

**RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE**  
Būvniecības fakultāte  
Būvniecības un rekonstrukcijas institūts

**Jānis ŠLISERIS**  
Doktora studiju programmas „Būvniecība” doktorants

**NETRADICIONĀLI KOKSNES  
KOMPOZĪTU KONSTRUKCIJU  
ELEMENTI UN TO APRĒĶINU  
METODIKAS**

**Būvzinātņu nozare, Būvkonstrukciju apakšnozare (promocijas  
padome „RTU P-06”)  
Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai**

Zinātniskais vadītājs  
Dr. habil. sc. ing., profesors  
**K.ROCĒNS**

**Rīga 2013**



**Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».**

## SATURS

Darba vispārējs raksturojums.....	5
1. Saplākšņa materiālu makro-struktūru modelēšana .....	14
1.1. Loksnes ar simetrisku un nesimetrisku struktūru pret vidusplakni un to aprēķini .....	14
1.1.1. Spriegumu-deformāciju aprēķini .....	16
1.1.2. Ģeometrisko nelinearitāšu ievērtēšana .....	20
1.2. Ribota saplākšņa aprēķini .....	23
1.2.1. Spriegumu un deformāciju aprēķina īpatnības.....	26
1.2.2. Siltuma un masas apmaiņas modelēšana .....	30
1.2.3. Koksnes nelineāro īpašību ievērtēšana .....	32
1.2.4. Konstruktijas topoloģijas optimizācija .....	34
1.3. Darba mērķis un uzdevumi .....	36
2. Saplākšņa lokšņu ar nesimetrisku struktūru mitruma-temperatūras izraisīto spriegumu- deformāciju analīze.....	38
2.1. Vienkāršots aprēķina modelis ģeometrisko un daļēju materiāla nelinearitāšu ievērtēšanai .....	38
2.2. Spriegumu pārdalīšanās un šļūdes efektu ievērtēšanas metodika.....	41
2.3. Loksnes iekšējās struktūras un mitruma ietekme uz deformācijām.....	42
2.3.1. Mitruma starpības ietekme.....	43
2.3.2. Šķērsslāņu un garenslāņu biezuma attiecības ietekme.....	45
2.3.3. Kopējā loksnes biezuma ietekme.....	47
2.4. Eksperimentālās pārbaudes un to rezultāti.....	48
2.4.1. Eksperimentu metodika.....	48
2.4.2. Nesimetriskas struktūras saplākšņa lokšņu liekšanās, samazinoties mitruma saturam .....	49
2.4.3. Sākotnēji izliekto lokšņu termiskā apstrāde nolūkā novērst atgriezeniskās deformācijas .....	52
2.4.4. Mitruma difūzijas ātruma novērtējums .....	55
2.4.5. Viļņotas formas saplākšņa lokšņu iegūšanas paņēmiens .....	57
2.5. Racionāla gaisa kondicionēšanas temperatūras un lokšņu termiskās apstrādes režīma noteikšana.....	62
3. Aprēķina metodika ribotas saplākšņa plātnes elementam ar plakanām ribām racionālu šķērsriezuma ģeometrisku parametru noteikšanai .....	65
3.1. Racionāla makrostruktūra .....	65
3.2. Optimizācijas metodoloģija .....	67
3.2.1. Ģenētiskā algoritma (GA) pielāgošana .....	68

3.2.2. Racionāls Mākslīgo Neironu Tīkls optimālu parametru prognozēšanai.....	70
3.2.3. Mākslīgo Neironu Tīkla trenēšana.....	73
3.3. Šķērsriezumu racionāls ģeometrisku parametru novērtējums .....	74
3.3.1. Neizdevīgākā slodžu kombinācija .....	75
3.3.2. Optimāli ģeometriskie parametri dažāda izmēra plātnēm .....	77
3.3.3. Trenēta Mākslīgā Neironu tīkla iespējas racionālu ģeometrisku parametru prognozēšanai .....	79
4. optimizācijas Metodika diskrēti un nepārtraukti mainīga stinguma plātņveida konstrukcijas elementiem ar paaugstinātu īpatnējo nestspēju .....	83
4.1. Metode lokāli ortotropu plātņu lieces un bīdes stingumu optimizācijai .....	83
4.2. Optimāls dalījums diskrētos apgabalos.....	86
4.3. Plātnes stinguma sadalījuma optimizācija pie tipiskākajiem sloģojuma un balstījuma veidiem .....	89
4.3.1. Brīvi balstīta plātne ar vienmērīgi izkliedētu slodzi .....	89
4.3.2. Trīslaidumu plātne ar koncentrētām slodzēm laidumu viduspunktos.....	93
4.3.3. Trīslaidumu plātne ar divām kustīgām slodzēm .....	95
4.3.4. Vienlaiduma plātne ar konsoli un vienmērīgi izkliedētu slodzi.....	97
4.4. Metodika ārējo lobskaidu orientācijas leņķa optimizācijai.....	100
5. Aprēķinu metodika plātņveida elementa racionāla, diskrēti mainīga ribojuma noteikšanai .....	107
5.1. Teorētiskās nestspējas noteikšanas metodika ribotai saplākšņa plātnei ar plakanas un izliektas formas ribojumu .....	108
5.2. Maksimālo piepūļu atkarība no ribojuma ģeometriskajiem parametriem .....	110
5.3. Mākslīgā Neironu Tīkla izveide un trenēšana .....	112
5.4. Racionāls diskrēti mainīgs ribojums.....	113
5.5. Spriegumu koncentrācijas .....	116
5.6. Ribojuma darbs lokāli mainīgā apkārtējās vides mitruma ietekmē .....	119
6. Racionāls ribojums trīslaidumu plātnei ar kustīgām slodzēm un trīsstūrveida trīslocīklu telpiskas arkas konstrukcijai .....	126
6.1. Ribojuma struktūru salīdzinājums .....	126
6.2. Trīslaidumu plātnes ar divām kustīgām slodzēm racionāls ribojums.....	128
6.3. Eksperimentālas pārbaudes .....	134
6.3.1. Saplākšņa plātnes ar vienmērīgu ribojumu eksperimentāla pārbaude .....	134
6.3.2. Ribotas saplākšņa plātnes ar diskrēti mainīgu ribojumu eksperimentāla pārbaude.....	137
6.3. Trīsstūrveida trīslocīklu telpiskas arkas racionāls ribojums .....	145
6.4. Konstrukcijas modeļa eksperimentāla pārbaude.....	149
Secinājumi.....	157
literatūra .....	159

## DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

### Tēmas aktualitāte

Viena no nozīmīgākajām mūsdienu problēmām ir neatjaunojamo dabas resursu aizstāšana ar atjaunojamiem. Izmantojot materiālus, kuru iegūšanā ir nepieciešami atjaunojamie enerģijas resursi, būtiski veicina ilgtspējīgu dabas resursu izmantošanu.

Lai varētu racionāli izmantot dabas resursus, konstrukcija un tajā izmantojamie materiāli ir jāprojektē vienlaicīgi. Ir nepieciešams pārzināt materiāla ar noteiktām īpašībām projektēšanas pamatprincipus un ierobežojumus. Konstrukcijas elements ar nesimetriskas vai simetriskas struktūras saplākšņa ribojumu attiecībā pret tā vidusplakni paver iespēju veidot materiālu ar vēlamām stiprības, stinguma, siltumvadītspējas un higroskopiskām īpašībām. Iteratīvi un mērķtiecīgi mainot materiāla īpašības un konstrukcijas ģeometriju, balstījumu, iespējams harmonizēt materiāla pretestības un konstrukcijas piepūļu laukus, tādējādi palielinot īpatnējo konstrukcijas nestspēju, samazinot siltumvadītspēju un mitruma izraisītās rukuma, uzbriešanas deformācijas.

Būvniecībā koka konstrukciju elementus visvairāk izmanto jumta konstrukcijās. Tās ir darbietilpīgas, jo nav industriālas, unificētas. Šo trūkumu var novērst, izstrādājot netradicionālu koksnes kompozīta konstrukcijas elementu. Mašīnbūvē bieži izmanto standarta saplākšņa loksnes, uz kurām iedarbojas specifiskas slodzes, radot nevienmērīgu konstrukcijas piepūļu lauku, kas nav harmonizēts ar materiāla pretestības lauku. Tādējādi rodas nepieciešamība izstrādāt netradicionālu kompozīta konstrukcijas elementu, kas atšķiras no tradicionāli lietotiem ar palielinātu īpatnējo nestspēju, mainīgu stingumu un tā aprēķina metodiku. Nepieciešams parādīt izstrādāto konstrukcijas elementu priekšrocības, izmantojot tos transportlīdzekļa slodzi nesošai daudzslaidumu plātnei ar divām kustīgām slodzēm un ēku jumtu trīsstūrveida trīslocīklu telpisku arku industriālām konstrukcijām.

## **Darba mērķis un uzdevumi**

Izstrādāt izgatavošanas paņēmiena pamatprincipus un aprēķinu pamatmetodikas netradicionāliem, paaugstinātas īpatnējās nestspējas koksnes kompozīta konstrukcijas elementiem ar plakanas un izliektas formas saplākšņa ribojumu, kā arī saplākšnim ar mainīgu ārējo lobskaidu orientāciju.

Mērķa sasniegšanai nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

1. Izstrādāt metodiku ribojumā izmantojamo liekto saplākšņa lokšņu, kam ir nesimetriska (nebalansēta) struktūra pret to vidusplakni, izgatavošanas un ekspluatācijas mitruma satura, termiskās apstrādes laika un temperatūras, kā arī struktūras projektēšanai, un veikt šīs metodikas konceptuālu, eksperimentālu validāciju.
2. Izstrādāt aprēķinu metodiku racionālu ģeometrisko parametru noteikšanai ribota saplākšņa konstrukcijas elementam ar vienā virzienā orientētām ribām un, pielietojot šo metodiku, trīslaidumu plātnei ar divām kustīgām slodzēm aprēķināt racionālu apšuvuma lokšņu un ribu biezumu, ribojuma orientāciju un intensitāti.
3. Izstrādāt konstruēšanas pamatprincipus un aprēķinu pamatmetodikas netradicionālam mainīga stinguma kompozītam konstrukcijas elementam ar izliektām un plakanām ribām, paaugstinātu īpatnējo nestspēju, samazinātām rukuma/uzbriešanas deformācijām un samazinātu siltumvadītspēju. Izstrādāt metodiku ārējo lobskaidu racionāla orientācijas leņķa noteikšanai paaugstinātas īpatnējās nestspējas saplākšņa loksnei ar mainīgu stingumu un, izmantojot izstrādāto metodiku, noteikt racionālu ārējo lobskaidu orientācijas leņķus vienlaiduma un trīslaidumu plātnēm pie vienmērīgi izkliedētas slodzes.
4. Noteikt lieces un bīdes stinguma atkarību no netradicionāli ribota saplākšņa kompozīta konstrukcijas elementa ribojuma struktūras, ģeometriskajiem parametriem, un, pielietojot šo informāciju, noteikt racionālu ribojumu diskrēti mainīga stinguma ribotai saplākšņa plātnei ar plakanas un izliektas formas ribām, kā arī novērtēt šīs konstrukcijas darbu pie mitruma izmaiņas lokālā plātnes apgabalā.
5. Parādīt izstrādātās aprēķinu metodikas izmantošanas iespējas trīslaidumu plātnei pie dažādām slodžu kombinācijām un trīsstūrveida trīslocīklu telpiskas arkas konstrukcijai, nosakot ribotas saplākšņa plātnes racionālu ribojumu, un veikt konceptuālus eksperimentus rezultātu validācijai.

### **Aizstāvēšanai izvirzīti/izvirzītas:**

1. Aprēķinu pamatmetodikas un to eksperimentāla validācija lobskaidu orientācijas leņķu, termiskās apstrādes temperatūras un laika noteikšanai nesimetriskas struktūras saplākšņa loksņēm, kuras veido ribojumu.
2. Aprēķina pamatmetodikas racionāla ribojuma un ārējo lobskaidu orientācijas leņķa noteikšanai saplākšņa kompozīta konstrukcijas elementam ar palielinātu īpatnējo nestspēju, izmantojot nesimetriskas vai/un simetriskas struktūras saplākšņa loksnes un, ja nepieciešams, ievērtējot putu pildījumu.
3. Konstruēšanas pamatprincipi trīsstūrveida trīslocīklu telpisku arku racionālam ēkas jumta tipveida konstrukcijas elementam un trīslaidumu plātņveida konstrukcijas elementam, un konceptuāla šo riboto elementu eksperimentāla skaitlisko rezultātu validācija.

### **Zinātniskā novitāte**

Izstrādāti pamatprincipi nesimetriskas struktūras saplākšņa lokšņu projektēšanai, nosakot racionālus lobskaidas orientācijas leņķus, kondicionēšanas režīmu, nesimetriskās struktūras lokšņu termiskās apstrādes temperatūru un laiku. Veikta eksperimentāla svarīgāko iegūto rezultātu validācija.

Pirmo reizi izstrādāta aprēķina metodika, kas rada iespēju projektēt ribotus saplākšņa plātņveida konstrukcijas elementus ar palielinātu īpatnējo nestspēju, samazinātām mitruma izraisītām rukuma/uzbriešanas deformācijām un siltumvadītspēju, un atsevišķos gadījumos diskrēti mainīgu iekšējo struktūru vai ārējo lobskaidu orientācijas leņķi, tā nodrošinot paaugstinātu īpatnējo nestspēju.

Veikta koksnes kompozīta konstrukcijas elementa modeļa eksperimentāla pārbaude liecē un parādītas pielietošanas iespējas izstrādātajai aprēķina metodikai, nosakot racionālu ribojumu trīslaidumu plātnei ar divām kustīgām slodzēm.

Veikta ēkas jumta kompozītā konstrukcijas elementa modeļa eksperimentāla pārbaude un parādītas pielietošanas iespējas izstrādātajai aprēķina metodikai, nosakot racionālu saplākšņa ribojumu ēku jumtu trīsstūrveida trīslocīklu telpisku arku tipveida kompozītam konstrukcijas elementam.

### **Praktiskais nozīmīgums**

Radīta iespēja atjaunojamā dabas resursa koksnes produktu- saplākšņa un citu materiālu efektīvākai izmantošanai plātņveida kompozītā konstrukcijas elementā,

harmonizējot materiāla pretestības lauku un konstrukcijas piepūļu laukus, kas paver iespēju projektēt paaugstinātas īpatnējās nestspējas konstrukcijas elementus ar samazinātām mitruma izraisītām rukuma, uzbriešanas deformācijām un samazinātu siltumvadītspēju.

Izstrādātais saplākšņa elementu ribojums ir ar lielāku telpisko stingumu, salīdzinot ar tradicionāli lietotiem ribojumiem, un lobskaidu specifiskā orientācija dod iespēju būtiski samazināt rukuma/uzbriešanas deformācijas, salīdzinot tās ar tradicionāliem saplākšņa lokšņu konstrukcijas elementiem.

### **Pētījuma ierobežojumi**

Izstrādātās mainīga stinguma plātnes ir racionālas tikai aprēķinā izmantojamajām slodžu kombinācijām un balstījuma veidam. Piedāvātā aprēķinu metodika ir spēkā gadījumos, kad maksimālie spriegumi nepārsniedz aprēķina pretestību vai pārvietojumus, kurus limitē otrais robežstāvoklis.

Aprēķini un eksperimenti veikti, izmantojot statiskas slodzes. Izstrādātajā metodikā koksne makrostruktūras līmenī tiek modelēta kā ortotrops materiāls. Mitruma difūzijas aprēķinos pieņemts, ka notiek tikai saistītā mitruma difūzija lokšnes transversiālajā virzienā. Ribota saplākšņa kompozītmateriāla aprēķinos pieņemts, ka ribojums ir pietiekami intensīvs, lai notiktu lokāls apšuvumu un ribojumu veidojošo lokšņu noturības zudums.

### **Pētīšanas metodika**

Nesimetriskās struktūras lokšņu aprēķini, kuri balstīti uz šajā darbā izstrādāto metodiku, tika veikti ar komerciālu galīgo elementu programmu *Ansys* un ar speciāli izstrādātu programmu *Matlab* vidē, kurā izmantotas slāņainu materiālu mehānikas nostādnes. Mitruma difūzija modelēta, izmantojot Fika likumu, ar galīgo diferencu metodi.

Darbā izstrādātajai aprēķina metodikai plātņveida konstrukcijām ar diskrēti mainīgu stingumu optimālu lieces un bīdes stingumu noteikšanai tika izveidota speciāla aprēķinu datorprogramma *Matlab* vidē, kuras pamatā ir galīgo elementu metode un mērķa funkcijas- minimāla padevīguma un spriegumu lauka atšķirības, maksimālā gradienta optimizēšanas algoritms. Ribojuma ģeometrisku parametru ietekmes noteikšanai uz plātnes nestspēju izstrādātajā metodikā izmantota komerciālā galīgo elementu programma *Ansys*, kurā parametriskā veidā izveidota programma.

Racionāla ribojuma noteikšanai tika izveidota programma *Matlab* vidē. Šī programma izmanto Ģenētiskā algoritma un Mākslīgā Neironu Tīkla iebūvētās funkcijas. Šajā programmā papildus iestrādātas speciālas procedūras, kas izmanto galīgo elementu programmas *Ansys* aprēķinu rezultātus.

Saplākšņa ar mainīgu stingumu ārējo lobskaidu orientācijas leņķa optimizācijai izstrādāta speciāla aprēķina programma, kas balstīta uz galīgo elementu metodi un konstrukciju topoloģijas optimizāciju.

Aprēķinu rezultāti tika validēti, pārbaudot samazināta izmēra konstrukcijas elementa modeļus- nesimetriskas struktūras saplākšņa lokšņu darbu pie mitruma iedarbes, ribota saplākšņa konstrukcijas elementa darbību liecē un divslīpu jumta konstrukcijas darbību pie vienmērīgi izklidētas slodzes.

### **Pētījuma teorētiskais un metodoloģiskais pamats**

Darbā izmantotas šādas inženierzinātņu sadaļas:

- Kompozītu materiālu mehānika;
- Būvmehānika;
- Koksnes zinātne;
- Būvkonstrukcijas;
- Siltuma un mitruma apmaiņas matemātiskā modelēšana;
- Konstrukciju un konstrukciju topoloģijas optimizācija.

### **Darba saturs un apjoms**

Promocijas darbs satur darba vispārējo raksturojumu, sešas nodaļas, secinājumus un izmantotās literatūras sarakstu. Darba apjoms – 165 lappuses, 142 attēli un literatūras saraksts ar 127 avotu.

### **Darbā iegūtie galvenie rezultāti publicēti šādās publikācijās:**

#### **a) Zinātniskos žurnālos:**

1. Sliseris J., Rocens K. Curvature Analysis for Composite with Orthogonal, Asymmetrical Multi-Layer Structure // Journal of Civil Engineering and Management. -2010. -Vol. 16. -No. 2. -pp 242-248. (žurnāls citēts datubāzēs: SCOPUS, EBSCO u.c.)

2. Šliseris J., Rocēns K. Optimization of multispan ribbed plywood plate macro-structure for multiple load cases // Journal of Civil Engineering and Management. - 2012. Pieņemta publicēšanai. (*žurnāls citēts datubāzēs: SCOPUS, EBSCO u.c.*)
3. Sliseris J., Rocens K. Optimal design of composite plate with discrete varying stiffness // Composite Structures. -2013, Vol. 98., -pp 15-23. (*žurnāls citēts datubāzēs: SCOPUS u.c.*)
4. Šliseris J., Rocens K. Rational Structure of Panel with Curved Plywood Ribs // World Academy of Science, Engineering and Technology, special journal Issue. – 2011. –Nr. 0076. –pp 317-323. (*žurnāls citēts datubāzēs: SCOPUS, EBSCO u.c.*).

**b) RTU zinātnisko rakstu krājumā:**

5. Sliseris J., Rocens K. Curvature analysis for asymetrical multi-layer composite // Construction Science. -Riga: RTU, 2009. -Nr. 10(2). -pp 139-146. (*žurnāls citēts datubāzēs: EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI*).
6. Šliseris J., Rocēns K. Non-Uniform Distribution of Moisture Influence on Shape of Plywood Sheet // Construction Science. -Riga: RTU, 2010. – Nr. 11. -pp 56-65. (*žurnāls citēts datubāzēs: EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI*).
7. Sliseris J., Rocens K. Experimental and numerical investigation of plywood panel with curved ribs// Construction Science. -Riga: RTU, 2012. Pieņemta publicēšanai. (*žurnāls citēts datubāzēs: EBSCO, CSA/ProQuest, VINITI*).

**c) Konferenču rakstu krājumos:**

8. Šliseris J., Rocēns K. Non-uniform moisture influence on multilayer corrugated plywood shell// 9th Nordic Symposium on Building Physics. Tampere, Finland, May 29- June 2, 2011. –Vol. 2. -pp 723-730.
9. Sliseris J., Rocens K. Behaviour of multilayer sheet with technological imperfection // 10th International conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques". -Vilnius: VGTU, 2010. -pp 793-798.
10. Šliseris J., Rocēns K. Influence of technological and structure properties on shape of asymmetric plywood sheet // International Scientific Conference "Civil engineering `11". Jelgava: LLU, May 12-13, 2011. –Vol. 3. -pp 131-136. (*rakstu krājums citēts datubāzēs: SCOPUS, EBSCO u.c.*).
11. Sliseris J., Rocens K. Flexural Plates With Heterogeneous In-Plane Stiffness // 15<sup>th</sup> European Conference On Composite Materials. Venice, Italy, 24-28 June 2012. - pp 1-7.

**d) Citas publikācijas:**

12. Šliseris J., Rocēns K. The Future Of Plywood Production. Furniture Design And Manufacturing Asia, Solid Wood & Panel Technology, November/December 2011. - pp 28-31
13. Šliseris J., Rocēns K. Koksnes materiālu un plastmasu spriegumu un deformāciju aprēķina pamati (Mācību metodiskie norādījumi). -Rīga:RTU, 2010. -74 lpp.

**e) Iesniegtās publikācijas zinātniskos žurnālos:**

14. Sliseris J., Rocens K. Discrete flexural stiffness optimization of orthotropic plate. Structural and Multidisciplinary Optimization (2012), iesniegta publicēšanai.
15. Sliseris J., Rocens K. Optimization of wood fiber orientation angle in outer layers of variable stiffness plywood plate. International Journal of Civil and Structural Engineering (2012), iesniegta publicēšanai.

**Promocijas darba rezultāti ziņoti šādās starptautiskās un vietējās zinātniskās konferencēs:**

1. Šliseris J., Rocēns K. Experimental and numerical investigation of plywood panel with curved ribs// Riga Technical University 53rd International Scientific Conference, Riga, Latvia, 11-12 October, 2012.
2. Šliseris J., Rocēns K. Plates And Shells With Discrete Varying Optimal Stiffness. Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, Politecnico di Torino, 18-20 June 2012.
3. Šliseris J., Rocēns K. Flexural Plates With Heterogeneous In-Plane Stiffness. 15<sup>th</sup> European Conference On Composite Materials, Venice, Italy, 24-28 June 2012.
4. Šliseris J., Rocēns K. Residual Stress In Moisture Sensitive Lamina. 17th International Conference- Mechanics Of Composite Materials, May 28-June 1, 2012, Riga, Latvia.
5. Šliseris J., Rocēns K. Rational topology of plywood composite macro-structure. OAS 2011, August 25-27, 2011 Tartu, Estonia
6. Šliseris J., Goremikins V., Rocēns K. Some rational structures and macrostructures of composites. Aleksandrs Malmeisters memorial symposium „Actual problems in the mechanics of heterogenous materials”, October 20-23, 2011, Riga, Latvia.

7. Šliseris J., Rocēns K. Rational structures of wood composite. RTU 52nd International scientific conference. 13 October, 2011, Riga.
8. Šliseris J., Rocēns K. Topology optimization of plywood composite. RTU 52nd International scientific conference. 13 October, 2011, Riga.
9. Šliseris J., Rocēns K. Racionālas koksnes kompozītmateriāla makro-struktūras. Apvienotais Pasaules latviešu zinātnieku III kongress un Letonikas IV kongress „Zinātne, sabiedrība un nacionālā identitāte” Rīgā, 2011. gada 24.-27. Oktobrī.
10. Šliseris J., Rocēns K. Non-uniform moisture influence on multilayer corrugated plywood shell. 9th Nordic Symposium on Building Physics. Tampere, Finland, May 29- June 2, 2011.
11. Šliseris J., Rocēns K. Influence Of Technological And Structure Properties On Shape Of Asymmetric Plywood Sheet. International Scientific Conference "Civil engineering `11", Jelgava, Latvia, May 12-13, 2011.
12. Šliseris J., Rocēns K. Rational Structure of Panel with Curved Plywood Ribs. ICBSE 2011 : "International Conference on Building Science and Engineering" Venice, Italy, April 27-29, 2011.
13. Šliseris J., Rocēns K. Mainīga mitruma ietekme uz koksnes plātņu formu. RTU 51. Starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, Latvija, 2010.gada 11.-15.oktobris.
14. Šliseris J., Rocēns K. Lokālu mitruma izmaiņu ietekme uz spriegumstāvokli izliektā koksnes plātnē. RTU 51. Starptautiskā zinātniskā konference. Rīga, Latvija, 2010.gada 11.-15.oktobris.
15. Šliseris J., Rocēns K. Curvature analysis for composite with orthogonal, asymmetrical multi-layer structure. International conference "Stability and Ductility of Structures". September 24-26, 2009, Vilnius Gediminas Technical University.
16. Šliseris J., Rocēns K. Curvature analysis for asymmetrical multi – layer composite. Rīgas Tehniskās universitātes 50. starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2009.gada 14.-16. oktobrī.
17. Šliseris J., Rocēns K. Lokālu mitruma izmaiņu ietekme uz spriegumstāvokli izliektā koksnes plātnē. 51. RTU Studentu zinātniskā un tehniskā konference, 2010, 11.-15. oktobris, Rīga.
18. Šliseris J., Rocēns K. Līmētu izliektu lokšņu formas prognozēšanas modelis. 50. RTU Studentu zinātniskā un tehniskā konference. 2009, 6.maijs, Rīga.

**Darba oriģinalitāti** apliecina Latvijas Republikas patents B32B3/12, Nr. P-12-52: Rocēns K., Šliseris J., Vērdiņš G. „Slāņains kompozīts ar šūnu tipa dobām ribām uz koksnes materiālu bāzes”.

Darba aktualitāti apliecina autora Hirša indekss 3.0.

# 1. SAPLĀKŠŅA MATERIĀLU MAKRO-STRUKTŪRU MODELĒŠANA

## 1.1. Loksnes ar simetrisku un nesimetrisku struktūru pret vidusplakni un to aprēķini

Saplāksni visbiežāk izgatavo no 1.4 līdz 1.7 mm biezām, lobītām bērza lobskaidām saskaņā ar SFS 2413 prasībām [42]. Ir šādas saplākšņa šķiras un to ieteicamais izmantošanas veids:

- B(I) Piemērots augstas kvalitātes caurspīdīgai vai puscaurspīdīgai apdarei, beicēšanai un lakošanai;
- S(II) labas kvalitātes saplāksnis, kas piemērots beicēšanai, lakošanai un pārklāšanai ar caurspīdīgiem apdares materiāliem;
- BB(II) apdarei ar iekšdarbu krāsu un pārklāšanai ar dažādiem caurspīdīgiem laminātu un filmu materiāliem, kā arī finierēšanai;
- WGE pārklāšanai ar necaurspīdīgu apdares materiālu (filmu, laminātu);
- WG(IV) izmantojams, kad virsējās kārtas lobskaidu izskats nav būtisks-saplākšņa kreisajai pusei, celtniecībai konstrukcijās un iepakojšanā.

Saplāksni visbiežāk pielieto šādiem darbiem: visāda veida celtniecības darbos, iekšējā un ārējā apdarē, transporta līdzekļu būvē, taras, sporta piederumu, mēbeļu, iepakojuma materiālu, rotaļlietu, gultas līstu ražošanā u.tml.

Būvniecībā izmantojamo saplāksni visbiežāk līmē ar fenola formaldehīda sveķu līmi. Līmējuma stiprības rādītāji atbilst: NE 314/3 klasei, BS 1203/H4 klasei, DIN 68705 daļa 3/ tips BFU 100. Saplākšņa līmēšanā var izmantot karbamīda formaldehīda sveķu līmi vai mitrumizturīgu, modificētu melamīna karbamīda formaldehīda sveķu līmi.

Saplākšņa lokšņu standarta izmēri ir šādi:

- 1220 x 2440/3050 mm
- 1250 x 2500/3000 mm
- 1500 x 2500/3000 mm
- 1525 x 2400/3050/3660 mm

- 2150 x 3050/3340/3850 mm
- 2500 x 1250 mm.

Standarta biezumi ir šādi: 4, 6.5, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 35, 40, 45, 50 mm. Eksistē arī tehnoloģijas, ar kurām var izgatavot biezākas saplākšņa loksnes. Izmēru un taisnā leņķa pielaides atbilst NE 315 prasībām.



1.1. att. Saplākšnis ar simetrisku struktūru pret vidusplakni-balansēts.

Saplākšņa loksnes tiek pilnvērtīgāk izmantota koksne, jo lobīšanas procesā nerodas skaidas, turklāt materiāla īpašību izkliedes ir mazākas, nekā tas ir dabīgai koksnei.

Loksnes ar simetrisku, jeb balansētu struktūru tiek veidotas, izmantojot šādu lobskaidu orientāciju  $[0/90...90/0]$ . Nesimetriskas struktūras loksnes iegūst, ja pret vidusplakni nav: simetriska lobskaidu orientācija, simetriski lobskaidu biezumi, simetriskas lobskaidu mehāniskās īpašības, mitruma saturs [15, 125].

Nesimetriskas struktūras saplākšņa lokšņu deformēšanās prognozēšana ir sarežģītāka, nekā simetriskām loksnes. Piemēram, pie aksiālas stiepes loksne var savērties, vai arī tai var būt negatīvs Puasona koeficients [51, 91, 92]. Taču tās paver iespēju iegūt liektas formas čaulas, izmantojot standarta preses ar plakaniem plauktiem. Izliekti ieliektās vai cilindriskās čaulas var izmantot kā plātņu ribojumu vai nosedzošās konstrukcijas liellaidumu pārsegumiem [88], kā arī mēbeļu rūpniecībā [107].

### 1.1.1. Spriegumu-deformāciju aprēķini

Plānu saplākšņa lokšņu (loksnes biezuma un īsākas malas attiecība ir 1/20 vai mazāka) aprēķinos, lietojot klasisko teoriju, izmantoti šādi pieņēmumi [89, 24]:

- Lieces procesā normāle nedeformējas, bet tikai pagriežas, paliekot perpendikulāra sijas vai plātnes vidusplaknei;
- Transversiālās deformācijas- perpendikulāras loksnes plaknei un bīdes deformācijas pa loksnes biezumu netiek ņemtas vērā;
- Aprēķinos plātne tiek sadalīta vairākos slāņos un viena slāņa robežās pieņemts, ka spriegumi, deformācijas mainās lineāri.

Šādi pieņēmumi tiek saukti par Kirhofa hipotēzēm.

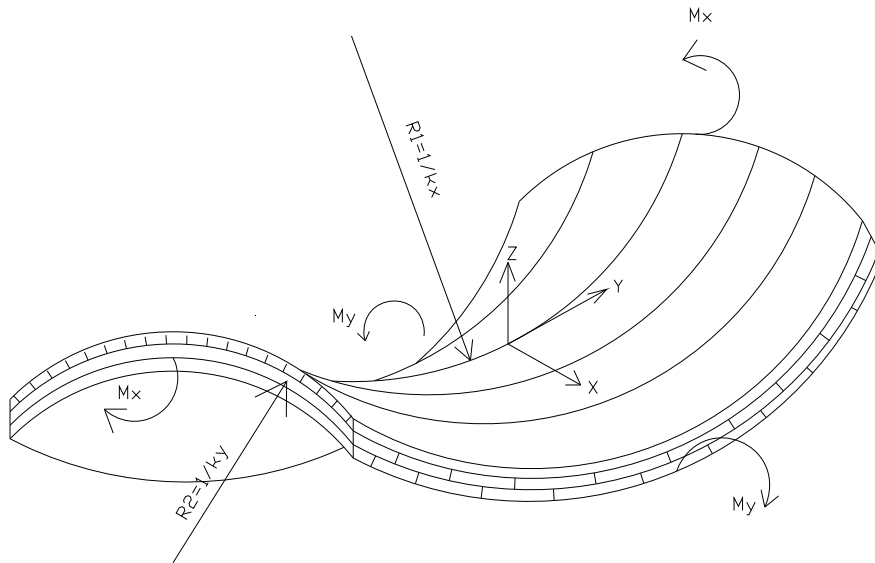
Izmantojot iepriekš minētos pieņēmumus, loksnes relatīvās deformācijas nosaka šādi :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_X \\ \varepsilon_Y \\ \gamma_{XY} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_X^0 \\ \varepsilon_Y^0 \\ \gamma_{XY}^0 \end{pmatrix} + z \begin{pmatrix} k_X \\ k_Y \\ k_{XY} \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

kur  $\varepsilon_X^0, \varepsilon_Y^0, \gamma_{XY}^0$  – loksnes vidusplaknes relatīvās deformācijas,  $k_x, k_y, k_{xy}$  – loksnes vidusplaknes liekumu un vērsuma vērtības, kuras nosaka kā otrās kārtas atvasinājumus vidusplaknes izlieces funkcijai  $w_0(x, y)$ :

$$\begin{pmatrix} k_X \\ k_Y \\ k_{XY} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y \partial x} \end{pmatrix}. \quad (1.2)$$

Liekumu ģeometrisko interpretāciju skatīt 1.2. att.

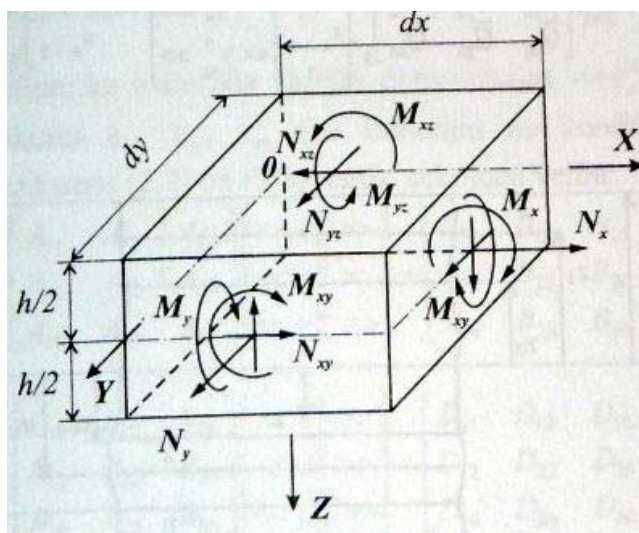


1.2. att. Liekumu ģeometriskā interpretācija un to izraisošie lieces momenti.

Aprēķinos ērti izmantot spriegumu laukam ekvivalento spēku sistēmu, kas darbojas uz vienu vienību platu loksnes zonu [75]. Spēku sistēma tiek aprēķināta kā attiecīgo spriegumu summa pa loksnes biezumu

$$\begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{pmatrix} dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_Y \\ \tau_{XY} \end{pmatrix}_k dz, \quad (1.3)$$

kur  $N_X, N_Y, N_{XY}$  – iekšējo spēku sistēma,  $h$ - kopējais loksnes biezums,  $n$ - kopējais slāņu skaits,  $\sigma_X, \sigma_Y, \tau_{XY}$  – spriegumu komponentes,  $z_k, z_{k-1}$  – k-tā slāņa augšējā un apakšējā koordināte, pa loksnes biezumu.



1.3. att. Uz slāņaina materiāla elementāra paralelopipeda darbojošos spēku un momentu shēma [89].

Izmantojot Huka likumu un iepriekš iegūto deformāciju vektoru (1.1), ekvivalento spēku sistēmu izsaka šādi:

$$\begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} \\ \bar{Q}_{31} & \bar{Q}_{32} & \bar{Q}_{33} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} z dz \right\}, \quad (1.4)$$

kur  $\bar{Q}_{ij}$  – stinguma matricas koeficienti koordinātu sistēmā X-Y.

Lai ievērotu spriegumstāvokļa neviendabīgumu, vidusplaknei ir jāpieliek ekvivalenti lieces momenti, kurus iegūst integrējot pa biezumu spriegumu reizinājumu ar to attālumu līdz loksnes vidusplaknei z:

$$\begin{pmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{pmatrix} = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_X \\ \tau_{XY} \end{pmatrix} z dz = \sum_{k=1}^n \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \sigma_X \\ \sigma_X \\ \tau_{XY} \end{pmatrix}_k z dz, \quad (1.5)$$

kur  $M_x, M_y, M_{xy}$  ir momenti attiecināti uz vidusplaknes vienu vienību platu zonu.

Izmantojot Huka likumu, lieces momentus aprēķina šādi:

$$\begin{pmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{pmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} \\ \bar{Q}_{31} & \bar{Q}_{32} & \bar{Q}_{33} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix} z^2 dz \right\}. \quad (1.6)$$

Veicot integrēšanu viena slāņa robežās un aprēķinot summu pa visiem slāņiem, iegūst šādu sakarību:

$$\begin{pmatrix} N_X \\ N_Y \\ N_{XY} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}. \quad (1.7)$$

Sarēķinot integrāļus izteiksmē (1.6) un sareizinot matricas iegūst šādu izteiksmi momentu aprēķināšanai

$$\begin{pmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{pmatrix}. \quad (1.8)$$

Matricu  $A$ ,  $B$ ,  $C$  koeficientus sarēķina pēc šādām formulām

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \sum_{k=1}^n \left( \bar{Q}_{ij} \right)_k (z_k - z_{k-1}) \\ B_{ij} &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \left( \bar{Q}_{ij} \right)_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \\ D_{ij} &= \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n \left( \bar{Q}_{ij} \right)_k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Apvienojot iegūtos vienādojumus (1.7), (1.8) iegūst vienādojumu sistēmu

$$\begin{pmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{k\} \end{pmatrix}. \quad (1.10)$$

Izsakot deformācijas, iegūst

$$\begin{pmatrix} \{\varepsilon^0\} \\ \{k\} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [B] & [D] \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \{N\} \\ \{M\} \end{pmatrix}, \quad (1.11)$$

kur matricu  $A$  sauc par aksiālā stinguma matricu,  $B$  par savstarpējās mijiedarbības matricu un  $D$  par lieces stinguma matricu.

Loksnēm ar balansētu struktūru matricas  $B$  visi koeficienti ir nulles. Nosakot deformācijas nesimetriskas struktūras loksnēm, spēku un momentu vektorus nosaka, izmantojot mitruma un temperatūras izmaiņas izraisītos papildus spriegumus [14, 83].

### ***1.1.2. Ģeometriskā nelinearitāšu ievērtēšana***

Tā kā nesimetriskas struktūras saplākšņu loksnes saliecas mainoties mitruma saturam, to pārvietojumi un deformācijas var būt ievērojami lielas. Tāpēc to akurātai matemātiskai modelēšanai ir nepieciešams ievērtēt ģeometriskās nelinearitātes. Izšķir divu veidu ģeometriskās nelinearitātes. Pirmā veida nelinearitātes rodas no lielām deformācijām, bet otrā veida - no lieliem pārvietojumiem, pagrieziena leņķiem. Gadījumā, ja aprēķinu gaitā mainās robežnosacījumi, tad šādus uzdevumus sauc par kontakta tipa uzdevumiem.

Ģeometriski nelineāros aprēķinos nepieciešams izšķirt atšķirību starp deformēto un nedeformēto stāvokli. Tāpēc spriegumus, deformācijas nepieciešams noteikt punktos, kuri seko deformētajam stāvoklim - šādu pieeju sauc par Lagranža formulējumu, kuru arī visbiežāk izmanto deformējamu ķermeņu mehānikā. Dažkārt lieto arī Eilera formulējumu, kurā tiek aplūkoti materiāla punktu pārvietojumi noteiktos stacionāros punktos, kuri neseko deformētajam stāvoklim (šo pieeju parasti izmanto hidrodinamikā).

Tā kā vispārīgākajā gadījumā var būt gan ģeometriskās, gan materiāla nelinearitātes, tad analītisks atrisinājums šīm problēmām visbiežāk nav iegūstams. Tāpēc šādus uzdevumus risina iteratīvi, soli pa solim, diskretizējot laiku un/vai pielikto slodzi mazos soļos. Katrā nākamajā solī tiek izmantoti iepriekšējā solī iegūtie rezultāti. Katrā solī tiek linearizētas nelineārās sakarības, izmantojot izvīzījumu Teilora rindā.

Tabula 1.1.

## Nelineāro aprēķinu klasifikācija [8]

Nelinearitātes veids	Aprēķina īpatnības	Biežāk lietotā aprēķinu metodika	Spriegumu un deformāciju mēri*
Materiāla nelinearitāte	Ļoti mazi pārvietojumi, deformācijas; spriegumu- deformāciju sakarība ir nelineāra.	Materiālu nelinearitāte tikai	Inžnierspriegumi ( <i>engineering stress</i> ) un inženierdeformācijas <sup>1</sup> ( <i>engineering strains</i> )
Lieli pārvietojumi, pagriezieni, mazas deformācijas	Šķiedru pārvietojumi un rotācijas leņķi ir lieli, bet šķiedru deformācijas un pagrieziena leņķis starp šķiedrām ir mazi; spriegumu-deformāciju sakarība var būt lineāra vai nelineāra	Pilnā Lagranža metode ( <i>Total Lagrangian</i> )	Otrais Piola-Kirhofa spriegumu mērs ; Grīna- Lagranža deformācijas <sup>2</sup>
		Uzlabotā Lagranža metode ( <i>Updated Lagrangian</i> )	Kauči spriegumu ( <i>Cauchy stress</i> ) mērs un Almansi deformāciju mērs <sup>3</sup> ( <i>Almansi strain</i> )
Lieli pārvietojumi, pagrieziena leņķi un lielas deformācijas	Šķiedru pārvietojumi un rotācijas leņķi ir lieli, kā arī šķiedru deformācijas un pagrieziena leņķis starp šķiedrām ir lieli; spriegumu-deformāciju sakarība var būt lineāra vai nelineāra	Pilnā Lagranža metode ( <i>Total Lagrangian</i> )	Otrais Piola-Kirhofa spriegumu mērs; Grīna- Lagranža deformācijas
		Uzlabotā Lagranža metode ( <i>Updated Lagrangian</i> )	Kauči spriegumu ( <i>Cauchy stress</i> ) mērs un logaritmiskās deformācijas <sup>4</sup> ( <i>Logarithmic strain</i> )

\* <sup>1</sup> - inženierdeformācijas tiek definētas, kā attiecība starp deformāciju izmaiņu un sākotnējo garumu. <sup>2</sup>-šis deformāciju mērs definēts ar attiecību  $\frac{1}{2} \frac{(l^2 - L^2)}{L^2}$ , kur  $l$ - garums pēc deformēšanās,  $L$ - sākotnējais garums, <sup>3</sup>- šis deformāciju mērs definēts šādi  $\frac{1}{2} \frac{(l^2 - L^2)}{l^2}$ , <sup>4</sup>- šis ir saukts arī par patiesajām deformācijām vai logaritmiskajām, jo visprecīzāk atspoguļo fizikālo procesu un tās definē šādi:  $\epsilon = \int_L^l \frac{\delta l}{l} dl = \ln\left(\frac{l}{L}\right)$ .

Kā redzams tabulā 1.1., ģeometriski nelineāros uzdevumos lieto divas pieejas- pilno Lagranža un uzlaboto Lagranža metodi.

Pilnajā Lagranža formulējumā visi statikas un kinemātikas lielumi (spriegumi, deformācijas, pārvietojumi) tiek aprakstīti sākotnējam- nedeformētam ķermenim, bet uzlabotajā Lagranža formulējumā tie tiek aprakstīti deformētam

ķermenim. Praksē biežāk izmanto uzlaboto Lagranža formulējumu, jo spriegumi un deformācijas tiek rakstīti deformētajam stāvoklim, līdz ar to tiem ir dziļāka fizikāla jēga.

Tabula 1.2.

Uzlabotās Lagranža metodes galvenie principi [8]

<p>Kustības vienādojums (statikas gadījumā – kopējās potenciālās enerģijas minimuma princips)</p>	$\int_{t_V} {}^{t+\Delta t} S_{ij} \delta_t^{t+\Delta t} \epsilon_{ij} d^t V = {}^{t+\Delta t} \mathfrak{R}, \quad (1.12)$ <p>kur apakšējais indekss pirms attiecīgā lieluma norāda laiku sākuma momentā, bet otrais laiku beigu momentā, kurā nepieciešams aprēķināt attiecīgo lielumu;</p> $\delta_t^{t+\Delta t} \epsilon_{ij} = \delta \frac{1}{2} ({}_t u_{i,j} + {}_{t+\Delta t} u_{i,j} + {}_t u_{k,i} {}_{t+\Delta t} u_{k,j}), \quad (1.13)$ <p><math>u_{i,j}</math> – atvasinājums pārvietojumam pa <math>i</math>-to asi pēc <math>j</math>-tā argumenta;</p> $\delta_t^{t+\Delta t} S_{ij} = \frac{{}_t \rho}{{}_{t+\Delta t} \rho} {}_t \chi_{i,m} {}^{t+\Delta t} \tau_{mn} {}_{t+\Delta t} \chi_{j,n}, \quad (1.14)$ <p><math>{}^t V</math> – ķermeņa tilums laika momentā <math>t</math>; <math>{}^{t+\Delta t} S_{ij}</math> – otrais Piola-Kirhofa spriegumu mērs iterāciju solī, kurā laiks mainās no <math>t</math> līdz <math>t+\Delta t</math>, pastāv sakarība <math>{}^t S_{ij} = {}^t \tau_{ij}</math>, kur <math>{}^t \tau_{ij}</math> – Kauči sprieguma mērs laika brīdī <math>t</math>; <math>\delta_t^{t+\Delta t} \epsilon_{ij}</math> – variācija no deformāciju mēra laika brīdī <math>t</math>; <math>{}^{t+\Delta t} \mathfrak{R}</math> – ārējo spēku veiktais darbs; <math>{}_{t+\Delta t} \chi_{j,n}</math> – deformācijas gradients- <math>j</math>-tās koordinātes atvasinājums pēc <math>n</math>-tā argumenta; <math>e_{ij}</math> – inženierdeformācijas; <math>\delta</math> – variācijas simbols.</p>
<p>Sprieguma un deformāciju aprēķins</p>	${}^{t+\Delta t} S_{ij} = {}^t \tau_{ij} + {}_t S_{ij}, \quad (1.15)$ ${}^{t+\Delta t} \epsilon_{ij} = {}_t e_{ij} + {}_t \eta_{ij}, \quad (1.16)$ ${}_t \eta_{ij} = \frac{1}{2} u_{k,i} u_{k,j}, \quad (1.17)$
<p>Kustības vienādojums izmantojot iepriekšējā solī iegūtos rezultātus</p>	$\int_{t_V} {}_t S_{ij} \delta_t \epsilon_{ij} d^t V + \int_{t_V} {}_t \tau_{ij} \delta_t \eta_{ij} d^t V = {}^{t+\Delta t} \mathfrak{R} - \int_{t_V} {}_t \tau_{ij} \delta_t e_{ij} d^t V \quad (1.18)$
<p>Linearizēts kustības vienādojums</p>	$\int_{t_V} {}_t C_{ijrs} {}_t e_{rs} \delta_t e_{ij} d^t V + \int_{t_V} {}_t \tau_{ij} \delta_t \eta_{ij} d^t V = {}^{t+\Delta t} \mathfrak{R} - \int_{t_V} {}_t \tau_{ij} \delta_t e_{ij} d^t V, \quad (1.19)$ <p>kur izmantota aproksimācija <math>{}^t S_{ij} = {}_t C_{ijrs} {}_t e_{rs}</math> un <math>\delta_t \epsilon_{ij} = \delta_t e_{ij}</math>, kur <math>{}_t C_{ijrs}</math> – stinguma tenzors laika brīdī <math>t</math>.</p>

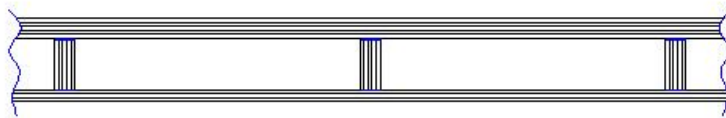
Plātņu, čaulu gadījumā sakarība starp galvenajām deformācijām un pārvietojumiem ir šāda:

$$e = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_1^0}{\partial x_1} - x_3 \frac{\partial^2 u_3^0}{\partial x_1^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_3^0}{\partial x_1} \right)^2 \\ \frac{\partial u_2^0}{\partial x_2} - x_3 \frac{\partial^2 u_3^0}{\partial x_2^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_3^0}{\partial x_2} \right)^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_1^0}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2^0}{\partial x_1} \right) - x_3 \frac{\partial^2 u_3^0}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{1}{2} \frac{\partial u_3^0}{\partial x_1} \cdot \frac{\partial u_3^0}{\partial x_2} \end{bmatrix}. \quad (1.20)$$

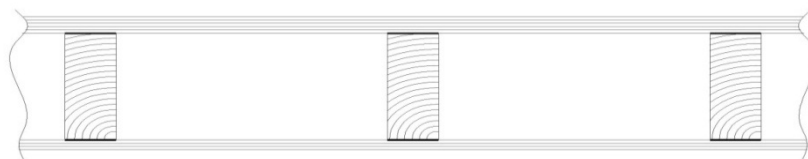
Kā redzams, ģeometrisko nelinearitāšu ievērtēšana ir sarežģīta procedūra un prasa papildus skaitļošanas resursus [91, 70, 13], tāpēc būtu lietderīgi izstrādāt vienkāršāku, daļēji analītisku veidu, kā tās ievērtēt nesimetriskas struktūras slāņainām plātnēm tipiskākajiem gadījumiem.

## 1.2. Ribota saplākšņa aprēķini

Ribotas saplākšņa struktūras visbiežāk veido, izmantojot saplākšņa ribas (1.4. att., 1.6. att.), dabīga koka ribas (1.5. att., 1.11. att. a., b., c.), kombinētas ribas (1.11. att. d., e., f., h., i.) vai alumīnija ribas (1.11. att. g., 1.7. att.). Gadījumos, kad nav nepieciešama augsta nestspēja, veido kompozītus no saplākšņa apšuvumiem un putu slāņa pildījuma (1.9. att., 1.8. att.). Šādas konstrukcijas visbiežāk var kalpot kā pašnesošas. Veikti plaši pētījumi par bišu šūnu vidējo slāni no dažādiem materiāliem, noteikta optimāla forma, kas palielina noturību [71]. Optimālu koksnes materiālu plātņu ar plastikātu ribojumu aprēķināšanas metodika tramvaja grīdu konstrukcijām izklāstīta darbā [49].



1.4. att. Ribots saplākšnis ar vertikālām saplākšņa ribām [122].

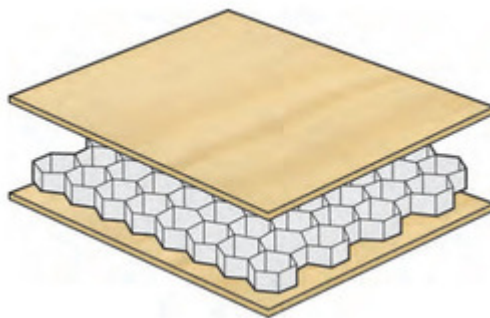


1.5. att. Ribots saplākšnis ar dabīga koka ribām [29].



1.6. att. Ribots saplāksnis ar viļņota saplākšņa vidusslāni (*corrugated core*) [73, 58].

Ribojumu var veidot arī no citiem materiāliem, piemēram, plastiskiem.



1.7. att. Saplākšņa panelis ar alumīnija bišu šūnu serdi [85].



1.8. att. Saplāksnis ar viskozu vidējo slāni [86].



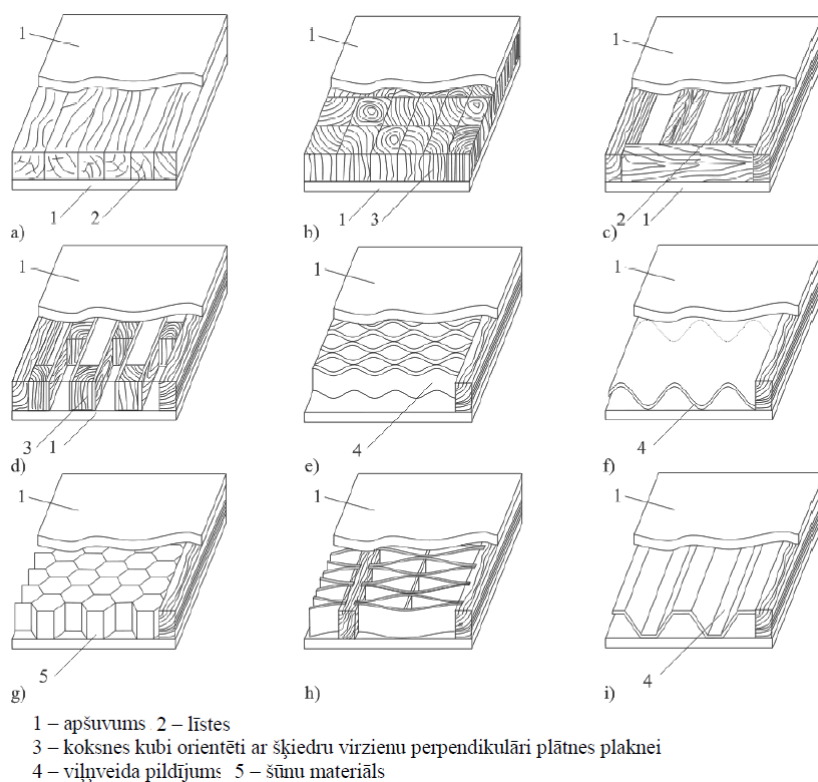
1.9. att. Saplākšņa- stikla šķiedru kompozīts ar putu materiālu pildījumu vidējā slānī [31].



1.10. att. Trīskārtīgs koksnes materiāls ar *Dendrolight* vidējo kārtu un saplākšņa vai citu materiālu apšuvumu [25].

Raksturīga īpašība kompozītiem ar putu pildījumu ir lielas bīdes deformācijas putu slānī, kā arī šķūdes deformācijas. To iespējams novērst papildus putu slānī, ievietojot ribas.

Atvieglinātas (ar samazinātu blīvumu) plātnes viedo, izfrēzējot kokā grapes, tādējādi iegūstot *Dendrolight* vidējo slāni (skat. 1.10. att.), kas ir ar samazinātu siltuma vadītspēju un rukuma/uzbriešanas deformācijām, taču to izgatavošanā vairāk kā 40% no lietderīgās koksnes tiek sazāģēta skaidās, kas nav lietderīgi.



1.11. att. Apkopojums par dažādu plātņveida koksnes materiālu veidiem [122].

Liektus saplākšņa ribojuma elementus visbiežāk izgatavo, karsti līmējot presēs ar liektiem plauktiem. Šīs tehnoloģijas negatīvā iezīme ir tāda, ka katram specifiskam gadījumam jāizgatavo specifiskas formas preses plaukti. Veidojot ribas no nesimetriskas struktūras saplākšņa, iespējams izmantot preses ar plakanas formas plauktiem un saliekt saplākšni, izmantojot koksnes izgatavošanas mitruma satura un ekspluatācijas apstākļu koksnes mitruma satura starpību, kā arī specifiski orientēto lobskaidu struktūru [108, 92, 91].

### 1.2.1. Spriegumu un deformāciju aprēķina īpatnības

Spriegumus un deformācijas ribotai saplākšņa plātnei var rēķināt, homogenizējot vidējo riboto slāni [16, 20, 68], t.i. piešķirot tam attiecīgas deformatīvās īpašības un aprēķinā izmantojot slāņainu materiālu teoriju. Aprēķinu pamatā ir sendviču konstrukcijās lietotās teorijas [2, 45, 67, 47]. Ja nepieciešams augstākas precizitātes aprēķins, tad ribotā struktūra ir jārēķina kā konstrukcija, izmantojot slāņainu čaulu teoriju [116, 117]. Šajā nodaļā aprakstīta modelēšana, homogenizējot vidējo slāni.

Ribotām struktūrām plātnes biezuma un malas garuma attiecība visbiežāk ir mazāka par 1/20, tāpēc nepieciešams veikt aprēķinus, ievērtējot šķērsdeformāciju teoriju [121, 75]. Šī teorija var dot neprecīzus rezultātus plānu lokšņu aprēķinos *shear locking* efekta (aprēķins uzrāda, ka plātne ir stingāka nekā tā patiesībā ir) dēļ.

Visbiežāk tiek lietota pirmās kārtas šķērsdeformāciju teorija:

$$u_1(x, y, z) = u(x, y) + z\phi_1(x, y), \quad (1.21)$$

$$u_2(x, y, z) = v(x, y) + z\phi_2(x, y), \quad (1.22)$$

$$u_3(x, y, z) = w(x, y), \quad (1.23)$$

kur  $u_1, u_2, u_3$  attiecīgi nosaka pārvietojumus plātnei punktā  $(x, y, z)$ ,  $u, v, w$ - pārvietojumi plātnes vidusplaknei punktā  $(x, y, 0)$ ,  $\phi_1, \phi_2$ - pagriezienu leņķi ap asīm  $x, y$ .

Eksistē arī citas šķērsdeformāciju teorijas, piemēram, trešās kārtas, kurā pa biezumu ir kubiska sakarība pārvietojumiem [44, 69], kā arī metode, kas balstīta uz Ģenētisko algoritmu un ļauj noteikt racionālāko aprēķina teoriju [17].

Deformācijas sastāda trīs komponentes- elastīgās, temperatūras un mitruma izraisītās deformācijas:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^{st}\} + \{\varepsilon_{Th}\} + \{\varepsilon_w\}. \quad (1.24)$$

Izvērstā veidā deformācijas asīs  $X, Y, Z$  ir definētas šādi, ja šīs asis ir piesaistītas ortotropas loksnes elastīgās simetrijas asīm:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_{xx} \quad \varepsilon_{yy} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{xz} \quad \varepsilon_{xy}\}^T = \{\varepsilon^{st}_{xx} \quad \varepsilon^{st}_{yy} \quad \varepsilon^{st}_{yz} \quad \varepsilon^{st}_{xz} \quad \varepsilon^{st}_{xy}\}^T + \dots$$

$$\{\alpha_x \Delta T \quad \alpha_y \Delta T \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T + \{\beta_x \Delta W \quad \beta_y \Delta W \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T, \quad (1.25)$$

kur  $\alpha_x, \alpha_y$  – temperatūras izraisītu izplešanās/saraušanās deformāciju koeficienti attiecīgi  $X$  un  $Y$  asu virzienos;  $\beta_x, \beta_y$  – mitruma izraisītu rukuma/uzbriešanas deformāciju koeficienti attiecīgi  $X$  un  $Y$  asu virzienos;  $\Delta T, \Delta W$  – temperatūras un mitruma izmaiņas.

Lai aprēķinātu pārvietojumus, parasti izmanto variāciju rēķinu pieeju - minimizē plātnes potenciālās enerģijas funkcionāli, kurš sastāv no deformāciju potenciālās enerģijas un ārējo iedarbju paveiktā darba.

Sistēmas elastīgo deformāciju kopējā potenciālā enerģija definēta ar šādu izteiksmi:

$$\Pi = \int_V \{\sigma\}^T \{\varepsilon^{st}\} dV = \int_V \{\varepsilon^{st}\}^T D \{E\} dV = \int_V \{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_{Th}\} - \{\varepsilon_w\}\}^T D \{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_{Th}\} - \{\varepsilon_w\}\} dV, \quad (1.26)$$

kur  $D$ - matrica, kas saista spriegumus ar deformācijām  $\{\sigma\} = D \cdot \{E\}$ , ortotropas plātnes gadījumā šī matrica ir šāda [103, 24]:

$$D = \begin{pmatrix} \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{\nu_{21}E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{pmatrix}, \quad (1.27)$$

kur  $E_1, E_2$  – Junga moduļi virzienos 1 un 2, kas sakrīt ar materiāla elastīgās simetrijas asīm;

$G_{12}$  – bīdes modulis plaknē 1-2;  $\nu_{12}, \nu_{21}$  – Puasona koeficienti.

Tilpump spēku paveikto darbu izsaka šāda izteiksme:

$$A_{bf} = \int_V (u_x G_x + u_y G_y + u_z G_z) dV, \quad (1.28)$$

kur  $u_x, u_y, u_z$  – čaulas vidusplaknes punktu pārvietojumi  $X, Y, Z$  asu virzienos;

$G_x, G_y, G_z$  – tilpump spēku komponentes  $X, Y, Z$  asu virzienos.

Virsmas spriegumu paveikto darbu izsaka šāda izteiksme

$$A_p = \int_{\Gamma} (u_x p_x + u_y p_y + u_z p_z) d\Gamma \quad (1.29)$$

kur  $p_x, p_y, p_z$  – virsmas spriegumu komponentes, kas darbojas apgabalā  $\Gamma$  attiecīgi  $X, Y, Z$  asu virzienos.

Koncentrēto spēku un momentu paveiktais darbs izsakāms šādi

$$A_F = \sum_i (F_x^i u_x^i + F_y^i u_y^i + F_z^i u_z^i) + \sum_j \left( M_x^j \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^j + M_y^j \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^j + M_z^j \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^j \right) \quad (1.30)$$

kur  $F_x^i, F_y^i, F_z^i$  – koncentrēti spēki, kas darbojas virzienos  $X, Y, Z$  un pielikti punktā  $(i)$ ;

$M_x^i, M_y^i, M_z^i$  – momenti, kas darbojas ap asīm  $X, Y, Z$  un pielikti punktā  $(i)$ ,

$\left( \frac{\partial u_z}{\partial y} \right)^j, \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} \right)^j, \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^j$  - punkta  $(j)$  pagrieziena leņķi ap asīm  $X, Y, Z$  attiecīgi.

Kopējā sistēmas enerģija  $U$  aprēķināma kā deformāciju potenciālās enerģijas un ārējo spēku paveiktā darba summa

$$U = \Pi - A_{bf} - A_p - A_F \quad (1.31)$$

Potenciālās enerģijas funkcionālis satur trīs nezināmas funkcijas – pārvietojumus  $X, Y, Z$  asu virzienos. Šo pieeju sauc par galīgo elementu metodi pārvietojumos. No variāciju rēķinu teorijas izriet, ka funkcionāļa minimums var būt tad, kad tā variācija ir vienāda ar nulli [121, 82, 110]:

$$\delta U = \delta \Pi - \delta A_{bf} - \delta A_p - \delta A_F = 0 \quad (1.32)$$

Lietojot tuvinātas skaitliskās metodes, parasti šo funkcionāļa minimumu atrod, pieņemot, ka pārvietojumu funkcijās ir nezināmi tikai atsevišķi koeficienti [121], tādējādi funkcionālis ir atkarīgs no šo koeficientu vērtībām. Koeficienti kļūst par funkcionāļa argumentiem, bet funkcionālis – par vairākargumentu funkciju. Sistēmas enerģijas minimums var būt tad, ja tās pirmās kārtas atvasinājumi pēc visiem mainīgajiem argumentiem ir nulle:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial U(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} = 0. \end{array} \right. \quad (1.33)$$

Pastāv arī jauktas pieejas galīgo elementu metode (*mixed finite element formulation*). Šajā gadījumā kā nezināmie lielumi var būt ne tikai pārvietojumi, bet arī spriegumi un/vai deformācijas. Šajā metodē tiek minimizēts *Hu-Washizu* funkcionālis [121]. Potenciālās enerģijas minimuma princips izriet, kā speciālgadījums, no šī funkcionāļa. *Hu-Washizu* funkcionālis tiek iegūts, ja potenciālās enerģijas funkcionāli papildina ar locekļiem, kas veido starpību starp deformācijām un spriegumiem uz virsmas vai iekšā ķermenī, kas ir nodefinēti, un tiem, kurus faktiski mēs aprēķinām, izmantojot Lagranža reizinātāju metodi. Par Lagranža reizinātājiem izmanto iekšējos un virsmas spriegumus. Šī metode ērti izmantojama gadījumos, kad konstrukcijai dots iekšējais saspriegumus vai virsmas spriegumi noteiktās vietās, vai noteiktas- iepriekš paredzētas deformācijas.

