

BÍRÁLAT

**Láng Elemér M. „Sztochasztikus és determinisztikus modellek faalapú kompozitok fejlesztésére”
(Stochastic and Deterministic Models for the Development and Manufacture of Wood-Based Composites)
című MTA doktori értekezéséről**

1. Témaválasztás, kutatási cél

A különböző összetételű és szerkezetű kompozitok anyagok, valamint a vonatkozó előállítási technológiák fejlesztése az utóbbi évtizedek kiemelkedő kutatási területei. A faalapú kompozitok jelentőségét különösen kihangsúlyozza az, hogy előállításuk megújuló nyersanyagforrásokon és fahulladék-felhasználáson alapul, valamint, hogy környezetbarát technológiák alkalmazhatók, és a kapott szerkezeti anyagok alapvetően biodegradábilisak. A kompozitkutatások egyik fontos ága az elméleti és/vagy szimulációs eszközökkel segített szerkezet- és technológia-tervezési módszerek kifejlesztése, amelyek meglete egyébként elősegíti az alkalmazási területek bővülését is.

Láng Elemér doktori értekezése az utóbbi korszerű területhez kapcsolódik, ezért a **választott téma aktuálisnak**, illetve az alkalmazott anyagtudományi kutatások szempontjából **jelentősnek minősíthető**.

Az értekezésnek az Előszóban röviden, az I.-V. fejezetekben részletesebben megfogalmazott **célja** a Jelölt, faalapú összetett anyagszerkezetek és előállítási folyamatuk alatti mechanikai viselkedésük vizsgálati, modellezési és szimulációs kutatási eredményeinek összefoglalása.

2. Formai követelmények

Az angol nyelven írt doktori értekezés terjedelme a fedőlapot (1 oldal), előszót (1 oldal), köszönetnyilvánítást (1 oldal), tartalomjegyzéket (2 oldal), függelék (22 oldal), rövid szakmai életrajzot (1 oldal) és egy hibajegyzéket (1 oldal) nem számítva, 139 oldal, amely 6 fejezetre oszlik. Az első fejezet általános irodalmi áttekintés, 4 fejezet alkotja az érdemi részt, míg a hatodik fejezet egy 4 oldalas, a téziseket is tartalmazó összefoglalás. Az érdemi részt alkotó négy fejezet mottós kezdőlappal, bevezetéssel és a kutatási célokat megfogalmazó alfejezettel rendelkezik, s mindegyiket összegzés és következtetések, irodalom- és jelölésjegyzék zárja. Egyes esetekben a kutatási feladatok háttérét képező irodalmi eredményeket is külön alfejezet tárgyalja.

Az értekezés világos, szakmailag korrekt megfogalmazású, ábrákkal gazdagon illusztrált, célszerűen szerkesztett munka. Megjegyzendő, hogy az ismertetett szimulációs eljárásokat megvalósító programokat célszerű lett volna a Függelékben mellékelni. Ugyancsak megjegyzendő, hogy az értekezés II.-V. sorszámú kutatás-tárgyú fejezeteire és a vonatkozó eredményekre a téziszfüzet I.-IV. sorszámú fejezeteiként hivatkozik.

Összességében megállapítható, hogy az értekezés lényegében **megfelel a formai követelményeknek**.

3. Az értekezés tartalmi áttekintése és részletes értékelése

Jelölt a disszertáció témakörének, a faanyagok és vizsgált termékek alapvető szerkezeti ismereteit az **I. fejezetben**, míg a tárgyalt kutatási munkák irodalmi előzményeit a II.-V. fejezetek vonatkozó részeiben foglalja össze. A bizonyos mértékben egymásra épülő II.-IV. fejezetek az értekezés súlyponti kutatásait és legfontosabb eredményeit ismertetik.

II. fejezet

A *II. fejezet* orientált forgácslapok (OSB) hidegprésselés előállítása során végbemenő tömörödési-konzolidációs folyamat szerkezeti-mechanikai szimulációs modellezésével foglalkozik.

A modellkidolgozás első lépése (*II.3., II.4.1. fejezetek*) a kiinduló, statisztikus szerkezetű forgácsteríték geometriai jellemzőinek kísérleti meghatározása volt, amelyek lehetővé tették egy virtuális forgácsteríték modell felállítását. A geometriai mérésekkel kapcsolatban az alábbi kérdések, észrevételek merültek fel.

- #1. Az adatfelvételi mérésekhez a forgácsteríték kialakítása azonos méretű (0,8 mm vastag, 19 mm széles, 70 mm hosszúságú), de szabálytalan alakú forgácsokból kézi úton (20. oldal) történt. Itt nem világos, hogy ez pontosan milyen kézi beavatkozást jelent. Vajon a kézi kialakítás csak a forgácsteríték kézi (kéziszerszámos) egyengetését jelentette, vagy pl. a forgácsok egyenkénti kézi orientálását, esetleg egyenkénti kézi fektetését is magába foglalta?

- #2. A II.3. ábra egy meglehetősen erősen orientált forgácselrendezést mutat az adott blokk egyik oldalán. Ennek alapján nem lehet tudni, hogy az orientált szerkezet egy-, vagy kéttengelyű rendezettséget jelent-e? A II.2.d. ábrán látható vázlat azt sugallja, hogy a szerkezet kéttengelyű irányítottságú, amit a II.3. ábra nem támaszt alá egyértelműen. Célszerű lett volna bemutatni az egyik erre merőleges oldal képét is.

- #3. Ha a cél a forgácsok párhuzamos elrendezése volt, akkor az milyen mértékben valósult meg? Egy orientált szerkezet esetében különösen fontos szerkezeti jellemző az irányítottság mértéke, amely általában a forgácsok orientáció-eloszlásával, esetleg az orientációs tenzorral, vagy legalábbis a szerkezeti főirányokban az átlagos orientációfaktorokkal volna jellemezhető. Ilyen információ nem található az értekezésben.

- #4. A szerkezeti jellemzők mérése 20 darab négyzetes, $8 \times 8 = 64$ oszlopra felosztott forgácsteríték blokkminta 32 kerületi oszlopfelületén felvett digitalizált képeken látható, egymásra támaszkodó forgácsokon, az oszlopközépvonalak mentén történt. Az adatfelvételi eljárás, s így az adatok kapcsolata sem világos egyes vonatkozásokban.

