



Izglītības un zinātnes ministrija



Studiju un zinātnes  
administrācija

Valsts pētījumu programmas “Inovātīvi materiāli un viedās tehnoloģijas vides  
drošumam (IMATEH)”

4. projekta “Slāņains koksnes kompozītmateriāls ar racionālu struktūru un  
palielinātu īpatnējo lieces nestspēju”

1. nodevums

**Lieces nestspējas aprēķinu metodika plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām**

Sagatavoja: M.sc.ing. Ģirts Frolovs

Dr.sc.ing. Jānis Šliseris

Projekta vadītājs: Dr. habil. sc. ing. Kārlis Rocēns

Rīga, 2016. gada 1. decembris

## SATURS

1.	Īss metodikas apraksts.....	3
2.	Aprēķinu metodikas algoritms.....	4
3.	Aprēķinu metodikas piemērs .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
4.	Literatūra.....	12

Lietojot šo aprēķinu metodiku, nepieciešams ievērot Eiropas Savienības spēkā esošos standartus.

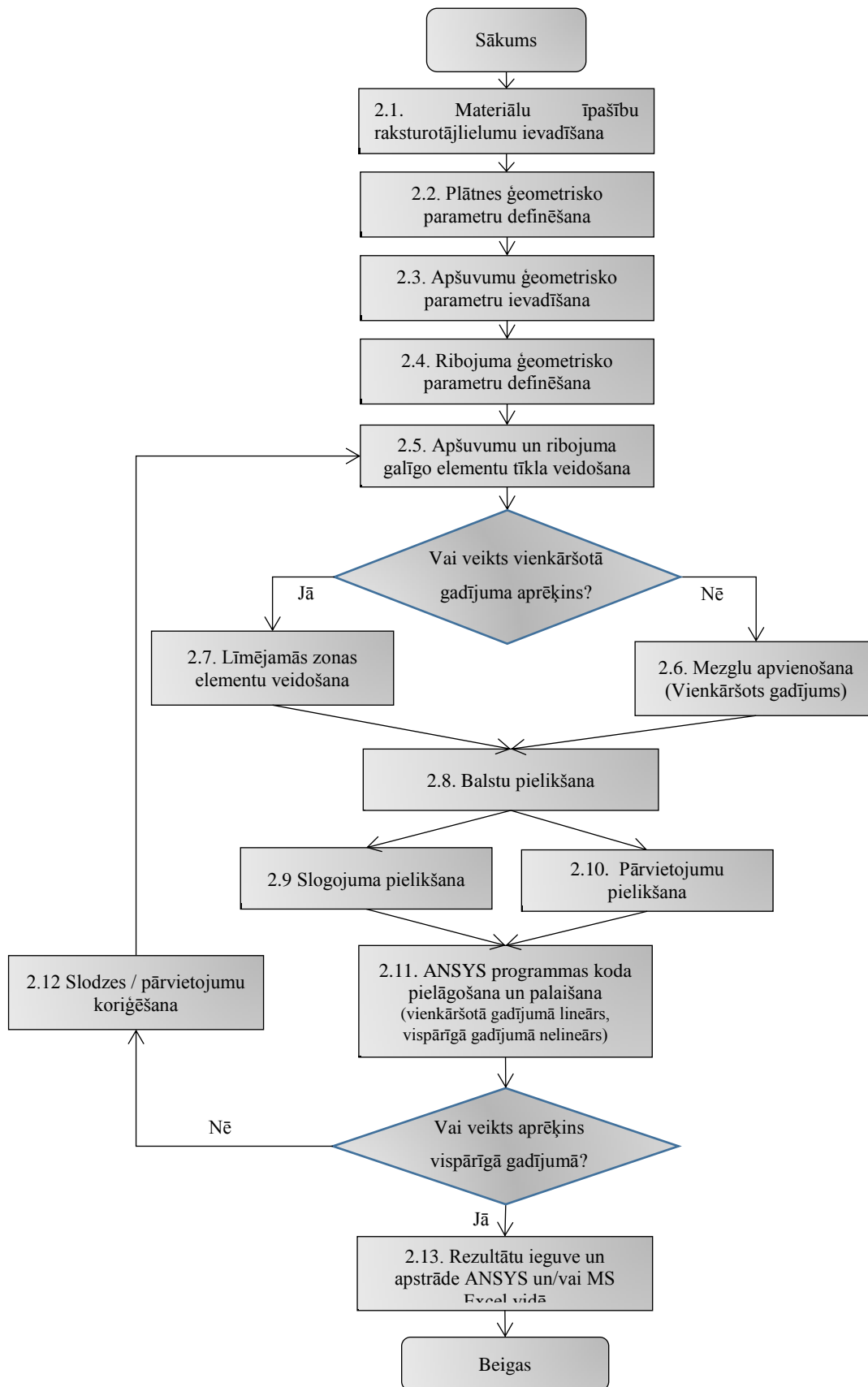
Aprēķinu metodikā lieto šādus terminus un definīcijas:

- Plātne ar šūnu tipa dobām ribām - Plātne, kuru veido saplākšņa šūnu tipa dobais ribojums un saplākšņa vai kāda cita materiāla apšuvums.
- plātnes garenvirziens - virziens, kas sakrīt ar ribas taisno daļu veidojošās sloksnes garenvirzienu
- plātnes šķērsvirziens - virziens, kas perpendikulārs dobās ribas taisno daļu veidojošās sloksnes garenvirzienam
- plātnes stingums - vienu metru platas joslas stingums

## **1. Īss metodikas apraksts**

Plātnes ar šūnu tipa dobām ribām [3] tiek veidotas no taisnām un viļņotas (liektas) formas ribām un saplākšņa, MDF vai kāda cita materiāla apšuvumiem. Aprēķinu metodika tiek veidota, kā ievades faila kods ANSYS ADPL programmēšanas valodā [1,2], kurā tiek parametriskā veidā definēta plātnes ģeometrija, robežnosacījumi un mehānisko īpašību raksturotājiem. ANSYS galīgo elementu aprēķinu modelis, izmantojot šo kodu, izskaitļo plātnes stingumu un spriegumu-deformāciju lauku. ANSYS ADPL programmā izšķir divus gadījumus – pirmais (vispārējais), kas ievērtē nelineārās līmes šuves un saplākšņa materiāla mehāniskās īpašības, kuras saistītas ar plaisu veidošanos līmes šuvēs un to apkārtņē, ka arī sabrukuma kritērijus plātnes elementos, un otrs (vienkāršots) gadījums, kad plātnes mezgli tiek stingi savienoti savā starpā un sabrukuma kritērijus tiešā veidā neievērtē. Lietojot aprēķinu metodiku gadījumiem, kad līmes šuves darbs netiek ievērtēts lineāri elastīgas stadijas robežās lieto vienkāršoto gadījumu, gadījumos, kad jāievērtē līmētā savienojuma uzvedība arī lineāri elastīgo deformāciju robežās, jālieto vispārīgās aprēķinu metodikas pieeja. Izstrādātās aprēķinu metodikas īpatnība ir tā, ka veidojot galīgo elementu tīklu, tā ievērtē salīmēšanās nepilnības, kas saistītas ar materiālu nominālo izmēru pielaidēm.

## 2. Aprēķinu metodikas algoritms



1. attēls Aprēķinu metodikas algoritms

2.1. Definē materiālu īpašību raksturotājlielumus – elastība moduļus, puasona koeficientus, bīdes moduļus un materiāla blīvumu, kā arī sabrukuma kritēriji stiepē, spiedē un bīdē, kā arī kopdarbības koeficienti. ANSYS vidē materiālu īpašības tiek piešķirtas ar funkciju MP (MP, Lab, MAT,C0,...), bet sabrukuma kritēriji ar funkciju FC (FC,MAT,Lab1,Lab2,DATA1,...)

