

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Vezető: Prof. Dr. Németh Róbert

Doktori program: F3 Faszerkezetek

Programvezető: Prof. Dr. Divós Ferenc

Tudományág: Anyagtudományok és technológiák

**LUCFENYŐ PRÓBATESTEK ÚJSZERŰ VÉGESELEMES MODELLJÉNEK,
VALAMINT ANYAGDEGRADÁCIÓS MODELLJÉNEK A FEJLESZTÉSE**

Király Tamás

Témavezetők: Dr. Karácsonyi Zsolt

Dr. Polgár Rudolf

Sopron

2023

Bevezetés

A fa az egyik legtermészetesebb és legemberközelebb építőanyagunk, és mint szerkezeti elem, jelentős szerepet játszik mind a régmúlt idők, mind a jelen korunkban. A jelenlegi eszközök, mint például a numerikus szimulációk, lehetővé teszik a faanyag mélyrehatóbb megismerését. Így mechanikai tulajdonságainak mélyebb megértését, valamint gazdaságilag az eddigieknél optimálisabb felhasználását. A modernkori fejlesztések a megújuló anyagokra fókuszálnak, ezáltal a faanyag kutatása az elmúlt években új lendületet vett.

Az optimális szerkezeti felhasználás elengedhetetlen feltétele, hogy minél precízebb és egyúttal gazdaságosabb eljárással állapíthassuk meg a faszervezeti elemek szilárdságtani tulajdonságait. Az informatika XX. századvégi fejlődésétől kezdve drasztikusan megnőtt a számítási kapacitás, ennek következtében a numerikus módszerek használhatósága, ezáltal a komplex végeselemes szimulációk egyre szélesebb körben nyertek teret. A faanyagok pontosabb leírásához is számos végeselemes modell, valamint a fát, mint anyagot leíró anyagmodell látott napvilágot. Kutatók az anatómiai skála széles spektrumán vizsgálódnak, próbálva minél valóságosabb absztrakciókat megállapítani, és még pontosabb szimulációkat létrehozni a faanyag vizsgálatára.

Az aktuális szakirodalmat tanulmányozva elmondható, hogy a legtöbb esetben a kutatók homogén izotróp anyagot feltételeznek, amikor a fát végeselemes módszerrel vizsgálják. A közelmúltban születettek azonban olyan kutatási eredmények, amelyek az évgyűrűk figyelembevételével kétfázisú faanyagmodellt vizsgálnak. A kihívást azonban a kétfázisú végeselemes modell létrehozása jelenti, valamint a korai- és a késői pászta anyagtulajdonságainak meghatározása.

Kutató munka célja

A kutatásom egyik célja egy olyan végeelem modellezési eljárás kidolgozása, amelynek segítségével a hibamentes Norvég lucfenyő (*picea abies*) próbatestek egyedileg is lekepezhetőek. A megfelelő módszertan kidolgozása érdekében kutatásom magában foglalja a szakirodalom áttekintését is. A próbatestek terhelés alatti viselkedésének jobb megértése érdekében szükség volt kísérletek elvégzésére is, amelyek eredményeit a kidolgozott módszertan validálására használtam fel.

Kutatásom további célja egy végeelemes törésmechanikai modell kidolgozása és paraméterezése lucfenyő próbatestekre, valamint az eredmények összehasonlítása a mérési adatokkal. Ezért szükséges volt a szimulációkhoz az anyagtulajdonságok meghatározása is. A modellezési technika egyedi próbatestekre történő alkalmazásával a további mérések eredménye jó közelítéssel előre megjósolható a szimuláció segítségével. Ilyen eredmények például az adott terhelés hatására bekövetkező lehajlás mellet a maximális teherbírás, valamint a túlterhelés alatt terjedő repedés útja.

Kutató munka tárgya

Kutatásomban a lucfenyő próbatesteket a mezo-skálán vizsgálom. A próbatestek évgyűrűmintázatát digitálisan leképezve következtetek a teherbíró képességükre és a deformációs alakjukra. Ennek megfelelően a próbatestek tönkremenetelét is vizsgálom.

Kezdetben a cél a kísérletek rekonstrukciója volt, a próbatestek bütüjéről készült fényképeknek a felhasználásával, valamint a próbatestek egyedi végeelemes modelljeinek elkészítésével. Mint minden modellezési eljárás esetében, az egyik fő kihívást a szükséges mechanikai tulajdonságok meghatározása jelenti, mivel a modell teljesítménye és előrejelző képessége nagymértékben függ ezektől a tulajdonságoktól. Kutatásomban nemcsak egy végeelemes modellezési módszert dolgoztam ki, hanem a korai- és a késői pászta anyagtulajdonságainak meghatározására is javaslatot tettem. Az egyes minták végeelemes módszerrel történő modellezéséhez egy olyan fotóanalitikus analízáló programot fejlesztettem, amely felismeri a fényképen a próbatestet és a benne lévő évgyűrűk mintázatát. A programra azért van szükség, hogy a javasolt módszerrel a késői- és korai pásztát figyelembe vevő végeelemes modellt létre lehessen hozni.

