

VÁLASZ OPPONENSI VÉLEMÉNYRE

OPPONENS:

Dr. Bojtár Imre

Egyetemi tanár

DOKTORI DOLGOZAT CÍME:

Sztochasztikus és determinisztikus modellek faalapú kompozitok fejlesztésére

SZERZŐ:

Láng Elemér Márton (2011)

Tisztelt Professzor Úr!

Köszönettel nyugtázom doktori dolgozatom írásos bírálatának kézhezvételét. Elsősorban az opponensi vélemény szakmai értékeiért valamint annak gondos összeállításba fektetett munkájáért szeretném kifejezni őszinte elismerésemet. A dolgozat kezelhetőségére, szerkesztésre és formájára tett értékelő megjegyzéseit külön megköszönöm. Kritikai és általános észrevételeire, a bírálatban megfogalmazott kérdéseire a lehetőségek szerint a véleményben megfogalmazott sorrendben adnám meg a válaszokat az alábbiak szerint.

Az általános értékelésben (A.) említett ábrák minőségével kapcsolatban nem kifogás, csak információs szinten megjegyezném, hogy a dolgozat két világrész, mintegy öt különböző számítógépén, többféle szövegszerkesztő és PDF konvertáló program használatával készült. Az ebből eredő kompatibilitási problémák teljes megszüntetését sajnos nem sikerült elérnem. Az elírások, tipográfiai hibák egy része is összeférhetlenségi jelenség. A fejezet- és oldalszámozási problémák már a *szakmai csőrlátás* következményei, ti. nem azt olvassuk, amit leírtunk, hanem azt, amit le szerettünk volna írni.

Bírálóm kifejezte azon véleményét, miszerint a Magyar Tudományos Akadémia hivatalos nyelve a magyar, ezért az Akadémiára benyújtandó tudományos dolgozatokat a nyelvvédelem érdekében magyarul kellene megfogalmazni. Véleményével teljes mértékben egyetértek. A magyar köznyelv hemzseg az olyan jövevényszavaktól, mint a *workshop*, *know-how*, *fitness*, *market*, stb. A tudományos közleményekre ez még fokozottabban érvényes. A faipari kutatásoknak csak egyetlen magyar nyelvű fóruma van, a FAIPAR című folyóirat, amely rendszertelen megjelenése miatt nem igazán kedvelt és olvasott szaklap. Ennek következtében a kutatók elsősorban külföldön publikálnak. Munkahelyi és tudományos előmenetel szempontjából a külföldi, *impakt-faktoros* publikációk - az MTA szabályai szerint is – jelentősen magasabb értéket képviselnek.

Ez ügyben látszólag ellentmondásban vagyok önmagammal. Publikációim zömében angol nyelven és külföldön jelentek meg, így kézenfekvő volt az angol nyelvi lehetőség kihasználása, elsősorban a doktori dolgozat szerkesztését elősegítendő. Nem jelentett volna különösebb problémát a dolgozat magyarra fordítása, de az ábrák jó részénél az alapadatok már elvesztek vagy az alkalmazott programok már nem álltak rendelkezésre. Ezért úgy

véltem, hogy egy idegen nyelven megírt, korrekt dolgozat nagyobb értékkel bír, mint egy kevert nyelvű tudományos írásmű.

Dr. Bojtár szakmai szempontból behatóan elemzi a disszertáció témáit meghatározó kutatások általános céljait, a probléma megközelítés elméleti és gyakorlati módszereit. Különösen örömmel vettem azt az észrevételét, hogy az egyes fejezetek, mint önálló kutatási munkák egymásra épülnek. A hasonló jellegű fizikai és analitikai vizsgálatok valóban összekötő szerepet játszanak. Kutatási/fejlesztési tevékenységeimnek globális célja a faanyag, mint újratermelhető nyersanyag jobb megismerése és hatékonyabb felhasználása volt, elsősorban faalapú kompozitok fejlesztése által. Természetesen, mint minden hosszú időtartamú vizsgálatok eredményeinél, a túlhaladottság ebben a munkában is tapasztalható.

A faanyag műszaki hasznosításával kapcsolatos kutatások több diszciplína határterületeit érintik, ezért és a gyakorlati eredményesség kényszere miatt a faanyaggal kapcsolatos kutatások csak nagy ritkán hoznak létre átütő jellegű tudományos eredményeket. Azonban úgy vélem, hogy a mérnöki, kémiai, biológiai és egyéb tudományok fejlődésének következtében kialakult analitikai módszerek és kísérleti technikák faanyagra történő adaptálásával új, eddig nem ismert eredményeket is elérhetünk. Köszönettel fogadtam bírálóm ezzel kapcsolatos észrevételeit.

