

Papírrács betétes bútorlapok mechanikai tulajdonságainak modellezése végeselemes módszerrel

UTASSY Viktor¹, DÉNES Levente¹

¹Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faalapú Termékek és Technológiák Intézet

Kivonat

Az üzemanyagárak és szállítási költségek emelkedése a szállított termékek tömegének csökkentési igényét vonja maga után. Következésképpen a bútortiparban is növekszik a kereslet a fa alapanyagú könnyített lemeztermékek iránt. A már jól ismert termékek mellett az utóbbi években számos kísérlet történt új könnyűszerkezetű bútorlapok fejlesztésére, melyek közül néhány már kereskedelmi forgalomban is megtalálható. Az új termékek általános mechanikai tulajdonságait egyszerű vizsgálatokkal tudjuk meghatározni, azonban az ilyen komplex, szendvics-típusú termékek mérnöki felhasználásához viselkedésük alaposabb megértésére van szükség. Jelen kutatásban a papír méhsejtrács középrétegű lemeztermékek legfontosabb mechanikai tulajdonságait mutatjuk be, melyeket szabványos módszerekkel vizsgáltunk, illetve a deformációk és az egyes komponensekben ébredő feszültségek szimulációját végeselemes modellezéssel. A modellnél alkalmazott anyagjellemzők meghatározása célirányos vizsgálatokkal történt, az ortotrop anyagmodellek igényeinek megfelelően. A modellek igazolásához a szimulációs eredményeket az azonos fizikai modelleken végzett vizsgálatok eredményeivel hasonlítottuk össze. A feszültség-alakváltozás görbék lineáris szakaszán a feszültségek és alakváltozások szimulált és mért értékeinél jó egyezést találtunk, a modellek adekvát módon becsülik a vizsgált tulajdonságokat.

Kulcsszavak: papírrács, szendvicsszerkezet, végeselem, szimuláció, bútorlap

Modelling the mechanical properties of paper honeycomb panels using the finite element method

Abstract

Increasing fuel prices and transportation costs entail the need to reduce the weight of transported goods. Consequently, the demand for lightweight wood panels is growing in the furniture industry. In recent years, many attempts have been made to develop lightweight furniture boards, some of which can be already found on the market. The overall mechanical properties of these new products can be determined by simple tests. However, for engineering and structural applications, a thorough understanding of the behavior of such complex sandwich type panels is required. In the present study, the most important mechanical properties of paper honeycomb core panels are determined by standard methods. The deformation and the stresses are simulated thereafter, using the finite element method. The defining characteristics of the materials used in the model were determined by targeted studies, in accordance with the orthotropic material model needs. To validate the models, simulation results were compared with the results of standard destructive tests. The simulated and measured stress and deformation values show a good agreement in the linear region of the stress-strain curves. The models estimate the investigated properties adequately.

Keywords: paper honeycomb, sandwich structure, finite element, simulation, wood-based panels

Bevezetés

Az elmúlt évek termékfejlesztési irányzatait a nagyfokú változatosság, az egyediségre való törekvés, az új fejlesztésű anyagok alkalmazása (kompozitok, műanyagok, strukturált felületek, funkcionális anyagok, stb.), a különböző anyagtipusok kombinációja jellemzi. A szerkezettervezésnél, méretezésnél különös gondot kell fordítani arra, hogy az eltérő tulajdonságú, két vagy több anyagból álló szerkezeteknél mind a geometriai kialakítás, mind a teherviselés a meghatározott és elvárt esztétikai, stabilitási, szilárdsági, tartóssági követelményeknek megfeleljen. Tekintve, hogy a piaci és gazdasági elvárások a termékfejlesztési idő folyamatos csökkentése irányába mutatnak, az új és/vagy hibrid szerkezeti kapcsolatoknál a mechanikai tulajdonságok, tartósság, megbízhatóság gyors meghatározása rendkívüli fontossággal bír. Ezeknek az elvárásoknak a teljesítését leggyorsabban a különböző szimulációs és modellezési módszerek alkalmazásával tudjuk biztosítani. Ha a szimulációval meghatározott és empirikus úton ellenőrzött modellek becslési pontossága megfelelő, akkor azok a tervezési folyamatokba beépíthetők, lerövidítve a méretezési tevékenységeket és összességében a fejlesztési időt. Az adekvát modellek továbbá kiválthatják a költséges roncsolásos vizsgálatokat.

A mérnöki szerkezetek viselkedésének szimulációját sok esetben végeselemes módszerrel végzik, ami egy olyan numerikus technika, amely parciális differenciálegyenletekkel leírható problémák közelítő megoldását adja. Ilyen mérnöki szerkezetnek minősülnek a különböző réteg-felépítésű szendvicsszerkezetek is, ahol a különböző rétegek úgy vannak elrendezve, hogy egy szerkezeti egységet alkotva, a legelőnyösebb mechanikai tulajdonsággal rendelkezzenek. A szendvicsszerkezet előnye a hagyományos szerkezetekkel szemben az igen kedvező tömeg/szilárdság arány, kiváló merevség, alacsony előállítási költség, jó hő- és hangszigetelés. A borítólapok általában nagy szilárdságú, vékony lemezekből készülnek, hiszen ezek adják a szerkezet fő teherviselő részét. A középső réteg vagy maganyag általában alacsony szilárdságú és tömegű. Feladata, hogy elválassza, és meghatározott távolságban tartsa a borító rétegeket, illetve felvegye a felmerülő nyíróerőket (Kovács 1975).

Szendvicsszerkezetű lapokat sok iparág alkalmaz. Találkozhatunk velük a járműgyártásban, fém- és műanyagiparban, építőiparban, valamint megtalálhatók a faiparban is. Az utóbbi területen számos kísérlet történt könnyűszerkezetű bútorlapok fejlesztésére, melyek közül néhány már kereskedelmi forgalomban is fellelhető (EuroLight, Kaurit, DendroLight, SingCore, EconCore, SuperPan Star, PlyCorr, stb.). A hazai fejlesztések közül a furnérforgácslapok gyártástechnológiai jellemzőinek laptulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata (Szabadhegyi 1983) vagy a furnér-poliuretán hab (PUR) kompozitok fejlesztése és vizsgálata (Dénes 2008) említendő meg. Utóbbi esetben a szendvicsszerkezet középrétegét az összeforgatott szinus hullámú furnérok adják PUR hab kitöltéssel, a borítórétegeket pedig műszaki furnérok képezik egy vagy több rétegben. Az új fejlesztések eredményeként megjelenő szendvicslapok fizikai, mechanikai tulajdonságainak meghatározását, modellezését több tudományos publikációban ismertették. Különösen a fém és műanyag alapú méhsejtrács középrétegű lapok elemzésére találunk sok példát; a hasonló szerkezetű fa alapú lapok vizsgálatát kevesebb kutatás jellemzi.

