

# **DOKTORI (Ph.D) ÉRTEKEZÉS**

DÉNES LEVENTE

Nyugat-Magyarországi Egyetem  
Faipari Mérnöki Kar

2005

DÉNES LEVENTE

**ÚJ FURNÉRALAPÚ TERMÉK KIFEJLESZTÉSE  
KÍSÉRLETTERVEZÉSSEL**

Doktori (Ph.D) értekezés

Témavezető:  
Dr. Kovács Zsolt  
egyetemi tanár

Nyugat-Magyarországi Egyetem  
Faipari Mérnöki Kar

2005

# ÚJ FURNÉRALAPÚ TERMÉK KIFEJLESZTÉSE KÍSÉRLETTERVEZÉssel

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:  
Dénes Levente

Készült a Nyugat-Magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák  
Doktori Iskola  
Fafeldolgozó Technológiák programja keretében

Témavezető: Dr. Kovács Zsolt CSc.

Elfogadásra javaslom (igen / nem)

(aláírás)

A jelölt a doktori szigorlaton ..... % -ot ért el,

Sopron

.....  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen /nem)

Első bíráló (Dr. Wittmann Gyula) igen /nem

(aláírás)

Második bíráló (Dr. Szalai József) igen /nem

(aláírás)

(Esetleg harmadik bíráló (Dr. ....)) igen /nem

(aláírás)

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján.....% - ot ért el

Sopron,

.....  
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése.....

.....  
Az EDT elnöke

## Kivonat

Az európai favagyonra vonatkozó előrejelzések az erőforrások mennyiségi és minőségi változását mutatják, ami maga után vonja a feldolgozási technológiák változását is. Ezért az innováció, a kutatás-fejlesztés a faiparban is fontos szerepet játszik az olyan új technológiák és anyagok/termékek kifejlesztésében, amelyek képesek a fának, mint megújuló erőforrásnak a leghatékonyabb felhasználására és a faalapú hulladékok újrahasznosítására. Ilyen hasznosítható másodnyersanyagnak minősülhet a színfurnérgyártás során keletkező hulladék is, hiszen a fa alapanyagbázis legjobb alakú és szövetszerkezeti tulajdonságokkal bíró választékából kerül ki.

Jelen disszertáció a színfurnérgyártás ollózási eselékéből előállított, szerkezeti célra is alkalmas, új termék kifejlesztési lehetőségét vizsgálja a kísérlettervezés és válaszfelületek módszerével. Az előkísérletek igazolták, hogy az eselékből – akár önmagában felhasználva, akár más szálforgács típusú anyaggal keverve – építőipari alkalmazásokra is megfelelő termékek állíthatók elő. A szerkezeti célú felhasználás igényéből fakadóan, ultrahangos és statikus módszerekkel megállapítja a színfurnérok hajlítórugalmassági modulusának anizotrópiáját a száraz és a technológiai behatásokkal megváltoztatott bükk és juhar színfurnérokon.

Az alapanyag-jellemzők, a terítékképzés és a préselési paraméterek laptulajdonságokra gyakorolt hatásának elemzéséhez alacsony szintű, frakcionált faktoriális tervet alkalmaz. Válaszjellemzőkként a hajlítórugalmassági modulus, a hajlítószilárdság, a vastagsági dagadás és a lappal párhuzamos nyírószilárdság szerepel. A vizsgált tulajdonságokra a legnagyobb hatást a lapvastagság, a furnérszálak orientációja és a présnyomás gyakorolta, a fafaj az élre merőleges hajlítószilárdságot és rugalmassági modulusot befolyásolta erőteljesebben. A terhelés irányának függvényében mind az átlagértékek, mind a faktorhatások nagysága változik, élre merőleges irányban az átlagértékek jelentősen nagyobbak. A kifejlesztett színfurnérkompozitok vastagsági dagadása igen kedvező értékeket mutat, melyek az optimális faktorszint-kombináció kiválasztásával tovább csökkenthetők. A befolyásoló tényezők hatásának ismeretében meghatározásra kerültek azok a regressziós modellek, amelyek a válaszjellemzők változását adekvát módon becsülik. Az elkészített válaszfelületek lehetővé tették a faktorok optimális működési tartományának kijelölését.

Három technológiai paraméternek a kompozitok rugalmassági tulajdonságaira gyakorolt hatását L9 típusú Taguchi terv segítségével vizsgálta. Az elemzés a lapsűrűség és lapközépből elhelyezett végeselék-tartalom rugalmassági modulusra és hajlítószilárdságra gyakorolt lineáris hatását mutatja szignifikánsnak. A ragasztóanyag-tartalom az 5-11%-os variációs intervallumban jelentősen nem befolyásolja a lapok rugalmassági tulajdonságait.

A kutatás eredményei lehetővé teszik a teljes mértékben tervezett tulajdonságú, és a szerkezeti felhasználás igényeit is kielégítő színfurnér alapú kompozitok előállítását, valamint tulajdonságaik előrejelzését a felhasznált alapanyag ortotróp jellemzői és gyártási paraméterei alapján.

## **Development of a new veneer based composite using the experimental design method**

### **Abstract**

Engineered wood products (EWPs) mean the future of wood-based construction materials because they offer the best hope for incorporating technological changes that make forest products cost competitive with all alternative materials. This dissertation describes the use of sliced veneer waste as base material for producing new types of engineered wood products. In the first part estimated changes in quality and quantity of the European forest resources are reviewed to forecast the available base material for this composite. Pilot study was completed to verify the applicability of sliced veneer waste for composite panels manufacturing. The study includes the assessment of the orthotropic elastic properties of the veneers. The effect of the strand geometry and parameters related to mat formation and pressing process were estimated using the experimental design method. Employing a fractional factorial and an L<sub>9</sub> type Taguchi designs it was possible to quantify the factor's effect, to determine the optimal factor's level combination, to establish the regression models of the important characteristics. Using the results the elastic properties, thickness swelling and internal bond strength of the sliced veneer based composites can be modeled in advance.

## Tartalomjegyzék

1. A faanyagkészletek jövőbeni alakulása és az ebből fakadó kutatási feladatok .....	11
2. Kutatási célkitűzések .....	16
3. Tudományos előzmények .....	18
3.1. Műszaki fatermékek modellezése .....	18
3.2. Kísérlettervezés a faiparban .....	21
3.3. Faanyagjellemzők vizsgálata roncsolásmentes (ultrahangos) módszerrel .....	24
3.3.1. Elméleti háttér .....	24
3.3.2. Az ultrahangos vizsgálatok előzményei .....	25
4. Előkísérletek: új típusú műszaki fatermékek előállítása a színfurnérok ollózási eselékéből ..	28
4.1. A késelési eselék keletkezése .....	28
4.2. Gazdasági szempontok .....	29
4.3. Anyag és módszer .....	30
4.4. Eredmények .....	30
5. Színfurnérok hajlítórugalmassági modulusának anizotrópiája .....	33
5.1. Az anizotrópia becslésére alkalmazott modellek .....	33
5.2. Vizsgálati módszerek, próbatestek kialakítása .....	33
5.2.1. A dinamikus rugalmassági modulus meghatározása ultrahanggal .....	34
5.2.2. A statikus rugalmassági modulus meghatározása hajlító vizsgálattal .....	35
5.3. Eredmények .....	36
6. Tervezett kísérletek: eszköz az irányított tulajdonságú, robusztus termék előállításához .....	41
6.1. A kísérlettervezés módszertana .....	41
6.1.1. Faktoriális kísérleti tervek .....	42
6.1.2. Adatelemzés, kiértékelés .....	46
6.2. A Taguchi féle minőségjavító kísérlettervezés .....	48
6.2.1. Bevezetés .....	48
6.2.2. A Taguchi-féle minőség .....	48
6.2.3. A veszteségfüggvény .....	50
6.3. A Taguchi-féle kísérlettervezés .....	52
6.3.1. A paraméter-tervezés .....	52
6.3.2. A jel-zaj viszony .....	55
7. Tervezett tulajdonságú kompozit termék kifejlesztése kísérlettervezéssel .....	58
7.1. Anyag és módszer .....	58
7.2. A hajlítórugalmassági modulus eredményeinek kiértékelése .....	64
7.2.1. Elemzések a lapra merőleges rugalmassági modulus átlagértékeire .....	64
7.2.2. Elemzések az élre merőleges rugalmassági modulus átlagértékeire .....	67
7.3. Elemzések a három párhuzamos kísérleti beállítás és a kölcsönhatások figyelembevételével .....	70
7.3.1. A lapra merőleges rugalmassági modulus eredményeinek kiértékelése .....	70
7.3.2. Az élre merőleges rugalmassági modulus eredményeinek kiértékelése .....	76
7.4. A hajlítószilárdságra kapott adatok kiértékelése .....	80
7.5. A vastagsági dagadás mérési eredményeinek kiértékelése .....	86
7.6. A nyírószilárdság vizsgálati eredményeinek kiértékelése .....	90
8. A rugalmas tulajdonságokat befolyásoló technológiai paraméterek vizsgálata L <sub>9</sub> típusú Taguchi terv segítségével .....	94
8.1. Anyag és módszer .....	94
8.2. Eredmények .....	95

---

8.3. Az eredmények korrigálása a lapsűrűség értékei alapján .....	101
8.4. Optimalizálás .....	112
9. Az eredmények összefoglalása .....	116
10. Új tudományos eredmények és azok hasznosítása .....	119
10.1. Tézisek .....	119
10.2. Az eredmények hasznosítása, további feladatok .....	121
11. Irodalomjegyzék .....	122
12. Mellékletek .....	130
12.1. Melléklet: Színfurnérok hajlítórugalmissági modulusának anizotrópiája .....	131
12.2. Melléklet: A hajlítórugalmissági modulus eredményeinek elemzése .....	135
12.3. Melléklet: A faktorok között fellépő kölcsönhatások, a lapra merőleges hajlító rugalmassági modulus esetén .....	138
12.4. Melléklet: A faktorok között fellépő kölcsönhatások az élre merőleges hajlító rugalmassági modulus esetén .....	141
12.5. Melléklet: Válaszfelületek a lapra merőleges hajlítórugalmissági modulusra, optimális faktorkombináció esetén .....	144
12.6. Melléklet: Válaszfelületek az élre merőleges hajlítórugalmissági modulusra, optimális faktorkombináció esetén .....	149
12.7. Melléklet: A hajlítórugalmissági modulus eredményeinek kiegészítő elemzése .....	154
12.8. Melléklet: A hajlítószilárdságra vonatkozó elemzések eredményei .....	157
12.9. Melléklet: Válaszfelületek a lapra merőleges hajlítószilárdságra, optimális faktorkombináció esetén .....	165
12.10. Melléklet: Válaszfelületek az élre merőleges hajlítószilárdságra, optimális faktorkombináció esetén .....	170
12.11. Melléklet: A vastagsági dagadás értékeinek elemzése .....	175
12.12. Melléklet: A nyírószilárdság értékeinek elemzése .....	178
12.13. Melléklet: A sűrűség és rugalmassági modulus, illetve a hajlítószilárdság kapcsolata .....	181
12.14. Melléklet: Kiegészítő elemzések az L9 Taguchi tervhez .....	185
Köszönetnyilvánítás .....	189

## Ábrajegyzék

1.1. ábra A világ hengeres iparifa szükségletének különböző becslései .....	11
1.2. ábra A világ természetes erdőből származó hengeres iparifa kínálatának becslése .....	12
1.3. ábra Európa favagyónának alakulása .....	13
1.4. ábra A hibák keletkezésének és megszüntetésének helye, eloszlása a termékciklus során ...	15
4.1. ábra A színfurnérgyártás műveletei: a – hasítás; b – ollózás .....	28
4.2. ábra Színfurnérollózáskor keletkező eseléktípusok .....	28
4.3. ábra Az európai furnérlap-termelés fajokonkénti megoszlása .....	29
4.4. ábra Különböző szerkezeti anyagok termékéletgöribén elfoglalt helye .....	30
4.5. ábra Színfurnérok ollózási eselékéből készült kompozitok .....	32
5.1. ábra Ultrahangos vizsgálati berendezés .....	34
5.2. ábra Az ultrahang terjedési idejének korrekciója .....	34
5.3. ábra Kétpontos statikus hajlítás .....	35
5.4. ábra A vizsgálatokhoz alkalmazott próbatestek szabásmintája .....	35
5.5. ábra A hangsebesség mért értékei és az ortotrop tenzor-elmélet alapján illesztett görbék ....	36
5.6. ábra A hangsebesség mért értékei és a módosított Hankinson egyenlet alapján illesztett görbék .....	37
5.7. ábra A dinamikus rugalmassági modulus változása a rostirány függvényében és a módosított Hankinson-függvény alapján illesztett görbék .....	38
5.8. ábra A mügyanta sűrűség-növelő hatása .....	38
5.9. ábra A száraz és a sűrűséggel korrigált gyantás színfurnérok dinamikus rugalmassági modulusának változása a rostirány függvényében és a módosított Hankinson függvény görbéi .....	39
5.10. ábra A dinamikus és a statikus rugalmassági modulus változása a rostirány függvényében, a módosított Hankinson függvénnyel modellezve .....	40
5.11. ábra A dinamikus és statikus rugalmassági modulusok hányadosának változása a rostiránnyal bezárt szög függvényében .....	40
6.1. ábra A termék-előállítási folyamat általános modellje .....	41
6.2. ábra Háromtényezős teljes faktoriális tervek geometriai ábrázolása két (a) és három (b) beállítási szinttel .....	43
6.3. ábra Lapon centrált (a) és elforgatható (b) kompozíciós tervek két tényezőre .....	45
6.4. ábra Háromszintes tervek lineáris és négyzetes kontrasztjai .....	45
6.5. ábra A Taguchi módszer folyamatábrája .....	50
6.6. ábra A négyzetes veszteségfüggvény .....	51
6.7. ábra Külső-belső mátrix elrendezésű kísérleti terv .....	54
6.8. ábra Két faktor hatásábrája kölcsönhatás nélkül .....	56
6.9. ábra Két faktor hatásábrája kölcsönhatással .....	57
7.1. ábra Hossztoldás és orientáció .....	58
7.2. ábra A lapok hőmérsékletváltozása az idő és vastagság függvényében .....	59
7.3. ábra A hőpréselés idő-nyomás diagramja .....	60
7.4. ábra A próbatestek szabásmintája .....	60
7.5. ábra 27 típusú kétszintes teljes faktoriális terv geometriai ábrázolása .....	61
7.6. ábra 27-3IV típusú részfaktoriális terv kísérleti pontjainak térbeli elhelyezkedése .....	61
7.7. ábra A faktorok főhatásainak Gauss papíros ábrázolása .....	66
7.8. ábra Pareto diagram az élre merőleges rugalmassági modulusra .....	68
7.9. ábra A rugalmassági modulus hatásaiból .....	68
7.10. ábra Maradék a kísérletek elvégzésének sorrendjében .....	69



7.11. ábra Standardizált maradékok a mért értékek függvényében .....	69
7.12. ábra A maradékok Gauss-papíros ábrázolása .....	69
7.13. ábra A lapra merőleges rugalmassági modulus átlagának és szórásának összefüggése .....	71
7.14. ábra A fafaj-szálforgács-szélesség, lapvastagság-orientáció és nyomás-hőmérséklet lehetséges kölcsönhatások ábrázolása .....	73
7.15. ábra A nyomás, orientáció és lapvastagság közötti fellépő lehetséges kölcsönhatás .....	74
7.16. ábra A lapra merőleges rugalmassági modulus válaszfelülete a lapvastagság és orientáció változásának függvényében, bükk lapok esetében .....	74
7.17. ábra A lapra merőleges rugalmassági modulus válaszfelülete a lapvastagság és orientáció változásának függvényében, juhar lapok esetében .....	75
7.18. ábra A faktorok szórásra gyakorolt hatásábrája .....	75
7.19. ábra A faktorok szórásra gyakorolt hatásának Gauss-papíros ábrázolása.....	76
7.20. ábra A faktorok és kölcsönhatások rugalmassági modulusra gyakorolt hatásai .....	78
7.21. ábra Az élre merőleges rugalmassági modulus szintvonalas ábrái a lapvastagság és orientáció változásának függvényében .....	78
7.22. ábra A faktorok szórásra gyakorolt hatásának Gauss-papíros ábrázolása.....	79
7.23. ábra A reziduális négyzetösszeg változása $\lambda$ függvényében .....	81
7.24. ábra A lapra merőleges hajlítózsilárdság válaszfelületei a lapvastagság és orientáció változásának függvényében .....	82
7.25. ábra A lapra merőleges hajlítózsilárdság szintvonalas ábrái a nyomás és hőmérséklet változásának függvényében .....	83
7.26. ábra A faktorok és kölcsönhatások hajlítózsilárdságra gyakorolt hatásai .....	84
7.27. ábra Az élre merőleges hajlítózsilárdság válaszfelületei a lapvastagság és orientáció változásának függvényében .....	85
7.28. ábra Az élre merőleges hajlítózsilárdság szintvonalas ábrái nyomás és hőmérséklet változásának függvényében .....	85
7.29. ábra A reziduális négyzetösszeg változása $\lambda$ függvényében .....	88
7.30. ábra A faktorok hatása a vastagsági dagadásra .....	88
7.31. ábra A vastagsági dagadás szintvonalas ábrái a nyomás és szálforgács-szélesség változásának függvényében .....	89
7.32. ábra A lapok síkjában működő nyírás vizsgálati elrendezése (a.) és néhány jellegzetes töréskép (b) .....	90
7.33. ábra A faktorok nyírózsilárdságra gyakorolt hatásábrája .....	91
7.34. ábra A nyírózsilárdság válaszfelülete az orientáció és présnyomás változásának függvényében.....	93
7.35. ábra A nyírózsilárdság szintvonalas ábrái a présnyomás és préshőmérséklet változásának függvényében.....	93
8.1. ábra Az L9 Taguchi terv geometriai ábrázolása .....	95
8.2. ábra Ollózási eselékből készített kompozitok szerkezete (a) és a rugalmassági tulajdonságok meghatározásához alkalmazott mérőberendezés (b) .....	95
8.3. ábra Az egyes faktorszintekhez tartozó átlagos hatás .....	97
8.4. ábra A faktorok hatásának Gauss-papíros ábrázolása .....	98
8.5. ábra A rugalmassági modulus válaszfelülete a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében .....	100
8.6. ábra A hajlítózsilárdság válaszfelülete a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében.....	100
8.7. ábra Az egyes kísérleti beállításokra kapott lapok próbatesteinek sűrűség-eloszlása .....	102
8.8. ábra A kompozitok térfogati sűrűségének Gauss-papíros ábrázolása .....	102

---

8.9. ábra A kompozitok térfogati sűrűségének sűrűségfüggvénye .....	103
8.10. ábra A sűrűség és mechanikai tulajdonságok lineáris függvénykapcsolata .....	103
8.11. ábra A korrigált faktorszintekhez tartozó hatásdiagramok .....	105
8.12. ábra A korrigált faktorhatások Gauss-papíros ábrázolása .....	106
8.13. ábra A hajlítórugalmassági modulus változásának szintvonalas ábrázolása a lapsűrűség és végeselék-tartalom függvényében .....	107
8.14. ábra A hajlítoszilárdság változásának szintvonalas ábrázolása a lapsűrűség és végeselék-tartalom függvényében .....	108
8.15. ábra A jellemző hajlítórugalmassági modulus válaszfelülete a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében .....	111
8.16. ábra A jellemző hajlítoszilárdság válaszfelülete a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében .....	111
8.17. ábra A becsült értékek és a kívánatosság kapcsolata .....	113
8.18. ábra Kívánatossági válaszfelület a lapsűrűség és ragasztóanyag-tartalom változásának függvényében .....	114
8.19. ábra Kívánatossági válaszfelület a végeselék-tartalom és ragasztóanyag-tartalom változásának függvényében .....	114
8.20. ábra Kívánatossági válaszfelület a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében .....	115

## Táblázatok jegyzéke

4.1. táblázat Színfurnérok ollózási eselékéből készült kompozitok rugalmassági tulajdonságai .	31
5.1. táblázat A hangsebesség értékei a rostirány függvényében .....	36
5.2. táblázat A dinamikus hajlítórugalmassági modulus értékei a rostirány függvényében .....	37
5.3. táblázat A statikus rugalmassági modulus értékei .....	39
6.1. táblázat $2^3$ típusú kísérleti terv mátrixa .....	43
7.1. táblázat A kísérletbe bevont változók és beállítási szintjeik .....	58
7.2. táblázat A felhasznált fenol-formaldehid műgyanta műszaki jellemzői .....	59
7.3. táblázat $2^{7-3}_{IV}$ típusú kétszintes faktoriális kísérleti terv mátrixa .....	62
7.4. táblázat A rugalmassági modulusra kapott értékek összesítő táblázata .....	64
7.5. táblázat A faktorok hatása a lapra merőleges rugalmassági modulusra .....	65
7.6. táblázat A tényezők hatásának varianciaanalízise, $MOE_{lap}$ .....	66
7.7. táblázat A faktorok főhatása az élre merőleges rugalmassági modulusra .....	67
7.8. táblázat A tényezők hatásának varianciaanalízise, $MOE_{él}$ .....	67
7.9. táblázat A hatások és kölcsönhatások nagysága a lapra merőleges rugalmassági modulus esetén.....	71
7.10. táblázat A lapra merőleges rugalmassági modulusz mért és becsült értékei .....	72
7.11. táblázat A hatások és kölcsönhatások nagysága az élre merőleges rugalmassági modulusz esetén.....	77
7.12. táblázat A hajlítószilárdságok összesítő táblázata .....	80
7.13. táblázat A hatások és kölcsönhatások nagysága a lapra merőleges hajlítószilárdság esetén	82
7.14. táblázat A hatások és kölcsönhatások nagysága az élre merőleges hajlítószilárdság esetén	83
7.15. táblázat $2^{6-3}_{III}$ típusú kétszintes faktoriális kísérleti terv mátrixa és a kapott eredmények ..	87
7.16. táblázat A lapsíkkal párhuzamos nyírószilárdság eredményei .....	91
7.17. táblázat A redukált modell varianciaanalízise .....	92
8.1. táblázat A kiválasztott faktorok és beállítási szintjeik .....	94
8.2. táblázat Az $L_9$ Taguchi terv kísérleti mátrixa .....	95
8.3. táblázat A kísérleti beállításokra kapott rugalmassági tulajdonságok .....	96
8.4. táblázat A faktorok hatása .....	96
8.5. táblázat A faktorhatások ANOVA-táblája (a - MOE; b - MOR).....	97
8.6. táblázat A faktorhatások négyzetösszegeinek felbontása lineáris és kvadratikus összetevekre.....	98
8.7. táblázat Eredmények a sűrűségek illeszkedésének statisztikai próbáira .....	102
8.8. táblázat A sűrűség tervezett beállítási szintje szerint korrigált rugalmas tulajdonságok .....	104
8.9. táblázat A faktorok korrigált hatása .....	105
8.10. táblázat ANOVA táblázatok a korrigált értékekre (a – MOE; b – MOR).....	105
8.11. táblázat Az optimális faktorkombinációkhoz tartozó hatások .....	106
8.12. táblázat A hajlítórugalmassági tulajdonságok 5%-os kvantilisei .....	109
8.13. táblázat Néhány műszaki fatermék rugalmas jellemzője .....	109
8.14. táblázat Szilárdsági osztályok és jellemző értékek lombos fafajokra (MSZ EN 338 szerint).....	110

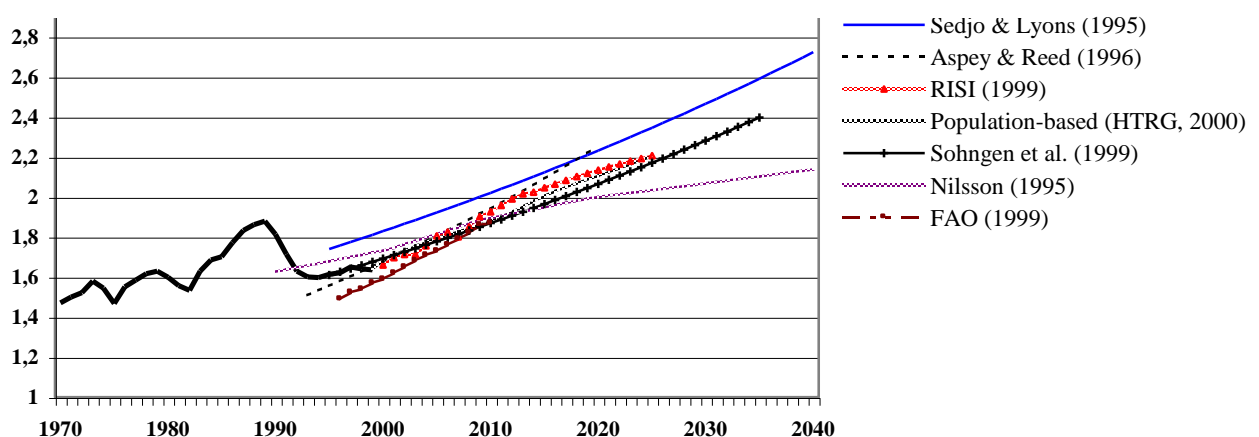
## 1. A faanyagkészletek jövőbeni alakulása és az ebből fakadó kutatási feladatok

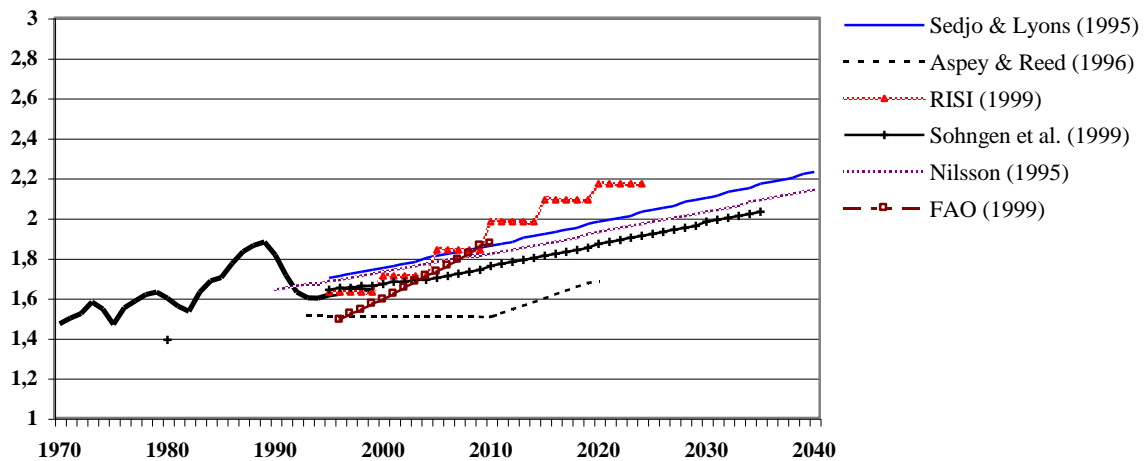
A fa az a megújuló, megújítható erőforrás, amely mindennapi életünkben igen változatos formában jelenik meg, annak elválaszthatatlan, szerves részét képezi, hisz elképzelhetetlen a világ erdők, szűkebb környezetünk pedig fából készült tárgyak nélkül. Ezért a harmadik évezred küszöbén joggal tehetjük fel a kérdést: lesz-e elegendő faanyag a szükségleteink kielégítésére, és ha igen, akkor hol, milyen formában találjuk? A válaszkeresés a fáfeldolgozó-ipar számára óriási jelentőséggel bír, ugyanis ez a felelet fogja meghatározni az ágazat fejlődésének irányát. A fakészletek jövőbeni alakulását gazdasági szempontból a kínálat-kereslet, társadalmi szempontból az igények, elvárások oldaláról közelíthetjük meg. A készletek változásának ismerete azért is fontos, mert a fára vonatkozó alap- és főleg alkalmazott kutatások iránya is ezt a tendenciát fogja követni.

A világ egy főre eső éves fafogyasztása  $0,67 \text{ m}^3$  körül ingadozik, mely érték 1960 óta jelentősen nem változott (Schultz, 1993; Youngquist, 1999). Azonban ez idő alatt a Föld lakossága majdnem megduplázódott (US Bureau of the Census), a gazdasági növekedés globális szinten folyamatos, amiből következik, hogy az erőforrások iránti igény is állandó növekedést mutat. Jelenleg a világ éves fakitermelése eléri a  $3,5$  milliárd  $\text{m}^3$ -t és évente további  $60$  millió  $\text{m}^3$ -el növekedik (FAO, 2003). Ha csak a feldolgozóipar nyersanyagbázisát jelentő hengeres ipari fa szükségleteket nézzük (a kitermelt mennyiség valamivel több, mint fele tűzifa (Brooks, 1997)), akkor a jelenlegi  $1,6$  milliárdos igény 2010-re  $20\text{-}40\%$ -al emelkedik, illetve 2050-re elérheti  $2\text{-}3$  milliárd  $\text{m}^3$ -t is (1.1. ábra).

A becsléseket bizonytalanná, szórttá teszi, hogy azok csak a múlt adatsorait és a jelen piaci, gazdasági és erdészeti-politikai tendenciáit veszik figyelembe, ezért a kiszámíthatatlan változások az eredményeket erősen torzíthatják. Ilyen szempontból különösen a hosszú távú előrejelzések megbízhatósága alacsonynak tekinthető. Ehhez járul még hozzá a gazdasági növekedés mértékének, az árak és technológiák kereslet-kínálatra gyakorolt hatásának bizonytalansága. A folyamatos igénynövekedés viszont mindegyik elemzés szerint egyértelmű, csupán a növekedés mértékében mutatkozik eltérés. Ugyanezek az előrejelzések erre az időpontra a természetes erdők kínálatát  $2,2\text{-}2,4$  milliárd  $\text{m}^3$ -re teszik (1.2. ábra), és így globális szinten fokozatosan növekvő különbség figyelhető meg.

1.1. ábra A világ hengeres iparifa szükségletének különböző becslései (Binkley S.C., 2000)





**1.2. ábra A világ természetes erdőiből származó hengeres iparifa kínálatának becslése (Binkley S.C., 2000)**

Európára szűkítve a favagyon-elemzést érdekes jelenségre figyelhetünk fel: a térség lakossága csökken, az élőfakészlet fokozatosan nő, a legújabb becslések mégis egyre növekvő hengeresfa-hiányt jeleznek (UNECE/FAO, 1996).

Az ellentmondás egyrészt az európai erdőgazdálkodási politikában megjelenő új tényezőknek, másrészt az erdők nyújtotta funkciók változásának köszönhető. Az első esetben három jelentős irányelv korlátozza a fakínálatot:

A természetközeli erdőgazdálkodás további erősödése a természet megóvására, a természetvédelmi szempontok fokozottabb érvényesülésére helyezi a hangsúlyt, a főleg fatermelést célzó gazdasági érdekek háttérbe szorulnak, csökken a kitermelési hajlandóság (Nabuurs, 2003).

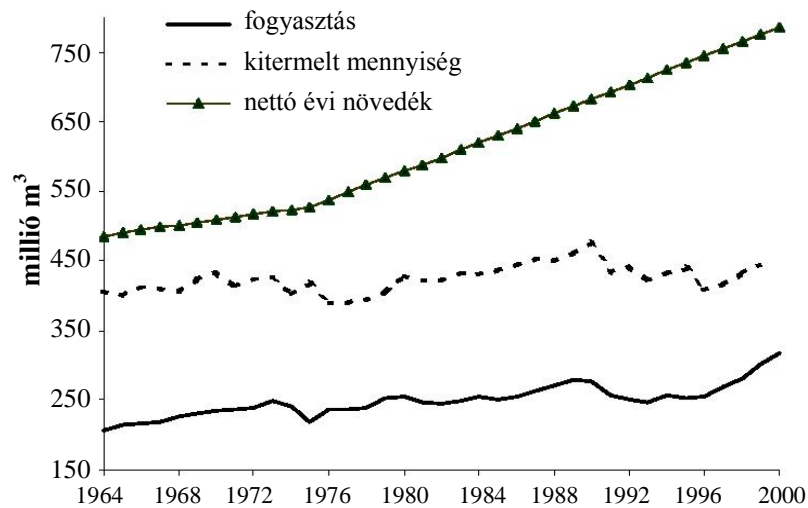
Az európai energiapolitika fokozni kívánja a megújuló nyersanyagokból előállított úgynevezett bioenergia részarányát, és ebben igen nagy szerepet szán a fának, mint energiaforrásnak. Ez további famennyiséget vonhat el a feldolgozóipartól.

A légszennyezés csökkentését célzó Kyotó-i egyezményben Európa országai 2010-re az üvegházhatású gázok [széndioxid ( $\text{CO}_2$ ), metán ( $\text{CH}_4$ ), nitrogénoxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hidrofluorokarbonok (HFCs), perfluorokarbonok (PFCs) és kén hexafluorid ( $\text{SF}_6$ )] kibocsátásának 8%-os csökkentését ígérték. A kibocsátott mennyiség alapján a légkör szennyezéséért leginkább felelős gáz a széndioxid. Figyelembe véve, hogy csak a fotoszintetizáló szervezetek képesek a széndioxid megkötésére, annak légköri koncentrációját csupán a növényzet csökkentheti. Becslések szerint az egyezmény maga után vonja az élőfa-készletek növelését, ami szintén az iparifa-kínálat mérséklődéséhez vezethet. Habár az előrejelzések 2060-ra az erdőterületek 22 millió hektáros növekedésével számolnak (Nabuurs, 2003), a frissen telepített erdők, csak 60-80 év múlva kerülhetnek kitermelésre, így a következő 50 év fakínálatához nem járulnak jelentősen hozzá.

A fentiekén túl az erdők elsődleges fatermelési funkciója is csökken, ezzel szemben erősödnek a biológiai sokszínűség megőrzésének, a szénkörforgásban játszott szerepnek, a szabadidős tevékenységek helyének a funkciói. Mindezek jelentősen korlátozhatják a faipar számára elérhető alapanyagbázist.

A becslések a nettó évi növedék további jelentős növekedését jósolják, amely jóval meghaladja a kitermelt mennyiséget, alátámasztva az európai erdők magas biológiai potenciálját. A 1.3. ábra jól szemlélteti, hogy ez a tendencia már régóta megjelent, például 2000-ben a nettó évi növedéknek csupán a fele került kitermelésre.

Az előrejelzésekben megjelenő hiányt a szerzők csupán elméletinek tekintik, egyrészt mert az abszolút kínálat erőteljes növekedése prognosztizálható, mely növekmény 2060-ra elérheti a 718 millió m<sup>3</sup>/év-es értéket (Nabuurs, 2003), másrészt a becslés nem veszi figyelembe a piacok és az erdészeti politika adaptációját az új körülményekhez. Tehát a probléma nem a készletek alakulásából, hanem az ipar számára elérhető famennyiség rendelkezésre állásából adódik.



1.3. ábra Európa favagyonának alakulása (Nabuurs et al., 2003)

A legújabb becslések alapján elmondható, hogy globálisan és főleg Európában az elkövetkező 50 évben az alapanyag valódi hiányával nem kell számolni, azonban a feldolgozóipar számára elérhető famennyiség a közeljövőben valószínűleg csökkenni fog. Hosszú távon viszont elképzelhetetlen, hogy a vágásérett erdőkből származó, jó minőségű ipari fa ne feldolgozással kerüljön hasznosításra. Továbbá ahhoz, hogy a jelen szükségletek kielégítése – a fenntartható fejlődés elvének megfelelően – ne veszélyeztesse a következő generációk igényeinek teljesülését, a kínálat-kereslet egyensúlyának a megteremtése szükséges. Az erdők megőrzésének és a növekvő szükségletek kielégítésének az ellentmondása, a tartamos erdőgazdálkodással, az ültetvényszerű erdők további telepítésével és a ffeldolgozó ipar hatékonyságának növelésével oldható fel. Vagyis a felmérések alapján megjelenő hiány pótlásának és az erdők megővésének eredményessége alapvetően két tényezőtől válik függővé: a fatömeg-termeléstől, illetve a famegtakarítástól.

Az első esetben az ültetvényszerű erdők gyorsan növő fafajokkal való telepítése 2050-re a szükségletek akár 50-75%-át is biztosíthatják (WWF, 2002; Victor, 2000), az intenzív erdőgazdálkodás és a kíméletes kitermelés nagyobb növekményt eredményezhet. A második esetben a feldolgozás hatékonysága, a keletkező hulladék újrahasznosítása, a termékfejlesztés jelenthet jelentős megtakarításokat. A leghatékonyabb módszerek és folyamatok széleskörű alkalmazásával akár az is elérhető, hogy a világ fa-szükségleteinek kielégítése az erdők 20-25%-ával is megvalósíthatóvá váljon (WWF, 2002).

Ennek eléréséhez és a favagyonnal szemben megfogalmazódó környezetvédelmi és gazdasági igények egyensúlyának megteremtéséhez mélységeiben kell megismerni és feltárni az erdő-társadalom-gazdaság komplex kapcsolatrendszerét (Youngquist, 2000). Ebben központi szerep jut a feldolgozási technológiáknak, mert a változó alapanyagokat csak rugalmas folyamatokkal, módszerekkel, nagyobb kihozattal lehet megfelelő módon kezelni.

A jövőben elérhető erőforrások mennyiségét és minőségét tekintve a ffeldolgozó-ipar két erdőtípus nyújtotta alapanyagbázisra támaszkodhat: a természetközeli és az ültetvényszerű erdők által termelt fatömegre.

Az első típusba tartoznak az őserdők, a származékerdők (az őserdők kivágása után újrasarjadt vagy részben újratelepített erdők), illetve a tartamos erdőgazdálkodás elve alapján telepített erdők. Mennyiségileg az őserdők nem tekinthetők jelentős alapanyagforrásnak, hiszen nagyrészüket védett vagy fizikailag és gazdaságilag elérhetetlen (Matthews, 1999). Az ilyen típusú erdőkben származó faanyag méretét, fafaj-összetételét és minőségét tekintve igen nagy változatosságot mutat. Ezzel szemben az ültetvényes erdők fája egynemű, azonos korú, közel azonos méretű, homogén. Mivel ezek az erdők az intenzív erdőgazdálkodásnak, a genetikailag válogatott, klónozott, gyorsan növekvő fafajoknak köszönhetően jelentősen magasabb növekményt adnak, mint a természetközeli erdők, jelentőségük a kitermelhető famennyiség előállításában várhatóan növekedni fog (Youngquist, 1999). Azonban az ültetvényes erdők, a felhagyott mezőgazdasági területek erdősítése csak a faipar igényeit elégítheti ki, az őserdők ökológiai szerepét nem helyettesítheti. Jelenleg az ültetvényes erdők közel 25%-al járulnak hozzá a világ hengeres ipari fa kínálatához (Matthews, 1999).

Tehát a jövőt tekintve a faiparnak még változatosabb alapanyaggal kell szembesülnie. Ahhoz, hogy a fáfeldolgozó-ipar egységes alapanyagokra épült technológiái ezt a változatosságot kezelni tudják, új gyártási módszereknek és termékeknek kellett/kell megjelenniük. Ezek közé sorolható a roncsolásmentes faanyagvizsgálat, a kompozit és műszaki termékek megjelenése, a szilárdsági osztályozás elterjedése. Az alapanyag típusának és minőségének változásával szemben rugalmasabb kompozit-technológiákra jó példa az irányított szálforgács lemez vagy OSB sikertörténete, amely egyre inkább kiszorítja a rétegelt lemeztermékeket. A roncsolásmentes és mechanikai osztályozás szintén jól kezeli a faanyag-tulajdonságok ingadozását azáltal, hogy az egyes elemek merevségét és szilárdságát külön-külön meghatározza, így a felhasználás a teljesítmény alapján történik. Az egyre inkább elérhetlenné váló jó minőségű és nagyméretű szerkezeti faanyag kiváltására pedig kiválóan alkalmasak az utóbbi évtizedekben megjelent és elterjedőben lévő műszaki fatermékek (Youngquist, 1999). Ezek közé tartozik a rétegelt furnérfa (LVL), a szálfurnérfa (PSL), a rétegelt szálforgácsfa (LSL) a különböző I-tartók, rétegelt-ragasztott tartók, az irányított szálforgács lemez (OSB). A szálerősítésű kompozitok is ezt a célt szolgálják. Mindezen termékek sikeresen növelték a feldolgozás hatékonyságát, az előállított termékek teljesítményét.

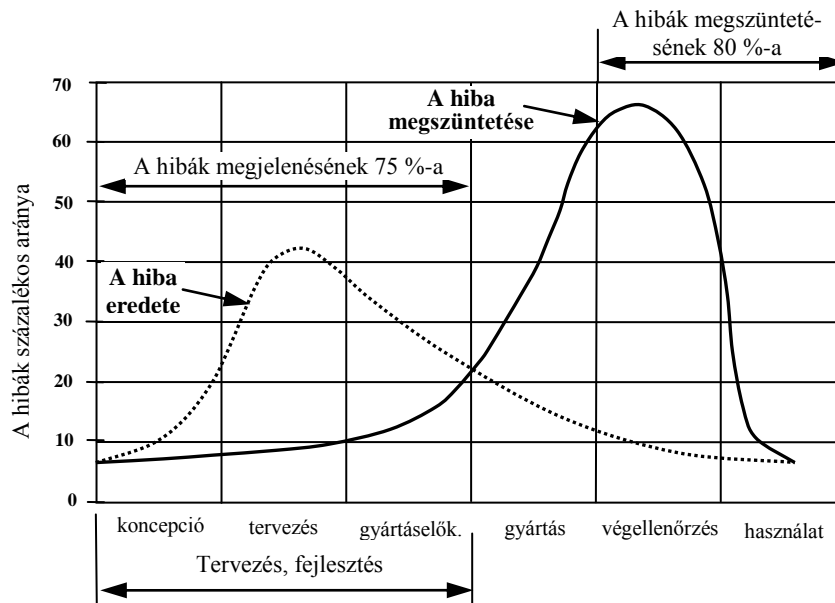
Újabb kihívást jelent az ágazat számára a hulladékhasznosítás kérdése. Ez az erőforrások megőrzéséhez is jelentősen hozzájárulhat, hisz a feldolgozás során keletkező hulladék és az elhasznált termék újrafeldolgozása kevesebb alapanyag-szükségletet von maga után. Fontos megtakarítást jelent a papírhulladékok növekvő újrafeldolgozása, és jelentős potenciállal bír a szerkezeti célú fatermékek újrahasznosítása is, különösen azokon a helyeken, ahol elterjedt a könnyűszerkezetes építkezés (Amerikai Egyesült Államok, Japán). Elemzések szerint az újrahasznosítás, visszaforgatás, a nagyobb hatékonyság, és a magasabb kihozatal együttesen az évi hengeres iparifa-szükségletet akár 0,5 milliárd m<sup>3</sup>-el is csökkentheti (Matthews, 1999).

A rendelkezésre álló faalapú erőforrások mennyiségi és minőségi elemzésének összegzéseként elmondható, hogy a jövőben elégséges mennyiségű alapanyag áll rendelkezésre, de az erdők termelte fa minősége, mérete és fafajösszetétele jelentős változásokon megy át, ami szükségszerűen a feldolgozási technológiák változását is maga után vonja. Ezért a kutatás, fejlesztés a megváltozott erőforrások optimális és hatékony felhasználására, új, rugalmas és környezetbarát technológiák kidolgozására, a feldolgozás vagy az elhasználódás során keletkező hulladékok hasznosítására kell összpontosuljon.

Az erőforrások megőrzésének egy másik fontos lehetősége a robusztus, tartós termékek gyártása, illetve a termékminőség kérdése.

Napjainkban a minőség és megbízhatóság az egymással versengő termékek és szolgáltatások harcában a vásárlók döntésének egyik legfontosabb tényezőjévé vált.