Az opponensi vélemény további részében Dr. Bojtár röviden összefoglalja az egyes fejezetek tartalmát, majd külön bekezdésekben teszi meg észrevételeit kérdésekkel kiegészítve. Jelen válaszomban a könnyebb áttekinthetőség kedvéért ezeket az észrevételeket dőlt betűtípussal bemásoltam, elsősorban további bírálómra és az esetleges érdeklődő olvasókra gondolva.

- Hasonló jellegű halmazok vizsgálata végrehajtható 3D végeselemes szimulációkkal, a mai számítógépes környezetben ez nem okoz jelentős nehézséget, ráadásul az ilyen modellek segítségével a szálak közötti összetettebb kölcsönhatások nagyobb geometriai tartományokban is elemezhetők. A szerző által bemutatott első vizsgálatok óta eltelt 17 év alatt történt-e ilyen jellegű összehasonlító elemzés, akár a komplex mechanikai viselkedés elemzésére, akár az anyagmodell-alkotás létrehozására?

A véges elem módszer, ahogy azt Winkler professzor bírálatára megfogalmazott válaszomban is leírtam, a kisméretű és sztochasztikus jellegű műszaki paraméterekkel rendelkező alkotókból kialakított fa kompozitok vizsgálataira nem igazán alkalmas. A vegyes fafaj-összetételű forgácsok eltérő rugalmas tulajdonságai és az orientáltság bizonytalanságai a módszerrel nem, vagy csak nehezen kezelhetők. Talán ez az oka annak, hogy a releváns szakirodalomban nem található orientált forgácslapok véges elem analíziséről beszámoló. Ilyen analitikai és kísérleti munkát sokkal homogénebb kompozitokon ugyan végeztünk, de azok eredményei is alátámasztották fenti véleményemet (Lang and Fodor 2002).

- Véleményem szerint az egyes rétegek térbeli viselkedésének szimulációjára a 28. oldalon bemutatott kéttámaszú tartó modell helyett célszerűbb lenne egy hajlított lemez- vagy héjmodell használata, ezek analitikus összefüggései éppúgy beépíthetők lennének a szerző által használt algoritmusbba. Mi erről a jelölt véleménye?

A II.3 és II.8 ábrák alapján jogosan felvetődő kérdés a héj- vagy lemezmodell analógia használatának hiánya. A kéttámaszú tartós megközelítést másik bírálóm - Vas László Mihály professzor – is észrevételezte. Ezzel kapcsolatosan az alábbi néhány gondolatra szeretném a figyelmet felhívni. A modell kialakítása során törekedtünk az egyszerűsége, ezért egy tartó lineáris megoszló terhelését feltételeztük kiindulási alapnak. Ez számottevő egyszerűsítés, de a korábbi konszolidációs modellekhez (pontoszerű terhelések szummázása) képest jelentős pontosságot sikerült elérni, különösen az alacsony feszültségtartomány előrejelzésében. A II.1 ábra egy valós orientált terítéket ábrázol, ahol a forgácsok alakja és mérete igencsak különböző. Ugyanakkor a forgácsok térbeli görbülete nem számottevő. A teríték belső üregeinek kialakulása jórészt az egyes forgácsok alátámasztási különbségeiből adódnak. A mechanikailag és geometriailag pontos forgács szimuláció a nagyszámú, véletlen alaki és pozíciós változók miatt sajnos nem megvalósítható. Továbbá, a héjszerkezettel jellemzett forgács terhelése változik a konszolidáció alatt (ti. koncentrált, vonal, ill. felület mentén megoszló) és a Poisson hatás is számottevő lehet. A modell determinisztikus része így túlzottan komplikálttá válik. Habár a számított lehajlási ellenállások pontosabbak lennének, a modell bemeneti paramétereinek (E_b és E_c) szórása és a virtuális terítékjellemzők bizonytalanságából eredő általános hibához képest ez a pontosságnövekedés véleményem szerint elhanyagolható.