### 1.2.2. Siltuma un masas apmaiņas modelēšana

Koksnē mitruma difūzija ir iedalīta saistītā un brīvā mitruma difūzijā. Virkne pētījumu parāda, ka koksnē saistītais mitrums ir līdz 30% mitruma saturam [126], bet pārējais mitrums ir brīvais. Viena no vienkāršākajām metodēm saistītā mitruma difūzijas modelēšanā ir Fika likuma izmantošana paraboliska parciālā diferenciālvienādojuma veidā [7, 43, 114]:

$$\frac{\partial m(Z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left( D(m(Z, t), T) \frac{\partial m(Z, t)}{\partial Z} \right), \quad -a < Z < a, \quad t > 0, \quad (1.34)$$

kur  $m$ - relatīvais mitruma saturs koksnē ( $kg/kg$ );  $D(m(Z, t), T)$  – saistītā mitruma difūzijas koeficients ( $m^2/h$ ),  $a$ - puse no loksnes biezuma,  $t$ - laiks,  $T$ - temperatūra,  $Z$ - koordināte pa loksnes biezumu.

Ir pētījumi, kas parāda, ka koksnes blīvums tieši ietekmē difūzijas koeficientu, tādēļ bērza splāksnim ar blīvumu  $700 \text{ kg/m}^3$  var pieņemt, ka difūzijas koeficients ir tāds pats kā sarkanajam ozolam ar tādu pašu blīvumu [114]:

$$D(m(Z,t),T) = 5.76 \cdot \exp\left(1.45 \cdot m(Z,t) - \frac{5280}{T}\right) \quad (1.35)$$

Lai atrisinātu mitruma difūzijas diferenciālvienādojumu, sākotnējo mitruma sadalījumu pa loksnes biezumu, ko pieņem par konstantu:

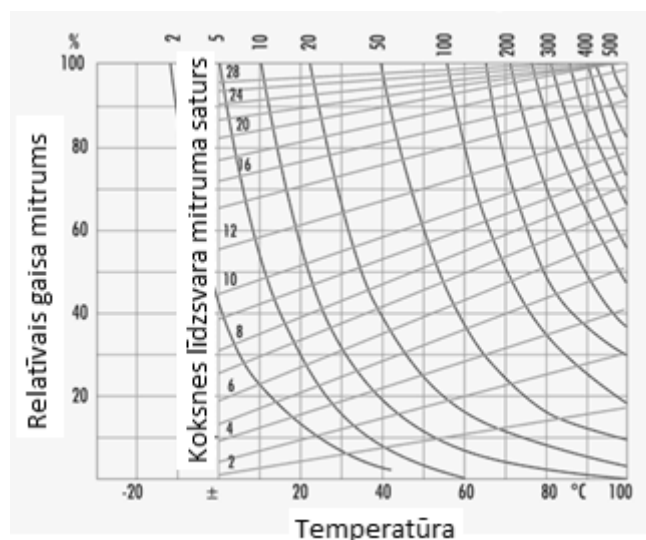
$$m(Z, 0) = m_0. \quad (1.36)$$

Nepieciešams izmantot arī konvekcijas tipa robežnosacījumus uz loksnes ārējām virsmām:

$$D(m(Z,t),T) \frac{\partial m(Z,t)}{\partial Z} = k_m (m(Z,t) - m_0), \quad Z = \pm a, \quad t > 0, \quad (1.37)$$

kur  $k_m$  –virsmas mitruma emisijas koeficients ( $m/s$ ). Radiālā virzienā Skotijas priedei tas skaitliski ir vienāds ar  $0.00243(m/h)$  [60] un aprēķinos pieņemts, ka bērza splāksnim tas ir tāds pats.

Tā kā koksnei mitruma saturs ir atkarīgs no temperatūras (skat. 1.12. att.), nepieciešams vienlaicīgi rēķināt temperatūras maiņas procesus.



1.12. att. Koksnes līdzsvara mitruma satura atkarība no temperatūras un gaisa relatīvā mitruma [126].

Siltuma apmaiņas procesu modelē izmantojot Furjē likumu paraboliska parciālā diferenciālvienādojuma formā [43, 76, 77]:

$$\rho(m)c(m,T)\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda(m,T)\nabla T), \quad (1.38)$$

kur  $\rho$  – blīvums ( $kg/m^3$ ),  $c(m,T)$  – īpatnējā siltumietilpība,  $\lambda(m,T)$  – siltumvadītspējas koeficients,  $\nabla$  – Nabla operators (pirmās kārtas parciālie atvasinājumi pēc koordinātēm).

Kā sākuma nosacījums tiek izmantots vienmērīgs temperatūras sadalījums pa loksni  $T_0$ , un uz loksnes ārējām virsmām pieņemts, ka siltuma apmaiņa ar apkārtējo gaisu notiek pēc konvekcijas tipa izteiksmes:

$$\begin{aligned} T(z, t = 0) &= T_0 \\ -\lambda(m, T)\frac{\partial T}{\partial t} &= h(T - T_{sur}), z = \pm a, t > 0 \end{aligned} \quad (1.39)$$

kur  $T_0$  – sākotnējais temperatūras sadalījums,  $h$  – virsmas temperatūras apmaiņas koeficients,  $T_{sur}$  – apkārtējās vides temperatūra.

Mitruma un temperatūras maiņu laikā nepieciešams rēķināt vienlaicīgi (kā vienādojumu sistēmu), jo temperatūras vadīšanas koeficients ir atkarīgs no mitruma satura koksnē, savukārt mitruma difūzijas koeficients ir atkarīgs no temperatūras. Viendimensiju gadījumā ērti izmantot galīgo diferenču metodi, lai atrisinātu šo parciālo diferenciālvienādojumu sistēmu.

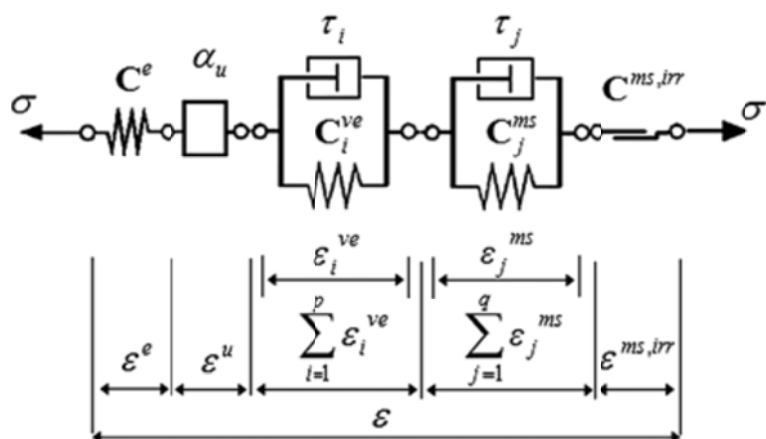
### 1.2.3. *Koksnes nelineāro īpašību ievērtēšana*

Virkne darbu parāda, ka koksne ir izteikti nelineārs materiāls [18, 19, 27, 33], līdzīgi kā citi biomateriāli, piemēram, kauli [56]. Viens no vienkāršākajiem aprēķina modeļiem, ar kuru var ievērtēt koksnes reonormās īpašības, ir tipiskā ķermeņa vienādojums [127], kurš saista spriegumus, deformācijas un laiku:

$$n\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \sigma = nH\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + E\varepsilon, \quad (1.40)$$

kur  $n$ - relaksācijas laiks (min),  $\sigma$  – spriegumi (MPa),  $\varepsilon$  – deformācijas,  $H$ - sākotnējais elastības modulis (MPa),  $E$ - elastības modulis pie ilglaicīgas slogošanas (MPa).

Šis modelis acīmredzami neņem vērā cikliska mitruma maiņas izraisītās papildus deformācijas, kuras var palielināt kopējo deformāciju lielumu līdz pat 3 reizēm [52, 80]. Lai ņemtu vērā šo koksnes īpatnību, var lietot šādu, sarežģītāku modeli [33, 27]:



1.13. att. Koksnes elastīgo un neelastīgo deformāciju veidojošās komponentes.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^w + \sum_{i=1}^p \varepsilon_i^{ve} + \sum_{j=1}^q \varepsilon_j^{ms} + \varepsilon^{ms,irr}, \quad (1.41)$$

kur  $\varepsilon^e$  – elastīgā deformācijas komponente,  $\varepsilon^w$  – mitruma un temperatūras izraisītā rukuma/uzbrīšanas komponente,  $\varepsilon^{ve}$  –viskoelastīgā deformāciju komponente,  $\varepsilon^{ms}$  – mitruma cikliskas maiņas izraisīto papildus deformāciju komponente,  $\varepsilon^{ms,irr}$  – neatgriezenisko deformāciju komponente.

Pie relatīvi lieliem spriegumiem, šļūde var izraisīt noturības zudumu čaulveida konstrukcijām [119].

Lai praktiski varētu veikt konstrukciju aprēķinu, ievērtējot materiāla nelinearitātes, parasti izmanto iteratīvu procedūru, ar kuru ievērtē materiāla nelinearitāti galīgo elementu aprēķinā. Tā sastāv no šādiem galvenajiem soļiem [8]:

1) izmanto zināmos lielumus: mezglu punktu pārvietojumu iepriekšējā iterācijā  ${}^{t+\Delta t}U^{(i-1)}$  un relatīvās deformācijas  ${}^{t+\Delta t}e^{(i-1)}$ , indeks  $(i-1)$  norāda uz iterācijas numuru.

2) Aprēķina: spriegumus  ${}^{t+\Delta t}\sigma^{(i-1)}$ , izmantojot sakarību:

$${}^{t+\Delta t}\sigma^{(i-1)} = {}^t\sigma + \int_t^{t+\Delta t} {}^{(i-1)}d\sigma, \quad (1.42)$$

pēc tam aprēķina tangenciālo stinguma matricu atbilstošu spriegumiem  ${}^{t+\Delta t}\sigma^{(i-1)}$ , kuru apzīmē ar  $C^{(i-1)}$ .

Izoparametriskā galīgo elementu aprēķinā šie spriegumu un deformāciju aprēķini tiek veikti visos diskrētajos integrēšanas punktos.

3) Aprēķina jaunus mezglu pārvietojumus  $\Delta U^{(i)}$ , izmantojot vienādojumus:

$${}^{t+\Delta t}K^{(i-1)}\Delta U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}U^{(i)}, \quad (1.43)$$

$${}^{t+\Delta t}U^{(i)} = {}^{t+\Delta t}U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)}, \quad (1.44)$$

kur  $K$ - globālā stinguma matrica,  $R$ - atlikuma- kļūdas vektors.

Iteratīvi tiek atkārtoti soļi 1-3, līdz iestājas konverģence.

Šobrīd ir ļoti maz pētījumu par saplākšņa materiāla neelastīgo dabu, kas atšķiras no dabīgas koksnes ar izjauktu koksnes struktūru, kas radusies presēšanas rezultātā pie paaugstinātas temperatūras (100...110 °C) un līmes slāni starp lobskaidām.

#### 1.2.4. *Konstrukcijas topoloģijas optimizācija*

Konstrukcijās parasti veidojas nevienmērīgs piepūļu lauks, kas izsauc nepieciešamību novērtēt konstrukciju vietas, kurās nepieciešams vairāk koncentrēt materiālu un kurās mazāk, harmonizējot konstrukcijas pretestības lauku ar piepūļu lauku. Izotropu materiālu gadījumā to var noteikt, izmantojot konstrukcijas topoloģijas optimizācijas metodiku, kurā tiek minimizēts padevīgums  $c(x)$  [10]:

$$\min_x: c(x) = U^T(x)K(x)U(x) = \sum_{e=1}^N (x_e)^p u_e^T k_e u_e, \quad (1.45)$$

$$\text{Ierobežojumi: } \frac{V(x)}{V} = f, \quad (1.46)$$

$$: KU = F, \quad (1.47)$$

$$: 0 < x_{min} < x < 1, \quad (1.48)$$

$$: E_{ijkl} = (x)^p E^0_{ijkl}, \quad (1.49)$$

kur  $x$  – materiāla sadalījuma funkcija,  $U, u^e$  – globālais un  $e$ -tā galīgā elementa pārvietojumu vektors,  $K, k_e$  – globālā un  $e$ -tā galīgā elementa stinguma matrica,  $f$ - relatīvais iespējamais materiāla daudzums konstrukcijā,  $F$  – ārējo spēku vektors,

$x_{min}$ - minimālā vērtība materiāla sadalījuma funkcijai,  $p$  – parametrs, kuru parasti pieņem par 3 [10],  $E_{ijkl}$  –materiāla padevīguma tenzors.

Šīs metodes trūkums ir lietošanas ierobežotība tikai izotropiem materiāliem, turklāt plātņu gadījumā lietderīgāk ir noteikt kādu materiālu katrā vietā nepieciešams lietot, nevis tikai materiālu izvietojumu.

Eksistē arī citas pieejas, piemēram, diskretā materiālu optimizācija [61, 62, 50, 74, 93], kuru galvenokārt izmanto slāņainu materiālu slāņu orientācijas leņķu optimizācijā. Ir arī plātņu un čaulu biezumu optimizācijas metodikas. Diskrētā materiāla optimizācijas metodes pamatā ir ideja, ka katram slānim izvēlas noteiktu diskretu materiālu no iespējamajiem, minimizējot vai maksimizējot nepieciešamās īpašības (stingumu, pašsvārstības frekvences, noturību). Pašsvārstību frekvences minimizācija plātnēm un čaulām detalizēti aplūkota darbos [1, 78, 109].

Ir izstrādātas metodes, kurās lieto integrētu pieeju, kas nozīmē, ka topoloģija (forma un/vai materiālu izvietojums) un elementu izmēri tiek optimizēti vienlaicīgi [21, 70, 120]. Topoloģijas optimizācijā dažkārt, piemēram, kad nosaka optimālu režģojumu kopnēm, ērti lietot uz populācijām balstītus algoritmus, piemēram, Ģenētisko Algoritmu [72, 94, 115].

Materiāliem, kas veidoti no šķiedrām, ir metodes, ar kurām optimizē šķiedru orientāciju [11, 12] un šķiedru formu [54].

Slāņainiem materiāliem ir speciālas metodes, ar kuru palīdzību optimizē slāņu orientācijas leņķus, lai panāktu plātnēm vai čaulām nepieciešamās īpašības [3, 55]. Eksistē metodikas, kurās tiek ņemtas vērā konstrukcijas ģeometrisko un materiālu īpašību izkliedes [53, 6], slāņainu materiālu delaminēšanās parādības [50], mainīgas slodzes [118] un vairākas mērķa funkcijas [79] kā arī starpslāņu spriegumu efekts (*interlaminar stress*) [26].

Slāņainu konstrukciju optimizācijā parasti izmanto laminēšanas parametrus. Šie 12 parametri viennozīmīgi definē loksnes iekšējo struktūru- slāņu orientācijas leņķus un biezumus [55]. Sakarība starp konstrukcijas stingumu un slāņu orientācijas leņķiem, biezumiem ir visai sarežģīta, un minimizācijas uzdevumam ir vairāki lokāli minimumi. Turpretī, ja izmanto laminēšanas parametrus, tad optimizācijas uzdevuma mērķa funkcija kļūst izliekta (*convex*). Parasti rodas problēmas piemeklēt slāņu orientācijas leņķus un biezumus atbilstoši iegūtajiem optimālajiem laminēšanās

parametriem. Šo problēmu dažkārt risina kā atsevišķu optimizācijas uzdevumu, kurā piemeklē loksnes struktūru, kuras laminēšanās parametri ir maksimāli līdzīgi nepieciešamajiem.

Tā kā liektām, plānām saplākšņa plātnēm tieši ārējie slāņi galvenokārt nosaka stinguma, stiprības īpašības, tad rodas nepieciešamība izstrādāt speciālu metodiku ārējo lobskaidu orientācijas leņķu optimizācijai.

Ribotām saplākšņa plātņveida konstrukcijām ar konstantu biezumu ne viena no esošajām metodikām nav racionāli izmantojama, jo ir nepieciešams piemeklēt katrā plātnes punktā materiālu ar nepieciešamajām lieces un bīdes stinguma īpašībām, minimizējot padevīgumu un spriegumu vērtību atšķirības pa plātņi, kas ļauj izvairīties no spriegumu koncentrācijām.

### 1.3. Darba mērķis un uzdevumi

**Darba mērķis:** Izstrādāt izgatavošanas paņēmiena pamatprincipus un aprēķinu pamatmetodikas netradicionāliem, paaugstinātas īpatnējās nestspējas koksnes kompozīta konstrukcijas elementiem ar plakanas un izliektas formas saplākšņa ribojumu, kā arī saplākšnim ar mainīgu ārējo lobskaidu orientāciju.

Mērķa sasniegšanai nepieciešams atrisināt šādus uzdevumus:

1. Izstrādāt metodiku ribojumā izmantojamo liekto saplākšņa lokšņu, kam ir nesimetriska (nebalansēta) struktūra pret to vidusplakni, izgatavošanas un ekspluatācijas mitruma satura, termiskās apstrādes laika un temperatūras, kā arī struktūras projektēšanai, un veikt šīs metodikas konceptuālu, eksperimentālu validāciju.

2. Izstrādāt aprēķinu metodiku racionālu ģeometrisku parametru noteikšanai ribota saplākšņa konstrukcijas elementam ar vienā virzienā orientētām ribām un, pielietojot šo metodiku, trīslaidumu plātnei ar divām kustīgām slodzēm aprēķināt racionālu apšuvuma lokšņu un ribu biezumu, ribojuma orientāciju un intensitāti.

3. Izstrādāt konstruēšanas pamatprincipus un aprēķinu pamatmetodikas netradicionālam mainīga stinguma kompozītam konstrukcijas elementam ar izliektām un plakanām ribām, paaugstinātu īpatnējo nestspēju, samazinātām rukuma/uzbrīšanas deformācijām un samazinātu siltumvadītspēju. Izstrādāt metodiku ārējo lobskaidu racionāla orientācijas leņķa noteikšanai paaugstinātas

īpatnējās nestspējas saplākšņa loksnei ar mainīgu stingumu un, izmantojot izstrādāto metodiku, noteikt racionālu ārējo lobskaidu orientācijas leņķus vienlaiduma un trīslaidumu plātnēm pie vienmērīgi izkliedētas slodzes.

4. Noteikt lieces un bīdes stinguma atkarību no netradicionāli ribota saplākšņa kompozīta konstrukcijas elementa ribojuma struktūras, ģeometriskajiem parametriem, un, pielietojot šo informāciju, noteikt racionālu ribojumu diskrēti mainīga stinguma ribotai saplākšņa plātnei ar plakanas un izliektas formas ribām, kā arī novērtēt šīs konstrukcijas darbu pie mitruma izmaiņas lokālā plātnes apgabalā.

5. Parādīt izstrādātās aprēķinu metodikas izmantošanas iespējas trīslaidumu plātnei pie dažādām slodžu kombinācijām un trīsstūrveida trīslocīklu telpiskas arkas konstrukcijai, nosakot ribotas saplākšņa plātnes racionālu ribojumu, un veikt konceptuālus eksperimentus rezultātu validācijai.

## **2. SAPLĀKŠŅA LOKŠŅU AR NESIMETRISKU STRUKTŪRU MITRUMA-TEMPERATŪRAS IZRAISĪTO SPRIEGUMU- DEFORMĀCIJU ANALĪZE**

Ribotām saplākšņa plātnēm izdevīgi lietot liektas formas ribas, kas būtiski uzlabo plātņu telpisko noturību un stiprību virzienā, kas perpendikulārs ribu virzienam. Ribojumam ir jābūt tādām, ar kur var panākt nepieciešamo stingumu attiecību ribu garenvirzienā un šķērsvirzienā. Liektas formas viļņveida ribojums dod iespēju iegūt nepieciešamo stingumu stiprību gan ribu garenvirzienā, gan šķērsvirzienā, mainot ribu liekuma rādiusu un biezumus. Saplākšņa ribojumam ir jānodrošina samazinātas mitruma izraisītās rukuma/uzbriešanas deformācijas pa loksnes biezumu. Tas ir atrisināms, veidojot ribojuma, kuram pietiekams daudzums ar lobskaidām ir orientētas plātnes transversiālajā virzienā. Ribojumam ir jānodrošina iespēju veidot plātnes ar nepieciešamo siltumvadītspēju.

Tehnoloģiski liektu saplākšņu ribu izgatavošanu var būtiski atvieglot, veidojot ribas no nesimetriskas struktūras saplākšņa un saliecot, izmantojot mitruma starpību starp ekspluatācijas un izgatavošanas mitruma saturiem.

Šajā nodaļā tiks aprakstīts izstrādātais modelis lokšņu deformāciju prognozēšanai, ņemot vērā ģeometrisko nelinearitāti un elastīgo raksturlielumu maiņu, mainoties mitruma saturam koksnē, kā arī racionāls lokšņu lobskaidu izvietojums, kondicionēšanas režīms un eksperimentālas izgatavošanas procesa pārbaudes.

### **2.1. Vienkāršots aprēķina modelis ģeometrisko un daļēju materiāla nelinearitāšu ievērtēšanai**

Lai varētu ērti veikt aprēķinus, kuros ir ņemta vērā gan ģeometriskā nelinearitāte, gan fizikāla, jeb materiāla nelinearitāte, ir izstrādāts speciāls aprēķina modelis, ar kura palīdzību var aprēķināt deformācijas taisnstūra formas nesimetriskas struktūras loksnei ar ortogonālu struktūru [91, 92]. Ģeometriskā nelinearitāte rodas no tā, ka loksnei liekšanās procesā palielinās tās stingums un tiek apgrūtināta tālāka liekšanās pretējā virzienā. Materiāla nelinearitāti nepieciešams ņemt vērā, jo koksnē, līdzīgi kā citiem materiāliem [4, 57], būtiski mainās mehāniskās īpašības, mainoties tās mitruma saturam. Dažkārt lielu ietekmi uz loksnes darbu atstāj tehnoloģiski radītās

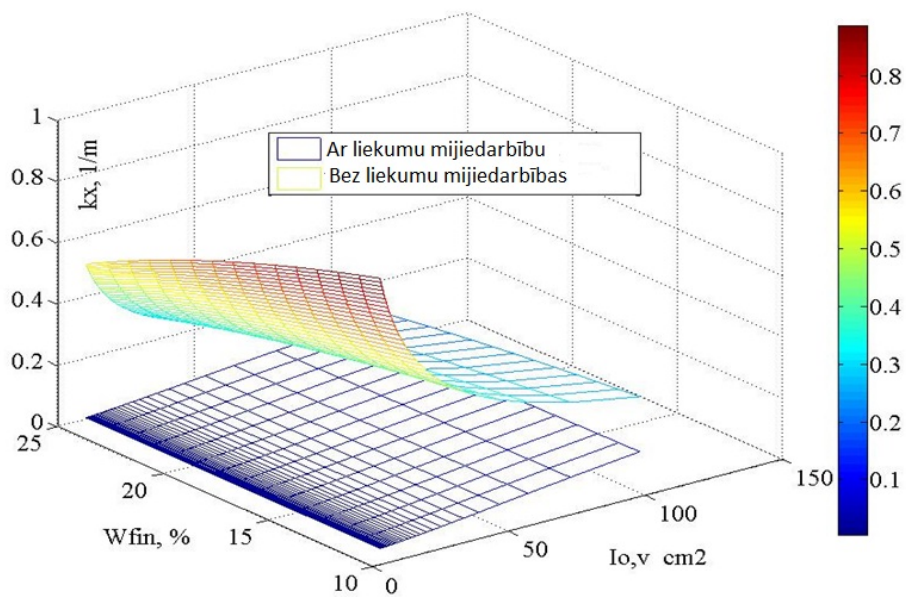
ģeometriskās novirzes un materiāla īpašību izkļedes [90], vai nelineāra sakaraība starp spriegumiem un deformācijām [32].

Izstrādātais aprēķina modelis sastāv no algoritma, kurš ir balstīts uz vienu ciklu ar  $N$  iterācijām. Cikls ar  $N$  iterācijām sadala kopējo mitruma pieaugumu  $N$  daļās un katrā iterācijā sarēķina jaunās elastīgo konstanšu matricas, kuras ir atkarīgas no mitruma un deformāciju izmaiņām. Atbilstoši katrā ciklā iegūtajām matricām tiek atrisināts vienādojums (1.11) un iegūts deformāciju vektors. Tālāk tiek pārveidoti iegūtās deformāciju matricas liekumi  $k_x$  un  $k_y$ , pareizinot tos ar inerces momentu nedeformētam stāvoklim un pretējā virziena izliektā stāvokļa inerces momentu dalījumu (2.1). Pārveidotā deformāciju matrica tiek pieskaitīta kopējo deformāciju matricai (2.2). Uzdevums ir atrisināts, ņemot vērā gan ģeometrisko nelinearitāti, kas attiecas uz liekumu ņemšanu vērā, gan daļēju materiāla nelinearitāti.

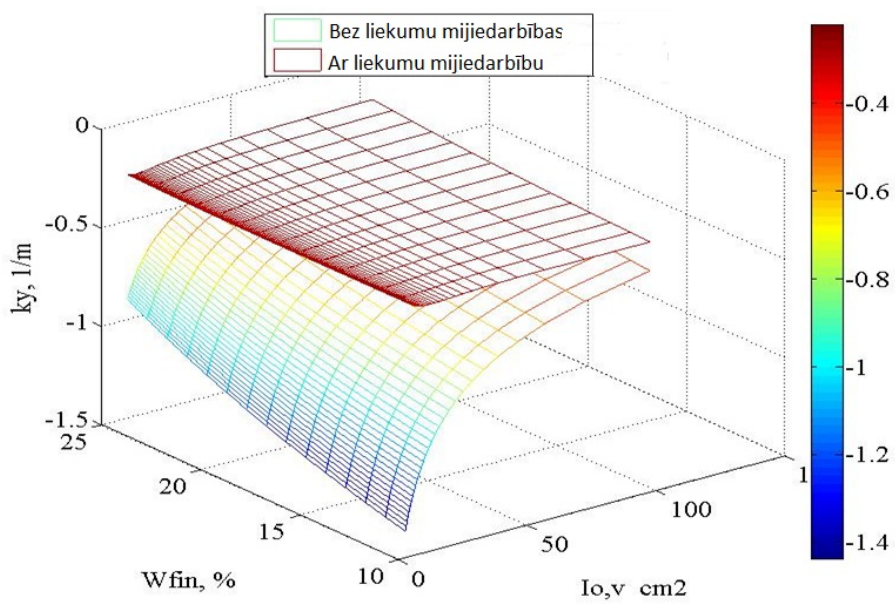
$$I_{0,x} = \frac{a^3}{8} h \left( \frac{1}{\alpha^2} + \frac{\sin(\alpha)\cos(\alpha)}{\alpha^3} - \frac{2\sin^2(\alpha)}{\alpha^4} \right) + \frac{a \cdot h^3}{12}, \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} k_X^0(w) \\ k_Y^0(w) \end{bmatrix} = \sum_{l=1}^N \begin{bmatrix} k_X^0(w) \cdot \frac{I_{0,y}}{I_{l,y}} \\ k_Y^0(w) \cdot \frac{I_{0,x}}{I_{l,x}} \end{bmatrix}_l, \quad (2.2)$$

kur  $I_{0,x}, I_{0,y}$  – inerces momenti plakanai loksnei pret asīm  $x$  un  $y$  attiecīgi;  $I_{l,x}, I_{l,y}$  – inerces momenti, līdz  $l$ -tajam solim, izliektai loksnei pret asīm  $x$  un  $y$  attiecīgi;  $N$ -kopējais iterāciju skaits.



2.1. att. Mazākā liekuma  $k_x$  maiņa atkarībā no beigu mitruma satura  $W_{fin}$  un plakanas loksnes inerces momenta  $I_{0,v}$  pie mitruma izmaiņas 4%.



2.2. att. Lielākā liekuma  $k_y$  maiņa atkarībā no beigu mitruma satura  $W_{fin}$  un plakanas loksnes inerces momenta  $I_{0,v}$  pie mitruma izmaiņas 4%.

## 2.2. Spriegumu pārdalīšanās un šļūdes efektu ievērtēšanas metodika

Spriegumu pārdalīšanās un šļūdes efektu ievērtēšanai tiek izmantots tipiskā ķermeņa vienādojums (1.32) [123, 125, 127, 84]. Tā kā, mainoties mitrumam, veidojas neviendabīgs spriegumu sadalījums pa loksnes biezumu, tipiskā ķermeņa vienādojums tiek lietots pa loksnes biezumu 19 (atkarīgs no lobskaidu skaita) diskrētos punktos (2.3). Tiek izdarīts pieņēmums, ka deformācijas pa loksnes biezumu sadalās lineāri, tādēļ nepieciešami vēl 2 vienādojumi, kurus iegūst sastādot spēka un momentu līdzsvara vienādojumus (vienādojumu sistēmas (2.3) pēdējie divi vienādojumi).

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 \frac{\partial \sigma_1}{\partial t} + \sigma_1 = n_1 H_1 \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} + E_1 \varepsilon_1, \\ \dots\dots\dots \\ n_{19} \frac{\partial \sigma_{19}}{\partial t} + \sigma_{19} = n_{19} H_{19} \frac{\partial \varepsilon_{19}}{\partial t} + E_{19} \varepsilon_{19}, \\ \int_{-a}^a \sigma dz = 0, \\ \int_{-a}^a \sigma \cdot z dz = 0. \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Gadījumos, kad spriegumi koksnē nepārsniedz 85% no koksnes sabrukšanas spriegumiem, momentāno elastības moduli un elastības moduli pie ilgstošām slodzēm, kā arī relaksācijas laiku apraksta ar šādām polinominālām sakarībām [124]

$$H(m, T) = 2235.15 - 7007m - 22.7T + 28.58mT + 5700m^2 + 0.079T^2, \quad (2.4)$$

$$E(m, T) = 574 - 926m - 3.76T - 9mT - 5460m^2 + 0.0026T^2, \quad (2.5)$$

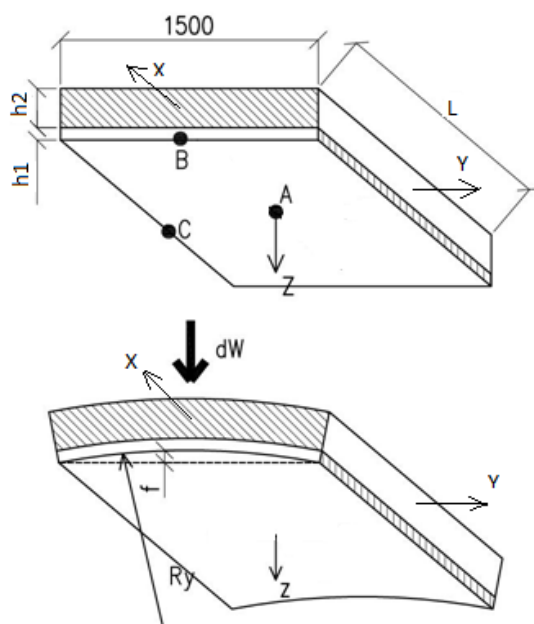
$$n(m, T) = 294.7 - 1236m - 1.36T + 3.17mT + 1380m^2 - 0.00063T^2, \quad (2.6)$$

kur  $m$  – mitruma relatīvais saturs (bezdimensiju),  $T$  – temperatūra ( $^{\circ}\text{K}$ ),  $H$  – momentānais elastības modulis (MPa),  $E$  – elastības modulis pie ilglaicīgām slodzēm (MPa),  $n$  – relaksācijas laiks (stundas).

### 2.3. Loksnes iekšējās struktūras un mitruma ietekme uz deformācijām

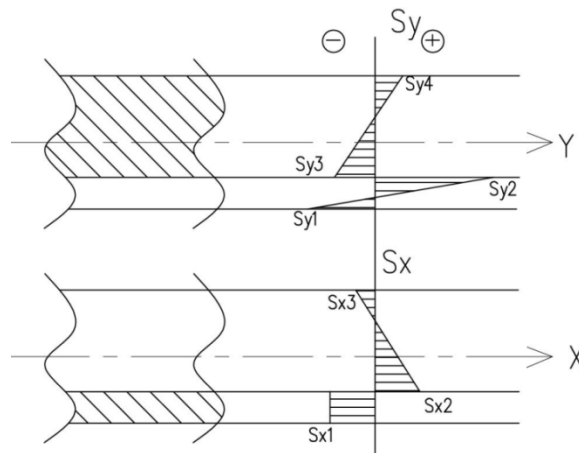
Praktiski liela nozīme ir cilindrisku čaulu iegūšanai, no kurām var veidot ribotas saplākšņa struktūras. Šajā nodaļā tiks aplūkoti gadījumi, kad loksne izliecas, iegūstot cilindrisku formu (otrs liekums ir neievērojami mazs).

Cilindrisku čaulu ar maksimāli lielu liekumu iespējams iegūt, ja loksne veidota ar ortogonālu struktūru  $[0/90]$  un šķērsslāņu kopējais biezums  $h_1$  ir ievērojami mazāks par garenslāņu biezumu  $h_2$  (skat. 2.3. att.) [96, 97].



2.3. att. Čaulas struktūra un forma pēc mitruma maiņas.

Iegūtie rezultāti parāda, ka spriegumu sadalījums pa loksnes platumu un garumu nav vienmērīgs. Veidojas malu efekti - pie loksnes malām ir ievērojamas spriegumu koncentrācijas. Tādēļ spriegumu vērtības nolasītas vairākos punktos pa loksnes laukumu- A, B, C (skat. 2.3. attēlu). Vienmērīgi samazinoties mitruma līmenim, loksne pa tās biezumu veidojas spriegumu sadalījums, kas parādīts 2.4. att., pie nosacījuma, ja nav augsts spriegumu līmenis un var pieņemt, ka koksne darbojas lineāri elastīgi.



2.4. att. Normālspriegumu epīras X un Y asu virzienos.

### 2.3.1. Mitruma starpības ietekme

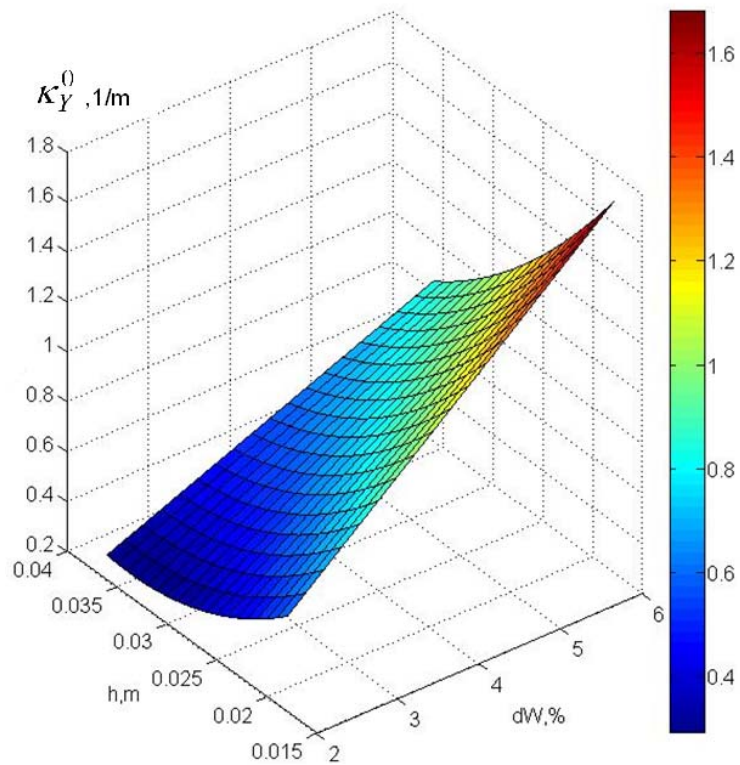
Mitruma starpības ietekme uz izlieci ir tuva lineārai, kā tas redzams tabulā 2.1. un 2.5. att. Skaitliskā eksperimentā aplūkota loksne, kurai ekspluatācijas mitruma saturs ir  $W_{fin}=12\%$ , loksnes platums 1.5 m, kopējais laukums  $12\text{ m}^2$ , šķērsslāņu un garenslāņu biezumu attiecība  $h_1/h_2=5$ . Koksnes īpašības ņemtas no šādiem darbiem [5, 111, 113].

2.1. Tabula

Loksnes izgatavošanas parametru ietekme uz deformācijām un spriegumiem.

H, mm	H <sub>1</sub> , mm	H <sub>2</sub> , mm	W <sub>izg</sub>	W <sub>eksp</sub>	f, mm	R <sub>y</sub> , mm	Punkts	S <sub>x1</sub> , MPa	S <sub>x2</sub> , MPa	S <sub>x3</sub> , MPa	S <sub>y1</sub> , MPa	S <sub>y2</sub> , MPa	S <sub>y3</sub> , MPa	S <sub>y4</sub> , MPa
20	3	17	6%	12%	390	667	A	-10.2	1	2.5	-27	48	-8.7	4.6
							B	-9.8	8	-4.7	-27	58	-8.7	4.6
							C	-10.1	2.5	2.5	-27	48	-8.7	4.6
20	3	17	9%	12%	210	1320	A	-5.1	0.5	1.22	-13	24.6	-4.3	2.3
							B	-4.9	4.1	-2.3	-8.6	29	-4.3	2.3
							C	-5.0	1.2	1.22	-13	24.6	-4.3	2.3
30	4.5	25.5	6%	12%	270	1000	A	-10.2	1	2.4	-26.8	49.2	-8.7	4.6
							B	-9.9	8.1	-4.6	-26.8	58.6	-8.7	4.6
							C	-10.1	2.4	2.4	-26.8	49.2	-8.7	4.6
30	4.5	25.5	9%	12%	140	2000	A	-5.1	0.5	0.5	-13.4	25	-4.4	2.3
							B	-4.9	4	-2.3	-8.6	30	-4.4	2.3
							C	-5.1	1.2	1.2	-13.4	25	-4.4	2.3
40	6	34	6%	12%	210	1330	A	-10.2	1	1	-26.7	50	-8.7	4.6
							B	-9.9	8	-4.6	-17	59.6	-8.7	4.6
							C	-10.2	2.4	2.4	-26.7	50	-8.7	4.6
40	6	34	9%	12%	100	2640	A	-5.1	0.5	0.5	-13	25	-4.4	2.3
							B	-4.9	4	-2.3	-8.6	30	-4.4	2.3
							C	-5	2.6	1.9	-13	25	-4.4	2.3

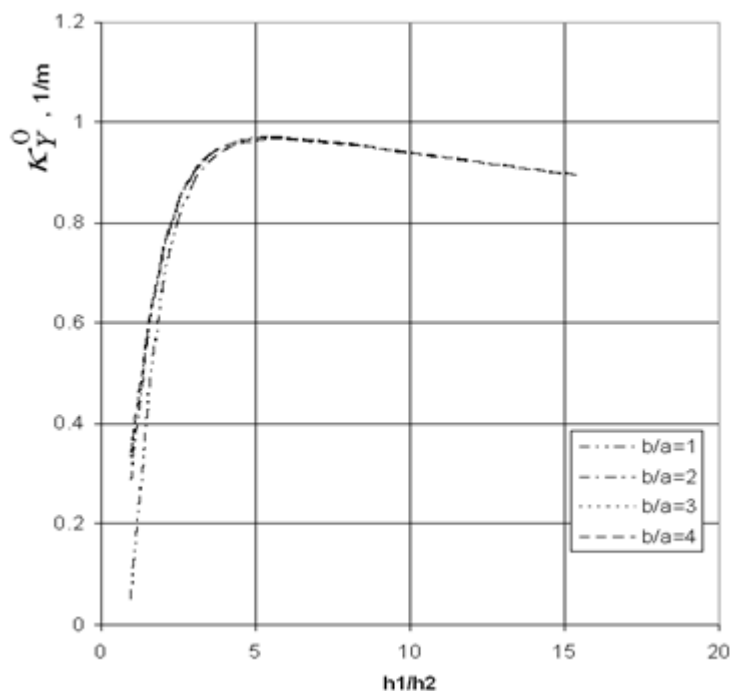
Piemēram, 1.5 m plata un 20mm bieza loksne, kurai izgatavošanas mitrums ir 6%, mitruma pieaugums 6% iegūst izlieci 390 mm, bet loksne, kurai izgatavošanas mitrums ir 9%, mitruma pieaugums 3% iegūst izlieci 210 mm.



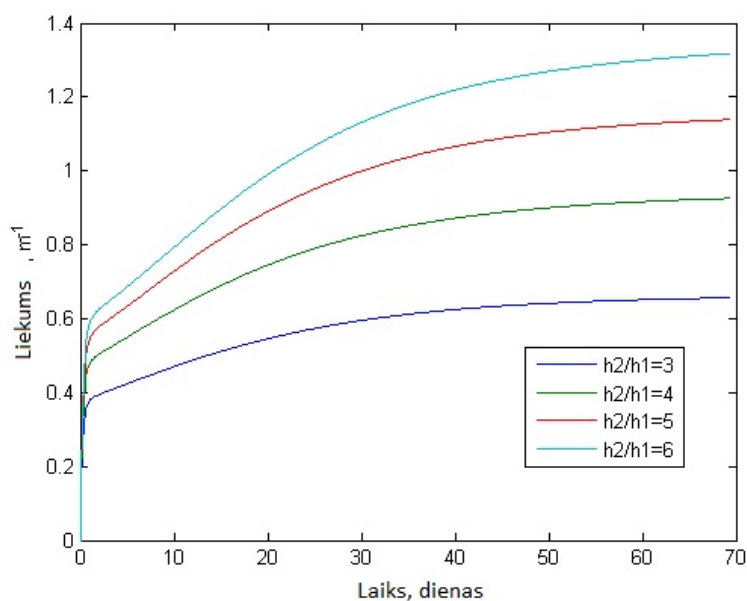
2.5. att. Loksnes galvenā liekuma atkarība no loksnes kopējā biezuma un mitruma satura izmaiņas.

### 2.3.2. Šķērsslāņu un garenslāņu biezuma attiecības ietekme

Pareizi izvēloties šķērsslāņu un garenslāņu attiecību, iespējams iegūt loksni ar nepieciešamo liekumu pie minimālas mitruma izmaiņas [104, 105]. Aprēķini parāda, ka neatkarīgi no loksnes garuma un platuma attiecības, maksimālais liekums tiek iegūts, ja garenslāņu un šķērsslāņu attiecība ir aptuveni 5 (skatīt 2.6. att.).

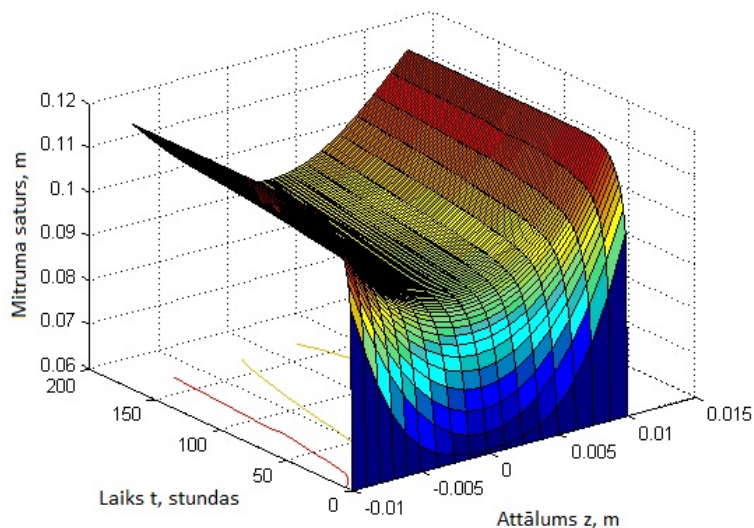


2.6. att. Loksnes galvenā liekuma atkarība no garenslāņu un šķērsslāņu biezumu attiecības  $h_1/h_2$  pie dažādām loksnes garuma un platuma attiecībām  $b/a$ .

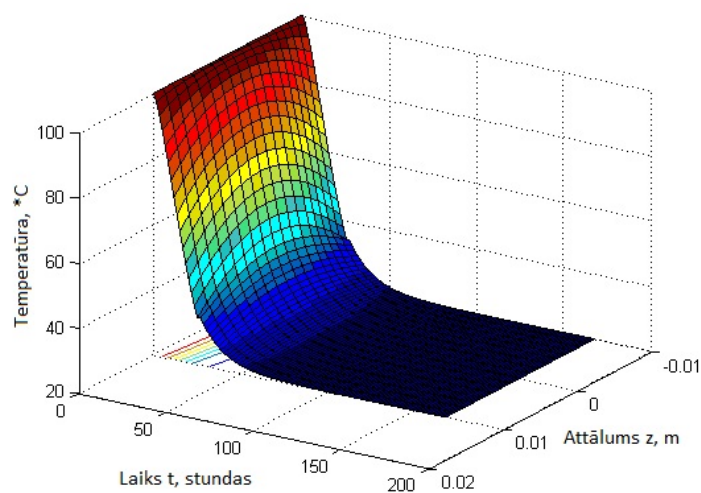


2.7. att. Liekuma izmaiņa laikā pie dažādām garenslāņu un šķērsslāņu biezumu attiecībām.

Tā kā mitruma difūzija koksnē ir relatīvi lēns process, nepieciešams aplūkot liekumu izmaiņu laikā. Izgatavojot loksni karsti līmējot ar līmēšanas temperatūru 100 °C, pēc izņemšanas no preses sākumā liekumi strauji pieaug, sasniedzot līdz pat 60% no maksimālās vērtības (skat. 2.7. att.). Tas galvenokārt notiek straujas atdzišanas dēļ, kas izraisa būtisku mitruma izmaiņu (skat. 2.8. att., 2.9. att.).



2.8. att. Mitruma satura izmaiņa laikā pa loksnes biezumu.



2.9. att. Temperatūras izmaiņa pa loksnes biezumu pēc izņemšanas no karstas preses.

### 2.3.3. Kopējā loksnes biezuma ietekme

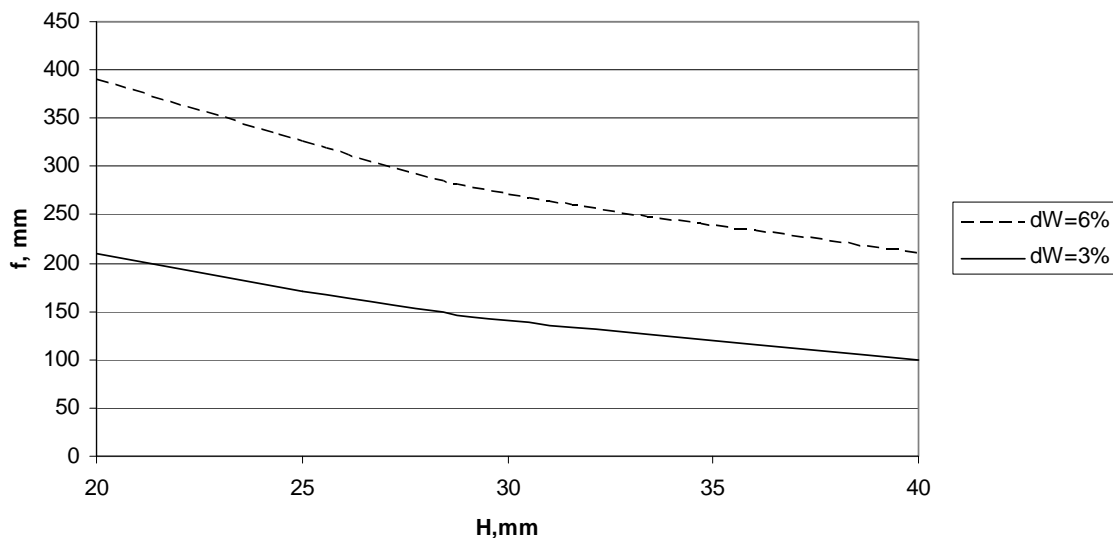
Maksimāli iespējamais liekums un izliece ir rēķināti, ņemot vērā koksnei maksimāli pieļaujamus spriegumus (pie žāvēšanas uzdevumiem) šķiedru garenvirzienā un šķērsvirzienā. To vērtības ir šādas  $R_{t,0} = 60\text{Mpa}$ ,  $R_{t,90} = 8.5\text{Mpa}$ ,  $R_{c,0} = 70\text{Mpa}$ ,  $R_{c,90} = 10\text{Mpa}$  [113, 124]. Gadījumā, ja šīs vērtības tiek pārsniegtas, tad žūšanas procesā rodas plaisa vai uzbriešanas rezultātā attīstās plastiskās deformācijas [124].

Tabula 2.2.

Maksimāli iespējamās loksnes izlieces pie dažādiem tās biezumiem.

H, mm	f, mm
<20	>400
20	390
30	270
40	210
>40	<200

Maksimālo spriegumu vērtības apkopotas tabulā 2.1. Spriegumu vērtības  $S_{x1}$ ,  $S_{x2}$ ,  $S_{y3}$ ,  $S_{y4}$  ir vērstas perpendikulāri šķiedrām, pārējās vērtības paralēli koksnes šķiedrām, mīnusa zīme nozīmē spiedi. Grafiski attēlota sakarība starp loksnes izlieci  $f$  un loksnes kopējo biezumu  $H$  (skat. 2.10. att.) pie divām mitruma starpībām- 3% un 6%. Redzams, ka sakarība ir tuva lineārai un jo plānāka loksne, jo lielāka ir maksimāli iespējamās izlieces vērtība. Pie loksnes biezumiem, kas mazāki par 20 mm, izliece var sasniegt vērtību, kas lielāka par 400 mm. Loksnes, kas biezākas par 40 mm, iegūst izlieci, kas mazāka par 200 mm. Tabulā 2.2. apkopotas maksimālās iespējamās loksnes izlieces pie dažādiem tās biezumiem.



2.10. att. Loksnes maksimālā izliece  $f$  (skat. 2.3. att.) atkarībā no loksnes kopējā biezuma  $H$ .

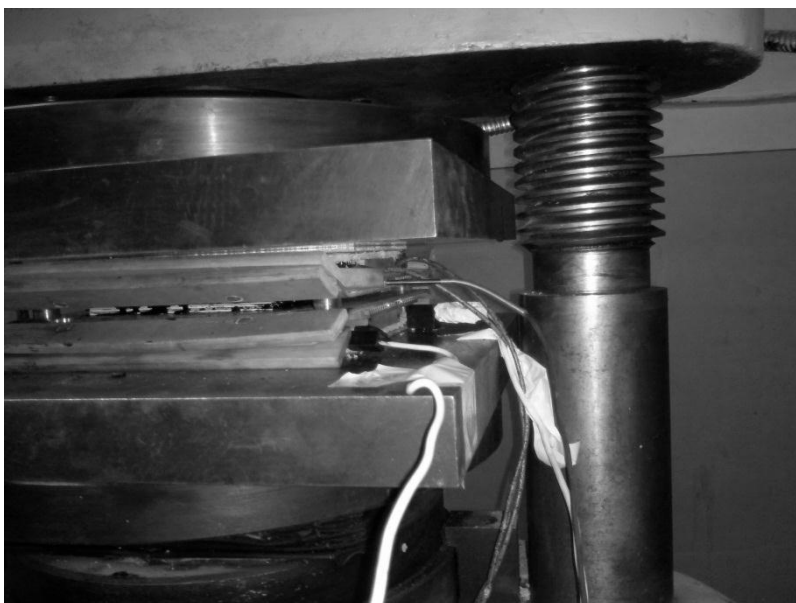
## 2.4. Eksperimentālās pārbaudes un to rezultāti

### 2.4.1. Eksperimentu metodika

Eksperimentāli tika izgatavoti 150x150 mm lieli paraugi no 1.4 mm biežām bērza lobskaidām, veicot līmēšanu un presēšanu presē ar apsildāmiem (spiediens 1 MPa), plakaniem plauktiem. Līmēšanai tika izmantota fenol- formaldehīda līme, kas uzklāta plānā kārtiņā ar rullīti.

Loksnēm izliece tika mērīta tās vidū ar izlieču mērītāju SC 060, kuram ir magnētiskā bāze un iedaļas vērtība 0.01 mm, bet mērapjoms 11 mm. Mitruma saturs tika noteikts ar gravimetrisko metodi, izmantojot elektroniskus svarus *KERN EMB*, kuriem iedaļas vērtība ir 0.01 g, bet mērapjoms 200 g. Temperatūru apsildāmajos preses plauktos kontrolēja, izmantojot termopāri *TSP-50* ar mikroprocesora temperatūras regulatoru *TR-P/S*, kura precizitāte ir 1 grāds, bet mērapjoms no 20...750 grādiem pēc celsija. Loksnes virsmas temperatūra pēc izņemšanas no preses tika mērīta ar infrasarkanu staru temperatūras mērierīci *AMPROBE IR608A*, kuras mazākā iedaļas vērtība ir 0.1 grāds, bet mērapjoms līdz 400 grādiem pēc celsija. Telpas gaisa temperatūra tika mērīta ar trīs dzīvsudraba termometriem, kuriem iedaļas vērtība ir 1 grāds pēc celsija, mērapjoms no -20 līdz 80 grādiem pēc celsija.

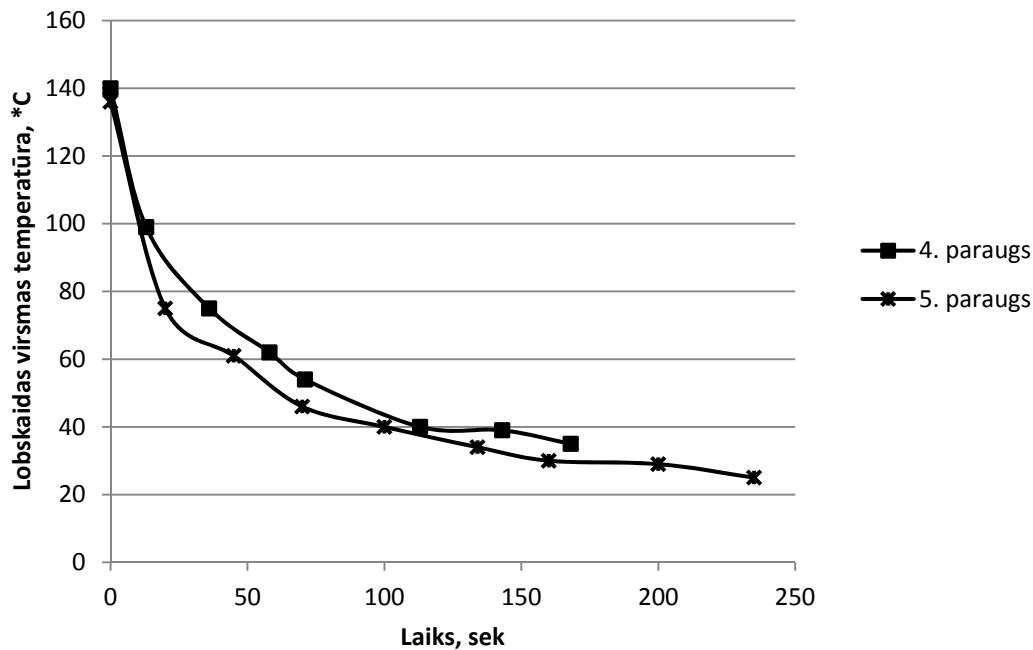
Lobskaidas dimensijas noteica ar elektronisku bīdmēru PARIERE 8030/D, kuram iedaļas vērtība ir 0.01mm, bet mērapjoms 150 mm.



2.11. att. Loksnes ar nesimetrisku struktūru presēšana-līmēšana presē ar apsildāmiem, plakaniem plauktiem.

#### ***2.4.2. Nesimetriskas struktūras saplākšņa lokšņu liekšanās, samazinoties mitruma saturam***

Pēc paraugu izņemšanas no preses, tiem strauji samazinās temperatūra, līdz tā sasniedz telpas temperatūru: 16 °C. Gadījumā, kad 4 lobskaidu loksne tika līmēta pie 145 °C temperatūras, tās ārējo virsmu temperatūras izmaiņa parādīta 2.12. att. Virsmu temperatūra izmērīta ar infrasarkanā starojuma termometru „Amprobe IR608A”. Mitruma saturs tika noteikts, veicot svēršanu ar svariem „KERN”. Lai noteiktu lobskaidu sākotnējo mitrumu, izlases kārtā tās tika izžāvētas līdz mitruma saturam, kas tuvs 0%.



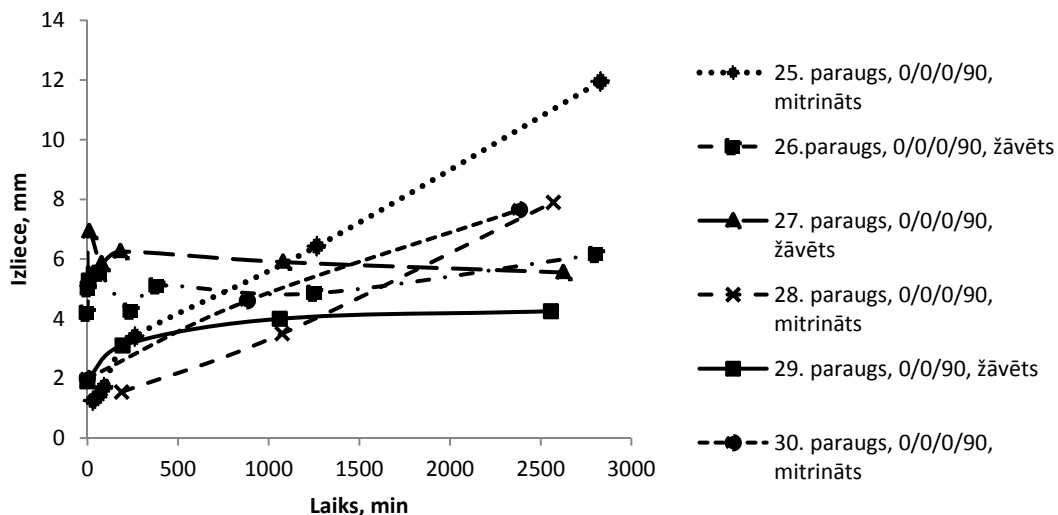
2.12. att. Ārējo virsmu temperatūras izmaiņa pēc loksnes izņemšanas no karstās preses, kuras plauktu vidējā temperatūra ir 145 °C.

Straujā temperatūras izmaiņa izraisa strauju mitruma izmaiņu, kas sekmē loksnes strauju saliekšanos.

Tika līmēti divu veidu paraugi- tādi, kuriem lobskaidas pirms līmēšanas tika izžāvētas no 8% līdz vidējam mitruma saturam 1...2% (26., 27. un 29. paraugs) un tādi, kuriem lobskaidas tika mitrinātas no 8% līdz 10...11%, ievietojot tās noslēgtā telpā ar paaugstinātu gaisa relatīvo mitrumu.

Pēc līmes uzklāšanas lobskaidu mitruma saturs žāvētajām lobskaidām pieauga vidēji par 7%, bet mitrinātajām par 4.5%.

Izlieču mērījumi parāda, ka paraugi ar žāvētajām lobskaidām pēc izņemšanas no preses ļoti ātri sasniedz savu maksimālo izlieci, bet tām, kuras tika mitrinātas, lēni. Maksimālā izliece mitrinātajiem paraugiem būtiski pārsniedz maksimālo izlieci paraugiem ar žāvētām lobskaidām (skat. 2.13. att.).



2.13. att. Iepriekš mitrinātu un žāvētu paraugu izlieces maiņa laikā.

Tabula 2.3.

Paraugu mitruma saturs, struktūra

Parauga nr.	Lobskaidu orientācija	Lobskaidu mitruma saturs pirms līmēšanas				Vidējais mitrums pēc līmes uznešanas*
		1	2	3	4	
25	0/0/0/90	8.73%	10.29%	10.26%	7.63%	15.51%
26	0/0/0/90	2.94%	1.39%	1.88%	2.01%	9.23%
27	0/0/0/90	0.66%	0.48%	0.1%	1.06%	8.4%
28	0/0/0/90	8.25%	9.35%	9.46%	9.98%	17.50%
29	0/0/90	1.31%	1.08%	1.50%		10.30%
30	0/0/90	11.41%	10.69%	11.22%		18.07%
106	0/0/0/90	8.83%	9.29%	10.11%	7.92%	15.9%

\*Aprēķinā izmantots, ka sausais atlikums, kas tika eksperimentāli noteikts, ir vidēji 7%.

Tabula 2.4.

Aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās izlieces.

Parauga nr.	Mitruma izmaiņa, %	$f_{eksp}, mm$	$f_{aprēķin}, mm$	Atšķirība, %
25	20...11	15	20	25
26	16.4...12.8	8.3	8.1	2.5
28	23...13	13	18	28
29	16.5...13.15	6.6	6.2	6
30	21...12.5	10.6	15.7	32

Tabulā 2.4. redzams, ka loksnēm, kuras tika izgatavotas no iepriekš izžāvētām lobskaidām (26. un 29.), aprēķinātā izliece  $f_{aprēķin}$  no eksperimentāli

noteiktās atšķiras mazāk nekā 6%. Loksņēm, kuras tika izgatavotas no mitrinātām lobskaidām (25., 28. un 30.), aprēķinātā izliece ir par 30% lielāka nekā eksperimentāli noteiktā. Šī atšķirība ir skaidrojama ar to, ka šīm loksņēm liekšanās process noritēja relatīvi ilgā laika periodā (skat. 2.13. att.), un tādējādi koksnes materiāla īpašības laikā bija būtiski mainījušās, kā arī notikusi spriegumu relaksācija un šļūde.

#### ***2.4.3. Sākotnēji izliekto lokšņu termiskā apstrāde nolūkā novērst atgriezeniskās deformācijas***

Loksnes ar nesimetrisku struktūru, kuras ir saliektas ar mitruma starpību, var mainīt savu formu, ja mainās apkārtējās vides apstākļi. Tas izraisa nepieciešamību izolēt loksni no apkārtējās vides mitruma ietekmes. To daļēji var izdarīt, pārklājot loksni ar aizsargkārtu, kas būtiski samazina mitruma difūzijas kinētiku, bet pilnībā to neizslēdz. Tāpēc ir nepieciešams papildus veikt termisko apstrādi, kas būtiski samazina koksnes higroskopiskās īpašības. Kad loksne ir sasniegusi vēlamu formu, nepieciešams to noturēt nemainīgu, ko dara ar speciālu rāmi (skat. 2.14. att.). Nofiksētās, izliektās loksnes ievieto termiskās apstrādes skapī (skat. 2.15. att.), kurā tās tiek karsētas pie temperatūras 140...150 °C, 1.8...3.67 stundas. Pirms termiskās apstrādes paraugi tika 1.5 stundas žāvēti temperatūrā 100...110 °C, lai tie iegūtu vēlamu formu un termiskās apstrādes laikā iespējami maz mainītu formu.