Következésképpen a termékek és folyamatok minőségének állandó javítása kulcsszerepet játszik a vevői elégedettség, és az ennek eredményeként jelentkező gazdasági siker elérésében. A költség és teljesítmény versenye során bebizonyosodott, hogy ellenőrzéssel nem lehet a minőséget gazdaságosan biztosítani. Jóval előnyösebb a minőséget megtervezni, mint gyártás közben ellenőrizni és hibák esetén a gyártási vonalon, rosszabb esetben a vevőnél korrigálni. Ez a tény sok – a minőséget fontosnak tartó – szervezetet arra készítetett, hogy a terméktervezés optimalizálására koncentráljon.



**1.4. ábra A hibák keletkezésének és megszüntetésének helye, eloszlása a termékciklus során (DTI, 1992)**

A minőség költségei a termelő vállalatok ráfordításainak akár 30%-át is jelenthetik. Ennek közel felét a termék nem-megfelelőségével vagy meghibásodásával járó költségek teszik ki, melyek végső soron tervezési elégtelenségekre vezethetők vissza. Csökkentésükkel a vállalati hatékonyság jelentősen fokozható, ezért érdemes a hibamentességnek már a tervezés fázisában való biztosítására törekedni. Tanulmányok (Russel, 1995; Booker, 2001) igazolják, hogy a hibák jelentős része a tervezési-fejlesztési fázisban keletkezik, megszüntetésükre azonban csak jóval később, a végellenőrzéskor, illetve még rosszabb esetben a használatkor kerül sor, amikor már tetemes veszteségeket okoztak (1.4. ábra). Ezért a minőséget a termékéletpálya legkorábbi szakaszában, a tervezéskor bele kell építeni a termékbe.

Az olyan új termékek vagy folyamatok fejlesztésénél, ahol várhatóan sok a termékminőséget befolyásoló tényező száma, és azok hatása a termék minőségjellemzőire jelentős, a kísérlettervezés módszere lehet célravezető. A módszer segítségével lehetőségünk nyílik a minőségjellemzőket jelentős mértékben meghatározó, valamint a szórásukat befolyásoló faktorok azonosítására. Felírható a kapcsolatot becsülő matematikai modell, megállapíthatók a tényezők optimális beállítási szintjei. Ezek ismeretében a termék vagy folyamat tulajdonságai előre megtervezhetők, a zavaró hatásokra való érzékenyséjük minimalizálható, azaz a termék vagy folyamat robusztussá tehető.



## 2. Kutatási célkitűzések

A műszaki fatermékek elterjedése egyrészt a gazdaságos nyersanyag-hasznosítás igényéből, másrészt a szerkezeti célú alapanyagok megbízhatósága iránti igény fokozódásából következik. A rendelkezésre álló nyersanyag csökkenő méreti és minőségi jellemzői mellett az értéknövelő hasznosítás úgy oldható meg, hogy újabb – kedvezőtlen tulajdonságaik miatt eddig nem használt - fafajokat vonunk be, fokozzuk a meglévő technológiák kihazatalát vagy a fafeldolgozás során keletkező hulladékot hasznosítjuk.

Hasznosítható másodnyersanyagként minősülhet a színfurnérgyártás során keletkező hulladék is, hiszen a legjobb minőségű rönkből kerül ki. A furnéralapú kompozit technológiák (rétegelt furnérfa –LVL, szálfurnérfa –PSL) műszaki furnért használnak alapanyagként, fafaj tekintetében pedig a túlevelűeket részesítik előnyben, azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni a lombos fafajokat sem. Szerkezeti célú termékekről lévén szó elsősorban a rugalmassági és szilárdsági tulajdonságokat, azok anizotrópiáját és a nedvességgel szembeni viselkedésüket szükséges ismerni (Kovács, 2001).

A furnéralapú, építőipari célra alkalmas lap vagy gerenda-típusú kompozitok rugalmas jellemzőit főként az alapanyag - jelen esetben a furnér - tulajdonságai és a gyártási paraméterek befolyásolják (Láng, 2000, 2002.). Az előállítás során végbemenő komplex folyamatok vizsgálatával egy olyan kombinált determinisztikus-probabilisztikus matematikai modellhez juthatunk, amely a kompozit termék keresztmetszeti jellemzőit a felépítő részecskék tulajdonságai, és a gyártási paraméterek alapján számítja ki (Bejó, 2000, Zombori, 2001.). A paraméterek és a késztermék fizikai, mechanikai tulajdonságai között fennálló kapcsolatok modellezése lehetővé teszi a tervezés és gyártás optimalizálását, végső soron pedig a kompozit termékek teljesítőképességének növelését. E modellek segítségével lehetőség nyílik arra, hogy olyan tervezett tulajdonságú terméket állítsunk elő, amely ismert, kis változékonyságú szilárdsági jellemzőkkel rendelkezik. Bemenő paraméterek a farészecskék fizikai, mechanikai jellemzői az ortotrópia tetszőleges irányában, az orientáltság foka, a részecskék mérete és elhelyezkedése az adott keresztmetszetben, valamint tulajdonságaik módosulása a ragasztási – préselési eljárás során. Kimeneti jellemzőként a modell a termék fizikai, mechanikai tulajdonságait határozza meg, a vizsgált keresztmetszetre vonatkozóan. A továbbiakban adott keresztmetszeti jellemzőkkel bíró elemi hosszúságú tartórészek egymásután sorolásával az egész tartó mechanikai viselkedését jelzi előre.

Az input jellemzők célszerű változtatásával – tervezett kísérletekkel – a termékjellemzők előrejelzésére alkalmas matematikai modell felállításának újabb lehetőségéhez jutunk. A tényezők beállítási értékeinek szisztematikus változtatása lehetővé teszi, hogy az egyes faktorhatásokat egymástól függetlenül becsüljük, azok terméktulajdonságokra gyakorolt hatásainak jelentőségét megállapítsuk. A hatások szignifikanciája alapján meghatározhatók a válaszjellemzőket leíró regressziós modellek és a tényezők optimális működési tartománya.

A kutatás fő célja szerkezeti célra is alkalmas, új termék kifejlesztése a színfurnérgyártás során keletkező ollózási eselékből, a termék rugalmassági tulajdonságainak optimalizálása a kísérlettervezés és válaszfelület módszerek segítségével, a terméktulajdonságok sztochasztikus modellezése. Ez a célkitűzés a terméktulajdonságokat leíró matematikai modell meghatározását jelenti tervezett kísérletekkel, mely modell a befolyásoló tényezők hatását adekvát módon számszerűsíti, és azok optimalizálásával lehetővé teszi a terméktulajdonságok javítását. A kutatás végső célja a teljes mértékben tervezett tulajdonságú, és a szerkezeti felhasználás igényeit is kielégítő faalapanyagú kompozitok előállításának, valamint tulajdonságaik előrejelzése a felhasznált alapanyag ortotróp jellemzői és gyártási paraméterei alapján.

*A kutatás első fázisában* a színfurnérok ollózási eselékének alkalmazhatóságát vizsgálom lap vagy tartó típusú termék előállítására. Az eselék önmagában vagy más „strand” típusú alapanyaggal keverve is földolgozható, fontos a terítékképzés, a préselés technológiájának a kidolgozása, a nyersanyagok arányának, a felhordott optimális műgyantamennyiségnek a meghatározása. Továbbá, ebben a szakaszban kerül sor a gyártási paramétereknek a kompozit alapanyagául szolgáló alkotóelemek mechanikai jellemzőire gyakorolt hatásának tanulmányozására. A szerkezeti célú felhasználás igényéből fakadóan, a színfurnérok hajlítómerevségének anizotrópiáját vizsgálom az anatómiai irányok függvényében. Emellett az egyedi furnércsíkokat a ragasztási és hőpréselési folyamat során fellépő hatásoknak vetem alá, hogy azt követően a hajlító rugalmassági modulus megváltozását értékelhessem az ortotrópia függvényében. A kapott eredmények hozzájárulhatnak a műszaki fatermékek mechanikai tulajdonságait szimuláló modellek becslési pontosságának növeléséhez.

*Második lépésben* az alapanyag-jellemzőknek, a préselési paramétereknek a laptulajdonságokra gyakorolt hatását elemzem. Tekintettel a lehetséges befolyásoló tényezők magas számára, a hatások kiértékeléséhez alacsony szintű, frakcionált faktoriális tervet alkalmazok. Ez a kísérleti tervtípus lehetőséget nyújt nagyszámú tényező bevonására, további előnyt jelent, hogy a frakcionálás mértékének, illetve a faktorok számának függvényében a kísérleti beállítások száma is mérsékelt. A szálfurnérok szélességének és orientációjának – mint fontosnak vélt faktoroknak – a vizsgálata szabályos oldalélű furnércsíkok alkalmazását indokolja, ezért ebben a szakaszban párhuzamos oldalú alapanyagot célszerű használni. A vizsgált minőségjellemzők a hajlítórugalmassági modulus, a hajlítószilárdság, a vastagsági dagadás és a lappal párhuzamos nyírószilárdság. A faktorhatások nagyságát és szignifikanciáját meghatározva lehetőség nyílik az egyes jellemzők modellezésére, a legkedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező termékek előállításához szükséges optimális faktorszint-kombináció kijelölésére.

*A fejlesztés következő szakaszában* a technológiai paraméterek vizsgálata történik háromszintes kísérleti terv segítségével. Ebben az esetben lehetőség nyílik négyzetes modellek előállítására, a Taguchi-féle jel/zaj viszony elemzésére. A kísérletekhez érdemes a színfurnér-hulladékot abban a formában fölhasználni, ahogy az az ollózás során keletkezik, hiszen ez jelenti a tulajdonképpeni hulladékhasznosítást. Mivel az így előállított lapok képezik a kísérleti munka végső célját, az új termék minősítéséhez szükség van a mért szilárdsági tulajdonságok jellemző értékeinek meghatározására és a hasonló termékekkel való összehasonlításra. Az eredmények alapján meghatározhatók a színfurnér-hulladékból előállítható lap és gerenda típusú termékek alkalmazási területei.

### 3. Tudományos előzmények

#### 3.1. Műszaki fatermékek modellezése

A műszaki fatermékek gyártásának legfőbb célja az alapanyag változékonyságának csökkentése, a késztermék tulajdonságainak homogenizálása. Ennek eléréséhez a faanyagot terméktípustól függően különböző méretű és alakú részecskékre (furnérlap, furnércsík, szálforgács vagy „strand”) bontották, majd különböző műgyanták segítségével nagyméretű termékeket hoztak létre. A termék-előállítás folyamatában ekkor már nem az input (faalapanyag) változékonysága jelent problémát, hanem a gyártás bonyolultsága. Ugyanis ahhoz, hogy a késztermék tulajdonságait előre meg lehessen tervezni, a gyártási folyamatok pontos szabályozására van szükség. Ez a teljes folyamatrendszer ismeretét és megértését feltételezi. A gyártási paraméterek szisztematikus elemzése és optimalizálása a kompozitok teljesítményének fokozásához, nagyobb termelési hatékonysághoz vezet. Az optimalizálás csak a termékre ható anyagi és gyártási jellemzők ismeretében, illetve e tényezők rugalmassági és szilárdsági tulajdonságokra gyakorolt hatásainak feltárása által valósítható meg.

A folyamatváltozók és a késztermék fizikai, mechanikai tulajdonságai között fennálló kapcsolatok szimulálására több modell is készült, amelyek a gyártási folyamat valamely részét, vagy teljes egészét eltérő pontossággal szimulálják. A legtöbb modellnél a gyártási folyamatok bonyolultsága különböző egyszerűsítések, peremfeltételek alkalmazását tette szükségessé. A gyártási paraméterek számától és a köztük fennálló kapcsolatok komplexitásától függően ezek a modellek sztochasztikus vagy kombinált, azaz sztochasztikus-determinisztikus jellegűek.

Az első modellek között szerepel Suchsland statisztikai modellje, amelyet az ostyalapok tömörödése és az alkotóelemek sűrűsége, geometriája, és az elemek közötti rések kapcsolatának modellezésére állított fel (Suchsland 1967).

Két évtizeddel később Suchsland és Xu (Suchsland 1989) a vízszintes sűrűségeloszlást vizsgálták párhuzamos szálfurnérokából készült lapoknál. A rétegelt lemezhez hasonló modell párhuzamosan rendezett furnércsíkokból épül fel, és figyelembe veszi az elemek közötti légréseket is. A légrések változása a vízszintes sűrűségeloszlást jelentősen befolyásolta. A modell gyengesége, hogy a terítékképzést egyenletesnek tekinti, holott a valóságban a légrések eltérőek, továbbá különböző mértékű átlapolások jelennek meg, amelyek a sűrűségeloszlást befolyásolják.

Hoover (Hoover, 1992) a feszültség hullám terjedési sebességének mérésével modellezte a lombos fáfajokból előállított szálforgács típusú lapok tulajdonságait. Az alkalmazott empirikus regressziós modellek a laptulajdonságok és a szálforgácsok hosszúsága, vastagsága, illetve a lapsűrűség és az orientáció közötti kapcsolatokat becsülik.

Cha és Pearson (Cha, 1994) kétdimenziós végeelem modellt dolgoztak ki három rétegű furnérlapok húzórugalmassági tulajdonságainak becslésére, ahol a középső réteg orientációja változó.

Dai és Steiner a rövidforgács alapú kompozitok véletlenszerű elrendeződését probablisztikus modellel vizsgálták (Steiner, 1994; Dai, 1994a, 1994b). A modell egyenletes szálforgácsot feltételez, a forgács helyének és orientációjának meghatározása a Poisson eloszlás alapján történik. Egyetlen réteg jellemzőiből indulnak ki, majd a rétegek kombinációjából építik fel a terítéket. A matematikai modell ellenőrzését Monte Carlo szimulációval, és kísérletekkel végzik. A három eredmény között kielégítő korreláció tapasztalható. Később a terítékképzés modelljét felhasználva, a lapok vízszintes sűrűségeloszlásának szimulálására újabb modellt dolgoznak ki. Bebizonyítják, hogy a sűrűség síkbeli ingadozása kétdimenziós véletlen mezővel jól modellezhető. Az első modell a teríték fizikai tulajdonságainak előrejelzésére alkalmas, a második lehetővé teszi a terítékképzés egyenletességének szabályozását. A terítékszerkezet

mennyiségi meghatározása a lefedettség fokának, a légrések térfogatának eloszlása, és az érintkezési felületek nagyságának függvényeként fontos kiegészítés a kompozitok hőpréselési modelljéhez.

A terítékképzés szimulálására dolgozta ki Láng és Wolcott (Láng, 1996a, 1996b) az úgynevezett él modellt. Ők a terítéket véges méretű és számú képzeletbeli oszlopra osztották, majd meghatározták az egységoszlop geometriai tulajdonságait. A mért adatokra valószínűség-eloszlási görbét illesztettek, majd az oszlopokat az eloszlásjellemzők alapján reprodukálták.

Nelson az optimális laptulajdonságok elérésének egyik feltételének a szálforgács geometriáját tartotta (Nelson 1997). Wang és Lam (Wang, 1999) empirikus összefüggést állapított meg a szálforgácsok karcsúsági foka, a felületi orientáció és a lapsűrűség között. Például az 5-10 cm hosszú és 0,6 mm vastag szálforgács optimális karcsúsági foka 133.

Oudjehane és Lam (Oudjehane, 1998a) szabályos alakú nyár szálforgácsokkal (100x20x0,75 mm) vizsgálták a teríték véletlenszerű kialakulásának hatását a lapok belsőfeszültségének változására. A szálforgácsok elrendezését laboratóriumi robottal végezték, a szimuláció a szálforgácsok orientációja és lapon belüli elhelyezkedése alapján történt. Először mindkét tényezőt rögzített értéken tartották, majd a tényezőket külön-külön, végül együtt is a normális eloszlás szerint változtatták. Kimutatták, hogy a szálforgácsok elrendeződésének véletlen jellege jelentősen befolyásolja a teríték vastagságát, a belső feszültség változása pedig erősen függ a préselési időtől. Későbbi munkájukban (Oudjehane, 1998b) egy nem-lineáris viszkoelasztikus modellt dolgoztak ki a fakompozitok konszolidáció során végbemenő változásainak leírására és becslésére. Rámutattak arra, hogy a gyártás során a szálforgácsok véletlen elrendeződése jelentősen befolyásolja a lapok sűrűségeloszlását. Előállítottak egy olyan sűrűségmodellt, amely magába foglalja a terítékképzés, a préselés során végbemenő konszolidációs folyamat, és tömegáramlás változóit. A modell a szálforgácsok eloszlását, sűrűségét, a préselés során fellépő feszültségeket és tömegáramlást igazolja.

A gyártási paramétereknek az irányított elrendezésű kompozitok szilárdsági tulajdonságaira gyakorolt hatásának becslésére dolgozott ki integrált modellt Barnes (Barnes, 2000). A modell a kompozit tulajdonságokat a falapanyag-jellemzők és nyolc paraméter (faanyagtartalom, gyanta tartalom, szálforgácsok síkbeli orientációja, hosszúsága, vastagsága, portartalom, és az orientáló korongok vagy lemezek közötti távolság) szorzataként határozza meg. Bevezeti az úgynevezett feszültségátadási szöget, amely a szilárdságot a rostszöghöz hasonló módon befolyásolja. Későbbi munkájában (Barnes, 2001) a szálforgács-hosszúság és vastagság szilárdságra gyakorolt hatásának szimulálására dolgoz ki újabb modellt. Ez az érintkező forgácsok közötti feszültségátadás elvén alapszik, amely szerint a feszítőerő iránya és a ragasztási felület síkja bizonyos – a forgácsvastagságtól függő – szöget zár be. Ez a szögváltozás a rostirányhoz hasonló módon befolyásolja a kompozit szilárdságát. Kimutatja, hogy a szilárdság változása a szálforgács-hosszúság és -vastagság függvényében a módosított Hankinson egyenlettel jól leírható.

Clouston és Lam (Clouston, 2001) az alkotóelemek tulajdonságaiból kiindulva, a szálforgács alapú kompozitok feszültségének és alakváltozásának szimulálására nemlineáris sztochasztikus modellt dolgoztak ki. A szálforgácsok nemlineáris tulajdonságainak jellemzésére az ortotróp képlékenységi elméletből indultak ki, ahol a viszkoelasztikus áramlási törvényt megfeleltették a Tsai-Wu kritériummal. A modellt a nyírórugalmasság és nyírófeszültség szimulálásához alkalmazták, a becslési pontosságot kísérletekkel ellenőrizték. A kedvező eredmények ellenére, kijelentik, hogy a modell csak a +/-15, és +/- 30 fokban elforgatott rétegelt termékekre vonatkozik.

Zombori terítékképzésre vonatkozó szimulációs modellje (Zombori 2001) a szálforgácsok méreteinek eloszlásjellemzőit is beépíti, továbbá a forgácssűrűséget is véletlen változónak

tekinti. A modell képes a rétegelt elrendezésű terítéket három dimenzióban is megjeleníteni. Doktori disszertációjában komplex sztochasztikus-determinisztikus modellt dolgozott ki a kompozitok préselése során végbemenő hő- és anyagtranszport folyamatok leírására.

Fa-kompozit alapú tartószerkezeti anyag műszaki és minőségi jellemzőinek előrejelzési és tervezési lehetőségét egy közös magyar-amerikai kutatócsoport is vizsgálta (Láng, 2002, Kovács, 2002). A kutatás fő célkitűzése a faforgács terítékek és tulajdonságaik alakulásának modellezése a farészecskék jellemzői és elhelyezkedése alapján.

A tenzorelméleten alapuló modelltől kiindulva olyan kombinált modellt dolgoztak ki, amely külön-külön a 0°-os rostirány, illetve a 90°-os rostirány mellett az évgyűrűk orientációjának 0°-tól 90°-ig való változtatásával írja le a nyírószilárdság változását.

A legjobb korrelációs együtthatókat a Hankinson formulával kombinált modellel kapták ( $r^2 = 0,76-0,86$ ). Ez a modell alkalmasnak látszik nem csak tömör faanyag, hanem „strand” típusú farészecskékből előállított kompozitok – LVL, LSL (rétegelt szálforgácsfa), PSL – nyírószilárdságának előrejelzésére is. A kutatás eredményeként számítógépes modell született az ilyen típusú kompozitok hajlítómerevségének előrejelzésére (Bejó, 2001). A modellezett hajlító- és nyomórugalmassági modulusok, valamint fizikai és geometriai tulajdonságok jól közelítették a kísérleti eredményeket. Megállapították, hogy az alkalmazott alapelvek illetve a kidolgozott modellek alkalmasak az ilyen jellegű kompozitok tulajdonságainak szimulációs modellezésére. A modell kidolgozásához néhány egyszerűsítő feltételezést alkalmaztak:

- a rétegek illetve forgácsok között tökéletes az adhézió; nincsenek folytonossági hiányok vagy gyengébb területek a ragasztórétegben;
- a kompozitok rétegfelépítése véletlenszerű; a rétegek vagy forgácsok rugalmassági modulusa nem függ azok elhelyezkedésétől;
- a forgácsok keresztmetszete a préselés után is téglalap marad;
- hajlításkor a semleges szál elmozdulása, illetve a főtehetlenségi tengelyek dőlése elhanyagolható.

Moses és társai (Moses, 2003) a rétegelt szálforgácsfa síkbeli tulajdonságainak előrejelzésére alkalmas modellt dolgoztak ki, kombinálva a kompozitok mechanikáját a megbízhatósági elméletekkel. Kimutatták, hogy szálforgácsok elrendeződésének a lapok síkbeli tulajdonságaira gyakorolt hatása jól becsülhető. A modell nemcsak az egyes mechanikai tulajdonságok, hanem azok ingadozásának becslésére is alkalmas.

Dai és társai (Dai, 2005) a kompozit lapok préselése során végbemenő konszolidációs folyamatok porozitásra és permeabilitásra gyakorolt hatásának becslésére dolgoznak ki elméleti modellt. Figyelembe veszik mind a szálforgácson belüli, mind a szálforgácsok közötti légrések változását. Utóbbi kiszámításához az átlapolások véletlenszerűségét és a forgács élek hatásának elméletét alkalmazzák. A szálforgácsok felületi érdességére és a préseléskor bekövetkező oldalirányú nyúlásra is tekintettel vannak. Bebizonyítják, hogy a porozitás és sűrűség közötti kapcsolat lineáris, a préselés során a forgácson belüli és forgácsok közötti légrések változása különbözik, és nem-lineáris jellegű. A modell képes becsülni a forgács geometriai jellemzőinek (hosszúság, szélesség, vastagság) porozitásra gyakorolt hatását. Segítségével a préselés során a középrétegben végbemenő hőmérséklet és nyomásváltozás pontosabban leírható.

Az OSB húzó és nyomó igénybevétele során fellépő feszültség- és alakváltozást a végeelem módszerrel vizsgálták Zhu és társai (Zhu, 2005). Megállapították, hogy húzásra az OSB alakváltozási görbéje közel lineáris, míg nyomásra jelentős kúszás tapasztalható. A rugalmassági modulus a két igénybevétel során majdnem azonos értéket mutat. A modell érvényességét egy OSB gerincű I-tartón ellenőrizték.

### 3.2. Kísérlettervezés a faiparban

A tervezett kísérletekkel történő minőségjavításra a faiparban csak szórványosan találunk példákat, hatékonyságukról, alkalmazhatóságuk sajátosságairól kevés tapasztalattal rendelkezünk. Más területeken beigazolódott, hogy a módszer eredményes, ezért a jelen kutatásban a kísérlettervezést, mint új faipari termékfejlesztési technikát alkalmazom.

A kísérlettervezés és válaszfelület módszerét sikeresen alkalmazták a furnérkihozatal és furnérminőség maximálására (Warren, 1980), nyárból készült irányított elrendezésű szálforgácslemezek (OSB) középrétegében elhelyezett papírkérgű nyír optimális arányának meghatározására (Au, 1992). Utóbbi a középréteg szálforgácsainak vastagságát és a nyír arányát tekintette független változóknak. A kísérleti pontokra regressziós modellt illesztett és a válaszfelületek segítségével meghatározta a faktorok optimális működési tartományát.

Hsu (Hsu, 1996) a válaszfelület módszert a préselési paraméterek (préslapok hőmérséklete, prészárási idő) és a fedőréteg nedvességtartalma közötti kölcsönhatások feltárására alkalmazta. Wang (Wang, 1999) a szálforgácsok karcsúsági tényezőjének, orientációjának és a lapsűrűségnek az OSB hajlítórugalmasági modulusára, hajlítoszilárdságára, lapra merőleges szakítószilárdságára és vastagsági dagadására gyakorolt hatását elemezte forgatható kompozíciós tervvel. Mind a kódolt, mind a kódolatlan faktorértékekre meghatározta a négyzetes hatásokat és a másodrendű kölcsönhatásokat is tartalmazó regressziós modelleket, majd a faktorhatásokat azok szignifikanciája alapján rangsorolta. Elvégezte a válaszjellemzők együttes optimalizálását, és meghatározta az optimális faktor-beállítási értékeket úgy, hogy a hajlítórugalmasági modulus és hajlítoszilárdság között fennálló korrelációt súlyozással korigálta.

Akác (*Acacia mangium*), eukaliptusz (*Eucalyptus pellita*) és nyár (*Populus x euramericana*) fafajokból készített faliszt és fagyapot portlandcementtel való kompatibilitását kombinált faktoriális kísérleti tervvel vizsgálták Semple és társai (Semple, 1999). A tervben a farészecskék típusa két szinten (faliszt-fagyapot), a fafaj és a gesztarány három szinten, a fa-cement arány négy szinten szerepel. A varianciaanalízis a farészecskék formájának és arányának jelentős befolyását mutatta mind a hidratációs hőmérsékletre, mind a kompatibilitási tényezőre (a kontroll és a minta hidratációs görbéinek aránya). A farészecskék formája és a többi tényező közötti kölcsönhatások is szignifikánsnak bizonyultak.

Németh (Németh, 2000) az akác lúgos-antrakinonos feltárási folyamatának vizsgálatára és optimalizálására szintén elforgatható középpontos tervet alkalmaz. Egy  $2^3$  teljes faktoriális tervből indul ki, melyet csillag- és centrumpontokkal egészít ki. A vizsgált faktorok a hőmérséklet, reakcióidő és aktív alkáli (NaOH) mennyiség. Regresszióanalízissel határozza meg az egyes együtthatók szignifikanciáját, elvégzi a matematikai modell adekvátságának becslését. Replikációt nem alkalmaz, így szórásElemzésre nincs lehetősége. A teljes regressziós modellekre elkészíti a válaszfelületeket és kijelöli a faktorok optimális beállítási szintjeit.

Polipropilén-farost kompozitok mechanikai tulajdonságainak (húzó- és hajlítoszilárdság, fajlagos nyúlás, rugalmassági modulus) optimalizálására  $2^2 \times 3^1$  típusú faktoriális tervet választanak, öt replikációval Costa és társai (Costa, 2000). A kísérleti tervben a mátrix típusa és a szilánnal, maleált polipropilénnel kezelt rostarány két-két szinten szerepel, a farost-arány három szinten. Az empirikus modellek paramétereinek becslésére a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazzák, a mért és becsült értékek összehasonlítását F-próbával végzik. A modellek adekvátak bizonyultak. A faktorhatások és a becslési pontatlanság ismeretében felírják az egyes válaszjellemzők regressziós egyenleteit, figyelembe véve a hatások és kölcsönhatások szignifikanciáját. Megállapítják, hogy a farost-tartalom növelésével a kompozit húzási és hajlítási tulajdonságai javulnak, a kompatibilitás céljából végzett farost kezelés függ a mátrix típusától.

Rétegtlemezek préseléskor keletkező illékony szerves vegyületek mennyiségét a préselési paraméterek függvényében vizsgálták Barry és társai (Barry, 2001). Független változók a préselési hőmérséklet, a présidő és a műgyanta szárazanyag-tartalma. A tényezőket 3 szinten vizsgálták egy Box-Behnken terv (15 kísérleti beállítás, 3 ismétlés a centripontban) segítségével. Teljes másodfokú regressziós modelleket határoznak meg a préseléskor felszabaduló formaldehid-, metanol-, fenol- és a teljes illékony szerves anyag mennyiségre. Az elkészített válaszfelületek alapján kijelölik a függő változók optimális tartományait eredményező faktorszinteket, majd az együttes optimalizáláshoz kívánatossági függvényt definiálnak és elkészítik a kívánatossági függvény szintvonalas ábráit.

Használt gumiabroncsokból előállított gumiörlemény és farost keverékéből állítottak elő új kompozit terméket Song és Hwang (Song, 2001). A termék mechanikai tulajdonságainak optimalizálására egy  $4^2$  típusú teljes faktoriális tervet választottak, amelynek segítségével a farost-gumiörlemény keverék arányának és a ragasztómennyiségnek (MDI) a húzó-, hajlító-, ütés-hajlítószilárdságra, rugalmassági modulusra, és lapleemelő szilárdságra gyakorolt hatását vizsgálták. A varianciaanalízis és a hatásdiagramok alapján megállapítják, hogy az ütés-hajlítószilárdságot mindkét tényező és azok kölcsönhatása is szignifikánsan befolyásolja, a maximális értékeket a 25:75 farost-gumiörlemény aránynál és 5%-os ragasztótartalomnál kapják. Ezzel ellentétben a húzó- és hajlítószilárdság legmagasabb értékei a gumimentes kompozitoknál, és 20%-os ragasztóanyag tartalomnál adódnak. Gumi hozzáadásával a lapleemelő szilárdság erőteljesen csökkent, a ragasztómennyiség növelésével pedig nőtt.

Andrews és társai OSB lapok vastagsági sűrűségprofilját vizsgálták úgynevezett split-plot terv segítségével (Andrews, 2001). Az alapanyag nedvességtartalmának és a prészársnak a sűrűsége gyakorolt hatását határozták meg a különböző vastagsági rétegekben.

A furnérozáskor megjelenő enyvátütés problémáját  $L_{27}$  ( $3^3$ ) típusú Taguchi terv felhasználásával vizsgálta Nagy (Nagy, 2001). Feltárja a furnérozás folyamatát döntően befolyásoló szabályozható és zajtényezőket, majd egy külső-belső mátrixos elrendezéssel határozza meg a kísérleti pontokat. Független változó az enyvátütés mértéke, melyet egy 1-től 5-ig felállított skálán minősít. Hatásdiagramokat készít mind az átlagértékre, mind a szórásra, meghatározza a jel/zaj viszonyt, de nem végez varianciaanalízist a hatások szignifikanciájának kimutatására.

Közepes sűrűségű farostlemezek és a rost alapanyag viszkoelasztikus tulajdonságának változását a hőmérséklet és a nedvességtartalom függvényében vizsgálták Houts és társai (Houts, 2003). A relaxáció mértékének meghatározására két  $L_8$  típusú Taguchi tervet választanak, az első tervben a hőmérséklet, nedvességtartalom és a kezdeti feszültség, a másodikban a ragasztóanyag-tartalom, a hőmérséklet, és a nedvességtartalom (az előzőtől eltérő értékekkel) szerepelnek változókként. A relaxációt a 90 perces terhelés utáni maradék feszültség és a kezdeti feszültség százalékos arányában fejezik ki. Mind a relaxációs görbék, mind a hatásdiagramok a nedvesség és hőmérséklet növekedés erőteljes relaxációs hatását mutatják, a kezdeti feszültség és a ragasztóanyag-tartalom hatása kisebb mértékű. A kölcsönhatások közül a ragasztómennyiség x nedvességtartalom szignifikáns.

A rétegelt-ragasztott tartóknál alkalmazott ékcsapos kötések kifáradási húzószilárdságát  $3^2$  típusú faktoriális tervvel vizsgálták Martínez és Calil (Martínez, 2003). A két tényező, a ciklikus terhelés nagysága és a fárasztási ciklus frekvenciája voltak. A terhelést a húzószilárdság nagyságának függvényében határozták meg, válaszjellemzőnek a kötés tönkremenetelig tartó ciklusszámot választották. A kísérleti terv replikációja hat volt. A regressziós modellel becsült és a mért értékek közötti különbségek (maradékok) ábrázolása a varianciák inhomogenitását jelezte, ezért a mért értékek logaritmikus transzformációját alkalmazták. A transzformált értékekre másodfokú polinomot illesztettek, majd a maradékok elemzésével a modell adekvátságát

ellenőrizték. A regressziós modellel extrapolációt is végeztek, majd a kapott értékeket összehasonlították egy korábbi kísérlet eredményeivel. A modell ebben az esetben is adekvát.

A kísérlettervezés és szimuláció kombinált módszerét alkalmazzák Baesler és társai (Baesler, 2004) egy fűrészüzem teljesítményének növelésére. A vizsgálatok fő célja a teljesítményt befolyásoló tényezők azonosítása, a gyártási folyamat szűk keresztmetszeteinek meghatározása. Egy  $2^4$  típusú teljes faktoriális kísérleti terv segítségével a következő tényezők hatását elemezték: a prizmázó síkforgácsológépet kikerülő rönkmennyiség, a rönkátmérő ingadozásának mértéke, a visszavágó körfűrész vágási sebessége, és a prizmázás előtti pozicionálási idő. A kísérleti beállítások eredményeit szimulálással állították elő, a válaszjellemző a 90 óra alatt feldolgozott rönkök száma volt. A hatások és kölcsönhatások hibával korrigált (standardizált) értékeit Pareto diagramon ábrázolják, majd az utolsó két faktor válaszjellemzőre gyakorolt hatását válaszfelülettel modellezik, az optimális beállítási szintek kijelöléséhez pedig szintvonalas ábrát készítenek. Az optimalizálás eredményeként a fűrészüzem teljesítménye 25%-al növekedett.

A kísérlettervezés módszerével ellenőrizték Zuo és társai (Zuo, 2004) azt a korábbi feltételezést, hogy a fűrészáru osztályok aránya és a belőlük méretre vágott alkatrészek kihozatala között lineáris összefüggés van. Faktorokként a különböző osztályok szerepelnek, melyeket 0-tól 1-ig súlyoznak úgy, hogy az arányok összege 1 legyen. A kísérletekhez a lehetséges hatból csupán két, illetve három minőségi osztály-kombinációt választanak. Az első esetben a két osztály arányát 25%-onként változtatják, a második esetben úgynevezett elegy terveket (mixture design) alkalmaznak. A faktorok beállítási szintje több mint kettő, így lehetőség van a kölcsönhatások és a négyzetes tagok becslésére is. Különböző szabástérképek felhasználásával kimutatják, hogy néhány osztálykombinációnál ez utóbbiak szignifikánsak, tehát a lineáris összefüggés nem minden esetben alkalmazható.



### 3.3. Faanyagjellemzők vizsgálata roncsolásmentes (ultrahangos) módszerrel

#### 3.3.1. Elméleti háttér

Az ultrahangos vizsgálat egyike azoknak, az utóbbi években a faiparban is elterjedt roncsolásmentes vizsgálati eljárásoknak, amelyek lehetővé teszik az alapanyag-felhasználás optimalizálását és a gyártási folyamatok hatékony és megbízható minőségszabályozását. Előnye a termelési vonalba történő integrálhatóságában és a viszonylag alacsony bevezetési költségekben rejlik. A fa és faalapú anyagok ultrahangos vizsgálatára általában két módszert, az árnyék eljárást és terjedési időn alapuló eljárást használják (Divós, 1999).

Az utóbbi módszer működési elve arra épül, hogy a piezo-elektromos konverter az elektromos energiát mechanikai energiává alakítja át, amely hullám formájában továbbterjed a vizsgált anyagban. Ha két jelátalakítót bizonyos távolságra elhelyezünk a próbatest felületén, lemérhetjük az ultrahang terjedési sebességét. Ez a sebesség összefüggésben van a vizsgált faanyag számos tulajdonságával (merevség, szilárdság, anizotrópia), ezért felhasználható a fahibák kiszűrésére (Divós, 2000), az alapanyagok és késztermékek osztályozására, a kompozitok ragasztási jóságának becslésére.

Az ultrahang terjedése a fa mikroszerkezetének rezgésén alapszik (Sandoz, 1996), és alapjában véve a hullám terjedési irányának rugalmas tulajdonságaitól függ.

A fára, mint ortotróp anyagra, alkalmazható az anizotróp anyagok általános Hook törvénye:

$$\sigma^{ij} = c^{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl} ; \quad \varepsilon_{ij} = s_{ijkl} \cdot \sigma^{kl} \quad [3.1.]$$

ahol:  $\sigma^{ij}$  – a feszültségi állapot tenzora

$\varepsilon_{kl}$  – az alakváltozási állapot tenzora

$c^{ijkl}$  – a merevségi együtthatók

$s_{ijkl}$  – az alakíthatósági együtthatók

A hang terjedése Newton mozgástörvénye alapján:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma^{ij}}{\partial x_j} \quad [3.2.]$$

Az ortotróp anyagok merevségi együtthatói és az ultrahang terjedési sebessége közötti kapcsolat a Christoffel egyenlet segítségével írható le:

$$\left[ \Gamma_{ij} - \rho \cdot v^2 \cdot \delta_{ik} \right] = 0 ; \quad \Gamma_{ij} = c^{ij} \cdot n_j \quad [3.3.]$$

ahol:  $\Gamma_{ij}$  – akusztikai tenzor vagy Christoffel merevség

$\rho$  - sűrűség

$v$  – az ultrahang terjedési sebessége

$\delta_{ik}$  - Kronecker-delta

$c^{ij}$  – a merevségi együtthatók rövidített reprezentációja

$n_j$  – az egység hullám normál vektorának komponensei

A merevségi mátrix tagjai az ultrahang terjedési sebessége függvényében fejezhetők ki:

$$c^{ij} = v_{ij}^2 \cdot \rho ; \quad i, j = L, R, T \quad [3.4.]$$

Ha a vizsgált próbatest egyik mérete legalább egy nagyságrenddel nagyobb, mint a másik kettő (egy dimenziós test) a [3.4.] képlet a következőképpen egyszerűsödik:

$$E_d = v^2 \cdot \rho \quad [3.5.]$$

Furnérlapok esetében csupán a vastagság tekinthető egy nagyságrenddel kisebbnek, mint a hosszúság és szélesség, ezért a fenti képletet a Poisson-tényezővel ( $\nu_{ij}$ ) korrigáljuk (Bejó, 2001):

$$E_d = \nu_{ij}^2 \cdot \rho \cdot (1 - \nu_{ij}) \quad [3.6.]$$

ahol  $i$  a hang terjedési iránya,  $j$  a terjedési irányra merőleges irány

A Poisson tényező meghatározása igen körülményes (Szalai, 1994), ugyanakkor Jung bebizonyította, hogy ez a korrekció furnérok esetében elhanyagolható (Jung 1979).

### 3.3.2. Az ultrahangos vizsgálatok előzményei

A rezgésjellemzők és az anyag rugalmassági tulajdonságai között fennálló szoros kapcsolatot már igen korán kimutatták (Ricatti, 1747 in Bejó, 2001), azonban a faipar a roncsolásmentes – és ezen belül az ultrahangos – vizsgálati módszereket csupán a 60-as évektől kezdte alkalmazni. Bodig szerint (Bodig, 2001) a faiparban a roncsolásmentes elemzések még mindig gyerekcipőben járnak.

A göcsök és a rostszőg hangterjedési sebességre gyakorolt hatását műszaki furnérokon vizsgálta Jung (Jung 1979). A hangsebesség és a rostszőg között erős korrelációt mutatott ki, ezzel szemben a ferdeszálúság a sebességet jelentősen nem befolyásolta. Rámutatott arra is, hogy minél keskenyebb a furnérlap, annál jobban becsülhető annak minősége. Ennek magyarázatát abban látta, hogy a göcsöknél a magas sűrűség okozta hangsebesség-növekedés a göcs után gyorsan csillapodik, a hullámpálya kisimul. Keskeny furnérokban ez a hullámpálya jobban korlátozott, a kiegyenlítődés később következik be.

Gerhards megállapította hogy a hanghullám terjedési sebességét a rostszőg, a hőmérséklet és a nedvességtartalom befolyásolja (Gerhards, 1982). Azonban a rosttelítettségi pont fölött – rosttal párhuzamos irányban – a nedvességtartalom a terjedési sebességet jelentősen már nem befolyásolja (Sakai, 1990).

Ross és Pellerin kimutatták, hogy az ultrahanghullám csillapodása érzékeny a ragasztási jellemzőkre, ezért sikeresen alkalmazható a fakompozitok húzó és hajlítószilárdságának előrejelzésére (Ross, 1988).

Az ultrahang amplitúdójának és frekvenciájának elemzésével a rétegelt ragasztott tartók ragasztási szilárdságát vizsgálta Beall és Biernacki (Beall, 1991).

Sun és Arima (Sun, 1998) arra a következtetésre jutottak, hogy forgácslapoknál a visszarugózás, és a lapra merőleges szakítószilárdság jól korrelál az ultrahang hossz- vagy vastagság irányú terjedési sebességével. OSB lapoknál korrelációt nem tapasztaltak.

A rostiránynak és a rostszőgnek az ultrahang terjedési sebességére és a vele szoros kapcsolatban álló merevségre gyakorolt hatását többen is vizsgálták (Suzuki és Sasaki 1990, Mishiro 1996, Bucur 1988), a korreláció minden esetben erősnek bizonyult.

Armstrong kimutatta, hogy a Hankinson formula nem csak a mechanikai tulajdonságok, hanem az ultrahang terjedési sebesség anizotrópiájának becslésére is alkalmas (Armstrong, 1991).

A fűrészáru szárítása közben keletkező felületi és belső repedések kimutatását a rostra merőleges irányú ultrahang terjedési sebesség függvényében vizsgálták Fuller és társai (Fuller, 1994). A mérési eredmények alapján azt a következtetést vonták le, hogy ezek a repedések kimutathatók.

Brashaw és társai sima fenyőből előállított hámozott műszaki furnérokban vizsgálták a nedvességtartalom és a védőszeres kezelés longitudinális hangterjedési sebességre és dinamikus rugalmassági modulusra gyakorolt hatását (Brashaw, 1996). A hangsebesség erős korrelációját állapították meg a nedves és száraz furnérok között, a korrelációt a különböző favédőszeres

(CCA, borát) lényegesen nem befolyásolták. Az eredmények lehetővé teszik a nedves furnérok feszültség hullámmal történő osztályozását, a különböző szilárdsági osztályokba sorolt furnérok osztályonkénti szárítását, végső soron pedig a furnérokból gyártott LVL tulajdonságainak tervezését.

Hidegen kötő ragasztó kikötését ultrahangos módszerrel ellenőrizték Biernacki és Beall (Biernacki, 1996). Az ultrahang terjedési sebességét különböző présnyomásokon, a ragasztás minősége és a kikötési idő függvényében mérték. A kiértékeléshez egy relatív és egy abszolút terjedési együtthatót definiáltak. Az relatív együttható a ragasztó teljes kikötésénél mért jel amplitúdójának négyzetes középértéke (RMS) és a kikötési folyamat különböző időpontjaiban mért jel közötti arányt, az abszolút együttható pedig a ragasztott minta és a tömörfában mért jel amplitúdójának RMS arányát jelöli. Kimutatták, hogy a présnyomás a hangterjedést jelentősen befolyásolja, a nyomásnövekedés először a terjedési együttható meredek emelkedését okozza, majd ez a növekedés jelentősen csökken. A hangterjedési görbék elemzésével a ragasztási hibákat (egyenetlen felhordás, a kevés ragasztó okozta tökéletlen ragasztás, kikötetlen ragasztó) is sikerült kimutatniuk.

Bükk rétegelt lemezek ragasztási jóságát ultrahangos módszerrel vizsgálták Iancu és társai (Iancu, 2000). A terjedési sebesség változásának függvényében ki tudták mutatni a 8 mm-nél hosszabb rétegeltválásokat, lineáris regressziós összefüggéseket állapítottak meg a hangsebesség és a dinamikus nyírórugalmasági modulus, nyírószilárdság, sűrűség kapcsolatára.