Alumínium és Nomex méhsejtrács középrétegű szendvicslapok tönkremenetelét függőleges nyomásra vizsgálták Aktay és társai (Aktay 2007). Az alkalmazott mikro-mechanikai és homogenizált anyagmodellek közül az első jó egyezést mutatott a kísérleti eredményekkel, a középréteg homogén anyagként történő modellezése a számításokat felgyorsítja, de a maganyag tönkremenetelét nem képes elég pontosan becsülni.

Üvegszál erősítésű méhsejtrács szerkezetek torziós tulajdonságait kombinált analitikus és numerikus modellel vizsgálták Davalos és társai (2009). A különböző felépítésű és orientációjú minták töréscsúszójával ellenőrzött modellek becslési pontossága kielégítő.

A papír méhsejtrács mag és MDF fedőrétegű szendvicspanelnél azt találták, hogy a magvastagság/borító réteg vastagság arányának csökkenése a késztermék hajlító- és nyírórugalmassági modulusának növekedését eredményezi (Chen 2012). A növekedés jelentős, ha a vastagsági arány kisebb, mint hat.

Méhsejtrács lapok hajlító terhelés hatására létrejövő kúszását vizsgálták Chen és társai (2011). Eredményeik azt mutatják, hogy a szendvicspanel méhsejtszerkezetű mag alakja és vastagsága, valamint a borítólapok vastagsága és anyaga a kúszási viselkedést szignifikánsan befolyásolja.

Wang (2009) csomagolóanyagként használt papír méhsejtrács és karton borítólapú szendvicslapok energiaelnyelését vizsgálta. Az ejtő vizsgálatok során azt tapasztalták, hogy a szendvicslapok dinamikus becsapódási görbéje homorú és emelkedő alakú; a méhsejt cellák vastagsága és hossza jelentős hatással van a lapok csillapítási tulajdonságaira; az alkalmazott papír magasabb sűrűsége javíthatja a lapok energiaelnyelő képességét;

a rugalmas barázdált karton bordák javíthatják a papírrács kompressziós ellenállását és csillapítási tulajdonságait.

Petras és Sutcliffe (1999) méhsejtrács maggal készített szendvicsszerkezetek tönkremeneteli módjait vizsgálta 3 pontos hajlításnál. A tanulmányban egy tönkremeneteli térképet állítottak össze, melyből kiderül, hogy a mag sűrűsége, alátámasztási hossza és az alátámasztási hossz–borítólap vastagsági arány változásai milyen tönkremeneteli módokhoz vezetnek.

A tanulmányban ismertetett vizsgálat célja a papír méhsejtrács maggal és forgácslap héjakkal készített szendvicslapok szilárdságtani viselkedésének végeselemes módszerrel történő szimulálására alkalmas modell megalkotása, mely az ilyen laptermékekből készített bútorok tervezését segítheti. A megfelelő modellel kapcsolatos elvárás, hogy a bútorelemekben a használati erőhatások során fellépő alakváltozási és feszültségi állapotot a méretezéshez elegendő pontossággal jelezze. Ez végső soron a laptermék és a rétegek látszólagos rugalmassági jellemzőinek modellezéssel való meghatározását jelenti.

Anyagok és módszerek

A kísérlet során papír méhsejtrács középrétegű szendvicslapokból készült próbatesteken végeztünk merevségi és szilárdsági vizsgálatokat (hajlító, nyomó és nyíró vizsgálatot), illetve ezzel párhuzamosan a szendvicslapok mechanikai tulajdonságait becsülő végeselemes modelleket készítettünk. A kísérletekhez a FRITZ EGGER GmbH & Co. OG vállalatcsoport által gyártott, a kereskedelmi forgalomban EUROLIGHT® néven beszerezhető, 60 mm vastag könnyített bútorlapját használtuk fel. A középrétegben 0,2 mm vastag papírból készült méhsejtráccsal kikönnyített szendvicslapok 8 mm-es forgácslap fedőréteggel, és 44 mm vastag papírrács középréteggel rendelkeznek. A méhsejtrács hatszög alakú és teljes mértékben újrahasznosított papírból készül, a papír mechanikai tulajdonságait, illetve a készlapok merevségét és hajlítószilárdságát a termék műszaki adatlapja nem tartalmazza, a szakirodalomban kimondottan erre a méhsejtrács típusra vonatkozó adatokat nem találtunk.

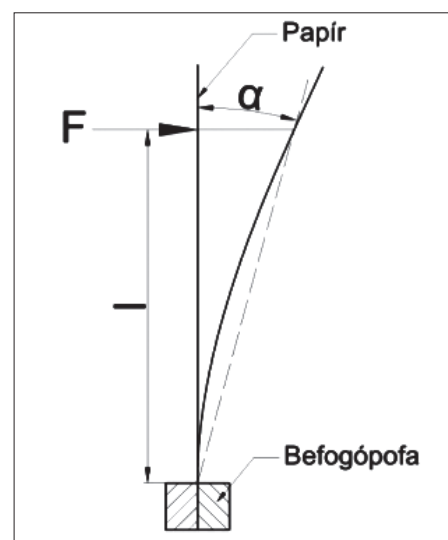
Ahhoz, hogy a lap modellezését el tudjuk végezni, ismernünk kell a középréteg és a borítólapok anyagának rugalmassági jellemzőit (rugalmassági modulusz, Poisson-állandó).

A szimulációs modellek nagyobb megbízhatósága érdekében a forgácslapok és a teljes szendvicsszerkezet mechanikai tulajdonságait törésteszték segítségével határoztuk meg, amit az is indokolt, hogy a merevségi és hajlítószilárdsági adatok nem álltak rendelkezésre. A végeselemes modellezéshez szükséges értékek hiányában a komponensek merevségi jellemzőit empirikus úton határoztuk meg.

Jóllehet, mind a forgácslap, mind a papír síkban is anizotróp, a hajlítómerevség és szilárdság esetében a forgácslap hosszirányában ébredő normálfeszültségekhez tartozó E-modulusz a mérvadó, tehát ennek az értékét kell elsősorban ismernünk. A papírrács anyagának modellezésekor azzal a feltételezéssel éltünk, hogy ez az anizotrópia figyelmen kívül hagyható, mivel itt leginkább nyomófeszültségek jelentkeznek. Első megközelítésben lineáris anyagmodelleket tételünk fel, melyekben a hajlító-, húzó- és nyomórugalmassági moduluszok értékei közel azonosak.