2.14. att. Termiskās apstrādes rāmis izliektām, nesimetriskas struktūras saplākšņu loksņēm.



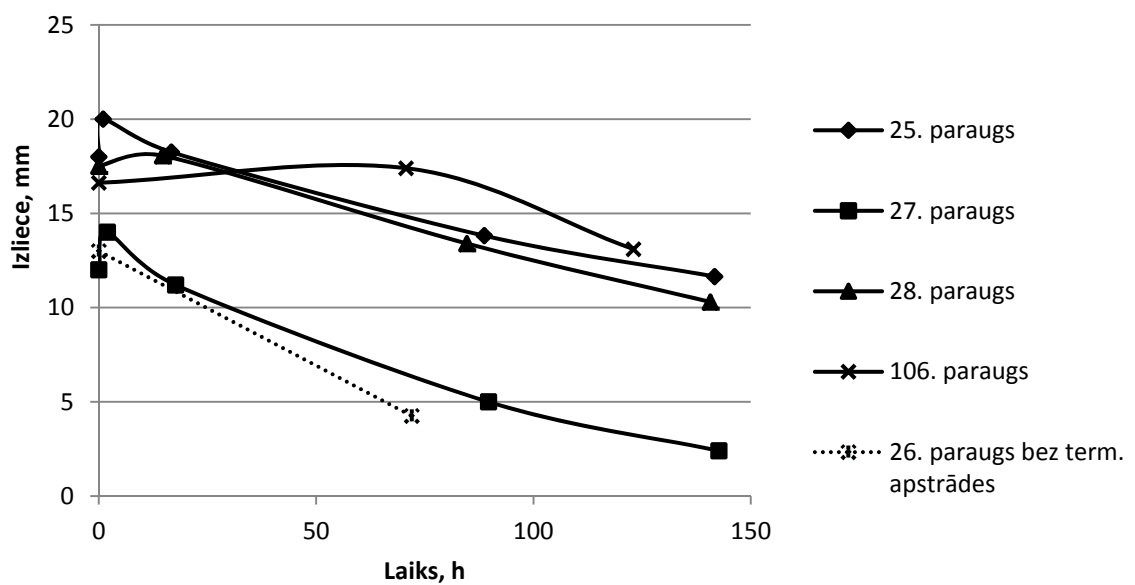
2.15. att. Paraugu termiskās apstrādes iekārta.

Tabula 2.5.

Termiskās apstrādes tehnoloģiskie parametri.

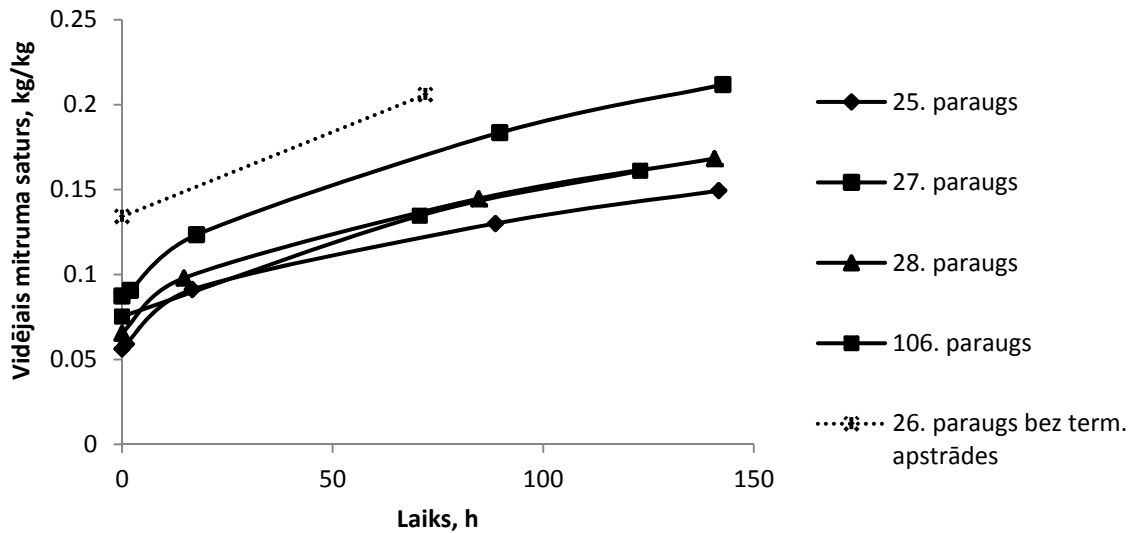
Parauga nr.	Mitruma saturs pēc žāvēšanas	Termiskās apstrādes laiks, h	Līmes sausais atlikums*, %
25	0.0172	2.67	5.6
27	0.031	1.8	
28	0.0179	3.67	6.5
106	0.017	3.67	7.5

\*Noteikts pieņemot, ka pēc termiskās apstrādes mitruma saturs ir 0%.

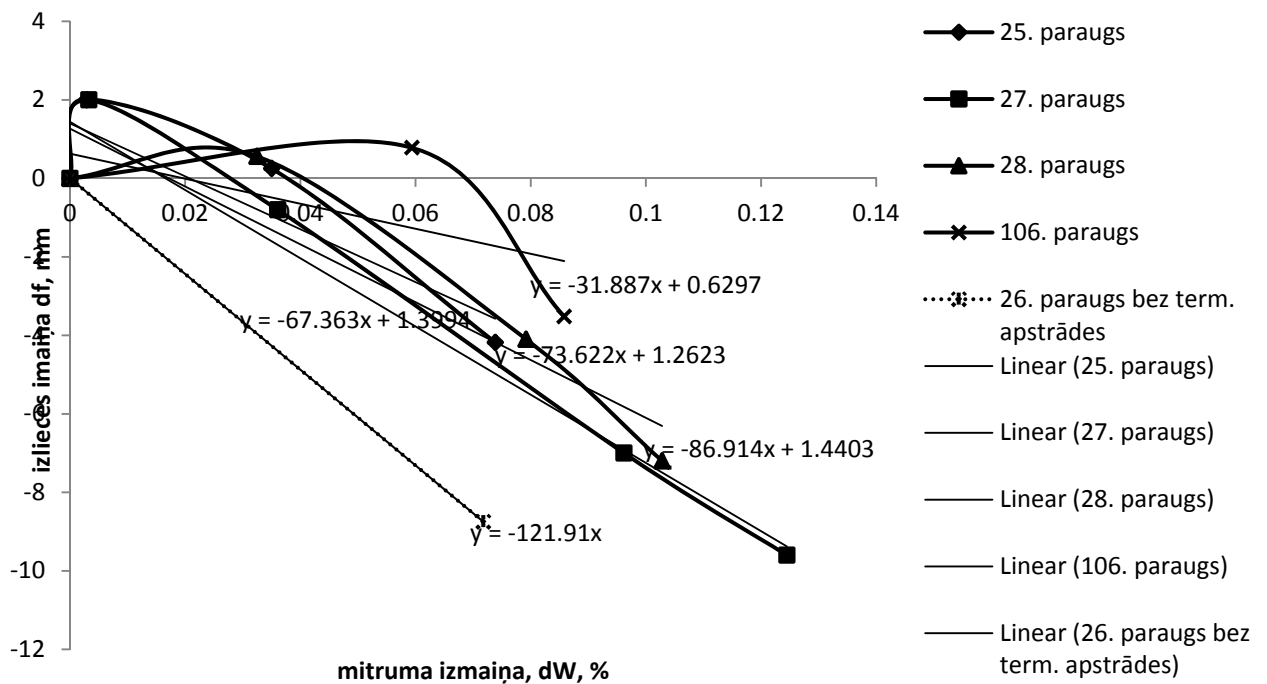


2.16. att. Izlieces izmaiņa laikā termiski apstrādātiem un neapstrādātiem paraugiem.

Paraugs bez termiskās apstrādes (26. paraugs) maina savu formu- izlieci daudz straujāk nekā tie paraugi, kuriem veikta termiskā apstrāde (skat. 2.16. att.). Redzams, ka 1.8 stundu ilga termiskā apstrāde 140...150 °C nav pietiekami ilga, jo sākotnējais (līdz 50 stundām pēc apstrādes) izlieces maiņas straujums ir tikai nedaudz mazāks, kā termiski neapstrādātai loksnei.



2.17. att. Vidējā mitruma satura izmaiņa laikā termiski apstrādātiem un neapstrādātiem paraugiem.



2.18. att. Izlieču izmaiņa atkarībā no paraugu vidējā mitruma satura izmaiņas.

Pēc termiskās apstrādes paraugu mitruma saturs nedaudz pieaug (skat. 2.17. att.), taču izmaiņas ātrums ir samazinājies līdz 2 reizēm tiem paraugiem, kuri tika apstrādāti ilgāk nekā 3 stundas.

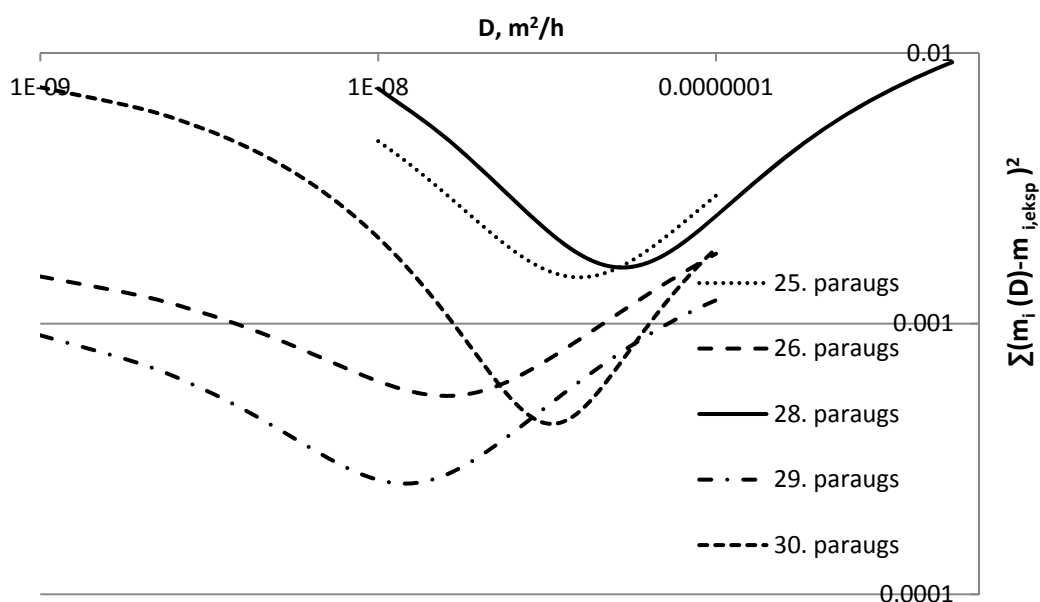
#### 2.4.4. Mitruma difūzijas ātruma novērtējums

Mitruma difūzijas koeficientu nosaka iterāciju ceļā. Veicot aprēķinus, nosaka mitruma saturu loksnes  $N$  punktos pa tās biezumu un maina mitruma difūzijas koeficientu tā, lai minimizētu starpību starp vidējo aprēķināto mitruma saturu  $m_i$  un eksperimentāli noteikto  $m_{i,eksp}$ :

$$\min_D \sum_{i=1}^N (m_i(D) - m_{i,eksp})^2 \rightarrow \min, \quad (2.7)$$

kur  $D$ - mitruma difūzijas koeficients ( $\frac{m^2}{h}$ ).

Aprēķinā pieņemts, ka loksnei sākotnējais mitruma saturs ir vienmērīgs pa tās biezumu, garumu un platumu un sakrīt ar eksperimentāli izmērīto vidējo mitruma saturu. Pieņemts, ka loksnei no abām pusēm iedarbojas gaiss ar relatīvo mitruma saturu 16% un telpas temperatūra ir 18 °C, kas izraisa mitruma samazināšanos.



2.19. att. Atšķirība starp eksperimentāli noteikto un aprēķināto vidējo mitruma saturu atkarībā no difūzijas koeficienta dažādiem paraugiem.

Tabula 2.6.

Eksperimentāli noteiktie un aprēķinātie difūzijas koeficienti pie mitruma satura 16% un temperatūras 20 °C

Parauga nr.	Vidējais difūzijas koeficients* $D, \frac{m^2}{h}$ , pirms termiskās apstrādes	Vidējais difūzijas koeficients* $D, \frac{m^2}{h}$ , pēc termiskās apstrādes	Atšķirība, %
25	$4.10 * 10^{-8}$	$2.10 * 10^{-8}$	50%
26	$1.46 * 10^{-8}$		
27	$8.00 * 10^{-8}$		
28	$5.58 * 10^{-8}$	$3.27 * 10^{-8}$	40%
29	$1.12 * 10^{-8}$		
30	$3.17 * 10^{-8}$		
Aprēķināts [114]	$9.13 * 10^{-8}$		

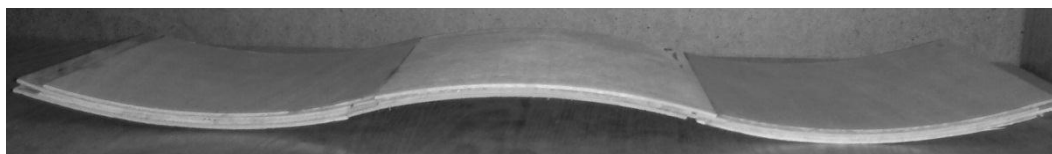
\* mitruma difūzijas koeficients noteikts pie mitruma atdošanas (samazināšanās).

Loksnēm, kuras izgatavotas no mitrinātajām lobskaidām, ir vidēji 3 reizes lielāks mitruma difūzijas koeficients, kā tām, kuras izgatavotas no iepriekš izžāvētām lobskaidām. Pēc termiskās apstrādes 25. paraugam mitruma difūzijas ātrums samazinās par 50%, bet 28. paraugam par 40%. Pēc termiskās apstrādes ievērojami samazinās rukuma/uzbriešanas deformāciju izraisītie pārvietojumi (skat. nodaļu 2.5.).

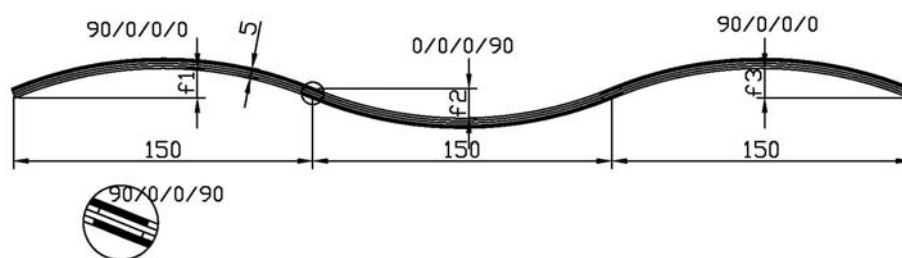
#### 2.4.5. Viļņotas formas saplākšņa lokšņu iegūšanas paņēmieni

Lai izgatavotu saplākšņa plātņu vai čaulu ribojumu, nepieciešami viļņotas formas elementi. Šos elementus var iegūt, izmantojot nesimetriskas struktūras saplākšni ar diskrēti mainīgu lokskaidu orientāciju. Eksperimentāli tika izgatavoti trīs šādi paraugi, viens parādīts 2.20.att. Paraugu izmēri un struktūra bija vienāda, atšķirās vidējais mitruma saturs pirms līmēšanas: 9.82% (1. paraugs), 13.92% (2. paraugs) un 17.43% (3. paraugs). Detalizēts apraksts par izmantoto lokskaidu mitruma saturu dots tabulā 2.7. Otrajam un trešajam paraugam paaugstināts mitruma saturs tika iegūts, kondicionējot tos virs noslēgtas ūdens tvertnes 3 un 7 diennaktis. Visi paraugi tika salīmēti presē bez apsildāmiem, plakaniem plauktiem, izmantojot līmi *CASCO SILVE* (saistviela- polivinilacetāts uz ūdens bāzes). Līmēšanas process notika 1h pie vidējā spiediena 1.5 MPa (spriegumu relaksācijas dēļ spriegums pakāpeniski samazinājās).

Pēc salīmēšanas paraugi tika kondicionēti telpā ar vidējo temperatūru 18 °C un vidējo gaisa relatīvo mitruma saturu 50%.



2.20.att. Eksperimentāli izgatavotais paraugs.



2.21.att. Eksperimentālā parauga izmēri un lokskaidu struktūra.

Tabula 2.7.

## Parauga lobskaidu mitruma saturs

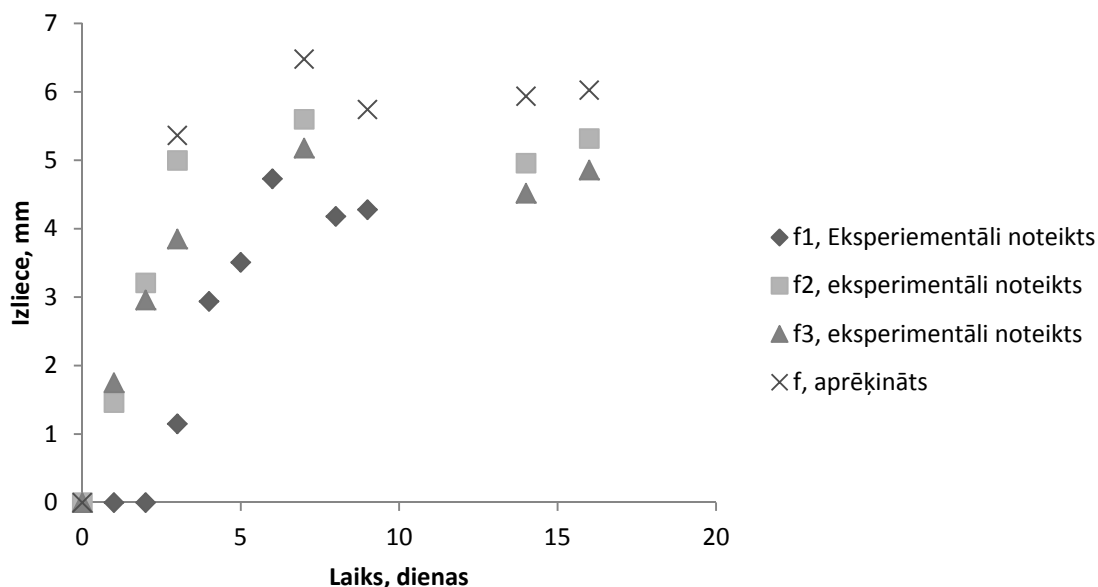
paraugs				paraugs					paraugs				
Lobsk. Nr.	Sākuma masa, g	Masa pie 0% mitruma, g	Mitruma saturs pirms līmēšanas	Lobsk. Nr.	Sākuma masas, g	Masa pēc mitrināšanas (3 dienas), g	Masa pie 0% mitruma, g	Mitruma saturs pirms līmēšanas	Lobsk. Nr.	Sākuma masa, g	Masa pēc mitrināšanas (7 dienas), g	Masa pie 0% mitruma, g	Mitruma saturs pirms līmēšanas
130	21.46	19.59	9.55%	301	19.99	21.16	18.21	16.23%	104	20.95	22.77	19.08	19.34%
144	20.88	19.05	9.61%	302	19.43	20.32	17.70	14.83%	105	21.53	23.17	19.61	18.16%
143	20.57	18.78	9.53%	303	21.53	22.38	19.61	14.13%	106	20.7	22.1	18.5	17.60%
178	21.08	19.22	9.68%	304	20.85	21.56	8.99	13.54%	107	21.2	22.59	19.31	17.00%
190	19.6	17.86	9.74%	305	20.51	21.16	18.68	13.28%	108	21.1	22.5	19.28	16.70%
227	20.97	19.04	10.14%	306	0.63	21.24	18.79	13.05%	109	20.83	22.11	18.97	16.55%
124	20.94	19.05	9.92%	307	20.7	21.29	18.85	12.93%	110	20.61	21.86	18.77	16.46%
123	20.85	18.99	9.79%	308	20.52	21.15	18.69	13.17%	111	20.58	21.86	18.74	16.63%
122	20.8	18.83	10.46%	309	20.63	21.31	18.79	13.42%	112	21.25	22.64	19.35	16.98%
121	21.27	19.4	9.64%	310	20.14	20.85	18.34	13.67%	113	20.9	22.33	19.03	17.31%
120	20.77	18.91	9.84%	311	20.58	21.4	18.74	14.17%	114	21.33	22.88	19.43	17.78%
119	20.85	18.96	9.97%	312	20.28	21.19	18.47	14.73%	115	21.05	22.73	19.17	18.56%
<b>Kopā</b>	<b>250.04</b>	<b>227.68</b>	<b>vid. 9.82%</b>	<b>kopā</b>	<b>245.79</b>	<b>255.01</b>	<b>223.85</b>	<b>vid. 13.92%</b>	<b>Kopā</b>	<b>252.1</b>	<b>269.61</b>	<b>229.6</b>	<b>vid. 17.43%</b>

Liekšanās procesā tika mērītas izlieces  $f_1$ ,  $f_2$  un  $f_3$  (skat. 2.21.att.), kā arī vidējā parauga masa. Izlieču mērīšana veikta ar mehānisku izlieču mērītāju *SHOCK-PROOF SCALA* ar magnētisku bāzi, kuram mazākā iedaļas vērtība ir 0.01 mm. Svēršana veikta ar svariem *KERN EMP 200-2*, kuriem minimālā iedaļas vērtība ir 0.01 g.

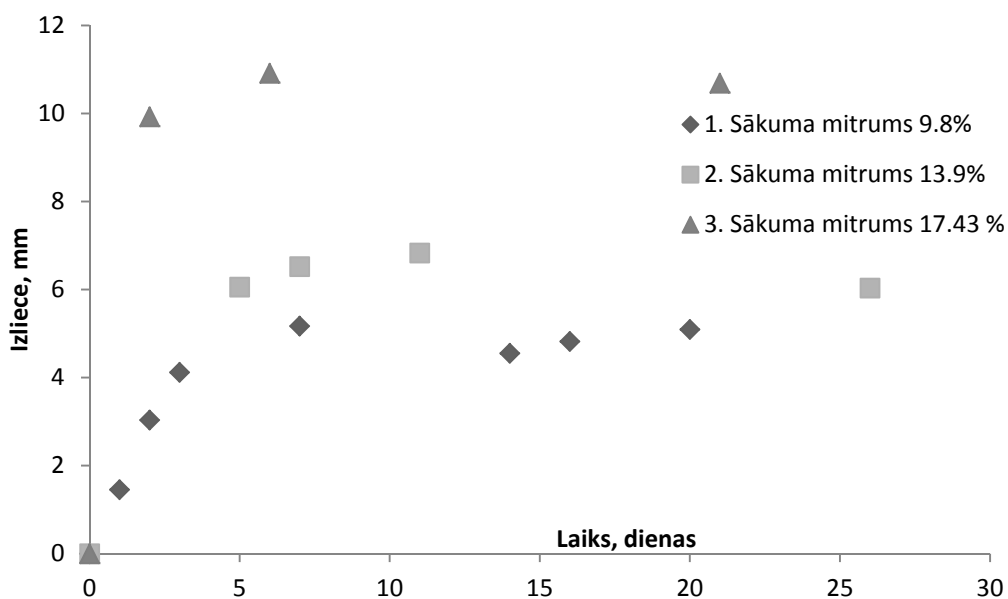
Izmantojot vidējās masas izmaiņu, tika noteikts, kā mainās mitruma saturs paraugā, pieņemot, ka pa garumu un platumu neveidojas mitruma gradients.

Iegūtie rezultāti pirmajam paraugam tika salīdzināti ar aprēķinātiem. Izlieces izmaiņa laikā pirmajam paraugam parādīta 2.22.att. Redzams, ka aprēķinātā izliece ir vidēji par 10% lielāka kā eksperimentāli noteiktā. Tas ir skaidrojams ar koksnes izteiktajiem šļūdes un spriegumu relaksācijas efektiem, kas lieces procesā var būtiski izmainīt formu, taču aprēķinā tie netika ņemti vērā.

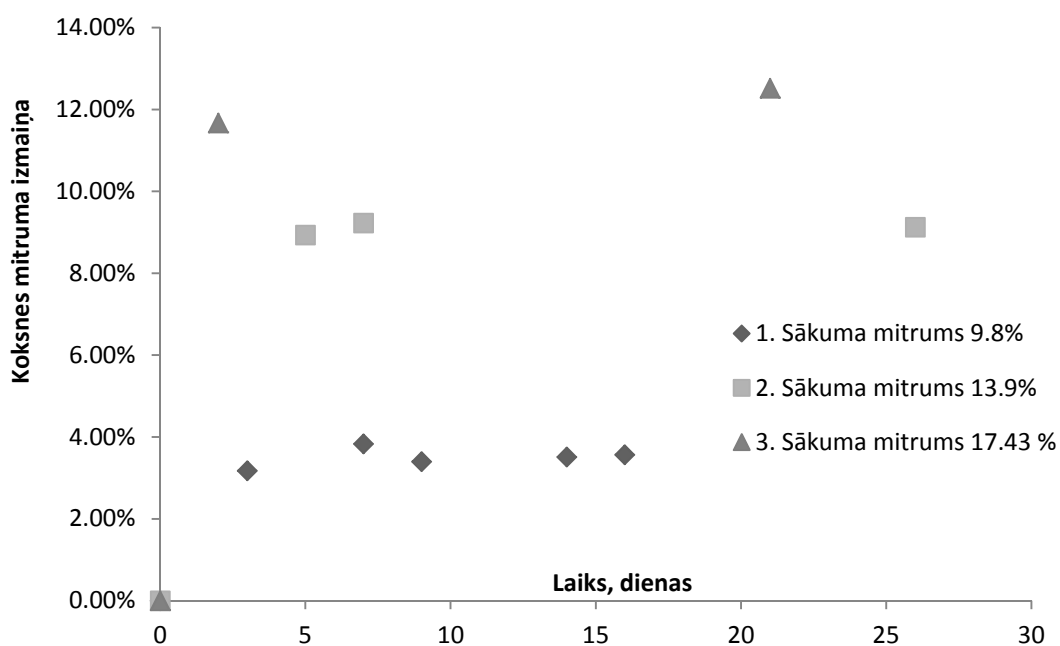
2.23.att. parādīta vidējās izlieces izmaiņa visiem trim paraugiem. Visiem paraugiem redzams, ka maksimālā izliece tiek sasniegta vidēji pēc vienas nedēļas kondicionēšanas. Vidēji dažu dienu laikā kopš kondicionēšanas uzsākšanas paraugi iegūst telpas līdzsvara mitruma saturu, bet, tā kā izliece vēl nav sasniegusi savu maksimumu, tad var secināt, ka loksnes iekšienē pastāv mitruma gradients.



2.22.att. Eksperimentāli noteiktā un aprēķinātā izliece laikā 1. paraugam (sākuma mitrums 9.8%).



2.23.att. Vidējās izlieces izmaiņa laikā trīs paraugiem ar dažādu sākotnējo mitruma saturu.

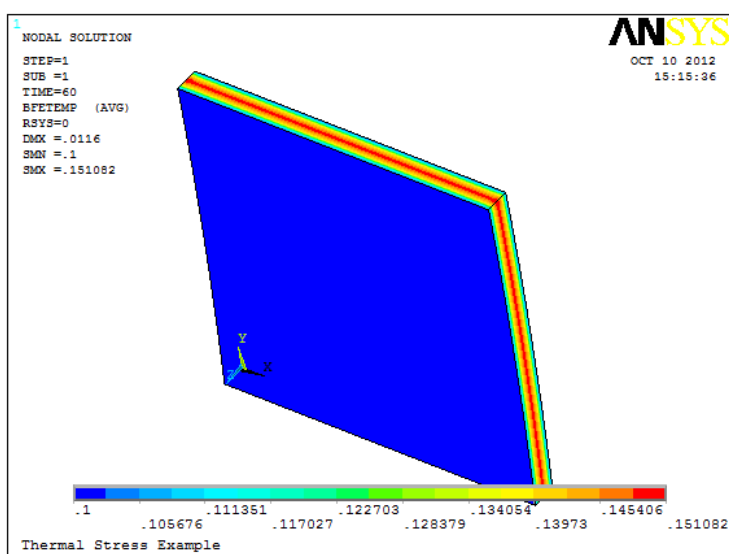


2.24.att. Koksnes mitruma samazinājums- izmaiņa laikā, sākot no brīža pēc salīmēšanas.

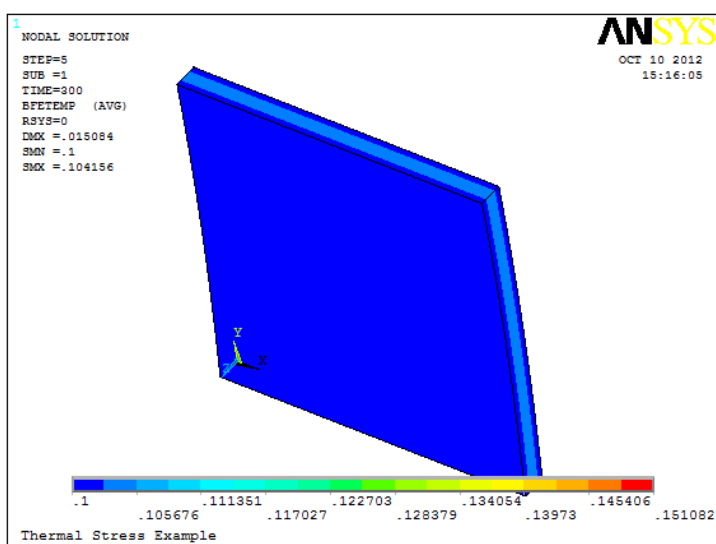
Veicot kondicionēšanas procesa skaitlisku simulāciju ar galīgo elementu metodi, iegūts mitruma satura sadalījums pa loksnes biezumu dažādos laika momentos (skat. 2.25.att., 2.26.att., 2.27.att.). Līdzīgi iegūta atbilstošajos laika momentos izlieces izmaiņa laikā (skat. 2.28.att.). Aprēķinā izmantota komerciālā datorprogramma *ANSYS 13*. Mitruma difūzija modelēta ar galīgo elementu *SOLID87*. Uz plātnes augšas un apakšas pielikts nemainīgs mitrums, kas vienāds ar koksnes

līdzsvara mitrumu, ja apkārtējās telpas gaisa relatīvais mitruma saturs ir 50%. Tā kā mitruma difūziju var modelēt ar Fika likumu, kurš ir identisks, no matemātikas viedokļa, Furjē siltumvadīšanas likumam- paraboliskais parciālais diferenciālvienādojums, tad tika izmantota siltumapmaiņas procesu modelēšanas tehnika.

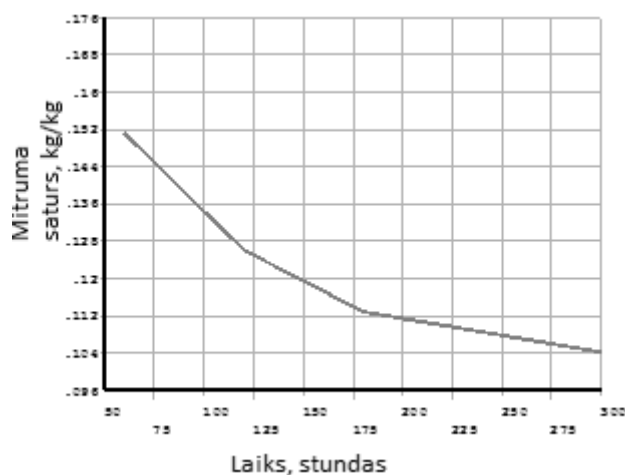
Pēc mitruma difūzijas aprēķināšanas diskrētos laika momentos, iegūtie rezultāti tika izmantoti konstrukcijas spriegumu-deformāciju aprēķinā. Tajā tika izmantots galīgais elements *SOLID187*.



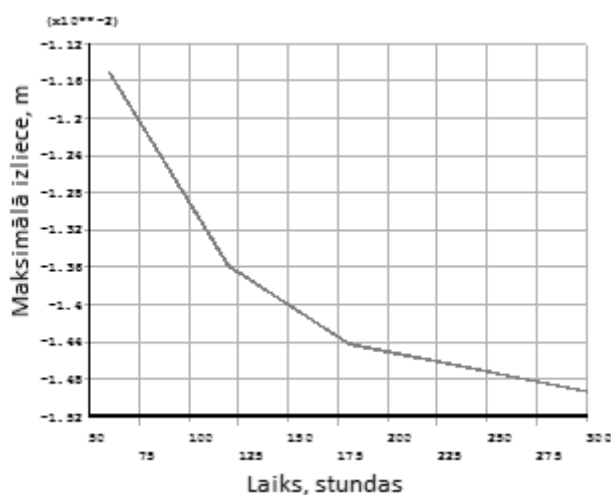
2.25.att. Mitruma saturs pēc 60 stundām.



2.26.att. Mitruma saturs pēc 300 stundām.



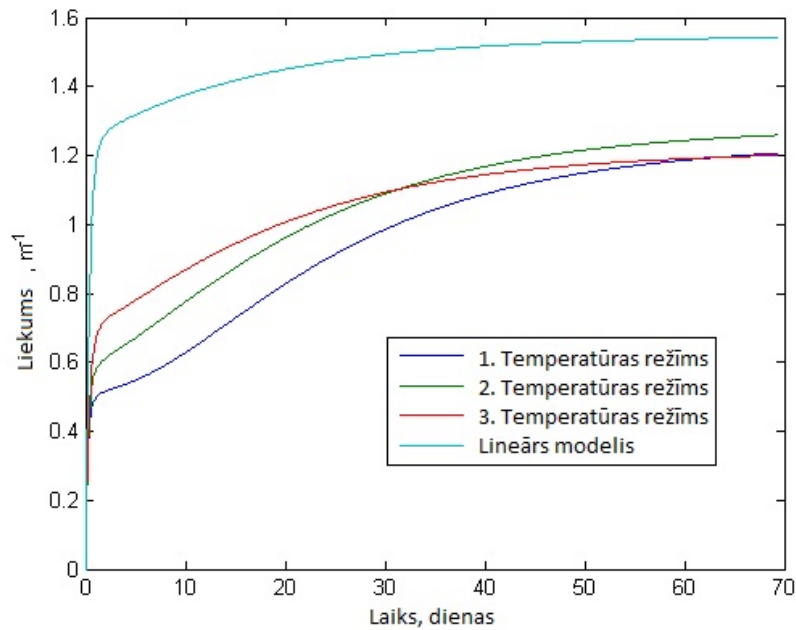
2.27.att. Aprēķinātā mitruma izmaiņa laikā (stundas) vidējos slāņos, izmantojot eksperimentāli noteiktu difūzijas koeficientu (skatīt iepriekšējo nodaļu)  $5.5862E-08$  ( $m^2/h$ ).



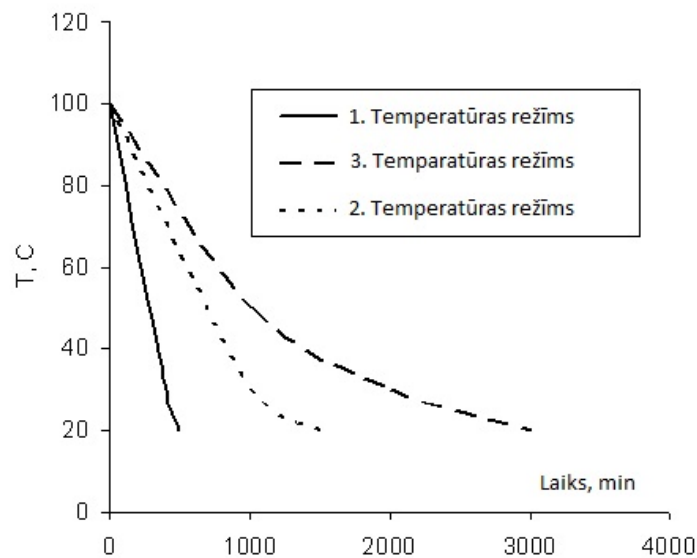
2.28.att. Aprēķinātās maksimālās izlieces izmaiņa laikā.

## 2.5. Racionāla gaisa kondicionēšanas temperatūras un lokšņu termiskās apstrādes režīma noteikšana

Lai varētu efektīvi izmantot nesimetriskās struktūras lokšņu izgatavošanas tehnoloģiju, nepieciešams noteikt temperatūras režīmu, kādā nepieciešams, tikko salīmēto loksnī kondicionēt, lai tā minimālā laikā iegūtu nepieciešamo izlieci un iegūtā forma būtu laikā noturīga. Tā kā nesimetriskas struktūras loksnēm pēc izliekšanās var notikt arī pretējais process- atpakaļ liekšanās, nepieciešams tās termiski apstrādāt optimālā temperatūrā un laikā, kurus ir nepieciešams noteikt.



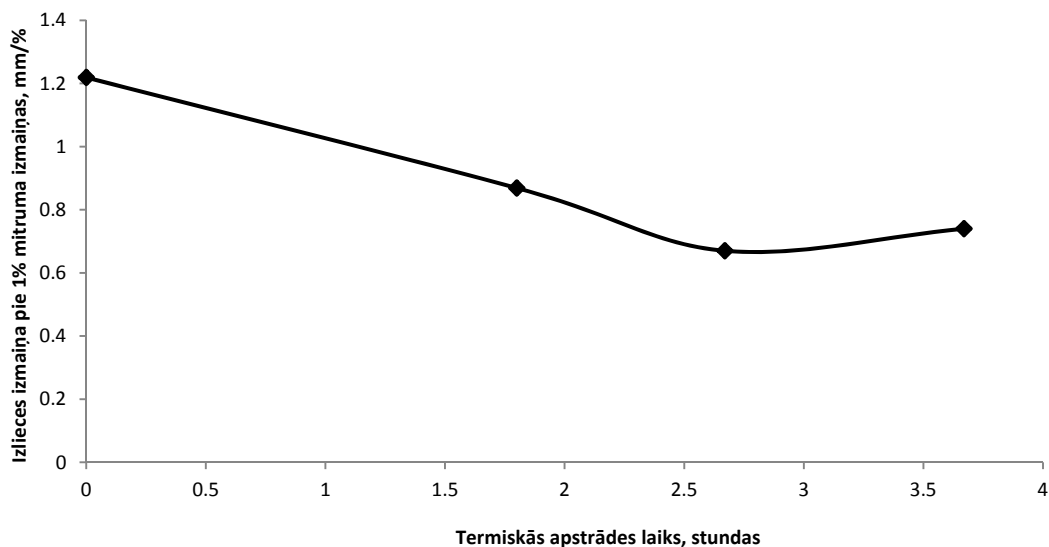
2.29. att. Loksnes liekumu maiņa atkarībā no kondicionēšanas temperatūras režīma.



2.30. att. Kondicionēšanas temperatūras režīmi.

2.30. att. parādīti trīs kondicionēšanas režīmi. Visos režīmos pieņemts, ka loksnes temperatūra, izņemot to no preses, ir 100 °C. Pēc tam kondicionēšanas procesā pakāpeniski tiek pazemināta loksnes temperatūra, līdz tā sasniedz 20 °C.

No 2.29. att. redzams, ka lielāko loksnes liekumu iespējams iegūt pie 2. kondicionēšanas režīma, kas ilgst 1 diennakti. Ja nepieciešams iegūt pēc iespējas lielāku liekumu, tad nepieciešams temperatūru pazemināt lēnāk- kondicionēšanas laiks aptuveni 2 diennaktis (3. kondicionēšanas režīms).



2.31. att. Termiskās apstrādes laika ietekme uz izlieces un mitruma izmaiņu attiecību.

Termiskās apstrādes temperatūrai nevajadzētu būt augstākai par 160 °C, jo pie šādas temperatūras koksnes stiprība būtiski samazinās, bet pārlietu zema temperatūra ievērojami paildzina apstrādes laiku. Kā racionālākais termiskās apstrādes laiks tika izvēlēts 140...150 °C.

Minimālu izlieču izmaiņas jutīgumu pret mitruma izmaiņu var panākt, ja karsēšanas laiks ir 2.5..3 h pie T=140..150 °C (skat. 2.31. att.).

Izlieču izmaiņas jutīgums pret mitruma izmaiņu  $\frac{df}{dW}$  ir samazinājies par 45%, ja tiek karsēts 2.7 stundas pie T=140...150 °C, salīdzinot ar loksni bez termiskās apstrādes.

### 3. APRĒĶINA METODIKA RIBOTAS SAPLĀKŠŅA PLĀTNES ELEMENTAM AR PLAKANĀM RIBĀM RACIONĀLU ŠĶĒRSGRIEZUMA ĢEOMETRISKO PARAMETRU NOTEIKŠANAI

#### 3.1. Racionāla makrostruktūra

Mašīnbūvē plaši tiek izmantotas saplākšņa daudzslāņveida plātnes, uz kurām iedarbojas kustīgas- statiskas slodzes, piemēram, auto treileru grīdas konstrukcijā (skat. 3.1. att.), uz kuru darbojas divas kustīgās slodzes, kuras rodas no auto iekrāvēja priekšējiem riteņiem. Tradicionālai saplākšņa loksnei šādā konstrukcijā veidojas bojājumi vairāk noslogotajās vietās. Tas izraisa nepieciešamību izveidot ribotas struktūras plātņveida konstrukcijas elementu ar racionālu šķērsgriezumu.

Racionāla ribotā saplākšņa konstrukcijas elementa struktūra parādīta 3.2. att. Saplākšņa konstrukcijas elements sastāv no augšējā un apakšējā apšuvuma ar biezumiem  $t_1$  un  $t_2$  attiecīgi. Vidusslānis sastāv no vertikālām saplākšņa ribām, kuru biezums ir  $t_3$  un, ja nepieciešams, putu materiālu pildījuma. Ribas tiek pielīmētas pie augšējā un apakšējā apšuvuma.

Šāda veida konstrukcijas elementam ir samazinātas mitruma izraisītās rukuma un uzbriešanas deformācijas, jo saplākšņa ribas plātnes transversiālajā virzienā maz deformējas, mainoties mitruma saturam, jo liela daļa koksnes šķiedru ir orientēta transversiālajā virzienā. Iepildot putu siltumizolācijas materiālu, starp ribām būtiski samazinās siltumvadītspēja.

Racionāls šķērsgriezums plātnei ar iepriekš paredzētu biezumu definējas ar četriem parametriem:

$$x = \{t_1, t_2, t_3, n\}, \quad (3.1)$$

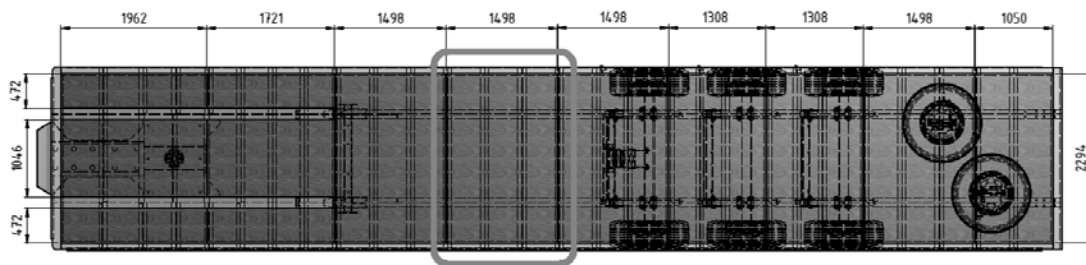
kur  $n$ - plātnes ribu skaits, kuru nosaka izmantojot šādu sakarību:

$$n = \frac{L_1}{b} + 1, \quad (3.2)$$

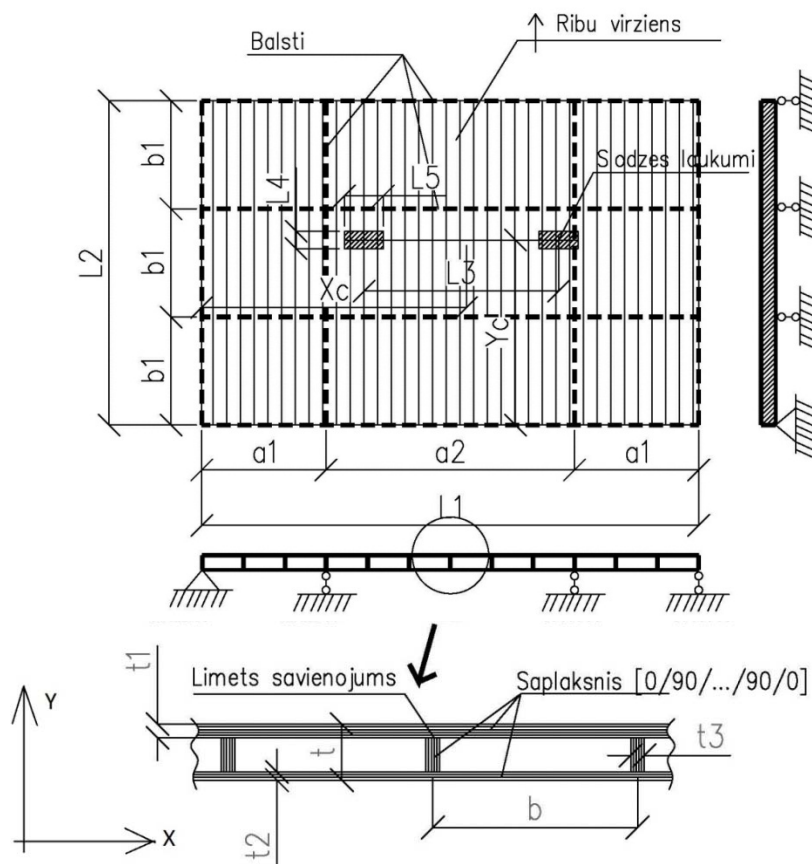
kur  $L_1$  –plātnes platums,  $b$ - attālums starp ribu centriem.

Plātne balstīta pa kontūru un diviem starp balstiem abos virzienos, kuri parādīti ar raustītām līnijām 3.2. att.

Slodzes laukumu izmēri ir relatīvi mazi (90x180 mm), salīdzinot ar plātnes tipveida izmēriem (2294x1498 mm), tāpēc tos iespējams aprēķināt aizstājot ar divām punktveida slodzēm. Attālums starp slodžu laukumu centriem ir  $L_3$ , kurš ir piesaistīts auto iekrāvēju priekšējās ass izmēriem. Tā kā slodzes var mainīt savu novietojumu, to izvietojumu definē ar slodžu laukumu centra koordinātēm  $X_c$  un  $Y_c$ .



3.1. att. Auto treilera grīdas shēma.



3.2. att. Tipveida auto treilera grīdas loksnes shēma un šķērsriezums.

### 3.2. Optimizācijas metodoloģija

Saplākšņa kompozītmateriāla konstrukcijas elementa šķērsriezuma ģeometriskie parametri (3.1) ir optimizēti, izmantojot šādu, speciāli izstrādātu algoritmu:

1. Nodefinē galvenos plātnes parametrus- platumu  $L_1$ , garumu  $L_2$ , attālumu starp balstiem  $b_1, a_1, a_2$ , kopējo plātnes biezumu  $t$ , slodzes laukumu izmērus  $L_4, L_5$  un slodzes lielumu  $Q$  uz katra slodzes laukuma.
2. Nosaka virzienu, kurā nepieciešams orientēt ribas (parasti īsākā laiduma virzienā), veicot iekšējo piepūļu aprēķinu plātnei ar vienmērīgi izkliedētu slodzi.
3. Nosaka visbīstamāko novietojumu slodžu laukumiem ( $X_c, Y_c$ ), kas izraisa maksimālos spriegumus un izlieci, veicot aprēķinus pēc raksturīgākajām slodžu kombinācijām.
4. Nosaka racionālus šķērsriezuma ģeometriskos parametrus  $x=\{t_1, t_2, t_3, n\}$ , dažāda izmēra plātnēm pie vairākiem slodžu līmeņiem, izmantojot pielāgotu Ģenētisko Algoritmu.
5. Izvēlas racionālu Mākslīgā Neironu Tīkla arhitektūru un veic tā trenēšanu, pēc iepriekšējā soli iegūtajiem datiem.
6. Testē Mākslīgo Neironu Tīklu, un nosakot vai tas var noteikt optimālus ģeometriskos parametrus ar nepieciešamo precizitāti.
7. Lieto Mākslīgo Neironu Tīklu optimālu ribotu saplākšņa konstrukcijas elementu projektēšanā.

Trenēta Mākslīgā Neironu Tīkla izmantošana rada iespēju būtiski paātrināt konstrukcijas elementu projektēšanas procesu, jo katrā konkrētā gadījumā atkārtota optimizēšana ir darbietilpīgs process.

Piedāvātā aprēķina metodika ir universāla, kas balstīta uz Ģenētisko Algoritmu un Mākslīgo Neironu Tīklu un to var izmantot, optimizējot plaša spektra konstrukcijas elementus, piemēram, auto priekšējo daļu aizsargsistēmas [66], lai iegūtu labākas to īpatnējās stiprības, stinguma rādītājus, siltumvadītspējas, rukuma, uzbriešanas, skaņas izolācijas īpašības. Ģenētiskā Algoritma vietā var lietot arī skudru kolonijas algoritmu (*Ant colony algorithm*) [87, 112] vai atdzesēšanas simulācijas algoritms (*Simulated annealing algorithm*) [95].

### 3.2.1. Ģenētiskā algoritma (GA) pielāgošana

Vispārīgā gadījumā konstrukcijas optimizācijas problēma tiek definēta šādi [81]:

$$\begin{cases} \text{Minimize}(f(x)) \\ g_i(x) \leq 0, i = 1..m \\ h_j(x) = 0, j = 1..p \end{cases} \quad (3.3)$$

kur  $x$  – optimizējamo lielumu vektors,  $f(x)$  – mērķa funkcija,  $g_i(x), h_j(x)$  – ierobežojumi, kas var būt vienādību un/vai nevienādību formā.

Ģenētiskais Algoritms tiešā veidā var tikt lietots tikai optimizācijas problēmām bez ierobežojumu vienādojumiem vai nevienādībām. Tāpēc problēma (3.3) tiek pārveidota par optimizācijas problēmu bez ierobežojumiem, izmantojot soda funkcijas (*penalty functions*) [81]:

$$\begin{aligned} & \text{Minimize}(\Phi(x)), \\ & \Phi(x) = f(x) + \sum_{i=1}^m r_i (G_i(x))^2 + \sum_{j=1}^p R_j (h_j(x))^2, \end{aligned} \quad (3.4)$$

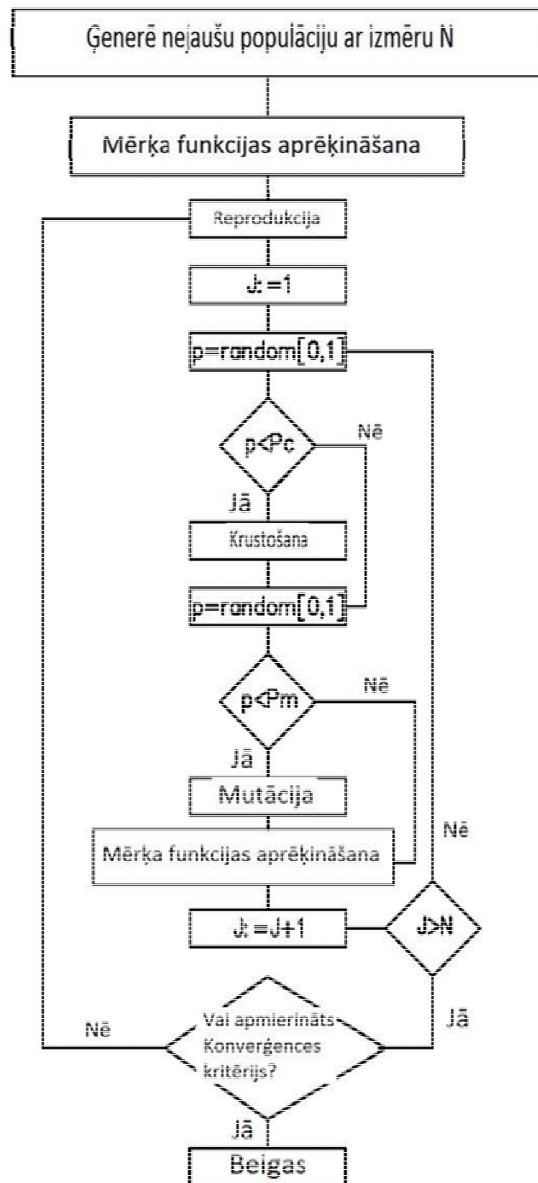
kur  $r_i, R_j$  – soda funkciju parametri, kuru vērtības parasti ir lieli pozitīvi skaitļi.

Ierobežojumus nevienādību veidā-  $g_i(x)$  pārveido šādi:

$$G_i(x) = \begin{cases} g_i(x), g_i(x) > 0 \\ 0, g_i(x) \leq 0 \end{cases} \quad (3.5)$$

Soda funkciju parametri dod iespēju grupēt ierobežojumus pēc to nozīmīguma- svarīgākiem lieto lielākas parametru vērtības. Funkcijas  $G_i(x), h_j(x)$  tiek kāpinātas kvadrātā, lai izvairītos no negatīvām vērtībām, jo tiek risināts minimizācijas uzdevums.

Ģenētiskais Algoritms ir balstīts uz dabiskās ģenētikas un dabīgās atlasē principiem- izdzīvo labākais un piemērotākais konkrētiem apstākļiem. Algoritmā tiek izmantoti dabiskās ģenētikas pamatoperātori- reprodukcija, krustošānās un mutācijas [36, 106]. Ģenētiskā algoritma vienkāršota blokshēma parādīta 3.3. att.



3.3. att. Ģenētiskā algoritma blokhēma.

Algoritma sākumā tiek ģenerēta sākotnējā populācija, kas sastāv no  $N$  vektoriem, kur katrs vektors nosaka savu optimizējamo lielumu  $x$  (3.1) kombināciju. Katram vektoram tiek aprēķināta mērķa funkcijas (3.4) vērtība. Pēc tam tiek ģenerēti citi optimizējamo parametru vektori, iedarbojoties uz populāciju ar ģenētiskajiem operātoriem- reprodukciju, krustošanu un mutāciju [9, 39, 101]. Evolūcijas veidā tiek iegūti arvien optimālāki ribota saplākšņa konstrukcijas elementa ģeometriskie parametri.

**Reprodukcija** ir pirmais ģenētiskais operators, kurš iedarbojas uz populāciju un tā uzdevums ir izvēlēties labākos indivīdus- plātnes ģeometriskos parametru

vektorus, kuri dod mazākās mērķa funkcijas vērtības.

**Krustošana** ir otrais ģenētiskais operators, kurš iedarbojas uz populāciju ar noteiktu varbūtību  $P_c$ . Šis operators pēc nejaušības principa izvēlas divus optimizējamo parametru vektorus (sauc par “vecākiem”) un pēc noteikta algoritma, izmainot šo vektoru koeficientu bināros kodus, iegūst divus jaunus vektorus (sauc par “bērniem”). Eksistē arī metodes, kurās neizmanto bināros kodus, bet tiešā veidā pārveido decimālos skaitļus [81].

Krustošanas operators pēc nejaušības principa ģenerē veselu skaitli intervālā no 1 līdz  $j$ , kur  $j$ - aplūkojamā optimizējamā parametra binārā koda garums. Izmainot binārā koda  $i$ -to skaitli no 0 uz 1 vai otrādi, kur  $i$  ir nejauši uzģenerētais skaitlis, tiek iegūta jauna parametra vērtība. Iegūtais jaunais vektors tiek saglabāts, ja tas dod mazāku mērķa funkcijas vērtību.

**Mutācijas** operators iedarbojas ar mazu varbūtību  $P_m$  uz jauniegūtajiem binārajiem kodiem. Operators izmaina bināro kodu attiecīgo ciparu no 0 uz 1 vai otrādi ar mazu varbūtību  $P_c < 0.01$ , tādējādi iegūstot jaunu optimizējamo parametru vērtību, kura tiek saglabāta tikai tad, ja tā dod mazāku mērķa funkcijas vērtību.

### ***3.2.2. Racionāls Mākslīgo Neironu Tīkls optimālu parametru prognozēšanai***

Mākslīgo Neironu Tīkla pamatā ir iegūtās atziņas par bioloģisko nervu sistēmu [34]. Izmantojot daudzus vienkāršojumus, bioloģiskā nervu sistēma var tikt modelēta kā šūnu ķermeņu kopa (neironi), kuru veido pārklājošas membrānas, dendrīti, sinapses un aksoni. Katram šūnu ķermenim apkārt atrodas dendrītu kopums, kas ir savienots ar šūnas ķermeni, izmantojot sinapses, kā arī var tikt savienoti ar citiem šūnu ķermeņiem, izmantojot aksonus. Katrs dendrīts nosūta elektroķīmisku signālu šūnas ķermenim, un, ja šo signālu kopējais spēks ir pietiekami liels, tad šūnas ķermeņa potenciāls tiek caursists, un tiek uzģenerēts jauns signāls, kurš tiek nosūtīts caur aksoniem tālāk uz nākamo neironu. Kopējais neironu skaits cilvēka smadzenēs ir aptuveni  $10^{11}$ , taču aplūkotajā ribotā plātņveida konstrukcijas elementa šķērsriezuma ģeometrisku parametru optimizācijā pietiek ar 20 neironu tīklu.

Mākslīgo Neironu Tīkls, kas ir matemātisks modelis procesiem, kas norit smadzenēs, tiek izmantots daudzu sarežģītu inženierzinātnisku uzdevumu risināšanai [35, 65], tai skaitā funkciju aproksimācija, attēlu atpazīšana (*pattern recognition*),

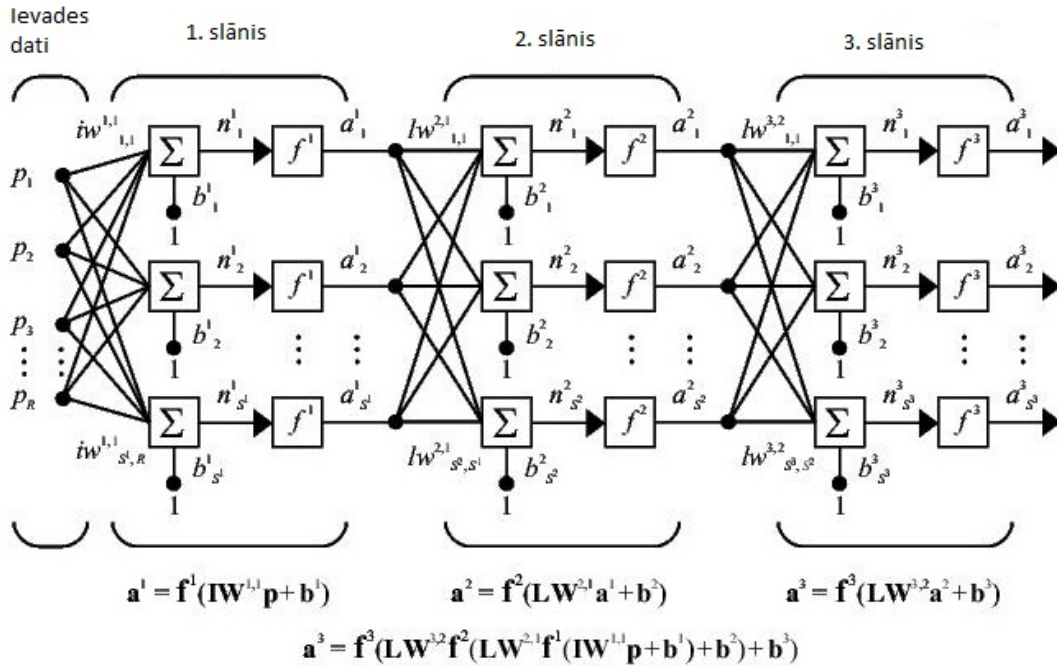
identifikācija, klasifikācija, skaņu atpazīšana [22] u.c. Slodzi nesošu konstrukciju aprēķinos Mākslīgo Neironu Tīkls ir plaši izmantots ģeotehnikas uzdevumos, piemēram, lai prognozētu grunšu nestspēju [23, 30, 46], kā arī betona spiedes stiprības prognozēšanai [48].

Mākslīgo Neironu Tīkls sastāv no vairākiem slāņiem, savukārt katrs slānis sastāv no ievades parametra  $p$ , svara koeficienta  $w$ , tieksmes koeficienta  $b$  (*bias*) un aktivācijas funkcijas  $f$ . Slāņa izvades dati tiek aprēķināti izmantojot šādu sakarību:

$$a = f(w \cdot p + b) . \quad (3.6)$$

Mākslīgo Neironu Tīkls, kas sastāv no trīs slēptajiem slāņiem un ievades slāņa, parādīts 3.4. att. Ievades vektors  $p$  satur  $R$  koeficientus. Attiecīgs neironu skaits pirmajā, otrajā un trešajā slāni ir  $s^1$ ,  $s^2$ ,  $s^3$ . Tāpat katram slānim ir savs tieksmes vektors (*bias vector*), aktivācijas funkcijas un izvades vektori  $b^1$ ,  $b^2$ ,  $b^3$  un  $f^1$ ,  $f^2$ ,  $f^3$ , un  $a^1$ ,  $a^2$ ,  $a^3$ .

Svara koeficientu matrica pirmajam slānim ir  $IW^{1,1}$  (matricas dimensija ir  $s^1 \times R$ ), otrajam slānim-  $LW^{2,1}$  (matricas dimensija  $s^2 \times s^1$ ) un trešajam slānim-  $LW^{3,2}$  (matricas dimensija ir  $s^3 \times s^2$ ). Vispārīgākā formā  $LW^{i,j}$  ir svara koeficientu matrica, kas tiek lietota, lai aprēķinātu izvades vektoru  $j$ -tajam slānim ar ievades vektoru no  $i$ -tā slāņa.



3.4. att. Vispārīga daudzslāņu uz priekšu orientēta Mākslīgā Neironu Tīkla uzbūve.

