

A DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

**A rétegelt-ragasztott fatartók külső terhelésből,
gyártási és klimatikus igénybevételekből származó
veszélyes feszültég-állapotának meghatározása, a tartók
erőtani méretezése anizotrop törésméleti alapon**

Vanya Csilla

Nyugat-magyarországi Egyetem
Faipari Mérnöki Kar
Sopron
2013

Doktori értekezés tézisei

Nyugat-magyarországi Egyetem

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Doktori program: Faszerkezetek

Programvezető: Dr. Divós Ferenc CSc.

Témavezetők: Dr. Csébfalvi Anikó CSc

Dr. Szalai József CSc.

1 Bevezetés

A rétegelt-ragasztott fatartók elterjedése az 1970-es évek közepétől indult meg Magyarországon, annak köszönhetően, hogy könnyebbek, rugalmasabbak és gazdaságosabbak voltak, mint a fém- és vasbeton tartószerkezetek. Jelenleg számtalan építőipari cég foglalkozik rétegelt-ragasztott tartók építésével és faszerkezetek gyártásával. A rétegelt-ragasztott tartók megfelelő minőségű anyagokból, minőségi beszerelést és üzemeltetést követően időtállóak. Azonban egyre több esetben fordul elő a rétegelt-ragasztott tartók károsodása és a károsodás okán egész tetőszerkezetek életveszélyessé válása (pécsi uszoda, berettyóújfalui uszoda, harkányi III. sz. medence, stb.). A problémát az okozza, hogy hiányoznak a változó klimatikus környezeti hatásnak kitett rétegelt-ragasztott fatartók időbeli viselkedésének, a saját feszültségek mértékének és a használt D4 ragasztóknak a célzott vizsgálatait.

2 A kutatás célja

Feladatom és témám, hogy bemutassam a rétegelt-ragasztott fatartók feszültségeit és azok számítási módszereit. Mivel a fa anizotrop anyag (vagyis valamely tulajdonság minden irányban más-más értékkel bír) a feszültség számításokat is anizotrop alapon végeztem el annak érdekében, hogy realisabb képet kaphassunk a fában lezajló folyamatokról. Külön már számolták (igaz, inkább csak a tudományos életben, mint a gyakorlatban) a rétegelt-ragasztott egyenes és íves tartók külső terhelésből származó feszültségeit, a rétegelt-ragasztott íves tartók gyártása során keletkező sajátfeszültségeket, illetve a klimatikus viszonyok hatására létrejövő sajátfeszültségeket, de ezek együttes hatását még sosem vizsgálták. Célom, hogy meg

tudjam mutatni a három különböző terhelésből származó feszültségek együttes alakulását, a rész feszültség-állapotmezők összegzésének módját, ezek ismeretében pedig a tartó veszélyes keresztmetszeteinek, illetve kritikus pontjainak, valamint azok kritikus feszültség-állapotainak meghatározását. A kritikus feszültségi állapotok ismeretében pedig elvégezhető az egész szerkezeti elem erőtani méretezése, de most már anizotrop alapon, a leginkább megfelelőnek bizonyult anizotrop tönkremeneteli elmélet felhasználásával.

A bemutatott illetve kidolgozott számítási eljárásokkal a már a megépített tartókra is tudunk megállapításokat tenni, ami nagy segítség lehet a gyakorlat számára. Hiszen Magyarország területén és Európában egyre több rétegelt-ragasztott tartót használnak fel és a beépített tartók egyre öregebbek. A teherhordó szerkezetek utólagos vizsgálata azonban mindig háttérbe szorult. Ezen szeretnék változtatni a doktori munkámmal.

A rétegelt-ragasztott fatartók erőtani méretezése, tervezés és ellenőrzése tekintetében már sok részletkérdést megoldottak, de ezeknek a szerkezeteknek az általános, rendszer-szemléletű méretezésének módszerét még nem dolgozták ki. Munkám egyik fő célja éppen az, hogy az általam kidolgozott méretezési eljárás mielőbb elterjedjen a rétegelt-ragasztott faszervezetek erőtani tervezésének mindennapi és megszokott gyakorlatába.

