

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

INGA AUDZEVIČIŪTĖ-LIUTKIENĖ

AUDINIŲ IR MEZGINIŲ BEI JŲ SIŪLINIŲ
JUNGINIŲ DEFORMACIJŲ TYRIMAS IR
VERTINIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, medžiagų inžinerija (08T)

2015, Kaunas

Disertacija rengta 2010 – 2015 metais Kauno technologijos universitete, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto Medžiagų inžinerijos katedroje, remiant Lietuvos valstybiniam mokslui ir studijų fondui ir Lietuvos mokslo tarybai.

Mokslinė vadovė:

Doc. dr. Vitalija MASTEIKAITĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T) nuo 2010 09 01 iki 2013 09 30.

Doc. dr. Milda JUCIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T) nuo 2013 10 01 iki 2014 08 31.

Mokslinė konsultantė:

Dr. Virginija SACEVIČIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, medžiagų inžinerija – 08T) nuo 2014 04 23 iki 2014 08 31.

TURINYS

ĮVADAS	9
1. LITERATŪROS APŽVALGA	12
1.1. Deformacijų susidarymas gaminiuose	12
1.2. Deformuojamų tekstilės medžiagų elgsena	14
1.3. Tekstilės medžiagų deformacinių savybių analizės metodai	18
1.4. Aprangos gaminių ir tekstilės medžiagų deformacinės elgsenos modeliavimas	27
1.5. Apibendrinimas	30
2. TYRIMO OBJEKTAI IR METODIKOS	32
2.1. Tirtos tekstilės medžiagos ir pagrindinės jų charakteristikos	32
2.2. Tyrimų metodikos	34
2.2.1. Tekstilės medžiagų ir jų siūlinių junginių tūsumo vertinimas standartiniu vienašiu tempimo metodu iki bandinio suirimo ir neviršijant mažų apkrovų ribos	35
2.2.2. Tekstilės medžiagų deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu	36
2.2.3. Tekstilės medžiagų ir jų siūlinių junginių deformacinių savybių vertinimas nauju Y formos bandinio metodu	39
2.2.4. Tekstilės medžiagų deformacijų tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM)	45
2.3. Skaitmeninių vaizdų fiksavimo sąlygos	48
3. TYRIMO REZULTATAI	50
3.1. Tekstilės medžiagų struktūros paslankumo vertinimas standartiniais metodais	50
3.1.1. Audinių ištiesos vertinimas standartiniu vienašiu tempimo metodu iki bandinio suirimo ir neviršijant mažų apkrovų ribos	50
3.1.2. Mezginių ištiesos vertinimas standartiniu vienašiu tempimo metodu iki bandinio suirimo ir neviršijant mažų apkrovų ribos	52
3.2. Tekstilės medžiagų deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu	56
3.2.1. Audinių deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu	56
3.2.2. Mezginių deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu	59
3.3. Tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinių savybių vertinimas nauju Y formos bandinio metodu	61
3.3.1. Audinių deformacinių savybių vertinimas Y formos bandinio metodu	61
3.3.2. Mezginių deformacinių savybių vertinimas Y formos bandinio metodu	67
3.3.3. Audinių siūlinių junginių deformacinių savybių vertinimas Y formos bandinio metodu	72

3.3.4. Mezginių siūlinių junginių deformacinių savybių vertinimas Y formos bandinio metodu	75
3.4. Tekstilės medžiagų deformacijų vertinimas baigtinių elementų metodu bei eksperimentinio ir skaitinio tyrimų rezultatų verifikavimas	78
IŠVADOS.....	82
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	84
MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	97
1 PRIEDAS	99
2 PRIEDAS	102
3 PRIEDAS	105
4 PRIEDAS	106
5 PRIEDAS	107
6 PRIEDAS	108
7 PRIEDAS	109
8 PRIEDAS	110

ŽYMĖJIMAI IR SUTRUMPINIMAI

<i>a</i>	– ataudai
<i>A</i>	– audinio kodas
<i>A_Y</i>	– Y formos bandinio viršutinės dalys
<i>AB</i>	– gretasienio formos bandinio viršutinė kraštinė
<i>CD</i>	– gretasienio formos bandinio apatinė kraštinė
<i>b_G</i>	– gretasienio formos bandinio plotis, mm
<i>an_V</i>	– santykinės trūkimo ištiesos anizotropiškumo koeficientas
<i>B_Y</i>	– Y formos bandinio apatinė dalis
<i>b_Y</i>	– visas Y formos bandinio plotis, mm
<i>b_{Y1}</i>	– Y formos bandinio centrinės dalies plotis, mm
<i>b_{Y2}</i>	– Y formos bandinio kraštelių plotis, mm
<i>b_{V1}</i>	– stačiakampio formos bandinio plotis, mm
<i>b_{V2}</i>	– atstumas iki siūlės stačiakampio formos bandinyje, mm
<i>CMD</i>	– modalinis pluoštas
<i>CO</i>	– medvilnės pluoštas
<i>CV</i>	– viskozės pluoštas
<i>e</i>	– mezginio eilučių kryptis
<i>E_x</i>	– tamprumo modulis <i>x</i> kryptimi, MPa
<i>E_y</i>	– tamprumo modulis <i>y</i> kryptimi, MPa
<i>EL</i>	– elastano pluoštas
<i>F₁, F₂</i>	– bandinį veikiančios ašinės jėgos, N
<i>F_G</i>	– tempimo jėga, kai gretasienio formos bandinio paviršiuje išnyksta nelygumai (audiniams), N/cm
<i>F_{G14}</i>	– tempimo jėga, tempiant gretasienio formos bandinį iki $\varepsilon_{G14} = 14 \%$, N/cm
<i>F_{G45}</i>	– tempimo jėga, tempiant gretasienio formos bandinį iki $\varepsilon_{G45} = 45 \%$ (mezginiams), N/cm
<i>F_{Y10}</i>	– tempimo jėga, tempiant Y formos bandinį iki $\varepsilon_{Y10} = 10 \%$ (audiniams), N/cm
<i>F_{Y40}</i>	– tempimo jėga, tempiant Y formos bandinį iki $\varepsilon_{Y40} = 40 \%$ (mezginiams), N/cm
<i>F_{V50}</i>	– tempimo jėga, kai neviršijama mažų apkrovų riba (mezginiams), N/cm
<i>F_{V490}</i>	– tempimo jėga, kai neviršijama mažų apkrovų riba (audiniams), N/cm
<i>F_{Vtr}</i>	– trūkimo jėga vienašio tempimo metu, užregistruota suardant bandinius, N/cm
<i>G_{x,y}</i>	– šlyties modulis, MPa
<i>h₁</i>	– atstumas nuo horizontalės iki vidurio taško naujos padėties, tempiant Y formos bandinį, mm
<i>h_i^c_{Y10;Y40}</i>	– Y formos bandinyje nubraižytų horizontalių linijų įlinkio dydis, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas ε_{Y10} ir ε_{Y40} , %

$h_{ski}^{\epsilon_{Y40}}$	– Y formos bandinyje nubraižytų horizontalių linijų įlinkio dydis, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas ϵ_{Y40} baigtinių elementų metodu (BEM), %
y^{ϵ_G}	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės ilgis tempimo metu, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas ϵ_G (audiniams), %
y_{G0}	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės ilgis prieš tempimą, mm
$y^{\epsilon_{G45}}$	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės ilgis tempimo metu, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas ϵ_{G45} (mezginiams), %
l_G	– gretasienio formos bandinio ilgis, mm
l_{Gp}	– papildomų gretasienio formos bandinio kraštelių ilgis, mm
LI	– lino pluoštas
l_Y	– visas Y formos bandinio ilgis, mm
l_{Y1}	– Y formos bandinio darbinės zonos ilgis, mm
l_{Y2}	– Y formos bandinio kraštelių ilgis, mm
l_{V1}	– stačiakampio formos bandinio ilgis, mm
l_{V2}	– atstumas iki siūlės stačiakampio formos bandinyje, mm
m	– metmenys
M	– mezginio kodas
PES	– poliesterinis pluoštas
PP	– polipropileninis pluoštas
RH	– drėgnis, %
s	– mezginio stulpelių kryptis
$S_{Y10;40}$	– spindulinėje diagramoje apibrėžtas rodiklių plotas, deformuojant Y formos bandinį, %
$\check{S}_{Y1}, \check{S}_{Y2}$	– Y formos bandinio vertikalios šoninės linijos
T	– temperatūra, °C
v_Y	– viršutinio veržtuvo judėjimo greitis tempiant Y formos bandinį, mm/min
V_Y	– Y formos bandinio vidurio linija
v_{S0}	– pradinis atstumas tarp Y formos bandinyje nubraižytų vertikalų šoninių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} prieš bandinio deformaciją, mm
v_{S1}	– atstumas tarp Y formos bandinyje nubraižytų vertikalų šoninių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} bandinio deformavimo metu, mm
$v_{Si}^{\epsilon_{Y10;Y40}}$	– atstumo pokytis tarp Y formos bandinyje nubraižytų šoninių vertikalų linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} , %
v_G	– viršutinio veržtuvo judėjimo greitis tempiant gretasienio formos bandinį, mm/min
v_V	– viršutinio veržtuvo judėjimo greitis tempiant stačiakampio formos bandinius, mm/min
w	– paviršinis tankis, g/m ²
WO	– vilnos pluoštas

x'_G	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės plotis tempimo metu, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas ε_G (audiniams), %
x_{G0}	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės plotis prieš tempimą, mm
x'_{G45}	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės plotis tempimo metu, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas ε_{G45} (mezginiams), %
α'_G	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės kampas tempimo metu, kai gretasienio formos bandinio paviršiuje išnyksta nelygumai (audiniams), %
α'_{G45}	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės kampas tempimo metu, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas ε_{G45} (mezginiams), %
α_0	– pradinis kampas tarp Y formos bandinyje nubraižytų horizontalių ir vertikalų šoninių linijų prieš bandinio deformaciją, °
α_1	– kampas tarp Y formos bandinyje nubraižytų horizontalių ir vertikalų šoninių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} bandinio deformavimo metu, °
α_G	– kampas tarp gretasienio formos bandinio viršutinio (AB) ir apatinio (CD) kraštų, kurie sudaro kampą atitinkamai su išilgine ir skersine kryptimis, °
α_{G0}	– gretasienio formos bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės kampas prieš tempimą, °
α_Y	– kampas tarp nubraižytų horizontalių ir vertikalų linijų Y formos bandinyje, °
$\alpha_i'_{Y10;Y40}$	– kampo pokytis tarp Y formos bandinyje nubraižytų horizontalių ir vertikalų linijų, %
α_K	– šlyties kampas pagal <i>KES-F</i> metodiką, °
β	– kampas tarp išilginių ir skersinių audinio struktūros elementų, °
γ	– šlyties ištįsa, mm
ε	– tempimo ištįsa, mm
ε_G	– gretasienio formos bandinio santykinis pailgėjimas (audiniams), %
ε_{G14}	– gretasienio formos bandinio santykinis pailgėjimas, %
ε_{G45}	– gretasienio formos bandinio santykinis pailgėjimas (mezginiams), %
ε_{Y10}	– Y formos bandinio santykinis pailgėjimas (audiniams), %
ε_{Y40}	– Y formos bandinio santykinis pailgėjimas (mezginiams), %
$\varepsilon_{i\check{s}}$	– išilginė deformacija, mm
ε_{sk}	– skersinė deformacija, mm
ε_{min}	– mažiausia trūkimo ištįsos vertė, mm
ε_{max}	– didžiausia trūkimo ištįsos vertė, mm
ε_{V50}	– santykinis pailgėjimas, kai neviršijama mažų apkrovų riba (mezginiams), %
ε_{V490}	– santykinis pailgėjimas, kai neviršijama mažų apkrovų riba (audiniams), %

- ε_{Vtr} – santykinė trūkimo ištįsa, susidariusi tuo metu, kai užregistruojama trūkimo jėga F_{Vtr} , %
- μ – Puasono koeficientas
- σ – tempimo įtempis, MPa
- τ – šlyties įtempis, MPa

ĮVADAS

Sparčiai vystantis ir tobulėjant mokslui, šiuolaikinių technologijų vystymasis daro didelę įtaką visoms pramonės šakoms, todėl tekstilės ir aprangos sektorius visame pasaulyje taip pat sparčiai kinta. Tekstilės medžiagos yra nuolat tobulinamos, sukuriamos ne tik inovatyvios ir sudėtingos struktūros medžiagos, bet ir sudėtingos aprangos gaminių konstrukcijos, sujungtos įvairaus tipo siūlėmis. Pastaraisiais metais aprangos pramonė vis labiau orientuota į specialiosios paskirties aprangos gamybą, kuriai keliami aukšti kokybės reikalavimai, tenkinantys ne tik vartotojų poreikius, bet atitinkantys techninius, ekonominius rodiklius bei kokybės standartus. Tekstilės medžiagos, priklausomai nuo savo sandaros, struktūros elementų išsidėstymo bei deformacinių savybių, gali ne tik lengvai deformuotis, bet ir išlaikyti erdvinę formą. Tekstilės medžiagos yra anizotropinės ir nehomogeniškos, todėl svarbu prognozuoti gaminio medžiagos savybes, atsižvelgti į veikiančius įvairius veiksnius: nevienodą detalių orientaciją gaminyje, skirtingų medžiagos sluoksnių anizotropiškumą, skirtingai orientuotų gaminių detalių paslankumą, siūlių orientaciją bei jų paslankumą ir pan. Moksliniais tyrimais nustatyta, kad tekstilės medžiagų elgseną gamybos bei eksploatacijos metu geriausiai įvertina jos deformacinė geba, apibūdinama ištjosos ir šlyties charakteristikomis. Nors šiuo metu sukurta daug naujų tekstilės medžiagų deformacinių savybių vertinimo metodų, tačiau vis dar trūksta metodų, leidžiančių nebrangiai, nesudėtingai ir našiai įvertinti medžiagos ir siūlių mechanines charakteristikas, ypač deformacijų pasiskirstymą, jų netolygumus. Tekstilės medžiagų deformacines savybes galima įvertinti įprastais standartiniais tyrimo metodais, bet išsamesniems ir tikslesniems tyrimams tenka ieškoti naujų tyrimo metodų arba tobulinti jau sukurtus.

Pastaraisiais metais, kai tekstilės medžiagų ir aprangos deformacinės savybės tiriamos ir vertinamos 3D kompiuterinio modeliavimo metodais, sparčiai išaugo mokslinių tyrimų skaičius. Virtualus trimatis gaminio vaizdas aprangos pramonėje naudojamas ne tik realiam vaizdui sukūrti, bet ir dėl galimybės imituoti tekstilės medžiagų mechaninių savybių elgseną be būtinybės pagaminti realų gaminį. Baigtinių elementų metodas (BEM) yra vienas universaliausių ir plačiausiai taikomų metodų inžinerijoje, kuriuo galima optimizuoti ir aprangos medžiagų bei gaminių gamybos procesus, numatyti procesų eigą, prognozuoti deformacijų, įtempių pasiskirstymą medžiagose.

Temos aktualumas ir tiriamoji problema

Dėl savo anizotropiškumo bei nehomogeninės sandaros, tekstilės medžiagos pasižymi įvairiomis ir dažnai sunkiai prognozuojamomis savybėmis. Dėl šių priežasčių yra labai svarbu įvertinti bei numatyti medžiagų savybes gaminio projektavimo ir gamybos metu (sudarant konstrukciją, kerpanč, jungiant skirtingas detales ir kt.), garantuoti kokybę eksploatuojant gatavą gaminį (dėvint, skalbiant ir kt.). Nustatius ir įvertinus medžiagos deformacijų pasiskirstymą, jų netolygumo priežastis, galima padidinti gaminio gamybos našumą, parinkti optimalią gaminio konstrukciją, užtikrinti jo kokybę eksploatacijos metu.

Pastaruoju metu didelis dėmesys skiriamas naujų medžiagų kūrimui, didėja pasiūla bei medžiagų asortimentas, tačiau, remiantis mokslinių darbų apžvalga, pastebėta, kad trūksta nesudėtingų, universalių metodų, leidžiančių įvertinti įvairių medžiagų, taip pat jų junginių deformacijas, atsirandančias gaminio eksploatacijos metu. Pasigendama metodų, leidžiančių viena eksperimentine metodika įvertinti įvairias tekstilės medžiagų deformacinių savybių charakteristikas, ir taip sumažinti bandinių skaičių, eksperimentinių medžiagų kiekius ir kaštus bei laiko sąnaudas. Gaminio detalių skaidymas ir siūliniai junginiai mažina gaminio dalių paslankumą. Nors siūlių kokybės nustatymo metodų ir mokslinių tyrimų yra daug, tačiau siūlės įtakos medžiagų stabilumui, tūsumui ir paslankumui išties nedaug.

Baigtinių elementų metodas (BEM) inžinerijoje taikomas jau kelis dešimtmečius, tačiau tekstilės ir aprangos mokslo sektoriuje pasigendama mokslinių darbų, kuriuose būtų siekiama praplėsti tekstilės medžiagų deformacinės elgsenos modeliavimo skaitiniais metodais ribas.

Darbo tikslas

Sukurti naują universalų, nesudėtingą tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacijų vertinimo metodą, atsižvelgiant į eksploatuojamų gaminių tekstilės medžiagų elgsenos dėsningumus.

Darbo uždaviniai:

1. Nustatyti tekstilės medžiagų bei jų junginių tūsumo ribas tradicinio vienašio tempimo metu suardant bandinius ir neviršijant mažų apkrovų ribos;
2. Ištirti gretasienio formos metodo taikymo galimybes ir tinkamumą vienasluoksnių liaunų tekstilės medžiagų deformacinėms savybėms vertinti;
3. Sukurti naują universalų tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinių savybių tyrimo metodą, atsižvelgiant į aprangos deformacinius ypatumus bei nustatyti tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinę elgseną apibūdinančius rodiklius;
4. Baigtinių elementų metodu (BEM) sudaryti naujo metodo bandinio modelį, atitinkantį realų eksperimentą bei įvertinti medžiagų deformacinę elgseną, palyginti skaitinio ir eksperimentinio metodų rezultatus.

Darbo mokslinis naujumas ir praktinis pritaikymas

Naujai sukurtu metodu galima nustatyti ir įvertinti tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinės savybes bei eksploatuojamų gaminių deformavimosi ypatumus. Darbe naujam metodui parinktos optimalios bandymų sąlygos, nustatyti tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinę elgseną apibūdinantys rodikliai. Naujuoju metodu deformacinės savybės vertinamos kompleksiskai, t. y. grafiniu, vizualiniu bei modeliavimo baigtiniais elementais būdais. Pagal naują metodą bandinys deformuojamas iki deformacijų, artimų dėvėjimo metu atsirandančioms deformacijoms. Baigtinių elementų metodu (BEM) sudarytas medžiagos Y formos bandinio deformavimo modelis suteikia galimybę analizuoti tekstilės medžiagų deformacinės savybes neatliekant realių eksperimentų, taupant eksperimento kaštus

bei laiką. Taip pat naujuoju metodu praplėstos tekstilės medžiagų deformacinės elgsenos modeliavimo skaitiniais metodais ribos.

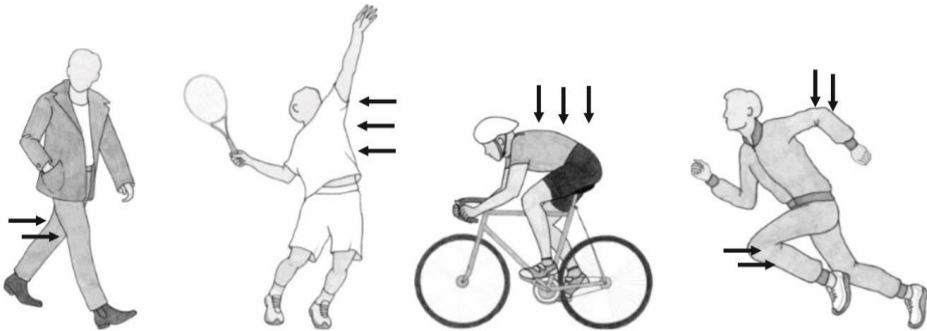
Ginamieji teiginiai:

1. Gretasienio formos bandinio metodu gautos charakteristikos nekoreliuoja su vienašio metodo gautomis charakteristikomis, ir gretasienio metodo kriterijai nėra tinkami vienasluoksnių liaunų tekstilės medžiagų deformacinėms savybėms vertinti;
2. Naujai sukurtu Y formos bandinio metodu ir parinktais išilginės, skersinės bei kampinės deformacijas apibūdinančiais rodikliais galima įvertinti tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinės savybės esant dėvėjimo lygio apkrovoms;
3. Baigtiniais elementais sudarytas modelis yra adekvatus eksperimentiniam modeliui, tad gali būti naudojamas kaip alternatyvus būdas laiką ir kaštus eikvojantiems eksperimentams bei pateikti rezultatai yra patikimi ir tinkami tiek praktiniu, tiek moksliniu požiūriu.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Deformacijų susidarymas gaminiuose

Dėvėdamas drabužius žmogus atlieka daug įvairių judesių, todėl atsiranda didelių įtempimų, kurie gali susikoncentruoti mažame tempimo plote, esant plačiam judesių diapazonui, pavyzdžiui, pakeliant ar sulenkiant rankas, kojas, tupiant, sėdant, sukant liemenį, lenkiantis ir kt. (**1.1 pav.**) (Senthilkumar, Anbumani, 2011; Reilly, 2010; Ng et al., 2007; Ng et al., 2008; Geršak, 2013; Wang et al., 2011). Todėl įvairiose gaminio vietose tekstilės medžiagos ištįsa svyruoja nuo 10 % iki 50 % [Senthilkumar, Anbumani, 2011; Reilly, 2010; Basset et al., 1999; Lin et al., 2011; Chowdhury et al., 2012; Shishoo, 2005).



1.1 pav. Įtempimų zonų koncentracija drabužiuose atliekant įprastus judesius (Geršak, 2013)

Apranga turi atitikti dėvėtojo figūrą, gražiai priglusti prie kūno (estetinė funkcija), drabužis turi būti patogus esant ramybės būsenai (esant statikai) ir dėvėjimo metu nevaržyti judesių (esant dinamikai), nesukelti neigiamų psichofiziologinių emocijų bei neprarasti kokybės visą numatytą eksploataavimo laiką (Reilly, 2010). Veikiant medžiagą tempimo ar lenkimo jėgomis, atsiradusi šlytis daro įtaką įvairiems nepageidaujamiems reiškiniams atsirasti: netvarkingoms klostėms ir raukšlėms susidaryti, suglamžyto drabužio išpūdzio efektui atsirasti ir t. t. Pastaraisiais metais, sparčiai vystantis naujoms technologijoms, sukurta ar patobulinta daugybė metodų, skirtų aprangos deformacinių savybių, konstrukcijos, atskirų drabužio dalių paslankumui ir trinčiai, dėvėjimo patogumui ir kokybei tirti bei vertinti (Ng et al., 2007; Alamdar, 2004; Kisilak, 1999; Klevaitytė, Masteikaitė, 2008; Klevaitytė et al., 2011; Lebrun et al., 2003; Galliot, Luchsinger, 2010a; Galliot, Luchsinger, 2010b; Semani et al., 2003; Luo, Verpoest, 2002; Celik et al., 2005; Tsai et al., 2002; Chen, Ye, 2013; Senthilkumar et al., 2012; Wang et al., 2011; Derler et al., 2007).

Drabužio patogumui įtakos turi dinaminis drabužio slėgis į žmogaus odą. Gaminio spaudimas yra jaučiamas įvairiu diapazonu judinant kūno dalis ir atliekant įvairius judesius. Mokslininkai Z. Chen ir J. Ye (2013) aprangos fiziologinio komforto testavimo įranga AMI analizavo drabužių slėgio žmogaus odos paviršiui bei įtempimų pasiskirstymą rankų, nugaros, pečių ir liemens srityse, atliekant įvairius judesius. Atsižvelgiant į testavimo įrangos AMI gautas rezultatų vertes ir savanorių apklausos rezultatus, nustatyta, kad didžiausios įtempimų koncentracijos ir slėgio odos paviršiui

vertės susidaro rankų srityse. Taip pat panašioms bandymams pasitelkę savanorius, mokslininkai *J. McLaren, R.J.N. Helmer, S.L. Horne* ir *I. Blanchonette* (2010) iš Australijos atliko eksperimentus tirdami sportinių drabužių spaudimą galūnėms – kojoms. Mokslininkų teigimu, A *CSIRO* belaidė stebėjimo sistema ir įrenginiai *Kikuhime* bei *PicoPress* gali padėti ne tik tiriant sportinių gaminių komforto savybes, bet ir parenkant tinkamą drabužio konstrukcinių detalių išdėstymą-dizainą, atsižvelgiant į kūno morfologiją bei antropometrinius matmenis. Minėtų bandymų metu jutikliai pirmiausia pritvirtinami prie žmogaus odos (**1.2 pav., a**), paskui savanoris užsimauna sportinio tipo priglundusias tamprias kelnes (**1.2 pav., b**) ir atlieka įvairaus diapazono judesius. Tuo metu kompleksinė jutiklių sistema ir įrengimai fiksuoja slėgimo į odą parametrų vertes.



a



b

1.2 pav. Jutiklių išdėstymas žmogaus odos paviršiuje prieš bandymą (a) ir po tampriu drabužiu bandymo metu (b) (McLaren et al., 2010)

Deformacijų nustatymo metodų sąlygos, kai eksperimentams naudojami savanoriai, yra labai artimos gaminio eksploatavimo sąlygoms, tačiau turi ir trūkumų. Pirmiausia, ne visada lengva surasti patikimų savanorių, atitinkančių metodo reikalavimus. Kiekvieno žmogaus kūno proporcijos, psichofiziologinės savybės ar, pavyzdžiui, komforto samprata yra subjektyvi. Dėl minėtų ir kitų įvairių šalutinių veiksnių, eksperimentinių duomenų patikimumas ir paklaidos yra sąlyginės. Todėl dažnai komfortui vertinti ir deformacijų aprangoje tyrimams analizuoti yra naudojami savanorius pakeičiantys imitaciniai įrenginiai. Pavyzdžiui, bendrame projekte mokslininkai iš Kinijos ir Jungtinių Amerikos Valstijų panaudojo žmogaus kūno imitaciją – plastikinį manekoną – deformacijų bei įtempimų pasiskirstymui ir drabužio slėgio įtakai įvertinti, esant didelėms apkrovoms (ekstremaliomis eksploatacinėmis sąlygomis). Bandymų metu buvo naudojamas judančių taškų metodas (angl. *moving mesh method*), kai taško dydžio jutikliai specialia įranga užpurškiami ant manekeno. Pagal jutiklių perduodamą informaciją, kompiuterinėmis programomis buvo sudaromas erdvinis modelis (3D), kuriame matomi deformacijų, įtempimų ir slėgio pasiskirstymai bei didžiausios jų koncentracijos vietos (Ng et al., 2007). Panašūs eksperimentai atlikti ir mokslininkų grupės, kuri naudojo moters kūno pavidalo „išmanųjį“ manekoną, deformacijoms, įtempimams ir slėgiui odai vertinti

8 -iuose antropometriniuose taškuose (Wang et al., 2011) (**1.3 pav.**). Tyrimai atlikti naudojant skirtingos pluoštinės sudėties tamprias palaidines. Tyrimais nustatyta, kad didžiausias slėgis ir įtempių koncentracija yra krūtinės srityje, o mažiausia liemens ir šonkaulių srityse. Taip pat pastebėta, kad, didėjant elastano pluošto procentiniam kiekiui, didėja ir gaminio slėgis į kūną.



1.3 pav. „Išmanusis“ manekenas su 8-iais jutikliais manekeno antropometriniuose taškuose (a); eksperimento darbo vieta (b); A – dešiniojo peties jutiklis; B – krūtinės dešinės pusės jutiklis; C – krūtinės kairės pusės jutiklis; D – nugaros dešinės pusės jutiklis; E – šonkaulių dešinės pusės jutiklis; F – liemens kairės pusės jutiklis; G – klubų kairės pusės jutiklis; H – kairiojo klubo šoninės pusės jutiklis (Wang et al., 2011)

Mokslinių tyrimų organizacija *Toyobo* (2008), įsikūrusi Japonijoje, sukūrė metodą, leidžiantį įvertinti drabužio komforto savybes bei įvertinti įtempių koncentracijų vietas. Tyrimams buvo naudojami „išmanieji“ manekentai *TOM III* ir *SAM* (angl. *Sweating thermal mannequins TOM III and SAM*), kurie atliko daugybę judesių. Manekeno „odoje“ yra daugybė jutiklių, perduodančių informaciją kompiuterinėms sistemoms, kurios įvertina ir apskaičiuoja reikiamas charakteristikas, sudaromas trimatis modelio vaizdas, kuriame matomi įtempių pasiskirstymai.

Moksliniai drabužių komfortinių, deformacinių savybių tyrimai atliekami ne tik su savanoriais ar „išmaniaisiais“ manekonais, bet ir su įrenginiais, kurie imituoja tik kurią nors konkrečią kūno dalį, pavyzdžiui, ranką ar koją (Senthilkumar et al., 2012; Pearce et al., 2009). Beje, tiriami ne tik drabužiai, bet ir jų komponentai, pavyzdžiui, kojinių slėgis į kojos paviršių (Liu et al., 2010).

Nors savanorius pakeičiantys ar žmogaus kūno dalis imituojantys įrenginiai yra informatyvūs, tačiau brangūs, sudėtingi, jiems reikalinga papildoma įranga, pavyzdžiui, valdymo skydai, įvairūs priedai ar jų komplektacijos, kompiuterinė programinė įranga ir kt.

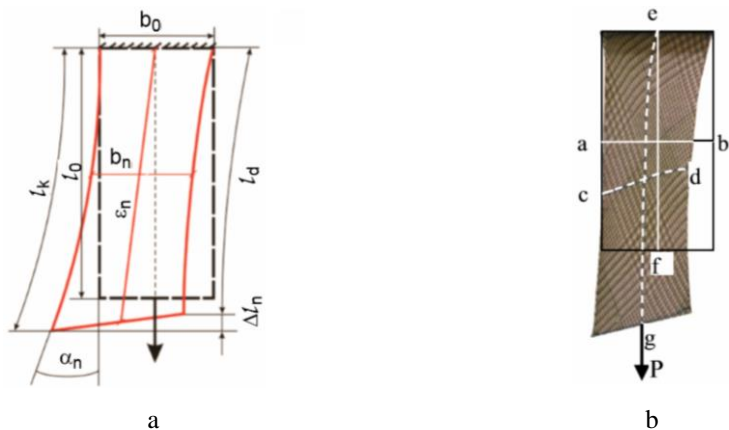
1.2. Deformuojamų tekstilės medžiagų elgsena

Anksčiau (žr. 1.1 skyrių) minėti moksliniai tyrimai yra daugiau skirti drabužio konstrukcijos, komforto, dėvėtojo judesių dinaminio aspekto, įtempių ir deformacijų koncentracijos dydžio bei jų koncentracijos vietai nustatyti, tačiau dažnai neatsižvelgiama į gaminio medžiagos deformacines savybes. Paprastai yra skiriamos trys pagrindinės, savo struktūra ir gamybos būdu besiskiriančios, tekstilės medžiagų

grupės – audiniai, mezginiai ir neaustinės medžiagos. Išsamiau bus aptariami mezginiai ir audiniai.

Tekstilės medžiagoms yra būdinga klampiatamprių kūnų elgsena, t. y. jų reakcija į išorinį poveikį vėluoja, įvairiais laiko momentais jų savybės yra skirtingos. Tokių medžiagų pluoštai, išoriškai paveikti, relaksuoja skirtingai laiko atžvilgiu: iš pradžių į išorinį poveikį reaguoja labai greitai, vėliau reakcijos greitis vis mažėja, galiausiai nusistovi tam tikra pusiausvyra. Visiškai pašalinus išorines apkrovas ir nustojus veikti išorinėms jėgoms, relaksuojančios sistemos palaispniui mažėjančiu greičiu grįžta į pradinę pusiausvyrą (Omeroglu et al., 2010; Stjepanovič et al., 2010; Urbelis et al., 2007; Kalinauskaitė, Dapkūnienė, 2007; Dapkūnienė et al., 2007). Tekstilės medžiagos yra **nevienalytės** (angl. *non-homogeneous*), nes joms būdingas daugiapakopiškumas, t. y. medžiagos sudarytos iš įvairių pakopų elementų, tokių kaip plaukeliai, gijos, siūlai ir t. t. Todėl kiekvienas atskiras medžiagos struktūros elementas daro įtaką medžiagos mechaninėms savybėms. Taip pat tekstilės medžiagos pasižymi nevienodomis savybėmis skirtingomis kryptimis – jos yra **anizotropinės** (angl. *anisotropic*) (Grėbliauskaitė et al., 2007; Hu et al., 2000; Hu, Lo, 2002; Sidabraitė, Masteikaitė, 2003). Mokslininkas R. Zouari ir kt. (2010) atliko eksperimentus su audiniais, kirptais septyniomis kryptimis kas 15° , kurie buvo veikiami tempimo apkrovų. Audiniai buvo įtvirtinami judančiuose lankstiniuose veržtuvuose, kuo mažiau apribojant bandinių poslinkius. Bandymais nustatyta, kad medžiagos yra anizotropinės, o jų mechaninė elgsena kinta netiesiškai dėl tarpusavio siūlų trinties, audinio gamybos procesų ir pačių pluoštų savybių bei elgsenos esant deformacijai. Taip pat nustatyta, kad mažiausi poslinkiai yra centrinėje bandinio dalyje išilgai tempimo krypties.

Panašia metodika medžiagų anizotropiškumą tyrė ir vertino mokslininkė R. Klevaitytė (Klevaitytė, Masteikaitė, 2008; Klevaitytė et al., 2010; Klevaitytė et al., 2006).



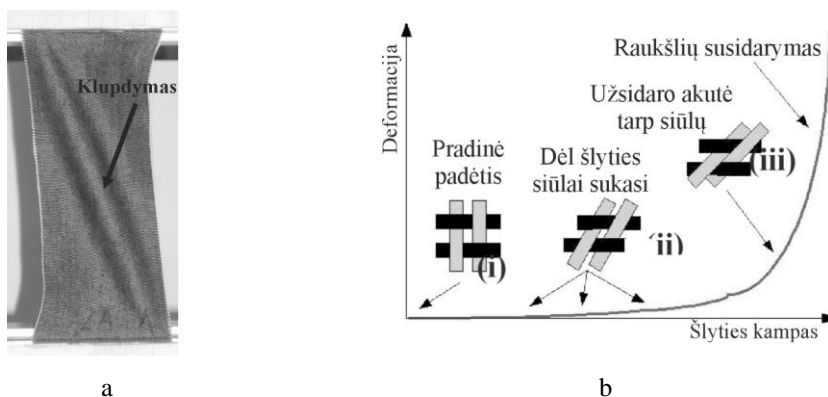
1.4 pav. Bandinio principinė schema prieš tempimą ir tempimo metu (a); nevienodas bandinio iššįsimas tempimo metu (b) (Klevaitytė, Masteikaitė, 2008)

Bandiniai buvo įtvirtinami stovo tipo relaksometre ir apkraunami pastovia apkrova. Bandiniai deformuojami pagal ciklą tempimas-atleidimas-poilsis. Taip

bandinys laikomas tam tikrą laiką (15 min.), paskui svoris nuimamas ir bandinys vėl išlaikomas tą patį laiko tarpą (**1.4 pav.**). Eksperimentu nustatyti tempimo jėgos vektorius ir bandinyje nubraižytų linijų deformacijos vektorių skirtumai. Taip pat pastebėta, kad audiniams būdingos netolygios deformacijos. Nors šio bandymo metodika nėra sudėtinga, tačiau reikalingas specialiai sukonstruotas standas. Be to, bandymų metodika sudaryta audiniams, kurie pasižymi didesniu struktūros elementų stabilumu, todėl ši metodika nėra tinkama kitoms, mažiau stabilioms, medžiagoms, pavyzdžiui, mežginiams.

R. Kovar su mokslininkų grupe (2005) nustatė, kad medžiagų anizotropiškumas labai priklauso nuo medžiagų sudarančių elementų anizotropiškumo. Buvo iškeltos ir dažniausios problemos, su kuriomis susiduriama vertinant medžiagų anizotropiškumą. Minėtų mokslininkų darbuose nustatyta, kad kuo didesnė dalis siūlų ar pluoštų išsidėsto atitinkama kryptimi, tuo didesnė medžiagos trūkimo jėga ir tuo mažesnė trūkimo ištįsa.

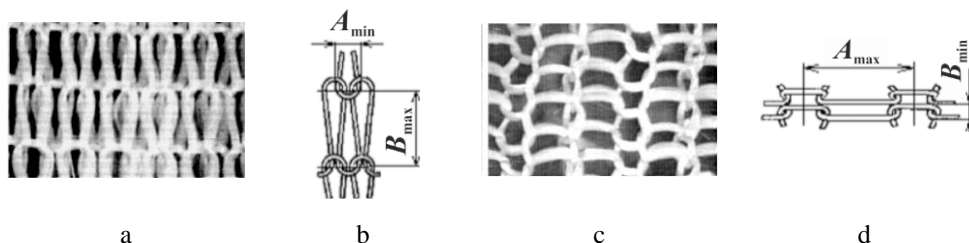
Nors deformuojamų (tempiamų, lenkiamų, gniuždomų, sukamų ir kt.) audinių ir mežginių elgsena yra skirtinga dėl skirtingo struktūros elementų išsidėstymo, tačiau jas deformuojant dažnai pasireiškia **klūpdyimo** (angl. *Buckling*) reiškiniai, nes šios medžiagos yra liaunos (Alamdardar, 2004; Glaser, Caccese, 2014; Zhu et al, 2007). Audiniuose siūlų sistemos yra statmenos viena kitai ir supintos tam tikra tvarka. Deformuojamą audinį veikia šlytis, kampas tarp siūlų sistemų keičiasi ir audinys suklumpa – audinio paviršiuje susidaro raukšlės (**1.5 pav., a**). **1.5 pav., b** parodyta kaip kinta deformuojamo šlytimi audinio išilginių ir skersinių elementų sandaros geometrija. Iš pradžių siūlai sukasi (ii) veikiami šlyties, paskui užsidaro akutė tarp gretimų siūlo elementų (iii), kol galiausiai siūlai, veikiami gniuždomo jėgų, linksta, susidaro raukšlės. Klūpdymui susidaryti įtakos turi audinio išilginių ir skersinių elementų geometrijos kitimas, taip pat trintis, atsiradusi siūlų perdangų vietose dėl statmenosios ir skersinės gniuždomo jėgų poveikio (Alamdardar, 2004; Alamdar, 2002; Bekampienė, Domskienė, 2009).



1.5 pav. Klūpdymo metu susidarančios raukšlės (a); audinio išilginių ir skersinių elementų elgsena esant šlyčiai (b) (Alamdardar, 2004)

Mežginiai yra sudaryti iš kilpomis išlankstytų ir persipynusių siūlų, kurie deformacijų metu iš pradžių išsitiesina, nes turi tam tikrą tąsumą, o paskui pynimą

sudarantys siūlai yra ištempiami (Luo, Verpoest, 2002; Stjepanovič et al., 2010; Mikučionienė et al., 2010).



1.6 pav. Ištempto lygiojo skersinio pynimo mezginys stulpelių kryptimi (a) (Luo, Verpoest, 2002) ir jo principinė schema (b) (Mikučionienė et al., 2010); įtempto lygiojo skersinio pynimo mezginys eilučių kryptimi (c) (Luo, Verpoest, 2002) ir principinė schema (d) (Mikučionienė et al., 2010)

Kai lygiojo skersinio pynimo mezginys tempiamas stulpelių kryptimi (išilgai), tai kilpų eilutės aukštis B didėja, o kilpų žingsnis A trūkimo metu mažėja (**1.6 pav., a, b**). Kai mezginys deformuojamas kilpų eilutės kryptimi (skersai), tai kilpų žingsnis didėja, o kilpų eilutės aukštis mažėja (**1.6 pav., c, d**). Beje, kilpų deformacija stulpelių kryptimi mažesnė nei eilučių kryptimi, o stipris žymiai didesnis, nes turi būti nutraukiamos dvi kilpų sudarančios siūlo šakos (Semani et al., 2003; Luo, Verpoest, 2002; Mikučionienė et al., 2010; Mickevičienė et al., 2010; Caallaro et al., 2007; Rypł et al., 2009).

Dažnai mokslininkai nesutaria, kurios medžiagos – mezginiai ar audiniai – yra sudėtingesnės struktūros ir patiria didesnę šlyties poveikį. Vienų mokslininkų teigiama, jog mezginiuose šlyties deformacijos yra mažos, lyginant su audiniais, ir audinio struktūra sudėtingesnė nei mezginių (Pan, Yu, 2007; Liu et al., 2005), tačiau kiti mokslininkai įrodo, kad mezginiai šlyties deformacijas patiria dažniau ir suklumpa greičiau, nes yra „minkštesnės“ (Zhang et al., 2007; Li, Zhang, 2008). R. Čiukas su kitais mokslininkais (1996a, 1996b, 1997; Matukonis et al., 1999) teoriškai prognozavo ir eksperimentiškai nustatė skersinio mezginio (kombinuoto šveicariško pikė, numegzto iš pusvilnonių siūlų) pynimo eilučių ir stulpelių deformacijas. Buvo pastebėta, kad mažiausiai deformuojasi antra ir ketvirta eilutės, nes jos sudarytos iš tų pačių pynimo elementų. Pagal atlikto teorinio ir eksperimentinio mezginio deformacijų tyrimo duomenis, galima geriau suprasti vienašio tempimo procesą. Galima prognozuoti, kad jei kilpų įtempimas visose gaminių dalyse būtų vienodas, tai megtame gaminyje skirtingų pynimų detalės eksploatacijos (dėvėjimo) metu turėtų deformuotis vienodai.

Pastaruoju metu medžiagų mechaninėms ir drabužio komforto savybėms gerinti į medžiagos struktūrą įterpiami elastano siūlai. Elastanas yra sintetinis elastomerinis pluoštas, kurio makromolekulės sudarytos iš stangrių poliuretano ir lanksčių alifatinių poliesterių ar polieterių grandinių atkarpų, dėl kurių kaitos makromolekulėje šie polimerai yra labai elastingi, turi aukštą stiklėjimo temperatūrą. Taip pat elastano pluoštai pasižymi dideliu tempimo stipriu ir dideliu tampros moduliui. Elastomerai, pavyzdžiui, elastingas termoplastikas elastano pluoštas, pasižymi mažu tamprumo moduliui, bet dideliu deformuojamumu. Elastano pluoštas

gali išsitempti iki 4–7 kartų bei sugrįžti į pirminę būseną. Medžiagos, kuriose yra net ir maža procentinė dalis elastano (1 %–2 %) yra tvirtos, mažiau glamžosi ir jas kur kas lengviau prižiūrėti nei medžiagas be elastano. Toks pluoštas taip pat atsparus saulės, sūraus vandens poveikiui, išlieka elastingas visą drabužio eksploatacijos laikotarpį (Abdessalem et al., 2009; Gorjanc, Bukošek, 2008; Sadek et al., 2012; Senthikumar et al., 2011; Singha, 2012; Gokarneshan, Thangamani, 2010; Bagheaei et al., 2010; Beceren et al., 2010; Das, Chakraborty, 2013).

Nors medžiagos su elastano pluoštu pasižymi geromis relaksacinėmis savybėmis, tačiau kartais joms yra būdingas medžiagos kraštelių susisukimas. Šį reiškinį tyrinėjo *D. Šajn* su mokslininkų grupe (2005a, 2005b) ir buvo nustatyta, kad medžiagos, kurių sudėtyje yra didesnis procentinis kiekis elastano, relaksuoja ilgiau nei medžiagos, kurių sudėtyje mažiau elastano. Taip pat nuo elastano procentinio kiekio labai priklauso medžiagos kraštelių susisukimo intensyvumas.

Moksliniais tyrimais nustatyta, kad medžiagų su elastano siūlais ir be elastano siūlų mechaninės savybės gerokai skiriasi, tačiau mechaninių charakteristikų skirtumas tarp skirtingo elastano procentinio kiekio medžiagų yra nedidelis (Ortlek, 2006; Ozdil, 2008; Dgouib et al., 2006). Mokslininkės *D. Šajn* ir *V. Bukošek* (2007) atliko eksperimentus su medžiagomis, kurių procentinis elastano kiekis buvo 2 %, 4 % ir 6 %. Eksperimentų metu nustatytų tūsumo ir stiprumo rodiklių verčių skirtumas tarp skirtingą procentinį kiekį turinčių medžiagų buvo nežymus.

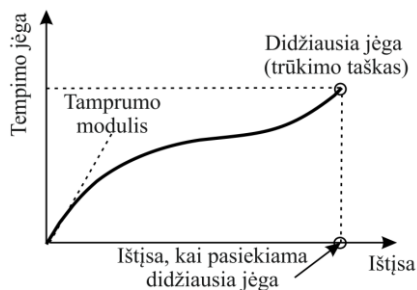
Tekstilės medžiagų deformacijos yra sudėtingos, jos deformuojasi kompleksiskai dėl anksčiau minėtos tekstilės medžiagų nehomogeninės sandaros bei anizotropiškumo skirtingomis kryptimis. Vienašio tempimo metu, dėl įtempių ir šlyties poveikio, įvairiomis kryptimis kirptų medžiagų deformacijos kryptis ne visada sutampa su tempimo jėgos kryptimi, o net ir nedidelių apkrovų poveikis medžiagoms sukelia sudėtingą reliatyvų judėjimą tarp siūlų (Sun-Pui et al., 2005).

1.3. Tekstilės medžiagų deformacinių savybių analizės metodai

Įvairios tekstilės medžiagos turi labai skirtingą sandarą, joms būdinga savybių anizotropija, todėl sudėtinga vertinti ir prognozuoti jų elgseną (Pan, Yu, 2007). Kuo medžiagos sandara sudėtingesnė, tuo sudėtingesnės gali būti medžiagą veikiančių jėgų sistemos. Todėl skirtingų medžiagų, net analogiško pobūdžio savybės, dažnai pasireiškia skirtingais požymiais ir išreiškiamos skirtingais kiekybiniais parametrais.

Tempimas įvairiomis kryptimis, šlytis, lenkimas yra poveikiai, sukiantys būdingiausias tekstilės medžiagų deformacijas. Tempimo savybės yra vienos svarbiausių, kurios apibūdina eksploatuojamos medžiagos elgseną (Luo, Verpoest, 2002; Bekampienė, Domskienė, 2009; Ozdil, 2008; Hu, 2008; Shishoo, 1995). Tam gali būti naudojamas vienašis, daugiaašis tempimas, suardant ar nesuardant bandinį.

Tekstilės medžiagoms būdingas plastiškumas, panašus į klampiųjų skysčių takumą. Tamprumu ir plastiškumu pasižyminčius kūnus veikiančių jėgų ir deformacijos santykis kinta netiesiškai (Pan, Yu, 2007). Tai įrodo **tempimo diagrama**, gauta tempiant medžiagų bandinius iki jų suirimo (**1.7 pav.**). Tempimo diagrama yra informacijos šaltinis apie tekstilės medžiagų mechanines savybes, tokias kaip medžiagos stiprumas, tūsumas ir t. t. (Hu, 2008).



1.7 pav. Tempimo diagrama, gauta suardant bandinį (Hu, 2008)

Vienaašis tempimas iki bandinio suirimo taikomas nustatant pagrindines medžiagos mechanines charakteristikas, tokias kaip trūkimo stipris ar santykinė išėjimas, tačiau deformuojamame bandinyje veikia ne tik tempimo jėgos, bet gali susidaryti tokie reiškiniai, kaip šlytis ir klupdymas. Būtent tiriant, prognozuojant ir analizuojant tokius reiškiniai, neužtenka vien tik bandymų suardant medžiagas, reikalingi kur kas išsamesni ir sudėtingesni tyrimai (Alamdar, 2004; Kisilak, 1999; Klevaitytė, Masteikaitė, 2008; Klevaitytė et al., 2010; Lebrun et al., 2003; Galliot, Luchsinger, 2010a; Galliot, Luchsinger, 2010b; Semani et al., 2003; Luo, Verpoest, 2002; Celik et al., 2005; Tsai et al., 2002; Chen, Ye, 2013; Senthilkumar et al., 2012; Wang et al., 2011; Derler et al., 2007; Huysmans et al., 2001).