Izvades vektori  $a^1, a^2, a^3$  attiecīgajiem slāņiem, ja tie ir virknē savienoti, tiek aprēķināti izmantojot šādas sakarības:

$$a^1 = f^1(IW^{1,1} \cdot p + b^1), \quad (3.7)$$

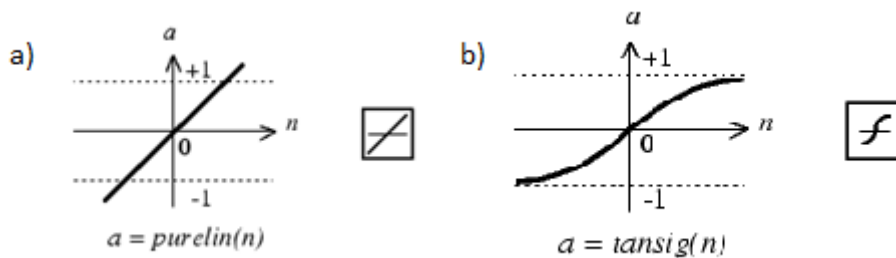
$$a^2 = f^2(LW^{2,1} \cdot a^1 + b^2), \quad (3.8)$$

$$a^3 = f^3(LW^{3,2} \cdot a^2 + b^3). \quad (3.9)$$

Veicot algebriskus pārveidojumus izteiksmēm (3.7)- (3.9), iegūst izteiksmi, ar kuru var aprēķināt izvades datus trīs slāņu Mākslīgo Neironu Tīklam, izmantojot pirmā slāņa ievades datu vektoru  $p$

$$a^3 = f^3(LW^{3,2} \cdot f^2(LW^{2,1} \cdot f^1(IW^{1,1} \cdot p + b^1) + b^2) + b^3). \quad (3.10)$$

Transformācijas funkcijas vispārīgajā gadījumā var tikt izvēlētas patvaļīgi. Praksē visbiežāk tiek izmantotas *tansig* (skatīt 3.5. att. b.) vai *purelin* (skatīt 3.5. att. a.).



3.5. att. Dažādas aktivācijas funkcija.

a- *purelin* funkcija, b- *tansig* funkcija.

### 3.2.3. Mākslīgo Neironu Tīkla trenēšana

Trenēšanas procesā nepieciešama datubāze ar ievades datiem  $p$  un atbilstošajiem izvades datiem  $t$ . Svarīgi izvēlēties optimālu datubāzes lielumu, ja tā būs pārāk liela, Mākslīgo Neironu Tīkls tiks pārtrenēts, bet ja pa mazu, tad nepietiekami uztrenēts. Svaru koeficientu matricas  $W$  un tieksmes vektori  $b$  tiek iteratīvi mainīti, lai minimizētu Mākslīgo Neironu Tīkla izpildes funkciju. Par izpildes funkciju parasti izvēlas vidējo kvadrātisko kļūdu *mse*- vidējā kvadrātiskā atšķirība starp Mākslīgo Neironu Tīkla aprēķinātajiem izvades datiem  $a$  un pareizajiem izvades datiem  $t$ .

Vienkāršākais trenēšanas algoritms ir atpakaļ izplatīšanās algoritms (*Backpropagation*). Algoritms iteratīvi uzlabo nezināmo koeficientu vektoru  $X$ , kas sastāv no svaru matricas  $W$  un noslieces vektora  $b$  koeficientiem. Tā pamatā ir informācija par izpildes funkcijas gradientu. Nezināmo koeficientu vektors tiek izmainīts tā, lai izpildes funkcija gradients būtu maksimāli negatīvs, tādējādi tā samazinās visstraujāk. Matemātiski to apraksta ar šādu iteratīvu sakarību:

$$X_{k+1} = X_k - \alpha_k \cdot g_k, \tag{3.11}$$

kur  $X_{k+1}$ - vektors ar uzlabotiem nezināmiem koeficientiem,  $X_k$ - iepriekšējā iterācijā iegūtais nezināmo koeficientu vektors,  $\alpha_k$ - mācīšanās ātrums,  $g_k$ - vektors, kas raksturo izpildes funkcijas gradientu.

Algoritma priekšrocība ir tā vienkāršums, bet galvenais trūkums ir lēna konverģence. Nākamais algoritms, kas tiks aprakstīts, konverģē aptuveni 10 līdz 100 reizes ātrāk.

Saistītā gradienta algoritms (*Conjugate Gradient Algorithms*) [40] ir balstīts uz ideju, ka neskatoties uz to, ka funkcija visstraujāk samazinās maksimālā negatīvā gradienta virzienā, tas negarantē maksimāli ātru konverģenci. Tāpēc minimums tiek meklēts saistītā gradienta virzienā.

Kvazi-Ņūtona algoritms (*Quasi-Newton Algorithms*) [40] parasti konverģē ātrāk par saistītā gradienta algoritmu. Šī algoritma pamatā ir šāda iteratīva sakarība:

$$X_{k+1} = X_k - A_k^{-1} g_k , \quad (3.12)$$

kur  $A_k^{-1}$ - Hesiana matricas (*Hessian matrix*) inversā matrica (otrās kārtas izpildes funkcijas atvasinājumu pret nezināmā vektora  $X$  koeficientiem).

Nākamais algoritms tiek saukts par Levenberga- Markvarda algoritmu (*Levenberg-Marquardt Algorithm*) [41], kas parasti iegūst rezultātu ātrāk par iepriekš minētajiem algoritmiem, tādēļ šis algoritms tiks lietots optimālu Mākslīgo Neironu Tīkla trenēšanā. Hesiana matrica tiek tuvināti aizstāta ar Jakobiāna matricu  $J$ , kas kāpināta kvadrātā-  $A$  (šis pieņēmums ir lietojams gadījumā, ja izpildes funkcija ir vidējā kvadrātiskā kļūda):

$$A = J^T \cdot J . \quad (3.13)$$

Nezināmo lielumu vektors  $X$  iteratīvā veidā tiek uzlabots, izmantojot šādu sakarību:

$$X_{k+1} = X_k - [J^T J + \mu \cdot I]^{-1} \cdot J^T \cdot e , \quad (3.14)$$

kur  $e$ - vidējās kvadrātiskās kļūdas  $mse$  vektors,  $\mu$ - skalārs lielums,  $I$ - vienības matrica.

Gadījumā, kad  $\mu \rightarrow 0$  šī metode strādā līdzīgi kā Kvazi-Ņūtona algoritms, bet, ja  $\mu$  ir ļoti liels skaitlis, tad tā strādā līdzīgi kā saistīto gradientu metode. Lielums  $\mu$  pēc katras veiksmīgas iterācijas tiek samazināts.

### 3.3. Šķersgriezumu racionāls ģeometrisku parametru novērtējums

Optimizācija tiks veikta plātnei ar šādiem ģeometriskajiem parametriem un slodzi:

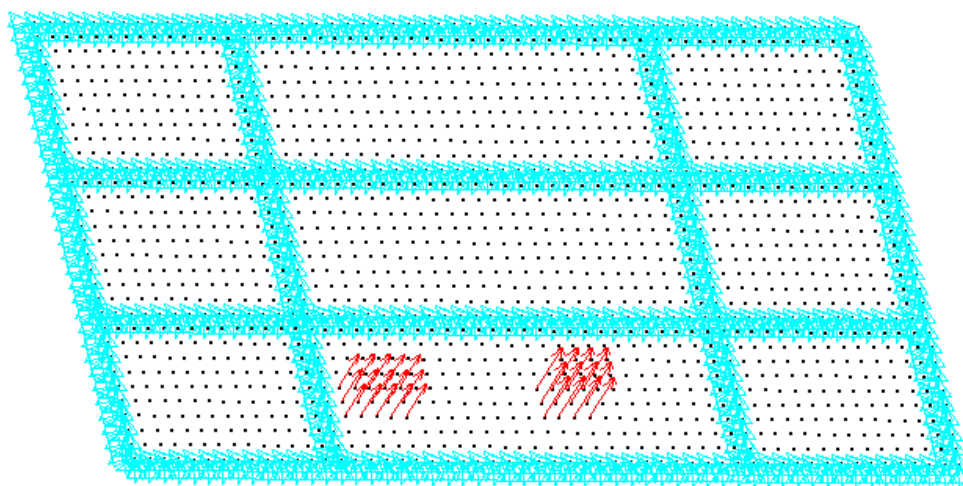
$L_1=2.16\text{ m}$ ,  $L_2=1.36\text{ m}$ ,  $b_1=0.453\text{ m}$ ,  $a_1=0.54\text{ m}$ ,  $a_2=1.08\text{ m}$ ,  $L_3=0.9\text{ m}$ ,  $L_4=0.08\text{ m}$ ,  $L_5=0.18\text{ m}$ ,  $Q=2700\text{ kg}$  (skatīt 3.2. att.). Plātnes ar šādiem izmēriem tiek plaši izmantotas auto treileru grīdu konstrukcijās.

### 3.3.1. Neizdevīgākā slodžu kombinācija

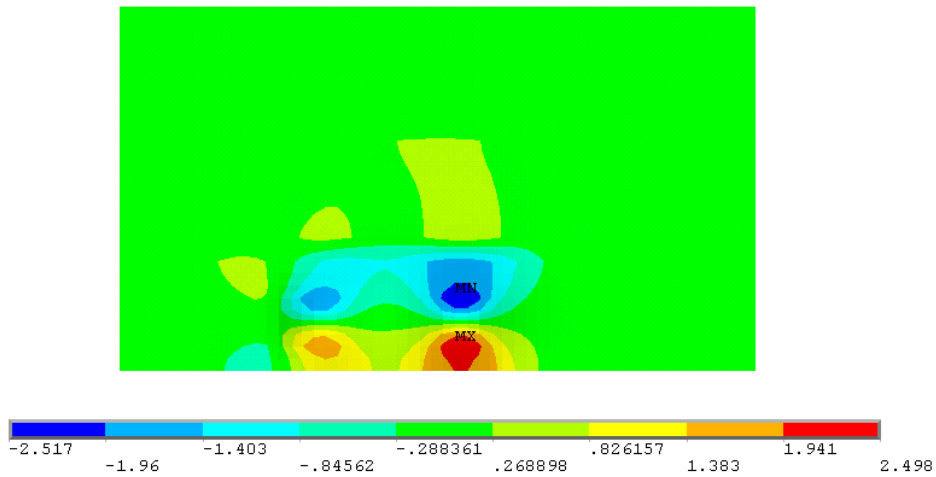
Slodžu laukumu centra koordinātes  $X_c$  un  $Y_c$  aprēķinā tiek mainītas, un pie katra slodžu novietojuma tiek noteikti maksimālie spriegumi koksne šķiedru virzienā un maksimālā izliece. Plātnes aprēķina shēma datorprogrammā *ANSYS* parādīta 3.6. att.

Izmantojot šos rezultātus, tiek iegūts bīstamākais slodžu novietojums, kas rada vislielākos spriegumus (skatīt 3.7. att.) un izlieci (skatīt 3.8. att.).

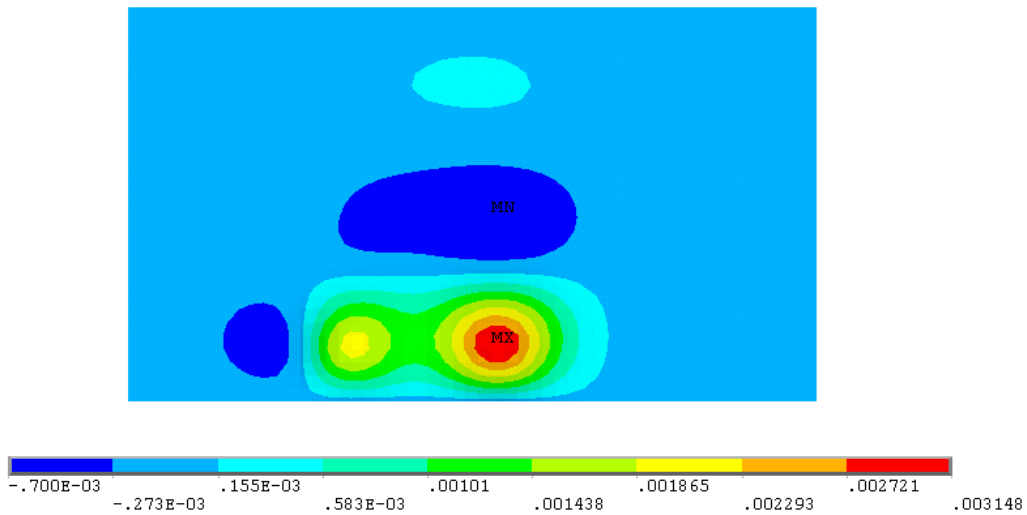
3.9. att. un 3.10. att. a. parādīta maksimālā-relatīvā izliece- attiecība  $U_z/U_z(max)$ , kur  $U_z$ - plātnes izliece pie attiecīgā slodžu izvietojuma, bet  $U_z(max)$  maksimālā izliece pie vissliktākā slodžu izvietojuma. 3.10. att. b. parādīti relatīvie- maksimālie spriegumi koksne šķiedru virzienā ceturtdaļpātnei (tā kā konstrukcija ir simetriska) atkarībā no slodžu laukumu centra koordinātēm. 3.11. att. parādīts bīstamākais slodžu laukumu novietojums (simetrijas dēļ ir vēl trīs tikpat bīstami novietojumi simetriski pret plātnes vidus asīm). Skaitliskās simulācijas tika veiktas, izmantojot komerciālo galīgo elementu programmu *Ansys 12* un personālo datoru ar šādiem rādītājiem: *Intel Core 2 Duo CPU 2.93 GHz, 2.5 GB of RAM*.



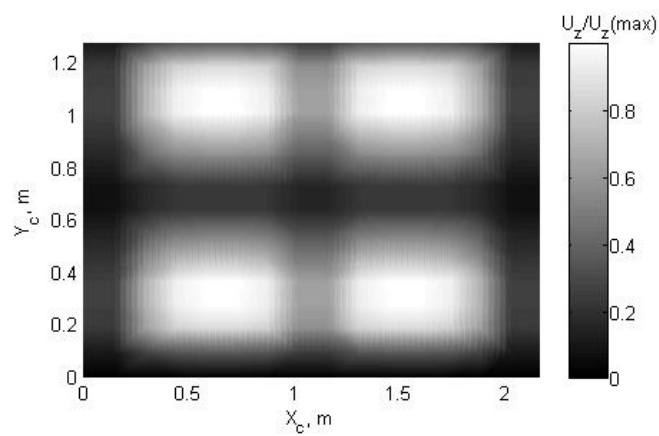
3.6. att. Aprēķina shēma daudzslaidumu plātnei ar divām slodzēm.



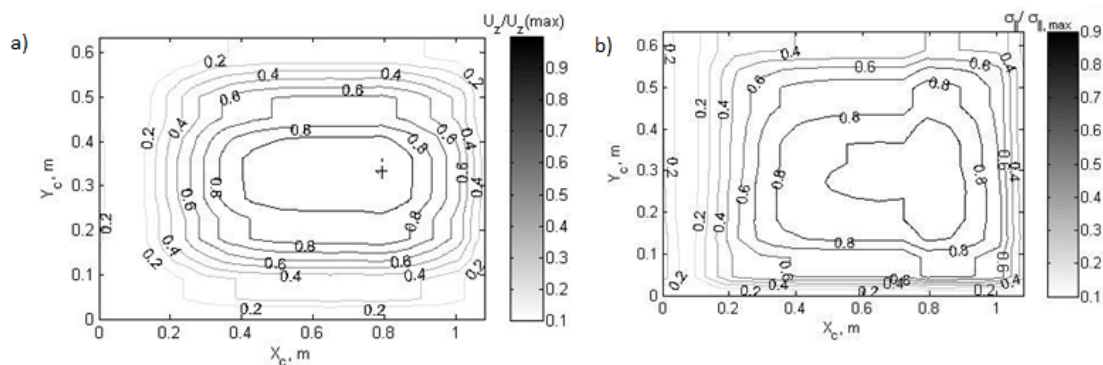
3.7. att. Spriegumi  $\sigma_{yy}$  (MPa) plātnes augšējās slāņos.



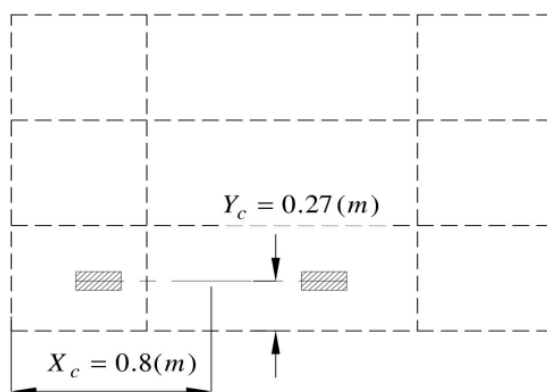
3.8. att. Plātnes izliece (metros), pie nelabvēlīgākā slodžu izvietojuma.



3.9. att. Maksimālās-relatīvās izlieces atkarība no slodžu laukumu centra koordinātēm  $(X_c, Y_c)$ .



3.10. att. Ceturdaļplātnes maksimālās-relatīvās izlieces (a) uz spriegumu (b) atkarība no slodžu laukuma centra koordinātēm.



3.11. att. Neizdevīgākais slodžu novietojums uz daudzslaidumu plātnes.

Neizdevīgākais slodžu novietojums tika iegūts vienai plātnei ar konkrētiem lieces un bīdes stingumiem, pieņemot, ka plātnes lieces stingums  $Y$  ass virzienā (ass īsākās malas virzienā) ir par 15% lielāks kā  $X$  ass virzienā, jo  $y$  ass virzienā tiek orientētas ribas. Šāds pieņēmums ir patiess, jo optimizētās struktūras lieces stingumu attiecība ir tuva pieņemtajai (atšķirība mazāka par 5%). Papildus tika veikts aprēķins sliktākajam slodžu novietojumam plātnei ar atšķirīgu lieces stinguma attiecību, un bīstamākais slodžu novietojums būtiski neizmainījās.

### 3.3.2. Optimāli ģeometriskie parametri dažāda izmēra plātnēm

Optimizācija tika veikta ar Ģenētisko Algoritmu (GA), kurš aprakstīts nodaļā 3.2.1. Ģenētiskais algoritms ir uz minējumiem balstīta optimizācijas metodika, tāpēc katram gadījumam tika veikta optimizācija 3 reizes [37, 38]. Ja rezultāti neatšķiras vairāk par 5% katrā optimizācijas reizē, tad tiek uzskatīts, ka ir atrasts optimālais atrisinājums, bet, ja atšķirība ir lielāka, tad tiek izdarīta atkārtota optimizācija.

Vektors ar optimizējamajiem lielumiem (3.1) tika optimizēts pie četrām diskrētām slodzēm  $Q=\{2; 2.5; 3; 3.5\}$  (tonnas uz katru slodžu laukumu). Katrai slodzei tika piekārtota kāda no šādām ģeometrisku lielumu kombinācijām:

$$L_1=\{1.5; 2; 2.5; 3\} (m)$$

$$L_2=\{0.75; 1; 1.25; 1.5\} (m)$$

$$t=\{30; 40; 50; 60\} (mm)$$

Tāpēc kopējais optimizējamo gadījumu skaits ir 256.

Attiecība starp  $a_1/a_2=0.5$ , kas ir nemainīga optimizācijas gaitā. Attālums starp slodžu laukumu centriem ir nemainīgs- 0.9 m. Viena slodžu laukuma izmēri ir 0.09 x 0.18 m.

Daži rezultāti, kad  $Q=2.5$  tonnas un  $t=40$  mm ir parādīti tabulā 3.1. Optimizācijā tika izmantoti šādi stiprības ierobežojumi [28, 29]:

1. Spriegumi spiestajā apšuvumā;
2. Spriegumi stieptajā apšuvumā;
3. Bīdes spriegumi saplākšņa ribās;
4. Bīdes spriegumi līmes šuvē;
5. Lokālās lieces izraisītie spriegumi spiestajam apšuvumam.

Ribotā saplākšņa kompozītmateriāla plātne tika modelēta izmantojot četru mezglu Galīgo elementu, kas balstīts uz lineāro Kirhofa-Lova plātņu lieces teoriju, jo plātnes biezums ir relatīvi niecīgs, salīdzinot ar malas garumu. Izmantojot šo pieņēmumu, iespējams būtiski samazināt skaitļošanas apjomu, salīdzinot ar gadījumu, kad aprēķins veikts pilnajam plātnes modelim, izmantojot čaulu galīgos elementus. Aprēķinā ribojums tika modelēts kā atsevišķs, ortotrops slānis ar noteiktām īpašībām. Aprēķins tika sadalīts divās daļās. Pirmajā daļā tika rēķināta visa plātne, kurai ribas aizstātas ar elastīgu slāni. Otrajā daļā tika aprēķināts tikai augšējais apšuvums, lai noteiktu tajā spriegumus, kas rodas no lokālas lieces. Tika pieņemts, ka augšējais apšuvums brīvi balstās uz ribām.

Saplākšņa elementi aprēķinā tika modelēti izmantojot, Somu bērza saplākšņa mehāniskos raksturlielumus [42].

Tabulā 3.1. redzams, ka atsevišķos gadījumos, piemēram, kad loksnes garums un platums ir 1.5m, netiek apmierināti stiprības ierobežojumi spiestajā apšuvumā (spriegumi ir lielāki par aprēķinu stiprību).

Gadījumi, kad nav apmierināti stiprības nosacījumi, būtiski apgrūtinā Mākslīgo Neironu Tīkla trenēšanu. Mākslīgo Neironu Tīklam ir jāprot identificēt tos

gadījumus, kad netiek apmierināti stiprības nosacījumi. Šī problēma tika atrisināta, papildus trenējot Mākslīgo Neironu Tīklu ar gadījumiem, kad stiprības nosacījumi nav apmierināti, un liekot šajos gadījumos izvades datus aizstāt ar vektoru, kuram visi koeficienti ir nulles. Tas dod iespēju ātri identificēt gadījumus, kad netiek apmierināti stiprības nosacījumi, ja Mākslīgo Neironu Tīkla izvades vektors ir tuvs nulles vektoram.

Tabula 3.1.

Optimizētā šķērsriezuma ģeometriskie parametri dažāda izmēra plātnēm

L, m	B, m	t <sub>1</sub> , m	t <sub>2</sub> , m	t <sub>3</sub> , m	n	F, kg
1.50	0.75	0.0130	0.0110	0.0200	15	115.3
1.50	1.00	0.0132	0.0115	0.0220	21	201.9
1.50	1.25	0.0139	0.0125	0.0250	28	350.4
1.50	1.50	Neizpildās stiprības ierobežojumi				
2.00	0.75	0.0136	0.0120	0.0250	14	120.5
2.00	1.00	0.0142	0.0127	0.0260	20	207.6
2.00	1.25	0.0146	0.0130	0.0300	27	353.8
2.00	1.50	Neizpildās stiprības ierobežojumi				
2.50	0.75	0.0143	0.0128	0.0280	14	126.6
2.50	1.00	0.0148	0.0130	0.0300	20	215.0
2.50	1.25	0.0150	0.0130	0.0300	26	361.6
2.50	1.50	Neizpildās stiprības ierobežojumi				
3.00	0.75	0.0150	0.0130	0.0300	14	133.1
3.00	1.00	0.0150	0.0130	0.0300	20	223.2
3.00	1.25	0.0150	0.0130	0.0300	30	401.0
3.00	1.50	Neizpildās stiprības ierobežojumi				

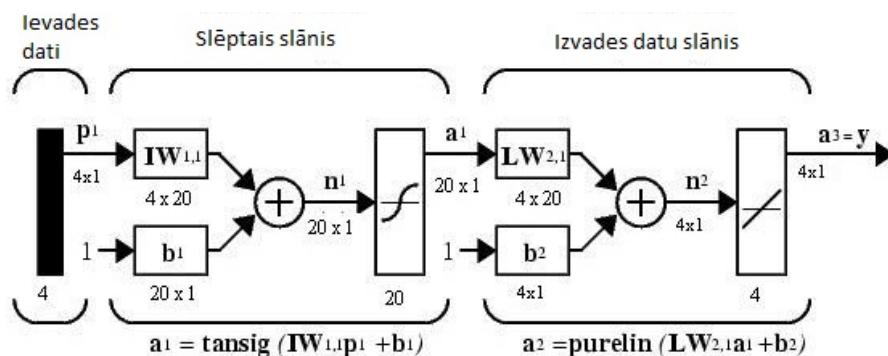
### 3.3.3. Trenēta Mākslīgā Neironu tīkla iespējas racionālu ģeometrisku parametru prognozēšanai

Ar Ģenētisko algoritmu optimizētie gadījumi tika izmantoti par trenēšanas (180 gadījumi) un testēšanas datiem (76 gadījumi) Mākslīgo Neironu Tīklam. Ievades datu vektors sastāv no četriem koeficientiem:  $p = \{Q, L_1, L_2, t\}$ . Trenētam Mākslīgo Neironu Tīklam, izmantojot ievades datus, ir jāsarēķina racionāli šķērsriezuma ģeometriskie parametri:  $y = \{t_1, t_2, t_3, n\}$ .

Skaitliskie eksperimenti parāda, ka minimālais neironu skaits Mākslīgo Neironu Tīklā ir 20, lai varētu ar nepieciešamo precizitāti aprēķināt racionālus šķērsriezuma ģeometriskos parametrus. Aprēķinos izmantotā trīsslāņu Mākslīgo Neironu tīkla arhitektūra parādīta 3.12. att.

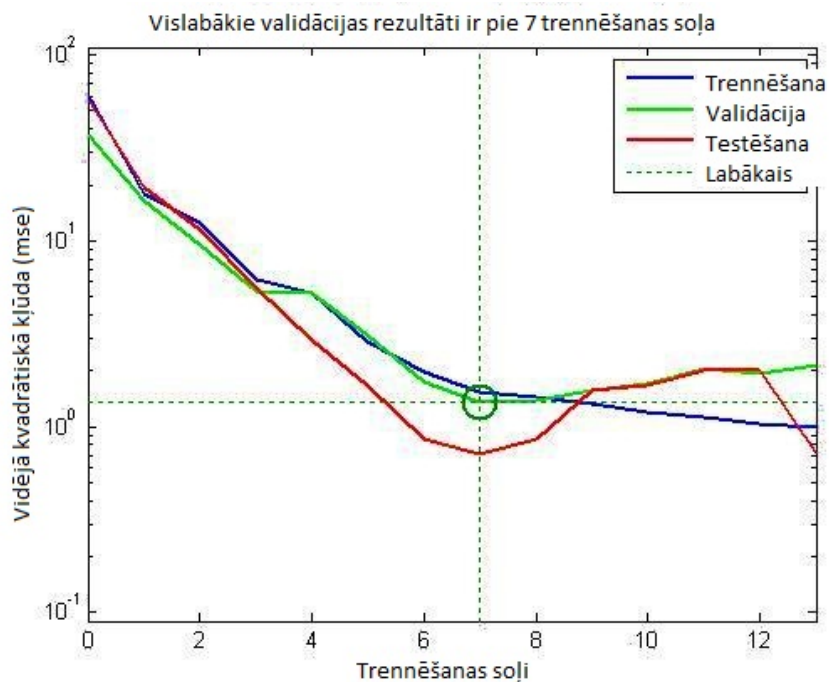
Slēptajā slānī (*hidden layer*), kā transformācijas funkcija izmantota *tansig* funkcija, bet izvades datu slānī *purelin* funkcija.

Mākslīgo Neironu Tīkls tika trenēts izmantojot Levenberga-Markvarda algoritmu, kas balstīts uz izteiksmi (3.14), jo šis ir vispiemērotākais algoritms uz priekšu orientēta Mākslīgo Neironu Tīkla trenēšanai [40]. Izpildes funkcijas izmaiņa pēc katras iterācijas parādīta 3.13. att.



3.12. att. Uz priekšu orientēts (*Feed-Forward*) Mākslīgo Neironu Tīkls ar vienu slēpto slāni, ievades slāni un izvades slāni.

Lai varētu novērtēt Mākslīgā Neironu Tīkla korektību, tika veikti validācijas testi. Tie parāda, ka optimāls trenēšanas iterāciju skaits ir 7 (skatīt 3.13. att. zaļo līkni). Vidējā kvadrātiskā kļūda jeb izpildes funkcijas vērtība pie 7. iterācijas ir vismazākā. Ja palielina iterāciju skaitu, tad testēšanas un validācijas rezultāti parāda, ka Mākslīgo Neironu Tīkls ir pārtrenēts un vidējā kvadrātiskā kļūda pieaug.

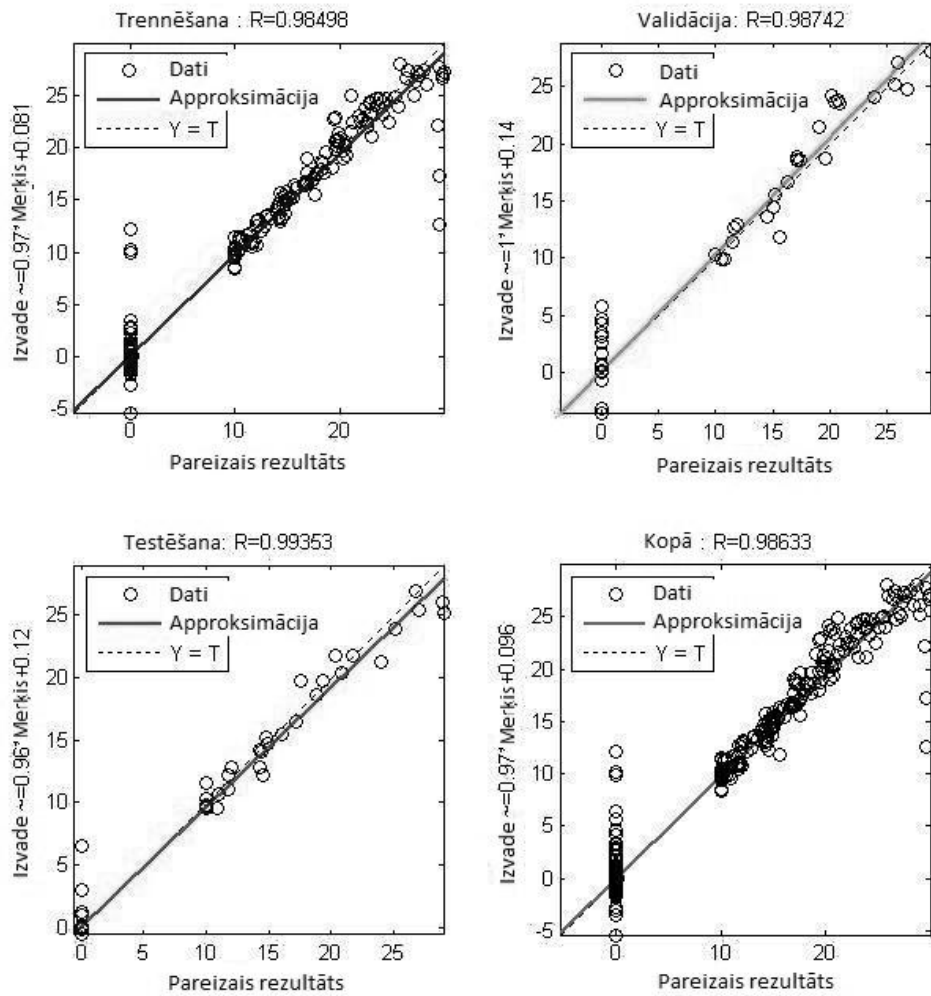


3.13. att. Mākslīgā Neironu Tīkla vidējās kvadrātiskās kļūda pie trenēšanas, testēšanas un validācijas atkarībā no trenēšanas piegājienu skaita.

Tika pārbaudīts Mākslīgo Neironu Tīkla adekvātums, veicot regresijas analīzi. Regresijas analīzes rezultāti parādīti 3.14. att. Redzams, ka korelācijas koeficients starp Mākslīgo Neironu Tīkla aprēķinātajiem šķērsriezuma ģeometriskajiem parametriem un optimālajiem ir tuvs vieniniekam  $R > 0.98$ , līdz ar to rezultāti ir ar inženieraprēķiniem pieņemamu precizitāti.

Rezultātu precizitāte samazinās tajos gadījumos, kad Mākslīgo Neironu Tīklam ir jāidentificē gadījumi, kad stiprības ierobežojumi nav izpildīti un izvades vektora koeficientiem jābūt tuviem nullei.

Mākslīgo Neironu Tīkls un Ģenētiskais algoritms tika realizēti *Matlab 7.6.0* vidē, izmantojot iebūvētās funkcijas un papildus izstrādātas procedūras ribota saplākšņa kompozītmateriāla šķērsriezuma ģeometrisku parametru optimizācijai.



3.14. att. Mākslīgo Neironu Tīkla aprēķināto rezultātu regresijas analīze.

#### 4. OPTIMIZĀCIJAS METODIKA DISKRĒTI UN NEPĀRTRAUKTI MAINĪGA STINGUMA PLĀTŅVEIDA KONSTRUKCIJAS ELEMENTIEM AR PAAUGSTINĀTU ĪPATNĒJO NESTSPĒJU

Plātņveida konstrukcijas elementos, kas darbojas liecē, pat pie vienmērīgi izkliedētas slodzes veidojas nevienmērīgs piepūļu lauks, kas rada nepieciešamību harmonizēt to ar materiāla pretestības lauku, veidojot plātņi, kurai dažādās vietās būtu dažādi lieces un bīdes stingumi abos galvenajos virzienos. Šajā nodaļā tiks aprakstīta aprēķina metode optimāla stinguma noteikšanai un tā diskretizēšanai, nosakot optimālu diskrešu stinguma sadalījumu, kas būtiski atvieglo šādu plātņu izgatavošanu. Tiks piedāvāt metode ārējo lobskaidu orientācijas leņķa optimizācijas mainīga stinguma saplākšņa plātņēm. Tiks noteikts optimāls stinguma sadalījums vienlaiduma un daudzlaiduma plātņēm ar vienmērīgi izkliedētu slodzi un kustīgām koncentrētām slodzēm.

##### 4.1. Metode lokāli ortotropu plātņu lieces un bīdes stingumu optimizācijai

Optimālu stinguma sadalījumu ortotropai plātnei var definēt ar 5 neatkarīgām funkcijām (4.1) [98, 99, 100]. Šīs funkcijas tiek izmantotas, lai koriģētu apvienoto lieces un bīdes stinguma matricu  $D^0$ . Optimizācijā mērķa funkcija  $C(x)$  (4.2) sastāv no divām daļām. Pirmā daļa ir nepieciešama, lai minimizētu normalizēto konstrukcijas padevīguma funkciju  $c(x)$  un otrā daļa, lai minimizētu normalizētā spriegumu lauka atšķirības  $\sigma(x)$ . Minimizēta padevīguma funkcijas (*compliance function*) vērtība nodrošina konstrukcijai maksimizētu stingumu. Minimizētas normalizētā spriegumu lauka atšķirības nodrošina to, ka plātnei spriegumu sadalījums pa tās laukumu ir maksimāli vienmērīgs. Tas tiek izdarīts, minimizējot vidējo spriegumu vērtības un spriegumu vērtības konkrētā punktā atšķirības absolūto vērtību pa visu plātņi.

Normālspriegumu lauka atšķirības stiepē un spiedē tiek minimizētas uz ārējiem plātnes slāņiem, kur ir to maksimālās vērtības, bet bīdes spriegumu lauka atšķirības plātnes vidusplaknē. Katra no mērķa funkcijas daļām tiek reizināta ar

atbilstošo svāra koeficientu  $h_1, h_2$ . Ja nav speciālu nosacījumu, tad var pieņemt, ka tie ir vienādi  $h_1 = h_2 = \frac{1}{2}$ .

$$x = (x^1, x^2, x^3, x^4, x^5), \quad (4.1)$$

$$\min_x : C(x) = c(x) + \sigma(x) = \frac{h_1 \sum_{i=1}^{Ne} U^k(x(k))^T \cdot K^k(x(k)) \cdot U^k(x(k))}{c_{max}} + \dots$$

$$+ \frac{h_2 \sum_{i=1}^{Ne} \left( \int_{\Omega_i^e} \|\sigma_{kl}^i(x)\| - \|\sigma_{kl}^{av}(x)\| \Omega_i^e \right)}{\delta \sigma_{kl}^{max}}. \quad (4.2)$$

Optimizācijas uzdevuma ierobežojumi:

$$\frac{\sum_{k=1}^{Ne} x^i(k) \text{area}(\Omega_k^e)}{\text{area}(\Omega)} = k_i, k_i \in (0,1) \quad (4.3)$$

$$K(x) \cdot U(x) = F(x), \quad (4.4)$$

$$0 < x_{i,min} \leq x^i(k) \leq 1, \quad (4.5)$$

$$D(k) = N(k)^T D(k)^0 N(k), \quad (4.6)$$

$$D^0(k) = \begin{pmatrix} D_{11}^0 x^1(k) & D_{12}^0 x^{12} x^1(k) & 0 & 0 & 0 \\ D_{21}^0 x^{12} x^1(k) & D_{22}^0 x^2(k) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{44}^0 x^3(k) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{55}^0 x^4(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66}^0 x^5(k) \end{pmatrix}, \quad (4.7)$$

$$N(k) = \begin{pmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & 2a_{12} & 2a_{11} & 2a_{11}a_{12} \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & 2a_{22} & 2a_{21} & 2a_{21}a_{22} \\ a_{21} & a_{22} & a_{22} & a_{21} & a_{21} + a_{22} \\ a_{11} & a_{12} & a_{12} & a_{11} & a_{12} + a_{11} \\ a_{11}a_{21} & a_{12}a_{22} & a_{12} + a_{22} & a_{21} + a_{11} & a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21} \end{pmatrix}, \quad (4.8)$$

kur  $D^0(k)$ - sākotnējā materiāla lieces stinguma matrica  $k$ -tajam galīgajam elementam, kura tiek definēta izmantojot pirmās kārtas šķērsdeformāciju teoriju (

$D_{11}^0 = k_b \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ ,  $D_{22}^0 = k_b \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}$ ,  $D_{12}^0 = D_{21}^0 = k_b \frac{\nu_{12}E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}}$  - lieces stinguma koeficienti,  $D_{44}^0 = k_s G_{23}$ ,  $D_{55}^0 = k_s G_{13}$ ,  $D_{66}^0 = G_{12}$  - bīdes stinguma koeficienti,  $k_b = \frac{1}{12}t^3$ ,  $k_s = \frac{5}{6}$ ,  $t$ -plātnes biezums),  $D(k)$  - optimizētā un transformētā materiāla lieces stinguma matrica  $k$ -tajam galīgajam elementam,  $Ne$  - kopējais galīgo elementu skaits,  $\sigma_{kl}^i(x)$  - funkcija, kas apraksta attiecīgā sprieguma komponenti pa plātņi,  $kl=11,22,23,13,12$ ,  $\sigma_{kl}^{av}(x)$  - vidējās sprieguma komponentes  $kl$  vērtība,  $a_{ij}$  - virzienu kosinuss leņķim starp lokālo asi  $i$  un globālo asi  $j$  (tās ir novietotas loksnes vidusplaknē),  $N(k)$  - koordinātu transformācijas matrica  $k$ -tajam galīgajam elementam no lokālās uz globālo koordinātu sistēmu,  $K(x)^k$  - globālā stinguma matrica  $k$ -tajam galīgajam elementa,  $U(x)^k$  - pārvietojumu vektors  $k$ -tajam galīgajam elementa globālajā koordinātu sistēmā,  $area(\Omega)$  - kopējais plātnes laukums,  $area(\Omega_k^e)$  -  $k$ -tā galīgā elementa laukums,  $k_i$  - relatīvā-maksimālā  $i$ -tā stinguma komponente,  $x^{12} = x^{12}(x^1(k), x^2(k))$  - funkcijas ar kuru palīdzību tiek ņemta vērā Puasona koeficienta  $\nu_{12}$  izmaiņa mainoties plātnes stingumam (ar inženieraprēķiniem pieņemamu precizitāti to var pieņemt  $x^{12} = 1$ ),  $c_{max}$  - maksimālā padevīguma funkcijas vērtība starp visiem galīgajiem elementiem neoptimizētai plātnei

$$c_{max} = \max\left((U^1)^T \cdot K^1 U^1, \dots, (U^{Ne})^T \cdot K^{Ne} U^{Ne}\right), \quad (4.9)$$

$\delta\sigma_{kl}^{max}$  - maksimālā sprieguma lauka atšķirība attiecīgajai sprieguma komponentei  $kl$  starp sprieguma vērtību attiecīgajā punktā un vidējo vērtību neoptimizētai plātnei :

$$\delta\sigma_{kl}^{max} = \max\left(\int_{S^1} \|\sigma_{kl}^1(x) - \sigma_{kl}^{av}(x)\| dS^1, \dots \right) \cdot \int_{S^{Ne}} \|\sigma_{kl}^{Ne}(x) - \sigma_{kl}^{av}(x)\| dS^{Ne} \quad (4.10)$$

Nosakot optimālu stingumu sadalījumu, nepieciešams ņemt vērā ortotropa materiāla sakarību starp elastības moduļiem un Puasona koeficientiem:

$$E_1 \cdot \nu_{12} = E_2 \cdot \nu_{21}. \quad (4.11)$$

Puasona koeficienti  $\nu_{12}, \nu_{21}$  daudzos praktiskos gadījumos, piemēram, galos balstīta plātne ar vienmērīgi izkliedētu slodzi, neatstāj būtisku ietekmi uz plātnes darbu liecē. Tādējādi tie var tikt pieņemti par konstantiem vai atkarīgiem no optimizējamajiem lieces stingumiem, nosakot šo sakarību eksperimentāli.

Ja konstrukcijā nav lielas spriegumu lauka atšķirības, tad otrā daļa mērķa funkcijā var tikt tuvināti izskaitļota, izmantojot viena punkta Gausa kvadrātūras formulu:

$$\sigma(x) = \frac{h_2 \sum_{i=1}^{Ne} (A(S^i) \|\sigma_{kl}^i(x)\| - \|\sigma_{kl}^{av}(x)\|)}{\delta\sigma_{kl}^{max}}, \quad (4.12)$$

kur  $A(S^i)$  - laukums  $i$ -tajam galīgajam elementam.

Optimizācijas problēma (4.2)-(4.8) tiek risināta, izmantojot uz mērķa funkcijas gradienta balstītu funkcijas minimuma meklēšana algoritmu.

## 4.2. Optimāls dalījums diskrētos apgabalos

Tehnoloģiski ir grūti izgatavot nemainīga biezuma ribotu plātņi ar nepārtraukti mainīgu stingumu. Tādēļ šajā nodaļā tiks aprakstīta metode, kā, izmantojot datus par optimālu nepārtrauktu stinguma sadalījumu, plātņi sadalīt diskrētos apgabalos, kur katra apgabala robežās plātnei ir nemainīgs stingums. Turklāt dalījums ir tāds, lai būtu minimāla atšķirība starp diskrēti mainīgo un nepārtraukti mainīgo stingumu sadalījumu.

Metodes pamatā ir minimizācijas uzdevuma atrisināšana, kurā tiek minimizēta vidējā kvadrātiskā atšķirība starp nepārtrauktā stinguma sadalījuma funkcijām  $X^j(y_1, y_2)$  un diskrēti mainīgā stinguma sadalījuma funkcijām  $\bar{X}_i^j$  katrā no diskrētajiem apgabaliem:

$$\min F(\Omega_i) = \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} w_j \left( X^j(y_1, y_2) - \bar{X}_i^j \right)^2 dy_1 dy_2 \quad (4.13)$$

Ierobežojumi:

$$\bigcup \Omega_i = \Omega, i = 1..n, \quad (4.14)$$

$$\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset, \forall i, j, \quad (4.15)$$

$$G_i(\Omega_i) \leq 0, \quad (4.16)$$

$$H_i(\Omega_i) = 0, \quad (4.17)$$

kur  $n$  - diskrēto apgabalu skaits,  $w_j$  - svara koeficienti,  $\bar{X}_1^j$  – vidējā  $j$ -tās stinguma funkcijas vērtība  $i$ -tajā diskrētajā apgabalā- $\Omega_i$ ,  $\Omega$  - visu diskrēto apgabalu apvienojums, kas veido visu plātņi (skatīt 4.1. att. a.),  $G_i, H_i$  - speciāli ierobežojumi diskrētajiem apgabaliem, piemēram, minimālie vai maksimālie tehnoloģiski iespējamie izmēri,  $X^j(y_1, y_2)$  -  $j$ -tā stinguma koeficienta interpolējošā vai aproksimējoša funkcija, kur indekss  $j=1,2$  - apzīmē lieces stingumu koeficientus,  $j=3,4,5$  - bīdes stingumu koeficientus.

Funkciju  $X^j(y_1, y_2)$  ērti iegūt, veicot aproksimācija, ar uz priekšu orientētu Mākslīgo Neironu Tīklu [34]:

$$X^j(y_1, y_2) = f^2(W^{2,1} f^1(W^{1,1} x^j(k) + b^1) + b^2), \quad (4.18)$$

kur  $f^1, f^2$  - aktivācijas funkcijas,  $W^{1,1}, W^{2,1}$  - svaru koeficientu matrica,  $b^i$  - noslieces vektors (*bias vector*),  $x^j(k)$  -  $j$ -tais stinguma funkcijas koeficients  $k$ -tajā galīgajā elementā.

Svaru koeficientu matricas  $W$  un noslieces vektora  $b$  koeficienti tiek iteratīvi aprēķināti ar Levenberga- Markvarda algoritmu.

$$W_{k+1} = W_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e, \quad (4.19)$$

$$b_{k+1} = b_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e, \quad (4.20)$$

kur  $e$  - vidējās kvadrātiskās kļūdas vektors,  $\mu$  - skalāra konstante,  $I$  - vienības matrica,  $J$  - Jakobiāna matrica.

Otra iespēja ir interpolēt funkciju  $X^j(y_1, y_2)$ , lietojot kubisko splainu metodi:

$$X^j(y_1, y_2) = \sum_{n=0}^3 \sum_{m=0}^{3-n} k_{i,j} (y_1 - y_{1,i})^n (y_2 - y_{2,i})^m, \quad (4.21)$$

kur  $y_{1,i}, y_{2,i}$  - interpolācijas punkti uz asīm  $y_1$  un  $y_2$ , attiecīgi,  $k_{i,j}$  - splainu koeficienti, kurus nosaka, izmantojot  $x^j$ .

Nezināmo lielumu skaits kubiskajā splainā ir 10, kas tiek aprēķināti, izmantojot interpolācijas nosacījumus un speciālus trešās kārtas atvasinājuma nosacījumus ("*Not-A-Knot*") uz splaina robežām.

Vidējotā stinguma koeficienta vērtība  $i$ -tajā diskrētajā apgabalā aprēķināma ar šādu izteiksmi

$$\bar{X}_i^j(\Omega_i) = \frac{\iint_{\Omega_i} X^j(y_1, y_2) dy_1 dy_2}{\text{area}(\Omega_i)} \quad (4.22)$$

Laukuma integrāli izskaitļo, izmantojot Gausa kvadrātūras formulas.

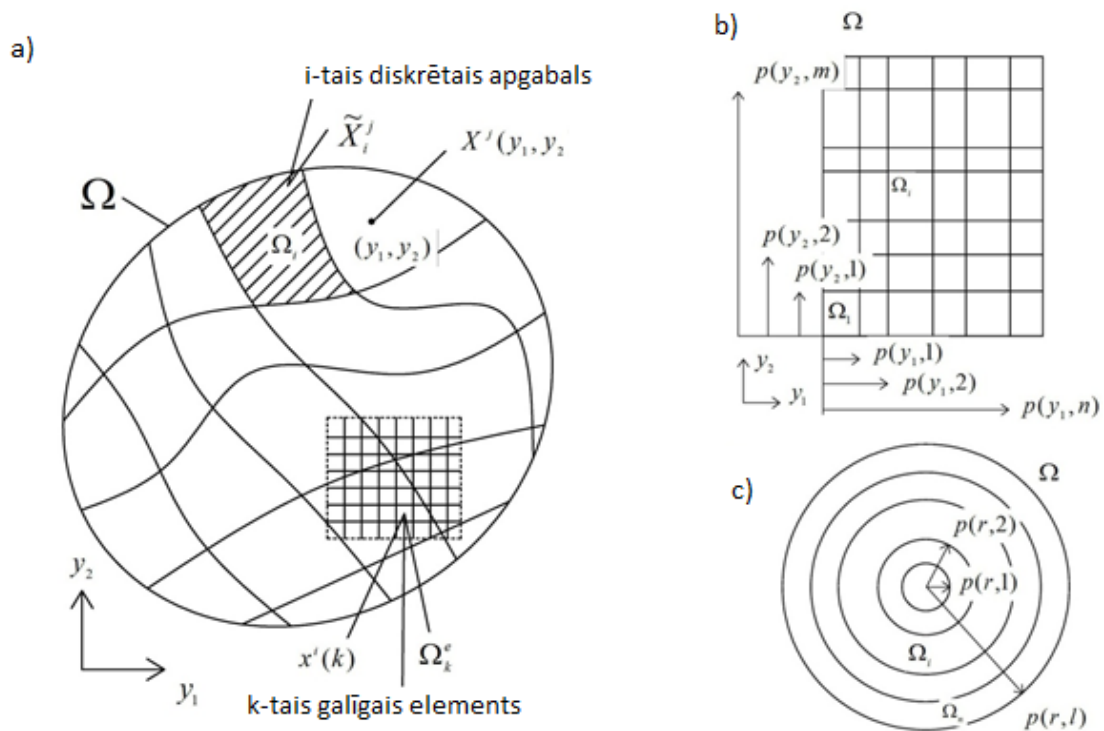
Svaru koeficientu vērtības  $w_i$  tiek aprēķinātas, lietojot pārvietojuma vektora normu:

$$w_i = \frac{\|U(x_i + \delta x_i) - U(x)\|}{\sum_{j=1}^5 \|U(x_j + \delta x_j) - U(x)\|} \quad (4.23)$$

Norma  $\|*\|$  šajā gadījumā tiek definēta kā maksimālais, pēc absolūtās vērtības, vektora  $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  elements:

$$\|V\| = \max(|v_1|, |v_2|, \dots, |v_n|) \quad (4.24)$$

Optimāls dalījums diskrētos apgabalos ir atkarīgs no plātnes formas  $\Omega$ . Plātnes diskrēto apgabalu formai ir jābūt saskaņotai ar plātnes formu, piemēram, taisnstūra formas plātnei (skat. 4.1. att. b.) vai apaļai plātnei (skat. 4.1. att. c.) diskrētiem apgabaliem arī jābūt attiecīgi taisnstūrveidīgiem vai apaļiem. Sarežģītas formas plātnēm nepieciešams matricu  $D^0$  transformēt, izmantojot koordinātu asu pagriešanas matricu  $N$  un izteiksmi (4.6).



4.1. att. Plātnes dalījums diskrētos apgabalos.

a- patvaļīgas formas plātne, b- taisnstūra formas plātne, c- riņķveida formas plātne.

Aprēķinos tiks izmantots Ģenētiskais Algoritms, kas aprakstīts 3. nodaļā.

Optimizācijas problēma ar ierobežojumiem(4.13)-(4.17) tiek pārveidota par bezierobežojumu optimizācijas problēmu, izmantojot soda funkciju pieeju:

$$\min F(\Omega_i) = \sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} w_j (X^j(y_1, y_2) - \bar{X}_i^j)^2 dy_1 dy_2 + \sum r_i G_i + \sum R_i H_i, \quad (4.25)$$

kur funkcijas  $r_i, R_i$  ir vienādas ar nulli, ja ierobežojumi  $G_i, H_i$  ir apmierināti, bet lieli skaitļi pretējā gadījumā.

### 4.3. Plātnes stinguma sadalījuma optimizācija pie tipiskākajiem slodžu un balstījuma veidiem

#### 4.3.1. Brīvi balstīta plātne ar vienmērīgi izkliedētu slodzi

Izmantojot izstrādāto metodi, tika optimizēts lieces un bīdes stinguma nepārtraukts un diskrets sadalījums (topoloģija) taisnstūra formas plātnei (skatīt 4.1. att. b.), kas brīvi balstīta pa kontūru un uz kuras darbojas vienmērīgi izkliedēta slodze. Plātnes malu garumi asu  $y_1$  un  $y_2$  virzienos ir attiecīgi  $L_{y_1}$  un  $L_{y_2}$ . Plātne sadalīta

četros diskrētos apgabalos abu asu virzienos, tā kopā ir 16 diskrēti apgabali. Tā kā plātnes balstījums un slodzes ir simetriskas, tad, lai viennozīmīgi definētu diskrētos apgabalus, nepieciešams noteikt divus parametrus  $p = (p(y_1, 1), p(y_2, 1))$ . Deformāciju aprēķins veikts, izmantojot lineārus četru mezglu galīgos elementus, kas balstīti uz Kirhofa-Lova teoriju, un galīgo elementu režģis ir vienmērīgs.

Diskrēto apgabalu izmērus limitē tehnoloģiskās iespējas ribotu saplākšņu struktūras izgatavošanai [108]. Tie tika ņemti vērā ar šādām nevienādībām, kuras lietotas optimizācijas uzdevumā (4.25) kā ierobežojumi:

$$G_1 = \frac{1}{10}L_{y_1} - p_{y_1,1} \leq 0, \quad (4.26)$$

$$G_2 = p_{y_1,1} - \frac{8}{20}L_{y_1} \leq 0, \quad (4.27)$$

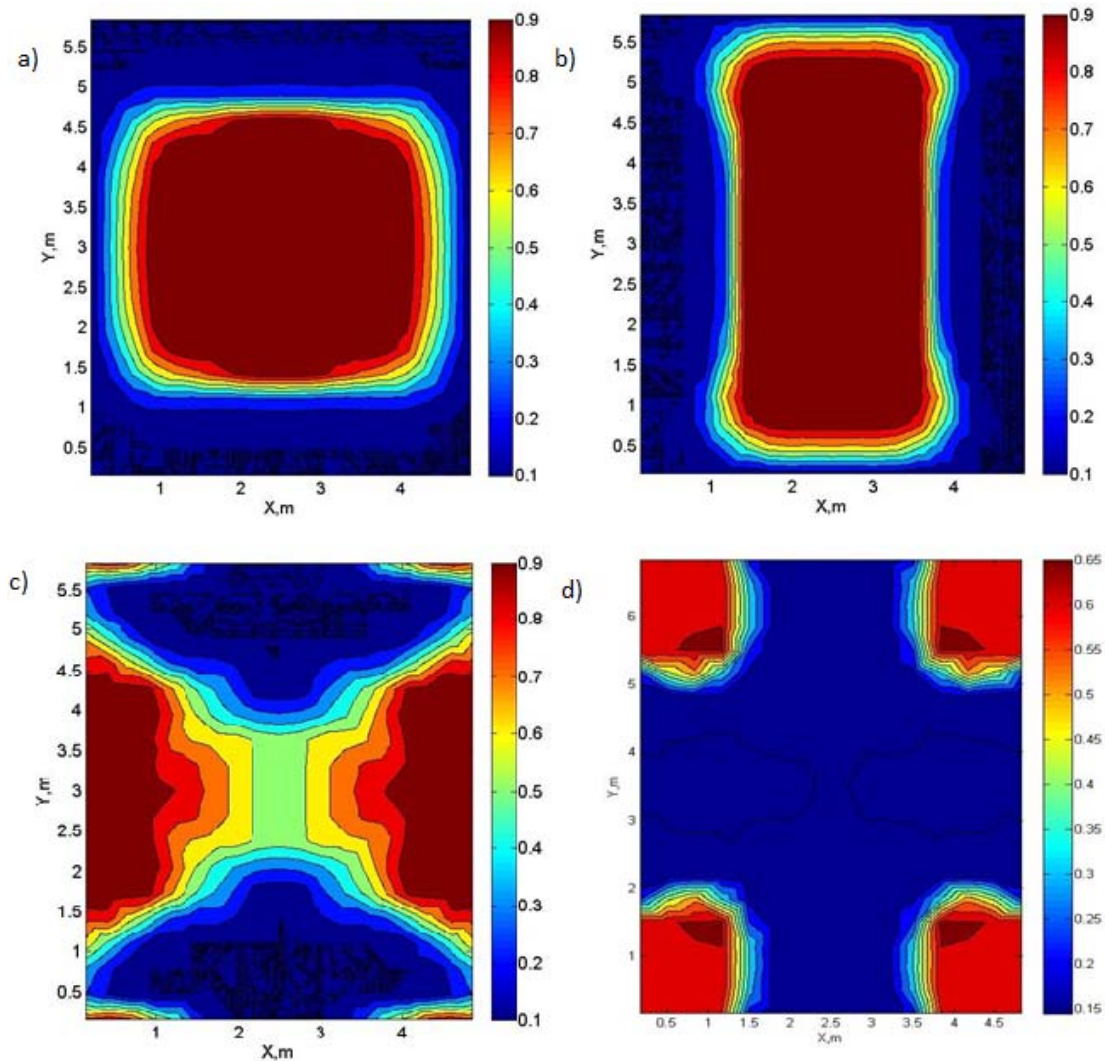
$$G_3 = \frac{1}{10}L_{y_2} - p_{y_2,1} \leq 0, \quad (4.28)$$

$$G_4 = p_{y_2,1} - \frac{8}{20}L_{y_2} \leq 0. \quad (4.29)$$

Ribotajam saplāksnim tika izmantotas šādas sākotnējās (vidējās) deformatīvās raksturvērtības [102, 106, 101]:

$$E_1 = E_2 = 5000(MPa), G_{13} = G_{23} = 100(MPa), G_{12} = 500(MPa), \nu_{12} = \nu_{21} = 0.3.$$

4.2. att. parādīti racionāli attiecīgo stingumu sadalījuma koeficienti. Redzams, ka lieces stingums  $D_{11}, D_{22}$  lielāks plātnes vidus zonā, bīdes stingums  $D_{44}$  pie balstiem noteiktā zonā, bet bīdes stingums  $D_{55}$  plātnes stūros.



4.2. att. Optimāla stingumu sadalījuma funkcijas.

a- lieces stinguma  $D_{11}$  sadalījuma funkcija  $x^1$ , b- lieces stinguma  $D_{22}$  sadalījuma funkcija  $x^2$ , c- bīdes stinguma  $D_{44}$  sadalījuma funkcija  $x^4$ , d- bīdes stinguma  $D_{55}$  sadalījuma funkcija  $x^3$ .

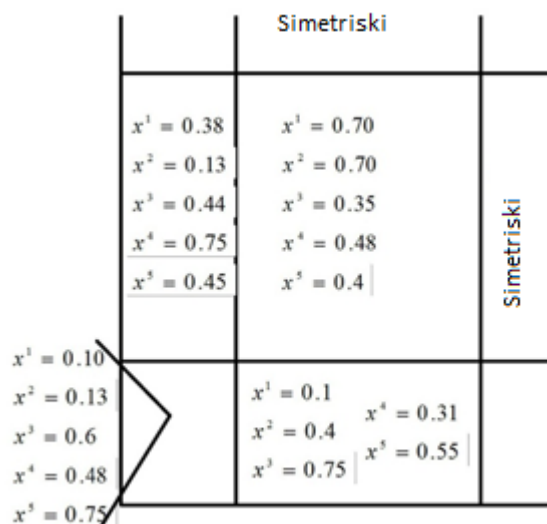
Atrisinot optimizācijas problēmu (4.25), iegūts, ka optimālie diskreto apgabalu izmēri ir  $p(y_1, 1) = 0.8 \text{ m}$ ,  $p(y_2, 1) = 0.98 \text{ m}$ . Optimālas stinguma koeficientu vērtības katrā no diskrētajiem apgabaliem parādītās 4.3. att.

4.4. att. parādītas padevīguma funkcijas un sprieguma lauka starpības izmaiņas iterāciju procesā. Redzams, ka visstraujāk samazinās padevīguma funkcijas  $c(x)$  vērtība (samazinājums 35%) un galveno sprieguma komponentu vērtības  $\sigma_{11}(x)$ ,  $\sigma_{22}(x)$  (samazinājums 10%).

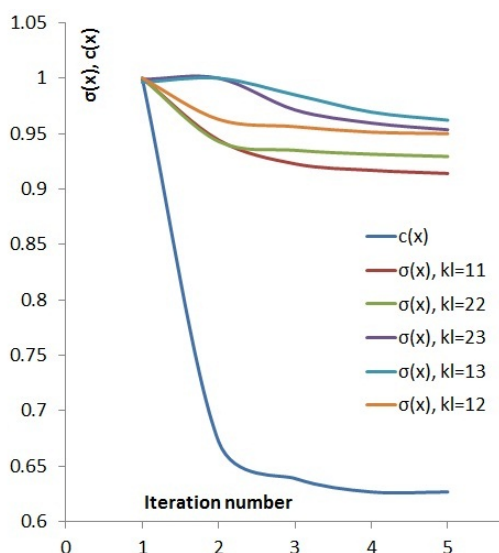
4.5. att. a. parādīts normalizētais padevīguma funkcijas  $c(x)$  lauks neoptimizētai plātnei, bet 4.5. att. b. optimizētai plātnei. Redzams, ka optimizētai

plātnei ir samazinājusies maksimālā padevīguma funkcijas vērtība par 35% un sadalījumam ir mazāks gradients, nekā neoptimizētai plātnei.

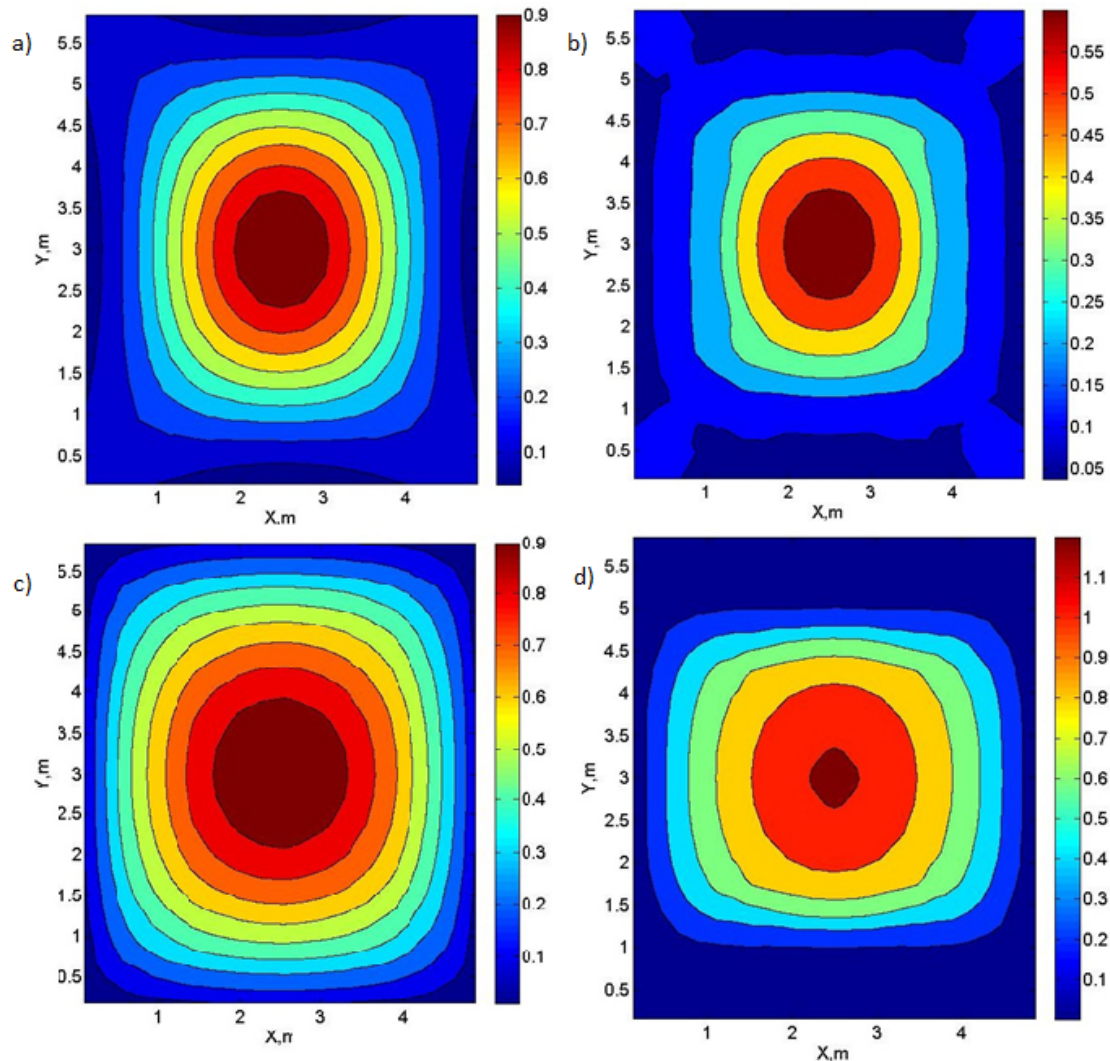
4.5. att. c. un d. parādīts normalizētais spriegumu atšķirību lauks, kas ir starpība starp  $\sigma_{11}^{av}(x)$  un  $\sigma_{11}(x)$  (kur indekss 1 nosaka ass  $y_1$  virzienu) neoptimizētai un optimizētai plātnei. Optimizētai plātnei maksimālā spriegumu vērtība plātnes centrā ir pieaugusi par 5%, taču sadalījums ir daudz vienmērīgāks.