Így nem érthető teljesen az adott forgács végének az adott oszlop középvonalától mért X_{jk} távolságának értelmezése. A bal-, vagy jobboldali végétől van szó? A II.2.d. ábra az egyik oldalfelületen a bal-, a másikon a jobboldali vég távolságát jelzi.

Másfelől, az X_{jk} vetületi méret, így, még ha kiegyenesítve minden forgács 70 mm hosszú is, akkor sem tudható, hogy a másik vége milyen távolságra van a középvonaltól, hiszen a forgács vetemedett, szabálytalan alakú és helyzetű, az orientálási igyekezet ellenére is.

Hasonlóképpen nem derül ki, hogy az L_{ijk} hossz méreteket hogyan definiáltak és/vagy hogyan határozták meg őket.

Végül kérdés, hogy a mérési eljárás kihasználta-e a blokkok sarokoszlopai különleges helyzetét, amelyek ugyanis egyes keresztirányú forgácsokra nézve a belsőkhöz képest több információt szolgáltathatnak.

Mindezekre vonatkozó megfontolások, feltételezések hiányoznak mind a mérési eljárás, mind a virtuális modell leírásából.

•#5. A II.1. táblázatban λ_b és N_{bj} rendre a b-edik blokkban az átlagos és annak j-edik oszlopában az aktuális forgácsszám. Ezek b-re (20), illetve j-re és b-re (20x32=640) a blokk-kerület mentén vett átlagai, amennyiben a λ_b az N_{bj} -k átlaga, úgy – a táblázattal szemben – meg kellene egyezzenek.

•#6. Jelölt szerint a X_{bjk} helyzeti és Δ_{bjk} forgácsköz méretek csak a képsíkkal párhuzamos forgácsokon voltak mérhetők (20. oldal). Feltehetőleg, mint összetartozó értékek. Ugyanakkor a Δ_{bjk} értékek a felvett képeken az oszlopközépvonalat metsző forgácsok között egyéb esetekben (az X_{bj} társértékek nélkül) is mérhetők lettek volna, a 100 (X_{bjk} , Δ_{bjk}) értékpárnál több Δ_{bjk} adatot szolgáltatva, elősegítve a felvételek adta információt jobb kihasználását.

Második lépésként (II.4.2. fejezet) Jelölt a mért értékekhez alkalmas eloszlásokat keresett és illeszkedés-vizsgálatokkal ellenőrizte a használhatóságukat. Az oszloponkénti N_{bj} forgácsszámokra az ilyen rendszereknél szokásos Poisson eloszlás nem adott elfogadható illeszkedést, azonban a blokkonkénti átlagokra a normális eloszlás megfelelőnek bizonyult. Ezekkel kapcsolatos kérdések, észrevételek:

•#7. A Poisson eloszlás elutasítását Jelölt a kis felbontású mintavételre, valamint arra vezette vissza, hogy az egyes blokkok egy összefüggő forgácsteríték részei helyett egymástól függetlenül készültek (23. oldal, 1. bek.).

Véleményem szerint, amellet, hogy a Poisson eloszlással szemben az N_{bj} lehetséges értékei halmaza határozottan korlátos (A II.1. táblázat alapján N_{bj} biztosan kisebb a $H/h=73,91/0,8\approx 92$, vagy sőt – a II.8. ábra alapján – $0,6H/h=44,3/0,8\approx 55$ értéknél), a fő probléma itt az, hogy a H blokkmagasságot kitöltő forgácsok számát jelentősen befolyásolja még egy tényező, a forgácsok vetemedett alakja meghatározta Δ_{bjk} értékeknek megfelelő egyfajta véletlen vastagság is, tehát az N_{bj} -t meghatározó összefüggés az értekezés (II.1) egyenlete, amely szerint:

$$N_{bj} : H = \sum_{k=1}^{N_{bj}} \Delta_{bjk} + hN_{bj} = N_{bj} \left(h + \frac{1}{N_{bj}} \sum_{k=1}^{N_{bj}} \Delta_{bjk} \right)$$

Ennek megfelelően az ismert diszkrét eloszlások mögötti véletlen hatások itt nem érvényesülhetnek tisztán, hiszen a fenti összefüggés szerint a benne szereplő változók nem teljesen függetlenek.

•#8. A λ_b blokkátlagok esetében a normális eloszlás használatát Jelölt helyesen a centrális határeloszlás tétel érvényesülésére alapította. A szimulációban ugyanakkor Poisson eloszlást alkalmazott a blokkokon belüli N_{bj} -kre (a normálisként generált λ_b értékekkel, mint paraméterekkel), azon az alapon, hogy még ez illeszkedett a legjobban a vizsgált csonkított és diszkrét eloszlások közül (23. oldal, 1.-2. bek.). Másfelől, a szimulációban alkalmazott Poissonnal közelített eloszlás paraméterei (II.2. táblázat) egy $(N, p)=(65; 0,372)$ paraméterű binomiális eloszláshoz is megfelelőnek, tehát az adott átlagérték és szórás adatokhoz jobban illeszkedőnek látszanak.

•#9. Az X_{ijk} értékek mérése csak a képsíkkal párhuzamos forgácsokon történt, ami egyértelműen csak a 20. oldalon, az utolsó bekezdésben található megjegyzésben derül ki. Ennek megfelelően a statisztikus modellben minden virtuális forgácshoz ezeket az adatokat (orientáció-információ nélkül) használta fel Jelölt, tehát a virtuális geometriai modellben minden forgács orientált, egymással párhuzamos volt. Ez a tényt már a mérések, illetve mért jellemzők leírásánál is ki kellett volna hangsúlyozni.

A II.4.3. és II.4.4. fejezetek a szimulációs eljárást és annak ötszöri futtatásával kapott virtuális modell tulajdonságait mutatják be. Az eredmények szerint a kidolgozott virtuális modell statisztikus geometriai jellemzői jól közelítik a mért adatokét.

A szimuláció során a normális eloszlással generált λ_b blokkátlagokkal meghatározott Poisson eloszlás volt a véletlen N_{bj} értékek előállításának alapja. Itt nincs megemlítve, hogy az eljárás hogyan kezeli azt a problémát, miszerint a Poisson eloszlással generált egyes N_{bj} értékek lehetnek irreálisan nagyok, sőt akár H/h -nál is nagyobbak.