A 8 mm-es forgácslap rugalmassági moduluszának meghatározását az MSZ EN 310 szabvány szerint végeztük. A szabvány hárompontos hajlítás alapján határozza meg a faalapú lemezek hajlítószilárdságát és rugalmassági moduluszát. A papír leválasztása után a forgácslap belső oldaláról az epoxi gyanút nem lehetett a lap sérülése nélkül eltávolítani, ezért az esetleges ragasztó hatás kiküszöbölésére a forgácslap mintákat mindkét oldalról terheltük. Így a ragasztópermet 10 mintánál a húzott, míg 10 mintánál a nyomott oldalon volt. A próbatestek szélessége 50 ± 1 mm, alátámasztási hossza 160 mm, teljes hossza 210 mm volt, a szabvány előírásainak megfelelően. A ragasztómaradványok miatt az anyag vastagsági méreteit furnér vastagságmérővel határoztuk meg. A törővizsgálatokat minden esetben Instron 5566 típusú anyagvizsgáló berendezéssel végeztük.

A papír szabványos rugalmassági moduluszának meghatározásához 38 mm széles papírcsíkokat készítettünk. A vizsgálatokat az MSZ ISO 5628 alapján a Papíripari Kutatóintézet kétpontos papírhajlító berendezésén végeztük. A mérési elvet az 1. ábra szemlélteti. A papír rugalmassági moduluszának meghatározása:



1. ábra A papír kétpontos hajlítása
Figure 1 Two point bending of paper strips

$$E = \frac{60 \cdot F \cdot l^2}{\pi \cdot \alpha \cdot I} \quad [\text{MPa}] \quad [1]$$

ahol:

F – a hajlításhoz szükséges erő [N],

l – a vizsgálati hossz [mm],

α – a lehajlási szög [°],

I – a keresztmetszet másodrendű nyomatéka, [mm⁴]

A méréseket $\alpha=15^\circ$ -os lehajlási szöggel és $l=10$ mm vizsgálati hosszal végeztük. A papír vastagsága $v=0,2$ mm volt.

A papír eltávolítása és a méréshez való előkészítése (simítás) a papír hajlító rugalmasságát negatívan befolyásolhatja. Ezért a kapott eredményeket összehasonlítottuk a papírrács nyomásra mért merevségével. A forgácsolapok közül eltávolított papírrácsot két merev fémlemez között terheltek nyomásra (2. ábra). Mindezt a következő megfontolások alapján tettük: ha a méhsejtrács papírt a képen látható módon lapsíkra merőlegesen, teljes felületen terheljük, az alakváltozás jelentős részét a papír veszi fel, hiszen a papír merevsége nagyságrendekkel kisebb a fémlemezénél, a kisebb rugalmassági tényezője és kisebb keresztmetszeti felülete miatt. A ragasztópermet merevítő hatása megszűnik, mivel az a forgácsolap felületén marad a papír eltávolítása után, az eredményeket csupán a papírcsíkok egymáshoz ragasztásához használt ragasztó hatása torzíthatja. A csekély deformációnál elért maximális erő és a méhsejt merevítő hatása miatt a kihajlást elhanyagolhatónak tekintettük.

A papírcsíkok vastagságát mikrométerrel, a hosszát vonalzóval mértük. Az ebből számolt felülettel határoztuk meg a rugalmassági moduluszt. A vizsgálatokat ebben az esetben is Instron 5566 típusú anyagvizsgáló géppel végeztük. A papír rugalmassági tényezőjét a következő [2] összefüggéssel számoltuk:

$$E = \frac{\Delta F \cdot b}{A_p \cdot \Delta a} \quad [\text{MPa}] \quad [2]$$

ahol:

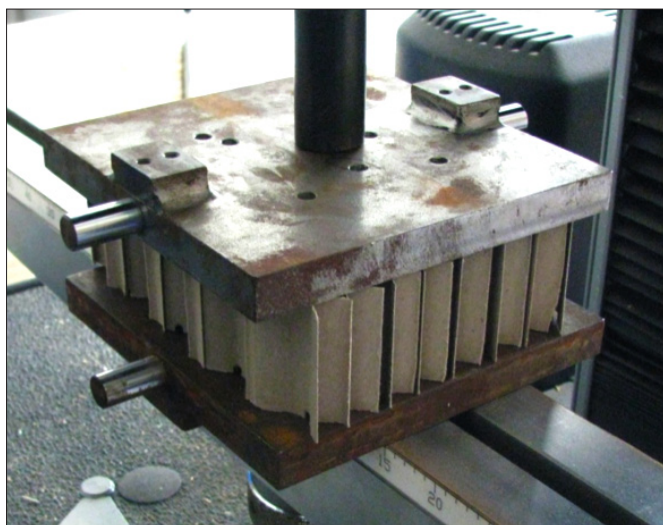
ΔF – a terhelőerő növekedése [N], a terhelőerő-alakváltozás görbe egyenes szakaszán,

b – a papírszalag szélessége [mm],

Δa – a ΔF erőhöz tartozó alakváltozás [mm],

A_p – a terhelt papírfelület [mm²].

A késztermék nyomó vizsgálatához 10 db 140x140 mm-es próbatestet készítettünk. A próbatesteket lapsíkra merőlegesen terheltek teljes felületen (3. ábra). Az ábra felső felén a papírrács tönkremenetele utáni állapotot láthatjuk, míg az alsó szimulációs ábra a lineáris szakasz végén, a tönkremenetel előtti állapotot mutatja.



2. ábra A papírrács merőleges nyomás vizsgálata
Figure 2 Perpendicular compression of paper honeycomb

A méhsejtrácsos lap nyomószilárdságának meghatározásához a fent bemutatott próbatesteken elvégzett vizsgálatokat használtuk fel. A késztermék látszólagos rugalmassági tényezőjét az [5] képlettel határoztuk meg, annyi változtatással, hogy A_p helyett a teljes terhelt lapfelülettel (A_t) számoltunk. A nyomószilárdságot a következő [3] összefüggéssel számoltuk:

$$\sigma_{nyomó} = \frac{F_{max}}{A_t} \quad [\text{MPa}] \quad [3]$$

ahol:

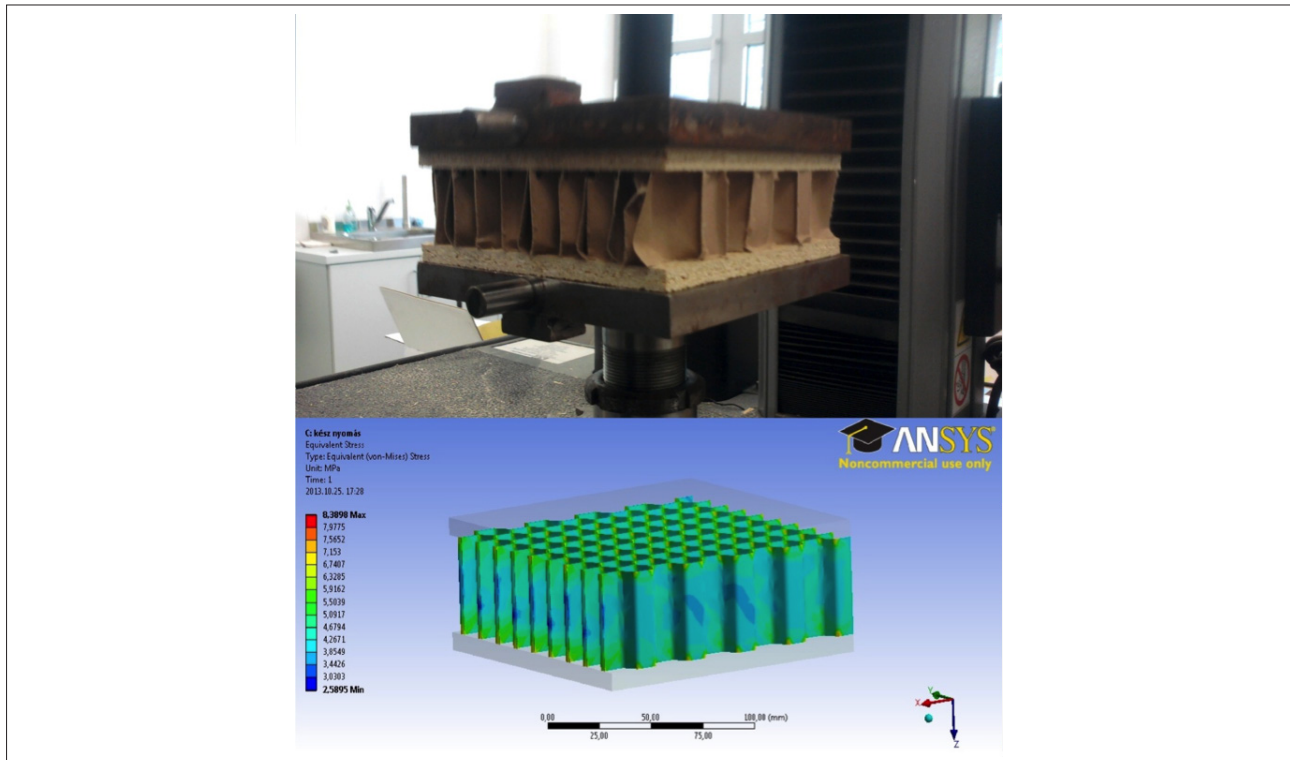
F_{max} – a maximális nyomóerő [N],

A_t – a terhelt teljes lapfelület [mm²]

A termék 3 pontos hajlító vizsgálatát szintén az MSZ EN 310-es szabvány alapján végeztük. A próbatest méretei a szabvány alapján: szélesség

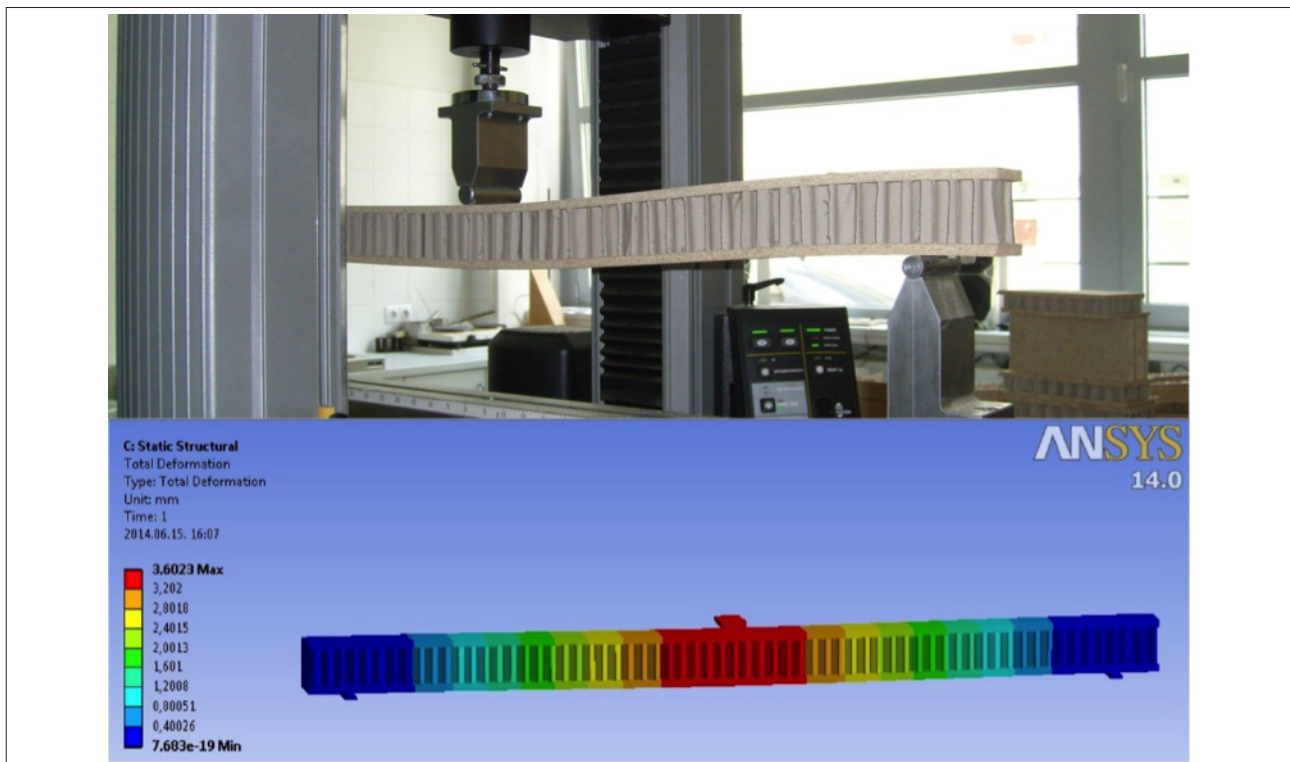
50±1 mm, alátámasztási köz 900 mm, teljes hossz 1000 mm. A vizsgálatot a 4. ábra mutatja be. A képen jól látható a szendvicsszerkezetekre jellemző, a magréteg jelentős nyírási alakváltozásával járó deformáció.

A nyíró vizsgálatokhoz a próbatesteket az 5. ábrán látható módon készítettük el. A próbatest teljes hossza 50 mm, szélessége 100 mm. A minták nyírószilárdsági értékeit szintén az EN 789-es szabvány alapján határoztuk meg.



