m / E_f \right]; \tag{3.7}$$

čia σ_{fu} - didžiausias pluošto tempimo įtempis.

Išilginis gniuždymo stipris yra maždaug 50 % mažesnis negu išilginis tempimo atsparumas. Todėl supaprastinant skaičiavimus galima nesinaudoti 3.8 formule. Klupimą dažniausiai sukelia mikro raukšlės, kai išklumpa atskiros skaidulos matricos viduje. Klupimo procesas sudėtingas ir iš esmės priklauso nuo pluošto netobulumų, šlyties modulio ir šlyties jėgos kompozite (Chugh ir Jinrong 2006). Išilginis gniuždymo stipris F_{1t} nustatomas pagal (3.8) formulę:

$$F_{1c} = \left(\frac{\chi}{a} + 1 \right)^b G_{12}; \tag{3.8}$$

$$\chi = \frac{G_{12}\Omega}{F_{12}}; \tag{3.9}$$

čia χ bedimensis parametras; a ir b empyriniai parametrai;

Ω standartinė pluošto deviacija, nuo pluošto poslinkio, radianais;

F_{12} šlyties stipris plokštumoje.

Skersinis tempimo stipris priklauso nuo užpildo stiprumo tempiant, pluošto ir užpildo sukibimo ir matricos defektų:

$$F_{2t} = \sigma_{mtu} C_v \left[1 + (V_f - \sqrt{V_f})(1 - E_m / E_f) \right]; \tag{3.10}$$

$$C_v = 1 - \sqrt{\frac{4V_f}{\pi(1 - V_f)}}; \tag{3.11}$$

čia σ_{mtu} didžiausi tempimo įtempiai užpilde;

C_v tuščia tūrio dalis.

Pagal panašią formulę skaičiuojama ir skersinis gniuždymo stipris:

$$F_{2c} = \sigma_{mcu} C_v \left[1 + (V_f - \sqrt{V_f})(1 - E_m / E_f) \right]; \tag{3.12}$$

čia σ_{mcu} didžiausi gniuždymo įtempiai užpilde.

Tokiu pat būdu skaičiuojamas ir šlyties stipris plokštumoje:

$$F_{12} = \tau_{mu} C_v \left[1 + (V_f - \sqrt{V_f})(1 - G_m / G_f) \right]; \tag{3.13}$$

čia τ_{mu} užpildo šlyties stipris.

Standartinės rovingo sluoksnio savybės pateikiamos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. *Rovingo* sluoksnio charakteristinės savybės (pagal Chugh ir Jinrong 2006)

Savybės	**Reikšmė**
E1 – tamprumo modulis pluošto kryptimi	34 GPa
E2 – tamprumo modulis statmena pluoštui kryptimi	10 GPa
G12 – šlyties modulis plokštumoje;	3,2 GPa
G23 – šlyties modulis iš plokštumos;	2,8 GPa
μ_{12} – Pausono koeficientas plokštumoje	0,25
F_{1t} – išilginis tempimo stipris	1,2 GPa
F_{1c} – išilginis gniuždymo stipris	91,6 kPa
F_{2t} – skersinis tempimo stipris	51,3 kPa
F_{2c} – skersinis gniuždymo stipris	72,7 kPa
F_{12} – šlyties stipris plokštumoje	51,2 kPa

CSM sluoksnio savybių nustatymas:

CSM sluoksnio savybės nustatomos remiantis prielaida, kad tai įvairiomis kryptimis orientuotas kompozitas. Kompozitinį sluoksnį su atsitiktinai orentuotu stiklo pluoštu galima idealizuoti kaip laminatą su dideliu skaičiumi vienakrypčių sluoksnių, kurių orentacija kinta nuo 0 iki 180 laipsnių (Chugh ir Jinrong 2006).

Tamprumo moduliai, šlyties moduliai, puasono koeficientai gali būti gaunami iš žinomų medžiagos savybių, žinant jų santykį tūryje.

Tamprumo modulis gaunamas pagal (3.14) formulę:

$$E = \frac{3}{8}E_1 + \frac{5}{8}E_2; \tag{3.14}$$

čia E_1 ir E_2 išilginis ir skersinis tamprumo modulis.

Šlyties modulis randamas pagal (3.15) formulę:

$$G = \frac{1}{8}E_1 + \frac{1}{4}E_2. \tag{3.15}$$

Puasono koeficientas randamas pagal formulę:

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1. \tag{3.16}$$

CSM sluoksnis atsitiktinai orientuotas kompozitas, todėl laikoma, kad stiprumo savybės visomis kryptimis yra vienodos.

Tempimo stipris nustatomas pagal (3.17) ir (3.18) formules:

$$F_t = \frac{4\alpha F_{2t}}{\pi}\left[1 + 0,5\ln\left(\frac{F_{1t}}{\alpha^2 F_{2t}}\right)\right], \text{ kai } \alpha \le \sqrt{\frac{F_{1t}}{F_{2t}}}; \tag{3.17}$$

$$F_t = \frac{4F_{2t}}{\pi}\sqrt{\frac{F_{1t}}{F_{2t}}}, \text{ kai } \alpha > \sqrt{\frac{F_{1t}}{F_{2t}}}; \tag{3.18}$$

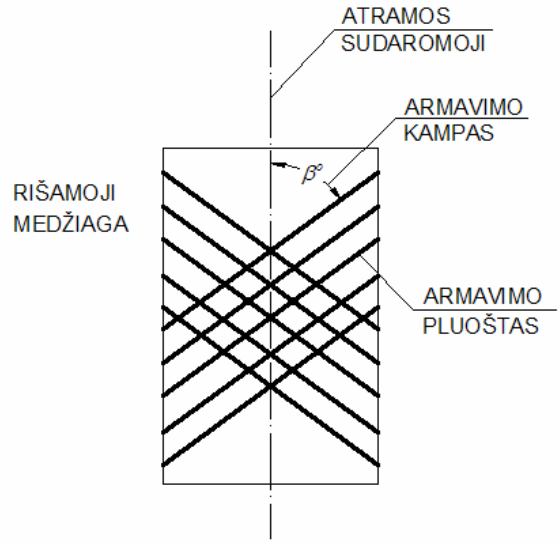
Dar neišvesta tokia formulė, kurią taikydami galėtume apskaičiuoti CSM sluoksnio gniuždymo stiprį, šlyties stiprį plokštumoje. Pagal Barbero prielaidas imama, kad gniuždomasis stipris ir šlyties stipris plokštumoje yra lygūs pusei tempiamojo stiprio (Chugh ir Jinrong 2006). Tipinės CSM sluoksnio savybės pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. CSM sluoksnio parametrai ir jų reikšmės

Savybės	**Reikšmė**
E1 – tamprumo modulis pluošto kryptimi	11,2 GPa
E2 – tamprumo modulis statmena pluoštui kryptimi	11,2 GPa
G12 – šlyties modulis plokštumoje;	4 GPa
G23 – šlyties modulis iš plokštumos;	4 GPa
μ_{12} – Pausono koeficientas	0,40
F_t – tempimo stipris	150 kPa
F_c – gniuždymo stipris	75 kPa
F_{12} – šlyties stipris	75 kPa

3.3. Atramos iš stiklo plastiko, pagamintos vijimo technologija, savybių nustatymas ir modeliavimas

Vijimo būdu pagamintų atramų kevale, skirtingai nei pultruzijos būdu, neišskiriami 3 sluoksniai, nei CSM, nei rovingo sluoksnis. Modeliuojamas vienas sluoksnis. Tiesiog formuojamas cilindrinis kevalas, kurio medžiaga modeliuojama iš elementarių sluoksnių, armavimo pluoštą išdėstant įvairiais atitinkamais kampais (žiūr. 3.3 pav.).



3.3 pav. Kevalo iš stiklo plastiko sluoksnio principinis modeliavimas (vijimo gamybos būdas)

Vijimo technologija pagamintų atramų kevalas modeliuojamas įvairiomis kryptimis išdėstytais sluoksniais. Šio elementaraus viena kryptimi armuoto sluoksnio savybės apskaičiuojamos pagal žemiau pateiktas formules.

Elementaraus sluoksnio tampriosios charakteristikos skaičiuojamos remiantis E – stiklo pluošto ir naudojamų dervų savybėmis. Kompozitinės medžiagos elementaraus sluoksnio tamprumo modulis pluošto kryptimi apskaičiuojamas pagal (3.19) formulę (Adams 1987):

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f); \tag{3.19}$$

čia E_f – pluošto tamprumo modulis;

E_m – užpildo (dervos) tamprumo modulis;

V_f – pluošto tūrio dalis (nustatoma gamybos metu).

Norint apskaičiuoti tamprumo modulį skersine pluoštui kryptimi ir šlyties modulį, naudojamas Tsai-Hahn (1980) metodas.

Tamprumo modulis statmena pluoštui kryptimi E_2 gaunamas pagal (3.20) formulę:

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{E_m V_f + E_f \left(1 - V_f\right)}; \tag{3.20}$$

G_f, G_m – atitinkamai armuojamosios bei rišamosios medžiagos šlyties moduliai:

$$G_f = \frac{E_f}{2 \cdot (1 + \nu_f)}; \tag{3.21}$$

$$G_m = \frac{E_m}{2 \cdot (1 + \nu_m)}. \tag{3.22}$$

G_{12} – šlyties modulis plokštumoje;

$$G_{12} = \frac{1}{\left[\frac{V_f}{G_f} + \frac{1 - V_f}{G_m}\right]}. \tag{3.23}$$

ν_1, ν_2 – medžiagos Puasono koeficientai plokštumoje ir iš plokštumos:

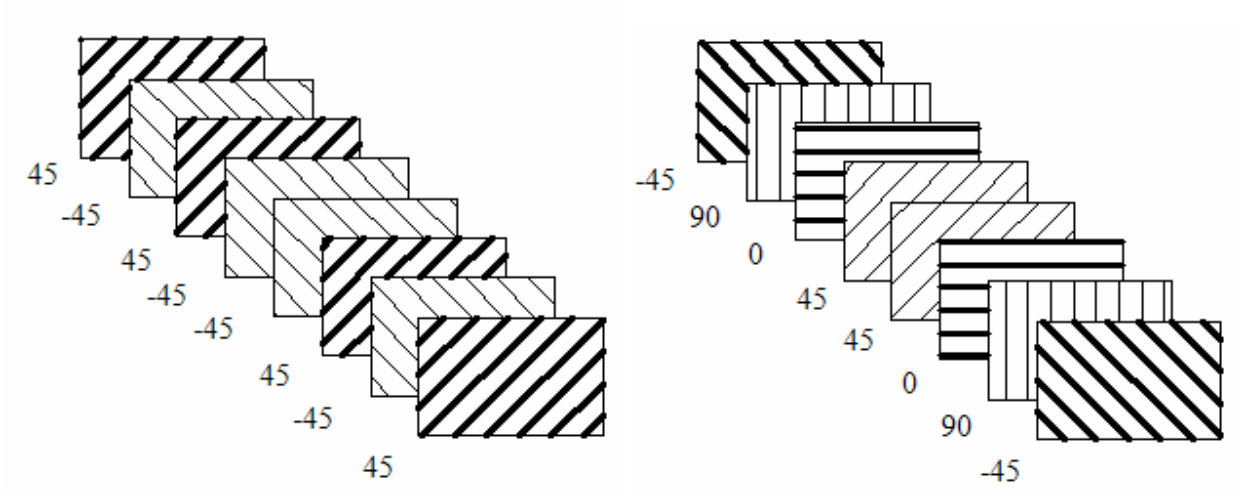
$$\nu_1 = \nu_m (1 - V_f) + \nu_f \cdot V_f; \tag{3.24}$$

$$\nu_2 = \nu_1 \frac{E_2}{E_1}; \tag{3.25}$$

ν_f, ν_m – atitinkamai armuojamosios ir rišamosios medžiagos Puasono koeficientai.

Stiklo plastikos stipris priklauso nuo pluošto ir matricos savybių ir jų atitinkančio tūrio dalių, jis apskaičiuojamos tokiu pačiu principu kaip rovingo sluoksnio parametrai (žiūr. 3.2 skyrių).

Modeliuojant kevalą (pagamintą vijimo būdu) kompiuterine programa, sluoksniai išdėstomi norimo storio ir atitinkamais kampais pagal kevalo sudaromąją ir simetriškai vidurinio sluoksnio paviršiaus atžvilgiu. Taip gaunama ortotropinė medžiaga.

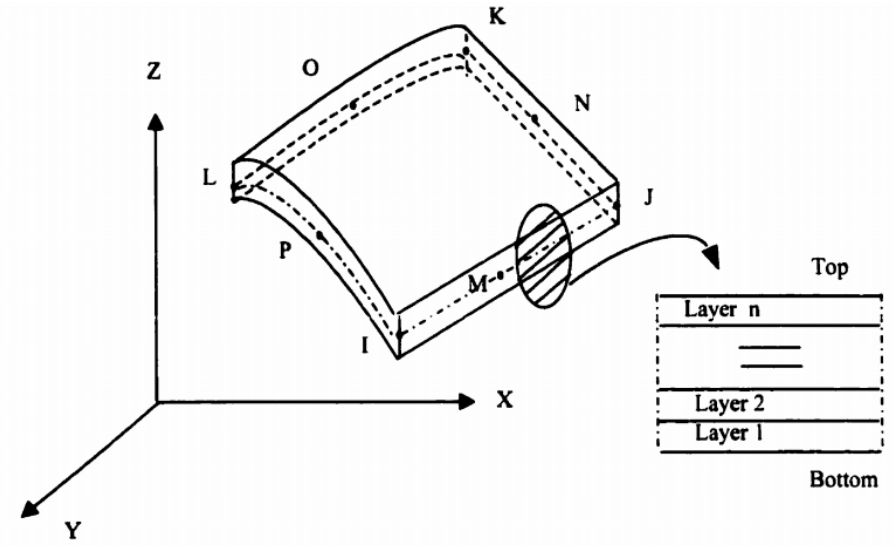


3.4 pav. Sluoksnių modeliavimo, išdėstant juos įvairiais kampais, principinė schema

3.4. Kompozito modeliavimas kompiuterine programa ANSYS

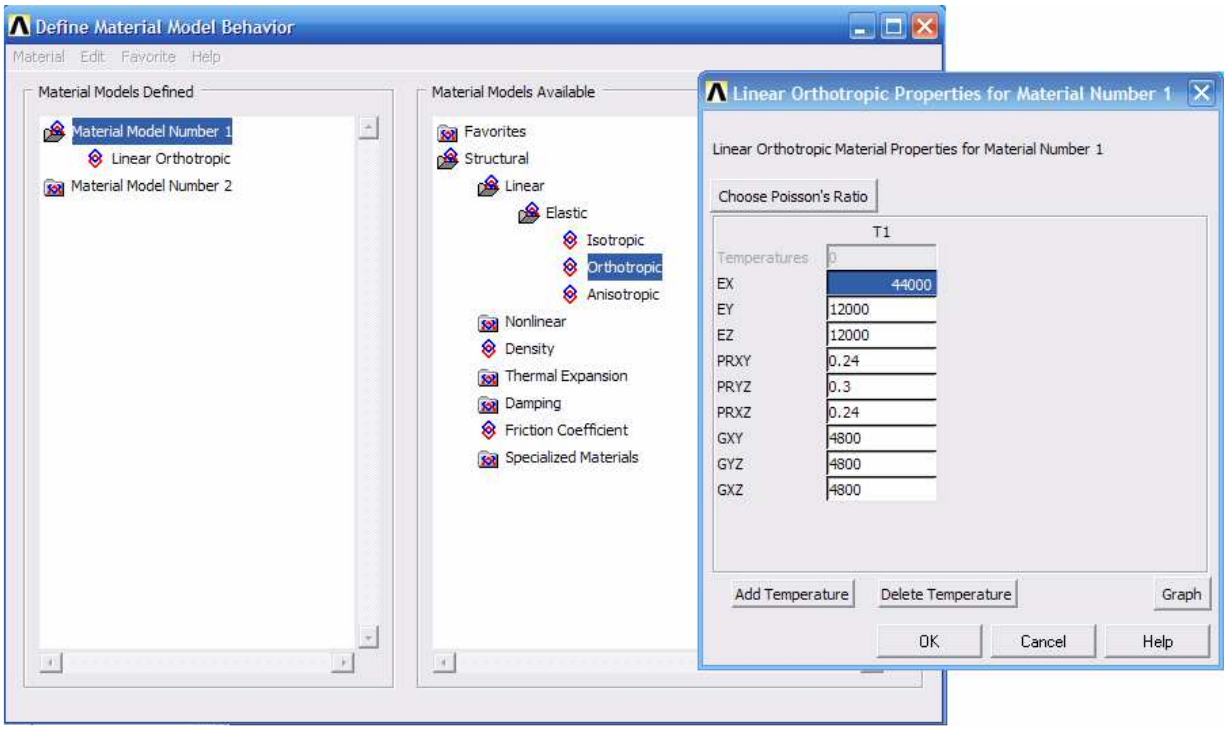
ANSYS – tai daugiafunkcinis baigtinių elementų programinis paketas, skirtas mechanikos, elektrotechnikos, skysčių dinamikos bei kitų inžinerinių- fizikinių uždavinių sprendimui ir analizei. Naudojantis paketu galima spręsti tiek mokslinės, tiek ir inžinerinės pakraipos problemas (Programinė... 2012). Taip pat su ja patogu modeliuoti ir tirti kompozitines medžiagas.

Modeliuojant kompozitą šia kompiuterine programa, pirmiausia pasirenkamas baigtinio elemento tipas. Idealizuojant sluoksniuoto elemento skerspjūvį, kurio savybės išilgine ir skersine linkme skiriasi priskiriamas 8 mazgų kevalinis baigtinis elementas (ANSYS programos įvesties kalboje, šis elementas vadinasi „SHELL 99“). Baigtinio elemento tipas SHELL 99 pateiktas 3.5 paveiksle (pagal Rajendran ir Song 1998).



3.5 pav. **Baigtinis 8 mazgų ir n sluoksnių elementas (pagal Release...2012)**

Kompiuterine programa ANSYS modeliuojamo kompozito savybių įvesties langas pavaizduotas 3.6 paveiksle. Šiame lange, priklausomai nuo medžiagos tipo, galime pasirinkti tamprumo modulius, šlyties modulius, ar Puasono koeficientus.

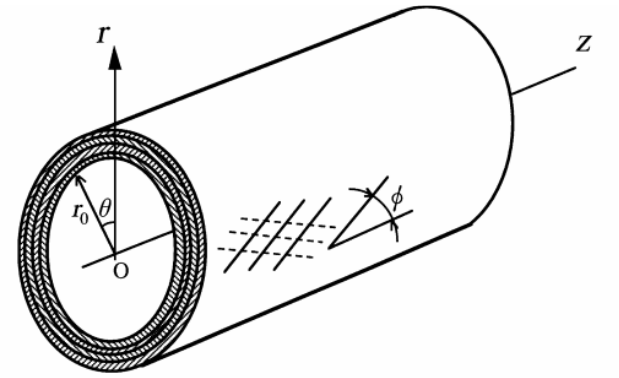


3.6 pav. Medžiagų savybių įvedimo langas

Kiekvienas SHELL 99 baigtinis elementas turi 8 mazgus, o kiekvienas mazgas turi šešis laisvės laipsnius: tris poslinkius U_x, U_y, U_z atitinkamai taško x, y, z kryptimis, ir tris posūkius R_x, R_y, R_z atitinkamai apie taško x,y,z ašis.

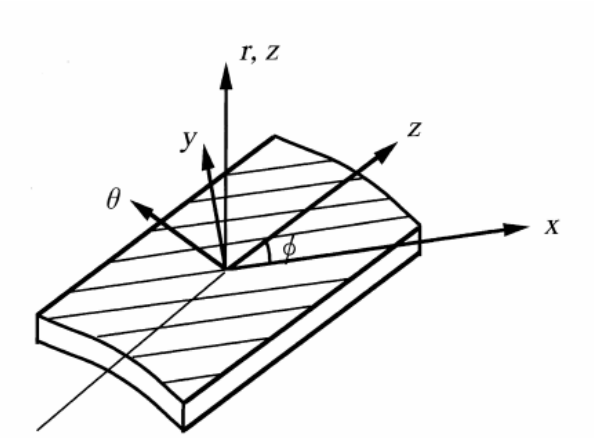
Pluošto orientacija kiekvieno sluoksnio apibūdinama apibrėžiant pluošto kampą θ, atžvilgiu lokalių elemento koordinačių. Todėl labai svarbu nusistatyti modeliuojamos geometrijos globalias koordinačių sistemas ir baigtinio elemento lokalią koordinačių sistemą .

Globali koordinačių sistema pavaizduota 3.7 paveiksle.



3.7 pav. Sluoksniuoto cilindrinio elemento globali koordinačių sistema (Takayanagi *et al.* 2001)

Lokali koordinačių sistema parodyta 3.8 paveiksle.