- A szerző is említi Zombori 2001-es továbbfejlesztési ajánlásait, amelyek – minden bizonnyal Zombori 2003-ban bekövetkezett halála miatt – nem teljesedtek ki további kutatásokban. Ő – többek között – felhívta a figyelmet a gyártási eljárás során létrejövő termomechanikai hatások fontosságára. Véleményével teljes mértékben egyetértve kérdezem, az azóta eltelt időben elvégzett vizsgálatokban a szerző által történt-e ilyen jellegű továbbfejlesztés, hiszen a gyakorlati alkalmazásokban – különösen az eltérő préselési technológiáknál – ennek alapvető fontossága lehet az anyag végső viselkedésére?

Zombori Balázs a transzport folyamatok (hő és tömegáramlás) modellezését végezte el PhD disszertációjában (Zombori, 2001). E munka a préselési feszültség – fajlagos deformáció viszonyait nem vizsgálta. Kutatásának célja a lapra merőleges sűrűség eloszlás kialakulásának és a préselés alatti belső hőmérséklet és gáznyomás modellezése volt. Mindezek szükségessé tették a forgácssteríték szimulációs létrehozását (Zombori et al. 2001). Zombori Balázs számos új paraméterrel és megközelítéssel módosította az általunk kialakított teríték szimulációját abból a célból, hogy a fent említett transzport folyamatok számíthatóvá váljanak. Ennek ellenére a teríték szimulációs meghatározása az általunk kialakított modell eredményeivel (horizontális sűrűség eloszlás, adhézió százalékos hibája és célvastagság) szinte megegyeztek.

A préselési hőmérséklet és nedvességtartalom hatásait a konszolidációs feszültség - deformáció alakulására a kutatási munka végén elemeztük. A korlátozott számú vizsgálatok eredményeit a mellékletben közölt ábra is jelzi (II. Függelék, A.II.3 ábra, 145. oldal). Itt lenne érdemes megjegyezni, hogy a préselési paraméterek (hőmérséklet, nedvességtartalom, présidő és nyomás) hatása a termék műszaki tulajdonságaira empirikus alapokon az üzemben történik. Itt az adott technológiai sajátosságokat/korlátokat figyelembe tudják venni, és a

rendszeres minőségellenőrzés eredményeit használják a technológiai paraméterek műszakonkénti korrigálására.

- Az alapvetően nyomási tesztekől kapott anyagmodellt használták-e a gyakorlatban, a végső formájában szerkezeti elemként alkalmazott fatartók tervezése során? Ha igen, milyen tapasztalatokat jeleztek a tervezők a modell alkalmazása során, különösen a hajlított-nyírt, vagy a hosszúidejű terhelésnek kitett szerkezeteknél?

A leírt konszolidációs modell kizárólag technológiai jellegű problémákra próbál részleges megoldást nyújtani. A forgácsterítő berendezések állításával vagy módosításával elért egyenletesebb forgácslerakódás előnyei felolelik a préselési energiaszükséglet csökkentését, az egyenletesebb horizontális térfogatsúly eloszlást valamint az alkotó elemek hatékonyabb ragasztását. A sűrűségváltozás csökkentése csak a szállítási költségeket tekintve éves szinten már több millió dolláros megtakarítást eredményezhet csak az Egyesült Államokban.

A tábla méretű és jellegű orientált forgácslapok felhasználása elsősorban a könnyűszerkezetes, fa épületek falburkolata, padlózata és tetőhéjálása céljából fejlesztették ki a drágább rétegelt lemez kiváltására. Az elmúlt húsz évben, mint I tartók gerinclemeze, a kompozit tartók gyártásánál is előtérbe került. A minőségellenőrzést Európában az ISO 9000, az amerikai kontinensen pedig az American Plywood Association – Engineered Wood Systems (APA – EWS) szabályozza és rendszeresen felügyeli. Következésképpen a gyártók felelnek a megbízható műszaki paraméterek biztosításáról, amit a tervezők közvetlenül alkalmazhatnak a szerkezetek méretezése során. A kutatóhelyeken, egyetemeken kidolgozott elméleti/gyakorlati eredmények közkincsnek tekintendők. Sajnálatos, hogy a kutatóhelyek munkájuk hasznosításáról visszajelzést sem a gyártóktól sem pedig a tervezőtől vagy véghasználótól nem kapnak. Ennek oka elsősorban cégek közötti kiélezett verseny. Néhány szakértői vélemény elkészítésére sor került, de ezek nem publikusak üzleti vagy jogi szempontok miatt. Ezért erre a kérdésre csak negatív értelemben tudok válaszolni.