Līmētā savienojuma nelineāro uzvedību plātnes aprēķina vispārīgajā gadījumā simulē izmantojot kohēzijas galīgos elements (INTER20X), kuri ievērtē arī plaisu veidošanos līmes slānī. Līmes šuves atvērums  $\delta$  tiek sadalīts normālajā  $\delta_n$  un tangenciālajā  $\delta_t$  komponentē. Tiek definēti arī maksimālie normālspriegumi  $\sigma_{max}$  un maksimālie tangenciālie spriegumi  $\tau_{max}$ . Kohēzijas zonas modelis tiek aprakstīts ar eksponenciālām sakarībām (TB,CZM,,,EXPO vai BILI) un programmā ievadīti nepieciešamie dati (TBDATA,1, $\sigma_{max}$ , $\bar{\delta}_n$ , $\tau_{max}$ , $\bar{\delta}_t$ ,), ja izmanto INTER20X elementus. Kontaktzonas materiāls tiek ģenerēts plātnes ribojuma sadurvietās, ja nepieciešams arī distancējošo līstī un saplākšņa sadurvietās, kā arī apšuvumu pielīmēšanai pie ribojuma vai arī atsevišķi tikai apšuvuma pielīmēšanai pie ribojuma.

2.2. Tiek definēts plātnes garums, platums un biezums.

2.3. Apšuvuma dalījums tilpumos tiek veidots tā, lai ribojuma savienojumos savā starpā un ar pārējiem tilpumiem (apšuvumiem, distancējošajām līstīm) veidotos kopīgas virsmas un savienojuma punkti, kas atvieglo galīgo elementu veidošanu. Ja nepieciešams ir iespējams ievērtēt ģeometriskās neprecizitātes apšuvumiem, pēc nejaušības var veidot dažos apšuvumu punktos nobīdi par kādu noteiktu lielumu, piemēram saplākšņa ražotāju pieļaujamo pielaižu robežās iezīmētajiem mezgliem ar funkciju KMODIF,ALL, , , ,).

2.4. Tiek definēta ribojuma intensitāte, biežumi, orientācija (atsevišķi ribas taisno daļu veidojošās sloksnei un viļņoto daļu veidojošajai sloksnei). Ribas viļņoto daļu veidojošās sloksnes ģeometrija ir veidota formā, kas ir līdzīga sinusoīda veida funkcijai, ņemot vērā viļņu virsotnes – sadurvietās ar ribas taisno daļu veidojošo loksni vai ar blakus esošo ribi.

2.5. Līdzīgi, kā tilpumus arī galīgie elementi apšuvumam jāaskaņo ar ribojuma dalījumu galīgajos elementos (izmantojot tilpuma SOLID185 vai SOLSH190 galīgos elementus, kas balstīts uz elastības teoriju un telpisku spriegumstāvokli) – visiem mezgliem šajās zonās ir jāsakrīt. Galīgo elementu skaitam pa ribas augstumu jābūt pāra skaitlim, ko nedefinē iepriekš atkarībā no veicamā aprēķina. Visiem elementiem izmēru pieņem ne mazāku par biežākā no plātni veidojošajām komponentēm (apšuvumiem, ribojuma utt.). Tiek piešķirts atbilstošais materiāls katram no plātni veidojošiem elementiem. Uzmanība jāpievērš viļņu

virsoņs, kur apšuvumam var rasties nekorekti galīgie elementi, kas var radīt kļūdas aprēķinos.

2.6. Ja izvēlas lineāru aprēķinu, tad apvieno mezglus, kas atrodas cieši blakus.

2.7. Līmes šuvēs, ar kohēzijas galīgajiem elementiem (INTER205) tiek veidots līmes slānis, kurš tiek uzģenerēts ar CZMESH,,,Z,,, funkciju, izmantojot iepriekš definēto kohēzijas zonas modeli. Līmējums tiek veidots starp divu elementu virsmām un mezgliem, kuri cieši pieguļ viens otram, bet savā starpā nav savienoti. Līmes šuves faktisko darbu ievērtē izmantojot sakarības starp līmes šuves biezumu un nestspēju, kā arī blakus esošo galīgo elementu nesavienošanu savā starpā atkarībā no apšuvumu biezuma un ribu augstumu ģeometrisku izmēru pielaidēm. Līdzīgi rīkojas ribojuma savienošanai savā starpā.