A hang terjedési sebességét vizsgálták három faalapú laptípuson (forgácslap, OSB, MDF) Bekhta és társai (Bekhta, 2000). Mérték a terjedési sebességet, illetve az ütéssel gerjesztett hanghullám rezonancia frekvenciáját, majd a segítségükkel kiszámított dinamikus rugalmasági moduluszt összehasonlították a statikus értékekkel. Elemezték a próbatest szélesség- és vastagság hatását is. Kimutatták, hogy a lapok fő tengelyével párhuzamosan a hangsebesség értékei nagyobbak, mint merőleges irányban, ami a laptípusok anizotróp jellegére utal. Az MDF lapok esetében a hangsebesség mindkét irányban jól korrelált a statikus rugalmasági moduluszal, ellenben a rezonancia frekvenciánál ugyanez nem mondható el. OSB lapoknál ez az összefüggés fordított, a fő tengellyel párhuzamosan a rezonancia frekvencia pontosabb becslést ad. A hajlítószilárdság és hangsebesség, illetve rezonancia frekvencia közötti kapcsolat gyengének bizonyult. Forgácslapoknál a próbatest szélesség a vizsgált tartományban (20-200 mm) nem befolyásolta a hangsebességet.

Wang és társai (Wang, 2001a) hámozott műszaki furnérok minőségét vizsgálták ultrahanggal és ütéssel gerjesztett feszültség hullámok segítségével. Legfontosabb minőségjellemzőnek a hámozási repedéseket tekintették, és kimutatták, hogy a repedések mélysége rostra merőleges irányban a terjedési sebességet jelentősen befolyásolja.

Wang és Chen OSB lapok szálforgácsainak elrendezését és az ebből következő ortotróp tulajdonságokat (hangsebesség, dinamikus rugalmasági modulus, hajlítórugalmasági modulus, hajlítószilárdság) vizsgálták ultrahangos módszerrel (Wang, 2001b). Az ultrahang terjedési sebességének ortotrópiáját a Hankinson és Jacoby formulákkal becsülték, az optimális  $n$  hatványkitevők a Hankinson függvényénél 1,8-2,6, a Jacobi egyenletnél 2,7-3,2 voltak. Erős lineáris korrelációt mutattak ki a két modell hatványkitevői között. Bebizonyították, hogy a fedőrétegek szálforgácsainak orientációja jelentősen befolyásolja a késztermék szilárdsági tulajdonságait. A dinamikus hajlítórugalmasági modulus és a hangsebesség, a statikus és a dinamikus rugalmasági modulus, valamint a MOE-MOR között lineáris kapcsolatokat mutattak ki. Az OSB sűrűséggel korrigált hajlítórugalmasági modulusának ( $MOE/\rho$ ) és hajlítószilárdságának ( $MOR/\rho$ ) anizotrópiája a tömörfa anizotrópiájához hasonló.

A dinamikus és statikus rugalmasági modulus összehasonlítását hibamentes lucfenyőn és akácon végezték el Passialis és Adamopoulos (Passialis, 2002). A DIN szabvány szerint

meghatározott statikus rugalmassági modulus jelentősen kisebb volt, mint a dinamikus modulus. A nyírófeszültségektől mentes vagy tiszta merevség és a dinamikus rugalmassági modulus szignifikánsan nem különbözött.

Szintén a dinamikus és statikus rugalmassági modulus kapcsolatát vizsgálta Ilic (Ilic, J 2001). A rezonancia frekvencia és spektrum analízis alapján meghatározta a terjedési sebességet, a rosttal párhuzamos rugalmassági modulust, a logaritmikus dekrementumot és a nyírási merevséget, majd összehasonlította a statikus értékekkel. A kapcsolatok lineárisak, az illeszkedések jónak bizonyultak.

Érintkezés nélküli ultrahangos módszerrel bükk és lucfenyő lokális rugalmassági anizotrópiáját vizsgálva Solodov (Solodov, 2004) megerősíti, hogy a módszer alkalmas vékony falemezek rugalmassági ortotrópiájának becslésére.

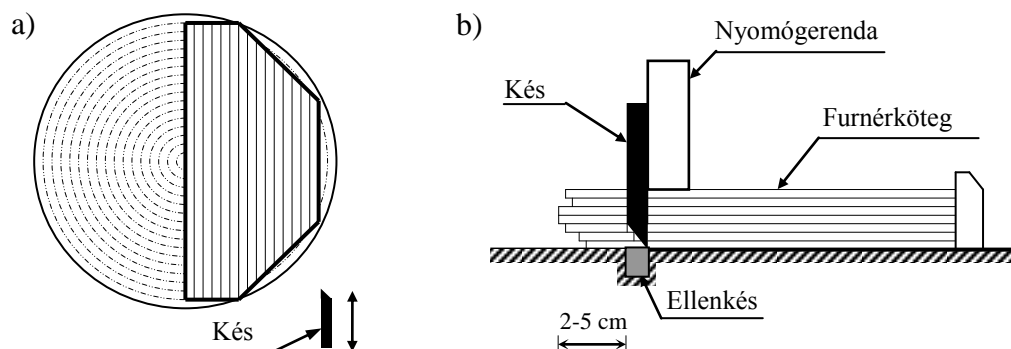
A szakirodalom alapján nyilvánvalóvá válik, hogy az ultrahangos vizsgálati módszerek a faiparban is igen sokoldalúan felhasználhatók, segítségükkel vizsgálható a fa és faalapú kompozitok mechanikai tulajdonságainak anizotrópiája, kimutathatók a különböző fahibák, ragasztási hiányosságok, alkalmasak a különböző fatermékek szilárdsági osztályozásához.

## 4. Előkísérletek: új típusú műszaki fatermékek előállítására a színfurnérok ollózási eselékéből

### 4.1. A késelési eselék keletkezése

Az innováció, a kutatás-fejlesztés a faiparban is fontos szerepet játszik olyan új technológiák és anyagok kifejlesztésében, amelyek képesek a fának, mint megújuló erőforrásnak a leghatékonyabb felhasználására, a faalapú hulladékok újrahasznosítására. Ezeket a törekvéseket, az elmúlt húsz év kutatásainak eredményeként megjelenő szerkezeti célú műszaki fatermékek (OSB, LVL, PSL, LSL), a fa-műanyag kompozitok, a módosított faanyagok testesítik meg. Tervezhető és irányítható fizikai-mechanikai tulajdonságaik, valamint a magasabb kihozatali értékeik révén a kifejlesztett új termékek versenyképes alternatívát jelentenek a többi építőanyaggal szemben. A környezettudatos szemlélet kialakulása azonban az új termékek és technológiák fejlesztésén túl a fatermékek és hulladékok kezelésére is ráirányította a figyelmet. Ideális megoldásnak tűnik a kettő ötvözete, amikor hulladékból állítunk elő megfelelő tulajdonságokkal bíró terméket. Ilyen hasznosítható hulladéknak minősülhet a színfurnérgyártás ollózási eseléke is.

A színfurnérok a megfelelő módon előkészített farönkből vagy prizmából hasítással vagy excentrikus hámozással előállított vékony falemezek. Hasításkor a megmunkáló gép szerszáma 0,5-0,8 mm vastag furnérokat választ le a prizmáról, a műveletet a 4.1a. ábra szemlélteti. A hasított furnérlapok végső méretét ollózással alakítják ki, az alkalmazott technológia függvényében szárítás előtt vagy után.



4.1. ábra A színfurnérgyártás műveletei: a – hasítás; b – ollózás

Az ollózási művelet a pengeshullás szerint képzett kötegeknek a négy él menti, derékszögű és párhuzamos szélezését jelenti, illetve minőségi hibák előfordulásakor a hibakiejtést. Az ollózás sematikus bemutatása a 4.1b. ábrán látható.



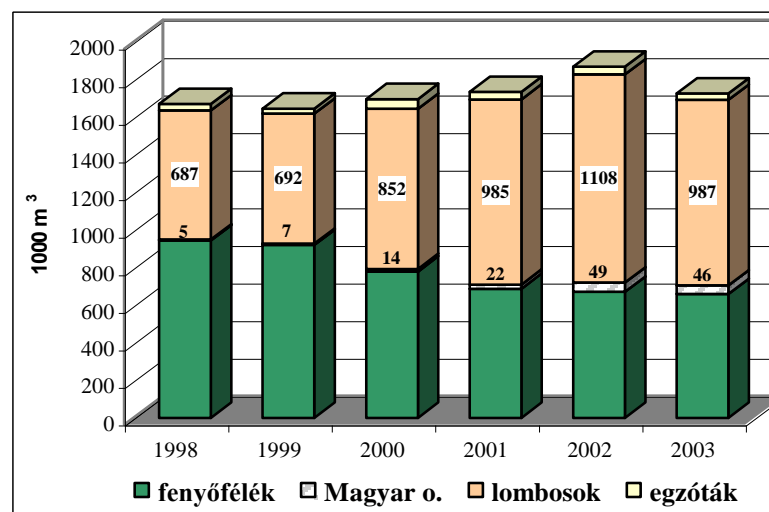
4.2. ábra Ollózáskor keletkező eseléktípusok

A furnérollózási művelet során kétféle hulladék keletkezik: egyrészt egy négyzetes, ostyaszerű végeselék, másrészt az egyik oldalon egyenes, a másikon változó szélességű, keskeny száleselék (4.2. ábra). A keletkező hulladékot legtöbbször felaprítják és eltüzelik, vagy ritkább esetben aprítékként tovább hasznosítják. Figyelembe véve, hogy a színfurnérgyártáshoz használt késelési rönk nemcsak a legdrágább, de tulajdonságait tekintve a legértékesebb ipari fa, az eselék ilyen megsemmisítése pazarlásnak tűnik, annál is inkább, mert az ollózás művelete igen jelentős anyagvesztéssel jár, hiszen a

rönkre vonatkoztatott ollózási veszteség elérheti a 20-35%-ot is. A kihozatali százalékok (35-50%) alapján ez azt jelenti, hogy 1 m<sup>3</sup> színfurnér gyártásakor 0,6-0,7 m<sup>3</sup> ollózási veszteség keletkezik (Molnár, 2002). A rendelkezésre álló alapanyag-mennyiség becsléséhez érdemes a statisztikákhoz és előrejelzésekhez fordulnunk.

## 4.2. Gazdasági szempontok

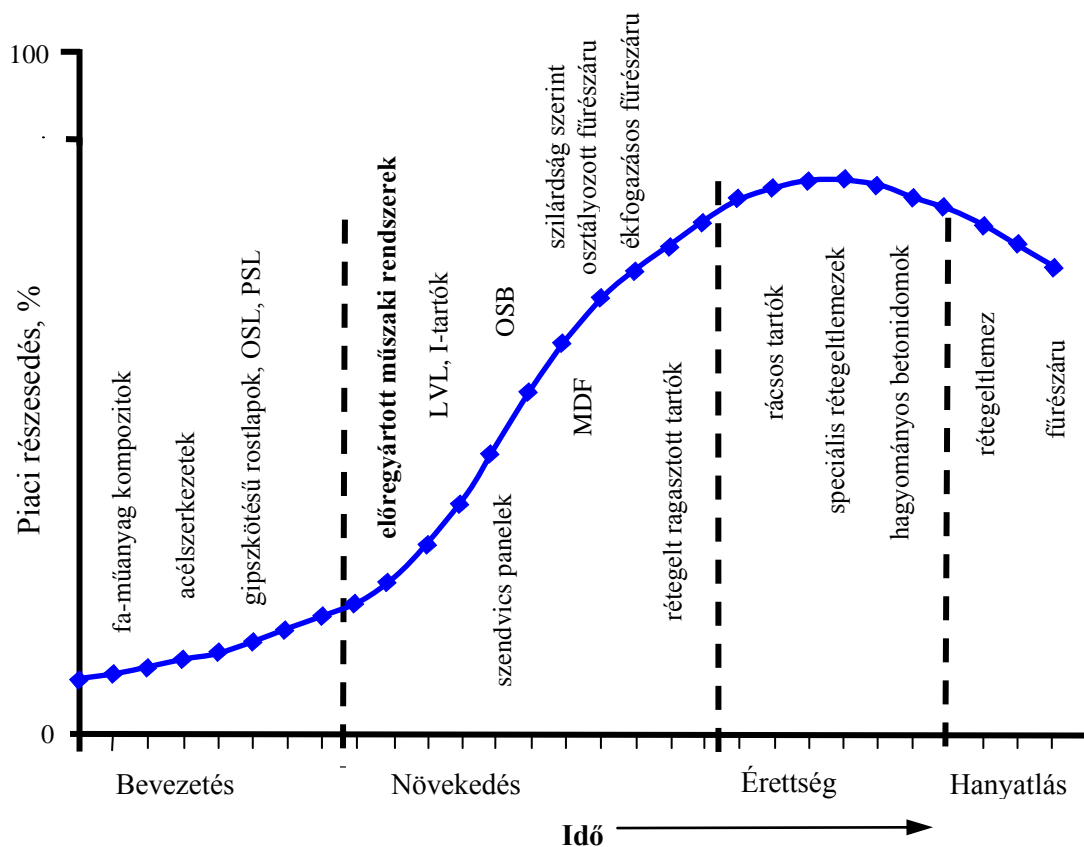
Európai viszonylatban a lombosokból és trópusi fafajokból gyártott furnérmennyiség az utóbbi években egy millió m<sup>3</sup> körül ingadozott (4.3. ábra), ez körülbelül évi 650.000 m<sup>3</sup> ollózási eselék megjelenését eredményezi. A statisztikák elkülönítik a rétegeltlemez termelést a furnértermeléstől, ezért feltételezhető, hogy a fenti lombos faanyagból főleg színfurnért gyártottak. A termelési adatokból becsült eselék-mennyiség közel megegyezik a 2003-as európai OSB-termelés negyedével, és még ha a Magyarországi színfurnértermelés nem is olyan jelentős, európai léptékben tekintélyes mennyiségű hulladékról van szó.



4.3. ábra Az európai furnértermelés fajfajonkénti megoszlása  
(Forrás: UNECE/FAO)

Az ollózási eselék hasznosítása gazdasági szempontból is indokolt, mert a fa alapanyagbázis legjobb alaki és szövetszerkezeti tulajdonságokkal bíró választékának legnagyobb hozzáadott értéket biztosító hasznosítási lehetősége továbbra is a színfurnérgyártás lesz (Molnár, 2002). Ebből következik, hogy főleg a keménylombos hengeresfa-kínálat számára kulcsfontosságú ez a szektor. Másrészt, ha az új típusú fakompozitok (OSB, LVL, PSL, LSL) termékéletpálya elemzését tekintjük (4.4. ábra), láthatjuk, hogy a műszaki fatermékek, és azon belül a furnér- és szálforgács alapú termékek a bevezetési, illetve a növekedési szakasz kezdetén találhatóak. Mindezt alátámasztják azok a jelentések is, melyek a műszaki fatermékek termelési kapacitásainak fejlődését elemzik (UNECE/FAO 2003, 2004). Következésképpen a kifejlesztetni kívánt új kompozit gazdaságos és versenyképes alternatívát jelenthet a szerkezeti termékek piacán.

A fentieket figyelembe véve, a rendelkezésre álló alapanyagbázis jelentős mennyisége és kedvező tulajdonságai alapján (hibamentes, homogén szövetszerkezet, alacsony 12-18%-os nedvességtartalom) az ollózási eselék alkalmas lehet nagy szilárdságú, műszaki fatermékek előállítására. Ezt a száleselék alakja is indokolja, hisz nagyon hasonlít a párhuzamos szálú furnérfa (PSL) alapanyagához. A kísérleti munka ezen szakaszában a színfurnérgyártás ollózási hulladékának új fakompozitok kifejlesztésére való alkalmasságát vizsgáltam. A kísérleteket a Nyugat-Virginiai Egyetem Faipari Intézetében végeztem.



4.4. ábra Különböző szerkezeti anyagok termékéletgörbén elfoglalt helye (Schuler, 2003)

### 4.3. Anyag és módszer

A kompozitok elkészítéséhez három, a színfurnérgyártáshoz az Apalache (USA) régióban gyakran használt fafaj keverékét alkalmaztam, megközelítőleg a következő arányokban: cseresznye (*Prunus Serotina*) 60%, vörös tölgy (*Quercus Rubra*) 35%, és juhar (*Acer spp.*) 5%. A száraz ollózási eselék alaki változtatás nélkül került felhasználásra, amiből különböző összetételű és réteg-felépítésű lapok készültek. Dobos enyvfelhordó segítségével a furnérok és szálforgácsok felületét fenol-formaldehid műgyantával (50% szárazanyag tartalom) vontam be, a száraz alapanyag tömegére vonatkoztatott 8-12%-os mennyiségben. A száleselék irányítottságát a terítékképzéshez alkalmazott formázó keret biztosította. A terítékképzés kézzel történt. A terítéket laboratóriumi hőprésben 135°C-os hőmérsékleten és 2,2 MPa nyomáson addig préseltem, amíg a lap közepének hőmérséklete el nem érte a gyanta kikeményedéséhez szükséges hőfokot. A ragasztó kikötéséhez előírt hőmérsékletet termoelemmel ellenőriztem. A sűrűség és lapvastagság szabályozásához különböző vastagságú távtartókat alkalmaztam. Az így elkészített lapok hajlító rugalmassági modulusának és hajlítószilárdságának értékeit az ASTM D-1037 szabvány szerint határoztam meg.

### 4.4. Eredmények

A furnérollózáskor keletkező vég- és száleseléket egymással vagy szálforgáccsal (OSB hosszúforgács) kombináltam, mindösszesen nyolc laptípust állítva elő. A kompozitok rugalmassági tulajdonságait a 4.1. táblázat összegzi. A táblázatban szereplő eredmények a lapokból kivágott 8 próbatest átlagértékeit mutatják.

## 4.1. táblázat Színfurnérok ollózási eselékéből készült kompozitok rugalmassági tulajdonságai

Kompozit típus	Vastagság, mm	Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>			Hajlító rugalmassági modulus, MPa			Hajlítoszilárdság, MPa			
		Átlag	CV <sup>1</sup>	% <sup>2</sup>	Átlag	CV	%	Átlag	CV	%	
<b>Ref. OSB</b>	18,2	597	1,3		6327	7,3		21,9	13,3		
<b>A</b>	19,8	636	1,4	106,5	9889	3,5	156,3	44,6	6,6	203,6	
<b>B</b>	<b>B<sub>1</sub></b>	19,2	739	4,2	123,7	11309	6,4	178,7	82,2	15,9	375,3
	<b>B<sub>2</sub></b>	35,7	673	6,7	112,7	11809	12,6	186,6	70,4	32,4	321,5
<b>C<sub>1</sub></b>	17,8	664	5,1	111,2	9936	8,0	157,0	50,6	18,5	231,1	
<b>C<sub>2</sub></b>	17,7	643	4,6	107,8	11164	5,5	176,5	73,1	9,3	333,8	
<b>D</b>	17,4	677	5,6	113,4	5595	10,5	88,4	37,2	16,1	169,9	
<b>Ref. lap</b>		622			11250			76			
<b>E<sub>1</sub></b>	<b>E<sub>11</sub></b>	11,3	725	10,5	116,5	17010	11,5	151,2	120	16,8	157,9
	<b>E<sub>12</sub></b>	17,9	677	6,8	108,8	15351	11,3	136,5	109,7	15,8	144,3
<b>E<sub>2</sub></b>	11,4	728	3,6	117,1	13206	8,5	117,4	89,1	10,0	117,2	
<b>F</b>	<b>F<sub>1</sub></b>	17,9	745	3,6	119,8	14582	5,6	129,6	109,5	15,5	144,1
	<b>F<sub>2</sub></b>	36,3	700	4,3	112,5	12553	12,0	111,6	78,7	34,9	103,6
<b>G</b>	<b>G<sub>1</sub></b>	11,4	813	4,0	130,6	13200	6,2	117,3	97,2	5,4	127,9
	<b>G<sub>2</sub></b>	31,1	739	2,4	118,8	16900	5,4	150,2	145,9	8,4	192,0

<sup>1</sup> – variációs együttható  
<sup>2</sup> – a referencialaphoz viszonyított változás

Az első laptípus (**A**) a kereskedelemben kapható OSB lapból készült, amelynek mindkét felületét 2-2 réteg száleselékkel vontam be. Eredményként a lap látszólagos rugalmassági modulusa 50%-kal, hajlítoszilárdsága 100%-kal nőtt. Ily módon egy közönséges OSB lap nemcsak szilárdabbá, hanem – víztaszító ragasztó alkalmazásával – a nedvességgel szemben ellenállóbbá is tehető. A középrétegben 50% szálforgácsot, a fedőrétegekben 25-25% száleseléket tartalmaz a **B** típusú termék (4.5a. ábra). A két vastagságban előállított kompozit (**B<sub>1</sub>**, **B<sub>2</sub>**) valamivel nagyobb sűrűséggel rendelkezik, mint a referencia OSB lap, és különösen a hajlítoszilárdsága igen kedvező. Annak ellenére, hogy a rétegek vastagsága nem egyenletes, a kapott értékek alapján mind lemez, mind gerenda típusú termék gyártására alkalmas változat. Rétegelt szerkezetet mutat a **C<sub>1</sub>**-el jelzett kompozit, melynek felépítése a következő: 3 réteg furnér - fedő szálforgács - 3 réteg furnér – közép szálforgács - 3 réteg furnér - fedő szálforgács – 3 réteg furnér. A **C<sub>2</sub>** típusú lap csupán abban különbözik **C<sub>1</sub>**-től, hogy a fedőrétegekben 5-5 réteg száleselék található. Közel azonos sűrűség mellett, a fedőrétegben elhelyezett 2-2 réteg furnértöbblet jelentősen megnövelte a második laptípus merevségét és szilárdságát.

Gyaluforgács újrahasznosítási lehetőségét testesíti meg a **D**-vel jelzett termék. Itt a gyaluforgácsot 30,5 cm (12”) hosszúra vágott száleselékkel kevertem össze fele-fele arányban (4.5b. ábra). A létrehozott lap inhomogén szerkezetet mutat, merevsége kisebb a referencia lap merevségénél, viszont hajlítoszilárdsága kellően magas. Egyenletes terítékképzéssel rugalmassági tulajdonságai tovább javíthatók, ezáltal a termék sikeresen veheti fel a versenyt az alacsonyabb szilárdsági osztályú irányított szálforgácslapokkal.

Szál- és végeselékéből készült lapok tulajdonságait tartalmazza a 4.1. táblázat második fele. Az összehasonlítás végett egy olyan referencia lap tulajdonságait számítottam ki, amelyik figyelembe veszi a felhasznált fafajok rugalmas tulajdonságait és az eselék keverékének százalékos összetételét. A számításhoz a párhuzamosan rétegelt-ragasztott testek modelljét alkalmaztam.





a) Száleselék – szálforgács lapok.



b) Kompozit gyaluforgács és rövidfurnér keverékéből.



c) Ollózási eselékből készült lapok.



d) Lap és gerenda típusú termékek 5 mm keskeny furnérszálakból.

#### 4.5. ábra Színfurnérok ollózási eselékből készült kompozitok

A 100% száleseléket tartalmazó, párhuzamosan orientált és két vastagságban előállított lapok ( $E_{11}$ ,  $E_{12}$ ) rugalmassági modulusa, illetve hajlítószilárdsága átlagosan 47%-al haladja meg a referencia lap hasonló értékeit. Az  $E_2$ -vel jelölt kompozitoknál, melyek szintén csak száleseléket tartalmaznak, az orientáció hatását úgy vizsgáltam, hogy minden második réteget  $45^\circ$ -kal és ellentétesen keresztvezve elforgattam. Az eredmények jól tükrözik a faanyag ortotróp tulajdonságának érvényesülését. A középrétegben 50% végeseléket, a fedőrétegekben 25-25% száleseléket találunk az  $F$ -el jelölt termékekben (4.5c. ábra). Tulajdonképpen ez a kompozitváltozat jelenti az ollózási hulladék teljes mértékű hasznosítását. A rugalmassági tulajdonságok mért értékei alapján nyilvánvalóvá válik, hogy ebből a hulladékból szerkezeti célra is alkalmas lap ( $F_1$ ), illetve tartó ( $F_2$ ) típusú termék állítható elő. A táblázatban utolsóként feltüntetett  $G$  lap alapanyaga a száleselékből vágott 5-6 mm széles furnérsík (4.5d. ábra). Az aprítás célja a homogenizálás volt. A megjelenésében PSL-hez hasonlító kompozit az átlagnál magasabb sűrűséggel és igen nagy hajlítószilárdsággal rendelkezik.

## 5. Színfurnérok hajlítórugalmassági modulusának anizotrópiája

### 5.1. Az anizotrópia becslésére alkalmazott modellek

A roncsolásmentes vizsgálatok ultrahangos módszere előnyösen alkalmazható a fa és faalapú anyagok mechanikai tulajdonságainak becslésére, osztályozására. Furnérok esetében a módszer alkalmazása azért is indokolt, mert az anyagvastagság a statikus vizsgálatokat nagyon körülményessé teszi. Ebben a fejezetben a színfurnérok hajlítórugalmassági modulusának anizotrópiáját vizsgálom száraz és fenol-formaldehid műgyantával bevont próbatesteken. Az irányfüggés becsléséhez a Hankinson és a tenzor elmélet szerinti modelleket alkalmazom.

Mind az ultrahang terjedési sebessége, mind a merevség függ a rostiránytól, a terjedés illetve az igénybevétel iránya és a rostok által bezárt szög nagyságától (Bucur, 1999). A fa rugalmasságának és szilárdságának változását a rostszőg függvényében sokan vizsgálták, és különböző egyenletek formájában e kapcsolatot meghatározták (lásd tudományos előzmények). Az első empirikus egyenletet Hankinson állapította meg (Hankinson, 1921), és a nyomószilárdság becslésére a következő képletet alkalmazta:

$$N = \frac{P \cdot Q}{P \sin^2 \theta + Q \cos^2 \theta} \quad [5.1.]$$

ahol: N – a szilárdsági tulajdonság  $\theta$  szögnél  
 P – a rosttal párhuzamos szilárdság  
 Q – a rostra merőleges szilárdság  
 $\theta$  - rostszőg

Az egyenletet később általánosították, és a trigonometrikus függvények kitevőjét egy tetszőleges n értékre változtatták, amelyet empirikus úton kell megállapítani (Kollmann és Cote, 1968). Ez az egyenlet más mechanikai tulajdonságok (rugalmassági modulus, húzószilárdság, hajlítószilárdság, stb.) irányfüggését is jól becslő, illetve az ultrahang terjedési sebességével is jól korrelál (Armstrong, 1991).

Az ortotróp tenzor elmélet a rugalmas tulajdonságok anatómiai fősíkokban való változását a rostszőg függvényében a következő képlettel fejezi ki (Szalai, 1994):

$$\frac{1}{E_{ij}^{k(\alpha)}} = \frac{1}{E_i} \cdot \cos^4 \alpha + \left( \frac{4}{E_{ij}^{k(45)}} - \frac{1}{E_i} - \frac{1}{E_j} \right) \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos^2 \alpha + \frac{1}{E_j} \cdot \sin^4 \alpha \quad [5.2.]$$

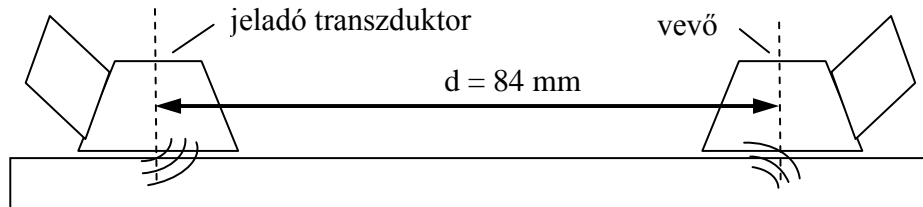
ahol:  $E_i, E_j$  – az anatómiai főirányokkal párhuzamos rugalmassági modulusok  
 $E_{ij}^{k(45)}$  – az i,j sík szögfelező irányához tartozó rugalmassági modulus  
 $\alpha$  - az i,j síkban az i anatómiai főiránnyal bezárt szög

### 5.2. Vizsgálati módszerek, próbatestek kialakítása

Bükk (*Fagus sylvatica*) és juhar (*Acer pseudoplatanus*) furnérkötegekből véletlenszerűen választottam ki két-két egymás melletti lapot, mindkét fafajból összesen 30-30 darabot. Az egyikből 120x120 mm-es négyzet alakú, a másikkól - ugyanarról a helyről - két-két 120x38 mm-es próbatestet vágtam, rosttal párhuzamos és rostra merőleges irányban. Az egymás melletti elhelyezkedés valószínűsíti, hogy a két furnér lap mechanikai tulajdonságai közel azonosak, így az egyik próbatesten meghatározott jellemző megegyezik a másik próbatest jellemzőjével és fordítva. Ezt az összehasonlítást végezt tartottam fontosnak. A színfurnér minták függőleges hasítással készültek, orientációjukat tekintve a sugár (LR) és tangenciális (LT) metszetek közötti átmeneti zónából kerültek ki, frízes vagy úgynevezett „csíkos” jelleget mutattak.

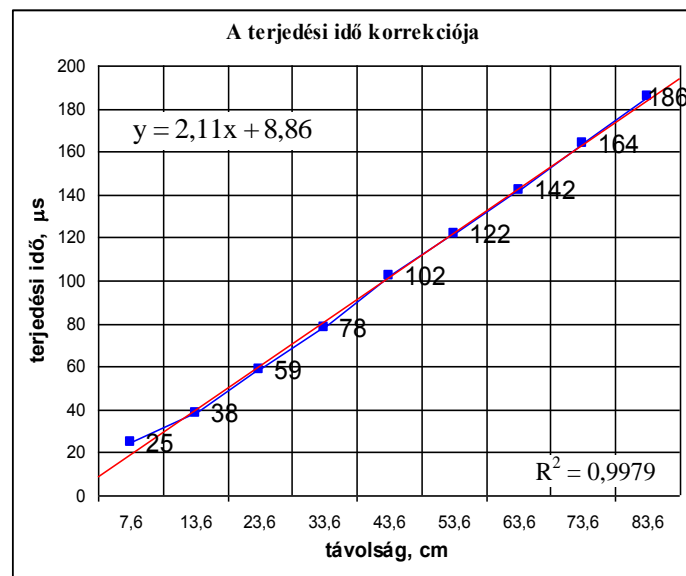
### 5.2.1. A dinamikus rugalmassági modulus meghatározása ultrahanggal

A négyzet alakú mintákon egymástól 84 mm-re elhelyezett piezo-elektromos konverterek segítségével 15 fokként mértem az ultrahang terjedési sebességét. A terjedési idő leolvasásához oszcilloszkópot használtam, a BaTi piezo-aktív transzduktor frekvenciája 45 kHz, a leolvasási pontosság  $\pm 0.5 \mu\text{s}$  volt. A mérés elvi sémáját mutatja az 5.1. ábra.



5.1. ábra Ultrahangos vizsgálati berendezés

A mért terjedési idő magába foglalja a hullám áthaladási idejét a háromszög alakú hullámterelőkből, ezért 8,86  $\mu\text{s}$ -os időkorrekció bevezetése szükséges (5.2. ábra).



5.2. ábra Az ultrahang terjedési idejének korrekciója

A technológiai behatások méréséhez a 120x120 mm-es próbatesteket rezol típusú fenol-formaldehid műgyantával vontam be, a felhordást hengeres enyvfelhordóval végeztem. A gyanta szárazanyag-tartalma 40%, a felhordott átlagos mennyiség 75 g/m<sup>2</sup>. A préselés szimulálásához a próbatesteket nem közvetlenül a préslapok közé, hanem egy furnérköteg közébe helyeztem. Préselési paraméterek: préselési hőmérséklet 145° C; présnyomás 1,5 MPa; présidő 10 perc. A kikeményedés után a mintákon ismét elvégeztem – 15°-ként – az ultrahang terjedési sebességének mérését.

A furnérokat a műgyantával való bevonás és préselés során két fontos hatás éri, amelyek megváltoztatják azok mechanikai tulajdonságait:

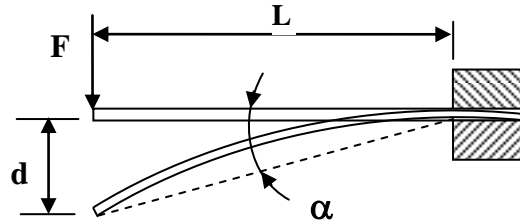
- a nyomás hatására a próbatestek bizonyos mértékben tömörödnek
- a felhordott mennyiség függvényében a fenol-formaldehid műgyanta a felületen elterül, és bizonyos mélységig beszívódik, majd a hőmérséklet hatására térhálósodik, és kiköt.

Az első esetben, ha a tömörödés csak olyan mértékű, hogy nem okoz a sejtszerkezetben roncsolódást, akkor a mechanikai tulajdonságok növekedése várható (Xu, 1998). Másrészt Bodig és Jayne szerint a fenol-formaldehid műgyantabevonat a hajlító- és nyomószilárdságot növeli, a húzási és dinamikus ellenállást pedig csökkenti (Bodig, 1982).

### 5.2.2. A statikus rugalmassági modulus meghatározása hajlító vizsgálattal

Az ultrahang terjedési sebességéből becsült dinamikus- és a statikus rugalmassági modulusok összehasonlítása végett mind a száraz, mind a gyantával bevont próbatesteket kétpontos statikus hajlító vizsgálatoknak vettem alá. A 120x120 mm-es műgyantával bevont mintákból 80x38 mm-es csíkokat állítottam elő, párhuzamos és merőleges irányokban, majd a papíriparban használt **Büchel 116BD** típusú elektronikus merevségmérővel (leolvasási pontosság  $\pm 2\%$ ) mértem a próbatestek hajlításához szükséges erőt.

A készülék működési elve, és a Young modulus meghatározása:



$$E = \frac{60 \cdot F \cdot L^2}{\pi \cdot \alpha \cdot I}, \text{ N/mm}^2$$

5.3. ábra Kétpontos statikus hajlítás

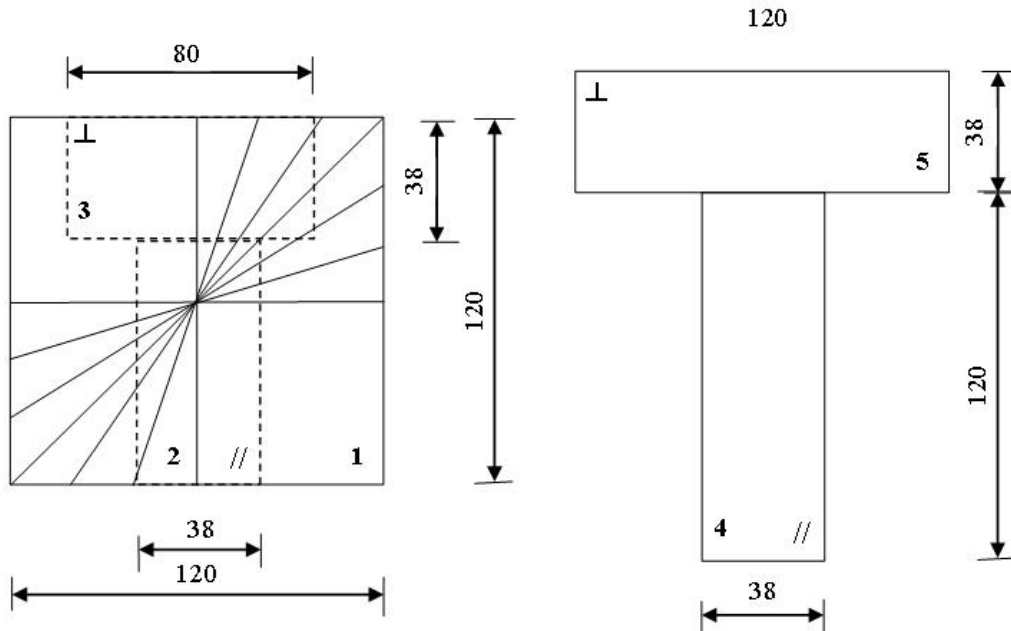
ahol: F – a hajlításához szükséges erő Newtonban

L – vizsgálati hossz mm-ben

$\alpha$  – hajlítási szög, fokban

I – a keresztmetszet másodrendű nyomatéka,  $\text{mm}^4$

A 120x38 mm-es rostiránnyal párhuzamos, száraz próbatestek mérését mindkét oldalon 2-2 helyen, a merőleges és műgyantával bevont próbatestek mérését pedig mindkét oldalon 1-1 helyen végeztem el. A próbatestek szabásmintája látható az 5.4. ábrán:



1 – száraz, illetve műgyantával bevont próbatest az ultrahangsebesség anizotrópiájának meghatározásához  
2, 3 – rosttal párhuzamos, illetve merőleges műgyantás minta statikus hajlításához

4, 5 – rosttal párhuzamos, illetve merőleges száraz furnér próbatest statikus hajlításához

5.4. ábra A vizsgálatokhoz alkalmazott próbatestek szabásmintája

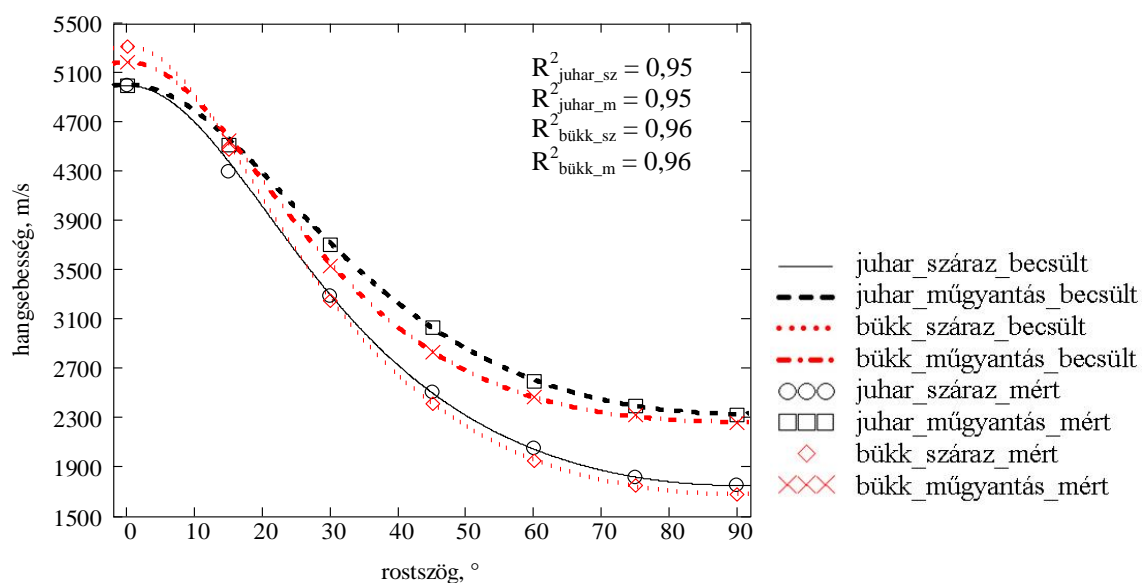
### 5.3. Eredmények

A mérési eredményeket az 5.1., 5.2. táblázatok, illetve az 5.5. – 5.9. diagramok foglalják össze. A diagramokon a vonaltípusok jelentése mindvégig azonos, az 5.5. ábrán megadottak szerinti. A száraz és műgyantával bevont mintákon mért hangsebességeket tartalmazza az 5.1. táblázat. Száraz próbatestek esetében a mért értékek közelítenek a szakirodalom tömör fára vonatkozó adataihoz, az esetleges eltérések részben a mérőhatással (Bucur, 1999), részben pedig a színfurnérhasítás során keletkező felületi repedésekkel magyarázhatók. A rostra merőleges értékek jól tükrözik a minták orientációjának a sugár és húr metszetek közötti átmeneti jellegét.

5.1. táblázat A hangsebesség értékei a rostirány függvényében

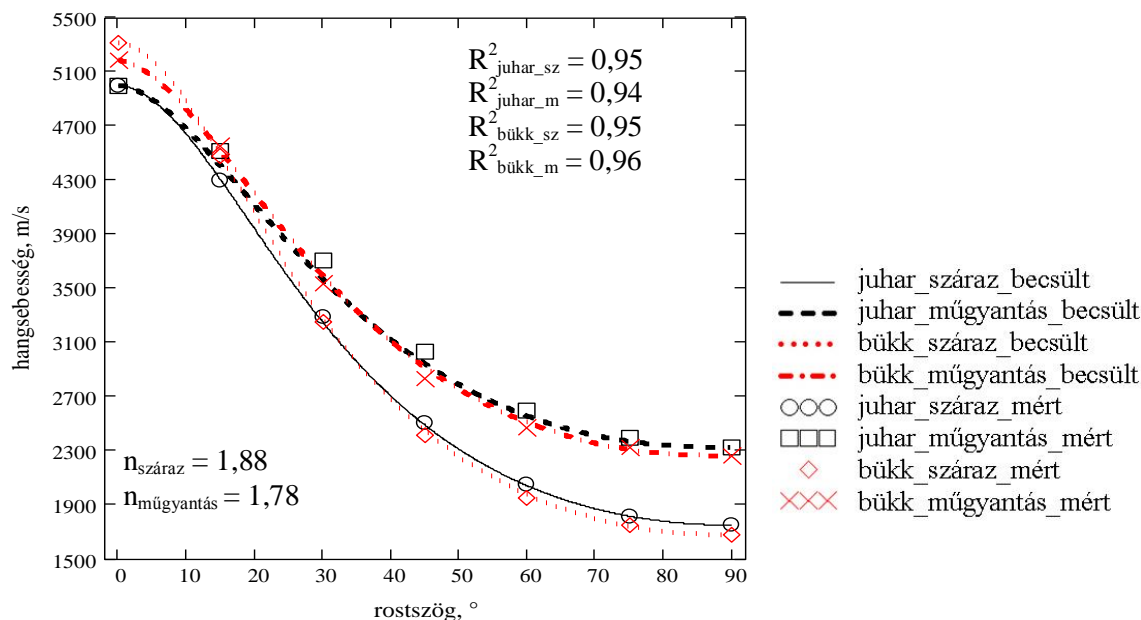
	juhar száraz		bükk száraz		Juhar műgyantás		bükk műgyantás	
	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV
sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	592,4	6,6	635,8	6,1	703,5	7,7	773,4	6,7
rostszőg, °	<b>Hangsebesség, m/s</b>							
0°	4993,1	9,1	5307,4	7,0	4994,6	7,7	5179,1	5,9
15°	4292,2	8,7	4475,7	7,2	4512,1	6,9	4542,7	6,3
30°	3283,4	7,4	3250,3	8,3	3698,6	5,6	3526,5	5,4
45°	2496,9	7,2	2407,7	9,9	3024,4	5,1	2831,3	5,6
60°	2041,2	7,4	1945,2	12,1	2594,5	5,5	2460,1	7,1
75°	1805,6	9,5	1741,3	15,8	2394,2	6,8	2314,4	7,5
90°	1746,1	10,4	1671,3	16,1	2321,7	7,8	2257,4	6,6

Az 5.5. és 5.6. ábrák a hangsebesség változását mutatják a rostiránnyal bezárt szög függvényében 0°-tól 90°-ig, mindkét fafajra, illetve a kezeletlen és a műgyantával bevont próbatesteken. Az első ábrán a mért pontokra az ortotróp tenzor-elmélet transzformációs összefüggését [5.2.] illeszttem, a második ábrán a kétdimenziós módosított Hankinson függvényt [5.1.] alkalmaztam. Utóbbi esetben a két fafajra az  $n$  kitevő legjobb illeszkedést adó értékei kezeletlen mintákra 1,88, a műgyantával kezelt mintákra pedig 1,78. Mindkét modell jól illeszkedik a mért adatokra ( $r^2 > 0,9$ ).



5.5. ábra A hangsebesség mért értékei és az ortotróp tenzor-elmélet alapján illesztett görbék

Száraz mintáknál 15°-ig a fafajok között szignifikáns különbség figyelhető meg ( $p < 0,05$ ), majd az eltérés megszűnik, és a rostszög növekedésével a hangsebesség először meredeken, majd 60° után mérsékelten csökken. Hasonló tendencia tapasztalható a fenol-formaldehid műgyantával bevont próbatesten is, azonban a fafajok között a 30-60°-os intervallumban statisztikailag jelentős eltérés mutatható ki.