Ezt követően a végeelemes modelleket a legújabb szakirodalom alapján fejlesztettem tovább és a kísérleti eredmények alapján a lucfenyő próbatestek törésmodelljére is javaslatot

tetem, amelyet a szálerősítésű anyagok témaköréből adaptáltam. A szimulációk elvégzéséhez a tönkremeneteli modellt az ABAQUS végelelemes megoldó programba implementáltam. Kutatásomban XFEM-et használok lineárisan rugalmas törésmechanikával (*linear elastic fracture mechanics*, azaz LEFM) a repedés kiindulásának és terjedésének leírására rideg törés esetén.

Az eredmények összefoglalása

Kutatásom eredménye egy végelelemes modellezési eljárás, amely lehetővé teszi az egyedileg vizsgált hibamentes Norvég lucfenyő próbatestek teherbírásának approximációját szimuláció segítségével a mérések elvégzése előtt. További elért kutatási eredmény egy végelelemes tönkremeneteli modell, amely lehetővé teszi a repedés kiindulási pontjának és terjedési útvonalaának megállapítását a túlterhelés során.

Kutatásom első szakaszáról két tézist mutatok be, amelyek segítségével a lineárisan elasztikus tartományban a mérési eredmények végelelemes szimulációval jól reprodukálhatóak. A fejlesztett fotóanalitikus analízáló program segítségével a hibamentes lucfenyő próbatestek egyszerűsített végelelemes modelljei fényképek alapján létrehozhatóak. A tézisek alapján a korai- és a késői pászta ortotróp anyagtulajdonságaira megközelítő értékeket definiáltam.

A kutatásom második szakaszában XFEM-et használok lineárisan rugalmas törésmechanikával a repedés kiindulási pontjának és terjedésének leírására. A hibamentes lucfenyő próbatestek tönkremeneteli mechanizmusainak leírására hat tönkremeneteli kritériumot használtam. Minden egyes tönkremeneteli módhoz definiáltam egy repedésfelületre vonatkozó normálvektort, figyelembe véve a maximális és minimális főfeszültségek orientációját. Az egyedi tönkremeneteli modellt pedig FORTRAN nyelven implementáltam az ABAQUS végelelemes megoldó szolverhez.

Ezenkívül a kísérleti eredmények alapján korrelációt állapítottam meg a korai- és késői pászta aránya, a maximális teherbírás, a maximális nyúlás és lehajlás, a számított modulusok, az évgyűrű orientáció és a kigyengítés környéki évgyűrű átmérő között.

Tézisek

1. Tézis.

Az A (legmagasabb minőségi osztály) vagy B osztályú fa esetében feltételezhető, hogy az elemzett fagerenda бүтү keresztmetszetében a korai és a késői fa aránya a hossz tengelye mentén minden keresztmetszetben közel azonos.

A próbatestek vége-selemes modelljének kidolgozásához az egyedi évegyűrűmintázat figyelembe van véve. Egy saját fejlesztésű fotóanalitikus analízáló programmal elemezve a бүтү fényképeinek HSV színspektrumát, valamint a Canny élfelismerési technika felhasználásával, elkülöníthető a korai- és a késői pászta.

A korai- és a késői pászta felületi arányának meghatározásával ezen tézis szerint ez az érték térfogati arányra számítható át. A korai- és a késői pászta sűrűsége véges kis minták segítségével határozható meg. Ha a feltételezés megfelelő, akkor a megadott képletnek a gerenda mért tömegére kell vezetnie. Ez a mutató egyszerűen meghatározható és roncsolásmentes.

Az összehasonlított mérések és a bemutatott kutatás alapján készült vége-selemes modellek eredményei jó egyezést mutatnak a lineáris rugalmassági határon belül. A természetes faanyagok esetében az EUROCODE 5 legalább 1.3-szoros biztonsági tényezőt ír elő, ami nagyon optimista feltételezés. Emiatt a 30%-os hibahatáron belüli értékek jónak tekinthetők.

2. Tézis.

A keverék szabály a korai- és a késői pászta ortotróp anyagtulajdonságai, valamint sűrűsége közötti összefüggéseivel kombinálva olyan egyenletekhez vezet, amelyek segítségével meghatározhatók a Norvég lucfenyő merevségi tulajdonságai a korai- és késői pászta között.

Az elvégzett kutatás alapján a Norvég lucfenyő korai- és késői pászták anyagtulajdonságai állapíthatóak meg. A meghatározott értékek jó alapot nyújtanak a további vizsgálatokhoz. Meg kell azonban jegyezni, hogy a faanyag származásától függően szükség lehet az anyagértékek újra kalibrálására. A javasolt egyenletek lehetővé teszik az anyagtulajdonságok meghatározását vagy kalibrálását a felhasznált Norvég lucfenyő mintára vonatkozóan.

