

# Javaslatok rétegelt-ragasztott fatartók tervezéséhez, gyártásához és üzemeltetéséhez, felmérési és modellezési eredmények alapján

II. rész: A számítómodell és azok eredményeinek bemutatása a rétegelt-ragasztott fatartók tönkremenetelek okaira

VANYA Csilla<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar

Kapcsolat: vanya.csilla@pmmik.pte.hu

## Kivonat

A rétegelt-ragasztott fatartók egyre elterjedtebbé váltak az elmúlt 50 évben. A megfelelő minőségű anyagokból készített rétegelt-ragasztott tartók minőségi beszerelést és üzemeltetést követően időállóak, azonban egyre több esetben fordul elő a rétegelt-ragasztott tartók károsodása és a károsodás miatt egész tetőszerkezetek életveszélyessé válása. A felmerülő problémák miatt Magyarország jelentősebb komplexumait felmérték, ahol rétegelt-ragasztott tartók a teherhordó szerkezetek. A tartók rétegrepedéseit és egyéb tönkremeneteli problémáit, az épületek üzemeltetési jellegzetességeinek figyelembevételével határozták meg. A hibák ok-okozati összefüggéseit mérésekkel és számítási eljárásokkal vizsgálták. Ezek után az összes tapasztalatból iránymutató következtetések és javaslatok születtek, a tervezésre, a gyártásra és az üzemeltetésre vonatkozóan.

**Kulcsszavak:** rétegelt-ragasztott faszerkezet, delamináció, felmérés

## Design, fabrication and operation proposals for glued-laminated timber, based on measuring and modelling results

Chapter 2: The calculation model and its results used for determination the reasons of damaging of glued-laminated timbers

## Abstract

Glue-laminated timber beams have been used in an increasing number of cases in the past 50 years. Glue-laminated beams are durable constructs if they are manufactured from adequate quality materials and if their installation and operation are performed to a high quality standard. There are however an increasing number of cases of glue-laminated beams suffering damage, and, as a result, entire roof structures becoming unsafe. Because of the arising problems the most important building complexes in Hungary, -in which glue-laminated beams are used as bearing structures,- have been examined. The assessment included both the damage problems of the existing structures and the operating features of the buildings. Later, the reasons for the damages were determined with measurements and calculations. From all of these observations, conclusions and suggestions were outlined for the design, construction and operation of the structures.

**Keywords:** glue-laminated structures, delamination, assessment

## Bevezetés

Mint azt a cikksorozat első részében (Vanya 2014) is leírtuk, a rétegelt-ragasztott fatartók egyre több esetben károsodnak és a károsodások okán egyre több tetőszerkezet válik életveszélyessé. A felmerülő problémákat és azok okait átfogóan kell vizsgálni, melynek megvalósítása nem kis feladat. A Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Karának Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézete elnyert egy pályázati támogatást (Baross Gábor RRTARTO1 OMFB-00398/2010). Ezen a pályázaton belül a felmért szerkezetek rétegrepedéseit és egyéb tönkremeneteli problémáit már bemutattuk a korábbi cikkünkben.

A felmért tönkremeneteli problémák magyarázatára egy olyan számítómodellt készítettünk, mely a külső terhelésből származó feszültségeket nem a mai gyakorlat által számításba vett homogén tartókeresztmetszetként, hanem a réteges szerkezetet figyelembe véve számítja. A számítások során nem csak a külső terhelésből származó feszültségeket, hanem a gyártási és a változó klimatikus hatások következtében keletkező sajátfeszültségeket is meghatározza. A feszültségeket külön-külön és egyben is vizsgáltuk. Ebben a cikkben ezt a számítási modellt és az ezekkel végzett kísérletek eredményeit mutatjuk be.

## A számítómodell

A von Roth (1975) által meghatározott, rétegelt-ragasztott íves tengelyű fatartók külső terhelésből származó feszültségeinek, illetve a Szalai (2001) által levezetett gyártási- és klimatikus sajátfeszültségeknek a számítását anizotrop alapon használtuk fel. Mindhárom feszültség számítására külön-külön példákat dolgoztunk ki, különféle geometriát és terhelési eseteket figyelembe véve, végül meghatároztuk és összegeztük egy rétegelt-ragasztott íves fatartón mindhárom hatás feszültség-állapotmezejét. Mindhárom számításban az eredeti jelölésrendszert használtuk és csak az összegzésnél, illetve az erőtan mértekezésnél választottunk egységes jelölésrendszert. A számításokat MS Excel program segítségével végeztük.