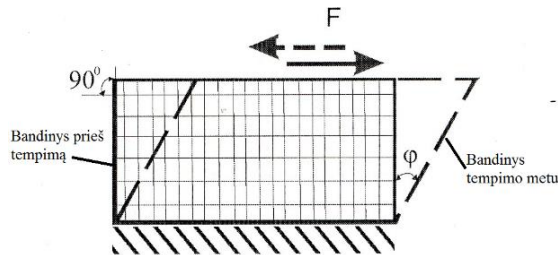
Šlyties jėgų veikiamų tekstilės gaminių savybės yra svarbios keliais požiūriais. Nuo drabužių audinio ar mezginio pasipriešinimo šlyties deformacijai priklauso gaminių minkštumas, standumas, glamžumas, drabužio kritumas, pasipriešinimas erdviniam formavimui ir kt. (Alamdar, 2004; Kisilak, 1999; Klevaitytė et al., 2010; Lebrun et al., 2003; Galliot, Luchsinger, 2010a; Galliot, Luchsinger, 2010b; Hu, lo, 2002; Glaser, Caccese, 2014; Zhu et al., 2007; Alamdar, 2002; Caallaro et al., 2007). Šlyties savybių prognozavimas yra svarbus ne tik audiniams ar mezginiams, bet ir tekstilės kompozitų formavimui, laminuotoms ar dengtomis tekstilės medžiagoms (Zhu et al., 2007; Marazas et al., 2007; Harrison et al., 2004; Masteikaitė, Sacevičienė, 2009; Yingying et al., 2013; Boisse et al., 2011; Chen et al., 2011).

Mokslininkai *B. Al-Gaadi* ir *M. Halasz* (2013) išskyrė tris pagrindinius ir plačiausiai naudojamus šlyties deformacijos vertinimo metodus:

- 1) *KES-F* (ang. *Kawabata Evulation System of Fabrics*);
- 2) Įstrižo bandinio tempimo metodas (angl. *Bias Extension Test*);
- 3) Rėmelio metodas (angl. *Picture Frame Test*).

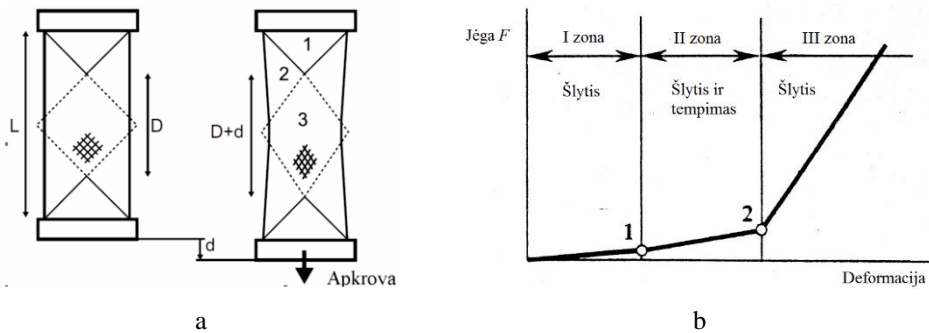
KES-F metodo įrenginiai veikia pagal principą, kuriam būdingas jėgų, momentų ar energijos matavimas deformuojant bandinį. *KES-F* yra skirtingus vertinimo metodus turinti testavimo sistema. Tekstilės medžiagų kokybei nustatyti plačiai naudojama *KES-FB* sistema, kuria tiriama tekstilės medžiagų mechaninė elgsena esant mažoms, t. y. dėvėjimo lygio apkrovoms. Net ir maža jėga tempiama tekstilės medžiaga deformuojasi, atsiranda šlytis, o jos bendrąją deformaciją sudaro tamprioji, elastinė ir liekamoji deformacijos (Hu, Zhang, 1997; Bishop, 1996; Tokmak et al., 2010; Yick, Cheng, 1996).

Pagal *KES-F* metodą, stačiakampio formos bandinys yra išspraudžiamas į veržtuvus – viršutinį nejudamą ir apatinį, kurį galima laisvai perslinkti horizontalia kryptimi. Apatinis veržtuvas slenka horizontaliai, atsiranda šlyties deformacija (**1.8 pav.**). *KES-F* metodu medžiagos deformuojamos mažų deformacijų intervalu iki 8° , nesuardant jų struktūros. Labiau deformuojamajame bandinyje susidaro įstriža raukšlė, kuri rodo, kad atsirado sudėtingos deformacijos, dar daugiau deformavus bandinį, gaunamos labai iškreiptos šlyties charakteristikos. Todėl *KES-F* metodas yra ribotas medžiagų asortimento atžvilgiu. Šiuo metodu sudėtinga įvertinti mezginių šlyties charakteristikas, kadangi 8° šlyties kampas šioms medžiagoms yra nepakankamas (Klevaitytė et al., 2010; Klevaitytė et al., 2006; Masteikaitė, Sacevičienė, 2009; Chen et al., 1995).



1.8 pav. Šlyties nustatymas *KES-F* metodu (Hu, Zhang, 1997; Bishop, 1996; Tokmak et al., 2010; Yick, Cheng, 1996)

Kitas plačiai naudojamas šlyties nustatymo metodas yra įstrižo (45° kampas į metmenų siūlą) audinio tempimas, esant mažoms apkrovoms (**1.9 pav., a**) (Galliot, Luchsinger, 2010; Bishop, 1996; Tokmak et al., 2010; Yick, Cheng, 1996; Bekampienė, Domskienė, 2010; Domskienė, Strazdienė, 2002; Cavallaro et al., 2007; Gereke et al., 2013).



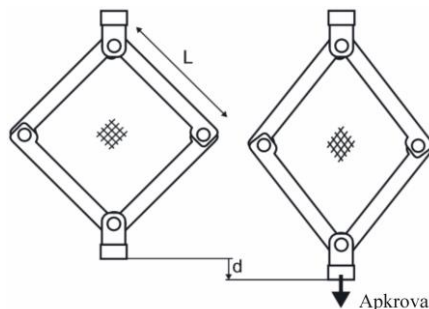
1.9 pav. Įstrižo (45° kampas į metmenų siūlą) bandinio tempimas (a) (Galliot, Luchsinger, 2010); šlyties ir tempimo jėgų atsiradimas tempiant bandinį (b) (Domskienė, Strazdienė, 2002)

Įstrižas bandinys tvirtinamas apatiniame ir viršutiniame veržtuvuose. Viršutinis veržtuvas tempia bandinį aukštyje nustatyta apkrova ir jame atsiranda šlyties deformacija. Tempiant įstrižą bandinį susidaro trys skirtingos deformacinės zonos. **III** zonoje, kuri yra centrinė bandinio dalis, audinio metmenys ir ataudai yra neįtvirtinti, todėl čia susidaro grynoji šlytis. **II** zonoje yra įtvirtinta tik viena siūlų sistema, veikia

įtempiai ir deformacijos, bet nesusidaro grynoji šlytis. **I** bandinio zonoje abi siūlių sistemos yra įtvirtintos, veikia dideli įtempiai, mažos deformacijos (**1.9 pav., b**).

Šis metodas yra *KES-F* metodo alternatyva, pasižymintis paprasta ir iš dalies nebrangia tyrimo sistema, kuria galima apytiksliai apskaičiuoti šlyties kampo pokytį kinematinėmis lygtimis, tačiau šlyties kampo pokytis nėra vienodas visame bandinyje. Mokslininkų grupė *Chen S., Ding X. ir H. Yi* (2007) tyrinėjo polivinilchloridu dengtų medžiagų anizotropines savybes, tempdami įstrižai kirptą bandinį. Buvo pastebėtas pagrindinis šio metodo trūkumas – nevienodas santykinės ištiesos pasiskirstymas, dėl kurio sudėtinga tiksliai apskaičiuoti šlyties kampą net naudojant vaizdų analizės metodus. Be to, įstrižo bandinio tempimo metodas tinka nesudėtingo pynimo audinių deformacinėms savybėms vertinti, tačiau sunkiai pritaikomas mezginiams. Įstrižai kerpant mezginį yra pažeidžiamas kilpos lankas, deformuojama medžiaga yra, sukasi krašteliai – gaunama netiksli informacija apie medžiagos deformacinę gebą.

Rėmelio metodu, priešingai nei anksčiau minėtais šlyties vertinimo metodais, šlytis vyksta visame bandinio plote. Rėmelio metodu tiriami bandiniai tempiami vienašio tempimo mašinomis su specialios ir sudėtingos konstrukcijos įtaisu – rėmeliu. Tempiant bandinius rėmelio metodu, taisyklingos kvadrato formos bandinys įtvirtinamas rėmelyje ir, nustačius šlyties kampą, atliekamas bandinio tempimas – kvadrato formos rėmelis virsta rombu (**1.10 pav.**) (Galliot, Luchsinger, 2010a; Galliot, Luchsinger, 2010b; Gereke et al., 2013; Chen et al., 2007; Zhang et al., 2013; Hivet et al., 2012; Taha et al., 2013; Galliot, Luchsinger, 2011).

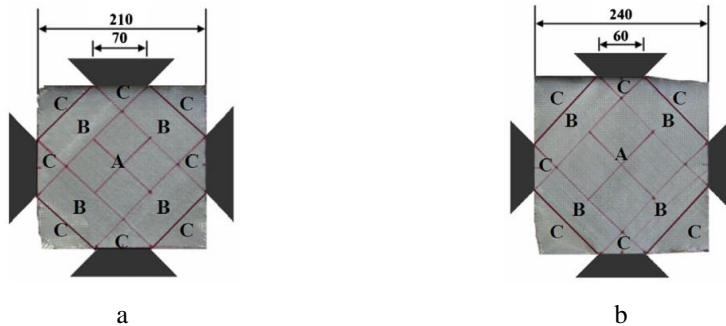


1.10 pav. Bandinio tempimas rėmelio metodu (Galliot, Luchsinger, 2010)

Idealiomis sąlygomis, jei kūnas būtų homogeniškas ir izotropinis visomis kryptimis, rėmelio metodu būtų paprasta vertinti šlyties charakteristikas. Tačiau, audinius ir mezginius tiriant rėmelio metodu, bandinio išilginė ir skersinė siūlių sistemos gali pailgėti tik tam tikromis rėmelio vertėmis, o tekstilės medžiagoms būdingas anizotropiškumas. Be to, rėmelio metodas yra pakankamai sudėtingos konstrukcijos metodas. Remiantis literatūros apžvalga pastebėta, kad rėmelio metodas dažniausiai taikomas tiriant kompozitų, laminuotų ar dengtų polimeriniu sluoksniu medžiagų šlyties charakteristikas (Galliot, Luchsinger, 2010a; Galliot, Luchsinger, 2010b; Gereke et al., 2013; Chen et al., 2007; Zhang et al., 2013; Hivet et al., 2012; Taha et al., 2013; Galliot, Luchsinger, 2011).

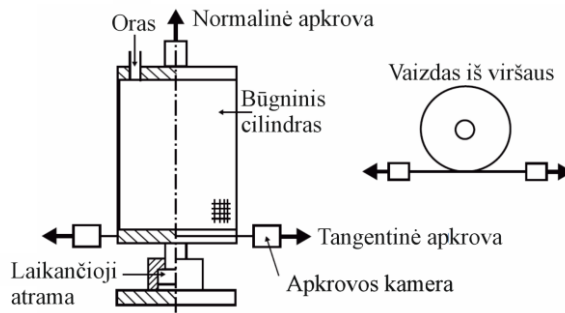
Vystantis šiuolaikinėms technologijoms, sukuriama vis daugiau naujų tikslesnių deformacinių savybių vertinimo metodų arba, atsižvelgiant į ankstesnių metodų trūkumus, tobulinami jau sukurti. Pavyzdžiui, mokslininkas *P. Harrison* (2012;

Harrison et al., 2012), remdamasis įstrižo bandinio tempimo metodu, patobulino bandinio formą ir jo įtvirtinimą, t. y. panaudojo kvadrato, o ne stačiakampio formos bandinius. Tokie bandiniai įtvirtinami ne tik apatiniame ir viršutiniame, bet ir šoniniuose veržtuvuose. Bandiniui buvo parinkti veržtuvai, mažesni nei bandinio ilgis ir plotis, paliekant laisvus C zonos kraštus (**1.11 pav.**). Nors naujas zonų sužymėjimas suteikia daugiau tikslesnės informacijos apie klupdymo reiškinių susidarymą ir šlyties kampo nustatymą, tačiau bandymų metu nepastebėta ryškių naujos bandinio formos privalumų. Šis metodas, kaip ir įstrižo bandinio metodas, tinka nesudėtingo pynimo audinių deformacinėms savybėms vertinti, tačiau sunkiai pritaikomas mezginiams. Taip pat reikalinga speciali įranga, leidžianti bandinius įtvirtinti keturiuose taškuose.



1.11 pav. Įstrižo bandinio tempimas, naudojant dviejų skirtingų matmenų bandinius bei veržtuvus (Harrison et al., 2012; Harrison, 2012)

Į *KES-F* metodą panašus, mažiau žinomas šlyties tyrimo metodas, kuriame naudojamas cilindro formos būgnas (**1.12 pav.**).

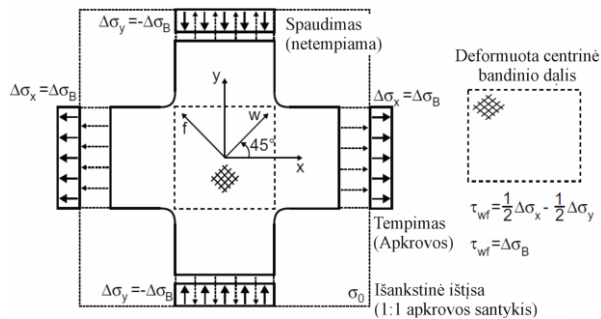


1.12 pav. Šlyties nustatymas cilindro formos būgnu (Skelton, 1971)

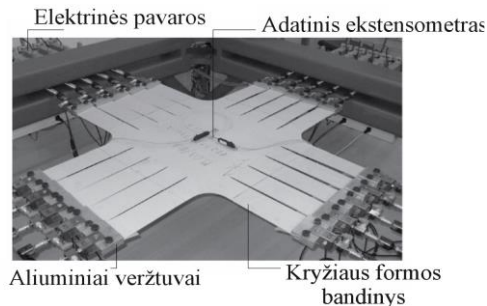
Cilindro formos medžiagos bandinys įtvirtinamas tarp dviejų diskų. Sistema yra sumontuojama vienakrypčio deformavimo įrenginyje, veikia pastovi ašinė tempimo jėga. Apatiniame būgno diske sukuriamas sukimo momentas ir taip medžiagoje sukeliama šlytis. Cilindrinio būgno metodu vyksta ir tempimas, ir sukimas, t. y. prie cilindro pritvirtintas bandinys tuo pat metu tempiamas išilgai tempimo ašies ir dėl savo cilindrinės formos deformuojamas dviem kryptim (Turner et al., 2008; Skelton, 1971). Pastarąjį metodą plačiau nagrinėjo mokslininkas *J. Skelton* (1971), kuris pastebėjo, kad cilindro formos būgnu deformuojant standžias medžiagas, pavyzdžiui,

dengtas polimeriniu sluoksniu ar laminatus, pasireiškia žymus priešinimasis šlyčiai, priešingai nei audiniams ar mezginiams. Cilindro formos būgnas yra pakankamai sudėtingas įrenginys. Be to, labai liaunas ir tąsias medžiagas sunku pritvirtinti prie būgno ir jų neištempti. Tiriant tokiu metodu dar būtina įvertinti ir trintį tarp būgno paviršiaus ir medžiagos.

Mokslininkas R. Blum su bendraautoriais (2004) yra pristatęs dvikrypčio tempimo metodą, kai bandinys yra kryžiaus formos ir bandiniai kerpami 45° tempimo kryptimi (1.13 pav., a). Kryžiaus formos bandinys yra įtvirtinamas aliuminiuose veržtuvuose, o centrinėje bandinio dalyje esantis adatinis ekstensometras fiksuoja deformacijas dvikrypčio tempimo metu.



a

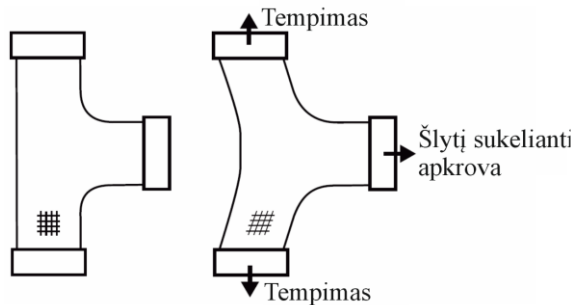


b

1.13 pav. Kryžiaus formos bandinio metodo principinė schema (a) (Galliot, Luchsinger, 2011); kryžiaus formos bandinys įtvirtintas aliuminiuose veržtuvuose (b) (Galliot, Luchsinger, 2010)

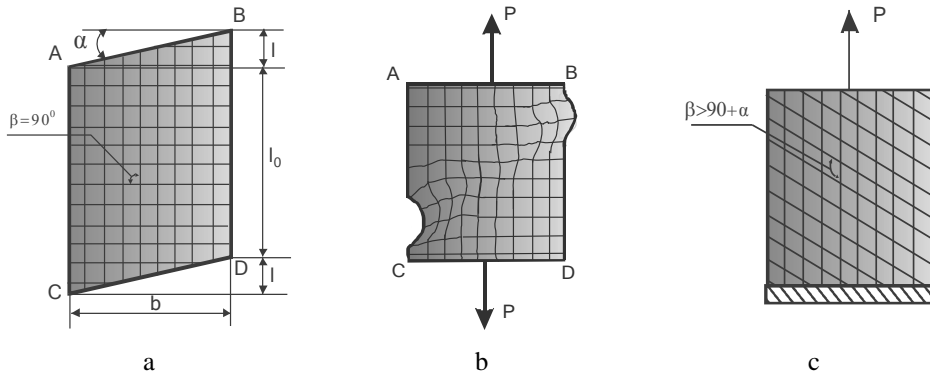
Tekstilės medžiagos, dėl savo plonasienės struktūros, neišlaiko apkrovų spaudimo ir tįsta dar tik pradėjus apkrovoms veikti. Todėl kryžiaus formos bandinio tempimo metu tįsta tik viena bandinio pusė ir grynoji šlytis susidaro bandinio centre (1.13 pav., b) (Galliot, Luchsinger, 2010a; Galliot, Luchsinger, 2010b; Blum et al., 2004; Galliot, Luchsinger, 2011; Makris et al., 2010; Carvelli et al., 2012; Bogner, Blum, 2008). Kryžiaus formos bandinio metodo trūkumas – sudėtingas įrenginys ir bandinio įtvirtinimas. Taip pat įtvirtinus liaunas ar tąsias tekstilės medžiagas, centrinė bandinio dalis išsilenkia, kai kuriais atvejais gaunama netiksli informacija apie bandinio deformacinę gebą.

Kitas metodas, panašus į kryžiaus formos bandinio metodą, yra T formos bandinio tempimas, kai šlyties reiškinys sukeliamas tempiant trečiąją neįtvirtintą bandinio dalį (**1.14 pav.**) (Galliot, Luchsinger, 2010; Vysochina et al., 2005). Tokio metodo tyrimo įranga yra sudėtinga, brangi. Bandinio matmenys 1000 x 1000 mm², todėl sunaudojama daug eksperimentinės medžiagos ir gerokai padidėja eksperimento kaštai.



1.14 pav. T formos bandinio principinė schema (Vysochina et al., 2005)

Mokslininkė V. Sacevičienė (Masteikaitė, Sacevičienė, 2009; Masteikaitė, Sacevičienė, 2010) pasiūlė šlyčiai tirti gretasienio formos bandinio metodą (**1.15 pav., a**). Įtvirtintus bandinį spraustuvuose, dėl papildomų bandinio kraštelių susidaro raukšlė (**1.15 pav., b**). Bandinys tempiamas tol, kol visiškai išsitiesina ir įgauna stačiakampio formą, o kampas β pakinta nuo 90° iki $90^\circ + \alpha$ (**1.15 pav., c**).

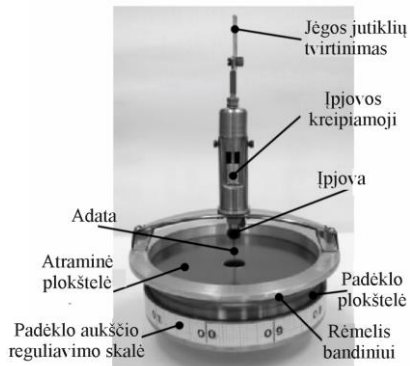


1.15 pav. Gretasienio formos bandinio principinė schema (a); bandinys įtvirtintas spraustuvuose prieš tempimą (b) ir po tempimo (c) (Masteikaitė, Sacevičienė, 2009)

Tokiu metodu šlyties reiškinys medžiagoje sukeliamas, tempiant į priešingas puses išilginius jos struktūros elementus, kurie pasuka skersinius elementus. Kiekvienas medžiagos struktūros elementas, veikiamas priešingos krypties jėgų, iš stačiakampio virsta į rombą. Išilginiai medžiagos siūlai, priešindamiesi trinties jėgai, persigrupuoja ir išsitiesina slinkdami vienas kito atžvilgiu, o skersiniai siūlai sukasi apie siūlų sankirtos taškus daugiau susirangydami. Bandinys tempiamas tol, kol susidariusios klostės visiškai išnyksta (vertinant vizualiai). Šiuo metodu buvo tiriamos daugiasluoksnės standžios medžiagos (laminatai, dengtos polimerine plėvele ar

polimerine danga medžiagos), tačiau neatlikta tyrimų su kitomis, įvairios struktūros tekstilės medžiagomis.

Erdvinėms deformacijoms vertinti dažnai naudojami dviašio deformavimo metodai, pavyzdžiui, membraniniai, puansoniniai bei apskrito bandinio ištraukimas pro kiaurymę (Al-Gaddi, Halasz, 2013; Hasani, 2009; Kim, Lewis, 1999; Seidel, 2001; Strazdienė et al., 2003). Mokslininkai *M. Gutauskas, E. Strazdienė* ir *V. Daukantienė* (Strazdienė et al., 2003; Strazdienė et al., 2002; Grinevičiūtė et al., 2010; Strazdienė et al., 1997; Strazdienė, Gutauskas, 1999; Truncytė, Gutauskas, 2006; Daukantienė, Gutauskas, 2002; Strazdienė et al., 2003; Daukantienė et al., 2003; Saukaitytė et al., 2004) tyrė „grifo“ reiškinį erdvinio deformavimo metodais, t. y. membraniniais, puansoniniais deformavimo prietaisais. Minėti mokslininkai taip pat buvo vieni iš bendraautorių, sukūrusių ir tobulinusių *KTU-Griff-Tester* prietaisą (**1.16 pav.**). Nors šis prietaisas yra tinkamas įvairių tekstilės medžiagų eksploatacinėms savybėms vertinti, tačiau jo konstrukcija yra sudėtinga.



1.16 pav. *KTU Griff-Tester* prietaisas (Strazdienė et al., 2003)

Tekstilės medžiagų ir aprangos deformacinėms savybėms tirti taip pat labai svarbi ir siūlės įtaka, nes drabužių detalės tarpusavyje yra jungiamos siūlėmis. Drabužiuose dažniausiai naudojami siūliniai detalių sujungimai. Tekstilės gaminiuose, o ypač sportiniuose ar laisvalaikio drabužiuose, dažnai pasitaiko detalių, kurių kirptiniai kraštai orientuoti įvairiomis kryptimis. Sujungus tokias detales siūlėmis, gaunami junginiai, kurių kryptis nesutampa su tempimo jėgos veikimo kryptimi. Todėl gaunamos netolygios deformacijos, kurių pasekmė – siūlių persislinkimai ar išėjimai, detalių išsikreivėjimas, įvairios raukšlės (Malčiauskienė et al., 2011; Pasayev et al., 2011; Pasayev et al., 2012; Malčiauskienė et al., 2011; Nayak et al., 2010).

Mokslininkė *R. Klevaitytė* (Klevaitytė, Masteikaitė, 2005; Klevaitytė, Masteikaitė, 2006; Klevaitytė, Masteikaitė, 2008) taip pat tyrinėjo audinių siūlinių junginių deformacijos netolygumus, kai bandinį sudaro ta pačia ar skirtingomis kryptimis kirptos detalės. Pastebėta, kad bandinyje veikiant tempimo jėgoms, netolygiai deformuojasi ne tik junginio detalės, bet ir siūlė. Eksperimentais nustatyta, kad skersinės siūlės panaudojimas sumažina junginio detalių skersinę deformaciją jėgos veikimo kryptimis, nesutampančiomis su metmenų ir ataudų kryptimis bei detalių skersinė santrauka priklauso nuo jų kirpimo krypties.

Dažnai ties gaminių siūlėmis pastebimas klupdymo reiškinys – raukšlių susidarymas, pačios siūlės raukšlėjimasis (Nassif, 2013; Midha, Kumar, 2015; Fernando, Jayawardean, 2014). Mokslininkai *H-A. Kim ir S.J. Kim* (2011) eksperimentais siekė tiksliai nustatyti raukšlių siūlėje susidarymo priežastis. Pastebėta, kad raukšlių susidarymo priežastis gali būti ne tik skirtinga detalių orientacija, bet ir siuvimo įrenginio komponentų nesuderinimas (kojelės prispaudimas į medžiagos paviršių, šaudyklės siūlo įtempimas) ar netinkami siuvimo režimai, pavyzdžiui, siuvimo greitis.

Atlikta nemažai mokslinių darbų, analizuojant ir vertinant siūlės įtaką medžiagų drapiravimuisi (kritumui) ir lenkiamajam standumui (Vaitkevičienė, Masteikaitė, 2003; Hu et al., 1989; Jevšnik, Žunič-Lojen, 2007; Hu, Chung, 2000; Choudhary, Goel, 2013). Mokslininkas *N. Ucar* ir kt. (2004) analizavo penkiasišio overloko 516 dygsnio tipo siūlės įtaką mezginių kritumo savybėms. Tyrimais nustatytas neįprastas reiškinys, kad medžiagos kritumas su siūle, kai bandiniai kirpti išilgine kryptimi, yra mažesnis, nei su siūle, kai bandiniai kirpti skersine kryptimi. Tuo tarpu be siūlės medžiagos kritumas didesnis išilgine kryptimi kirptuose bandiniuose, nei skersine kryptimi kirptuose bandiniuose. Be to, siūlės kryptis veikė medžiagos kritumo rodiklių pokyčius net iki 95 %.

Dar vienas dažnai pasitaikantis nepageidaujamas reiškinys, turintis įtakos medžiagų deformacinių savybių ir kokybės pokyčiams – tai siūlės irimas, siūlų prasislinkimas. Remiantis moksliniais tyrimais, siūlės irimas priklauso ne tik nuo medžiagos pynimo, siūlės tipo, dygsnių tankumo ir siuvimo siūlo įtempimo, tačiau ir nuo siūlų tarpusavio trinties, kampo kitimo tarp medžiagą sudarančių siūlų, siūlų tankumo ir lenkiamojo standumo (Gurarda, 2008; Lin, 2004; Gurarda, Binnaz, 2010; Bulut, Sular, 2012). Mokslininkas *K. Yildirim* (2010) atliko eksperimentus, kuriais siekta nustatyti medžiagos siūlų tankumo, siūlės dygsnio tankumo ir ilginio tankio įtaką siūlės irimui sėdynių apmušalams skirtuose audiniuose. Tyrimai parodė, kad vis dėlto siūlės irimui didesnės įtakos turi medžiagos fizikinės savybės, nei siūlės dygsnių tankumas.

Mokslininkės *V. Daukantienė* ir *M. Lapinskienė* (2012) tyrė ir vertino audinių siūlų slydimą ties siūlėmis, taikydamos 5 skirtingus deformavimo būdus. Bandymais nustatyta, kad siūlių prasislinkimas priklauso nuo deformavimo būdo, nuo siūlės užlaidos tipo, audinio pynimo ir krypties. Pastebėta, kad tempiant audinius su siūlėmis, kurių užlaidos laisvos, jų irimas yra simetriškas. Siūlėse, kurių užlaidos nulenktos į vieną pusę, prie peltakio siūlai sutankėja, keičiasi siūlės geometrija. Nors metodas yra nesudėtingas ir artimas drabužių dėvėjimo sąlygoms, tačiau skirtas tik siūlinių sujungimų persislinkimui audiniuose vertinti

Medžiagos deformacinėms savybėms įtakos turi ne tik įvairių tipų siūlės, bet ir peltakiavimo raštai. Mokslininkės *P. Bekampienė* ir *J. Domskienė* (2010) išsamiai nagrinėjo lokalaus klupdymo reiškinį, tempdamos įstrižai kirptus audinius. Vienas iš bandymų yra peltakiavimo rašto ir vietos bandinyje įtakos nustatymas audinių deformacinėms savybėms bei formos stabilumui (Bekampienė, Domskienė, 2010). Pastebėta, kad kai kurių peltakių raštais išsiuvinėti bandiniai nesuklumpa, sumažėja deformacijų netolygumas. Nors siūlės, priklausomai nuo medžiagos fizikinių savybių, daro įtaką medžiagos deformacinei elgsenai, tačiau gaminiuose, kuriuose siekiama

padidinti medžiagos formos stabilumą, siūlės yra pageidaujamas, o dažnai ir būtinas veiksnys.

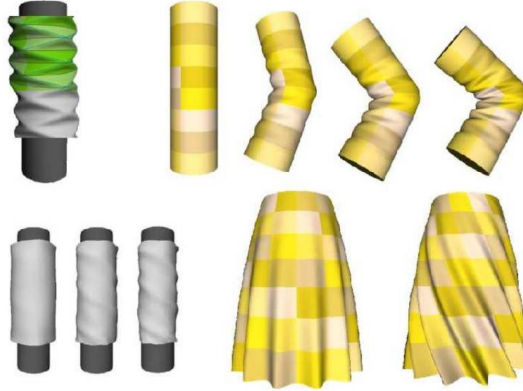
Apžvelgus įvairius tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinių savybių vertinimo metodus pastebėta, kad daugelis metodų yra sudėtingi arba jiems reikalinga brangi, sudėtinga įranga, priedai. Taip pat pasigendama universalių metodų, kuriais būtų galima vertinti ne tik skirtingos struktūros medžiagų, bet ir jų junginių deformacines savybes. Trūksta metodų, leidžiančių viena eksperimentine metodika įvertinti įvairias deformacinių savybių charakteristikas, ir taip sumažinti bandinių skaičių, eksperimentinių medžiagų kiekius ir kaštus bei laiko sąnaudas. Nors siūlių kokybės nustatymo metodų ir mokslinių tyrimų netrūksta, tačiau siūlės įtakos medžiagų stabilumui, tūsumui ir paslankumui nustatyti išties pasigendama.

1.4. Aprangos gaminių ir tekstilės medžiagų deformacinės elgsenos modeliavimas

Pastaraisiais metais sparčiai išaugo mokslinių tyrimų skaičius, kai tekstilės medžiagų ir aprangos deformacinės bei komforto savybės tiriamos ir vertinamos 3D kompiuterinio modeliavimo metodais (Hedfi et al., 2011; Lim, Istook, 2011; Hong et al., 2011; Liu et al., 2010; Lin et al., 2011; Dan et al., 2013; Jevšnik et al., 2014). Mokslininkų nuomone, virtualus trimatis gaminio vaizdas aprangos pramonėje naudojamas ne tik realiam vaizdui sukurti, bet ir dėl galimybės imituoti tekstilės medžiagų mechaninių savybių elgseną be būtinybės pagaminti realų gaminį (Ancutienė et al., 2014). Mokslininkas K. *Lekeckas* (Lekeckas, Strazdienė, 2012; Lekeckas, Strazdienė, 2014; Ancutienė et al., 2014) atliko nemažai mokslinių tyrimų, skirtų aprangos pramonei. Vienuose iš savo su bendraautoriais aliktų mokslinių darbų K. *Lekeckas* (Ancutienė et al., 2014) vertino programiniu paketu *Modaris 3D* sukurtą virtualių suknelių kokybę, keisdamas medžiagos mechanines charakteristikas bei medžiagų kirpimo kryptis. Sudarytame suknelės modelyje buvo parinkta 11 taškų, kuriuose vertinama santykinė ištiša. Tyrimais nustatyta, kad medžiagų mechaninės charakteristikos daro įtaką drabužio estetinėms savybėms, kokybei bei deformacijų pasiskirstymui gaminyje. Taip pat nustatytos didžiausios santykinės ištišos ir tempimo energijos vertės gaminiuose, sudarytuose iš ataudų kryptimi kirptų medvilninių medžiagų. Praktiniu požiūriu, pagrindinės skaitmeninių technologijų funkcijos tekstilės ir aprangos sektoriuje tiek dizaineriams, tiek inžinieriams ar gamybininkams/pardavėjams yra padėti sumažinti produktų gamybos laiką ir gamybinius kaštus, atsižvelgiant į produktų paklausą, sparčiai besikeičiantį medžiagų, drabužių dizainą ir išplėsti gaminamų produktų paklausą pasauliniu mastu.

Remiantis literatūros apžvalga galima skirti tris pagrindinius tekstilės medžiagų modeliavimo būdus: **geometrini** (angl. *Geometrical*), **fizikini** (angl. *Physical*) ir **mišrųjį** (angl. *Hybrid*) (Hedfi et al., 2011; Lim, Istook, 2011; Jevšnik et al., 2009; Stjepanovič, 2006; Volino et al., 2005; Wang, 2003). Geometrinis modelis yra naudojamas kaip pažangi animacinė priemonė perteikti medžiagos ar drabužio 3D vaizdą, kai neatsižvelgiama į medžiagos fizikines savybes. Dažnai geometrinis modelis taikomas, vaizduojant įvairių klosčių, raukšlių susidarymą drabužiuose. Pavyzdžiui, mokslininkas P. *Decaudin* su bendraautoriais (2006) pateikia virtualių drabužių modeliavimo būdą, paremtą geometriniu modeliu, kai remiamasi

matematinėmis formulėmis, tačiau neatsižvelgiama į medžiagos fizikines savybes. Pirmiausia kompiuterine programa yra sudaromi drabužio detalių lekalai, o vėliau jų paviršius suskaidomas į daugybę tarpusavyje sujungtų taškų ir, remiantis matematinėmis formulėmis, sukuriamas virtualus deformuojamo drabužio vaizdas, pavyzdžiui, lenkiant ranką, sukant liemenį ir pan. (1.17 pav.).



1.17 pav. Virtualaus drabužio vaizdas, sukurtas remiantis geometriniais modeliais (Decaudin et al., 2006)

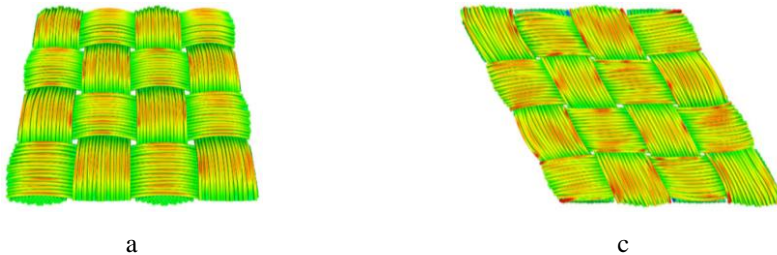
Fizikiniame modelyje įvertinamos visos galimos kiekvieną drabužio elementą veikiančios jėgos. Paprastai yra skiriami trys fizikiniai modeliai: **energetinis modelis ir modelis, paremtas tamprumo teorija** (angl. *energy-based model and model based on the theory of elasticity*), **dalelių tarpusavio ryšio modelis** (angl. *particle-based model*), **baigtinių elementų modelis BEM** (angl. *finite element model*) (Jevšnik et al., 2014; Volino et al., 2005; Hing, Grimsdale, 1996). Baigtinių elementų metodas yra vienas universaliausių ir plačiausiai taikomų metodų inžinerijoje, skirtų mechaninių, šiluminių, hidraulinių, elektromagnetinių ir kt. fizinių sistemų uždaviniams spręsti bei dinaminiam procesams modeliuoti. Taikant skaitinius metodus galima optimizuoti aprangos medžiagų ir gaminių gamybos procesus, numatyti procesų eigą, prognozuoti deformacijų, įtempimų pasiskirstymą medžiagose ir t. t. (Onate et al., 2010; Barauskas, Rimavičius, 2010).

Tekstilės medžiagų deformacinių savybių vertinimas baigtiniais elementais yra dvejopas – mikro- ir makrolygmens. Mikrolygmeniu yra vertinamos medžiagos siūlų deformacijos, jų tarpusavio trintis ir pan. Makrolygmeniu vertinamas jau visos medžiagos deformacijų ir įtempimų pasiskirstymas, atsižvelgiant į bandinio formą, apkrovą, deformacijų tipus ir t. t. (Lomov et al., 2011; Hivet, Boisse, 2005; Durville, 2010). Sudarant mikromechaninį medžiagos modelį, paprastai daromos prielaidos, kad:

- siūlas/gija yra vientisa homogeniška elastinė konstrukcija;
- siūlas/gija per visą savo ilgį yra apskritimo arba elipsės skerspjūvio;
- siūlo/gijos skersmuo yra lygus vienetui;
- tempiamo siūlo/gijos skersmuo nekinta.

Taip pat pasirenkama ar į siūlą bus žiūrima kaip į vientisą darinį, ar siūlas bus sudarytas iš tam tikro skaičiaus homogeniškų gijų. Beje, modeliuojant pasirenkami

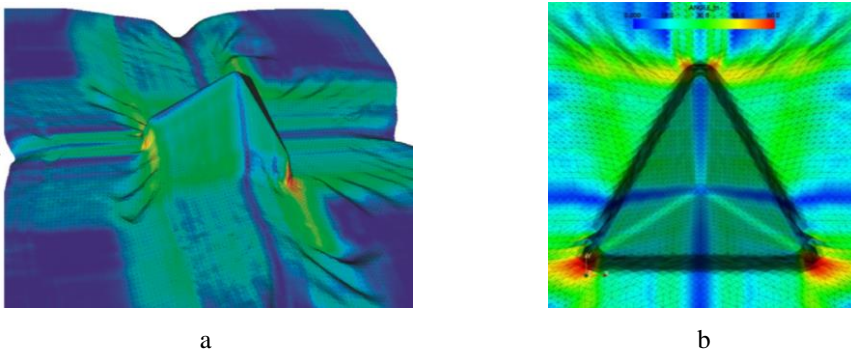
geometriniai audinio ar mezginio modeliai, pagal kuriuos sudaromi matematiniai skaičiavimai. Modeliuojant yra įvertinama ir siūlų tarpusavio trintis perdangose ar kilpų supynimo vietose. Dažniausiai medžiagų siūlo/gijos konstrukcinis modelis yra izotropinė sija, kuri deformuojama pagal priimtus mechanikos dėsnius (Lomov et al., 2011; Hivet, Boisse, 2005; Durville, 2010). Mokslininkas *D. Durville* (2010) sudarė drobinio bei ruoželinio pynimų medžiagų modelius, kai siūlą sudaro daug homogeniškų gijų. **1.18 pav.** matyti didžiausios įtempių koncentracijos (raudona spalva) siūlių perdangų vietose nedeformuotame bandinyje ir bandinyje, paveiktame šlyties.



1.18 pav. Pradinis nedeformuotas drobinio pynimo audinys (a) bei paveiktas šlyties drobinio pynimo audinys (b) (Durville, 2010)

1.18 pav. galima pastebėti, kaip išsiplečia veikiamo šlytimi drobinio pynimo audinio įtempių koncentracijos zonos.

Mokslininkas *S. Allaoui* su grupe mokslininkų (2011) baigtinių elementų metodu sudarė audinio deformacijų pasiskirstymo modelį, kai medžiaga deformuojama ne ant pusrutulio, kaip įprasta kompozituose, o ant piramidės formos spaudo (**1.19 pav.**).



1.19 pav. Audinio deformacijų pasiskirstymo modelio visas vaizdas (a) ir priartintas vaizdas iš viršaus (b) (Allaoui et al., 2011)

1.19 pav., a matyti, kaip pasiskirsto įtempiai visame deformuojamame audinio paviršiuje ir kuriose vietose atsiranda medžiagos klumpymas. **1.19 pav., b** parodytas deformuojamos medžiagos vaizdas iš viršaus. Galima pastebėti, kad didžiausia įtempių koncentracija yra piramidės kampuose.

Mikromechaninio modelio sudarymas mezginiams yra sudėtingesnis procesas nei audiniams. Pirmiausia dėl to, kad mezginio struktūrą sudaro netiesiniai elementai,

t. y. mezginyje siūlai išlankstyti į kilpas. Todėl sudarant mezginio modelį, kilpa turi būti skaidoma į atskirus skirtingos deformacinės elgsenos elementus. Plačiausiai žinomi *Chamberlain*, *Peirce*, *Leaf*, *Munden*, *Postle*, *Demiroz* ir *Kurbak* kilpos modeliai (Luo, Verpoest, 2002; Kurbak, Ekmen, 2008; Supel, Mikolajczyk, 2010; Zhang et al., 2005).

Kalbant apie tekstilės medžiagų 3D modeliavimo būdus, reikėtų paminėti paskutiniąją mišrią techniką, kuri sujungia tiek geometrinį, tiek fizikinį modelius ir dažniausiai naudojama sudėtingiems modeliams sudaryti. Pastarąjį metodą savo bandymams panaudojo ir mokslininkai *J. Feng*, *L. Ruqin* bei *Q. Yiping* (2006). Modeliavimas atliktas remiantis baigtinių elementų, tūrio bei dalelių tarpusavio sąveikos modeliais, iš kurių sudarytas **tinklelio tipo** (angl. *Mass-spring model*) kompleksinis modelis.

Apibendrinant 3D modeliavimo metodus reiktų pastebėti, kad kiekvienas modelis yra skirtingas, todėl pasirenkant modelį svarbu įvertinti, kuris iš jų tinkamiausias norimiems rezultatams gauti. Taip pat reiktų paminėti, kad 3D simuliacijos metodai yra našesni už eksperimentinius tyrimus laiko, medžiagų sąnaudų ir kaštų atžvilgiu. Skaitiniais metodais galima imituoti tekstilės medžiagų mechaninių savybių elgseną be būtinybės pagaminti realų gaminį. Pastebėta, kad dėl savo universalumo ir plataus pritaikymo įvairiose inžinerinėse srityse, plačiausiai naudojamas baigtinių elementų metodas (BEM). BEM metodu galima ne tik optimizuoti aprangos medžiagų ir gaminių gamybos procesus, numatyti procesų eigą, bet ir įvertinti deformacijų, įtempimų pasiskirstymą medžiagose.

1.5. Apibendrinimas

Pastaruoju metu sparčiai vystantis technologijoms, sukuriama vis daugiau sudėtingos struktūros medžiagų, kurių mechaninių savybių tyrimams ir analizei neužtenka įprastų standartinių tyrimo metodų. Remiantis literatūros apžvalga pastebėta, kad daugelyje metodų naudojama įranga yra brangi, sudėtingos konstrukcijos. Trūksta nesudėtingų universalių metodų, pritaikomų įvairių tekstilės medžiagų, taip pat jų siūlinių junginių išsamesniems mechaninių savybių tyrimams, kai veikia įvairių pobūdžių deformacijos. Moksliniuose darbuose didelis dėmesys skiriamas audinių deformacinių netolygumų tyrimams, tačiau mokslinių straipsnių apie šlyties reiškinių susidarymą mezginiuose išties nedaug. Nors siūlių kokybės nustatymo metodų ir mokslinių tyrimų netrūksta, tačiau siūlės įtakos medžiagų stabilumui, tūsumui, paslankumui bei jų sudėtingos deformacinės elgsenos gaminyje tyrimų pasigendama.

Pastaraisiais metais sparčiai išaugo ir mokslinių tyrimų skaičius, kai tekstilės medžiagų ir aprangos deformacinės bei komforto savybės tiriamos pasitelkiant ne tik eksperimentinius metodus, bet ir 3D kompiuterinio modeliavimo metodus, kurie aprangos pramonėje naudojami ne tik dėl realaus vaizdo sukūrimo, bet ir dėl galimybės imituoti tekstilės medžiagų mechaninių savybių elgseną be būtinybės pagaminti realų gaminį. Vis dėlto, remiantis literatūros apžvalga, pastebėta, kad baigtinių elementų metodas (BEM) inžinerijoje taikomas jau kelis dešimtmečius, tačiau tekstilės ir aprangos sektoriuje vis dar trūksta mokslinių darbų, kuriuose būtų

siekama praplėsti tekstilės medžiagų deformacinės elgsenos modeliavimo skaitiniais metodais ribas.

Atsižvelgiant į mokslinės literatūros analizę ir nustatytas problemas, buvo iškeltas darbo tikslas – sukurti naują universalų, nesudėtingą tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacijų vertinimo metodą, atsižvelgiant į eksploatuojamų gaminių tekstilės medžiagų elgsenos dėsningumus. Taip pat šiam tikslui pasiekti suformuoti keturi pagrindiniai uždaviniai:

1. Nustatyti tekstilės medžiagų bei jų junginių tūsumo ribas tradicinio vienaašio tempimo metu suardant bandinius ir neviršijant mažų apkrovų ribos;
2. Ištirti gretasienio formos metodo taikymo galimybes ir tinkamumą vienasluoksnių liaunų tekstilės medžiagų deformacinėms savybėms vertinti;
3. Sukurti naują universalų tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinių savybių tyrimo metodą, atsižvelgiant į aprangos deformacinius ypatumus bei nustatyti tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinę elgseną apibūdinančius rodiklius;
4. Baigtinių elementų metodu (BEM) sudaryti naujo metodo bandinio modelį, atitinkantį realų eksperimentą bei įvertinti medžiagų deformacinę elgseną, palyginti skaitinio ir eksperimentinio metodų rezultatus.

2. TYRIMO OBJEKTAI IR METODIKOS

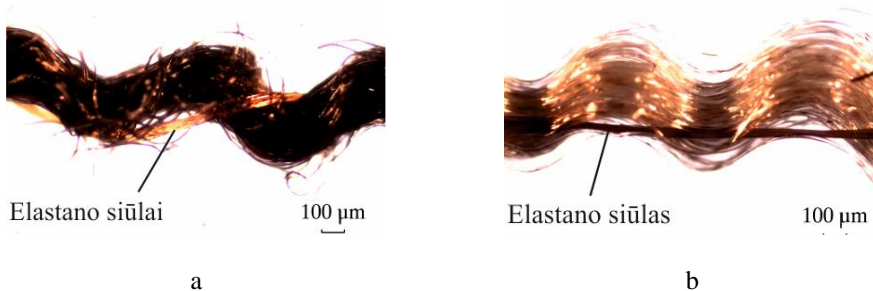
2.1. Tirtos tekstilės medžiagos ir pagrindinės jų charakteristikos

Tekstilės medžiagos pasirinktos atsižvelgiant į pluoštų paklausos ir pasiūlos rodiklių statistiką pasaulinėje tekstilės ir aprangos gamybos bei pardavimų rinkoje (Global Textile Markets, 2013; CARMICHAEL, 2014; Worldwide production volume of chemical and textile fibers from 1975 to 2014 (in 1,000 metric tons), 2015). Taip pat šios tekstilės medžiagos pasirinktos siekiant įvertinti gretasienio ir naujai sukurto Y formos bandinio metodo universalumą įvairioms tekstilės medžiagoms bei pritaikyti gautus tyrimų rezultatus įvairiose praktinėse srityse. Todėl tyrimams buvo parinktos skirtingų charakteristikų tekstilės medžiagos. Bandymų medžiagos suskirstytos į dvi grupes: 1-oji medžiagų grupė – audiniai ir 2-oji medžiagų grupė – mežginiai. Audinių ir mežginių pagrindinės charakteristikos pateiktos **2.1 lentelėje**.