4.3. att. Lieces un bīdes stinguma sadalījuma koeficienti diskrēti optimizētai plātnei (simetrijas dēļ parādīta ceturtdaļa).



4.4. att. Normalizētās padevīguma funkcijas  $c(x)$  un spriegumu atšķirību funkcijas  $\sigma(x)$  izmaiņa, pieaugot iterāciju skaitam.

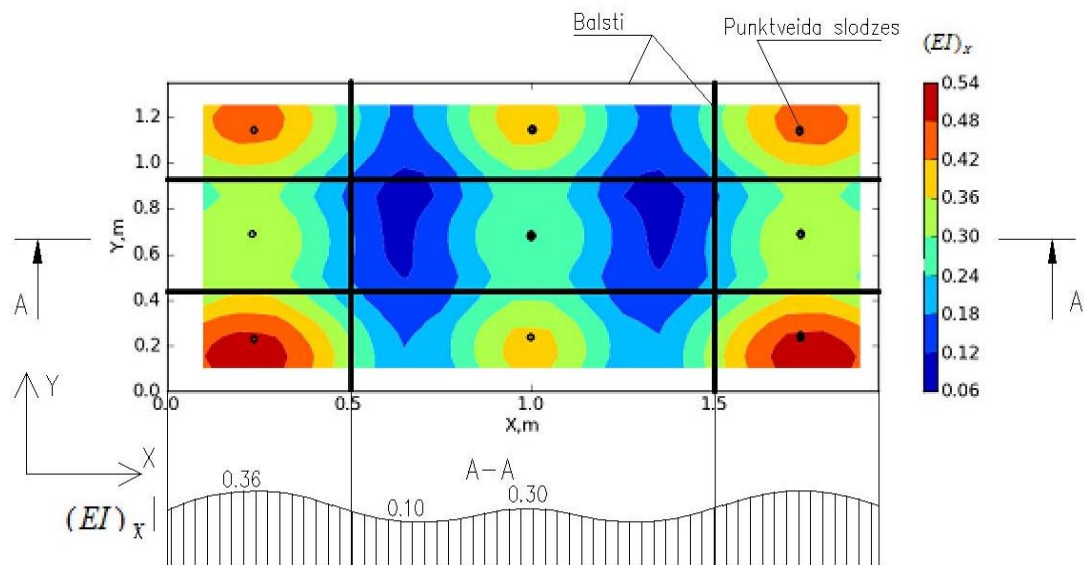


4.5. att. Normalizētais padevīguma funkciju un spriegumu atšķirību lauki.

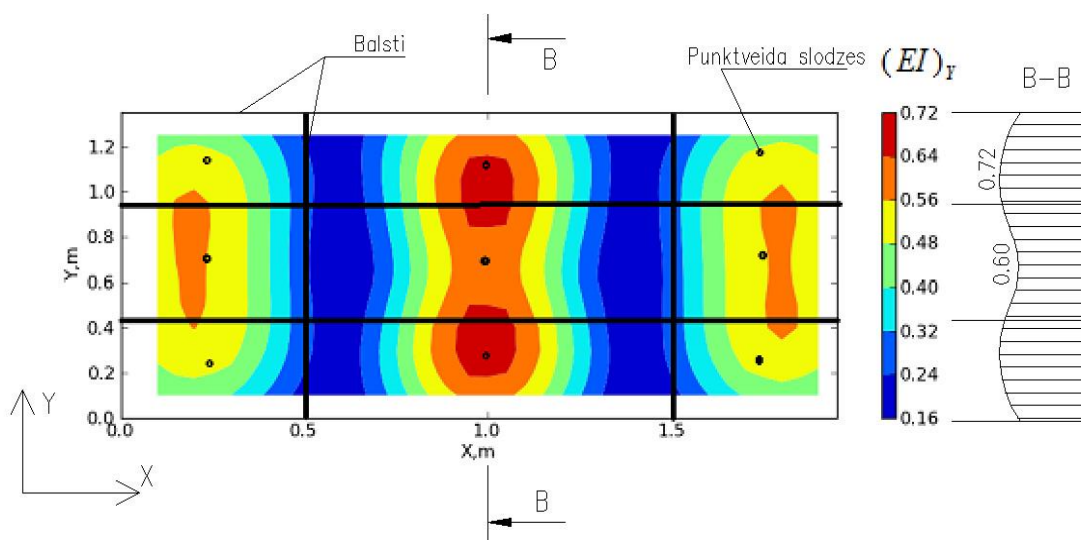
a- normalizētā padevīguma funkcija neoptimizētai plātnei, b- normalizētā padevīguma funkcija optimizētai plātnei, c- normalizētais spriegumu atšķirību lauks, kas ir starpība starp  $\sigma_{11}^{av}(x)$  un  $\sigma_{11}(x)$  (kur indekss 1 nosaka ass  $y_1$  virzienu) neoptimizētai plātnei, d- normalizētais spriegumu atšķirību lauks, kas ir starpība starp  $\sigma_{11}^{av}(x)$  un  $\sigma_{11}(x)$  (kur indekss 1 nosaka ass  $y_1$  virzienu) optimizētai plātnei.

#### 4.3.2. Trīslaidumu plātne ar koncentrētām slodzēm laidumu viduspunktos

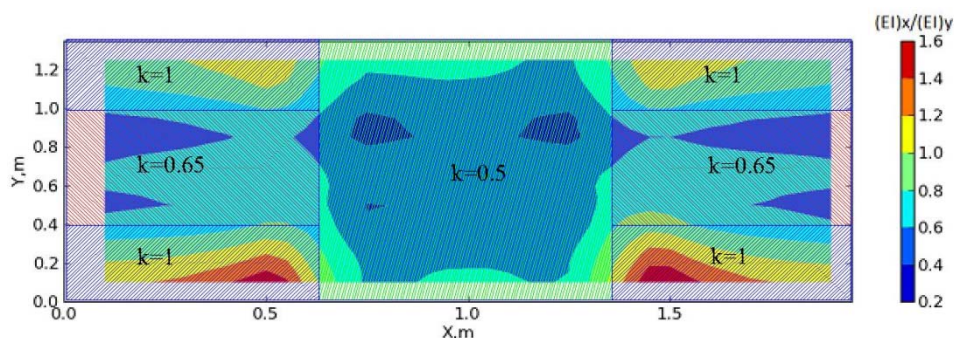
Optimizācija veikta plātnei ar garumu 2 m, platumu 1.3 m un biezumu 30 mm, kura nobalstīta kā parādīts 4.6. att. Katrā laiduma vidū atrodas vienību liela punktveida slodze. Redzams, ka plātnei ir nepieciešams par 25% lielāks lieces stingums  $y$  ass virzienā, jeb īsākā laiduma virzienā. Plātnei nav nepieciešams liels lieces stingums abu asu virzienos ap vidējiem balstiem  $y$  ass virzienā.



4.6. att. Trīs-laidumu plātnes ar punktveida slodzēm laidumu centros lieces stinguma  $x$  ass virzienā optimāls sadalījums.



4.7. att. Lieces stinguma  $y$  ass virzienā optimāls sadalījums.



$k=1.00$ : [ 90, 0, 90, 0, 0, 0, 90, 90, 90, 0, 90, 0, 90, 90, 90, 0, 0, 0, 90, 0, 90 ]  
 $k=0.65$ : [ 0, 90, 90, 90, 0, 90, 0, 90, 90, 90, 0, 90, 90, 90, 0, 90, 0, 90, 90, 90, 0 ]  
 $k=0.50$ : [ 0, 90, 90, 90, 90, 90, 0, 0, 90, 90, 0, 90, 90, 0, 0, 90, 90, 90, 90, 90, 0 ]

4.8. att. Optimāla lobskaidu orientācija diskrētos loksnes apgabalos.

Plātnei var būtiski palielināt stingumu, ja mērķtiecīgi to sadala diskrētos apgabalos un katrā apgabalā plātņi veido no saplākšņa loksnes ar specifisku lobskaidu orientāciju.

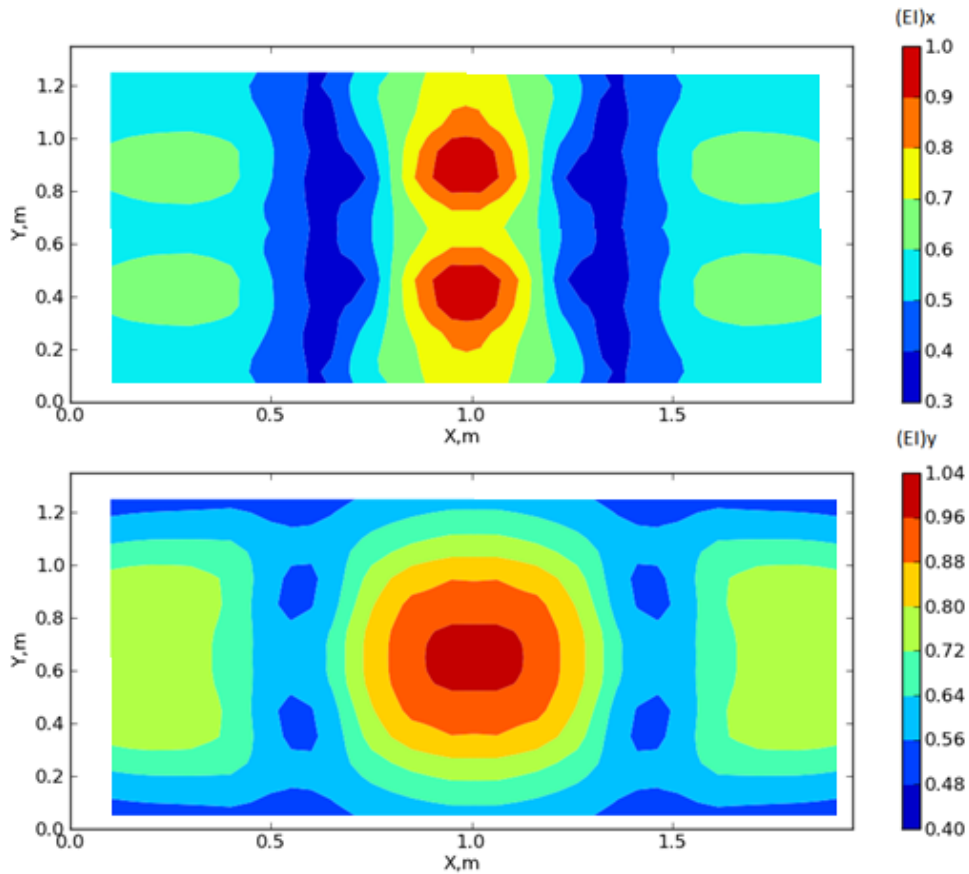
Šim nolūkam nepieciešams ievest stingumu attiecības koeficientu:

$$k = \frac{(EI)_x}{(EI)_y} \quad (4.30)$$

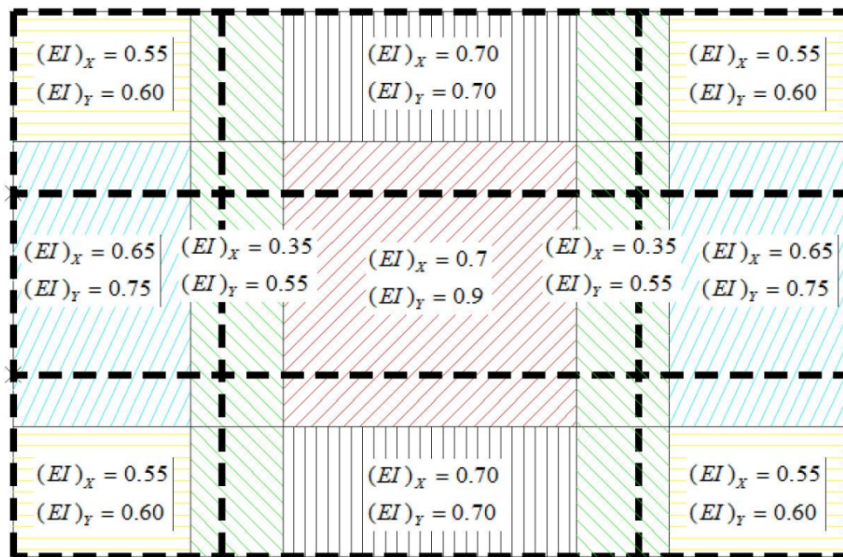
Pēc šī stinguma koeficienta katrā diskrētajā apgabalā veido lobskaidu orientāciju tādu, lai stingumu attiecība būtu pēc iespējas tuvāka nepieciešamajai. Šim konkrētajam gadījumam, kad stingumu atšķirības abos virzienos nav lielākas par 25%, materiālu ekonomija nav liela- 5%, salīdzinājumā ar tradicionāli lietotu saplākšņa loksni. Taču gadījumos, kad plātne izteikti vienā virzienā strādā vairāk nekā otrā, iespējams iegūt materiālu ekonomiju līdz 20%, mērķtiecīgi orientējot lobskaidas.

#### 4.3.3. Trīslaidumu plātne ar divām kustīgām slodzēm

Aktuāls jautājums mašīnbūvē auto treileru grīdas konstrukcijā ir optimālas plātnes struktūras atrašana trīslaidumu plātnei (tādai pašai kā sadaļā 4.3.2. uzrādītajai), uz kuru darbojas divas kustīgas punktveida slodzes. 4.9. att. parādīti optimāli lieces stingumu sadalījumi šādai trīslaidumu plātnei galvenajos virzienos. Šajā gadījumā redzams, ka plātne jāveido maksimāli stinga centrālajā daļā, jo tā visvairāk ietekmē plātnes darbu pie jebkuras slodžu kombinācijas.



4.9. att. Optimāls lieces stinguma sadalījums galvenajos virzienos plātnē ar divām kustīgām slodzēm



4.10. att. Racionāls dalījums diskrēta stinguma apgabalos un lieces stinguma vērtības katrā no apgabaliem.

4.10. att. parādīts racionāls plātnes sadalījums diskrētos taisnstūra formas apgabalos, balstoties uz lieces stinguma topoloģijām, kuras parādītas 4.9. att. Veidojot

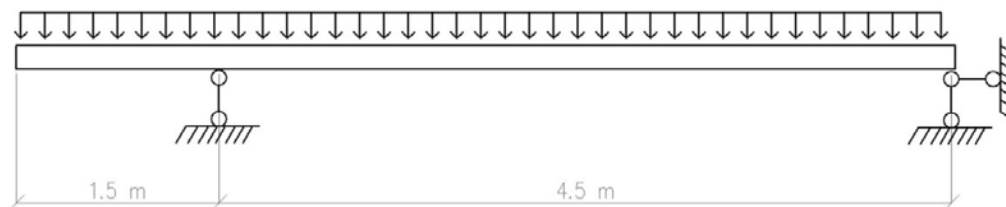
plātņi ar šādām lieces stingumu attiecībām, iespējams iegūt materiālu ekonomiju līdz 25%, salīdzinājumā ar nemainīga stinguma plātnēm.

#### 4.3.4. Vienlaiduma plātne ar konsoli un vienmērīgi izkliedētu slodzi

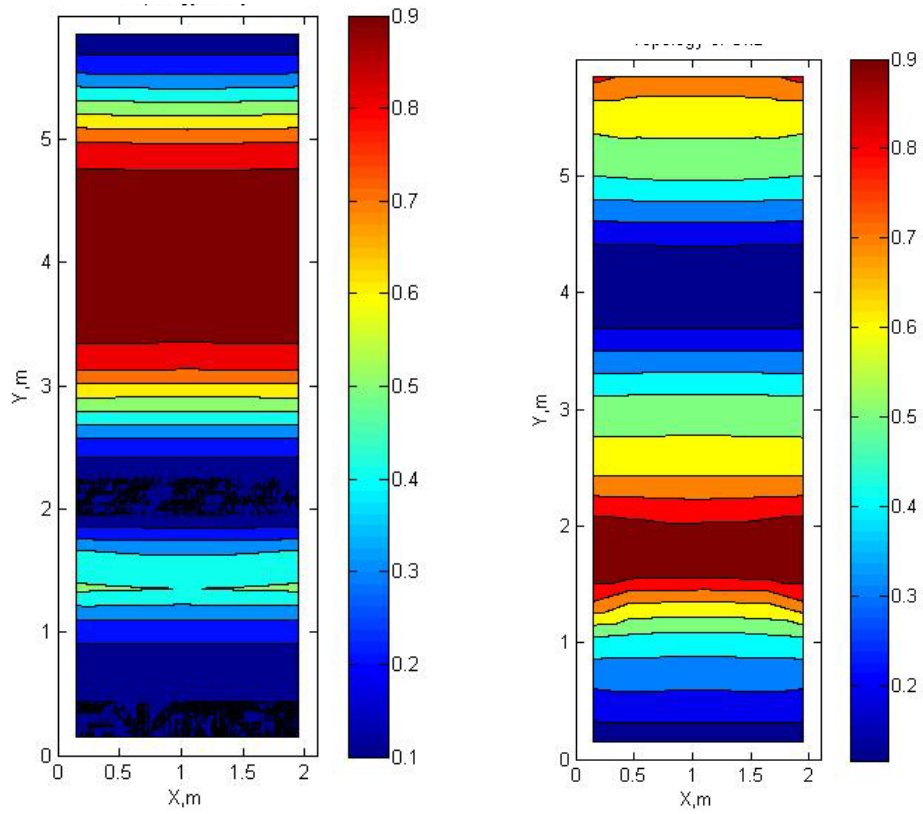
Trīstūrveida, trīslocīklu divslīpu jumta arku konstrukcijām, ja jumta slīpums nav liels, tad šīs arkas lieces izraisītās deformācijas un spriegumi ir pietiekami lieli, lai būtu lietderīgi optimizēt šīs konstrukcijas lieces stingumu. Puse no divslīpu jumta arkas konstrukcijas plātnes parādīta 4.11. att. Konsole ir nepieciešama, lai atrisinātu jumta pārkares problēmu tipveida mājām.

4.12. att. parādīts optimāls lieces stinguma un bīdes stinguma sadalījums plātnes galvenajā darbības virzienā, ja slodze ir vienmērīgi izkliedēta. Redzams, ka maksimālais plātnes lieces stingums nepieciešams laiduma trešdaļā, bet uz balsta konsoles pusē nepieciešams par 50% mazāks lieces stingums. Bīdes stingums virs balsta konsoles pusē nepieciešams par 20% lielāks nekā otrā balstā.

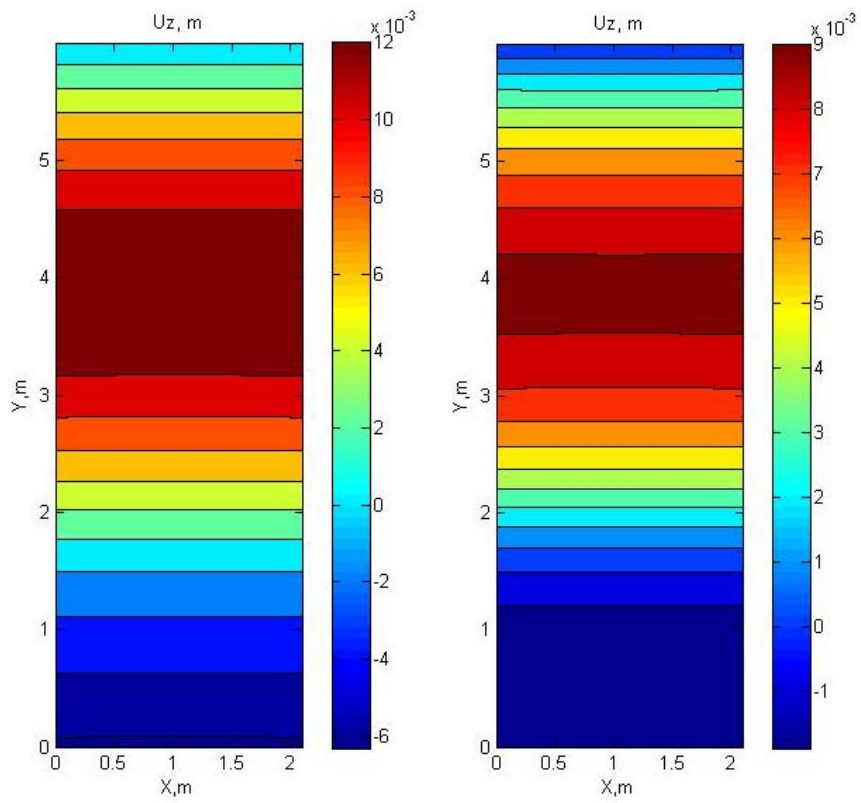
Redzams, ka šādi optimizētai plātnei maksimālā izliece var tikt samazināta par 33% (skatīt 4.13. att.) pie tā paša materiālu patēriņa.



4.11. att. Vienlaiduma sijas, kam ir konsole, izmēri un aprēķina shēma.



4.12. att. Optimāls lieces stinguma  $D_{22}$  koeficienta  $x^2$  un bīdes stinguma  $D_{33}$  koeficienta  $x^3$  sadalījums.



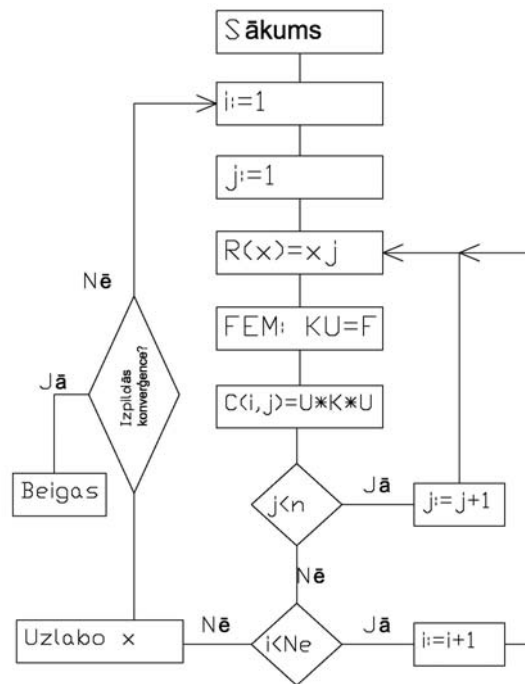
4.13. att. Plātnes izliece (metros) gadījumā, kad tai ir neoptimizēta un optimizēta struktūra.

#### 4.4. Metodika ārējo lobskaidu orientācijas leņķa optimizācijai

Liektu plātņu gadījumā liela nozīme ir ārējo lobskaidu orientācijas leņķim, kurš ļoti būtiski ietekmē plātnes stinguma un stiprības īpašības. Tā rodas nepieciešamība izstrādāt speciālu metodiku, ar kuras palīdzību plātnēm un čaulām būtu iespējams noteikt optimālu ārējo lobskaidu orientāciju.

Izstrādāta speciāla metodika, kuras pamatā ir konstrukcijas padevīguma minimizācija, piemeklējot optimālāko ārējo lobskaidu orientācijas leņķi attiecīgos punktos (katra galīgā elementa centrā). Metodes pamatā ir algoritms, kura blokshēma parādīta 4.14. att.

Algoritms sastāv no trim cikliem. Ārējais cikls tiek izpildīts līdz brīdim, kad konverģences kritērijs tiek apmierināts (kritēriji var būt dažādi, piemēram, konstrukcijas kopējais padevīgums vairs būtiski nemainās). Vidējā ciklā tiek aplūkoti visi galīgie elementi no  $1$  līdz  $N_e$  (kopējais galīgo elementu skaits). Iekšējā ciklā tiek pārbaudīta konstrukcijas uzvedība, ja attiecīgajā apgabalā tās ārējām lobskaidām ir kaut kāda noteikta, diskrēta slāņu orientācijas leņķa vērtība. Visu ciklu iekšienē ir speciāla procedūra  $R(x)=x_j$ , kas apgabalā ar centru  $j$ -tajā galīgajā elementā un rādiusu  $R_{inf}$  izmaina pašreizējos orientācijas leņķus uz  $x_j$ . Ciklu iekšienē tiek veikts galīgo elementu aprēķins, kā arī pēc iegūtajiem rezultātiem izskaitļots kopējais konstrukcijas padevīgums  $C(i,j)$  (indeksi norāda  $i$ -to galīgo elementu un  $j$ -to diskrēto slāņu orientācijas leņķa vērtību). Galīgo elementu aprēķinā izmantoti 4 mezglu taisnstūra galīgie elementi, kas balstīti uz Kirhofa-Lova lineāro teoriju. Lobskaida tiek uzskatīta par ortotropu, lineāri elastīgu slāni.



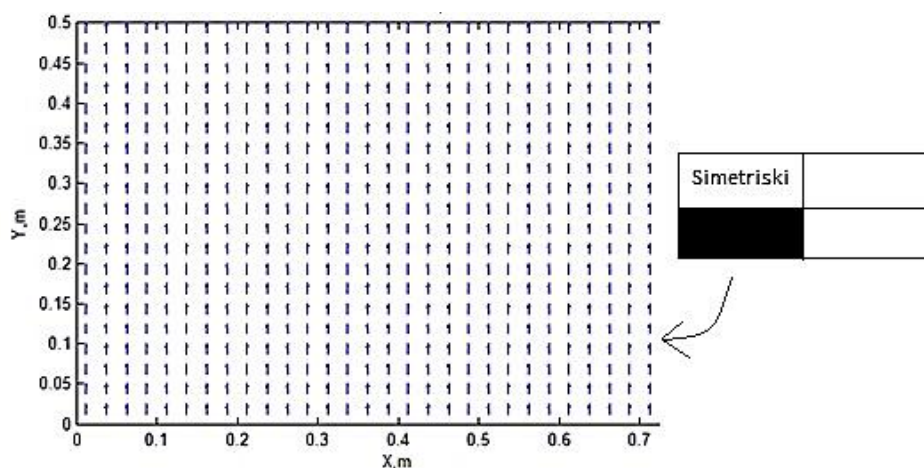
4.14. att. Piedāvātās metodes ārējo lobskaidu orientācijas leņķa optimizācijai.

Lai varētu veikt praktiskus aprēķinus, izstrādāta aprēķinu programma *MATLAB 7.10.0* vidē, kuras pamatā ir piedāvātais algoritms. Ar šo metodi tika optimizēta ārējo lobskaidu orientācija 19 slāņu bērza saplāksnim ar kopējo biezumu 26 mm.

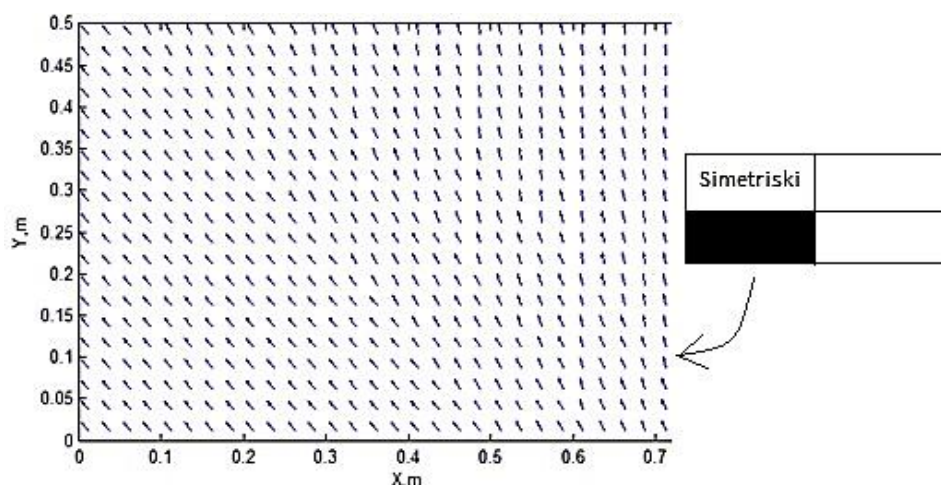
Sākotnēji pieņemtā slāņu orientācija ir šāda:  $[90,0,90,0,90,0,90,0,90,0,90,0,90,0,90,0,90]$ . Tika optimizēta ārējā lobskaida, tādējādi optimizējamās loksnes slāņu orientācija ir šāda:  $[x,0,90,0,90,0,90,0,90,0,90,0,90,0,90,0,x]$ . Aprēķinos visos gadījumos ietekmes rādiuss bija nemainīgs  $R_{inf}=0.2(m)$ .

Pirmajā skaitliskajā eksperimentā tika optimizēta ārējās lobskaidas šķiedru orientācija taisnstūrveida, vienlaiduma, pa kontūru balstītai plātnei, uz kuru darbojas vienmērīgi izkliedēta slodze ar intensitāti  $1\text{ KPa}$ , kas pielikta, kā koncentrētas slodzes mezglu punktos. Aprēķini veikti pie šādām plātnes platuma un garuma attiecībām  $a/b=1;1.5;2$ . Gadījumā, ja plātnes platuma un garuma attiecība ir 1.5, tad optimālā un sākotnēji pieņemtā malējo šķiedru orientācija parādītās 4.15.att. un 4.16.att. Rezultāti par maksimālajiem pārvietojumiem un lieces momentiem apkopoti tabulā 4.1. Piemēram, ja plātnes malas garuma un platuma attiecība ir 1, tad neoptimizētā plātne izliecas par 1.33 mm, bet optimizēta par 1.16mm, kas ir par 13% mazāk. Palielinoties plātnes malas platuma un garuma attiecībai, šī atšķirība samazinās. Izlieču sadalījums

pa plātni optimizētai un neoptimizētai konstrukcijai ir atšķirīgs (skat. 4.17.att. un 4.18.att.).



4.15.att. Sākotnēji pieņemtā neoptimizētas, pa visu kontūru balstītas plātnes ārējo lobskaidu orientācija (simetrijas dēļ parādīta tikai ceturtdaļa- kreisais apakšējais stūris).



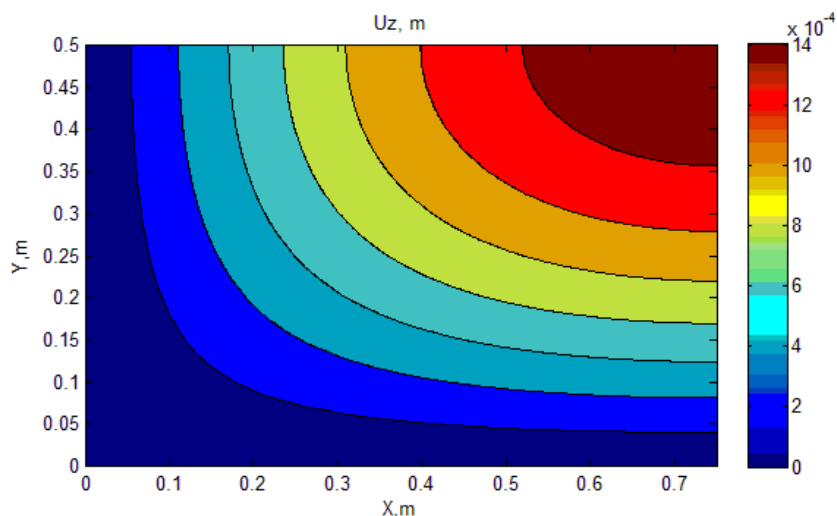
4.16.att. Ārējo lobskaidu orientācija optimizētai plātnei (simetrijas dēļ parādīta tikai ceturtdaļa- kreisais apakšējais stūris).

Tabula 4.1.

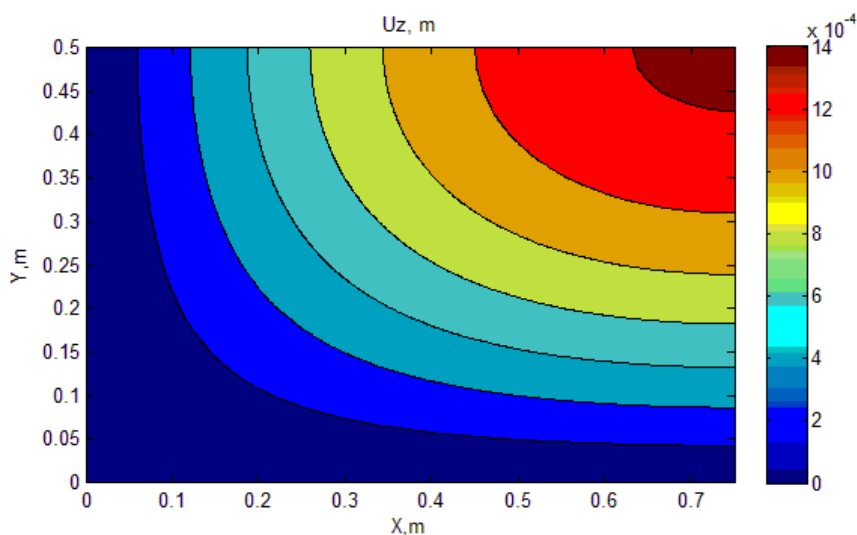
Maksimālie pārvietojumi un lieces momenti optimizētai un neoptimizētai plātnei\*.

	Neoptimizēta			Optimizēta		
	a/b=2	a/b=1.5	a/b=1	a/b=2	a/b=1.5	a/b=1
$U_z$ , m	0.00143	0.00155	0.00133	0.00136	0.00144	0.00116
$Rot_x$ , rad	0.00456	0.00499	0.00434	0.00438	0.00473	0.00393
$Rot_y$ , rad	0.00282	0.00369	0.00439	0.00263	0.00339	0.00392
$M_x$ , KN*m/1m	0.141	0.185	0.241	0.135	0.167	0.243
$M_y$ , KN*m/1m	0.237	0.278	0.292	0.226	0.246	0.210
$M_{xy}$ , KN*m/1m	0.0239	0.0318	0.0383	0.0273	0.0354	0.0392

\* a/b- plātnes platuma un garuma attiecība. x-y Dekarta koordinātu sistēma, kur x- horizontālā ass, y- vertikālā ass



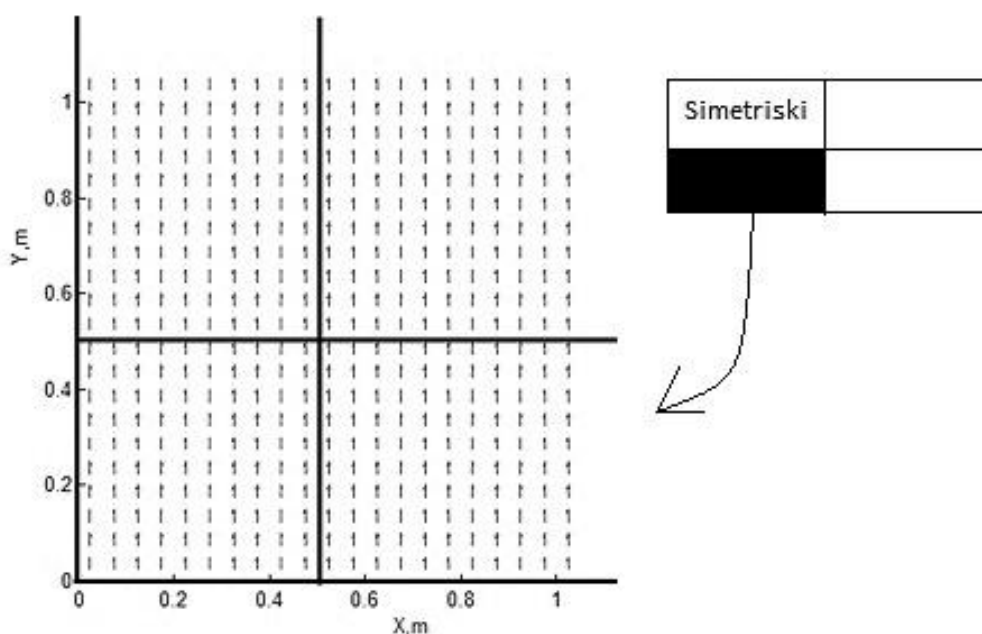
4.17.att. Izlieču grafiks (metros) neoptimizētai plātnei (simetrijas dēļ parādīta tikai ceturtdaļa).



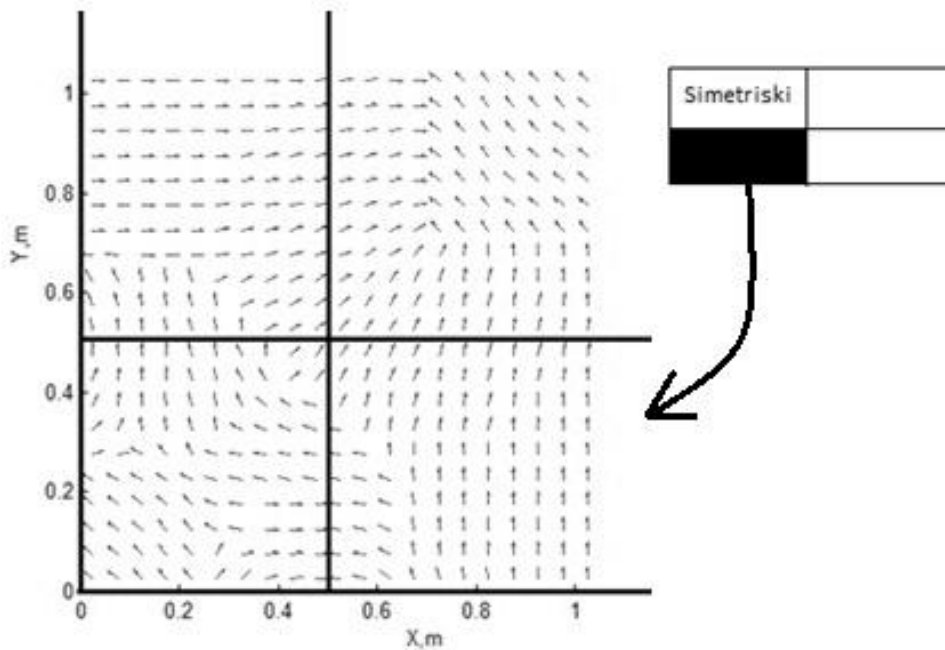
4.18.att. Izlieču grafiks (metros) optimizētai plātnei (simetrijas dēļ parādīta tikai ceturtdaļa).

Izmantojot izstrādāto metodiku, tika noteikta optimāla ārējo lobskaidu orientācija trīs slaidumu plātnēm ar malas garumu un platumu 2.1 (m). Pirmajā skaitliskajā eksperimentā tika aplūkota plātne, kurai abos virzienos ir šādi laidumi 0.5 (m), 1.1 (m) un 0.5 (m). Šim gadījumam sākotnēji pieņemtā un optimizētā ārējo lobskaidu orientācija parādītas 4.19.att. un 4.20.att. Šajā gadījumā maksimālā izliece optimizētai plātnei ir 0.16 (mm), bet neoptimizētai tā ir 0.189 (mm). Tātad optimizēta plātne izliecas par 15% mazāk.

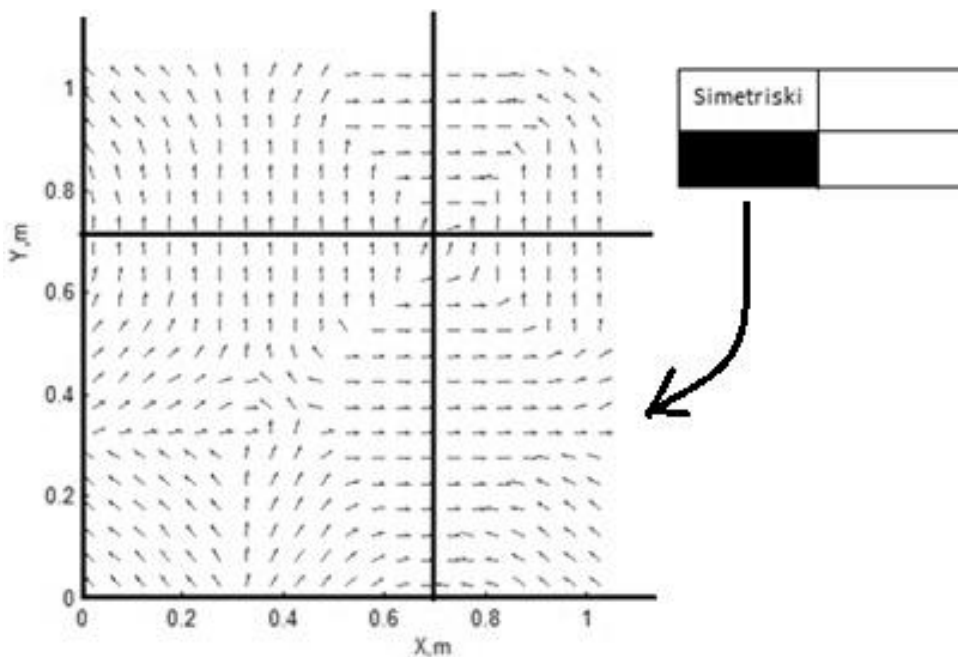
Analoģiski tika aplūkota trīs-laidumu plātne ar vienādiem laidumiem abos virzienos 0.7 (m), 0.7 (m) un 0.7 (m). Šai plātnei optimālā lobskaidu orientācija parādīta 4.21.att. Šim gadījumam tika veikts skaitliskais eksperiments, kurā tika noskaidrots, kādu efektu dod tas, ja tiek optimizēta vairāk nekā viena ārējā lobskaida (visām optimizējamajām lobskaidām ir vienāds orientācijas leņķis). Skaitliskajā eksperimentā iegūtie rezultāti apkopoti tabulā 4.2. Piemēram, ja tiek optimizēts tikai viens ārējais slānis, tad izliece samazinās par 14%, bet ja divi ārējie slāņi, tad izliece samazinās par 20%. Gadījumā, kad tika optimizēti trīs ārējie slāņi, tad izlieču samazinājums vairs būtiski nepieauga, līdz ar to varam secināt, ka šim gadījumam ir pietiekami, ja tiek optimizētas lobskaidu orientācijas tikai divos ārējos slāņos.



4.19.att. Sākotnēji pieņemtā ārējo lobskaidu orientācija neoptimizētai plātnei (simetrijas dēļ parādīta tikai ceturtdaļa- kreisais apakšējais stūris, biezās melnās līnijas norāda balstus).



4.20.att. Optimāla ārējo šķiedru orientācija trīs slaidumu plātnei ar laidumiem 0.5(m), 1.1(m) un 0.5 (m) abos virzienos (simetrijas dēļ parādīta tikai ceturtdaļa- kreisais apakšējais stūris, biezās melnās līnijas norāda balstus).



4.21.att. Optimāla ārējo šķiedru orientācija trīs slaidumu plātnei ar laidumiem 0.7(m), 0.7(m) un 0.7 (m) abos virzienos (simetrijas dēļ parādīta tikai ceturtdaļa- kreisais apakšējais stūris, biezās melnās līnijas norāda balstus).

Tabula 4.2.

Maksimālie pārvietojumi un lieces momenti neoptimizētai un optimizētai plātnei pie atšķirīga optimizējamo ārējo slāņu skaita\*

	Neoptimizēta plātne / Plātne ar 1 optimizētu slāni	Neoptimizēta plātne / Plātne ar 2 optimizētiem slāņiem	Neoptimizēta plātne / Plātne ar 3 optimizētiem slāņiem
$U_z$ , mm	0.0036 / 0.0031	0.0036 / 0.0029	0.0036 / 0.0029
$Rot_x$ , rad	0.000193 / 0.000174	0.000193 / 0.000166	0.000193 / 0.000167
$Rot_y$ , rad	0.000195 / 0.000174	0.000203 / 0.000167	0.000203 / 0.000165
$M_x$ , KN*m/1m	0.0194 / 0.025	0.0125 / 0.0245	0.0125 / 0.0274
$M_y$ , KN*m/1m	0.0238 / 0.0223	0.0306 / 0.0268	0.0306 / 0.0265
$M_{xy}$ , KN*m/1m	0.00276 / 0.00285	0.00283 / 0.00418	0.00283 / 0.00586

\*Abos virzienos laidumi ir 0.7m/0.7m/0.7m. Plātne ir noslogota ar vienmērīgi izkliedētu slodzi.

## 5. APRĒĶINU METODIKA PLĀTŅVEIDA ELEMENTA RACIONĀLA, DISKRĒTI MAINĪGA RIBOJUMA NOTEIKŠANAI

Plātnei ar diskreti mainīgu ribojumu nepieciešams katrā diskrētajā apgabalā noteikt nepieciešamā ribojuma un apšuvumu biezumus un citus parametrus tā, lai plātne varētu uzņemt maksimālās piepūles katrā apgabalā. Katrā apgabalā jānosaka struktūra, kuras nestspēja- maksimālās piepūles, kuras var uzņemt attiecīgā struktūra, ir pēc iespējas tuvākas ārējo slodžu radītajam piepūļu laukam. Piepūles nosaka plātnei ar diskreti mainīgu stingumu sadalījumu.

Plātnei racionāli ģeometriskie parametri  $p = p(p_1, p_2, \dots, p_n)$  tiek noteikti minimizējot funkcionāli  $P(p)$ :

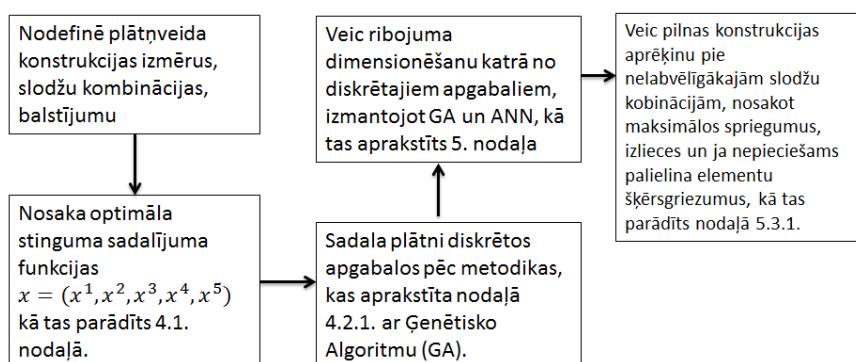
$$\min P(p) = \sum_i k_i |MQ^{max}(p)_i - MQ(p)_i|, i = 1..5, \quad (5.1)$$

kur  $MQ^{max} = (M_x^{max}, M_y^{max}, M_{xy}^{max}, Q_{xz}^{max}, Q_{yz}^{max})$  - maksimālie lieces un vērpes momenti, un šķērsspēki attiecīgajos virzienos, kurus var uzņemt ribotā plātne, nepārsniedzot spriegumiem aprēķina stiprību,  $MQ = (M_x, M_y, M_{xy}, Q_{xz}, Q_{yz})$  - maksimālie lieces un vērpes momenti, un šķērsspēki attiecīgajā diskrētajā apgabalā, kas aprēķināti plātnei ar racionālu, diskreti mainīgu stingumu,  $k_i, i = 1..5$  - svara koeficienti, kurus nosaka ar šādu vienādību

$$k_i = \begin{cases} \frac{MQ(p)_i}{\sum_{j=1}^5 MQ(p)_j}, (MQ^{max}(p)_i - MQ(p)_i) > 0 \\ (1+k) \frac{MQ(p)_i}{\sum_{j=1}^5 MQ(p)_j}, (MQ^{max}(p)_i - MQ(p)_i) < 0, k > 0 \end{cases}, \quad (5.2)$$

kur  $k$  - koeficients, kurš būtiski palielina svara koeficientu, ja plātnes nestspēja ir mazāka par nepieciešamo, kas savukārt būtiski palielina mērķa funkcijas vērtību un palīdz izvairīties no plātnes ar nepietiekamu nestspēju.

Minimizācijas problēma (5.1) tiek risināta izmantojot Ģenētisko algoritmu. Galvenie soļi racionāla ribojuma noteikšanas algoritmā parādīti 5.1. att.



5.1. att. Diskrēti mainīga- racionāla ribojuma aprēķina shēma.

### 5.1. Teorētiskās nestspējas noteikšanas metodika ribotai saplākšņa plātnei ar plakanas un izliektas formas ribojumu

Lai noteiktu maksimālās iekšējās piepūles  $MQ^{max} = (M_x^{max}, M_y^{max}, M_{xy}^{max}, Q_{xz}^{max}, Q_{yz}^{max})$ , ko var uzņemt plātne ar attiecīgo struktūru, katrai piepūlei veic atsevišķu aprēķinu, izmantojot speciālu aprēķina modeli, kas balstīts un slogots tā, lai analītiski būtu iespējams noteikt attiecīgo piepūļu  $M_x, M_y, M_{xy}, Q_{xz}$  vai  $Q_{yz}$  sadalījumu. Savukārt attiecīgās spriegumu vērtības  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$  nosaka ar galīgo elementu metodi. Maksimālās piepūles nosaka izmantojot šādas sakarības:

$$M_x^{max} = \min \left( \frac{\sigma_0^{[-]}}{f_{c,0,d}} M_x; \frac{\sigma_0^{[+]}}{f_{t,0,d}} M_x; \frac{\sigma_{90}^{[-]}}{f_{c,90,d}} M_x; \frac{\sigma_{90}^{[+]}}{f_{t,90,d}} M_x; \right), \quad (5.3)$$

$$M_y^{max} = \min \left( \frac{\sigma_0^{[-]}}{f_{c,0,d}} M_y; \frac{\sigma_0^{[+]}}{f_{t,0,d}} M_y; \frac{\sigma_{90}^{[-]}}{f_{c,90,d}} M_y; \frac{\sigma_{90}^{[+]}}{f_{t,90,d}} M_y; \right), \quad (5.4)$$

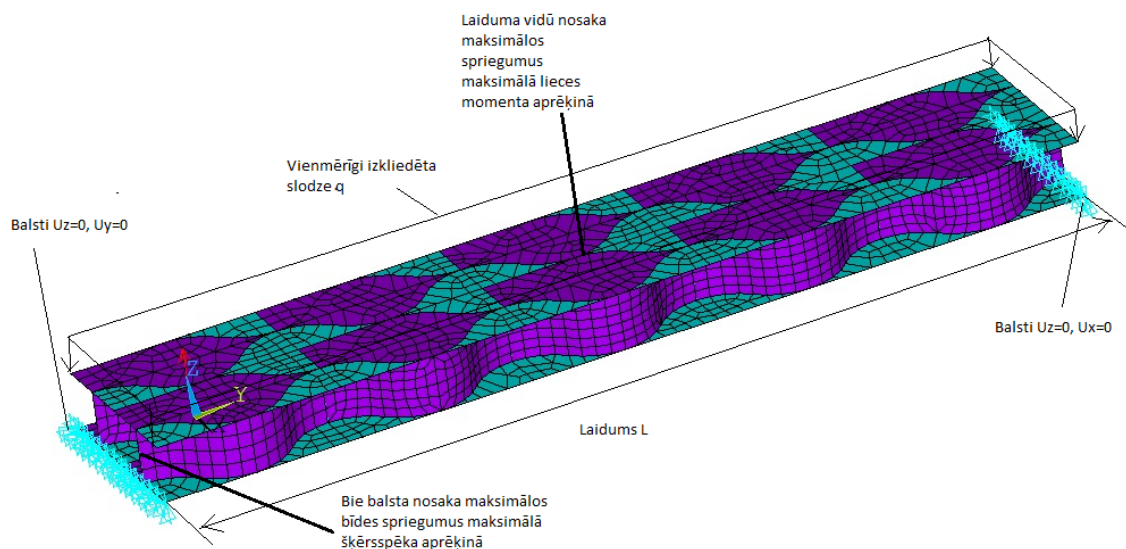
$$M_{xy}^{max} = \min \left( \frac{\sigma_0^{[-]}}{f_{c,0,d}} M_{xy}; \frac{\sigma_0^{[+]}}{f_{t,0,d}} M_{xy}; \frac{\sigma_{90}^{[-]}}{f_{c,0,d}} M_{xy}; \frac{\sigma_{90}^{[+]}}{f_{t,0,d}} M_{xy}; \frac{\sigma_{xy}}{f_{v,d}} M_{xy}; \right), \quad (5.5)$$

$$Q_{xz}^{max} = \min \left( \frac{\sigma_{xy}}{f_{v,d}} Q_{xz}; \right), \quad (5.6)$$

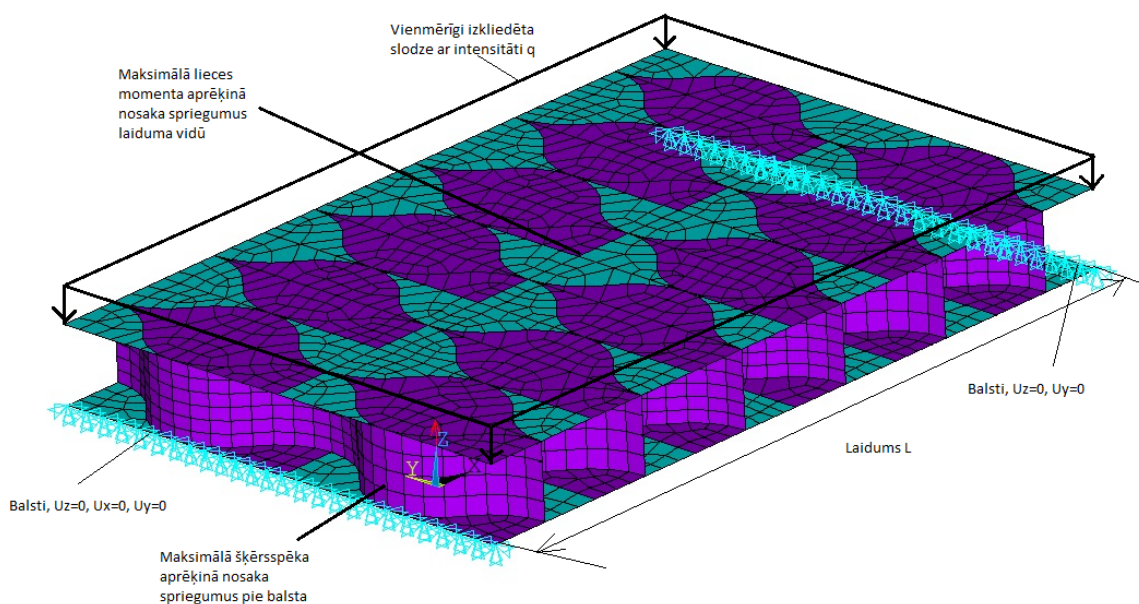
$$Q_{yz}^{max} = \min \left( \frac{\sigma_{xy}}{f_{v,d}} Q_{yz}; \right), \quad (5.7)$$

kur  $f_{c,0,d}, f_{t,0,d}$  – aprēķina stiprība spiedē un stiepē šķiedru garenvirzienā,  $f_{c,90,d}, f_{t,90,d}$  – aprēķina stiprība spiedē un stiepē šķiedru šķērsvirzienā,  $\sigma_0, \sigma_{90}$  –

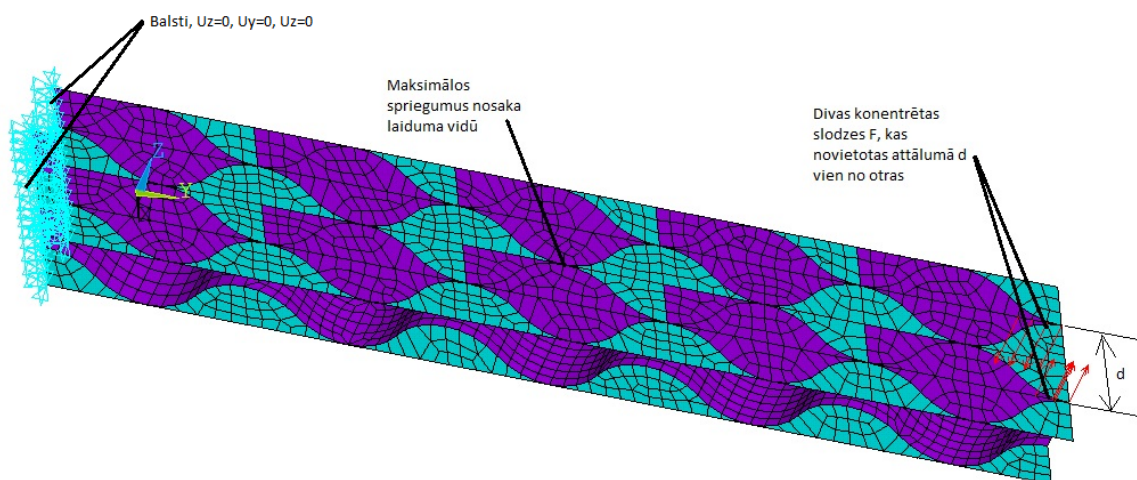
maksimālie spriegumi šķiedru garenvirzienā un šķērsvirzienā vietā, kurā ir attiecīgā iekšējā piepūle.



5.2. att. Aprēķina shēma maksimālo spriegumu aprēķinam ar galīgo elementu metodi nosakot  $M_y^{max}, Q_{yz}^{max}$ .



5.3. att. Aprēķina shēma maksimālo spriegumu aprēķinam ar galīgo elementu metodi nosakot  $M_x^{max}, Q_{xz}^{max}$ .



5.4. att. Aprēķina shēma maksimālo spriegumu aprēķinam ar galīgo elementu metodi nosakot  $M_{xy}^{max}$ .

5.2. att.5.3. att. parādītajām shēmām lieces momentu aprēķina pēc sakarības (5.8), bet šķērsspēkus pēc sakarības (5.9). 5.4. att. parādītai shēmai vērpes momentu aprēķina pēc sakarības (5.10).

$$M_{x,y} = q \frac{L^2}{8}, \quad (5.8)$$

$$Q_{xz,yz} = \frac{qL}{2}, \quad (5.9)$$

$$M_{xy} = Fd, \quad (5.10)$$

kur  $q$ - vienmērīgi izkliedētas slodzes intensitāte (KN/m),  $L$ - laidums,  $F$ - koncentrēta slodze,  $d$ - koncentrētā spēka  $F$  plecs.

## 5.2. Maksimālo piepūļu atkarība no ribojuma ģeometriskajiem parametriem

Galvenie faktori, kas ietekmē maksimālo piepūļu vērtības, ko var uzņemt plātne, ir augšējā un apakšējā apšuvuma, liekto ribu un plakano ribu biezumi, kā arī liekto ribu forma.

Maksimālās piepūles tika noteiktas plātnei ar:

- Biezumu kopējo 100 mm, 150 mm un 250 mm;
- augšējā, apakšējā apšuvuma un liektās ribas biezumu 6, 9.5, 13, 16.5, 20 mm;
- plakanās ribas biezumu 6.5 mm;
- Apšuvumu ārējo šķiedru orientācija 0 un 90 grādi attiecībā pret ribu orientāciju;
- ribu tipveida elementa platumu  $p_1$  – 200, 250 un 333 mm (skat. 5.8. att.);

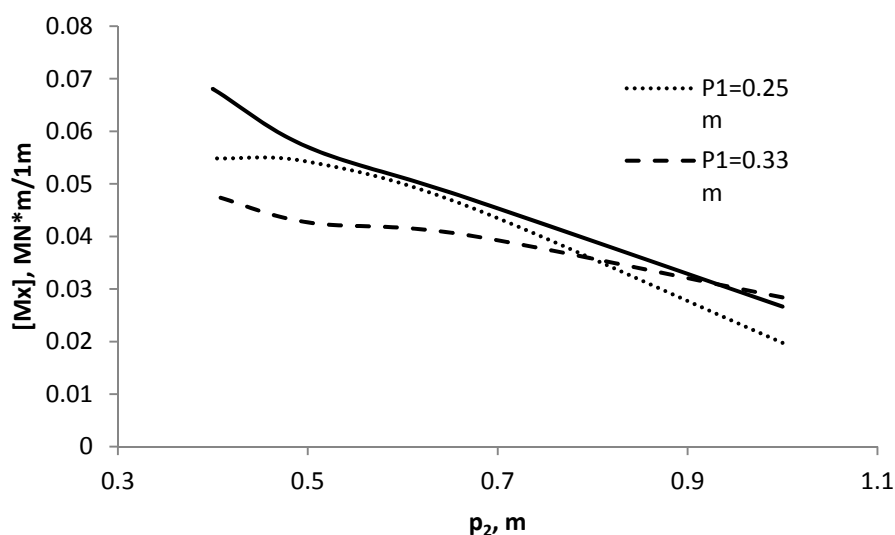
- ribu tipveida elementa garumu  $p_2$  –1000, 667, 500 un 400 mm (skat. 5.8. att.).

Augšējiem un apakšējiem apšuvumiem visos gadījumos pieņemts vienāds biezums. Tātad kopā 1800 gadījumos aprēķinātas maksimālās piepūles, ko plātne ar attiecīgo struktūru var uzņemt.

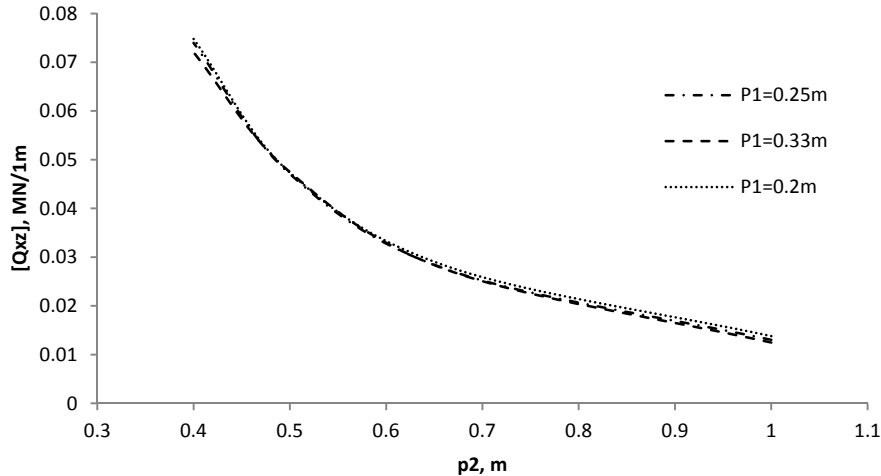
5.5. att. un 5.6. att. parādīta maksimālo iekšējo piepūļu atkarība no ribu tipveida elementa garuma  $p_2$  pie tipveida elementa platuma  $p_1 = \{200,250,333\}$ , augšējā un apakšējā apšuvuma biezuma 9.5mm, liekto ribu biezuma 13mm, kopējā plātnes biezuma 150mm un apšuvumu ārējo lobskaidu orientācijas ribu virzienā.