## Az egyes feszültségfajták meghatározásának bemutatása

Az íves rétegelt-ragasztott fatartók külső terhelésből származó feszültségeinek analitikus meghatározását Roth (1975) vezette le. A feszültségek számítása az alábbi formulákkal történik:

$$\sigma_{rr} = \frac{M_0 + N_0 \cdot R}{W} \cdot K_{rr}^M + \frac{Q_0}{F} \cdot \sin\varphi \cdot K_{rr}^Q + \frac{N_0}{F} \cdot \cos\varphi \cdot K_{rr}^N, \quad [1]$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{M_0 + N_0 \cdot R}{W} \cdot K_{\varphi\varphi}^M + \frac{Q_0}{F} \cdot \sin\varphi \cdot K_{\varphi\varphi}^Q + \frac{N_0}{F} \cdot \cos\varphi \cdot K_{\varphi\varphi}^N, \quad [2]$$

$$\sigma_{r\varphi} = \frac{N_0}{F} \cdot \sin\varphi \cdot K_{r\varphi}^N + \frac{Q_0}{F} \cdot \cos\varphi \cdot K_{r\varphi}^Q, \quad [3]$$

ahol:

$\sigma_{\varphi\varphi}$  – a rostokkal párhuzamos normálfeszültség

$\sigma_{rr}$  – a rostokra merőleges normálfeszültség

$\sigma_{r\varphi}$  – a nyírófeszültség

$W$  – a keresztmetszeti tényező

$F$  – a keresztmetszet területe

$N_0, Q_0, M_0$  – a tartó belső erői a vizsgált szakasz kezdeti keresztmetszetében

$R$  – a tartó súlyponti szálának görbülete sugara

$\varphi$  – a számolni kívánt keresztmetszet helyének szöge a kezdeti számítási ponttól

$K_{rr}^M, K_{rr}^N, K_{\varphi\varphi}^M, K_{\varphi\varphi}^N$  – faktorok, melyek a geometriai jellemzőkből és az anyagtulajdonságokból számíthatók, valamint:

$$K_{rr}^Q = -K_{rr}^N, \quad K_{r\varphi}^N = K_{rr}^N, \quad K_{r\varphi}^Q = K_{rr}^N, \quad K_{\varphi\varphi}^Q = -K_{\varphi\varphi}^N.$$

Ezekkel az összefüggésekkel a tartó  $\varphi$ -vel megadott keresztmetszetének tetszőleges pontjában számíthatjuk a külső terhelésből származó, síkbeli feszültségi állapot három komponensét. A megoldás lehetővé teszi, hogy tetszőleges fafajnak megfelelő ortotrop anyagjellemzőket vegyünk figyelembe rugalmas állandóként.

A rétegelt-ragasztott íves fatartók gyártása során keletkező sajátfeszültségek meghatározása Szalai (2001) szerint a következő módon történik:

Az  $i$ -dik lamellában:

$$\sigma_{zzi}(z, y_i) = \frac{M_i(z)}{I_i} y_i + \frac{N_i(z)}{F_i}, \quad [4]$$

A tartóvégek közelében az  $i$ -dik ragasztórétegben:

$$\sigma_{yyi}(\xi) = \frac{2}{bh^2 f(\xi=1)} [2 \sum_{j=1}^i M_j + \sum_{j=1}^i h_j \sum_{k=1}^i N_k - N_j] f''(\xi), \quad [5]$$

$$\tau_i(\xi) = -\frac{2 \sum_{j=1}^i N_j}{bh f(\xi=1)} f'(\xi), \quad [6]$$

ahol:

$\sigma_{zzi}$  – a rostokkal párhuzamos normálfeszültség

$\sigma_{yyi}$  – a rostokra merőleges normálfeszültség

$\tau_i$  – a nyírófeszültség

$I_i = \frac{bh_i^3}{12}$  – az  $i$ -dik lamella másodrendű nyomatéka saját súlyponti  $x$  tengelyére

$F_i = bh_i$  – az  $i$ -dik lamella keresztmetszet-területe

$b$  – a lamellák szélessége

$h_i$  – az  $i$ -dik lamella vastagsága

$N_i(z) = A_i \frac{M_0(z)}{AJ-S^2} (Aa_i - S)$  – az  $i$ -dik lamella normál igénybevétele a  $z$  helyen

$M_i(z) = M_{0i}(z) - J_i \frac{M_0(z)A}{AJ-S^2}$  – az  $i$ -dik lamella hajlító igénybevétele a  $z$  helyen

ahol:

$$S = \sum_{i=1}^n A_i a_i$$

$A_i$  – az  $i$ -dik lamella módosított keresztmetszet területe

$a_i$  – az  $i$ -dik lamella súlypontjának távolsága az első lamella súlypontjától a  $z$  helyen

$J_i$  – az  $i$ -dik lamella módosított másodrendű nyomatéka

$M_{0i}(z)$  – a lamellák préselő sablonba hajlításához szükséges nyomaték.