3 Az alkalmazott módszerek

A Nyugat-Magyarországi Egyetem Faipari Mérnöki Karának Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézete elnyert egy pályázati támogatást (Baross Gábor RRTARTO1 OMFB-00398/2010). Ennek a pályázatnak lehettem részese, ennek a keretein belül vizsgáltam a rétegelt-ragasztott tartókra ható feszültségek együttes hatását. Ezek

ismeretében a veszélyes keresztmetszetek kritikus pontjait méreteztem az újonnan kidolgozott méretezési eljárással.

A pályázatban együtt dolgoztunk Rabb Péter okleveles építőmérnökkel és kollégáival, ők a már megépített tartók felmérését végezték. Ezeket a valós problémákat próbáltuk számításokkal is igazolni és magyarázni.

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 mutattam be. Mindhárom feszültség számítására külön-külön példákat dolgoztam ki különféle geometria és terhelési eseteket figyelembe véve, végül – amit eddig még senki sem végzett el – meghatároztam és összegeztem egy rétegelt-ragasztott íves fatartón mindhárom hatás feszültség-állapotmezéjét. Mindhárom számításban az eredeti jelölésrendszert használtam és csak az összegzésnél, illetve az erőtani méretezésnél választottam egységes jelölésrendszert. A számításokat Excel program segítségével végeztem.

A mérnöki gyakorlat számára, annak érdekében, hogy a tervező mérnökök figyelembe vehessék az anizotrop alapon számolható külső terhelésből származó feszültségeket és az eddig hanyagolt sajátfeszültségeket (a gyártási- és a klimatikus feszültségeket), a Baross Gábor pályázatán belül készítettünk egy Excel alapú programot. Ennek használatával összegezni tudjuk a gyártásból és a klimatikus terhelésből származó feszültségeket a veszélyes keresztmetszetekben. A program még további fejlesztésekre szorul, hogy a külső terhelésből származó feszültségeket is tartalmazza, és így a ténylegesen ható feszültségállapotokat kapjuk meg a veszélyes keresztmetszetek kritikus pontjaiban. A külső terhelésből származó feszültségek meg-

határozására, a külön Excel program elkészült, már csak a két program integrálását kell elvégezni informatikai segítséggel. Ha ez a program elkészül, akkor mondhatjuk, hogy a mérnöki gyakorlat számára is könnyen használható számítási formát alakítottunk ki rétegelt-ragasztott fatartók anizotrop alapú erőtani méretezéséhez.

3.1 Az egyes feszültségfajták meghatározásának bemutatása

Az íves rétegelt-ragasztott fatartók külső terhelésből származó feszültségeinek analitikus meghatározását Walter von 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,

σ_{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 görbületi sugara,

φ – 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 φ -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 állandókként.

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

az i -edik 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 -edik 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: σ_{zzi} – a rostokkal párhuzamos normálfeszültség,

σ_{yyi} – a rostokra merőleges normálfeszültség,

τ_i – a nyírófeszültség,

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

$F_i = bh_i$ – az i -edik lamella keresztmetszet-területe,

b – a lamellák szélessége,

h_i – az i -edik lamella vastagsága,

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

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

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

A_i – az i -edik lamella módosított keresztmetszet területe,
 a_i – az i -edik lamella súlypontjának távolsága az első lamella súlypontjától a z helyen,

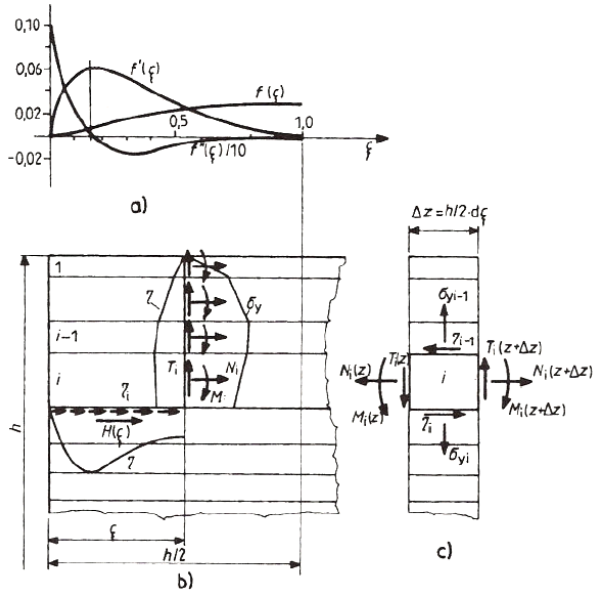
J_i – az i -edik lamella módosított másodrendű nyomatéka,
 $M_{0i}(z)$ – a lamellák préselő sablonba hajlításához szükséges nyomaték.