2.8. Tiek iezīmēti mezgli, kuros pieliekams balsts un atkarībā no tā vai tas ir kustīgs, nekustīgs, vai iespīlēts ANSYS programmēšanas valodā pārvietojumiem izmantota D, funkcija UX, UY un atbilstošo pagriezīenu ierobežošanu.

2.9. (2.10.) Slogojums pielikts iezīmējot mezglu punktus (ar NSEL, funkciju) pieliekamās plātnes zonās un kopējo pielikto slodzi izdalot ar iezīmēto mezglu skaitu piešķir slodzi katrā no iezīmētajiem mezgliem (F,ALL,FZ,-P/NOD\_C). Gadījumā, ja tiek pielikta slodze vairākos virzienos, tad darbību atkārtoti definējot pielikto slodzi FX FY vai FZ virzienos, vai arī pielikto momentu MX, MY, MZ ar attiecīgajām vērtībām iezīmētajos mezglu punktos.

2.11. Izvēlas nelineāru aprēķina gadījumu un palaiž aprēķinu.

2.12. Slodzes / pārvietojumu koriģēšana Atkarībā no iegūtajiem rezultātiem (spriegumstāvokļiem plātnes elementos un līmētās zonās) nosaka slodzes lielumu detalizētajam aprēķinam (Kad tiek sasniegta nestspējas (ULS) vai lietojamības (SLS) robežstāvoklis). No aprēķinātajām spriegumu vērtībām, balstoties uz Eironormām ir zināma nestspējas un lietojamības robežstāvokļu vērtības, un pakāpeniski mainot slogojuma lielumu, līdz tiek sasniegta kāds no robežstāvokļiem.

2.13. ANSYS pēcapstrādes režīmā iegūst plātnes elementu spriegumstāvokli katrā slodzes solī, kā arī informāciju par šķēlumiem ar maksimālajiem spriegumiem un maksimālajiem pārvietojumiem grafiskā veidā vai arī importē uz MS Excel vai kādu citu datu apstrādes programmu.

### 3. Izstrādātās “Lieces nestspējas aprēķinu metodika plātnēm ar šūnu tipa dobām ribām” praktiskās lietošanas etapi

#### Materiālu īpašību raksturotājlielumu ievadišana

Deformatīvie raksturotājlielumi plātnes elementu (apšuvumu un ribojuma) materiāliem bērza saplāksnim, priedes distancējošo līstu u.c.

**1. tabula. Materiālu īpašības**

	Apzīmējums	Bērza saplāksnis [4]	Priedes zāģmateriāls [5]
Elastības modulis garenvirzienā [GPa]	$E_x$	9,75	12,30
Elastības modulis tangenciālā virzienā [GPa]	$E_y$	8,14	0,70
Elastības modulis radiālā virzienā [GPa]	$E_z$	8,14	0,58
Puasona koeficients xy	$\mu_{xy}$	0,390	0,037
Puasona koeficients yz	$\mu_{yz}$	0,460	0,790
Puasona koeficients xz	$\mu_{xz}$	0,390	0,030
Bīdes modulis xy plaknē [GPa]	$G_{xy}$	0,750	0,800
Bīdes modulis in yz plaknē [GPa]	$G_{xz}$	0,100	0,010
Bīdes modulis in xz plaknē [GPa]	$G_{yz}$	0,172	1,230
Blīvums [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho$	700	500

\* - x virziens - ārējās lobskaidas šķiedru orientācijas virziens, y virziens perpendikulāri ārējo lobskaidu virzienam un z virziens perpendikulārs loksnes plaknei. Puasona koeficientiem indeksi norāda plakni, kurā mērītas deformācijas, ja spēks ir pielikts perpendikulāri šai plaknei.

Sabrukuma kritēriji tiek veidoti definējot materiālu, bet šajā gadījumā tiks aplūkots gadījums slogojot līdz izlieces lielumam 1/200 no plātnes laiduma, tad sabrukuma kritērijus izvēlas neievērtēt.