5.6. ábra A hangsebesség mért értékei és a módosított Hankinson egyenlet alapján illesztett görbék

Ha a száraz és műgyantás mintákat hasonlítjuk össze látható, hogy a görbék 15°-ig hozzávetőleg egymás mellett futnak, utána fokozatosan távolodnak egymástól. Vagyis a rostokkal közel párhuzamos irányban a fenol-formaldehid műgyanta bevonat nem befolyásolja a hangsebességet, de a rostszög növekedésével a hatás jelentőssé válik. Az eredmények azzal magyarázhatók, hogy a késelés következtében fellépő felületi repedések rostirányban futnak, így a kezeletlen furnérokon hatásuk a rostiránytól való eltéréskor markánsabb, mint a műgyantával kezelt mintákon, ahol a késelési repedéseket a ragasztó bizonyos mértékig kitölti.

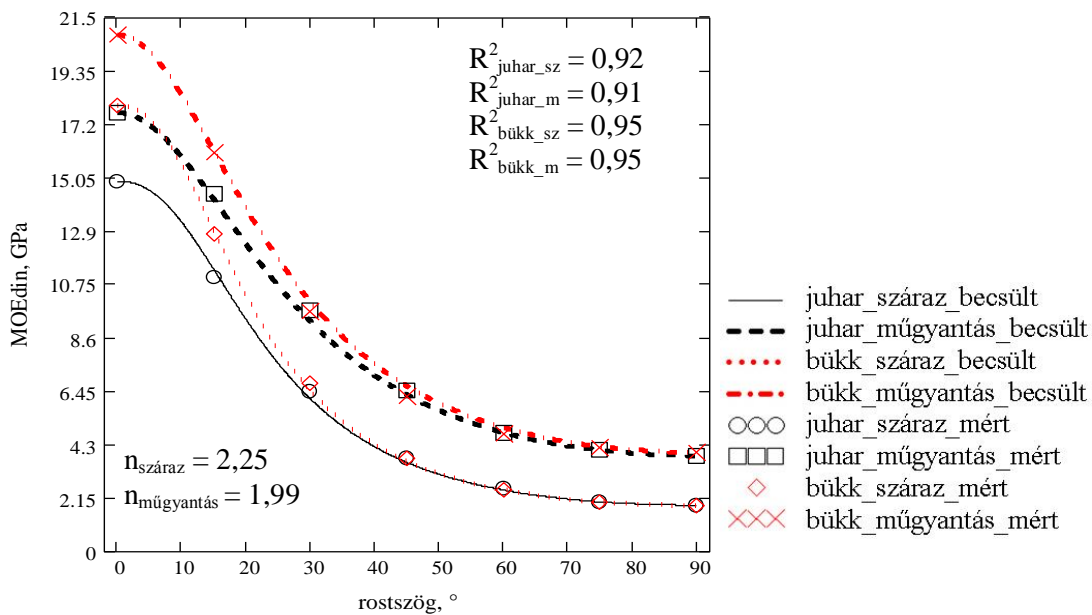
A hangsebességgel becsült dinamikus hajlítórugalmassági modulus értékeit az 5.2. táblázat mutatja, az 5.7. ábra pedig a rostiránnyal bezárt szög függvényében való változás menetét hasonlítja össze a négyféle próbatesten.

5.2. táblázat A dinamikus hajlítórugalmassági modulus értékei a rostirány függvényében

	Juhar száraz		bükk száraz		juhar műgyantás		bükk műgyantás	
	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV
sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	592,4	6,6	635,8	6,1	703,5	7,7	773,4	6,7
rostszög, °	<b>MOE<sub>d</sub>, MPa</b>							
0°	14876	19,0	17941	13,3	17642	17,1	20772	12,2
15°	10983	18,2	12772	14,0	14386	16,1	16015	13,8
30°	6406	14,6	6753	16,6	9658	14,0	9641	12,1
45°	3707	15,0	3719	20,3	6464	14,0	6225	13,4
60°	2476	14,8	2440	26,0	4762	15,2	4714	17,2
75°	1948	19,7	1974	33,2	4069	17,9	4173	17,5
90°	1826	21,7	1820	33,6	3834	19,5	3964	15,7

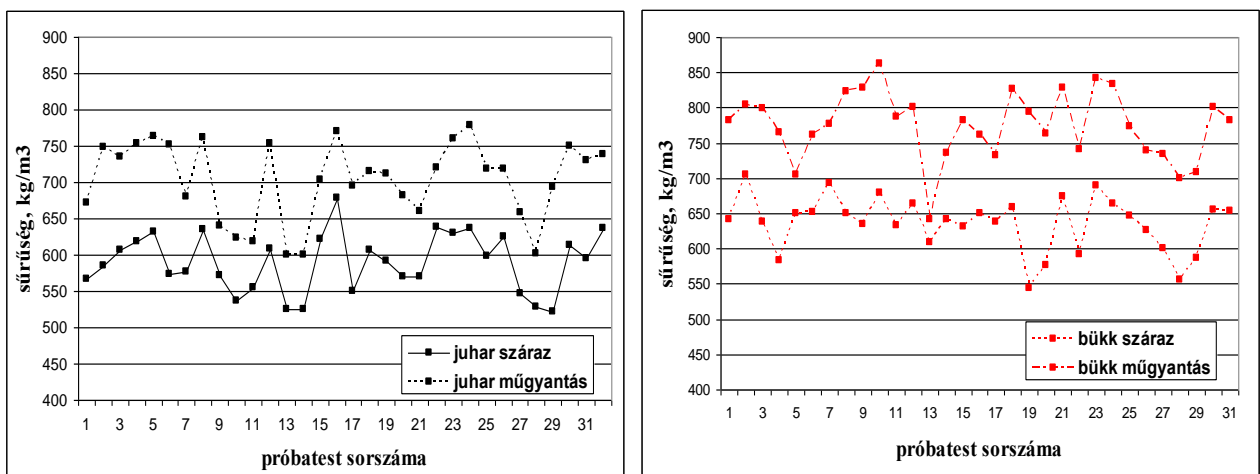
A mért értékekre a görbéket az általánosított Hankinson-képlet alapján illesztettem,

meghatározva az  $n$  kitevő optimális értékeit. A dinamikus hajlítórugalmassági modulus rostra merőleges értékei megfelelnek a szakirodalom által megadott értéktartományoknak (Bucur, 1995), a rosttal párhuzamos értékek magasabbak.

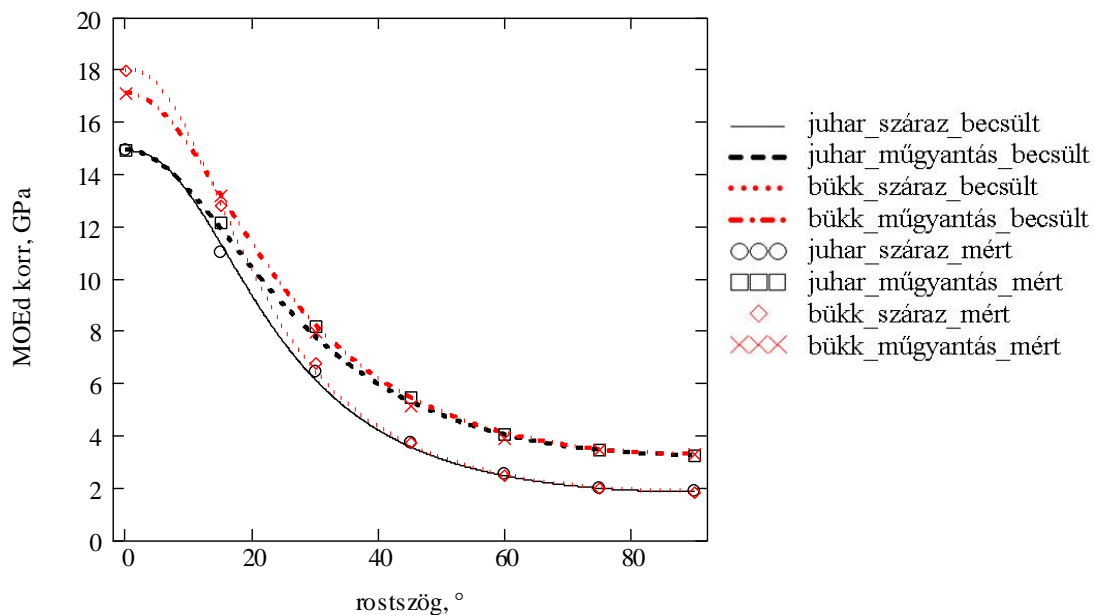


5.7. ábra A dinamikus rugalmassági modulus változása a rostirány függvényében és a módosított Hankinson-függvény alapján illesztett görbék

A két fafaj rugalmassági modulusainak eltérése rostirányban mintegy 20%, a különbség  $10^\circ$  után rohamosan csökken, és mintegy  $30^\circ$ -tól kezdve megszűnik. Hasonló a menete a műgyantával kezelt próbatestek görbéinek is, melyek ordinátái  $0^\circ$ -tól  $90^\circ$ -ig közel azonos különbséget tartanak a kezeletlen próbatestek görbeitől, így a rostszög növekedésével a műgyantával bevont és a kezeletlen minták dinamikus rugalmassági modulus értékeinek hányadosa egyre nagyobb (lásd 1. melléklet). A dinamikus rugalmassági modulusok kis szögeknél ( $0$ - $15^\circ$ ) tapasztalt erősebb elkülönülésében a két fafaj eltérő sűrűsége és a felületre felvitt műgyanta sűrűsénövelő hatása (5.8. ábra) mutatkozik meg, ennél nagyobb rostszögnél a tömörödés és a gyanta repedéskitöltő hatása is fellép. Ezt bizonyítja az 5.9. ábrán látható diagram is, ahol a dinamikus rugalmassági modulusot a műgyantabevonat sűrűsénövelő hatásával korrigáltam.



5.8. ábra A műgyanta sűrűsénövelő hatása



5.9. ábra A száraz és a sűrűséggel korrigált műgyantás színfurnérok dinamikus rugalmassági modulusának változása a rostirány függvényében és a módosított Hankinson függvény görbéi

A hajlítással mért statikus rugalmassági modulus rosttal párhuzamos és rostra merőleges értékeit az 5.3. táblázat tartalmazza:

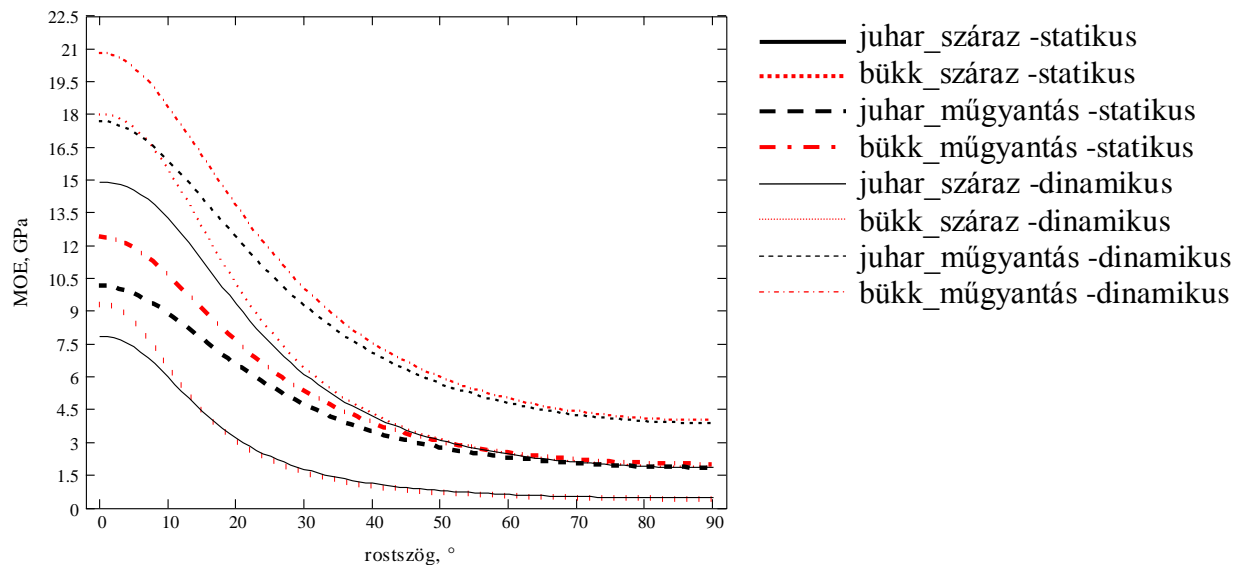
5.3 táblázat A statikus rugalmassági modulus értékei

	juhar száraz		bükk száraz		juhar műgyantás		bükk műgyantás	
	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV
rostszög, °	MOE <sub>s</sub>							
0° (//)	7863	21,2	9288	19,0	10179	20,7	12599	14,7
90° (⊥)	441,4	26,9	378,6	42,8	1811,1	16,9	1968,2	17,4

A tömör faanyag statikus hajlítórugalmassági modulusához képest a párhuzamos irányban mért értékek a variációs intervallum alsó határának értékeihez közelítenek, rostra merőleges irányban még annál is alacsonyabbak. Ennek oka a színfurnérok repedezettségében, illetve a rugalmassági modulus meghatározásában rejlik. A kiszámítási képlet ugyanis nem veszi figyelembe a késelés során keletkező felületi repedéseket, amelyek átlagos mélysége bükk furnéroknál a vastagság akár 15-25%-áig is terjedhet (Plahov, 1975), juharnál pedig elérheti az 50%-ot (Cassens, 2003). Ez a repedezettség rosttal párhuzamos hajlításkor csak kismértékben, rostra merőleges hajlításkor azonban erőteljesen befolyásolja a hajlítási merevséget. Ezért az utóbbi esetben, a képletben szereplő másodrendű nyomaték kiszámításához a repedések átlagos mélységét figyelembe kell venni. 20%-os viszonylagos mélységgel számolva a rostra merőleges statikus rugalmassági modulusok már közel megkétszereződnek, és közelítenek a szakirodalmi adatokhoz.

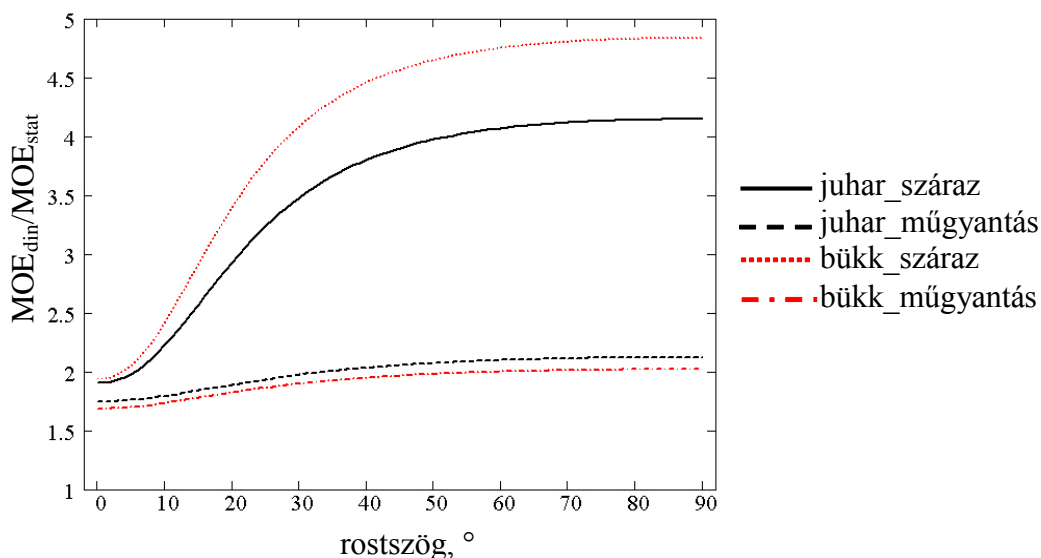
Az 5.10. ábra a dinamikus és a statikus rugalmassági modulusok értékeit hasonlítja össze. A statikus hajlítórugalmassági modulus irányfüggését a Hankinson egyenlettel becsültem, felhasználva a dinamikus modulusnál megállapított optimális  $n$  kitevőket. A modulus változása a rostiránnyal bezárt szög függvényében hasonló tendenciájú, és a négyféle minta esetében egymáshoz viszonyítottan is hasonlóan alakul, mint a dinamikus modulusé. Azonos próbatesteknél a dinamikus rugalmassági modulus értékek irodalmi közlések szerint (Bodig, 1982.) mintegy 5-15 %-kal nagyobbak, mint a statikus modulusok. Ebben az esetben a különbségek ennél jelentősen nagyobbak.





**5.10. ábra** A dinamikus és a statikus rugalmassági modulus változása a rostirány függvényében, a módosított Hankinson függvényel modellezve

Az 5.11. ábrán a dinamikus és statikus rugalmassági modulusok aránya látható. Kezeletlen mintáknál ez az arány a rostiránytól való eltérés függvényében először meredeken növekszik, majd körülbelül 40°-tól alig változik. A megfigyeléseket két okkal magyarázhatjuk. Egyik, hogy a szabványos hajlító vizsgálat értékelése az elsőrendű elméleten alapul, azaz a használatos egyszerű összefüggésekben a rugalmas szál alakját leíró differenciálegyenletből elhagyjuk a differenciálhányados magasabb hatványait. Ebben az esetben a fellépő geometriai nemlinearitás feltehetően növeli az elhanyagolás hibáját. A repedések hatásával együtt, ez eredményezheti az alacsony statikus rugalmassági modulus értékeket. A másik valószínű ok az, hogy a vizsgálat módjából adódóan a statikus merevség a hosszirányú repedések miatt a rostiránytól eltérő terheléskor lényegesen erősebben csökken, mint a dinamikus modulus. Ugyanakkor a gyanta repedéskitöltő hatása a kezelt mintáknál ezt az arányt a rostiránnyal bezárt szög teljes tartományában gyakorlatilag azonos értéken tartja.



**5.11. ábra** A dinamikus és statikus rugalmassági modulusok hányadosának változása a rostiránnyal bezárt szög függvényében

## 6. Tervezett kísérletek: eszköz az irányított tulajdonságú, robusztus termék előállításához

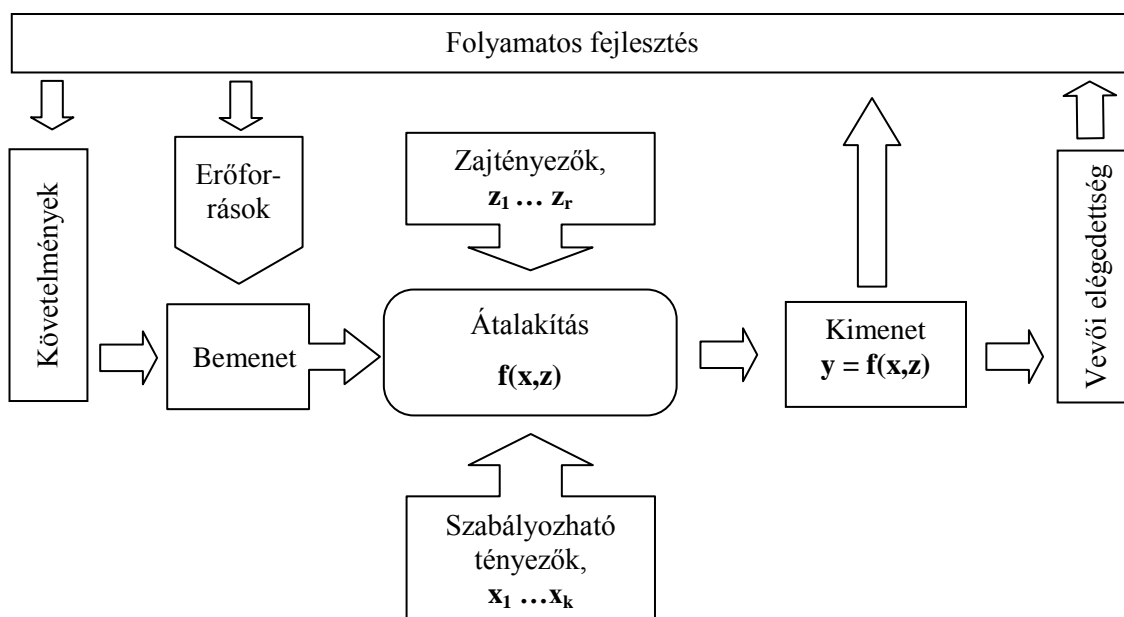
” A kísérletezés, a világ megismerésének egyik hatékony módja”  
A. C. Atkinson

### 6.1. A kísérlettervezés módszertana

Ha egy termék minőségét a használatra való alkalmasság és a követelményeknek való megfelelés szempontjából közelítjük meg, akkor ezt alapvetően a tervezés minősége, illetve a termék-előállítási folyamat vagy folyamatrendszer minősége fogja meghatározni. Ez utóbbi nem lesz más, mint a tervezési előírásoknak való megfelelés, tehát a kiindulási pont ebben az esetben is a tervezés.

A tervezés minőségét a konstrukció, a kiválasztott anyagok, technológiák, stb. befolyásolják, míg a folyamat minőségét annak stabilitása és a követelmények teljesítésének képessége. A stabilitás feltétele a termék minőségjellemzőinek – az előírt tűréshatárokon belüli – véletlenszerű ingadozása és az ingadozás időbeni állandósága. Ennek teljesülése esetén, a múltbéli adatok alapján lehetőség nyílik a folyamat jövőbeni viselkedésének előrejelzésére. Képesnek nevezünk egy folyamatot, ha az előállított termékek minőségjellemzőinek ingadozása az előírt tűréshatárokon belül van. Ha a minőség fogalmát az ingadozásokra szűkítjük, akkor a minőség fordítottan arányos lesz az ingadozással, így a minőségfejlesztés a termék- és folyamatjellemzők ingadozásának csökkentését jelenti.

A minőség és termelékenység fokozása akkor a leghatékonyabb, ha a termék vagy folyamat fejlesztési ciklusának szerves részét képezi. A tervezett kísérletek módszertanának bevezetése a fejlesztési ciklus legkorábbi szakaszában, ahol új termék tervezése, a régi továbbfejlesztése és a gyártási folyamatok optimalizálása a cél, jelentős mértékben segítheti a termék sikerét. A statisztikai kísérlettervezés eredményes használata olyan termékekhez vezethet, amelyek gyártása könnyen megvalósítható, magas fokú megbízhatósággal rendelkeznek, és teljesítményük is a lehető legmagasabb.



6.1. ábra A termék-előállítási folyamat általános modellje

A termék minőségi jellemzőit a gyártás során nagyszámú szabályozható és szabályozhatatlan tényező vagy zajtényező befolyásolja (6.1. ábra), melyek bonyolult

kölcsönhatási rendszere nagyon gyakran kevésbé ismert és dokumentált, ami a termék jövőbeni teljesítményének becslését bizonytalanná teszi, illetve az ismeretek hiánya rossz döntéseket, minőségi és megbízhatósági problémákat eredményez.

Tervezett kísérletek alatt egy olyan kísérletsorozatot értünk, amelynek során a folyamatot befolyásoló tényezők előre meghatározott beállítási értékeit – bizonyos szabályok betartásával – úgy variáljuk, hogy minimális számú kísérlet elvégzésével a folyamatra vonatkozó lehető legtöbb információt nyerjük. Ez a független változók függő változóra gyakorolt hatásainak azonosítását, azok nagyságainak meghatározását, a folyamat leírására alkalmas matematikai modell felállítását jelenti.

A módszer lehetőséget teremt a vizsgált jelenség vagy objektum belső, oksági törvényszerűségeinek feltárására, az ok-okozati összefüggések matematikai leírására, a független változók optimális működési tartományának kiválasztására (Kemény, 2000).

Mindezek alapján a termék vagy folyamat kísérlettervezéssel történő fejlesztése három alapvető szakaszra bontható: a termék/folyamat jellemzése, szabályozása és optimalizálása. Az első szakaszban a választényező ingadozását jelentős mértékben befolyásoló tényezők azonosítása történik. Ezt követően a termékjellemzők stabilitását biztosító beállításokat keressük, végül a legjobb teljesítményjellemzőket eredményező faktorszintek kijelölésével az optimális feltételek keresésével zárul a folyamat.

### 6.1.1. Faktoriális kísérleti tervek

Ha a független változók optimális működési tartományát viszonylag egyszerű, lineáris vagy legfeljebb másodfokú függvények alkalmazásával keressük, és a válaszjellemzőt befolyásoló tényezők száma nem túl nagy, a faktoriális kísérletek alkalmazása javasolt, melynek során az összes tényezőt egyidejűleg változtatjuk. A kísérlet tervezése a független változók terében azon pontok kijelölését jelenti, amelyekben kísérletet kívánunk végezni. A megfelelően megválasztott kísérleti tervek segítségével a függő és független változók közötti kapcsolat alacsony fokszámú polinomok segítségével approximálható, a modell paraméterei, melyek az egyes tényezők hatását számszerűsítik, nagy statisztikai biztonsággal, egymástól függetlenül becsülhetők. További előnyt jelent, hogy a tényezők egyidejű változtatása lehetővé teszi a faktorok közötti kölcsönhatások kimutatását, így információt nyerünk arra vonatkozóan, hogy az egyes tényezők hatásai milyen mértékben függenek más faktorok beállítási szintjeitől.

A legegyszerűbb és legkönnyebben kezelhető tervezett kísérlet a  $2^p$  típusú teljes faktoriális terv, amikor a  $p$  számú faktor két beállítási szintjének minden kombinációját megvalósítjuk. A tényezők szintjeinek kijelölése a kísérletezési tartomány nagyságának, a faktorok beállítási hibájának, és a variációs intervallum megválasztásának alapján történik. A tervezési mátrix előállításakor előnyös, ha elvégezzük a változók skála-transzformációját, így az  $x_j$  faktor értéke a felső szinten  $+1$ , az alsó szinten  $-1$  lesz:

$$x_j = \frac{z_j - z_j^0}{\Delta z_j} \quad [6.1.]$$

ahol:  $z_j$  – a  $j$ -edik faktor alsó vagy felső szintje  
 $z_j^0$  – a faktor alapszintje  
 $\Delta z_j$  – a variációs intervallum

Ahhoz, hogy faktoriális tervek által meghatározott kísérleti pontokra illesztett modell paramétereire a legjobb becslést kapjuk, a kísérleti mátrix a következő tulajdonságokkal kell rendelkezzen:

- mindegyik faktor oszlopvektorában az elemek összege nulla (középpontra vonatkozó szimmetria):  $\sum_{i=1}^N x_{ji} = 0$ ,

ahol: -  $j$  a faktor sorszáma

-  $N$  a kísérleti beállítások száma

2. mindegyik oszlop elemeinek négyzetösszege egyenlő a kísérleti beállítások számával (normálási feltétel):

$$\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 = N$$

3. bármely két oszlopvektor skaláris szorzata nulla (ortogonalitás):

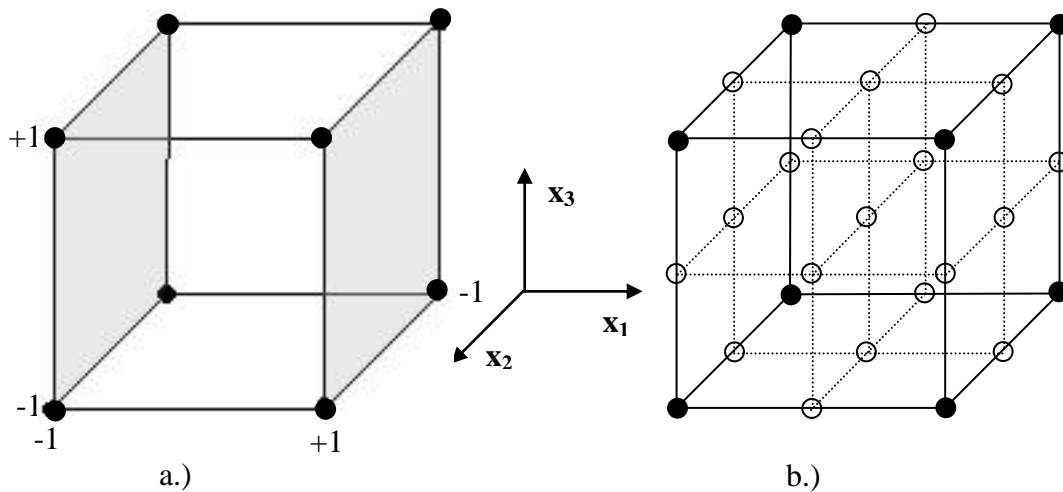
$$\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot x_{ui} = 0, (j \neq u)$$

4. a függő változó becslésének pontossága a középponttól egyenlő távolságra egyforma és nem függ az iránytól (elforgathatóság)

Egy, a felsorolt tulajdonságokkal rendelkező háromtényezős, teljes faktoriális tervek mátrixát mutatja az 6.1. táblázat, geometriai ábrázolását pedig a 6.2.a ábra.

6.1. táblázat  $2^3$  típusú kísérleti tervek mátrixa

Beáll.	Faktorok és kölcsönhatások								y
	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> x <sub>3</sub> (x <sub>4</sub> )	
1	+	-	-	-	+	+	+	-	y <sub>1</sub>
2	+	+	-	-	-	-	+	+	y <sub>2</sub>
3	+	-	+	-	-	+	-	+	y <sub>3</sub>
4	+	+	+	-	+	-	-	-	y <sub>4</sub>
5	+	-	-	+	+	-	-	+	y <sub>5</sub>
6	+	+	-	+	-	+	-	-	y <sub>6</sub>
7	+	-	+	+	-	-	+	-	y <sub>7</sub>
8	+	+	+	+	+	+	+	+	y <sub>8</sub>



6.2. ábra Háromtényezős teljes faktoriális tervek geometriai ábrázolása két (a) és három (b) beállítási szinttel

A faktorok számától és befolyásuk jellegétől, nagyságától függő kísérlet tervek meghatározása után ki kell választani azt a matematikai modellt, amely legjobban illeszkedik a kísérleti pontokra. A kétszintes tervekre illeszthető, főhatásokat és kétfaktoros kölcsönhatásokat is tartalmazó modell alakja egy nem teljes másodfokú polinom:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j \cdot x_j + \sum_{i < j} \sum_{j=1}^p \beta_{ij} \cdot x_i x_j + \varepsilon \quad [6.2.]$$

ahol:  $y$  – valamely kísérleti beállításnál mért érték

$\varepsilon$  – kísérleti hiba, normális eloszlással ( $\varepsilon \sim N(0, \sigma)$ )

A függvény paramétereit ( $\beta_0, \beta_j, \beta_{ij}$ ) a következő képletekkel becsülhetjük:

$$\hat{\beta}_j \equiv b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}; \quad \hat{\beta}_{ij} \equiv b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_j x_i \cdot y_i}{N} \quad j = 0, 1, \dots, p; \quad [6.3.][6.4.]$$

ahol  $x_j x_i (j \neq i)$  a kétfaktoros vagy másodrendű kölcsönhatásokat jelöli.

Az így kapott együtthatók az egyes faktorok és kölcsönhatások erősségét mutatják, értékeik kifejezik, hogy mennyit változik a válaszjellemző, ha az adott faktor az alapszintről a felső vagy alsó szintre módosul. Ennek kétszeresét nevezzük a faktor főhatásának (Adler, 1977).

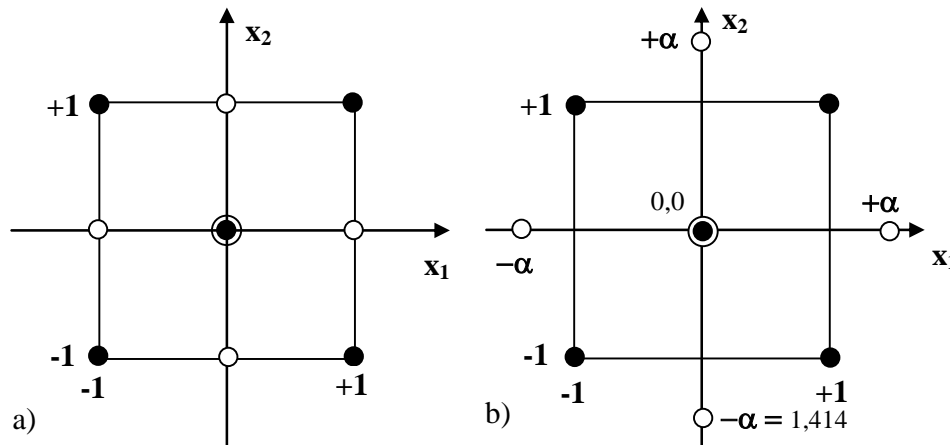
A faktorok számának növekedésével rohamosan nő a szükséges kísérleti beállítások, és a harmad-, vagy annál magasabb rendű kölcsönhatások oszlopvektorainak száma is. Ha feltételezhetjük, hogy ez utóbbiak jelentősége kicsi, akkor a lineáris modell együtthatóinak meghatározásához kevesebb kísérleti beállítás is elegendő, így a jelentéktelennek ítélt kölcsönhatások helyére új tényezőket helyezhetünk (pl. az 2. táblázatban  $x_1 x_2 x_3$  helyére  $x_4$ -t), csökkentve a tervezési mátrix méretét. Ezt a műveletet nevezzük frakcionálásnak és az ilyen terveket rész- vagy frakcionált faktorterveknek. A frakcionálás hátránya, hogy bizonyos hatások és kölcsönhatások egymástól függetlenül nem becsülhetők, a hatások keverednek. Az együtthatók becslésekor előálló keveredési rendszer bonyolultsága függ az eredeti tervbe bevitt új faktorok számától és helyétől. Amennyiben a figyelembe nem vett kölcsönhatások mégis szignifikánsnak bizonyulnak, a keveredő együtthatók becslési bizonytalansága növekedik.

A keveredési rendszer megállapítása a meghatározó kontraszt és a generáló összefüggések segítségével történik. A kontraszt az oszlopok olyan szorzatát jelenti, amelynek minden eleme +1 vagy -1, míg a generáló összefüggés megmutatja, hogy egy adott hatással milyen más hatások vagy kölcsönhatások keverednek (pl. az 2. táblázat alapján  $x_4 = x_1 x_2 x_3$ ;  $x_1 = x_2 x_3 x_4$ ;  $x_1 x_2 = x_3 x_4$ ).

A részfaktor terv hatékonysága függ a keveredési rendszertől és a terv úgynevezett feloldóképességétől. Hacsak nincsenek a kölcsönhatásokra vonatkozó előzetes ismereteink, törekednünk kell arra, hogy a főhatások minél magasabb rendű kölcsönhatásokkal keveredjenek (negyed-, ötöd rendű rezolúciós tervek). A főhatásokkal keveredő szignifikáns interakciók elkülönítésére alkalmazható az átváltásos módszer, mely során kiegészítő tervek segítségével és a megfelelő generáló összefüggések kiválasztásával, a keveredő hatások különválaszthatók. Frakcionált terveknél az egyes beállítások közül a legjobb még nem biztos, hogy az optimális értéket is jelenti, hisz a terv által nem tartalmazott kombinációk eredményeit nem ismerjük. Ezért is fontos az egyes tényezők főhatásainak szétválasztása. A többszörösen frakcionált vagy telített terveket, melyekben a kísérleti beállítások száma egyenlő a modell együtthatóinak számával, általában az optimalizációs feladatok kezdetekor érdemes alkalmazni, amikor csupán a főhatások független becslése a cél. Ezáltal lehetővé válik a jelentéktelen tényezők kihagyása a további kísérleti munkából, a megmaradt faktorok hatásainak kisebb tervekkel való alaposabb vizsgálata.

A kezdeti kísérletek után a magasabb fokú – általában másodfokú – polinom-modellekre való áttérés jelenti a továbblépés irányát (Adler, 1978). Ilyen esetek: a választott lineáris matematikai modell nem illeszkedik kellő pontossággal a kísérleti pontokra, azaz a függvény nem adekvát; vagy feltételezzük, hogy a tényezők négyzetes hatása is jelentős, esetleg az optimum közelében járunk és a gradiens mentén való haladás hatástalanná válik. A kvadrátikus hatások becslésére két lehetőségünk van: három- vagy többszintes kísérleti tervek alkalmazása; a kétszintes kísérleti tervek kiegészítése centrumponttal és úgynevezett csillagpontokkal.

Az utóbbiakat kompozíciós terveknek nevezzük (Kemény, 2000).



6.3. ábra Lapon centrált (a) és elforgatható (b) kompozíciós tervek két tényezőre (Kemény, 2000)

Háromtényezős, háromszintes kísérleti terv geometriai elrendezése látható a 6.2b. ábrán, a kéttényezős kompozíciós terveket a 6.3. ábra szemlélteti.

Az ily módon előállított tervekre illeszthető matematikai modell alakja kiegészül a négyzetes tagokat magába foglaló taggal:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} \cdot x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} \cdot x_i^2 + \varepsilon \quad [6.5.]$$

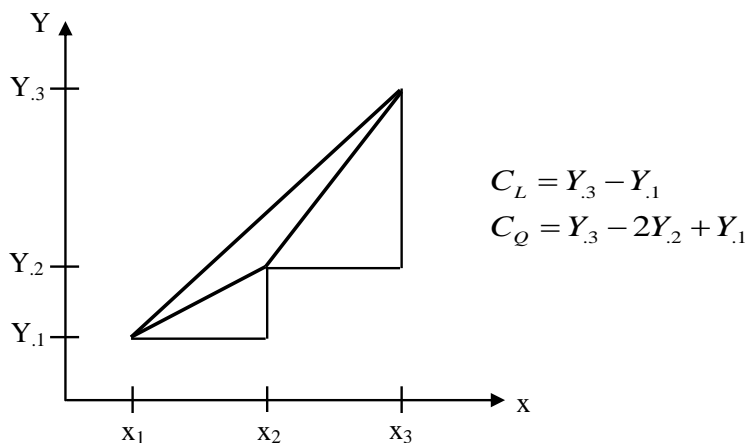
Másodfokú terveknel az  $x_i$  együtthatókat úgy képezzük, hogy a nullával jelölt alapszinthez hozzáadjuk és kivonjuk a variációs intervallumot (-1; 0 ;+1). Általános esetben a négyzetes tagokra az ortogonalitás feltétele nem teljesül, ezért az eredeti faktorértékek transzformációja szükséges:

$$x'_{ji} = x_{ji}^2 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ji}^2 \quad [6.6.]$$

Ezek után a négyzetes tagok paramétereinek becslését a következő képlettel kapjuk:

$$b_{jj} = \frac{\sum_{i=1}^N x'_{ji} \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N (x'_{ji})^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{ji}^2 - \overline{x_j^2}) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^N (x_{ji}^2 - \overline{x_j^2})^2} \quad [6.7.]$$

Az 6.4. ábra a lineáris és négyzetes hatások kontrasztjai közti különbséget érzékelteti:



6.4. ábra Háromszintes tervek lineáris és négyzetes kontrasztjai (Hicks, 1993)

Kvadratikus hatás létezésekor az  $Y_{.2}-Y_{.1}$  és  $Y_{.3}-Y_{.2}$  lineáris hatások különböznek (a hatásvonalak meredeksége eltérő), ami görbe vonalú hatásdiagramot eredményez.

### 6.1.2. Adatelemzés, kiértékelés

A termék vagy folyamat minőségjellemzőit befolyásoló tényezők kiválasztása, a kísérletezési tartomány nagyságának meghatározása, a beállítási szintek számának, és az illeszthető matematikai modell megválasztása után történik a kísérlet végrehajtása, a felsorolt feltételek alapján előállított kísérleti mátrix szerint. Ezt követi a kapott adatok feldolgozása, kiértékelése és interpretálása, a modellre vonatkozó hipotézisek vizsgálata. Az adatfeldolgozás alapvető célja a lehető legtöbb információ kinyerése az adott kísérleti tervből, valamint adott mértékű kockázattal a megfelelő következtetések levonása.

A kísérletek megvalósításánál figyelembe kell venni, hogy minden kísérlet tartalmaz bizonyos hibát, mely lehetetlenné teszi a pontos reprodukálást. Ez a hiba egy összegzett mennyiség, tartalmazza mind a faktorok beállítási, mind a válaszjellemző mérési hibáit, a figyelembe nem vett tényezők ingadoztató hatását. A hibák két nagy csoportba sorolhatók: vannak véletlen hibák és szisztematikus hibák. A véletlen kísérleti hibák folyamatra gyakorolt egyedi hatása csekély, megjelenésük véletlenszerű, ebből kifolyólag megelőzésük szinte lehetetlen. A szisztematikus hibákat olyan okok hozzák létre, amelyek rendszeresen lépnek fel és a minőségjellemzőre gyakorolt hatásuk jelentős lehet.

A kísérleti hibák negatív hatását a kísérleti beállítások véletlenszerű sorrendben történő végrehajtásával csökkenthetjük (randomizálás), a hiba nagyságát azonos körülmények között végzett párhuzamos kísérletekkel becsülhetjük (replikáció).

A szisztematikus hibák kiküszöbölése érdekében, vagy amikor a kísérleti körülmények nem homogének, alkalmazhatjuk a blokkokra osztás módszerét. Ennek lényege, hogy a kísérleteket a zavaró hatások kombinációi szerinti csoportokra osztjuk, így elkülöníthetjük a többi faktor hatásától (Kemény, 2000).

A kísérleti adatok kiértékeléséhez alkalmazott módszerek kiválasztása a faktorok jellegétől függ. Minőségi változók esetén a varianciaanalízis (ANOVA) alkalmazható, mennyiségi változóknál úgy a varianciaanalízis, mint a regresszióelemzés. Amennyiben a független változók vegyesek, a kétféle elemzés kombinációját, az általános lineáris modellt használjuk. Az első módszernél a faktorszintek között nem értelmezhető függvénykapcsolat (nincs értelme a görbe illesztésnek), így kvalitatív modell állítható elő. A regresszióanalízis a független ( $x_i$ ) és függő ( $y$ ) változók között fennálló kapcsolatot mennyiségileg határozza meg (kvantitatív modell), a becsült modell interpolációra és extrapolációra egyaránt alkalmas. Ahhoz, hogy a statisztikai vizsgálatok elvégezhetőek legyenek, mindkét módszernél bizonyos feltételek kell teljesüljenek.

A regresszióanalízisnél használt legkisebb négyzetek módszerének alkalmazási feltételei:

- Az optimalizációs paraméter normális eloszlású.
- A  $y$  válaszjellemző szórásnégyzete nem függ  $y$  nagyságától.
- A faktorértékek nem véletlen mennyiségek, beállítási bizonytalanságuk jelentősen kisebb, mint a variációs intervallum szélessége és a reprodukálhatósági hiba.
- A faktorok között nincs korreláció.

A varianciaanalízis alkalmazási feltételei:

- A varianciák homogének.
- A hibák függetlenek.
- Az adatok normális eloszlásúak.

Az  $\varepsilon$  kísérleti hibára vonatkozó feltételezések:

- $E(\varepsilon_{ij}) = 0$ , vagyis  $y_{ij}$  adatok a  $\mu_i$  várható érték körül ingadoznak.

- $Var(\varepsilon_{ij}) = \sigma_e^2 = konst.$ , minden  $i$  csoport hibáinak varianciája egyforma (homoszcedaszticitás).
- az  $\varepsilon_{ij}$ -k csoporton belül és kívül is függetlenek egymástól.
- az  $\varepsilon_{ij}$ -k normális eloszlásúak.

A felsorolt feltételek ellenőrzését a reziduumok (a kísérleti pontokban mért és a modell által becsült értékek különbsége) grafikus vizsgálatával végezzük, amikor a maradékokat a kísérletek elvégzésének sorrendjében, a mérési adatok függvényében, valamint Gauss-hálón ábrázoljuk.