A keletkező feszültségekről azt kell tudnunk, hogy a  $\sigma_{zzi}$  rostokkal párhuzamos normálfeszültség a tartó teljes szakaszára vonatkozik (kivéve a zavart szakasz), míg a  $\sigma_{yyi}$  rostokra merőleges normálfeszültségek és a  $\tau_i$  nyírófeszültségek csak a tartó végek közelében működnek. A tartó végén  $h/2$  hosszon alakul ki az úgynevezett zavart szakasz. A feszültségek maximumai: a tartó végpontjában, valamint a tartó végétől számított  $h/6$  és  $2h/6$  távolságra elhelyezkedő keresztmetszetekben ébrednek. A  $\sigma_{zzi}$  feszültség a zavart szakaszon fokozatosan 0-ra csökken le a  $f(\xi)$  függvény szerint (1. ábra).

Analóg módon határozhatók meg a klimatikus terhelésből származó sajátfeszültség állapotok. Az alapvető eltérés a lamellák klímaváltozásból származó hő- és nedvességtágulásának számításában van.

### A feszültségállapotok összegzésének módszere

A három hatásfajtának (külső, gyártási és klimatikus) megfelelően a tartóban háromféle feszültség-tenzorkezelő keletkezik. A tartó szerkezetek valójában ezek együttes hatását, az eredő feszültség-tenzorkezelőt érzékelik, és annak megfelelően viselkednek, azaz tönkre mennek vagy épek maradnak.

A tenzorokat úgy összegezzük, hogy a tenzor egymásnak megfelelő komponenseit skalárisan összeadjuk. Az összegezhetőség feltétele, hogy egy adott ponthoz tartozó háromféle feszültség-tenzorkezelő elemek mind ugyanabban a koordináta-rendszerben adjuk meg (a faanyaggal kapcsolatban ez a koordináta-rendszer a faanyag anatómiai főirányával párhuzamos). Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor a tenzorkomponenseket a legalkalmasabb közös koordináta-rendszerbe kell átszámolni a megfelelő tenzor-transzformációk segítségével.

A megfelelő feltételek esetén az összegzés képletben:

$$\sigma_{eredő}^{ij} = \sigma_{külső}^{ij} + \sigma_{gyártási}^{ij} + \sigma_{klimatikus}^{ij} =$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma_{k\ddot{u}}^{LL} & \sigma_{k\ddot{u}}^{RL} & \sigma_{k\ddot{u}}^{TL} \\ \sigma_{k\ddot{u}}^{LR} & \sigma_{k\ddot{u}}^{RR} & \sigma_{k\ddot{u}}^{TR} \\ \sigma_{k\ddot{u}}^{LT} & \sigma_{k\ddot{u}}^{RT} & \sigma_{k\ddot{u}}^{TT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{gy}^{LL} & \sigma_{gy}^{RL} & \sigma_{gy}^{TL} \\ \sigma_{gy}^{LR} & \sigma_{gy}^{RR} & \sigma_{gy}^{TR} \\ \sigma_{gy}^{LT} & \sigma_{gy}^{RT} & \sigma_{gy}^{TT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{kl}^{LL} & \sigma_{kl}^{RL} & \sigma_{kl}^{TL} \\ \sigma_{kl}^{LR} & \sigma_{kl}^{RR} & \sigma_{kl}^{TR} \\ \sigma_{kl}^{LT} & \sigma_{kl}^{RT} & \sigma_{kl}^{TT} \end{bmatrix} =$$