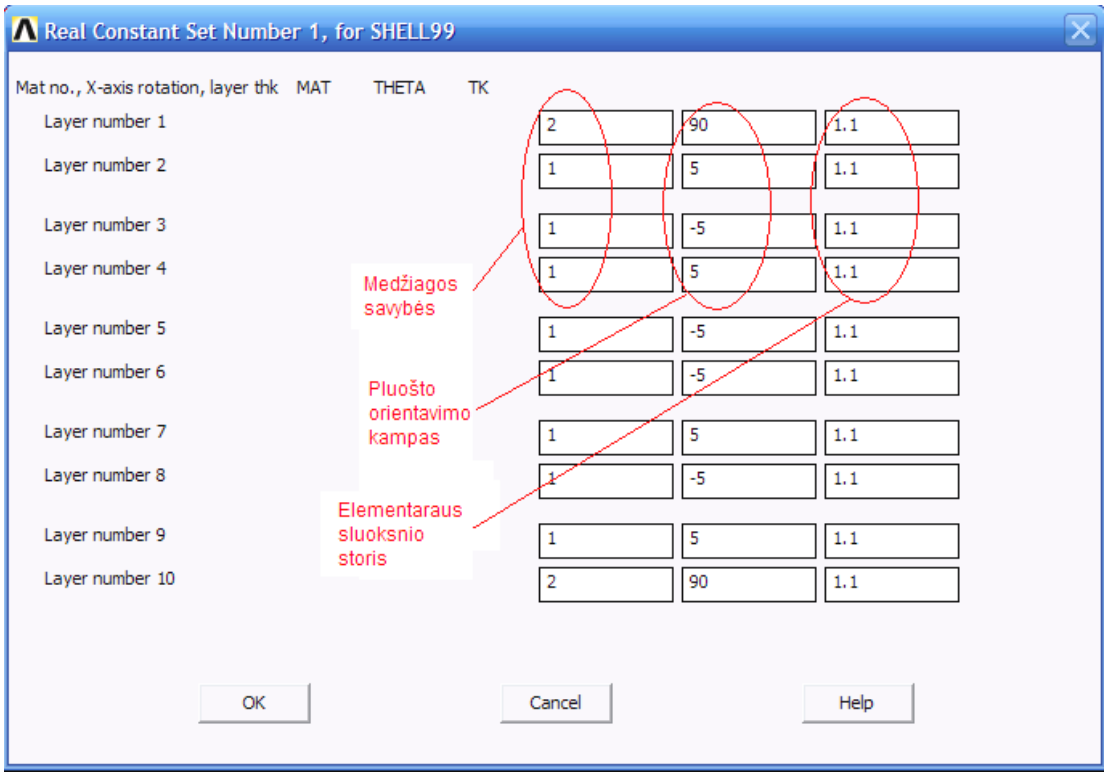


(x, y, z) : Baigtinio elemento (lokali) koordinačių sistema
(r, θ , z) : cilindrino elemento (globali) koordinačių sistema

3.8 pav. Aštuonių mazgų ir n sluoksnių baigtinio elemento koordinačių sistema (Takayanagi *et al.* 2001)

Kai geometrinė forma nustatoma, gemetrija padalijama į lygiaverčių baigtinių elementų sistemą. Yra gerai žinoma, kad kuo mažesni tinklelio baigtiniai elementai tuo tikslesnius rezultatus galima gauti.

Bagtiniai elementas yra apibrėžiami sluoksnio storiu, sluoksnio posūkio kampu, ir ortotropinės medžiagos savybėmis.



3.9 pav. Sluoksnių savybių įvestiesties langas

3.9 paveiksle pažymėti įvesties stulpeliai, kuriuose priskiriamos savybės kiekvienam komponuojamo elemento sluoksneliui:

- *Medžiagos savybės* – kiekvienam sluoksniui galima parinkti skirtingas jau suformuotas medžiagos savybes, t.y. tamprumo modulius, šlyties modulius ar puasono koeficientus.
- *Pluošto orientavimo kampas* – šiame stulpelyje įvedamas sluoksnių pasisukimo kampas atžvilgiu profiliuočio sudaromosios. Svarbu programoje patikrinti, kaip išsidėstę baigtiniai elementai erdvėje, ir pagal X lokalią baigtinių elementų ašį priskirti sluoksneliui orientavimo kampą (žiūr. 3.8 pav.).
- *Elementaraus sluoksnio storis* – šiame stulpelyje įrašoma norimo storio sluoksnelių storiai.

3.5. Medžiagos nepakankamumo kriterijus

Projektavimo kriterijai reikalauja, kad įtempiai ir deformacijos, atsirandančios dėl apkrovimo, neturi viršyti ribinių medžiagos atsparumo kriterijų.

Nepakankamumas – tai medžiagos apkrovimo būsena, kai viršijamos nustatytos ribinės medžiagos stiprumo savybės. Kiekviena medžiaga turi tam tikrą stiprį, kuris išreiškiamas įtempiais ir deformacijomis, ir kurias viršijus medžiaga nebesugeba atlaikyti apkrovos.

Nepakankamumo kriterijus gali būti įtrauktas į stiklo plastiko atramų analizės ribinių apkrovų nustatymui.

Kompozitinėms ortotropinėms medžiagoms gali būti taikomas Tsai – Wu (1971) nepakankamumo kriterijus. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijus išvystytas anizotropinėms kompozitinėms medžiagoms, kurių stipruminės tempimo ir suspaudimo savybės yra skirtingos, taip pat sudaro saveikas tarp skirtingų kompozito komponenų, todėl tinkamas naudoti stiklo plastiko atramų analizei (Paepegem ir Degrieck 2003)

Tsai – Wu įtempių nepakankamumas nustatomas šia (3.26) lygtimi:

$$\zeta = \left(\frac{1}{\sigma_{xt}^f} + \frac{1}{\sigma_{xc}^f}\right)\sigma_x + \left(\frac{1}{\sigma_{yt}^f} + \frac{1}{\sigma_{yc}^f}\right)\sigma_y + \left(\frac{1}{\sigma_{zt}^f} + \frac{1}{\sigma_{zc}^f}\right)\sigma_z - \frac{\sigma_x^2}{\sigma_{xt}^f\sigma_{zc}^f} - \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{yt}^f\sigma_{yc}^f} - \frac{\sigma_z^2}{\sigma_{zt}^f\sigma_{zc}^f} + \\ + \frac{\sigma_{xy}^2}{\left(\sigma_{xy}^f\right)^2} + \frac{\sigma_{yz}^2}{\left(\sigma_{yz}^f\right)^2} + \frac{\sigma_{xz}^2}{\left(\sigma_{xz}^f\right)^2} + \frac{2C_{xy}\sigma_x\sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}^f\sigma_{xc}^f\sigma_{yt}^f\sigma_{yc}^f}} + \frac{2C_{yz}\sigma_y\sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}^f\sigma_{yc}^f\sigma_{zt}^f\sigma_{zc}^f}} + \frac{2C_{xz}\sigma_x\sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}^f\sigma_{xc}^f\sigma_{zt}^f\sigma_{zc}^f}} \tag{3.26}$$

Lygties nariai apibrėžiami taip:

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – įtempiai, atitinkamai sluoksnių *x, y ir z* kryptimis;

$\sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}$ – šlyties įtempiai sluoksnio *xy, yz, ir xz* plokštumose;

$\sigma_{xt}^f, \sigma_{xc}^f$ – medžiagos, atitinkamai, kritiniai tempimo ir gniuždymo įtempiai *x* kryptimi;

$\sigma_{yt}^f, \sigma_{yc}^f$ – medžiagos, atitinkamai, kritiniai tempimo ir gniuždymo įtempiai *y* kryptimi;

$\sigma_{zt}^f, \sigma_{zc}^f$ – medžiagos, atitinkamai, kritiniai tempimo ir gniuždymo įtempiai *z* kryptimi;

$\sigma_{xy}^f, \sigma_{yz}^f, \sigma_{xz}^f$ – medžiagos kritiniai šlyties įtempiai, atitinkaamai *xy, yz ir xz* plokštumose;

C_{xy}, C_{yz}, C_{xz} – sankibos koeficientas, atitinkamai *xy, yz ir xz* plokštumose.

Medžiagos nepakankamumas pasireiškia, kai nepakankamumo kriterijus ς yra lygus daugiau už vieną, o Tsai – Wu sankibos koeficientai turi būti nuo -1.0 iki 1.0 . Ši sąlyga būtina siekiant užtikrinti medžiagos stiprumą.

4. STIKLO PLASTIKO ATRAMŲ DAUGIAKRITERĖ ANALIZĖ

Stiklo plastiko atramų elgseną būtų lengviau ir paprasčiau suprasti iš ekspermentinių laboratorinių bandymų rezultatų. Tačiau visiškai pagrįsti projektavimą vadovaujantis bandymų rezultatais nepraktiška ir labai brangu. Todėl yra svarbu plėtoti analitinius modelius, galinčius prognozuoti GFRP atramų elgseną, be gausių bandymų.

4.1. Teorinių ir eksperimentinių tyrimų palyginimas

Patikimų projektavimo rekomendacijų sąlyga, žinoma, yra teorinių tyrimų palyginimas su eksperimentiniais rezultatais.

Siekiant įsitikinti baigtinių elementų analizės pagrįstumu, bei žinoma tolimesnio tyrimo rezultatais buvo palyginti tirtų stiklo plastiko atramų baigtinių elemetų metodu gauti duomenys su D. Polyzois (Polyzois *et al.* 2003) atliktais eksperimentiniais tyrimais.

Stiklo plastiko atramos baigtinių elementų metodu buvo tiriamos su kompiuterine programa ANSYS.

D. Polyzois bandymai buvo atliekami su vijimo būdu pagamintomis stiklo plastiko atramomis. Gaminant šias atramas buvo naudojama E – stiklo pluoštas ir vinilesterio dervos (470-300 DERAKANE). Medžiagų savybės pateikiamos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Stiklo pluošto ir dervos mechaninės savybės

Savybės	E – stiklo pluoštas	Vinylesterio derva (DARAKANE 470 – 300)
Tamprumo modulis (Gpa)	72.4	3.58
Puasono koeficientas	0.2	0.3
Tempiamasis stipris (MPa)	2400	85
Šlyties modulis (GPa)	30	1.38
Tankis (gm/cm3)	2.54	1.08

Bandiniai buvo kūginiai tuščiaviduriai profiliuočiai, 6250 mm ilgio. Atramų skersmenys apačioje ir viršuje atitinkamai 416 mm ir 305 mm. Bendras sienelės storis,

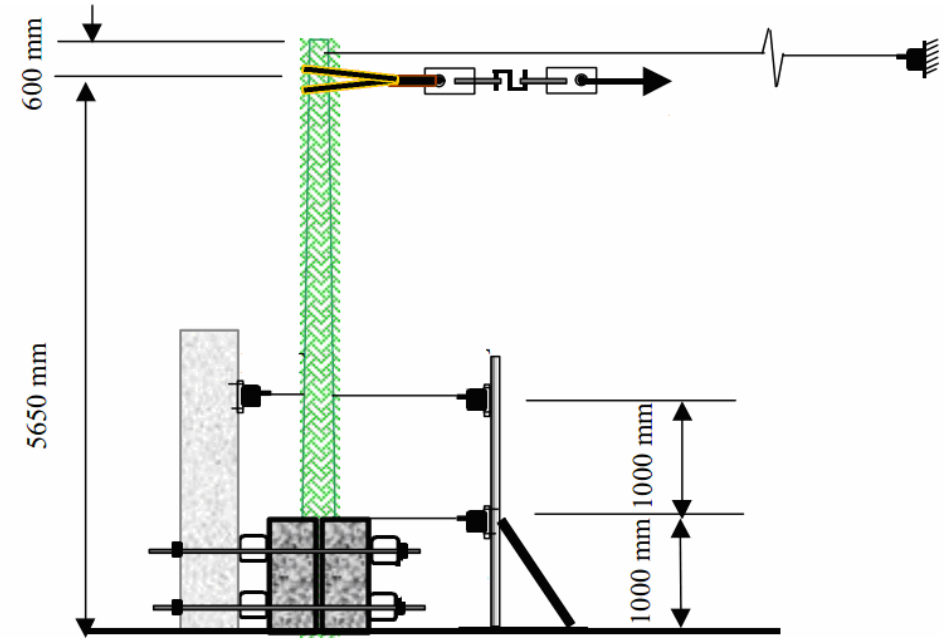
priklausomai nuo sluoksnių skaičiaus, svyravo nuo 2,75 mm iki 5,5 mm. Stiklo pluoštas išsidėstęs 5/-5, 10/-10 ar 20/-20 laipsnių kampu atžvilgiu kūgio sudaromosios, taip pat įterpta ir žiedine linkme išsidėsčiusio stiklo pluošto. Pluošto ir dervos kiekiai buvo nustatyti gamybos proceso metu. Atramų gamybos parametrai pateikti 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Stiklo pluošto atramų gamybos parametrai (pagal Polyzois 2003)

Atramos Nr.	Išilginio stiklo pluošto kompas	Skersinių pluošto sluoksnių skaičius	Bendras sluoksnių skaičius	Sienelės storis (mm)	Stiklo pluošto tūris (%)
1	10/-10	0	8	5.5	60
2	10/-10	4	8	4.5	60
3	10/-10	4	6	4.0	60
4	10/-10	2	4	2.4	60
5	20/-20	0	8	5.5	60
6	20/-20	2	8	5.0	60
7	20/-20	4	8	4.9	60
8	20/-20	2	6	4.0	60
9	20/-20	2	4	2.75	60
10	5/-5	2	6	4.6	60
11	5/-5	2	4	2.8	60

Atrama buvo įtvirtinta į gelžbetoninį pagrindą. Betono pagrindas buvo pritvirtintas prie standžios sienos naudojant 4 inkarus. Bandymo schema pavaizduota 4.1 pav.

Atrama buvo apkrauta horizontaliai, 600 mm atstumu nuo bandinio viršūnės. Apkrovimas buvo taikomas maždaug 0,25 mm / s.



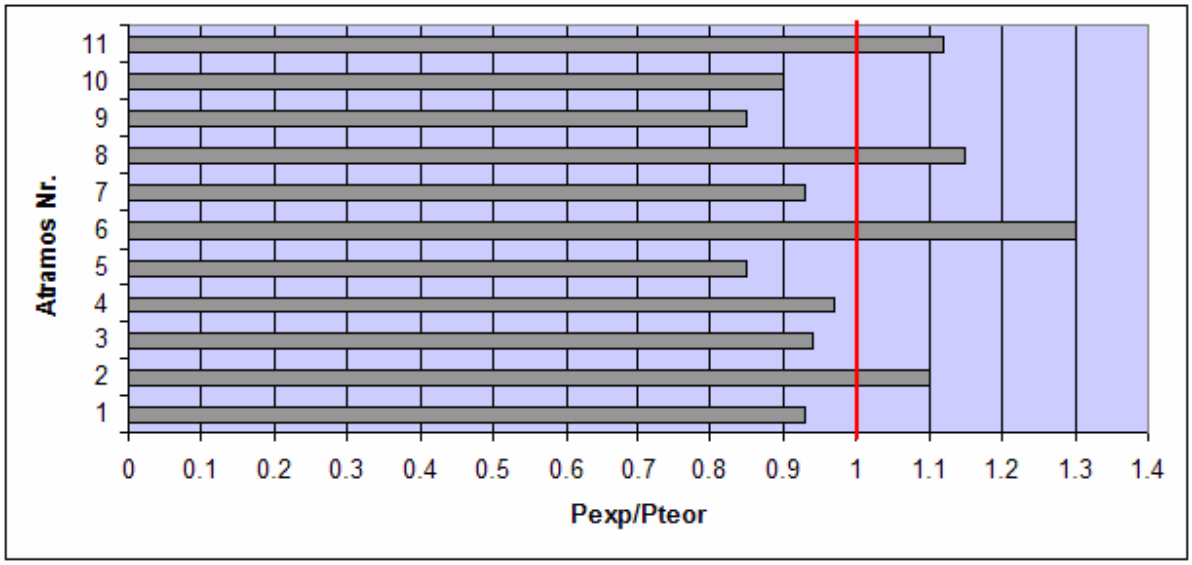
4.1 pav. D. Polyzois atliktų bandymų schema (pagal Polyzois 2003)

Visų bandymų rezultatai pateikiami 4.3 lentelėje.

4.3 lentelė. D. Polyzois tirtų atramų bandymų rezultatai (pagal Polyzois 2003) ir teorinių rezultatų rodikliai

Atramos Nr.	Kritinė jėga (kN) *eksperimentinė*	Kritinė jėga (kN) *teorinė*	Viršūnės poslinkis (mm)	Ekvival. medinių atramų klasei	Poslinkis % nuo viso aukščio
1	34.2	31.8	486	H3	9.7
2	30.1	33.1	608	H2	12.0
3	20.8	19.5	430	1	8.6
4	7.55	7.32	240	6	4.8
5	30.4	25.9	431	H2	8.6
6	36.4	47.3	634	H3	12.7
7	28.1	25.9	593	H2	11.9
8	18.9	21.8	416	2	8.3
9	6.90	5.90	252	6	5.0
10	20.0	18.0	403	1	8.1
11	8.80	9.90	278	5	5.6

Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas pateiktas 4.2 paveiksle.



Pexp *eksperimentinė kritinė apkrova;* ***Pteor*** *teorinė kritinė apkrova*

4.2 pav. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas

Vidutinis nuokrypio santykis tarp eksperimentinių ir teorinių kritinių apkrovų buvo maždaug 17 %. Kaip matyti iš šių rezultatų, yra pakankama koreliacija tarp gautų rezultatų.

Platus atramų iš stiklo pluošto parametrų tyrimas buvo atliktas naudojant ANSYS baigtinių elementų programą. Rezultatai pateikiami tolimesniuose poskyriuose.

4.2. Stiklo plastiko atramų tyrimas

Šio tyrimo tikslas buvo, taikant baigtinių elementų analizę, ištirti stiklo plastiko elektros linijų atramų elgesį, siekiant konstrukciją sumodeliuoti taip, kad būtų priartėta prie realios kosntrukcijos.

Pagrindinis tyrimo parametras pasirinktas stiklo pluošto orientavimas atramos sudaromosios atžviliu, taip pat nagrinėta kūginių atramų geometriniai parametrai.

Buvo išskirta trys stiklo pluošto elektros linijų atramų tyrimo etapai:

1. Žiedinio stiklo pluošto įtaka konstrukcijai;
2. Išilginio stiklo pluošto poveikis konstrukcijai;
3. Skerspjūvio įtaka stiklo plastiko atramos elgsenai.

Šiame tyrime buvo nagrinėjamos įvairių aukščių ir klasių stiklo plastiko elektros linijų atramos, pagamintos vijimo technologija.

Su ANSYS programa sumodeliuota vijimo būdu pagamintos atramos.

Tiriama konstrukcija: kūginė atrama (gembė), kurios viršūnėje (laisvame gale) pridėta koncentruota apkrova.

Kevalą sudaro sluoksneliai sudaryti stiklo plastiko sudėtinių medžiagų, kiekvienas jų konstruojamas skirtingai, t.y. armuojantys pluošteliai orientuojami įvairiais kampais.

Kaip buvo aptarta ankstesniame skyriuje, pasirenkamas toks baigtinis elementas, kad būtų galimybė modeliuoti kompozitinę medžiagą su neribotu skaičiumi sluoksnių, kurių kiekvienas turi savo pluošto orientaciją, bei atitinkamas medžiagos savybes.

Atramos atraminė bazė Ansys programa modeliuojama pasirenkant įtvirtinimo taškus standžius. Visi laisvės laipsniai Ux, Uy, Uz, Rx, Ry, Rz, prie atramos pagrindo suvaržomi imituojant fiksuotą atramos bazę prie betoninio pagrindo.

Apkrovos veikimo vieta 600 mm žemiau atramos viršūnės.

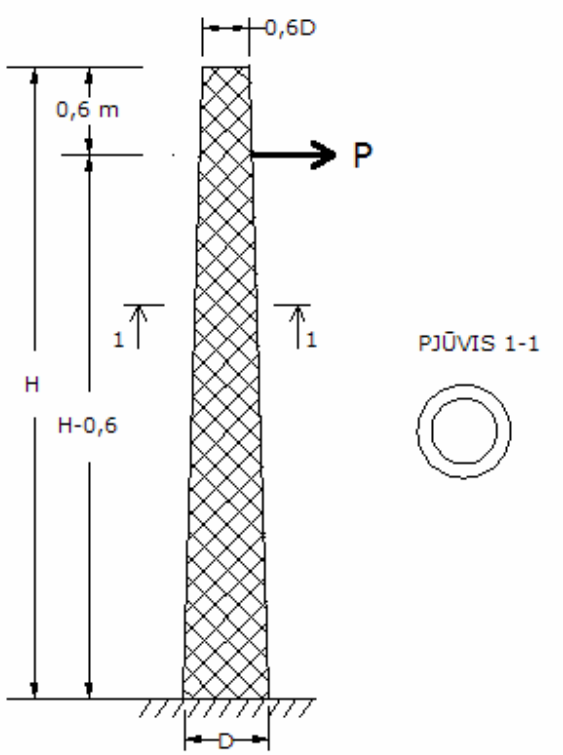
Pluošto tūrio santykis, visose tiriamose atramose, pasirinktas 0,6.

Tiriamų atramų medžiagų charakteristikos pateikiamos 4.4 lentelėje.