1-ąją medžiagų grupę sudaro penki audiniai su elastano pluoštu ir keturi audiniai be elastano. Audiniai A1, A3, A6-EL-ma, A7-EL-a, A8-EL-a ir A9-EL-m(a) yra skirti viršutinių kostiuminių drabužių gamybai. Audinių A2, A4-EL-a ir A5 metmenų siūlai sudaryti iš medvilnės pluoštų ir šie audiniai yra skirti džinsinių drabužių gamybai. Tirti audiniai yra drobinio ir ruoželinio pynimų, kurių paviršinis tankis w svyruoja nuo 200 g/m^2 iki 294 g/m^2 .









2-ąją medžiagų grupę sudaro septyni skersinio mezgimo mežginiai, skirti apatinių, sportinių ir laisvalaikio drabužių gamybai. Mežginiai M2-EL-e, M4-EL-e ir M5-EL-(e) savo sudėtyje turi elastano pluošto, o mežginiai M1, M3, M6 ir M7 yra be elastano. Mežginių paviršinis tankis w svyruoja 120 g/m^2 – 180 g/m^2 ribose.

Siekiant tiksliai nustatyti bandymų medžiagose esančių elastano siūlų išsidėstymo pobūdį (susukti, apsukti ar gretinti), audinių metmenų ir ataudų bei mežginių siūlai buvo tiriami optiniu mikroskopu *Nikon Eclipse E200*. Gauti skaitmeniniai vaizdai skaitmenine vaizdo kamera *Lumenera Infinity 1* buvo koreguojami programine įranga *Infinity Analyze Release 5.0.2*. Remiantis skaitmeniniais vaizdais nustatyta, kad tiriamuose audiniuose elastano siūlai yra gretinti arba apsukti kitų pluoštų gijomis, pavyzdžiui, A6-EL-ma audinio ataudų siūlas, sudarytas iš kelių elastano siūlų, apsuktų poliesterio gijomis (**2.1 pav., a**), o audinio A8-EL-a ataudų siūlo elastano siūslas gretinta su viskozės bei poliesterio gijomis (**2.1 pav., b**).



2.1 pav. Audinio A6-EL-ma ataudų siūlo (a) ir audinio A8-EL-a ataudų siūlo (b) nuotraukos, darytos optiniu mikroskopu *Nikon Eclipse E200*

2.1 lentelė. Tirtų medžiagų pagrindinės charakteristikos

Charakteristika	1-oji grupė. Audiniai									
	A1	A2	A3	A4-EL-a	A5	A6-EL-ma	A7-EL-a	A8-EL-a	A9-EL-m(a)	
Pynimas (modelis ir pavadinimas)	 1/2 ruoželinis	 Drobinis	 1/2 ruoželinis	 1/2 ruoželinis	 Drobinis	 Drobinis	 1/3 ruoželinis	 1/2 ruoželinis	 1/2 ruoželinis	 Laužytasis 1/2 ruoželinis
Pluoštinė sudėtis, % (pateikta gamintojo)	100 WO	65 CO, 35 PES	50 CO, 50 CV	98 CO, 2 EL	57 LI, 43 CO	96 PES, 4 EL	70 CO, 27 PES, 3 EL	50 CV, 48 PES, 2 EL	97 PES, 3 EL	
Paviršinis tankis w, g/m ²	200	227	217	292	228	294	279	251	281	
Tankumas, cm ⁻¹	23	26	42	56	20	25	40	37	31	
a	19	19	18	24	13	21	30	18	27	
m	35	47	35	36	50	50	32	37	37	
a	36	50	42	45	100	53	31	42	35 / 39	
Storis, mm	0,51	0,49	0,44	0,65	0,63	0,63	0,65	0,63	0,63	
Elastano siūlai	-	-	-	Susukti su ataudų siūlais	-	Susukti su metmenų ir ataudų siūlais	Susukti su ataudų siūlais	Gretinti su ataudų siūlais	Susukti su metmenų ir kas antru ataudų siūlais	
Charakteristika	2-oji grupė. Mezginiai									
	M1	M2-EL-e	M3	M4-EL-e	M5-EL-(e)	M6	M7			
Pynimas	Dvigubasis skersinis (išvirkščiasis)	Lygusis skersinis	Lygusis skersinis	Lygusis skersinis	Lygusis skersinis	Lygusis skersinis	Lygusis skersinis			
Pluoštinė sudėtis, % (pateikta gamintojo)	70 CMD, 30 pieno pluoštas	66 CMD, 30 pieno pluoštas, 4 EL	100 bambuko pluoštas	95 bambuko pluoštas, 5 EL	97 bambuko pluoštas, 3 EL	100 CO	100 PP			
Paviršinis tankis w, g/m ²	166	162	168	176	172	120	180			
Tankumas, cm ⁻¹	15	21	17	19	18	17	13			
e	15	31	22	27	23	23	18			
Storis, mm	0,77	0,75	0,52	0,62	0,63	0,51	0,83			
Elastano siūlai	-	Susukti su kilpų eilučių siūlais	-	Susukti su kilpų eilučių siūlais	Susukti su kas antros kilpų eilučių siūlais	-	-			

Audiniuose A4-EL-a, A7-EL-a, A8-EL-a elastano siūlai susukti ar gretinti tik su ataudų siūlais, todėl audinio kodo gale pridėta raidė „a“, reiškianti ataudus. Audinio A6-EL-ma elastano siūlai susukti metmenų ir ataudų kryptimis, todėl kodo gale pridėtos raidės „m“ ir „a“, reiškiančios metmenis ir ataudus. Audinyje A9-EL-m(a) elastano siūlai yra susukti su metmenų ir tik su kas antru ataudų siūlu, todėl raidė „a“ yra skliaustuose. Mezginuose, kuriuose elastano siūlai susukti su kilpų eilučių siūlais, kodo gale pažymėta raidė „e“, reiškianti eilučių kryptį, o mezginuose, kuriuose elastano siūlas susuktas tik su kas antros kilpų eilučių siūlais, kodo gale raidė „e“ yra skliaustuose. Pluoštų pavadinimai sutrumpinti pagal ISO standartus (Denton, Daniels, 2002)

Bandinių paviršinis tankis w nustatytas pagal LST EN 12127: 1999 standartą. Audinių siūlų tankumas nustatytas suskaičiavus metmenų ir ataudų siūlus vienetiniame ilgje pagal LST EN 1049-2: 1998 standartą. Mezginių tankumas (kilpų skaičius) ir siūlų ilginis tankis nustatytas remiantis LST EN 14971: 2006 standartu. Audinių metmenų ir ataudų siūlų ilginis tankis nustatytas remiantis standartu LST ISO 3801: 1998. Medžiagų storis nustatytas elektroniniu stormačiu *Schmidt* ($\pm 0,01$ mm), remiantis standartu LST EN ISO 5084: 2000.

Tyrimo objektai prieš bandymus ne mažiau kaip 24 valandas išlaikyti kondicinėmis sąlygomis ($RH = 65 \pm 5$ %, $T = 20 \pm 2^\circ$ C) pagal standartą LST EN ISO 139: 2005/A1:2011. Visų tirtų audinių ir mezginių pagrindinių charakteristikų galutiniu matavimo rezultatu laikomas 6 bandinių išmatuotų rodiklių verčių aritmetinis vidurkis, o bendroji matavimo rezultatų santykinė paklaida neviršijo 5 %.

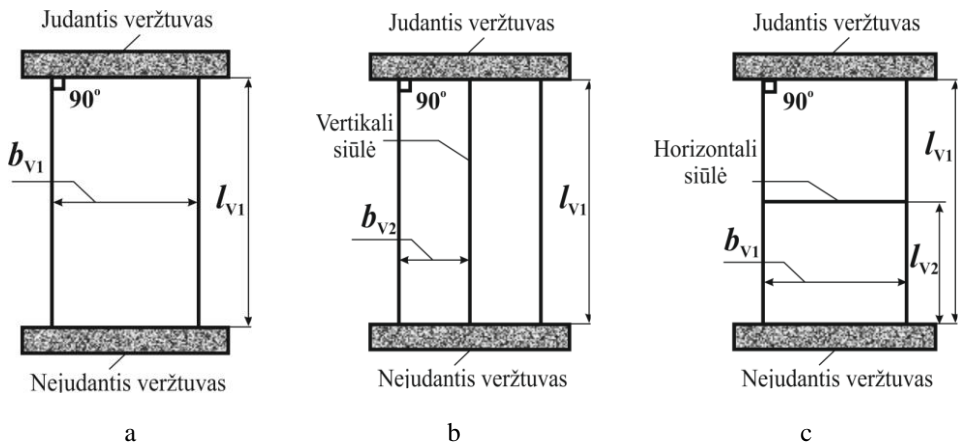
2.2. Tyrimų metodikos

Bandymams buvo naudotos 4 tyrimo metodikos – standartinis vienašis tempimo metodas iki bandinio suirimo bei neviršijant mažų apkrovų ribos (**2.2.1. skyrius**), patobulintas gretasienio metodas (**2.2.2. skyrius**), šiame darbe naujai sukurtas universalus Y formos bandinio metodas (**2.2.3. skyrius**) bei modeliavimas baigtiniais elementais (**2.2.4. skyrius**). Standartinis vienašis tempimo metodas iki bandinio suirimo bei tempimas neviršijant mažų apkrovų ribos buvo naudotas medžiagų tūsumui įvertinti bei nustatyti santykinio pailgėjimo vertes neviršijant grįžtamųjų deformacijų ribų. Patobulinus ir atlikus tam tikrus pakeitimus gretasienio metodikoje, buvo siekta įvertinti jo tinkamumą liaunų tekstilės medžiagų deformacinėms savybėms tirti. Nustačius, kad gretasienio metodas yra netinkamas liaunų tekstilės medžiagų deformacinėms savybėms vertinti, sukurtas naujas Y formos bandinio metodas, atsižvelgiant į tekstilės medžiagų eksploatacinės elgsenos dėsningumus bei veikiančių jėgų pobūdį eksploatuojant gaminius. Siekiant praplėsti tekstilės medžiagų deformacinės elgsenos modeliavimo skaitiniais metodais ribas, baigtinių elementų analizės sistema ANSYS buvo sudarytas naujojo Y formos bandinio kompiuterinis didelių deformacijų geometrinis ir skaičiuojamasis modeliai.

2.2.1. Tekstilės medžiagų ir jų siūlinių junginių tąsumo vertinimas standartiniu vienašiu tempimo metodu iki bandinio suirimo ir neviršijant mažų apkrovų ribos

Medžiagų tąsumui tirti buvo naudotas standartinis tempimo metodas iki bandinio suardymo pagal standartą LST ISO 13934 – 1: 2013. Nors tradiciškai medžiagų mechaninės savybės tiriamos vienašiu tempimo metu iki bandinio suardymo, tačiau moksliniai tyrimai parodė, jog dėvėjimo lygio apkrovos yra kur kas mažesnės (100 N/m – 140 N/m) (Alamdar, 2004; Kleivaitytė et al., 2011; Alamdar, 2002; Hu, Zhang, 1997; Tokmak et al., 2010; Yick, Cheng, 1996; Dapkūnienė, Strazdienė, 2006; Naujokaitytė et al., 2008; Geršak, 2004; Kawabata, 1980). Todėl medžiagos buvo tirtos ir neviršijant mažų dėvėjimo lygio apkrovų ribos pagal KES-F bandymų sąlygas (Alamdar, 2002; Hu, Zhang, 1997; Bishop, 1996; Kawabata, 1980). Remiantis minėta metodika, audiniai buvo deformuojami 490 N/m apkrova (24,5 N/5cm), o mežginiai – 50 N/m (2,5 N/5cm). Abiem tyrimo metodais tirtų medžiagų bandymai atlikti naudojant tempimo mašiną *Tinius Olsen HT10*, kai viršutinio veržtuvo judėjimo greitis – $v_V = 100 \pm 5$ mm/min. Tyrimų metu naudoti audinių stačiakampio formos bandiniai, kirpti metmenų ir ataudų kryptimis, o mežginiai – stulpelių ir eilučių kryptimis. Bandinių matmenys: $l_{V1} = 100$ mm (darbinės zonos ilgis), $b_{V1} = 50$ mm (2.2 pav., a).

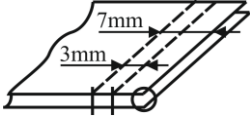
Remiantis mokslininkų darbais (Luo, Verpoest, 2002; Zhang et al., 2007; Li, Zhang, 2008; Supel, Mikolajczyk, 2010) bei šiame moksliniame darbe vienašiu tempimo metu iki bandinio suirimo gautais rezultatais, nustatyta, kad tempiami mežginiai pailgėja iki 4-ių kartų, o audiniai – iki 1,5-o karto. Todėl išsamesnei tąsių mežginių deformacinei elgsenai įvertinti buvo atlikti papildomi bandymai su vertikalia ir horizontalia siūlėmis. Siūlės padėties matmenys bandiniuose: $l_{V2} = 50$ mm ir $b_{V2} = 25$ mm (2.2 pav., b, c).



2.2 pav. Bandinių tipai: bandinys be siūlės (a), su vertikalia (b) ir horizontalia (c) siūlėmis

Bandinių elementai susiūti ir apsiūlėti ketursiūliu overloku *JANOME 204D*. Pagrindiniai siūlinio junginio parametrai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Pagrindiniai siūlinio junginio parametrai

Siūlės schema	Dygsnio tipas	Dygsnių tankumas, dygsniai/cm	Siuvimo siūlų ilginis tankis, tex	Pastabos
	514	3	25 (šerdinės struktūros)	Uždėtinė sujungimo siūlė; siūlės plotis – 7mm; bandinio elementams sujungti naudoti <i>Gütermann Mara 120</i> (100 % PES) siuvimo siūlai, skirti lengvo ir vidutinio storio medžiagoms siūti

Vienašio tempimo metu iki bandinių suirimo gautos tempimo-trūkimo kreivės, iš kurių nustatyta ir apskaičiuota trūkimo jėga F_{Vtr} , santykinė trūkimo ištįsa ε_{Vtr} bei santykinės trūkimo ištįsos anizotropiškumo koeficientas an_V :

$$an_V = \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}}; \quad (2.1)$$

čia ε_{\max} – didžiausia trūkimo ištįsos vertė, (mm); ε_{\min} – mažiausia trūkimo ištįsos vertė, (mm).

Deformuojant bandinius, kai neviršijama mažų apkrovų riba, nustatytas santykinis pailgėjimas ε_{V490} , kai tempimo jėga $F_{V490} = 490$ N/m (audiniams) bei ε_{V50} , kai tempimo jėga $F_{V50} = 50$ N/m (mezginiams).

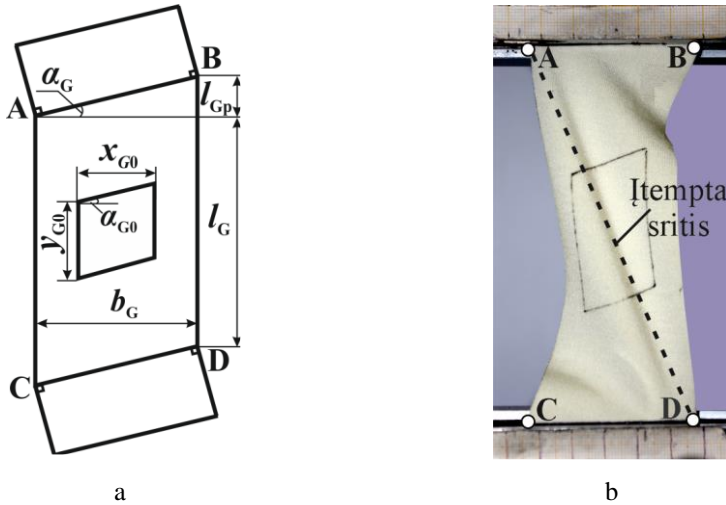
Kiekvienam bandymui buvo paruošta po 6 elementariusius bandinius metmenų ir ataudų kryptimis (audiniams) bei stulpelių ir eilučių kryptimis (mezginiams). Esant tokiam bandinių skaičiui variacijos koeficientas nustatytoms charakteristikoms F_{Vtr} , ε_{Vtr} , an_V bei ε_{V490} ir ε_{V50} neviršijo 5,5 %.

2.2.2. Tekstilės medžiagų deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu

Mokslininkė dr. V. Sacevičienė, savo disertacijoje nagrinėdama laminuotų ir dengtų aprangos medžiagų deformacines savybes, pasiūlė naują metodą, kai gretasienio formos bandinyje tempimo metu vyksta šlyties procesas, panašus į medžiagos deformaciją įvairiose aprangos vietose. Šiuo metodu buvo tirtos daugiasluoksnių standžių medžiagų, t. y. laminuotų ir dengtų aprangos medžiagų, deformacinės savybės (Klevaitytė et al., 2011; Masteikaitė, Sacevičienė, 2009; Masteikaitė, Sacevičienė, 2010). Remiantis moksliniais tyrimais, gretasienio formos bandinio tempimo metodas, atlikus nedidelius bandymo sąlygų pakeitimus ir patobulinimus, buvo taikomas ir šiame darbe audinių bei mezginių deformacinėms savybėms vertinti. Buvo siekta įvertinti gretasienio metodo pritaikymo galimybes liaunų ir plonasienių medžiagų, t. y. audinių ir mezginių, deformacinėms savybėms vertinti.

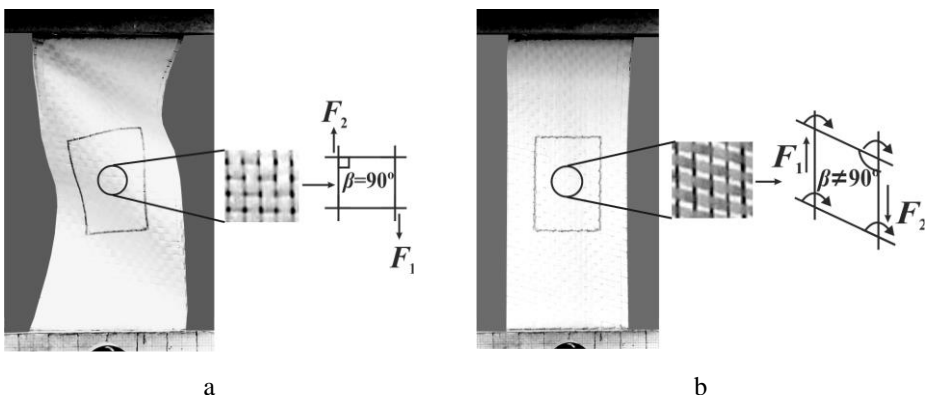
Bandymams iš audinių buvo iškirpti gretasienio formos bandiniai metmenų ir ataudų, o iš mezginių – stulpelių bei eilučių kryptimis. Bandinio matmenys: bandinio plotis $b_G = 50$ mm, bandinio ilgis $l_G = 100$ mm. Bandinio viršutinis (AB) ir apatinis (CD) kraštai sudaro kampą $\alpha_G = 16^\circ$ atitinkamai su išilgine ir skersine kryptimis, o papildomų bandinio kraštelių ilgis $l_{Gp} = 14$ mm (2.3 pav., a) (Masteikaitė,

Sacevičienė, 2009). Bandinio viršutinis AB ir apatinis CD kraštai tvirtinami veržtuvuose pasukant bandinio kraštus horizontaliai. Dėl papildomų bandinio kraštelių l_{Gp} bandinyje ties šoniniais kraštais susidaro nelygumų, o ties įstrižaine AD – įtempta sritis (2.3 pav., b).



2.3 pav. Bandinių deformacijos vertinimas gretasienio metodu: pradinė bandinio forma (a) ir bandinys, įtvirtintas sprastuvuose su susidariusiais nelygumais jo paviršiuje (b)

Norint gauti papildomos informacijos apie medžiagos deformacines savybes, šiame moksliniame darbe šlyties reiškinio analizei gretasienio formos bandinio viduryje buvo nubraižytas lygiagretainis, kurio kraštinės x_{G0} ir y_{G0} yra lygios po 30 mm ir lygiagrečios bandinio kraštinėms A-B-C-D (2.3 pav., a). Nubraižytas lygiagretainis vizualiai iliustruoja šlyties reiškinį, nes galima išmatuoti kampo α_{G0} ir kraštinių x_{G0} bei y_{G0} pokyčius.

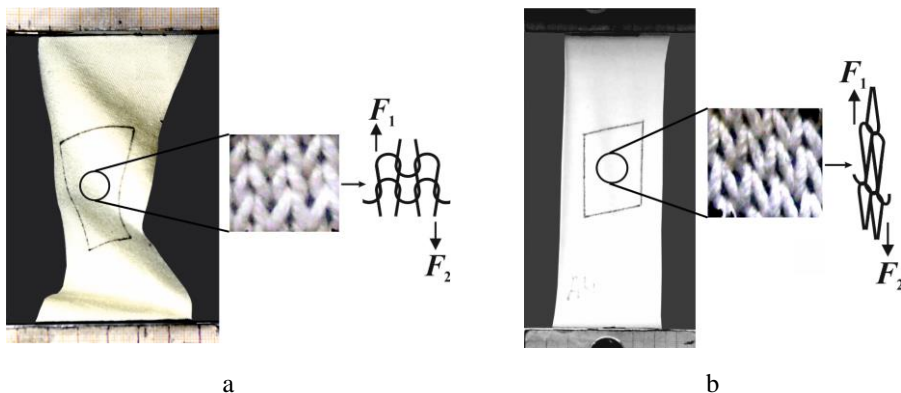


2.4 pav. Audinių deformacija gretasienio metodu: struktūros elementų išsidėstymas prieš tempimą (a) ir struktūros elementų pokyčiai tempimo metu (b)

Gretasienio metodu deformuojant audinius, kiekvienas jo struktūros elementas, veikiamas dviejų, priešingos krypties jėgų F_1 ir F_2 , iš stačiakampio virsta į

lygiagretainį. Šiuo atveju išilginiai audinio siūlai, veikiami trinties jėgų, tiesinasi ir persilenka vienas kito atžvilgiu, o skersiniai siūlai sukasi apie išilginių ir skersinių siūlų sankirtų taškus ir susirango. Todėl prieš tempimą, kampas tarp išilginių ir skersinių medžiagos struktūros elementų yra $\beta = 90^\circ$ (2.4 pav., a), o po tempimo kampas β pakinta (2.4 pav., b).

Mezginių struktūros elementai (siūlai), skirtingai nei audinių, yra netiesiniai, todėl mezginiai pasižymi didesniu struktūros elementų paslankumu. Mezginius deformuojant gretasienio metodu pirmiausia išsitiesina pynimo struktūros elementai (kilpos visiškai susiglaudžia), kadangi jie turi tam tikrą tįsumą, o tempiant toliau, mezginį sudarantys siūlai yra ištempiami. Pritaikius gretasienio metodą mezginiams, veikiant tempimo jėgoms, simetrinė kilpučių forma virsta nesimetriine (2.5 pav.).



2.5 pav. Mezginių deformacija gretasienio metodu: struktūros elementų išsidėstymas prieš tempimą (a) ir struktūros elementų pokyčiai tempimo metu (b)

Medžiagas pagal *KES-F* metodiką siūloma deformuoti iki 8 laipsnių ($\alpha_K = 8^\circ$) (Alamdor, 2002; Hu, Zhang, 1997; Kawabata, 1980). Idealiomis sąlygomis, esant netąsiems ir nepaslankiems medžiagos struktūros elementams, veikiant jėgoms F_1 ir F_2 , tarp jų įvyktų pilnoji šlytis, tačiau tekstilės medžiagas sudarantys siūlai ne tik persilenka vienas kito atžvilgiu, bet taip pat ir tįsta, pakinta siūlų skersmuo. Bandymo metu kai kurių medžiagų bandiniai išsitiesino ir įgavo stačiakampio formą esant mažesnei, o kiti – esant didesnei deformacijai. Audiniai pasižymi didesne siūlų tarpusavio trintimi nei mezginiai, todėl šlytis pasireiškia greičiau ir esant mažesniai šlyties kampui tarp siūlų sistemų.

Remiantis gretasienio metodika, bandiniai yra deformuojami iki 14 % santykinio pailgėjimo, tačiau, remiantis šiuo darbe atliktais tyrimais, nustatyta, kad toks santykinis pailgėjimas nėra pakankamas, nes daugelio audinių ir mezginių plokštumose dar buvo matomų nelygumų ir pasireiškė klupdymo reiškinys (Masteikaitė, Sacevičienė, 2009; Masteikaitė, Sacevičienė, 2010). Todėl audiniai, atsižvelgiant į ankstesnius tyrimus (Sacevičienė et al., 2011; Sacevičienė et al., 2011; Audzevičiūtė-Liutkienė et al., 2013), buvo deformuojami tol, kol jų plokštumoje nebelikdavo nelygumų (vertinant vizualiai), o mezginiuose iki $\epsilon_{G45} = 45\%$. Mezginių paviršiuje nelygumai neišnykdavo iki pat medžiagos suirimo.

Tirtų medžiagų vienašis tempimas atliktas tempimo mašina *Tinius Olsen HT10*, kai viršutinio veržtuvo greitis – $v_G = 100 \pm 5$ mm/min ir darbinės zonos ilgis – 100 mm (Masteikaitė, Sacevičienė, 2009).

Vienašio tempimo metu buvo gautos tempimo histerezės kreivės, iš kurių nustatyti ir apskaičiuoti šie rodikliai: tempimo jėga F_{G14} , kai bandinys deformuojamas iki nustatyto santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G14} = 14$ %, tempimo jėga F_G , kai bandinys deformuojamas iki tol, kol paviršiuje išnyksta nelygumai (audiniams), tempimo jėga F_{G45} , kai bandinys deformuojamas iki nustatyto santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G45} = 45$ % (mezginiams). Deformavus bandinį iki santykinio pailgėjimo ε_G ir $\varepsilon_{G45} = 45$ %, remiantis bandymų metu užfiksuotais skaitmeniniais vaizdais, nustatyti ir apskaičiuoti bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinių x_{G0} , y_{G0} bei kampo α_{G0} tarp jų geometrinių pokyčių rodikliai x'_{G} , y'_{G} , x'_{G45} , y'_{G45} , α'_{G} , α'_{G45} .

Bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinių pokyčių rodikliai x'_{G} , y'_{G} , x'_{G45} , y'_{G45} apskaičiuoti pagal formules (2.2) ir (2.3):

$$x'_{G;G45} = \frac{x_{G1} - x_{G0}}{x_{G0}} 100\%; \quad (2.2)$$

čia x_{G0} – bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės ilgis prieš tempimą (30 mm); x_{G1} – nubraižyto lygiagretainio kraštinės ilgis (mm), kai tempiama iki tol, kol bandinio paviršiuje nebelieka nelygumų (audiniams) ir iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G45} = 45$ % (mezginiams).

$$y'_{G;G45} = \frac{y_{G1} - y_{G0}}{y_{G0}} 100\%; \quad (2.3)$$

čia y_{G0} – bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės ilgis prieš tempimą (30 mm); y_{G1} – nubraižyto lygiagretainio kraštinės ilgis (mm), kai tempiama iki tol, kol bandinio paviršiuje nebelieka nelygumų (audiniams) ir iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G45} = 45$ % (mezginiams).

Bandinyje nubraižyto lygiagretainio kampo tarp kraštinių pokyčio rodikliai α'_{G} , α'_{G45} apskaičiuotas pagal formulę (2.4):

$$\alpha'_{G;45} = \frac{\alpha_{G1} - \alpha_{G0}}{\alpha_{G0}} 100\%; \quad (2.4)$$

čia α_{G0} – bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės kampas prieš tempimą (16°); α_{G1} – bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės kampas ($^\circ$), kai tempiama iki tol, kol bandinio paviršiuje nebelieka nelygumų (audiniams) ir iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G45} = 45$ % (mezginiams).

Kiekvienam bandymui buvo paruošta po 6 elementariusius bandinius metmenų ir ataudų kryptimis (audiniams) bei stulpelių ir eilučių kryptimis (mezginiams). Esant tokiam bandinių skaičiui, variacijos koeficientas nustatytoms charakteristikoms F_{G14} , F_G , F_{G45} , x'_{G} , y'_{G} , x'_{G45} , y'_{G45} , α'_{G} , α'_{G45} nevyršijo 9,8 %.

2.2.3. Tekstilės medžiagų ir jų siūlinių junginių deformacinių savybių vertinimas nauju Y formos bandinio metodu

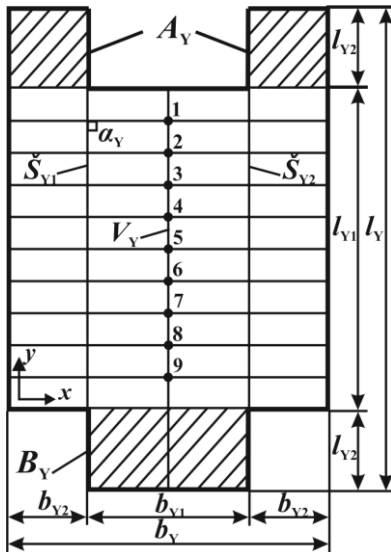
Tekstilės medžiagos pasižymi anizotropinėmis savybėmis, todėl yra sudėtinga tiksliai prognozuoti ir įvertinti jų deformacines savybes sudėtingos konstrukcijos gaminiuose. Medžiagų deformacinė geba priklauso ne tik nuo jų fizikinių savybių, bet ir nuo gaminio konstrukcijos, figūros anatominių ypatumų, drabužio laisvumo ar

priguldimo laispio bei dėvėtojo fizinio aktyvumo. Judėdamas žmogus atlieka daugybę įvairių judesių, todėl drabužio dalys yra tempiamos įvairiomis kryptimis, o medžiagos deformuojamos skirtingo dydžio ir priešingų krypčių jėgomis. Eksploatacijos metu, įvairiose gaminio vietose ištįsa svyruoja 10 % – 50 % ribose (Senthilkumar, Anbumani, 2011; Reilly, 2010; Basset et al., 1999; Lin et al., 2011; Chowdhury et al., 2012; Shishoo, 2005; Senthikumar et al., 2011). Dėl tekstilės medžiagų liaunumo ir struktūros paslankumo dažnai atsiranda ir šlyties bei lenkimo deformacijos. Daugelis laisvalaikio ir sporto drabužių yra gaminami iš mezginių, kurie, dėl savo struktūros (kilpučių), yra paslankesni, tasesni ir elastingesni nei audiniai (Senthilkumar, Anbumani, 2011; Alamdar, 2004; Klevaitytė et al., 2006; Čukas, 1996; Senthikumar et al., 2011). Remiantis atlikta literatūros apžvalga (žr. **1 skyrių**) pastebėta, kad vis dar trūksta nesudėtingų, nebrangių ir našių universalių metodų, leidžiančių įvertinti ne tik įvairių tekstilės medžiagų, bet ir jų junginių deformacijas, artimas gaminio eksploatacinėms sąlygoms. Tradicinės komercinės sistemos, tokios kaip KES-F ar FAST, suteikia apibendrintą medžiagų deformacinės elgsenos informaciją, tačiau realiomis eksploataavimo sąlygomis pastebimos kur kas sudėtingesnės deformacijos, pavyzdžiui, šlyties sukeltas medžiagos klupdymas ir pan. Atsižvelgiant į šiame moksliniame darbe atliktus tamprių gaminių medžiagų deformacinių savybių vertinimo papildomus tyrimus (Audzevičiūtė-Liutkienė et al., 2012; Audzevičiūtė, Masteikaitė, 2013) bei į kitų mokslininkų darbus (Senthilkumar, Anbumani, 2011, Hasani, 2009; Kim, Kim, 2011; Hivet, Boisse, 2005; Durville, 2010; Kurbak, Ekmen, 2008; Supel, Mikolajczyk, 2010; Zhang et al., 2005; Petruitytė, Baltakytė, 2009; Deng et al., 2010; Khedher et al., 2009) nustatyta, kad didžiausios deformacijos ir įtempiai susidaro tose gaminių vietose, kuriose veikia priešingos krypties vektorių jėgos, pavyzdžiui, kelių srityse sėdant, tupiant, nugaros, alkūnių, pažastų srityse keliant ar lenkiant rankas, taip pat aprangos detalių, sujungtų siūlėmis, vietose. Todėl minėtose gaminių vietose atsiranda šlytis, sukelianti medžiagų klupdymą. Atsižvelgiant į visa tai, buvo sukurtas Y formos bandinio deformavimo metodas, kai tempiamame bandinyje veikia priešingų krypčių jėgos – taip galima bandinį deformuoti artimomis drabužio dėvėjimo sąlygomis. Deformuojant Y formos metodu, bandiniuose vertinamas deformacijų pasiskirstymas, jų intensyvumas ir netolygumas, atsižvelgiant į bandinių geometrinių parametrų kitimą.

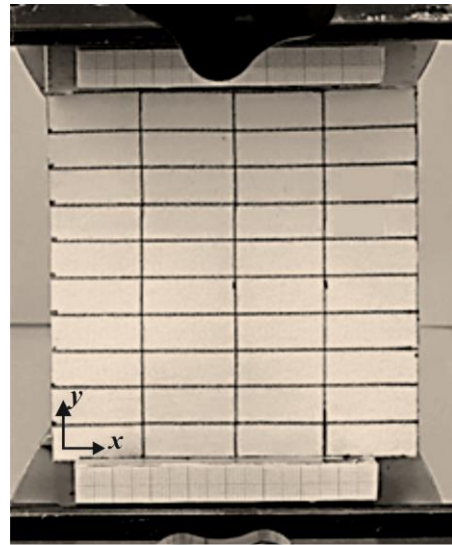
Tyrimams buvo naudoti tokie patys audiniai ir mezginiai, kaip ir vienašiamie bei gretasienio metoduose (žr. **2.1 lentelę**), kurių bandiniai kirpti metmenų, ataudų kryptimis (audiniai) ir stulpelių, eilučių kryptimis (mezginiai). Bandymams buvo naudotas Y formos bandinys, kurio matmenys: visas bandinio plotis $b_Y = 100$ mm, $b_{Y1} = 50$ mm, $b_{Y2} = 25$ mm, visas bandinio ilgis $l_Y = 200$ mm, $l_{Y1} = 100$ mm (darbinės zonos ilgis), $l_{Y2} = 25$ mm (**2.6 pav., a**).

Dvi viršutinės bandinio dalys A_Y ir apatinė bandinio dalis B_Y įtvirtinamos tempimo mašinos veržtuvuose. Medžiagų deformacinėms savybėms ištirti bei vertinti bandinyje buvo nubraižytos horizontalios linijos (intervalu kas 10 mm \pm 1 mm), kurios sužymėtos taškais nuo 1 iki 9 linijos viduryje. Taip pat bandinyje nubraižytos dvi vertikalios šoninės linijos \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} bei vidurio linija V_Y , kurios lygiagrečios bandinio kraštinėms. Deformuojant bandinį, nubraižytos horizontalios linijos, vidurio

ir šoninės linijos kinta įvairiu dydžiu skirtinguose taškuose. Prieš bandymą, kampas tarp nubraižytų horizontalių ir vertikalinių linijų bandinyje yra $\alpha_Y = 90^\circ$.



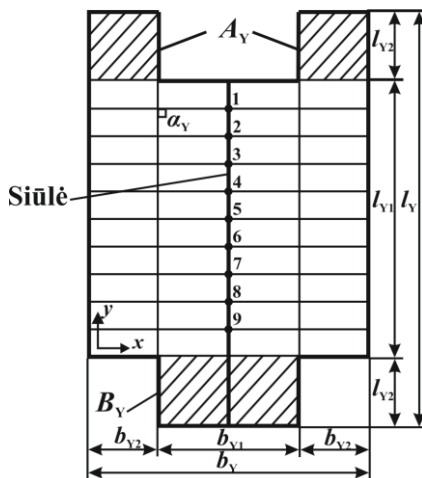
a



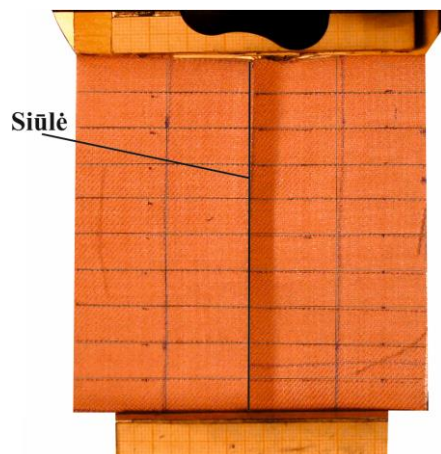
b

2.6 pav. Principinė Y formos bandinio schema (a); bandinio įtvirtinimas veržtuvuose (b); /// - bandinio zonos, įtvirtintos veržtuvuose

Taip pat siūlės įtakai medžiagų deformacinėms savybėms įvertinti naudoti dviejų tipų Y formos bandinių atskirų elementų siūliniai sujungimai: su vertikalia siūle bandinio simetrijos ašyje (**2.7 pav.**) ir bandinio kirptiniuose kraštuose (**2.8 pav.**).

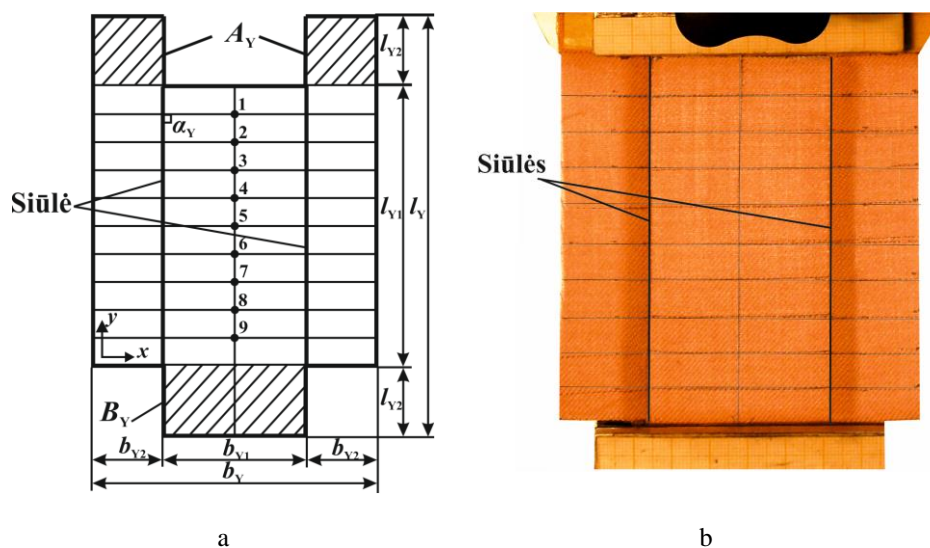


a



b

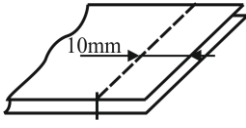
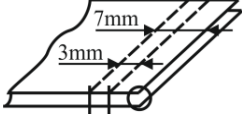
2.7 pav. Principinė Y formos bandinio schema su siūle bandinio simetrijos ašyje (a) ir bandinio kirptiniuose kraštuose (b); /// - bandinio zonos, įtvirtintos veržtuvuose



2.8 pav. Principinė Y formos bandinio schema su siūle bandinio simetrijos ašyje (a) ir bandinio kirptiniuose kraštuose (b); - bandinio zonos, įtvirtintos veržtuvuose

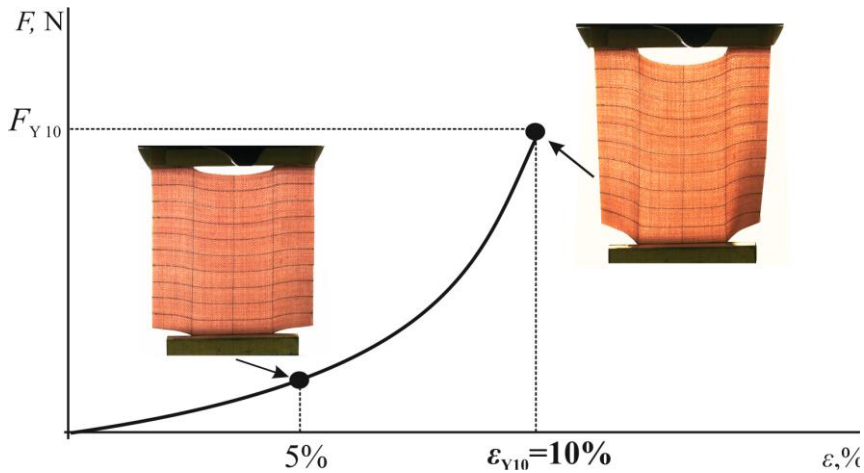
Bandinių atskiri elementai iš audinių susiūti šaudyklinio dygsnio siuvimo mašina *JANOME Memory Craft 6600P*, o bandinių elementai iš mezginių susiūti ir apsiūlėti ketursiūliu overloku *JANOME 204D*. Pagrindiniai siūlinių junginių parametrai pateikti **2.3 lentelėje**.

2.3 lentelė. Pagrindiniai siūlinių junginių parametrai

Siūlės schema	Dygsnio tipas	Dygsnių tankumas, dygsniai/cm	Siuvimo siūlų ilginis tankis, tex	Pastabos
	301	3	25 (šerdinės struktūros)	Uždėtinė sujungimo siūlė; siūlės plotis – 10 mm; bandinio elementams sujungti naudoti <i>Gütermann Mara 120</i> (100 % PES) siuvimo siūlai, skirti lengvoms ir vidutinio storio medžiagoms siūti
	514	3	25 (šerdinės struktūros)	Uždėtinė sujungimo siūlė; siūlės plotis – 7 mm; bandinio elementams sujungti naudoti <i>Gütermann Mara 120</i> (100 % PES) siuvimo siūlai, skirti lengvoms ir vidutinio storio medžiagoms siūti

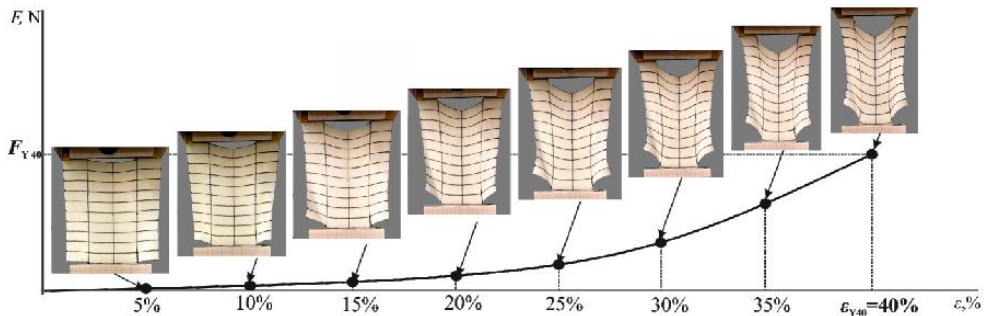
Bandiniai buvo tempiami *Tinius Olsen HT10* tempimo mašina, kai tempimo greitis $v_Y = 10 \pm 1$ mm/min, kad būtų galima stebėti ir fiksuoti medžiagų geometrinių matmenų kitimą. Remiantis šiame moksliniame darbe atliktais tyrimais pagal standartinę metodiką (žr. **2.2.1. skyrių**) ir kitų mokslininkų darbus (Senthikumar, Anbumani, 2011; Reilly, 2010; Basset et al., 1999; Lin et al., 2011; Chowdhury et al., 2012; Shishoo, 2005; Senthikumar et al., 2011), audiniai buvo tempiami iki santykinio

pailgėjimo $\varepsilon_{Y10} = 10\%$ (2.9 pav.), o mežginiai – iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y40} = 40\%$ (2.10 pav.).



2.9 pav. Audinio tempimo kreivė $F-\varepsilon$

Bandymų metu nustatyta tempimo jėga F_{Y10} , kai bandinys deformuojamas iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y10} = 10\%$ (audiniams) bei tempimo jėga F_{Y40} , kai bandinys tempiamas iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y40} = 40\%$ (mežginiams).



2.10 pav. Mežginio tempimo kreivė $F-\varepsilon$

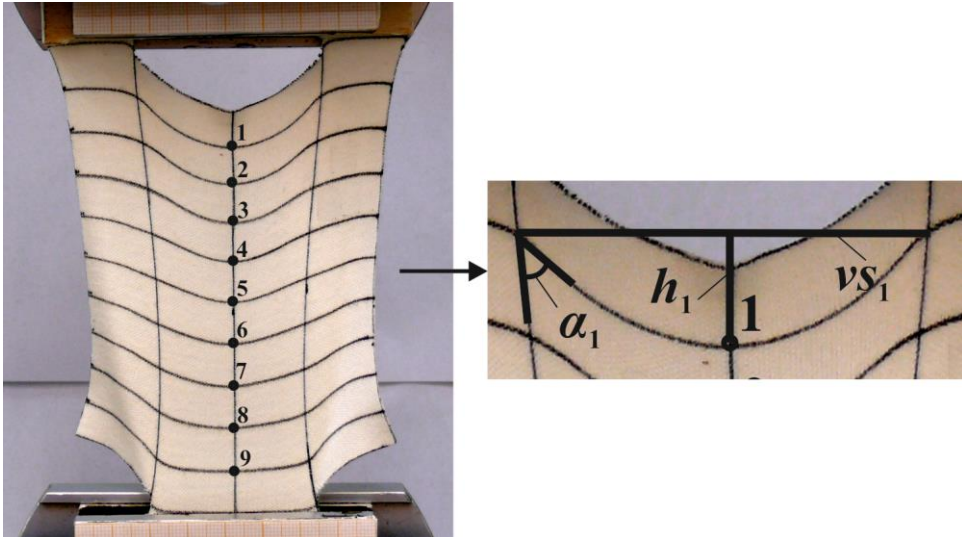
Remiantis visų medžiagų bandinių deformavimo skaitmeniniais vaizdais nustatyti trys, labiausiai charakteringi, taškai – 1-asis, 5-asis ir 9-asis. Kadangi deformuojamos medžiagos patiria sudėtingų ir įvairaus pobūdžio deformacijų (išilginių, skersinių ir kampinių) poveikį, todėl parinkti trys, medžiagų deformacines savybes nusakantys, rodikliai: $h_i'_{Y10;Y40}$, $\nu S_i'_{Y10;Y40}$, $\alpha_i'_{Y10;Y40}$ (2.11 pav.).

Rodikliu $h_i'_{Y10;Y40}$ vertinamas išilginių deformacijų poveikis, ir šis rodiklis nusako bandinyje nubraižytų horizontalių linijų įlinkio dydį trijuose (1-ame, 5-ame, 9-ame) charakteringiausiuose taškuose.

Rodiklis $h_i'_{Y10;Y40}$ apskaičiuojamas:

$$h_{iY10;40}' = \frac{h_1}{l_{Y1}} 100\%; \quad (2.5)$$

čia h_1 – atstumas nuo horizontalės iki vidurio taško naujos padėties tempiant bandinį, mm, $i = 1, 5$ ir 9 taškai; l_{Y1} – bandinio ilgis, kai bandinys įtvirtintas veržtuvuose, (100 mm)



2.11 pav. Deformuoto Y formos bandinio geometrinių parametru matavimo schema

Rodikliu $vs'_i{}_{Y10;Y40}$ vertinamas skersinių deformacijų poveikis, ir šis rodiklis nusako atstumo pokytį tarp bandinyje nubraižytų šoninių vertikalinių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} trijuose (1-ame, 5-ame, 9-ame) charakteringiausiuose taškuose. Rodiklis $vs'_i{}_{Y10;Y40}$ apskaičiuojamas:

$$vs'_{iY10;40} = \frac{|vs_1 - vs_0|}{vs_0} 100\%; \quad (2.6)$$

čia vs_0 – pradinis atstumas tarp bandinyje nubraižytų vertikalinių šoninių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} prieš bandinio deformaciją, (50 mm); vs_1 – atstumas tarp bandinyje nubraižytų vertikalinių šoninių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} bandinio deformavimo metu, mm, $i = 1, 5$ ir 9 taškai.