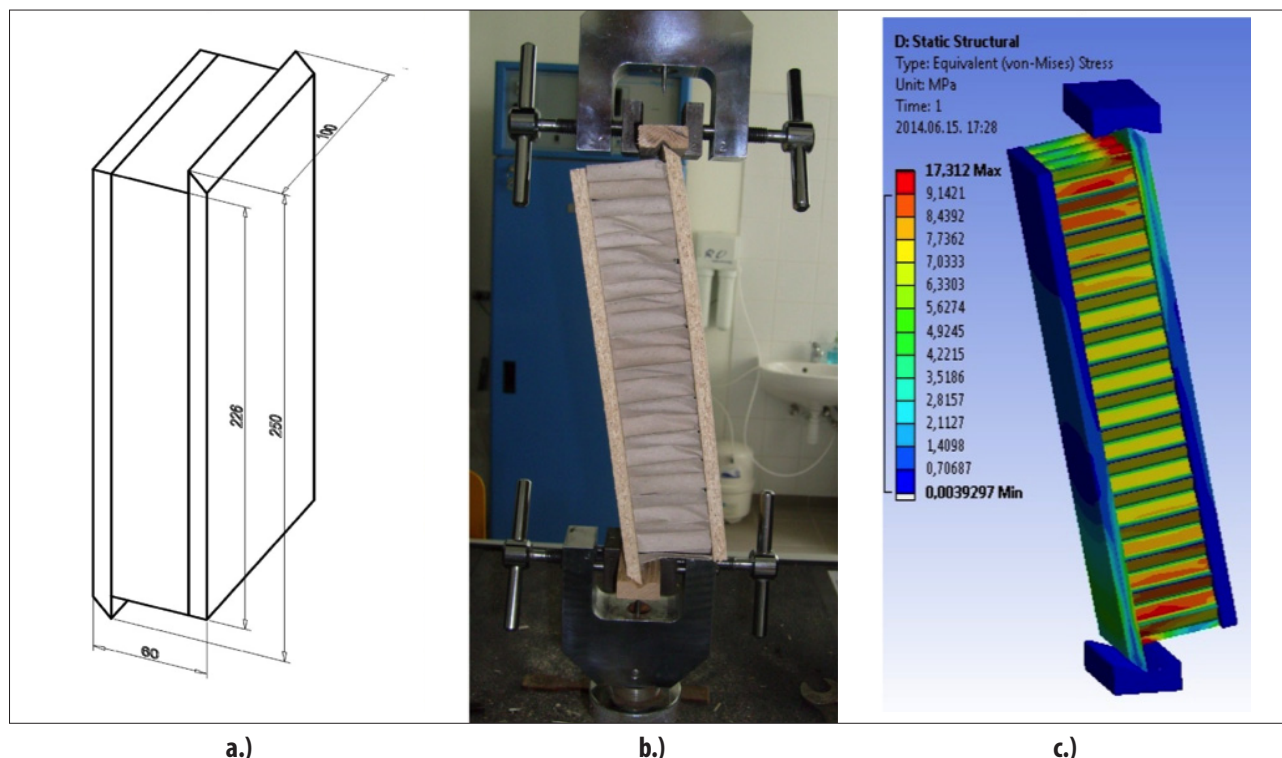
3. ábra Lapsíkra merőleges nyomás vizsgálata (fent) és a szimulált nyomószilárdság (lent)

Figure 3 Perpendicular compression of sandwich panels (up) and finite element modeling of compression strength (down)



4. ábra A hajlítás vizsgálata (fent) és a deformáció szimulációja (lent)

Figure 4 Three-point bending (up) and the simulated deformations (down)



5. ábra Nyírásra készített próbatest mérete (a), nyírás vizsgálat (b) és feszültség eloszlása (c)

Figure 5 Shear specimens (a), shear tests (b) and the stress distribution

A méhsejtrács lapon elvégzett, fent említett három vizsgálatot végelelemes szimulációval is modelleztük. Anyagmodellként – a fentebb említetteknek megfelelően – mindkét alkotóelemre (forgácslap és papírrács) izotróp, lineáris anyagmodellt alkalmaztunk. A rugalmassági modulusokat a mért átlagokkal adtuk meg, papírrácsnál a lapsíkra merőleges mérésrel kapott értéket használtuk fel. Az anyagjellemzők megadásánál szükség volt a Poisson-tényezőkre is, melyeket a forgácslapnál és a papírnál is egyaránt $\nu=0,3$ -nak feltételeztük (Bodig és Jayne 1982). A modellben a papírrácsot rögzítő ragasztórétegeket kis vastagságuk, nem folytonos, foltszerű megjelenésük miatt elhanyagoltuk. Hatásukat a papírrács élei és a borítólapok belső felületei közti kapcsolat valamint a rácspapír hullámai érintkezési felületein kialakult kapcsolat merev jellegével vettük figyelembe, tekintettel arra, hogy a megszilárdult ragasztó rugalmassági modulusa mind a papír, mind a forgácslap rugalmassági tényezőjénél lényegesen nagyobb. A modellezett próbatestek peremfeltételeit a vizsgálati szabványokban előírt megtámasztási és erő bevezetési feltételeknek megfelelően vettük fel, azaz a vizsgáló berendezés támaszainak és terhelő blokkjának a próbatesttel érintkező környezete a geometriai modellünk részét képezte. A felfekvések kontakt feltételei súrlódásmentes érintkezésre voltak beállítva.