Līmes slāņa vidējais bīdes robežstiprības lielums ir 7,11 MPa un līmes slāņa nobīde pie maksimālo spriegumu sasniegšanas – 0,12 mm. Līmes slāņa vidējais stiepes robežstiprības lielums – 3,39 MPa un līmes slāņa atvērums pie maksimālo spriegumu sasniegšanas – 0,10 mm [6].

TB,CZM,7,1,1,EXPO pieņem eksponenciālu līmes slāņa sakarību un TBDATA,1,3400000,0.00010,0.00012, piešķir dotās vērtības

#### Plātnes ģeometrisko parametru definēšana

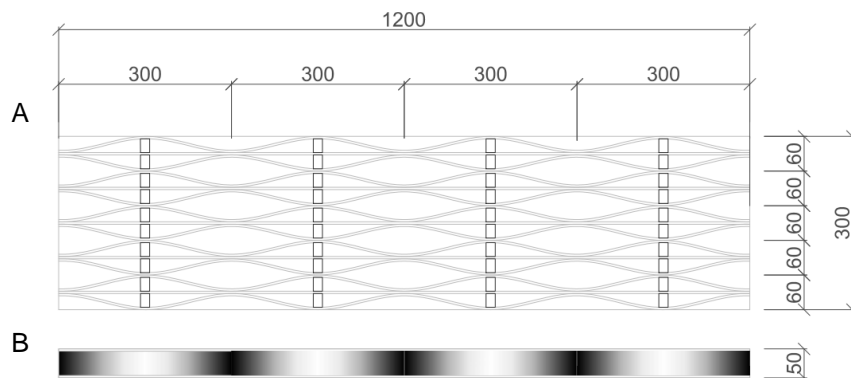
Pārbaudāmais paraugs tiek veidots vadoties pēc EN 789 standarta. Biezumam 50 mm atbilstošais plātnes garums 1,2 m.

#### Apšuvumu ģeometrisku parametru ievadišana

Apšuvumi ( $t_u = t_a = 4,0$  mm) ar orientāciju plātnes laiduma virzienā.

### Ribojuma ģeometrisko parametru definēšana

Tiek izvēlēta plātnes ribojuma ģeometriskie parametri – ribas platums (Br) 60mm (kopā 5 ribas, lai iegūtu nepieciešamo parauga platumu 300 mm), 4 viļņi 300 mm (Lw) garumā, kas veido kopējo plātnes garumu. Viļņotās sloksnes viļņi veidojas pēc sakarības  $y = \frac{Br}{4} \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi x}{L_w} \right) \right)$ . Ribas taisno daļu veidojošās sloksnes biezums (tsr = 6,5 mm) ar orientāciju plātnes laiduma virzienā, ribas viļņoto daļu veidojošās sloksnes biezums (twr = 4,0 mm) ar orientāciju plātnes biezuma virzienā, un distancējošo līstu biezums 20,0 mm ar orientāciju plātnes biezuma virzienā. Ģeometriskās neprecizitātes šajā gadījumā nav ievērtētas.



3. attēls. Plātne ar šūnu tipa dobām ribām. A - skats no augšas; B - skats no sāna;

Plātnes ģeometrija sāka veidot no apakšējā apšuvuma, laukums veidojot atkarībā no ribojuma ģeometriskiem parametriem, lai tie apšuvumā veidot ribojuma zīmējumu. Tālāk pa biezumu tiek uzģenerēti apakšējais apšuvums ar VEXT,ALL,,,,,,, funkciju, Iezīmēti plātnes tilpumi apšuvumā, kuri saskarsies ar ribojumu, un ribojums tiek uzģenerēts aprēķinātajā biezumā  $Tr = Tpl - Ta - Tu$ , augšējais apšuvums tiek veidots līdzīgi apakšējam apšuvumam.