A virtuális geometriai modell és a szimuláció végső célja a forgácsteríték minták lemezzé való préselése közben a nyomófeszültség-deformáció összefüggés modellezése volt (II.6. fejezet). Ehhez Jelölt a forgácsokat kéttámaszú, egyenletesen eloszló terhelésű, véletlen görbületű tartóknak tekintette, amelyek az X_{ijk} és Δ_{ijk} adatokkal meghatározott „lehajlása” (forgácsközi félüreg-magasság) a tömörítés során a blokkvastagsággal arányosan csökken a célvastagság eléréséig, vagy a forgácsok teljes egymásra fekvéséig, azaz az üregek megszűnéséig. Az egyes forgácsselemek ellenállásait összegezve az adott oszlopban ébredő feszültséget kapta. A virtuális modellre alapozott szimulációt, a feszültség-deformáció kapcsolat előállításában, a teljes konszolidáció elérése után egy nyomóvizsgálatok alapján identifikált összefüggés segítette.

Kérdések, megjegyzések:

- #10. A lehajlás egyenlet invertált formájának alkalmazása (28. old. 2. bek.) azt feltételezi, hogy egy tehermentesen görbült rúd kiegyenesítéséhez ugyanakkora megoszló terhelés szükséges, mint egy egyenes rúdnak a görbültnek megfelelő deformációjához. Itt a korlátozások között megemlítendő lett volna a kis lehajlásokra érvényes lineáris differenciálegyenletre kapható (II.3) formulára vonatkozó szokásos $\Delta_{ijk} < 0,1 \cdot L_{ijk}$ feltétel is. Kérdés, hogy ez milyen arányban teljesült a valós forgácsokat tekintve?
- #11. A Δ_{ijk} lehajlás adat értelmezése azt sugallja, hogy az egyes forgácsok egyszeresen görbült rudak; azonban a valós forgácsok általában véletlen alakú, az elcsavarodások miatt kétszer görbült felületet valósítanak meg. Kérdés, hogy milyen arányban találhatók a forgácsok között a modellként alkalmazott egyszer görbült alakok?
- #12. Megjegyzendő, hogy a megoszló terhelés intenzitását adó (II.3) egyenlet korrekt formája a következő (az eltérések nyilván gépelési hibából származnak):

$$\omega_{ijk} = \frac{\Delta_{ijk} X_{ijk}^{-1} 24EI}{L_{ijk}^3 - 2L_{ijk} X_{ijk}^2 + X_{ijk}^3}$$

A kiegyenesedett forgácsokban a préselés folytatódásával azonban nyomófeszültség ébred, amelynek leírásához – amikor a forgácsteríték összenyomódása teljesen eliminálta a forgácsközi üregeket (31. oldal) – Jelölt a (II.5) alakú nemlineáris feszültség-deformáció kapcsolatot használta. Ehhez a dimenziómentes $\Phi(\varepsilon)$ függvényt nyomóvizsgálatból meghatározva, egy 10-edfokú polinommal közelítette (II.8.1. fejezet). A szimulációban a két – a valóságban egy időben zajló, egymást kiegészítő – folyamat becslése két, egymást követő, diszjunkt deformáció-tartományban történik, a határpontban folytonos csatlakoztatással.

Kérdések, megjegyzések:

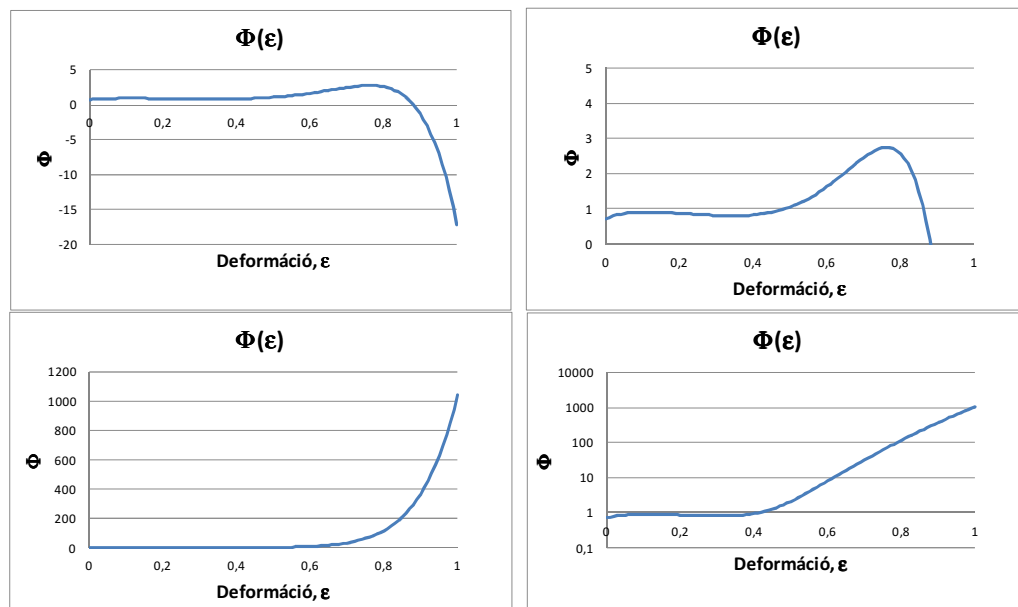
- #13. A (II.5) összefüggés kis ε értékek esetében a Hooke törvénynek megfelelő feszültség-deformáció kapcsolatot adja, következésképpen e környezetben $\Phi(\varepsilon) \approx 1$, tehát logaritmusa zérus. Ennek megfelelően a II.10. ábrán a $\Phi(\varepsilon)$ -nek nem a logaritmusa szerepel, hanem csak egy logaritmikus skálázásról van szó, így a Log Strain Function helyett Strain Function a helyes megjelölés. Másfelől, az ábrán bemutatott görbe kezdeti szakasza egy 1-értékű vízszintes egyenes, amely egy bizonyos, a 0,1 és 0,2 deformációértékek között található töréspontig terjed.