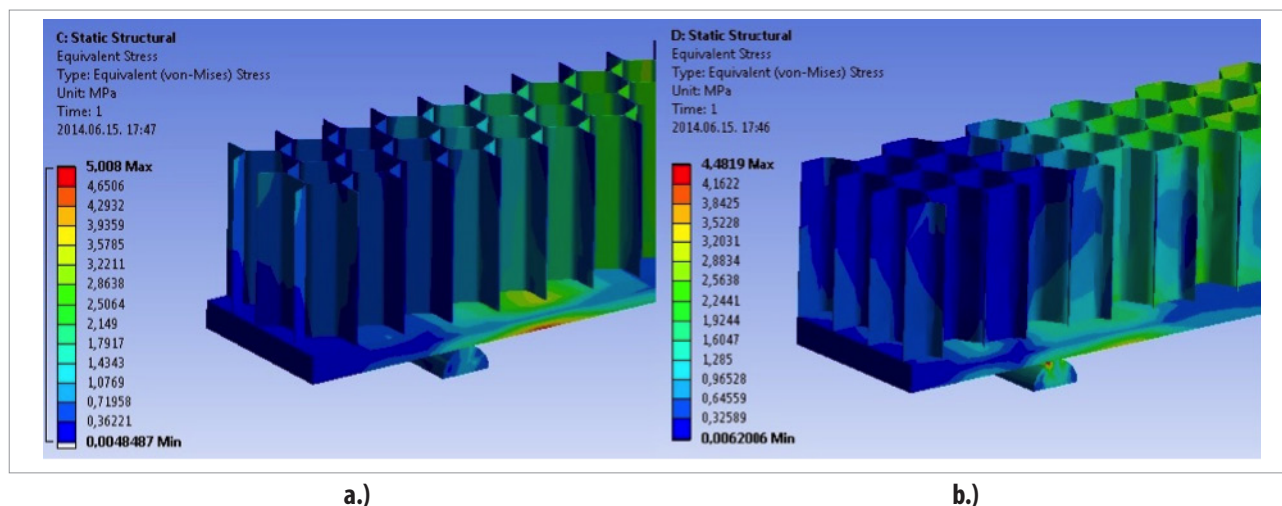
A vizsgálatot ANSYS szoftverrel végeztük. Mint a méréseknél kiderült, a lap viselkedését a sejtrács orientációja is befolyásolja. Ezért a szimulációkhoz is kétféle kialakítású modellt készítettünk. A szimulációs vizsgálat is igazolta, hogy hajlításnál és nyírásnál a méhsejtrács kialakításához alkalmazott papírszalagok főirányának és a próbatest hosszúságának viszonya nem közömbös, a hosszal párhuzamos vagy hosszra merőleges irányok eltérő eredményeket adnak (6. ábra). Ennek ismerete azért is fontos, hogy táblafelosztáskor az egyes alkatrészek főirányát ki tudjuk jelölni.

Eredmények, értékelés

A forgácslap próbatesteken meghatározott rugalmassági tényező és hajlító szilárdság átlagokat és azok statisztikai jellemzőit az 1. táblázat ismerteti.

A két minta átlagértékét kétmintás t-próbával hasonlítottuk össze, melynek eredményeként megállapítható, hogy a két vizsgált változó szignifikánsan nem különbözik. Ezért a végelelemes szimulációhoz a két mérési sorozat átlagát használtuk fel.

A papír MSZ ISO 5628 szabvány szerinti, illetve a méhsejtrács lapok lapsíkra merőleges nyomása alapján számolt adatokat a 2. táblázat tartalmazza.



6. ábra A szimulált feszültségállapot hajlító vizsgálat esetén: (a) keresztirányú (b) hosszirányú sejtrács elrendezés

Figure 6 The simulated stress state in bending: cross orientation (a) and parallel orientation (b) of the honeycomb

1. táblázat A 8 mm-es forgácslap rugalmassági tényezője

Table 1 Modulus of elasticity of the 8 mm thick particle boards

	Minta	E [Mpa]			σ [Mpa]		
		átlag	szórás		átlag	szórás	
	[db]	[MPa]	[MPa]	[%]	[MPa]	[MPa]	[%]
Ragasztóval nyomott oldalon	10	6898	469,5	6,8	19,12	1,991	10,41
Ragasztóval a húzott oldalon	10	7179	530,7	7,4	18,90	1,543	8,16

2. táblázat A papír rugalmassági modulusza

Table 2 Modulus of elasticity of the paper

	Minta	E [Mpa]		
		átlag	szórás	
	db	[Mpa]	[Mpa]	[%]
60 mm	6	587,4	20,5	3,49
60 mm, MSZ ISO 5628	32	661,4	91,3	13,80

A papír rugalmassági tényezőjét a gyártási iránnyal megegyező irányban szabványos hajlító vizsgálatot határoztuk meg, míg az arra merőleges irányban nem szabványos nyomó vizsgálatot. Az elvégzett t-próba eredménye alapján a két minta a vizsgált konfidencia szinten megegyezik. Modellünkhöz a nyomás alapján meghatározott alacsonyabb modulus értéket használtuk, így konzervatívabb becsléshez jutunk.

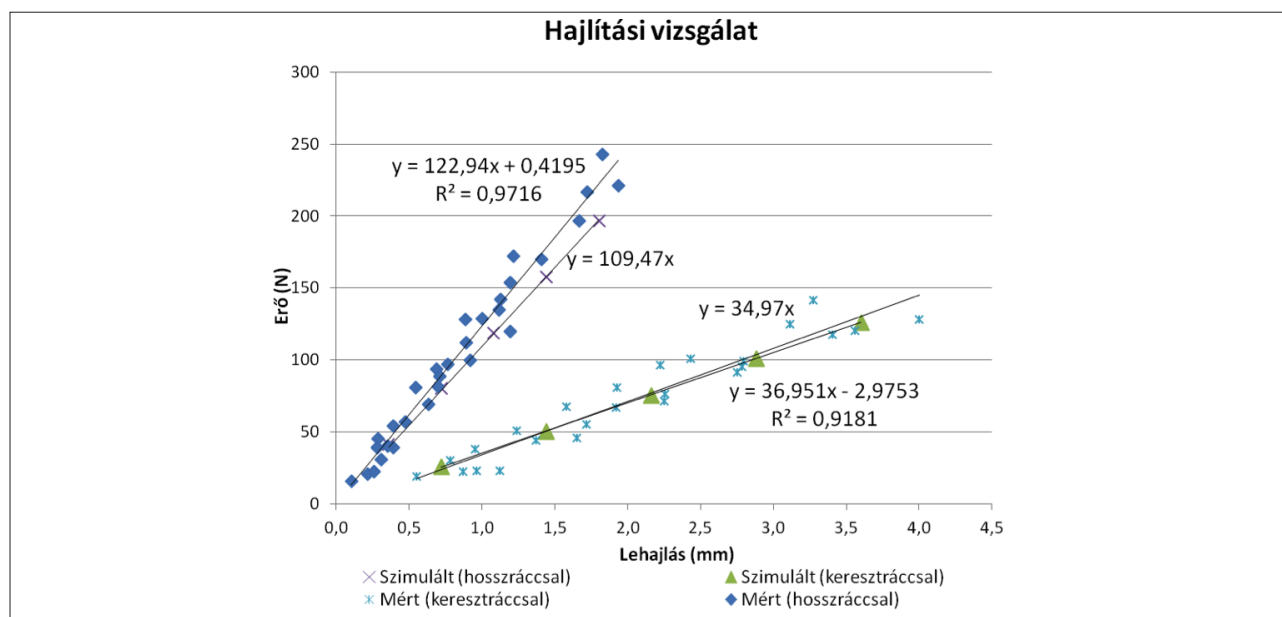
A késztermék hajlító-, nyomó- és nyírószilárdságát, valamint látszólagos rugalmassági modulusát mutatja be a 3. és 4. táblázat.