A keletkező feszültségekről azt kell tudnunk, hogy a σ_{zzi} rostokkal párhuzamos normálfeszültség a tartó teljes szakaszára vonatkozik (kivéve a zavart szakasz), míg a σ_{yyi} rostokra merőleges normálfeszültségek és a τ_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 σ_{zzi} feszültség a zavart szakaszon fokozatosan 0-ra csökken le a $f(\xi)$ függvény szerint (lásd 1. ábra).

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

3.2 A feszültségállapotok összegzésének módszere

A három hatásfajtnak (külső, gyártási és klimatikus) megfelelően a tartóban három féle feszültség-tenzormező keletkezik. A tartószerkezetek valójában ezek együttes hatását, az eredő feszültség-tenzormezőt érzékelik és annak megfelelően viselkednek, azaz tönkre mennek vagy épek maradnak.



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 Δz hosszúságú *i*-edik lamellára ható belső erők és feszültségek.

A tenzorokat úgy összegezzük, hogy a tenzor egymásnak megfelelő komponenseit skalárisan összeadjuk. Az összegezhetőség feltétele, hogy egy adott ponthoz tartozó három féle feszültségtenzormező elemeit mind ugyanabban a koordinátarendszerben adjuk meg (a faanyaggal kapcsolatban ez a koordinátarendszer a faanyag anatómiai főirányaival párhuzamos). Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor a tenzorkomponenseket a legalkalmasabb közös koordinátarendszerbe kell átszámolni a megfelelő tenzortranszformációk segítségével. A megfelelő feltételek esetén az összegzés képletben:

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

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} \sigma_{kü}^{LL} & \sigma_{kü}^{RL} & \sigma_{kü}^{TL} \\ \sigma_{kü}^{LR} & \sigma_{kü}^{RR} & \sigma_{kü}^{TR} \\ \sigma_{kü}^{LT} & \sigma_{kü}^{RT} & \sigma_{kü}^{TT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{gy}^{LL} & \sigma_{gy}^{RL} & \sigma_{gy}^{TL} \\ \sigma_{gy}^{LR} & \sigma_{gy}^{RR} & \sigma_{gy}^{TR} \\ \sigma_{gy}^{LT} & \sigma_{gy}^{RT} & \sigma_{gy}^{TT} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_{kl}^{LL} & \sigma_{kl}^{RL} & \sigma_{kl}^{TL} \\ \sigma_{kl}^{LR} & \sigma_{kl}^{RR} & \sigma_{kl}^{TR} \\ \sigma_{kl}^{LT} & \sigma_{kl}^{RT} & \sigma_{kl}^{TT} \end{bmatrix} = \\
&\begin{bmatrix} \sigma_{kü}^{LL} + \sigma_{gy}^{LL} + \sigma_{kl}^{LL} & \sigma_{kü}^{RL} + \sigma_{gy}^{RL} + \sigma_{kl}^{RL} & \sigma_{kü}^{TL} + \sigma_{gy}^{TL} + \sigma_{kl}^{TL} \\ \sigma_{kü}^{LR} + \sigma_{gy}^{LR} + \sigma_{kl}^{LR} & \sigma_{kü}^{RR} + \sigma_{gy}^{RR} + \sigma_{kl}^{RR} & \sigma_{kü}^{TR} + \sigma_{gy}^{TR} + \sigma_{kl}^{TR} \\ \sigma_{kü}^{LT} + \sigma_{gy}^{LT} + \sigma_{kl}^{LT} & \sigma_{kü}^{RT} + \sigma_{gy}^{RT} + \sigma_{kl}^{RT} & \sigma_{kü}^{TT} + \sigma_{gy}^{TT} + \sigma_{kl}^{TT} \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