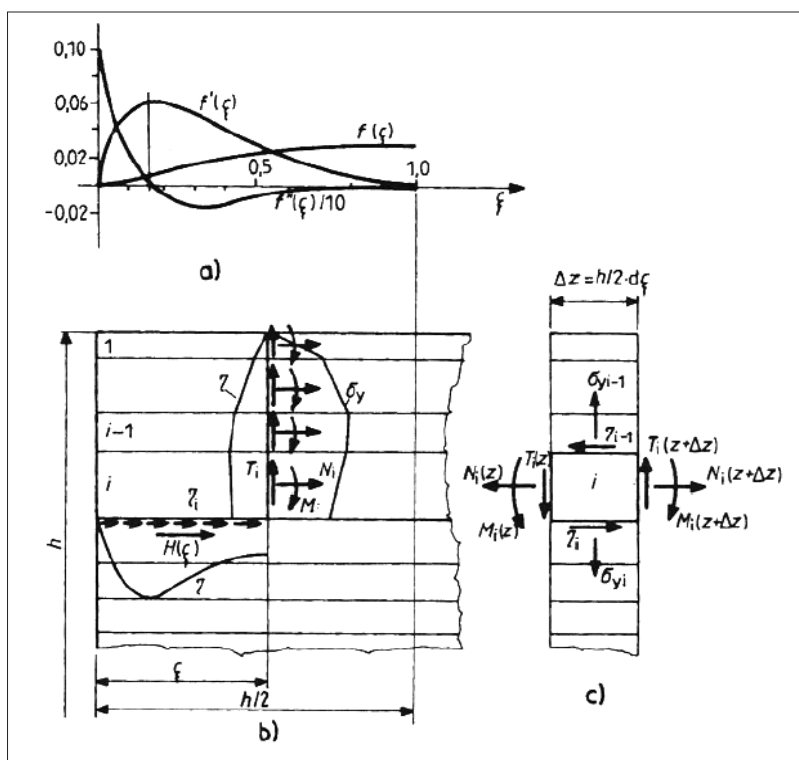
$$= \begin{bmatrix} \sigma_{k\ddot{u}}^{LL} + \sigma_{gy}^{LL} + \sigma_{kl}^{LL} & \sigma_{k\ddot{u}}^{RL} + \sigma_{gy}^{RL} + \sigma_{kl}^{RL} & \sigma_{k\ddot{u}}^{TL} + \sigma_{gy}^{TL} + \sigma_{kl}^{TL} \\ \sigma_{k\ddot{u}}^{LR} + \sigma_{gy}^{LR} + \sigma_{kl}^{LR} & \sigma_{k\ddot{u}}^{RR} + \sigma_{gy}^{RR} + \sigma_{kl}^{RR} & \sigma_{k\ddot{u}}^{TR} + \sigma_{gy}^{TR} + \sigma_{kl}^{TR} \\ \sigma_{k\ddot{u}}^{LT} + \sigma_{gy}^{LT} + \sigma_{kl}^{LT} & \sigma_{k\ddot{u}}^{RT} + \sigma_{gy}^{RT} + \sigma_{kl}^{RT} & \sigma_{k\ddot{u}}^{TT} + \sigma_{gy}^{TT} + \sigma_{kl}^{TT} \end{bmatrix}$$

Az egyenes vagy íves tengelyű rétegelt-ragasztott fatartóban, a leggyakoribb esetben a tartó síkjával párhuzamos síkú feszültségállapot keletkezik, azaz a feszültségi állapotoknak a tartó minden pontjában három nem nulla komponense lesz. A már bemutatott három fajta terhelés mindegyikéből meghatározhatók ezek a feszültségkomponensek, mégpedig a tartó elméleti középsíkján felvett pontok helyének függvényében. Ezeket a tenzorszámítás szabályainak figyelembevételével összegezve megkapjuk a tartó síkbeli modelljének eredő feszültség-állapotmezejét. Az eredő feszültség-tenzor függvény ismeretében elvileg bármely pontban számíthatjuk a hozzá tartozó feszültség-állapotot. A tönkremenetel szempontjából legveszélyesebb feszültségállapot-tenzor helye lesz a tartó kritikus pontja, a ponthoz tartozó keresztmetszet a tartó veszélyes keresztmetszete. Természe-

tesen egy tartón egyszerre több ilyen pont is lehet. Számítógép alkalmazásával ezek a tenzormező-függvények felírhatók és a kritikus pontok, illetve feszültség-állapotok meghatározása viszonylag egyszerűen megszervezhető (erre akár egy Excel program is alkalmas).

A feladat jellegéből következik, hogy a tartó szerkezet tervezését csak közvetve végezhetjük el, azaz – a gyakorlati tapasztalatok alapján – felvesszük a tartó keresztmetszeti méreteit, majd ellenőrzést végzünk. Ha a gazdaságossági követelményeket is szem előtt tartjuk, akkor esetleg csökkenthetjük is a keresztmetszet méreteit, majd újabb ellenőrzést végzünk.