>> A közelítésre használt 10-edfokú polinom, amelynek együtthatói a II.4. táblázatban találhatók, nem rendelkezik ezekkel a tulajdonságokkal: a zérus deformáció

környezetében az értéke nem 1 (a nulladfokú tag együtthatója $\beta_0=0,71$), és nem mutat töréspontot sem, hiszen a (0, 1) intervallumban mindenütt deriválható. Feltehetőleg tehát a az alkalmazott $\Phi(\epsilon)$ nyúlásfüggvény két szakaszból áll, így a II.10. ábrán látható töréspont előtti vízszintes (1-értékű) szakasz a fenti feltétel kielégítését szolgálja. Nem érthető viszont a mért értékek által adott görbe töréspontja ezen az ábrán, hiszen ilyen törés a nagyobb nagyítású II.12.b. ábrán nem látható.

>> A fent említett 10-edfokú polinom alakja sem egyezik meg a II.10. ábrán bemutatottal, ha a II.4. táblázatban megadott együtthatókat használjuk (1. ábrán a felső két diagram). A 10-edfokú tag együtthatójának (β_{10}) előjelét pozitívrá változtatva görbe ugyan nemnegatív lett, azonban még ekkor jelentős az alaki eltérés (1. ábra alsó két diagramja). Mindezek azt jelentik, hogy – feltehetőleg gépelési hibák miatt – a II.4. táblázatban megadott együtthatók és/vagy előjelük, vagy legalábbis egy részük nem korrekt.

>> Megjegyzendő, hogy az Asby és Gibson által alkalmazott (II.6) és (II.7)-el adott $\Phi(\epsilon)$ függvény interpretációja nem teljesen világos (30. oldal). A (II.5) szerinti formulában a zérus deformációhoz zérus feszültség kell tartozzon, továbbá kis deformációkra a Hooke törvény érvényesül, tehát $\epsilon \rightarrow 0$ esetén $\Phi(\epsilon) \rightarrow 1$. Következésképpen $\epsilon \rightarrow 0$ esetén a (II.6)-ban a zárójeles, $[\cdot]^3$ formájú tényező ϵ -ban aszimptotikusan egy elsőfokú kifejezéshez kell tartson, ami viszont a (II.7) kifejezésből nem tűnik ki. Az sem látszik a (II.6) és (II.7) formulákból – mint Jelölt ezt megjegyzi (30. oldal, utolsó bek.) –, hogy $\Phi(\epsilon)=1$ lenne, ha ϵ kisebb az ϵ_y folyási deformációnál.



1. ábra. A II.4. táblázattal adott 10-edfokú polinom (felső két diagram) és annak a β_0 együttható előjelének megváltoztatása utáni görbealakja (alsó két diagram)

•#14. A modell mechanikai validációját szolgáló II. 11. és II. 12. ábrák szerint a modellezés lényegi célját jelentő konszolidálási folyamatot leíró görbe mentén, illetve annak folytatását képező, a tömör anyag nyomás alatti viselkedését leíró görbe csatlakozási pontjának környezetében számottevő eltérés látható a mérthez képest:

>> A II. 12.b. logaritmikus skálázású ábra szerint a feszültség-deformációs kapcsolat nem alulról konvex és relatív értelemben jelentős a felülbecslés a kb. 55%-os forgácsteríték tömörödés és 0,01 MPa alatt. A II.12.a. és b. diagramok alapján úgy tűnik, hogy a

statisztikus szerkezeti modellen és a kiegyenesedő forgácselemeken alapuló tömörödési folyamat leírása éppen a 0,01 MPa terhelés alatt működik, így a Jelölt által említett (35. oldal, 3. bek.) pontos becslés tartománya 0,01-4,0 MPa, kívül esik ezen, tehát az egyes oszlopokban összenyomódó forgácsok statisztikus összvastagsága és a fenomenológiai jellegű $\Phi(\epsilon)$ nyúlásfüggvény által meghatározott szakaszra vonatkozik.

>> A forgácsteríték konszolidációját és a tömör anyag viselkedését leíró görbék csatlakozása éles töréssel történik, ellentétben az itt bemutatott mért alakokkal.

Célszerű lett volna a lineáris skálán is kinagyítani a két görbét, ezen eltérések reálisabb megítéléséhez.

- #15. Megjegyzendő, hogy a mért $\Phi(\epsilon)$ görbe közelítése előnyösebbnek tűnik egy, a zérus lemezvastagságnál végtelenbe tartó (pl. hiperbolikus) függvény alkalmazásával, amellyel megoldható lenne, hogy ez az anyag-összenyomódási deformációt a préselés kezdetétől figyelembe vegye, azaz ne legyen szükség két, folytonosan kapcsolódó görbére. [pl. $\Phi(\epsilon)=1+a\epsilon^b/(1-c\epsilon^d)$; a,b,c,d illesztendő állandók]

- #16. A II.11. ábrán látható modell-validációk szerint a modellgörbék a forgácsteríték 0,6-0,7 értékű deformációja között alábecsli, kb. 0,7 felett viszont felülbecsli a nyomófeszültség értékeket, és a relatív eltérések mértéke pl. a Mat#4 esetén jelentősnek mondhatók.

A virtuális modell megfelelő alkalmazhatóságát bizonyítják mind a forgácsteríték, mint a préselt OSB lemezek esetében a II.13. ábrán bemutatott sűrűségek területi megoszlásai is.

A fentieket összefoglalva, a forgácsteríték kidolgozott és a II. fejezetben bemutatott statisztikus virtuális szerkezeti-geometriai modellje, valamint az adatbázist szolgáltató mérési eljárás lényegében (a felvetett kisebb hiányosságok ellenére is) újszerű, továbbá a statisztikus szimulációs modell a valós szerkezetet a tömörödési folyamat szempontjából megfelelő pontossággal írja le. Ez tekinthető a disszertáció **egyik** súlypontjának. A konszolidációs folyamat e modellre épített mechanikai leírása, amely a forgácsdeformációk leglényegesebb – a visszahajlításból, kiegyenesedésből származó – összetevőjét ragadja meg, a nyomófeszültség nagyságrendjét tekintve elfogadható becslést ad, azonban a részleteket tekintve a mért folyamathoz képest számottevő eltérések tapasztalhatók. A lemezpréselés második – a szimulációban elkülönített – szakaszában, az egészét tekintve már konszolidált forgácsteríték továbbpréselése során fellépő feszültségeket – az egyes oszlopokban generált forgácsok összvastagságától eltekintve – a már részben fenomenológiai jellegű szimuláció egy nyomóvizsgálatok alapján meghatározott, nemlineáris szorzótényező függvény segítségével, egy üzemi technológia tervezéséhez lényegében és összességében kielégítő pontossággal becsli.