A kísérleti hiba varianciájának becslése történhet az ismételt mérések alapján, vagy annak hiányában a reziduumok szórásnégyzetével, ha ezt eléggé kis tartományra szűkítjük. Harmadik lehetőség a hibaterjedési törvény alkalmazása. Nem egyforma számú párhuzamos beállítás esetén megszűnik a mátrix ortogonalitása, ekkor súlyozott középértéket kell alkalmazni a reprodukálhatósági hiba kiszámításához. Ha nincs ismétlés, a nem szignifikáns hatások és kölcsönhatások oszlopai fölhasználhatók a maradék- vagy error szórásnégyzet becslésére, így lehetővé válik a szignifikancia becslés. Az ilyen szórásnégyzetek maradék szórásnégyzetbe vonásával (pooling) növeljük annak szabadsági fokát, vagyis a becslés biztonságát. Ezt akkor érdemes elvégezni, ha a hatás véletlen előfordulásának valószínűsége nagyobb, mint 0.25, de ha a faktor bármely kölcsönhatásánál  $p < 0.25$  a hatást ne hagyjuk el. (Kemény, 2000).

Mind a regressziószámítás, mind a varianciaanalízis esetében az optimalizációs paraméter szórásnégyzetének (reprodukálhatósági hiba) kiszámítását csak akkor végezhetjük el, ha a szórásnégyzetek megegyeznek (a tapasztalati szórásnégyzetek azonos elméleti varianciákhoz tartoznak). Két normális eloszlású valószínűségi változó egyenlőségét F-próbával, kettőnél több változó szórásnégyzetének egyezését Bartlett-, Cochran-, vagy Levene-próbával ellenőrizhetjük. Egyenlőtlenség esetén a függő változó transzformációja szükséges (Box-Cox tarnszformáció).

A faktorok hatásának jelentőségét a kísérleti hibával való összehasonlítás alapján állapíthatjuk meg. Ehhez a szórásnégyzetek F-próbáját, vagy a regressziós együtthatók t-próbáját végezzük el. Amennyiben a faktoroknak nincs hatásuk, és közöttük kölcsönhatás sem lép fel, a becsült értékek csupán véletlenszerűen térnek el az átlagtól, és a kísérleti hibák nulla várható értékű normális eloszlást követnek. Ezt a hatások és kölcsönhatások Gauss-papíros ábrázolásával is ellenőrizhetjük. Ismételt mérések hiányában a modell paramétereinek szignifikanciája ugyancsak Gauss-papíros ábrázolással vizsgálható. Ekkor a becsült hatások tapasztalati eloszlását ábrázoljuk. Ha a kísérleti eredmények szórása csupán a véletlennek tulajdonítható és a faktorszintek változtatása nincs hatással a válaszjellemzőre, a kapott értékek az 1-es meredekségű egyenes mentén helyezkednek el. A nem szignifikáns hatások és kölcsönhatások modelltől való kihagyása után szükség van az adekvátság ellenőrzésére, vagyis arra, hogy a modell jól illeszkedik-e a tényleges adatokhoz. Ez az illeszkedési vagy reziduális és a reprodukálhatósági szórásnégyzetek hányadosának F-próbáját jelenti. Ha a valódi függvény alakja közel azonos a modell alakjával, a reziduumok eloszlásának típusa, várható értéke és varianciája megegyezik a mérési hibáéval. Ha a lineáris modell nem adekvát, akkor legalább egy interakció vagy a négyzetes tagok összege szignifikáns. Ilyenkor át kell térni másodfokú tervekre.

A regressziós függvények illeszkedési jóságát a meghatározottsági együtthatóval fejezhetjük ki, amely megmutatja az  $y_i$  adatok  $\bar{y}$  átlagtól való eltérésének  $\hat{Y}$  regressziós függvénnyel magyarázható részét:

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{Y}_i - \bar{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad [6.8.]$$



Az együttható értéke erősen függ mind az  $x$  független változótól, mind a modell paramétereinek számától, ezért a négyzetösszegeket azok szabadsági fokokaival korrigáljuk:

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p} \quad [6.9.]$$

Miután meghatároztuk a szignifikáns hatásokat és kölcsönhatásokat, kiszámítottuk a modell paramétereit, vizsgáltuk annak adekvátságát, következik a modell interpretálása, az optimális beállítások várható értékének becslése. Az így kapott eredményeket ellenőrző kísérletekkel igazoljuk. Előfordulhat, hogy a kísérleti modell felállításánál lényeges tényezőket nem vettünk figyelembe, időközben a kísérleti körülmények változtak, a kísérleti hiba túl nagy, és elfedi a faktorok hatását, vagy a részfaktortervek keveredési rendszere megakadályozza az egyes tényezők hatásának elkülönülését. Ilyenkor az ellenőrző kísérletek eredményei nem a várt értéket adják, ami a felsorolt okok kiküszöbölése után újabb kísérleti munka elvégzését követeli meg.

## 6.2. A Taguchi féle minőségjavító kísérlettervezés

"A minőség hiánya az a pénzügyi veszteség, amelyet egy termék a társadalomnak okoz, a fogyasztóhoz való eljutás után"

*G. Taguchi*

### 6.2.1. Bevezetés

A kísérletek jelentős részénél a termék minőségjellemzőinek nem kívánt ingadozását olyan zajtényezők okozzák, amelyek szabályozása vagy megszüntetése megvalósíthatatlan. A környezeti hatásokkal szemben érzéketlen, úgynevezett robusztus termékek kísérlettervezéses módszerrel történő tervezésének ötlete a japán Genichi Taguchinak tulajdonítható (Taguchi, 1986). Ő a tervezett kísérleteket arra használta, hogy a gyártott termékek vagy folyamatok robusztusak legyenek mind a környezeti feltételekkel, mind az összetevők változékonyságával szemben.

A módszer fő célja a folyamat- és terméktervezés javítása a szabályozható tényezők és azok beállítási szintjeinek meghatározása által úgy, hogy a célérték körüli ingadozás minimális legyen. A megmunkálási és környezeti hatásokkal szemben robusztus termékre való törekedéssel Taguchi a rossz hatás okának megszüntetése helyett inkább az okok rossz hatásának csökkentését javasolja.

### 6.2.2. A Taguchi-féle minőség

Taguchi minőségdefiníciója (lásd idézet) teljesen új megvilágításba helyezi a minőséget, mivel azt a költségekkel kapcsolja össze. A meghatározás úgy értendő, hogy a leggyártott termék minőségének fordított mértéke mindazon veszteségek összessége, melyet a termék a társadalomnak okoz. Két fontos veszteségcsoportot különböztethetünk meg: egyrészt a termék tökéletlensége miatt a vevőnél jelentkező veszteségeket, másrészt a termék és a gyártás rossz tervezéséből származó, a gyártónál jelentkező veszteségeket, amelyek magukba foglalják a javítási, szavatossági, reklamáció-kezelési valamint az újragyártásból származó selejt költségeket.

Taguchi minőségelvei:

a.) A minőség előre megtervezhető, de nem valósítható meg ellenőrzés útján: a minőségjavításnak már a tervezési szakaszban meg kell jelennie, és végig kell kísérnie a terméket a gyártás minden további szakaszán is, hisz az ellenőrzés csupán azt dönti el, hogy a termék megfelel-e az előírásoknak vagy nem. A tervezési szakaszban bevezetett minőség- és

költségszabályozási tevékenységek összessége folyamaton kívüli minőségszabályozást jelent, segítségükkel növelhető a gyárthatóság és megbízhatóság, csökkenthetők a fejlesztési és élettartam költségek.

b.) A minőség a célértéktől való eltérés csökkentésével biztosítható a legjobban: ha a terméket a teljes gyártási szakaszon keresztül ellenállóvá tesszük a szabályozhatatlan környezeti tényezőkkel szemben, az ingadozások jelentős mértékben csökkenthetők.

c.) A minőség nem alapulhat a termék teljesítőképességén, tulajdonságain vagy jellemzőin: újabb tulajdonságok hozzáadása nem a minőségjavítás felé vezető út, hanem csupán ár- és piacváltóztatási eszköz. A teljesítmény és egyéb termékjellemzők kapcsolatban állnak a minőséggel, de nem képezik annak alapját. A teljesítmény inkább a termék képességének mértékét fejezi ki.

d.) A minőség költsége a termék teljesítményének ingadozásától és a teljes rendszerben mért veszteségektől függ: az adott tervezési paramétereiktől való eltérés a termék teljes életciklusában okozott többletköltségekkel mérhető. Ez magába foglalja az újramegmunkálás, ellenőrzés, jótállás, karbantartás, stb. költségeit. A leginkább szabályozásra szoruló paraméterek költségelemzéssel is kimutathatók.

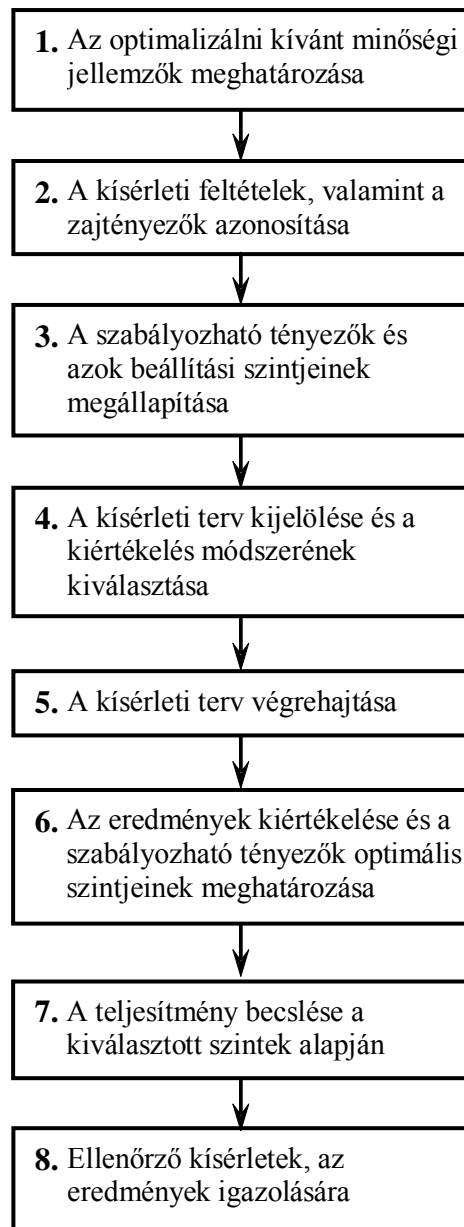
A fenti elvek alapján Taguchi a minőségfejlesztési stratégiáját három elem köré építi:

1. A rossz minőség okozta vásárlói veszteség arányos a teljesítményjellemzők célértéktől való eltérésének négyzetével, így a szabvány szerinti megfelelés célértéken tartással, illetve az ingadozás minimalizálásával alakul.

2. A tervezési/fejlesztési folyamatokban az egyetlen tényező változtatása helyett a többtényezős, egyidejű változtatás alkalmazása javasolt, ezáltal a minőség hatékonyan beépíthető a termékekbe/folyamatokba. Ennek megvalósítása erősen frakcionált, két és háromszintes ortogonális kísérleti tervekkel a leghatékonyabb.

3. A termék teljesítmény- és minőségjellemzőinek ingadozása a teljesítményt befolyásoló paraméterek lineáris és nem-lineáris hatásainak vizsgálata által jelentősen csökkenthető.

A módszer alkalmazásának lépéseit a következő folyamatra mutatja:

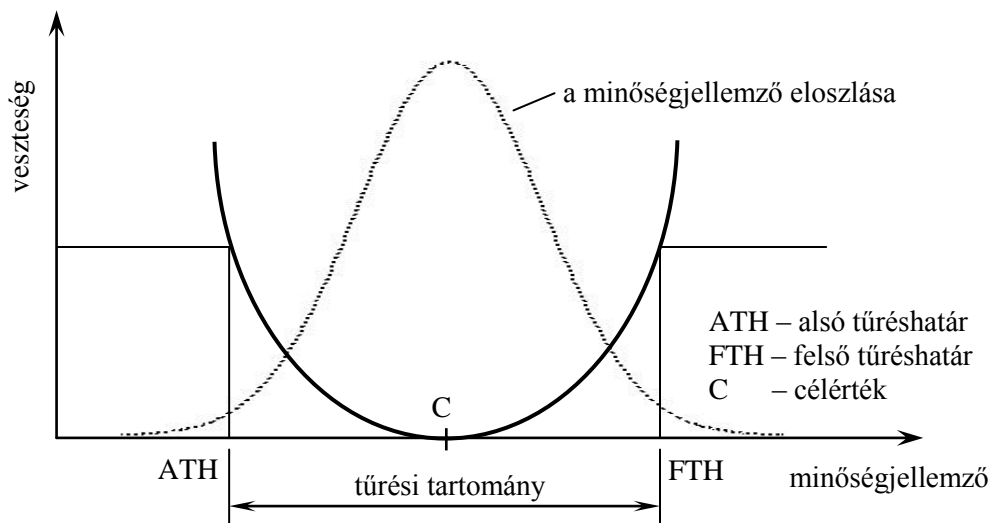


6.5. ábra A Taguchi módszer folyamatábrája

### 6.2.3. A veszteségfüggvény

A hagyományos minőség szabályozás egy termék minőségének megállapításához a tűréshatárokat veszi alapul, és ha a minőségi jellemző az előírt értékek között van, azt jónak minősíti. Taguchi szerint nem elég, hogy a minőségjellemző az előírt határokat betartsa, fontos a tűréstartományon belüli helyzetének pontos ismerete is, hisz nehezen elképzelhető, hogy a jellemző kismértékű változása gyökeresen megváltoztatja a termék megítélését (Kemény, 1998). A két szemlélet közötti különbséget a 6.6. ábra szemlélteti. Az ábrán, a veszteség az ideális- vagy célértéktől való eltérés nagyságának függvénye, „C” jelenti a figyelembe vett tényező célértékét vagy leginkább elvárt értékét, ATH és FTH jelöli az alsó ill. felső elfogadási vagy tűréshatárt. Ha egy termék vizsgált paramétere e két határ közé esik, akkor azt elfogadjuk, nem terheli társadalomnak okozott veszteség, és a további megmunkálási folyamatokra alkalmas. Még ha egy termék az elfogadási határokon kívülre is esik, az általános gyakorlat szerint

megpróbálják javítással korrigálni és a tűréstartományba visszavinni. Minden erőfeszítés arra irányul, hogy a megmunkálási folyamat során a termék e határok közé kerüljön.



6.6. ábra A négyzetes veszteségfüggvény

Taguchi szerint azonban a valóságban nem létezik éles határ, hanem a teljesítmény folyamatosan romlik a célértéktől való távolság növekedésével. Vagyis a minőség a célértéktől való eltérés nagyságától függ, nem pedig a selejtszázalékkal arányos. Ezért nem elég arra törekedni, hogy a minőségi mutató bizonyos határok között legyen; nem közömbös hogy e határok között hol van. Nehezen indokolható, hogy a tűréshatár közelében a minőségi mutató csekély változása a termék megítélését radikálisan megváltoztatja. Ezt az elképzelést fejezi ki a Taguchi-féle négyzetes veszteségfüggvény:

$$L_{(x)} = k(x - T)^2 \quad [6.10.]$$

ahol:  $L(x)$  – a pénzügyi veszteség

$T$  – a paraméter optimális értéke

$x$  – a paraméter mért értéke

$k$  – a nagyságrendtől és a pénzegységtől függő állandó

A minőségi jellemző a termék egyetlen példányára egy konkrét érték, a terméksokaságra azonban valószínűségi változó, ezáltal a sokaságra vonatkozó veszteség-függvényérték is valószínűségi változó lesz, a következő várható értékkel:

$$E[L_{(x)}] = k[\sigma^2 + (\mu - T)^2] \quad [6.11.]$$

Ez a kifejezés nem más, mint a jól ismert közepes négyzetes hiba (mean square error), amely a varianciából és a várható értéknek az előírt értéktől való négyzetes eltéréséből adódik össze. A veszteség-függvény várható értéke tehát annál nagyobb, minél nagyobb az ingadozás és az átlagnak az előírt értéktől való eltérése. Az  $n$  elemből álló mintára kiszámított veszteségfüggvény várható értékének becslése:

$$\bar{L}_{(x)} = \frac{k}{n} \sum_i (x_i - T)^2 = k \left[ \frac{n-1}{n} s^2 + (\bar{x} - T)^2 \right] \quad [6.12.]$$

Az átlagos veszteség így módon két részből áll, egyrészt a szórásból, másrészt a célértéktől való átlagos eltérésből. A Taguchi módszer célja mindkét összetevő csökkentése.

Nem minden esetben a célértéken tartás a cél, előfordul, hogy valamely minőségjellemző lehető legkisebb, illetve legnagyobb értékének elérésével tehetjük még robusztusabbá a terméket (kopás, szennyezés, költségek ill. szilárdság, keménység, élettartam). Ilyenkor a

veszteségfüggvény alakja is változik:

- „minél kisebb, annál jobb” esetben:

$$L_{(x)} = kx^2 ; \bar{L}_{(x)} = \frac{k}{n} \sum_i x_i^2 = k \left( s^2 \frac{n-1}{n} + \bar{x}^2 \right) \quad [6.13.]$$

- „minél nagyobb, annál jobb” esetben:

$$L_{(x)} = \frac{k}{x^2} ; \bar{L}_{(x)} = \frac{k}{n} \sum_i \frac{1}{x_i^2} \quad [6.14.]$$

### 6.3. A Taguchi-féle kísérlettervezés

A termék- vagy folyamat-tervezés rendkívüli módon befolyásolja a minőséget és élettartam-költségeket, ezért törekedni kell a tervezés optimalizálására, hisz ezáltal jelentős minőségjavulást és költségmegtakarítást érhetünk el. Taguchi kihangsúlyozza a minőségbiztosítás visszavezetésének fontosságát a tervezési szakaszba, mivel a rossz tervezést még az ellenőrzés és statisztikai minőség szabályozás sem képes teljes mértékben ellensúlyozni. Ez a szisztematikus és igen hatékony tervezési módszer lehetővé teszi, hogy megtaláljuk a tervezési paramétereknek azt az optimális kombinációját, amely a funkciókat kifogástalanul és magas szinten teljesítő, a szabályozhatatlan vagy csak magas költségekkel szabályozható zajtényezőkkel szemben érzéketlen terméket biztosít.

A robusztus terméktervezés három szakaszra bontható:

- *rendszer-tervezés*: ebben a szakaszban első lépésként a vásárlói követelmények pontos meghatározására kerül sor, majd a tudományos és műszaki ismeretek felhasználásával az alapszerkezet, működési elvek, alkatrésztípusok, gyártási folyamat meghatározása, valamint a mintapéldány elkészítése történik. A minta tulajdonságainak elemzésével a prototípus további fejlesztéseken esik át.
- *paraméter-tervezés*: a paraméter-tervezés során azonosításra kerülnek mindazok a tervezési paraméterek, illetve azok beállítási szintjei, amelyek biztosítják a teljesítményjellemzők optimalizálását és csökkentik a műszaki terv érzékenységet a zajhatásokkal szemben. A zajfaktorok a termék minőségjellemzőiben jelen lévő szabályozhatatlan ingadozásforrások: környezeti feltételek, az anyag, alkatrész, termék inhomogenitása, a használatból adódó károsodások. Ez a szakasz kísérletek elvégzését igényli a zajfaktorok teljesítményre és minőségre gyakorolt hatásának értékeléséhez. A kísérletezések elvezetnek a szabályozható tényezők optimális szintjeinek kiválasztásához, a zajfaktorokkal szembeni robusztusság eléréséhez.
- *tűrés-tervezés*: amikor a paraméter-tervezés nem képes az ingadozás kellő mértékű csökkentésére, tűrés-tervezést alkalmazunk. Ebben az esetben szűkíteni kell azoknak a termék/folyamat paramétereknek az ingadozáshatárait, amelyek leginkább befolyásolják a válaszcsoportok szórását. A tűréshatárok szűkítése általában magasabb szintű és drágább termék- vagy folyamat-összetevők beépítésével érhető el, ami megnöveli a termelési és megmunkálási költségeket. Ezért a tűrés-tervezés csak akkor javasolt, ha a robusztus tervezés nem tudja biztosítani az elvárt teljesítményt.

#### 6.3.1. A paraméter-tervezés

Taguchi úgy említi a paraméter-tervezést, mint a tervezési folyamat azon szakaszát, amelyben kiválasztásra kerülnek a fontos tervezési tényezők legjobb névleges értékei. A legjobb névleges értékeken az egyes tervezési tényezők azon beállítási értékeit értjük, melyek együttesen

a zajtényezők legkisebb ingadoztató hatását eredményezik. A teljesítmény és költség szempontjából kiválasztott optimális faktorkombináció segítségével robusztus termék állítható elő.

A Taguchi módszer a kísérlettervezésből ismert ortogonális mátrixokat használja nagyszámú tényező, kevés kísérlettel történő tanulmányozásához. Így jelentősen csökkenthető a kísérleti munka nagysága. Taguchi előnyben részesíti a háromszintes, erősen frakcionált ortogonális mátrixokat, vagyis a nemlinearitás becslésére helyezi a hangsúlyt. Ezek a tervek általában harmadrendű rezolúciós képességgel rendelkeznek, tehát a főhatások egymással ugyan nem, de kétfaktoros kölcsönhatással keverednek. Taguchi ezeket a kölcsönhatásokat kísérleti hibaként kezeli és egyenletes eloszlásukat feltételezve azt gondolja, hogy a főhatásokat jelentősen nem befolyásolják. Hamada és Wu ennek ellenkezőjét bizonyították (Hamada, 1992), így a kapott eredmények interpretálása nagy körültekintést igényel. A kölcsönhatások minimalizálásának feltétele a minőségi jellemző monotonitása és folytonossága. Az alkalmazott kísérleti mátrixok kiegyensúlyozottak, és az ortogonalitás következményeként a tényezők egymástól függetlenül becsülhetők. Azonban a redukáltságból kifolyólag elsősorban a főhatásokra koncentrálnak (Nair, 1992), és a faktorok közötti kölcsönhatást ismertnek vagy nem létezőnek tekintik.

Figyelembe véve a Pareto-elvet, mely szerint a válaszjellemző ingadozásának 80%-áért csupán a faktorok 20%-a felelős, az optimalizációs feladatok kezdetekor indokoltabb kétszintes, negyed-, vagy akár ötödrendű rezolúciós terveket alkalmazni, és a jelentős hatások, kölcsönhatások kikeresése után térni át a háromszintes tervekre (Montgomery 1997). Box az optimalizációs problémák leghatékonyabb megoldására kisméretű tervek iteratív elvégzését javasolja (Nair, 1992).

Az egyes faktorok szórásra gyakorolt hatásának vizsgálatához a kísérleti beállításokat többször meg kell ismételni (replikáció). Ahhoz, hogy a zajtényezők okozta ingadozást is értékelni tudjuk, szükséges eme változók mesterséges ingadoztatása. Ehhez Taguchi olyan terveket javasol, amelyek egy belső és egy külső részből állnak. A belső, rendszerint szokványos részfaktor-terv a szabályozható faktorokat, a külső pedig a zajtényezőket tartalmazza. Egy ilyen keresztezett tervet mutat a 6.7. ábra. A zajtényezők szisztematikus ingadoztatása hatékonyabb, mint a randomizáció, mivel lehetővé válik az egyes zajtényezők hatásának elkülönítése és a szabályozható faktorokkal szemben fennálló kapcsolatuk tanulmányozása. De a zajtényezők beállítási szintjeinek rögzítésével, azok elveszítik sztochasztikus jellegüket, a külső mátrixból számolt variancia nem a legjobb becslés a populáció varianciájára (Engel, 1996). Itt inkább a kísérleti beállítás zajtényezőkkel szembeni érzékenységéről van szó (Nair et al., 1991).

A teljes tervben, a szabályozható tényezők minden beállítására elvégezzük a zajtényezők külső tervében szereplő összes kombináció adta kísérletet. Így vizsgálni tudjuk minden belső beállításra a válaszparaméter ingadozását, melyet a zajfaktorok ingadoztatása okoz, anélkül, hogy a két tényezőtípus hatása keveredne. Amikor mind a szabályozható, mind a zajtényezők száma nagy, a külső-belső ortogonális elrendezés a kísérlet méretének jelentős növekedéséhez vezet. Különösen másodfokú matematikai modellek alkalmazása esetén nő rohamosan a beállítások száma. Megoldásként Taguchi a zajtényezők összevonását javasolja (kevert zaj), ennél viszont előnyösebb a zajtényezőket a belső tervbe bevonni; ekkor egy úgynevezett kombinált tervet kapunk (Shoemaker et al., 1991). Az ilyen tervekben a keveredési rendszer is jobban kezelhető, de ellentétben a külső-belső mátrixokkal, itt a különböző zajkombinációk nem hasonlíthatók össze, csupán az egyes zajhatások nagysága becsülhető (Nair, 1992). A kombinált tervek másik hátránya, hogy a szabályozható- és zajtényezők okozta ingadozások nagysága igen eltérő lehet, ami ellentmond a varianciák homogenitás-feltételének, tehát ilyen esetekben a Box-Cox transzformáció elkerülhetetlen (Kacker, 1985).

	1	2	3	4
N <sub>1</sub>	1	1	2	2
N <sub>2</sub>	1	2	1	2
N <sub>3</sub>	1	2	2	1

	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Y <sub>i,j</sub>			

6.7. ábra Külső-belső mátrix elrendezésű kísérleti terv

Miután a kísérlet során azonosítottuk a jelentős faktorhatásokat, azok becült nagyságát felhasználhatjuk a legkisebb négyzetek regressziós egyenletének felírására, amelyben a regressziós együtthatók arányosak ezekkel a hatásokkal. Az egyenlet a kísérleti modell matematikai kifejezése, amely remélhetőleg tartalmazza a legtöbb észlelt ingadozást. Ily módon a szabályozható és zajfaktorok hatása külön-külön becülhető, a matematikai modell alakja pedig – ha a zajtényezők kölcsönhatásától és négyzetes hatásától eltekintünk – a következő lesz:

$$y(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \beta_0 + \mathbf{x}'\boldsymbol{\beta} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x} + \mathbf{z}'\boldsymbol{\gamma} + \mathbf{x}'\boldsymbol{\Delta}\mathbf{z} + \varepsilon, \quad [6.15.]$$

ahol:  $\mathbf{X}$  - a szabályozható tényezők sorvektora  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{r_1}]$

$\mathbf{Z}$  - a zajtényezők sorvektora  $\mathbf{z} = [z_1, z_2, \dots, z_{r_2}]$

$\mathbf{x}'$ ,  $\mathbf{z}'$  - a szabályozható és zajtényezők vektorainak transzponáltja,

$\boldsymbol{\beta}$  - a szabályozható tényezők regressziós együtthatóinak vektora

$\mathbf{B}$  - az átlóban a szabályozható tényezők négyzetes hatásait, az átlón kívül azok kölcsönhatásait tartalmazó  $r_1 \times r_1$ -es mátrix

$\boldsymbol{\gamma}$  - a zajtényezők főhatásait tartalmazó regressziós együtthatók vektora

$\boldsymbol{\Delta}$  - a szabályozható és zajtényezők kölcsönhatásait tartalmazó  $r_1 \times r_2$ -es mátrix

$\varepsilon$  - véletlen hiba

A különböző faktorszintek becült és valós értékei közötti különbségek (maradék) Gauss-papíros ábrázolásával ellenőrizni lehet a modell adekvát voltát. Ha a modell a faktorok és válaszok kapcsolatát helyesen becüli, a jelentéktelen faktorhatások csak véletlen ingadozások vagy zajok. Azonban a zajtényezők ingadoztató hatásának valós csökkentése csak akkor lehetséges, ha a szabályozható és zajfaktorok között létezik kölcsönhatás (Nair, 1992). Másrészt a kísérleti beállítások csökkentéséhez csak a soron belüli véletlen ismétlést alkalmazza, azonban a folyamatok adott beállítási szinteken könnyebben ismételtetők, és maguk a folyamatfeltételek reprodukálása jóval nehezebb. Ebben az esetben a kísérleti beállítások közötti szórás jóval nagyobb lehet, mint a beállításon belüli és emiatt túl erős helyzeti hatást észlelünk. A soron belüli ismétlés elemzése – mintha az a teljes véletlen ismétlés lenne – gyakran azt eredményezi, hogy nehezen lehet a helyzeti hatást a zajtényezők hatásától megkülönböztetni és csupán a beállításon belüli szórást észleljük.

Az optimális beállítás megtalálására ezért az átlagos hatások ábrázolásánál alkalmasabb a válaszfelület módszer.

### 6.3.2. A jel-zaj viszony

A kísérleti eredmények kiértékelésének célja meghatározni, hogy mely faktorok hatnak a minőségi jellemző várható értékére és melyek varianciájára. Hagyományos módszerként használható az átlagelemzés (ANOM) és a variancianalízis (ANOVA), azonban Taguchi a szórásnégyzet helyett a robusztussággal szorosan összefüggő úgynevezett jel-zaj viszonyszámokat (SN) definiál. A becült értékek varianciaanalízissel történő elemzése után, a szabályozható tényezők olyan beállításának meghatározására kerül sor, amelyre robusztus teljesítményt kapunk. A jel-zaj viszony kiszűri a szórásból az átlag miatti növekedést vagy csökkenést, ugyanis Taguchi szerint egy mennyiség bizonytalansága arányos értékének növekedésével. Ez a függőségi viszony sok esetben kimutatható a  $\ln \bar{y}_i - \ln s_i^2$  ábrázolásával. A kísérleti eredmények szórásmértékké alakítása felhasználható a legkisebb ingadozást előidéző tényezőszintek kiválasztására. Azokat a tényezőket, amelyek a jel/zaj viszonyt nem befolyásolják, felhasználhatjuk a válaszijellemző célértékre állításához (beállító tényező). Akárcsak a veszteségfüggvény, a jel-zaj viszony is függ a minőségi jellemző jellegétől.

A leggyakrabban használt három eset:

a) "a névleges a legjobb" :

$$SN_N = 10 \lg \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad [6.16.]$$

b) "minél nagyobb annál jobb" :

$$SN_B = -10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_i \frac{1}{y_i^2} \right) \quad [6.17.]$$

c) "minél kisebb annál jobb" :

$$SN_S = -10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_i y_i^2 \right) \quad [6.18.]$$

A jel/zaj viszony egy összevont statisztika, az eloszlás két jellemzőjét, az átlagot és a szórást foglalja egyetlen számadatba. A b) és c) esetekben ez az érték tulajdonképpen a variációs együttható inverzéből levezetett mennyiség.

Mivel egy termék akkor robusztus, ha erős "jellel" és kis "zajjal" rendelkezik, azon faktorok beállításával, amelyek a szórásra hatnak, a jel-zaj viszonyt maximálhatjuk, az átlagra ható tényezők beállításával pedig  $(y-T)^2$ -t minimálhatjuk. Ennek az úgynevezett szimultán optimalizálásnak az egyensúlya robusztus és egyenletes termékminőséghez vezet. Ha a faktorok különböző szintjeinek jel-zaj viszonyra gyakorolt hatását grafikusán ábrázoljuk, könnyen kiválaszthatjuk az optimális szintet. A tényező hatása kétszintes tervek esetén a faktor két szintje közötti különbség, háromszintes terveknél a beállítási szintek átlagtól való eltérése.

Taguchi szerint a jel-zaj viszony a teljesítmény mérésére szolgál és a kiszámított viszonyszám értékének maximálásával a szórás csökkenthető. Azonban, például a "névleges a legjobb" arány felírható a következő alakban:

$$SN_N = 10 \lg \left( \frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) = 10 \lg(\bar{y}^2) - 10 \lg(s^2)$$

Ha ezt az értéket egy rögzített célértékre akarjuk maximálni, elégséges, ha csupán a  $\lg(s^2)$ -t minimáljuk. Ez kevesebb számítást igényel és a folyamatingadozást befolyásoló faktorok közötti kölcsönhatás is tisztábban látható. Továbbá ha csupán a  $\lg(s^2)$ -t minimáljuk, kiküszöböljük azt a



hibalehetőséget, hogy a befolyásoló faktorok az átlagot jelentősen módosítják a szórás csökkentése helyett. Ha azonban a  $10\lg(\bar{y}^2/s^2)$  alakba felírt függvényt maximáljuk, nincs biztosíték arra, hogy szétválasztjuk a helyzeti és szórás hatásokat, és a szórás csökkentése helyett a várható érték növelése azt a látszatot kelti, mintha a minőség javulna (Montgomery, 1997). A "minél nagyobb, annál jobb", illetve a "minél kisebb, annál jobb" esetekben még rosszabb a helyzet:

$$SN_s = -10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2\right)$$

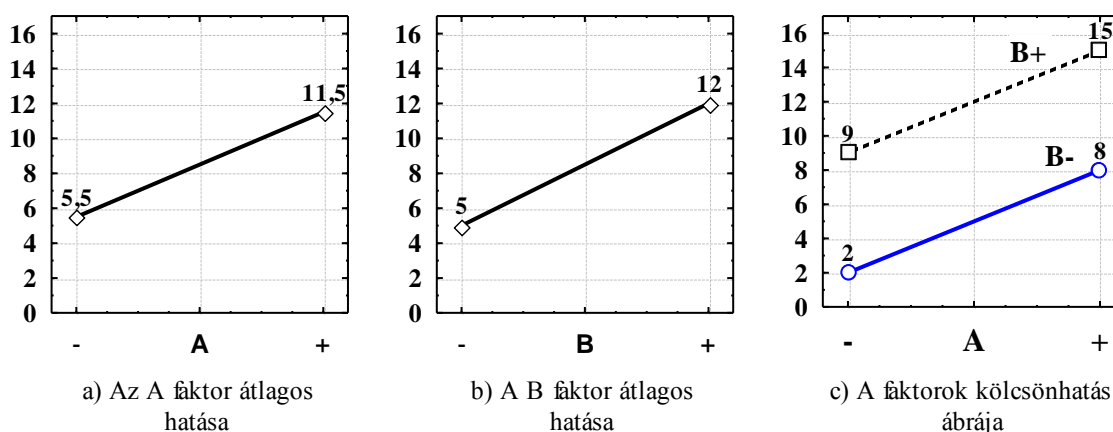
A logaritmus argumentumát átalakítva, kapjuk:

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n y_i^2 = \bar{y}^2 + \frac{(n-1)}{n}s^2, \text{ ahol } s^2 \text{ a minta szórásnégyzete}$$

Tehát  $SN_s$  összekeveri a helyzeti és szórás hatásokat. Mivel az  $SN_s$ ,  $SN_L$  viszonyszámok  $y^2$ -t és  $1/y^2$ -t tartalmaznak, a kiugró és nulla körüli értékekre nagyon érzékenyek, emellett változatlanok maradnak az eredeti válaszártékek lineáris transzformációjára. Így az  $SN_L$ , és  $SN_s$  alkalmatlanok a szóródás azonosítására, csak a helyzeti hatásokról adnak információt. Megoldásként a jel/zaj viszonyszámok elemzése helyett az átlag és szórás külön-külön történő elemzése javasolt (Montgomery, 1997), vagy a már ismertetett Box-Cox transzformáció. Ez utóbbi Trocine szerint sokkal jobb alternatíva a jel/zaj viszonytal szemben, mert kiküszöböli a variancia átlagtól való függését, és teljesíti a takarékoság kritériumát, egyszerű additív modellt ad az átlagra és szórásra (Trocine, 2000, Box, 1988). A transzformáció csak akkor alkalmazható, ha a vizsgált minőségjellemző ( $y$ ) monoton függvénye a szabályozható tényezőknek, különben az esetleges transzformáció a becslést torzíthatja.

Az optimális tényezők értékelésénél használt gyakorlat, mely szerint akár az átlagos jel-zaj viszonyt, akár az átlagos hatásokat ábrázoljuk, majd a legkedvezőbbet kiválasztjuk, nem mindig megbízható. Ennek bizonyítása Montgomery nyomán (Montgomery, 1997) a következő példával szemléltethető:

Két tényező, két szinten történő vizsgálata után a 6.8. ábrán feltüntetett eredményeket kapjuk.

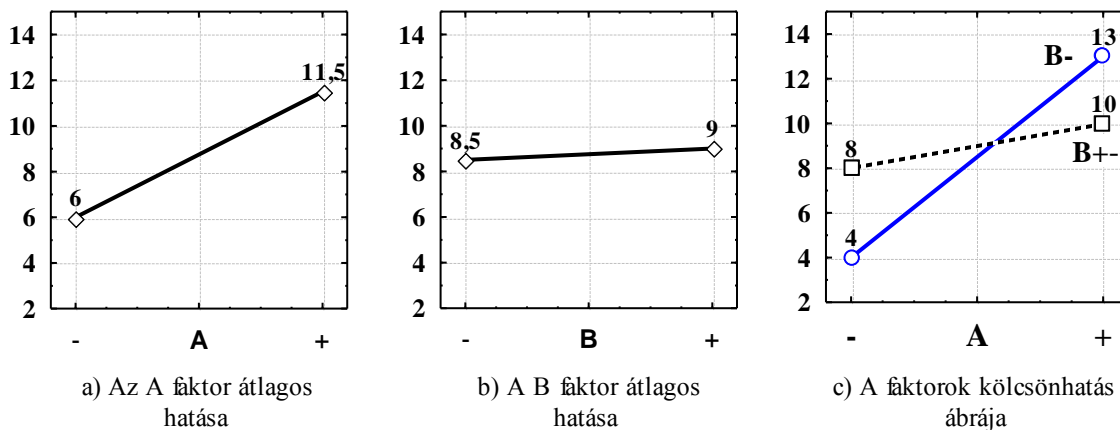


6.8. ábra Két faktor hatásábrája kölcsönhatás nélkül

Az A és B faktorok átlagos hatását (szélső átlag) a felső és alsó beállítási szinteken az a) és b) ábrák mutatják. Mindkét esetben a felső szintek adják a maximumot, tehát ezek kiválasztása ajánlott. A c) ábrán látható, hogy az A és B faktor között nincsen kölcsönhatás, mivel a B felső,

illetve alsó szintjei között ugyanakkora a különbség, akár az A alsó vagy felső szintjét vesszük.

Tegyük fel, hogy az A és B tényezőkre a kísérlet a 6.9. ábra szerinti eredményeket adja. Az a) és b) ábrákon feltüntetett átlaghatások alapján ismét csak a felső szintek lennének optimálisak, azonban a c) ábrán látható, hogy a két tényező között kölcsönhatás van. Tehát ebben az esetben a helyes választás az A faktor felső illetve a B faktor alsó szintje lesz, hisz ez adja a legnagyobb értéket.



A fentiek alapján belátható, hogy a szélsőátlag elemzés csak akkor helytálló, ha a

### 6.9. ábra Két faktor hatásábrája kölcsönhatással

minőségjellemző monoton és additív függvénye a szabályozható tényezőknek. (Wu, 1990). Ellenkező esetben jelentős kölcsönhatásoktól tekintünk el, és ez torzítja a modell becslésének pontosságát. Az erősen frakcionált kísérleti tervek nem tartalmazzák a faktorszintek összes lehetséges kombinációját, és gyakran az eredeti tervben nem szereplő kombinációt választjuk optimumként. Nyilvánvaló, hogy ha az átlagos hatás nem megbízhatóan mutatja a legjobb kombinációt, amikor minden variáció szerepel a tervben, akkor ez a módszer részleges faktoriális terveknél sem működik. Nem ismerve a frakcionált tervek keveredési rendszerében a kölcsönhatások nagyságát, az optimális beállítás ellenőrzésére végzett kísérletek is hibás eredményt adhatnak (Phadke, 1989). Ahhoz hogy külön-külön tudjuk vizsgálni a faktorok átlagra, illetve szórásra gyakorolt hatását, szükséges a két hatás különválasztása. A kapott eredmények válaszfelület módszerrel is elemezhetők, sőt ajánlott külön modellt alkalmazni mind az átlagra, mind a szórásra (Myers, 1995):

$$\hat{\mu} = b_0 + \mathbf{x}'\mathbf{b} + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x} \quad [6.19.]$$

$$\hat{\sigma} = c_0 + \mathbf{x}'\mathbf{c} + \mathbf{x}'\mathbf{C}\mathbf{x} \quad [6.20.]$$

ahol: **B, C** – a kölcsönhatásokat és másodrendű hatásokat tartalmazó ( $k \times k$ ) mátrixok  
**b, c** – az elsőrendű főhatásokat tartalmazó ( $k \times 1$ ) vektorok  
 $b_0, c_0$  – skalárok  
 $\mathbf{x}$  – a független változók ( $k \times 1$ ) vektora

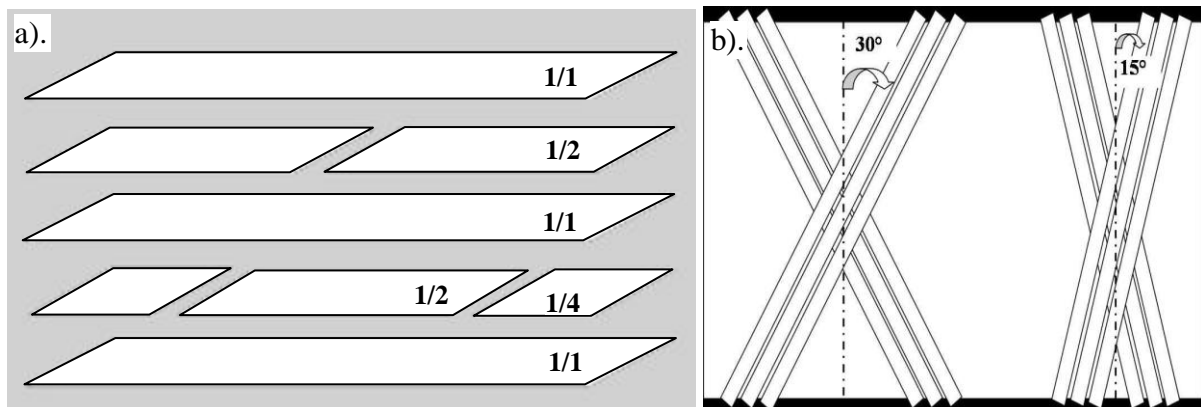
A különböző megfontolások szerint kiválasztott kísérleti pontokban kapott eredmények válaszfelületként való ábrázolása a tényezők és minőségjellemzők közötti kapcsolatra felállított regressziós modell interpretálásához is segítséget nyújt.

## 7. Tervezett tulajdonságú kompozit termék kifejlesztése kísérlettervezéssel

Ebben a fejezetben az alapanyag-jellemzők, a terítékképzés és a préselés fontosabb paramétereit vizsgálom frakcionált faktoriális kísérleti terv segítségével. A vizsgálatok célja a terméktulajdonságokat a legnagyobb mértékben befolyásoló tényezők meghatározása, a robusztusság feltételeinek megállapítása. A kísérleti terv kiválasztásánál a vizsgálni kívánt faktorok számát és azok szintjeit, valamint a faktorhatások frakcionálásból adódó lehetséges keveredési rendszerét vettem figyelembe.

### 7.1. Anyag és módszer

Az előállítandó termék alapanyagául a színfurnérgyártás ollózási eselékét választottam, maga a termék az eselék-furnérszalakból préselt lap, szerkezeti célú felhasználásra. A kísérletekhez két fafajból, bükkből (*Fagus silvatica*) és hegyi juharból (*Acer pseudoplatanus*) előállított színfurnér széleselékét használtam. A furnérszalak átlagos vastagsága 0,59 mm (bükknél a vastagság szórása 0,081 mm, juharnál 0,026 mm) volt. Vizsgálni kívántam a szélesség hatását is, hiszen ollózáskor a keletkező eselék szélessége viszonylag tág határok (1-6,8 cm) között változik, ami terítékképzéskor az átlapolást jelentősen befolyásolja. Ezért két különböző szélességű 15 mm, illetve 35 mm párhuzamos oldalú, szabályos furnérsíkokat alkalmaztam. A furnérszal hosszúsága a lap típusától függött: a hosszoldás nélküli lapoknál 72 cm, a hosszoldott lapoknál az 1, 3, és 5-ös rétegekben szintén 72 cm; a 2. rétegben, a laphosszúság negyedénél és háromnegyedénél, a 4. rétegben pedig közepén toldott (7.1a. ábra).