- Kérem a jelöltet, ismertesse, hogy az ezen fejezetben publikált – 10-15 évvel ezelőtt keletkezett – adatbázis alkalmazására más kutató- illetve gyakorlati műhelyekben hol és milyen eredményességgel került sor (további kutatások, tervezések, ipari gyakorlat, stb.)?

A disszertáció 90. oldalán felsorolt öt, a témához kötődő publikáció 25 független idézetet kapott a világ különböző országaiból. Habár ez nem túl magas szám, de úgy vélem, hogy eredményeinket számos kutatóhelyen ismerik és számon tartják. Az adatbázis tervezési és gyakorlati alkalmazásról nincs konkrét információ. Kasal és Lehti (2003) egy kifejezetten szerkezetépítő mérnöki folyóiratban említette ez irányú fejlesztéseinket. A teherviselő fából készült szerkezetek méretezés során vagy az alapanyaggyártó tanúsítványát, vagy pedig a kisméretű próbatestek vizsgálatainak eredményeit veszik figyelembe. A mi adatbázisunk az utóbbi kategóriába tartozik. Az ilyen adatokat közvetlenül nem, csak bizonyos módosító tényezőkkel (biztonsági faktorokkal) korrigálva lehet egy tervezés során felhasználni. A tervezők azonban csak irodalmi adatként hivatkoznak az egyes fafajok alapadataira. Ugyanakkor csaknem biztosra vehető, hogy az alulhasznált lombos fajok technika szilárdság adatait valahol már alkalmazták. Szakértői vélemények megfogalmazásánál már én is

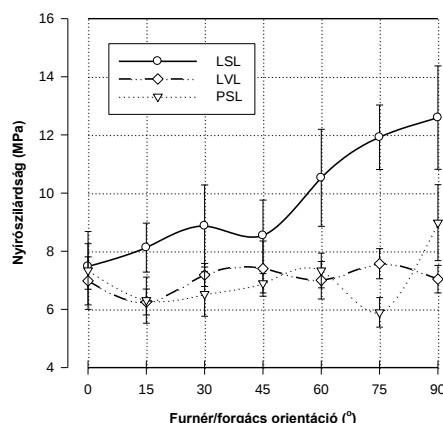
használtam az általunk összeállított adatbázist, valamint az egyes modellekkel meghatározott, irányfüggő technikai jellemzőket.

- Milyen különbségeket tapasztaltak a szerző által említett 3D modell és az eredeti, 2D változat szolgáltatta eredmények között?

A IV. fejezetben leírt, a furnérszalag (PSL) és laminált furnértartókra (LVL) kidolgozott kétdimenziós anyagmodell véleményem szerint három dimenzióban is jól alkalmazható a keresztmetszeti szimuláció többszöri ismétlésével és az eredmények átlagolásával. Az Awarde és társai által kimunkált megközelítésről és azok eredményeiről sajnos csak a két publikáció alapján van információ (Awarde et al. 2009, 2010). A közzétett eredmények szerint a 3D modell mintegy 4.5 %-osan alulbecsüli a hajlítás során mért E értékeket. A szórások tekintetében ez az alábecslés azonban 18 % körülire adódott. Ezek az eredmények az általunk létrehozott modell előrejelzéseéhez képest átlagértékben szignifikánsan jobbak, de a szórásukat tekintve a 2D modell kevésbé szélsőséges. A 3D modellel a nyomórugalmassági moduluszt nem vizsgálták, de a nyomószilárdságot igen. Az eredmények jól illeszkedtek a kísérletileg meghatározott szilárdsági adatokhoz. Megjegyzendő, hogy sem a laminált furnértartót, sem pedig a furnérszalag tartókban az E értékek ortotrópiáját nem vizsgálták.

- Milyen módon lehetne pontosabban figyelembe venni a nyírási alakváltozások hatását az egyszerűsített 2D változatban?

A szerkezeti faalapú kompozitok (SCL) nyíró-igénybevételének elemzése meglehetősen komplikált. Az alábbi ábra a hossziránnyal párhuzamos nyírószilárdság értékeit mutatja az alkotó elemek orientációjának függvényében.