Némi gyakorlattal megspórolhatjuk a feszültség tenzor-függvények felírását. A veszélyes keresztmetszeteknek és azok kritikus pontjainak a kiválasztása megfelelő számú megoldott feladat után szinte automatikussá válik. Ebben az esetben nem kell az egész tartó feszültség-állapotmezejét meghatározni, elegendő a kritikusnak ítélt pontokban az eredő feszültség-állapotokat számítani. A külső terhelésből származó feszültségek maximum



**1. ábra** A belső erők és a sajátfeszültségek eloszlása a tartóvégek közelében a ragasztórétegben és a lamellákban: *a* – az Y. Guyon által definiált függvények; *b* – a lamella végek közelében ébredő belső erők és feszültségek; *c* – a  $\Delta z$  hosszúságú *i*-dik lamellára ható belső erők és feszültségek (Szalai 2001, a szerző engedélyével).

**Figure 1** Distribution of internal loads and residual stresses in the vicinity of the beam ends within the glue layer and within the lamellae: *a*– the functions defined by Y. Guyon; *b*–the internal loads and stresses arising in the vicinity of the lamella ends; *c* – the internal forces and stresses acting on lamella *i* of a length of  $\Delta z$ . (Szalai 2001, with permission)

értékei azokban a keresztmetszetekben várhatók, ahol a maximális igénybevételek keletkeznek. Ezeket a keresztmetszeteket mindenképpen vizsgálni kell abból a szempontból, hogy a klimatikus hatásokból keletkező feszültségek, és a gyártási feszültségek kedvező hatást, vagy többlet terhet adnak-e az adott keresztmetszetre. Ugyanezen az elven vizsgálni kell azokat a keresztmetszeteket, ahol a sajátfeszültségek szélsőértékei vannak, hogy ott a három feszültség összegéből mekkora feszültségek jönnek létre.

Sajnos a szerkezetben a három feszültség egymásra hatásából az is előfordulhat, hogy nem ott keletkeznek a feszültségek szélsőértékei, ahol az egyes feszültségek szélsőértékei vannak, hanem olyan keresztmetszeten belül, ahol a három feszültség fajtából, bár egyenként viszonylag alacsony, de mégis egymást károsan befolyásoló értékek keletkeznek. Nagyon körültekintően kell kiválasztanunk, hogy a szerkezet melyik keresztmetszeteit és azoknak melyik kritikus pontjait vizsgáljuk. Egyszerűbb szerkezetek esetében ez nagyon gyorsan megállapítható, de bonyolult terhelések és/vagy tartógeometria esetén az is előfordulhat, hogy a szélsőérték helyeken kívül kis szakaszokra kell felbontani a tartót és minden szakasz keresztmetszetében összegeznünk kell a feszültség-tenzorokat, hogy láthassuk, hol lesznek a különböző hatásokból keletkező eredő feszültség-állapotok kritikus értékei.

### Erőtani méretezés az anizotrópia figyelembevételével

A rétegelt-ragasztott fatartók erőtani méretezését – összhangban a régi magyar MSZ és az EUROCODE előírásaival – a valószínűség-számítással kiegészített határállapot módszerével végezzük. Azaz a feszültségeket a mértékadó terhelésből számítjuk, a határfeszültségek pedig az adott típusú szilárdság eloszlásfüggvényének 0,1%-os kvantiliséhez tartozó értéke. Az anizotrop anyag összetett feszültségi állapottal kapcsolatos problémájához az Ashkenazi-féle tönkremeneteli elméletet alkalmaztuk, amely faanyagra és faalapú anyagokra az utóbbi évtizedek kutatásai alapján a legeredményesebb. Eszerint a vizsgált pontban a szerkezeti elem megfelel, ha az Ashkenazi-elmélettel számított mértékadó egyenértékű feszültsége kisebb, mint az alkalmazott faanyag rostirányú határ-húzószilárdsága. Képletben:

$$\sigma_{egy}^M = \frac{1}{t_{LLL}^H} \frac{t_{ijkl}^H \sigma_M^{ij} \sigma_M^{kl}}{\sqrt{I_1^2 - I_2}} \leq \sigma_e = f_L^{H+}, \quad i, j, k, l = L, R, T \quad [8]$$

ahol:

$\sigma_{egy}^M$  – a mértékadó terhelésnek megfelelő Ashkenazi-féle egyenértékű feszültség

$f_L^{H+}$  – rostirányú határ-húzófeszültség

$t_{ijkl}^n$  – a technikai szilárdságok határértékével (0,1%-os valószínűségi szint) számított tenzorkomponensek

$\sigma_M^{ij}$  – a ható feszültségi állapot tenzora (a tartó mértékadó terhelésből számítva) a faanyag anatómiai főirányainak megfelelő koordináta rendszerben

$I_1, I_2$  – a feszültségi állapot első és második invariánsa.