III. fejezet

Jelölt a *III. fejezetben* ötfajta, ortotrópnak tekintett lombos faanyag irányfüggő mechanikai tulajdonságaival kapcsolatos kutatási eredményeit foglalta össze. Véleményem szerint ezek az eredmények képezik a disszertáció **második** súlypontját. A rostirányszög és az évgyűrű orientációs szöge függvényében mérésekkel meghatározott modulus és szilárdságjellemzők alakulását – statisztikai elemzés után – elméleti mechanikai összefüggésekkel írta le. A vizsgált mechanikai jellemzők a nyírószilárdság, a nyomórugalmassági modulus és nyomószilárdság, valamint a szónikus vagy dinamikus modulus voltak, amelyek irányfüggő leírásához Jelölt (E.K. Ashkenazi és Szalai J. által kidolgozott, illetve alkalmazott) ortotróp tenzoriális alapú törési feltétel formulákat, illetve ezek, valamint a kvadrátikus és a módosított Hankinson formulák általa bevezetett kombinációit használta.

A nyírási viselkedés vizsgálatához Jelölt szakítógépen alkalmazható készüléket dolgozott ki. Az eredmények szerint a vizsgált fafajták esetében a *nyírószilárdság* szignifikáns ortotrópiát mutat, amelyet az elvégzett szórásanalízis (ANOVA) is rendre igazolt. A mért (bizonyos szögértékek felett látszólagos) nyírószilárdság átlagértékeit a rostirányszög és az évgűrű orientációs szöge függvényében a fent említett modellekkel közelítette (és derékszögű koordinátarendszerben ábrázolta), amelyek közül a módosított Hankinson formulával kombinált modell szolgáltatta a legnagyobb pontosságot ($r^2=0,76...0,87$).

•#17. A III.5. ábra szerinti nyírókészülékben a próbatestet a fix támasz és a görgős támaszlap közé szorítják. Ugyanakkor a nyíróvizsgálat során a nyomóterhelés hatására a fix támasz felületén elcsúszó minta révén súrlódó erő lép fel. Kérdés, hogy ez milyen mértékű a mért nyomóerőhöz képest, és a kiértékelésben figyelembe lett-e véve?

•#18. Az alkalmazott formulák szerint a maximális nyírószilárdság az origóban várható, azonban a mérések jelentős részében (több, mint 2/3-ában) – ahogy más kutatók is tapasztalták – a 15°-os rostorientációnál jelentkezett, amelyet általában feszültségeloszlási problémával magyaráztak, és a Jelölt szerint ez további kutatásokat igényel (58. oldal). Feltehető ugyanakkor, hogy a rostok nem egészen úgy helyezkednek el a próbatest térfogatában, ahogy ez a kivágásnál a felületi rostok alapján feltételezhető lenne, ami egyúttal a várttól eltérő feszültségeloszlásban is megnyilvánulhat. Ez a próbatestek törési felületén ellenőrizhető, míg pl. végeelemes vizsgálatokkal a kis rostirányszög-változások hatása is elemezhető lenne. Kérdés, hogy Jelölt ezt a lehetőséget is vizsgálta-e, és milyen eredményre jutott?

A vizsgált faanyagok *nyomórugalmassági modulusát*, illetve *nyomószilárdságát* illető ortotrópiájának leírásához Jelölt az ortotróp anyag rugalmassági tenzorából származtatható formulákat, illetve E. K. Ashkenazi előzőhöz hasonló alakban értelmezett szilárdság tenzorából Szalai J. által levezetett összefüggést, valamint J. Bodig és B.A. Jayne kutatók Hankinson formulára alapított közelítését alkalmazta. A nyírószilárdság elemzéséhez hasonlóan, a szignifikáns ortotrópiát ANOVA vizsgálattal ellenőrizte, míg a modellek megfelelő illeszkedését, különösen az ortotróp tenzor alapú formuláknál, amagas determinációs együtthatók ($r^2=0,92-0,94$) bizonyították. Az Ashkenazi-féle törési feltétel független a deformációtól, és nem ad információt a tönkremenetel módjáról. Jelölt a tönkremeneteli mód elemzése alapján kimutatta, hogy a nyírószilárdság rostirányszög és évgűrű-orientációs szög függvényében meghatározott felületén megadható egy olyan, a próbatest aktuális szögadataihoz tartozó kritikus tartomány, amelyben a nyomóterhelés során nyírótörés alakul ki. Jelölt egyúttal arra is rámutat, hogy egy ilyen elemzés gyakorlati alkalmazása azonban – hasonlóan más kritériumokhoz – korlátozott a nyírószilárdság meghatározását illető bizonytalanságok, valamint a természetes faanyagok feltételezettől eltérő rostos szerkezete miatt.

•#19. A nyomószilárdsági eredmények hengerkoordináta rendszerben lettek ábrázolva, ahol az évgűrű-orientációs szög 0 és 90° közé esik, ezzel azt feltételezve, hogy kéttengelyű szimmetria érvényesül. Jelölt végzett vizsgálatokat arra vonatkozólag, hogy a faanyagok mutatnak-e rugalmassági és/vagy szilárdsági eltéréseket aszerint, hogy a minta a fatörzs északi, vagy déli oldaláról származik?

E fejezetben Jelölt végül furnér lemezek ortotrópiáját tárgyalja a ultrahang terjedési sebességéből meghatározott (szónikus) *dinamikus modulus* és a rostirányszög összefüggését illetően, amelynek szignifikáns voltát *műszaki (hámozott) furnér* esetében ANOVA eljárással ellenőrizte. Kimutatta, hogy a Hankinson formula és az ortotróp tenzor modell, illetve ezek általa bevezetett kombinációja magas determinációs együttható értékek mellett illeszthető a mért értékekre. Vizsgálta a dinamikus és statikus modulusok mért értékei közötti kapcsolatot is, amelyről megállapította, hogy nemlineáris, és másodfokú polinommal jól közelíthető.