4.4 lentelė. Stiklo plastiko atramos elementaraus sluoksnio charakteristinės savybės

Parametrai	**Reikšmės**
E1 – tamprumo modulis pluošto kryptimi	44,0 GPa
E2 – tamprumo modulis statmena pluoštui kryptimi	12,0 GPa
G12 – šlyties modulis	4,80 GPa
μ_{12} – Pausono koeficientas	0,24
F_{1t} – išilginis tempimo stipris	1,3 GPa
F_{1c} – išilginis gniuždymo stipris	680 MPa
F_{2t} – skersinis tempimo stipris	47 MPa
F_{2c} – skersinis gniuždymo stipris	130 MPa
F_{12} – šlyties stipris plokštumoje	44 MPa

Atramų tipinė geometrijos ir apkrovimo schema pateikta 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Atramų geometrija ir apkrovimo schema

Atramos kritinė apkrova buvo nustatoma pagal Tsai – Wu (1971) nepakankamumo kriterijų naudojantis ANSYS programa.

Tipiškas GFRP atramos analizės įvesties kodas, naudojant ANSYS programą yra pateiktas A priede. Šis įvesties kodas gali būti lengvai pakeistas dirbant su skirtingų konfigūracijų GFRP atramomis.

4.3. Žiedinio stiklo pluošto įtaka įtempių – deformacijų būviui

Šiame tyrime buvo nagrinėjamos 3 atramų grupės. Kiekviena grupė išsiskyrė geometrija ir stiklo pluošto išsidėstymu.

Trijų atramos grupių geometrinių savybių ir pluošto išdėstymas pateiktas 4.5 lentelėje.

Visų atramų sienutės buvo modeliuojamos 10 – ies vienodo storio sluoksniais.

Kiekvienoje atramų grupėje žiedinių, 90^o laipsnių kampu atžvilgiu atramos sudaromosios, orientuotų sluoksnių ir bendras sluoksnių skaičiaus santykis svyravo nuo 0/10 iki 8/10. Išilginiai pluoštai buvo orientuojami + / - 5 kampu, atramos vertikalios ašies (sudaromosios) atžvilgiu.

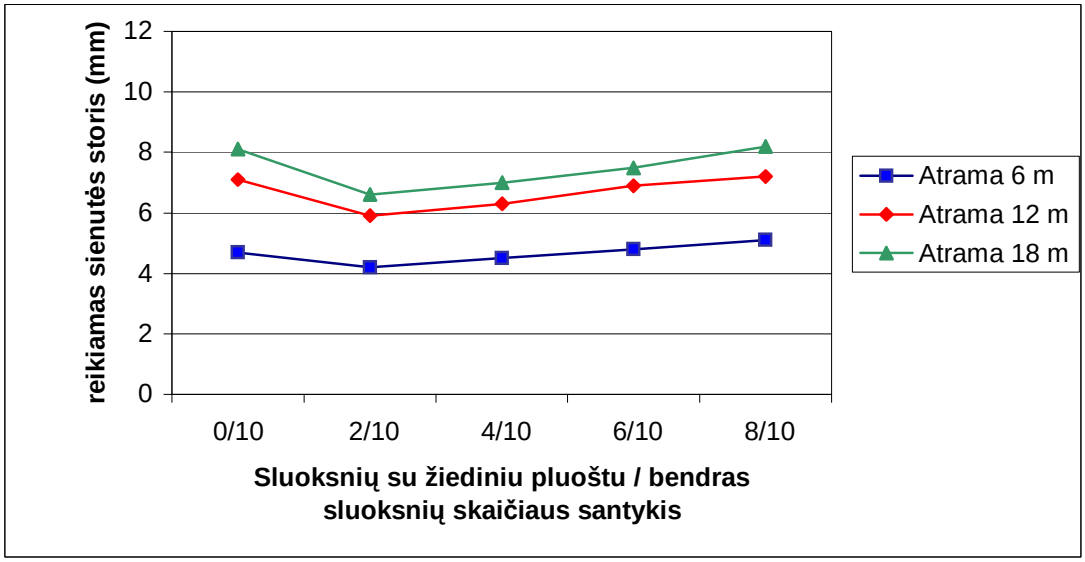
4.5 lentelė. Atramų geometrinės savybės ir pluošto išdėstymo rodikliai

Atramų grupė	Ilgis (mm)	Apačios diametras (mm)	Viršaus diametras (mm)	Išilginių sluoksnių skaičius	Žiedinių sluoksnių skaičius	Sluoksnių santykis	Išilginio pluošto kampas
1	6000	330	200	10	0	0/10	+ / - 5
				8	2	2/10	
				6	4	4/10	
				4	6	6/10	
				2	8	8/10	
2	12000	400	240	10	0	0/10	+ / - 5
				8	2	2/10	
				6	4	4/10	
				4	6	6/10	
				2	8	8/10	
3	18000	550	330	10	0	0/10	+ / - 5
				8	2	2/10	
				6	4	4/10	
				4	6	6/10	
				2	8	8/10	

GFRP buvo analizuojamos naudojant baigtinių elementų analizę su ANSYS programa.

Kiekvienos atramos, reikiamas sienutės storis buvo skaičiuojamas atramą apkraunant 20 kN horizontalia jėga (atramų 1 klasė), kurios pridėties taškas – 600 mm žemiau stiebo viršaus. Nepakankamumas buvo apibrėžtas taikant Tsai - Wu kriterijų, kuris buvo aprašytas ankstesniame 3.5 poskyryje.

Elektros linijų atramų, trijų skirtingų aukščių reikiamas sienutės storis pagal Tsai Wu kriterijų (1 ai atramų klasei) pateiktas 4.4 pav.



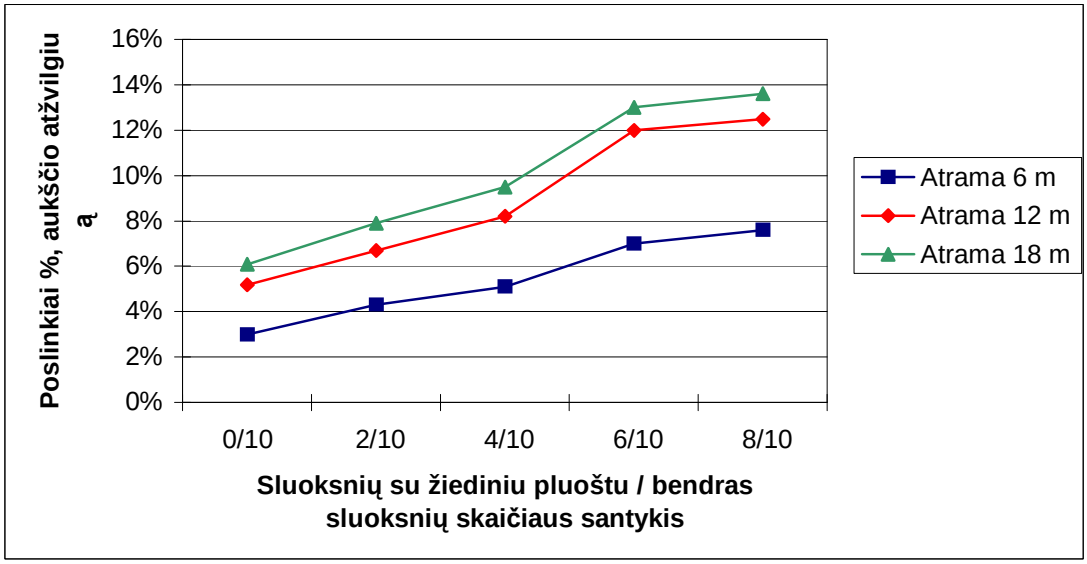
4.4 pav. Atramų sienelės storio ir sluoksnių išsidėstymo priklausomybė

Šiame 4.4 paveiksle rezultatai rodo, kad mažiausias GFRP atramos reikiamas sienutės storis gali būti komponuojamas, kuomet sluoksnių santykis 2/10.

Norint pasiekti tą patį stiprumą, bet be skersinio pluošto išdėstymo, stiklo pluošto atramos sienutės storis turi būti 15% ir 20% didesnis, nei atramos su atitinkamų sluoksnių, 2/10 santykiu, išdėstymu. Galime pastebėti, kad tuomet reikalinga papildoma masė, kuri tuo pačiu didina gamybos sąnaudas.

Atramos minimali masė buvo pasiekta, kada sluoksnių išsidėstymo santykis 2/10. Projektavimo požiūriu – tai būtų optimalus projektavimas. Taigi, žiedinio, 90 laipsnių kampu atžvilgiu atramos sudaromosios, išdėstyto pluošto poveikio efektas – mažesnis sienutės storis ir atramos masė.

Atramų viršūnių poslinkiai (procentiškai, viso aukščio atžvilgiu), nuo 10 kN apkrovos ir priklausomai nuo sluoksnių išsidėstymo, parodyti 4.5 paveiksle.



4.5 pav. Atramos santykinių poslinkių priklausomybė nuo žiedinio pluošto sluoksnių skaičiaus

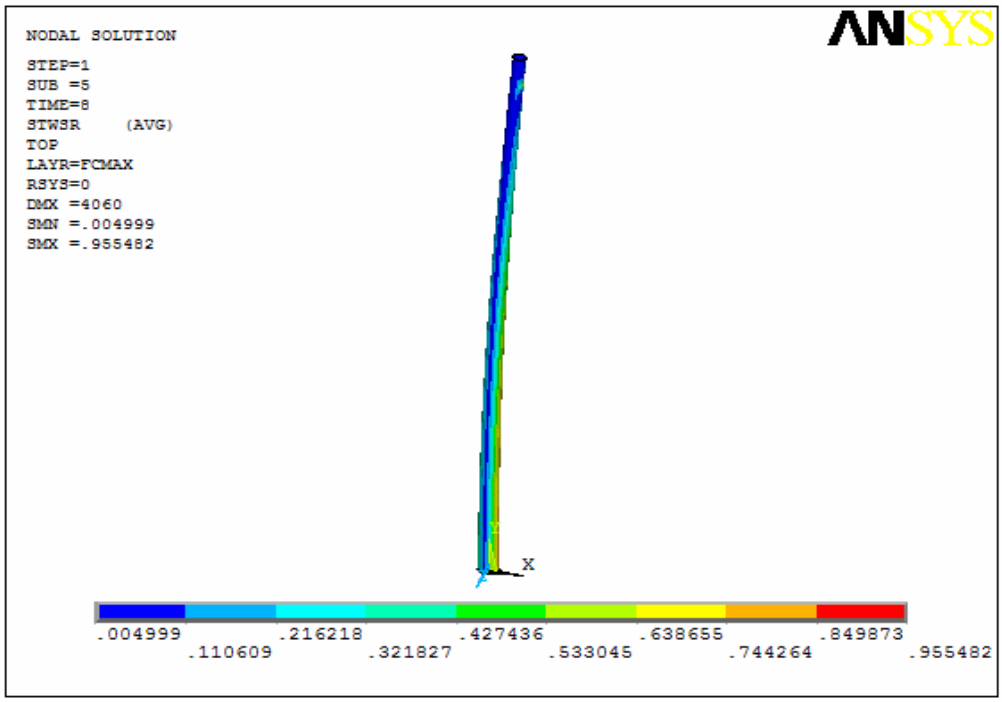
Stiklo pluošto atramos standumas tiesiogiai priklauso nuo skersinio pluošto sluoksnių skaičiaus. Minimalūs atramų poslinkiai buvo pasiekti, kai visi sluoksniai yra orientuojami išilgine kryptimi.

Didesnis skersinių sluoksnių skaičius sumažina atramos standumą ir atitinkamai padidina horizontalųjį poslinkį. Pavyzdžiui, su santykiu 6/10, horizontalus poslinkis buvo daugiau nei du kartus didesnis, nei poslinkis su 0/10 atitinkamų sluoksnių santykiu, nors atramų sienučių storis vienodas.

Stiklo pluošto atramų nepakankamumas dažniausiai buvo pastebėtas atramos suspaudimo pusėje ir ties apkrovos pridėjimo vieta.

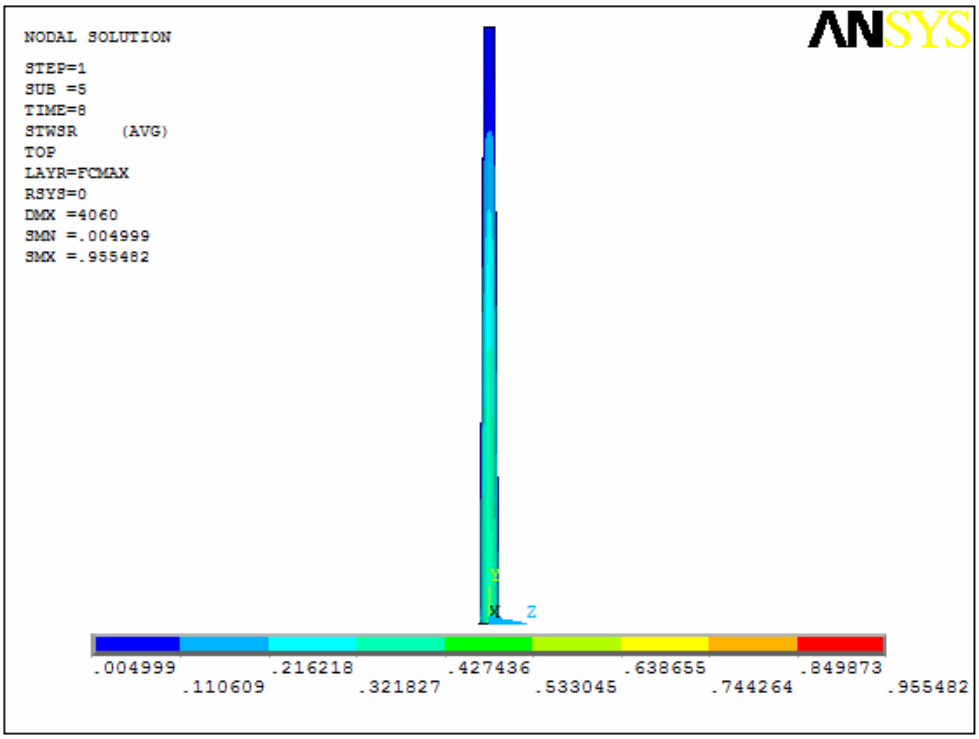
Medžiagos nepakankamumas suspaudimo pusėje pasireikšdavo, kada stiklo plastiko atrama buvo modeliuojama be skersinio pluošto.

Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymą 12 m aukščio atramoje, be skersinio pluošto žiūrėti į 4.6 pav.



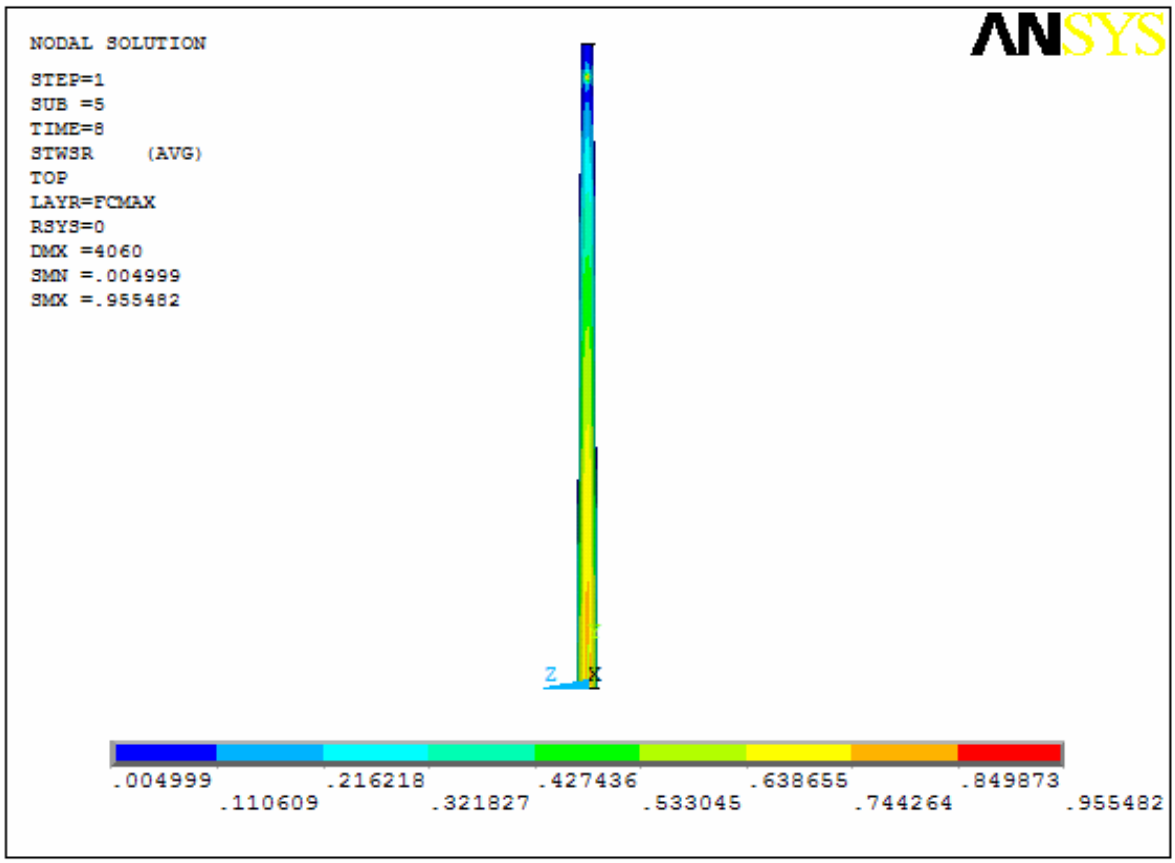
4.6 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje be skersinio pluošto

Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymą 12 m aukščio atramoje, be skersinio pluošto, tempiamoje pusėje žiūrėti 4.7 pav.



4.7 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, be skersinio pluošto, tempiamoje pusėje

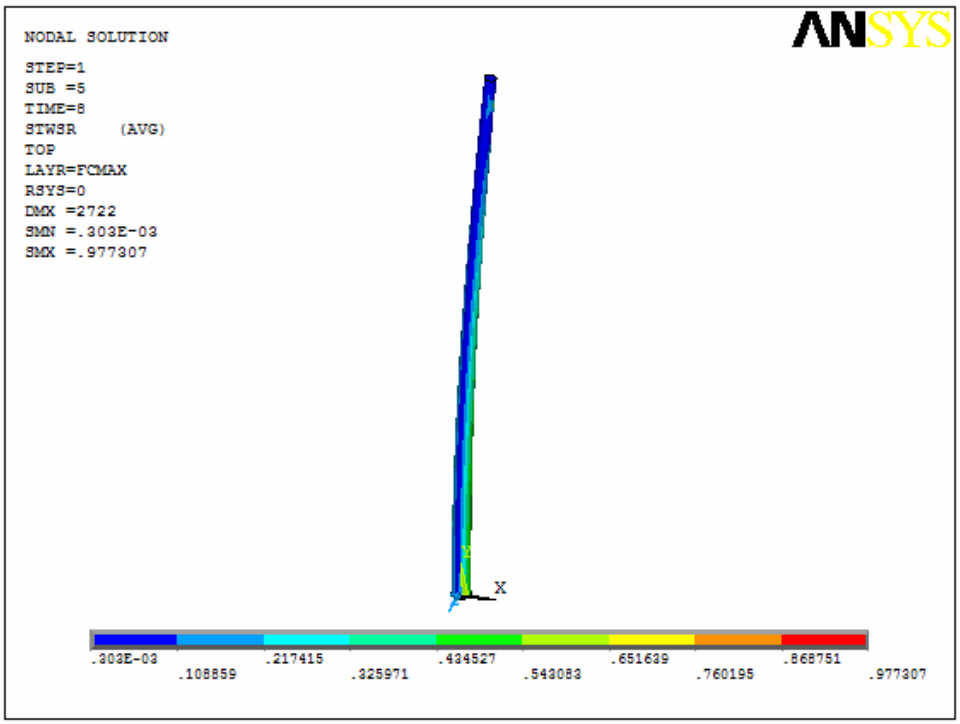
Medžiagos nepakankamumas suspaudimo pusėje pasireiškė, kada stiklo plastiko atrama buvo modeliuojama be skersinio pluošto. Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymą 12 m aukščio atramoje, be skersinio pluošto, suspaudimo pusėje žiūrėti 4.8 pav



4.8 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, be skersinio pluošto, gniuždomoje pusėje

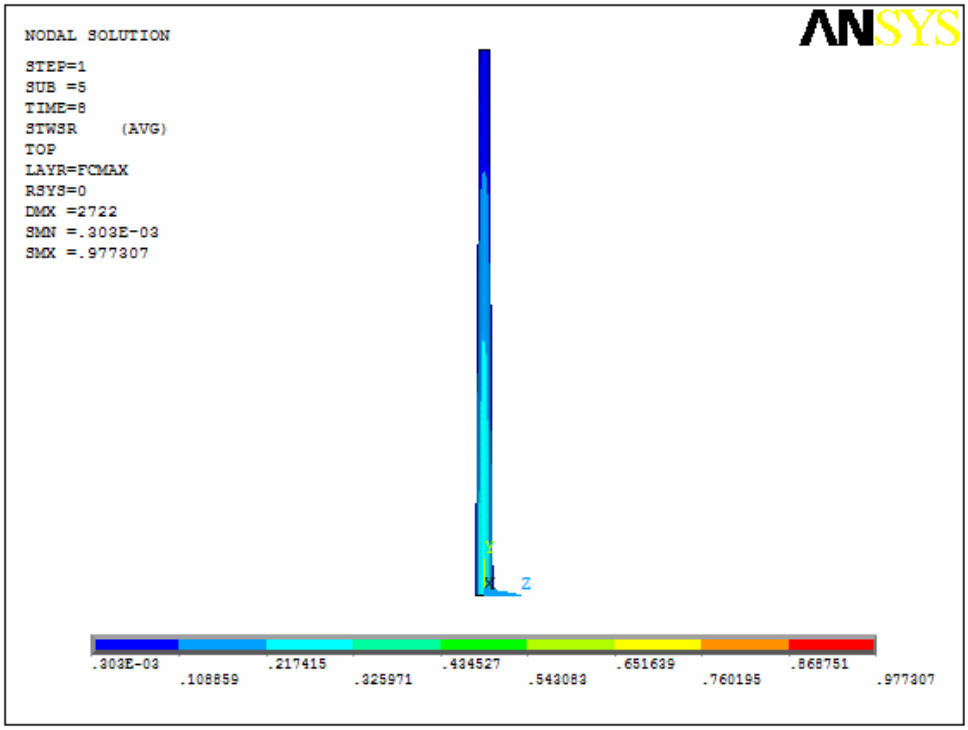
Vietinis klupimas ties apkrovos pridėjimo vieta buvo pastebėtas kada buvo komponuojami ir skersiniai pluoštai santykiu 2/10 (žiedinių sluoksnių / bendras sluoksnių skaičius).

Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymą 12 m aukščio atramoje, su skersiniu pluoštu, žiūrėti 4.9 pav. (atrama apkrauta 20 kN skersine jėga).



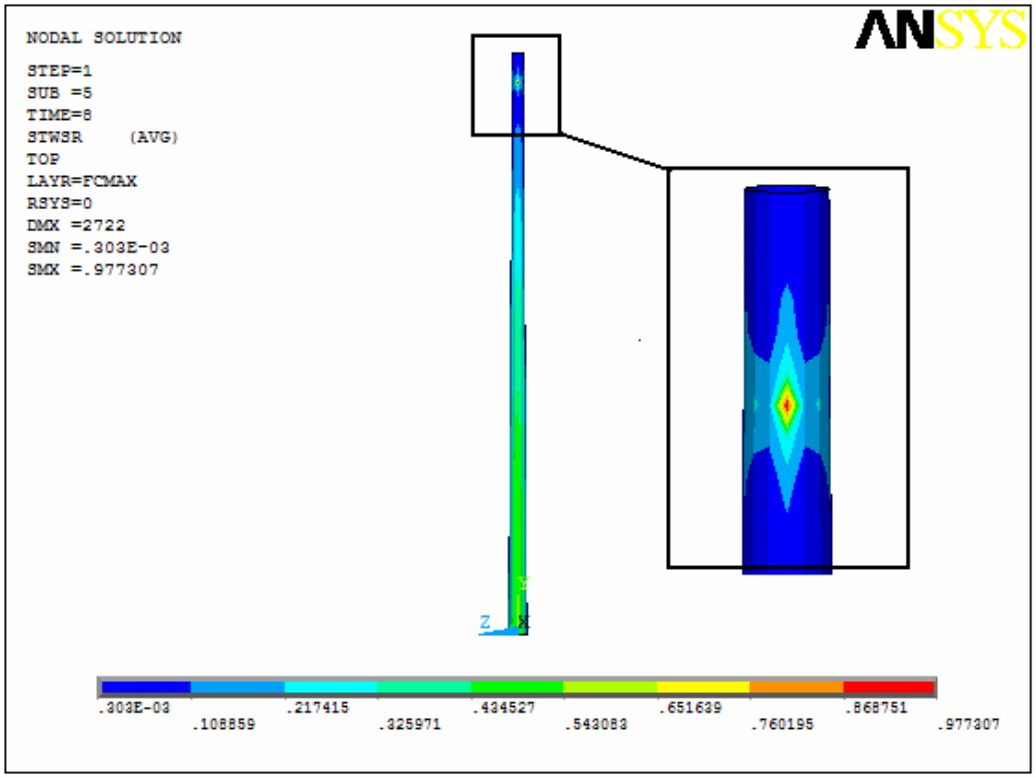
4.9 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, su skersiniu pluoštu

Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymą 12 m aukščio atramoje, su skersiniu pluoštu, tempiamoje pusėje žiūrėti 4.10 pav.



4.10 pav. Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, su skersiniu pluoštu, tempiamoje atramos pusėje

4.11 paveiksle galima pamatyti Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymą 12 m aukščio atramoje, su skersiniu pluoštu, gniuždomoje atramos pusėje, čia nepakankamumas pasireiškia ties apkrovos pridėjimo vieta.

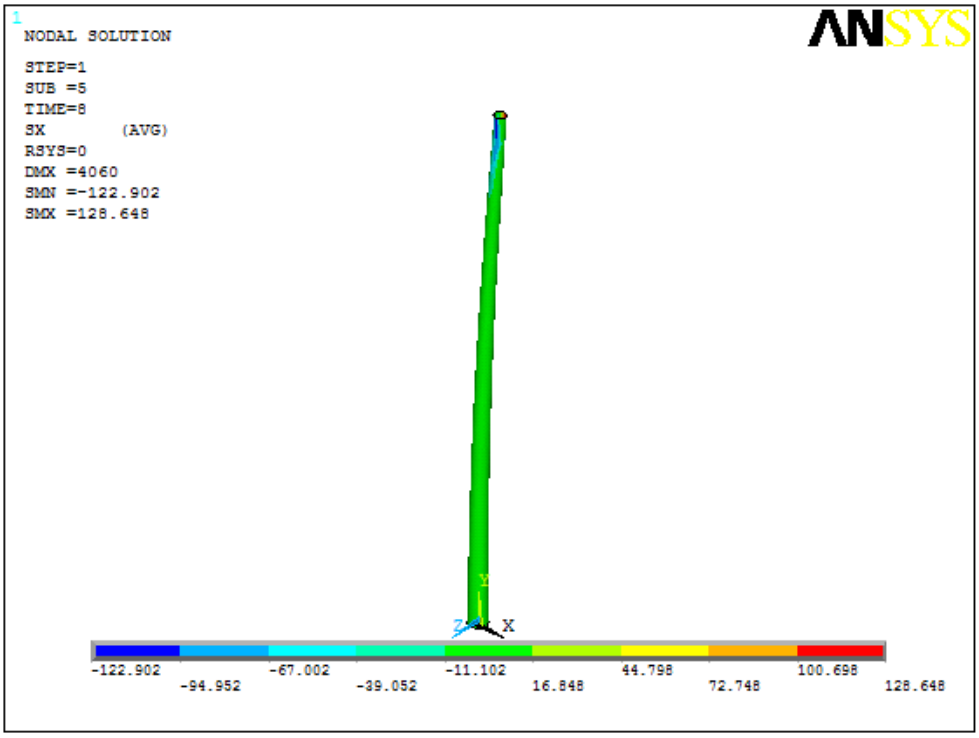


4.11 pav. Tsai –Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, su skersiniu pluoštu, gniuždomoje atramos pusėje

Medžiagos nepakankamumas suspaudimo pusėje nebuvo dominuojantis tais atvejais, kada buvo į atramos sienutės sluoksnius įtraukti žiediniai pluoštai, nes žiedinis pluoštas atsparesnis skersiniams ir šlyties įtempiams. Tačiau tempiamoje atramos pusėje nepakankamumas labiau dominuojantis nei atramose be skersinio pluošto.

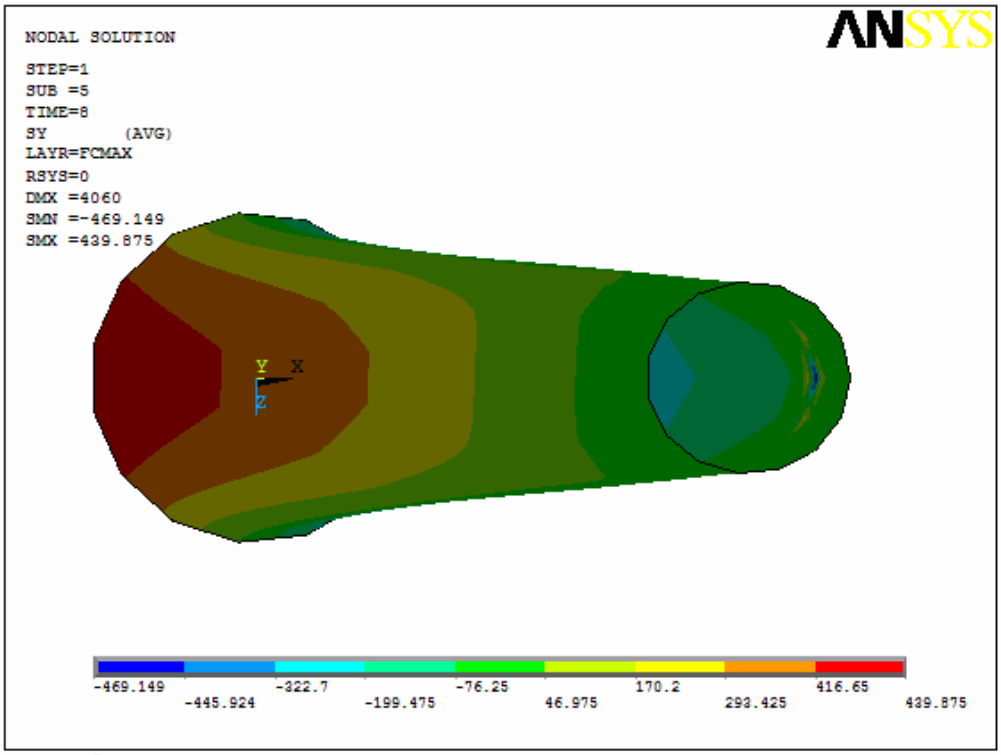
Įtempių pasiskirstymas X, Y kryptimis ir šlyties įtempiai 12 m atramoje be skersinio pluošto, atitinkamai pavaizduoti 4.12, 4.13, 4.14 pav.

Didžiausi gniuždomieji įtempiai X kryptimi yra – 122 MPa, kaip parodyta 4.12 paveiksle.

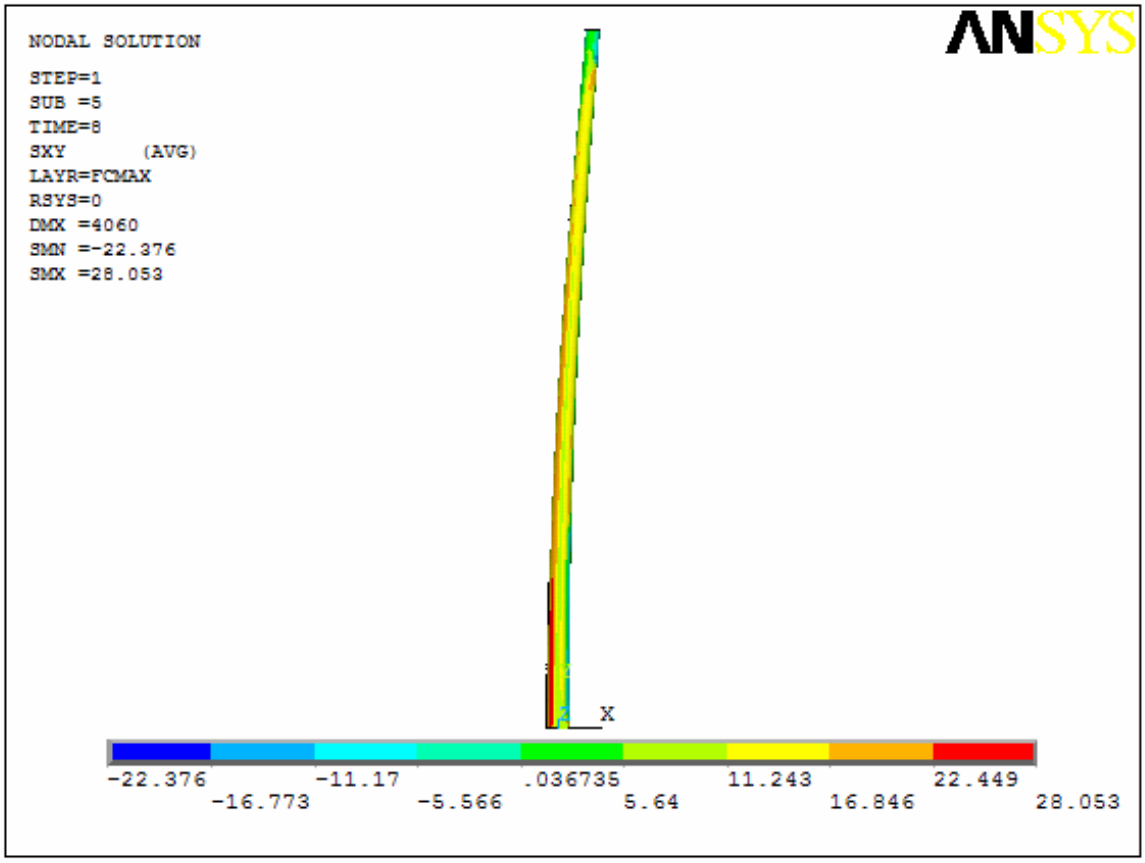


4.12 pav. Įtempių X kryptimi pasiskirstymas 1 klasės 12 m atramoje, be skersinio pluošto

Kai įtempiai Y kryptimi lygūs 469,1 MPa, o šlyties įtempiai lygūs 22,4 MPa, nepakankamumas pagal Tsai – Wu kriterijų įvyksta šioje vietoje (žiūr. 4.13 ir 4.14 pav.).



4.13 pav. Įtempių Y kryptimi pasiskirstymas 1 klasės 12 m atramoje, be skersinio pluošto



4.14 pav. Šlyties XY įtempių pasiskirstymas 1 klasės 12 m atramoje, be skersinio pluošto

Žiedinio pluošto įtaką konstrukcijai galima aprašyti taip:

Kai nėra žiedinių pluoštų, priešinamasi žiediniams ir šlyties įtempiams tik išilgai pluošto. Dėl išilginio pluošto mažos šlyties ir skersinių įtempių, medžiagos nepakankamumas atsiranda gniuždomoje atramos pusėje prie žemės paviršiaus.

4.4. Išilginio pluošto įtaka elektros linijos atramos konstrukcijai

Tiriamos 3 atramų grupės. Kiekvieną grupę sudarė skirtingos geometrijos atramos su įvairiu stiklo pluošto išsidėstymu.

Pirmos grupės atramų aukštis buvo 6 m, antros grupės 12 m, ir 18 m trečios grupės. Atramų apatinis diametras buvo 330 mm – pirmosios grupės, 400 mm – antrosios grupės, ir 500 mm – trečiosios grupės. Viršutinis atramos skresmuo atitinkamai buvo 200 mm, 240 mm, 300 mm.

Visų atramų sienelę sudarė 10 vienodo storio sluoksniai, kurių vidinį ir išorinį sluoksnį sudarė pluoštas, išdėstytas skersine linkme atžvilgiu atramos sudaromosios. Kiti aštuoni sluoksniai buvo orientuojami įvairias kampais – nuo + / -5 iki + / - 45 laipsnių.

Sluoksnių santykis 2/10 (žiedinių pluoštų sluoksniai / bendras sluoksnių skaičius) buvo parinktas neatsitiktinai, o dėl optimalių rodiklių, gautų 4.3 skyriaus tyrimo atžvilgiu.

Tirtų atramų gemetrijos ir pluošto išdėstymo variacija pateikta 4.6 lentelėje.

4.6 lentelė. Tiriamų atramų geometrijos ir stiklo pluošto išdėstymo parametrai

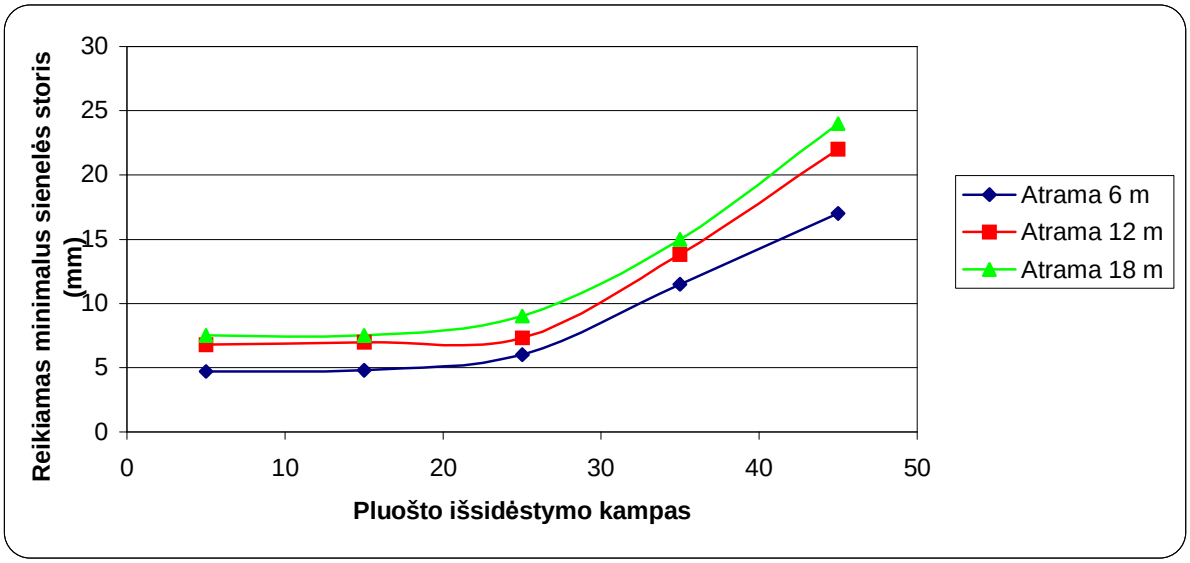
Atramų grupė	Ilgis (mm)	Apačios diametras (mm)	Viršaus diametras (mm)	Pluošto vyjimo kampas	Išilginių sluoksnių skaičius	Žiedinių sluoksnių skaičius
1	6000	330	200	+ / - 5	8	2
				+ / - 15		
				+ / - 25		
				+ / - 35		
				+ / -45		
2	12000	400	240	+ / - 5	8	2
				+ / - 15		
				+ / - 25		
				+ / - 35		
				+ / -45		
3	18000	550	330	+ / - 5	8	2
				+ / - 15		
				+ / - 25		
				+ / - 35		
				+ / -45		

Kiekvienos atramos sluoksnis buvo parenkamas toks, kad konstrukcija galėtų atlaikyti 20 kN apkrovą (1 atramų klasė). Apkrovos pridėjimo taškas – 600 mm žemiau atramos viršūnės. Buvo analizuojamos kelios konstrukcijos, kol buvo pasiektas tinkamas sienutės storis. Esant 20 kN apkrovai buvo nustatytas Tsai – Wu nepakankamumo kriterijus.

4.15 paveiksle pateikta reikiamas sienutės storis 1 – ai atramų klasei, priklausomai nuo atramos aukščio ir pluošto išsidėstymo. Rezultatai parodo, kad mažiausias reikiamas GFRP atramos sienelės storis pasiekiamas tada, kai išilginio pluošto kampas yra 5 laipsniai atžvilgiu atramos ašies sudaromosios.

Reikiamas sienutės storis, kai išilginis pluošto kampas buvo 5 ir 15 laipsnių buvo panašus. Sienutės storis, esant 15 laipsnių išilginio pluošto, buvo tik 5-9 % didesnis nei minimalus sienutės svoris, esant 5 laipsnių pluošto išsidėstymui.

Sienutės storis žymiai padidėjo, kai išilginio pluošto kampas buvo daugiau kaip 15 laipsnių.

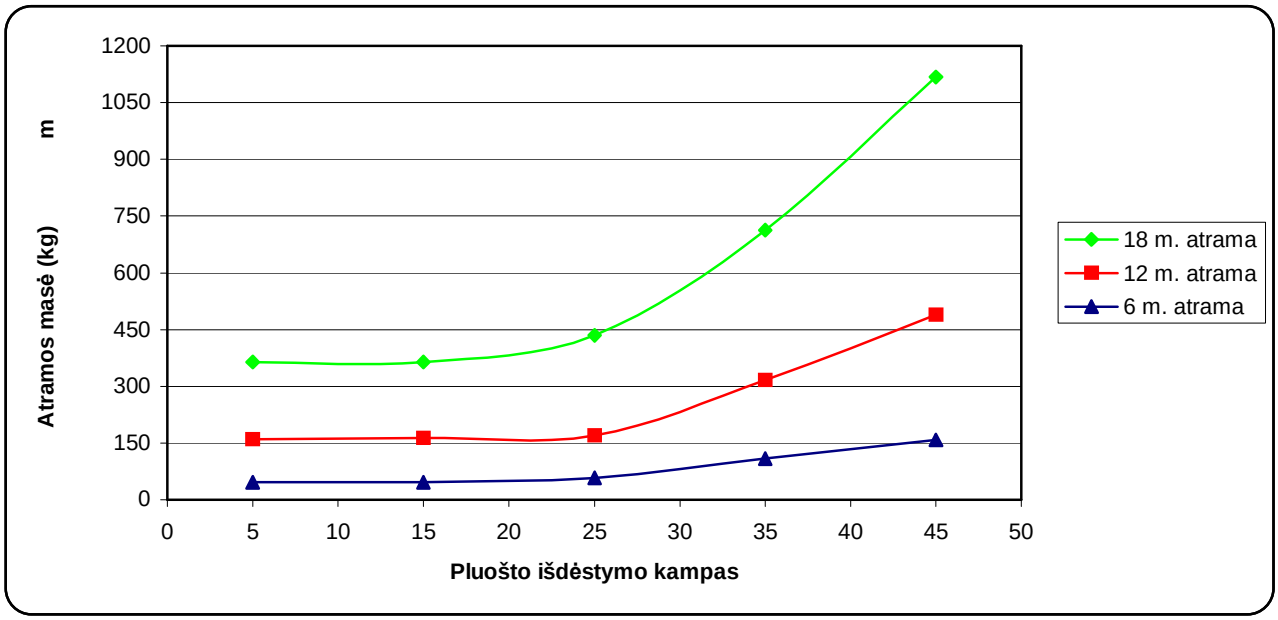


4.15 pav. Pluošto išdėstymo kampo ir sienutės storio priklausomybė

Stiklo pluošto atramos masė tiesiogiai proporcinga projektuojamajam sienutės storiui. Taigi, atrama, kuri būtų pagaminta su 5 laipsnių kampu orientuotu pluoštu, atžvilgiu atramos sudaromosios, projektuojant būtų laikoma optimalia.