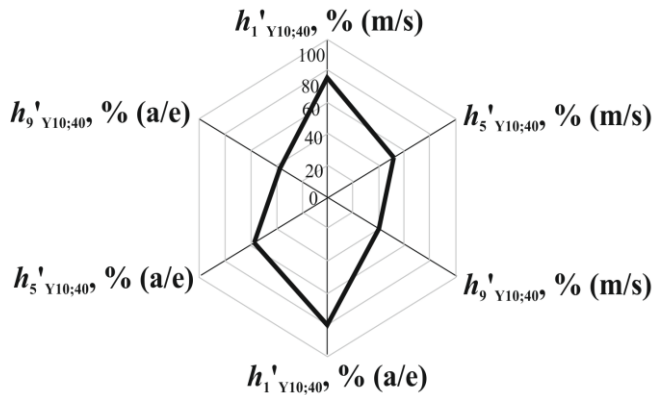
Rodikliu $\alpha'_i{}_{Y10;Y40}$ vertinamas kampinių deformacijų poveikis, ir šis rodiklis nusako kampo pokytį tarp bandinyje nubraižytų horizontalių ir vertikalinių linijų trijuose (1-ame, 5-ame, 9-ame) charakteringiausiuose taškuose. Rodiklis $\alpha'_i{}_{Y10;Y40}$ apskaičiuojamas:

$$\alpha'_{iY10;40} = \frac{|\alpha_1 - \alpha_0|}{\alpha_0} 100\%; \quad (2.7)$$

čia α_0 – pradinis kampas tarp bandinyje nubraižytų horizontalių ir vertikalinių šoninių linijų prieš bandinio deformaciją, (90°); α_1 – kampas tarp bandinyje nubraižytų horizontalių ir vertikalinių šoninių linijų bandinio deformavimo metu, $^\circ$, $i = 1, 5$ ir 9 taškai.

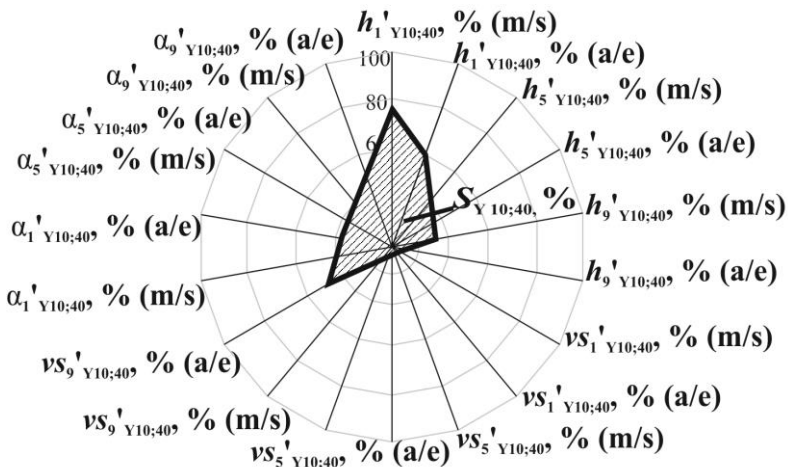
Medžiagų deformacinės savybės buvo įvertintos spinduline diagrama, kai ašyse atidėti rodikliai (Pan et al., 1993). Spindulinėje diagramoje rodikliai atidėti dviem etapais: pirmajame etape spindulinėje diagramoje kiekvienas rodiklis buvo atidėtas

atskirai, siekiant išanalizuoti kiekvieno rodiklio vertes, deformacijų netolygumus ir pasiskirstymą bandinio plote (2.12 pav.).



2.12 pav. Rodiklių išsidėstymo pavyzdys spindulinėje diagramoje pirmuoju etapu

Antrajame etape buvo siekiama įvertinti medžiagos deformuojamumą, atsižvelgiant į visų rodiklių pokyčius. Todėl spindulinėje diagramoje atidėti visi rodikliai (2.13 pav.).



2.13 pav. Rodiklių išsidėstymo pavyzdys spindulinėje diagramoje antruoju etapu

Apibrėžti plotai $S_{Y10;40}$ rodo, kurios medžiagos patiria didesnę deformacijų poveikį ir yra mažiau paslankios struktūros. Plotai apskaičiuoti naudojant programinę įrangą *AutoDesk AutoCAD 2014*.

Rezultatai gauti remiantis 6-ių išilgine ir skersine kryptimis kirptų bandinių tempimo bandymais. Minėtų charakteristikų variacijos koeficientas neviršijo 5,9 %.

2.2.4. Tekstilės medžiagų deformacijų tyrimas baigtinių elementų metodu (BEM)

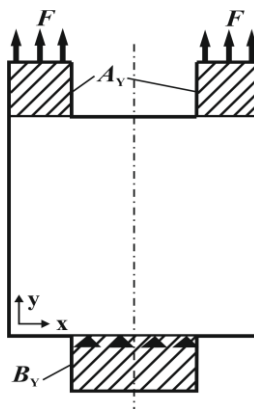
Daugelis sukurtų medžiagų deformacinių savybių vertinimo metodų yra daugiau teorinio pobūdžio ir dažnai nepritaikomi praktinėse srityse. Taip pat vystantis

technologijoms sukuriama naujos struktūros medžiagų, kurių deformacinei elgsenai prognozuoti reikalingi sudėtingi, brangūs ir laiką eikvojančios tyrimai. Todėl baigtinių elementų metodo panaudojimas tekstilės medžiagų deformacinei elgsenai prognozuoti ir analizuoti gali sutaupyti ne tik laiko, reikalingo atlikti realius eksperimentus, bet ir kaštų, išleidžiamų naujoms medžiagoms, sudėtingai įrangai ar jos priedams įsigyti. Remiantis anksčiau atlikta literatūros apžvalga pastebėta, kad vis dar trūksta tekstilės medžiagų skaitinių tyrimų, kuriais būtų galima prognozuoti ir analizuoti tekstilės medžiagų deformacinę elgseną. Todėl baigtinių elementų analizės sistema ANSYS buvo sudarytas naujojo Y formos bandinio kompiuterinis didelių deformacijų geometrinis ir skaičiuojamasis modeliai, siekiant praplėsti tekstilės medžiagų deformacinės elgsenos modeliavimo skaitiniais metodais ribas.

Baigtinių elementų analizės sistema ANSYS buvo sudaryti naujojo Y formos bandinio kompiuteriniai (didelių deformacijų geometrinis ir skaičiuojamasis) modeliai. Atlikti trys uždavinių skaitinio sprendimo etapai:

- **Pasiruošimo dalis** (angl. *Preprocessing Phase*), kurioje sudaromas geometrinis modelis, artimas realiai esančiam tiriamajam elementui, t. y. Y formos bandiniui. Galima keisti sudaryto geometrinio modelio geometriją, medžiagas. Taip pat atliktas geometrinio modelio skaidymas baigtiniais elementais;
- **Sprendimo dalis** (angl. *Solution Phase*). Šioje dalyje atliekami skaičiavimai, t. y. sprendžiamos netiesinės funkcijos pagrindiniams rezultatams gauti.
- **Užbaigimo dalis** (angl. *Postprocessing Phase*), kurioje atliekama gautų skaičiavimo rezultatų analizė.

Tiriamasis elementas (Y formos bandinys) yra simetriškas y ašies atžvilgiu, todėl naudojama tik pusė elemento, siekiant sumažinti skaičiavimo trukmę (2.14 pav.).



2.14 pav. Y formos bandinio deformavimo schema

/// - bandinio zonos, įtvirtintos veržtuvuose

Bandinio konstrukcija įtvirtinama atitinkamiems paviršiams nurodant simetrijos sąlygas tam, kad sudarytas modelis atitiktų realų bandinį, o įtempių-deformacijų būvis būtų taikomas visame bandinio plote. Bandinio matmenys parinkti tokie patys, kaip ir eksperimentiniuose bandiniuose (žr. 2.2.3 skyrius) bei laikomasi tų pačių bandymo

sąlygų, t. y. bandinio apatinė dalis B_Y įtvirtinama nejudančiame veržtuve, suvaržant poslinkius, o viršutinės bandinio dalys A_Y įtvirtinamos judančiuose veržtuvuose, su sąlyga, kad viršutinis veržtuvas gali judėti tik vertikaliai.

Remiantis moksliniais tyrimais (Zhang et al., 2007; Li, Zhang, 2008; Supel, Mikolajczyk, 2010; Zhang et al., 2005; Zhang et al., 2004), mežginiai dėl savo sudėtingesnės struktūros yra „minkštesni“, liaunesni nei audiniai, dažniau klumpa tiek išilgine, tiek skersine kryptimis, todėl pasirinkta sudėtingesnės struktūros tekstilės medžiaga M7 (100 % polipropilenas) (žr. **2.1 lentelę**), kai bandinys orientuojamas stulpelių kryptimi. Mežginio M7 mechaninės charakteristikos pateiktos **2.3 lentelėje**.

2.3 lentelė. Tekstilės medžiagos M7 mechaninės charakteristikos

Tamprumo modulis E , MPa	Šlyties modulis G , MPa	Puasono koeficientas, μ
$E_x = 0,9$ $E_y = 2,0$	$G_{x,y} = 0,018$	$\mu = 0,4$ (angl. <i>major</i>) $\mu = 0,2$ (angl. <i>minor</i>)

Tamprumo modulis E nustatytas, kaip tempimo įtempio σ ir tempimo išťažos ε santykis (Hu, 2008):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.8)$$

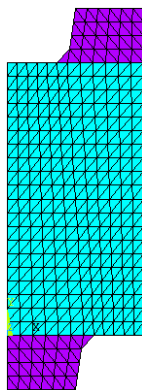
Šlyties modulis G nustatytas, kaip šlyties įtempio τ ir šlyties išťažos γ santykis (Hu, 2008):

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.9)$$

Puasono koeficientas μ nustatytas, kaip linijinių skersinės ir išilginės deformacijų santykis (Hu, 2008):

$$\mu = \left[\frac{\varepsilon_{sk}}{\varepsilon_{i\check{s}}} \right] \quad (2.10)$$

Remiantis kitų mokslininkų darbais (Chen et al., 2011; Carvelli et al., 2012; Hedfi et al., 2011), modeliavimui pasirinktas ortotropinis plokštelės (angl. *Shell*) tipo elementas *Plane 42*, kuris suskaidytas baigtiniais elementais (**2.15 pav.**).



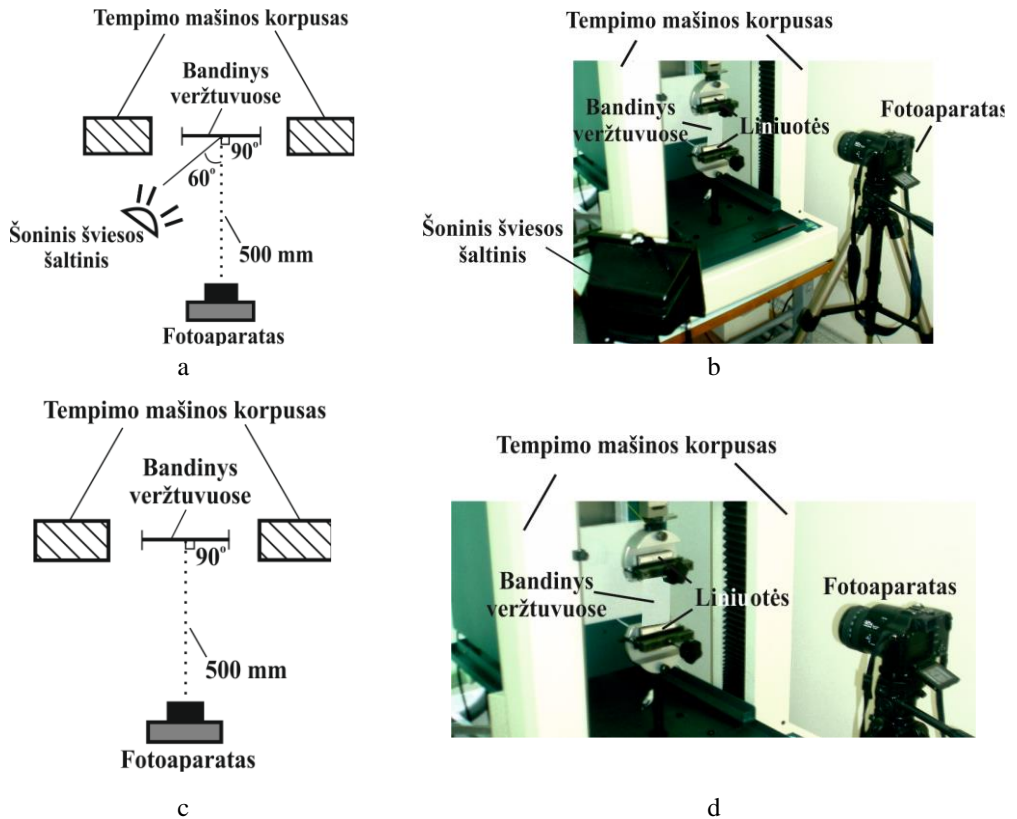
2.15 pav. Mežginio M7 bandinio suskaidymas baigtiniais elementais

Parinktas reguliarus tinklelis, kurio elementai turi 2 laisvės laipsnius, reikalingus apskaičiuojant parametrus, nusakančius tampriai deformuojamų plonasienių konstrukcijų būvį (Potluri et al., 2006; Sherburn, 2007; Lomov et al., 2007). Kadangi pasirinktas tyrimo mežginys yra liauna ir plona medžiaga, todėl modelyje bandinio kraštai A_Y ir B_Y sutvirtinami apie 10 kartų standesne medžiaga, siekiant išlaikyti medžiagos stabilumą imituojamuose veržtuvuose.

Imituojat tempiamo mežginio bandinio deformavimą, nurodoma, kad bandinys tempiamas kas 5 mm iki 40 mm, kad būtų galima stebėti, kaip kinta deformacijų pasiskirstymo laukai deformuojamame bandinio plote.

2.3. Skaitmeninių vaizdų fiksavimo sąlygos

Deformuojamų gretasienio (2.16 pav., a, b) ir Y formos bandinių (2.16 pav., c, d) vaizdai buvo fiksuojami skaitmeniniu veidrodiniu fotoaparatu *Pentax K7*, kurio objektyvas 18–55 mm F/3.5–5.6 AL.



2.16 pav. Deformuojamo gretasienio formos bandinio vaizdų fiksavimo principinė schema (a) ir eksperimentą fiksuojantis vaizdas (b) bei deformuojamo Y formos bandinio vaizdų fiksavimo principinė schema (c) bei eksperimentą fiksuojantis vaizdas (d)

Vaizdų fiksavimo sąlygos parinktos atsižvelgiant į kitų mokslininkų darbus ir rekomendacijas (Dargienė, Domskienė, 2013; Na, Pourdeyhimi, 1995; Liu et al., 2014; Meškuotienė et al., 2015).

Atstumas nuo bandinio iki fotoaparato objektyvo lęšio – 500 mm. Gretasienio ir Y formos bandinio vaizdams ir bandinių geometriniams pokyčiams analizuoti prie tempimo mašinos veržtuvų buvo pritvirtintos lipnios liniuotės (padalos vertė $\pm 0,5$ mm). Gretasienio metodui naudotas viršutinis ir šoninis, o Y formos bandinio metodui – viršutinis apšvietimai LED tipo lempomis (gamintojas *Epistar*, 9W, spalvinė temperatūra 3000–6000 K). Gretasienio metodui naudotas šoninis apšvietimas buvo nukreiptas 60° kampu į bandinį, kad būtų galima pastebėti, kada išnyksta nelygumai bandinio paviršiuje (pagal šešėlį). Skaitmeniniams vaizdams apdoroti ir koreguoti naudota programinė įranga *Adobe Photoshop CS4*, o bandinio geometriniams pokyčiams matuoti naudota programinė įranga *AutoDesk AutoCAD 2014*.

3. TYRIMŲ REZULTATAI

3.1. Tekstilės medžiagų struktūros paslankumo vertinimas standartiniais metodais

3.1.1. Audinių ištiesos vertinimas standartiniu vienašiu metodu iki bandinio suirimo ir tempimas neviršijant mažų apkrovų ribos

Audinių bandinių, kirptų metmenų ir ataudų kryptimis, trūkimo jėgos F_{Vtr} , santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} bei santykinės ištiesos anizotropiškumo koeficiento an_v vertės pateiktos **3.1 lentelėje**.

3.1 lentelė. Audinių rodikliai, gauti vienašio tempimo metu

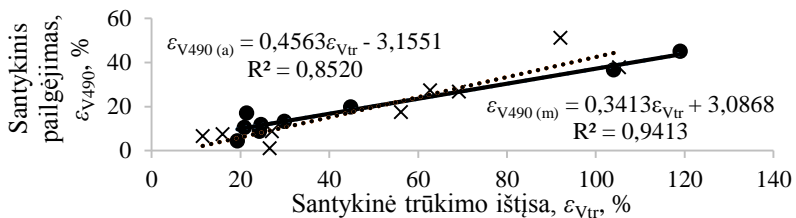
Kodas	F_{Vtr} , N/cm		ε_{Vtr} , %		an_v
	m	a	m	a	
A1	57,8±1,14 *	71,7±1,20 *	29,9	27,1	0,9 **
A2	176,5±1,02	207,1±1,11	20,9	26,6	0,8
A3	204,8±1,14 **	108,2±1,19	24,3	11,5 *	0,5
A4-EL-a	190,4±1,44	89,5±2,90	19,3 *	56,1	0,3
A5	112,5±1,25	225,6±2,20 **	21,4	16,0	0,8
A6-EL-ma	185,2±1,14	136,5±1,32	104,0	69,2	0,7
A7-EL-a	95,2±2,00	84,7±1,02	44,8	92,0	0,5
A8-EL-a	130,7±1,11	151,4±0,69	24,6	105,2 **	0,2 *
A9-EL-m(a)	180,8±0,66	124,5±1,27	119,0 **	62,7	0,5

* – mažiausia skaitinė vertė; ** – didžiausia skaitinė vertė

Audinių trūkimo jėgos F_{Vtr} vertės svyruoja 57,8 N/cm–225,6 N/cm ribose, santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} vertės kinta nuo 11,5 % iki 119,0 %, o santykinės trūkimo ištiesos anizotropiškumo koeficiento an_v – nuo 1,1 iki 4,3. Audinys A1 pasižymi mažiausiu pasipriešinimu išorinėms jėgoms abiem kryptimis ($F_{Vtr} = 57,8$ ir $71,7$ N/cm), kai tuo tarpu audinio A3 metmenų kryptimi ($F_{Vtr} = 204,8$ N/cm) ir audinio A5 ataudų kryptimi ($F_{Vtr} = 225,6$ N/cm) atsparumas tempimo jėgoms yra vienas didžiausių. Nors audinio A1 atsparumas išorinėms jėgoms mažas, tačiau, remiantis nedidelėmis santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} (29,9 % (metmenų kr.), 27,1 % (ataudų kr.)) ir santykinės trūkimo ištiesos anizotropiškumo koeficiento an_v skaitine verte, artima vienetui ($an_v = 0,9$), toks audinys turi geras deformacines savybes, jo struktūros elementai paslankūs ir išlaiko stabilumą abiem kryptimis. Nustatyta, kad audiniai A6-EL-ma, A7-EL-a (ataudų kr.), A8-EL-a (ataudų kr.), A9-EL-m(a) (metmenų kr.) yra tšūs, gerai deformuojasi, tai parodo ir aukštos santykinės trūkimo ištiesos vertės, kurios siekia ~ 100 %. Audinių A6-EL-ma ir A9-EL-m(a) deformacinė elgsena yra labai panaši dėl beveik vienodos pluoštinės sudėties. Šie audiniai pasižymi geru deformuojamumu, tačiau mažu struktūros elementų stabilumu. Audiniuose A6-EL-ma ir A9-EL-m(a) yra elastano siūlų, susuktų tiek su metmenų, tiek su ataudų siūlais. Tačiau santykinė trūkimo ištiesa ataudų kryptimi kirptuose šių audinių bandiniuose yra mažesnė maždaug trečdaliu. Pirmiausia, audinio A9-EL-m(a) elastano siūlai susukti tik su kas antru ataudų siūlu, priešingai nei metmenų – su kiekvienu, taip pat šio audinio metmenys tankesni, nei ataudai, vadinasi, ir metmenų siūlams tenka didesnė elastano pluoštų procentinė dalis. Nors audinio A6-EL-ma

elastano siūlai susukti ir su ataudais, ir su metmenimis, tačiau, kaip ir audinio A9-EL-m(a), metmenys yra tankesni nei ataudai, o didesnė elastano procentinė dalis metmenų siūluose pasižymi geresnėmis deformacinėmis savybėmis. Nors audinio A4-EL-a ataudų siūluose yra elastano siūlų, kaip ir audinių A7-EL-a ir A8-EL-a, tačiau šio audinio net 98 % sudaro mažiau paslankus, daugiau stabilus medvilnės pluoštas – sumažėja audinio deformuojamumas. Mažiausiu tąsumu ir deformuojamumu pasižymėjo celiuliozės pluošto turintys audiniai A2, A3 bei A5, kurių siūluose nėra sukty ar gretintų elastano siūlų, todėl tokių audinių struktūros elementai mažiau paslankūs, audiniai mažiau elastingi ir ne tokie tąsūs kaip elastano turintys audiniai. Todėl nustatyta, kad celiulioziniai pluoštai padidina audinių struktūros elementų stabilumą, sumažėja siūlų paslankumas. Panašių tendencijų surasta ir kitų mokslininkų darbuose (Rahman, 2011; Coruh et al., 2011; Kan et al., 2009; Vasconcelos, Cavaco-Paulo, 2006; Cortez et al., 2002; Mikučionienė, 2004). Nors audinio A4-EL-a pluoštinėje sudėtyje yra elastano gijų, tačiau dėl didelio medvilnės procentinio pluošto procentinio kiekio bei dvigubai tankesnių metmenų nei ataudai, šio audinio struktūros stabilumas yra didesnis, o deformacinės savybės kur kas prastesnės nei kitų, elastano gijų turinčių, audinių. Nustatyta, kad didesnėmis santykinės trūkimo ištiesos anizotropiškumo koeficiento α_V vertėmis pasižymi tie audiniai, kurių tankumo skirtumas tarp metmenų ir ataudų yra beveik dvigubai ar daugiau didesnis (A3, A4-EL-a, A7-EL-a bei A8-EL-a). Pynimo tankumo įtaką santykinės trūkimo ištiesos didėjimui nustatė ir mokslininkės A. Sviderskytė bei A. Kumpikaitė (2006). Remiantis santykinės trūkimo ištiesos anizotropiškumo koeficientu, nustatyta, kad audiniai su elastano siūlais yra anizotropiškesni, nei audiniai be elastano.

Remiantis mokslininkų darbais (Alamdar, 2004; Klevaitytė et al., 2011; Alamdar, 2002; Hu, Zhang, 1997; Tokmak et al., 2010; Yick, Cheng, 1996; Dapkūnienė, Strazdienė, 2007; Naujokaitytė et al., 2008; Geršak, 2004; Kawabata, 1980), medžiagų deformacines savybes rekomenduojama nustatyti esant mažoms dėvėjimo lygio apkrovoms. Deformuojant audinius mažomis dėvėjimo lygio apkrovomis, jų bandiniai yra nesuardomi, nepažeidžiami struktūros elementai. KES-F bandymų metodika siūloma audinius deformuoti 490 N/m (24,5 N/5cm) apkrova (Alamdar, 2002; Hu, Zhang, 1997; Kawabata, 1980). Siekiant įvertinti ir nustatyti ryšį tarp santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} rezultatų skaitinių verčių, kai suardomi bandiniai, ir tarp santykinio pailgėjimo ε_{V490} , kai bandiniai tempiami neviršijant mažų apkrovų ribos, buvo sudarytos tiesinės priklausomybės (3.1 pav.).



3.1 pav. Santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} , kai suardomas audinio bandinys, ryšys su santykinio pailgėjimu ε_{V490} , kai bandiniai deformuojami neviršijant mažų apkrovų ribos:

● – metmenys; × – ataudai

Toks glaudus ryšys tarp minėtų charakteristikų, deformuojant bandinius skirtingo lygio apkrovomis, rodo, jog audinių deformacinės savybės išryškėja jau pradinėmis deformavimo stadijomis, kai pasiekiamos nedidelės apkrovos, todėl audinių deformacinėms savybėms vertinti galima naudoti metodus, kai deformuojami bandiniai nesuardomi. Taip pat kitų mokslininkų darbuose (Alamdard, 2002; Tokmak et al., 2010; Yick, Cheng, 1996; Vasconcelos, Cavaco-Paulo, 2006) nustatytos ne tik tempimo, bet ir lenkimo bei šlyties rodiklių žymios koreliacijos tarp KES-F ir mažų apkrovų metodų.

3.1.2. Mezginių išties vertinimas standartiniu vienašiu metodu iki bandinio suirimo ir tempimas neviršijant mažų apkrovų ribos

Meginiai, kaip ir audiniai, pradžioje buvo deformuojami iki bandinio suirimo, o tempimo charakteristikos F_{Vtr} , ε_{Vtr} ir an_V pateiktos 3.2 lentelėje.

3.2 lentelė. Mezginių rodikliai, gauti vienašio tempimo metu

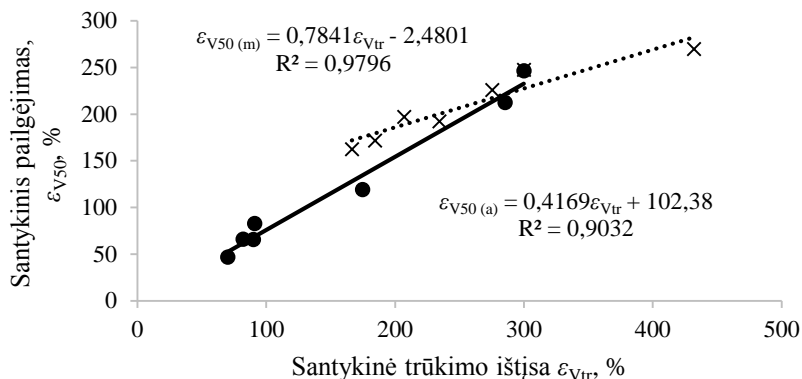
Kodas	F_{Vtr} , N/cm		ε_{Vtr} , %		an_V
	s	e	s	e	
M1	68,9±1,18 **	28,3±1,01	70,1 *	207,0	0,3
M2-EL-e	41,0±2,20	36,5±0,88 **	300,0 **	300,0	1,0 **
M3	40,2±1,13	27,1±2,25	89,8	184,5	0,5
M4-EL-e	36,3±1,74	35,2±1,15	285,4	275,4	1,0 **
M5-EL-(e)	53,3±0,90	35,0±1,19	174,8	234,4	0,7
M6	31,7±1,12 *	25,9±1,21 *	91,0	166,5 *	0,6
M7	40,8±1,12	30,0±0,91	82,0	432,0 **	0,2 *

* – mažiausia skaitinė vertė; ** – didžiausia skaitinė vertė

Bandymais nustatyta, kad medžiaga M1 stulpelių kryptimi yra tampriausia, pasižyminti prastomis deformacinėmis savybėmis ir gebėjimu priešintis išorinių jėgų poveikiui. Medžiaga M1 yra dvigubo skersinio mezgimo, skirtingai nei visos kitos bandymų medžiagos, todėl tempiant stulpelių kryptimi nutraukiamos jau nebe viena, dvi kilpą sudarančios siūlo šakos, o keturios. Medžiagos M7 tūsumas eilučių kryptimi yra didžiausias ($\varepsilon_{Vtr} = 432,0$ %), kai tuo tarpu stulpelių kryptimi – vienas mažiausių ($\varepsilon_{Vtr} = 82,0$ %). Medžiaga M7, skirtingai nuo kitų tirtų mezginių, yra elastingas polimeras, kurio deformacinės savybės lemia makromolekulių segmentų persigrupavimo greitis. Remiantis rezultatų skaitinėmis vertėmis, deformuojant polipropileno gijas stulpelių kryptimi, dviejų kilpą sudarančių siūlo šakų skerspjuvio plotai, dėl skirtingo siūlų išsilankstymo, pradeda mažėti kur kas greičiau, nei eilučių kryptimi. Todėl stulpelių kryptimi siūlai patiria mažesnes deformacijas. Eilučių kryptimi kirptų medžiagų trūkimo jėgos vertės yra panašios, t. y. skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios verčių vos 20 %, kai stulpelių kryptimi kirptų bandinių – apytiksliai 50 %. Nustatyta, kad medžiagos M2-EL-e ir M4-EL-e pasižymi didžiausiu tūsumu ir mažiausiu struktūros stabilumu abiem kryptimis. Šių mezginių pluoštinėje sudėtyje yra didžiausia elastano procentinė dalis (4 %–5 %), lyginant su kitais tirtais mezginiais. Taip pat medžiagose M2-EL-e ir M4-EL-e elastano siūlai gretinti su kiekvienu stulpelio/eilutės siūlu, priešingai nei medžiagos M5-EL-(e), kuriame elastano siūlai gretinti tik su kas antru stulpelio/eilutės siūlu. Priešingai nei audiniuose, didesniu santykinės trūkimo ištiesos anizotropiškumu pasižymėjo

mezginiai M1, M3, M6 ir M7 be elastano. Tokį reiškinį paaiškina anksčiau minėta skersinio mezginio struktūra.

Mezginiai, kaip ir audiniai, buvo deformuojami dėvėjimo lygio apkrova 50 N/m (2,5 N/5cm). Siekiant įvertinti ir nustatyti ryšį tarp santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} rezultatų skaitinių verčių, kai suardomi bandiniai ir santykinio pailgėjimo ε_{V50} , tempiant bandinius neviršijant mažų apkrovų ribos, buvo sudarytos tiesinės priklausomybės (3.2 pav.).



3.2 pav. Santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} , kai suardomas mezginio bandinys, ryšys su santykinio pailgėjimu ε_{V50} , kai bandiniai deformuojami neviršijant mažų apkrovų ribos:
 • – stulpelių kryptis; × – eilučių kryptis

Bandymai parodė, kad egzistuoja stiprus ryšys ($R^2 = 0,9032 \div 0,9796$) tarp santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} , kai suardomas mezginio bandinys ir santykinio pailgėjimo ε_{V50} , kai bandiniai deformuojami neviršijant mažų apkrovų ribos (3.2 pav.). Nors mezginių deformacinėms savybėms vertinti dažnai naudojami bandinio suardymo, dvikrypčiai ar daugiakrypčiai metodai (Cortez et al., 2002; Mikučionienė, 2004; Kumpikaitė, Sviderskytė, 2006), tačiau randama mokslinių tyrimų, kai bandiniai deformuojami neviršijant mažų apkrovų ribos ne tik tradiciniais metodais (Yazdi-Alamdard, 2003; Robertson, 2000; Robertsin, 2000).

Remiantis 3.1 ir 3.2 lentelėse pateiktomis santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr} vertėmis, nustatyta, kad mezginių tūsumas ir struktūros elementų paslankumas yra žymiai didesnis nei audinių, todėl mezginių bandiniai buvo susiūti dviejų tipų siūlėmis – vertikalia ir horizontalia – siekiant nustatyti paslankių mezginių siūlės įtaką jų deformuojamumui, struktūros elementų paslankumui ir stabilumui. Bandinių, kirptų stulpelių ir eilučių kryptimis, trūkimo jėgos F_{Vtr-S} , santykinės trūkimo ištiesos ε_{Vtr-S} bei santykinės trūkimo ištiesos anizotropiškumo koeficiento an_{V-S} vertės pateiktos 3.3 lentelėje.

Nustatyta, kad mezginių bandinių, susiūtų vertikalia siūle, trūkimo jėgos F_{Vtr-S} vertės stulpelių kryptimi padidėjo apytiksliai nuo 2,0 % iki 20,9 %, o eilučių kryptimi – nuo 2,1 % iki 28,1 %. Mezginių bandinių, susiūtų vertikalia siūle, trūkimo jėgos F_{Vtr-S} vertės stulpelių kryptimi sumažėjo apytiksliai nuo 7,5 % iki 45,9 %, o eilučių kryptimi nuo –7,1 % iki 38,1 %. Tokiems trūkimo jėgos pokyčiams, t. y. F_{Vtr-S} verčių padidėjimui, tempiant bandinius, susiūtus vertikalia siūle, ir verčių

sumažėjimui, tempiant bandinius, susiūtus horizontalia siūle, įtaką daro siūlės padėtis bandinyje.

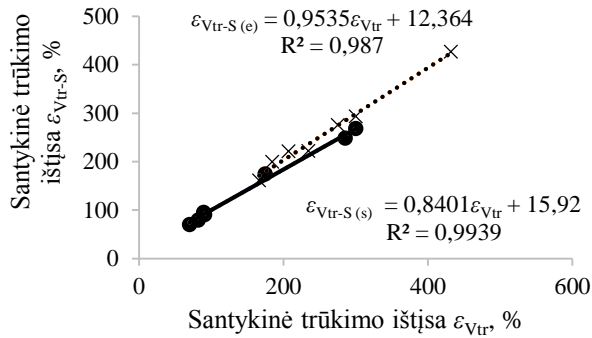
3.3 lentelė. Mezginių bandinių, sujungtų skirtingo tipo siūlėmis, rodikliai vienašio tempimo metu

Kodas	$F_{V_{tr-S}}$, N/cm		$\varepsilon_{V_{tr-S}}$, %		an_{V-S}
	s	e	s	e	
Susiūti vertikalia siūle					
M1	86,7±2,22 **	37,1±1,08	70,4 *	222,0	0,3
M2-EL-e	39,1±2,00 *	44,6±0,94 **	268,4 ↑	293,6	0,9 **
M3	48,6±1,91	36,1±2,21	95,4	200,0	0,5
M4-EL-e	48,1±1,70	43,5±1,01	249,2	276,1	0,9 **
M5-EL-(e)	63,8±1,14	41,2±1,17	175,2	222,5	0,8
M6	39,8±1,12	32,6±0,99	91,2	161,5 *	0,6
M7	41,6±1,15	30,9±0,97 *	80,0	427,0 **	0,2 *
Susiūti horizontalia siūle					
M1	37,2±1,01 **	26,3±0,66	62,2 *	212,0	0,3
M2-EL-e	25,0±0,69	32,0±0,92 **	261,0 **	294,0	0,9 ↑
M3	27,5±0,91	23,8±1,20	78,5	180,5	0,4
M4-EL-e	29,5±1,12	21,8±1,03 *	217,6	281,4	0,8
M5-EL-(e)	30,2±1,18	32,1±1,12 **	137,5	225,3	0,6
M6	22,9±1,20 *	21,7±1,11 *	92,5	167,5 *	0,6
M7	37,7±1,31	32,3±1,00 **	80,4	445,0 **	0,2 *

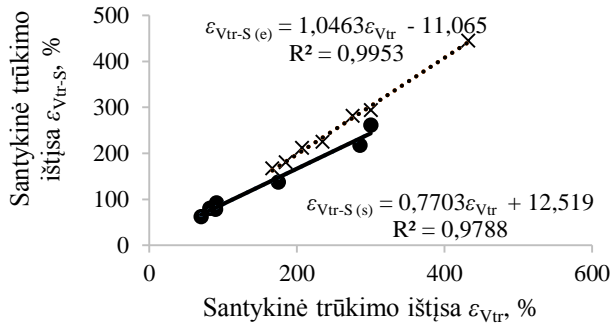
* – mažiausia skaitinė vertė; ** – didžiausia skaitinė vertė

Mezginių be siūlės santykinės trūkimo iššios $\varepsilon_{V_{tr-S}}$ vertės svyruoja 70,1 %–432,0 % ribose, susiūtų vertikalia siūle – 70,4 %–427,0 %, o susiūtų horizontalia siūle – 62,2 %–445,0 % ribose. Nors trūkimo jėgų verčių pokyčiai, tempiant siūlėmis sujungtus bandinius, yra pakankamai žymūs, tačiau santykinės trūkimo iššios verčių pokyčiai yra nedideli, t. y. stulpelių kryptimi svyruoja nuo 0,2 % iki 12,7 %, eilučių kryptimi – nuo 0,3 % iki 7,8 %, kai bandiniai sujungti vertikalia siūle ir nuo 1,6 % iki 23,8 % (stulpelių kryptimi) bei nuo 0,6 % iki 3,9 % (eilučių kryptimi), kai bandiniai sujungti horizontalia siūle. Tai rodo ir nežymūs santykinės trūkimo iššios anizotropiškumo koeficiento an_{V-S} verčių pokyčiai, kurie siekia ~ 0,2 %.

Medžiagų M2-EL-e (10,5 %) ir M4-EL-e (12,7 %) stulpelių kryptimi santykinės trūkimo iššios verčių sumažėjimas yra didžiausias, kai bandiniai susiūti vertikalia siūle. Nustatytas didžiausias santykinės trūkimo iššios sumažėjimas medžiagoms M4-EL-e ir M5-EL-(e) stulpelių kryptimi, kai bandiniai susiūti horizontalia siūle. Rezultatai rodo, jog siūlė labiausiai daro įtaką mezginių su elastanu tūsumo ir struktūros paslankumo bei deformuojamumo sumažėjimui, o medžiagų be elastano santykinės trūkimo iššios pokyčių vertės kinta neviršydamos paklaidos ribų. Tai rodo ir labai glaudus ryšys ($R^2 = 0,9788 \div 0,9953$) tarp santykinės trūkimo iššios $\varepsilon_{V_{tr}}$ verčių, kai bandiniai be siūlės, ir santykinės trūkimo iššios $\varepsilon_{V_{tr-S}}$ verčių, kai bandiniai susiūti vertikalia (**3.3 pav., a**) ir horizontalia siūlėmis (**3.3 pav., b**).



a



b

3.3 pav. Santykinės trūkimo ištįsos ε_{Vtr} , kai bandiniai be siūlės, ryšys su santykinė trūkimo ištįsa ε_{Vtr-S} , kai bandiniai sujungti vertikalia (a) ir horizontalia (b) siūlėmis: ● – stulpelių kryptis; × – eilučių kryptis

Apibendrinimas

Tempiant tekstilės medžiagas vienašiu metodu iki bandinių suirimo, nustatyta, kad audinių santykinės trūkimo ištįsos ε_{Vtr} vertės svyruoja 11,5 %–119,0 % ribose. Deformuojant audinius, kai neviršijama mažų apkrovų riba (490 N/m), santykinio pailgėjimo ε_{V490} vertės kinta 1,1 %–51,2 % ribose. Nustatyta, kad mažesnės tūsumo ribos būdingos bandiniams, kirptiems ta kryptimi, kurioje yra natūralaus pluošto, pavyzdžiui, lino ar medvilnės. Tačiau nepastebėta žymios pynimo įtakos audinių deformacinėms savybėms. Mezginių atveju, tempiant bandinius vienašiu metodu iki bandinių suirimo, nustatyta, kad santykinės trūkimo ištįsos ε_{Vtr} vertės svyruoja 70,1 %–432,0 % ribose ir yra kelis kartus didesnės nei audinių. Deformuojant mezginius, kai neviršijama mažų apkrovų riba (50 N/m), santykinio pailgėjimo ε_{V50} vertės kinta 46,8 %–246,6 % ribose. Galima pastebėti, kad mezginiai, priešingai nei audiniai, jau mažų dėvėjimo lygio apkrovų metu pasiekia aukštą tūsumo ribas.

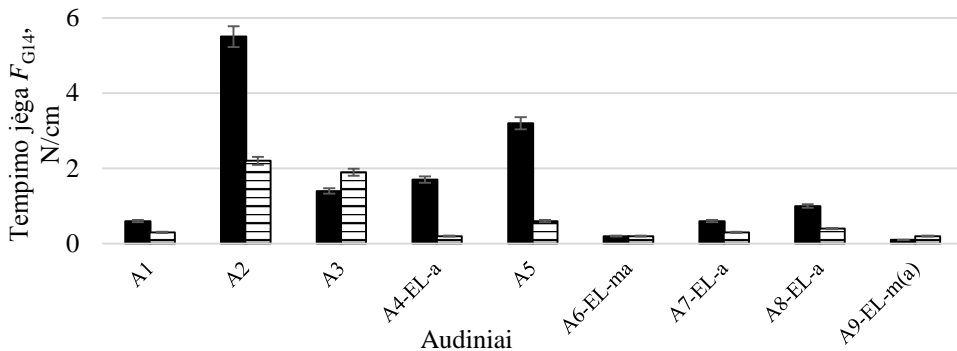
Santykinės trūkimo ištįsos verčių pokyčiai, kai mezginių bandiniai sujungti siūlėmis, svyruoja nuo 0,2 % iki 12,7 % (bandiniai sujungti vertikalia siūle) bei nuo 0,6 % iki 23,8 % (bandiniai sujungti horizontalia siūle). Taip pat nustatyti ir nežymūs santykinės trūkimo ištįsos anizotropiškumo koeficiento an_{V-S} verčių pokyčiai, po bandinių sujungimo siūlėmis, kurie siekia ~ 0,2 %.

Bandymai parodė, kad egzistuoja stiprus ryšys tarp santykinės trūkimo ištiesos ε_{tr} , kai suardomas bandinys ir santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{V490;50}$, kai bandiniai deformuojami neviršijant mažų apkrovų ribos, būdingas tiek audiniams ($R^2 = 0,8520 \div 0,9413$), tiek mezginiams ($R^2 = 0,9032 \div 0,9796$). Analogiškos išvados padarytos ir kitų mokslininkų darbuose, kuriuose nustatyta ne tik tempimo, bet ir lenkimo bei šlyties rodiklių žymios koreliacijos tarp KES-F ir mažų apkrovų metodų. Taigi, tekstilės medžiagų deformacinės savybės išryškėja jau pradinėmis deformavimo stadijomis, kai pasiekiamos nedidelės dėvėjimo lygio apkrovos. Todėl tekstilės medžiagų deformacinėms savybėms vertinti galima naudoti ne tik standartinius metodus, kurie skirti bendrajai deformacinei elgsenai nustatyti, bet ir netradicinius metodus, kai bandiniai deformuojami neviršijant tamprumo ribų nesuardant jų struktūros elementų.

3.2. Tekstilės medžiagų deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu

3.2.1 Audinių deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu

Remiantis 2.2.2 skyriuje pateikta gretasienio metodika, bandiniai buvo tempiami iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G14} = 14\%$. Tempimo jėgos F_{G14} skaitinės vertės svyruoja mažose 0,1 N/cm – 5,5 N/cm ribose (3.4 pav.).

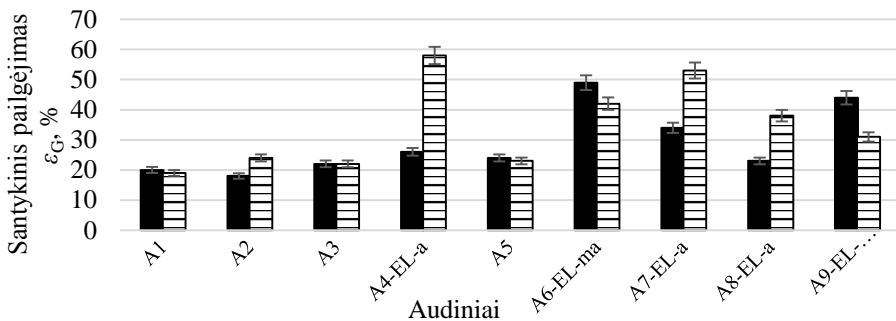


3.4 pav. Tempimo jėgos F_{G14} vertės, tempiant audinius iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G14} = 14\%$: ■ – metmenų kryptimi kirpti bandiniai; ▨ – ataudų kryptimi kirpti bandiniai

Esant tokioms apkrovoms galima nustatyti pradinę audinių elgseną juos deformuojant. Audinių A2 ir A5, kirptų metmenų kryptimi, tempimo jėgos F_{G14} vertės yra 50 %–80 % didesnės nei kitų, ta pačia kryptimi kirptų, audinių. Ataudų kryptimi didžiausiu pasipriešinimu ašinėms jėgoms pasižymėjo taip pat audinys A2 bei A3. Audinių A6-EL-ma ir A9-EL-m(a) tempimo jėgos F_{G14} vertės yra vienos mažiausių abiem kryptimis. Esant pradinei deformavimo stadijai audinių elgsenai daro įtaką siūlų sukrumas, audinio tankumas. Audinių A6-EL-ma ir A9-EL-m(a) elastano siūlai yra susukti su abiem siūlų sistemomis (metmenų ir ataudų), todėl tikėtina, kad šiuos audinius deformuojant gretasienio metodu, pirmiausia pasireiškia siūlų ištiesa. Tokie audiniai yra tasesni, lengviau tempiasi ir iš pradžių patiria mažesnę priverstinę deformaciją bei siūlų tarpusavio trintį nei audiniai be elastano. Atliekant bandymus pastebėta, kad, deformuojant bandinius iki $\varepsilon_{G14} = 14\%$, bandinių paviršiuje susidarę nelygumai neišnyksta – tai parodo ne iki galo įvykusį šlyties reiškinį tarp metmenų ir

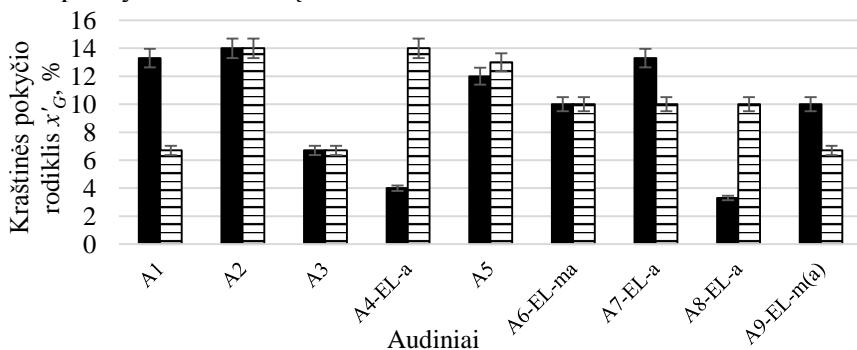
ataudų siūlų. Todėl vertinti bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinių geometrinųjų pokyčių rodiklius x'_{G14} , y'_{G14} ir α'_{G14} nėra tikslinga. Išsamesnei medžiagų deformacinių savybių analizei bandiniai buvo tempiami tol, kol jų paviršiuje nebelikdavo nelygumų. Nustatytas santykinis pailgėjimas ε_G (3.5 pav.), bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinių pokyčių rodikliai x'_G (3.6 pav.) ir y'_G (3.7 pav., a).

Santykinio pailgėjimo ε_G skaitinės vertės svyruoja 18 % – 58 % ribose. Nustatyta, kad audinių su elastano siūlais A4-EL-a, A6-EL-ma, A7-EL-a, A8-EL-a, A9-EL-m(a) santykinio pailgėjimo vertės yra didesnės, ypač bandinių, kirptų ataudų kryptimi. Audiniai A6-EL-ma ir A9-EL-ma yra tąsiau ir pasižymi geromis deformacinėmis savybėmis, kai bandiniai yra kirpti metmenų kryptimi. Šių audinių, skirtingai nei kitų bandymams naudotų audinių, elastano siūlai susukti su metmenų siūlais, taip pat šių audinių elastano kiekis pluoštinėje sudėtyje sudaro didžiausią dalį.



3.5 pav. Santykinio pailgėjimo ε_G vertės: ■ – metmenų kryptimi kirpti bandiniai; ▨ – ataudų kryptimi kirpti bandiniai

Audinių A4-EL-a ir A7-EL-a santykinio pailgėjimo ε_G vertės ataudų kryptimi yra didžiausios ir siekia 50 % – 60 %. Šių audinių ataudai yra tankiausi ir susukti su elastano siūlais, todėl ataudų kryptimi yra mažiau stabilūs, labiau paslankesni ir tempami pasižymi didesniu tąsumu.