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 3.1. alfejezetben láttuk, hogy a 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-állapotmezéjét. Az eredő feszültség-tenzor függvény ismeretében elvileg bármely pontban számíthatjuk a hozzá tartozó feszültség-állapotot. A tönkremenetel szempontjából legveszélyesebb feszültség-állapotenzor helye lesz a tartó kritikus pontja, a ponthoz tartozó keresztmetszet a tartó veszélyes keresztmetszete. Természetesen 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 tartószerkezet 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 tenzorfüggvények 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-állapotmezéjét meghatározni, elegendő a kritikusnak ítélt pontokban az eredő feszültségállapotokat számítani. A külső terhelésből származó feszültségek maximum 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. Ugyan ezen az elven vizsgálni kell a sajátfeszültségek szélsőértékeinek keresztmetszeteit, hogy ott a három feszültség összegéből mekkora szélsőértékek 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 fajtákból bár nem olyan nagy, de mégis egymást károsan befolyásoló értékek keletkeznek. Azt, hogy a szerkezet melyik keresztmetszeteit és azoknak melyik kritikus pontjait vizsgáljuk, nagyon körültekintően kell kiválasztanunk. 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 kü-

lönböző hatásokból keletkező eredő feszültség-állapotok kritikus értékei.

3.3 Erőtani méretezés az anizotrópia figyelembevételével

A rétegelt-ragasztott fatartók erőtani méretezését – összhangban a régi magyar MSZ és az EUROCODE előírásaival – a valószínűségszámítással kiegészített határállapot módszerével végezzük. Azaz a feszültségeket a mértékadó terhelésből számítjuk, a határfeszültségek pedig az adott típusú szilárdság eloszlásfüggvényének 0,1 %-os túllépési szintjéhez 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 rost irányú határhúzószilárdsága. Képletben:

$$\sigma_{egy}^M = \frac{1}{t_{LLL}^H} \frac{t_{ijkl}^H \sigma_M^{ij} \sigma_M^{kl}}{\sqrt{I_1^2 - I_2}} \leq \sigma_e = f_L^{H+}, \quad i,j,k,l = L, R, T, \quad (7)$$

ahol: σ_{egy}^M – a mértékadó terhelésnek megfelelő Ashkenazi-féle egyenértékű feszültség,

f_L^{H+} – rostirányú határhúzófeszültség,

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

σ_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 inavariánsa.

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.

4 Az eredmények összefoglalása

Az eredményekből egyértelműen megállapítható, hogy a gyakorlat a rétegelt-ragasztott fatartókat nem a tényleges, a valóságnak megfelelő igénybevételekre és feszültségekre méretezi. Így a számítási eredmények tükrében nem véletlen, hogy a rétegelt-ragasztott fatartók idő előtt károsodnak és tönkre mennek. Az is látszik, hogy a vékony lamellából álló tartók esetében lényegesen kisebb feszültség keletkezik.

Ha elfogadjuk, hogy a gyártási feszültségek pihentetéssel jelentősen csökkenthetők, a klimatikus feszültségek pedig a klímaváltozás hatásainak mechanikus vagy fizikai, kémiai úton történő változtatásával csökkenthetők, akkor az eddig a gyakorlatban alkalmazott méretezési eljárás majdnem helyesnek mondható. Azzal a kiegészítéssel, hogy a korábban alkalmazott méretezési módszereknél gyakorlatilag többnyire izotrop, homogén anyagmodellt használtak. Ez a nézet ma már nem tartható, mert létezik a szakirodalomban egy olyan méretezési eljárás, amely bizonyítottan kiválóan tükrözi a faanyagok és a faalapú anyagok tönkremeneteli tulajdonságát.

Már a Baross Gábor pályázat készítése közben is rájöttünk, hogy a rétegelt-ragasztott tartók tönkremeneteleinek vizsgálata egy nagyon komplex feladat, és még nagyon sok kutatásra van szükség ahhoz, hogy teljes képet kaphassunk róla. A rétegelt-ragasztott tar-

tók, szerkezetek károsodásaiban sok minden közrejátszhat. Sok egymásra halmozódó probléma (nem megfelelő gyártástechnológia, tervezés, kivitelezés és üzemeltetés) nagyon nagy károkat tud okozni a rétegelt-ragasztott fa anyagú tartószerkezetekben, mint azt az irodalmi áttekintésekben is láthattuk már.