Palielinot ribojuma tipveida elementa garumu pie nemainīga platuma, maksimālais lieces moments, ko var uzņemt struktūra, samazinās, turklāt šī sakarība ir tuva lineārai (skatīt 5.5. att.). Turpretī maksimālais lieces moments ribu garenvirzienā nedaudz palielinās, palielinot ribojuma tipveida elementa garumu pie nemainīga platuma.

Maksimālais šķērsspēks perpendikulāri ribām samazinās pēc nelineāras sakarības, ja palielinās tipveida ribojuma elementa garums, turklāt tipveida ribojuma elementa platumam nav liela ietekme (skatīt 5.6. att.).



5.5. att. Maksimālais lieces moments  $M_x^{max}$  (perpendikulāri ribu garenvirzienam), atkarībā no ribu formas.



5.6. att. Maksimālais šķērsspēks  $Q_{xz}^{max}$  (perpendikulāri ribu garenvirzienam), ko var uzņemt plātne, atkarībā no ribu formas.

### 5.3. Mākslīgā Neironu Tīkla izveide un trenēšana

Lai ērti varētu izmantot iepriekšējā nodaļā iegūtos rezultātus, nosakot racionālu ribojumu katrā diskrētajā apgabalā, nepieciešams izveidot trenētu Mākslīgo Neironu tīklu, kurš var aprēķināt maksimālās piepūles, ko var uzņemt plātne ar paredzēto struktūru.

Vektora  $MQ^{max}$  koeficientu vērtības aprēķina ar iepriekš trenētu trīs slāņu Mākslīgo Neironu Tīklu:

$$MQ^{max} = f^2 \left( W^{2,1} f^1 (W^{1,1} p + b^1) + b^2 \right), \quad (5.11)$$

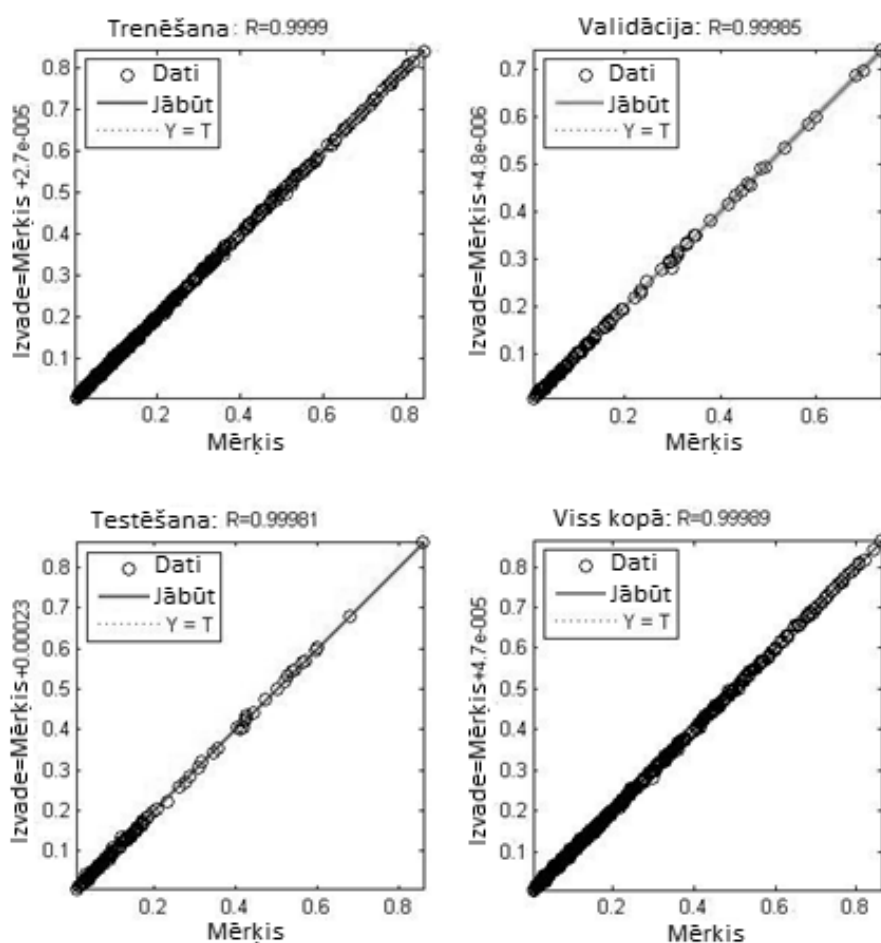
kur  $p = p(i)$  - vektors, kas sastāv no plātnes ģeometriskajiem parametriem iekšējai struktūrai,  $f^1, f^2$  - aktivācijas funkcijas,  $W^{2,1}, W^{1,1}$  - svaru matrica,  $b^2$  - tieksmes vektors (*bias vector*).

Svaru matricas un tieksmes vektora  $W_b = [W^{1,1}, W^{2,1}, b^1, b^2]$  koeficienti tiek noteikti iterāciju veidā izmantojot Levenberga Markvarda algoritmu [41]:

Svaru matricas un tieksmes vektora  $W_b = [W^{1,1}, W^{2,1}, b^1, b^2]$  koeficienti tiek noteikti iterāciju veidā izmantojot Levenberga Markvarda algoritmu [41]:

$$Wb_{k+1} = Wb_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e, \quad (5.12)$$

kur  $e$  - vidējās kvadrātiskās kļūdas vektors,  $\mu$  - skalāra konstante,  $I$  - vienības matrica,  $J$  - Jakobiāna matrica.



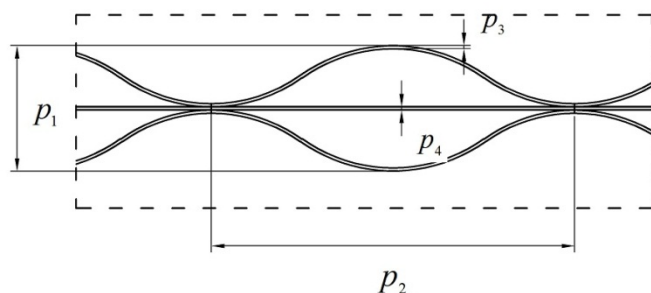
5.7. att. Mākslīgā Neironu Tīkla trenēšanas, validācijas un testēšanas rezultātu regresijas analīze.

Mākslīgā Neironu Tīkla ar 20 neironiem, trenēšanai tika izmantoti 70% no datiem, pārējie dati tika izmantoti validācijai un testēšanai. Validācijas un testēšanas rezultātu regresijas analīze (skat. 5.7. att.) parāda, ka izveidotais Mākslīgo Neironu Tīkls var noteikt plātnes nestspēju atkarībā no tās struktūras ar augstu precizitāti ( $R > 0.999$ ).

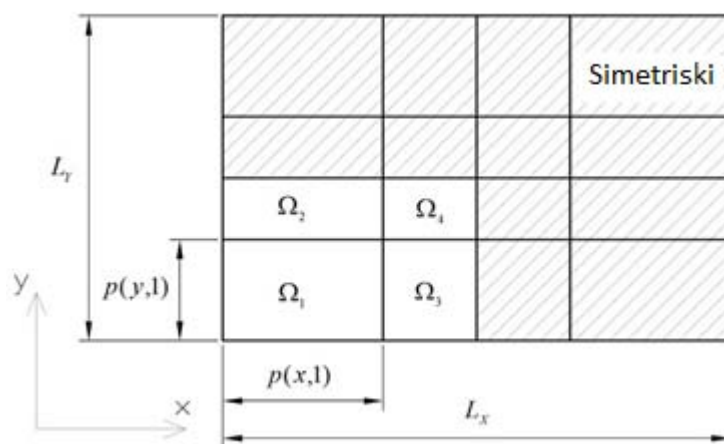
#### 5.4. Racionāls diskreti mainīgs ribojums

Racionāli ribojuma parametri noteikti plātnei ar 9 diskreti mainīgiem apgabaliem (simetrijas dēļ aplūkota plātnes ceturtda daļa) (skatīt 5.9. att.). Katrā

apgabālā ribojumu veido struktūra, kas parādīta 5.8. att. Plātne ir brīvi balstīta pa kontūru, un uz tās darbojas vienmērīgi izkliedēta slodze  $q=1 \text{ KPa}$ .

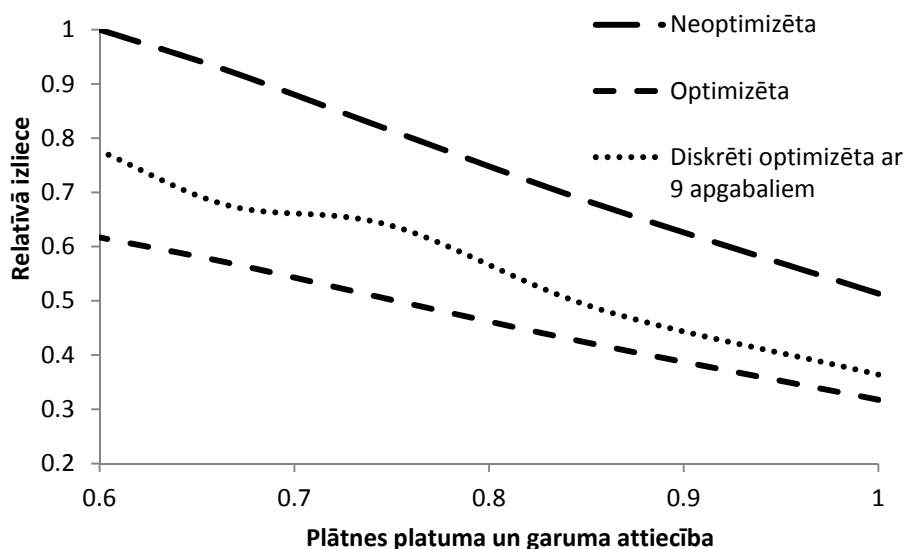


5.8. att. Ribojuma struktūras tipveida elements ar plakanām un liektām ribām.



5.9. att. Plātne ar 9 diskrētiem apgabaliem (simetrijas dēļ 4 apgabali tiek optimizēti).

Plātnes malas garuma un platuma attiecība būtiski ietekmē maksimālās izlieces samazinājumu optimizētai un diskrēti optimizētai plātnei. Piemēram, ja malas garuma un platuma attiecība ir 0.6, tad relatīvā izliece diskrēti mainīgai plātnei ar 9 diskrētiem apgabaliem samazinās par 25%, bet plātnei ar nepārtraukti mainīgu struktūru par 40% (skatīt 5.10. att.). Savukārt, ja šī attiecība ir 1, tad attiecīgie izlieču samazinājumi ir 50% un 60% (skatīt 5.10. att.).



5.10. att. Maksimālo izlieču salīdzinājums pa kontūru balstītai plātnei, kas noslogota ar vienmērīgi izkliedētu slodzi un ir ar neoptimizētu vai optimizētu struktūru.

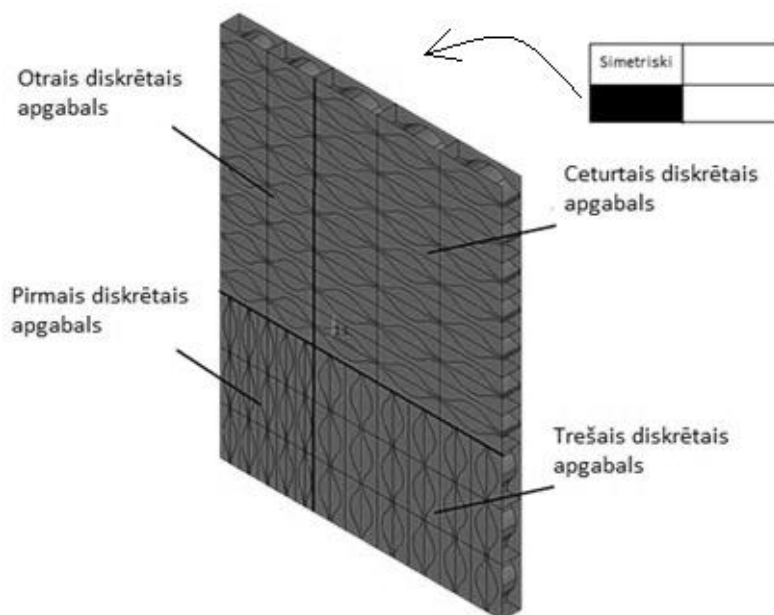
Atrisinot minimizācijas problēmu aplūkotajai plātnei ar malas garumu 6m un platumu 4.5m, iegūtie racionālie ģeometriskie parametri pie ribi orientācijas 0 un 90 grādiem apkopoti tabulā 5.1. Vizuāli iegūtā racionālā struktūra parādīta 5.11. att. Redzams, ka optimāla ribojuma orientācija sakrīt ar maksimālā lieces momenta un šķērsspēka virzienu.

Tabula 5.1.

Racionāla ribojuma parametri un orientācija katrā diskrētajā apgabalā\*.

Apgabala nr.	0 grādi ribi orientācija				
	$p_{1,m}$	$p_{2,m}$	$p_{3,m}$	$p_{5,m}$	$P(p)$
1	0.248	0.672	0.032	0.004	1.482
2	<b>0.379</b>	<b>0.577</b>	<b>0.029</b>	<b>0.022</b>	<b>0.772</b>
3	0.256	0.686	0.032	0.004	3.401
4	<b>0.343</b>	<b>0.616</b>	<b>0.007</b>	<b>0.032</b>	<b>1.430</b>
90 grādi ribi orientācija					
1	<b>0.249</b>	<b>0.670</b>	<b>0.032</b>	<b>0.004</b>	<b>1.469</b>
2	0.429	0.518	0.021	0.004	3.786
3	<b>0.349</b>	<b>0.583</b>	<b>0.032</b>	<b>0.007</b>	<b>0.802</b>
4	0.341	0.616	0.007	0.032	3.474

\* ar treknāku rakstu parādīti optimālie lielumi, ņemot vērā ribi orientāciju.



5.11. att. Aprēķinātais optimālais ribojums plātnei ar diskrēti mainīgu struktūru (simetrijas dēļ parādīta 4. daļa no plātnes- kreisais apakšējais stūris).

### 5.5. Spriegumu koncentrācijas

Iepriekšējā nodaļā aprēķinātie racionālie ģeometriskie parametri tika noteikti, neņemot vērā spriegumu koncentrācijas uz diskrēto apgabalu robežām. Taču aprēķini parāda, ka tieši šajās vietās plātnē veidojas ievērojamas spriegumu koncentrācijas (skatīt 5.12. att.).

Palielinot augšējā un apakšējā apšuvuma biezumu 2.5 reizes spriegumu koncentrāciju zonās, maksimālo spriegumu vērtības šajās vietās samazinās 2.7 reizes (skatīt 5.13. att.). Praktiski ir grūti izgatavot plātņi ar apšuvumu sabiezinājumu šajās zonās.

Lai noteiktu racionālu struktūru, pie kuras būtu iespējami samazinātas spriegumu koncentrācijas pa kontūru balstītai plātnei, tika analizēti 5 dažādi gadījumi:

1. Plātne bez optimāla stinguma sadalījuma, ar ģeometriskajiem parametriem, kas parādīti tabulā 5.2 un visos apgabalos ir vienāda struktūra.
2. Plātne bez optimāla stinguma sadalījuma ar 12 mm biezām, plakanām ribām.
3. Plātne ar optimālu, diskrēti mainīgu struktūru, kā tas parādīts iepriekšējā nodaļā.

4. Plātne ar optimālu diskkrēti mainīgu struktūru, kurai pastiprināts 3. apgabala augšējais un apakšējais apšuvums no 6.4 mm uz 14.8 mm.

5. Plātne ar optimālu diskkrēti mainīgu struktūru tikai ribojumam un vienādiem apšuvumiem visos apgabalos- to biezums 20.4 mm.

Tabulā 5.3. parādīti katram no pieciem gadījumiem īpatnējā nestspēja pēc normālspriegumiem, izlieces ( $1/200$  no laiduma) un bīdes spriegumiem. Redzams, ka visaugstākā īpatnējā nestspēja visos gadījumos sanāk 5. gadījumam, kad iegūts plātnes optimāls stinguma sadalījums, mainot tikai ribojuma ģeometriskos parametrus.

Līdzīga analīze tika veikta šādiem 4 gadījumiem plātnei ar laidumu 6m, biezumu 250mm, kas brīvi balstīta galos:

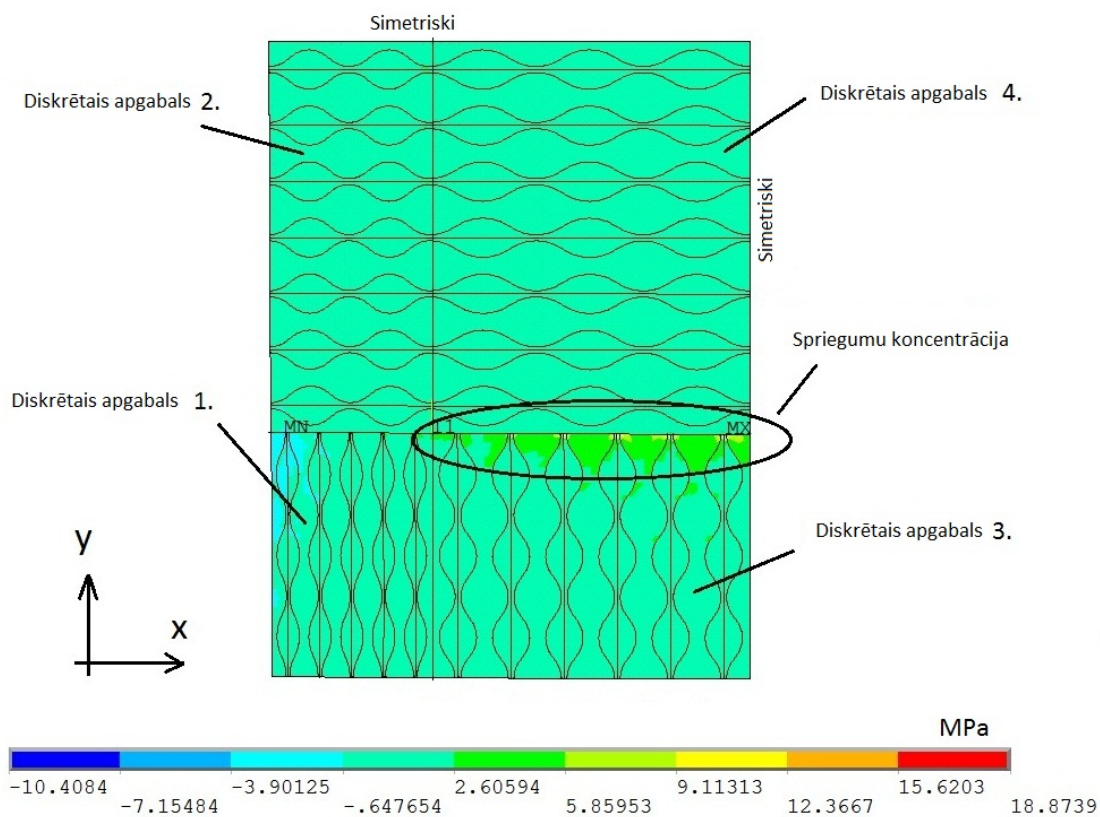
6. Plātne bez optimālas diskkrēti mainīgas struktūras ar liekto ribu biezumu 12 mm un apšuvumu biezumiem 20.4 mm, pārējie parametri kā parādīti tabulā 5.2.

7. Plātne bez optimālas diskkrēti mainīgas struktūras ar liekto ribu biezumu 20.4 mm un apšuvumu biezumiem 12 mm.

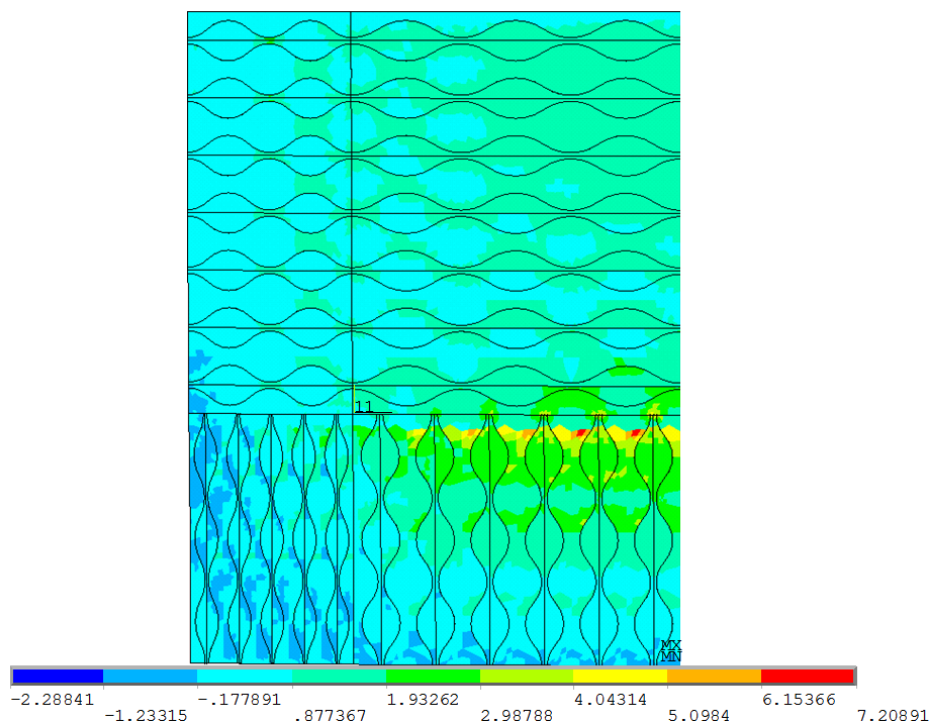
8. Plātne ar 2 diskkrēti mainīgiem apgabaliem (simetrijas dēļ puse no plātnes tiek aplūkota), kur pirmais apgabals veido  $1/6$  no laiduma, un tajos ribas ir no 12mm bieziem elementiem, pārējā daļā no 6 mm bieziem, apšuvumi 20.4mm biezi.

9. Plātne ar 2 diskkrēti mainīgiem apgabaliem (simetrijas dēļ puse no plātnes tiek aplūkota), kur pirmais apgabals veido  $1/6$  no laiduma, un tajā ribas un apšuvumi ir no 12mm bieziem elementiem, pārējā daļā ribas ir no 6 mm biežām loksnēm, bet apšuvumi 20.4mm biezi.

Apkopojums par īpatnējo nestspēju gadījumiem 6.-9. parādīts tabulā 5.4. Redzams, ka arī brīvi balstītai plātnei vislielāko īpatnējo nestspēju iespējams panākt, ja apšuvumi ir ar nemainīgu biezumu, bet ribojuma biezums ir atšķirīgs diskkrētajos apgabalos (8. gadījums).



5.12. att. Normālspriegumi augšējos un apakšējos apšuvumu lobskaidu slāņos y ass virzienā.



5.13. att. Normālspriegumi augšējos un apakšējos apšuvumu lobskaidu slāņos y ass virzienā.

Tabula 5.2.

Plātnes struktūras ģeometriskie parametri diskrētajos apgabalos, apskatītajiem  
gadījumiem

Gadījuma nr.	Apgabals 1.					Apgabals 2.					Apgabals 3.					Apgabals 4.				
	$p_1$ , mm	$p_2$ , mm	$p_3$ , mm	$p_5$ , mm	$\alpha$ , [deg]	$p_1$ , mm	$p_2$ , mm	$p_3$ , mm	$p_5$ , mm	$\alpha$ , [deg]	$p_1$ , mm	$p_2$ , mm	$p_3$ , mm	$p_5$ , mm	$\alpha$ , [deg]	$p_1$ , mm	$p_2$ , mm	$p_3$ , mm	$p_5$ , mm	$\alpha$ , [deg]
1	300	560	20.4	3.6	0															
2	300	560	20.4	12	0															
3	249.04	670.32	31.949	4.473	90	378.9	576.6	29.28	22.46	0	348.7	583	31.95	14.8	90	342.8	616.5	6.518	31.95	0
4	249.04	670.32	31.949	4.473	90	378.9	576.6	29.28	22.46	0	348.7	583	31.95	7.165	90	342.8	616.5	6.518	31.95	0
5	249.04	670.32	31.949	22.46	90	378.9	576.6	29.28	22.46	0	348.7	583	31.95	22.46	90	342.8	616.5	6.518	22.46	0
6	300	560	12	3.6	0															
7	300	560	20.4	12	0															
8	300	560	12	12	0	300	560	6	12	0										
9	300	560	12	6	0	300	560	6	12	0										

Tabula 5.3.

Pa kontūru balstītas plātnes īpatnējā nestspēja

Gadījuma nr.	Masa, kg	Īpatnējā nestspēja, KPa/kg		
		Pēc normāl- spriegumiem	Pēc bīdes spriegumiem	Pēc izlieces (1/200*L)
1	249.0	0.0079	0.0404	0.0565
2	328.4	0.0224	0.0557	0.0957
3	373.8	0.0030	0.0090	0.0177
4	394.1	0.0051	0.0085	0.0168
5	417.1	0.0470	0.0557	0.0992

Tabula 5.4.

Galos balstītas plātnes īpatnējā nestspēja

Gadījuma nr.	Masa, kg	Īpatnējā nestspēja, KPa/kg		
		Pēc normāl- spriegumiem	Pēc bīdes spriegumiem	Pēc izlieces (1/200*L)
6	145.7	0.0434	0.1039	0.1003
7	145.3	0.0294	0.0845	0.0774
8	130.8	0.0473	0.1138	0.1088
9	120.1	0.0253	0.0647	0.0680

### 5.6. Ribojuma darbs lokāli mainīgā apkārtējās vides mitruma ietekmē

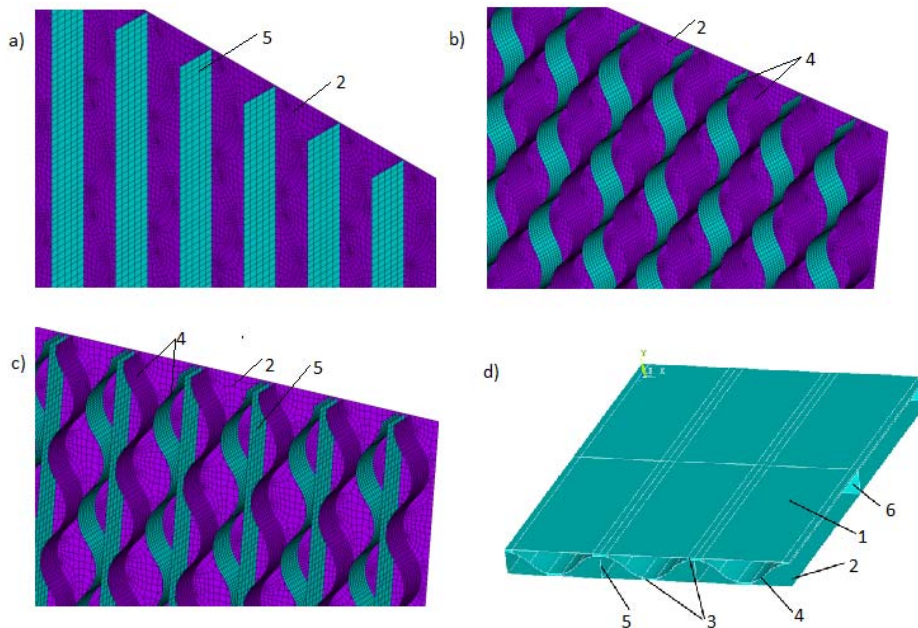
Plātnei, kuras ribojums un apšuvumi veidoti no koksnes materiāliem, piemēram, saplāksnim, ir būtiski noskaidrot tās uzvedību apkārtējās vides mitruma ietekmē. Vislielākā varbūtība ir iestāties gadījumam, kad konstrukcijā kādā noteiktā lokālā daļā- apgabalā mainās mitruma saturs, jo aizsargpārklājums šajā vietā var būt

nepilnvērtīgs, vai izveidojies lokāls bojājums nosedzošajā konstrukcijā, piemēram, jumtā [105].

Šajā nodaļā tiks salīdzinātas plātnes ar plakanām ribām (skat. 5.14. att. a.), liektām vertikālām ribām (skat. 5.14. att. b.), liektām un plakanām ribām (skat. 5.14. att. c.) un viļņotu vidusslāni (*corrugated core*) (skat. 5.14. att. d.).

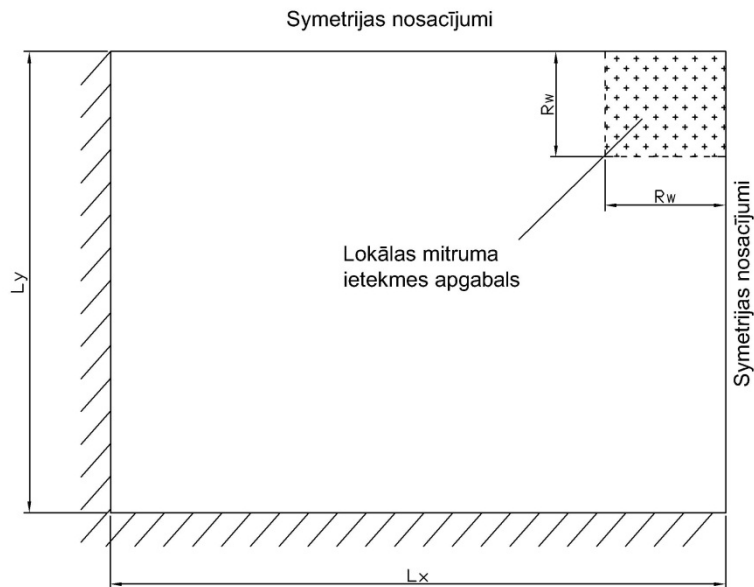
Lokāla mitruma ietekme tiks modelēta taisnstūra formas plātnes apgabalam, kas balstīts pa kontūru un mitruma saturs izmainās ārējā apšuvumā un tuvumā pie tā (attālums līdz 50 mm) esošajās ribās. Aprēķinos pieņemts, ka mitruma saturs pieaug no 10 līdz 13%. Lokālā mitruma iedarbes centrs atrodas plātnes centrā un tiek mainīts tā rādiuss  $R_w$  (skatīt 5.15. att.).

Visos gadījumos plātnes kopējais biezums tika pieņemts 250 mm. Plātnēm, kuras parādītas 5.14. att. a., b., c. liekto ribu biezums ir 12 mm, bet plakano ribu biezums 6mm. Plātnei, kurai ir tikai plakanas ribas, to biezums ir 20 mm. Plātnei ar viļņotu vidusslāni liekto ribu biezums ir 12mm, saplākšņa uzlikas (skatīt 5.14. att. d.) vidējais biezums 7.5 mm. Augšējā un apakšējā apšuvuma biezums visos gadījumos ir 12 mm. Plātnes garums un platums ir  $L_x = 4\text{ m}$ ,  $L_y = 3\text{ m}$ , ribas orientētas garākās malas virzienā. Liekto ribu izmēri  $p_1 = 0.5\text{ m}$ ,  $p_2 = 0.75\text{ m}$ . Horizontālās liektās ribas viena viļņa garums ir 0.75 m.



5.14. att. Saplākšņa plātnes ar dažādu ribojumu. a- plātne ar plakanām ribām, b- plātne ar liektām ribām, c) plātne ar plakanas un liekts formas ribojumu, d) plātne ar viļņotu vidusslāni

(*corrugated core*) 1,2- augšējais un apakšējais saplākšņa apšuvums, 3- saplākšņa elements, kas palielina pielīmēšanas laukumu viļņotajam vidusslānim, 4- liektas formas saplākšņa ribojums, 5- plakanas garenribas, 6- plakanas šķērsribas.



5.15. att. Lokālas mitruma izmaiņas aprēķina modelis.

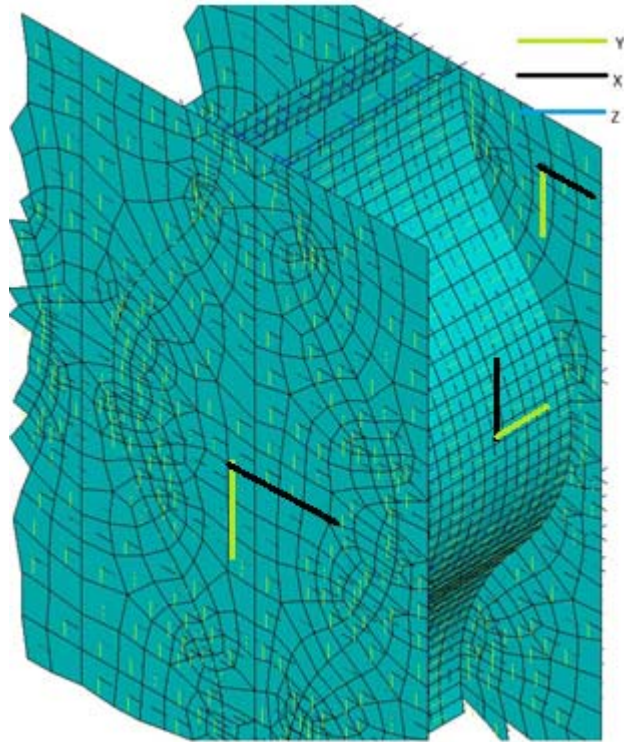
Pieaugot mitruma saturam par 3%, plātnes apšuvumos veidojas būtiski spriegumi (skatīt 5.17. att., 5.18. att., 5.19. att.). Spriegumi parādīti galīgo elementu lokālajās koordinātu sistēmās, kuras parādītas 5.16. att. Apgabalā, kurā pieaug mitruma saturs, veidojas spiedes spriegumi līdz 3 MPa. Savukārt otrā apšuvumā veidojas stiepes spriegumi līdz 25 MPa, jo augšējais apšuvums cenšas izplesties (skatīt 5.17. att.), savukārt apakšējais apšuvums pa kontūru ir stingri nostiprināts.

Izplešoties augšējam apšuvumam, liektās ribas tiek laužas un tajās veidojas gan stiepes, gan spiedes spriegumi līdz 30 MPa (skatīt 5.18. att.).

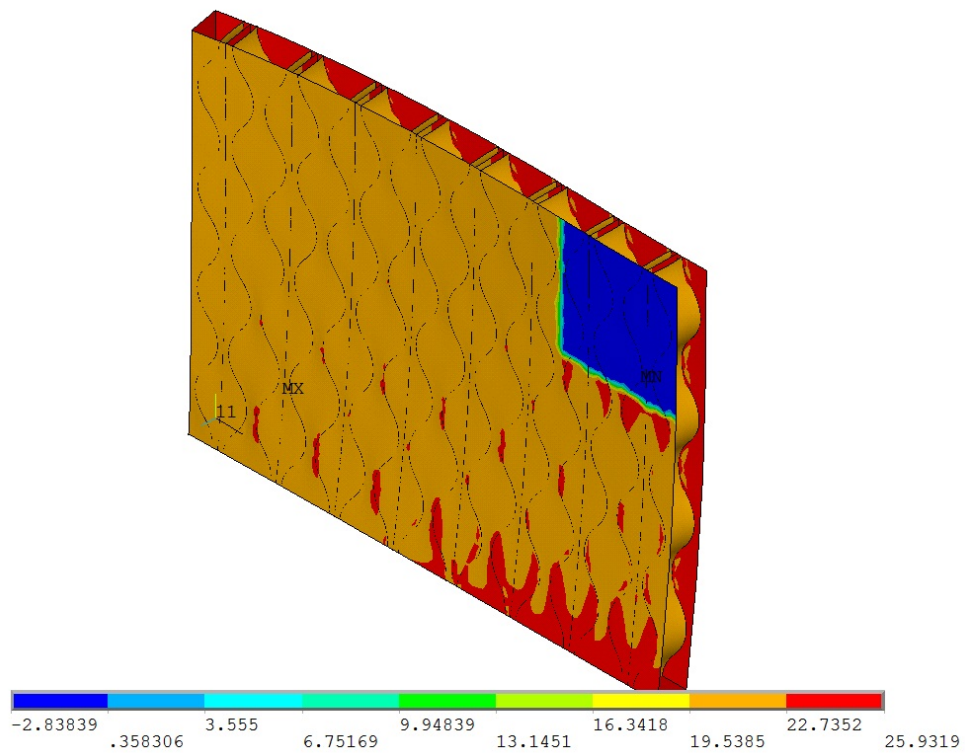
Uz mitruma izmaiņas apgabala robežām veidojas bīdes spriegumi 4.4 MPa, kas var izraisīt līmes šuves sabrukumu.

Spriegumu vērtības iegūtas pieņemot, ka pa kontūru ir absolūti stingri horizontāli un vertikāli balsti, taču dabā horizontālie balsti parasti nav absolūti stingri, tāpēc šīs spriegumu komponentes tik lielas nebūs.

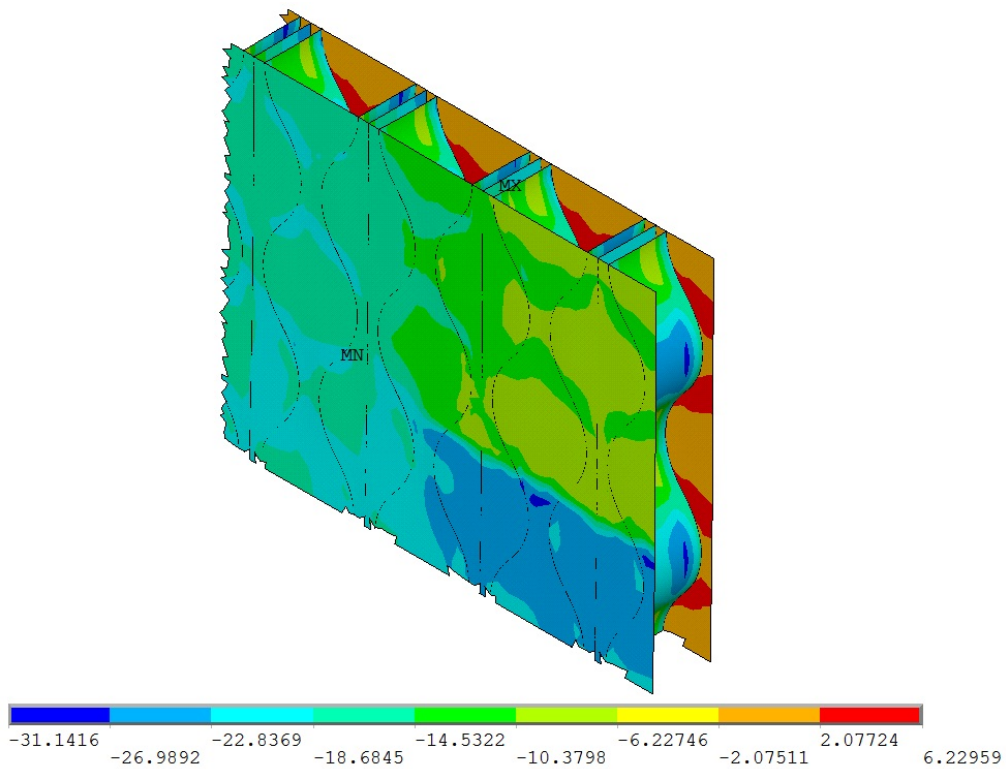
Rezultāti parāda, ka saplākšņa elementus nepieciešams akurāti apstrādāt ar izolējošu slāni, lai nerastos papildus spriegumi, mainoties mitruma saturam.



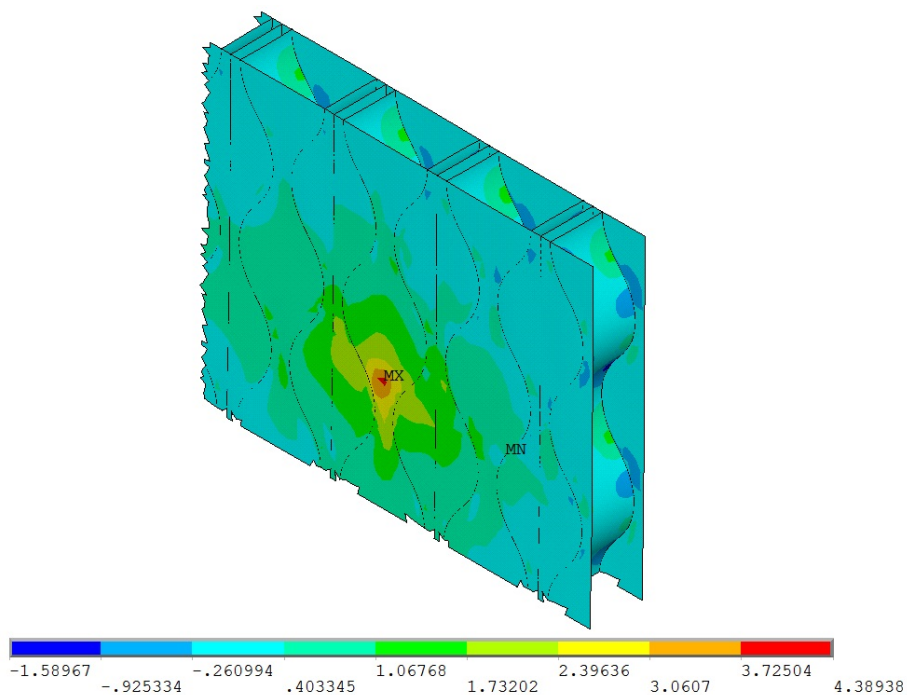
5.16. att. Lokālā koordinātu sistēma plātnes apšuvumos un liektajās ribās.



5.17. att. Spriegumi  $\sigma_x$  plātnei ar lokālu mitruma ietekmes apgabalu, kura izmērs  $R_w = 1000 \text{ mm}$ .



5.18. att. Spriegumi  $\sigma_y$  plātnei ar lokālu mitruma ietekmes apgabalu, kura izmērs  $R_w = 1000 \text{ mm}$ .

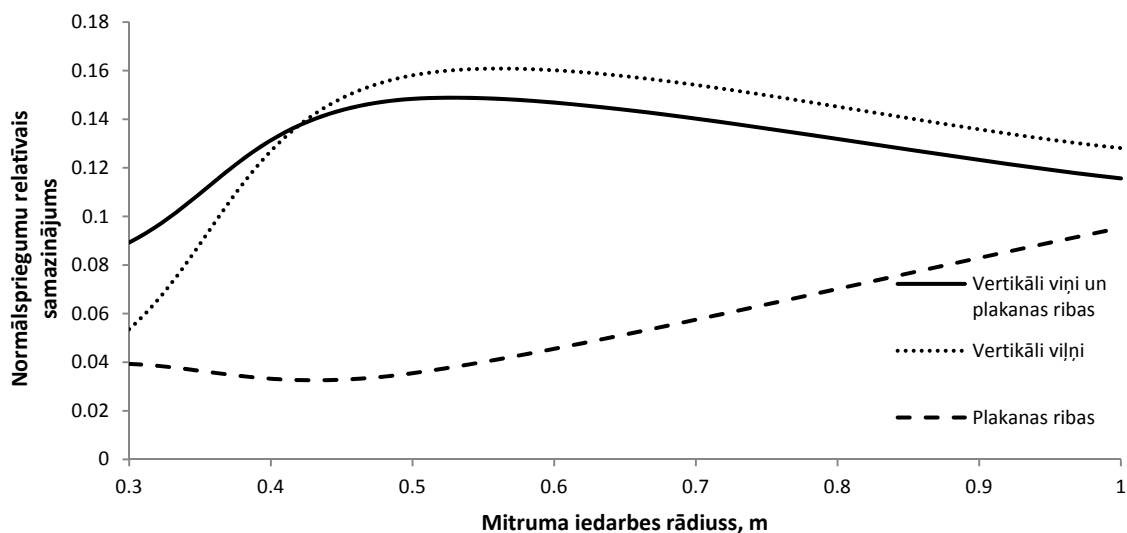


5.19. att. Spriegumi  $\sigma_{xy}$  plātnei ar lokālu mitruma ietekmes apgabalu, kura izmērs  $R_w = 1000 \text{ mm}$ .

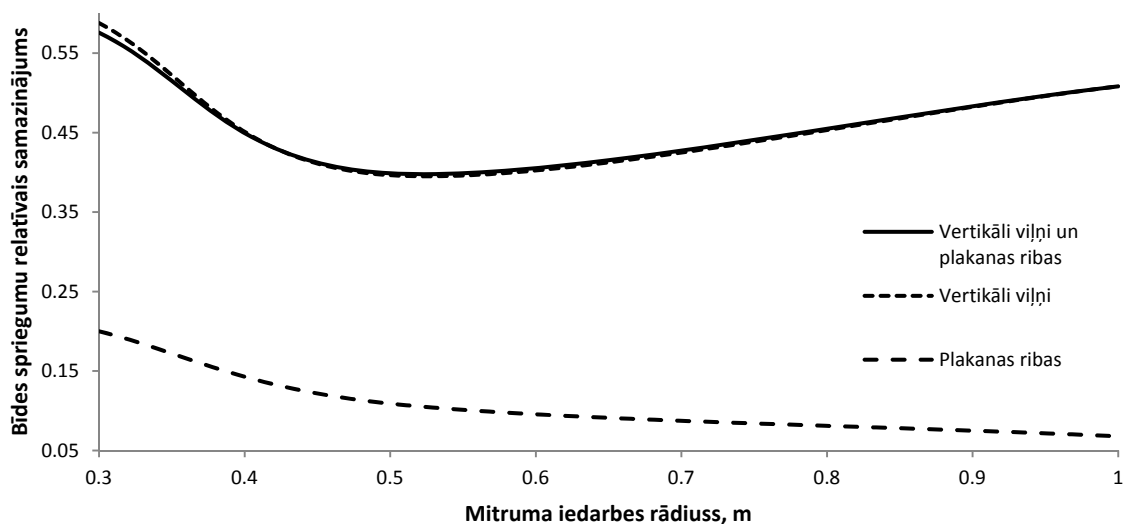
Vislielākie spriegumi veidojas plātnē, kurai ir horizontālas viļņotas ribas. Gadījumā, kad ir tikai plakanas ribas, normālspriegumu samazinājums ir ap 5%, bet

bīdes spriegumu ap 15% (skatīt 5.20. att. un 5.21. att.). Gadījumos, kad ir gan liektas, gan plakanas ribas, plātņu uzvedība ir līdzīga. Normālsprriegumu un bīdes spriegumu samazinājums plātnēm ar liektas formas ribām salīdzinājumā ar sliktāko variantu, kas parādīts 5.14. att. ir attiecīgi līdz 15% un 50%.

Sakarība starp spriegumu samazinājumu un lokālās mitruma izmaiņas apgabala rādītājus ir izteikti nelineāra.



5.20. att. Normālsprriegumu samazinājums plātnei ar dažādām ribām, salīdzinot ar plātņi, kurai ir viļņots vidusslānis (*corrugated core*) (skatīt 5.14. att.).



5.21. att. Bīdes spriegumu samazinājums plātnei ar dažādām ribām, salīdzinot ar plātņi, kurai ir viļņots vidusslānis (*corrugated core*) (skatīt 5.14. att.).

Mainoties mitruma saturam, plātne uzbriest vai sarūk. Šīs deformācijas daudzos gadījumos ir nevēlamas. Veidojot ribas no simetriskas vai nesimetriskas struktūras ribojuma, rukuma, uzbriešanas deformācijas (transversālajā virzienā) 50

mm biezai ribotai loksnei ar 12 mm apšuvumiem ir 2.4 reizes mazākas nekā 50 mm biezai saplākšņa loksnei. Ja plātnes biezums ir 250 mm ar tādiem pašiem apšuvumiem, tad rukuma/uzbriešanas deformācijas, salīdzinot ar gadījumu, kad ribas veidotas no koka brusām, ir 11.4 reizes mazākas. Aprēķini veikti pieņemot, ka mitruma izmaiņa ir vienmērīga pa šķērsriezuma augstumu un nav mitruma gradientu, un rukuma uzbriešanas koeficients ņemts tāds pats kā bērza koksnei tangenciālajā virzienā.

## 6. RACIONĀLS RIBOJUMS TRĪSLAIDUMU PLĀTNEI AR KUSTĪGĀM SLODZĒM UN TRĪSSTŪRVEIDA TRĪSLOCĪKLU TĒLPISKAS ARKAS KONSTRUKCIJAI

Šajā nodaļā tiks salīdzinātas plātnes ar diskrēti mainīgu, racionālu ribojumu, vienmērīgu ribojumu un standarta saplākšņa plātne no īpatnējās nestspējas viedokļa. Tiks aplūkota transportlīdzekļa daudzslāņu plātne ar divām kustīgām slodzēm, kā arī ribotas plātnes un spāru konstrukcijas ēku jumtu trīsstūrveida trīslocīklu telpisku arku industriālām konstrukcijām.

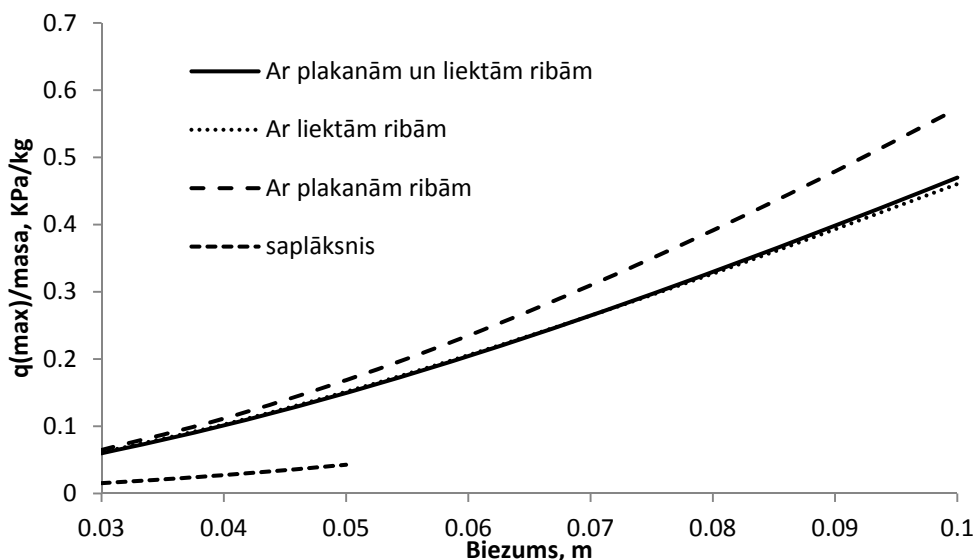
### 6.1. Ribojuma struktūru salīdzinājums

Lai noskaidrotu ribojuma darbu liecē galvenajos virzienos, tika skaitliski pētīta īpatnējā nestspēja galos balstītai plātnei ribojuma garenvirzienā un šķērsvirzienā. Riboto plātņu visi elementi veidoti no 9.5 mm biezām saplākšņa loksņēm ar simetrisku struktūru. Viena viļņa garums ir 300 mm, bet platums 100mm. Uz plātnēm darbojas vienmērīgi izkliedēta slodze. Plātņu laidums, slogojot to ribu garenvirzienā, ir 2.1m, bet šķērsvirzienā 1.1m. Elementu biezumu eksperimenta laikā maina no 30 līdz 100 mm. Eksperimentā pārbaudīto paraugu īpatnējā nestspēja noteikta pēc maksimālo izlieču kritērija  $\frac{f}{L} = \frac{1}{200}$ , kas visbiežāk ir noteicošais šādas ģeometrijas, slogojuma un balstījuma plātnēm.

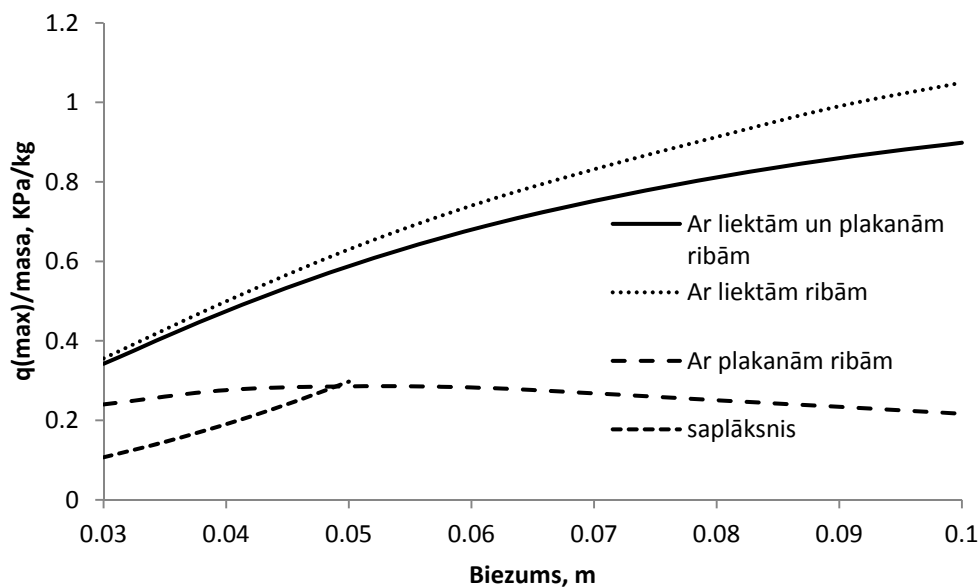
6.1. att. parādīta īpatnējā nestspēja (vienmērīgi izliedētās slodzes lielums (KPa), ko var uzņemt 1 konstrukcijas masas vienība), gadījumā, ja liece notiek ribojuma garenvirzienā. Vislielākā īpatnējā nestspēja ir plātnei, kas ribota ar plakanām ribām, savukārt plātnes, kas ribotas ar plakanām vai plakanām un liektām ribām, uzrāda līdzīgus īpatnējās nestspējas rādītājus. Standarta saplākšņa loksnei ir vidēji 3 reizes mazāka īpatnējā nestspēja, salīdzinot ar ribotām plātnēm.

6.2. att. parādīta īpatnējās nestspējas atkarība no plātņu biezuma ribotām plātnēm un standarta saplākšnim, ja liece notiek perpendikulāri ribojuma garenvirzienam. Vislielāko īpatnējo nestspēju uzrāda plātne, kas ribota tikai ar liektām ribām. Vidēji par 5 līdz 10% mazāka īpatnējā nestspēja ir plātnei, kas ribota ar liektām

un plakanām ribām. Pie plātņu biezuma 50 mm saplākšņa plātnei ir lielāka īpatnējā nestspēja kā plātnei, kas ribota ar plakanām ribām, jo plakanās ribas ar relatīvi lielu augstumu ir ļoti vājas pret lieci perpendikulāri ribu virzienam.



6.1. att. Īpatnējās nestspējas, no maksimālo izlieču viedokļa  $\frac{f}{L} = \frac{1}{200}$ , salīdzinājums brīvi balstītai plātnei ar laidumu 2.1 m un dažādiem biezumiem, ja liece notiek ribojumu garenvirzienā.



6.2. att. Īpatnējās nestspējas, no maksimālo izlieču viedokļa  $\frac{f}{L} = \frac{1}{200}$ , salīdzinājums brīvi balstītai plātnei ar laidumu 1.1 m un dažādiem biezumiem, ja liece notiek ribojumu šķērsvirzienā.

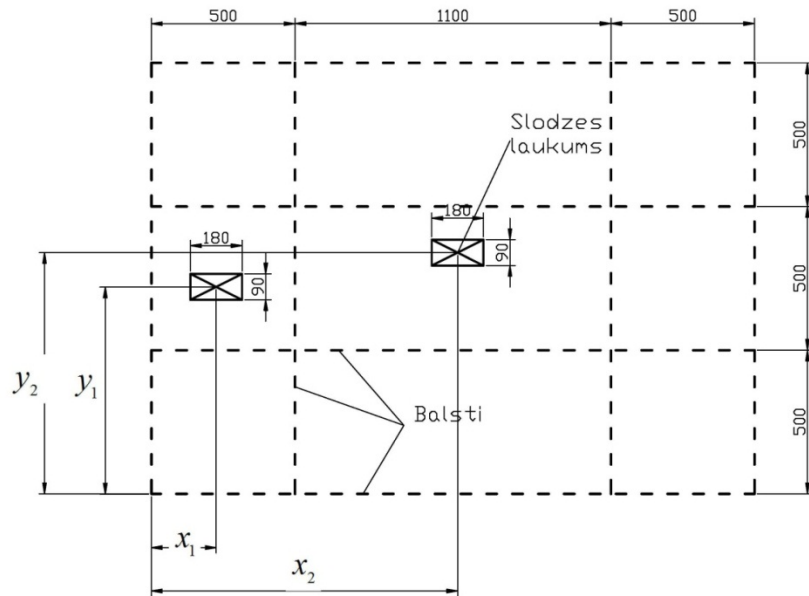
## 6.2. Trīslaidumu plātnes ar divām kustīgām slodzēm racionāls ribojums

Aprēķini veikti tipiskam gadījumam trīslaidumu plātnei (trīs laidumi divos virzienos, skatīt 6.3. att.), kuru lieto auto treileru grīdu konstrukcijās un kādu parasti izgatavo no standarta 30mm bieza 21 slāņa bērza saplākšņa. Uz plātņi iedarbojas divas kustīgas slodzes, kas izklidētas uz slodžu laukumiem ar izmēriem 180 x 90 mm, kuri rodas no auto iekrāvēju priekšējiem riteņiem. Slodzes lielums uz katra riteņa parasti ir 27 vai 36 kN, ko nosaka iekrāvēja specifikācija. Attālums starp priekšējo riteņu centriem visbiežāk ir 900 mm, ko arī nosaka iekrāvēja specifikācija.

Tā kā iekrāvējs var brīvi pārvietoties pa konstrukciju, tad veidojas daudzas slodžu kombinācijas- slodžu izvietojumi. Lai vienkāršotu aprēķinus, bet neizslēgtu sliktāko slodžu izvietojumu, pieņemam, ka ir 36 slodžu kombinācijas, kad uz plātnes ir abi slodžu laukumi, kuru centri atrodas laidumu vidū un vēl 9 kombinācijas, kad uz plātnes ir tikai viens slodžu laukums katra laiduma vidū. Konstrukcijas simetrijas dēļ no 45 slodžu laukumu izvietojumiem paliek 23. Apkopojums par slodžu izvietojumiem dots Tabula 6.1.

Aprēķini parāda, ka standarta 30 mm bieza saplākšņa loksnei vismazākā īpatnējā stiprība ir pēc spiedes spriegumu kritērija slodžu kombinācijām 1,9,22,27,34,36 (skat. 6.4. att.). Īpatnējās stiprības aprēķinā izmantoti maksimālo spiedes, stiepes un bīdes spriegumu ierobežojumi īslaicīgām slodzēm.

Lai noteiktu kādu īpatnējās stiprības palielinājumu, ko dod standarta saplākšņa loksnes aizstāšana ar plātņi, kurai ir diskrēti mainīgs vai nemainīgs ribojums no plakanām un liektām loksņēm, tika salīdzināta īpatnējā nestspēja pie katras slodžu kombinācijas ribotai plātnei ar standarta 30mm biezu bērza saplākšņa plātņi- standarta risinājums (skatīt 6.7. att.). Plātņu struktūras ar diskrēti mainīgu un nemainīgu ribojumu parādītas 6.5. att. Diskrēti mainīgā struktūra tika izvēlēta, balstoties uz 4. nodaļā iegūtajiem optimāla lieces stinguma sadalījuma rezultātiem. Aprēķini veikti pie slodžu lieluma 27 kN uz vienu slodžu laukumu. Racionāli elementu biezumi ribotai plātnei ir 9.5 mm (7 lobskaidas) biezi abi apšuvumi, 12 mm (9 lobskaidas) biezas liektās ribas un 4 mm (3 lobskaidas) biezas plakanās ribas un šķērsribas, kas norobežo diskrētos apgabalus.

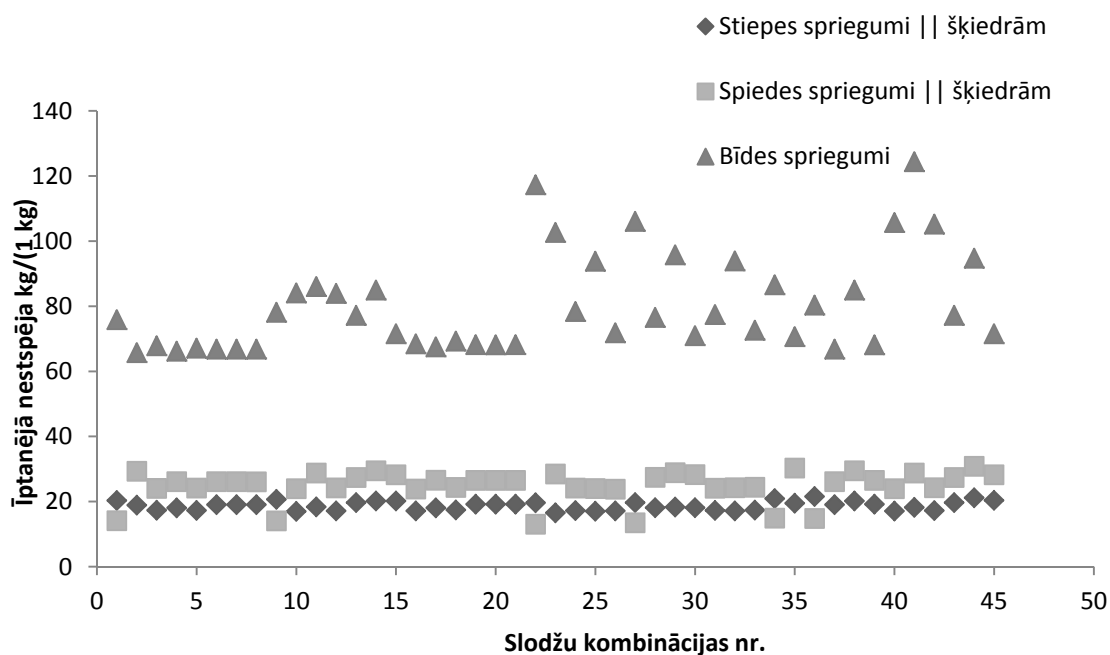


6.3. att. Trīsliedumu plātnes shēma ar divām kustīgām slodzēm.