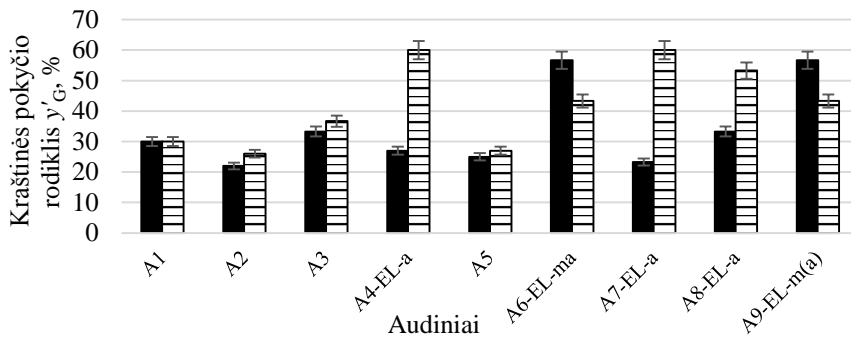


3.6 pav. Audinių bandiniuose nubraižyto lygiagretainio kraštinės x_{G0} pokyčio rodiklis x'_G (a): ■ – metmenų kryptimi kirpti bandiniai; ▨ – ataudų kryptimi kirpti bandiniai

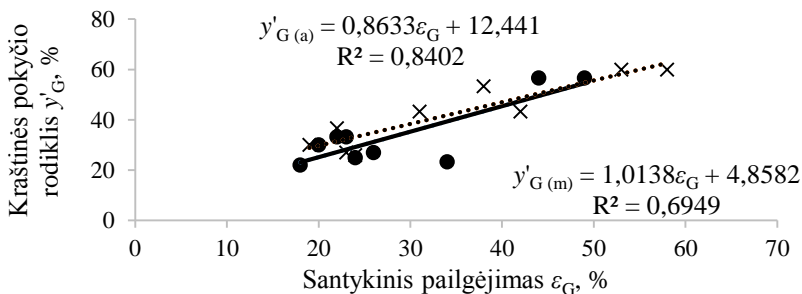
Audinio struktūra lemia tam tikrą metmenų ir ataudų siūlų rangytumą. Tempiamų išilginių siūlų skersmuo mažėja, skersiniai siūlai išsirango didesniu laipsniu, akutės tarp siūlų sumažėja, dėl to kinta bandinio skersiniai matmenys.

Rodiklis x'_G nusako bandinio skersinių matmenų geometrinius pokyčius, o rodiklis y'_G parodo, kokią dalį deformacijos sudaro išilginių siūlų ištįsa.

3.6 pav. matyti, kad skersinių matmenų kitimas neviršija 15 % ribos, o tuo tarpu išilginių matmenų pokyčiai siekia net 60 % (**3.7 pav., a**). Remiantis gautais pradinės tempimo dalies bandymų rezultatais, kai deformacijos yra nedidelės, audinio išilginiai ir skersiniai matmenys kinta beveik proporcingai, t. y. dėl siūlų persislinkimo ir tūsumo pailgėjus išilginei kraštinei y_{G0} , skersinė kraštinė x_{G0} , dėl akučių tarp metmenų ir ataudų mažėjimo, susiaureėja. Tačiau deformuojant bandinius toliau ir artėjant prie santykinio pailgėjimo ε_G , išilginiai siūlai vis dar tempiami tįsta, tačiau tarp metmenų ir ataudų siūlų esančios akutės užsidaro, siūluose padidėja trintis ir gniuždymo jėgos – lygiagretainio kraštinės pokyčio rodiklio x'_G vertės beveik nekinta, o rodiklio y'_G vertės didėja priklausomai nuo siūlų tūsumo. Tą rodo ir priklausomybė tarp santykinio pailgėjimo ε_G ir rodiklio y'_G ($R^2 = 0,6949 \div 0,8402$) (**3.7 pav., b**). Bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinė y_{G0} yra lygiagreti tempimo jėgos veikimo kryptčiai ir deformavimo pradžioje išilginiai siūlai patiria mažesnę klupdymą nei skersiniai. Tempimo metu bandinio viduryje veikia trinties jėga, susidaranti tarp priešingos sistemos siūlų, jiems sukantis kontakto vietoje vienas kito atžvilgiu, kuri yra didesnė nei prie veržtuvų. Tempiamų bandinių viduryje taip pat atsiranda šoninės jėgos.



a



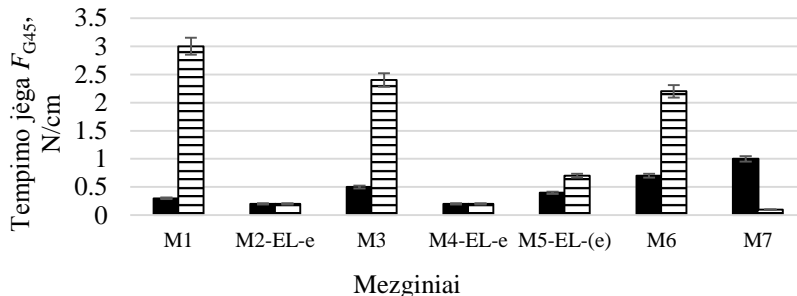
b

3.7 pav. Audinių bandiniuose nubraižyto lygiagretainio kraštinės y_{G0} pokyčio rodiklis y'_G (a) ir rodiklio y'_G priklausomybė nuo santykinio pailgėjimo ε_G : ■, ● – metmenų kryptimi kirpti bandiniai; ▨, × – ataudų kryptimi kirpti bandiniai

Rodiklis α'_G nusako, kurią dalį sudaro siūlų ištįsa ir kurią – šlytis tarp metmenų ir ataudų siūlų. Kuo α'_G vertė artimesnė 90° kampui, tuo mažesnę deformacijos dalį deformuojamame bandinyje sudaro išilginių siūlų ištįsa. Ištempus bandinius iki tol, kol jų paviršiuje nelikdavo raukšlių, kampas α_{G0} tarp lygiagretainio kraštinių x_{G0} ir y_{G0} priartėjo prie 90° kampo, tačiau audiniuose su elastano pluoštu rodiklio α'_G vertės buvo $\sim 3^\circ$ mažesnės nei 90° . Audinių be elastano pluošto ir drobinio pynimo rodiklio α'_G vertės neviršijo 1° . Vadinasi, mažiau tįsūs drobinio pynimo audiniai patiria didesnes šlyties deformacijas.

3.2.2. Mezginių deformacinių savybių vertinimas gretasienio metodu

Remiantis 2.2.2 skyriuje pateikta gretasienio metodika, tempiant mezginius iki santykinio pailgėjimo ε_{G45} , tempimo jėgos F_{G45} vertės svyruoja 0,1 N/cm–3,0 N/cm ribose (3.8 pav.). Kadangi bandiniai deformuojami ištįsęs dydžiu, kuris nėra maksimalus medžiagos pailgėjimas, todėl tempimo jėgos F_{G45} skaitinės vertės nusako medžiagų priešinimąsi apkrovoms esant pradinėms deformavimo stadijoms. Nustatyta, kad didžiausios tempimo jėgos F_{G45} vertės yra mezginių M1, M3 ir M6 eilučių kryptimi, kurių pluoštinėje sudėtyje nėra elastano, o mažiausios F_{G45} vertės yra medžiagų M2-EL-e ir M4-EL-e, kurių pluoštinėje sudėtyje yra didžiausias kiekis elastano (4 %–5 %). Medžiagos M2-EL-e ir M4-EL-e, dėl jų sudėtyje esančio elastano, yra paslankesnės, tįsesnės nei medžiagos be elastano, todėl tokios medžiagos, veikiamos mažų apkrovų, puikiai deformuojasi.

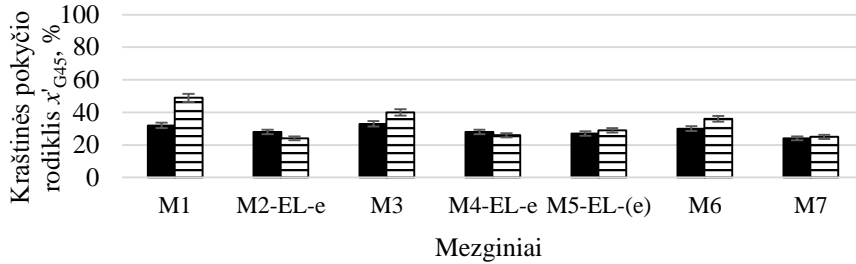


3.8 pav. Tempimo jėgos F_{G45} vertės, deformuojant mezginius iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{G45} = 45\%$: ■ – stulpelių kryptimi kirpti bandiniai; ▨ – eilučių kryptimi kirpti bandiniai

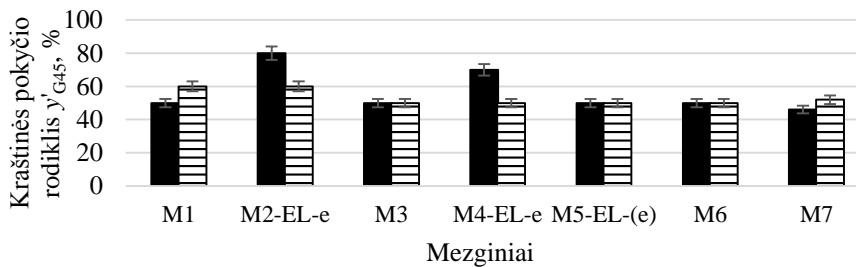
Idealiomis sąlygomis, netįsius bet paslankius medžiagos struktūros elementus veikiant priešingų krypčių jėgomis, tarp jų susidarytų grynoji šlytis. Tačiau medžiagų siūlai sudaryti ne tik iš tįsųjų gijų, bet ir mezginio kilpučių, todėl pasireiškia ne tik šlytis, bet ir siūlų lenkimas, ištįsimas ir kitos deformacijos. Mezginius deformuojant gretasienio metodu, pirmiausia išsitiesino mezginio struktūros elementai (kilpos visiškai susiglaudė), kadangi jie yra šiek tiek tįsūs. Vėliau mezginį sudarantys siūlai buvo ištempiami, todėl bandymuose sumažėjo skersiniai matmenys, bet žymiai padidėjo išilginiai bandinio matmenys. Tirtų mezginių bandinyje nubraižyto lygiagretainio kraštinės x_{G0} pokyčio rodiklis x'_{G45} pateiktas 3.9 pav., a, o kraštinės y_{G0} pokytis y'_{G45} pateiktas 3.9 pav., b.

Nustatyta, kad rodiklio x'_{G45} vertės svyruoja 24 %–49 % ribose, o rodiklio y'_{G45} – 50 %–80 % ribose. Daugelio mezginių bandiniuose nubraižyto lygiagretainio

kraštinė x_{G0} susiaurėjo apytiksliai 30 %, o kraštinė y_{G0} pailgėjo 50 %. Medžiagų M1, M3 ir M6 skersiniai pokyčiai didesni nei išilginiai, o medžiagų M2-EL-e, M4-EL-e ir M5-EL-(e) – atvirkščiai. Kadangi mezginiai M1, M3 ir M6 yra be elastano, tai tempimo metu mezginio kilpos, dėl mažesnio siūlų tūsumo ir paslankumo, užsidaro greičiau ir skersiniai bandinio matmenys sumažėja.



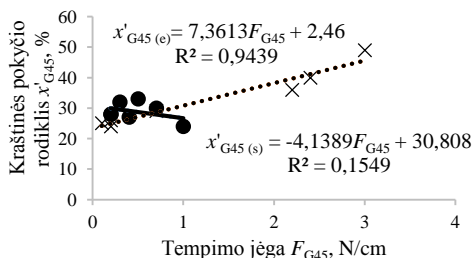
a



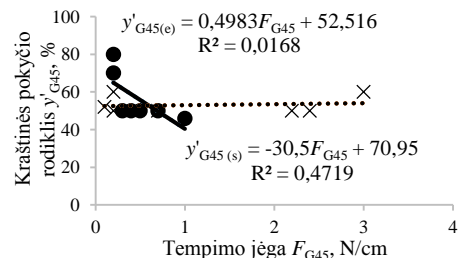
b

3.9 pav. Mezginių bandiniuose nubraižyto lygiagretainio kraštinės x_{G0} pokyčio rodiklis x'_{G45} (a) ir rodiklis y'_{G45} (b) : ■ – stulpelių kryptimi kirpti bandiniai; ▨ – eilučių kryptimi kirpti bandiniai

Tempiant medžiagas M2-EL-e, M4-EL-e ir M5-EL-(e), dėl elastano pluošto siūlai iš pradžių tįsta, o paskui yra tempiami, dėl to išilginiai matmenys pailgėja. Kaip ir audiniuose, taip ir mezginiuose, išilginių matmenų kitimas labai priklauso nuo santykinio pailgėjimo dydžio.



a



b

3.10 pav. Mezginių tempimo jėgos F_{G45} ryšys su x'_{G45} (a) ir y'_{G45} (b) rodikliais: ● – stulpelių kryptis; × – eilučių kryptis

Tiriant mezginių deformacinę elgseną buvo ieškota ryšio tarp medžiagų tempimo jėgos ir medžiagos deformaciją nusakančių rodiklių x'_{G45} (**3.10 pav., a**), ir y'_{G45} (**3.10 pav., b**). Tačiau stipri tiesinė priklausomybė ($R^2 = 0,9439$) nustatyta tik rodikliui x'_{G45} , kai bandiniai kirpti eilučių kryptimi. Tai rodo, jog dėl medžiagų anizotropiškumo, gretasienio metodu sudėtinga objektyviai įvertinti rodiklių kitimo dėsningumus.

Apibendrinimas

Ištempus audinių bandinius iki tol, kol jų paviršiuje nelikdavo nelygumų, kampas α_{G0} tarp lygiagretainio kraštinių x_{G0} ir y_{G0} priartėjo prie 90° kampo, tačiau audinių su elastano pluoštu, rodiklio α'_G vertės buvo $\sim 3^\circ$ mažesnės nei 90° . Audinių be elastano pluošto ir drobinio pynimo, rodiklio α'_G vertės neviršijo 1° . Vadinasi, mažiau tāsūs drobinio pynimo audiniai patiria didesnes šlyties deformacijas. Tuo tarpu mezginių bandiniuose nubraižyto lygiagretainio kampo tarp kraštinės x_{G0} ir y_{G0} pokyčio rodiklis α'_{G45} , deformuotiems bandiniams santykinio pailgėjimo dydžiu $\varepsilon_{G45} = 45\%$, nesiekė 1% , t. y. nubraižytas lygiagretainis beveik nepakito. Šiuo atveju, tirtų mezginių deformaciją sudarė medžiagų struktūros elementų tįsimas, o ne šlytis. Ištempus bandinius ištįsa, didesne nei 45 mm , bandiniuose nubraižytas lygiagretainis netapo stačiakampiu, o medžiagų struktūros elementai pradėjo irti.

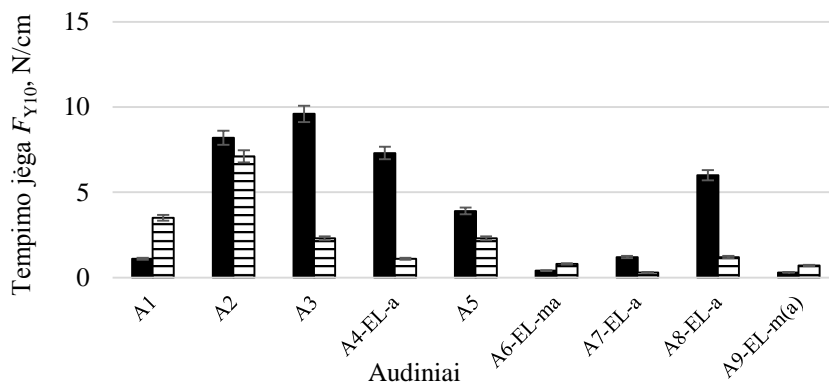
Tiriant priklausomybę tarp mezginių tempimo jėgos ir medžiagos deformaciją nusakančių rodiklių x'_{G45} ir y'_{G45} , stipri tiesinė priklausomybė ($R^2 = 0,9439$) nustatyta tik rodikliui x'_{G45} , kai bandiniai kirpti eilučių kryptimi. Vadinasi, dėl medžiagų anizotropiškumo, gretasienio metodu sudėtinga objektyviai įvertinti rodiklių kitimo dėsningumus. Eksperimentų metu gauti rezultatai patvirtino, kad gretasienio formos bandinio deformavimo metodika sunkiai pritaikoma paslankių audinių, o ypač mezginių deformacinėms savybėms vertinti. Todėl nuspręsta gretasienio metodikos netaikyti tolimesniuose bandymuose ir sukurti naują, universalų metodą, tinkantį audinių ir mezginių sudėtingoms deformacijoms vertinti (**žr. 2.2.3. ir 3.3. skyrius**).

3.3. Tekstilės medžiagų ir jų junginių deformacinių savybių vertinimas nauju Y formos bandinio metodu

3.3.1. Audinių deformacinių savybių vertinimas Y formos bandinio metodu

Remiantis **2.2.3 skyriuje** pateikta Y formos bandinio tempimo metodika, audinių bandiniai buvo tempiami, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas $\varepsilon_{Y10} = 10\%$. Tempimo jėgos F_{Y10} skaitinės vertės kinta $0,3\text{ N/cm} - 9,6\text{ N/cm}$ ribose (**3.11 pav.**).

Nustatyta, kad tempiant audinių bandinius Y formos bandinio metodu iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y10} = 10\%$, tempimo jėgos F_{Y10} vertės neviršija mažų apkrovų ribos. Taip pat bandiniai deformuojami neviršijant medžiagų tamprumo ribų ir yra nepažeidžiami jų struktūros elementai. Deformuojant bandinius Y formos bandinio metodu, bandinyje sukiamas šlyties reiškinys, todėl **3.11 pav.** matyti, kad audinių, kurių metmenų arba ataudų siūlai yra mažiau paslankūs, pavyzdžiui, sudaryti iš medvilnės pluoštų, pasižyminčių mažesniu struktūros elementų paslankumu, pasipriešinimas išorinėms jėgoms yra didesnis.

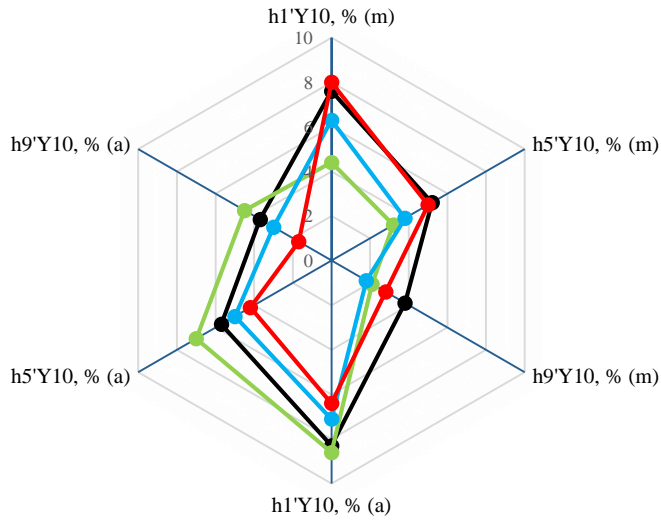


3.11 pav. Tempimo jėgos F_{Y10} vertės, deformuojant audinius iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y10} = 10\%$: ■ – metmenų kryptimi kirpti bandiniai; ▨ – ataudų kryptimi kirpti bandiniai

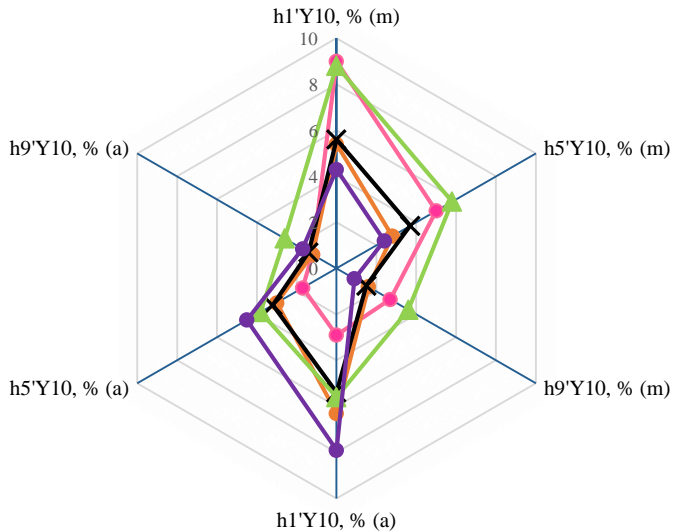
Siekiant išsamiai išanalizuoti ir įvertinti medžiagų deformacines savybes, remiantis Y formos bandinio metodu (žr. **2.2.3 skyrių**), tyrimams buvo pasirinkti 3 rodikliai $h_i'_{Y10}$, $v_{Si}'_{Y10}$ ir $\alpha_i'_{Y10}$ medžiagų deformuojamumui, deformacijų pasiskirstymui ir netolygumui charakterizuoti 1-ame, 5-ame ir 9-ame bandinio taškuose. Kadangi šio darbo ankstesniuose tyrimuose (Sacevičienė et al., 2011) ir kitų mokslininkų darbuose (Abdessalem et al., 2009; Gorjanc, Bukošek, 2008; Senthikumar et al., 2011; Das, Chakraborty, 2013; Šajn et al., 2005; Šajn et al., 2005; Ortlek, 2006; Ozdil, 2008; Dgouib et al., 2006; Gurarda, 2008) buvo nustatyta žymi elastano įtaka medžiagų deformacinėms savybėms, todėl audiniai išskirti į dvi grupes – be elastano ir su elastano pluoštu.

Rodikliai $h_1'_{Y10}$, $h_5'_{Y10}$ ir $h_9'_{Y10}$ nusako išilgines deformacijas ir medžiagų bandinių ilginių matmenų pokyčius. Nustatyta, kad 1-ame taške tirtų audinių išilginės deformacijos yra didžiausios ir 1-ojo taško poslinkiai siekia iki 10 %, kai bandiniai kirpti tiek metmenų, tiek ataudų kryptimis (**3.12 pav.**). Tuo tarpu 5-ame taške deformacijos yra mažesnės ir čia poslinkiai siekia 7 %, o 9-ame taške poslinkiai mažiausi ir neviršija 5 %. Kadangi taškas 1 yra prie neįtvirtintos bandinio zonos, tai čia abi neįtvirtintos siūlų sistemos deformuojasi laisvai, o deformavimasi riboja tik siūlų tarpusavio trintis, todėl ir deformacijos yra vienos didžiausių. Tuo tarpu taškas 9 yra prie įtvirtinto veržtuvo zonos, kurioje ribojamas siūlų deformavimasis, todėl čia deformacijos kur kas mažesnės. Taške 5, kuris yra bandinio centrinėje dalyje tarp veržtuvuose įtvirtintos ir neįtvirtintos bandinio zonų, poslinkiai mažiausi dėl skirtingomis kryptimis tempiamų bandinio A_Y ir B_Y dalių, t. y. bandinio dalys A_Y tempiamos viena kryptimi, o dalis B_Y , įtvirtinta apatiniame veržtuve, veikiama priešingos krypties jėgų. Todėl šių, priešingų krypčių jėgų veikiamo taško poslinkis priklauso nuo jų ribojančių zonų paslankumo ir medžiagos siūlų tūsumo.

Pastebėta, kad audinių be elastano kreivės sudaro beveik taisyklingų simetriškų geometrinių figūrų plotus, o audinių su elastano pluoštu kreivės sudaro netaisyklingas figūras. Todėl nustatyta, kad kuo kreivės kontūras artimesnis taisyklingos geometrinės figūros plotui ir yra simetriškesnis, tuo audinių struktūra stabilesnė, mažiau deformuojasi.



a



b

3.12 pav. Rodiklio $h_i^c_{Y10}$ vertės trijuose bandinio taškuose audinių be elastano (a) ir su elastanu(b): m – metmenų kryptimi kirpti audiniai, a – ataudų kryptimi kirpti audiniai

—●— A1 —●— A2 —●— A3 —●— A4-EL-a —●— A5 —●— A6-EL-ma —●— A7-EL-a
 —▲— A8-EL-a —●— A9-EL-m(a)

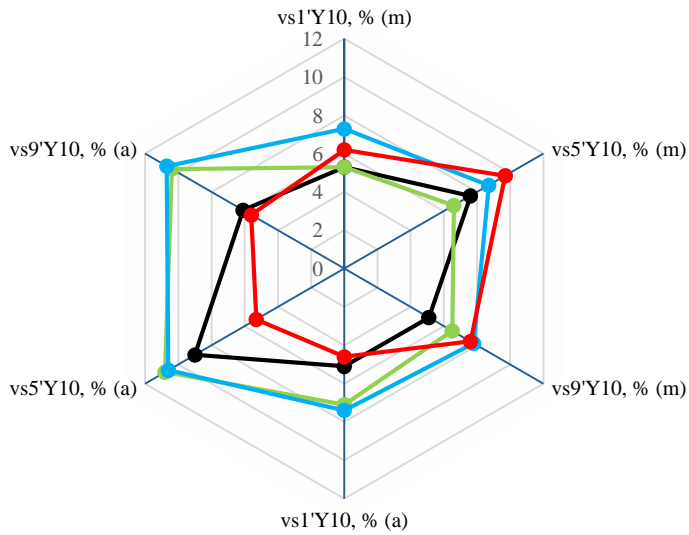
Galima pastebėti, kad audinių A1 ir A3 įlinkio $h_i^c_{Y10}$ vertės, metmenų kryptimi kirptų bandinių yra labai artimos ataudų kryptimi kirptų bandinių vertėms, o kreivės kontūras primena taisyklingą lygiagretainį. Kadangi audinio A1 pluoštinė sudėtis sudaryta tik iš vienos žaliavos, t. y. 100 % vilnos, o siūlų tankumo skirtumas tarp metmenų ir ataudų siūlų nežymus, todėl audinys A1 išlaiko formos stabilumą ir deformacijos pasiskirsto labai panašiai abiejose siūlų sistemose. Audinys A3

sudarytas iš medvilnės ir viskozės pluoštų, pasižyminčių panašiomis savybėmis, tačiau audinio metmenų ir ataudų tankumas skirtingas, todėl kreivėje pastebimas nežymus rodiklio $h_{9'Y10}$ verčių sumažėjimas metmenų kryptimi.

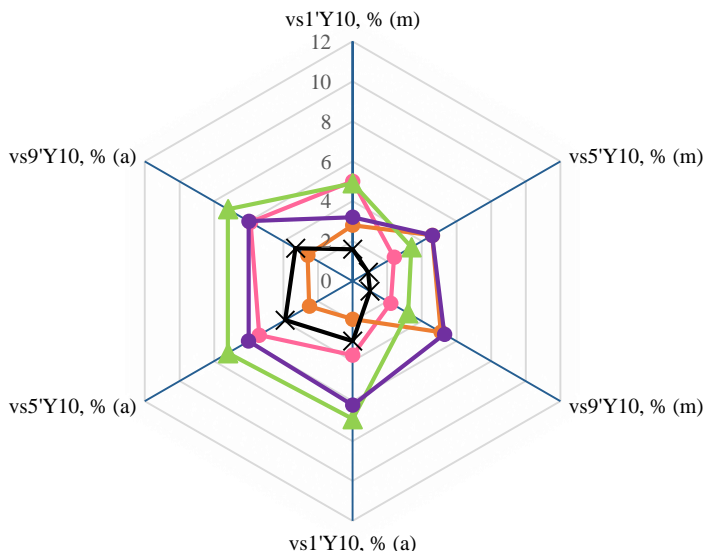
Audinio A2 bandinių elgsena veikiant išilginėms deformacijoms metmenų kryptimi žymiai skiriasi nuo ataudų kryptimi kirptų bandinių dėl metmenis ir ataudus sudarančių skirtingų pluoštų, t. y. metmenys sudaryti iš celiuliozinių natūralių medvilnės pluoštų, o ataudai – iš sintetinių poliesterio gijų. Todėl skirtingomis savybėmis pasižymintys pluoštai daro įtaką ir skirtingai medžiagų deformacinei gebai. Tai galima pastebėti ir audinio A8-EL-a rodiklio $h_{i'Y10}$ kreivėje. Šio audinio metmenys sudaryti iš viskozės, o ataudai – iš poliesterio ir elastano siūlų. Audinio A4-EL-a kreivės kontūro netaisyklingumas priklauso ir nuo dvigubai tankesnių metmenų siūlų nei ataudų, ir nuo elastano ataudų siūluose.

Kitas svarbus rodiklis – bandinio viduryje nubraižytų vertikalių linijų \tilde{S}_{Y1} ir \tilde{S}_{Y2} susiaurėjimas $v_{Si'Y10}$, kuris apibūdina bandinio skersinių deformacijų poveikį bandinio skersinių matmenų kitimui (**3.13 pav.**). Kadangi bandiniai yra veikiami jėgomis, nukreiptomis išilgai bandinio, todėl skersinių matmenų pokytis priklauso ne tik nuo siūlų tankumo ar pynimo, bet ir nuo vidinių jėgų, veikiančių siūlų kontaktų vietose, taip pat siūlus veikiančios ir skersinės gniuždymo jėgos (Cavallaro et al., 2007; Jinlian, Yaming, 2002; Savci, Curiskis, 2000).

Audinio A1 skersinių matmenų kitimas, kaip ir anksčiau minėtų išilginių matmenų kitimas (**žr. 3.12 pav.**), metmenų kryptimi yra labai panašus į ataudų kryptimi kirptų bandinių. Nustatyta, kad audinių su elastano A4-EL-a, A6-EL-ma, A7-EL-a, A8-EL-a, A9-EL-m(a) bandinio vidurio susiaurėjimas yra mažiau žymus, tai matyti ir **3.13 pav., b**. Tempiant tąsius, paslankesnės struktūros, elastano turinčius audinius, pirmiausia siūlai tįsta, trintis ir gniuždymo jėgų poveikis mažesnis, todėl ir akučių tarp metmenų ir ataudų siūlų sumažėjimas yra mažesnis, nei audinių A1, A2, A3 ir A5, kurių pluoštinėje sudėtyje yra medvilnės pluošto didžioji dalis. Audiniai A2, A3 ir A5 išsiskiria ypač aukštomis rodiklio $v_{Si'Y10}$ vertėmis. Tai rodo, kad medvilniniai audiniai, kurių sudėtyje nėra kitų medžiagos elastingumą didinančių pluoštų, pavyzdžiui, elastano pluošto, net ir paveikti nedidelių deformacijų, pasiekia savo kritinių deformacijų ribą ir, deformuojant toliau, pradeda irti. Taip pat pastebėta, kad šių audinių skersinių deformacijų pasiskirstymas visuose trijuose taškuose yra pakankamai tolygus ir audiniai išlieka gana stabilūs visame bandinio plote. Mažiausi bandinio skersinių matmenų kitimai nustatyti audiniui A7-EL-a tiek metmenų, tiek ataudų kryptimis. Šis audinys, skirtingai nuo kitų tirtų audinių, yra 1/3 ruoželinio pynimo, kurio siūlų perdangos yra ilgesnės nei 1/2 ruoželinio ar drobinio pynimo. Todėl tikėtina, kad, ištempus audinį A7-EL-a iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y10} = 10\%$, akutės visiškai neužsidaro ir skersinių matmenų pokyčiai mažesni, nei, pavyzdžiui, trumpesnės siūlų perdangas turinčių drobinio pynimo audinių. Audinio su elastanu A4-EL-a rodiklio $v_{Si'Y10}$ vertės yra vienos didžiausių metmenų kryptimi kirptų bandinių, tačiau mažiausios, kai bandiniai kirpti ataudų kryptimi, dėl dvigubai tankesnių metmenų siūlų nei ataudai.



a



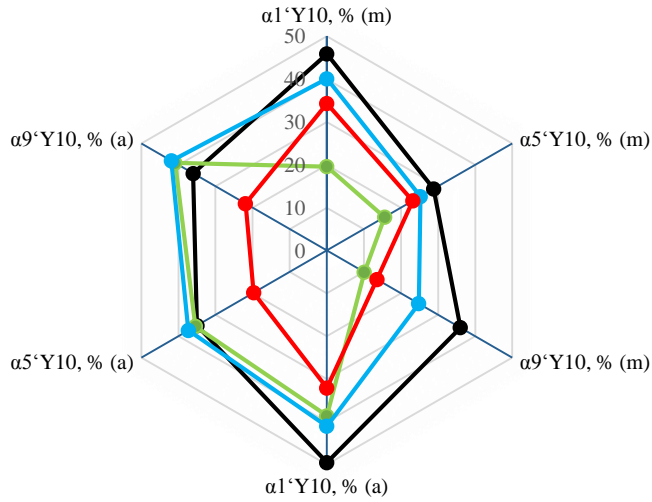
b

3.13 pav. Rodiklio $vs_i^c Y_{10}$ vertės trijuose bandinio taškuose audinių be elastano (a) ir su elastanu (b): m – metmenų kryptimi kirpti audiniai, a – ataudų kryptimi kirpti audiniai

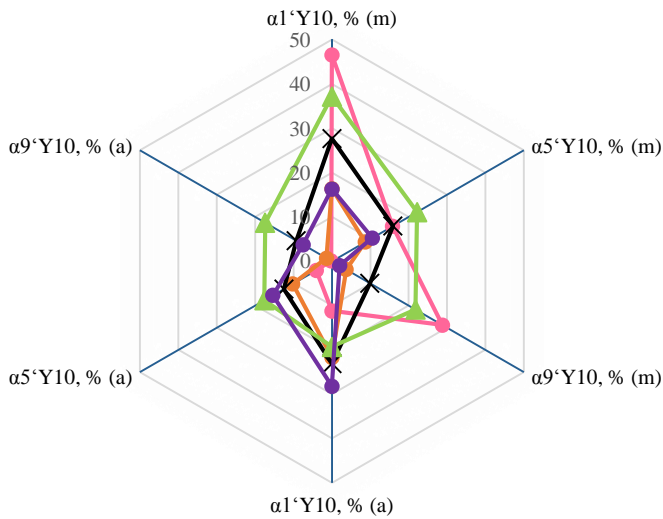
—●— A1 —●— A2 —●— A3 —●— A4-EL-a —●— A5 —●— A6-EL-ma —●— A7-EL-a
 —▲— A8-EL-a —●— A9-EL-m(a)

Kampines deformacijas apibūdinančio rodiklio $\alpha_i^c Y_{10}$ vertės pateiktos **3.14 pav.** Nustatyta, kad didesnės kampinės deformacijos metmenų ir ataudų kryptimis būdingos audiniams A1, A2, A3 ir A5. Šiuose mažiau tąsiuose audiniuose be elastano trintis siūlų kontaktų vietose sukelia didesnes šlyties deformacijas. Pastebėta, kad mažesnes kampines deformacijas patiria audiniai su elastanu tomis kryptimis,

kuriomis yra elastano siūlai. Tąsnesnių audinių didesnę dalį sudaro ištiša nei šlytis, todėl ir kampinių matmenų pokyčiai yra mažesni.



a



b

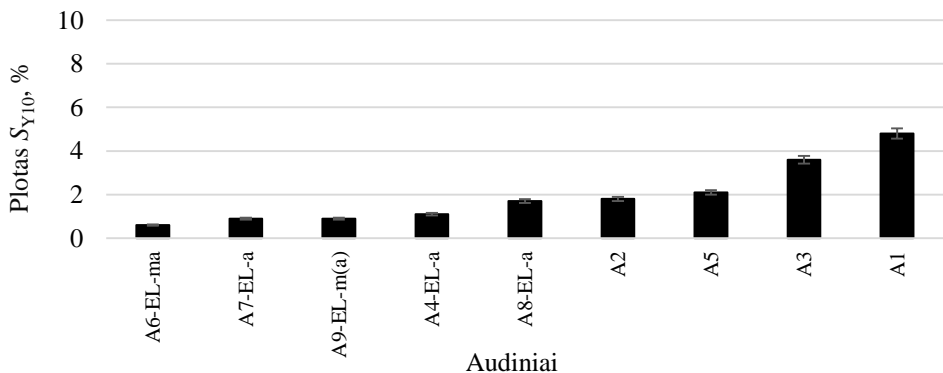
3.14 pav. Kampe α_i^Y10 vertės trijuose bandinio taškuose audinių be elastano (a) ir su elastano (b): m – metmenų kryptimi kirpti audiniai, a – ataudų kryptimi kirpti audiniai

—●— A1 —●— A2 —●— A3 —●— A4-EL-a —●— A5 —●— A6-EL-ma —●— A7-EL-a
—▲— A8-EL-a —●— A9-EL-m(a)

3.14 pav. matyti, kad audiniuose be elastano A1, A2, A3 ir A5 sudėtingos kampinės deformacijos susidaro visame bandinio plote, tai rodo ir kampe pokyčio α_i^Y10 vertės, kurios yra žymios visuose trijuose bandinio taškuose, o ypač 1-ame ir 9-

ame bandinio taškuose. Kiek mažesnės rodiklio $\alpha_i'_{10Y}$ vertės yra 5-ame taške, dėl bandinio skersinių matmenų pokyčio. Aptariant audinių be elastano rodiklio $\alpha_i'_{Y10}$ vertes, galima pastebėti, kad audinio A5 jos yra vienos mažiausių. Kadangi šis audinys sudarytas iš lino ir medvilnės pluoštų, kurie yra mažai tāsūs, struktūros elementai mažai paslankūs, siūlų tarpusavio trintis didelė – gaunami mažesni kampo pokyčiai.

Išnagrinėjus kiekvieno rodiklio pokyčius atskirai, visi rodikliai dar buvo atidėti vienoje spindulinėje diagramoje ir, įvertinus jų vertėmis apibrėžtus plotus, nustatytas bendras medžiagos deformuojamumas, atsižvelgiant į išilginių, skersinių ir kampinių deformacijų poveikį (žr. **1 priedą**). Pagal **1 priede** pateiktas kreives apskaičiuoti plotai, kurie **3.15 pav.** išdėstyti verčių didėjimo tvarka – kuo didesnė kreivėmis apibrėžto ploto S_{Y10} skaitinė vertė, tuo audinys patiria didesnes išilgines, skersines ir kampines deformacijas.



3.15 pav. Kreivėmis apibrėžto audinių ploto S_{Y10} skaitinių verčių išdėstymas didėjimo tvarka

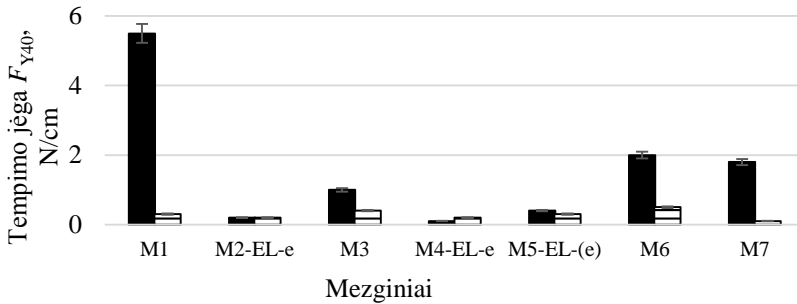
Palyginus **3.15 pav.** diagramose gautus tirtų medžiagų plotus S_{Y10} , galima vertinti medžiagos struktūros paslankumą, t. y. vienos siūlų sistemos savybę persislinkti kitos sistemos atžvilgiu. Nustatyta, kad medžiagos A4-EL-a, A6-EL-ma, A7-EL-a ir A9-EL-m(a) pasižymi geriausiu struktūros paslankumu, kurių rodiklių kompleksinės diagramos plotas yra mažiausias ir neviršija 1 %. Tuo tarpu medžiagų A2, A5 ir A8-EL-a struktūros elementai stabilesni, o mažiausiu struktūros paslankumu pasižymi medžiagos A1 ir A3.

3.3.2. Mezginių deformacinių savybių vertinimas Y formos bandinio metodu

Remiantis **2.2.3 skyriuje** pateikta Y bandinio formos tempimo metodika, mezginių bandiniai buvo tempiami, kai pasiekiamas santykinis pailgėjimas $\varepsilon_{Y40} = 40\%$. Tempimo jėgos F_{Y40} skaitinės vertės kinta 0,1 N/cm–4,8 N/cm ribose (**3.16 pav.**).

Nustatyta, kad tempiant mezginių bandinius Y formos bandinio metodu iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y40} = 40\%$, tempimo jėgos F_{Y40} vertės, kaip ir audinių atveju, neviršija mažų apkrovų ribos, o bandiniai deformuojami neviršijant medžiagų tamprumo ribų ir yra nepažeidžiami jų struktūros elementai. **3.16 pav.** matyti, kad mezginiai be elastano M1, M3, M6 ir M7 stulpelių kryptimi patiria didesnę

pasipriešinimą išorinėms jėgoms. Tuo tarpu medžiagų M2-EL-e, M4-EL-e ir M5-EL-e) tempimo jėgos F_{Y40} vertės neviršija 0,5 N/cm ribos.

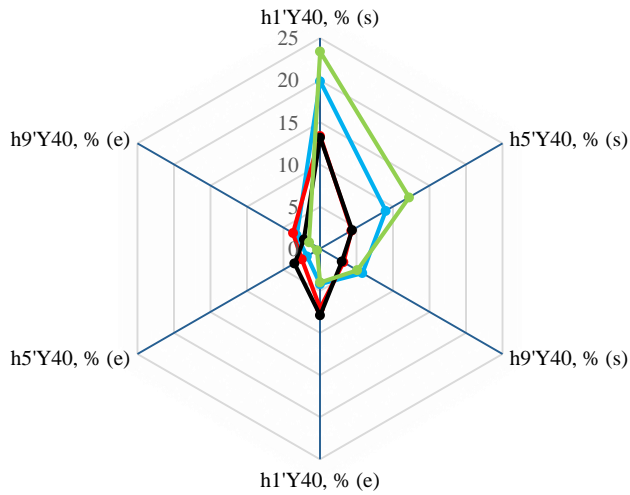


3.16 pav. Tempimo jėgos F_{Y40} vertės, deformuojant mezginius iki santykinio pailgėjimo $\epsilon_{Y40} = 40\%$: ■ – stulpelių kryptimi kirpti bandiniai; ▨ – eilučių kryptimi kirpti bandiniai

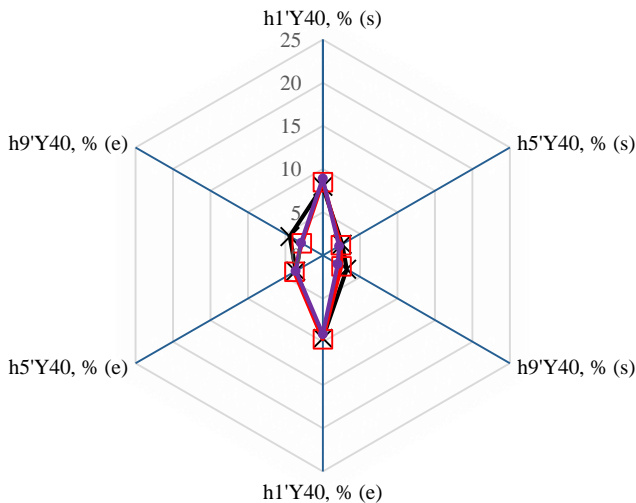
Siekiant išsamiai išanalizuoti ir įvertinti medžiagų deformacines savybes, remiantis Y metodu (žr. **2.2.3 skyrius**), tyrimuose buvo pasirinkti 3 rodikliai $h_i'_{Y40}$, $v_{Si}'_{Y40}$ ir $\alpha_i'_{Y40}$ medžiagų deformuojamumui, deformacijų pasiskirstymui ir netolygumui charakterizuoti 1-ame, 5-ame ir 9-ame bandinio taškuose. Rodikliai $h_1'_{Y40}$, $h_5'_{Y40}$ ir $h_9'_{Y40}$ nusako išilgines deformacijas ir medžiagų bandinių ilginių matmenų pokyčius (**3.17 pav.**).

3.17 pav. pateiktose kreivėse matyti, kad įlinkiai $h_i'_{Y40}$ stulpelių kryptimi didžiausi 1-ame bandinio taške ir kai kurių medžiagų siekia 25 % ribą, o mažiausi – 9-ame taške ir yra 4-is–5-is kartus mažesni nei 1-ame taške. Eilučių kryptimi kirptų medžiagų rodiklio $h_i'_{Y40}$ verčių skirtumai tarp 1, 5 ir 9 taškų nėra tokie ryškūs kaip stulpelių kryptimi. Medžiagų M1 ir M7 $h_i'_{Y40}$ vertės stulpelių kryptimi yra didelės, palyginus su $h_i'_{Y40}$ vertėmis eilučių kryptimis (iki 5-ių kartų). Eilučių kryptimi kirpto bandinio veržtuve įtvirtinama visa mezginio kilputė, o stulpelių kryptimi kirpto bandinio veržtuve įtvirtinamas tik vienas kilputės siūlo galas. Taip pat deformuojant stulpelių kryptimi kirptas medžiagas, kilputės lankas virsta tiese, todėl ypač mažai paslankių mezginių deformacijų pobūdis, kilputės lankui virtus tiese, primena audinio deformavimą. Mezginių M1 ir M7 rodiklio $h_i'_{Y40}$ vertės stulpelių kryptimi yra vienos didžiausių, todėl šios medžiagos patiria žymų išilginių deformacijų poveikį.

Medžiagų su elastanu M2-EL-e, M4-EL-e ir M5-EL-(e) rodiklio $h_i'_{Y40}$ vertės 1-ame taške stulpelių kryptimi yra vienos mažiausių (iki 10 %), tačiau vienos didžiausių eilučių kryptimi. Nustatyta, kad stulpelių kryptimi kirptų bandinių rodiklio $h_i'_{Y40}$ verčių kreivės tendencingai pasiskirsto, t. y. medžiagos M1 ir M7, medžiagos M3 ir M6 bei medžiagos M2-EL-e, M4-EL-e, M5-EL-(e). Pastarųjų medžiagų įlinkio $h_i'_{Y40}$ vertės yra mažiausios, vadinasi, jos yra paslankiausios ir ašinio tempimo metu įtempiai visame bandinio plote pasiskirsto kur kas tolygiau, nei tokių medžiagų kaip M1 ar M7.



a



b

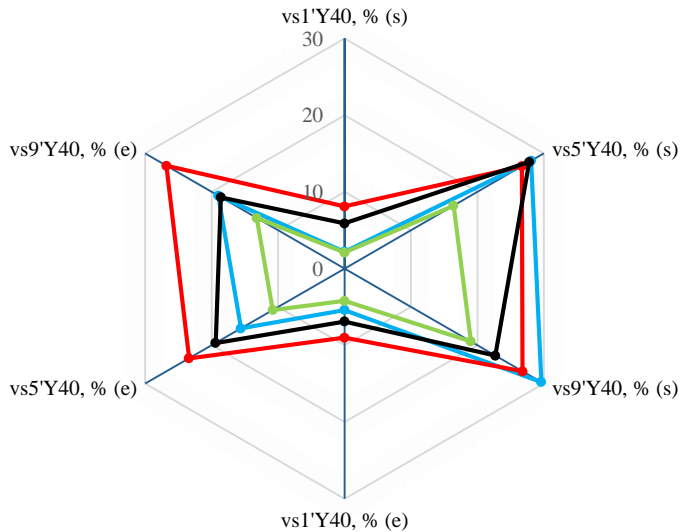
3.17 pav. Rodiklio $h_i^e_{Y40}$ vertės trijuose bandinio taškuose mezginių be elastano (a) ir su elastanu (b): s – stulpelių kryptimi, e – eilučių kryptimi

—●— M1 —✕— M2-EL-e —●— M3 —□— M4-EL-e —●— M5-EL-(e) —●— M6 —●— M7

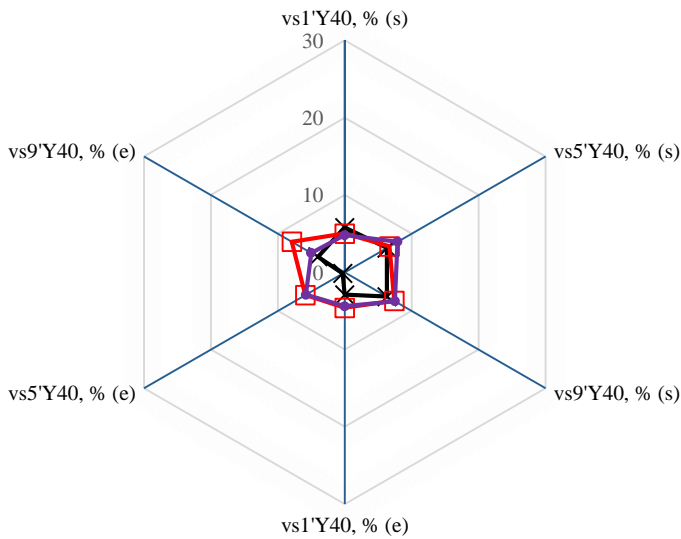
3.17 pav. matyti, kad mezginių su elastano siūlais rodiklio $h_i^e_{Y40}$ verčių kreivės stulpelių kryptimi yra artimos kreivių kontūrai eilučių kryptimi. Šios medžiagos dėl elastano pluošto deformuojasi tolygiau ne tik visame bandinio plote, bet pasižymi mažesniu anizotropiškumu.