Az eljárást az összetett feszültségi állapot következtében nem lehet tervezésként (méretezésként) alkalmazni, csak ellenőrzésként. Tehát az előre felvett geometriai méretek és a mértékadó terhelés felhasználásával kiszámítjuk a mértékadó feszültségi állapotot a kritikus pontban. Kiszámítjuk a mértékadó egyenértékű szilárdságot és összehasonlítjuk a faanyag rostirányú határ-húzószilárdságával.

### Számítómodellel végzett kísérletek

A számítások során nem csak a külső terhelésből származó feszültségeket, hanem a gyártási és a változó klimatikus hatások következtében keletkező sajátfeszültségeket is meghatároztuk. A feszültségeket külön-külön és egyben is vizsgáltuk. Változó klimatikus hatásokat modellezve homogén (GL28h szilárdsági kategóriájú) és kombinált (GL28c) keresztmetszetű – azaz szélső övek jobb szilárdsági tulajdonságúak – tartókra 9 féle, a valóságból vett példát modelleztünk, ahol nem csak a nedvességtartalmi –, de a hőmérsékletváltozás hatásait is vizsgáltuk.

Csak a klimatikus hatásokból származó feszültségeket vizsgáltuk a következő esetekben:

- Egy egyenes tengelyű homogén rétegelt-ragasztott fa tartógerenda ( $h_i = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 20 \text{ db}$ ,  $L = 60 \text{ m}$ ) sajátfeszültség-állapotmezejének meghatározása, ha a gyártáskor az 5. lamella nedvességtartalma 10%-kal nagyobb, mint a többié és a nedvességtartalom a beépítés után viszonylag rövid idő alatt kiegyenlítődik.

- Egy körív alakú homogén rétegelt-ragasztott fa tartógerenda ( $h_i = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 20 \text{ db}$ ,  $L = 60 \text{ m}$ ) sajátfeszültség-állapotmezejének meghatározása, ha a gyártáskor az 5. lamella nedvességtartalma 10%-kal nagyobb, mint a többié és a nedvességtartalom a beépítés után viszonylag rövid idő alatt kiegyenlítődik.
- Egy körív alakú homogén rétegelt-ragasztott fa tartógerenda ( $h_i = 10 \text{ mm}$ ,  $n = 60 \text{ db}$ ,  $L = 60 \text{ m}$ ) sajátfeszültség-állapotmezejének meghatározása, ha a gyártáskor az 5. lamella nedvességtartalma 10%-kal nagyobb, mint a többié és a nedvességtartalom a beépítés után viszonylag rövid idő alatt kiegyenlítődik.
- Egy körív alakú kombinált rétegelt-ragasztott fa tartógerenda ( $h_i = 30 \text{ mm}$ ,  $n = 20 \text{ db}$ ,  $L = 60 \text{ m}$ ) sajátfeszültség-állapotmezejének meghatározása, ha a gyártáskor az 5. lamella nedvességtartalma 10%-kal nagyobb, mint a többié és a nedvességtartalom a beépítés után viszonylag rövid idő alatt kiegyenlítődik.
- Egy körív alakú kombinált rétegelt-ragasztott fa tartógerenda ( $h_i = 10 \text{ mm}$ ,  $n = 60 \text{ db}$ ,  $L = 60 \text{ m}$ ) sajátfeszültség-állapotmezejének meghatározása, ha a gyártáskor az 5. lamella nedvességtartalma 10%-kal nagyobb, mint a többié és a nedvességtartalom a beépítés után viszonylag rövid idő alatt kiegyenlítődik.
- Egy körív alakú homogén rétegelt-ragasztott tartó sajátfeszültségi-állapotmezejének kialakulása, ha a lamellák nedvességtartalma véletlenszerűen eltér egymástól, de maximum  $\pm 1\%$ -ban.
- Egy körív alakú kombinált rétegelt-ragasztott tartó sajátfeszültségi-állapotmezejének kialakulása, ha a lamellák nedvességtartalma véletlenszerűen eltér egymástól, de maximum  $\pm 1\%$ -ban.
- Egy körív alakú homogén rétegelt-ragasztott tartó sajátfeszültségi-állapotmezejének kialakulása, ha az 5. lamellának nem a nedvességtartalma, hanem a hőmérséklete magasabb a többinél ( $\Delta t_5 = 30 \text{ C}^\circ$ ).
- Egy körív alakú homogén rétegelt-ragasztott tartó sajátfeszültségi-állapotmezejének kialakulása, ha a beépítés után a tartóban viszonylag egyenletes, a magasság mentén folytonos parabola függvényvel megadható nedvesség-eloszlás alakul ki (tartós beázás miatt a lamellák nedvességtartalma a felső tartórétegekben jelentősen megnő).