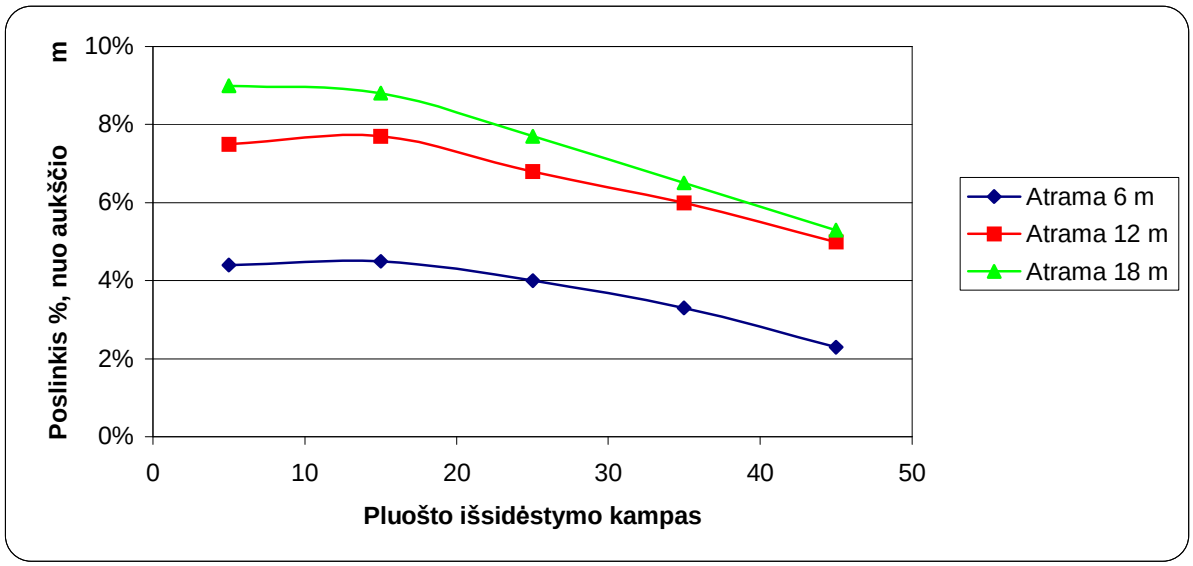
Kiekvienos stiklo plastiko atramos, trijų grupių, svoris parodytas 4.16 paveiksle.

Ir apskritai, išilginių pluoštų orientuotavimas intervale 5 – 15 laipsnių kampu, gali būti laikomas optimaliu. Toks stiklo pluošto orientavimas sumažina gamybos sąnaudas, taip pat transportavimo išlaidas, kartu viso projekto kaštus.



4.16 pav. Pluošto išdėstymo kampo ir atramos masės priklausomybė

Stiklo plastiko atramų horizontalūs viršūnės poslinkiai nuo 10 kN apkrovos, priklausomai nuo pluošto išdėstymo kampo, pateikti 4.17 pav.



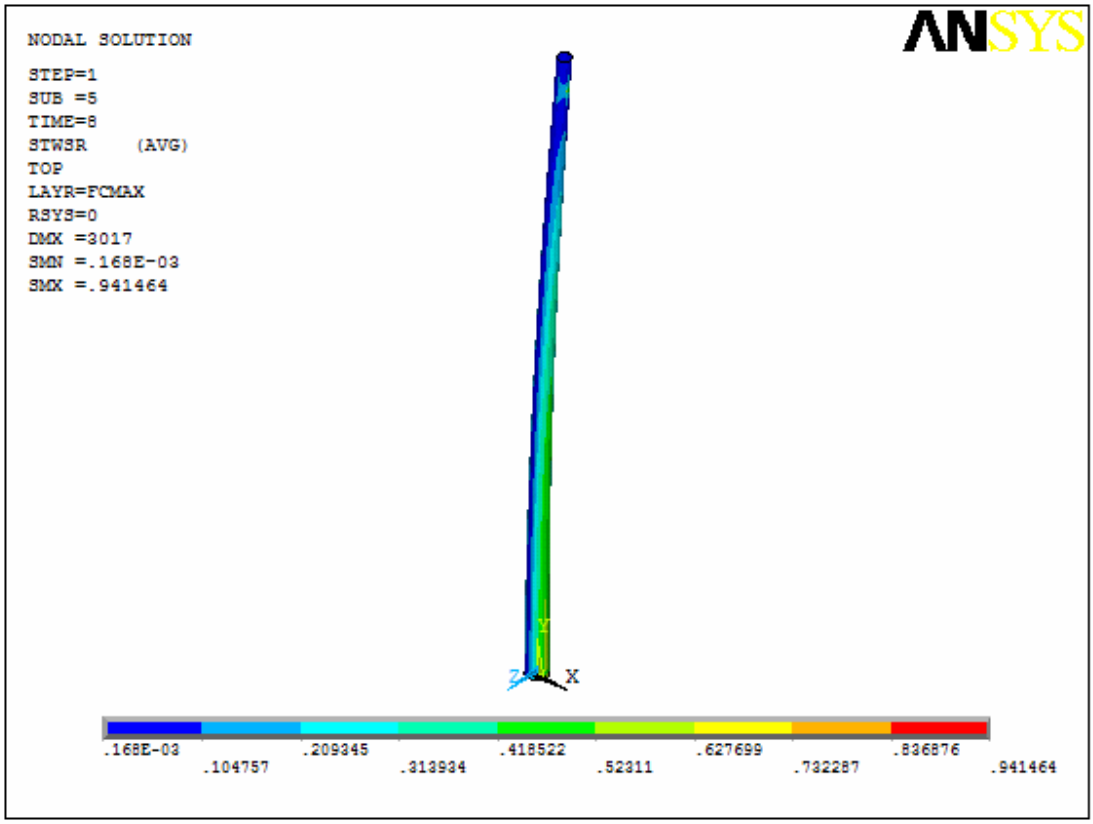
4.17 pav. Atramų viršūnės poslinkių priklausomybė nuo pluošto išdėstymo kampo

Stiklo plastiko atramų standumas ypatingai nepakito, kai išilginio pluošto kampas buvo nuo 5 iki 25 laipsnių. Standumo didelis pokytis atsirado, kai stiklo pluošto išdėstymo kampas padidėjo daugiau nei 25 laipsnių. Šį akivaizdų standumo pasikeitimą galima pagrįsti dėl didelio sienutės storio pokyčio (žiūr. į 4.15 pav.).

Horizontalus mažiausias įlinkis buvo pasiektas, kai stiklo pluošto kampas buvo 45 laipsniai. Vidutiniškai, ištirtų trijų grupių atramų, horizontalus viršūnės poslinkis, su išsidėsčiusiu 5^o kampu stiklo pluoštu, buvo maždaug 40 – 60 % didesnis, nei atramų su 45^o pluoštu.

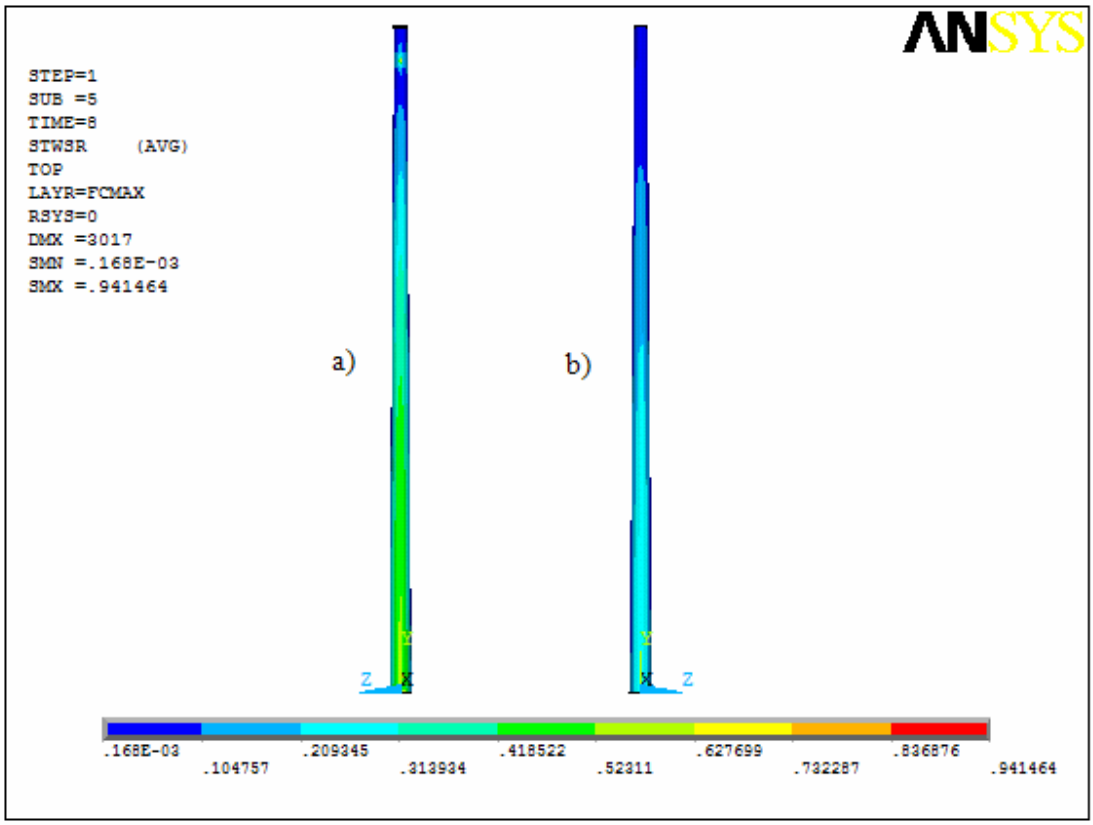
Medžiagos nepakankamumas suspaudimo pusėje buvo pastebėtas, kai pluošto kampas buvo tarp 15 ir 25.

4.18 paveikslas rodo Tsai – Wu gedimo kriterijaus verčių pasiskirstymą, kai atramos aukštis 12 m, o išilginio pluošto kampas lygus 15^o.



4.18 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 12 atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 15.

4.19 paveiksle galima pamatyti Tsai – Wu gedimo kriterijaus verčių pasiskirstymą gniuždomoje ir tempiamoje pusėje, kai atramos aukštis 12 m, o išilginio pluošto kampas lygus 15^o.

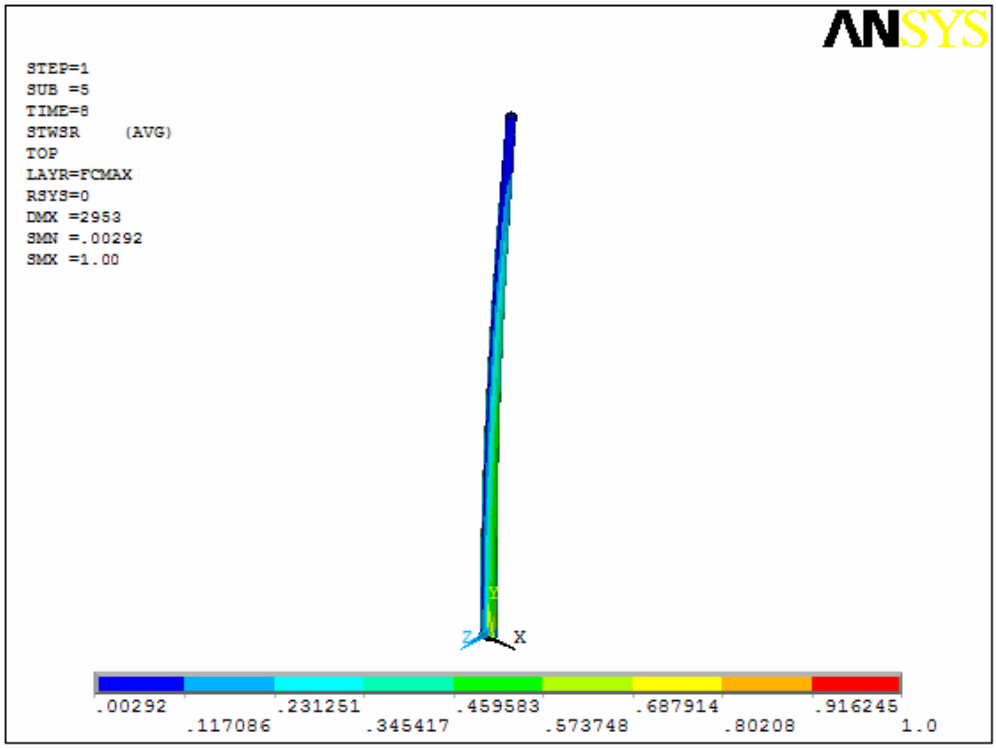


a) gniuždomoje atramos puseje, b) tempiamoje atramos pusėje

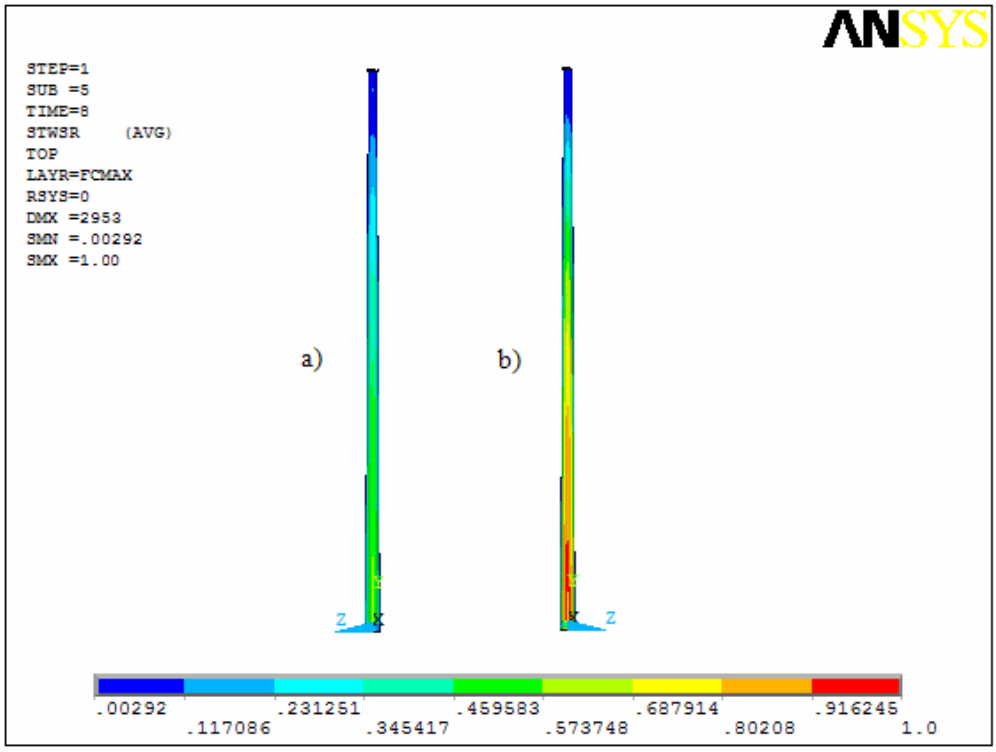
4.19 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 15 laipsnių

Visų stiklo pluošto atramų, kurių stiklo pluošto išdėstymo kampas buvo nuo 35 iki 45, nepakankamumas pasireiškė atramos tempiamoje pusėje. Stiklo pluoštas išdėstytas 35 ir 45 laipsnių kampu neįvykdo tempimo sąlygų atramos apatinėje dalyje (prie žemės paviršiaus).

Tsai – Wu nepakankamumo verčių pasiskirstymas 18 m aukščio atramoje, kai pluošto išsidėstymo kampas 45^o , parodytas 4.20 ir 4.21 pav.



4.20 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 45 laipsniai.



4.21 pav. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus verčių pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto pasiskirstymo kampas 45 laipsniai: a) gniuždomoje atramos pusėje, b) tempiamoje atramos pusėje

Išilginio pluošto įtaka konstrukcijai:

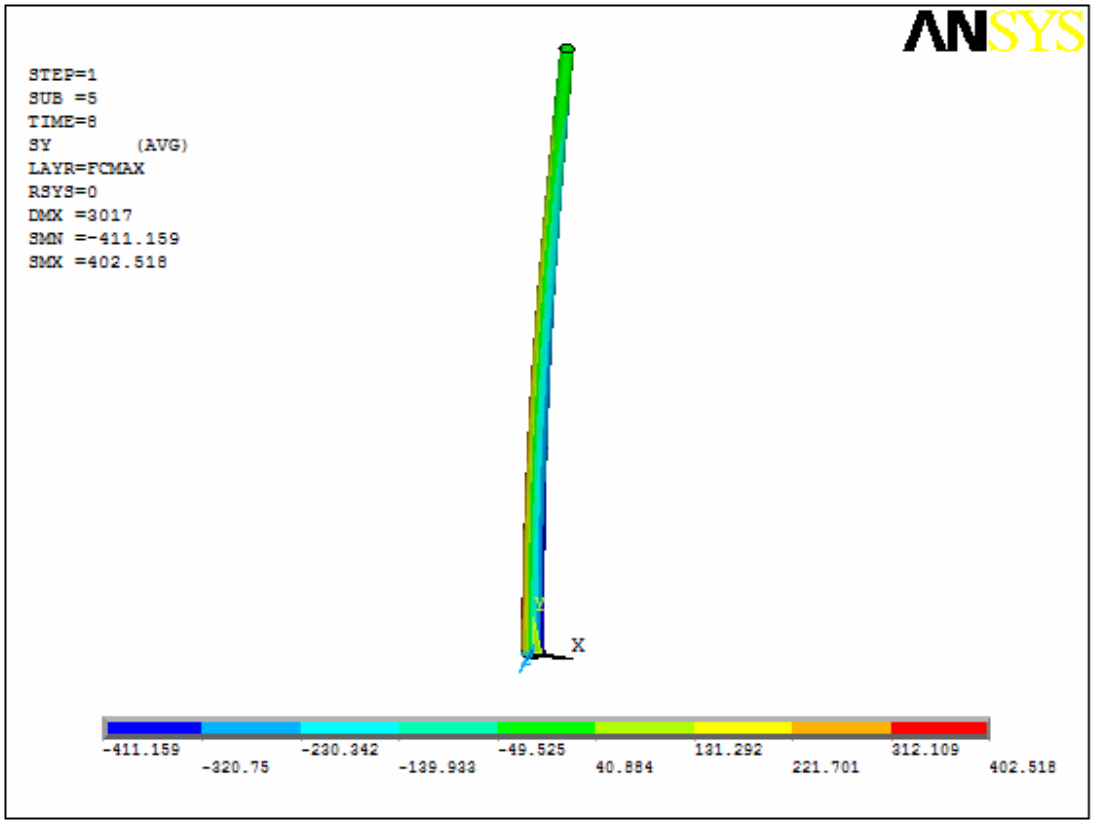
1. Mažiausias atramos sienelės storis gali būti projektuojamas, kai išilginio pluošto kampas 5 laipsniai.

2. Visų tirtų atramų su 5 laipsnių išdėstytu pluoštu nepakankamumas pasireiškia ties atramos apačia, prie žemės paviršiaus.

3. Kai išilginio pluošto kampas buvo tarp 15 ir 25, medžiagos nepakankamumas pagal Tsai – Wu kriterijų pasireiškė atramos suspaudimo pusėje, prie žemės paviršiaus.