A doktori munkámban az egymásra halmozódó problémák közül a gyakorlati tervezés méretezési hibáit akartam bizonyítani, ismertetni a mérnöki gyakorlat számára is. A számolt feszültségek és azok összegzése megmutatta, hogy a mérnöki gyakorlat olyan számítható igénybevételeket és feszültségeket nem vesz figyelembe, amelyek jelentősen hozzájárulhatnak a tönkremenetelhez. Ezek mértéke természetesen csökkenthető lenne a megfelelő üzemeltetéssel (egyenletes klíma biztosítása) és faanyagvédelemmel, de ezeket a gyakorlatban általában hanyagolják, így már a tervezés során figyelni kell a többlet igénybevételt okozó hatásokra.

A doktori munka során nyert és a dolgozatban leírt, illetve bizonyított konkrét tudományos eredményeket a tézisekben foglaltam össze.

5 Tézisek

1. Tézis: Bemutattam a rétegelt-ragasztott, íves és egyenes tengelyű fatartók erőtani méretezését úgy, hogy a külső terhelés mellett figyelembe vettem a gyártási és klimatikus terheléseket is.

A rétegelt-ragasztott fatartókat lassan 100 éve készítik, építik és méretezik. Az eddigi méretezés során azonban csak a külső terheléseket vették figyelembe. Egyéb hatásokkal a méretezés folyamán nem vagy alig törődtek. Sokszor még a faanyag anizotrop jellegzetességeivel sem foglalkoztak, hanem egyszerűen egyenes vagy görbe tengelyű és izotrop, homogén anyagú rúdként kezelték. Felkutattam a

szakirodalomban található legáltalánosabb analitikus modell-számítást, amely lehetővé teszi a faanyag anizotrop jellegének és a tartó görbültségének pontos figyelembe-vételét, valamint azokat a modell-számításokat, amelyek segítségével mind a gyártási, mind a klimatikus feszültségek (utóbbiak bizonyos feltételek esetén) meghatározhatók. Ezeket a számító eljárásokat oly módon foglaltam össze, hogy a felhasználó maga is el tudja végezni a számításokat és dolgozatomat sillabuszként és példatárként alkalmazhassa.

2. Tézis: Kidolgoztam a különböző terhelés típusokból származó feszültség-tenzormezők összegzésének, azaz az eredő tenzormező meghatározásának a módját. Ezzel – elvileg – meghatároztam a fatartó tetszőleges pontjában a három fajta hatásból származó, összegzett (eredő) feszültségi állapotot. Kidolgoztam hogyan határozható meg a fatartó veszélyes keresztmetszetei, illetve ezen keresztmetszeten belül a kritikus pontok. Bemutattam továbbá az ezen pontokban számított feszültségi állapotot, amelyre az anizotrop alapú erőtani méretezés elvégezhető.

3. Tézis: A megelőző elméleti és a kísérleti kutatások eredményeként a tervezői gyakorlat számára is feldolgozható és kivitelezhető módszerként mutattam be a rétegelt-ragasztott faszerkezetek anizotrop erőtani méretezését (ellenőrzését) az Ashkenazi-féle tönkremeneteli elmélet alkalmazásával.

Bár tönkremeneteli elméleteket faszerkezetek és egyéb kompozitok erőtani méretezésére már korábban is alkalmaztak, azonban ezek anizotrop anyagok szilárdságának megítélésére – bizonyíthatóan – csak igen közelítően alkalmasak. Dolgozatom egyik nem titkolt célja, hogy ez a több szempontból is megvizsgált és iga-

zolt tönkremeneteli elmélet minél előbb elterjedjen a mindennapi tervezői gyakorlatba. A méretezés és az ellenőrzés egyszerűbb és bonyolultabb terhelések esetén is ugyan úgy elvégezhető.

4. Tézis: Megállapítottam, hogy az íves rétegelt-ragasztott fatartók esetén, azonos külső geometria és görbületi sugár mellett, az azonos külső terhelésből származó feszültség-tenzormező ugyanaz.

Azaz a külső terhelésből származó feszültségek nagyságára és eloszlására nincs hatással a lamella-vastagság, a lamella-szám, sőt még az egyes lamellák rugalmassági modulusának nagysága, azaz maga az alkalmazott fafaj sem. Elvileg akár mindegyik lamella más fafajból származhat. Az alkalmazott fafajok számának a gyártástechnológia szab határt. A gyakorlatban – egy fa anyagú tartó esetén – nem érdemes kettő (esetleg három) fafajnál többet használni. A ragaszthatóság az egyik legfontosabb technológiai tényező. A kombinált tartókeresztmetszet – a szemléletnek, ill. az EN szabványnak megfelelő elrendezés mellett – jól követi a veszélyes keresztmetszetekben a rostokkal párhuzamos normálfeszültségek magasság menti eloszlását (az alsó és felső szálak közelében fellépő feszültségek a maximálisak). Az itt elhelyezett magasabb szilárdságú lamellák ezeket a feszültségeket könnyedén elviselik.