Csak a gyártásból származó sajátfeszültségeket vizsgáltuk a következő esetekben (a tartó magasság és görbületi sugár viszonyait figyelembe véve):

- Egy  $R/H = 180$  viszonyszámnak megfelelő rétegelt-ragasztott íves fatartó ( $h_i = 30 \text{ mm}$ ) gyártási feszültség-állapot-mezőjének meghatározása.
- Egy  $R/H = 220$  viszonyszámnak megfelelő rétegelt-ragasztott íves fatartó ( $h_i = 30 \text{ mm}$ ) gyártási feszültség-állapot-mezőjének meghatározása.
- Egy  $R/H = 50$  viszonyszámnak megfelelő homogén rétegelt-ragasztott íves fatartó ( $h_i = 30 \text{ mm}$ ) gyártási sajátfeszültség-állapotmezejének meghatározása.
- Egy  $R/H = 50$  viszonyszámnak megfelelő homogén rétegelt-ragasztott íves fatartó ( $h_i = 10 \text{ mm}$ ) gyártási feszültség-állapot-mezőjének meghatározása.
- Egy  $R/H = 50$  viszonyszámnak megfelelő kombinált rétegelt-ragasztott íves fatartó ( $h_i = 30 \text{ mm}$ ) gyártási sajátfeszültség-állapotmezejének meghatározása.

A külső terhelésből, a gyártásból és a klimatikus hatásokból együttesen származó feszültségek meghatározására példa a következő volt:

- Egy félkörív alakú, háromcsuklós, 14 m-es feszávolságú rétegelt-ragasztott fatartó erőtan vizsgálata az összes lehetséges teherfajta egyidejű figyelembevételével, vastag és vékony lamellájú esetben. Külső terhelés egy közepesen ható koncentrált erő, a klimatikus terhelés a legfelső lamella nedvességtartalma 16%-os, míg a többi lamella 12%-os nedvességtartalmú.

### Az összes példából levonható következtetések

Az íves rétegelt-ragasztott fatartók gyártási feszültségeit érintő megállapítások:

- A gyártási és a külső terhelésből származó feszültségek összemérhetők. Ezek sokszor azonos nagyságrendűek, tehát a gyártási feszültségeket mindenképpen figyelembe kell venni a tartók erőtan méretezése során.
- Minél kisebb az  $R/H$  viszony (azaz azonos tartómagasság mellett minél kisebb a görbületi sugár), annál nagyobbak a gyártási feszültségek, különösen a rostokkal párhuzamos normál-feszültségek. Az  $R/H = 200$  érték azonban (hasonlóan a külső terhelésből származó feszültségszámításhoz) itt sem tekinthető határértéknek, hisz átlépésével nem változnak jelentősen a feszültségek. A modellszámítás alkalmas a konkrét  $R/H$  viszony figyelembe vételére.

- Azonos külső geometria esetén annál kisebbek a gyártási feszültségek, minél vékonyabbak a lamellák.
- Kombinált tartó esetén a normálfeszültségek maximumai az átmenetek környezetében jelentősek és a rostokra merőleges felszakadás veszélye közvetlenül a sablonból való kivétel után ezeknél a vegyes, eltérő rugalmassági modulusú íves tartóknál nagyobb. Ez a jelenség is a ragasztási technológia helyes betartására figyelmeztet minket.

A rétegelt-ragasztott fatartók klimatikus változások hatására fellépő feszültségeire érvényes általános megállapítások:

- A tartóvégeken fellépő, rostra merőleges normálfeszültségek és nyírófeszültségek kedvezőtlen klímaváltozás (ami a helytelen gyártási technológiának is köszönhető) esetén akkorák lehetnek, hogy akár önmagukban (a külső terhelés vagy a gyártási feszültségek nélkül) is okozhatnak tönkremenetelt, ami a tartóvégek felhasadását és elnyíródását eredményezi. E tekintetben az egyenes és íves tengelyű tartók között nincs különbség.
- Ugyanolyan külső geometria mellett vékonyabb lamellák esetén a klímaváltozásból származó feszültségek kisebbek lesznek. A rostokkal párhuzamos normálfeszültségek változása a tartó nagy részét kitevő, belső tartományában nem jelentős, míg a rostokra merőleges normálfeszültségek és a nyírófeszültségek a tartóvégeken a háromszoros lamella-vastagsághoz tartozó feszültségekhez képest majdnem a felére csökkennek.
- Ha a lamellák nedvességtartalma a gyártás kezdetén véletlenszerűen változik, de sohasem nagyobb mértékben, mint  $\pm 1\%$ , akkor homogén és kombinált keresztmetszetenél a klimatikus feszültségek lefutása a magasság mentén hasonló. Nem nagyobb, mint  $\pm 1\%$ -os nedvességtartalom eltérés esetén a klimatikus feszültségek nagysága még nem elég a szerkezet tönkremeneteléhez, de a többi feszültségfajttával szuperponálódva a tönkremenetel valószínűsége jelentősen megnő.
- A hőmérsékletváltozás anomáliái a rétegelt-ragasztott tartókban legalább egy nagyságrenddel kisebb klimatikus feszültségeket okoznak, mint a nedvességtartalom-változások (a gyakorlatban megfigyelt klímaváltozások mellett).
- Az élettartam folyamán egy 12%-os, aszimmetrikus nedvesedés hatására a rétegelt-ragasztott fatartóban ébredő klimatikus feszültségek önmagukban is tönkretelhetik a szerkezetet.

Számításokkal igazoltuk, hogy két ugyanolyan rétegelt-ragasztott fatartó (ugyanolyan külső geometria és terhelés) közül – az összes feszültséget összegezve és figyelembe véve – a vékony lamellákból állóban jóval kisebb feszültségek keletkeznek, mint a vastag lamellákból állóban.

A vékonyabb lamellákból álló tartók gyártása drágább ugyan (hiszen nagyobb a hulladékképződés, több ragasztóanyagra van szükség, érzékenyebb a gyártás-technológiai előírásokra), a tönkremenetellel szembeni nagyobb biztonság mégis indokolja alkalmazásukat, különösen a bizonytalanabb külső terheléssel és klímaki-tettséggel jellemezhető szerkezetekben.

### Összefoglalás

Megállapítható, hogy a rétegelt-ragasztott fa tartószerkezetek tönkremeneteleinek és meghibásodásainak problémái sok okra vezethetők vissza, mint azt a felmérési eredményekből is láthattuk előző cikkünkben. Hogy ezen okokat megértsük és kiküszöbölhessük, számításokat végeztünk, különféle esetek modellezésével. Ezek eredményei jó összefüggést mutatnak a felmérési eredményekkel. Így valamivel érthetőbbé vált, hogy a tervezés oldaláról milyen problémákat jelent egy nem megfelelően méretezett szerkezet. Nem csak a külső terhelésekre kell méretezni a rétegelt-ragasztott faszerkezeteket, mint azt a mai gyakorlat teszi.

A következő cikk, ugyanezen rétegelt-ragasztott fa tartószerkezetek tönkremeneteleinek és meghibásodásainak az okait vizsgálja, mechanikai mérések, vizsgálatok bemutatásával. Ezek után a gyakorlat számára is hasznos javaslatok kerülnek bemutatásra, mind a tervezésre, gyártásra és üzemeltetésre vonatkozóan.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatás a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

**Irodalomjegyzék**

- Bartal és Rabb Kft. (2010) KUTATÁSI JELENTÉS A BAROSS RRTARTO1 OMFB-00398/2010 számú pályázathoz, 118.
- Szalai J. (2001) A faszerkezetek méretezését és gyártását befolyásoló sajátosságok; (Wittmann Gy. szerk.) Mérnöki faszerkezetek II., Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 143-258.
- Guyon Y. (1951) Contraintes dans les pièces prismatiques soumises á des forces appliqués sur le bases, au voisinage de ces bases, Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau Abhandlung, 11, pp 165-226.
- Roth W. (1975) Festigkeitsuntersuchungen an gekrümmten Brettschicht trägern unter statischer und dynamischer Belastung, Dissertation, Von der für Bauingenieur-und Vernessungswesen der Universität Karlsruhe (TH), 1-51.
- Vanya Cs. (2014) Javaslatok rétegelt-ragasztott fatartók tervezéséhez, gyártásához és üzemeltetéséhez, felmérési és modellezési eredmények alapján. I. rész: Irodalmi áttekintés és a rétegelt-ragasztott fatartók tönkremeneteleinek felmérési eredményei, FAIPAR 62. évf. (2014), DOI: 10.14602/WoodScience-HUN\_2014\_3
-