### Apšuvumu un ribojuma galīgo elementu tīkla veidošana

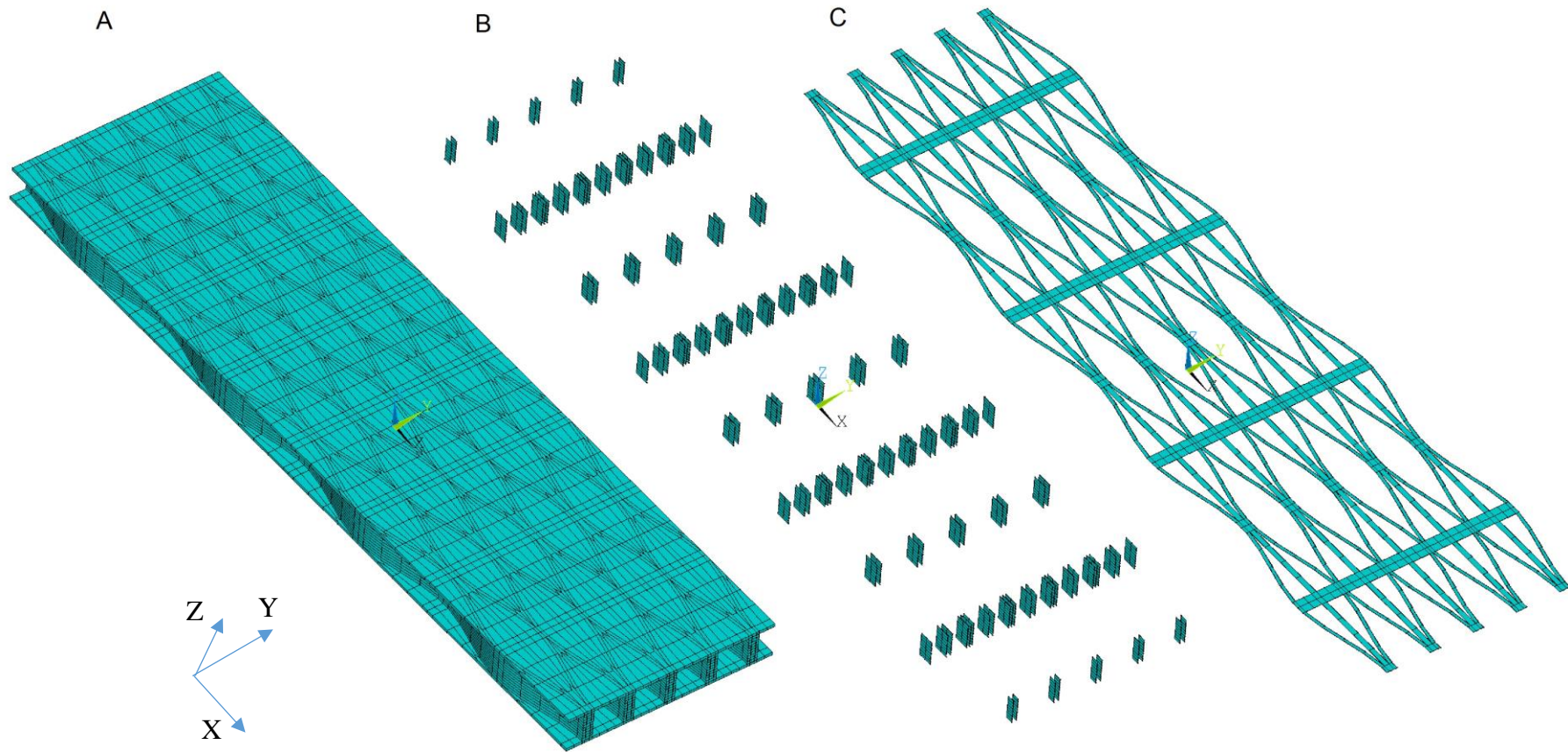
Iezīmēti apšuvumu veidojošie tilpumi un izveidots galīgo elementu tīkls, kas sastāv no 8 mezglu galīgajiem elementiem, ar funkciju VMESH, piešķirot atsevišķi ribojuma elementiem un apšuvumiem materiālu un iepriekš piešķirto orientāciju (4. attēls A).