5. Tézis: Az íves rétegelt-ragasztott fatartók gyártási feszültségeit érintő megállapításaim:

5.1 A gyártási és a külső terhelésből származó feszültségek összemérhetők. Sokszor azonos nagyságrendűek, tehát a gyártási feszültségeket mindenképpen figyelembe kell venni a tartók erőtani méretezése során.

5.2 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.

5.3 Azonos külső geometria esetén annál kisebbek a gyártási feszültségek, minél vékonyabbak a lamellák.

A bemutatott két tartó esetén a rostokkal párhuzamos normál-feszültségek a harmadára, a rostra merőleges normál-feszültségek és nyírófeszültségek kb. egy nagyságrenddel csökkentek harmad olyan lamella-vastagság esetén.

5.4 Kombinált tartó esetén a nagyobb rugalmasságú modulusú, azaz merevebb lamellák nagyobb rostirányú normál-feszültséget vesznek fel, mint a kevésbé merev középsők.

Ez a teherbírás szempontjából is optimális, hiszen a merevebb faanyag rostokkal párhuzamos szilárdsága is feltehetően nagyobb, mint a kisebb rugalmasságú modulusú faanyagé. A nyírófeszültségek eloszlásában a méretezést érintő jelentős különbség nincs. A rostra merőleges normál-feszültség értékek sem térnek el jelentősen egymástól, ám a normál-feszültségek maximumai az átmenetek (a 20 rétegű tartóban a 4.-5. és a 15.-16. lamella) környezetében jelentősek és a rostokra merőleges felszakadás veszélye közvetlenül a sablonból való kivétel után ezeknél a vegyes, eltérő rugalmasságú modulusú íves tartóknál nagyobb. Ez a jelenség is a ragasztási technológia helyes betartására figyelmeztet minket.

6. Tézis: A rétegelt-ragasztott fatartók klimatikus változások hatására fellépő feszültségeire érvényes általános megállapítása-
im:

6.1 A tartóvégeken fellépő rostra merőleges normálfeszültség és nyírófeszültség 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.

Az állítás elsősorban a gyártástechnológia szigorú betartására hívja fel a figyelmet. Ha az összeragasztandó lamellák nedvességtartalma nem azonos (a tartó anyaga nem homogén), az a tartó szerkezet egésze szempontjából katasztrofális következményekkel járhat.

6.2 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 lamellavastagsághoz tartozó feszültségekhez képest majdnem a felére csökkennek.

6.3 A kombinált lamella-felépítésű tartóban azonos lamellavastagság mellett hasonló klímaváltozáshoz gyakorlatilag azonos feszültség-állapotmező tartozik, mint a homogén tartóéhoz, csak a feszültségmaximumok értékei 20-30 %-kal kisebbek.

A kombinált felépítés tehát kedvezően hat a rétegelt-ragasztott fatartók klimatikus feszültségeinek nagyságára.

6.4 Ha a lamellák nedvességtartalma a gyártás kezdetén véletlenszerűen változik, de sohasem nagyobb mértékben, mint ± 1 %, akkor homogén és kombinált keresztmetszetnél a klimatikus feszültségek lefutása a magasság mentén hasonló. Nem nagyobb, mint ± 1 %-os nedvességtartalmú eltérés esetén a klimatikus feszültségek nagysága még nem elég a szerkezet tönkremeneteléhez, de a többi feszültségfajtaival szuperponálódva a tönkremenetel valószínűsége jelentősen megnő.

6.5 A hőmérséklet-változás anomáliái a rétegelt-ragasztott tartókban legalább egy nagyságrenddel kisebb klimatikus feszültségeket okoznak, mint a nedvességtartalom-változások (a gyakorlatban megfigyelt klíma-változások mellett).