Az 7. ábra a 3-pontos hajlítás mért és a szimulált eredményeinek összehasonlítását mutatja be. Az ábrán a papírrács mindkét orientációjával készült méréseket, illetve a szimulációs modellek eredményeit is feltüntettük. A diagram a minták véletlenszerűen kiválasztott, de a törőerő 80%-át nem meghaladó terhelési pontjait és a végeselemes szimulációs görbéket mutatja a lineáris szakaszban. A kezdeti és végső referencia pontokat utóbbi esetben is véletlenszerűen választottuk, a köztes pontok közötti távolságok megegyeznek. A mért és szimulált értékeket az erő-elmozdulás diagramon összehasonlítva, jó egyezés tapasztalható. A hossz tengellyel párhuzamos rácselrendezésű minták közel háromszor merevebbnek mutatkoztak, míg hajlítószilárdságuk a 3. táblázat értékei alapján csupán 18%-kal nagyobb.

A lehajlási eredményekből a termék látszólagos hajlító rugalmassági modulusza a papírrács kétféle orientációjára, illetve mind a valóságos próbatestekre, mind a modelljükre kiszámítható. Értékeiket összehasonlítás céljából a 4. táblázatban adjuk meg.

A nyomóvizsgálat erő-elmozdulás értékeit mutatja a 8. ábra. Ebben az esetben a papírszalagok irányának nincs jelentősége. A szimulációval előállított egyenes y-metszékét tetszőlegesen, a mért értékek y metszékével közel megegyező mértékével toltuk el. A végeelem szimulációs eredmények összehasonlíthatók a mért értékekkel, a elvégzett u próba alapján a szimulált átlagérték az elfogadási tartományba esik. Mindez a mért értékek jelentős szórásának tudható be. A szabványos papírvizsgálatok magasabb rugalmassági tényezőjét alkalmazva (2. táblázat) a szimulációs modell még jobban közelíti a mért értékeket. egyezések elfogadhatóak.

A nyírás erő-elmozdulás értékeit mutatja a 9. ábra. A végeelemes szimulációt keresztrácsos és hosszrácsos elrendezéssel is elvégeztük. A szimulált és a mért eredmények jó egyezést mutatnak. A hosszrácsos elrendezésű próbatestek nyírószilárdsága 18%-kal nagyobb, mint a keresztrácsos mintáké.



7. ábra Erő-elmozdulás diagramok a mért és szimulált eredményekkel, hajlító igénybevétel esetén

Figure 7 Force-displacement diagrams of the measured and simulated values in case of bending

3. táblázat A szendvicslap hajlító-, nyomó- és nyírószilárdsága

Table 3 The bending, compression and shear strength of sandwich panels

	$\sigma_{h,keresztrács}$	$\sigma_{h,hosszrács}$	$\tau_{keresztrács}$	$\tau_{hosszrács}$	$\sigma_{nyomó}$
Mintaszám [db]	6	6	6	6	10
Átlag [Mpa]	1,262	1,491	0,0535	0,0632	0,2055
Variációs együttható [%]	23,16	26,21	2,42	2,18	5,47

4. táblázat A szendvicslap látszólagos modulusz értékei

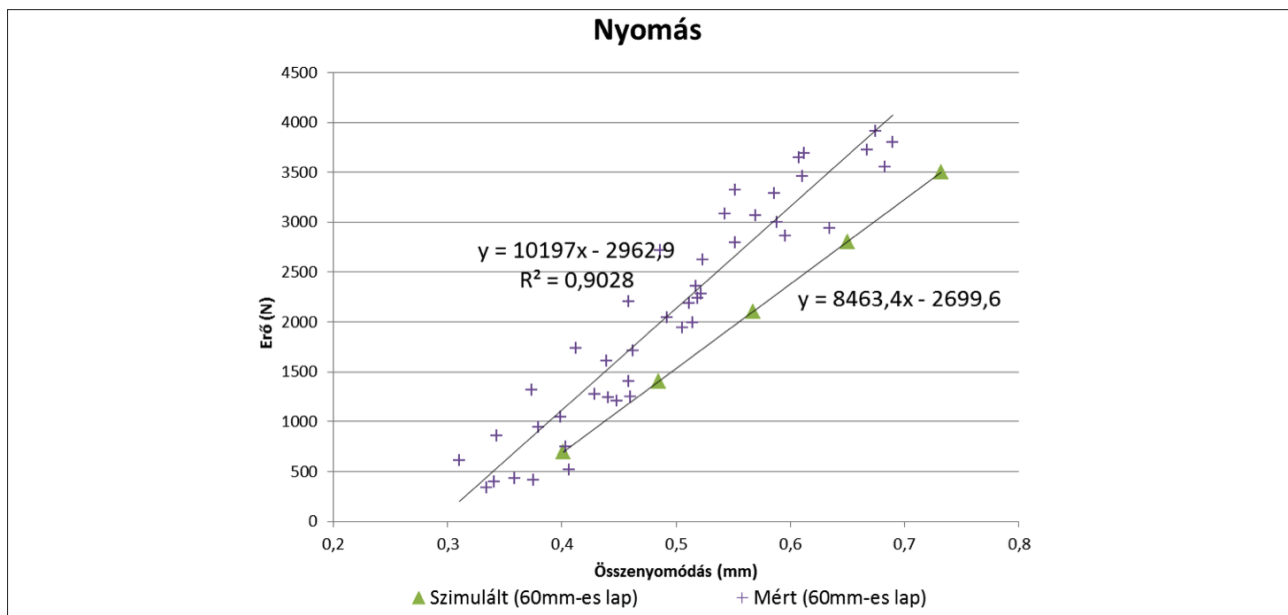
Table 4 The apparent modulus of elasticity of sandwich panels.

	$E_{h,keresztrács}$	$E_{h,hosszrács}$	$G_{keresztrács}$	$G_{hosszrács}$	$E_{nyomó}$
Mintaszám [db]	6	6	6	6	10
Átlag [Mpa]	666,7	2034,5	1,567	3,689	33,70
Variációs együttható [%]	8,74	7,40	0,13	5,27	16,97
Szimulált értékek [Mpa]	585,8	1813,2	1,661	4,153	25,89

A mért és szimulált adatokból számíthatók a papírrácsra (nem papírra) azok a nyírórugalmassági moduluszok, melyek a kétféle rácsorientációval végzett hajlítópróbáknál érvényesülnek (G_{xz} és G_{yz} , ahol z a szendvicselemez síkjára merőleges koordinátairány). Ezen moduluszok ismerete lehetővé teszi a bonyolult geometriájú papírrács folytonos térkitöltésű anyaggal való modellezését. Az eredményeket a 3. táblázat mutatja be.