7.1. ábra Hosszoldás és orientáció

A faj, szálfurnér-szélesség, és hosszoldáson kívül további négy technológiai tényező hatását is vizsgáltam: a lapvastagságnak, a szálfurnérok elfordulási szögének (7.1b. ábra), a préselési nyomásnak és hőmérsékletnek a laptulajdonságokra gyakorolt hatását. A lapvastagságot a rétegek számában határoztam meg, az elfordulást a lap hossz tengelyéhez képest mértem. A vizsgált jellemzők beállítási értékeit a 7.1. táblázat összegzi.

7.1. táblázat A kísérletbe bevont változók és beállítási szintjeik

	Faktor	-1 szint	+1 szint
1	$x_1$ – Fafaj	bükk	juhar
2	$x_2$ – Szálforgács szélesség	15 mm	35 mm
3	$x_3$ – Hosszoldás	0 %	50 %
4	$x_4$ – Lapvastagság	35 réteg	75 réteg
5	$x_5$ – Orientáció	15°	30°
6	$x_6$ – Nyomás	2,16 MPa	3,14 MPa
7	$x_7$ – Hőmérséklet	130°C	160°C

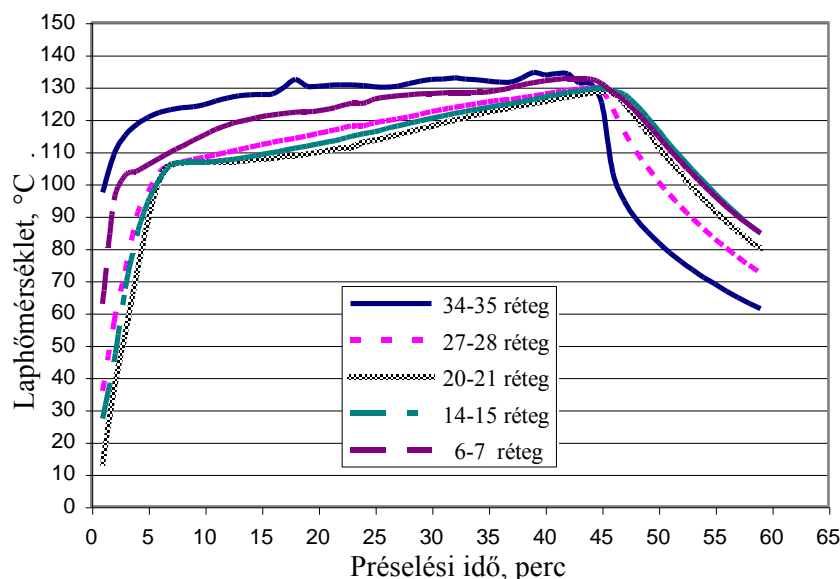
Terítékképzés előtt a furnérokat 2,2-4,2% nedvességtartalomig szárítottam, a ragasztóanyag felhordása hengeres felhordógép segítségével történt. A ragasztáshoz fenol-formaldehid műgyantát alkalmaztam, a 7.2. táblázatban megadott tulajdonságokkal. A rétegek nagy száma jelentős műgyanta felhasználást feltételez, ami a termék gazdaságos előállítását korlátozza, ezért a kísérletek során törekedni kellett a ragasztóanyag-mennyiség minimalizálására, anélkül, hogy a ragasztás minősége számottevően romlana.

### 7.2. táblázat A felhasznált fenol-formaldehid műgyanta műszaki jellemzői

Jellemző	Érték
Száranyag tartalom, %	38-42
Nátriumhidroxid tartalom, %	6,5-7,5
Főzési próba 100 °C-on, perc	Max. 50
Viszkozitás, 20 °C-on	200-500 mPas
Kénsavval kicsapható rész, %	min. 80
Javasolt felhordási mennyiség rétegelt lemez gyártásához	120-170 g/m <sup>2</sup>
Préselési hőmérséklet	100-150 °C
Présnyomás	6-25 kg/cm <sup>2</sup>

A próbapréselések eredményeinek alapján a felületre felhordott átlagos ragasztómennyiséget 65 g/m<sup>2</sup>-ben állapítottam meg, az átlag variációs intervalluma 55-75 g/m<sup>2</sup> között volt. Figyelembe véve a lapok rétegszámát és a furnérrétegek vastagságát, ez a felhordási mennyiség 1 m<sup>3</sup> szálfurnérlap előállításához átlagosan 130 kg műgyantaszükségletet eredményez. Az 5 mm névleges vastagságú, ötrétegű rétegeltlemez köbméterenkénti ragasztói igénye, 160 g/m<sup>2</sup>-es felhordási mennyiség esetén hasonló értéket mutat. A rétegeltlemezhez képest viszont előnyt jelent, hogy a termék költségét nagymértékben meghatározó magas ragasztószükségletet bizonyos mértékben kompenzálja a faalapanyag hulladék jellege.

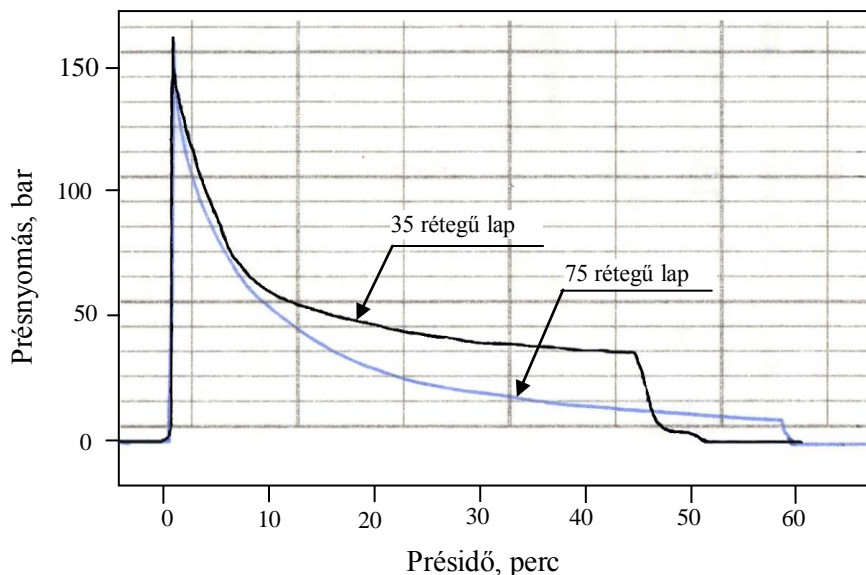
Az ellentétesen elforgatott, és párhuzamos rétegekből felépített teríték préselése laboratóriumi hőprésben történt. A préselési idő meghatározásához, a lapközépen elhelyezett molibdén és réz szálabból készített termoelemeket használtam. Az előzetes kísérletek alapján a 35 rétegű lapok préselési idejét 42 percben állapítottam meg. Ez megegyezik a rétegeltlemez-gyártás présidő meghatározásához alkalmazott tapasztalati képlet értékével (Németh, 2003).



7.2. ábra A lapok hőmérsékletváltozása az idő és vastagság függvényében

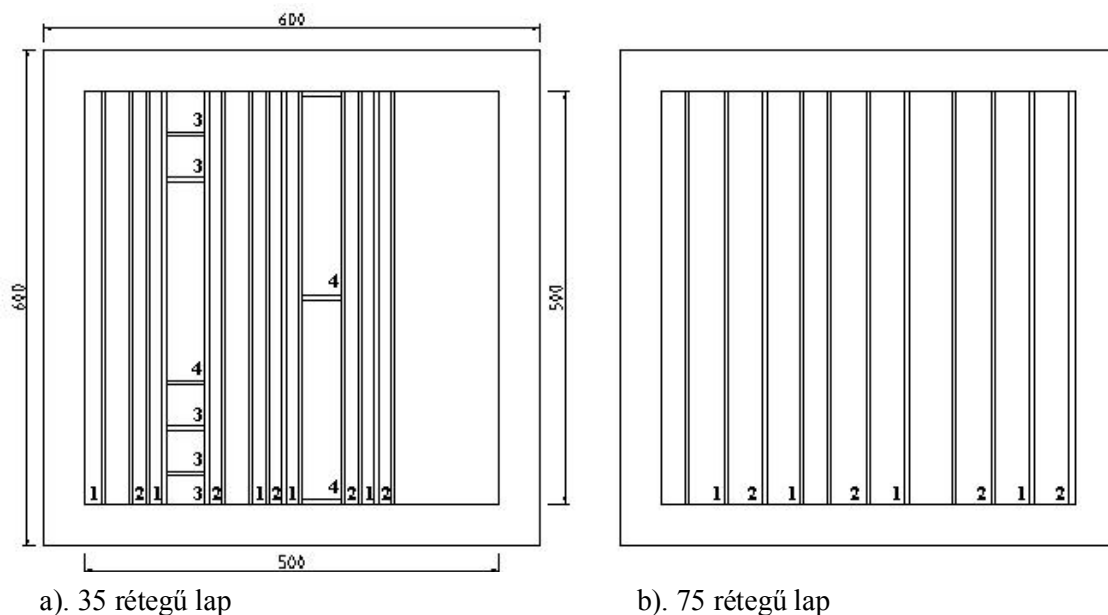
A 75 rétegű lapok préselési ideje 57 perc volt, ami kisebb, mint a  $t_{\min} = f + d/2$  képlettel számolt idő ( $f$  - a ragasztóanyaggal bevont felületek száma,  $d$  - a lemezvastagság). Többcsatornás adatgyűjtő segítségével a lap felmelegedését a vastagság öt pontjában követtem, egy ilyen diagramot mutat a 7.2. ábra:

A 35 rétegű lap közepe 6-7 perc alatt éri el a 100°C körüli hőmérsékletet, ekkor a ragasztóanyaggal bevitt nedvesség elpárolgása jelentősen lassítja a hőmérsékletemelkedést, majd a 42. perc környékén a lap hőmérséklete eléri a beállított préselési hőmérsékletet. A 75 rétegű lapoknál a középrétegek nem minden esetben érték el a hőmérsékletbeállítási-szinteket, a ragasztó kikötéséhez szükséges hőmérsékletet viszont igen.



7.3. ábra A hőpréselés idő-nyomás diagramja

A préseléskor alkalmazott idő-nyomás diagramot a 7.3. ábra mutatja. A présnyomást az adott kísérleti beállítás szerinti értékig növeltem, majd a préslapokat rögzítettem. Ily módon a préselési nyomás a teríték visszarugózásának csökkenése függvényében mérséklődik. A 35 rétegű lapoknál a présidő végére jelentős hidraulikus nyomás maradt, így présnyitáskor fokozatos nyomáscsökkentésre volt szükség. Ezzel szemben a 75 rétegű lapoknál a nyomás közel a légköri nyomás értékére csökkent.



a). 35 rétegű lap

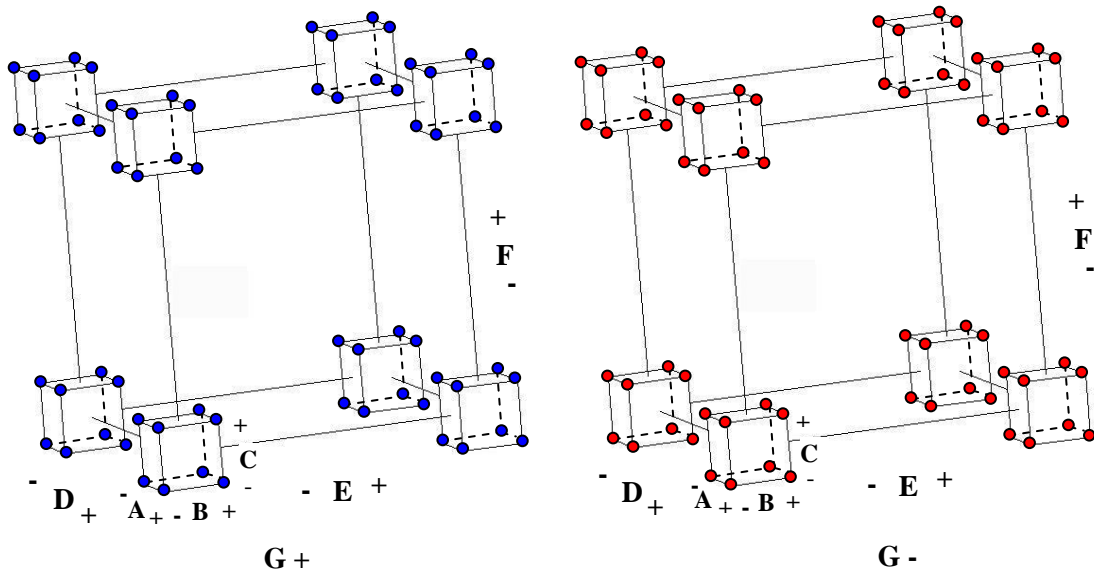
b). 75 rétegű lap

7.4. ábra A próbatestek szabásmintája

Préselés és klimatizálás után, a lapokból előállítottam a fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározásához szükséges próbatesteket. A lapvastagságtól függő szabásmintát a 7.4. ábra szemlélteti, ahol:

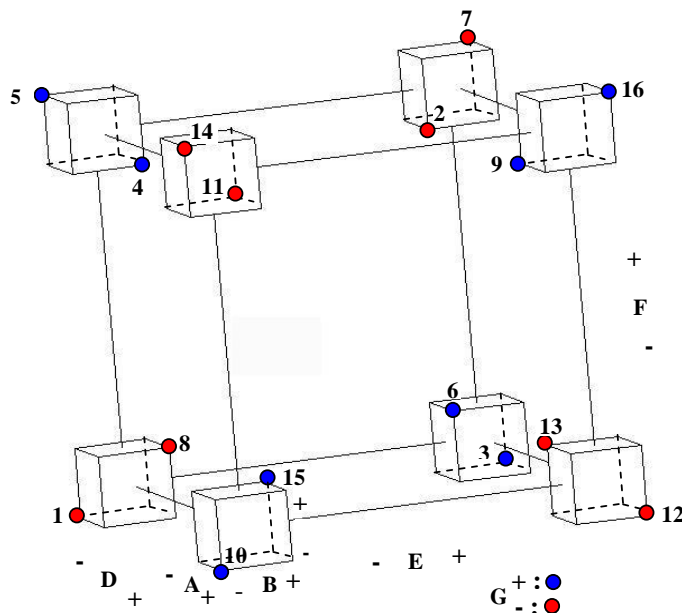
- 1 – próbatestek a lapra merőleges hajlításhoz (18x500 mm; 40x500 mm)
- 2 – próbatestek az élre merőleges hajlításhoz (18x500 mm; 40x500 mm)
- 3 – a vastagsági dagadás méréséhez alkalmazott próbatestek (50x50 mm)
- 4 – a lapsíkkal párhuzamos nyírás meghatározáshoz alkalmazott próbatestek (45x240 mm)

Ha a kísérletekbe bevont hét faktor (7.1. táblázat) hatását kétszintes, teljes faktoriális terv segítségével kívánjuk vizsgálni, a faktorok összes lehetséges szintkombinációinak száma  $2^7$ , azaz 128. Egy ilyen terv kísérleti beállításainak elrendezését láthatjuk a 7.5. ábrán.



7.5. ábra  $2^7$  típusú kétszintes teljes faktoriális terv geometriai ábrázolása

Mivel a kétszintes tervekre csupán lineáris modellt illeszthető, a kísérleti beállítások száma jelentősen meghaladja a modell meghatározandó együtthatóinak számát, így a tervezési mátrix méretének csökkentésére alkalmazhatjuk a frakcionálás módszerét. Jelen esetben egy  $2^{7-3}$  típusú teljes faktoriális tervből indultam ki.



7.6. ábra  $2^{7-3}_{IV}$  típusú részfaktoriális terv kísérleti pontjainak térbeli elhelyezkedése

Feltételezve, hogy a harmad- és annál magasabbrendű kölcsönhatások nem jelentősek, ezek helyébe újabb faktorok helyezhetők, a terv méretének növekedése nélkül. A három új faktor bevezetéséhez az  $x_1x_2x_4$ ,  $x_1x_3x_4$ ,  $x_2x_3x_4$  kölcsönhatások oszlopait használtam fel. Az eredmény egy olyan nyolcadolt terv, amely csupán 16 beállítást tartalmaz. A csökkenés mértékét a 7.5. ábra szemlélteti, feltüntetve a kísérleti beállítások sorszámát is.

A részfaktorterv kísérleti mátrixát a 7.3. táblázat mutatja. Ebben a kölcsönhatások oszlopai is szerepelnek, ahol a szintek szorzással adódnak (azonos előjelű szintek szorzata +1, a különbözőké -1). A mátrix rendelkezik a faktoriális kísérleti tervek tulajdonságaival: szimmetrikus, ortogonális, és elforgatható.

**7.3.táblázat  $2^{7-3}_{IV}$  típusú kétszintes faktoriális kísérleti terv mátrixa**

Beáll.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$
													= $x_5$	= $x_6$	= $x_7$	
1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
5	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1
9	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
10	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1
11	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1
13	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
14	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1
15	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

A frakcionálásból következik, hogy egyes hatások és kölcsönhatások egymással keverednek. Ha azonban a behelyettesítést megfelelően választjuk meg, az előálló keveredési rendszer kezelhető. A három új faktor beállítási értékeire használt generáló összefüggések:

$$x_5 = x_1x_2x_4; \quad x_6 = x_1x_3x_4; \quad x_7 = x_2x_3x_4; \quad (\text{lásd 7.3. táblázat})$$

Az összefoglaló meghatározó kontraszt az alábbi:

$$I = x_1x_2x_4x_5 = x_1x_3x_4x_6 = x_2x_3x_4x_7 = x_2x_3x_5x_6 = x_1x_3x_5x_7 = x_1x_2x_6x_7 = x_4x_5x_6x_7$$

A generáló összefüggésekből kiindulva megkapjuk a keveredési rendszert, melyben a főhatások három- és ötfaktoros kölcsönhatásokkal, az elsőrendű kölcsönhatások pedig egymással, valamint négy- és hatfaktoros kölcsönhatásokkal keverednek (negyedrendű feloldó-, vagy rezolúciós képesség):

$$x_1 = x_2x_4x_5 = x_3x_4x_6 = x_3x_5x_7 = x_2x_6x_7 = x_1x_2x_3x_4x_7 = x_1x_2x_3x_5x_6 = x_1x_4x_5x_6x_7$$

$$x_2 = x_1x_4x_5 = x_3x_4x_7 = x_3x_5x_6 = x_1x_6x_7 = x_1x_2x_3x_4x_6 = x_1x_2x_3x_5x_7 = x_2x_4x_5x_6x_7$$

$$x_3 = x_1x_4x_6 = x_2x_4x_7 = x_2x_5x_6 = x_1x_5x_7 = x_1x_2x_3x_4x_5 = x_1x_2x_3x_6x_7 = x_3x_4x_5x_6x_7$$

$$x_4 = x_1x_2x_5 = x_1x_3x_6 = x_2x_3x_7 = x_5x_6x_7 = x_2x_3x_4x_5x_6 = x_1x_3x_4x_5x_7 = x_1x_2x_4x_6x_7$$

$$x_5 = x_1x_2x_4 = x_2x_3x_6 = x_1x_3x_7 = x_4x_6x_7 = x_1x_3x_4x_5x_6 = x_2x_3x_4x_5x_7 = x_1x_2x_5x_6x_7$$

$$x_6 = x_1x_3x_4 = x_2x_3x_5 = x_1x_2x_7 = x_4x_5x_7 = x_1x_2x_4x_5x_6 = x_2x_3x_4x_6x_7 = x_1x_3x_5x_6x_7$$

$$\begin{aligned}
x_7 &= x_2x_3x_4 = x_1x_3x_5 = x_1x_2x_6 = x_4x_5x_6 = x_1x_2x_4x_5x_7 = x_1x_3x_4x_6x_7 = x_2x_3x_5x_6x_7 \\
x_1x_2 &= x_4x_5 = x_6x_7 = x_2x_3x_4x_6 = x_1x_3x_4x_7 = x_1x_3x_5x_6 = x_2x_3x_5x_7 = x_1x_2x_4x_5x_6x_7 \\
x_1x_3 &= x_4x_6 = x_5x_7 = x_3x_2x_4x_5 = x_2x_1x_4x_7 = x_2x_1x_5x_6 = x_3x_2x_6x_7 = x_1x_3x_4x_5x_6x_7 \\
x_1x_4 &= x_2x_5 = x_3x_6 = x_2x_3x_1x_7 = x_4x_3x_5x_7 = x_4x_2x_6x_7 = x_1x_5x_6x_7 = x_1x_4x_2x_3x_5x_6 \\
x_2x_3 &= x_4x_7 = x_5x_6 = x_1x_3x_4x_5 = x_1x_2x_4x_6 = x_1x_2x_5x_7 = x_1x_3x_6x_7 = x_2x_3x_4x_5x_6x_7 \\
x_2x_4 &= x_1x_5 = x_3x_7 = x_1x_3x_2x_6 = x_4x_3x_5x_6 = x_1x_4x_6x_7 = x_2x_5x_6x_7 = x_2x_4x_1x_3x_5x_7 \\
x_3x_4 &= x_1x_6 = x_2x_7 = x_1x_2x_3x_5 = x_2x_4x_5x_6 = x_1x_4x_5x_7 = x_3x_5x_6x_7 = x_3x_4x_1x_2x_6x_7 \\
x_1x_7 &= x_3x_5 = x_2x_6 = x_7x_2x_4x_5 = x_7x_3x_4x_6 = x_2x_3x_4x_1 = x_4x_5x_6x_1 = x_1x_7x_2x_3x_5x_6
\end{aligned}$$

A három- és annál többfaktoros kölcsönhatásokat jelentéktelennek feltételezve, ezek hatásától eltekinthetünk, így a regressziós modell paramétereinek becslésénél a következő egyszerűsített keveredési rendszer érvényes:

$$\begin{aligned}
b_1 &\rightarrow \beta_1; & b_{12} &\rightarrow \beta_{12} + \beta_{45} + \beta_{67}; \\
b_2 &\rightarrow \beta_2; & b_{13} &\rightarrow \beta_{13} + \beta_{46} + \beta_{57}; \\
b_3 &\rightarrow \beta_3; & b_{14} &\rightarrow \beta_{14} + \beta_{25} + \beta_{36}; \\
b_4 &\rightarrow \beta_4; & b_{23} &\rightarrow \beta_{23} + \beta_{47} + \beta_{56}; \\
b_5 &\rightarrow \beta_5; & b_{24} &\rightarrow \beta_{24} + \beta_{15} + \beta_{37}; \\
b_6 &\rightarrow \beta_6; & b_{34} &\rightarrow \beta_{34} + \beta_{16} + \beta_{27}; \\
b_7 &\rightarrow \beta_7; & b_{17} &\rightarrow \beta_{17} + \beta_{35} + \beta_{26};
\end{aligned}$$

Az egyszerűsített keveredési rendszerre felírt matematikai modell alakja a főhatásokat és a kétfaktoros kölcsönhatásokat tartalmazó polinom:

$$\begin{aligned}
\hat{y} &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 \\
&+ b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{17}x_1x_7
\end{aligned} \tag{7.1.}$$

Ahol:  $x_i$  – a faktorok kódolt értékei ( $i = 1 \dots 7$ )

$x_ix_j$  – a kölcsönhatások kódolt értékei ( $i, j = 1 \dots 7$ )

$b_i$  – az egyenletben szereplő főhatások együtthatóinak kiszámított értékei

$b_{ij}$  – az egyenletben szereplő kétfaktoros kölcsönhatások kiszámított együtthatói

$\beta_i$  – a főhatások együtthatóinak valódi értéke

$\beta_{ij}$  – a kölcsönhatások együtthatóinak valódi értéke

Az együtthatókat a tizenhat kísérleti pontban kapott mérési adatok segítségével számíthatjuk ki. Az eredmények alapján azonosítani tudjuk a vizsgált tulajdonságokat leginkább befolyásoló tényezőket, majd a hatások és kölcsönhatások nagyságának kiszámításával meg tudjuk határozni azokat a faktor-beállítási szinteket, amelyekre a válaszjellemző a lehető legjobb értéket adja. Végül felírjuk azt a matematikai modellt, amely kellő pontossággal leírja a jellemzőknek a független változóktól való függőségét.



## 7.2. A hajlítórugalmassági modulus eredményeinek kiértékelése

A 7.3. táblázat kísérleti beállításait véletlen sorrendben háromszor ismételt meg, majd a szabásminták szerint kivágott próbatesteket szabványos vizsgálatoknak vettem alá. Az új termék szerkezeti célú felhasználása miatt, válaszjellemzőknek a lapok hajlító- és lapsíkkal párhuzamos nyírószilárdságát, hajlítórugalmasságát, valamint vastagsági dagadását választottam.

A kapott értékekre a [7.1.]-ben meghatározott regressziós modellt illesztettem, és meghatároztam az egyes paraméterek szignifikanciáját. Elhagyva a statisztikailag nem jelentős tagokat, előállítottam a csökkentett modellt, végül kerestem azokat a faktor beállítási kombinációkat, amelyre a vizsgált válaszjellemző az optimális értéket adja.

A modellben a fafaj kivételével mindegyik faktor folytonos változó. A kísérleti eredmények kiértékeléséhez nem követelmény, hogy a faktorok mennyiségi változók legyenek, azok kategorikus jellemzők is lehetnek. A fafaj minőségi jellegéből azonban az következik, hogy levont következtetések csak a faktor  $-1$  és  $+1$  szimbólummal jelölt szintjeire érvényesek, az interpoláció értelmetlen.

### 7.2.1. Elemzések a lapra merőleges rugalmassági modulus átlagértékeire

Az elemzés első lépéseként a végrehajtott kísérleti terv három ismétlésének átlagát vizsgáltam, eltekintve a replikációk és kölcsönhatások okozta ingadozásoktól. A lapra és élre merőleges rugalmassági modulusok mért értékeit, azok szórását és variációs együtthatóját a 7.4. táblázat tartalmazza. Az egyes beállításokra kapott eredmények jelentősen eltérnek, ami előrevetíti, hogy a faktorok különböző mértékben befolyásolják a lapok rugalmasságát.

7.4. táblázat A rugalmassági modulusra kapott értékek összesítő táblázata

Beáll.	Faktorok							$\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	MOE <sub>lap</sub> , MPa			MOE <sub>él</sub> , MPa		
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$		$\bar{y}$	$s$	COV., %	$\bar{y}$	$s$	COV., %
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	776	13485	899	6,7	13586	619	4,6
2	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	708	7767	980	12,6	7946	1228	15,5
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	797	9251	416	4,5	8899	880	9,9
4	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	699	12260	151	1,2	12393	342	2,8
5	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	829	16071	1447	9,0	15819	1462	9,2
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	688	8425	261	3,1	8298	611	7,4
7	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	841	9294	838	9,0	12424	1588	12,8
8	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	674	11291	935	8,3	11672	597	5,1
9	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	765	8667	534	6,2	9026	855	9,5
10	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	651	9660	573	5,9	9952	594	6,0
11	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	768	10888	715	6,6	12266	542	4,4
12	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	664	6841	428	6,3	7013	802	11,4
13	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	703	4171	455	10,9	7246	643	8,9
14	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	665	9598	99	1,0	9593	315	3,3
15	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	753	8314	323	3,9	9773	471	4,8
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	682	7830	490	6,3	7871	436	5,5

A legmagasabb értéket az ötödik kísérleti beállítás adja, amikor a bükkből előállított 35 rétegű teríték 15 mm széles szálfurnéroból, hossztoldással készült, 15°-os orientációval, a présnyomás 2,16 MPa bar, a hőmérséklet 160°C volt. Ez az érték megegyezik a bükk rostokkal párhuzamos átlagos statikus hajlító rugalmassági modulusával (Molnár, 2002). Azonban frakcionált faktoriális tervről lévén szó, nem tudhatjuk, hogy a tizenhat szintkombinációra kapott eredmények között szerepel-e a legjobb vagy legrosszabb lehetséges érték.

A faktorok hatását az alsó és felső szintjeikhez tartozó középértékük különbségéből (kontraszt) kapjuk, az együtthatók a hatások felét jelentik. A kísérletbe bevont tényezők lapra merőleges rugalmassági modulusra gyakorolt hatásainak nagyságát, a regressziós paramétereket, azok átlagos hibáját, és az optimális beállítási szintekre kapott becslési értékeket a 7.5. táblázat tartalmazza:

**7.5. táblázat A faktorok hatása a lapra merőleges rugalmassági modulusra**

Faktor	Becsült hatás	Együttható (b)	b hibája	t érték	p	Optimális szint (x <sub>i</sub> )	b*x <sub>i</sub>
átlag (teng. metsz.)	9613	9613	377,15	25,490	0,0000		
x <sub>1</sub> – fafaj	-809	-404	377,15	-1,072	0,3150	-1	404
x <sub>2</sub> – szálforg. szél.	-234	-117	377,15	-0,311	0,7640	-1	117
x <sub>3</sub> – hosszoldás	-478	-239	377,15	-0,634	0,5439	-1	239
<b>x<sub>4</sub> – vastagság</b>	<b>-2734</b>	<b>-1367</b>	<b>377,15</b>	<b>-3,625</b>	<b>0,0067</b>	<b>-1</b>	<b>1367</b>
<b>x<sub>5</sub> – orientáció</b>	<b>-3665</b>	<b>-1833</b>	<b>377,15</b>	<b>-4,859</b>	<b>0,0013</b>	<b>-1</b>	<b>1833</b>
x <sub>6</sub> – nyomás	1367	684	377,15	1,812	0,1075	+1	684
x <sub>7</sub> – hőmérséklet	893	446	377,15	1,184	0,2705	+1	446
Becsült optimális érték, ( $\sum b^* x_i$ ), Mpa							<b>14704</b>

Az egyes tényezők becsült hatásának szignifikanciáját t-próba segítségével állapíthatjuk meg, ahol a  $t$  próbastatisztika a becsült hatás és annak standard hibájából kapott hányados lesz:

$$t_0 = \frac{\hat{\beta}}{s.e.(\hat{\beta})} = \frac{\hat{\beta}}{\sqrt{\frac{\hat{\sigma}^2}{n2^{k-p}}}} \quad [7.2.]$$

ahol:  $n$  – a párhuzamos kísérleti beállítások száma (jelen esetben  $n=1$ , mert csak az átlaggal számoltam);

$\hat{\sigma}$  – a kísérleti hiba varianciájának, a maradék szórásnégyzetből becsült értéke

$k$  – a tényezők száma ( $k = 7$ );

$p$  – az elhanyagolható kölcsönhatások helyére bevezetett új faktorok száma ( $p=3$ , vagyis  $2^{7-3} = 16$  beállítást veszünk a  $2^7 = 128$  helyett).

A  $t$  próbastatisztika értékeit és a hozzá tartozó valószínűségeket a 7.5. táblázat ötödik és hatodik oszlopa tartalmazza. Annak a valószínűsége, hogy az átlagértéknek a vastagság és orientáció okozta ingadozása csupán a véletlennek köszönhető, igen csekély. Tehát a két tényező lapra merőleges rugalmassági modulusra gyakorolt hatása 95%-os megbízhatósági szinten szignifikáns. Az utolsó előtti oszlopban a változók optimális, jelen esetben a legnagyobb értéket adó beállítási szintjei láthatók, majd a táblázat utolsó sorában a faktorkombináció becsült értéke, amely közel 53%-kal haladja meg az átlagértéket. Ez a faktorkombináció a kísérleti tervben nem szerepel, a hozzá legközelebb álló 5. kísérleti beállítás viszont jóval nagyobb értéket mutat ( $\bar{y} = 16071$ ). Az eltérést okozhatják a figyelembe nem vett faktorok közötti kölcsönhatások, esetleg más, a modellben nem szereplő tényezők.

A hatások jelentőségét varianciaanalízissel is igazolhatjuk, amikor a válaszcsoport – egyes faktorok okozta – ingadozását a maradék szórásnégyzettel hasonlítjuk össze. Az ismétlések figyelembevétele nélkül nincs lehetőség a kísérleti hiba varianciájának ( $\sigma_y^2$ ) független becslésére, de ha a modell nem megy át minden ponton (a terv nem telített), a kísérleti hibát a figyelembe nem vett hatások reziduális szórásnégyzetével ( $s_r^2$ ) becsülhetjük.

A három párhuzamos kísérleti beállítás átlagára elvégzett varianciaanalízis alapján (7.6. táblázat) a vastagság és orientáció jelentősen befolyásolja a lapra merőleges hajlító rugalmassági modulusot.

7.6. táblázat A tényezők hatásának variancianalízise,  $MOE_{lap}$ 

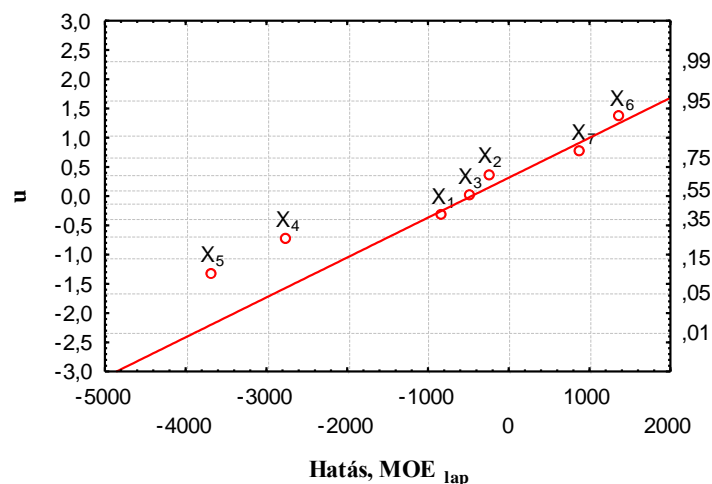
Faktor	SS	df	MS	F	p
$x_1$ - fajaj	2615498	1	2615498	1,149	0,315
$x_2$ - szálforg. szél.	219727	1	219727	0,097	0,764
$x_3$ - hosszoldás	914414	1	914414	0,402	0,544
<b><math>x_4</math> - vastagság</b>	<b>29907227</b>	<b>1</b>	<b>29907227</b>	<b>13,141</b>	<b>0,007</b>
<b><math>x_5</math> - orientáció</b>	<b>53732565</b>	<b>1</b>	<b>53732565</b>	<b>23,610</b>	<b>0,001</b>
$x_6$ - nyomás	7476123	1	7476123	3,285	0,107
$x_7$ - hőmérséklet	3188903	1	3188903	1,401	0,271
Maradék	18206662	8	2275833		
Teljes SS	116261117	15			
<b><math>R^2 = 0,843</math>; <math>R^2_{adj} = 0,706</math></b>					

Az ötödik oszlop  $F$  statisztikái tulajdonképpen a 7.5. táblázatban szereplő  $t$  statisztikák négyzetei, hisz egy  $v$  szabadságfokú  $t$ -eloszlású valószínűségi változó négyzete olyan  $F$ -eloszlást követ, amelynek a számlálóban szereplő szabadsági foka 1, a nevezőé pedig  $v$  (Montgomery, 1997).

A faktorok főhatásainak regressziós modellje:

$$\hat{y}_{MOE_{lap}} = 9613 - 404x_1 - 117x_2 - 239x_3 - 1367x_4 - 1833x_5 + 684x_6 + 446x_7 \quad [7.3.]$$

A mért adatokra illesztett, csak a főhatásokat tartalmazó regressziós függvény illeszkedésének jóságát a determinációs együttható ( $R^2$ ), illetve a modellben szereplő paraméterek számával korigált együttható ( $R^2_{adj}$ ) mutatja. A főhatásokra kapott regressziós függvény az átlagtól való eltérés 70,6%-át magyarázza. Az egyes hatások jelentőségét Gauss papíros ábrázolással is ellenőrizhetjük. Ha a becsült hatások csupán a véletlennek köszönhetően térnek el zérustól, akkor azok eloszlása nulla várható értékű normális eloszlást mutat, a pontok az origón áthaladó elméleti egyenes körül helyezkednek el. A 7.7. ábra igazolja a vastagság és orientáció szignifikanciáját.



7.7. ábra A faktorok főhatásainak Gauss papíros ábrázolása

A tényezők hatásának szignifikanciája alapján kapott matematikai modell alakja a következő polinomra egyszerűsödik:

$$\hat{y}_{MOE_{lap}} = 9613 - 1367x_4 - 1833x_5 + 684x_6 \quad R^2 = 0,784 ; R^2_{adj} = 0,73 \quad [7.4.]$$

Az  $x_6$  faktor hatását a másodfajú hiba valószínűségének csökkentése érdekében a modellben hagytam, betartva ez által a „sometimes pooling” szabályt is (Lorenzen, 1993). E szabály szerint egy hatást csak akkor hagyjunk el, ha annak válaszijellemzőre gyakorolt hatása kicsi ( $p > 0,25$ ).

Párhuzamos kísérleti beállítások hiányában a reprodukálhatósági hiba kiszámításához a magasabb rendű kölcsönhatások szórásnégyzetét a maradék szórásnégyzetbe vonhatjuk (pooling), növelve annak szabadsági fokát és következésképpen a statisztikai próbák erősségét. Ha a redukált modellből kihagyott faktorok és kölcsönhatások ingadoztató hatását a reziduális négyzetösszeggel egyesítjük, a korrigált determinációs együttható  $R^2_{adj} = 0,73$  értékre módosul.

### 7.2.2. Elemzések az élre merőleges rugalmassági modulus átlagértékeire

Az élre merőleges rugalmassági modulus értékekre elvégzett hasonló elemzések (lásd 7.7. és 7.8. táblázatok) a vastagság és orientáció jelentőségén túl, 1,66%-os szinten a fafaj, 5,04%-os szinten pedig a nyomás szignifikanciáját is jelzik. A fafaj hatásának nagysága eltér a lapra merőleges értékektől (több mint kétszeresére emelkedik), a vastagság, orientáció és nyomás hatása közel megegyezik, a reziduális szórásnégyzet valamivel kisebb értéket mutat.

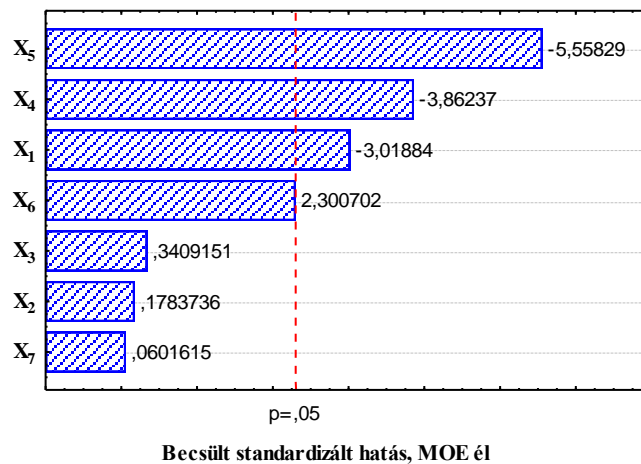
7.7. táblázat A faktorok főhatása az élre merőleges rugalmassági modulusra

Faktor	Becsült hatás	Együttható (b)	b hibája	t érték	p	Optimális szint ( $x_i$ )	$b \cdot x_i$
átlag (teng.metsz.)	10236		296,08	34,572	0,0000		
<b><math>x_1</math> – fafaj</b>	<b>-1788</b>	<b>-894</b>	<b>296,08</b>	<b>-3,019</b>	<b>0,0166</b>	<b>-1</b>	<b>894</b>
$x_2$ - szálforg. szél.	106	53	296,08	0,178	0,8629	+1	53
$x_3$ – hosszoldás	202	101	296,08	0,341	0,7419	+1	101
<b><math>x_4</math> – vastagság</b>	<b>-2287</b>	<b>-1144</b>	<b>296,08</b>	<b>-3,862</b>	<b>0,0048</b>	<b>-1</b>	<b>1144</b>
<b><math>x_5</math> – orientáció</b>	<b>-3291</b>	<b>-1646</b>	<b>296,08</b>	<b>-5,558</b>	<b>0,0005</b>	<b>-1</b>	<b>1646</b>
$x_6$ - nyomás	1362	681	296,08	2,301	0,0504	+1	681
$x_7$ - hőmérséklet	36	18	296,08	0,060	0,9535	+1	18
Becsült optimális érték, ( $\sum b \cdot x_i$ ), Mpa							<b>14772</b>

7.8. táblázat A tényezők hatásának varianciaanalízise,  $MOE_{el}$

Faktor	SS	df	MS	F	p
<b><math>x_1</math> – fafaj</b>	<b>12782413</b>	<b>1</b>	<b>12782413</b>	<b>9,113</b>	<b>0,0166</b>
$x_2$ - szálforg. szél.	44627	1	44627	0,032	0,863
$x_3$ - hosszoldás	163014	1	163014	0,116	0,742
<b><math>x_4</math> – vastagság</b>	<b>20923763</b>	<b>1</b>	<b>20923763</b>	<b>14,918</b>	<b>0,005</b>
<b><math>x_5</math> – orientáció</b>	<b>43332598</b>	<b>1</b>	<b>43332598</b>	<b>30,895</b>	<b>0,0005</b>
$x_6$ - nyomás	7424263	1	7424263	5,293	0,0504
$x_7$ - hőmérséklet	5077	1	5077	0,004	0,953
Maradék	11220766	8	1402596		
Teljes SS	95896519	15			
<b><math>R^2 = 0,883</math>; <math>R^2_{adj} = 0,781</math></b>					

A hatások hibával korrigált (standardizált) értékeit Pareto diagramon is ábrázolhatjuk, a feltüntetett szignifikanciahatár fölötti értékek az adott hatások jelentőségét mutatják (7.8. ábra).



7.8. ábra Pareto diagram az élre merőleges rugalmassági modulusra

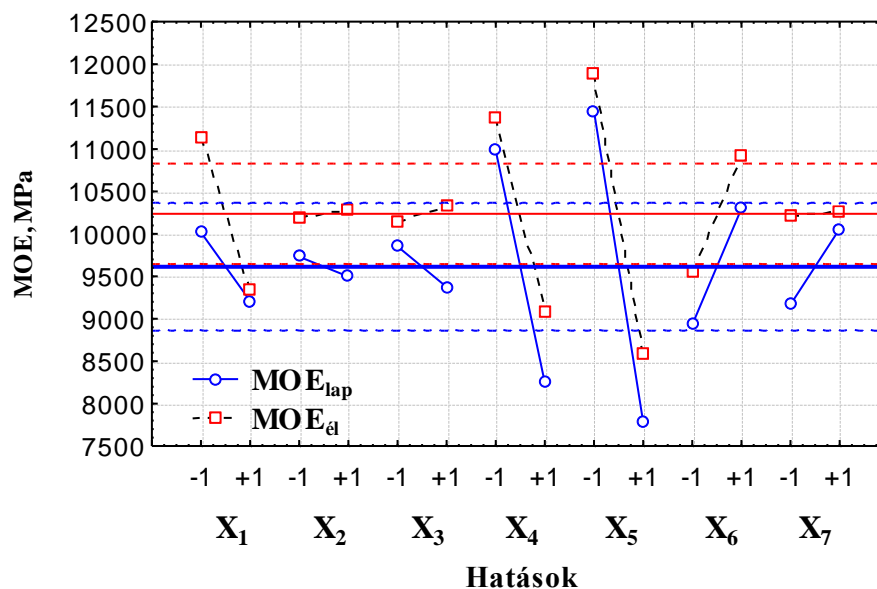
A regressziós függvény – a faktorok szignifikanciája alapján – a következő tagokat tartalmazza:

$$\hat{y}_{MOE_{el}} = 10236 - 894x_1 - 1144x_4 - 1646x_5 + 681x_6 \quad R^2 = 0,881 ; R^2_{adj} = 0,834 \quad [7.5.]$$

Az egyenletben a fafaj ( $x_1$ ) nem mennyiségi, hanem minőségi jellegű független változó, tehát ahhoz, hogy a függvényt értelmezni lehessen, csak a -1 és +1 szintekhez tartozó értékeket veheti föl.

A tényezők hatásának figyelembe vételével megállapított optimális beállítási szintek az élre merőleges rugalmassági modulus átlagértékét 44%-kal növelik.