6.6 Az élettartam folyamán egy 12 %-os, aszimmetrikus nedvesedés hatására a rétegelt-ragasztott fatartóban ébredő klimatikus feszültségek önmagukban is tönkre tehetik a szerkezetet.

Míg e tézis 6.1. bekezdése a gyártási technológia pontos betartására figyelmeztet, ez a pont arra utal, hogy a szerelési és építési technológia előírásai (sőt annak tervezése is) rendkívüli fontossággal bírnak. Esetleges beázás vagy állandó páralecsapódás okozhat olyan jelentős klimatikus feszültségeket, amelyek a szerkezet tönkremeneteléhez vezethetnek.

7. Tézis: Megmutattam és számításokkal igazoltam, hogy két ugyanolyan rétegelt-ragasztott fatartó (ugyanolyan külső geometria és terhelés) esetén, – az összes feszültséget összegezve és

figyelembe véve – a vékony lamellákból állóban jóval kisebb feszültségek keletkeznek, mint a vastag lamellákból állóiban.

A disszertáció elején, a 16 épület felmérése során találkoztunk vékony és vastag lamellából álló szerkezetekkel. A felmérés során megfogalmazódott, hogy a vékony lamellából álló keresztmetszet kevésbé reped, mint a vastag lamellás. Ennek okát számítással bizonyítottam.

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 klímakitettséggel jellemezhető szerkezetekben.

8. tézis: A rétegelt-ragasztott egyenes és íves tengelyű fatartók erőtani méretezése – a kutatásaim szerint – az alábbi pontok alapján végzendő:

- I. A célnak és feladatnak megfelelő faszerkezet-típus választás.**
- II. A főtartó fafajának, külső és belső geometriájának megválasztása (görbületi sugár, feszítávolság, lamella vastagság, a lamellák és a tartógerenda keresztmetszeti méretei stb.).**
- III. A mértékadó terhelés meghatározása.**
- IV. A reakcióerők és az igénybevételek meghatározása a mértékadó terhelés alapján**
- V. A külső mértékadó terhelésből származó feszültség-állapotmező meghatározása (von Roth modell).**

- VI. A gyártási technológiának megfelelő sajátfeszültség-állapotmező meghatározása (Szalai modell).
- VII. Az előre látható klímaváltozásnak megfelelő sajátfeszültség-állapotmező meghatározása (Szalai modell).
- VIII. A tartó kritikus pontjainak meghatározása (a szemléletnek megfelelő gyakorlat alapján, vagy alkalmasan választott számítógépes program segítségével).
- IX. A kritikus pontok egyenértékű feszültségeinek meghatározása a mértékadó feszültségek, az anizotrop határfeszültségek alapján az Ashkenazi-féle tönkremeneteli elméletnek megfelelően.
- X. Az egyenértékű feszültség(ek) és a határfeszültség értékeinek összehasonlítása. Ha
- $$\sigma_{\text{egy}}^M < f_L^{H+},$$
- a szerkezet kritikus pontja megfelel. Természetesen az összes kritikus pontot ellenőrizni kell.
- XI. Ha valamelyik kritikus pontban a reláció nem felel meg, akkor a 2. pontra visszaugorva, alkalmasan megnövelt keresztmetszetekkel újra elvégezzük az ellenőrzést.

6 A fontosabb felhasznált szakirodalmak

- Ashkenazi E.K.: 1967:** K voprosu o geometrii teorii protschnosti. (Geometry of strength theory) Mekhanika Polimerov 3(4):703-707
- Bartal és Rabb Kft.: 2010:** KUTATÁSI JELENTÉS A BAROSS RRTARTO1 OMFB-00398/2010 számú pályázathoz, 118.
- 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.
- Noack D. and Roth W.: 1972:** Berechnung gekrümmter Brettschichtträger unter Belastung durch Momente, Normal- und Querkräfte; HOLZ als Roh- und Werkstoff 30, 220-233
- Roth W.: 1975:** Festigkeitsuntersuchungen an gekrümmten Brettschichtträgern unter statischer und dynamischer Belastung, Dissertation, Von der für Bauingenieur-und Vernessungswesen der Universität Karlsruhe (TH), 1-51.
- Szakmai zárójelentés:** Rétegelt ragasztott fatartók méretezési és technológiai innovációja a klimatikus sajátfeszültségek figyelembevételével. Projektvezető: Dr. Kánnár Antal (NymE, Faipari mérnöki Kar), projekt REG-ND-09-2-2009-0019
- Szalai J.: 1985:** Rétegelt ragasztott íves fatartók gyártása során, valamint klimaváltozás következtében fellépő sajátfeszültségeinek és alakváltozásának meghatározása, Kandidátusi értekezés; Sopron, 151.
- Szalai J.: 2001:** A faszerkezetek méretezését és gyártását befolyásoló sajátosságok; (Wittmann Gy. szerk.) Mérnöki faszerkezetek II., Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 143-258.