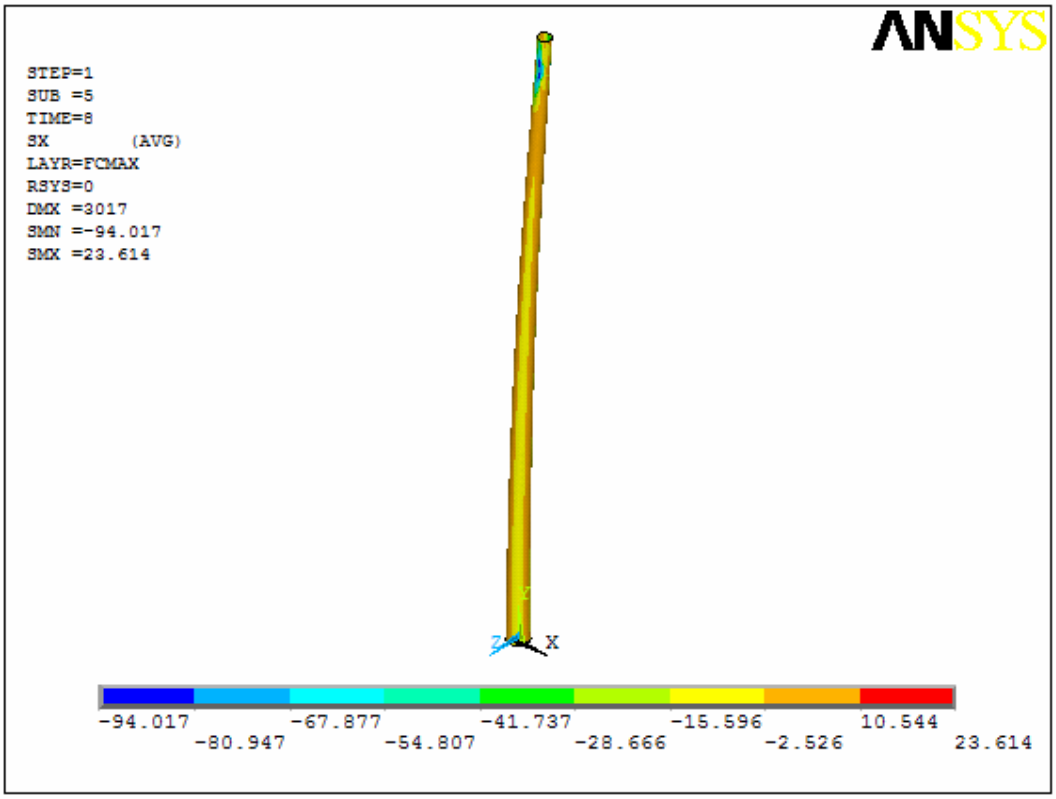
4. Visų stiklo pluošto atramų, kurių stiklo pluošto išdėstymo kampas buvo nuo 35^o iki 45^o, nepakankamumas pasireiškė atramos tempiamoje pusėje.

Įtempių X, Y ir šlyties įtempių pasiskirstymas, 12 m stiklo plastiko atramoje, parodytas 4.22, 4.23, 4.24 pav.

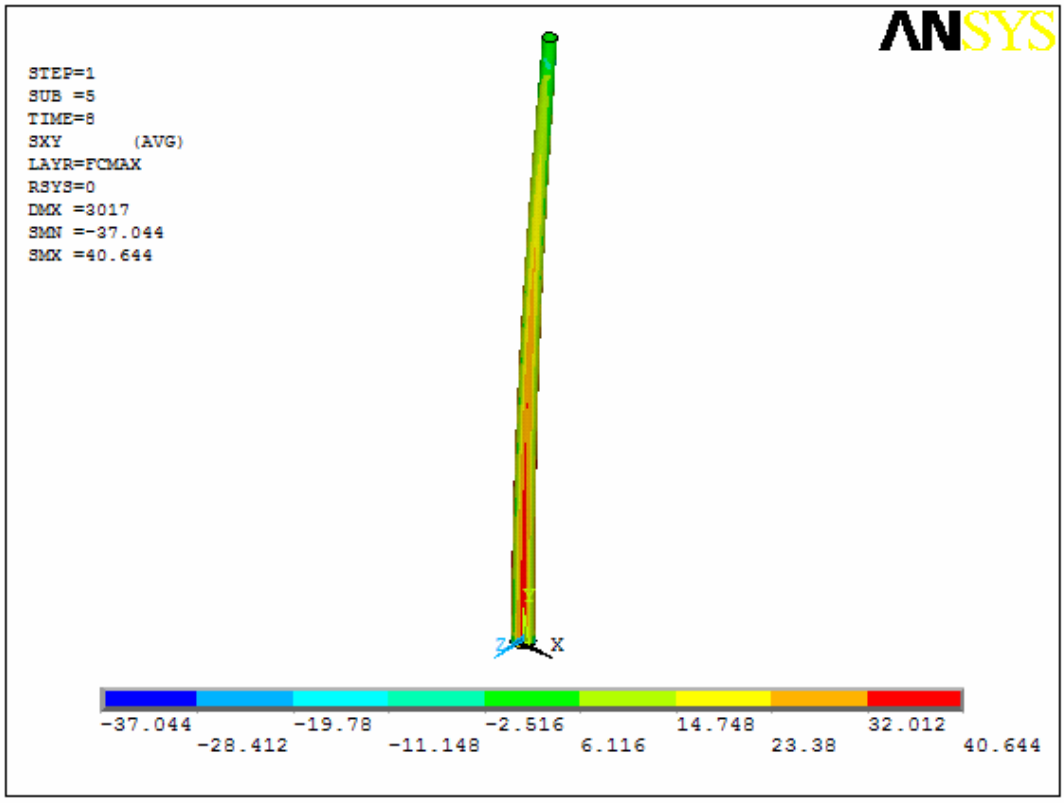


4.22 pav. Įtempių Y kryptimi pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 15 laipsnių

Kaip parodyta 4.22 paveiksle, 12 m aukščio atramoje, kai stiklo pluošto pasiskirstymo kampas 15 laipsnių, medžiagos nepakankamumas vyksta, kai gniuždymo įtempiai pluošto kryptimi yra 411 MPa, o tempimo įtempiai skersai pluoštu 94 MPa ir šlyties įtempiai 37 MPa (žiūr. 4.23 ir 4.24 pav.).



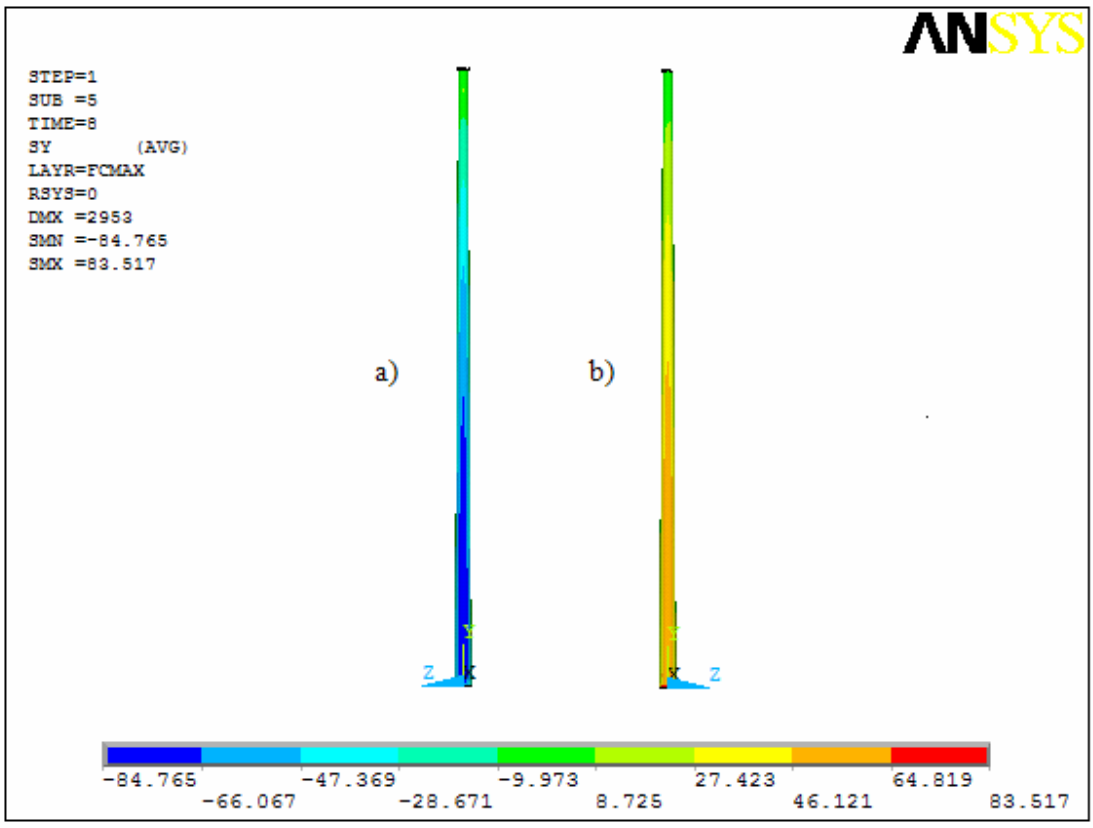
4.23 pav. Įtempių X kryptimi pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 15 laipsnių



4.24 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas 12 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 15 laipsnių

Kai pluošto komponavimo kampas buvo 35^o ar 45^o, išilginiai lenkiamieji įtempiai, atramos tempimo pusėje, lėmė medžiagos nepakankamumą. Todėl nepakankamumas pasireiškė tempiamoje atramos pusėje, šalia žemės paviršiaus.

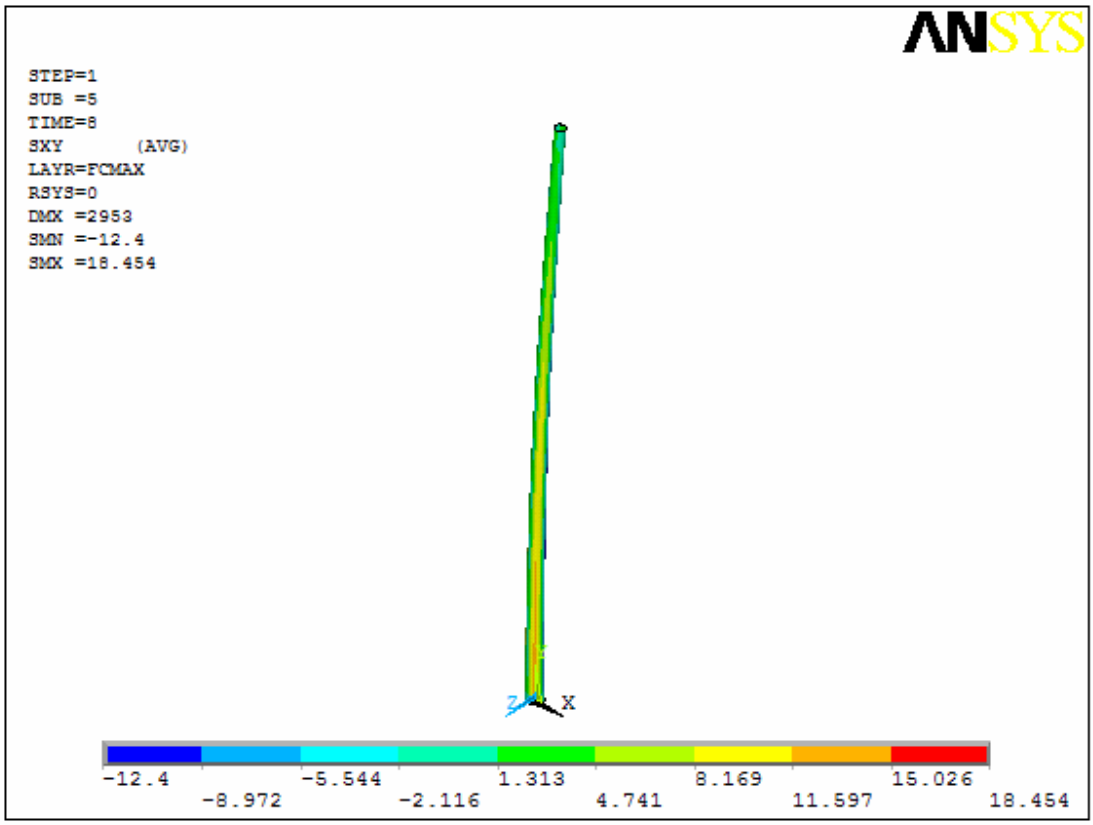
4.25 ir 4.26 pav. rodo įtempių pasiskirstymą 18 m aukščio atramoje, su 45 laipsnių kampu išsidėsčiusiu stiklo pluoštu.



a) gniuždomoje atramos pusėje, b) tempiamoje atramos pusėje

4.25 pav. Įtempių Y kryptimi pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 45 laipsiai.

Didžiausias tempiamasis įtempis skersinio pluošto kryptimi buvo lygus 83,5 MPa, kaip parodyta 4.25 pav., o maksimalūs šlyties įtempiai buvo lygūs 18,5 MPa (žiūr. 4.26 pav.).



4.26 pav. Šlyties įtempių pasiskirstymas 18 m atramoje, kai išilginio pluošto kampas 45 laipsniai

4.5. Skerspjūvio įtaka stiklo plastiko atramos elgsenai

Šiame tyrime analizuojama stiklo pluošto atramų geometrija. Įvairių matmenų kūginės atramos buvo išskirtos į tris grupes.

Kaip ir ankstesniuose tyrimuose, pirmosios atramų grupės aukštis buvo pasirinktas 6 m., atrosios 12 m, o trečiosios stiklo plastiko atramų grupės 18 m. Viršutinių ir apatinių atramos skersmenų santykis buvo išlaikomas 0,6, t.y. viršutinis skersmuo/ apatinis skersmuo = 0,6.

Pirmosios atramų grupės skersmuo buvo nuo 150 iki 450 mm, antrosios grupės svyravo nuo 200 iki 600 mm, o trečiosios nuo 250 iki 800 mm.

Visos atramos buvo projektuojamos 10 vienodo storio sluoksniais. Du išorinius sluoksnius sudarė žiediniai sluoksniai, kiti 8 buvo išilginiai – 5^o laipsnių kampu orientuoti sluoksniai atramos sudaromosios atžvilgiu. Šis sluoksnių santykis ir pluošto išdėstymo kampas buvo pasirinktas remiantis ankstesnių tyrimų atžvilgiu, siekiant sukomponuoti optimalią ir ekonomišką konstrukciją.

Visi pasirinkti tiriamų atramų parametrai pateikti 4.7 lentelėje.

4.7 lentelė. Tiriamų atramų geometriniai ir medžiagų parametrai

Grupės Nr.	Aukštis (mm)	Apačios diametras (mm)	Viršaus diametras (mm)	Apatinio / viršutinio diametro santykis	Atramos klasė	Išilginio pluošto kampas	Žiedinių sluoksnių skaičius	Išilginių sluoksnių skaičius
1	6000	150	90	0.6	H1 1 2 3 4	+ / - 5	2	8
		200	120					
		250	150					
		300	180					
		350	210					
		400	240					
		450	270					
2	12000	200	120	0.6	H1 1 2 3 4	+ / - 5	2	8
		250	150					
		300	180					
		370	220					
		450	270					
		520	310					
		600	360					
3	18000	200	120	0.6	H1 1 2 3 4	+ / - 5	2	8
		300	180					
		400	240					
		500	300					
		600	360					
		700	420					
		800	480					

Atramų analizė atlikta naudojant baigtinių elemtų metodą su ANSYS programa.

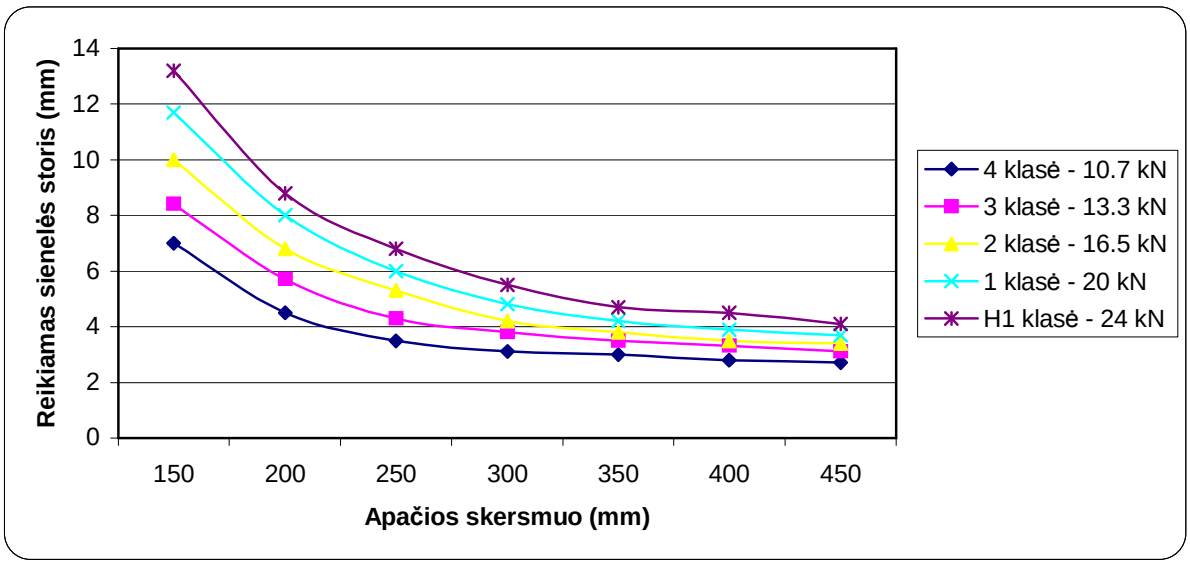
Atramos buvo apkraunamos 600 mm žemiau atramos viršūnės.

Kiekvienos stiklo plastiko atramos storis buvo parinktas toks, kad atrama atitiktų kategoriją., t.y. H1, 1, 2, 3, 4 – ąją (atramų klasės aprašytos 2.4 skyriuje).

Kiekvienos atramų grupės rezultatai aptariami atskirai.

- **1 ATRAMŲ GRUPĖ**

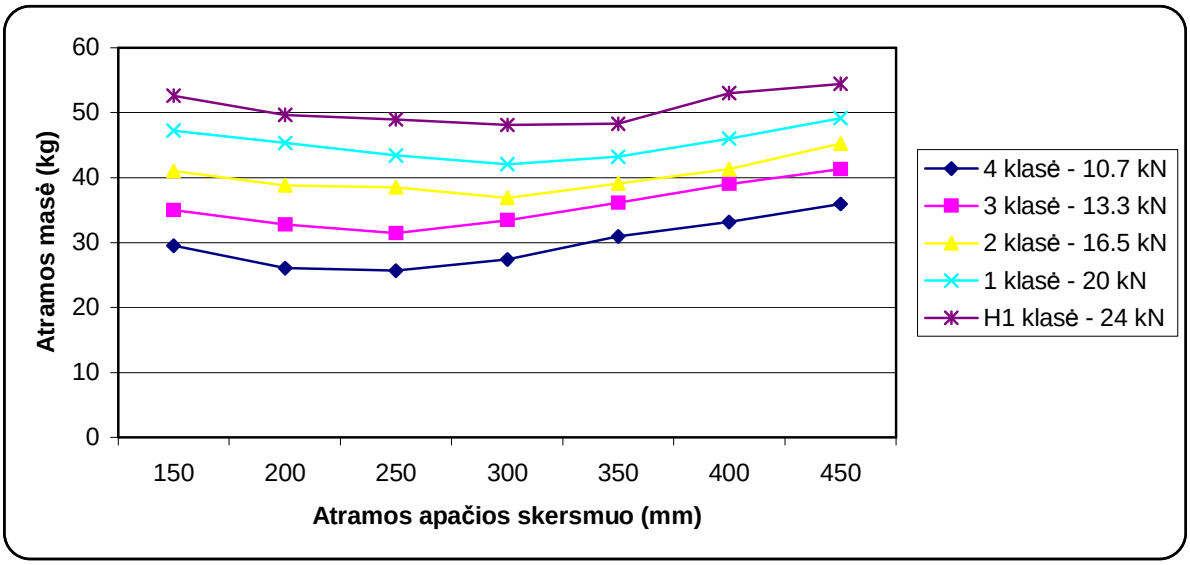
4.27 paveiklse pateikta 6 m aukščio stiklo plastiko atramų sienutės storiai, atitinkantys H1 ir 1 4 klasių atramų reikalavimus.



4.27 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir sienutės storio priklausomybė

Analizės metu buvo nustatyta, kad kuo mažesnis atramos sienutės storis, tuo turėtų būti desnis apatinis atramos skersmuo. Tačiau atramos masė su šiais parametrais yra didesnė, nei tų atramų, kurių sienelės storis didesnis, o apatinis skersmuo mažesnis. Todėl galima pasakyti, kad nuo atramos skersmes priklauso atramos masė, t.y. radus optimalų skersmenį gali akivaizdžiai sumažėti masė.

Pagal 4.27 pav. duomenis buvo apskaičiuota atramų masė. Tirtų atramų apačios skersmens ir masės rodikliai pateikti 4.28 pav.