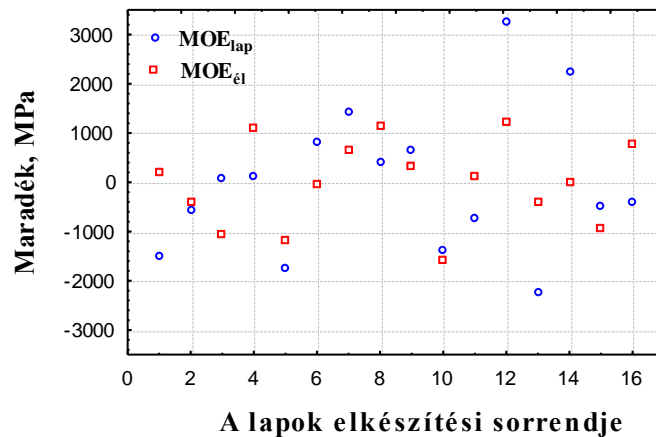
Az egyes változók lapra, illetve élre merőleges rugalmassági modulusra gyakorolt átlagos hatásait ábrázolja a 7.9. ábra, feltüntetve az átlagok kétszeres hibáinak határait (szaggatott vonalak). A határokon kívül eső hatások, 95%-os megbízhatósági szinten szignifikánsak.



7.9. ábra A rugalmassági modulus hatásábrái

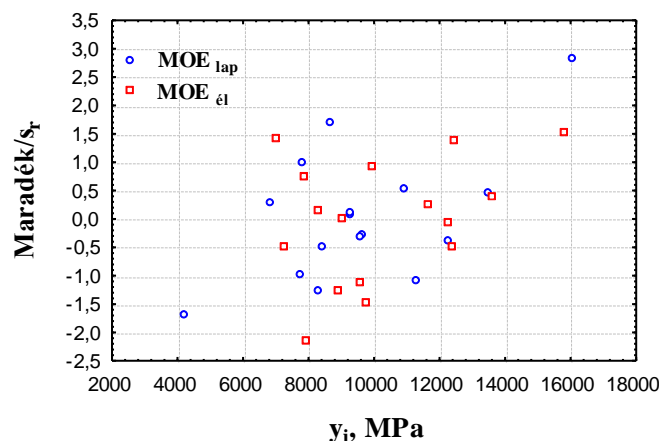
Az ábráról leolvasható, hogy élre merőleges irányban az elkészített lapok átlagos merevsége nagyobb. Az orientáció, lapvastagság és nyomás hatása mindkét terhelési irányban közel azonos, a lapra merőleges rugalmassági modulusnál a fafaj hatása nem szignifikáns. A szálforgács-szélesség, hosszoldás és hőmérséklet egyik terhelési irányban sem befolyásolja jelentősen a lapok rugalmasságát. A regresszió feltételeinek teljesülését a maradékok vagy

reziduumok grafikus vizsgálatával ellenőrizhetjük. A mérési hibák függetlenségének megállapításához, az  $(y_i - \hat{Y}_i)$  maradékokat a mérési adatok sorrendjének függvényében ábrázoljuk, és ha azok nulla körüli véletlenszerű ingadozást mutatnak a hibák függetlenek.



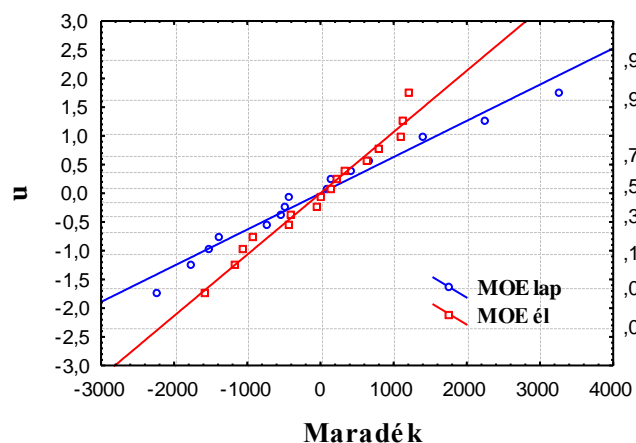
7.10. ábra Maradékok a kísérletek elvégzésének sorrendjében

A 7.10. ábra szerint, a lapra és élre kapott maradékok ábrázolásánál semmiféle tendencia nem tapasztalható, ez a hibák függetlenségére utal.



7.11. ábra Standardizált maradékok a mért értékek függvényében

A függvény adekvátságának grafikus ellenőrzésére a standardizált maradékokat a mérési adatok függvényében ábrázoltam, és mivel azok a zero körül véletlenszerűen ingadoznak, következik, hogy a regressziós függvények mindkét esetben jól illeszkednek a mért pontokra (7.11. ábra).



7.12. ábra A maradékok Gauss-papíros ábrázolása

A maradékok normális eloszlását a 7.12. ábra mutatja. A reziduumokat az elméleti eloszlásfüggvényből visszszámolt valószínűségi értékek függvényében ábrázoltam, és azok közel egy egyenes mentén helyezkednek el, tehát a normalitásra vonatkozó feltétel is teljesül.

### 7.3. Elemzések a három párhuzamos kísérleti beállítás és a kölcsönhatások figyelembevételével

Az átlagokra elvégzett elemzéseknél, az ismételt mérések figyelmen kívül hagyása miatt nem volt lehetőség a kísérleti hiba modelltől független becslésre, vagyis arra, hogy a feltételezett regressziós modell adekvát voltát ellenőrizzem. Ekkor csak a figyelembe nem vett hatásokból számolt reziduális szórásnégyzettel hasonlítottam össze az egyes faktorok szórásnégyzetét, így vontam le a faktorok szignifikanciájára vonatkozó következtetést. A kísérleti terv beállításainak háromszori megisméltése lehetőséget ad az adekvátság vizsgálatára, így a következőkben az ismételt mérésekre elvégzett analízisek kerülnek bemutatásra.

#### 7.3.1. A lapra merőleges rugalmassági modulus eredményeinek kiértékelése

Ismételt mérések esetén mind a regresszió-, mind a varianciaanalízis feltételei közé tartozik a replikációk varianciájának azonossága. Ennek megállapítására közel normális eloszlású változóknál alkalmazhatjuk a Bartlett-, vagy Cochran-próbát, ha pedig az adatok normális eloszlása kétséges, akkor a Levene-próbát.

a.) Cochran-próba a lapra merőleges rugalmassági modulus varianciájának homogenitászvizsgálatára:

$$G_{MOE_{lap}} = \frac{s_{i_{max}}^2}{\sum_i s_i^2} = 0,2763 < G_{0,05}(2,16) = 0,3218 \quad [7.6.]$$

ahol:  $s_i^2$  – az egyes beállítások tapasztalati szórásnégyzete (7.3. táblázat)  
 $s_{max}^2$  – a legnagyobb tapasztalati szórásnégyzet

b.) A varianciák homogenitásának Bartlett-próbája:

$$K^2 = \frac{1}{c} \left( \nu \ln s^2 - \sum_{i=1}^N \nu_i \ln s_i^2 \right); \quad c = 1 + \frac{1}{3(N-1)} \left( \sum_{i=1}^N \frac{1}{\nu_i} - \frac{1}{\nu} \right); \quad [7.7.]$$

ahol:  $s^2$  – az egyesített szórásnégyzet  $\nu$  szabadsági fokkal  
 $N$  – a beállítások száma

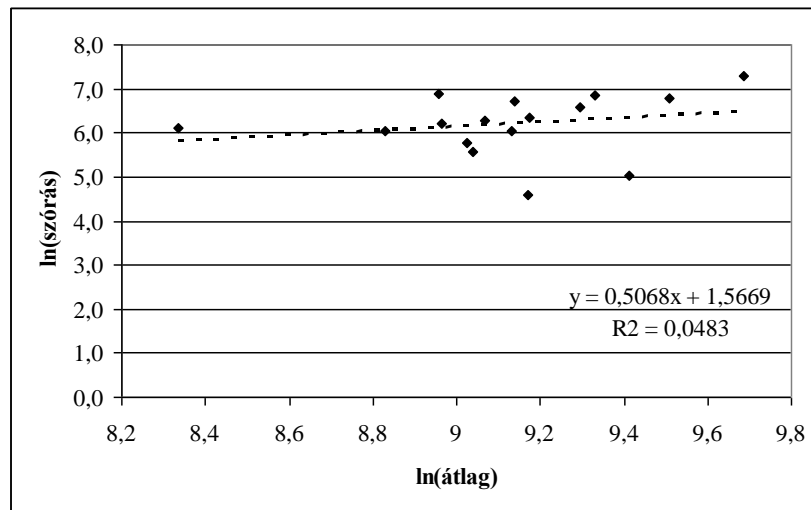
$$c = 1 + \frac{1}{3 \cdot 15} \left( \sum_{i=1}^{16} \frac{1}{2} - \frac{1}{32} \right) = 1,177$$

$$K^2 = \frac{32 \cdot 13,068 - 396,43}{1,177} = 18,471 < \chi_{0,05}^2(15) = 24,996$$

A próbastatisztikák mindkét esetben kisebbek, mint az adott szabadságfokokhoz tartozó kritikus értékek, így 95%-os megbízhatósági szinten elfogadhatjuk azt a nullhipotézist, hogy az egyes kísérleti beállítások varianciái megegyeznek.

Következő lépés a szórások átlagtól való függésének elemzése. A szórás és az átlag logaritmusai közötti függvénykapcsolatot megvizsgálva (7.13. ábra), levonható az a

következtetés, hogy a kettő között nincs korreláció, tehát nincs szükség az adatok transzformációjára.



7.13. ábra A lapra merőleges rugalmassági modulus átlagának és szórásának összefüggése

Mivel a varianciák homogenitására és függetlenségére vonatkozó feltételek teljesülnek, rátérhetünk a faktorhatások szignifikanciájának vizsgálatára.

Az egyes faktorok és a köztük fellépő kölcsönhatások lapra merőleges rugalmasságra gyakorolt hatásainak elemzésekor (7.9. táblázat) kitűnik, hogy az egyes kölcsönhatások nagysága megközelíti, néhány esetben meg is haladja néhány főhatás értékét. A táblázat szerint az átlag közepes hibájához képest szinte minden faktor és kölcsönhatás szignifikáns, kivéve az  $x_2$  szálforgács-szélesség, illetve az  $x_1x_7$ , és  $x_2x_3$  kölcsönhatásokat.

7.9. táblázat A hatások és kölcsönhatások nagysága a lapra merőleges rugalmassági modulus esetén

Faktor	Becsült hatás	Együttható (b)	b hibája	t érték	p	Optimális szint ( $x_i$ )	$b \cdot x_i$
átlag (teng.metsz.)	9613		97,8	98,297	0,0000		
$x_1$ - faj	-809	-404	97,8	-4,134	0,0002	-1	404
$x_2$ - szálforg. szél.	-234	-117	97,8	-1,198	0,2393	-1	117
$x_3$ - hosszoldás	-478	-239	97,8	-2,444	0,0200	-1	239
$x_4$ - vastagság	-2734	-1367	97,8	-13,980	0,0000	-1	1367
$x_5$ - orientáció	-3665	-1833	97,8	-18,738	0,0000	-1	1833
$x_6$ - nyomás	1367	684	97,8	6,989	0,0000	+1	684
$x_7$ - hőmérséklet	893	446	97,8	4,566	0,0001	+1	446
$x_1x_2$	927	464	97,8	4,740	0,0000	+1	464
$x_1x_3$	632	316	97,8	3,232	0,0028	+1	316
$x_1x_4$	1281	640	97,8	6,549	0,0000	+1	640
$x_1x_5$	679	339	97,8	3,468	0,0015	+1	339
$x_1x_6$	-1058	-529	97,8	-5,407	0,0000	-1	529
$x_1x_7$	-223	-112	97,8	-1,142	0,2615	-1	112
$x_2x_3$	-150	-75	97,8	-0,764	0,4501	+1	-75
Becsült opt. érték, Mpa							17029
-95,% konfidencia int.							16890
+95,% konfidencia int.							17167

A hasonló eredményeket adó varianciaanalízis táblázatát a 2 sz. melléklet tartalmazza. Az ismétléseknek köszönhetően a maradék szórásnégyzet szabadsági foka száma jelentősen megnőtt



(szf=33, lásd melléklet), ami lehetővé teszi a faktorok hatásának és közöttük fellépő kölcsönhatásoknak nagy statisztikai biztonsággal történő becslését. Ez a szórásnégyzet tulajdonképpen a csoporton belüli és a modellbe be nem vont hatások (itt csupán a  $x_1x_2x_3$  kölcsönhatás) összevont ingadozásának mértékét mutatja, és ehhez viszonyítja a faktorok és kölcsönhatások ingadoztató hatását.

A hierarchia szabály szerint, ha egy faktor valamely kölcsönhatása szignifikáns, akkor magát a faktort is be kell vonni a modellbe. E szabály alapján a szálforgács-szélesség ( $x_2$ ) hatásától nem tekinthetünk el, annak ellenére sem, hogy a faktor hatása önmagában nem bizonyul jelentősnek. Ebből a megfontolásból a faktort bent hagytam a regressziós modellben, ezzel is csökkentve a másodfajú hiba valószínűségét.

A regressziós függvény alakja a következő többváltozós, nem teljes másodfokú polinom:

$$\hat{y}_{MOE_{up}} = 9613 - 404x_1 - 117x_2 - 239x_3 - 1367x_4 - 1833x_5 + 684x_6 + 446x_7 + \\ + 464x_1x_2 + 316x_1x_3 + 640x_1x_4 + 339x_1x_5 - 529x_1x_6 \quad [7.8.]$$

$$R^2 = 0,956; R^2_{adj} = 0,941$$

A [7.4.] függvény kiegészítése a fenti faktorokkal és kölcsönhatásokkal a modell becslési pontosságát jelentősen növeli. A faktorok optimális szintkombinációjára kapott rugalmassági modulus 78,5%-os növekedést mutat és meghaladja a legjobb beállításra kapott értéket. Fontos kiemelni, hogy a legjobb beállítási kombináció meghatározásakor csak a faktorok szintjeit választhatjuk meg, a kölcsönhatások előjele azok szorzatából következik. A maradékok elemzését szintén a 2. melléklet tartalmazza, az eredmények a regresszió és varianciaanalízis feltételeinek teljesülését igazolják. Az egyes kísérleti beállítások ismétléséből adódóan, lehetőségünk van a modell adekvátságának vizsgálatára. A mért és a modellel becsült értékek eltérését a 7.10. táblázat mutatja.

**7.10. táblázat A lapra merőleges rugalmassági modulusz mért és becsült értékei**

$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}_i$	$s_i^2$	$\hat{Y}_i$	$(\bar{y}_i - \hat{Y}_i)^2$
12682	13316	14456	13485	808105	13674	35691
6710	7946	8646	7767	961141	7727	1579
9578	8783	9393	9251	173339	9062	35691
12112	12414	12254	12260	22828	12300	1579
15424	15060	17728	16071	2093189	15881	35943
8477	8656	8142	8425	68239	8465	1591
10135	9288	8459	9294	702104	9484	35918
10361	12232	11280	11291	875065	11251	1574
8667	8133	9202	8667	285610	8633	1161
9014	9862	10106	9660	328729	9844	33901
11260	10063	11340	10888	511491	10922	1151
7330	6539	6653	6841	182806	6657	33870
4025	4681	3806	4171	207385	4205	1162
9606	9496	9693	9598	9803	9415	33625
7948	8560	8435	8314	104556	8280	1146
8278	7905	7306	7830	240561	8014	33680
Összeg:				7574954		289264

Ha a modell jól illeszkedik a tényleges adatokhoz, akkor a reziduális szórásnégyzetből ( $s_r^2$ ) és a reprodukálhatósági szórásnégyzetből ( $s_e^2$ ) képzett próbastatisztika hányadosa F-eloszlású:

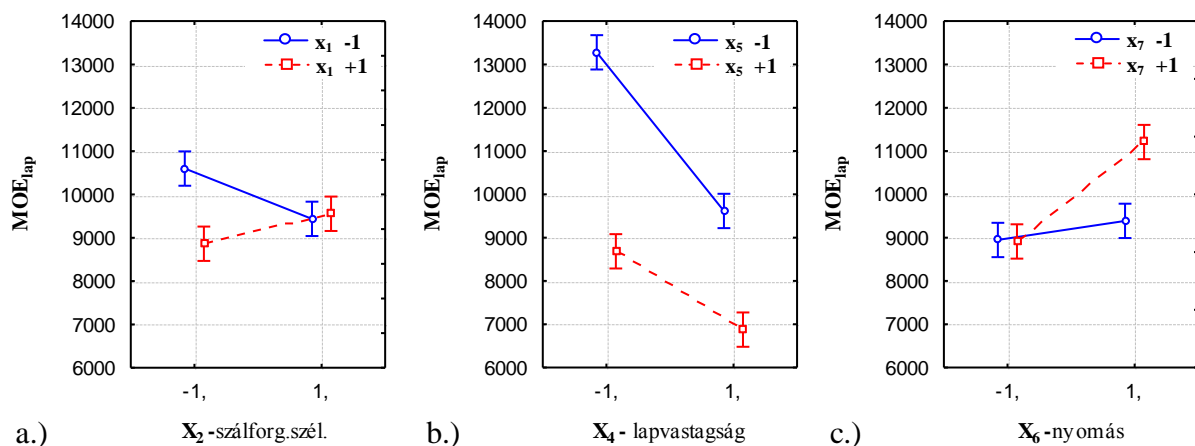
$$F_0 = \frac{s_r^2}{s_e^2} = \frac{p \cdot \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{Y}_i)^2}{\frac{N - (k + 1)}{\sum_{i=1}^N s_i^2}} = 0,611 < F_{0,05(3,16)} = 3,24 \quad [7.9.]$$

ahol:  $p$  – az ismétlések száma ( $p = 3$ )

$k$  – a modell együtthatóinak száma ( $k = 12$ )

A kiszámított próbastatisztika nem haladja meg a kritikus értéket, tehát azt a nullhipotézist, hogy a  $x_1x_7$ ,  $x_2x_3$  kölcsönhatásokkal redukált [7.8.] modell adekvát, 95%-os megbízhatósági szinten elfogadhatjuk. A varianciaanalízis, a reziduumok elemzése és az illeszkedés jóságának ellenőrzése alapján megállapítható, hogy a fenti regressziós modell statisztikailag megbízható módon becsüli a lapra merőleges hajlító rugalmassági moduluszt.

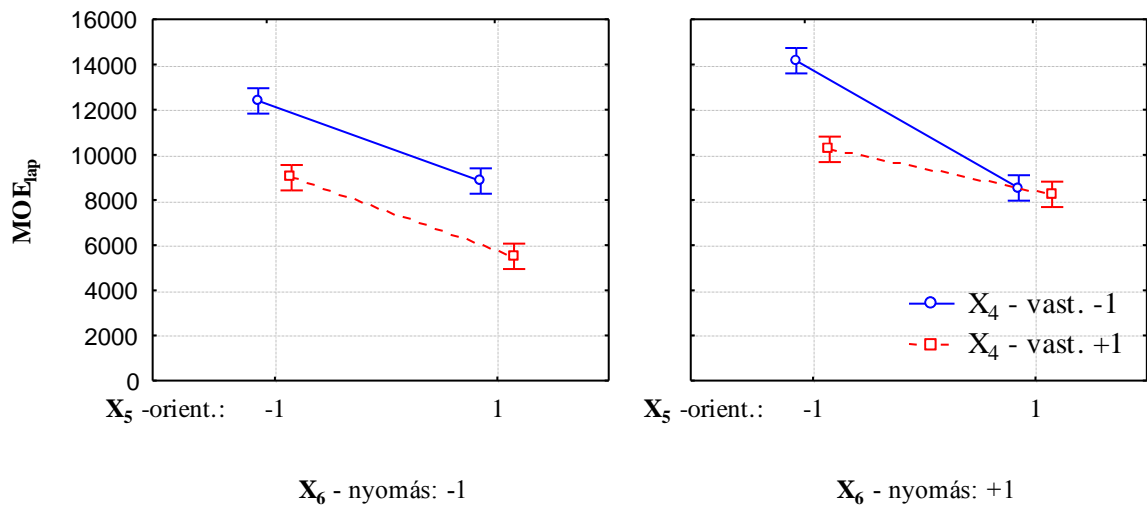
Ha valamely faktor válaszejelmezőre gyakorolt hatása függ egy másik faktor beállítási szintjétől, akkor azt grafikusan is kimutathatjuk. Azonban a választott frakcionált faktoriális kísérleti tervben a kétfaktoros kölcsönhatások egymással keverednek, így azok elkülönítése nem lehetséges. A független becslésekhez kiegészítő kísérleti tervek elvégzésére van szükség. A 7.14-15. ábrákon egyes, a modellben is szereplő lehetséges kétfaktoros kölcsönhatások megjelenítése látható. Például a 7.14a. ábra szerint a szálforgács-szélesség növekedésével a lapra merőleges rugalmassági modulus a bükk furnérból készült lapoknál csökken, míg a juharnál enyhén növekedik. A 7.1.b ábra alapján a lapvastagság növekedésével a rugalmasság erőteljesebben csökken, ha a szálforgácsok orientációja  $15^\circ$ , illetve a présnyomás növekedésekor a rugalmasság nagyobb mértékben növekedik, ha a hőmérséklet a felső szintre van beállítva (7.14c. ábra). A bemutatott kölcsönhatások egymással keverednek, így nem lehet eldönteni, hogy a három közül melyik a valós.



**7.14. ábra A fafaj-szálforgács-szélesség, lapvastagság-orientáció és nyomás-hőmérséklet lehetséges kölcsönhatások ábrázolása**

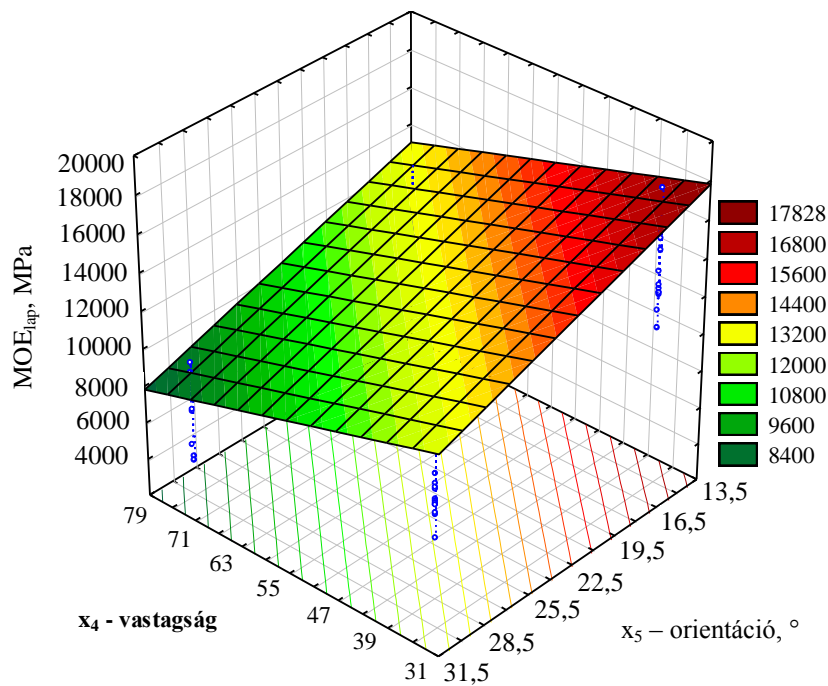
A fafaj minőségi jellegéből adódóan itt is csak a  $-1$  és  $+1$  beállítási szintek értelmezhetők, a szinteket összekötő vonal csupán a szemléltetést szolgálja.

Érdekes megfigyelni a vastagság, orientáció és nyomás között fellépő kölcsönhatásokat a 7.15. ábrán. Míg alacsony nyomáson a szálfurnérok elforgatási szögének növekedésekor a rugalmasság mind a 35 rétegű, mind a 75 rétegű lapoknál azonos mértékben csökken (a hatásvonalak közel párhuzamosak), addig a nyomás felső szintjén a vékonyabb lapok rugalmassági modulusa nagyobb mértékben csökken. A rugalmassági modulusok kölcsönhatás ábráit a 3-4. mellékletek tartalmazzák.



7.15. ábra A nyomás, orientáció és lapvastagság közötti fellépő lehetséges kölcsönhatás

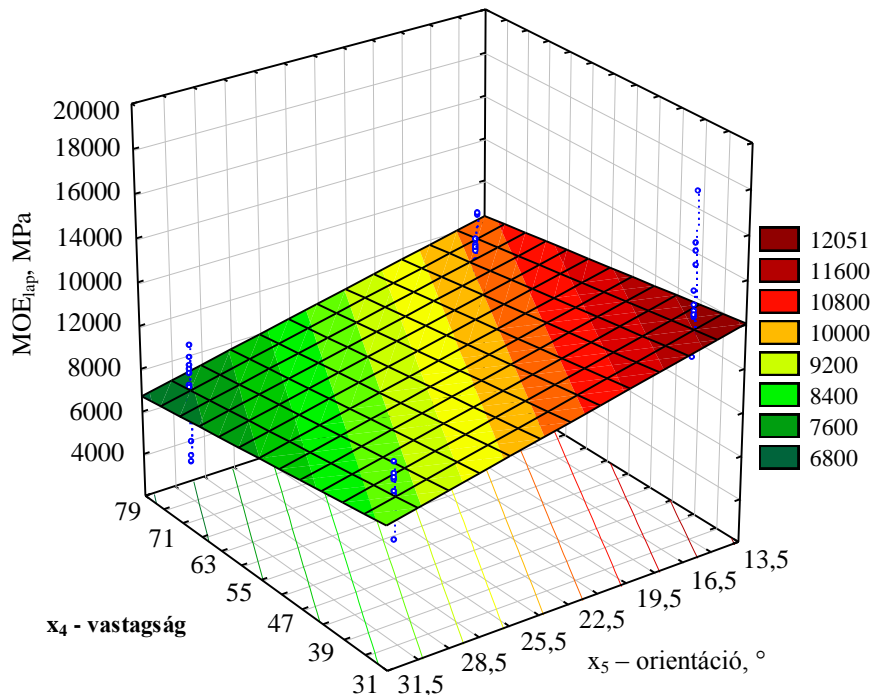
A válaszjellemzőt jelentősen befolyásoló faktorok és kölcsönhatások azonosítása után következik annak a beállítási tartománynak a meghatározása, amely a lehetséges legjobb eredményt adja. Ehhez nyújt segítséget a legkisebb négyzetek módszerével előállított válaszfelületek elemzése, amely nemcsak a jelenlegi kísérleti térben való optimumkeresést jelenti, hanem a téren kívüli optimum fele haladás irányának a kijelölését is (gradiens módszer). Az extrapolációt minden esetben kísérletekkel szükséges ellenőrizni. A választott kísérleti tervnél ábrázolási nehézséget jelent a faktorok háromnál magasabb száma, ezért egyszerre csupán két-két tényező működési tartománya jeleníthető meg, a többi tényezőt az általunk választott szinteken rögzítjük.



7.16. ábra A lapra merőleges rugalmassági modulus válaszfelülete a lapvastagság és orientáció változásának függvényében, bükk lapok esetében

A fafaj minőségi jellegéből következik, hogy a beállítási szintek közötti értékek folytonos felületként nem jeleníthetők meg. Ennek kiküszöbölése úgy lehetséges, hogy a fafajt, mint független változót, vagy a bükknek megfelelő -1, vagy a juharnak megfelelő +1 szinten rögzítjük.

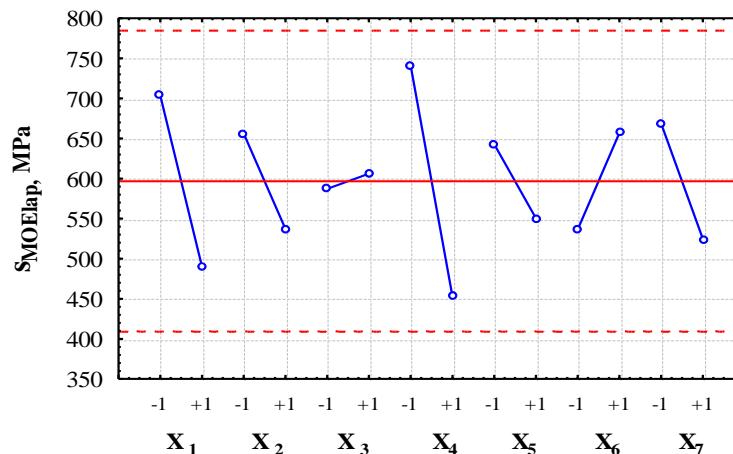
Ilyen válaszfelületet mutat a 7.16. ábra, ahol a bükkfurnérból készült kompozitok lapra merőleges hajlítórugalmassági modulusának változása látható, a két legnagyobb hatással rendelkező faktor változásának függvényében. A többi tényezőt a 7.9. táblázat szerinti optimális szinteken rögzítettem. Az illetett felület alapján kellő hajlítómerevséggel rendelkező lapok állíthatók elő, ha az orientáció  $20^\circ$  alatt van és a rétegek száma nem nagyobb mint 55. Hasonló tendencia tapasztalható a juharlapoknál is (7.17. ábra), de az optimális tartomány jóval alacsonyabb értékeket mutat. A többi tényező hatásának szintvonalas ábrái az 5. mellékletben láthatók.



7.17. ábra A lapra merőleges rugalmassági modulus válaszfelülete a lapvastagság és orientáció változásának függvényében, juhar lapok esetében

#### A faktorok hatása a szórásra:

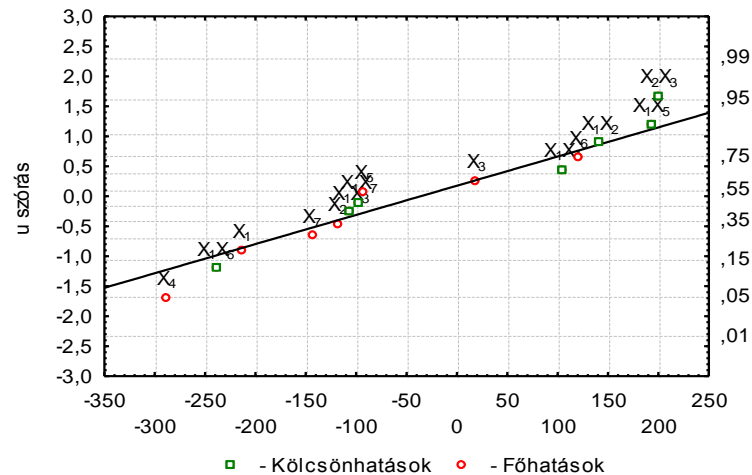
A robusztus tervezés során nem csak a minőségjellemzők optimalizálására törekszünk, hanem a környezeti hatásokkal szemben érzéketlen termék előállítására is. Ezért kiszámítottam a faktorok szórásra gyakorolt hatásait, majd elkészítettem azok hatásdiagramját (7.18. ábra).



7.18. ábra A faktorok szórásra gyakorolt hatásábrája

A diagram elemzése során arra a következtetésre jutunk, hogy az átlagos szóráshoz képest a faktoroknak a szórásra gyakorolt hatása elhanyagolható, a tényezők szintjeinek változtatása az ingadozást jelentős mértékben nem befolyásolja. Ugyanakkor ez azt is jelentheti, hogy a csoporton belüli ingadozás túl nagy, és „elfedi” a faktorok ingadoztató hatását.

A faktorok és kölcsönhatások szórásra gyakorolt hatásainak Gauss papíros ábrázolása is megerősíti a fenti megállapítást:



7.19. ábra A faktorok szórásra gyakorolt hatásának Gauss-papíros ábrázolása

Az átlagértékre felírt függvénykapcsolathoz hasonlóan, a szórásra is előállítható a regressziós modell:

$$\hat{\sigma}_{MOElap} = 596,5 - 106,9x_1 - 59,5x_2 + 9,5x_3 - 144,4x_4 - 46,2x_5 + 60,3x_6 - 72,1x_7 + 70,9x_1x_2 - 52,9x_1x_3 + 52,2x_1x_4 + 96,4x_1x_5 - 119,9x_1x_6 - 48,7x_1x_7 + 100x_2x_3 \quad [7.10.]$$

A szórás szerinti optimális faktorszint kombináció az átlagos szórást több mint 40%-kal csökkenti, de ez a beállítás – az  $x_3$ ,  $x_7$  faktorokat kivéve – ellentétes az átlagértékek optimális beállítási szintjeivel. Utóbbi esetben a szórás nemhogy csökkenne, de több mint duplájára nő ( $\hat{\sigma}_{MOElap} = 1367 \text{ MPa}$ ). Ezért ha robusztus termék előállítás a cél, akkor azt csak az átlagérték csökkenésének rovására tehetjük, vagy valamilyen kompromisszumos megoldást kell keresnünk.

### 7.3.2. Az élre merőleges rugalmassági modulus eredményeinek kiértékelése

A lapra merőleges hajlítórugalmassági modulusához hasonlóan először itt is a varianciák megegyezőségét vizsgáltam a Cochran és Levene próbákkal. Ez utóbbi próba alkalmazását az alacsony mintaszám indokolja.

a.) Cochran próba a varianciák homogenitására:

$$G_{MOE\ell} = \frac{s_{i\max}^2}{\sum_i s_i^2} = 0,2269 < G_{0,95}(2,16) = 0,3218 \quad [7.11.]$$

b.) Levene-próba a varianciák homogenitására:

$$W = \frac{(N-k)}{(k-1)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k N_i (\bar{Z}_i - \bar{Z}_{..})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2}, \quad W = 1,535 < F_{(0,05,15,32)} = 1,992 \quad [7.12.]$$

ahol:  $Z_{ij} = |y_{ij} - y_i|$ , a csoportátlagtól való eltérés abszolút értéke

$\bar{Z}_i$  - az abszolút eltérések csoport szerinti átlaga

$\bar{Z}$  - az eltérések teljes átlaga

$N_i$  az ismétlések,  $k$  a beállítások,  $N$  az összes adat száma

A kapott eredmények alapján az egyes kísérleti beállítások szórásának homogenitására vonatkozó nullhipotézisét, 95%-os megbízhatósági szinten ebben az esetben is elfogadhatjuk. Hasonlóképpen a szórások és átlagok függetlenségére utal a mellékletben elvégzett Box-Cox transzformáció. A diagramról leolvasható, hogy az átlagok és szórások között nincs korreláció, valamint a  $\chi^2$  próba is jelzi, hogy a transzformáció a reziduális szórásnégyzetet jelentősen nem csökkentette.

Mindezek után rátérhetünk a faktorok élre merőleges rugalmassági modulusra gyakorolt hatásainak vizsgálatára. A hatások és kölcsönhatások nagyságát és jelentőségét tartalmazó 7.11. táblázat és 7.20. ábra a lapra merőleges értékektől eltérő eredményeket mutat, vagyis élre merőlegesen az egyes tényezők befolyása megváltozott. A fafaj hatása itt kétszer nagyobb, a hosszoldás és hőmérséklet nem befolyásolja jelentősen az átlagértéket. A vastagság, orientáció, és nyomás becslt hatása jelentősen nem módosult, és tendenciájuk is hasonló, újabb kölcsönhatások bizonyultak jelentéktelennek, a jelentős kölcsönhatások hatása mérséklődött.

**7.11. táblázat A hatások és kölcsönhatások nagysága az élre merőleges rugalmassági modulusz esetén**

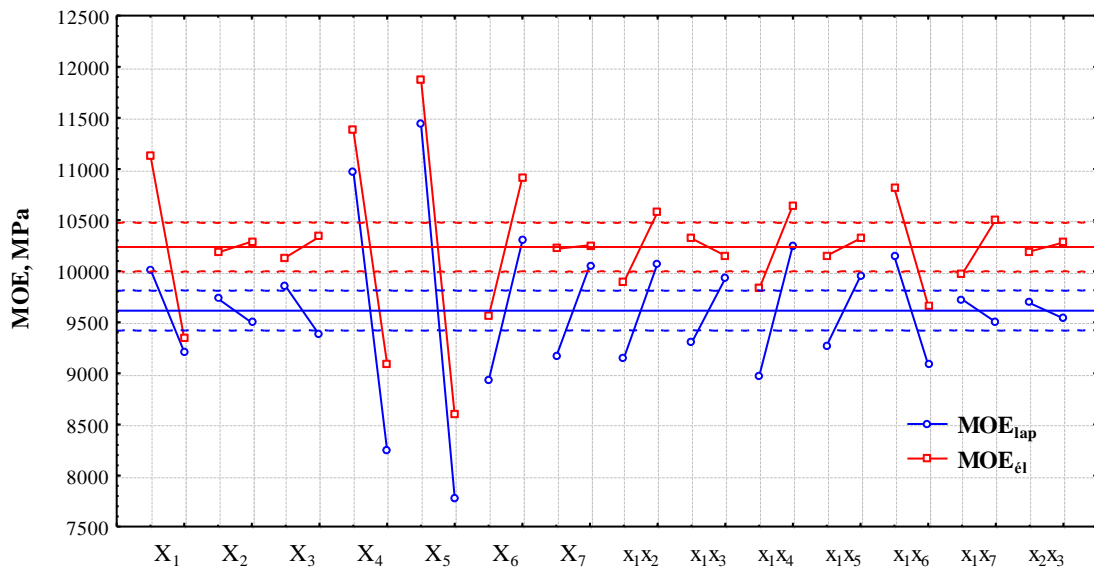
Faktor	Becsült hatás	Együttható (b)	Hiba	t érték	p	Optimális szint ( $x_i$ )	$b \cdot x_i$
átlag (teng.metsz.)	10236		118,5764	86,3238	0,000000		
<b><math>x_1</math> - fafaj</b>	<b>-1788</b>	<b>-894</b>	<b>118,5764</b>	<b>-7,5384</b>	<b>0,000000</b>	<b>-1</b>	<b>894</b>
$x_2$ - szálforg. szél.	106	53	118,5764	0,4465	0,658160	-1	-53
$x_3$ - hosszoldás	202	101	118,5764	0,8513	0,400759	+1	101
<b><math>x_4</math> - vastagság</b>	<b>-2287</b>	<b>-1144</b>	<b>118,5764</b>	<b>-9,6441</b>	<b>0,000000</b>	<b>-1</b>	<b>1144</b>
<b><math>x_5</math> - orientáció</b>	<b>-3291</b>	<b>-1646</b>	<b>118,5764</b>	<b>-13,8777</b>	<b>0,000000</b>	<b>-1</b>	<b>1646</b>
<b><math>x_6</math> - nyomás</b>	<b>1362</b>	<b>681</b>	<b>118,5764</b>	<b>5,7443</b>	<b>0,000002</b>	<b>+1</b>	<b>681</b>
$x_7$ - hőmérséklet	35	18	118,5764	0,1497	0,881937	-1	-18
<b><math>x_1x_2</math></b>	<b>684</b>	<b>342</b>	<b>118,5764</b>	<b>2,8858</b>	<b>0,006832</b>	<b>+1</b>	<b>342</b>
$x_1x_3$	-169	-85	118,5764	-0,7141	0,480206	-1	85
<b><math>x_1x_4</math></b>	<b>817</b>	<b>409</b>	<b>118,5764</b>	<b>3,4458</b>	<b>0,001571</b>	<b>+1</b>	<b>409</b>
$x_1x_5$	171	85	118,5764	0,7204	0,476373	+1	85
<b><math>x_1x_6</math></b>	<b>-1146</b>	<b>-573</b>	<b>118,5764</b>	<b>-4,8302</b>	<b>0,000030</b>	<b>-1</b>	<b>573</b>
<b><math>x_1x_7</math></b>	<b>537</b>	<b>268</b>	<b>118,5764</b>	<b>2,2637</b>	<b>0,030295</b>	<b>+1</b>	<b>268</b>
$x_2x_3$	90	45	118,5764	0,3815	0,705265	-1	-45
Becsült opt. érték, Mpa							<b>16347</b>
-95,% konfidencia int.							15413
+95,% konfidencia int.							17282

A faktorok és kölcsönhatások hatásának szignifikanciája alapján és a hierarchia szabályt is betartva, a regressziós modell a következő polinom:

$$\hat{y}_{MOE_a} = 10236 - 894x_1 + 53x_2 - 1144x_4 - 1646x_5 + 681x_6 + 18x_7 + 342x_1x_2 + 409x_1x_4 - 573x_1x_6 + 268x_1x_7 \quad [7.13.]$$

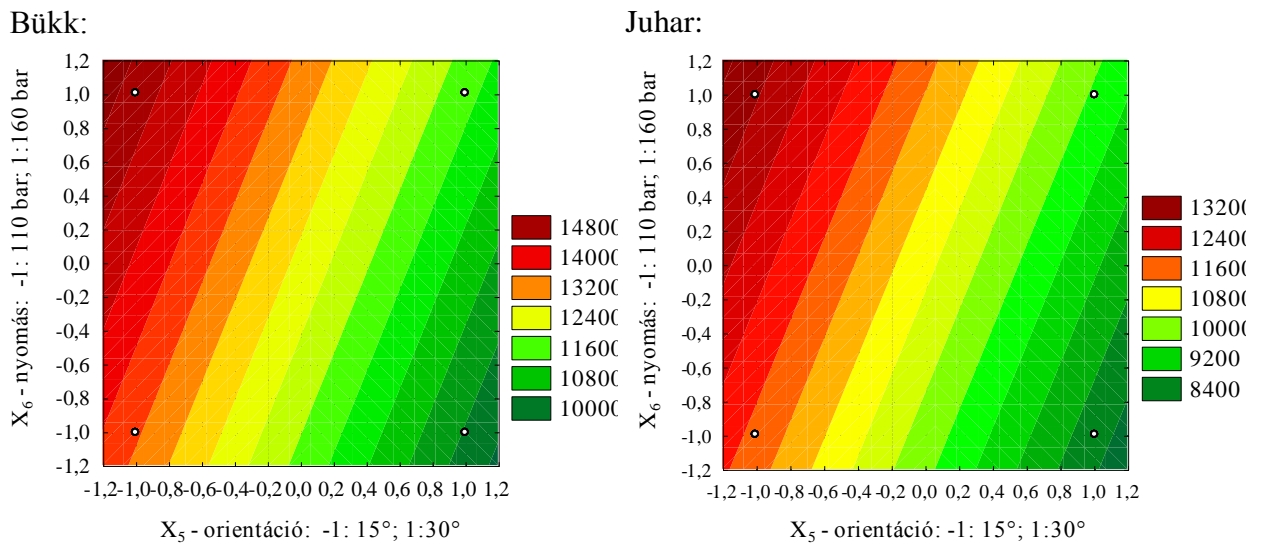
$$R^2 = 0,924; R^2_{adj} = 0,903$$

A modell jól illeszkedik a mért pontokra, és az optimális faktorkombináció a várható értéket több mint 60%-kal növeli. A redukált regressziós függvény, a 6 sz. mellékletben bemutatott F-próba alapján adekvátnak bizonyult.



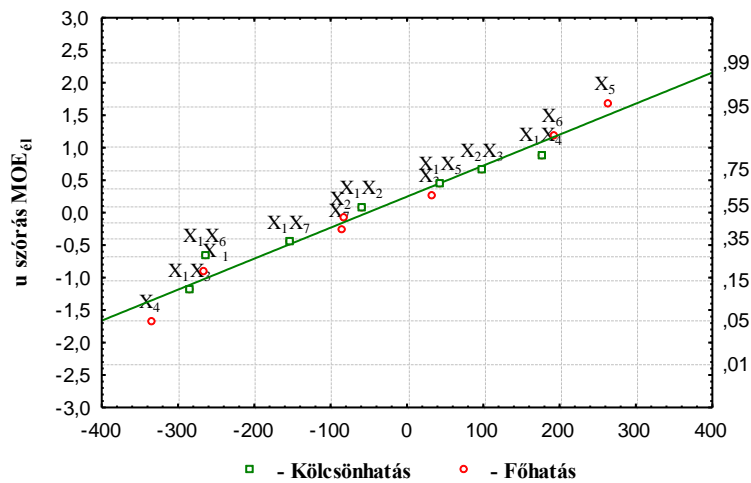
7.20. ábra A faktorok és kölcsönhatások rugalmassági modulusra gyakorolt hatásai

A fenti regressziós modell segítségével itt is elkészíthetők azok a válaszfelületek, amelyek az egyes faktorok változásának az élre merőleges rugalmassági modulusra gyakorolt hatását szemléltetik. Az orientáció és présnyomás szintvonalas ábráit láthatjuk a 7.21. diagramon. Az elméleti megfontolásoknak megfelelően a legmagasabb értékeket adó tartományok alacsony elfordulási szögnél és magas nyomáson találhatók. További szintvonalas ábrák találhatóak a 6. sz. mellékletben.