- #20. Az illesztett másodfokú polinom azonban nem megy át az origón, tehát zérus dinamikus modulus esetén pozitív statikus átlagos modulus becslést ad, mint azt Jelölt meg is jegyzi (84. oldal). Az illesztés történhetett volna annak előírásával is (pl. MS Excelben), hogy a regressziós görbe teljesítse ezt a feltételt (ha a nullponteltérés kicsi, akkor a determinációs együttható is csak kicsit csökken).

A vizsgálatok szerint a *késelt (szeletelt) furnér lemezek* esetében a furnér fatörzsbeli helyzete, azaz a középvonaltól való távolsága szignifikánsan befolyásolta a rostirány szög függvényében meghatározott dinamikus modulus értékeket.

IV. fejezet

Jelölt részben a forgácslap II. fejezetben bemutatott statisztikus virtuális modelljére, illetve a réteges szerkezetek effektív hajlítómodulusának számítási módszerére, valamint a III. fejezetben ismertetett mechanikai összefüggésekre alapozva dolgozta ki a laminált furnér (LVL) és furnérszalag (PSL) tartók szerkezeti-mechanikai szimulációs modelljeit nyomás és hajlítás esetére, amelyek felépítését, működését, és az eredményeket a *IV. fejezetben* foglalta össze. Lényegében ezek az eredmények képezik az értekezés **harmadik** súlypontját.

A szerkezeti modelleknél feltette, hogy a rétegfelépítés mindkét esetben statisztikus, azonban a laminált furnérban a hosszuk mentén állandó vastagságú lemezek rostiránya minden esetben párhuzamos a tartó hosszirányú tengelyével, míg a furnérszalag tartóknál az azonos szélességű (25 mm) szalagok rostiránya párhuzamos a szalag hosszirányú tengelyével. Ugyancsak feltevés volt, hogy a semleges szál a keresztmetszet szimmetriasisíkja esik.

- #21. Ismeretes, hogy szálerősített polimereknél a húzó- és nyomóigénybevételnél mért erő-deformáció görbék jelentősen eltérnek egymástól, tehát elég nagy hajlítóigénybevételnél a húzó- és nyomófeszültségek vastagságmenti eloszlása nem középpontosan szimmetrikus, következésképpen a semleges szál sem esik a keresztmetszet szimmetriaközéppontjába. Kérdés, hogy Jelölt vizsgálta-e ennek mértékét és befolyását a modellezés eredményeire?

- #22. A szimulációs számításokhoz bevezette a terhelés (θ'), illetve a szalag/réteg (φ') orientációs szögeit (102. oldal, 1. bek.). Ezek a későbbiekben (107. oldal 2. bek.; 111. oldal IV.7. ábra) felcserélve szerepelnek.

A *laminált furnér* (LVL) esetében a rétegek száma rögzített volt (15), míg a rétegvastagságok mérések alapján meghatározott normális eloszlással generált értékek voltak, ahol a két külső és a maradék magréteget a szimulációs eljárás külön kezelte.

- #23. Nem világos, hogy a „maradék” (rest) réteg mit jelent. Megadott tartóvastagságot, amelyen belül pl. 14 réteg vastagsága generált, míg a 15. magrétegé kiadódó, vagy csak azt, hogy a magréteget generálja utoljára az eljárás?

A *furnérszalag tartók* (PSL) szerkezeti-geometriai szimulációja a tartó keresztmetszeti területére vetített szalagok (nem feltétlenül egész) számának generálása és rögzítése után, egy előre meghatározott terület-fedettségi kritérium kielégítéséig tart. Ez egyfajta inverz eljárással történik, amely először a szalagok vetületi-tömörített vastagságát generálja, majd az eredeti véletlen vastagságértékek hozzárendelése után kiszámítja a szalagok vetületi szélességét és keresztmetszetét, illetve vastagságirányú tömörödését az ugyancsak generált, a tartó hosszirányában (α) és keresztmetszetében (β) definiált szögelhajlásokkal adott orientációjuknak megfelelően (feltéve, hogy a szalag hossztengelye párhuzamos a tartó hossztengelyével).

A szalagok vetületi-tömörített „szalagterületének” (strand area) összegzése és a terület-fedettségi kritérium ellenőrzése után történik a szalagkeresztmetszetek lényegében egyenletes elrendezése a tartó keresztmetszetében. A tartóhatáron esetlegesen túlnyúló szalagrészeket az eljárás az ún. „gyűrű-konvenció” szerint kezeli (ugyan a 103. oldalon a „torus-convention”-ra

való „Hall (1988)” hivatkozásnak megfelelő publikáció egyik fejezet irodalomjegyzékében sem található), azaz feltehetőleg az ellentétes felületen épülnek be.

- #24. Nem található leírás arra nézve, hogy a szalag orientációs szögeit (α , β) hogyan mérték, és a IV. Függelék IV.1. táblázatában szereplő, a szimulációban a szögek generálására használt normális eloszlások esetében miért, milyen gyártási hatások miatt nem zérus az átlagérték (főleg a β esetében), noha a gyártás feltehetőleg erre irányul.
- #25. Nem egészen világos, hogy a „terület-fedettség” (coverage) mit definiál. Megadott tartóvastagsággal meghatározott térfogatban elhelyezkedő szalagok keresztmetszet-vetületeiből számolt átlagos tartó-keresztmetszeti kitöltöttséget?
- #26. A IV.2.b. ábra jobboldalán látható rajz – a másik hárommal és az ábrafelirattal ellentétben – nem keresztmetszet, hanem vetületi nézet, amelyben egymást metsző szalagok keresztmetszetei láthatók. A szalagok egyazon tartó-keresztmetszetben nem metszhetik egymást, így a rajz feltehetőleg egy közbülső (elrendezés előtti) szimulációs lépés eredményét, vagy a tartó térfogatában található szalagok tartóhossztengelyre merőleges vetületi keresztmetszeteit, feltehetően a végfelületek vetületeit ábrázolja.
- #27. A IV.1. ábra azt sugallja, hogy a szalagok lehetnek rövidebbek a tartó hosszánál, és nem feltétlenül a tartófelületek korlátozzák (kezdődhetnek a tartó belsejében is), azonban nem derül ki egyértelműen, hogy a szalagok hossza milyen módon meghatározott. Állandó, vagy valamilyen eljárás határozza meg?
- #28. A 2D-ös, és főleg a 3D-ös térkitöltési problémák általában nagy nehézségeket okoznak, még akkor is, ha – mint jelen esetben – nem cél az optimális kitöltés. Ha pl. a IV.2.b. ábrán a többit metsző szalagot már nem lehet (még kettévágással sem) az adott tartó-keresztmetszetben nem metszőként elhelyezni, akkor a tartó hossztengelye irányában a többi mögé tolható el, azonban ezzel esetleg jelentősen csökken a tartókeresztmetszet fedettsége. A 103. oldalon röviden leírt eljárás – miszerint „az egyenletes fedettséghez a szalagközpontokat lényegében szisztematikus módon egyenletesen osztják szét” – nem tisztázza, hogy a fedettség megtartása mellett ténylegesen milyen konvergens eljárással történik az eredetileg egymást metsző szalagkeresztmetszetek elrendezése a tartó keresztmetszetében, és a szalagoké a tartó hosszában, azaz térfogatában úgy, hogy egymást sehol ne messék.