3. Tézis.

A javasolt tönkremeneteli kritériumok és tönkremeneteli feszültségértékek segítségével leírható a hibamentes Norvég lucfenyő próbatestek tönkremeneteli folyamata és a repedés terjedése rideg törés esetén.

A fa nyomó terhelésre képlékeny, húzó- és nyíró terhelésre pedig rideg viselkedést mutat, ahol mindkét tönkremeneteli mód egyszerre is előfordulhat. Azokban az esetekben, amikor a faanyag főként rideg anyagként viselkedik, a K_{Ic} törési szívóssági paraméteren alapuló lineárisan rugalmas törésmechanikai elvek alkalmasak a törési folyamat megfelelő jellemzésére. A tézis szerint, ezen esetekben a Norvég lucfenyő próbatestek tönkremenetelét hat tönkremeneteli kritériummal lehet leírni. A tönkremeneteli mechanizmusok az alábbiak: húzó és nyomó igénybevétel a három fő irányban. A tiszta nyírási módokat nem vesszem figyelembe.

Ha a hat tönkremeneteli kritérium közül legalább egy teljesül, akkor megindul a károsodás. A kritikus értéket elsőként elérő kritérium felelős a tönkremenetelért.

Az elért szimulációs eredmények, a 3. tézis hitelességét támasztják alá.

A doktori dolgozat témájához kapcsolódó publikációk:

Király T., Polgár R., Andor K. (2020): Modeling the early- and latewood annual rings as orthotropic material for FE calculation of Norway spruce timber beams using the rule of mixture. Abstract book for the 16th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium, Pollack Press, pp. 73-74, ISBN: 978-963-429-578-5

Király T. (2021): Macroscopic Material Degradation Model of Wood for XFEM using the Rule of Mixtures. Abstract book for the 17th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium, Pollack Press, pp. 147-148, ISBN: 978-963-429-811-3

Király T., Karácsonyi Zs., Polgár R., (2023): Modeling the earlywood and latewood annual rings of Norway spruce timber beams for finite element calculation. Wood Research 68 (1), pp. 28-43, DOI: 10.37763/wr.1336-4561/68.3.55857

Király T., Karácsonyi Zs. (2023): Fracture testing of edge-notched timber beams with different annual ring orientations. Wood Research, Vol. 68(3), pp. 558-571, DOI: 10.37763/wr.1336-4561/68.3.558571

Király T., Karácsonyi Zs., Polgár R. (2023): Macroscopic material degradation model of Norway spruce clear wood for XFEM. Results in Materials (*megjelenés alatt*)

A doktori dolgozat témájához kapcsolódó konferencia részvételek:

Király T. (2020): Modeling the early- and latewood annual rings as orthotropic material for FE calculation of Norway spruce timber beams using the rule of mixture. Pécs, PhD and DLA Symposium 2020, Conference presentation

Király T. (2021): Macroscopic Material Degradation Model of Wood for XFEM using the Rule of Mixtures. Pécs, PhD and DLA Symposium 2021, Conference presentation

Egyéb publikációs tevékenységek:

Király T., Primusz P. (2020): A gumiabroncs és az útpályaszerkezet érintkezési kapcsolatának elemzése végeselem módszerrel [*Finite element analysis of the tyre-road structure contact using the finite element method*]. Útügyi lapok, Vol. 8 (14), DOI: 10.36246/UL.2020.2.04

Király T., Primusz P. (2021): Ikerabroncs-terhelés hatására ébredő igénybevételek meghatározása hajlékony útpályaszerkezetben [Determination of dual-tyre loading stresses in flexible pavement structures]. Soproni Egyetem Kiadó, pp. 402-409, ISBN: 9789633343739

Király T., Primusz P. (2022): Simulation of Static Tyre – Pavement interaction using two FE Models of Different Complexity. Applied Sciences – Basel, 12 (5) Paper 2388. p24, DOI: 10.3390/app12052388

Polgár R., Bálint B.E., Horváth A., Király T. (2023): Matematika tanár szakos hallgatók oktatási készségeinek hallgatóközpontú fejlesztése mikrotanítási környezetben [Developing student-centered teaching skills for mathematics teacher students in a microlearning environment]. Dimenziók, Matematikai Közlemények.

Egyéb publikációs konferencia részvételek:

Király T. (2021): Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek elemzése végeselem-módszerrel [Finite element analysis of asphalt pavement structures]. HAPA XIV. Fiatal Mérnökök Fóruma, Conference presentation

Király T. (2022): Aszfaltburkolatú útpályaszerkezetek elemzése végeselem-módszerrel [Finite element analysis of asphalt pavement structures], HAPA XXII. Nemzetközi Aszfaltkonferencia, Conference presentation