### Līmējamās zonas elementu veidošana

Līmētā savienojuma vietās tiek izveidoti INTER205 galīgie elementi ar funkciju CZMESH,E\_comp1,E\_comp2,,,,, ribojuma salīmēšanai savā starpā (4. attēls B) un ribojuma pielīmēšanai pie apšuvumiem (4. attēls C) Par cik ribu augstuma pielāides projektā nav paredzēts pētīt, aprēķinos līmes šuves faktiskais darbs nav ņemts vērā, iegūstot paaugstinātas aprēķinātās plātnes stinguma vērtības.







4. attēls. Plātnes galīgo elementu modelis A - visas plātnes galīgo elementu modelis B – līmes šuves (ribojuma līmēšanai perpendikulāri ribu garenvirzienam) galīgie elementi, C – līmes šuves ribojuma līmēšanai pie apšuvuma galīgo elementu modelis (nosacīti parādīts tikai viena apšuvuma līmēšanai).

### Balstu pielikšana

Balsti tiek pielikti, iezīmējot mezglus (NSEL funkcija) ar X koordinātēm -0,55 m pieņemam, kā ierobežotu X, Y un Z virzienā (D,ALL,,,,,UX,UY,UZ,,,) , bet attiecīgi ar koordinātēm 0,55 m pieņem kā ierobežotu Z virzienā (D,ALL,,,,,UZ,,).

### Slogojuma pielikšana

Atbilstoši EN 789 tiek veidots četru punktu liecei atbilstošais slogojums attālumos 400 mm no balstiem un savstarpējo attālumu 300 mm. Slogojums pielikts iezīmējot mezglu punktus 10mm platās joslās šajos apgabalos un kopējo pielikto slodzi izdalot ar iezīmēto mezglu skaitu (F,ALL,FZ,-P/NOD\_C)

### ANSYS programmas koda pielāgošana un palaišana

Palaiž lineāro aprēķinu un nosaka slodzes lielumu vispārīgā gadījuma aprēķinam. Aplūkotajai plātnei noteicošais būs lietojamības robežstāvoklis, kura sasniegšanai sākotnēji tiek aprēķināta slodzes vērtība 3,4 kN. Tiek atkārtoti veiktas darbības sākot no galīgo elementu veidošanas ar jaunajiem nosacījumiem.

Pēc plātnes modeļa izveidošanas izvēlas ģeometriski nelineāru aprēķina gadījumu (NLGEOM,1), slodzes soli 1/100 (NSUBST,100,100,100) no pieliktās slodzes un palaiž aprēķinu (SOLVE).

### Rezultātu ieguve un apstrāde ANSYS un/vai MS Excel vidē

Rezultāti tiek iegūti pa tiešo, nolasot no grafiskā displeja, vai arī automātiski nolasot tos ar funkciju palīdzību. Piemēram, maksimālos pārvietojumus nolasa no pārvietojumu (PLNSOL,U,Z, 0,1.0), spriegumu (PLNSOL,S,\_\_,0,1.0), rezultātu izvades uz ekrāna izmantojot funkciju \*GET,PAR,PLNS,,MIN vai MAX. Tiek izvadīta slodzes-izlieces līknes uz ekrāna un nolasīti rezultāti no rezultātu tabulām, kā arī iegūta slodzes vērtība pie kāda no robežstāvokļa sasniegšanas ar funkciju \*GET. Šajā gadījumā pie lietojamības robežstāvokļa sasniegšanas, kad izliece sasniedz 5,5 mm, kas ir 1/200 no plātnes laiduma. Izmantojot iegūtās spriegumstāvokļu vērtības, tiek aprēķināta plātnes nestspēja un/vai vienu metru platas plātnes joslas stingums, u.c. lielumi.

Līdzīgi rīkojas veicot aprēķinu šādas pašas plātnes ģeometrisku parametru vērtībām plātnes šķērsvirzienā, lai kopējais ribu skaits ģenerējot plātņi veidotu tās garumu (laidumu un slogojumu) vadoties pēc EN 789.