A szimulációs eljárás a különböző orientációjú és ferdeségű szalagok, vagy lemezzrétegek húzó/nyomó rugalmassági modulusainak meghatározásához a III. fejezetben alkalmazott ortotróp modelleket használja, amelyek paraméterei generálásához normális eloszlásokat alkalmaz, majd kísérleti úton meghatározott másodrendű tömörödési görbék alapján módosítja az összetevők rugalmassági modulusait.

A kísérleti eredményekkel összevetve, az egyebekben jól működő szimulációs eljárás a laminált furnértartó (LVL) esetén szignifikánsan alábecsülte a tartó sűrűségét, ha az átlapolódó furnérlemezeket is tartalmazott, míg a furnérszalag tartók (PSL) keresztmetszetére csekély alábecslés adódott a rögzített fedettség miatt.

A hajlítóvizsgálat szimulációja kismértékű alábecslést adott az LVL esetén a hajlítómodulust illetően, míg a PSL-nél tapasztalt szignifikáns fölébecslés oka Jelölt szerint az ortotróp modell ilyen kompozitokra nem megfelelő volta, valamint a számításokban a szalagok hossztengely körüli elfordulásának (β) elhanyagolása. Ugyanakkor a PSL esetében a szalagok orientációs szögei szórását illető érzékenységi elemzés szerint a β elfordulási szög szórásának befolyása elhanyagolható, azonban az tartó hossztengelyéhez mért α irányszögé szignifikáns.

A nyomóvizsgálat szimulációja kiváló illeszkedést adott mindkét kompozit rugalmassági modulusára a tartó lapirányú középsíkja mentén, míg ezektől eltérő irányokban szignifikáns túlbecslés adódott, amit Jelölt az alkalmazott 3D-s Hankinson, illetve ortotróp tenzorikus formulák e tekintetben javítandó voltára vezetett vissza.

•#29. Nem érthető az az állítás (108. oldal, utolsó bekezdés), miszerint az A.IV.3. táblázatban a hajlítómodulus értékeket illetően „az átlagérték szórása helyett megadott szórások átlaga jobb becslést biztosít a minimumok, illetve maximumok várható értékére”, hiszen az ún. ANOVA egyenlőség szerint több méréssorozat totális szórásnégyzete az egyes sorozatok szórásnégyzetei átlaga és az átlagok totális átlagtól mért eltérésnégyzetének összege, míg a maximumok, illetve minimumok eloszlása az aszimptotikus, ún. extrémérték eloszlásokhoz tart, amelyek egyike pl. a Weibull eloszlás.

V. fejezet

Az V. fejezet, lényegében a I.-IV. fejezetekben bemutatott egyes eredmények egyfajta alkalmazásaként, újszerű, faalapú, összetett szerkezeti elemek kialakítását, tulajdonságait ismerteti, amelyek lényegében a hámozásos, illetve szeletelő eljárással kapott elemi furnér lemezek, illetve szalagok gyártásának hulladékait hasznosítják.

Az eredmények szerint a kidolgozott technológiák alkalmasak különböző szerkezetű tartók, hullámlemezek gyártására, szendvicstartók kialakítására.

Jelölt bemutatta, hogy a Taguchi statisztikai minőség szabályozási módszer alkalmas az ilyen hulladékból gyártott kompozit lapok hajlítómodulusának és hajlítószilárdságának maximumát szolgáltató szerkezeti (elsősorban a rétegszám és szalagorientáció) és gyártási paraméterek (elsősorban a tömörítési nyomás) meghatározására, amelyekkel az adott esetben a totális átlagértékekhez képest jelentős 40-50%-os növekedés érhető el. Az eredmények szerint a szignifikánsnak bizonyult paraméterek a faanyagtól és a tekintett eredményjellemzőtől függték. Az V. Függelék további eredményeket is tartalmaz, pl. a sűrűség és a szalagvégvágatok aránya függvényében, rögzített (8%) gyantatartalom mellett.

4. Tézisekről

Jelölt a tudományos eredményeit, a VI.2. fejezetben, 23 pontban foglalta össze. Ezek a II.-V. fejezetben tárgyalt négy téma köré csoportosulnak, amelyeken belüli állítások egymáshoz szorosan kapcsolódnak.

Ad. II. fejezet: OSB lemezek konszolidációjának modellezése

Az értekezésben Jelölt 8 állítást fogalmazott meg e témakörben, amelyek azonban két esetben eltérnek a téziszűzetben lévőktől. A téziszűzetben szereplő 3. állítás nem található meg az értekezés összefoglalásában, míg az értekezésbeli 8. állítás a téziszűzetben alkalmazásokat összegző, sorszámozatlan megjegyzésként jelenik meg. A bíráló feladata elsősorban a disszertáció értékelése, ezért az alábbiakban az értekezésben található állításokat értékeltem.

Az 1. állítás elfogadható, mert a kidolgozott statisztikus szerkezeti modell és szimulációs eljárás a modellezés célját illetően megfelelően írja le a forgácsteríték szerkezeti és geometriai tulajdonságait.

A 2. állítás lényegében bármely anizotróp részekből összetett anyagra igaz, míg a függés módját illetően nem ad információt, így lényegében triviálisnak tekinthető.