Mint látható, a száliránnyal párhuzamos nyírószilárdság a laminált furnértartó (LVL) esetében majdnem állandó, és csak minimális szórást mutat. Ez a termék, egy kiegyenesített évgyűrűjű, idealizált tömör fával hasonlítható össze. A furnérszalag tartó (PSL) nyírószilárdsága már nagyobb szórással és véletlenszerű átlagokkal rendelkezik. Ez a jelenség a furnérszalagok hosszirányú rendezetlenségének következménye, amit disszertációmban α szöggel jelöltem. A laminált hosszúforgács (LSL) esetében a nyírási síkra merőleges forgácsok szálirányának véletlen orientációja miatt, az átlagos nyírószilárdság közel duplájára nő, mivel a nyírt síkban számos forgács a rostjaira (szálirányra) merőleges nyírásnak lesz kitéve. E forgácsok száma és volumene nem ismert.

Visszatérve a nyírásból eredő deformáció pontosabb előrejelzésére, úgy vélem, hogy kombinált valószínűségi - determinisztikus alapokon van lehetőség az LVL és PSL típusú kompozitok anyagmodelljeinek további finomítására. A keresztmetszet többszöri szimulációja és az eredmények átlagolása után, homogén tartóként elemezve a lehajlási viszonyokat a nyírási deformációk pontosabban meghatározhatóvá válnak. Sajnos a különféle fafajok fő anatómiai síkjaiban meghatározható csúsztató rugalmassági modulusainak szakirodalmi adatbázisa nagyon szegényes. Teherviselő, faalapú kompozitokra pedig ilyen adatbázis nem létezik.

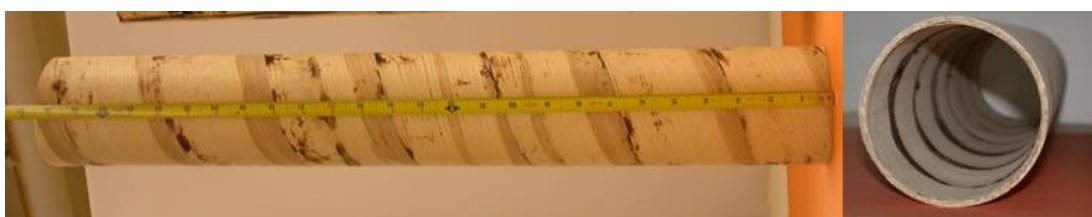
A West Virginiai Egyetem építőmérnöki intézetében torziós vizsgálatokkal kísérelték meg a fent említett kompozitok G_{xy} és G_{xz} értékeit determinálni (Davalos et al. 2002). A háromféle elméleti számítás alapján összevetett eredmények elfogadható egyezést mutattak, kivéve a laminált hosszúforgács tartó G_{xy} értékeit, ahol az előbb említett okok miatt az egyes elméletek (izotróp, Lekhnitski and Whitney) kalkulációi GPa nagyságrendű eltéréseket eredményeztek.

- Milyen mérnöki szerkezeti (teherhordó) elemeknél lát további alkalmazási lehetőségeket a dolgozatban javasolt technológiával?

A furnérhulladékból kialakított kompozitok lehetséges felhasználási területe széles és nem csak az építőiparra korlátozódik. A fából vagy fahelyettesítésű anyagokból történő könnyűszerkezetes építkezés az amerikai kontinensen igen elterjedt. Hazai viszonylatban is igény lenne gyorsan felépíthető, olcsó és energiatakarékos, lakó, vagy kommunális épületekre.

Az V. fejezetben ismertetett furnéralapú kompozitok elsősorban az I tartók öv- és gerinclemezeiként jöhetnek számításba. A hullámosított furnérhulladék lapok megnövekedett kihajlási ellenállása az I tartók koncentrált és megoszló teherviselő képességét a többszörösére emelheti. Ugyanakkor, számos összetett keresztzelvényű, kazettás tartó és/vagy oszlop készíthető a vázolt technológiával, amelynek nagy előnye, hogy tetszőleges hosszméretekben gyártható.

A csomagolás és szállítástechnika két olyan terület, ahol az ismertetett kompozitok jól hasznosíthatók lehetnének. Vegyük példának csak a rakodólap gyártást. A jó, többször használható rakodólap négy alapvető tulajdonsága: a teherbíró képesség, tartósság, könnyű súly és gyors javíthatóság. Az V.3 ábrán látható vékonyabb ($v = 12$ mm) furnérszalag panel (VSP) műszaki paramétereit tekintve sokkal jobb bármilyen raklapgyártásban használt, tömör faanyagnál. Táblaméretüknél fogva minden típusú raklap síkelemeiként felhasználható, szegezhető és csavarozható. Az alábbi ábrán látható többretegű furnérszalag csövet alkalmas hosszra vágva, a nyomó igénybevételnek kitett távtartó blokkokat alakíthatjuk ki.