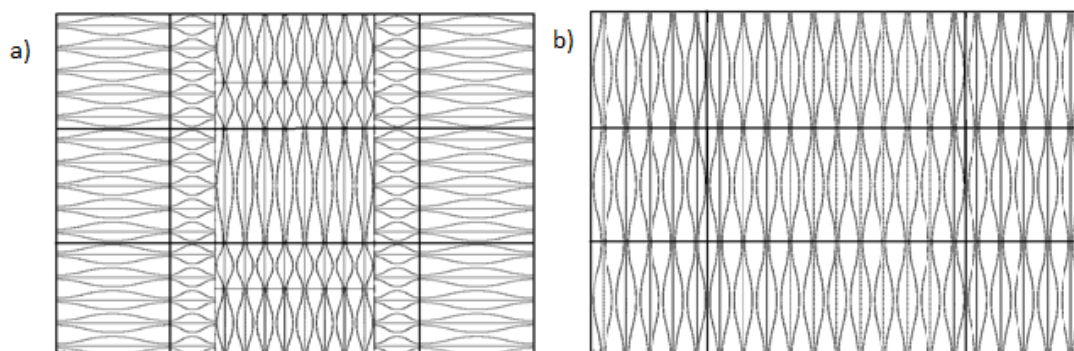
Tabula 6.1

Slodžu izvietojums aprēķinā izmantotajās slodžu kombinācijās

Nr.	$x_1$ , m	$y_1$ , m	$x_2$ , m	$y_2$ , m	Nr.	$x_1$ , m	$y_1$ , m	$x_2$ , m	$y_2$ , m
1	0.25	0.25	0.25	0.75	26	1.05	1.25	1.85	1.25
2	0.25	0.25	0.25	1.25	27	1.05	0.75	1.05	0.25
3	0.25	0.25	1.05	1.25	28	1.05	0.75	1.85	0.25
4	0.25	0.25	1.05	0.75	29	1.05	0.75	1.85	0.75
5	0.25	0.25	1.05	0.25	30	1.05	0.75	1.85	1.25
6	0.25	0.25	1.85	0.25	31	1.05	0.25	1.85	0.25
7	0.25	0.25	1.85	0.75	32	1.05	0.25	1.85	0.75
8	0.25	0.25	1.85	1.25	33	1.05	0.25	1.85	1.25
9	0.25	0.75	0.25	1.25	34	1.85	0.25	1.85	0.75
10	0.25	0.75	1.05	1.25	35	1.85	0.25	1.85	1.25
11	0.25	0.75	1.05	0.75	36	1.85	0.75	1.85	1.25
12	0.25	0.75	1.05	0.25	37	0.25	0.25		
13	0.25	0.75	1.85	0.25	38	0.25	0.75		
14	0.25	0.75	1.85	0.75	39	0.25	1.25		
15	0.25	0.75	1.85	1.25	40	1.05	1.25		
16	0.25	1.25	1.05	1.25	41	1.05	0.75		
17	0.25	1.25	1.05	0.75	42	1.05	0.25		
18	0.25	1.25	1.05	0.25	43	1.85	0.25		
19	0.25	1.25	1.85	0.25	44	1.85	0.75		
20	0.25	1.25	1.85	0.75	45	1.85	1.25		
21	0.25	1.25	1.85	1.25					
22	1.05	1.25	1.05	0.75					
23	1.05	1.25	1.05	0.25					
24	1.05	1.25	1.85	0.25					
25	1.05	1.25	1.85	0.75					

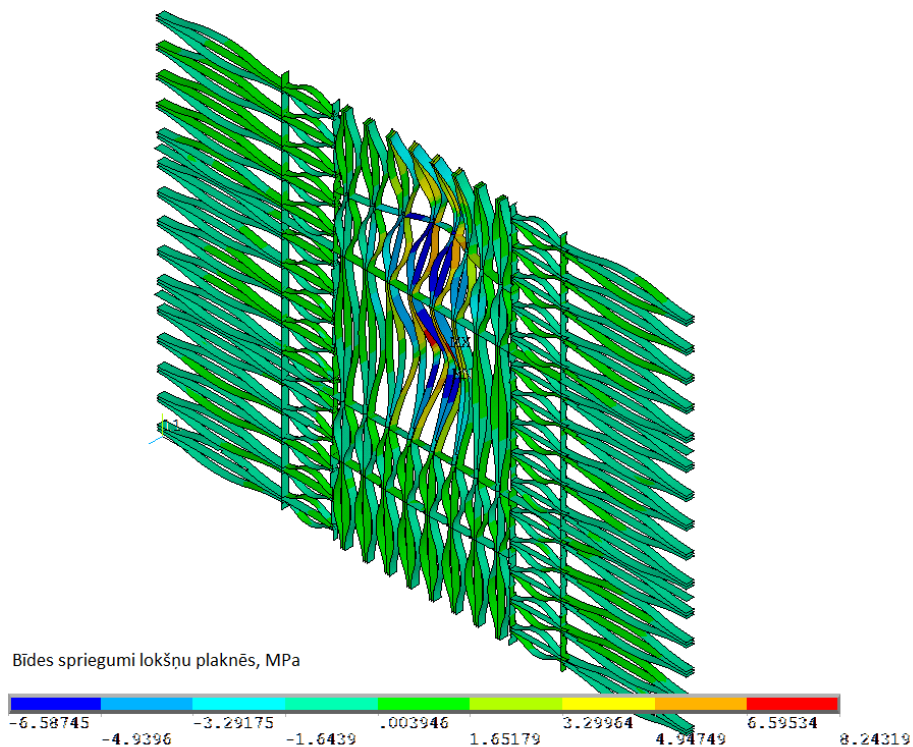


6.4. att. Standarta 30 mm biezas saplākšņa loksnes īpatnējā nestspēja (kg/1kg)- slodze uz viena slodzes laukuma (kg) ko var uzņemt 1 kg konstrukcijas pie dažādām slodžu kombinācijām.



6.5. att. Trīsraidum plāntes ribojums.

a- diskrēti mainīgs ribojums, b- vienmērīgs ribojums

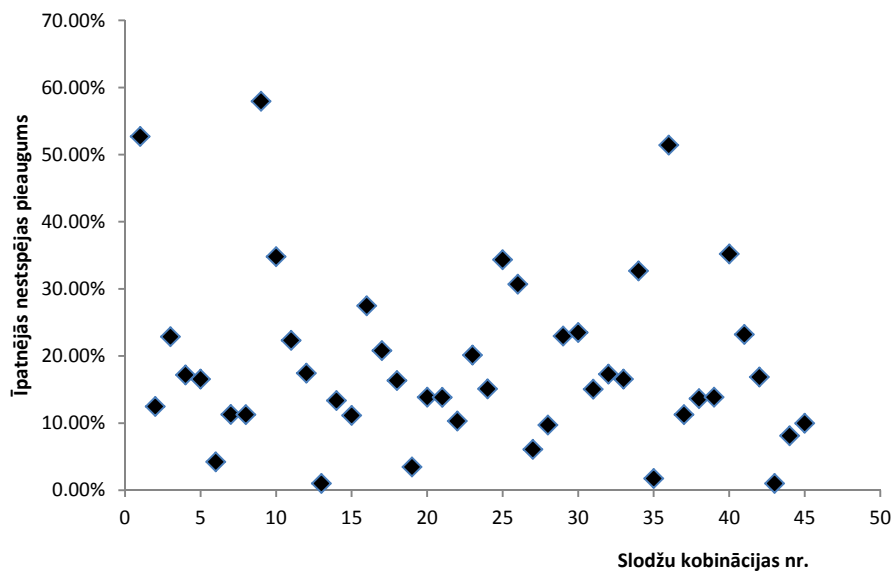


6.6. att. Bīdes spriegumi ribās 30 mm biežai plātnei ar diskrēti mainīgu ribojumu pie 27kN slodzes un vienu slodžu laukumu un pie 27. slodžu kombinācijas.

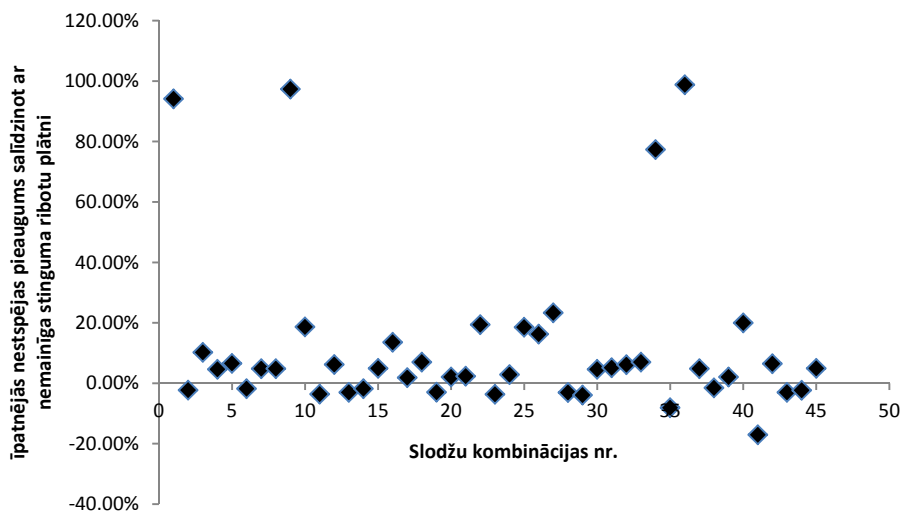
Aprēķini parāda, ka, lai panāktu līdzvērtīgu absolūto nestspēju (pie slodzes 27 kN) ribotai plātnei ar 30 mm biezu standarta saplākšņa loksni, ribotas plātnes biežumam ir jābūt lielākam par 40 mm.

Ribotai plātnei ar diskrēti mainīgu ribojumu un 30 mm kopējo biežumu, 12 slodžu novietojumu gadījumos (slodžu kombinācijās) ir mazāka īpatnējā nestspēja kā standarta saplākšnim. Savukārt gadījumā, ja ribotai plātnei ar diskrēti mainīgu ribojumu kopējais biežums ir 40 mm līdz 50 mm, tad pie visiem 45 aplūkotajiem slodžu izvietojumiem īpatnējā nestspēja ir augstāka nekā standarta saplākšnim. Pie kopējā biežuma 60 mm parādās atsevišķi slodžu gadījumi (6., 13., 19., 28., 35., 43. slodžu kombinācija), kad īpatnējā nestspēja ir mazāka nekā standarta saplākšnim.

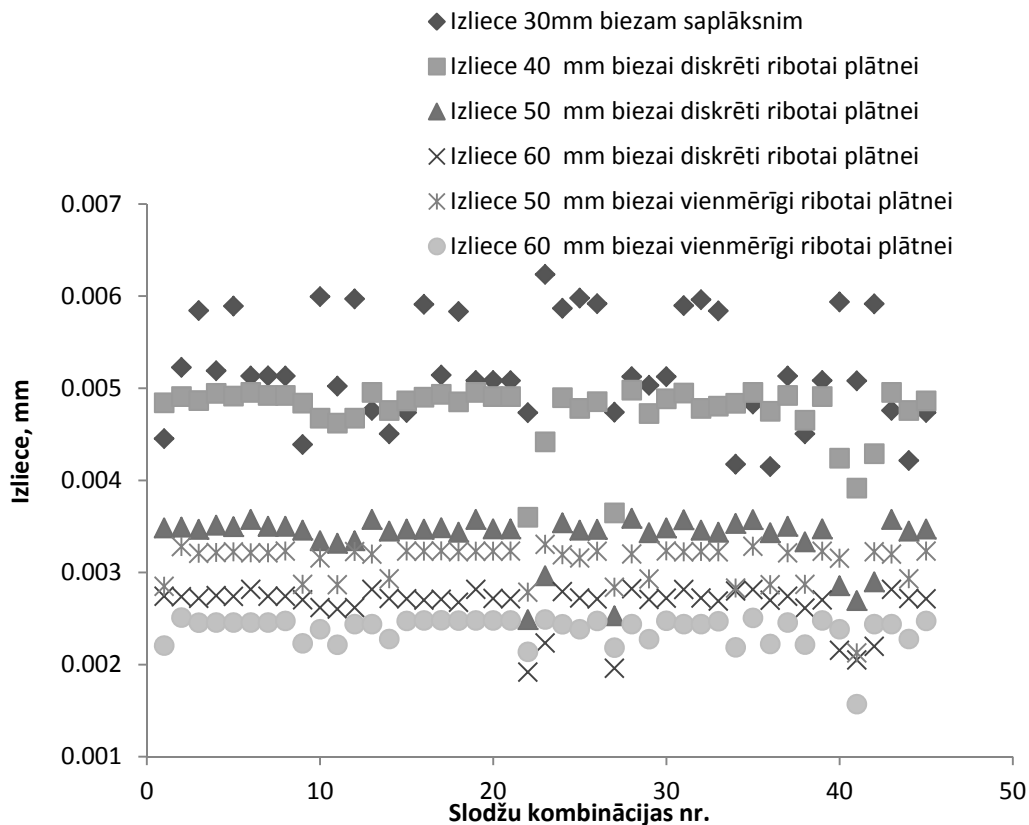
Ja veido 40 mm biezu plātņi ar vienmērīgu ribojumu, kā parādīts 6.5. att. b., tad īpatnējā nestspēja 6 slodžu izvietojumu gadījumos mazāka kā 30 mm standarta saplākšnim. 40 mm biežai plātnei ar diskrēti mainīgu ribojumu, ir vidēji 12% lielāka īpatnējā nestspēja kā tāda paša biežuma plātnei ar vienmērīgu ribojumu (skat. 6.8. att.).



6.7. att. Īpatnējās nestspējas pieaugums 40 mm biežai saplākšņa loksnei ar racionālu, diskrēti mainīgu ribojumu, salīdzinot ar standarta risinājumu.



6.8. att. Īpatnējās nestspējas pieaugums 40 mm biežai, ar diskrēti mainīgu ribojumu ribotai saplākšņa plātnē, salīdzinot ar tāda paša biežuma vienmērīgi ribotu plātni.



6.9. att. Maksimālo izlieču salīdzinājums saplāksnim, plātnei ar diskrēti mainīgu ribojumu un vienmērīgu ribojumu, kad uz vienu slodžu laukumu darbojas 27 kN liela slodze.

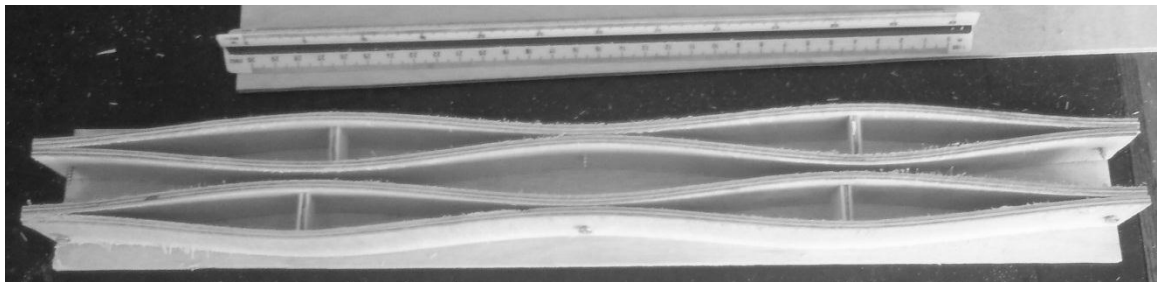
Tika salīdzinātas arī maksimālās izlieces pie dažādām slodžu kombinācijām standarta saplāksnim un ribotai plātnei ar diskrēti mainīgu vai nemainīgu ribojumu (skat. 6.9. att.). Vislielākā izliece gandrīz pie viesiem slodžu izvietojumiem ir standarta 30 mm biežam saplāksnim. Savukārt vienāda biezuma ribotai plātnei ar vienmērīgu ribojumu lielākajā daļā gadījumos ir mazākas izlieces kā plātnei ar diskrēti mainīgu ribojumu.

### 6.3. Eksperimentālas pārbaudes

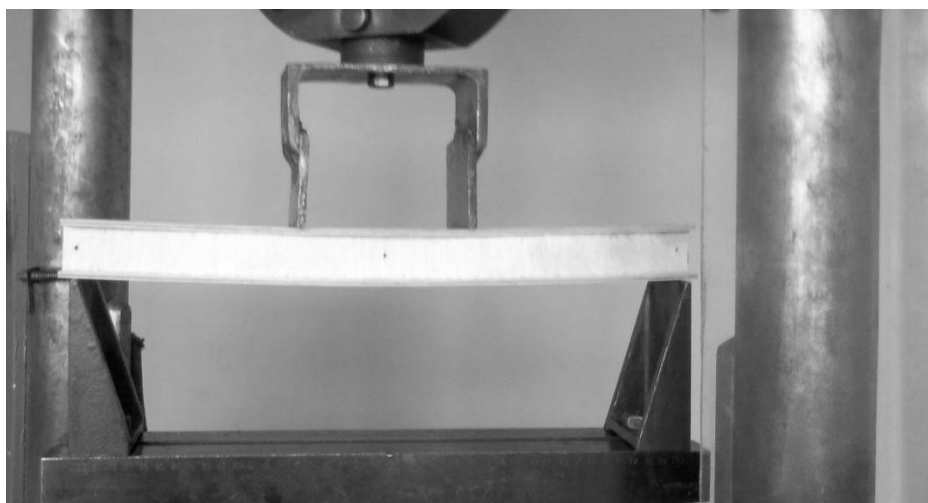
#### 6.3.1. *Saplākšņa plātnes ar vienmērīgu ribojumu eksperimentāla pārbaude*

Lai novērtētu aprēķinu pareizību, ribotai plātnei, tika veiktas samazinātu paraugu eksperimentālas pārbaudes [64, 63] un rezultāti salīdzināti ar aprēķinātajiem. Visi saplākšņa elementi izgatavoti no 4 mm bieza 3 slāņu bērza saplākšņa. Ribojums pie apšuvuma pielīmēts ar auksto līmēšanas paņēmieni zem spiediena 1.5 MPa.

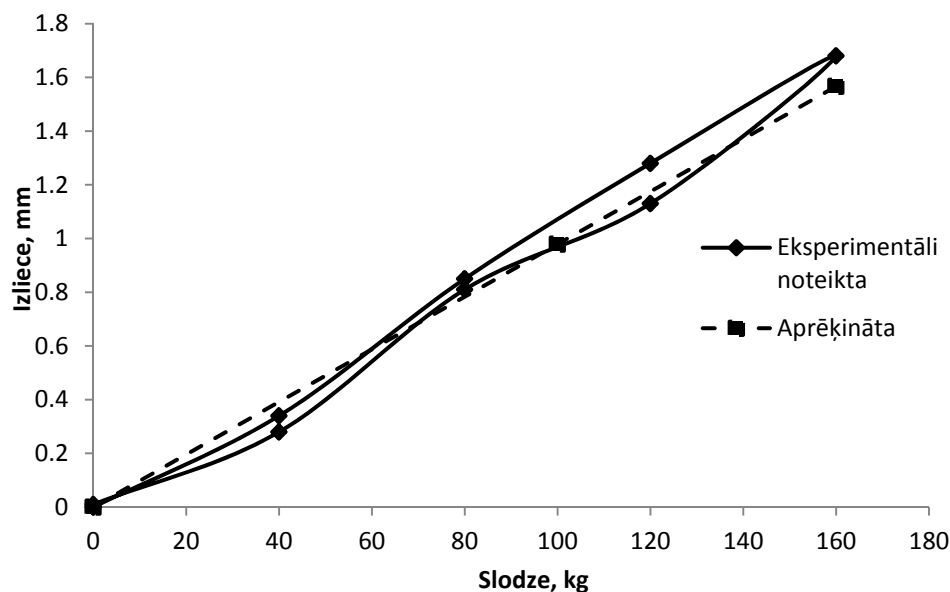
Liekto ribu darbu ribojuma garenvirzienā 4 punktu liecē eksperimentāli pārbaudīja plātnēm, kuru ribojumu veido liektas loksnes ar viļņa garumu 215 mm (skat. 6.10. att.), 143 mm, plātnes kopējais biezums 38 mm un laidums 430 mm. Iegūtie rezultāti parāda, ka 4 punktu lieces gadījumā maksimālā izliece, kas noteikta eksperimentāli, no aprēķinātās atšķiras ne vairāk par 10 % (skat. 6.12. att., 6.13. att.).



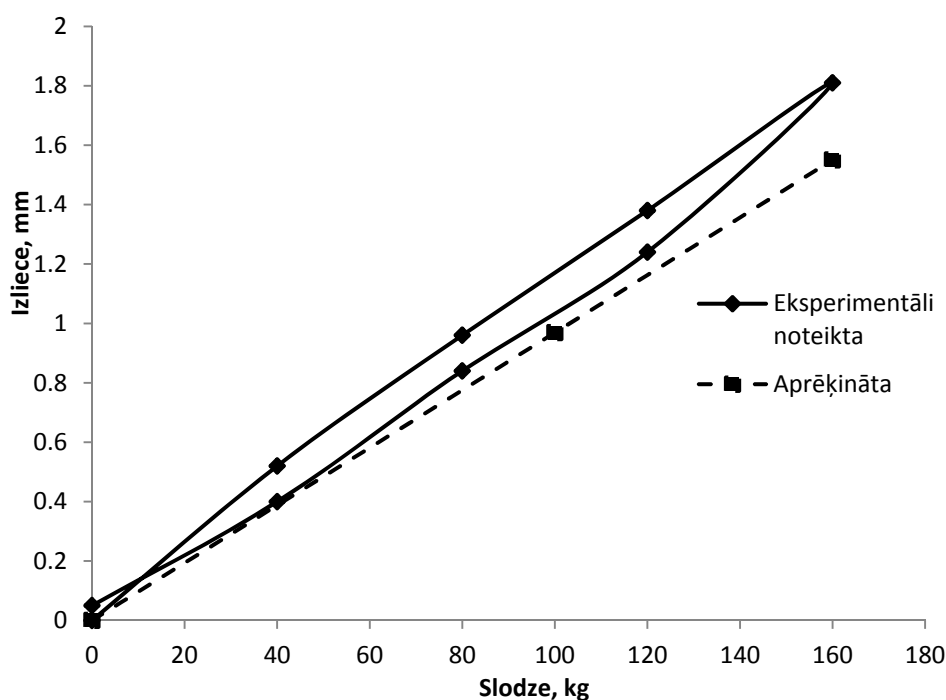
6.10. att. Eksperimentālo paraugu ribojums no liektām loksnes ar viļņa garumu 215 mm.



6.11. att. Eksperimentālo paraugu ar laidumu 430 mm un biezumu 38mm pārbaude 4 punktu liecē.



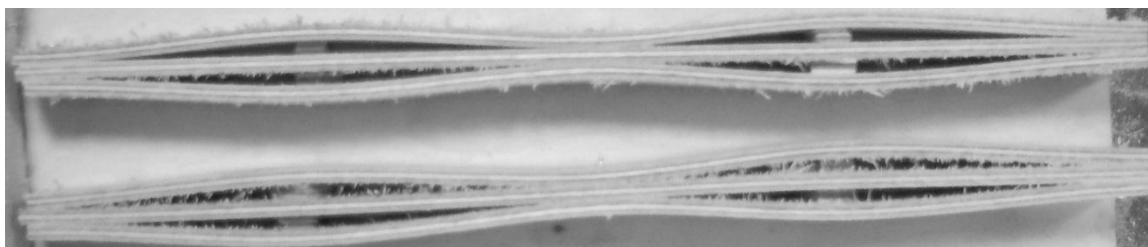
6.12. att. Eksperimentāli un skaitliski noteiktā izlieces atkarība no slodzes paraugam ar viļņa garumu 215 mm.



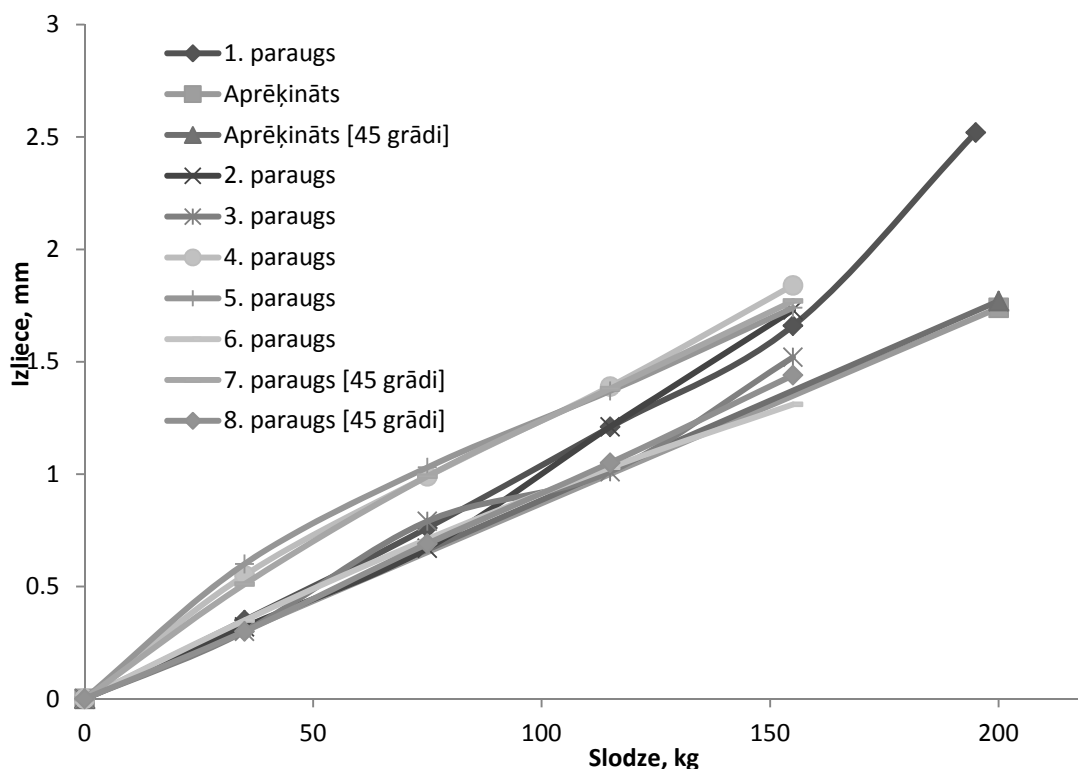
6.13. att. Eksperimentāli un skaitliski noteiktā izlieces atkarība no slodzes paraugam ar viļņa garumu 143 mm.

Tika eksperimentāli novērtēta un salīdzināta ar aprēķiniem plātnes izliece, kura ribota ar liektām un plakanām ribām (skat. 6.14. att.), 3 punktu lieces gadījumā ribojuma garenvirzienā. paraugu laidums 270 mm, biezums 28mm. Tika pārbaudīti gadījumi, kad ribojumam 2 lobskaidas vērsta transversiālajā virzienā, viena garenvirzienā (1.-6. paraugs), kā arī gadījums, kad ribu lobskaidu orientācija ir 45

grādu lenķī pret apšuvumiem (7., 8. paraugs). Iegūtie rezultāti parāda, ka vairumā gadījumu aprēķinātā izliece no eksperimentāli noteiktās neatšķiras vairāk par 10 %. 4., 5., 7. paraugam vērojama tendence sākotnējā slogošanas posmā straujāk palielināties izliecēm, kas ir skaidrojams ar paraugu izgatavošanas neprecizitātēm, atsevišķu līmes šuvju nepilnvērtīgu darbu.



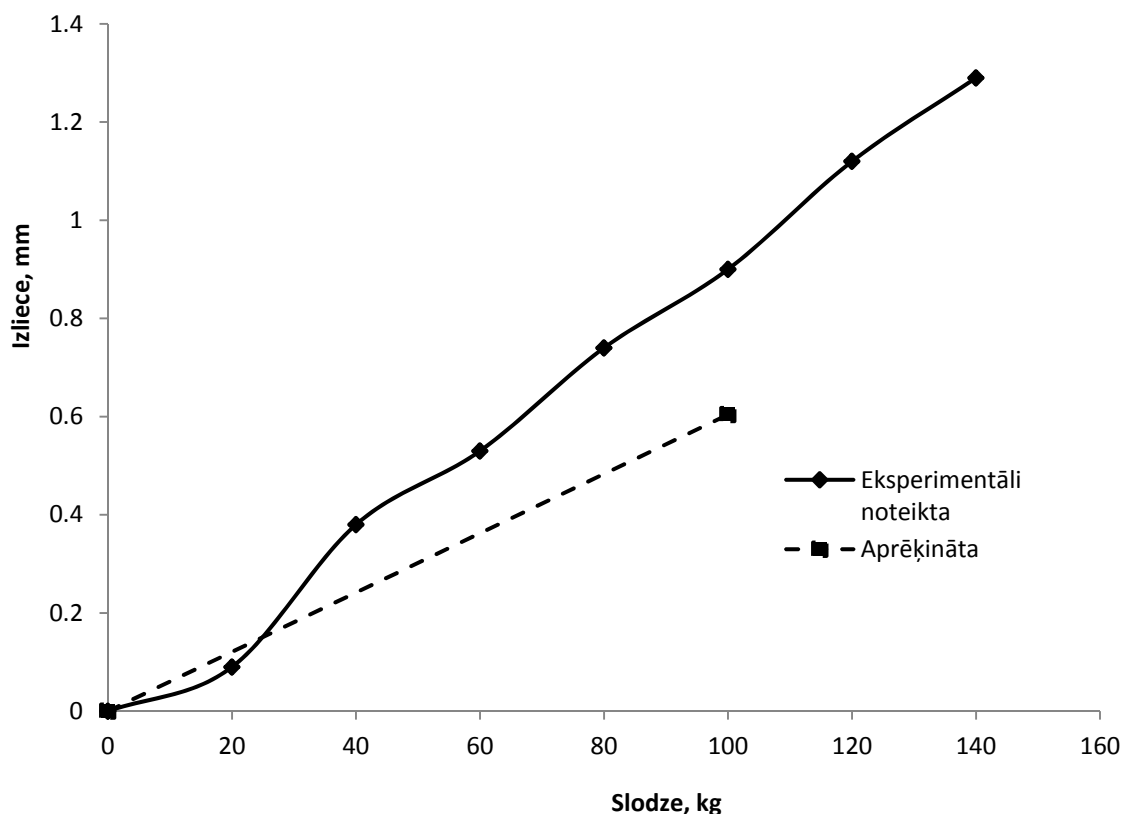
6.14. att. Eksperimentālo plātņu paraugu ribojums no liektām un plakanām loksniēm ar viļņa garumu 135 mm un kopējo biezumu 28 mm.



6.15. att. Trīspunktu lieces eksperimenta rezultāti paraugam ar izmēriem 270x28x60 mm ar liektām un plakanām ribām.

Lai noskaidrotu ribojuma darbu ribu šķērsvirzienā, izgatavota plātne, kuras ribojumu veido liektas formas ribas ar izmēriem 300x300x31mm. Sākotnējā slogošanas posmā eksperimentāli noteiktā izliece ir mazāka par aprēķināto, bet slodzi pieaugot, paraugu izgatavošanas defektu dēļ, eksperimentāli noteiktā izliece ir lielāka par aprēķināto (skat. 6.16. att.). Maksimālā atšķirība nepārsniedz 25%. Atšķirība

skaidrojama ar deformatīvo īpašību atšķirību, jo aprēķinā izmantotas ideālas struktūras paraugu deformatīvās īpašības.



6.16. att. Pārbaude trīspunktu liecē perpendikulāri ribu garenvirzienam.

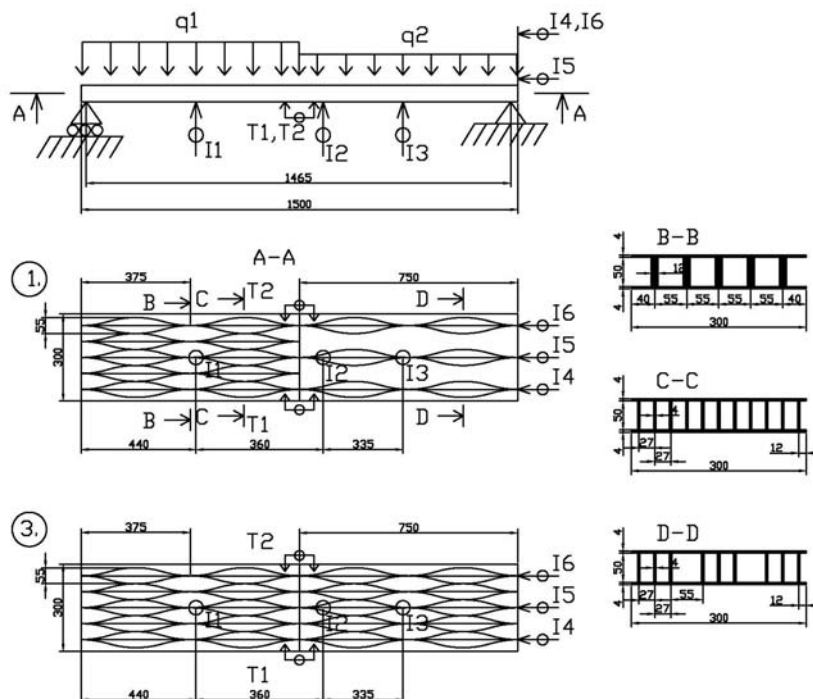
### 6.3.2. Ribotas saplākšņa plātnes ar diskrēti mainīgu ribojumu eksperimentāla pārbaude

Iepriekšējā nodaļā tika parādīts, ka zonās, kurās mainās ribojums, var veidoties spriegumu koncentrācijas. Tādā veidā rodas nepieciešamība eksperimentu rezultātā pārbaudīt, vai šajās zonās iegūtie skaitliskie rezultāti ir pietiekami precīzi un atspoguļo konstrukciju ar diskrēti mainīgu ribojumu patieso darbu.

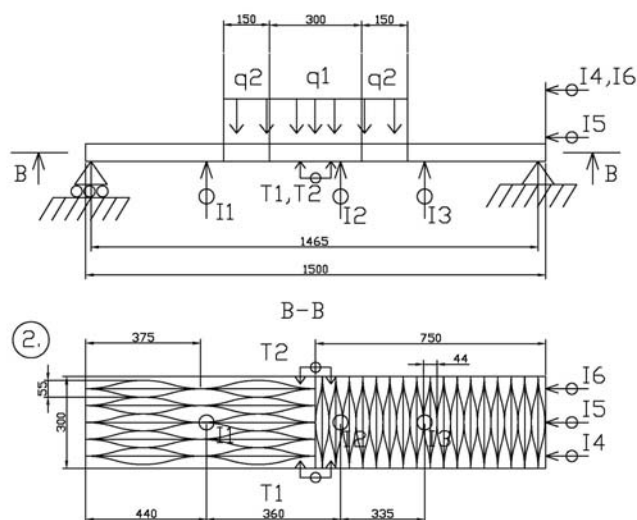
Laboratorijas apstākļos tika izgatavoti trīs eksperimentāli paraugi. Pirmajam paraugam ribojums vienā laiduma pusē ir divas reizes intensīvās kā otrā pusē (skat. 6.17.att., 6.19.att. a., 6.20.att.). Otrajam paraugam ribojums kreisajā laiduma pusē ir orientēts laiduma virzienā, bet labajā pusē šķērsām laidumam (skat. 6.18.att., 6.19.att. b.). Trešajam paraugam ir vienmērīgs ribojums, kas vērsts laiduma virzienā (skat. 6.17.att., 6.19.att.a.).

Paraugu kopējais biezums ir 58 mm. Tie veidoti no trīsslāņu bērza saplākšņa *Riga Ply BB/W*. Līmēšanai izmantota līme *CASCO SILVA* (saistviela polivinilacetāts

uz ūdens bāzes). Pēc līmes uzklāšanas uz ribu abām pusēm, tika pielīmēti augšējais un apakšējais apšuvums. Līmes cietēšanas laikā uz apšuvumiem tika novietoti atsvari ar intensitāti 10 KPa, kas līmēšanas šuvē rada spiedes spriegumus vidēji 50 KPa.



6.17.att. Shēma 1. un 3. paraugam



6.18.att. Shēma 2. paraugam

Paraugi tika pārbaudīti liecē un slogoti ar vienmērīgi izkliedētu slodzi, kas iegūta novietojot uz konstrukcijas metāla gabalus ar izmēriem 400x130x80 mm un vidējo masu 19 kg (skat. 6.20.att.).Pirmajam un trešajam paraugam izmantotās izkliedētās slodzes vērtība pie izmantotajām slodžu kombinācijām dota tabulā 6.2., bet 2. paraugam tabulā 6.3.

Eksperimenta gaitā tika mērītas izlieces trīs punktos I1, I2, I3 ar mehāniskiem izlieču mērītājiem *PAO 102*, kuriem mazākā iedaļas vērtība ir 0.01 mm. Laiduma vidū, jeb zonā, kurā mainās ribojums, katrā malā tika mērītas relatīvās deformācijas ar mehāniskiem tenzometriem *YPM LISI TA-2*, kuru precizitāte ir 0.001 mm, bet bāze 100mm. Konstrukcijas labajā malā pie balsta tika netiešā veidā mērīts pagrieziena leņķis ar trīs pārvietojumu mērītājiem punktos I4, I5, I6, izmantojot mehāniskus mēraparātus *SHOCK- PROOF SCALA*, kuru mazākās iedaļas vērtība ir 0.01 mm.

Tabula 6.2.

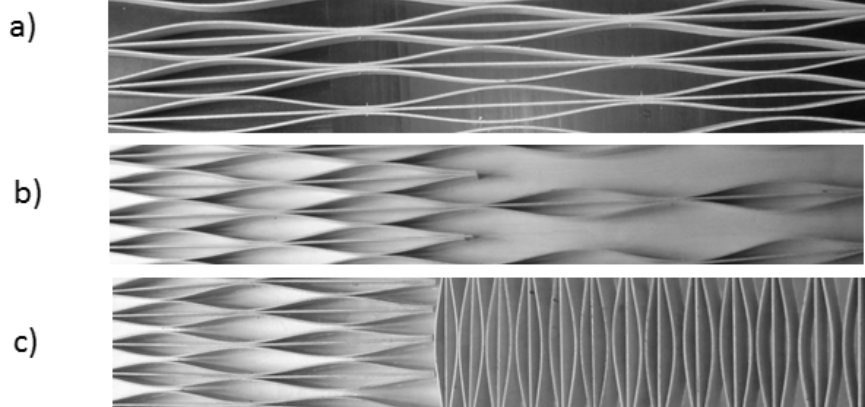
Slodžu kombinācijas 1. un 3. paraugam

Slodzes komb. nr.	q1, KPa	q2, KPa
1	5	0
2	5	5
3	10	5
4	10	10

Tabula 6.3.

Slodžu kombinācijas 2. paraugam

Slodzes komb. nr.	q1, KPa	q2, KPa
1	5	0
2	5	5

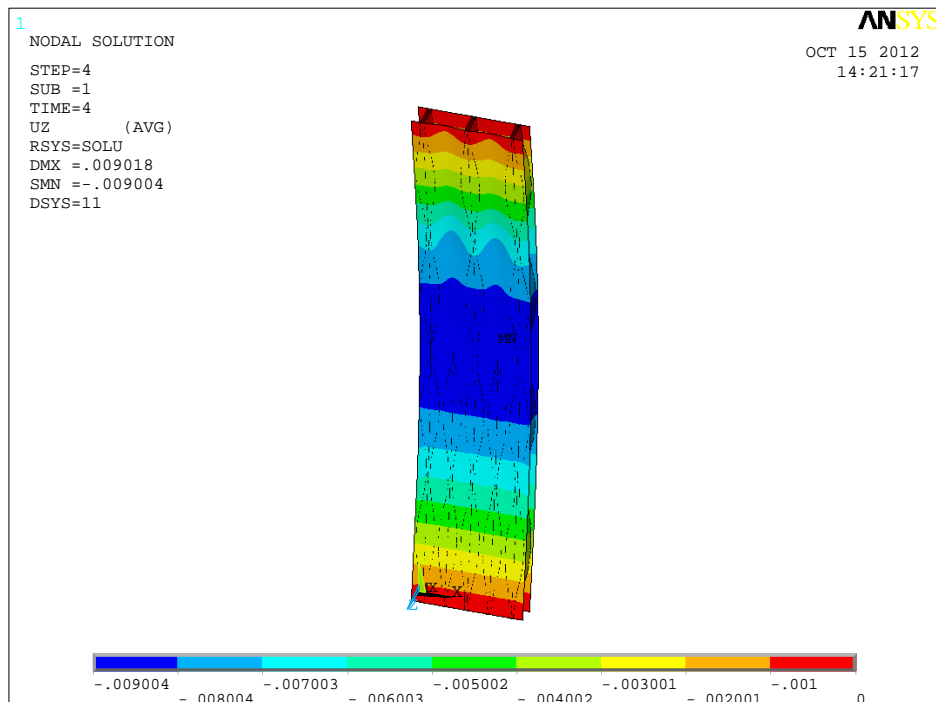


6.19.att. Pārbaudāmo paraugu ribojuma struktūras.



6.20.att. Pirmā parauga pārbaude liecē.

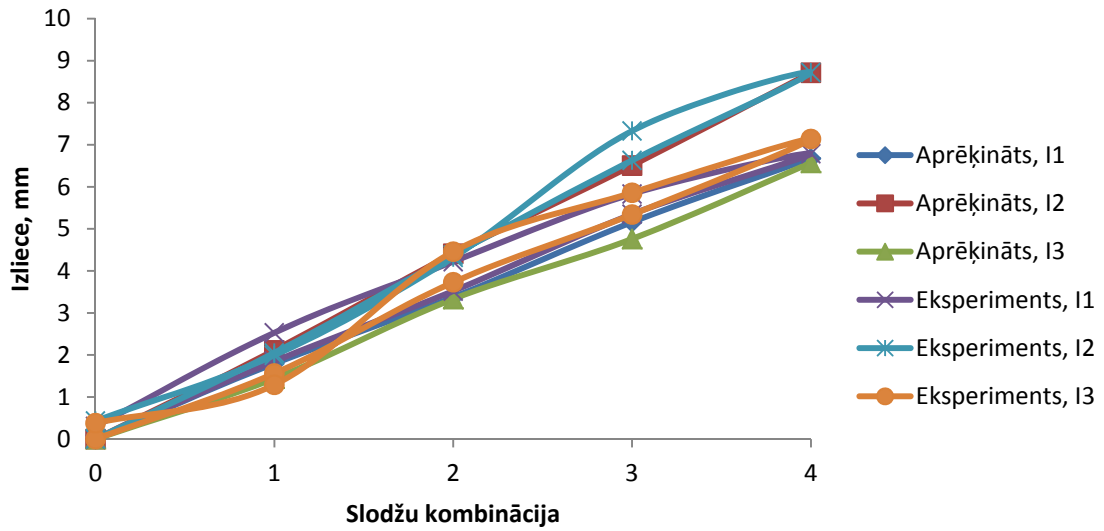
Paralēli eksperimentiem, paraugiem tika noteikts spriegumu-deformatīvais stāvoklis ar galīgo elementu programmu *ANSYS 13*. Modelī tika izmantoti čaulu galīgie elementi *SHELL181* (skat. 6.21.att.), kuriem ir mezgli katrā virsotnē un katrā mezglā ir 3 translācijas un 3 rotācijas kustības brīvības pakāpes. Šis galīgais elements balstīts uz pirmās kārtas šķērsdeformāciju teoriju. Datorprogrammas modelis izveidots parametriskā veidā, izmantojot *ADPL* programmēšanas iespējas. Konstrukcija modelēta, izmantojot lineāri elastīgu slāņainu materiālu, kurš sastāv no ortotropiem slāņiem. Slāņu mehāniskās īpašības bērza finierim ņemtas no publikācijas [59].



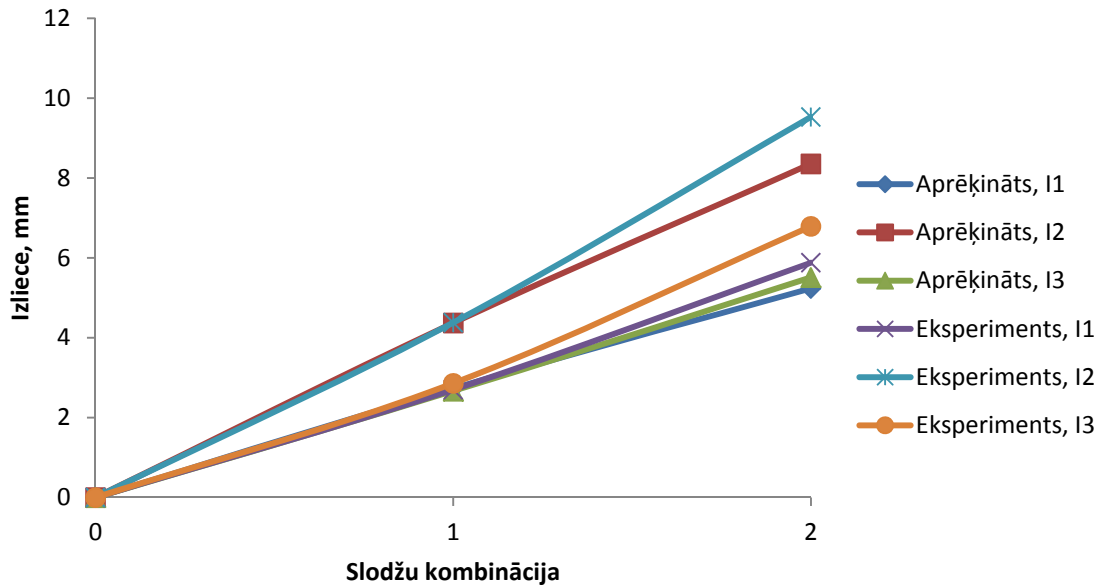
6.21.att. Transversiālie pārvietojumi (metri) pirmajam paraugam pie 4. slodžu kombinācijas.

Iegūtie skaitliskie rezultāti tika salīdzināti ar eksperimentāli noteiktajiem vienos un tajos pašos punktos. 6.22.att. parādītas eksperimentāli noteiktās izlieces punktos I1, I2 un I3, kā arī aprēķinātās izlieces šajos pat punktos pie četrām dažādām slodžu kombinācijām. Redzams, ka ir ļoti laba sakritība starp aprēķinātām un eksperimentāli noteiktām izliecēm (maksimālā atšķirība nepārsniedz 5%). Atslogojot konstrukciju, neveidojas ievērojamas paliekošās deformācijas.

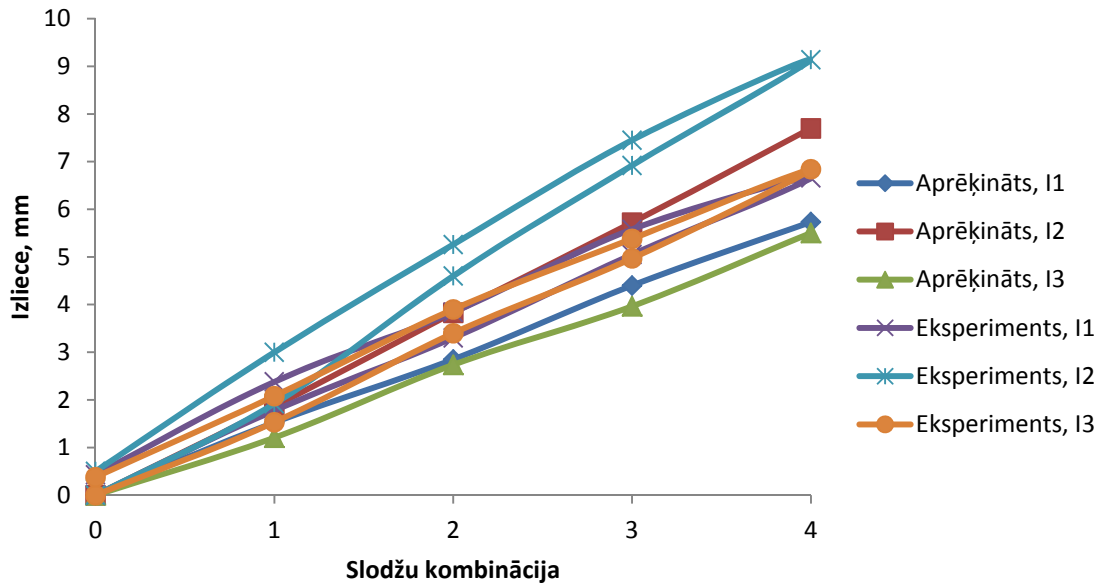
6.23.att. un 6.24.att. parādītas eksperimentāli un skaitliski noteiktas izlieces punktos I1, I2 un I3. Redzams, ka otrajam paraugam pie otrās slodžu kombinācijas palielinās atšķirība starp aprēķinātiem un eksperimentāli noteiktiem rezultātiem, jo pie lieliem spriegumiem būtisku lomu spēlē koksnes nelineārās īpašības, kas aprēķinos netika ņemtas vērā.



6.22.att. Aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās izlieces punktos I1, I2 un I3 pirmajam paraugam.

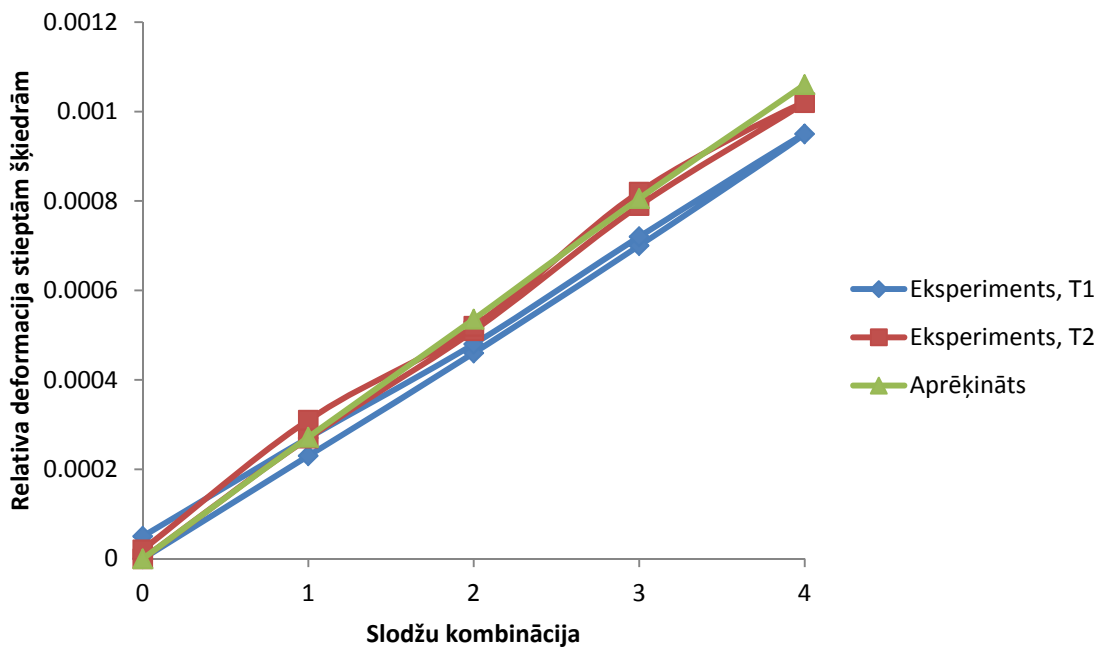


6.23.att. Aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās izlieces punktos I1, I2 un I3 otrajam paraugam.

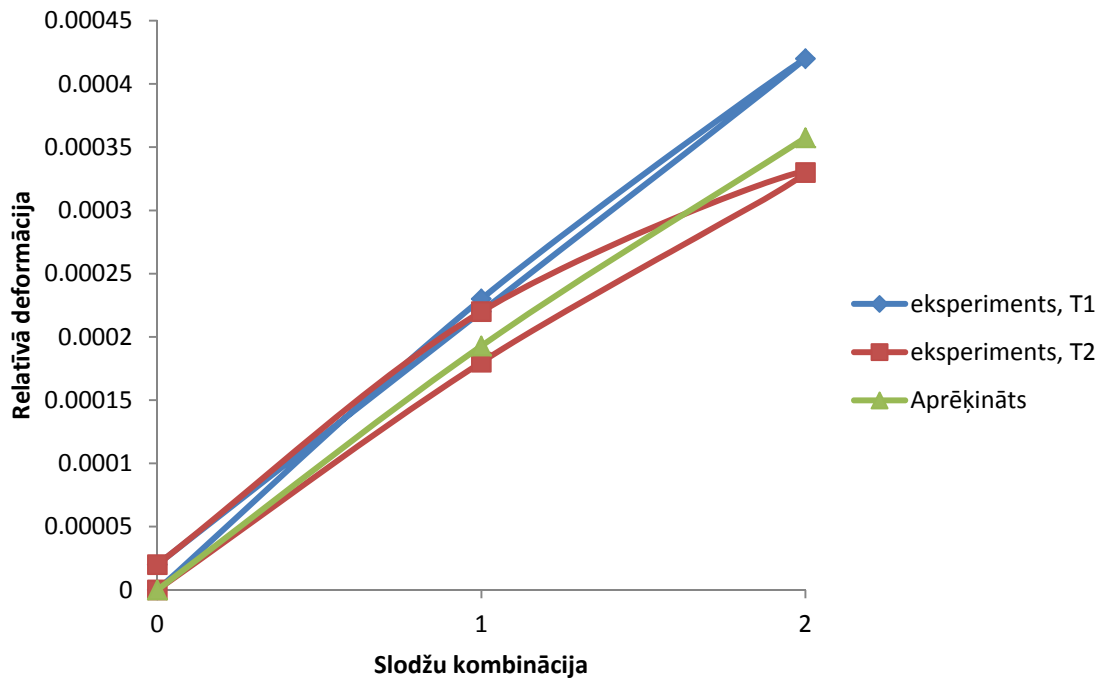


6.24.att. Aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās izlieces punktos I1, I2 un I3 trešajam paraugam.

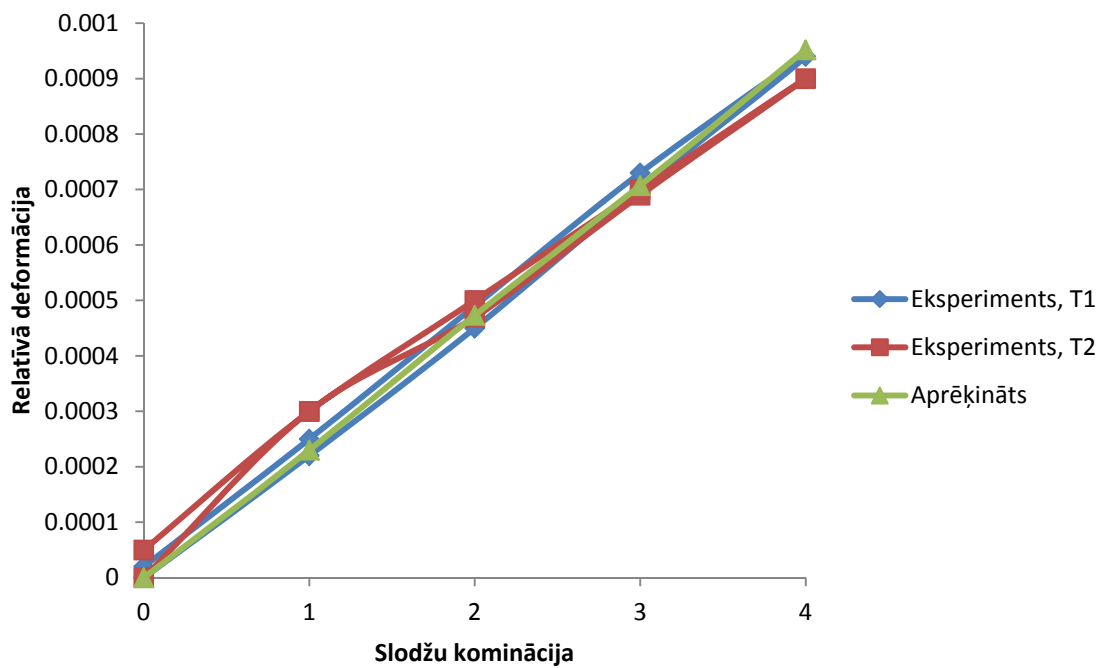
6.25.att., 6.26.att., 6.27.att. parādītas aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās relatīvās deformācijas laiduma vidū. Aprēķinātais rezultāts uzrādīts pa vidu starp eksperimentāli noteiktajām deformācijām punktos T1 un T2. Redzams, ka maksimālā atšķirība nepārsniedz 7% robežu.



6.25.att. Relatīvās deformācijas stieptajās šķiedrās 1. paraugam.



6.26.att. Relatīvās deformācijas stieptajās šķiedrās 2. paraugam.



6.27.att. Relatīvās deformācijas stieptajās šķiedrās 3. paraugam.

Tabula 6.4.

## Spriegumu līmenis paraugos pie maksimālās slodzes

parauga nr.	Maksimālie normāl spriegumi šķiedru virzienā, MPa	Maksimālie bīdes spriegumi, MPa	Attiecība $\frac{\sigma}{R}$ *, %
1	21	3.14	70
2	7	0.94	63
3	12.6	1.63	48

\* stiprība  $R$  noteikta netiešā veidā, izmantojot testu rezultātus samazinātiem paraugiem.  $\sigma$  – maksimālie spriegumi konstrukcijā.

Paraugi netika slogoti ar lielāku slodzi, kā 70% no graužošās slodzes. Graužošā slodze tika noteikta netiešā veidā izmantojot graužošo slodzi, kas iegūta samazinātiem paraugiem trīs punktu lieces testā.

Pārbaudāmie paraugi uzrādīja ievērojami labāku stingumu par standarta saplāksni. Piemēram, lai iegūtu saplākšņa loksni ar šādu pat stingumu, kā 3. paraugam ar biezumu 58 mm, tās biezumam ir jābūt 42 mm. Kopējā masa standarta saplāksnim ar tādu pat stingumu ir 12.92 kg, bet ribotai plātnei tā ir 6.02 kg. Tādā veidā, lietojot ribotu saplākšņa plātņi, iespējams vairāk kā 2 reizes samazināt masu saplāksnim, nesamazinot tā stingumu.

### 6.3. Trīsstūrveida trīslocīklu telpiskas arkas racionāls ribojums

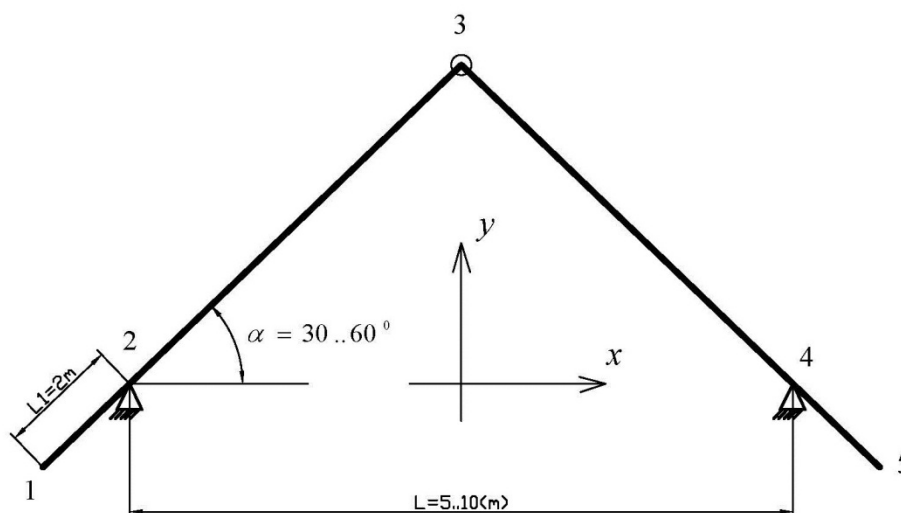
Būvniecībā koksnes konstrukcijas visvairāk izmantot jumta konstrukciju izbūvē, no kurām vispopulārākā ir divslīpu jumta konstrukcija, kur kā galvenais nesošais elements ir trīsstūrveida trīslocīklu telpiska arka. Šādas konstrukcijas tradicionāli veido no līmēta vai dabīga koka spārēm. Bieži izmanto arī kopņu konstrukcijas, taču šajā gadījumā būtiski samazinās dzīvojamā platība. Spāru konstrukcijas veidošana ir darbietilpīgs un neindustriāls process. Šajā nodaļā parādītas šādu konstrukciju veidošanas iespējas no ribotu saplākšņu plātnēm, kuras iepriekš izgatavotas rūpnīcā kā montāžas bloki ar siltumizolāciju un apšuvumiem. Aplūkoti gadījumi, kad laidums ir no 5 līdz 10 m un jumta slīpuma leņķis no 30 līdz 60 grādiem, bet jumta pārkare 2m (skat. 6.28. att.). Piedāvātā ribotā konstrukcija salīdzināta ar spāru konstrukciju, kurā spāru šķērsriezums ir 50x250 mm no C18 klases koksnes. Uz spāru konstrukcijas papildus jālieto 20 mm dēļu apšuvumi no abām pusēm, kas nav nesoši. Gan ribotajā konstrukcijā, gan spāru konstrukcijā

pieņemts, ka vidusslānis ir aizpildīts ar *Rockwool* mīksto siltumizolācijas slāni 250 mm biezumā.

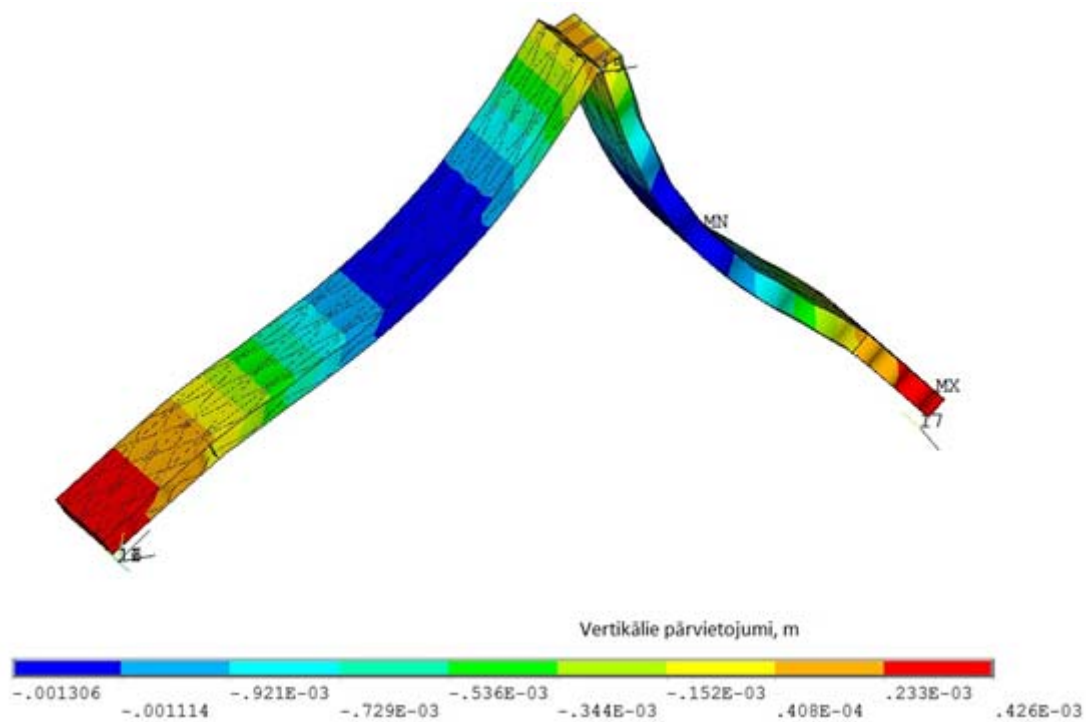
Spāru konstrukcijā vislielāko īpatnējo nestspēju-  $0.01 \dots 0.018 \frac{KPa}{kg}$  (KPa, ko var uzņemt 1 kg konstrukcijas) var panākt, ja attālums starp balstiem ir 6 m (skat. 6.30. att.). Savukārt vienmērīgi ribotas saplākšņa plātnes konstrukcijā vislielākā īpatnējā nestspēja ir pie laiduma 5m - vidēji  $0.22 \frac{KPa}{kg}$ , bet mazākā pie 10 m laiduma –  $0.06 \frac{KPa}{kg}$  (skat. 6.31. att.).