Aptariant vidurio susiaurėjimo $vs_i^e_{Y40}$ tarp bandinyje nubraižytų vertikalių linijų vertes ir jų kreives, reiktų paminėti, kad 1-ame taške rodiklio $vs_i^e_{Y40}$ vertės išsidėsto kur kas mažesnėse verčių ribose, nei 5-ame ir 9-ame taškuose, priešingai nei rodiklio $h_i^e_{Y40}$ (**3.18 pav.**). Kadangi 1-asis taškas yra bandinio dalyje tarp įtvirtintų bandinio

zonų, taigi, mezginių atveju, skersinių deformacijų poveikis šiame taške yra nežymus ir daugiausiai siekia 9 %.



a



b

3.18 pav. Rodiklio $vs_i'Y_{40}$ vertės trijuose bandinio taškuose mezginių be elastano (a) ir su elastanu (b): s – stulpelių kryptimi, e – eilučių kryptimi

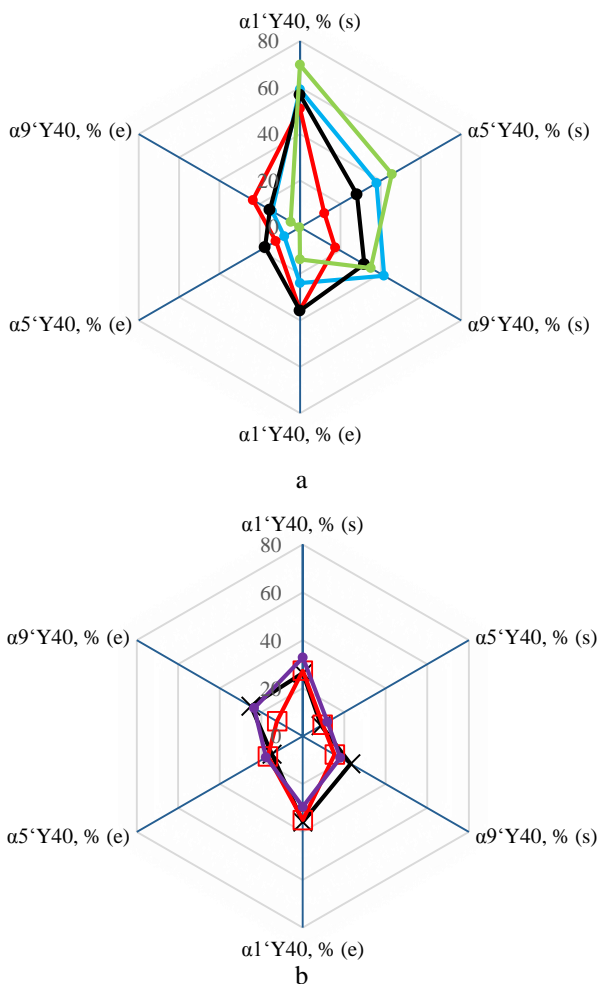
—●— M1 —×— M2-EL-e —●— M3 —□— M4-EL-e —●— M5-EL-(e) —●— M6 —●— M7

Galima pastebėti, kad mezginių be elastano (3.18 pav., a) kreivių ribojami plotai primena taisyklingas figūras ir yra pastebima figūrų simetrija tarp stulpelių ir eilučių kryptimis kirptų bandinių taškuose. Antrosios grupės medžiagų kreivių plotai yra kur kas mažesni ir panašūs į netaisyklingus daugiakampius. Deformuojant paslankesnės

struktūros medžiagas M2-EL-e, M4-EL-e, M5-EL-(e), skersinių deformacijų poveikis neviršijant mažų apkrovų ribos yra ne toks žymus ir tolygiau pasiskirsto visame bandinio plote, todėl ir bandinio vidurio susiaurėjimas mažiau žymus.

Medžiagų M1, M3 ir M6 vidurio susiaurėjimo $\alpha_i^{\cdot Y40}$ vertės yra vienos didžiausių, ypač 5-ame ir 9-ame bandinio taškuose. Deformuojant tokias medžiagas, kurios yra mažiau paslankios nei medžiagos, pavyzdžiui, su elastanu, jų siūlai dėl mažo tūsumo yra veikiami didesnių tarpusavio trinties jėgų ir, dėl didesnio priešinimosi, greičiau nei elastingos medžiagos yra stumiami link bandinio vidurio – bandinys susiaurėja.

Tarp kampo pokyčio $\alpha_i^{\cdot Y40}$ ir įlinkio $h_i^{\cdot Y40}$ verčių išsidėstymo pastebimas panašumas – stulpelių kryptimi kirptų mezginių didžiausios vertės eilučių kryptimi kirptuose bandiniuose tampa mažiausiomis, t. y. atvirkščiai proporcingos (**3.19 pav.**).



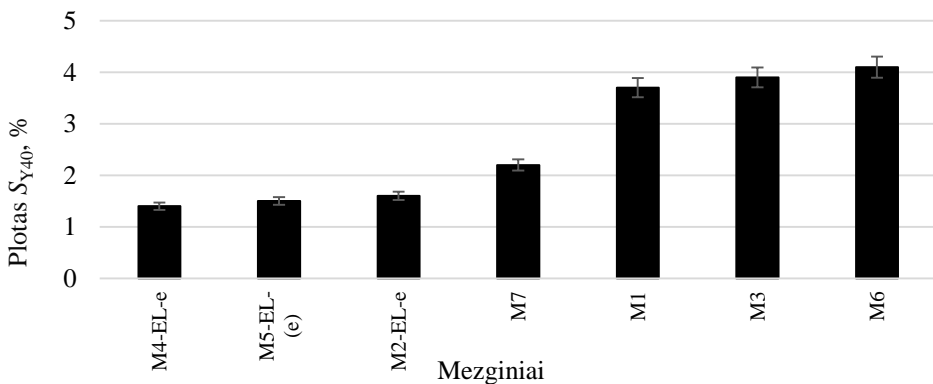
3.19 pav. Kampo $\alpha_i^{\cdot Y40}$ vertės trijuose bandinio taškuose mezginių be elastano (a) ir su elastanu (b): s – stulpelių kryptimi, e – eilučių kryptimi

—●— M1 —×— M2-EL-e —●— M3 —□— M4-EL-e —●— M5-EL-(e) —●— M6 —●— M7

Nustatyta, kad paslankesnių mezginių, pavyzdžiui, tokių kaip M4-EL-e, M5-EL-(e), kampo pokytis $\alpha_{i'Y40}$ yra perpus mažesnis nei mažiau paslankių medžiagų. Todėl rodiklio $\alpha_{i'Y40}$ vertės rodo, jog paslankios ir elastingos medžiagos patiria mažesnes kampines deformacijas. **3.19 pav.** matyti, kad tasesnių ir paslankesnės struktūros medžiagų kreivės išsidėsto arčiau spindulinės diagramos centro, o labiausiai nuo centro nutolusios medžiagos yra mažiau paslankios. Mezginių M1, M3, M6 ir M7 eilučių kryptimi kreivių išsidėstymas yra visiškai priešingas nei stulpelių kryptimi kirptų bandinių ir visų medžiagų yra panašus.

Kadangi bandiniai yra Y formos, kur veržtuvuose įtvirtinami šoniniai jų kraštai ir yra tempiami priešinga kryptimi, tai ištemptame bandinyje kilpučių tankumas bus mažiausias centrinėje bandinio dalyje, o didžiausias – nubraižytų vertikalių šoninių linijų vietose, kuriose ir vyksta didžiausios kampinės deformacijos.

Išnagrinėjus kiekvieno rodiklio pokyčius atskirai, visi rodikliai, kaip ir audinių atveju, dar buvo atidėti vienoje spindulinėje diagramoje ir, įvertinus jų vertėmis apibrėžtus plotus, nustatytas bendras medžiagos deformuojamumas, atsižvelgiant į išilginių, skersinių ir kampinių deformacijų poveikį (**2 priedas**). Pagal **2 priede** pateiktas kreives apskaičiuoti plotai, kurie **3.20 pav.** išdėstyti verčių didėjimo tvarka – nuo didesnės kreivėmis apibrėžto ploto S_{Y40} skaitinė vertė, tuo mezginys patiria didesnes išilgines, skersines ir kampines deformacijas.



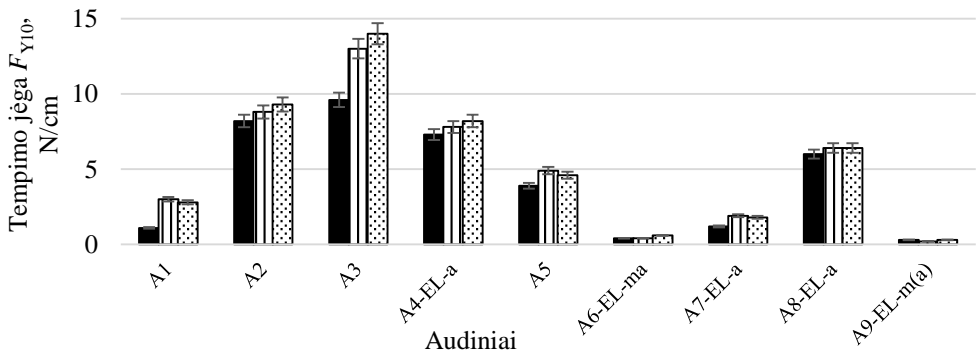
3.20 pav. Kreivėmis apibrėžto mezginių ploto S_{Y40} skaitinių verčių išdėstymas didėjimo tvarka

Nustatyta, kad paslankiausi mezginiai M2-EL-e, M4-EL-e, M5-EL-(e), kurių plotas S_{Y40} neviršija 2 %. Tuo tarpu medžiagų M1, M3 ir M6 struktūros elementai stabilesni, šios medžiagos mažiau paslankios, o jų plotas dvigubai didesnis. Tyrimais nustatyta, kad medžiagos M7 struktūros elementai mažiau paslankūs nei mezginių su elastanu. Taip pat gauti rezultatai rodo, kad medžiagos M7 struktūros elementai yra paslankesni nei medžiagų M1, M3 ir M6, kurios taip pat neturi elastano siūlų.

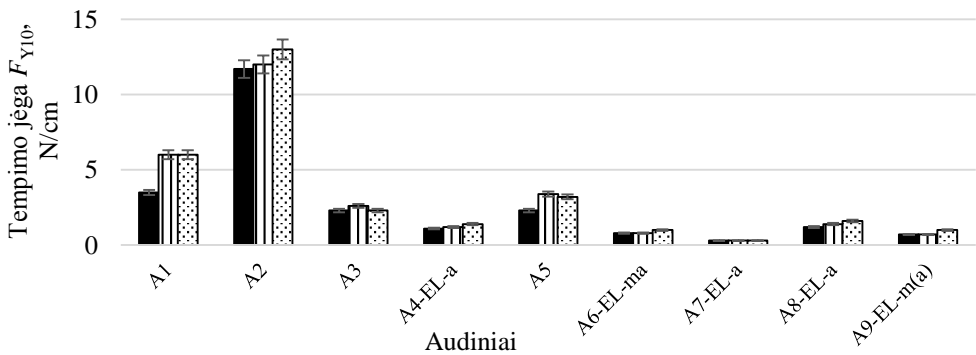
3.3.3. Audinių siūlinių junginių deformacinių savybių vertinimas nauju Y formos bandinio metodu

Analizuojant siūlės įtaką audinių deformacinėms savybėms, **3.21 pav.** pateiktos tempimo jėgos F_{Y10} vertės, kai bandiniai be siūlės, su vertikalia siūle bandinio

simetrijos ašyje ir bandinio kirptiniuose kraštuose. Nustatyta, kad siūlės įtaka audinių tempimo jėgos pokyčiams siekia iki 20 %. Nustatytas audinio A1 tempimo jėgos verčių padidėjimas apie 18 %, kai siūlė bandinio simetrijos ašyje, taip pat, kai siūlė bandinio kirptiniuose kraštuose (metmenų kryptimi). Taip pat nustatytas ir audinio A1 tempimo jėgos verčių padidėjimas apie 20 % abiem siūlės susiuvimo atvejais ataudų kryptimi. Žymesni tempimo jėgos verčių pokyčiai nustatyti ir audiniui A3, kai bandiniai kirpti metmenų kryptimi tiek su siūle bandinio simetrijos ašyje, tiek su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose. Minėtu atveju nustatytas audinio A3 tempimo jėgos verčių padidėjimas apie 17 %. Kitų tirtų audinių tempimo jėgos F_{Y10} verčių pokyčiai kinta paklaidų ribose.



a



b

3.21 pav. Tempimo jėgos F_{Y10} vertės, deformuojant audinius iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y10} = 10\%$, kai bandiniai kirpti metmenų (a) ir ataudų (b) kryptimis
 ■ - bandiniai be siūlės, ▨ - su siūle bandinio simetrijos ašyje, ▩ - su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose

Siekiant išsamiau įvertinti siūlių įtaką audinių deformacinėms savybėms, buvo tarpusavyje palygintos rodiklių $h_i^{\varepsilon_{Y10}}$ (3 priedas), $vS_i^{\varepsilon_{Y10}}$ (4 priedas) ir $\alpha_i^{\varepsilon_{Y10}}$ (5 priedas) vertės tarp bandinių be siūlės ir bandinių su siūle bandinio simetrijos ašyje bei su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose.

3 priede pateiktuose rezultatuose galima pastebėti siūlės įtaką audinių deformacinėms savybėms, kai sujungtų siūlėmis bandinių rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ pokyčiai siekia iki 4,0 %. Mažiausi rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ pokyčiai (iki 1,0 %–1,5 %), kai bandinių detalės sujungiamos bandinio simetrijos ašyje, nustatyti audiniams A2, A4-EL-a, A5, A8-EL-a. Kiek didesni rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ pokyčiai ($\geq 2,0$ %) nustatyti audiniams A1, A3, A6-EL-ma, A7-EL-a, A8-EL-a ir A-EL-m(a).

Panaši tendencija, kaip ir su siūle bandinio simetrijos ašyje, pastebėta ir bandiniuose su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose. Audinio A1 rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ pokyčiai nežymūs, išskyrus 9-ame taške, kai bandinys su siūle simetrijos ašyje ir kirptas metmenų kryptimi – čia pastebimas $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ verčių sumažėjimas apie 2,0 % (**3 pr., 3.1 pav., a**). Audinio A2 rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ verčių pokyčiai panašūs, tačiau 1-ame taške, kai bandiniai kirpti metmenų kryptimi, pastebimas 1,5 %–2,0 % verčių didėjimas, o ataudų kryptimi – toks pat verčių sumažėjimas (**3 pr., 3.1 pav., b**), dėl skirtingos metmenų (medvilnė) ir ataudų (poliesteris) pluoštinės sudėties. Priešinga tendencija pastebima audinio A3 $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ verčių pokyčiuose (**3 pr., 3.1 pav., c**). Nustatyta, kad sujungus audinio A3 bandinį siūle simetrijos ašyje, visuose trijuose jo taškuose tiek metmenų, tiek ataudų kryptimis, rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ vertės padidėjo nuo 1,5 % iki 2,5 %. Audinyje A4-EL-a rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ pokyčiai, kaip ir audinyje A2, žymesni 1-ame bandinio taške metmenų ir ataudų kryptimis (**3 pr., 3.1 pav., d**). Audinio A5 rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ verčių padidėjimas pastebimas visuose taškuose, tiek su siūle bandinio simetrijos ašyje, tiek su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose, tačiau žymesni pokyčiai nustatyti 1-ame ir 5-ame taškuose (apie 1,5 %) (**3 pr., 3.1 pav., e**). Nors audinyje A6-EL-ma siūlių bandinio kirptiniuose kraštuose įtaka labai nežymi (iki 0,5 %), tačiau, sujungus bandinio detales simetrijos ašyje, pastebimi labai ryškūs rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ verčių padidėjimai 1-ame ir 5-ame taškuose, kurie siekia 2,0 % (**3 pr., 3.1 pav., f**).

Audinyje A7-EL-a nustatyti labai žymūs, t. y. 3,0 %–4,0 % $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ verčių padidėjimai 1-ame taške, kai bandiniai kirpti metmenų kryptimi (**3 pr., 3.1 pav., g**). Vienintelis audinys A8-EL-a, kuriame matomas rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ verčių sumažėjimas po sujungimo abiejų tipų siūlėmis, nors pokyčiai ir nedideli (iki 1,0 %) (**3 pr., 3.1 pav., h**). Audinyje A9-EL-m(a) nustatyta siūlių įtaka rodiklio $h_i^{\prime}{}_{Y10}$ vertėms visuose taškuose, kurių prieaugis siekia iki 2,5 % (**3 pr., 3.1 pav., i**).

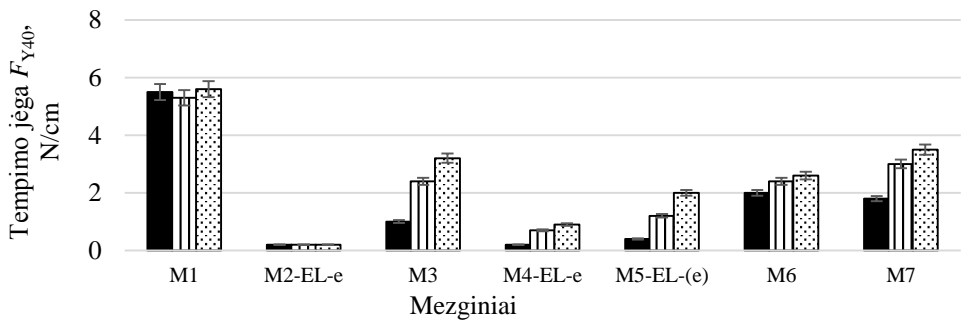
Aptariant bandinyje nubraižytų vertikalių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} susiaurėjimo rodiklio $v_{Si}^{\prime}{}_{Y10}$ pokyčius po sujungimo siūlėmis (žr. **4 priedą**), būtina paminėti, kad daugelio audinių $v_{Si}^{\prime}{}_{Y10}$ verčių pokyčiai siekia net iki 55 %. Todėl galima teigti, kad siūlių įtaka bandinio skersinių matmenų pokyčiams yra žymi. Deformuojant bandinius be siūlės, bandinio šoniniai kraštai yra laisvi, todėl skersinių matmenų pokyčiai labai priklauso nuo deformacijos dydžio ir medžiagos tankumo. Deformuojant bandinius su siūle bandinio simetrijos ašyje, kuri bandinį dalina į dvi dalis, bandinys siaurėja jau ne visame savo plote, bet atskirai siūle padalintuose plotuose.

Sujungus bandinio detales kirptiniuose kraštuose, centrinė bandinio dalis yra ribojama dviejų siūlių, todėl vidurio susiaurėjimas labai priklauso nuo medžiagos tūšumo. Todėl **4 pr., 4.1 pav.** matyti, kad tūšesnių ir paslankesnės struktūros audinių, tokių kaip A4-EL-a, A6-EL-ma, A7-EL-a, A8-EL-a ir A9-EL-m(a), rodiklio $v_{Si}^{\prime}{}_{Y10}$ vertės padidėja po bandinio detalių sujungimo kirptiniuose kraštuose.

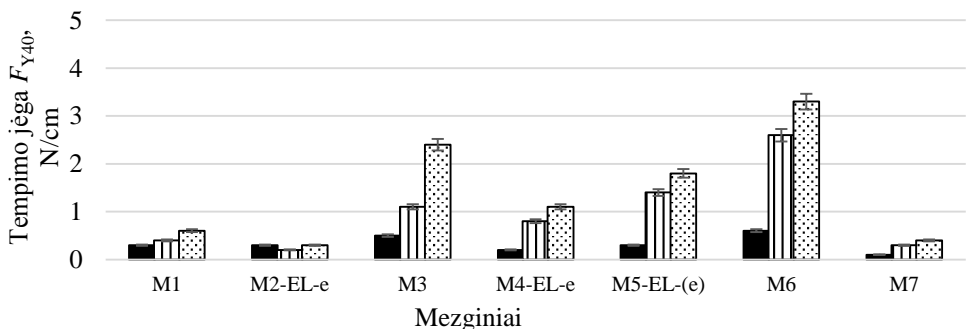
Aptariant bandinyje nubraižytų horizontalių ir vertikalinių linijų kampo pokyčio rodiklio $\alpha_i'_{Y10}$ verčių pokyčius (**5 priedas**), verta paminėti, kad nustatyti žymesni $\alpha_i'_{Y10}$ verčių pokyčiai, kai deformuojami bandiniai su siūlėmis kirptiniuose kraštuose. Be abejo, siūlės bandinio kirptiniuose kraštuose sumažina bandinio centrinės dalies paslankumą ir dėl kampinių deformacijų poveikio labiau pasireiškia šlytis. Žymesni rodiklio $\alpha_i'_{Y10}$ verčių pokyčiai, kaip ir buvo minėta, pastebėti bandiniuose su siūlėmis bandinio kirptiniuose kraštuose audiniuose A7-EL-a ir A9-EL-ma.

3.3.4. Mezginių siūlinių junginių deformacinių savybių vertinimas nauju Y formos bandinio metodu

Tyrimų metu buvo analizuota siūlės įtaka mezginių deformacinėms savybėms. **3.22 pav.** pateiktos tempimo jėgos F_{Y40} vertės, kai bandiniai yra be siūlės, su siūle bandinio simetrijos ašyje ir su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose. Siūlės įtaka mezginių tempimo jėgos pokyčiams yra žymesnė nei audiniams ir kai kurioms medžiagoms siekia 50,0 %. Nustatytas tempimo jėgos verčių prieaugis apie 30 %–40 % medžiagoms M3, M4-EL-e, M5-EL-(e) bei M7, kirptoms stulpelių kryptimi ir apie 15 %–50 % medžiagoms M3, M4-EL-e, M5-EL-(e), M6 ir M7, kirptoms eilučių kryptimi. Kitų tirtų audinių tempimo jėgos F_{Y40} verčių pokyčiai kinta paklaidų ribose.



a



b

3.22 pav. Tempimo jėgos F_{Y40} vertės, deformuojant mezginius iki santykinio pailgėjimo $\varepsilon_{Y40} = 40\%$, kai bandiniai kirpti stulpelių (a) ir eilučių (b) kryptimis

■ - bandiniai be siūlės, ▨ - su siūle bandinio simetrijos ašyje, ▩ - su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose

Pastebėta, kad siūlės įtaka tempimo jėgai buvo didesnė mezginiams nei audiniams. Mezginiai dėl savo struktūros (kilpučių) yra liaunesni ir mažiau stabilūs, nei audiniai, taigi, ir siūlės įtaka mezginių struktūros paslankumui, ypač tuomet, kai siūlės bandinio šonuose, yra žymesnė.

Siekiant išsamiau įvertinti siūlių įtaką mezginių deformacinėms savybėms, buvo tarpusavyje palygintos rodiklių $h_i^{\prime}_{Y40}$ (**6 priedas**), $v_{S_i^{\prime}_{Y40}}$ (**7 priedas**) ir $\alpha_i^{\prime}_{Y40}$ (**8 priedas**) vertės tarp bandinių be siūlės ir bandinių su siūle bandinio simetrijos ašyje bei kirptiniuose kraštuose.

Nustatyta, kad siūlės įtaka rodiklio $h_i^{\prime}_{Y40}$ verčių pokyčiams siekia iki 5 % (**6 pr., 6.1 pav.**). Panašios tendencijos, kaip ir su siūle bandinio simetrijos ašyje, pastebėtos ir bandiniuose su dviem siūlėmis bandinio kirptiniuose kraštuose. Mezginiuose M2-EL-e, M4-EL-e, M5-EL-(e) nustatyti žymesni rodiklio $h_i^{\prime}_{Y40}$ verčių padidėjimai 9-ame taške (apie 1 %–1,5 %), kai kituose bandinio taškuose nepastebima jokių žymių pakeitimų. Mezginiuose M3 ir M6 pastebimi didžiausi rodiklio $h_i^{\prime}_{Y40}$ pokyčiai, kurie žymesni 1-ame, 5-ame ir 9-ame taškuose stulpelių kryptimi ir 9-ame taške eilučių kryptimi.

Mezginiuose skersinių matmenų rodiklio $v_{S_i^{\prime}_{Y40}}$ verčių pokyčiai po sujungimų siūlėmis svyruoja iki 45 % (**7 pr., 7.1 pav.**). Medžiagoms M1, M3, M6 ir M7 rodiklio $v_{S_i^{\prime}_{Y40}}$ verčių pokyčiai nedideli ir daugeliu atveju pasireiškia verčių sumažėjimas. Tačiau visiškai kitokios tendencijos nustatytos mezginiams M2-EL-e ir M4-EL-e, nes čia nustatytas rodiklio $v_{S_i^{\prime}_{Y40}}$ verčių didėjimas iki 45 % visuose bandinio taškuose. Šių mezginių pluoštinėje sudėtyje yra didžiausia procentinė dalis elastano pluošto, o siūlų tankumas didžiausias, todėl, tempiant bandinius su siūlėmis, jų struktūros paslankumas yra ribojamas siūlių, kilpų akutės ne visiškai užsidaro – skersinių matmenų pokyčiai padidėja.

Rodiklio $\alpha_i^{\prime}_{Y40}$ verčių pokyčiai mezginiuose, kai bandiniai sujungiami siūlėmis, taip pat yra akivaizdūs ir siekia 50 % (**7 pr., 7.1 pav.**). Medžiagoje M2-EL-e, M3, M4-EL-e, M5-EL-(e) bei M6 pastebimas labai žymus rodiklio $\alpha_i^{\prime}_{Y40}$ verčių padidėjimas 9-ame taške. Tuo tarpu mezginiuose M1 ir M7 nustatytas nežymus rodiklio $\alpha_i^{\prime}_{Y40}$ verčių kitimas visuose bandinio taškuose.

Apibendrinimas

Nustatyta, kad tempiant tekstilės medžiagas nauju Y formos bandinio metodu, medžiagos yra deformuojamos neviršijant mažų apkrovų tamprumo ribos, t. y. tempimo jėga audiniams neviršija 9,6 N/cm, o mezginiams 4,8 N/cm. Tokiu būdu nepažeidžiami medžiagas sudarantys struktūros elementai.

Audinių išilgines deformacijas ir bandinių ilginių matmenų pokyčius nusakančių rodiklių $h_1^{\prime}_{Y10}$, $h_5^{\prime}_{Y10}$ ir $h_9^{\prime}_{Y10}$ vertės yra didžiausios 1-ame taške (neviršija 10 %), o mažiausios – 9-ame taške ir kinta iki 5 %. Bandinio viduryje nubraižytų vertikalių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} susiaurėjimo rodiklio $v_{S_i^{\prime}_{Y10}}$ pokyčiai yra artimi $h_i^{\prime}_{Y10}$ vertėms ir neviršija 12 %. Taip pat nustatyta, kad mažesniu struktūros elementų paslankumu pasižyminčiuose audiniuose (A2, A3, A5) išilginių ir skersinių deformacijų pasiskirstymas visuose trijuose taškuose yra pakankamai tolygus ir audiniai išlieka gana stabilūs visame bandinio plote. Kampines deformacijas apibūdinančio rodiklio $\alpha_i^{\prime}_{Y10}$ vertės kinta iki 50 %, ypač audiniuose be elastano.

Audinių be elastano A1, A2, A3 ir A5 sudėtingos kampinės deformacijos veikia visame bandinio plote, tai rodo ir kampo pokyčio $\alpha_i'_{Y10}$ vertės, kurios yra žymios visuose trijuose bandinio taškuose, o ypač 1-ame ir 9-ame bandinio taškuose. Tokių audinių gerą struktūros stabilumą patvirtina ir rodiklio S_{Y10} vertės, kurio siekia 5 %, kai tuo tarpu kitoms medžiagoms rodiklis neviršija 1,5 %.

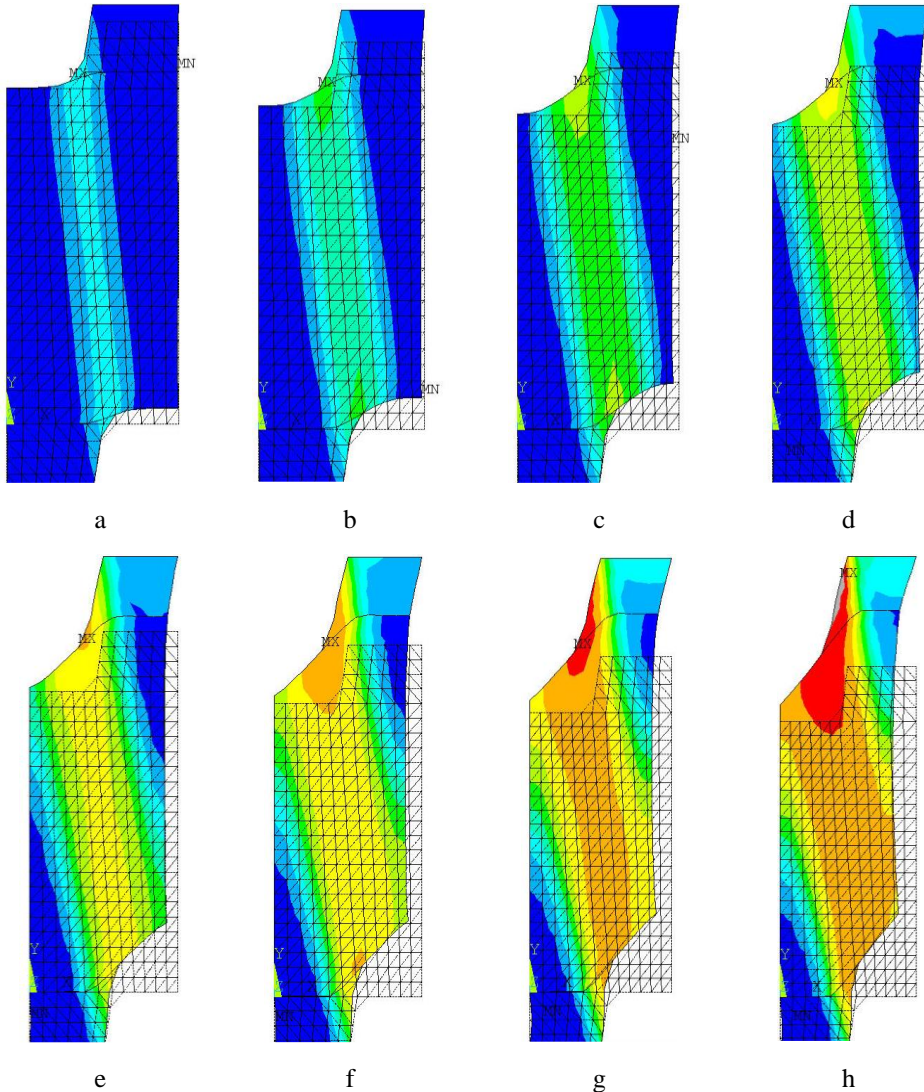
Mezginių išilginių deformacijų pokyčius nusakančio rodiklio $h_i'_{Y40}$ vertės, kaip ir audiniuose, didžiausios 1-ame bandinio taške ir kai kurių medžiagų siekia 25 % ribą, o mažiausi 9-ame taške ir yra iki 4–5 kartų mažesni nei 1-ame taške, dėl mezginių savybės tįsti. Nustatyta, kad stulpelių kryptimi kirptų bandinių rodiklio $h_i'_{Y40}$ verčių kreivės tendencingai pasiskirsto, t. y. medžiagos M1 ir M7, medžiagos M3 ir M6 bei medžiagos M2-EL-e, M4-EL-e, M5-EL-(e). Pastarųjų medžiagų įlinkio $h_i'_{Y40}$ vertės yra mažiausios, vadinasi, jos yra paslankiausios ir ašinio tempimo metu įtempiai visame bandinio plote pasiskirsto kur kas tolygiau, nei tokių medžiagų kaip M1 ar M7 ar M3 ir M6. Vidurio susiaurėjimo $vs_i'_{Y40}$, tarp bandinyje nubraižytų vertikalių linijų ir vertės 1-ame bandinio taške išsidėsto kur kas mažesnėse verčių ribose, nei 5-ame ir 9-ame taškuose, priešingai nei rodiklio $h_i'_{Y40}$. Nustatyta, kad mažesniu struktūros elementų paslankumu pasižyminčių mezginių vidurio susiaurėjimo $vs_i'_{Y40}$ vertės yra vienos didžiausių, ypač 5-ame ir 9-ame bandinio taškuose. Deformuojant tokias medžiagas, kurios yra mažiau paslankios nei medžiagos, pavyzdžiui, su elastanu, jų siūlai dėl mažo tūsumo yra veikiami didesnių tarpusavio trinties jėgų ir, dėl didesnio priešinimosi, greičiau nei elastingos medžiagos yra stumiami link bandinio vidurio – bandinys susiaurėja. Mezginių kampo pokyčio $\alpha_i'_{Y40}$ vertės siekia net 70 %. Nustatyta, kad paslankesnių mezginių, pavyzdžiui, tokių kaip M4-EL-e, M5-EL-(e) kampo pokytis $\alpha_i'_{Y40}$ yra perpus mažesnis nei mažiau paslankių medžiagų. Todėl rodiklio $\alpha_i'_{Y40}$ vertės rodo, jog paslankios ir elastingos medžiagos patiria mažesnes kampines deformacijas.

Nustatyta, kad siūlės įtaka audinių tempimo jėgos pokyčiams siekia iki 20 %. Siūlių įtaka audinių išilginių matmenų kitimui yra nežymi ir rodiklio $h_i'_{Y10}$ pokyčiai siekia iki 4,0 %. Tuo tarpu daugelio audinių bandinyje nubraižytų vertikalių linijų S_{Y1} ir S_{Y2} susiaurėjimo rodiklio $vs_i'_{Y10}$ pokyčiai siekia net iki 55 %. Vadinasi, siūlių įtaka bandinio skersinių matmenų pokyčiams yra žymi. Žymesni audinių bandiniuose nubraižytų horizontalių ir vertikalių linijų kampo pokyčiai $\alpha_i'_{Y10}$ nustatyti bandiniams su siūlėmis bandinio kirptiniuose kraštuose. Šoninės siūlės sumažina bandinio centrinės dalies paslankumą ir dėl kampinių deformacijų poveikio labiau pasireiškia šlytis.

Pastebėta, kad siūlės įtaka tempimo jėgai buvo didesnė mezginiams nei audiniams ir siekė 55 %. Nustatyta, kad siūlės įtaka mezginių išilginiams matmenų kitimo rodiklio $h_i'_{Y40}$ verčių pokyčiams siekia iki 5 %. Mezginiuose skersinių matmenų rodiklio $vs_i'_{Y40}$ verčių pokyčiai po sujungimų siūlėmis svyruoja iki 45 %, ypač dideliu struktūros elementų paslankumu pasižymintiems mezginiams. Todėl tempiant ypač tūsius mezginius su siūlėmis, jų struktūros paslankumas yra ribojamas siūlių, kilpų akutės ne visiškai užsidaro – skersinių matmenų pokyčiai padidėja. Rodiklio $\alpha_i'_{Y40}$ verčių pokyčiai mezginiuose, kai bandiniai sujungiami siūlėmis, taip pat yra akivaizdūs ir siekia 50 %.

3.4. Tekstilės medžiagų deformacijų vertinimas baigtinių elementų metodu bei eksperimentinio ir skaitinio tyrimų rezultatų verifikavimas

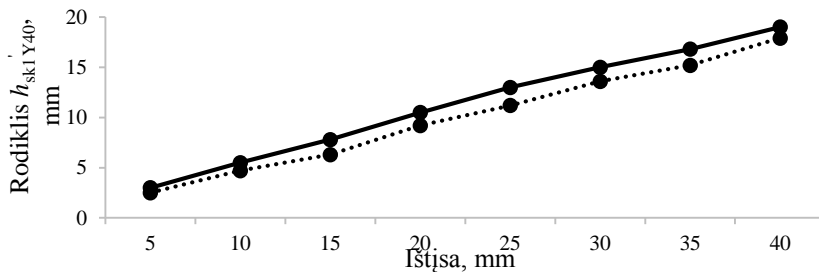
Siekiant išsiaiškinti, kaip deformacijų laukai pasiskyrto sudarytame BEM mezginyje M7 modelyje ir koks deformacijų intensyvumas skirtingose bandinio vietose, buvo gauti skaitinio eksperimento vaizdai, kuriuose galima stebėti, kaip kinta deformacijų pasiskirstymas bei intensyvumas bandinio plote, kai bandinys tempiamas kas 5 mm iki 40 mm (3.23 pav.).



3.23 pav. Deformacijų pasiskirstymas mezginyje M7, kai bandinys ištempiamas 5 mm (a), 10 mm (b), 15 mm (c), 20 mm (d), 25 mm (e), 30 mm (f), 35 mm (g), 40 mm (h)

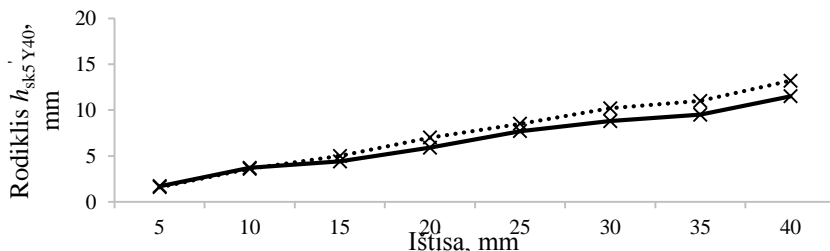
3.23 pav. matyti, kad tempimo pradžioje, kai bandinys deformuojamas 5 mm–10 mm (**3.23 pav., a, b**), deformacijų laukai ir jų intensyvumas yra nežymus, o deformacijų laukai susikoncentruoja įstrižai nuo viršutinių iki apatinių kirptinių kraštų. Deformuojant bandinį dar iki 15 mm–20 mm (**3.23 pav., c, d**) pastebimas geltonos zonos išsiplėtimas įstrižai nuo viršutinių ir apatinių kirptinių kraštų, kurioje deformacijos pasiekia 40 mm ištiesos ribą. Ištempus bandinį dar iki 25 mm (**3.23 pav., e**), deformacijų laukai išsiplėčia ir pasiekia bandinio vidurį. Deformavimo eigai pasiekus 30 mm (**3.23 pav., f**), bandinio kirptiniuose kraštuose, ypač viršutiniuose, pastebimas artėjimas prie kritinių deformacijų ribos, o deformacijų laukai išplinta beveik visame bandinio plote. Deformavus mezginio M7 bandinį iki 35 mm–40 mm (**3.23 pav., g, h**), viršutiniuose kirptiniuose bandinio kraštuose matomas kritinių deformacijų susidarymas, kur deformacijų intensyvumas siekia apie 60 mm. Tokiose vietose galimas pradinis mezginio struktūros elementų irimas. Deformavimo eigai pasiekus 40 mm, nustatytas didžiausias deformacijų intensyvumas bandinio viršutiniuose krašteliuose, centrinės bandinio dalies viršuje bei šoninėse dalyse, o mažiausias – centrinės bandinio dalies apačioje.

Siekiant patikrinti sudarytos skaitinių tyrimų metodikos patikimumą, buvo palyginti skaitinių ir eksperimentinių tyrimų rodiklių $h_1'_{Y40}$ ir $h_{sk1}'_{Y40}$ rezultatai 1-ame (**3.24 pav.**), 5-ame (**3.25 pav.**) ir 9-ame taškuose (**3.26 pav.**).



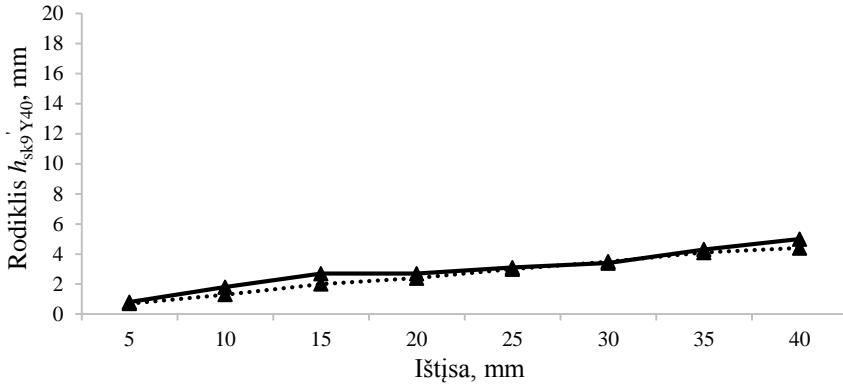
3.24 pav. Eksperimentinio ir skaitinio metodų rodiklių $h_1'_{Y40}$ ir $h_{sk1}'_{Y40}$ verčių palyginimas
 —●— eksperimentinių tyrimų vertės 1-ame taške; ...●... skaitinių tyrimų vertės 1-ame taške

3.24–3.26 pav. akivaizdžiai matyti skaitinio ir eksperimentinio tyrimų rezultatų žymus sutapimas. Didžiausias skirtumas tarp eksperimentinio ir skaitinio metodo rodiklio $h_1'_{Y40}$ verčių yra apytiksliai 9,8 %.



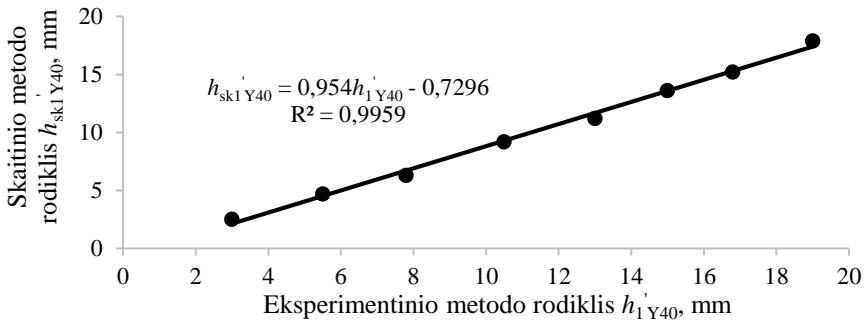
3.25 pav. Eksperimentinio ir skaitinio metodų rodiklių $h_5'_{Y40}$ ir $h_{sk5}'_{Y40}$ verčių palyginimas
 —x— eksperimentinių tyrimų vertės 5-ame taške; ...x... skaitinių tyrimų vertės – 5-ame taške

Didžiausi rodiklio $h_i'_{Y40}$ skirtumai tarp skaitinių ir eksperimentinių tyrimų nustatyti 1-ame ir 5-ame bandinio taškuose, kai deformavimo eiga 15 mm–40 mm. Mažiausi rodiklio $h_i'_{Y40}$ skirtumai yra 9-ame bandinio taške, kai deformavimo eiga 25 mm–35 mm (~ 0,5 %).

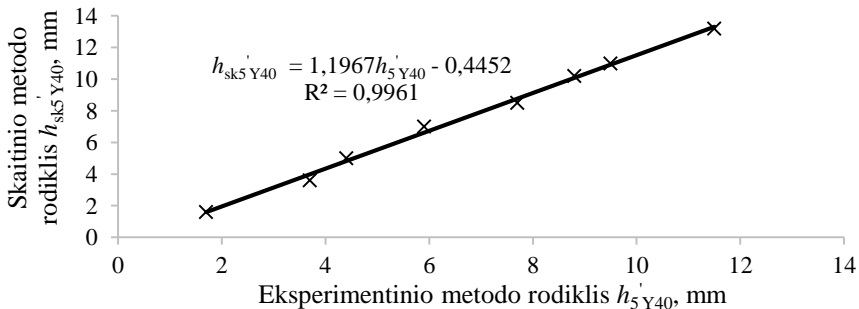


3.26 pav. Eksperimentinio ir skaitinio metodų rodiklių $h_{9'Y40}$ ir $h_{sk9'Y40}$ verčių palyginimas
 —▲— eksperimentinių tyrimų vertės 9-ame taške; ···▲··· skaitinių tyrimų vertės 9-ame taške

Taip pat buvo nustatytas ryšys tarp eksperimentinio ir skaitinio metodų (3.27 pav.).



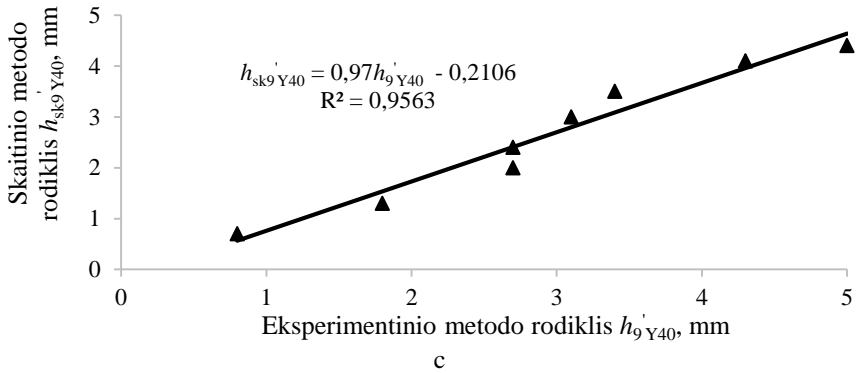
a



b

3.27 pav. tęsinys kitame lape

3.27 pav. tęsinys



3.27 pav. Eksperimentinio metodo rodiklio h_{iY40} ryšys su skaitinio metodo rodikliu h_{skiY40}
● 1-ame taške ; × 5-ame taške ; ▲ 9-ame taške

3.25 pav. matyti, kad gautas labai stiprus ryšys tarp eksperimentinio ir skaitinio metodų, kai $R^2 = 0,9563 \div 0,9961$. Taigi, galima teigti, kad **3.3** ir **3.4 skyriuose** pateikti rezultatai yra tinkami tiek praktiniam, tiek moksliniam panaudojimui.

IŠVADOS

1. Nustatytas glaudus ryšys ($R^2 = 0,8520 \div 0,9413$ audiniams, $R^2 = 0,9032 \div 0,9796$ mezginiams) tarp santykinų pailgėjimų, deformuojant audinių ir mezginių bandinius iki bandinių suardymo ir neviršijant mažų apkrovų ribos. Tai rodo, jog tekstilės medžiagų deformacinės savybės išryškėja jau pradinėmis deformavimo stadijomis, kai pasiekiamos nedidelės apkrovos. Todėl tekstilės medžiagų deformaciems savybių vertinti galima naudoti ne tik standartinius metodus, kurie skirti bendrajai deformacinei elgsenai nustatyti, bet ir netradicinius metodus, kai bandiniai deformuojami neviršijant tamprumo ribos ir nesuardant jų struktūros elementų.