A távtartókat rögzített vagy oldható kötéssel csatlakoztathatjuk a lapelemekhez. A hengeres távtartó előnye, hogy a targonca villáinak ütközése esetén kevésbé sérülékeny a mindig szálirányra merőlegesen bekövetkező erőhatások következtében. Előzetes számításaink szerint az így kialakított rakodólap súlya, a ma használatos raklapok átlagos súlyához képest, cca. 20%-al alacsonyabb. Mindezen előnyök gazdasági jelentősége úgy vélem nagyon jelentős lehet.

A TÉZISEK ÉRTÉKELÉSÉRŐL

Bojtár professzor a további két opponens, téziseimet értékelő gyakorlatától eltérően, négy fő megállapítást értelmezett, amelyek 23 altézissel kerültek meghatározásra. Itt kell megjegyeznem, hogy ez csak látszólagos ellentmondás, mivel az összehasonlítva a véleményeket, azok tartalmukban és szellemükben is szinte azonosak.

Elkövettem azt a hibát, hogy publikációk konklúziójaként kezeltem a disszertáció téziseit. A két különböző szemléletű bírálat is saját hibámnak köszönhető, mert a fejezetek számozása nem egyértelmű. A problémát nagyon egyszerűen megoldhattam volna akár a tézisek átszámozásával, vagy az „*érdemi*” szócska megfelelő helyeken történő beszúrásával.

Az első téziscsoporttal kapcsolatban annyit kéne megjegyeznem, hogy az eredeti angol nyelvű disszertációból kimaradt a 3. pont és a számozatlan utalás a hasznosításra lépett elő 8. pontként. A hiányzó tézispont az alábbi:

3. It has been proved that the central limit theorem (CLT) can be used successfully to generate discrete random deviates. [II.10, II.12]

A második téziskörrel kapcsolatos állásfoglalását tisztelettel tudomásul veszem. Ugyanakkor szeretném megjegyezni, hogy a kérdéses fejezetben ismertetett új nyírószilárdság mérési eszköz, nyírási kombinációs modell és a kritikus nyírási feszültség kontúr kidolgozásával, ha nem is radikálisan új, de eddig nem megfogalmazott ismereteket közöltünk.

A további tézispontok értékelésével teljes egészében egyetértek. Következésképpen azok kommentálását mellőzném.

Válaszom végére érve tisztelettel megköszönöm Dr. Bojtár professzor elkötelezett munkáját, ami az ilyen konstruktív opponensi vélemény összeállításához elengedhetetlenül szükséges. Dr. Bojtár kritikai észrevételeit és a kérdésekben rejlő jelzéseket, iránymutatásokat további munkám során igyekszem majd jól hasznosítani. Egyben külön is megköszönöm támogató javaslatát dolgozatom védelemre bocsátását illetően.

Tisztelettel:

Láng Elemér Márton

Sopron, 2013, Február 19.

HIVATKOZÁSOK

Arwade, A.R., P.L. Clouston and R. Winanas. 2009. Measurement and stochastic computational modeling of the elastic properties of parallel strand lumber. *J. Engrg. Mech.* 135(9):897-905.

Arwade, A.R., R. Winanas and P.L. Clouston. 2010. Variability of the compressive strength of parallel strand lumber. *J. Engrg. Mech.* 136(4):405-412.

Davalos, JF, Qiao, PZ, Wang, JL, Salim, HA and Schlussel, j. 2002. Shear Moduli of Structural Composites from Torsion Tests. *Journal of Composite Materials*, 36(10):1151-1173.

Kasal B, Leichti R J. 2005 State of the art in multiaxial phenomenological failure criteria for wood members. *PROGRESS IN STRUCTURAL ENGINEERING AND MATERIALS 7: (1)* 3-13

Lang, E. M. and T. Fodor. 2002. Finite Element Analysis of Cross-halved Joints for Structural Composites. *Wood and Fiber Science*, 34(2):251-265.

Zombori, BG.2001. Modeling the transient Effects During the Hot-Pressing of Wood-Based Composites. Ph.D. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Va. pp.212.

Zombori-BG Kamke-FA Watson-LT. 2001. Simulation of the Mat Formation Process *Wood and Fiber Science* 2001, Vol. 33, Iss. 4, pp 564-579.