7 A dolgozat témájához kapcsolódó saját publikációk

Cikk:

1. **Vanya Cs., Csébfalvi A.: 2010:** Rétegelt ragasztott fatartó kupola főtartójának tervezési problémái, Faipar, LVIII. évf. 2010/2. szám, 6-12 old.
2. **Vanya Cs.: 2011:** A rétegelt ragasztott faanyagban ébredő feszültségek; XI. Magyar Mechanikai Konferencia CD kiadványa, Miskolc-Egyetemváros, 2011. augusztus 29-31. Szerkesztette: Baksa Attila, Bertóti Edgár és Szirbik Sándor; 67. jelű.; ISBN 978-963-661-975-6
3. **Vanya Cs.: 2012:** Damage problems in glued laminated timber; Drewno – Prace, Naukowe, Donesienia, Komunikaty, No. 188, pp.115-128; ISSN 1644-3985

Konferencia kiadványok:

4. **Vanya Cs.: 2010:** The laminated beams tensions; Engineering Research Anniversary Volume Honoring Amália and Miklós Iványi, Sixth International PhD & DLA Symposium October 25-26. 2010.; Printed at Rotary Press, Komló, Hungary 2010; C:107; ISBN 978-7298-40-0
5. **Vanya Cs.: 2011:** A rétegelt ragasztott faanyagban ébredő feszültségek; XI. Magyar Mechanikai Konferencia Az előadások összefoglalói, Miskolc-Egyetemváros, 2011. augusztus 29-31. Szerkesztette: Baksa Attila, Bertóti Edgár és Szirbik Sándor; 127. old.; ISBN 978-963-661-975-6
6. **Vanya Cs., Karácsonyi Zs.: 2011:** Difficult stresses in glue laminated wood; WOOD NDT, Proceedings, 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, September 14-16, 2011. Volume 2, University of West Hungary Sopron, Hungary; 735-736; ISBN 978-963-9883-81-9, ISBN 978-963-9883-83-3 volume 2.
7. **Vanya Cs.: 2011:** The tensions of glue laminated beams; 28th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental

Mechanics; 28 September-01 October 2011 Siófok, Hungary; 145-146; ISBN 978-963-9058-32-3

8. **Vanya Cs.: 2011:** Complex tensions in a glue laminated beams; Research Conference on Information Technology, Pollack Mihály Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, Hungary, PhD & DLA Symposium October 24-25. 2011.; Seventh International PhD & DLA Symposium; Printed at Rotary Press, Komló, Hungary 2011; C:145; ISBN 978-963-7298-46-2

Poszter:

9. **Vanya Cs., Karácsonyi Zs.: 2011:** Difficult stresses in glue laminated wood; WOOD NDT, 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, September 14-16, 2011., University of West Hungary Sopron, Hungary;
10. **Vanya Cs.: 2011:** The tensions of glue laminated beams; 28th Danubia-Adria-Symposium on Advances in Experimental Mechanics; 28 September-01 October 2011 Siófok, Hungary

Előadás:

11. **Vanya Cs.: 2010:** The laminated beams tensions, Conference on Engineering Research Sixth International PhD & DLA Symposium, 2010.10.25-26. Pécs, Hungary
12. **Vanya Cs.: 2011:** A rétegelt-ragasztott faanyagban ébredő feszültségek, XI. Magyar Mechanikai Konferencia, 2011. augusztus 29-31. Miskolc
13. **Vanya Cs.: 2011:** Complex tensions in a glue laminated beams, Research Conference on Information Technology Seventh International PhD and DLA Symposium, Pollack Mihály Faculty of Engineering and Information Technology, University of Pécs, Hungary, 2011. október 24-25. Pécs, Hungary

Sopron, 2013.