### Salīdzinājums ar eksperimentālajiem rezultātiem

Aprēķinu rezultāti tika validēti, pārbaudot samazināta izmēra konstrukcijas elementa modeļus, ribota saplākšņa konstrukcijas elementa darbību četru punktu liecē vadoties pēc ES

standartiem [7-11]. Ribojumam un apšuvumiem izmantots A/S Latvijas Finieris RIGA PLY saplākšnis elementus salīmējot ar Vincents Polyline PVA D3 līmi. Paraugi izgatavoti līmējot zem 0.5 MPa spiedienā un salīmējamām šuvēm, temperatūras 20°C un relatīvā gaisa mitruma 65%. Pārbaudes veiktas vismaz 72h pēc salīmēšanas. Iegūtie rezultāti (slogojot līdz izliecei sasniedzot 1/200 no plātnes laiduma) parādīti 2. (nestspēja) un 3. (lieces stingums) tabulā.

**2. tabula. Plātnes lieces nestspēja tipiskajam ribojuma veidam**

		ANSYS teorētiskais	Eksperimentāli iegūtais vidējais	Atšķirība
		kN	kN	
Plātnes biezums 50mm Apšuvumu biezums 4,0mm	Garenvirzienā	3,25	3,30	-2,0%
	Šķērsvirzienā	1,45	1,40	+4,7%

**3. tabula. Plātnes stingums (1 m platas joslas) tipiskajam ribojuma veidam**

		ANSYS teorētiskais	Eksperimentāli iegūtais vidējais	Atšķirība
		N·m <sup>2</sup>	N·m <sup>2</sup>	
Plātnes biezums 50mm Apšuvumu biezums 4,0mm	Garenvirzienā	49765	48790	-2,0 %
	Šķērsvirzienā	20920	21920	+4,7%

Veicot statistisko analīzi [7] iegūts, ka garenvirzienā vidējais aritmētiskais 48787 N·m<sup>2</sup>, standartnovirze 1656,07 N·m<sup>2</sup>; variācijas koeficients 3,39%; vidējā aritmētiskā ticamības intervāls pie 95% varbūtības ±1451,61 N·m<sup>2</sup>; bet šķērsvirzienā vidējais aritmētiskais 21293 N·m<sup>2</sup>, standartnovirze 953,56 N·m<sup>2</sup>; variācijas koeficients 4,35%; vidējā aritmētiskā ticamības intervāls pie 95% varbūtības ±835,83 N·m<sup>2</sup>. Variāciju koeficients abos gadījumos <10%, kas liecina, ka sērijas ietvaros attiecībā uz stingumiem plātnes abos virzienos ir vērojamas mazas izkliedes.

#### 4. Literatūra

1. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference ANSYS, Inc. Release 15.0 November 2013 Southpointe USA
2. ANSYS Mechanical APDL Element Reference November 2013 Southpointe USA
3. G.Frolovs, K.Rocens, J.Sliseris. Comparison of a load bearing capacity for composite sandwich plywood plates. „Environment. Technology. Resources”, Rīga, Latvia, 30.09-02.10.2015, Vol I, 39-45 lpp.
4. Saplākšņa rokasgrāmata, Rīga: Latvijas Finieris, 2005.

5. Pereligin L.M., Ugolev B.N. Koksnes zinātne (kr. valodā).- Maskava: Lesnaja promislennostj 1971. -386 lpp.
6. Frolovs G., Rocens K., Sliseris J. Shear and tensile strength of narrow glued joint depending on orientation of plywood plys 12th international conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques” in Vilnius, Lithuania, on 26–27 May, 2016 Procedia Engineering.
7. LVS EN 324-1:2000 Koka skaidu plāksnes - Plākšņu izmēru noteikšana - 1.daļa: Biezuma, platuma un garuma noteikšana
8. LVS EN 325:2012 Koksnes plātnes. Testēšanas paraugu izmēru noteikšana
9. LVS EN 326-1:2000 Koka skaidu plāksnes - Paraugu ņemšana, griešana un pārbaude - 1.daļa: Paraugu ņemšana, griešana un testa rezultātu noformēšana
10. LVS EN 789:2000 Koka konstrukcijas - Testa metodes - Koksnes plātņu mehānisko īpašību noteikšana
11. LVS EN 1058:2010 Koksnes plātnes. 5 procentīļu raksturvērtību un raksturīgo vidējo vērtību noteikšana