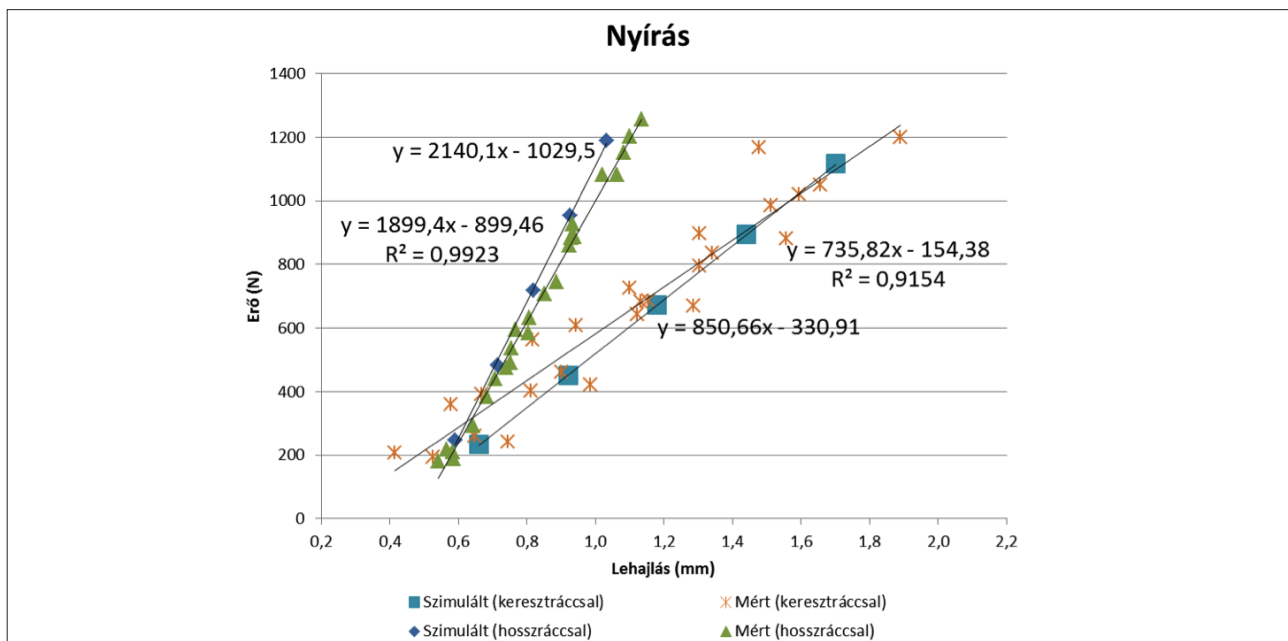
Következtetések

A vizsgálati és szimulációs eredmények alapján elmondhatjuk, hogy az erő-elmozdulás diagramok, valamint a rugalmassági tényező értékek jó egyezést mutatnak a lineáris tartományban. A mért eredmények azt mutatják, hogy a papírrács orientációja jelentős befolyással bír a lapok mechanikai tulajdonságaira. A papírmaggal rendelkező minták szimulált és mért értékei alapján a hossziránnyal párhuzamos papírelrendezésnél a hajlító merevség jelentősen magasabb a merőlegesen irányított lapokhoz képest. A magyarázatot a papírrács geometriájában kell keresni, azaz a hullámos papírcsíkok hossziránnyal párhuzamos elhelyezése nagyobb merevséget biztosít.



8. ábra A mért nyomási erő és elmozdulás értékek összehasonlítása a végeleemes szimulációval előállított eredményekkel

Figure 8 Force-displacement diagrams of the measured and simulated values in case of compression



9. ábra A mért nyírási erő és deformáció értékek összehasonlítása a végeleemes szimulációval előállított eredményekkel

Figure 9 Force-displacement diagrams of the measured and simulated values in case of shear

Ezért a lapok alkalmazása során különös figyelmet kell fordítani a papír orientációjára, hogy elkerülhető legyen a papír méhsejtrács lapokból készült bútoralkatrészek túlzott deformációja.

A továbbiakban a papír méhsejtrácsot a modellezés egyszerűsítése érdekében folytonos, ortogonálisan anizotróp anyaggal kívánjuk helyettesíteni, mely a szendvicslemez ugyanolyan deformációját eredményezi, mint a papírrács középrész. Modellezéshez a törő vizsgálatok eredményeiből a középrészre meghatározott rugalmassági modulusz értékeket, illetve a borítórétegeknél mért merevségi jellemzőket kívánjuk felhasználni.

Köszönetnyilvánítás

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

Irodalomjegyzék

- Aktay L., Alastair F., Johnson AF, Kröplin B-H. (2008) Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. Elsevier Engineering Fracture Mechanics. 75: 2616–2630
- Bodig J., Jayne BA (1982) Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- Chen Z., Yan N. (2012) Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels. Elsevier Composites: Part B. 43: 2107–2114
- Chen Z., Yan N., Deng J., Smith G. (2011) Flexural creep behavior of sandwich panels containing Kraft paper honeycomb core and wood composite skins. Elsevier Materials Science and Engineering A. 528:5621–5626
- Davalos JF, Qiao P., Ramayanam V., Shan L., Robinson J. (2009) Torsion of honeycomb FRP sandwich beams with a sinusoidal core configuration. Elsevier Composite Structures. 88: 97–111
- Dénes L., Kovács Zs., Láng EM, McGraw B. (2008) Investigation of the Compression and Bending Strength of Veneer-Polyurethane Foam Composites. Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology, November 10-12, 2008 Concepción, Chile.
- Kovács Zs. (1975) Szendvicslapok szilárdsági jellemzőinek kísérleti meghatározása. Egyetemi Doktori értekezés, Erdészeti és Faipari Egyetem Sopron
- Molnár S. (2004) Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest.
- Szabadhegyi Gy. (1983) Furnérforgácslapok gyártástechnológiai jellemzőinek laptulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata. Doktori értekezés, Erdészeti és Faipari Egyetem
- Petras A., Sutcliffe MPF (1999) Failure mode maps for honeycomb sandwich panels. Elsevier Composite Structures. 44: 237–252
- Wang D. (2009) Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels. Elsevier International Journal of Impact Engineering. 36: 110–114
- EN 789: 1995. Timber structures – Test methods – Determination of mechanical properties of wood based panel.
- MSZ EN 310: 1999. Faalapú lemezek. A hajlítószilárdság és a hajlítási rugalmassági tényező meghatározása.
- MSZ ISO 5628: 1992. A papír és karton hajlítási merevsége, statikus meghatározásának általános előírásai.