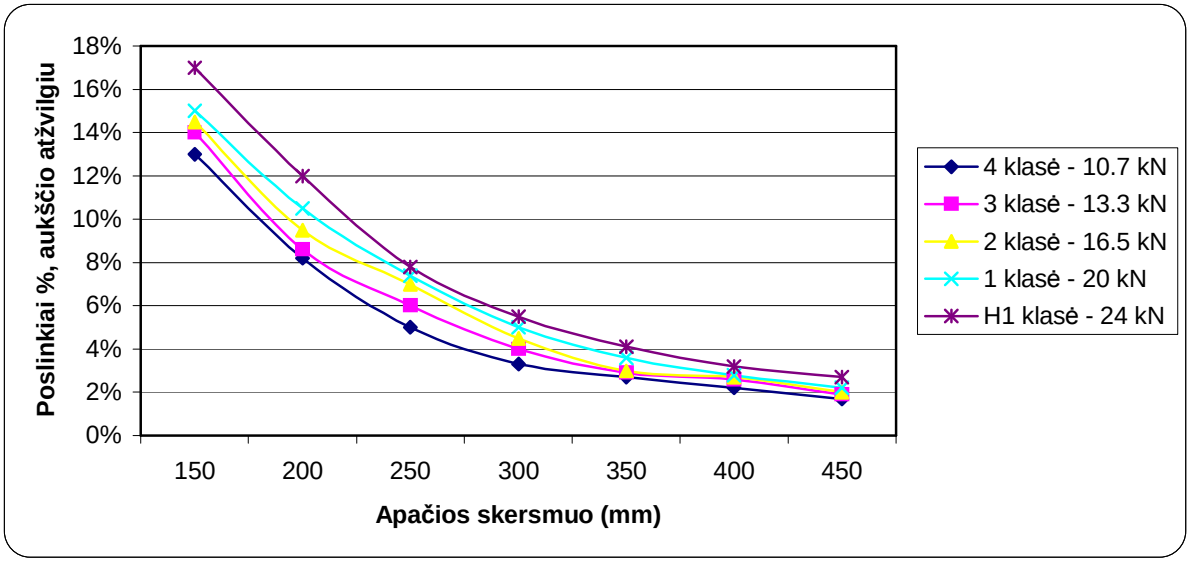
4.28 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir masės priklausomybė

Atramos apačios skersmuo priklauso nuo atramos klasės, t.y. akprovimo dydžio.

Optimalus skersmuo H1 klasės buvo nuo 300 iki 350 mm., 300 mm 1 ir 2 klasių, o 250 mm. 3 ir 4 klasių.

Taip pat pagal gautus tirtų atramų rezultatus buvo nuraižyta atramų skersmenų ir poslinkių priklausomybės diagrama. Šį kartą elektros linijų atramos buvo apkrautos 50 % apkrova priklausomai nuo klasės (1 klasė atrama buvo apkrauta ne 20 kN, o 50 % mažesne 10 kN horizontalia jėga).

Poslinkių dydžiai priklausomai nuo atramos diametro ir klasės pateikti 4.29 pav.



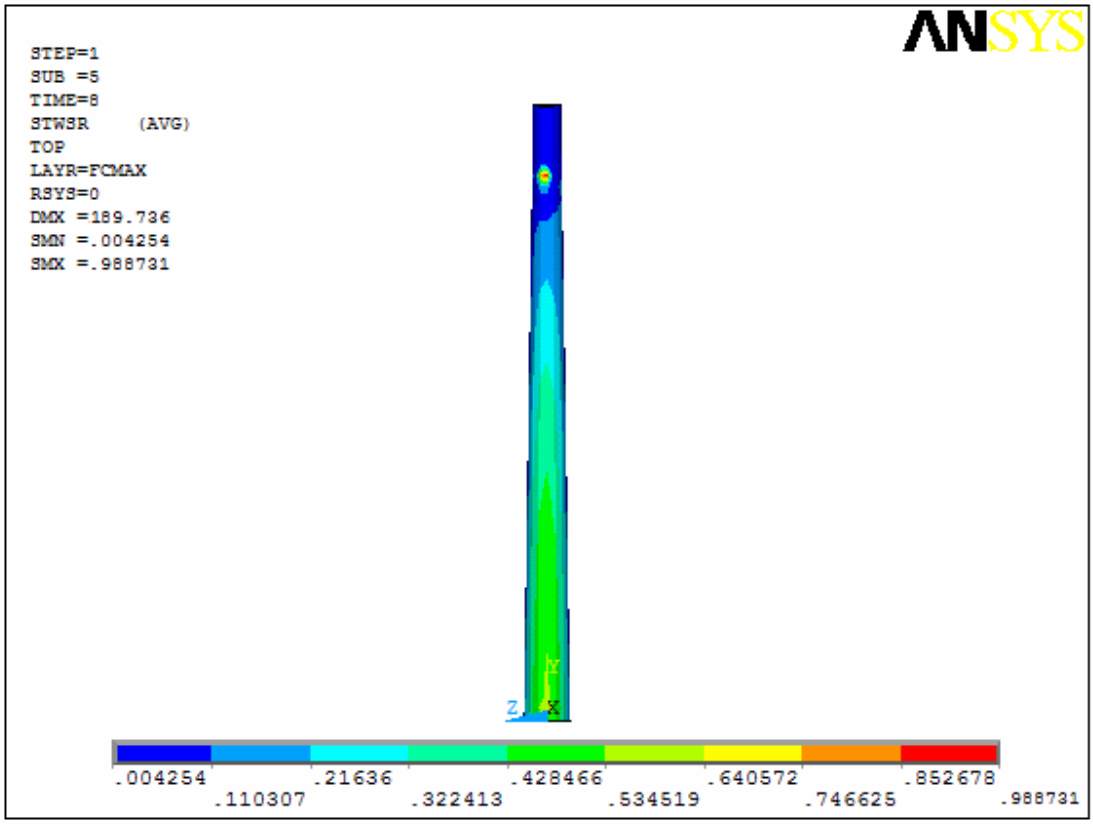
4.29 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir poslinkių priklausomybė

Tiriant atramas buvo kreipiamas dėmesys į stiprumo kriterijus neatsižvelgiant į poslinkius. Stiklo plastiko atramų tamprumo modulis mažas (lyginant su plienu), todėl priklausomai nuo sienutės storio ar atramos skersmens horizontalus atramų poslinkis gali būti labai didelis. Pavyzdžiui, H1 klasės atramos horizontalus poslinkis, kai dugno skersmuo 150 mm, buvo 17 % atžvilgiu viso atramos aukščio.

Elektros linijų projektavimo normose nėra nustatyta konkrečios ribos horizontaliam poslinkiui, tačiau projektuojant stengiamasi išlaikyti 10 % ribą.

Tiriant šios grupės atramas buvo pastebėti du nepakankamumo kriterijaus pasiskirstymo tipai. Kai 6 m stiklo plastiko atramos apatinis skersmuo 350 mm ar didesnis, nepakankamumas pasireiškia ties lenkimo apkrovos vieta. Kada atramos skersmuo mažesnis Tsai – Wu nepakankamumo kriterijus pasireiškė atramos gniuždomoje pusėje.

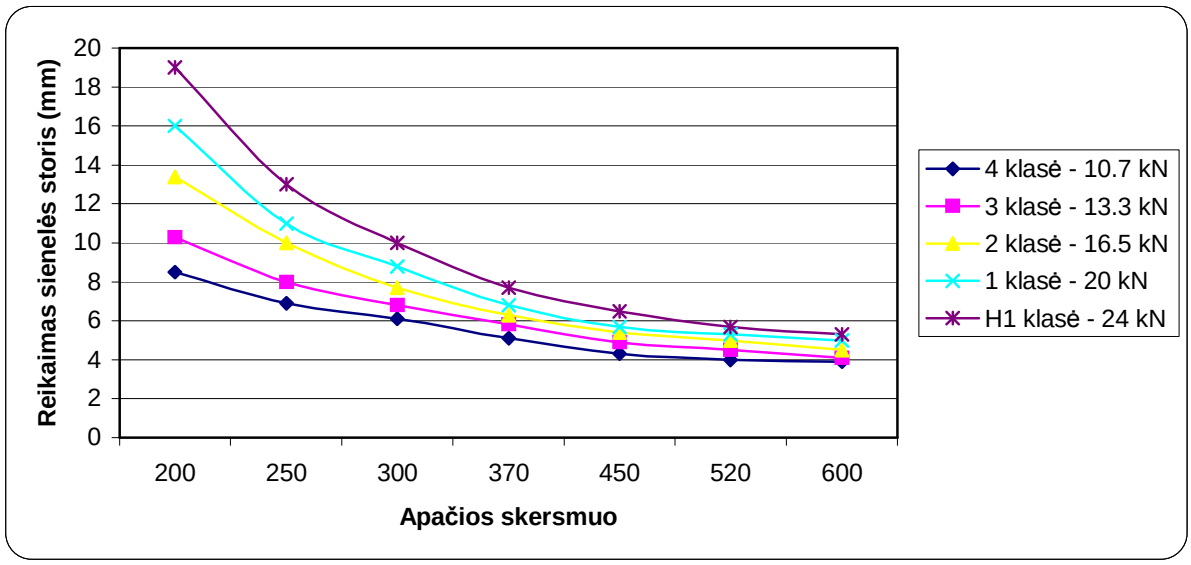
6 m atramoje, kai skersmuo 400 mm. Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymo vertės pateiktos 4.30 pav.



4.30 pav. 6 m aukščio stiklo plastiko atramoje, kai skersmuo 400 mm. Tsai – Wu kriterijaus pasiskirstymas giuždomoje atramos pusėje

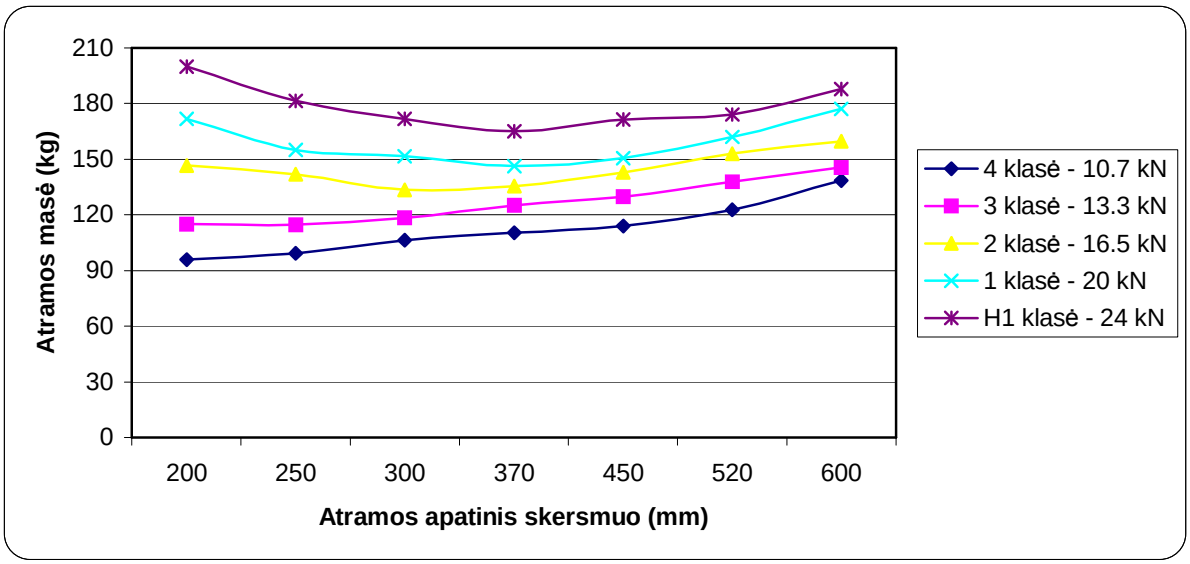
- **2 ATRAMŲ GRUPĖ**

Kaip ir 1oje atramų grupėje, stiklo plastiko atramų sienelės storis priklauso nuo atramos apačios skersmens. Sienelės storiai 12 m atramų, atitinkančių H1 ir 1 4 klasių atramų reikalavimus, pateikti 4.31 pav.



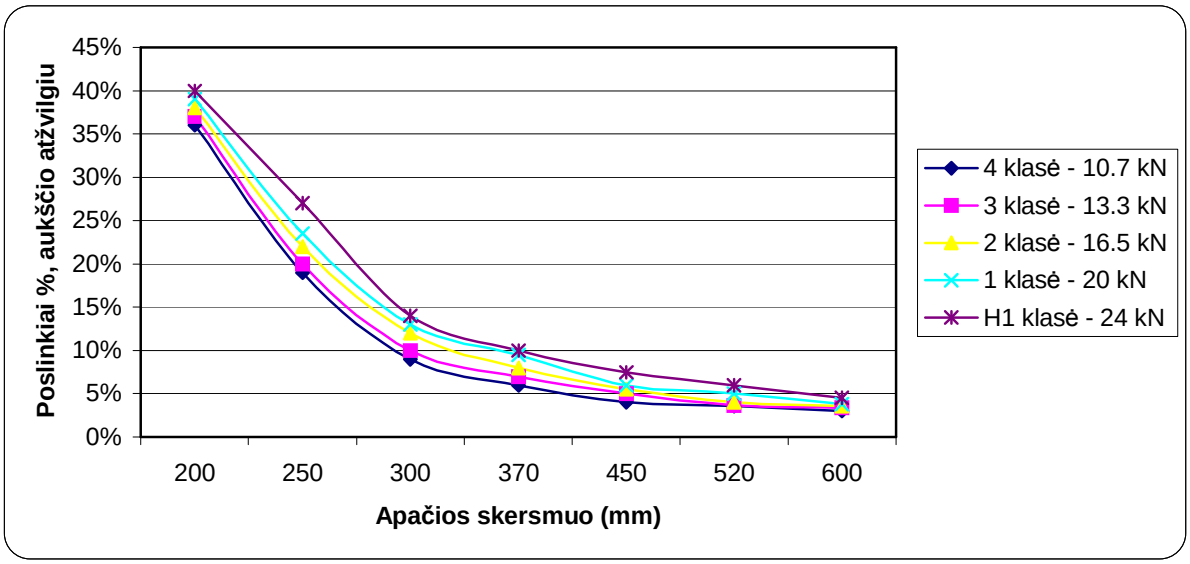
4.31 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir sienutės storio priklausomybė

Nuo sienelės storio ir skersmens priklauso atramos masė, kuri yra vienas iš rodiklių optimaliam stiklo plastiko atramų projektavimui. Apskaičiuota atramų masė pagal 4.31 pav. duomenis pateikta 4.32 pav.



4.32 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir masės priklausomybė

Pagal 4.32 pav. kreivių minimumo taškus, 1 – oios ir H1 klasių 12 m atramų optimalus skersmuo 370 mm, 300 mm – 2 klasės, o 200 mm – 3 ir 4 klasių. Taigi šie atramų matmenys gali būti laikomi optimaliais pagal masės rodiklius, tačiau kai kurių iš šių skersmenų atramų poslinkiai itin dideli. Poslinkių dydžiai atžvilgiu atramos skersmens pateikti 4.33 pav.



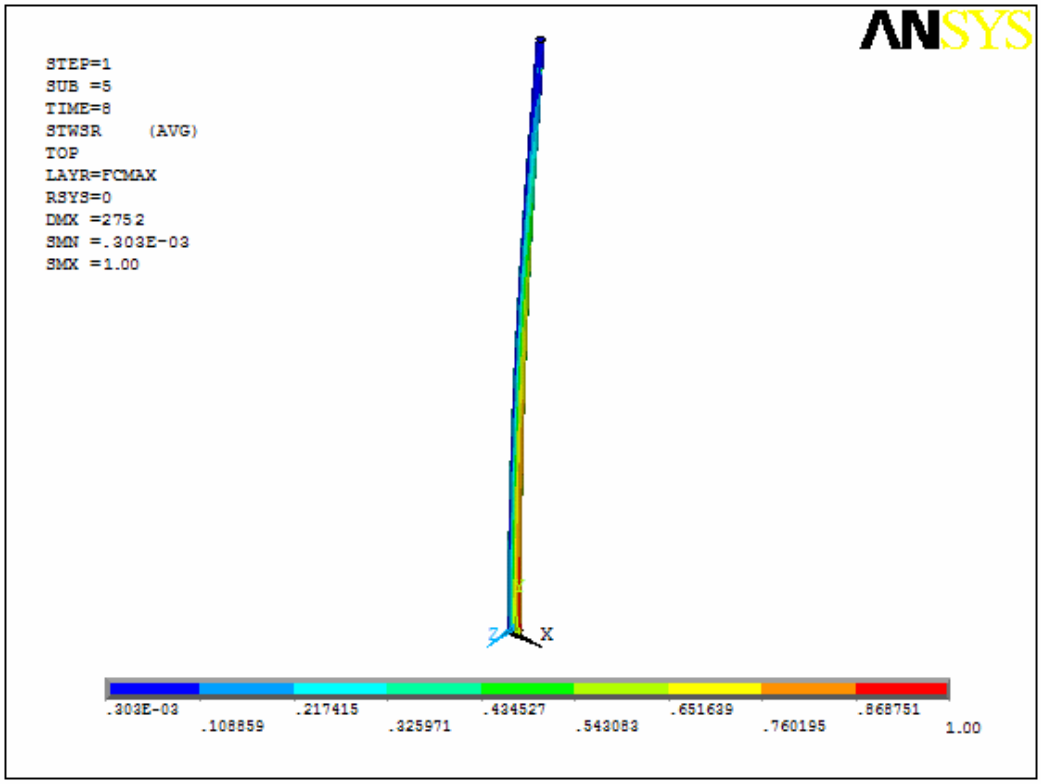
4.33 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir poslinkių priklausomybė

Kaip jau buvo minėta, elektros linijų atramų poslinkiai normose yra neribojami, tačiau tarp projektuotojų vyrauja nuomonė, kad atramų poslinkiai turėtų būti apie 10 %. Todėl atsižvelgiant į konstrukcijos apkrovimą ar projektų užsakovų pageidavimus, į šių poslinkių dydžius rekomenduojama atsižvelgti.

Tiriant šios 2 – osios grupės atramas buvo pastebėti du Tsai – Wu nepakankamumo kriterijaus pasiskirstymo tipai. Kai stiklo plastiko atramų apatinis skersmuo buvo lygus ar didesnis nei 370 mm, nepakankamumas pasireiškia ties lenkimo apkrovos vieta H1, 1 ir 2 klasių atramose, kai skersmuo 300 mm ar didesnis 3 ir 4 klasių atramose.

Kada atramos skersmuo mažesnis už 300 mm. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijus pasiskirsto atramos gniuždomoje pusėje.

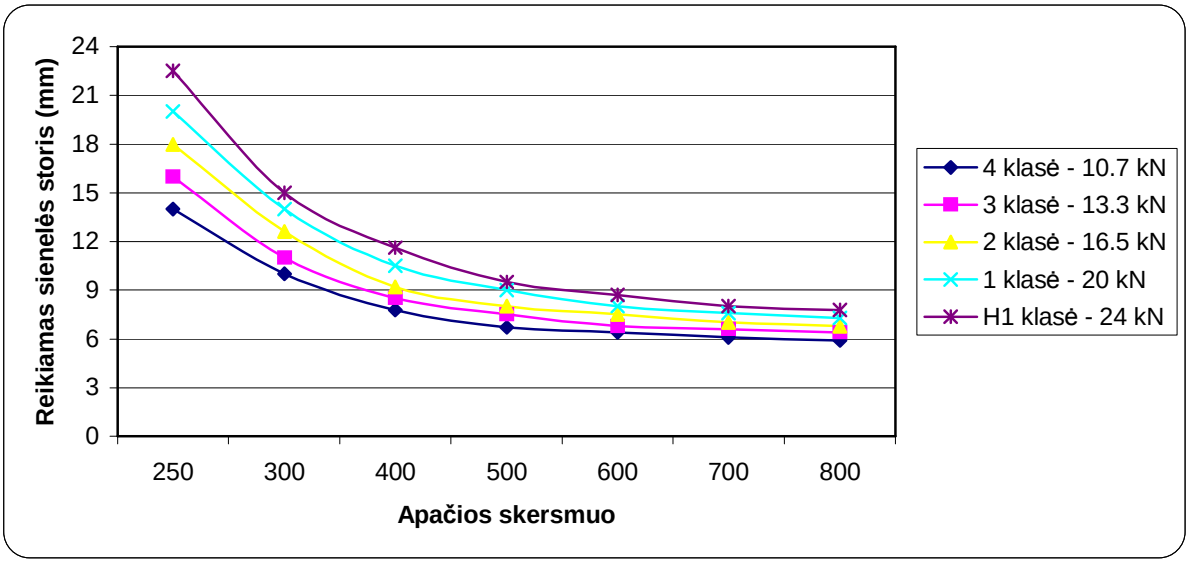
1 klasės 12 m atramoje, kai skersmuo 250. Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymo vertės pateiktos 4.34 pav.