2. Vienašiu metodu tempiant tiriamas tekstilės medžiagas iki bandiniams suyrant, nustatyta, kad audinių santykinės trūkimo ištisos ε_{Vtr} vertės svyruoja 11,5 %–119,0 % tūsumo ribose. Deformuojant audinius, kai neviršijama mažų apkrovų riba, santykinio pailgėjimo ε_{V490} vertės kinta 1,1 %–51,2 % tūsumo ribose. Tempiant mezginių bandinius vienašiu metodu iki bandiniams suyrant, nustatyta, kad santykinės trūkimo ištisos ε_{Vtr} vertės svyruoja 70,1 %–432,0 % tūsumo ribose ir yra kelis kartus didesnės nei audinių. Deformuojant mezginius, kai neviršijama mažų apkrovų riba, santykinio pailgėjimo ε_{V50} vertės kinta 46,8 %–246,6 % tūsumo ribose. Nustatyta, kad mezginiai, priešingai nei audiniai, jau mažų dėvėjimo lygio apkrovų metu pasiekia aukštas tūsumo ribas.

3. Vienašiu metodu deformuojant siūlėmis sujungtus mezginių bandinius, jų santykinės trūkimo ištisos ε_{Vtr-S} verčių pokyčiai svyruoja nuo 0,2 % iki 12,7 % (bandiniai sujungti vertikalia siūle) bei nuo 0,6 % iki 23,8 % (bandiniai sujungti horizontalia siūle). Taip pat nustatyti ir nežymūs santykinės trūkimo ištisos anizotropiškumo koeficiento an_{V-S} verčių pokyčiai, po bandinių sujungimo siūlėmis, kurie siekia ~ 0,2 %.

4. Eksperimentų metu gauti rezultatai patvirtino, kad gretasienio formos bandinio deformavimo metodas netinkamas paslankių audinių, o ypač mezginių deformacinėms savybėms vertinti. Tyrimų metu nustatyta, kad mezginių bandiniuose lygiagretainio kampo tarp kraštinės x_{G0} ir y_{G0} pokyčio rodiklis α'_{G45} , deformuotiems bandiniams santykinio pailgėjimo dydžiu $\varepsilon_{G45} = 45$ %, nesiekė 1 %, t. y. nubraižytas lygiagretainis beveik nepakito. Gauta, kad tirtų mezginių deformaciją sudarė medžiagų struktūros elementų tįsimas, o ne šlytis. Ištempus bandinius ištįsa didesne nei 45 mm, bandiniuose nubraižytas lygiagretainis netapo stačiakampiu, o medžiagų struktūros elementai pradėjo irti.

5. Nustatyta, kad tempiant tekstilės medžiagas nauju Y formos bandinio metodu, medžiagos yra deformuojamos neviršijant mažų apkrovų tamprumo ribos, t. y. tempimo jėga audiniams neviršija 9,6 N/cm, o mezginiams 4,8 N/cm. Taigi medžiagas sudarantys struktūros elementai nepažeidžiami.

6. Y formos bandinio metodu deformuotų audinių išilgines deformacijas ir bandinių ilginių matmenų pokyčius nusakančių rodiklių $h_1'_{Y10}$, $h_5'_{Y10}$ ir $h_9'_{Y10}$ vertės yra didžiausios 1-ame taške (neviršija 10 %), o mažiausios – 9-ame taške ir kinta iki 5 %. Mezginių išilginių deformacijų pokyčius nusakančio rodiklio $h_i'_{Y40}$ vertės, kaip ir audiniuose, yra didžiausios 1-ame bandinio taške ir kai kurių medžiagų siekia

25 % ribą, o mažiausi – 9-ame taške ir yra iki 4–5 kartų mažesni nei 1-ame taške dėl mezginių savybės tįsti.

7. Y formos bandinio viduryje nubraižytų vertikalių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} susiaurėjimo rodiklio $vs_i'_{Y10}$ pokyčiai yra artimi $h_i'_{Y10}$ vertėms ir neviršija 12 %. Taip pat nustatyta, kad mažesniu struktūros elementų paslankumu pasižyminčiuose audiniuose (A2, A3, A5) išilginių ir skersinių deformacijų pasiskirstymas visuose trijuose taškuose yra pakankamai tolygus ir audiniai išlieka gana stabilūs visame bandinio plote. Priešingai nei rodiklio $h_i'_{Y40}$, mezginių vidurio susiaurėjimo $vs_i'_{Y40}$, tarp bandinyje nubraižytų vertikalių linijų, vertės 1-ame bandinio taške išsidėsto kur kas mažesnėse verčių ribose, nei 5-ame ir 9-ame taškuose. Nustatyta, kad mažesniu struktūros elementų paslankumu pasižyminčių mezginių vidurio susiaurėjimo $vs_i'_{Y40}$ vertės yra vienos didžiausių, ypač 5-ame ir 9-ame bandinio taškuose.

8. Y formos bandinio kampines deformacijas apibūdinančio rodiklio $\alpha_i'_{Y10}$ vertės audiniuose kinta iki 50 %, ypač audiniuose be elastano. Nustatyta, kad tokiuose audiniuose sudėtingos kampinės deformacijos veikia visame bandinio plote, tai rodo ir kampo pokyčio $\alpha_i'_{Y10}$ vertės, kurios yra žymios visuose trijuose bandinio taškuose, o ypač 1-ame ir 9-ame bandinio taškuose. Tokių audinių gerą struktūros stabilumą patvirtina ir rodiklio S_{Y10} vertės, kurios siekia 5 %, kai tuo tarpu kitų medžiagų rodiklis neviršija 1,5 %. Mezginių kampo pokyčio $\alpha_i'_{Y40}$ vertės siekia net 70 %. Nustatyta, kad paslankesnių mezginių kampo pokytis $\alpha_i'_{Y40}$ yra perpus mažesnis nei mažiau paslankių medžiagų. Todėl rodiklio $\alpha_i'_{Y40}$ vertės rodo, jog paslankios ir elastingos medžiagos patiria mažesnes kampines deformacijas.

9. Nustatyta, kad siūlės įtaka Y formos audinių bandinių tempimo jėgos pokyčiams siekia iki 20 %. Siūlių įtaka audinių išilginių matmenų kitimui yra nežymi ir rodiklio $h_i'_{Y10}$ pokyčiai siekia iki 4,0 %. Tuo tarpu daugelio audinių bandinyje nubraižytų vertikalių linijų \check{S}_{Y1} ir \check{S}_{Y2} susiaurėjimo rodiklio $vs_i'_{Y10}$ pokyčiai siekia net iki 55 %. Taigi, gauta, kad siūlių įtaka bandinio skersinių matmenų pokyčiams yra žymi. Žymesni audinių bandiniuose nubraižytų horizontalių ir vertikalių linijų kampo pokyčiai $\alpha_i'_{Y10}$ nustatyti bandiniams su siūlėmis bandinio kirptiniuose kraštuose. Tokios siūlės sumažina bandinio centrinės dalies paslankumą ir dėl kampinių deformacijų poveikio labiau pasireiškia šlytis.

10. Nustatyta, kad siūlės įtaka tempimo jėgai buvo didesnė Y formos mezginių bandiniams nei audiniams ir siekė 55 %. Siūlės įtaka mezginių išilginiams matmenų kitimo rodiklio $h_i'_{Y40}$ verčių pokyčiams siekia iki 5 %. Mezginiuose skersinių matmenų rodiklio $vs_i'_{Y40}$ verčių pokyčiai, po sujungimų siūlėmis, ypač dideliu struktūros elementų paslankumu pasižymintiems mezginiams svyruoja iki 45 %. Rodiklio $\alpha_i'_{Y40}$ verčių pokyčiai mezginiuose, kai bandiniai sujungiami siūlėmis, taip pat yra akivaizdūs ir siekia 50 %.

11. Nustatytas žymus skaitinio ir eksperimentinio tyrimų rezultatų sutapimas. Didžiausias skirtumas tarp eksperimentinio ir skaitinio metodo rodiklio $h_i'_{Y40}$ verčių yra apie 9,8 %. Nustatytas stiprus ryšys ($R^2 = 0,9563 \div 0,9961$) tarp eksperimentinių ir skaitinių tyrimų rezultatų. Taigi, pateikti rezultatai yra teisingi ir tinkami tiek praktiniam, tiek moksliniam panaudojimui.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. ABDESSALEM, S. B., et al. Influence of Elastane Consumption on Plated Plain Knitted Fabrics Characteristics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2009, 4(4), 30-35. ISSN 1558-9250.
2. ALAMDAR, Y. A New Method to Evaluate Low-Stress Shearing Behaviour of Woven Fabrics. *Indian Journal of Fibre and Textile Eesearch*. 2004, 29(3), 333-338. ISSN 0971-0426.
3. ALAMDAR, Y. Evaluation of the Basic Low Stress Mechanical Properties (Bending, Shearing and Tensile). *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2002, 12(5), 311-322. ISSN 0955-6222.
4. AL-GADDI, B., and M. HALASZ. Deformation Analysis of Composite Reinforcing Fabrics through Yarn Pull-out, Drape and Shear Tests. *Fibers and Polymers*. 2013, 14(5), 804-814. ISSN 1229-9197.
5. ALLAOUI, S., et al. Experimental and Numerical Analyses of Textile Reinforcement Forming of a Tetrahedral Shape. *Composites: Part A*. 2011, 42(6), 612-622. ISSN 1359-835X.
6. ANCUTIENĖ, K., et al. Quality Evaluation of the Appearance of Virtual Close-Fitting Woven Garments. *The Journal of the Textile Institute*. 2014, 105(3), 337-347p. ISSN 0040-5000.
7. AUDZEVIČIŪTĖ, I., ir V. MASTEIKAITĖ. Bandinio formos įtaka mezginių deformacijai jų tempimo metu. *Gaminių technologijos ir dizainas 2013: konferencijos pranešimų medžiaga*. Kaunas, Lietuva. Kaunas: Technologija, 2013. pp. 3-7.
8. AUDZEVIČIŪTĖ-LIUTKIENĖ, I., et al. Analysis of knitted fabrics deformation using uniaxial tension methods. In *ITC&DC: proceedings of 6th International Textile Clothing & Design Conference*, October 7-10, 2012, Dubrovnik, Croatia. Zagreb: Tekstil, 2013. pp. 30-35.
9. BAGHAEI, B., et al. Effect of Tensile Fatigue Cyclic Loads on Bagging Deformation of Elastic Woven Fabrics. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*. 2010, 35, 298-302. ISSN 0971-0426.
10. BARAUSKAS, R., and V. RIMAVIČIUS. Coupling of Zones with Different Resolution Capabilities in Finite Element Models of Uniform Structures. *Information Technology and Control*. 2010, 39(1), 7-17. ISSN 1392-124X.
11. BASSETT, R. J., et al. Experimental Methods for Measuring Fabric Mechanical Properties: a Review and Analysis. *Textile Research Journal*. 1999, 69(11), 866-875. ISSN 0040-5175.
12. BECEREN, Y., et al. Properties of Plain Knits from Siro-Spun Viscose/Spandex Yarns. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2010, 1(78), 41-46. ISSN 1230-3666.
13. BEKAMPIENĖ, P., and J. DOMSKIENĖ. Analysis of Fabric Specimen Aspect Ratio and Deformation Mechanism during Bias Tension. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2009, 15(2), 167-172. ISSN 1392-1320.
14. BEKAMPIENĖ, P., and J. DOMSKIENĖ. Experimental Analysis of the Influence of Stress Concentrators on the Bukling of Woven Materials under Uniaxial Tension. *International Journal of Material Forming*. 2010, 3(1), 211-214. ISSN 1960-6206.

15. BEKAMPIENĖ, P., and J. DOMSKIENĖ. Influence of Stitcing Pattern on Deformation Behaviour of Woven Fabric during Forming. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2010, 16(3), 226-230. ISSN 1392-1320.
16. BISHOP, D. P. Fabrics Sensory and Mechanical Properties. *Textile Progress*. 1996, 26(3), 1-62. ISSN 0040-5167.
17. BLUM, R., et al. *Testing Methods and Standards. European Design Guide for Tensile Surface Structures*. 2004, 293–322. ISBN 908086871X.
18. BOGNER, B. H., and R. BLUM. The Mechanical Behaviour of Coated Fabrics Used in Prestressing Textile Engineering Structures: Theory, Simulation and Numerical Analysis to be Used in a FEM-Model. *Journal of the Indiana Academy of the Social Science*. 2008 49(1), 39-47. ISSN 1522-7030.
19. BOISSE, P., et al. Simulation of Wrinkling During Textile Composite Reinforcement Forming. Influence of Tensile, in-Plane and Bending Stiffnesses. *Composites Science and Technology Journal*. 2011, 71(5), 1-22. ISSN 0266-3538.
20. BULUT, Y., and V. SULAR. Manufacturing and Sewing Performance of Polyurethane and Polyurethane/Silicone Coated Fabrics. *Materials and Manufacturing Processes*. 2012, 28(1), 106-111. ISSN 1042-6914.
21. CAALLARO, P., et al. Decrimping Behaviour of Uncoated Plain-Woven Fabrics Subjected to Combined Biaxial Tension and Shear Stresses. *Textile Research Journal*. 2007, 77(6), 403-416. ISSN 0040-5175.
22. CARMICHAEL, Alasdair. Man-Made Fibers Continue To Grow. In *2014 Textile World Innovation Forum, September, 2014*, Atlanta, Georgia, USA.
23. CARVELLI, V., et al. Deformability of a Non-Crimp 3D Orthogonal Weave E-glass Composite Reinforcement. *Composites Science and Technology Journal*, 2012, 73, 9-18. ISSN 0266-3538.
24. CAVALLARO, P. V., et al. Decrimping Behavior of Uncoated Plain-Woven Fabrics Subjected to Combined Biaxial Tension and Shear Stresses. *Textile Research Journal*. 2007, 77(6), 403-416. ISSN 0040-5175.
25. CELIK, O., et al. Determination of Spirality in Kintted Fabrics by Image Analyses. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2005, 3(51), 47-49. ISSN 1230-3666.
26. CHEN, Q., et al. Intra/inter-ply Shear Behaviors of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites in Thermoforming Processes. *Composites Structures*. 2011, 93(7), 1692-1703. ISSN 0263-8223.
27. CHEN, S., et al. On the Anisotropic Tensile Behaviors of Flexible Polyvinylchloride-Coated Fabrics. *Textile Research Journal*. 2007, 77(6), 369-374. ISSN 0040-5175.
28. CHEN, Y., et al. Mechanical Characteristics of Coated Fabrics. *Journal Textile Institute*. 1995, 86(4), 690-700. ISSN 0040-5000.
29. CHEN, Z., and J. YE. The Evaluation of Dynamic Clothing Pressure. *Advanced Materials Research*. 2013, 796, 584-587. ISSN 1662-8985.
30. CHOUDHARY, A. K., and A. GOEL. Effect of Some Fabric and Sewing Conditions on Apparel Seam Characteristics. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Textiles*. 2013, 2013, 1-8. ISSN 2314-6044.
31. CHOWDHURY, H., et al. Rapid Prototyping of High Performance Sportswear. *Procedia Engineering*. 2012, 34, 38-43. ISSN 1877-7058.

32. ČIUKAS, R. Theoretical Determination of Parameters of Weft Knitted Fabric Structure. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 1996, 2(3), 72-73. ISSN 1392-1320.
33. ČIUKAS, R. Theoretical Investigations of the Course Deformation of Weft Knitting. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 1997, 1(4), 73. ISSN 1392-1320.
34. ČIUKAS, R. Deformation of Knitting Heaving Transfer Loops. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 1996, 1(2), 67. ISSN 1392-1320.
35. CORTEZ, J. M., et al. P. Using Cellulases to Improve the Dimensional Stability of Cellulosic Fabrics. *Textile Research Journal*. 2002, 72(8), 673-680. ISSN 0040-5175.
36. CORUH, M., et al. A Scale Development Study to Evaluate the Physical Comfort of Denim Jeans. *TEKSTİL ve KONFEKSIYON*. 2011, 21(1), p. 77-81. ISSN 1300-3356.
37. DAN, R., et al. Numerical Simulation of Dynamic Pressure and Displacement for the Top Part of Men's Socks Using the Finite Element Method. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2013, 4(100), 112-117. ISSN 1230-3666.
38. DAPKŪNIENĖ, K., and E. STRAZDIENĖ. Comparative Analysis of Fabric Tensile Properties at Low-Stress and Breaking Loads. In *ITC&DC: proceedings of 3rd International Textiles Clothing and Design Conference "Magic World of Textiles", October 08-11, 2006, Dubrovnik, Croatia*. Zagreb: Tekstil, 2007. pp. 577-581.
39. DAPKŪNIENĖ, K., et al. Pusvilnonių audinių grįžtamosios gebos tyrimas. *Gaminių technologijos ir dizainas 2007: konferencijos pranešimų medžiaga, 2007, Kaunas, Lietuva*. pp. 152-157.
40. DARGIENĖ, J., and J. DOMSKIENĖ. Errors of Image Analysis Technique for the Textile Deformations Behaviour Investigation. *Fibers and Polymers*. 2013, 14(9), 304-310. ISSN 1392-1320.
41. DAS, A., and R. CHAKRABORTY. Studies on Elastane-Cotton Core-Spun Stretch Yarns and Fabrics: Part II – Fabric Low-Stress Mechanical Characteristics. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*. 2013, 38, 340-348. ISSN 0971-0426.
42. DAUKANTIENĖ, V., and M. GUTAUSKAS. Textile Hand: An Analysis of Knitted Fabric Behaviour. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2002, 8(6), 299-303. ISSN 1392-1320.
43. DAUKANTIENĖ, V., and M. LAPINSKIENĖ. Influence of the Deformation Mode on Seam Slippage in Woven Fabrics. *Fibers and Polymers*. 2012, 13(8), 1086-1093. ISSN 1528-0837.
44. DAUKANTIENĖ, V., et al. Simulation and Application of the Behaviour of a Textile Fabric while Pulling Through a Round Hole. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2003, 11(2), 38-42. ISSN 1230-3666.
45. DECAUDIN, P., et al. Virtual Garments: A Fully Geometric Approach for Clothing Design. *Computer Graphic Forum*. 2006, 25(3), 625-634. ISSN 1467-8659.
46. DENG, B., et al. Laundering Durability of Superhydrophobic Cotton Fabric. *Advanced Materials*. 2010, 22 (48), 5473-5477. ISSN 1521-4095.
47. DENTON, M. J., and P. N. DANIELS. *Textile Terms and Definitions*. 11th ed. Manchester: Textile Institute, 2002.
48. DERLER, S., et al. Tribology of Human Skin and Mechanical Skin Equivalents in Contact with Textiles. *Wear*. 2007, 263(7-12), 1112-1116. ISSN 0043-1648.

49. DGOUIB, A. B., et al. A Study of the Impact of Elastane Ratio on Mechanical Properties of Cotton Wrapped Elastane-Core Spun Yarns. *Journal of Textile Institute*. 2006, 97(2), 167-172. ISSN 0040-5000.
50. DOMSKIENĖ, J., and E. STRAZDIENĖ. Shearing Behaviour of Technical Textiles. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2002, 8(4), 489-494. ISSN 1392-1320.
51. DURVILLE, D. Simulation of the Mechanical Behaviour of Woven Fabrics at the Scale of Fibres. *International Journal of Material Forming*. 2010, 3(2), 1243-1251. ISSN 1960-6206.
52. FERNANDO, S., and T. JAYAWARDEAN. Measurement of Seam Puckering and Influence of Its Causes. *IOSR Journal of Engineering*. 2014, 4(4), 1-7. ISSN 2250-3021.
53. GALLIOT, C., and R. A. LUCHSINGER. A New Test Method for Measuring the Shear Properties of Coated Fabrics. *Tensinews: Newsletter of the European Based Network for the Design and Realisation of Tensile Structures*. 2011, 20, 8-9. ISSN 1784-5688.
54. GALLIOT, C., and R. H LUCHSINGER. The Shear Ramp: A New Test Method for the Investigation of Coated Fabric Shear Behaviour – Part II: Experimental Validation. *Composites: Part A*. 2010b, 41, 1750-1759. ISSN 1359-835X.
55. GALLIOT, C., and R. H. LUCHSINGER. The Shear Ramp: A New Test Method for the Investigation of Coated Fabric Shear Behaviour – Part I: Theory. *Composites: Part A*. 2010a, 41, 1743-1749. ISSN 1359-835X.
56. GALLIOT, C., and R. H. LUCHSINGER. Uniaxial and Biaxial Mechanical Properties of ETFE Foils. *Polymer Testing*. 2011, 30(4), 356-365. ISSN 0142-9418.
57. GEREKE, T., et al. Experimental and Computational Composite Textile Reinforcement Forming: A Review. *Composites: Part A*. 2013, 46, 1-10. ISSN 1359-835X.
58. GERŠAK, J. Clothing Design and Fit Comfort Based on Body Motion. *Gazette of Chemists, Technologists & Environmentalists of Republic of Srpska*. 2013, November, 43-49. ISSN 2232-755X.
59. GERŠAK, J. Study of Relationship between Fabric Elastic Potential and Garment Appearance Quality. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2004, 16(1/2), 238-251. ISSN 0955-6222.
60. GLASER, R., and V. CACCESE, V. Experimental Determination of Shear Properties, Buckling Resistance and Diagonal Tension Field of Polyurethane Coated Nylon Fabric. *The Journal of the Textile Institute*. 2014, 105(9), 980-997. ISSN 0040-5000.
61. *Global Textile Markets*, 2013. France: ReportLinker.
62. GOKARNESHAN, N., and K. THANGAMANI. An Investigation into the Properties of Cotton/Spandex and Polyester/Spandex Knitted Fabrics. *The Journal of the Textile Institute*. 2010, 101(2), 182-186. ISSN 0040-5000.
63. GORJANC, D., and V. BUKOŠEK. The Behaviour of Fabrics with Elastane Yarn during Stretching. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2008, 3(68), 63-68. ISSN 1230-3666.
64. GRĖBLIAUSKAITĖ, I., et al. Daugiakryptis audinių formavimasis. *Gaminių technologijos ir dizainas 2007: konferencijos pranešimų medžiaga, 2007, Kaunas, Lietuva*. pp. 68-72.
65. GRINEVIČIŪTĖ, D., et al. Influence of New Fiber-Forming Polymers Structure on Garment Hand Parameters. *Materials science (Medžiagotyra)*. 2010, 16(2), 144-147. ISSN 1392-1320.

66. GURARDA, A. Investigation of the Seam Performance of PET/Nylon-Elastane Woven Fabrics. *Textile Research Journal*. 2008, 78(1), 21-27. ISSN 0040-5175.
67. GURARDA, A., and M. BINNAZ. Slippage and Grinning Behavior of Lockstitch Seams in Elastic Fabrics under Cycling Loading Conditions. *Journal of Textile and Apparel/Tekstil ve Konfeksiyon*. 2010, 20(1), 65-69. ISSN 1300-3356.
68. HARRISON, P. Normalisation of Biaxial Bias Extension Test Results Considering Shear Tension Coupling. *Composites: Part A*. 2012, 43(9), 1546-1554. ISSN 1359-835X.
69. HARRISON, P., et al. Characterising the Shear-Tension Coupling and Wrinkling Behaviour of Woven Engineering Fabrics. *Composites: Part A*. 2012, 43(9), 903-914. ISSN 1359-835X.
70. HARRISON, P., et al. Shear Characterization of Viscous Woven Textile Composites: a Comparison between Picture Frame and Bias Extension Experiments. *Composites Science and Technology Journal*. 2004, 64(10/11), 1453-1465. ISSN 0266-3538.
71. HASANI, H. P. Analysis of the Physical Fundamentals of an Objective Integral Measuring System for the Determination of the Handle of Knitted Fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2009, 6(77), 70-75. ISSN 1230-3666.
72. HEDFI, H., et al. Dynamic Fabric Modelling and Simulation Using Deformable Models. *The Journal of the Textile Institute*. 2011, 102(8), 647-667. ISSN 0040-5000.
73. HING, N. Ng., and L. R. GRIMSDALE. Computer Graphics Techniques fir Modeling Cloth. *Journal IEEE Computer Graphics and Application*. 1996, 16(5), 28-41. ISSN 0272-1716.
74. HIVET, G., and P. BOISSE. Consistent 3D Geometrical Model of Fabric Elementary Cell. Application to a Meshing Preprocessor for 3D Finite Element Analysis. *Finite Elements in analysis and Design*. 2005, 42(1), 25-49. ISSN 0168-874X.
75. HIVET, G., et al. Analysis of the Dress Components in a Textile Composites Reinforcement. *Journal of Composites Materials*. 2012, 47(3), 269-285. ISSN 0021-9983.
76. HONG, L., et al. A Study of the Relationship Between Clothing Pressure and Garment Bust Strain, and Young's Modulus of Fabric, Based on a Finite Element Model. *Textile research Journal*. 2011, 81(13), 1307-1319. ISSN 0040-5175.
77. HU, J. *Fabric Testing*. Elsevier: Woodhead Publishing, 2008.
78. HU, J. L., and W. M. LO. Shear Properties of Woven Fabrics in Various Directions. *Textile Research Journal*. 2002, 72(5), 383-390. ISSN 0040-5175.
79. HU, J. L., et al. Bending Hysteresis of Plain Woven Fabrics in Various Directions. *Textile Research Journal*. 2000, 70(3), 237-242. ISSN 0040-5175.
80. HU, J. L., et al. Effect of Seams on Fabric Drape. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 1989, 9(3), 220-227. ISSN 0955-6222.
81. HU, J., and S. CHUNG. Bending Behavior of Woven Fabrics with Vertical Seams. *Textile Research Journal*. 2000, 70(2), 148-153. ISSN 0040-5175.
82. HU, L., and Y. ZHANG. The KES Shear Test for Fabrics. *Textile Research Journal*. 1997, 67(9), 654-664. ISSN 0040-5175.
83. HUYSMANS, G., et al. A Damage Model for Knitted Fabric Composites. *Composites: Part A*. 2001, 32(10), 1465-1475. ISSN 1359-835X.
84. JEVŠNIK, S., and D. ŽUNIČ-LOJEN. Drape Behaviour of Seamed Fabrics. *Fibers and Polymers*. 2007, 8(5), 550-557. ISSN 1528-0837.

85. JEVŠNIK, S., et al. Review of Computer Models for Fabric Simulation. *Tekstilec*. 2014, 57(4), 300-314. ISSN 2350-3696.
86. JEVŠNIK, S., et al. Virtual Clothes' Simulations. In *Proceedings of 1st International Conference I Love Inter/National Fashion, April 2-4, 2009, Ljubljana, Slovenia*. pp. 67-74.
87. JI, F., et al. Simulate the Dynamic Draping Behavior of Woven and Knitted Fabrics. *Journal of Industrial Textiles*. 2006, 35(3), 201-215. ISSN 1528-0837.
88. JINLIAN, H., and J. YAMING. Modeling Formability of Multiaxial Warp Knitted Fabrics on a Hemisphere. *Composites: Part A*. 2002, 33(5), 725-734. ISSN 1359-835X.
89. KALINAUSKAITĖ, R., ir K. DAPKŪNIENĖ. Kostiuminių drobinio pynimo audinių grįžtamosios gebos tyrimas. *Gaminių technologijos ir dizainas 2007: konferencijos pranešimų medžiaga, 2007, Kaunas, Lietuva*. pp. 127-130.
90. KAN, C. W., et al. Effect of Enzymatic Treatment and Reactive Dyeing on the Low Stress Mechanical Properties of Linen Fabric. *Fibers and Polymers*. 2009, 10(3), p. 325-332. ISSN 1229-9197.
91. KAWABATA, S. *The Standardization and Analysis of Hand Evaluation*. Japan: The Hand Evaluation and Standardization Comitee, the Textile Machinery Society of Japan, 1980.
92. KHEDHER, F., et al. The Influence of Industrial Finishing Treatments and their Sucedion on the Mechanical Properties of Denim Garment. *Autex Research Journal*. 2009, 9(3), 93-100. ISSN 1470-9589.
93. KIM, H-A., and S-J. KIM. Seam Pucker and Formability of the Worsted Fabrics. *Fibers and Polymers*. 2011, 12(8), 1099-1105. ISSN 1229-9197.
94. KIM, J. O., and B. LEWIS. Objective Evaluation of Fabric Hand. Part I: Relationship of the Fabric Hand by the Extraction Method and Related Physical and Surface Properties. *Textile Research Journal*. 1999, vol. 69(1), 59-67. ISSN 0040-5175.
95. KISILAK, D. A New Method of Evaluating Spherical Fabric Deformation. *Textile Research Journal*. 1999, 69(12), 908-913. ISSN 0040-5175.
96. KLEVAITYTĖ, R., and V. MASTEIKAITĖ. Anisotropy of Woven Fabric Deformation after Stretching. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2008, 4(69), 52-56. ISSN 1230-3666.
97. KLEVAITYTĖ, R., and V. MASTEIKAITĖ. Deformation Anisotropy of Stretch Fabric Systems. In *Baltic Polymer Symposium: programme and proceedings, September 20-22, 2006, Riga, Latvia*. Riga: Riga Technical University, 2006. pp. 34.
98. KLEVAITYTĖ, R., and V. MASTEIKAITĖ. Deformation anisotropy of Textile Fabrics Joined with Seam. In *Materials Engineering 2005: Abstracts of Paper of 14th International Baltic Conference, October 6-7, 2005, Kaunas, Lithuania*. Kaunas: Technologija, 2005. pp. 52.
99. KLEVAITYTĖ, R., et al. Investigation of Fabrics Tensile Deformations. *Materials science (Medžiagotyra)*. 2006, 12(2), 152-157. ISSN 1392-1320.
100. KLEVAITYTĖ, R., et al. Shear's Evaluation of Various Textile Fabrics. In *ITC&DC: proceedings of 5th International Textiles Clothing and Design Conference "Magic World of Textiles", October 03-06, 2010, Dubrovnik, Croatia*. Zagreb: Tekstil, 2011. pp. 610-615.
101. KOVAR, R., et al. Measuring of Anisotropy of Woven Fabric Deformation. In *ITC&DC: proceedings of 2nd International Textiles Clothing and Design Conference "Magic World*

- of Textiles*”, October 05-08, 2004, Dubrovnik, Croatia. Zagreb: Tekstil, 2005. pp. 732-737.
102. KUMPIKAITĖ, E., and A. SVIDERSKYTĖ. The Influence of Woven Fabric Structure on the Fabric Strength. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2006, 12(2), 162-166. ISSN 1392-1320.
 103. KURBAK, A., and O. EKMEK. Basic Studies for Modeling Complex Weft Knitted Fabric Structures Part I: A Geometrical Model for Widthwise Curlings of Plain Knitted Fabrics. *Textile Research Journal*. 2008, 70(3), 198-208. ISSN 0040-5175.
 104. LEBRUN, G., et al. Evaluation of Bias-Extension and Picture-Frame Test Methods for the Measurement of Intraply Shear Properties of PP/Glass Commingled Fabrics. *Composite Structures*. 2003, 61, 341-352. ISSN 0263-8223.
 105. LEKECKAS, K., et al. The effect of fabric fusing in 3D clothing simulation. In *ITC&DC: proceedings of 6th International Textiles Clothing and Design Conference “Magic World of Textiles”*, October 07-10, 2012, Dubrovnik, Croatia. pp. 360-364.
 106. LEKECKAS, K., ir E. STRAZDIENĖ. Trimačio modelio generavimo galimybės taikant netiesioginį medžiagos savybių nustatymą. *Pramonės inžinerija 2014: jaunųjų mokslininkų konferencija*. Kaunas, Lietuva. Kaunas: Technologija, 2014, pp. 139-146.
 107. LI, C. Y., and X. T. ZHANG. Research and Comparison of Numerical Simulation of Draping and Buckling About Woven Fabric and Knitted Fabric. In *International Conference on Computer Science and Software Engineering, December 12-14, 2008, Wuhan, Hubei*. IEEE, 2008. pp. 1094-1097.
 108. LIM, H., and C. ISTOOK. Drape Simulation of three-Dimensional Virtual Garment Enabling Fabric Properties. *Fibres and Polymers*. 2011, 12(8), 1077-1082. ISSN 1229-9197.
 109. LIN, T. H. Construction of Predictive Model on Fabric and Sewing Thread Optimization. *Journal of Textile Engineering*. 2004, 50(1), 6-11. ISSN 1346-8235.
 110. LIN, Y., et al. Finite Element Modeling of Male Leg and Sportswear: Contact Pressure and Clothing Deformation. *Textile Research Journal*. 2011, 81(14), 1470-1476. ISSN 0040-5175.
 111. LIN, Y., et al. Finite Element Modeling of Male Leg and Sportswear: Contact Pressure and Clothing Deformation. *Textile Research Journal*. 2011, 81(14), 1470-1476. ISSN 0040-5175.
 112. LIU, Ch., et al. Novel Testing Equipment for Fabric Wrinkle Resistance Simulating Actual Wear. *Textile Research Journal*. 2014, 84(10), 1059-1069. ISSN 0040-5175.
 113. LIU, L., et al. Two-Dimensional Macro-Mechanics Shear Models of Woven Fabrics. *Composite: Part A*. 2005, vol. 36(1), 105-114. ISSN 1359-835X.
 114. LIU, R., et al. Fabric Mechanical-Surface Properties of Compression Hosiery and Their Effects on Skin Pressure Magnitudes when Worn. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2010, 2(79), 91-97. ISSN 1230-3666.
 115. LIU, Y. J., et al. A Survey on CAD Methods in 3D Garment Design. *Computers in Industry*. 2010, 61(6), 576-593. ISSN 0166-3615.
 116. LOMOV, S., et al. Meso-FE Modelling of Textile Composites: Road-Map, Data Flow and Algorithms. *Composites Science and Technology*. 2007, 67(9), 1870-1891. ISSN 0266-3538.

117. LOMOV, S., et al. Modeling three-Dimensional Fabrics and Three-Dimensional Reinforced Composites: Challenges and Solutions. *Textile Research Journal*. 2011, 81(1), 28-41. ISSN 0040-5175.
118. LUO, Y., and I. VERPOEST. Biaxial Tension and Ultimate Deformation of Knitted Fabric Reinforcements. *Composite: Part A*. 2002, 33(2), 197-203. ISSN 1359-835X.
119. MAKRIS, A., et al. Shape Optimisation of Biaxially Loaded Cruciform Specimen. *Polymer Testing*. 2010, 29(2), 216-223. ISSN 0142-9418.
120. MALČIAUSKIENĖ, E., et al. Influence of Weave into Slippage of Yarns in Woven Fabrics. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2011, 17(1), 50-52. ISSN 1392-1320.
121. MALČIAUSKIENĖ, E., et al. Weave Factor for Seam Slippage Prediction of Unbalance Fabrics. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2011, 4(87), 101-104. ISSN 1230-3666.
122. MARAZAS, G., et al. Stress Distribution in Soft Polymer Laminates. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2007, 13(1), 43-46. ISSN 1392-1320.
123. MASTEIKAITĖ, V., and V. SACEVIČIENĖ. A Method for Mobility Estimation of Textile-Polymeric Systems. *Fibers and Polymers*. 2010, 11(6), 869-876. ISSN 1229-9197.
124. MASTEIKAITĖ, V., and V. SACEVIČIENĖ. Coated and Laminates Fabrics Structural Stability Evaluation. In *ITC&DC: proceedings of 4th International Textiles Clothing and Design Conference "Magic World of Textiles", October 03-06, 2008, Dubrovnik, Croatia*. Zagreb: Tekstil, 2009. pp. 1-6.
125. MATUKONIS, A., et al. Frictional Interaction between Textile Yarns. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 1999, 4(11), 50-52. ISSN 1392-1320.
126. MCLAREN, J., et al. Preliminary Development of a Wearable Device for Dynamic Pressure Measurement in Garments. *Procedia Engineering*. 2010, 2(2), 3041-3046. ISSN 1877-7058.
127. MEŠKUOTIENĖ, A, et al. Metrological performance of the digital image analysis method applied for investigation of textile deformation. *Textile Research Journal*. 2015, 85(1), 71-79. ISSN 0040-5175.
128. MICKEVIČIENĖ, A., et al. The Investigation of Weft-Knitted Fabrics Axial Dimensions Having Loop, Tuck and Float. In abstract book of *AUTEX 2010: 10th World Textile Conference, 21-23 June, 2010, Vilnius, Lithuania*. Kaunas: Technologija, 2010. pp. 183.
129. MIDHA, V. K., and S. S. KUMAR. Effect of Seam Angle on Seam Puckering in Lightweight Woven Fabrics. *The Journal of the Textile Institute*. 2015, 106(4), 395-401. ISSN 0040-5000.
130. MIKUČIONIENĖ, D. The Dimensional Change of Used Pure and Compound Cotton Knitwear. *Material Science*, 2004, 10(1), 93-96. ISSN 1392-1320.
131. MIKUČIONIENĖ, D., et al. The Influence of Knitting Structure on Mechanical Properties of Weft Knitted Fabrics. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2010, 16(3), 221-225. ISSN 1392-1320.
132. NA., Y., and B. POURDEYHIMI. Assessing Wrinkling Using Image Analysis and Replicate Standards. *Textile Research Journal*. 1995, 65(3), 1574-1580. ISSN 1229-9197.
133. NASSIF, N. A. A. Evaluation os Seam Pucker of Woven Cotton Fabrics Usinf Two Different Methods. *Journal of American Science*. 2013, 9(4), 205-210. ISSN 0002-9599.

134. NAUJOKAITYTĖ, L., et al. Investigation of Fabric Behaviour in Bias Extension at Low Loads. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2008, 5(70), 52-56. ISSN 1230-3666.
135. NAYAK, R., et al. Sewing Performance of Stretch Denim. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*. 2010, 6(3), 1-9. ISSN 1533-0915.
136. NG, R., et al. Dynamic Ease Allowance in Arm Raising of Functional Garment. *Sen 'i Gakkaishi*. 2008, 64(9), 236-243. ISSN 0037-9875.
137. NG, R., et al. Dynamic Stress Distribution on Garment. In *ITC&DC: proceedings of 3rd International Textiles Clothing and Design Conference "Magic World of Textiles, October 08-11, 2006, Dubrovnik, Croatia*. Zagreb: Tekstil, 2007. pp. 123-127.
138. OMEROGU, S., et al. Comparison of Bending, Drapability and Crease Recovery Behaviors of Woven Fabrics Produced from Polyester Fibers Having Different Cross-Sectional Shapes. *Textile Research Journal*. 2010, 80(12), 1180-1190. ISSN 0040-5175.
139. ONATE, E., et al. Possibilities of the Particle Finite Element Method in Computational Mechanics. *Advanced Structured Materials*. 2010, 1, 271-310. ISSN 1869-8433.
140. ORTLEK, H. G. Influence of Selected Process Variable on the Mechanical Properties of Core-Spun Vortex Yarns Containing Elastane. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2006, 14(3), 42-44. ISSN 1230-3666.
141. OZDIL, N. Stretch and Bagging Properties of Denim Fabrics Containing Different Rates of Elastane. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2008, 1(56), 63-67. ISSN 1230-3666.
142. PAN, J-H. H., and J. YU. Fibrous Materials as Soft Matter. *Textile Research Journal*. 2007, 77(4), 205-213. ISSN 0040-5175.
143. PAN., N., et al. An Alternative Approach to the Objective Measurement of Fabric. *Textile Research Journal*. 1993, 61(1), 33-43. ISSN 0040-5175.
144. PASAYEV, N., et al. Investigation of the Techniques Decreasing the Seam Slippage in Chenille Fabrics (Part II). *Textile Research Journal*. 2011, 81(20), 2075-2081. ISSN 0040-5175.
145. PASAYEV, N., et al. Investigation of the Techniques Decreasing the Seam Slippage in Chenille Fabrics (Part I). *Textile Research Journal*. 2012, 82(9), 855-863. ISSN 0040-5175.
146. PEARCE, A. J., et al. Wearing a sport Compression Garment on the Performance of Visuomotor Tracking Following Eccentric Exercise: A Pilot Study. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2009, 12(14), 500-502. ISSN 1440-2440.
147. PETRULYTĖ, S., and R. BALTAKYTĖ. Liquid Sorption and Transport in Woven Structures. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2009, 2(73), 39-45. ISSN 1230-3666.
148. POTLURI, P., et al. Measurement of Meso-Scale Shear Deformations for Modeling Textile Composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2006, 37(2), 303-314. ISSN 1359-835X.
149. RAHMAN, O. Understanding Consumers' Perceptions and Behaviours: Implications for Denim Jeans Design. *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*. 2011, 7(1), 1-16. ISSN 1533-0915.
150. REILLY, T. *Ergonomics in Sport and Physical Activity*. 1st ed. Hardback, 2010. ISBN-13: 9780736069328.
151. ROBERTSON, R. E. Three-Dimensional Fiber Reinforcement Shapes Obtainable from Flat, Bidirectional Fabrics without Wrinkling or Cutting, Part 1: A Single Four-Sided Pyramid. *Composites: Part A*. 2000, 31(7), 703-715. ISSN 1359-835X.

152. ROBERTSON, R. E. Three-Dimensional Fiber Reinforcement Shapes Obtainable from Flat Bidirectional Fabrics without Wrinkling or Cutting, Part 2: A Single n-Sided Pyramid, Cone, or Round Box. *Composites: Part A*. 2000, 31(11), 1149-1165. ISSN 1359-835X.
153. RYPL, R., et al. Effect of Twist, Fineness, Loading Rate and Length on Tensile Behaviour of Multifilament Yarn. In *4th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS4), June 03–05, 2009, Dresden, Germany*. pp. 29-40.
154. SACEVIČIENĖ, V., et al. Influence of Textile Structure on Their Tensile deformation. In *ITC&DC: proceedings of 5th International Textile Clothing & Design Conference „Magic World of Textiles”, October 3-6, 2010, Dubrovnik, Croatia*, pp. Zagreb: Tekstil, 2011. pp. 700-704.
155. SACEVIČIENĖ, V., et al. Influence of the Elastane Fibre on the Woven Fabric Structural Mobility. *Materials science (Medžiagotyra)*. 2011, 17(4), 413-416. ISSN 1392-1320.
156. SADEK, R., et al. Effect of Lycra Extension Percent on Single Jersey Knitted Fabric Properties. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2012, 7(2), 11-16. ISSN 1558-9250.
157. ŠAJN, D., and V. BUKOŠEK. The Viscoelastic Properties of Spherical Loading of Stretch Fabric. In *ITC&DC: proceedings of 3rd International Textiles Clothing and Design Conference “Magic World of Textiles”, October 08-11, 2006, Dubrovnik, Croatia*. Zagreb: Tekstil, 2007. pp. 734-738.
158. ŠAJN, D., et al Study of the Relaxation Phenomena of Fabrics Containing Elastane Yarns. In *ITC&DC: proceedings of 2nd International Textiles Clothing and Design Conference “Magic World of Textiles”, October 05-08, 2004, Dubrovnik, Croatia*. Zagreb: Tekstil, 2005. pp. 188-199.
159. ŠAJN, D., et al. Correlation between the Relaxation and Deformation of Fabrics Containing Elastane Yarn. In abstract book of *AUTEX 2005: 5th World Textile Conference, June 27, 2005, Maribor, Slovenia*. 2005. pp. 406-411.
160. SAUKAITYTĖ, I., et al. Woven Fabric Behaviour During Pulling Disc-Shaped Specimen Through a Central Hole. *Indian Journal of Fibre and Textile Research*. 2004, 29(2), 138-142. ISSN 0971-0426.
161. SAVCI, S., and J. I. Curiskis. A Study of the Deformation of Weft-Knit Preforms for Advanced Composite Structures, Part 1: Dry Preform Properties. *Composites Science and Technology*. 2000, 60(10), 1931-1942. ISSN 0266-3538.
162. SEIDEL, A. Griffbewertung von Strumpfwaren mit dem ITV-Griff-Tester. *Melliand Textilberichte*. 2001, 6, 491–494. ISSN 0198-7275.
163. SEMANI, D., et al. A New Aspect of Geometrical and Physical Principles Applicable to the Estamination of Textile Structures: An Ideal Model for the Plain-knitted Loop. *Journal of Textile Institute*. 2003, 94, Part I, 202-211. ISSN 0040-5000.
164. SENTHIKUMAR, M., et al. Elastane Fabrics – A Tool for Stretch Applications in Sports. *Indian Journal of Fibre and Textile Rsearch*. 2011, 36(3), 300-307. ISSN 0971-0426.
165. SENTHILKUMAR, M., and N. ANBUMANI. Dynamics of Elastic Knitted Fabrics for Sports Wear. *Journal of Industrial Textiles*. 2011, 41(1), 13-24. ISSN 1528-0837.
166. SENTHILKUMAR, M., et al. Design and Development of a Pressure sensing Device for Analysing the Pressure Comfort of Elastic Garments. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2012, 1(90), 64-69. ISSN 1230-3666.

167. SHERBURN, M. *Geometric and Mechanical Modelling of Textiles*. PhD thesis, Nottingham University, 2007.
168. SHISHOO, L. R. Importance of Mechanical and Physical Properties of Fabric in the Clothing Manufacturing process. *International Journal of clothing science and Technology*. 1995, 7(2/3), 35-42. ISSN 0955-6222.
169. SHISHOO, R. *Textiles in Sport*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005.
170. SIDABRAITĖ, V., and V. MASTEIKAITĖ. Effect of Woven Fabric Anisotropy on Drape Behaviour. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2003, 9(1), 111-115. ISSN 1392-1320.
171. SINGHA, K. Analysis of Spandex/Cotton Elastomeric Properties: Spinning and Applications. *International Journal of Composite Materials*. 2012, 2(2), 11-16. ISSN 2166-479X.
172. SKELTON, J. Mechanics of Elastic Performance of Textile Materials, Part XIX: the Shear Behavior of Fabrics under Biaxial Loads. *Textile Research Journal*. 1971, 41(11), 871-880. ISSN 0040-5175.
173. STJEPANOVIČ, Z. IMB 2006 – Novelties in the Field of the 3D Virtual Prototyping. *Tekstilec*. 2006, 49(7/9), 117-121. ISSN 2350-3696.
174. STJEPANOVIČ, Z., et al. Research on the Effect of Some Knitting Parameters on Properties of Cotton/Lycra Knitted Fabrics during Relaxation Process. *Tekstilna industrija*. 2010, 58(1), 22-31. ISSN 0040-2389.
175. STRAZDIENĖ, E. et al. Tekstilinių membranų elgsena puansoninio deformavimo procese. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 1997, 2(5), 50-54. ISSN 1392-1320.
176. STRAZDIENĖ, E., et al. A New Method for Textile Objective Evaluation. *Journal of Textile Institute*. 2003, 94(3/4), 245-255. ISSN 0040-5000.
177. STRAZDIENĖ, E., et al. Bagging of Thin Polymer Materials: Geometry, Resistance and Application. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2003, 9(3), 262-265. ISSN 1392-1320.
178. STRAZDIENĖ, E., et al. New Method for the Objective Evaluation of Technical Textile Behaviour. *Biofunktionelle Materialien: Gesundheit durch Textilien* [interaktyvus]. 2002, [žiūrėta 2012-01-12]. Prieiga per: Tu-Dresden.de
179. STRAZDIENĖ, E., ir M. GUTAUSKAS. Audinių ir trikotažo medžiagų elgsena vienašio ir dviašio deformavimo atvejais. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 1999, 10(3), 48-53. ISSN 1392-1320.
180. SUN-PUI, Ng, et al. Bilinear Approximation of Anisotropic Stress-Strain Properties of Woven Fabrics. *Research Journal of Textile and Apparel*. 2005, 9(4), 50-56. ISSN 1560-6074.
181. SUPEL, B., and Z. MIKOLAJCZYK. Modelling the Process of the Compression of Distance Knitted Fabrics in the Aspect of Elastica Curves. *Fibres and Textiles in Rastern Europe*. 2010, 4(81), 52-55. ISSN 1230-3666.
182. TAHA, I., et al. Comparison of Picture Frame and Bias-Extension Test for the Characterization of Shear Behaviour in Natural Fibre Woven Fabrics. *Fibres and Polymers*. 2013, 14(2), 338-344. ISSN 1229-9197.
183. TOKMAK, O., et al. Investigation of the Mechanics and Performance of Woven Fabrics Using Objective Evaluation Techniques. Part I: The Relationship Between FAST, KES-F and Cusick's Drape – Meter Parameters. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2010, 2(79), 55-59. ISSN 1230-3666.