Az értekezésben található 3. állítás szerint „a véletlen változók generálásán alapuló modell kiterjeszthető, és könnyen módosítható, mint azt más kutatók demonstrálták”. Mivel minden Monte Carlo alapú szimuláció változógenerálást alkalmaz, és ez a módszer általános értelemben tetszőlegesen kiterjeszthető, ugyanakkor a más kutatók által kidolgozott adott kiterjesztés nem a Jelölt érdeme, ezért ebben a megfogalmazásban ez tudományos, de nem igazán újszerű eredmény. (A téziszűzet 3. pontjában szereplő „központi korlátozás tétele

(CLT)” feltehetően a központi határeloszlás tételre céloz, amelyet az értekezésben leírt eljárás helyesen alkalmaz, így ez megfelelőbb megfogalmazás.)

A 4. állítás elfogadható, azzal a megjegyzéssel, hogy az „ésszerűen jó(l)” itt lényegében üzemi technológia tervezéshez való alkalmasságot jelent.

Az 5. állítás elfogadható, de ilyen megfogalmazásban az idézett szerzők által javasolt módszer tudományos megerősítése nem túl erős, hiszen Jelölt az egyébként meglehetősen triviális alapon értelmezett $\Phi(\varepsilon)$ függvényként a javasolt (II.5) helyett egy tízedfokú, illesztett polinomot alkalmazott.

A 6. állítás elfogadható, de azzal a megjegyzéssel, hogy az állításnak a nem megfelelő kötési területek részarányát illető részére csak a 2. Függelékben találtam eredményleírást (145. oldal, utolsó bek.).

A 7. állítás is elfogadható, de hangsúlyozandó, hogy a szóban forgó pontosságnövekedés a konszolidációs folyamat szimulációjának második szakaszát érinti, ugyanakkor – a közölt mérési eredmények szerint – egyes esetekben e szakaszban is előfordulhatnak számottevő eltérések a mért folyamattól.

A 8. állítás az ipari felhasználást illető jelentőséget méltató megállapítás, tudományos tézisnek nem fogadható el.

Véleményem szerint e tárgykörben a legfontosabb eredményeket a forgácsteríték szerkezeti-geometriai modelljével kapcsolatos 1. állítás és a hozzá csatolódó 6. állítás fogalmazza meg. (Ezt egészítené ki a téziszüzetben szereplő 3. állítás is.) Lényegében és elsősorban a technológiatervezést szolgáló tudományos eredménynek tekinthetők a 4., 5. és 7. állításokban megfogalmazottak.

Ad. III. fejezet: *Keményfák ortotróp mechanikai jellemzőinek feltárása*

Hat állítás foglalja össze az e tárgykörben elért eredményeket, amelyek mindegyike elfogadható, megjegyezve, hogy a 10. állítást illetően az összehasonlítás eredményeit Jelölt vonatkozó publikációi részletezik.

A fenti témakörben a legfontosabb eredményeket a 9., 11. és 13. állítások fogalmazzák meg, míg a másik három ezek kiegészítéseinek tekinthetők.

Ad. IV. fejezet: *Szerkezeti kompozitok jellemzőinek modellezése*

A vonatkozó 4 állítás (15.-18.) mindegyike elfogadható, azzal a megjegyzéssel, hogy a 18. állítás igaz, de ebben a megfogalmazásban, tudományos értékét tekintve, gyengébb a többinél.

Ad. V. fejezet: *Új fakompozitok innovációja; paraméterek optimalizálása statisztikai módszerekkel*

Az 5 pontban megfogalmazott állításokból a 19., 20, és 21. állítások üzemi termékfejlesztéssel kapcsolatos mérnöki munka eredményei, nem tekinthetők új tudományos téziseknek. A Taguchi módszerek alapuló optimalizálásnak a 22. állítás egyik fontos eredménye, ami elfogadható, de a kapcsolódó 23. állítás voltaképpen egy összefoglaló megállapítás, amely túl általános ahhoz, hogy külön új tudományos eredménynek lehessen tekinteni.

A fenti állítások tehát a disszertációban és a vonatkozó publikációkban bizonyítottak, azonban – tudományos értéküket és helyenként újszerűségüket tekintve – néhányuk nem fogadható el egy MTA disszertáció tudományos téziseinek.

Összefoglalva, az értekezés VI.2. fejezetében, 23 pontban megfogalmazott állítás közül tehát 16 új tudományos eredménynek fogadható el, 3 alkalmazásnak, mérnöki

alkotásnak (19.-21.) tekinthető, míg a többi 4 állítás (2., 3., 8., 23.), noha igaz, de nem tekinthető új tudományos eredménynek. A legfontosabb eredményeket, véleményem szerint, az első témakörben (II. fejezet) az 1., a másodikban (III. fejezet) a 9. és a 11.-14., valamint a harmadikban (IV. fejezet) a 15.-17. állítások fogalmazzák meg.

5. Összefoglaló értékelés

A 2011-ben benyújtott értekezés eredményeit Jelölt 1993 és 2011 között – a tézisfüzet szerint – összesen 41 nemzetközi és magyar folyóiratcikkben, illetve konferenciákban, konferencia-előadásban publikálta. A Web of Science szerinti 16 angol nyelvű, külföldön megjelent, a faanyagok és faalapú kompozitok tulajdonságaival, modellezésével foglalkozó folyóiratcikkből (idegen hivatkozások száma: 96) – a tézisfüzet besorolása alapján – 9 kapcsolódik szorosan a disszertáció téziseihez, amelyek összességükben 65 idegen hivatkozást kaptak.

Jelölt tehát a tézisekhez kapcsolódó eredményeket **megfelelően publikálta** és eredményei révén figyelemre méltó **nemzetközi elismertséget** szerzett.

Összefoglalva, megállapítható, hogy Láng Elemér a korábbi tudományos fokozatának megszerzése után a faalapú kompozit szerkezetek elemzése és modellezése területén magas színvonalú tudományos munkát végzett és jelentős, nemzetközileg figyelemre méltó eredményeket ért el, hozzájárult a tudomány továbbfejlődéséhez, ezért javaslom a disszertáció **doktori védésre bocsátását** és sikeres védés esetén az **MTA Doktora cím odaítélését**.

Budapest, 2012. november 05.

Vas László Mihály
az MTA doktora