Veidojot ribotam panelim diskrēti mainīgu, racionālu ribojuma struktūru- četriem diskrētiem apgabaliem: 1. apgabals- pārkare, 2.,3.,4.apgabals trešā daļa no laiduma. Augšējais apšuvums visos apgabalos 9.2 mm biezs, apakšējais apšuvums un plakanās ribas- 6.4 mm, liektās ribas 1. apgabalā ir 6.4 mm biezas, 2.,3. apgabalā 12 mm biezas, bet 4. apgabalā 6.4 mm biezas. Diskrētais dalījums iegūts, balstoties uz 4. nodaļā iegūtajiem racionālajiem lieces un bīdes sadalījumiem. Pie 30 grādu slīpuma leņķa un 8 m laiduma, iespējams palielināt īpatnējo nestspēju par 12% (skat. 6.32. att.), turklāt pie mazāka slīpuma leņķa īpatnējās nestspējas (KN slodze ko var uzņemt 1 kg konstrukcijas) palielinājums ir vēl lielāks.

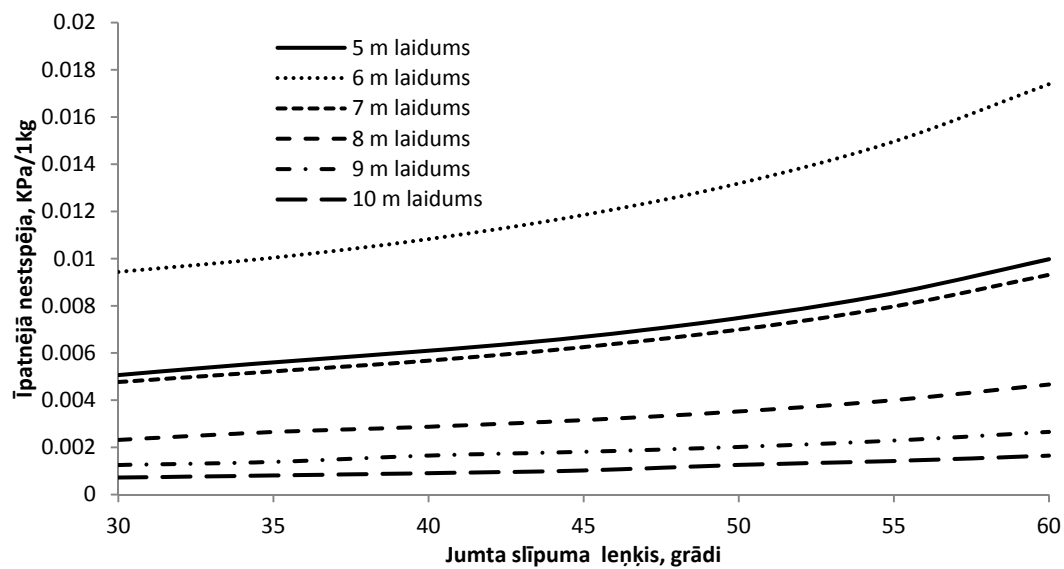
Pie slīpuma leņķa, kas lielāks par 60 grādiem, strauji samazinās atšķirība starp īpatnējo nestspēju ribotai plātnei un spāru konstrukcijai.



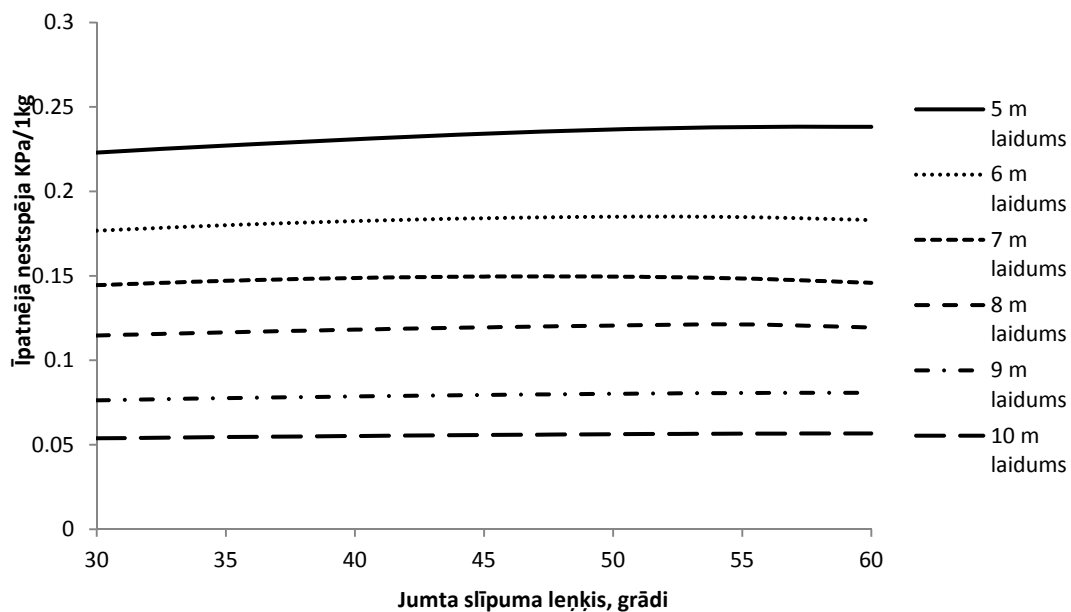
6.28. att. Divslīpu jumta konstrukcijas (trīsstūrveida trīslocīklu arka) aprēķina modelis.



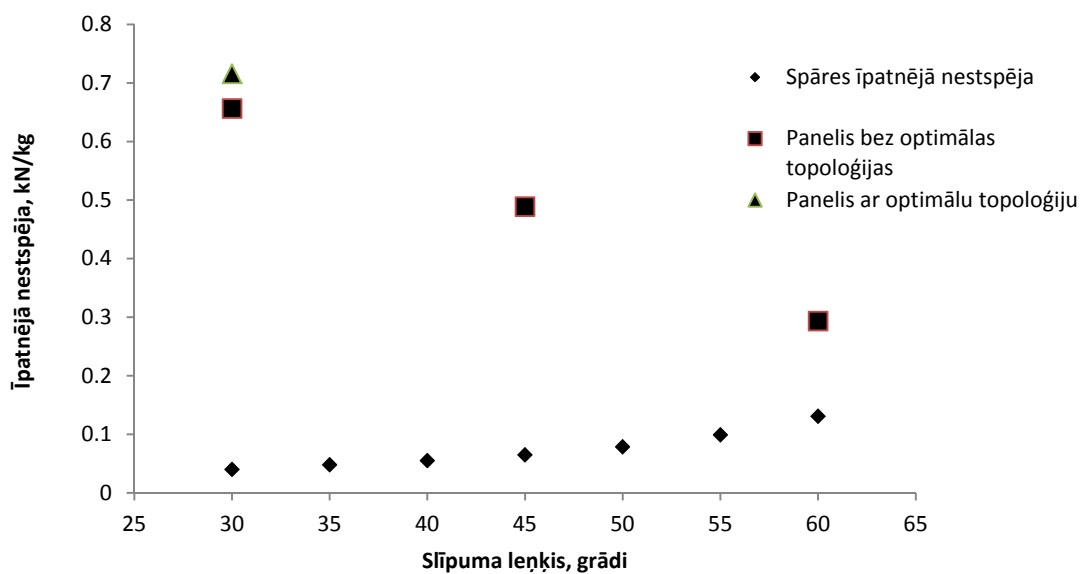
6.29. att. Vertikālie pārvietojumi ribotā konstrukcijā ar laidumu starp balstiem 8 m un slīpumu 45 grādi.



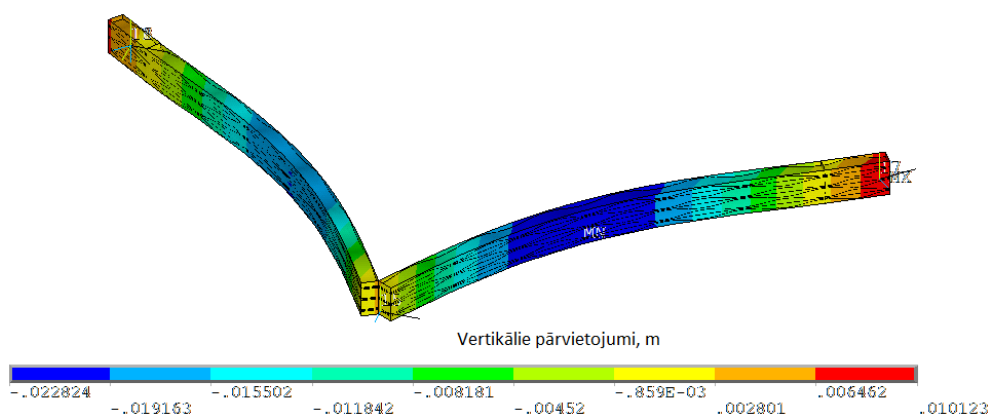
6.30. att. Spāru konstrukcijas Īpatnējā nestspēja.



6.31. att. Vienmērīgi ribota paneļa īpatnējā nestspēja.



6.32. att. Īpatnējās nestspējas salīdzinājums dažādām konstrukcijām, atkarībā no slīpuma leņķa pie 8 m laiduma un vienmērīgi izkliedētas slodzes.



6.33. att. Vertikālie pārvietojumi, ja laidums ir 16 m, slīpuma leņķis 45 grādi un kopējais biezums 400 mm, un vienmērīgi izkliedēta slodze ar intensitāti 3 KPa.

Izmantojot šo konstrukciju, var pārsegt relatīvi lielus laidumus- 16 m. aprēķini parāda, ka pie šāda laidumu, veidojot plātņi ar kopējo biezumu 400 mm, normālspriegumi, bīdes spriegumi un vertikālie pārvietojumi nepārsniedz pieļaujamus lielumus ( $f_{c,0,d} = 22.7 \text{ MPa}$ ,  $f_{t,0,d} = 33 \text{ MPa}$ ,  $f_{v,d} = 6.3 \text{ MPa}$  un izlieci  $\frac{1}{200}$  no laiduma- 8 cm (aprēķināts 2.3 cm)). Plātnes kopējais biezums ir 400 mm, liekto ribu biezums 12 mm, apšuvumu biezumi 9.5 mm, plakano ribu biezums 6.5 mm. Saplākšņa elementi izgatavoti no bērza saplākšņa.

Ribota paneļa konstrukcijas aprēķinā tika pieņemts, ka balstmezgli un kores mezgls ir veidoti tā, ka tajos neveidojas lielas spriegumu koncentrācijas.

Ribotā konstrukcija paver iespējas veidot siltumizolējošas konstrukcijas, tā, piemēram, ja vidus slāni aizpilda uz putupolistirolu EPS 60 (siltumvadītspējas koeficients  $0.0407 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ , tad silpumprestība 250 mm biežai plātnei palielinās 3 reizes salīdzinot ar monolītu koksnes plātņi (pieņemts, ka siltumvadītspējas koeficients ir  $0.12 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ).

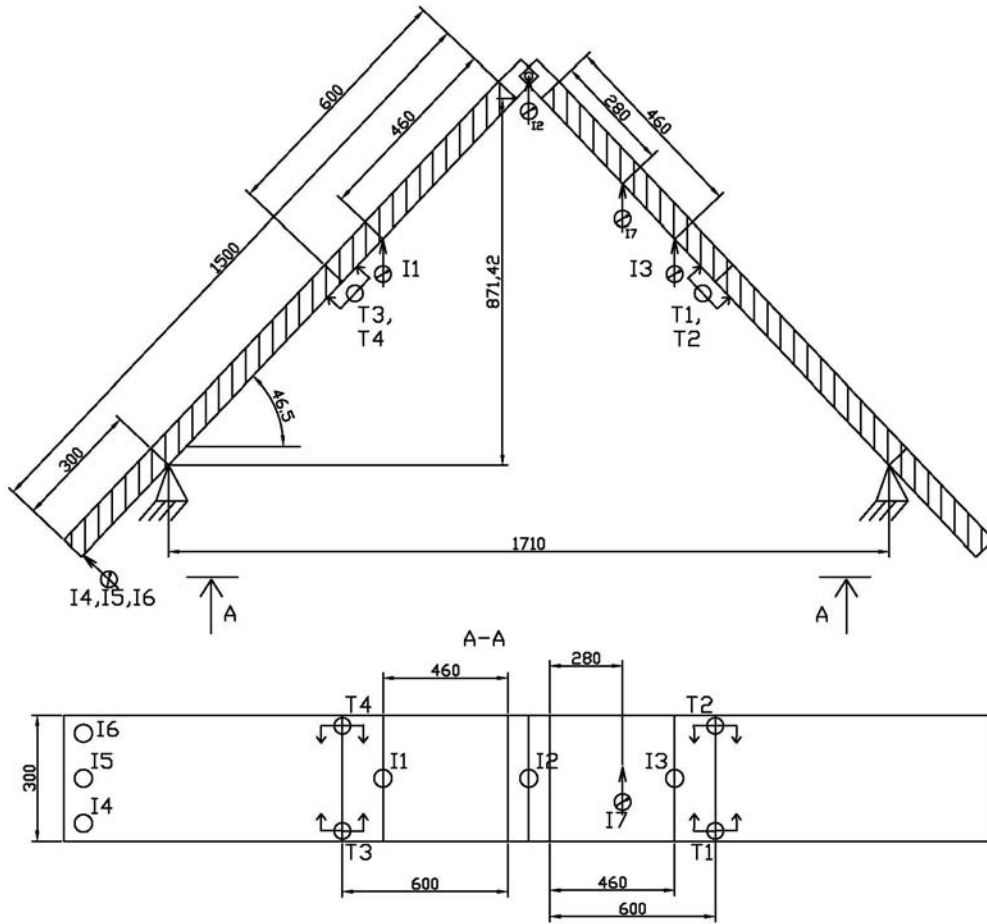
#### 6.4. Konstrukcijas modeļa eksperimentāla pārbaude

Aprēķinu rezultāti tika pārbaudīti samazinātai ēkas jumta trīsstūrveida trīslocīklu telpiskas arkas konstrukcijai. Modelim attālums starp balstiem 1710 mm, slīpuma leņķis 46.5 grādi, biezums 58 mm, platums 300 mm (skat.6.34. att., 6.35. att.). Kores mezglā izveidota locīkla no metāla detaļas (skat. 6.37.att.). Pie konstrukcijas balstvietas pielīmēts priedes koka elements ar izmēriem 300x30x120 mm (skat. 6.36.att.), kas atbalstās pret speciālu apaļu, cilindrisku stieni, uz kura

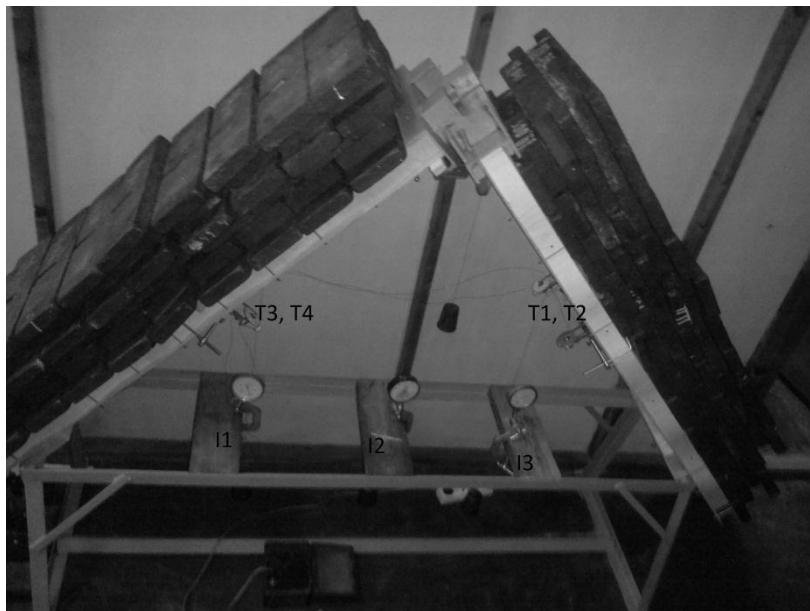
novietots 90 grādu tērauda leņķa profils, kurš var pagriezties ap stieni, nodrošinot ka neveidojas lieli lokāli spriegumi un nodrošinot aprēķinā pieņemto balstījuma veidu. Šķērsgriezums veidots no 3 lobskaidu 4 mm biezām bērza saplākšņa loksniem *Riga Ply BB/W*. Apšuvumiem divas lobskaidas vērstas ribu garenvirzienā, savukārt ribām 2 lobskaidas vērstas plātnes transversiālajā virzienā.

Slodze pielikta, izmantojot tērauda svarus ar izmēriem 130x70x400mm un vidējo masu 19 kg katrs. Lai nodrošinātu svaru nenoslīdēšanu no konstrukcijas, pirmā svaru rinda nofiksēta ar speciāliem tērauda stieņiem (skat. 6.38.att.). Otrā un trešā rinda ar atsvariem nofiksēta pret noslīdēšanu ar speciālām, vertikālām koka latām (skat. 6.38.att.).

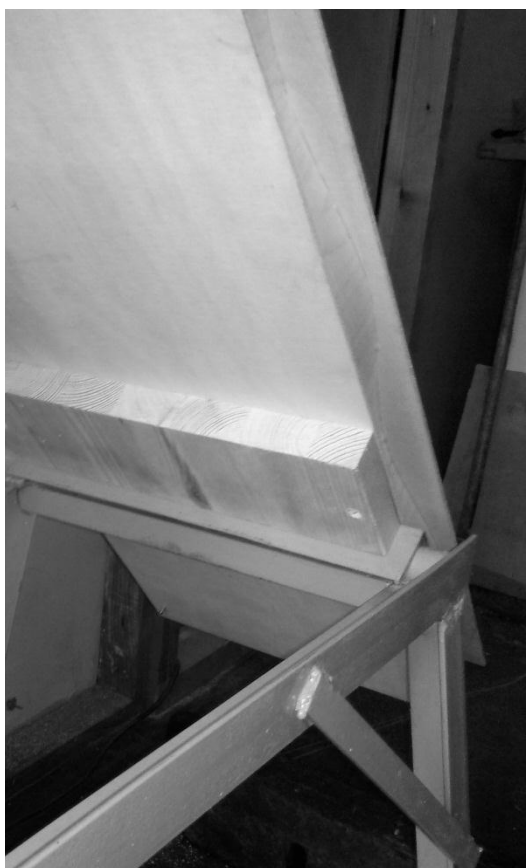
Konstrukcijai mērīti vertikālie pārvietojumi trijās vietās (I1, I2, I3), kā tas parādīts 6.35. att. Šajos punktos izmantoti mehāniskie pārvietojumu mērītāji *PAO 102*, kuru mazākā iedaļas vērtība ir 0.01mm. Konstrukcijas konsolei kreisajā pusē tika mērīti transversiālie pārvietojumi (perpendikulāri apšuvumu virsmai) punktos I4, I5, I6 ar mehāniskiem pārvietojumu mērītājiem *SHOCK- PROOF SCALA*, kuriem minimālā iedaļas vērtība ir 0.01 mm. Lai novērtētu konstrukcijas novirzi no vertikālās plaknes, tika mērīti horizontālie pārvietojumi perpendikulāri konstrukcijas plaknei punktā I7 ar mehānisko pārvietojumu mērītāju *PAO 102* (skat. 6.34. att.).



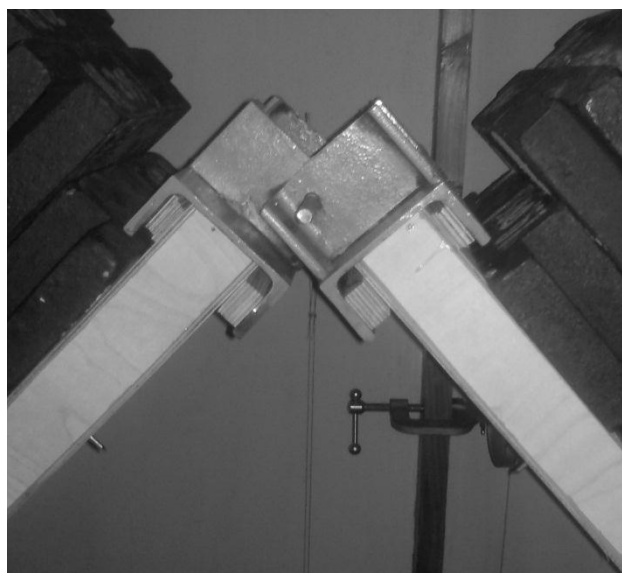
6.34. att. Konstruktijas modeļa shēma.



6.35. att. Eksperimentālais modelis.



6.36.att. Konstruktijas locīklveida balsta mezgls.



6.37.att. Konstruktijas kores locīklveida mezgls.



6.38.att. Slodzes pielikšana un nofiksēšanas mehānismi pret noslīdēšanu.

Konstrukcija slogota ar 9 dažādiem slodžu gadījumiem, kā tas parādīts 6.39.att. un tabulā 6.5. Slodze pielikta simetriski pret konstrukcijas kores mezglu.

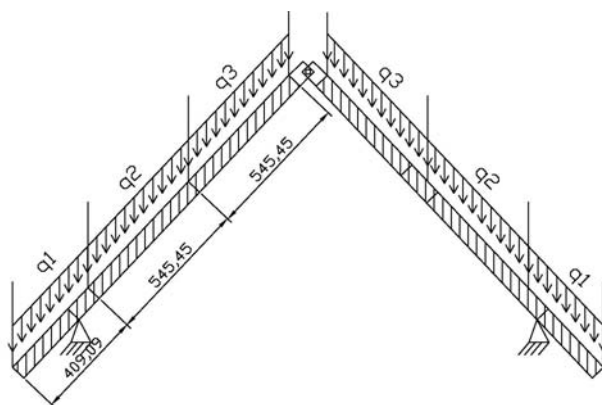
Eksperimentāli noteiktās deformācijas un pārvietojumi salīdzināti ar aprēķinātām vērtībām. Aprēķins veikts ar galīgo elementu datorprogrammu *ANSYS 13*. Aprēķinā izmantots čaulu galīgais elements *SHELL187*. Konstrukcija modelēta, izmantojot lineāri elastīgu slāņainu materiālu, kurš sastāv no ortotropiem slāņiem. Slāņu mehāniskās īpašības bērza finierim ņemtas no publikācijas [59].

Kores mezgla tērauda elements modelēts ar speciāliem augsta stinguma stieņiem. Konstrukcijas ribojums veidots no vienmērīgi izvietotām ribām, kurām viļņa garums ir 300 mm, platums 50 mm. Aprēķina modelī pieliktas punktveida slodzes pie augšējā apšuvuma un attiecīgajās vietās izveidots locīklveida balstījums.

Aprēķinātie un eksperimentāli noteiktie pārvietojumi punktos I1, I2 un I3 pie dažādiem slodžu gadījumiem parādīti 6.40.att. Redzams, ka starp aprēķinātiem un eksperimentāli noteiktiem pārvietojumiem pastāv laba sakritība.

Aprēķinātās un eksperimentāli noteiktās relatīvās deformācijas punktos T1, T2 un T4 (tenzometrs punktā T3 sabojājās eksperimenta gaitā) dotas 6.41.att. Atšķirība starp aprēķinātiem un eksperimentāli noteiktiem rezultātiem nepārsniedz 10%.

Konsoles transversiālo deformāciju mērītāji uzrādīta lielākus rezultātus kā aprēķinātie, kas ir skaidrojams ar to, ka šos mērītājus ar magnētisko bāzi ir problemātiski precīzi nofiksēt pret izkustēšanos pret nelīdzenām virsmām, šajā gadījumā grīdu, kas rada papildus mērījumu kļūdu.



6.39.att. Slodzes pielikšanas shēma.

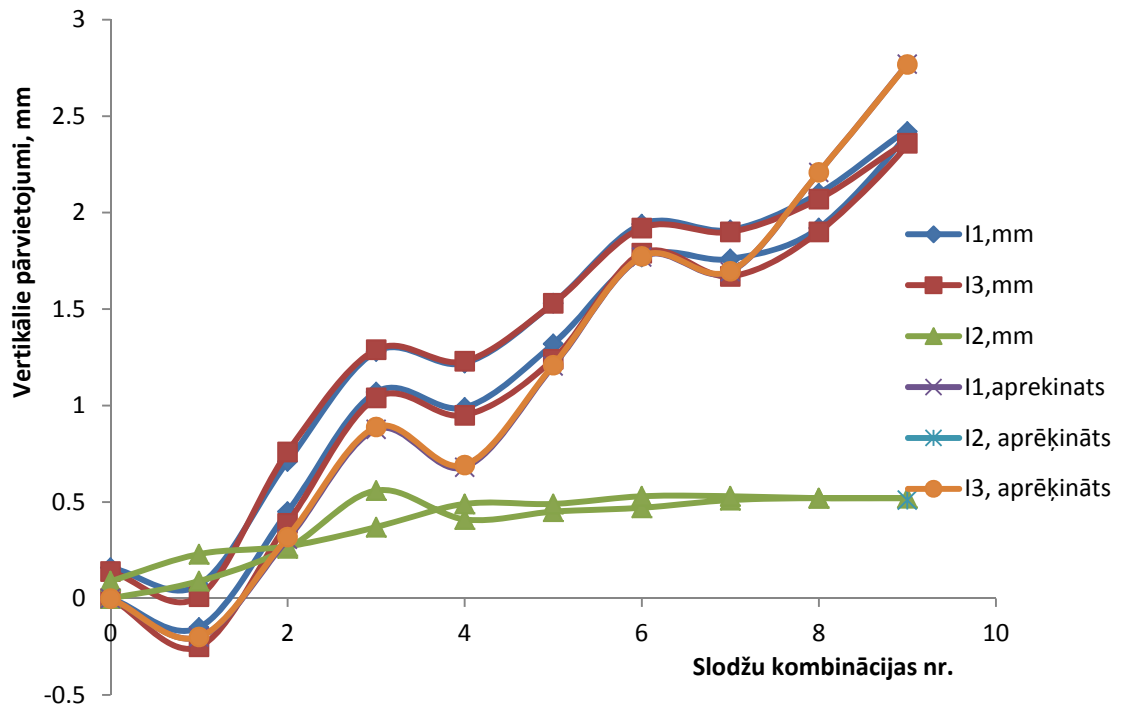
Tabula 6.5.

Pielikto slodžu vērtības katrā no slodžu gadījumiem

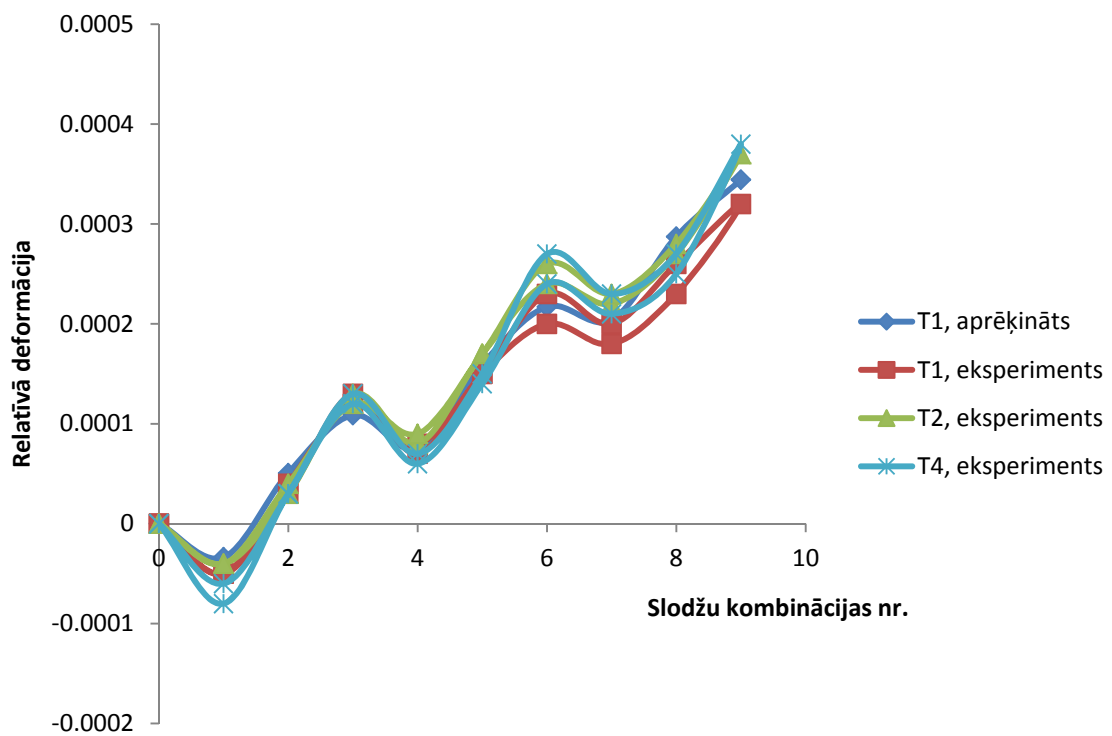
Slodžu komb. nr.	$q_1$ , KPa	$q_2$ , KPa	$q_3$ , KPa
1	4.67	0	0
2	4.67	4.67	0
3	4.67	4.67	4.67
4	9.33	4.67	4.67
5	9.33	9.33	4.67
6	9.33	9.33	9.33
7	14.00	9.33	9.33
8	14.00	14.00	9.33
9	14.00	14.00	14.00

Pārvietojumi un relatīvās deformācijas tika mērīti gan noslogojot konstrukciju, gan atslogojot. Pēc atslogošanas redzams, ka būtiskas paliekošās deformācijas nav izveidojušās. Tāpēc ir iespējams uzskatīt, ka slogošanas gaitā konstrukcijā mikroplaisas, atslāņošanās un citi defekti nav izveidojušies.

Ārpus plaknes pārvietojumi punktā I7 nevienā gadījumā nebija lielāki par 0.3 mm (1/5667 no laiduma), tādēļ varam uzskatīt, ka konstrukcija stāvēja stabili un uz sāniem nekustējās.



6.40.att. Vertikālie pārvietojumi punktos I1, I2, I3.



6.41.att. Relatīvās deformācijas punktos T1, T2 un T4.

Tabula 6.6.

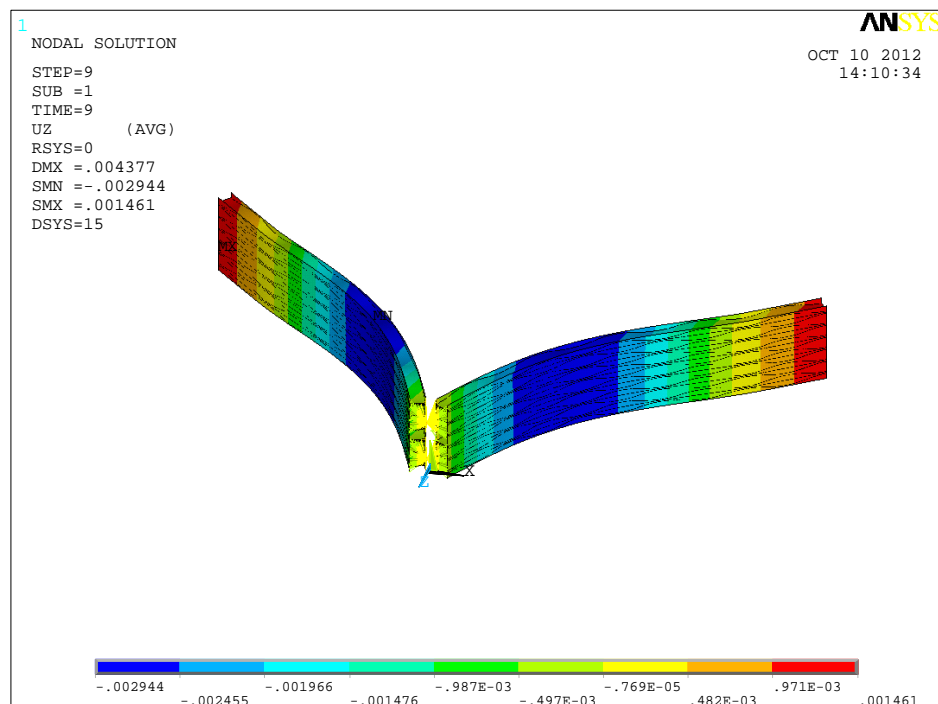
## Maksimālie spriegumi pie dažādiem slodžu gadījumiem.

Slodžu komb. nr.	Maksimālie spriegumi šķiedru virzienā, MPa	Maksimālie tangenciālie spriegumi, MPa	Attiecība $\frac{\sigma}{R}$ *
1	0.310	0.117	3.36%
2	0.605	0.306	8.77%
3	3.23	0.654	18.71%
4	2.85	0.580	16.60%
5	3.84	0.765	21.87%
6	6.46	1.30	37.33%
7	6.31	1.27	36.50%
8	7.29	1.45	41.70%
9	9.88	1.99	56.96%

\* graujošie spriegumi noteikti netiešā veidā izmantojot eksperimenta rezultātus maza izmēra paraugiem trīspunktu liecē, tāpēc spriegumu līmenis no graujošās slodzes ir ļoti aptuvenš. R- spriegumi pie graujošās slodzes,  $\sigma$  – maksimālie spriegumi konstrukcijā.

Modelim tika veikts 24 stundu ilgs šļūdes tests pie slodzes, kas nepārsniedz 50% no graujošās slodzes. Rezultāti parādīja, ka pie šī spriegumu līmeņa būtiskas šļūdes deformācijas neattīstās, jo deformācijas palielinājās 3 stundu laikā par aptuveni 10%. Pēc tam šļūdes deformācijas vairs būtiski nepalielinājās.

Aprēķinātie vertikālie pārvietojumi parādīti 6.42.att.



6.42.att. Vertikālie pārvietojumi (metros) konstrukcijā pie 9. slodžu kombinācijas.

## SECINĀJUMI

Piedāvātas ribotu struktūru no plakanas un izliektas formas ribojuma un slāņainu kompozītu plātņu, kurās vidējā kārtā ir veidota no piedāvātās ribojuma struktūras, izgatavošanas paņēmiens un izstrādātas šo konstrukciju elementu, kā arī saplākšņa ar mainīgu ārējo lobskaidu orientāciju, aprēķinu pamatmetodikas.

- Mitruma izmaiņas izraisītie pārvietojumi slāņainā loksne ar nesimetrisku struktūru pret vidusplakni samazinās par 45%, veicot termisko apstrādi 2.5...3 stundas 145 °C temperatūrā, un pie šiem apstākļiem samazinās saistītā mitruma difūzijas koeficients loksnes transversiālajā virzienā par 45%. Veidojot loksni ar ortogonālu, nesimetrisku struktūru un līmējot presē ar apsildāmiem, plakaniem plauktiem 100...110 °C tā iegūst maksimālo izliekumu pie minimālas mitruma izmaiņas, ja šķērsslāņu un garenslāņu biezumu attiecība ir 1/4...1/6, un tā tiek kondicionēta, pakāpeniski samazinot temperatūru un mitruma saturu vienas diennakts laikā, ko apliecina skaitliskie aprēķini.
- Speciāli pielāgota Ģenētiskā algoritma un procedūras, kas nosaka neizdevīgāko slodžu izvietojumu, ribu racionālu orientāciju, kā arī speciālu uz priekšu orientētu (*feed forward*) Mākslīgo Neironu Tīkla izmantošana, nodrošina racionālu plātņu šķērsriezuma ģeometrisku parametru prognozēšanu (korelācijas koeficients starp Mākslīgo Neironu Tīkla aprēķinātajiem parametriem un optimālajiem ir lielāks par 0.98), ko apliecina noteiktie racionālie saplākšņa kompozīta plātņu apšuvumu un ribu biezumi, un ribu izvietojuma intensitāte trīslaidumu plātnei, kurai laidumi īsākās malas virzienā ir vienādi, bet garākās malas virzienā to attiecība ir 1:2:1 pie plātnes biezuma no 30...60 mm un divām kustīgām slodzēm.
- Piedāvāto ribojuma veidu pielietošana un izstrādāto aprēķina metodiku izmantošana plātņu racionāla, nepārtraukta vai diskrēti mainīga lieces un bīdes stinguma sadalījuma noteikšanai, minimizējot konstrukcijas padevīgumu un spriegumu atšķirības konstrukcijā, nodrošina pa kontūru balstītas plātnes stinguma palielināšanos par 50% un spriegumu atšķirību samazināšanos par 10%, salīdzinot ar nemainīga stinguma plātņi. Trīslaidumu mainīga stinguma saplākšņa loksnei ar vienmērīgi izkliedētu slodzi stingums palielinās par 20%, bet vienlaiduma plātnei

par 13%, salīdzinot ar standarta saplākšņa loksni, ja tiek optimizēts ārējo lobskaidu orientācijas leņķis, izmantojot izstrādāto aprēķina metodiku.

- Plātnes ribojuma dimensijas un struktūra, kas noteiktas minimizējot atšķirību starp plātnes teorētisko nestspēju (lieces momentiem un šķērsspēkiem, ko var uzņemt plātne tās darbības galvenajos virzienos) un nepieciešamo nestspēju (faktiskajām piepūlēm attiecīgajā diskrētajā apgabalā), palielina diskrēti mainīga stinguma plātnes īpatnējo nestspēju līdz 50%. Nestspējas aprēķini diskrēti mainīga stinguma saplākšņa plātnēm ar plakanas un izliektas formas ribojumu, kuru kopējais biezums ir 100, 150 un 200 mm, saplākšņa elementu standarta biezums no 6 līdz 20 mm, ribojuma tipveida elementa platums no 200 līdz 333 mm un garums no 400 līdz 1000 mm, parāda, ka, ņemot vērā spriegumu koncentrācijas, faktiskais īpatnējās nestspējas pieaugums ir 27% pa kontūru balstītai plātnei ar vienmērīgi izkliedētu slodzi. Ribotai saplākšņa plātnei ar plakanas un izliektas formas ribojumu lokālas mitruma izmaiņas izraisītie normālspriegumi ir par 15% mazāki kā plātnei ar ribojumu no horizontāliem viļņveida elementiem (*corrugated core*), bet bīdes spriegumi ir par 50% mazāki.

- Diskrēti mainīga stinguma, kas tiek panākts ar ribojuma orientāciju, intensitāti un ģeometriju, trīs laidumu plātnei ar divām kustīgām slodzēm īpatnējās nestspējas vidējais pieaugums ir 20%, ja plātnes biezums ir 40 mm, bet, ja ir vienmērīgs ribojums, tad tāda paša biezuma plātnei īpatnējās nestspējas vidējais pieaugums ir 8.5%, salīdzinot ar standarta 21 slāņa bērza saplākšni pie neizdevīgākajām slodžu kombinācijām. Eksperimentālas paraugu ar vienmērīgu un diskrēti mainīgu ribojumu pārbaudes liecē apliecina izvēlēto aprēķinu modeļu pareizību (svarīgākie izmērītie pārvietojumi neatšķiras vairāk kā par 15% no aprēķinātajiem).

- Piedāvāto plātņveida konstrukcijas elementu ar plakanas un izliektas formas ribojumu, pie jumta slīpuma leņķa  $30^\circ$  un laiduma 8 m diskrēti mainīgās struktūras izmantošana dod īpatnējās nestspējas palielinājumu par 12%, salīdzinot ar plātņi, kurai ir vienmērīgs ribojums, bet, salīdzinot vienmērīgi ribotu saplākšņa plātņi ar tipisku spāru konstrukciju, īpatnējā nestspēja pieaug vairākas reizes (piem. pie 8 m laiduma un  $60^\circ$  slīpuma leņķa īpatnējā nestspēja pieaug 2 reizes). Atšķirība starp būtiskākajiem teorētiski aprēķinātajiem pārvietojumiem un relatīvajām deformācijām elementos no eksperimentāli noteiktiem nepārsniedz 15%.

## LITERATŪRA

1. Abdalla M., Setoodeh S., Gurdal Z. *Design of variable stiffness composite panels for maximum fundamental frequency using lamination parameters// Composite Structures.* - 2007. –Vol. 81. –Nr.2. -pp -283-291.
2. Alfredsson K.S., Gawandi A.A., Gillespie J.W., Carlsson L.A., Bogetti T.A. *Stress analysis of axially and thermally loaded discontinuous tile core sandwich with and without adhesive filled core gaps// Composite Structures.* -2011. –Nr. 93. –pp 1621-1630.
3. Almeida F., Awruch A. *Design optimization of composite laminated structures using genetic algorithms and finite element analysis// Composite Structures.* - 2009. –Nr. 88. –pp 443-454.
4. Aniskevich K., Glaskova T., and Jansons J. *Elastic and sorption characteristics of epoxy binder in a composite during its moistening // Mechanics of Composite Materials.* -2005. -vol. 41. -No. 4. -pp 341-350.
5. Arya C. *Desing of Structural Elements.* – London: Spon Press, 2004. - 441 p.
6. Asadpoure A., Tootkaboni M., Guest J.K. *Robust topology optimization of structures with uncertainties in stiffness application to truss structures// Computers and Structures.* -2011. -Nr. 89. -pp 1131-1141.
7. Avramidis S., Englezos P., Papathanasiou T. *Dynamic nonisothermal transport in hygroscopic porous media: moisture diffusion in wood// AIChE J.* -1992. –Nr. 38. -pp 1279–1287.
8. Bathe K.J. *Finite element procedures.* -USA: Prentice- Hall, Inc, -1996. –1037 p.
9. Baušys R., Pankrašovaite I. *Optimization of architectural layout by the improved genetic algorithm// Journal of Civil Engineering and Management.* -2005. –Vol. 11. –Nr. 1. -pp 13-21.
10. Bendsoe M., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods and applications.* – Berlin: Springer-Verlag, -2003. –370 p.
11. Blasques J.P., Stolpe M. *Maximum stiffness and minimum weight optimization of laminated composite beams using continuous fiber angles// Structural and Multidisciplinary Optimization.* -2011. –Nr. 43. -pp 573-588.
12. Blom A.W., Mostafa A., Gurdal Z. *Optimization of course locations in fiber-placed panels for general fiber angle distributions// Composites Science and Technology.* -2010. –Nr. 70. –pp 564-570.
13. Bonet J., Wood R.D. *Nonlinear continuum mechanics for finite element analysis.* UK: Cambridge university press, -1997. –283 p.
14. Brauns J., Rocens K. *Design of humidity sensitive wooden materials for multi-objective application// Wood Sci. Technol.* -2004. -Nr. 38. -pp 311-321.
15. Brauns J., Rocens K. *Hygromechanics of composites with asymmetric structure// Mechanics of composite materials.* -1994. –Nr. 30. -pp 601-607.
16. Burlayenko V., Sadowski T. *Effective elastic properties of foam-filled honeycomb cores of sandwich panels// Composite Structures.* -2010. –Nr. 92. –pp 2890-2900.
17. Carrera E., Miglioretti F. *Selection of appropriate multilayered plate theories by using a genetic like algorithm// Composite Structures.* -2012. –Nr. 94. -pp 1175-1186.
18. Chassagne P., Bou-Said E., Jullien J.F., Galimard P. *Three Dimensional Creep Model for Wood Under Variable Humidity-Numerical Analyses at Different*

- Material Scales// Mechanics of Time-Dependent Materials.* -2006. –Nr. 9. –pp 203–223.
19. Chazal C., Pitti R.M. *Viscoelastic incremental formulation using creep and relaxation differential approaches// Mechanics of Time-Dependent Materials.* -2010. –Nr. 14. -pp 173–190.
  20. Chen D., Yang L. *Analysis of equivalent elastic modulus of asymmetrical honeycomb// Composite Structures.* -2011. –Nr. 93. -pp 767-773.
  21. Cherkaev E., Cherkaev A. *Minimax optimization problem of structural design// Computers & Structures.* -2008. –Nr. 86. -pp 1426-1435.
  22. Chi L. H. *Artificial Neural Networks- Application.* -Croatia: InTech, -2011. - 586 p.
  23. Das S.K., Basudhar P.K. *Undrained lateral load capacity of piles in clay using artificial neural network// Computers and Geotechnics.* -2006. –Nr. 33, -pp 454–459.
  24. Decolon C. *Analysis of composite structure.* -London: Hermes Penton ltd, -2002. – 336 p.
  25. *Dendrolight produkti.* <http://dendrolight.lv/lv/produkti>. 29.05.2012.
  26. Diaz J., Fagiano C., Abdalla M., Gurdal Z., Hernandez S. *A study of interlaminar stresses in variable stiffness plates// Composite Structures.* -2012. –Nr. 94. –pp 1192-1199.
  27. Dubois F., Randriambololona H., Petit C. *Creep in Wood Under Variable Climate Conditions: Numerical Modeling and Experimental Validation// Mechanics of Time-Dependent Materials.* -2005. –Nr. 9. –pp 173–202.
  28. EN 1991-1-1:2002. *Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for building.*
  29. *Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General- Common rules and rules for buildings.*
  30. Ferentinou M.D., Sakellariou M.G. *Computational intelligence tools for the prediction of slope performance// Computers and Geotechnics.* -2007. – Vol. 34. –Nr. 5. –pp 362-384.
  31. *Fiberglass FRP Plywood Sandwich Panel.* [http://www.ecvv.com /producēt /3096626.html](http://www.ecvv.com/producēt/3096626.html). 29.05.2012.
  32. Filipenkova V., Laizans J., Knets I. *Bond strength of implant to the bone tissue and the stress-strain state of “bone-implant” system by the finite element method // Acta of Bioengineering and Biomechanics.* -2006. -Vol. 8. -No. 2. -pp 19-26.
  33. Fortino S., Mirianon F., Toratti T. *A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures// Mechanics of time-dependent materials.* -2009. –Nr. 13. -pp 333-356.
  34. Garson G.D. *Interpreting neural network connection weights// Artificial Intelligence Expert.* -1991. –Nr. 6. –pp 47-51.
  35. Goh A.T.C. *Back-propagation neural networks for modeling complex systems// Artificial Intelligence in Engineering.* -1995. –Nr. 9. –pp 143-151.
  36. Goldberg D.E. *Genetic Algorithms in Search, Optimisation and Machine Learning.* -USA: Addison-Wesley, -1989. –432 p.
  37. Goremikins V., Rocens K. and Serdjusks D. *Evaluation of Rational Parameters of Trussed Beam// Scientific Journal of RTU. Construction Science.* – 2010. – Vol. 11. – pp 21-25.

38. Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Rational Large Span Structure of Composite Pultrusion Trussed Beam// *Scientific Journal of RTU. Construction Science*. – 2010. – Vol. 11. – pp 26-31.
39. Goremikins V., Rocens K. and Serdjuks D. Decreasing of Displacements of Prestressed Cable Truss// *An International Journal of Science, Engineering and Technology “World Academy of Science, Engineering and Technology”*. Special Journal Issues. – 2012. – Nr. 0063. –pp 554-562.
40. Hagan M.T., Demuth H.B., Beale M.H. *Neural Network Design*. –Boston: PWS Publishing. -1996. –736 p.
41. Hagan M.T., Menhaj M.B. Training feedforward networks with the Marquardt Algorithm// *IEEE Trans. Neur. Networks*. -1994. –Nr. 5. –pp 989-993.
42. *Handbook of Finnish Plywood*. Finland: Finnish Forest Industries Federation, Kirjapaino Markprint Oy, -2002. –65 p.
43. Hanhijarvi A., Helnwein P. M. Computational Analysis of Quality Reduction during Drying of Lumber due to Irrecoverable Deformation. I: Orthotropic Viscoelastic-Mechanosorptive-Plastic Material Model for the Transverse Plane of Wood// *Journal of Engineering Mechanics*. -2003. -Vol. 129. -No. 9. -pp 996–1005.
44. Hause T. Elastic structural response of anisotropic sandwich plates with a first-order compressible core impacted by a friedlander-type shock loading// *Composite Structures*. -2012. –Nr. 94. –pp 1634-1645.
45. He L., Cheng Y., Liu J. Precise bending stress analysis of corrugated core, honeycomb-core and x-core sandwich panels// *Composite Structures*. -2012. –Nr. 94. –pp 1656-1668.
46. He S., Li J. 2008. Modeling Nonlinear Elastic Behavior of Reinforced Soil Using Artificial Neural Networks// *Applied Soft Computing*. -2008. –Vol. 9. –Nr. 3. –pp 954-961.
47. Herranen, H., Pabut, O., Eerme, M., Majak, J., Pohlak, M., Kers, J., Saarna, M., Allikas, G., Aruniit, A. Design and Testing of Sandwich Structures with Different Core Materials // *Journal of Materials Science of Kaunas University of Technology*. -2011. -Vol. 17. -No. 4. -pp 1 - 6.
48. Hola J., Schabowicz K. 2005. Application of artificial neural networks to determine concrete compressive strength based on non-destructive tests// *Journal of Civil Engineering and Management*. -2005. –Vol. 11. –Nr. 1. –pp 23-32.
49. Hudson C. W., Carruthers J. J., Robinson A. M. Multiple objective optimisation of composite sandwich structures for rail vehicle floor panels// *Composite Structures*. -2010. –Nr.92. -pp 2077-2082.
50. Johansen L., Lund E. Optimization of laminated composite structures using delamination criteria and hierarchical models// *Structural and Multidisciplinary Optimization*. -2009. –Nr. 38. –pp 357-375.
51. Jones R.M. *Mechanics of composite materials*. UK: Taylor & Francis Ltd., -1999. –519 p.
52. Jönsson J. Moisture induced stresses in timber structures. Technical Report TVBK-1031, Dissertation, Division of Structural Engineering. Sweden: Lund University of Technology, -2005. –50 p.
53. Jung H., Cho S. Reliability-based topology optimization of geometrically nonlinear structures with loading and material uncertainties// *Finite Element Analysis and Design*. -2004. –Nr. 41. –pp 311-331.

54. Kato J., Ramm E. Optimization of fiber geometry for fiber reinforced composites considering damage// *Structural and Multidisciplinary Optimization*. -2010. –Nr. 46. –pp 401-415.
55. Keller D. Optimization of ply angles in laminated composite structures by a hybrid, asynchronous, parallel evolutionary algorithm// *Composite Structures*. - 2010. –Nr. 92. -pp 2781-2790.
56. Knets I., Krilova V., Cimdins R., Berzina L., Vitins V. Stiffness and strength of composite acrylic bone cements // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. -2007. -Vol. 20. -nr. 1-2. -pp 135-138.
57. Korkhov V.P., Faitelson Ye.A., Glaskova T.I., and Jansons Yu.O. Influence of moisture on the structure and properties of the interphase layer of a composite based on an epoxy binder // *Mechanics of Composite Materials*. -2005, -vol. 41, - No. 4, -pp. 365-370.
58. Labans E., Kalniņš K. Numerical Versus Experimental Investigation of Plywood Sandwich Panels with Corrugated Core // *Civil Engineering '11: 3d international Scientific Conference Proceedings*. Vol.3, Latvija, Jelgava, 12.-13. maijs, 2011. – pp 159-165.
59. Labans E., Kalniņš K., Ozoliņš O. Experimental and Numerical Identification of Veneers Mechanical Properties// *Construction science*. -2010. –Vol. 11. –pp 38-43.
60. Liping C. Determination of diffusion coefficients for sub-alpine fir// *Wood science and technology*. -2005. –Nr. 39. –pp 153-162.
61. Lund E. Buckling topology optimization of laminated multi-material composite shell structures// *Composite Structures*. -2009. –Nr. 91. –pp 158-167.
62. Lund E., Stegmann J. On structural optimization of composite shell structures using a discrete constitutive parametrization// *Wind Energy*. -2005. –Nr. 8. –pp 109-124.
63. LVS EN 789: 2005. „Timber structures - Test methods - Determination of mechanical properties of wood based panels”.
64. LVS ENV 14272:2003 „Saplāksnis- Dažu mehānisko īpašību aprēķina metode”.
65. Maier H.R., Dandy G.C. Neural network based modelling of environmental variables: A systematic approach// *Mathematical and Computer Modelling*. -2001. –Vol. 33. –Nr. 6.-7. –pp 669-682.
66. Majak, J.; Pohlak, M.; Eerme, M.; Velsker, T. Design of car frontal protection system using neural networks and genetic algorithm // *Mechanika*. -2012. -Vol. 18. -No. 4. -pp 453-460.
67. Manalo A., Aravinthan T., Karunasena W. Flexural analysis of discontinuous tile core sandwich structure// *Composite Structures*. -2012. –Nr. 94. –pp 1524-1532.
68. Manalo A., Aravinthan T., Karunasena W. Flexural behaviour of glue-laminated fibre composite sandwich beams// *Composite Structures*. -2010. –Nr. 92. –pp 2703-2711.
69. Mantari J., Oktem A., Soares C. G. Static and dynamic analysis of laminated composite and sandwich plates and shells by using a new higher-order shear deformation theory// *Composite Structures*. -2011. –Nr. 94. –pp 37-49.
70. Maout N. L., Verron E., Begue J. Simultaneous geometrical and material optimal design of hybrid elastomer/composite sandwich plates// *Composite Structures*. - 2011. –Nr. 93. –pp 1153-1157.
71. Miller W., Smith C., Evans K. Honeycomb cores with enhanced buckling strength// *Composite Structures*. -2011. –Nr. 93. –pp 1072-1077.

72. Muca A., Muc-Wierzgon M. *An evolution strategy in structural optimization problems for plates and shells*// *Composite Structures*. -2012. –Nr. 94. –pp 1461-1470.
73. *New corrugated FSC plywood by corelan*. <http://www.jetsongreen.com/2011/06/corelam-corrugated-plywood-fsc-panels.html>. 29.05.2012.
74. Niu B., Olhof N., Lund E., Cheng G. *Discrete material optimization of vibrating laminated composite plates for minimum sound radiation*// *International Journal of Solids and Structures*. -2010. –Nr. 47. –pp 2097-2114.
75. Ochoa A.A., Reddy J.N. *Finite Element Analysis of Composite laminates*. - London: Kluwer Academic Publishers, -1992. –200 p.
76. Olek W., Weres J. *Effects of the method of identification of the diffusion coefficient on accuracy of modeling bound water transfer in wood* // *Transport in porous media*. -2007. -Nr. 66. –pp 135-144.
77. Pang S. *Relationship between a diffusion model and a transport model for softwood drying*// *Wood Fiber Sci*. -1997. –Nr. 29. –pp 58–67.
78. Pedersen N. *Maximization of eigenvalues using topology optimization*// *Structural and Multidisciplinary Optimization*. -2000. –Nr. 20. –pp 2-11.
79. Pelletier J. L., Vel S. *Multi-objective optimization of fiber reinforced composite laminates for strength, stiffness and minimal mass*// *Computers and Structures*. - 2006. –Nr. 84. –pp 2065-2080.
80. Ranta-Maunus A. *Effects of climate and climate variations on strength*. In: Thelandersson, S., Larsen, H.J. (eds.) *Timber Engineering*. New York: Wiley, - 2003. –16 p.
81. Rao S.S. *Engineering Optimization. Theory and Practise 4th ed*. New Jersey: John Willey & Sons Inc, -2009. –813 p.
82. Rikards R., Čāte A. *Galīgo elementu metode*. -Rīga: RTU, -2002. -108 lpp.
83. Rocēns K., Brauns J. *Behaviour and Optimization of Environmental Sensitive Layered Systems* // *Proceedings of 8th Nordic Symposium on Building Physics, Denmark, Copenhagen, June 16-18, 2008*. -pp 1007-1014.
84. Sallé E.V., Chassagne P. *Constitutive equations for orthotropic nonlinear viscoelastic behaviour using a generalized Maxwell model Application to wood material*// *Mechanics of Time-Dependent Materials*. -2007. –Nr. 11. -pp 127–142.
85. *Sandwich panel: plywood / honeycomb*. <http://www.nauticexpo.com/prod/ayres-composite-panels/sandwich-panels-plywood-honeycomb-28043-244684.html>. 29.05.2012.
86. *Sandwich panel: plywood / rubber / cork (soundproofing)*. <http://www.nauticexpo.com/prod/acoustics-noisereduction-bv/sandwich-panels-plywood-rubber-cork-soundproofing-38200-303270.html>. 29.05.2012.
87. Sebaey T., Lopes C., Blanco N., Costa J. *Ant colony optimization for dispersed laminated composite panels under biaxial loading*// *Composite Structures*. -2011. –Nr. 94. –pp 31-36.
88. Serdjuks D., Rocens K., Pakrastinsh L. *Utilization of composite materials in saddle shape cable roof*// *Mechanics of Composite Materials* -2000. -vol. 36. –Nr. 5. -pp 637-644.
89. Skudra A.M, Skudra A.A. *Ievads slāņaino materiālu un konstrukciju mehānikā*. -Rīga: Rīgas Tehniskā universitāte, -2002. -116 lpp.
90. Sliseris J., Rocens K. *Behaviour of multilayer sheet with technological imperfection* // *10th International conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques"*. –Lithuania: VGTU, 2010. -pp 793-798.

91. Šliseris J., Rocens K. Curvature analysis for asymetrical multi-layer composite // *Construction Science*. -2009. -Vol. 10. -Nr. 2 –pp 139-146.
92. Šliseris J., Rocens K. Curvature Analysis for Composite with Orthogonal, Asymmetrical Multi-Layer Structure// *Journal of Civil Engineering and Management*. -2010, -Vol. 16. -No. 2. -pp 242-248.
93. Stegmann J., Lund E. Discrete material optimization of general composite shell structures// *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. -2005. –Nr. 62. –pp 2009-2027.
94. Šešok D., Belevičius R. Global optimization of trusses with a modified Genetic Algorithm// *Journal of Civil Engineering and Management*. -2008. –Vol. 14. –Nr. 3. –pp 147-154.
95. Šešok D., Mckus J., Belevičius R., Kačeniauskas A. Global optimization of grillages using Simulated annealing and high performance computing// *Journal of Civil engineering and Management*. -2010. –Vol. 16. –Nr. 1. –pp 95-101.
96. Šliseris J. Līmētu Izliektu Lokšņu Formas Prognozēšanas Modeļa Izstrāde. *Bakalaura darbs*. –Rīga: RTU, 2009. -54 lpp.
97. Šliseris J. Saplākšņa Čaulas Konstruktijas Un Aprēķina Metodikas Izstrāde. *Maģistra darbs*. –Rīga: RTU, 2010. -134 lpp.
98. Šliseris J., Rocens K. Discrete flexural stiffness optimization of orthotropic plate// *Structural and Multidisciplinary Optimization*. -2012., iesniegta publicēšanai.
99. Šliseris J., Rocens K. Flexural Plates With Heterogeneous In-Plane Stiffness// *15<sup>th</sup> European Conference On Composite Materials*. -Venice, Italy, 24-28 June 2012. –pp 1-7.
100. Šliseris J., Rocens K. Optimal design of composite plate with discrete varying stiffness// *Composite Structures*. -2013, -Vol. 98., -pp 15-23.
101. Šliseris J., Rocens K. Rational Structure of Panel with Curved Plywood Ribs // *World Academy of Science, Engineering and Technology, special journal Issue*. – 2011. –Nr. 76. -pp 317-323.
102. Šliseris J., Rocēns K. Influence of technological and structure properties on shape of asymmetric plywood sheet// *International Scientific Conference "Civil engineering '11"*. -Jelgava, Latvia, May 12-13, 2011., Vol 3., -pp 131-136.
103. Šliseris J., Rocēns K. Koksnes materiālu un plastmasu spriegumu un deformāciju aprēķina pamati (Mācību metodiskie norādījumi). -Rīga: RTU, -2010. -74 lpp.
104. Šliseris J., Rocēns K. Non-Uniform Distribution of Moisture Influence on Shape of Plywood Sheet // *Scientific Journal of RTU. 2. series., Būvzinātne*. -2010. –Nr. 11. –pp 56-65.
105. Šliseris J., Rocēns K. Non-uniform moisture influence on multilayer corrugated plywood shell// *9th Nordic Symposium on Building Physics*. -Tampere, Finland, May 29- June 2, 2011. Vol. 2., -pp 723-730.
106. Šliseris J., Rocēns K. Optimization of multispan ribbed plywood plate macro-structure for multiple load cases// *Journal of Civil Engineering and Management*. *Pieņemta publicēšanai*.
107. Šliseris J., Rocēns K. The Future Of Plywood Production// *Furniture Design And Manufacturing Asia, Solid Wood & Panel Technology*. -2011. - November/December -pp 28-31.
108. Šliseris J., Rocēns K., Vērdiņš G. Slāņains kompozīts ar šūnu tipa dobām ribām uz koksnes materiālu bāzes. *Patents P-12-52*. –Rīga: Latvijas Patentu valde, 2012.

109. Takezawa A., Nii S., Kitamura M., Kogiso N. *Topology optimization for worst load conditions based on the eigenvalue analysis of an aggregated linear system// Comput Methods Appl Mech Eng.* -2011. –Nr. 200. –pp 2268-2281.
110. Teters G. *Būvkonstrukciju aprēķinu skaitliskās metodes.* -Rīga: RTU, -2008. -112 lpp.
111. Thelanderson S., Larsen H.J. *Timber Engineering.* – U.S.: John Willey & Sons LTD, -2003. –446 p.
112. Wang W., Guo S., Chang N., Yang W. *Optimum buckling design of composite stiffened panels using ant colony algorithm// Composite Structures.* -2010. –Nr. 92. –pp 712-719.
113. *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material.* U.S.: Forest Products Laboratory, -1999. –463 p.
114. Wook K., Woo Y., Chang D. E. *Some considerations in heterogeneous nonisothermal transport models for wood: a numerical study // Journal of Wood Science.* -2008. -Nr. 54. pp 267-277.
115. Wu C., Tseng K. *Truss structure optimization using adaptive multi-population differential evolution// Structural and Multidisciplinary Optimization.* -2010. –Nr. 42. –pp 575-590.
116. Zenkert D. *An Introduction to Sandwich Construction.* Stockholm: Emas publishing, -1997. –277 p.
117. Zenkert D. *The Handbook of Sandwich Construction.* –London: Chameleon Press Ltd., -1997. –442 p.
118. Zheng B., Chang C., Gea H. *Topology optimization with design-dependent pressure loading// Structural and Multidisciplinary Optimization.* -2009. –Nr. 38. –pp 535-543.
119. Zhou H.Z., Fan F., Zhu E.C. *Buckling of reticulated laminated veneer lumber shells in consideration of the creep// Engineering Structures.* -2010. –Nr. 32. –pp 2912-2918.
120. Zhou M., Pagaldi N., Thomas H., Shyy Y. *An integrated approach to topology, sizing, and shape optimization// Structural and Multidisciplinary Optimization - 2004.* –Nr. 26. –pp 308-317.
121. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method. Vol. 2. Solid Mechanics.* -London: McGraw-Hill, -2000. –459 p.
122. Zudrags K. *Paaugstinātas īpatnējās stiprības saplākšņa plātnes. Promocijas darbs.* –Jelgava: LLU, 2010.
123. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. *Сопротивление полимерных и композитных материалов.*-Рига: Зинатне, -1980. -572 с.
124. Перельгин Л.М., Уголев Б.Н. *Деревосиноведение.*- Москва: Лесная промышленность, 1971. -386 с.
125. Роценс К.А. *Технологическое регулирование свойств древесины.*- Рига : Зинатне, -1979. -220 с.
126. Чудинов Б. С., *Вода в древесине.*- Новосибирск: Наука, -1984. -370 с.
127. Шубин Г. С., *Физические основы и расчет процессов сушки древесины.*- Москва: Лесная промышленность, -1973. -246 с.