184. TOYOBO, T. Development of Clothing Pressure Simulation Technology that Calculates Clothing Pressure from Fabric Tensile-Strength Test Results. *Fibre to fashion News* [interaktyvus]. August 2008, 1-1 [žiūrėta 2011-01-11]. Prieiga per Fibre 2 Fashion.
185. TRUNCYTĖ, D., and M. V. GUTAUSKAS. The Change of Handle Properties of Knitted Fabrics Influenced by Washing Process. *Materials science (Medžiagotyra)*. 2006, 12(2), 158-16. ISSN 1392-1320.
186. TSAI, I., et al. The Influence of Woven Stretch Fabric Properties on Garment Design and Pattern Construction. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*. 2002, 24(1), 3-14. ISSN 0142-3312.
187. TURNER, A. W., et al. Tension/torsion Testing of Inflatable Fabric Tubes. *Experimental Techniques*. 2008, 32(2), 47-52. ISSN 1747-1567.
188. UCAR, N., et al. Investigating the Drape Behavior of Seamed Knit Fabrics with Image Analysis. *Textile Research Journal*. 2004, 74(2), 166-171. ISSN 0040-5175.
189. URBELIS, V., et al. Stress Relaxation of clothing Fabrics and Their Systems. *Materials Science (Medžiagotyra)*. 2007, 13(4), 327-332. ISSN 1392-1320.
190. VAITKEVIČIENĖ, V., and V. MASTEIKAITĖ. A Method for the Evaluation of Fabric Drapeability. In *Baltic Textile and Leather: International Conference*, September 11-12, 2003, Kaunas-Vilnius, Lithuania. pp. 101–105.
191. VASCONCELOS, A., and A. CAVACO-PAULO. Enzymatic Removal of Cellulose from Cotton/Polyester Fabric Blends. *Cellulose*. 2006, 13(5), 61-68. ISSN 0969-0239.
192. VOLINO, P., et al. From Early Virtual Garment Simulation to Interactive Fashion Design. *Computer-Aided Design*. 2005, 37(6), 593-608. ISSN 0010-4485.
193. VYSOCHINA, K., et al. Identification of Shear Stiffness of Soft Orthotropic Textile Composites: Part I – Development of a Mixed Method for Shear Elastic Constant Identification. *Journal of Industrial Textiles*. 2005, 35(2), 137-155. ISSN 1528-0837.
194. WANG, G. Definition and Review of Virtual Prototyping. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*. 2003, 2(3), 232-236. ISSN 1944-7078.
195. WANG, Y., et al. A Smart Mannequin System for the Pressure Performance Evaluation of Compression Garments. *Textile Research Journal*. 2011, 81(11), 1113-1123. ISSN 0040-5175.
196. WANG, Y., et al. Experimental Investigation the Dynamic Pressure Attenuation of Elastic Fabric for Compression Garment. *Textile Research Journal* [interaktyvus]. October 22, 2011, 1-11 [žiūrėta 2011-09-02]. Prieiga per Sage Pub.
197. *Worldwide production volume of chemical and textile fibers from 1975 to 2014 (in 1,000 metric tons)*, 2015. Germany: Statista.
198. YAZDI-ALAMDAR, A. Further Studies on Fabric Objective Measurement (Concentrated Loading Method). *International Journal of clothing science and Technology*. 2003, 15(1), 28-46. ISSN 0955-6222.
199. YICK, K. L., and K. P. S. CHENG. Comparison of Mechanical Properties of Shirting Materials Measured on KES-F and FAST Instruments. *Textile Research Journal*. 1996, 66(10), 622-633. ISSN 0040-5175.
200. YILDIRIM, K. Predicting Seam Opening Behavior of Woven Seat Fabrics. *Textile Research Journal* [interaktyvus]. Sage Journals, 2010, 1-9 [žiūrėta 2013-02-12]. ISSN 0040-5175. Prieiga per Sage Pub.

201. YINGYING, Z., et al. Experimental Analysis of Tensile Behaviors of Polytetrafluoroethylene-Coated Fabrics Subjected to Monotonous and Cyclic Loading. *Textile Research Journal* [interaktyvus]. July 12, 2013, 1-15 [žiūrėta 2011-12-15]. Prieiga per Sage Pub.
202. ZHANG, Y. T., et al. Buckling Analysis of Plain Knitted Fabric Sheets under Simple Shear in an Arbitrary Direction. *International Journal of Solids and Structures*. 2007, 44(21), 7049-7060. ISSN 0020-7683.
203. ZHANG, Y., et al. A Micro-mechanical Model of Knitted Fabric and its Application to the Analysis of Buckling under Tension in Wale Direction: Buckling Analysis. *Acta Mechanica Sinica*. 2005, 21(2), 176-180. ISSN 0567-7718.
204. ZHANG, Y., et al. Micro-Mechanical Model of Knitted Fabric and Its Application to the Analysis of Buckling under Tension in Wale Direction: Micro-Mechanical Model. *Acta Mechanica Sinica*. 2004, 20(6), 623-631. ISSN 0567-7718.
205. ZHANG, Y., et al. Study on Intra/Inter-Ply Shear Deformation of Three Dimensional Woven Preforms for Composite Materials. *Materials and Design*. 2013, 49, 151-159. ISSN 0261-3069.
206. ZHU, B., et al. An Experimental Study of In-Plain Large Shear Deformation of Woven Fabric Composites. *Composite Science and Technology*. 2007, 67(2), 252-261. ISSN 2215-0986.
207. ZOUARI, R., et al. Experimental and Numerical Analyses of Fabric Off-Axes Tensile Test. *The Journal of Textile Institute*. 2010, 101(1), 56-68. ISSN 0040-5000.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Thomson Reuters Web of Science duomenų bazės pagrindinio sąrašo leidiniuose

1. Sacevičienė, Virginija; Masteikaitė, Vitalija; Klevaitytė, Ramunė; Audzevičiūtė, Inga. Influence of the Elastane Fibre on the Woven Fabric Structural Mobility // Materials science = Medžiagotyra / Kaunas University of Technology, Academy of Sciences of Lithuania. Kaunas : Technologija. ISSN 1392-1320. 2011, vol. 17, no. 4, p. 413-416. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)].
2. Masteikaitė, Vitalija; Sacevičienė, Virginija; Audzevičiūtė-Liutkienė, Inga. Influence of Structural Changes in Cotton Blend Fabrics on Their Mobility // Fibres and Textiles in Eastern Europe. Lodz : Institute of Chemical Fibres. ISSN 1230-3666. 2013, vol. 21, no. 1(97), p. 55-60. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)].

Kituose Mokslinės informacijos instituto (ISI) duomenų bazėse referuojamuose leidiniuose [Proceedings ir kt.]

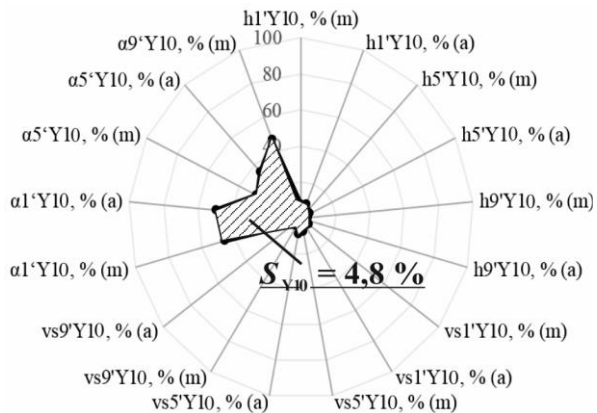
1. Sacevičienė, Virginija; Klevaitytė, Ramunė; Masteikaitė, Vitalija; Audzevičiūtė, Inga. Influence of Textile Structure on Their Tensile deformation // ITC&DC : 5th International Textile Clothing & Design Conference – Magic World of Textiles, October 3-6, 2010, Dubrovnik, Croatia : book of proceedings. Zagreb : University of Zagreb. ISSN 1847-7275. 2010, p. 700-704. [ISI Proceedings].
2. Audzevičiūtė-Liutkienė, Inga; Masteikaitė, Vitalija; Sacevičienė, Virginija. Analysis of knitted fabrics deformation using uniaxial tension methods. // Magic world of Textiles : 6th international textile clothing & design conference, October 7-10, 2012, Dubrovnik, Croatia : book of proceedings / University of Zagreb. Faculty of Textile technology. Zagreb : University of Zagreb. ISSN 1847-7275. 2012, p. 30-35. [ISI Proceedings].

Konferencijų pranešimų medžiagoje

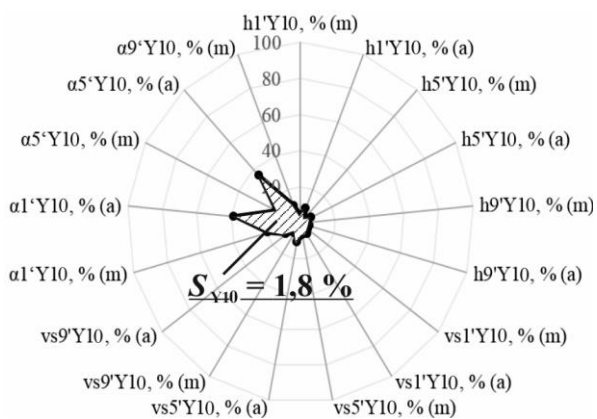
1. Sacevičienė, Virginija; Masteikaitė, Vitalija; Audzevičiūtė, Inga; Klevaitytė, Ramunė. Influence of the Polyurethane Fibre on the Woven Fabric Structure Mobility // Baltic Polymer Symposium 2010 : Palanga, September 8-11, 2010 : programme and abstracts / Kaunas University of Technology, Vilnius University. Kaunas : Technologija, 2010. ISBN 9789955258384. p. 57.
2. Audzevičiūtė, Inga; Masteikaitė, Vitalija; Sacevičienė, Virginija; Klevaitytė, Ramunė. Elastano pluošto įtaka audinių paslankumui // Gaminių technologijos ir dizainas 2010 : konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas : Technologija. ISSN 1822-492X. 2010, p. 36-40 (Konferencijoje dalyvavo doktorantė).
3. Masteikaitė, Vitalija; Sacevičienė, Virginija; Audzevičiūtė-Liutkienė, Inga; Adomaitienė, Loreta. Mechanical Behaviour of Knitted Fabrics under Different Tension Conditions // Baltic Polymer Symposium 2011 : Pärnu, Estonia,

- September 21-24, 2011 : program and abstracts / Tallinn University of Technology. Tallinn : Tallinn University of Technology, 2011. p. 66.
4. Audzevičiūtė, Inga; Masteikaitė, Vitalija. Bandinio formos įtaka mezginių deformacijai jų tempimo metu // Gaminių technologijos ir dizainas 2013 : konferencijos pranešimų medžiaga / Kauno technologijos universitetas. Kaunas : Technologija. ISSN 1822-492X. 2013, p. 3-7 (Konferencijoje dalyvavo doktorantė).
 5. Audzevičiūtė-Liutkienė, Inga; Masteikaitė, Vitalija. The Influence of Specimen's Type on Deformation of Knitted Fabrics during Their Extension // 15th International Conference-School 2013 : Palanga, Lithuania, August 27-31, 2013 : book of abstracts / Kaunas University of Technology. Kaunas : Technologija, 2013. ISSN 1822-7759. p. 159 (Konferencijoje dalyvavo doktorantė).

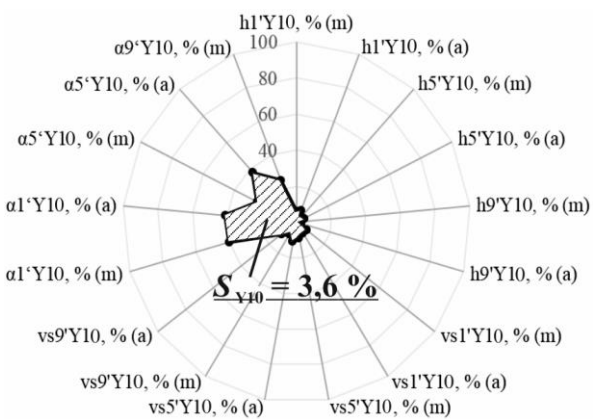
1 PRIEDAS



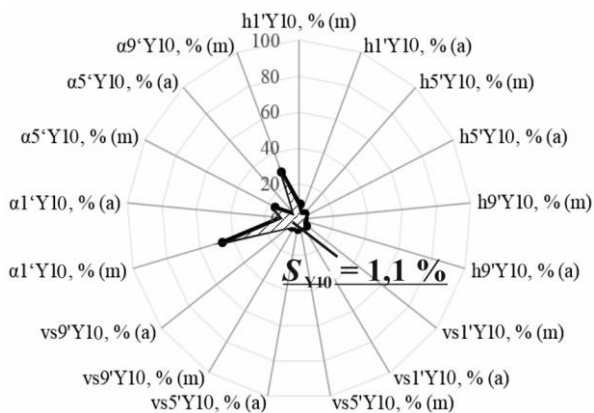
1.1 pav. Audinio A1 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}



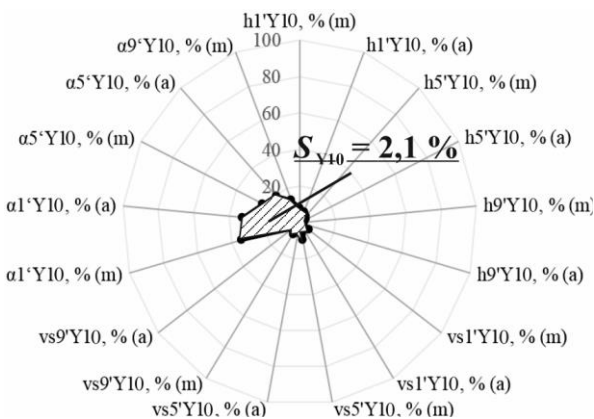
1.2 pav. Audinio A2 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}



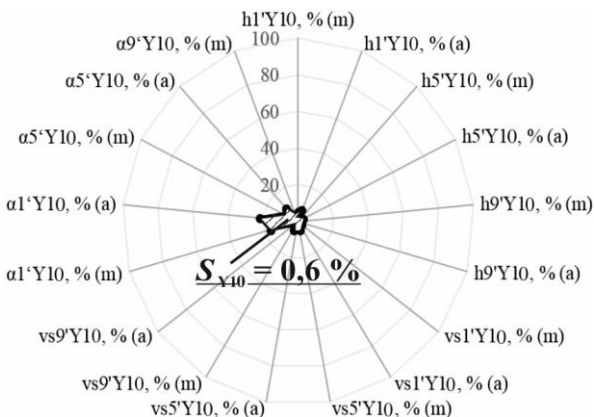
1.3 pav. Audinio A3 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}



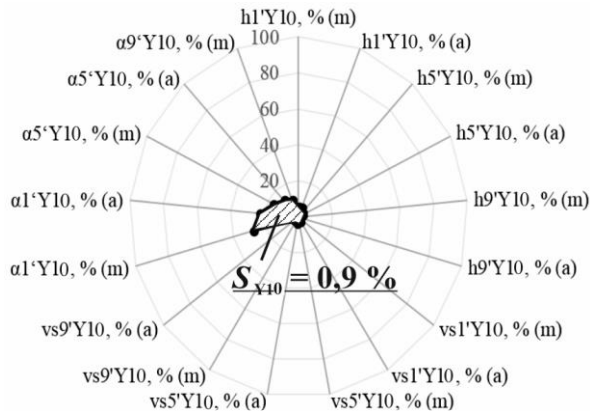
1.4 pav. Audinio A4-EL-a rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}



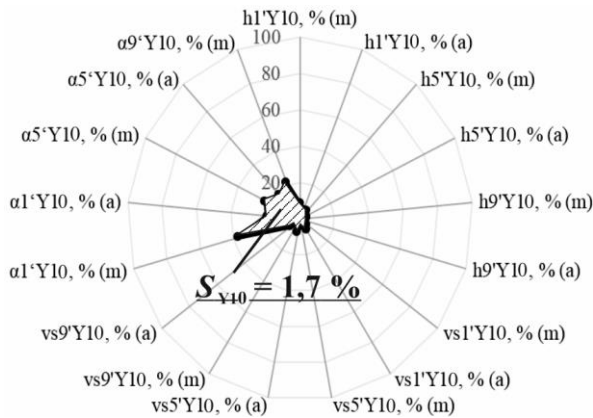
1.5 pav. Audinio A5 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}



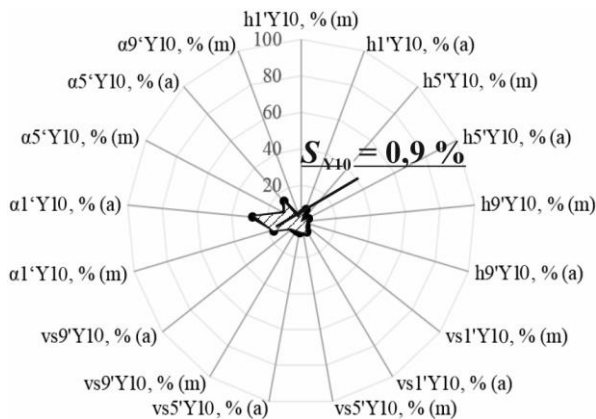
1.6 pav. Audinio A6-EL-ma rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}



1.7 pav. Audinio A7-EL-a rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}

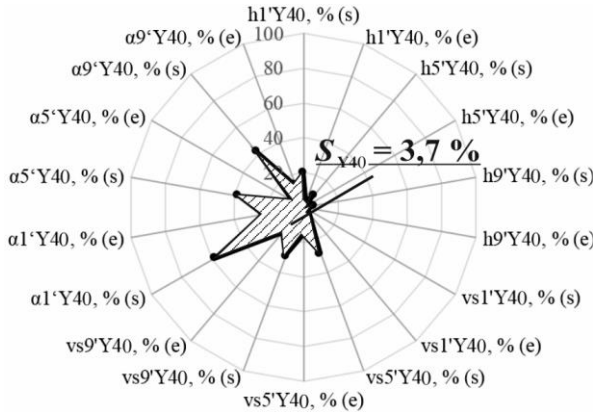


1.8 pav. Audinio A8-EL-a rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}

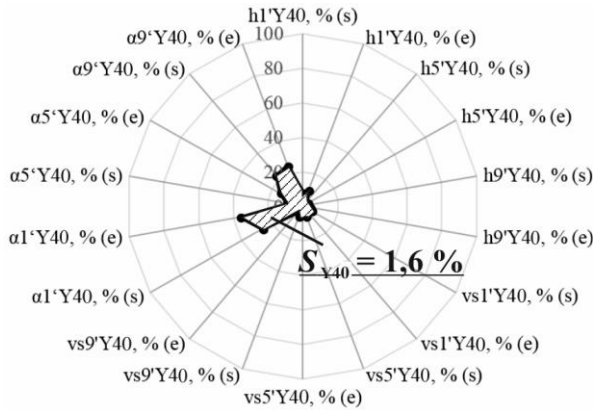


1.9 pav. Audinio A9-EL-m(a) rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y10}

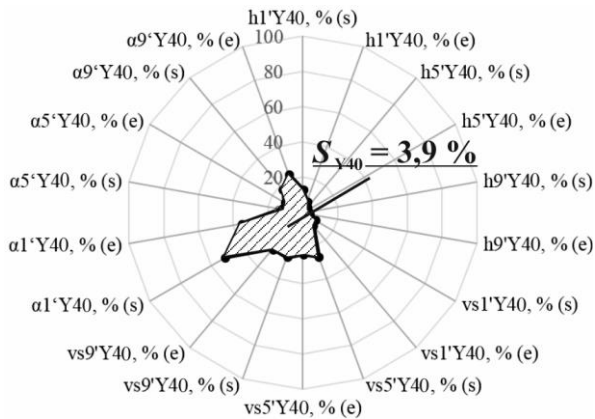
2 PRIEDAS



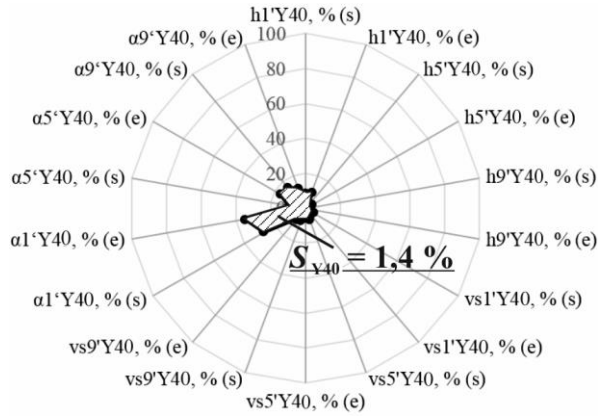
2.1 pav. Mezinio M1 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y40}



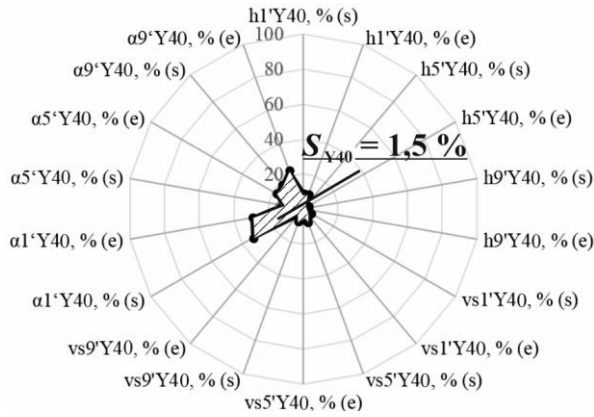
2.2 pav. Mezinio M2-EL-e rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y40}



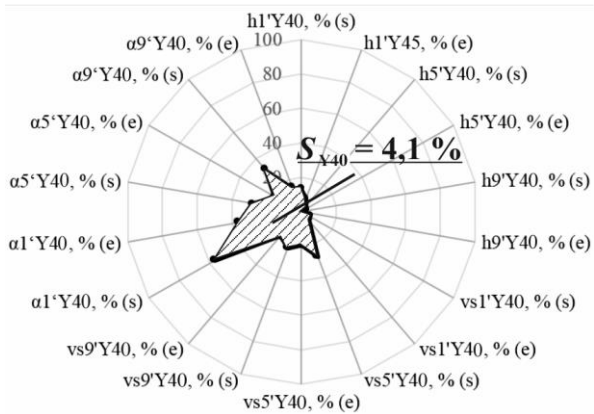
2.3 pav. Mezinio M3 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y40}



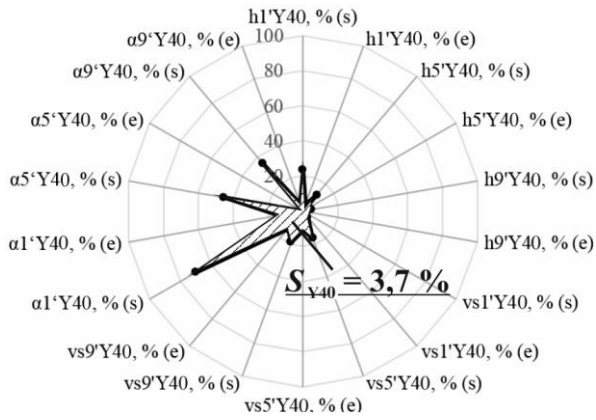
2.4 pav. Mezinio M4-EL-e rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y40}



2.5 pav. Mezinio M5-EL-(e) rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y40}

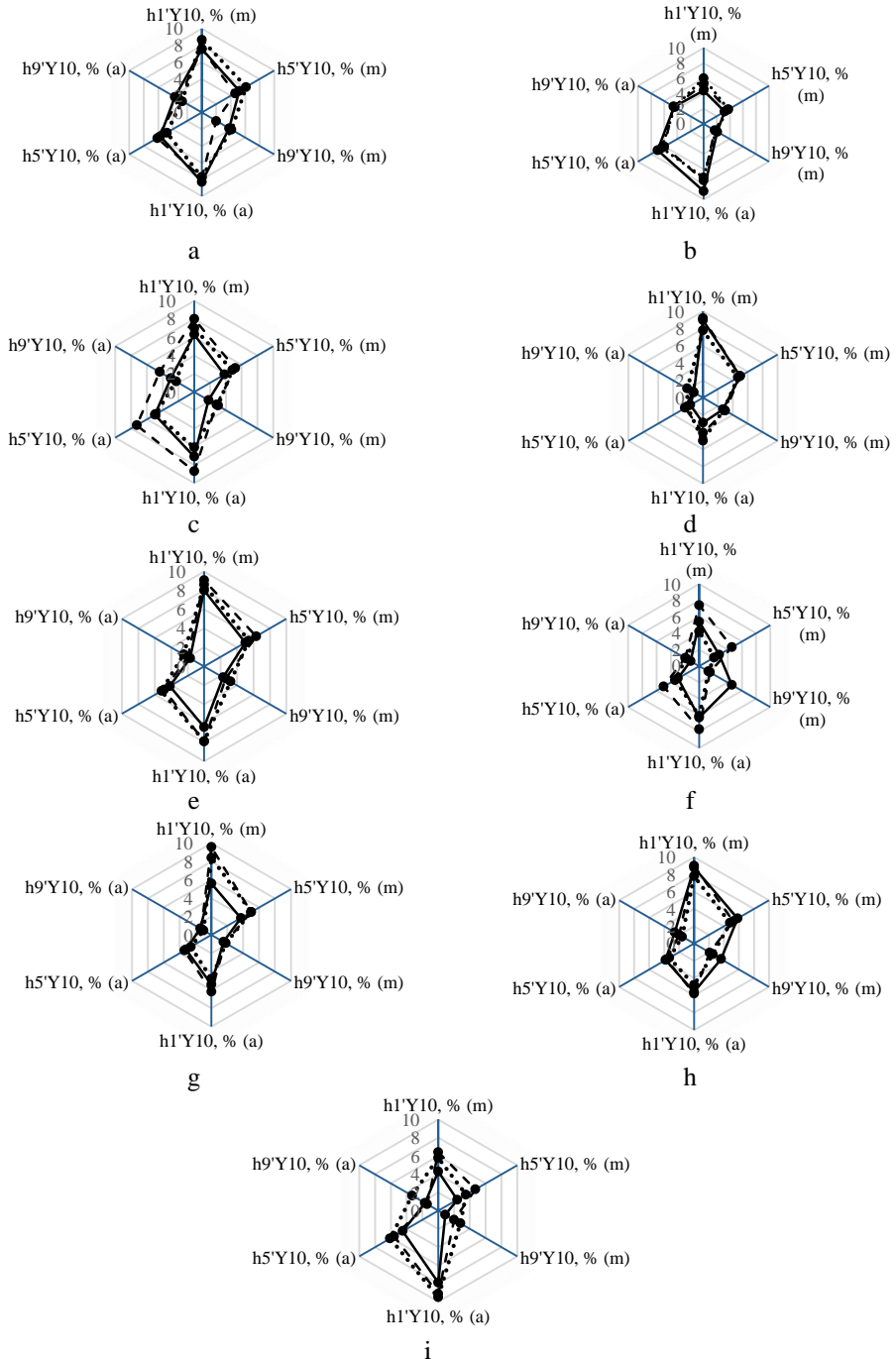


2.6 pav. Mezinio M6 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y40}



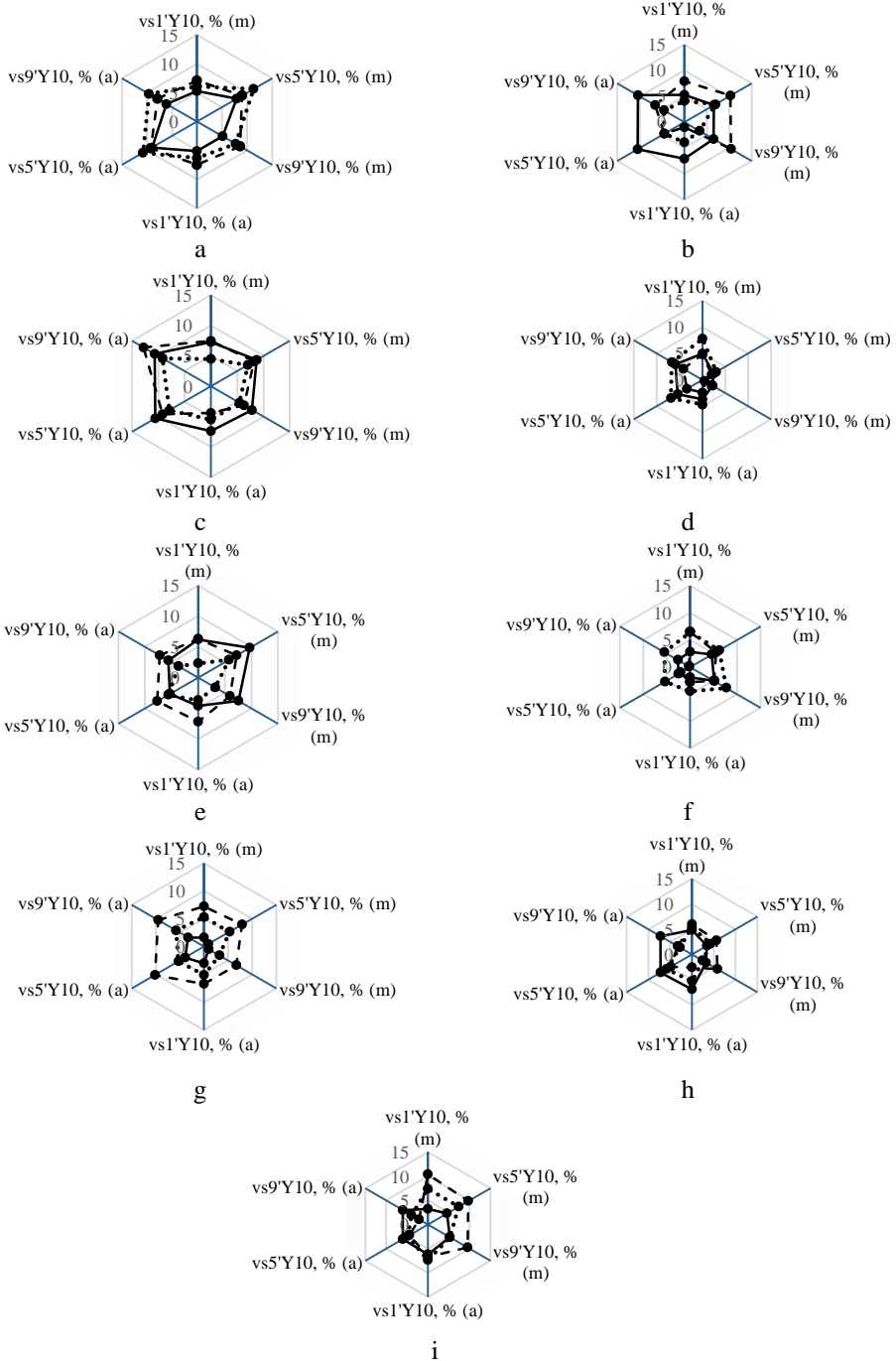
2.7 pav. Mezzinio M7 rodiklių kreivėmis apibrėžtas plotas S_{Y40}

3 PRIEDAS



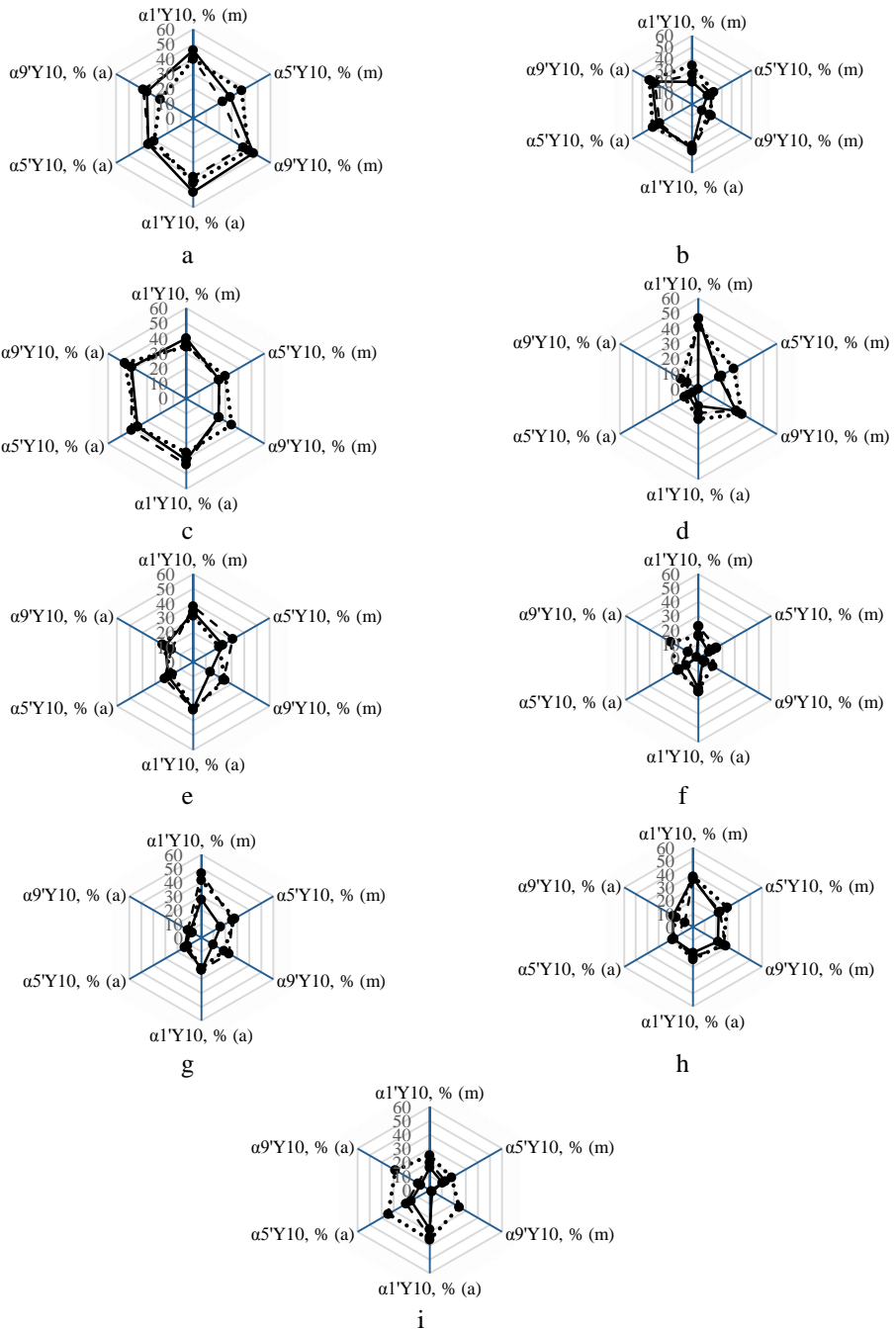
3.1 pav. Rodiklio $h_i^c Y_{10}$ vertės trijuose taškuose audinių A1 (a), A2 (b), A3 (c), A4-EL-a (d), A5 (e), A6-EL-ma (f), A7-EL-a (g), A8-EL-a (h) ir A9-EL-m(a) (i); — Be siulės; - - - Su siūle bandinio simetrijos ašyje; Su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose

4 PRIEDAS



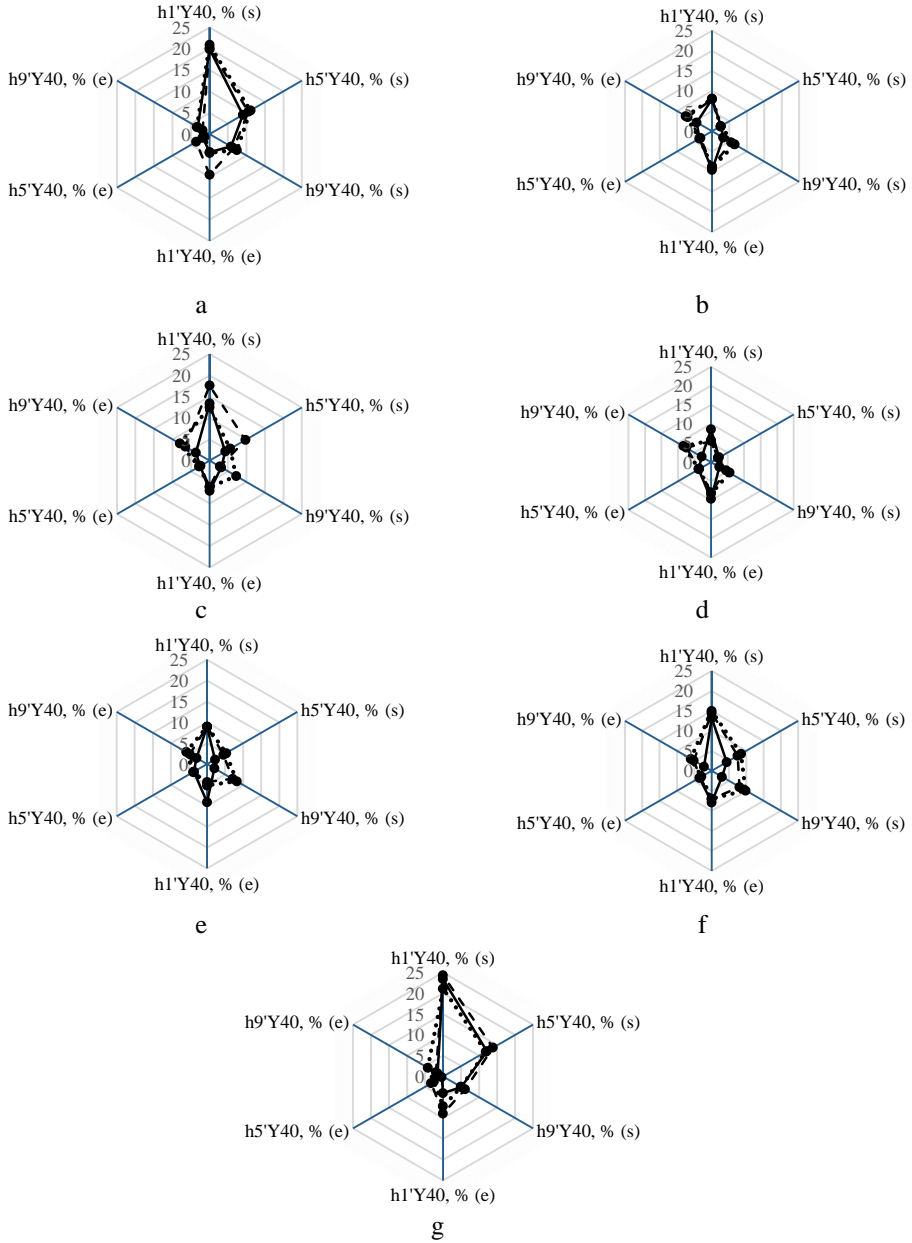
4.1 pav. Rodiklio vs_i^Y10 vertės trijuose taškuose audinių A1 (a), A2 (b), A3 (c), A4-EL-a (d), A5 (e), A6-EL-ma (f), A7-EL-a (g), A8-EL-a (h) ir A9-EL-m(a) (i); —●— Be siūlės; - - ● - - Su siūle bandinio simetrijos ašyje; ····●···· Su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose

5 PRIEDAS



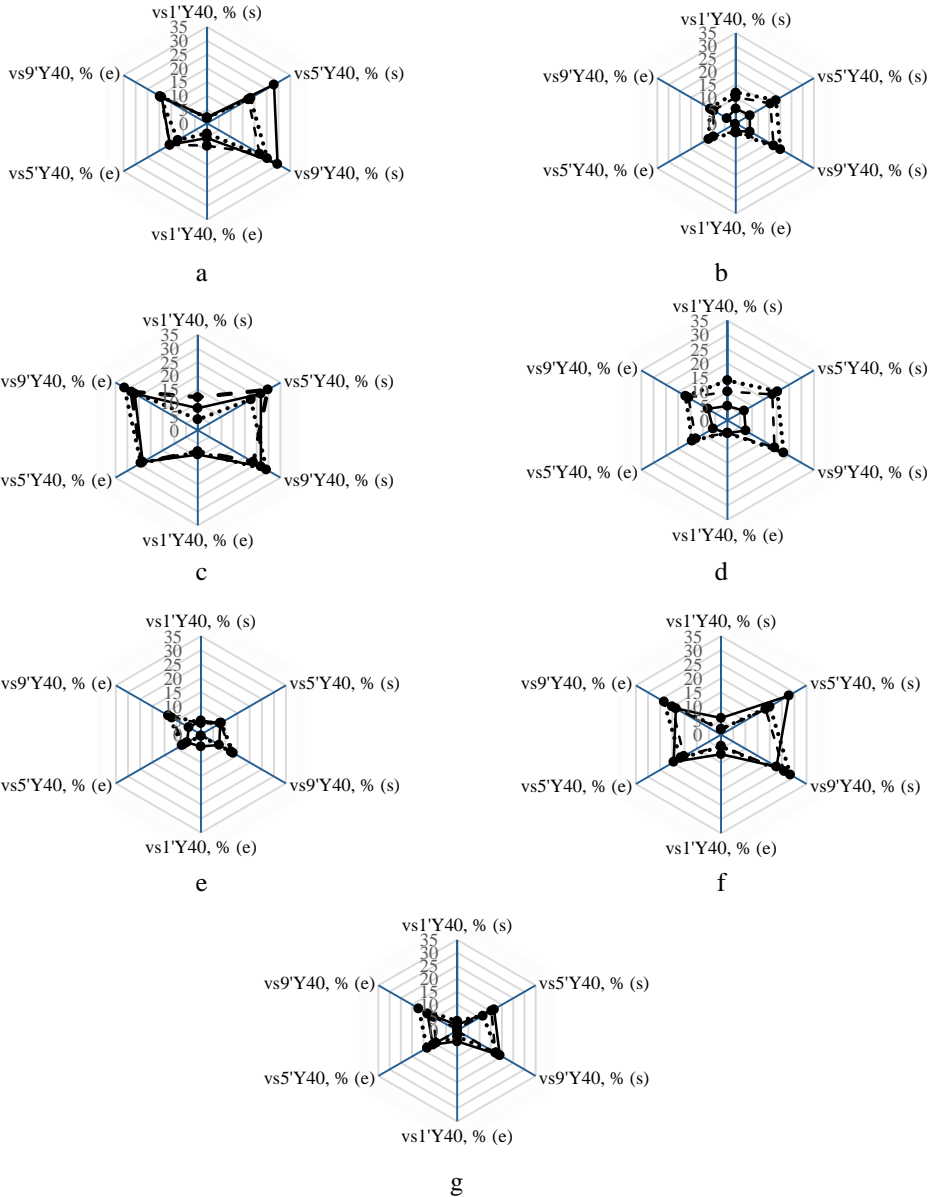
5.1 pav. Rodiklio $\alpha_i Y_{10}$ vertės trijuose taškuose audinių A1 (a), A2 (b), A3 (c), A4-EL-a (d), A5 (e), A6-EL-ma (f), A7-EL-a (g), A8-EL-a (h) ir A9-EL-m(a) (i); —●— Be siulės; - - - ● - - - Su siūle bandinio simetrijos ašyje; ...●... Su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose

6 PRIEDAS



6.1 pav. Rodiklio h_i^{Y40} vertės trijuose taškuose mezginių M1 (a), M2-EL-e (b), M3 (c), M4-EL-e (d), M5-EL-e (e), M6 (f), M7 (g)
 —●— Be siūlės; - - -●- - Su siūle bandinio simetrijos ašyje; ····●···· Su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose

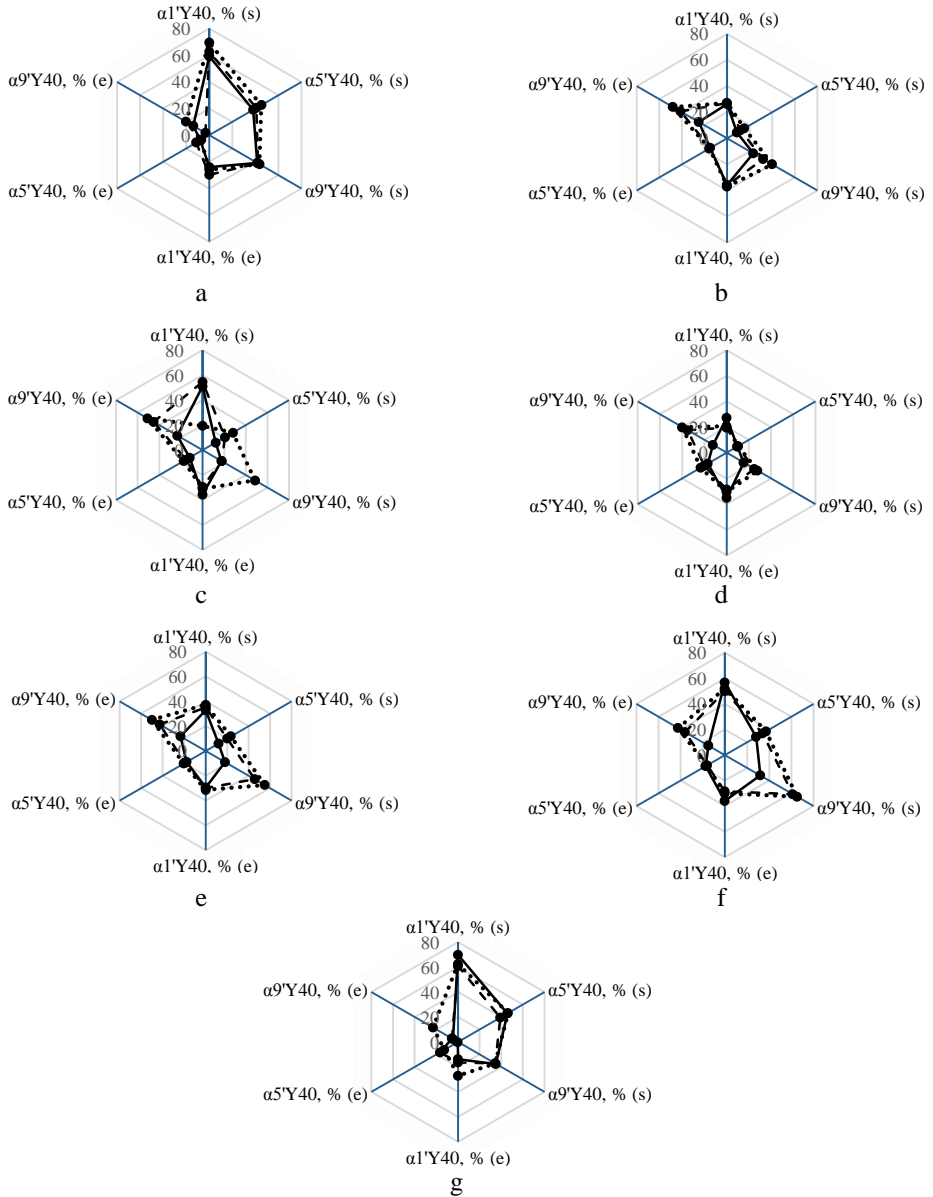
7 PRIEDAS



7.1 pav. Rodiklio vs_i^{Y40} vertės trijuose taškuose mezginių M1 (a), M2-EL-e (b), M3 (c), M4-EL-e (d), M5-EL-e (e), M6 (f), M7 (g)

—●— Be siūlės; -■- Su siūle bandinio simetrijos ašyje;♦..... Su siūle bandinio kirtiniuose kraštuose

8 PRIEDAS



8.1 pav. Rodiklio $\alpha_i^Y_{40}$ vertės trijuose taškuose mezginių M1 (a), M2-EL-e (b), M3 (c), M4-EL-e (d), M5-EL-e (e), M6 (f), M7 (g)

—●— Be siulės; - - -●- - - Su siūle bandinio simetrijos ašyje; ····●···· Su siūle bandinio kirptiniuose kraštuose

PADĖKA

Disertantė nuoširdžiai dėkoja Kauno technologijos universiteto profesoriui habil. dr. Rimantui Barauskui už naudingus patarimus ir konsultacijas, rengiant skaitinių metodų skyrių. Taip pat disertantė nuoširdžiai dėkoja lekt. Gintarui Keturakiui už pagalbą ir žinias, dirbant optiniais prietaisais.