4.34 pav. 12 m aukščio stiklo plastiko atramoje, kai skersmuo 250 mm. Tsai – Wu kriterijaus pasiskirstymas

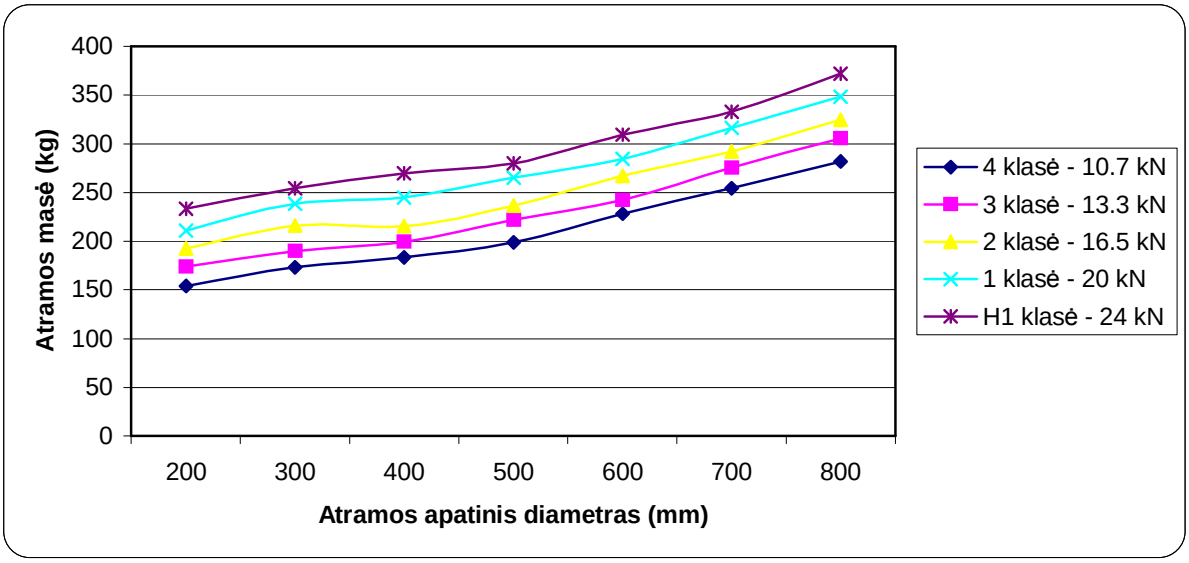
- **3 ATRAMŲ GRUPĖ**

Sienelių storiai, 18 m atramų atitinkačių H1, 1 – 4 klasių reikalavimus, pateikti 4.35 pav. Šie sienelių storiai buvo gauti remiantis Tsai – Wu nepakankamumo kriterijumi.



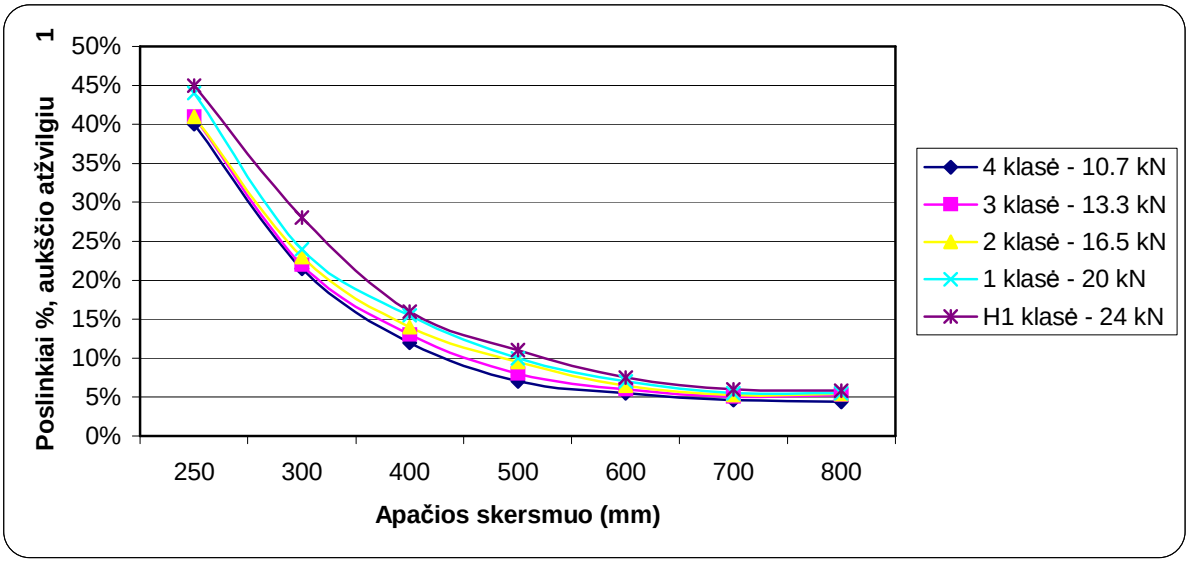
4.35 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir sienelės storio priklausomybė

Optimalūs atramos matmenys dažniausiai priimami, kai atramos masė minimali. Atramų masės rodikliai pateikti 4.36 pav.



4.36 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir masės priklausomybė

Pagal 4.36 pav. kreivių minimumo taškus, visų klasių atramų minimali masė pasiekiama, kada atramos skersmuo 200 mm. Tačiau, kaip ir ankstesnėse atramų grupėse, pasireiškia itin dideli horizontalūs poslinkiai. Atramų įlinkiai parodyti 4.37 pav.



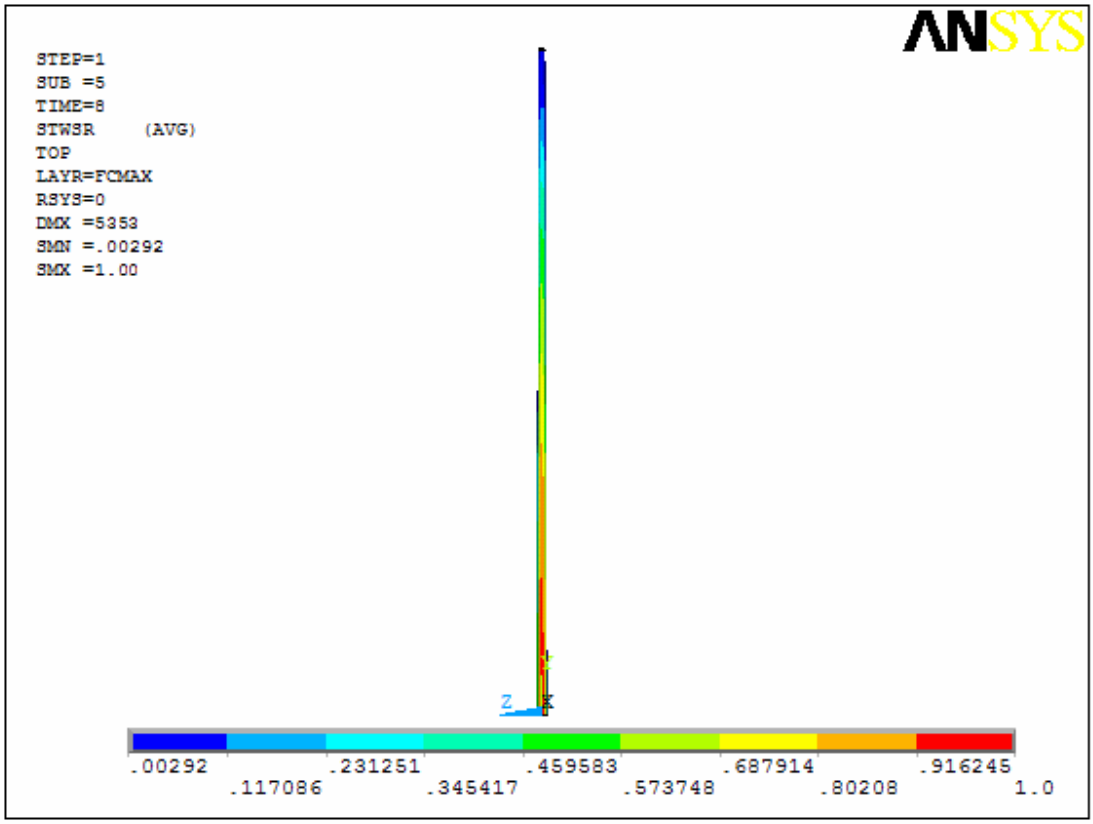
4.37 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramų apatinio skersmens ir poslinkių priklausomybė

Pavyzdžiui, didžiausi įlinkiai H1 klasės atramoje, kai skersmuo 250 mm, 45 % atžvilgiu viso atramos aukščio. Tai itin dideli rodikliai, ir jeigu būtų atsižvelgiama ne tik į

stiprumo reikalavimus, bet ir į poslinkius, turėtų būti atliekami papildomi tyrimai nustatant sienutės reikiamą storį pagal atramos skersmenį ir klasę.

Tiriant šios grupės atramas buvo pastebėti du nepakankamumo kriterijaus pasiskirstymo tipai. Kai stiklo plastiko atramos apatinis skersmuo 500 mm ar didesnis, nepakankamumas pasireiškia ties lenkimo apkrovos vieta. Kada atramos skersmuo mažesnis už 500 mm. Tsai – Wu nepakankamumo kriterijus pasireiškė atramos gniuždomoje pusėje.

18 m atramoje, kai skersmuo 300 mm. Tsai – Wu nepakankamumo pasiskirstymo vertės pateiktos 4.38 pav.



4.38 pav. 18 m aukščio stiklo plastiko atramoje, kai skersmuo 300 mm, Tsai – Wu kriterijaus pasiskirstymas gniuždomoje atramos pusėje

IŠVADOS

1. Mažiausias stiklo plastiko atramos reikiamas sienelės storis gali būti komponuojamas, kai sluoksnių santykis 2/10, t.y žiedinių pluoštų sluoksniai/ bendras sluoksnių skaičius. Norint pasiekti tą patį stiprumą, bet be skersinio pluošto išdėstymo, stiklo pluošto atramos sienelės storis turi būti 15 % ir 20 % didesnis, nei atramos su atitinkamų sluoksnių (2/10 santykiu) išdėstymu.
2. Stiklo pluošto atramos standumas tiesiogiai priklauso nuo skersinio pluošto sluoksnių skaičiaus. Minimalūs atramų poslinkiai buvo pasiekti, kai visi sluoksniai yra orientuojami išilgine kryptimi. Didesnis skersinių sluoksnių skaičius sumažina atramos standumą ir atitinkamai padidina horizontalųjį poslinkį, nes didžiausias stiklo pluošto standumas yra išilgai pluošto kryptimi ir minimalios savybės statmenai pluošto. Todėl, norint suprojektuoti standesnę atramos konstrukciją, reikia stiklo pluoštą orientuoti kuo mažesniu kampu, atramos sudaromosios ašies atžvilgiu.
3. Medžiagos nepakankamumas atramos suspaudimo pusėje pasireiškia, kada stiklo plastiko atrama modeliuojamos be žiedinio pluošto. Medžiagos nepakankamumas suspaudimo pusėje nebuvo dominuojantis tais atvejais, kada buvo į atramos sienutės sluoksnius įtraukti žiediniai pluoštai, nes žiedinis pluoštas atsparesnis skersiniams ir šlyties įtempiams.
4. Mažiausias reikiamas stiklo plstiko atramos sienelės storis pasiekiamas tada, kai išilginio pluošto kampas yra nuo 5 iki 15 laipsnių, atramos ašies sudaromosios atžvilgiu.
5. Kai išilginio pluošto kampas tarp 5^o ir 25^o, medžiagos nepakankamumas pagal Tsai – Wu kriterijų pasireiškia atramos suspaudimo pusėje, prie žemės paviršiaus.
6. Stiklo pluošto atramų, kurių stiklo pluošto išdėstymo kampas nuo 35^o iki 45^o, medžiagos nepakankamumas pasireiškia atramos tempiamoje pusėje.
7. Horizontalus mažiausias įlinkis pasiekiamas, kai stiklo pluošto kampas 45^o, tačiau kad tenkintų nepakankamumo kriterijus, sienelės storis su 45^o kampu išdėstytu pluoštu turi būti daug storesnis, nei su 5^o ar 15^o kampu išdėstytu pluoštu.
8. Šiuose tyrimuose buvo pasirinkta tirti kūginė elektros linijų atramos forma. Siekiant sumažinti svorį ir kainą, tai būtų optimalus pasirinkimas. Tačiau sumažėjęs skersmuo ir skerspjūvis ties viršūne sumažina lenkimo standumą ir poslinkiai atramos aukščio

atžvilgiu, priklausomai nuo pluošto orientavimo kampo, gali būti itin dideli. Šiame darbe, buvo tiriamos kūginės atramos, kurių smailėjimo santykis buvo 0.6, t.y. atramos apačios/viršaus skersmuo = 0,6. Siekaint rasti optimalią konstrukciją įvertinant poslinkius, reikėtų atsižvelgti į atramos smailėjimo kampą.

A priedas. Atramos modeliavimo su ANSYS programa kodas

```
/BATCH
! /COM,ANSYS RELEASE 12.0.1  UP20090415
/CWD,'D:\ansys failai'
/TITLE,  12m. stiklo plastiko atrama
! SAVE, r,db,
!*
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,0
/GO
/PREP7
ET,1,SHELL91,,1
ETDEL,1
ET,1,SHELL99
KEYOPT,1,2,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,4,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,8,1
KEYOPT,1,9,0
KEYOPT,1,10,0
KEYOPT,1,11,0
*SET,_RC_SET,1,
R,1
RMODIF,1,1,10,0,0,0,0,0
RMODIF,1,13,1,75,1.1,1,-75,1.1,
RMODIF,1,19,1,75,1.1,1,-75,1.1,
RMODIF,1,25,1,75,1.1,1,75,1.1,
RMODIF,1,31,1,-75,1.1,1,75,1.1,
RMODIF,1,37,1,-75,1.1,1,75,1.1,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,44000
MPDATA,EY,1,,12000
```

```
MPDATA,EZ,1,,12000
MPDATA,PRXY,1,,0.24
MPDATA,PRYZ,1,,0.3
MPDATA,PRXZ,1,,0.24
MPDATA,GXY,1,,4800
MPDATA,GYZ,1,,4800
MPDATA,GXZ,1,,4800
K,1,0,0,0,
K,2,0,12000,0,
K,3,120,12000,0,
K,4,200,0,0,
LSTR,3,4
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
FLST,8,2,3
FITEM,8,2
FITEM,8,1
AROTAT,P51X, , , , , ,P51X, ,360,15,
AESIZE,ALL,100,
MSHKEY,0
FLST,5,15,5,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-15
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
/SOL
FLST,2,15,4,ORDE,15
FITEM,2,17
FITEM,2,19
FITEM,2,21
FITEM,2,23
FITEM,2,25
FITEM,2,27
FITEM,2,29
FITEM,2,31
FITEM,2,33
FITEM,2,35
FITEM,2,37
FITEM,2,39
FITEM,2,41
FITEM,2,43
```

```
FITEM,2,45
/GO
DL,P51X, ,ALL,
ANTYPE,0
NSUBST,8,10,4
AUTOTS,1
LNSRCH,1
NEQIT,6
! /VIEW,1,1,1,1
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,259
/GO
F,P51X,FX,20000
nsel,all
time,8
allsel,all
outres,all
! /STATUS,SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
!*
FC,1,S,XTEN,1300
FC,1,S,YTEN,47
FC,1,S,ZTEN,1000
FC,1,S,XCMP,-680
FC,1,S,YCMP,-130
FC,1,S,ZCMP,-1000
FC,1,S,XY,44
FC,1,S,YZ,44
FC,1,S,XZ,44
FC,1,S,XYCP,-1
FC,1,S,YZCP,-1
FC,1,S,XZCP,-1
FC,1,EPEL,XTEN,0
FC,1,EPEL,YTEN,0
FC,1,EPEL,ZTEN,0
FC,1,EPEL,XCMP,-0
FC,1,EPEL,YCMP,-0
FC,1,EPEL,ZCMP,-0
FC,1,EPEL,XY,0
FC,1,EPEL,YZ,0
FC,1,EPEL,XZ,0
SOLVE
FINISH
```

Literatūra

Apie stiklo pluošto gaminius [interaktyvus]. 2011. UAB „FibroLT" [žiūrėta 2011-09-27]. Prieiga per internetą: http://www.fibro.lt.

Bendrai apie kompozitus [interaktyvus]. 2011. UAB „Compozitus" [žiūrėta 2011-10-20]. Prieiga per internetą: http://www.compositus.lt.

Chugh, P.Y.; Jinrong, M. 2006. *Development and Demonstration of Coal combustion Byproducts Filled Composite Materials for Utility Pole Fabrication.* Mining and Mineral Resources Engineering Southern Illinois University. Carbondale, Illinois.

Derrick, G. L. 1996. *Fiberglass Composite Distribution and Transmission Poles*. Manufactured Distribution and Transmission Pole Structure Workshop Proceeding, Electric Power Research Institute. 55 – 61 p.

Energetikai. Laikas kirsti ir genėti šalia elektros linijų augančius želdinius [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-03-21]. Prieiga per internetą: http://blog.delfi.lt

Fiberglass construction: An Alternate Material [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-01-20]. Prieiga per internetą: http://www.fiberglassconstruction2day.info

Filament winding [interaktyvus]. [žiūrėta 2011-09-27]. Prieiga per internetą: http://www.mvpind.com/

Frederick, T.; Wallenberger, J.; Watson, C.; Hong, L. 2001. *Glass Fibers.* PPG Industries. Prieiga per internetą: http://www.asminternational.org

Gay, D.; Hoa, S.V.; Tsai, W.S. 2003. *Composite materials: Design and application.* New York, Washington. 45 p.

Hota, V. S.; Ganga R.; Taly, N.; Vijay, P. V. 2006. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*. 63 – 79 p.

Klova, E. 2005. *Cilindrinių kevalų statinis modeliavimas ir analizė.* Šiauliai. 4 p.

Konstrukcijos iš stiklo pluošto profilų [interaktyvus]. 2011. UAB „FibroLT" [žiūrėta 2011-11-06]. Prieiga per internetą: http://www.fibro.lt.

Latvijos keliai (forumas) [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-04-02]. Prieiga per internetą: http://www.miestai.net

Marčiukaitis, G. 1998. *Statybinių kompozitų kūrimo ir savybių prognozavimo principai*. Vilnius „Technika". 45 p.

Martin, J. D.; Richter, C. S. 1974. *A Marketing Approach to the Development of the RP/C lighting Pole Market*. Annual Technical Conference. Reinforced Plastics/Composite Institute, The Society of the Plastics Industry. 9 – 12 p.

McClure, G.; Boire, L.; Carriere, J. C. 1992. *Applications of Advanced Composite Materials in Overhead Power Lines and Telecommunications Structure*. Canadian Society of Civil Engineering, Canada. 543 – 549 p.

Miestai ir architektūra (forumas) [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-04-02]. Prieiga per internetą http://www.miestai.net

Munro, M. 1988. *Review of Manufacturing of Fiber Composite Components by Filament Winding.Polymer Composites*. 34 p.

Murphy, J. 1998. *Reinforced Plastics Handbook*. Second Edition, Elsevier Advanced Technolgy. 67 p.

Onder, .A. 2007. *First failure pressure of composite pressure vessels.* Dokuz Eylül University. Izmir. 22 p.

Paepegem, W.; Degrieck J. 2003. *Calculation of damage dependent directional failure indices from the Tsai Wu static failure criterion.* Ghent University, Belgium. 67 p.

Polyzois D., Burachynsky, V. and S. K. Hassan. 2003. *Glass fiber reinforced plastic poles for transmission and distribution lines: an experimental investigation*. Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg,Canada. 1 – 30 p.

Programinė įranga [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-03-12]. Prieiga per internetą http://lsl.vgtu.lt/vilkas/lt

Pultrusion [interaktyvus]. [žiūrėta 2011-09-27]. Prieiga per internetą http://www.rishon-inter.lv

Pultrusion industry council [interaktyvus]. [žiūrėta 2011-11-10]. Prieiga per internetą http://www.acmanet.org

Putrusion preocess. Strongwell. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012-01-17]. http://www.strongwell.com

Ray F. L.; Chem, D.; Hota, G.R. 2002. *Manufacturing and Applications of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Materials.* Constructed Facilities Center (CFC) Development. 25 p.

Rajendran, S.; Song, D.Q. 1998. *Finite Element Modelling of Delamination Buckling of Composite Panel Using ANSYS.* Materials Technology Application Centre Singapore Productivity and Standards Board. Singapore. 45 p.

Release 11.0 Documentation for ANSYS [interaktyvus]. 2012. ANSYS [žiūrėta 2012-04-10]. Prieiga per internetą: http://www.kxcad.net

Sarmento, M.; and Lacoursiere, B. 2006. *A State of the Art Overview: Composite Utility Poles for Distribution and Transmission Applications*. 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America, Venezuela. 1 – 15 p.

Slimane, M.; Radhouane, M. 2007. *Full Scale Flexural Testing on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Poles.* Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke. The Open Civil Engineering Journal. Canada. 37 –50 p.

Sunkų metalą keičia lengvas ir patvarus stiklo plastikas. 2008. *Statybų žinios*. Nr. 9 (21) 2008 m. birželio 28 d. – liepos 17 d. Prieiga per internetą: http://www.traidenis.lt/lt/

Stiklaplastikis [interaktyvus]. [žiūrėta 2011-10-05]. Prieiga per internetą http://lt.wikipedia.org

Takayanagi, H.; Xia, M.; Kemmochi K. 2001. *Analysis of multy layered wilamnt wound composite pipes under internal pressure*. Ibaraki, Japan. 34 – 50 p.

Tsai, S.; W., Hahn, H. T. 1980. *Introduction to Composite Materials Technomic*. Publishing Co., Lancaster. 56 p.

Tsai, S. W.; Wu, E. M. 1971. *A general theory of strength for anisotropic materials*. Journal of Composite Materials. 58 – 80 p.

Vanderbuilt, M. D.; Criswell, M. E. 1988. *Reliability Analysis of Pole - Type Transmission Structures*. 343 p.

Williams, B.K. 2000. *The Development of GFRP Bridge Deck Modules*. The university of Manitoba faculty of graduate studies. Canada. 13 – 48 p.