7.21. ábra Az élre merőleges rugalmassági modulus szintvonalas ábrái a lapvastagság és orientáció változásának függvényében

A faktorok szórásra gyakorolt hatásainak varianciaanalízise (7. melléklet) és a Gauss-papíros ábrázolás (7.22. ábra) itt sem mutat kiugró hatásokat, az irányultságok tekintetében viszont a fafaj és lapvastagság pozitívan, a nyomás és orientáció negatívan befolyásolja a szórás. A szálforgács-szélesség, hosszitoldás és hőmérséklet változása a lapok átlagértékének szórását csekély mértékben módosítja. Ha a maradék szórásnégyzettel összevonjuk az  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_7$ ,  $x_1x_2$ ,  $x_1x_5$ , és  $x_2x_3$  hatásokat, melyek mindegyikéhez  $p > 0,4$  valószínűség tartozik, akkor a modellben hagyott tagok véletlen előfordulásának  $p$  valószínűsége –  $x_1x_2$  kölcsönhatást leszámítva – 0,05 alá csökken. A varianciaanalízis összevonás előtti és utáni eredményét a 6. sz. melléklet tartalmazza.



7.22. ábra A faktorok szórásra gyakorolt hatásának Gauss-papíros ábrázolása

Az ingadozás várható értékének regressziós modellje az összevonás utáni szignifikáns hatások alapján:

$$\hat{\sigma}_{MOE} = 749,1 - 133,5x_1 - 166,9x_4 + 131,4x_5 + 96,9x_6 - 142,1x_1x_3 + 88x_1x_4 - 132,3x_1x_6 - 77,1x_1x_7 \quad [7.14.]$$

$$R^2 = 0,925; R^2_{adj} = 0,839$$

Az optimális faktorszint-kombináció ebben az esetben sem azonos az élre merőleges rugalmassági modulus növelését célzó szintkombinációval, tehát szórásnövekedés csak az átlagérték csökkenésével érhető el. Optimális beállításkor a szórás 60%-os csökkenése érhető el, ha a teljes modellt tekintjük, és 32% a redukált modell esetében. Ekkor az átlag becült értéke 10825 MPa.



#### 7.4. A hajlítószilárdságra kapott adatok kiértékelése

A kompozitok hárompontos hajlítása során kapott hajlítószilárdsági értékeket a 7.12. táblázat foglalja össze. Néhány kísérleti beállításra mind lapra, mind élre merőlegesen igen kedvező adatokat mértem, azonban lapra merőleges hajlításkor az 1, 12, 14 és 16 kísérleti beállításoknál jelentős szórás tapasztalható.

7.12. táblázat A hajlítószilárdságok összesítő táblázata

Beáll.	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	MOR <sub>lap</sub> , MPa			MOR <sub>él</sub> , MPa		
								$\bar{y}$	$s$	COV., %	$\bar{y}$	$s$	COV., %
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	111,1	20,8	18,7	118,8	0,9	0,7
2	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	85,2	2,5	2,9	86,7	7,1	8,2
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	98,9	5,4	5,4	98,6	5,7	5,7
4	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	117,8	9,7	8,3	114,5	5,5	4,8
5	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	133,3	3,1	2,3	131,7	8,5	6,5
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	75,1	5,0	6,7	81,4	5,1	6,3
7	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	94,6	2,9	3,1	99,0	2,2	2,2
8	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	101,2	8,7	8,6	99,8	4,8	4,8
9	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	37,5	2,6	7,1	86,4	3,9	4,5
10	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	44,9	6,5	14,4	84,8	8,6	10,1
11	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	36,5	4,0	11,0	101,4	7,4	7,3
12	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	37,2	6,0	16,1	67,0	5,7	8,5
13	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	13,2	0,6	4,7	43,6	3,2	7,3
14	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	58,9	16,2	27,4	76,3	0,7	0,9
15	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	49,0	3,4	6,9	81,7	3,9	4,8
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	57,2	13,8	24,1	73,2	3,1	4,3

A szórások kiugró értékei előrevetítik a varianciák inhomogenitását, a Cochran-, Bartlett-, és Levene próbák 95%-os konfidencia szinten ezt számszerűen is megerősítik:

$$G_{MOR_{lap}} = 0,3473 > G_{0,95(2,16)} = 0,3218$$

$$K^2_{MOR_{lap}} = 29,8923 > \chi^2_{0,05(15)} = 24,996$$

$$W = 4,377 > F_{0,05(15,32)} = 1,992$$

A varianciák stabilizálására a függő változó Box-Cox módszer (Box-Cox, 1964) szerinti transzformációja alkalmazható. Ekkor az  $y$  válaszjellemző olyan  $y^\lambda = y^\lambda$  transzformáltját keressük, amelynek varianciája konstans. A  $\lambda$  értékét a legnagyobb valószínűség (maximum likelihood) módszerével becsüljük:

$$y^\lambda = \frac{y^\lambda - 1}{\lambda y^{\lambda-1}}; \quad \text{ha } \lambda \neq 0$$

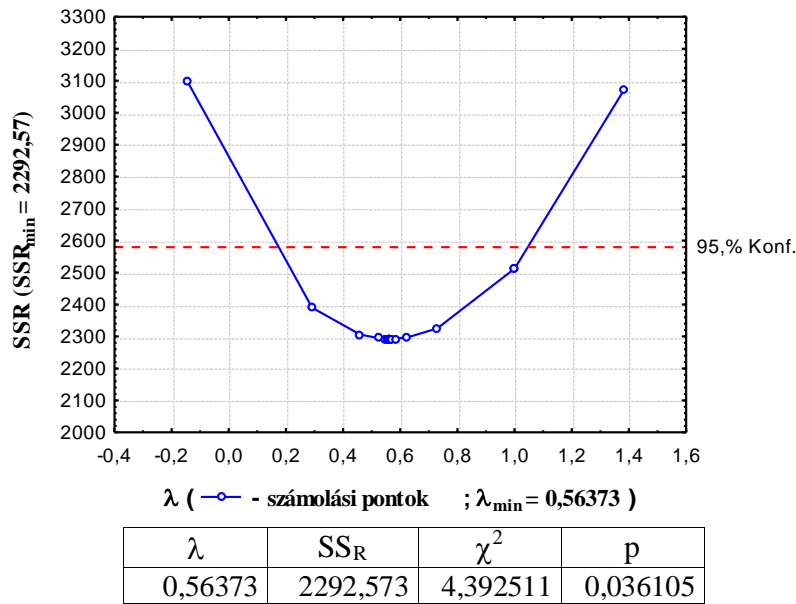
$$y^\lambda = \dot{y} \ln y; \quad \text{ha } \lambda = 0$$

[7.15.]

ahol  $\dot{y} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n y_i}$ , az  $y_i$  ( $i=1, \dots, n$ ) adatok geometriai átlaga.

A  $\lambda$  legnagyobb valószínűségű becslése az az érték, amelyre a modell reziduális négyzetösszege minimális. Ezt úgy kapjuk meg, hogy  $\lambda$  különböző értékeire kiszámítjuk az  $y^\lambda$  transzformáltjait, majd erre illesztjük a modellt, és kiszámítjuk a reziduális négyzetösszeget.

A minimumhoz tartozó  $\lambda$  lesz a keresett hatványkitevő. A módszert szemlélteti  $\lambda$ -nak a reziduális szórásnégyzet [SSR( $\lambda$ )] függvényében való ábrázolása:



7.23. ábra A reziduális négyzetösszeg változása  $\lambda$  függvényében ( $MOR_{lap}$ )

Az ábrán feltüntetett 95%-os konfidencia-intervallumot a következő képlettel számítjuk ki:

$$SSR_{\alpha} = SSR(\lambda) \left( 1 + \frac{F_{\alpha}}{\nu} \right) \tag{7.16.}$$

ahol  $\nu$  a reziduális négyzetösszeg modell szerinti szabadságfoka

$F_{\alpha}$  az F-eloszlás kritikus értéke, ha a számláló szabadságfoka 1, a nevezőé  $\nu$

A függő változó transzformációjának szükségességét a reziduális szórásnégyzet csökkenésének  $\chi^2$ -próbájával ellenőrizhetjük. A 0,5 körüli  $\lambda$  értékekre a megfelelő transzformáció a négyzetgyökvonás. A transzformált adatok varianciájának Cochran-próbája a szórásnégyzetek azonosságát jelzi, míg a Bartlett- és Levene-próbák szerint el kell utasítanunk a varianciák azonosságára vonatkozó nullhipotézist. Az utóbbi két próba arra utal, hogy a varianciák között továbbra is jelentős a különbség, de ez már nem a várható értékkel való korrelációnak tulajdonítható.

A transzformált értékek varianciaanalízise az  $x_2, x_4, x_5, x_6, x_7$  faktorok és  $x_1x_4, x_1x_7$  kölcsönhatások átlagra gyakorolt szignifikáns hatását mutatja, ami csupán az  $x_2, x_1x_2$  hatások szignifikanciájában tér el az eredeti értékek szórás elemzésétől. A jelentős faktorokra és kölcsönhatásokra illesztett regressziós modell a következő:

$$\hat{y}_{MOR_{lap}} = 72 + 0,22x_1 + 2,07x_2 - 30,16x_4 - 9,62x_5 + 5,65x_6 + 4,74x_7 + 4,08x_1x_2 + 7,54x_1x_4 - 3,18x_1x_7 \tag{7.17.}$$

$R^2 = 0,951 ; R^2_{Adj} = 0,94$

A szórás regressziós modellje:

$$\hat{\sigma}_{MOR_{lap}} = 6,95 + 1,59x_1 - 2,09x_5 - 0,76x_7 + 1,22x_1x_2 + 2,61x_1x_3 + 2,38x_1x_4 + 2,1x_1x_6 + 0,97x_1x_7 \tag{7.18}$$

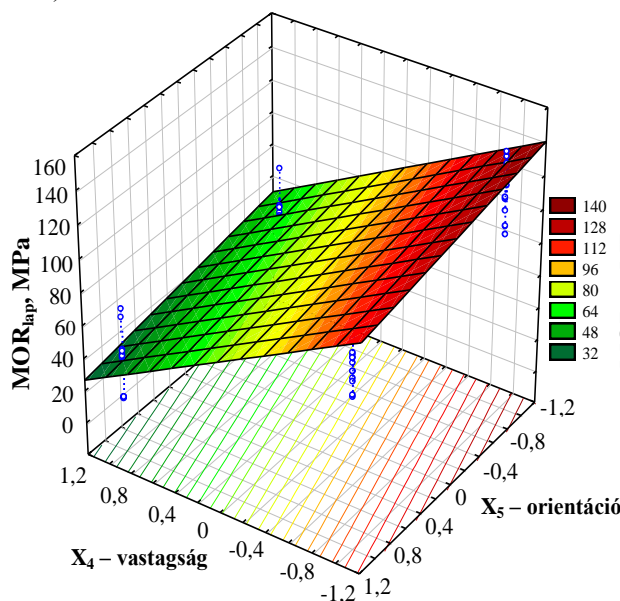
$R^2 = 0,907 ; R^2_{Adj} = 0,801$

7.13. táblázat A hatások és kölcsönhatások nagysága a lapra merőleges hajlítószilárdság esetén

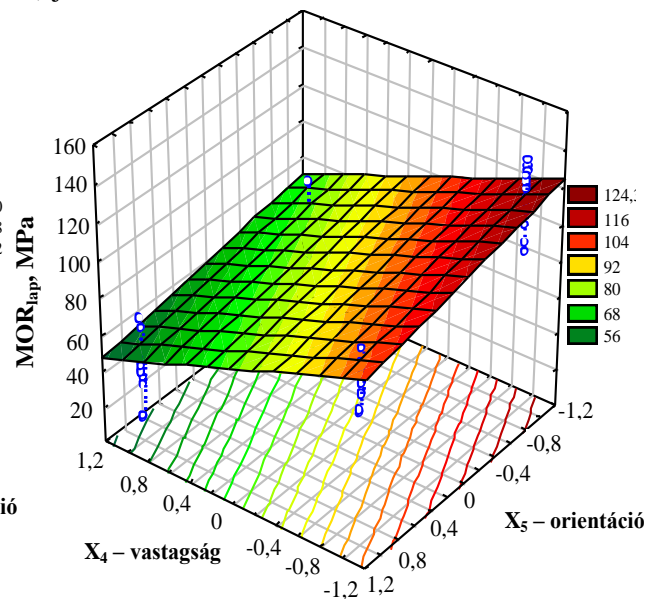
Faktor	Becsült hatás	Együttható (b)	Hiba	t érték	p	Optimális szint ( $x_i$ )	$b \cdot x_i$
átlag (teng.metsz.)	71,98	71,98	1,259				
$x_1$ - fafaj	0,44	0,22	1,259	0,175	0,8625	+1	0,22
$x_2$ - szálforg. szél.	4,14	2,07	1,259	1,645	0,1094	+1	2,07
$x_3$ – hosszoldás	1,67	0,84	1,259	0,663	0,5118	+1	0,84
$x_4$ – vastagság	<b>-60,32</b>	<b>-30,16</b>	<b>1,259</b>	<b>-23,949</b>	<b>0,0000</b>	<b>-1</b>	<b>30,16</b>
$x_5$ – orientáció	<b>-19,24</b>	<b>-9,62</b>	<b>1,259</b>	<b>-7,637</b>	<b>0,0000</b>	<b>-1</b>	<b>9,62</b>
$x_6$ - nyomás	<b>11,31</b>	<b>5,65</b>	<b>1,259</b>	<b>4,489</b>	<b>0,0001</b>	<b>+1</b>	<b>5,65</b>
$x_7$ - hőmérséklet	<b>9,48</b>	<b>4,74</b>	<b>1,259</b>	<b>3,766</b>	<b>0,0007</b>	<b>+1</b>	<b>4,74</b>
$x_1x_2$	<b>8,17</b>	<b>4,08</b>	<b>1,259</b>	<b>3,242</b>	<b>0,0027</b>	<b>+1</b>	<b>4,08</b>
$x_1x_3$	0,19	0,10	1,259	0,076	0,9401	+1	0,10
$x_1x_4$	<b>15,08</b>	<b>7,54</b>	<b>1,259</b>	<b>5,987</b>	<b>0,0000</b>	<b>-1</b>	<b>-7,54</b>
$x_1x_5$	2,21	1,10	1,259	0,876	0,3874	-1	-1,10
$x_1x_6$	3,86	1,93	1,259	1,531	0,1354	+1	1,93
$x_1x_7$	<b>-6,37</b>	<b>-3,18</b>	<b>1,259</b>	<b>-2,528</b>	<b>0,0164</b>	<b>+1</b>	<b>-3,18</b>
$x_2x_3$	1,23	0,62	1,259	0,490	0,6276	+1	0,62
Becsült opt. érték, Mpa							120,18
-95,% konfidencia int.							110,25
+95,% konfidencia int.							130,10

Lapra merőleges hajlításkor, a szilárdságot legnagyobb mértékben a vastagság és a szálfurnérok elfordulási szöge befolyásolja (7.13. táblázat), azonban a két faktor hatása fafajfüggő. Bükk kompozitoknál a lapvastagság növekedése a lapra merőleges hajlítószilárdság meredek csökkenését okozza, az orientáció hatása mérsékelt (7.24a. ábra). Juharfünréből készült lapok esetében a vastagság szilárdságra gyakorolt befolyása jóval kisebb, az orientáció hatása hasonló (7.24b. ábra). Az optimális faktorkombináció az átlagos hajlítószilárdságot 60%-kal növeli. Ezt a beállítást a kísérleti terv nem tartalmazza, a hozzá legközelebb álló 4. beállítás (7.13. táblázat) csupán az  $x_3$  szintjében tér el, és a mért, illetve becült értékek is hasonlóak.

a.) bükk



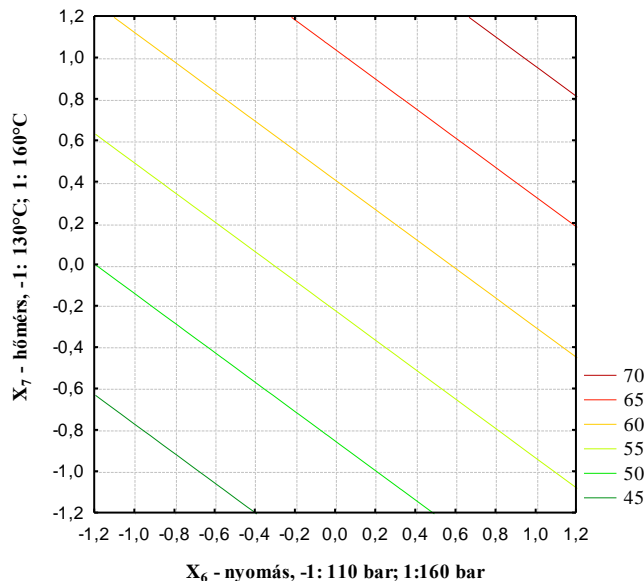
b.) juhar



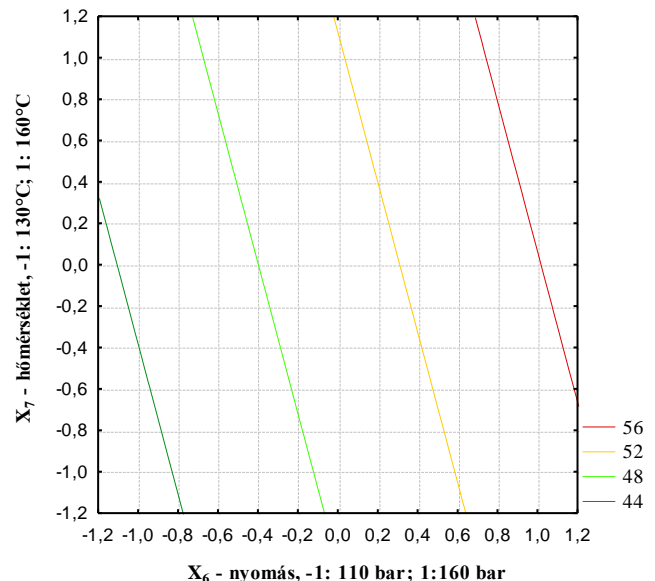
7.24. ábra A lapra merőleges hajlítószilárdság válaszfelületei a lapvastagság és orientáció változásának függvényében

A nyomás és hőmérséklet hajlítószilárdságra gyakorolt hatását szintvonalas ábrákkal elemezve azt látjuk, hogy bükk lapoknál (7.25a. ábra) a két faktor befolyása közel azonos (a szintvonalakra húzott merőleges meredeksége körülbelül 1), juhar lapoknál (7.25b. ábra) a nyomás hatása jóval erőteljesebb.

a.) bükk



b.) juhar



**7.25. ábra** A lapra merőleges hajlítószilárdság szintvonalas ábrái a nyomás és hőmérséklet változásának függvényében

A hatások és kölcsönhatások élre merőleges hajlítószilárdságra gyakorolt hatásait, azok szignifikanciáját, a becslés hibáját, valamint a legoptimálisabb eredményt adó faktorszint-kombinációt tartalmazza a 7.14. táblázat.

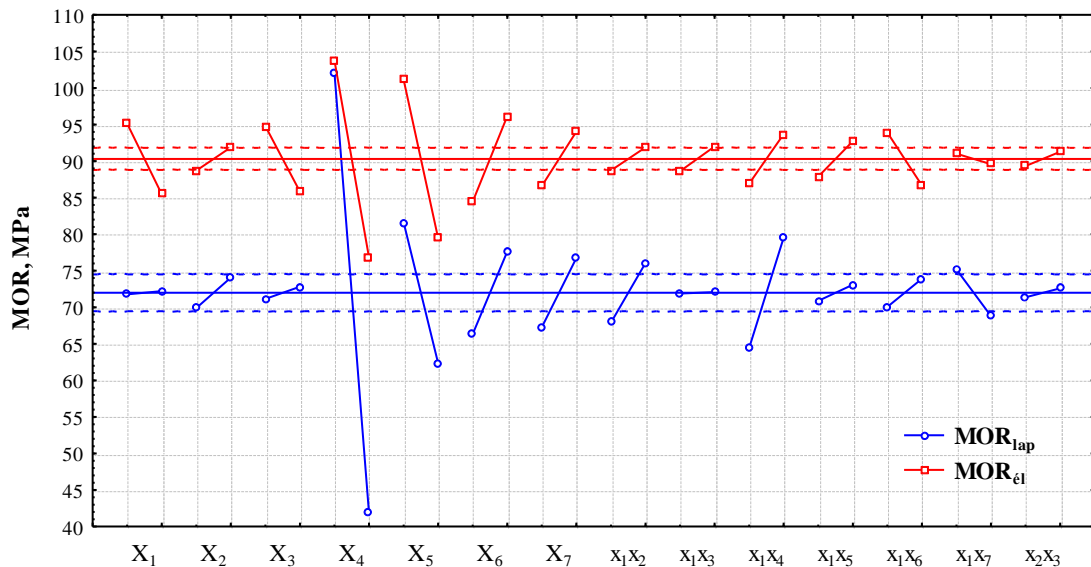
**7.14. táblázat** A hatások és kölcsönhatások nagysága az élre merőleges hajlítószilárdság esetén

Faktor	Becsült hatás	Együttható (b)	Hiba	t érték	p	Optimális szint ( $x_i$ )	$b \cdot x_i$
átlag (teng. metsz.)	90,30	90,30	0,758				
$x_1$ - fafaj	-9,69	-4,84	0,758	-6,392	0,0000	-1	4,84
$x_2$ - szálforg. szél.	3,19	1,59	0,758	2,104	0,0430	+1	1,59
$x_3$ – hosszoldás	-8,97	-4,48	0,758	-5,917	0,0000	-1	4,48
$x_4$ – vastagság	-26,99	-13,50	0,758	-17,810	0,0000	-1	13,50
$x_5$ – orientáció	-21,64	-10,82	0,758	-14,278	0,0000	-1	10,82
$x_6$ - nyomás	11,69	5,85	0,758	7,714	0,0000	+1	5,85
$x_7$ - hőmérséklet	7,45	3,73	0,758	4,916	0,0000	+1	3,73
$x_1x_2$	3,16	1,58	0,758	2,087	0,0447	-1	-1,58
$x_1x_3$	3,38	1,69	0,758	2,229	0,0327	+1	1,69
$x_1x_4$	6,75	3,37	0,758	4,451	0,0001	+1	3,37
$x_1x_5$	4,86	2,43	0,758	3,208	0,0030	+1	2,43
$x_1x_6$	-7,25	-3,62	0,758	-4,780	0,0000	-1	3,62
$x_1x_7$	-1,43	-0,71	0,758	-0,942	0,3528	-1	0,71
$x_2x_3$	1,96	0,98	0,758	1,296	0,2039	-1	-0,98
Becsült opt. érték, Mpa							144,65
-95,% konfidencia int.							139,01
+95,% konfidencia int.							150,28

Az átlag hibájához képest mind a hét faktor, illetve az  $x_1x_7$ ,  $x_2x_3$  interakciókat leszámítva minden kölcsönhatás szignifikáns (7.26. ábra). Élre merőlegesen az átlagérték jelentősen

nagyobb, ami azzal magyarázható, hogy lapra merőleges hajlításkor a terhelés iránya a 15-30 fokkal elforgatott rostok hossztengetyére merőleges, míg élre merőleges hajlításkor a szálfurnérok orientációja miatt a terhelésnek rostokkal párhuzamos nyomásösszetevője is megjelenik. Mindez a kompozit ortotróp jellegére utal. A hatásokat a lapra merőleges hajlítással összehasonlítva megállapítható, hogy a vastagság hatása több mint felére csökken, az orientáció, nyomás és hőmérséklet közel azonos befolyással bír. Jelentős hatásként megjelent a fafaj és a hosszoldás is, a hatások iránya változatlan. Optimális faktorszint-kombináció esetén a hajlítószilárdság elérheti a 144 Mpa-t is, ez magasabb, mint a tömör bükk rostra merőleges átlagos hajlítószilárdsága.

A varianciák mellékletben elvégzett homogenitásvizsgálatai a szórásnégyzetek egyezésére



7.26. ábra A faktorok és kölcsönhatások hajlítószilárdságra gyakorolt hatásai

utalnak, így nincs szükség az adatok transzformációjára. A hatások és kölcsönhatások szignifikanciája alapján a kísérleti pontokra a következő regressziós modell illeszthető:

$$\hat{y}_{MOR_d} = 90,3 - 4,84x_1 + 1,6x_2 - 4,48x_3 - 13,5x_4 - 10,82x_5 + 5,85x_6 + 3,73x_7 + 1,58x_1x_2 + 1,69x_1x_3 + 3,37x_1x_4 + 2,43x_1x_5 - 3,62x_1x_6 \quad [7.19.]$$

$$R^2 = 0,955 ; R^2_{Adj} = 0,939$$

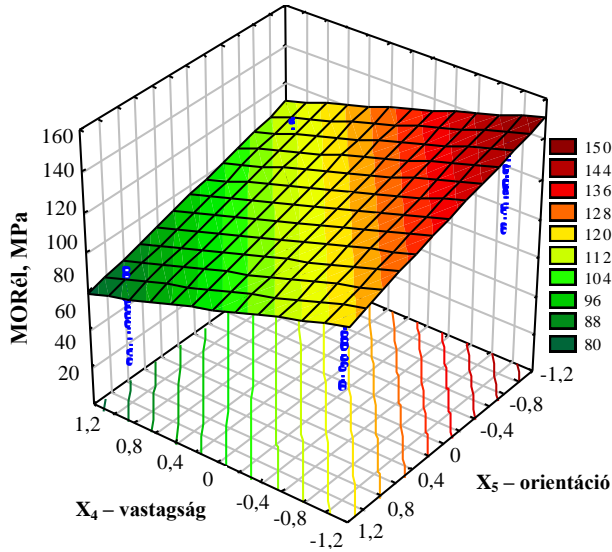
A három replikációból számolt szórások elemzése egyetlen jelentős faktorhatást sem jelez, hasonlóan a lapra merőleges hajlítószilárdsági értékekhez a szórás hatások szinte teljesen ellentétesek az átlaghatásokkal. Ezért robusztus termék előállítása az átlagérték csökkentése árán lehetséges. A szórásokra illesztett regressziós modell:

$$\hat{\sigma}_{MOR_d} = 4,77 + 0,31x_1 + 0,02x_2 - 0,82x_3 - 0,2x_4 - 0,27x_5 + 0,04x_6 + 0,76x_7 - 0,32x_1x_2 - 0,81x_1x_3 - 35x_1x_4 + 0,45x_1x_5 - 1,02x_1x_6 - 0,27x_1x_7 + 0,45x_2x_3 \quad [7.20.]$$

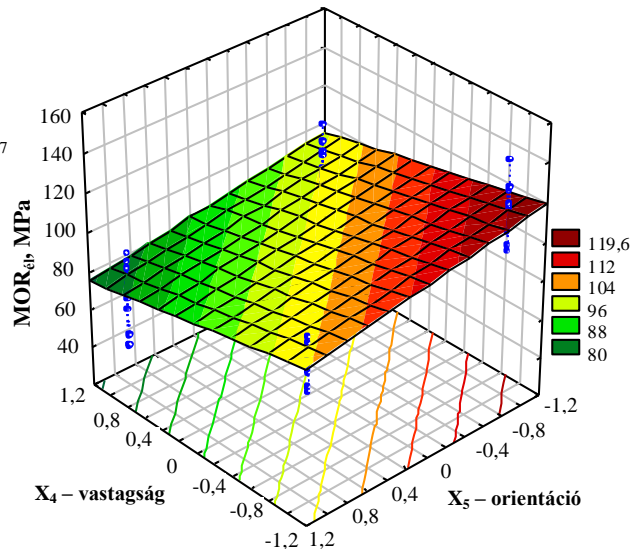
$$R^2 = 0,702$$

Az optimális faktorszint-kombináció kiválasztásakor, a két legnagyobb hatással rendelkező faktor, élre merőleges hajlításra gyakorolt hatását megvizsgálva (7.27. ábra) megállapítható, hogy a válaszfelületek meredeksége itt is fafajfüggő, az eltérés azonban kisebb. A szálfurnérok 20°-nál kisebb elforgatása, és a vastagság 50 rétegszám alatti értékeinél a becsült hajlítószilárdság bükkből készült lapoknál meghaladja 125 Mpa-t, juharnál a 110 Mpa-t.

a.) bükk



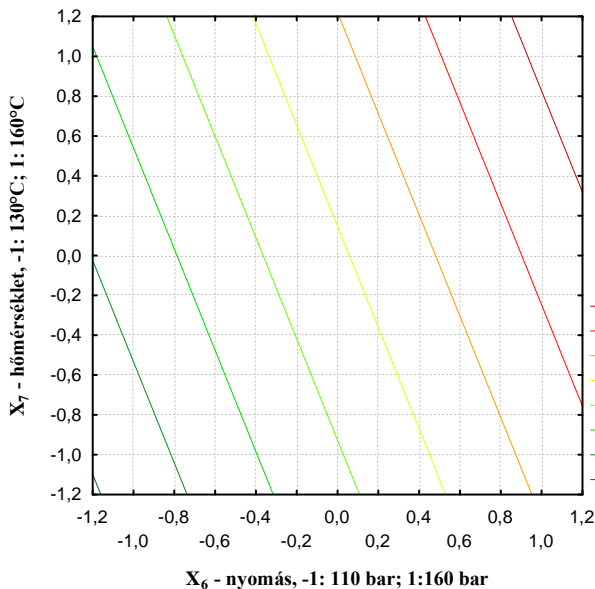
b.) juhar



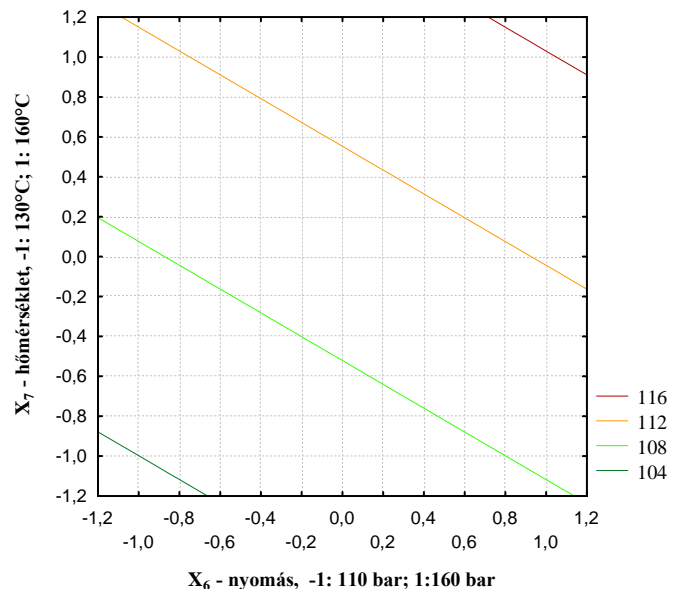
7.27. ábra Az élre merőleges hajlítószilárdság válaszfelületei a lapvastagság és orientáció változásának függvényében

A nyomás és hőmérséklet hatásának vizsgálata (7.28. ábra) bükk kompozitoknál hasonló tendenciákat mutat, mint lapra merőleges hajlításkor, juhar lapoknál a nyomás hatása mérsékeltebb. Utóbbi esetben a két faktor választott variációs intervallumán belüli változtatása a hajlítószilárdságot csak kis mértékben befolyásolja.

a.) bükk



b.) juhar



7.28. ábra Az élre merőleges hajlítószilárdság szintvonalas ábrái nyomás és hőmérséklet változásának függvényében

Mind a lapra, mind az élre merőleges hajlítószilárdság redukált regressziós egyenletei megfelelően írják le a kísérleti terv pontjaihoz tartozó mérési adatokat, a modellek adekvátak:

$$F_{0_{MORlap}} = 0,665 < F_{0,05(6,16)} = 2,74; \quad F_{0_{MORél}} = 0,901 < F_{0,05(3,16)} = 3,24$$

Hasonló megállapítások tehetők a maradékok elemzése során is (7 sz. melléklet):

- a kísérletek elvégzésének sorrendjében ábrázolt maradékok véletlen szórást mutatnak
- a mérési adatok függvényében ábrázolt standardizált maradékok lapra merőlegesen enyhe növekedést mutatnak, ezt a Box-Cox transzformációval korrigáltuk, élre merőlegesen nem mutatnak eltolódást
- a maradékok Gauss-papíros ábrázolása azok normális eloszlására utal, élre merőlegesen a maradékok szórása kisebb

### 7.5. A vastagsági dagadás mérési eredményeinek kiértékelése

A szerkezeti célú termékek egy másik fontos tulajdonsága a nedvesség hatására bekövetkező vastagsági dagadás. Nedves környezetben a kompozitot felépítő furnérszalak fafajtól függően kisebb-nagyobb méretváltozást szenvednek, ami a zsugorodás-dagadás anizotrópiája miatt a rétegek közötti feszültségek megjelenéséhez vezet. Ha ezek a feszültségek jelentősek, akkor a lapok mechanikai tulajdonságai negatív módon változnak, szélsőséges esetben rétegelválások jelennek meg. A víznek a rétegek közé történő beszivárgását, a ragasztóanyag helyes megválasztásával, a felületek nedvesség elleni védelmével, az illesztési és hosszoldási hézagok minimalizálásával akadályozhatjuk meg. A dagadást továbbá olyan tényezők is befolyásolják, mint az összenyomódás mértéke, az alkotóelemek plaszticitása, a présnyomás, a visszarugózás, ezért a préselés során különös gondot kell fordítani a technológiai paraméterek megfelelő beállítására. Ebben az alfejezetben a kiválasztott faktorok vastagsági dagadásra gyakorolt hatását vizsgáltam.

A 75 rétegű laptípusoknál a hajlítási tulajdonságok elemzéséhez szükséges 2x5 elemű minták – a négyzetes keresztmetszet biztosítása miatt – a teljes lapot lefoglalták, ezért ezeknél a kompozitféleségeknél a vastagsági dagadás és a nyírási tulajdonságok vizsgálatára nem volt lehetőség. Így az említett jellemzőket csupán a 35 rétegű lapoknál tudtam vizsgálni. Ekkor a kísérleti tervből kimarad az  $x_4$  faktor, és az eredeti keveredési rendszer megváltozik.

Az eredeti terv  $x_5$ ,  $x_6$ ,  $x_7$  faktorainak beállítási értékeit figyelembe véve, a generáló összefüggések a következőképpen módosulnak:

$$x_5 = -x_1x_2; \quad x_6 = -x_1x_3; \quad x_7 = -x_2x_3; \quad (7.15. \text{ táblázat})$$

Az összefoglaló meghatározó kontraszt az alábbiak szerint változik:

$$1 = -x_1x_2x_5 = -x_1x_3x_6 = -x_2x_3x_7 = -x_5x_6x_7 = x_2x_3x_5x_6 = x_1x_3x_5x_7 = x_1x_2x_6x_7$$

A fenti generáló összefüggés alapján a főhatások két-, három-, négy- és ötfaktoros kölcsönhatásokkal, a maradék elsőrendű kölcsönhatások pedig egymással, valamint három- és hatfaktoros kölcsönhatásokkal keverednek:

$$x_1 = -x_2x_5 = -x_3x_6 = x_3x_5x_7 = x_2x_6x_7 = -x_1x_2x_3x_7 = -x_1x_5x_6x_7 = x_1x_2x_3x_5x_6$$

$$x_2 = -x_1x_5 = -x_3x_7 = x_3x_5x_6 = x_1x_6x_7 = -x_1x_2x_3x_6 = -x_2x_5x_6x_7 = x_1x_2x_3x_5x_7$$

$$x_3 = -x_1x_6 = -x_2x_7 = x_2x_5x_6 = x_1x_5x_7 = -x_1x_2x_3x_5 = -x_3x_5x_6x_7 = x_1x_2x_3x_6x_7$$

$$x_5 = -x_1x_2 = -x_6x_7 = x_2x_3x_6 = x_1x_3x_7 = -x_1x_3x_5x_6 = -x_2x_3x_5x_7 = x_1x_2x_5x_6x_7$$

$$x_6 = -x_1x_3 = -x_5x_7 = x_2x_3x_5 = x_1x_2x_7 = -x_1x_2x_5x_6 = -x_2x_3x_6x_7 = x_1x_3x_5x_6x_7$$

$$x_7 = -x_2x_3 = -x_5x_6 = x_1x_3x_5 = x_1x_2x_6 = -x_1x_2x_5x_7 = -x_1x_3x_6x_7 = x_2x_3x_5x_6x_7$$

$$-x_1x_7 = -x_3x_5 = -x_2x_6 = x_2x_5x_7 = x_3x_6x_7 = x_1x_2x_3 = x_1x_5x_6 = -x_1x_2x_3x_5x_6x_7$$

Továbbra is eltekintve a három- és annál többfaktoros kölcsönhatásoktól, a regressziós modell paramétereinek becsléséhez érvényes keveredési rendszer:

$$\begin{aligned} b_1 &\rightarrow \beta_1 - \beta_{25} - \beta_{36}; \\ b_2 &\rightarrow \beta_2 - \beta_{15} - \beta_{37}; \\ b_3 &\rightarrow \beta_3 - \beta_{16} - \beta_{27}; \\ b_5 &\rightarrow \beta_5 - \beta_{12} - \beta_{67}; \\ b_6 &\rightarrow \beta_6 - \beta_{13} - \beta_{57}; \\ b_7 &\rightarrow \beta_7 - \beta_{23} + \beta_{56}; \\ b_{17} &\rightarrow \beta_{17} + \beta_{35} + \beta_{26}; \end{aligned}$$

Ennek a tervnek csupán harmadrendű a feloldóképessége, a főhatások kétfaktoros kölcsönhatásokkal keverednek. Így ha léteznek jelentős kölcsönhatások, akkor a faktorok jelentőségére vonatkozóan téves következtetéseket vonhatunk le. Csak a főhatásokat tartalmazó, az egyszerűsített keveredési rendszerre felírt matematikai modell alakja következő elsőfokú polinom:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_7x_7 \quad [7.21.]$$

A kompozitok vastagsági dagadása az MSZ EN 317 szerinti 24 órás áztatás után került meghatározásra, laponként öt próbatesten. A vastagsági dagadást a kezdeti vastagsághoz viszonyított, beáztatás előtti és utáni méretkülönbség jelenti, százalékban kifejezve:

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100, \quad [7.22.]$$

Ahol:  $G_t$  – vastagsági dagadás [%]

$t_1$  – a próbatest áztatás előtti vastagsága [mm]

$t_2$  – a próbatest áztatás utáni vastagsága [mm]

A mintaátlagokat, a szórásokat és a variációs együtthatókat a 7.15. táblázat tartalmazza. Leszámítva a 7. kísérleti beállítást, a nedves környezetben alkalmazható, nagy igénybevételre alkalmas OSB teherhordó lapok (OSB/4) MSZ EN 317 szabvány által előírt 12%-os határértéke teljesül, azonban az egyes beállítások adatainak nagy szórása csökkentheti a megbízhatóságot. A vastagsági dagadás  $x_1$  faktor szerint két jól elkülöníthető csoportra osztható, előrevetítve a fafaj jelentőségét.

**7.15. táblázat**  $2^{6-3}_{III}$  típusú kétszintes faktoriális kísérleti terv mátrixa és a kapott eredmények

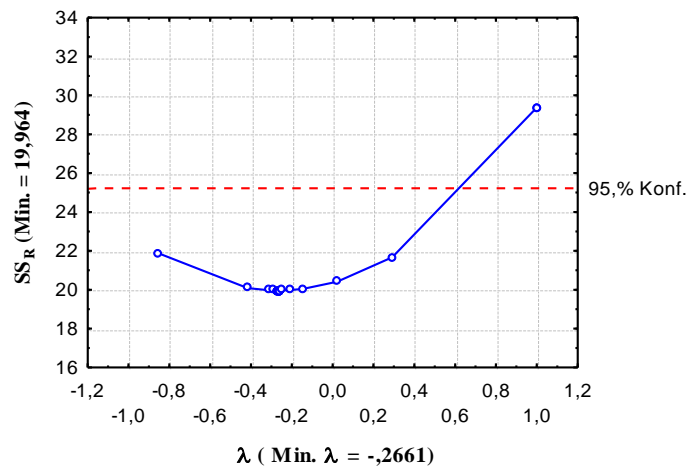
Beáll.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2=-x_5$	$x_1x_3=-x_6$	$x_2x_3=-x_7$	$x_1x_2x_3$	Vastagsági dagadás, $G_t$ %		
									$\bar{y}$	$s$	COV., %
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	10,37	1,39	13,4
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	7,09	0,58	8,2
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	11,13	1,71	15,3
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	6,98	0,49	7,0
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	11,23	0,50	4,4
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	6,02	1,02	16,9
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	12,79	2,81	22,0
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	7,05	0,21	2,9



A varianciák homogenitásvizsgálata a függő változó transzformációjának szükségességét jelzi. A kiszámított  $\lambda$  alapján (7.29. ábra) a mért értékek négyzetgyökének inverzével kell számolni. A transzformációt a maradékok elemzése is megerősíti, hiszen a mért értékek függvényében való ábrázoláskor láthatóvá válik a szórás átlagtól való függése.

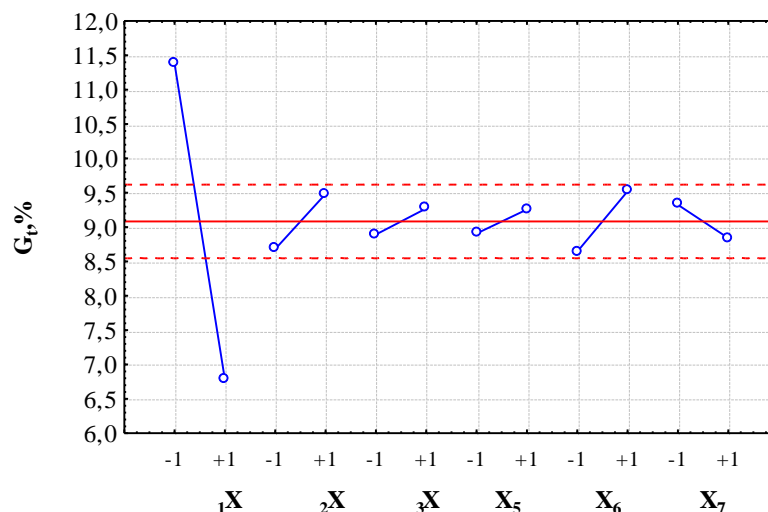
A transzformált értékek varianciaanalízise (11. melléklet) csupán a fafaj hatásának jelentőségét mutatja ki, a nyomás hatása 5%-nál kissé magasabb szinten mutatkozik szignifikánsnak. Hasonló eredményeket kapunk a transzformálatlan adatokra is, tehát a varianciák homogenitásának feltételét kielégítő transzformáció a hatásokat nem befolyásolja. A hatások Gauss-papíros ábrázolása is (11. melléklet) a fafaj vastagsági dagadásra gyakorolt szignifikáns befolyását igazolja. Ha a három replikációt blokkokként kezeljük, és úgy végzünk szórásnégyzet elemzést, azt látjuk, hogy az ismétlések között nincs jelentős különbség. Ha a maradék szórásnégyzetbe vonjuk a  $p > 0,25$  hatásokat, továbbra is csak a fafaj szignifikáns.

$\lambda$	SS <sub>E</sub>	$\chi^2$	p
-0,266124	19,964	9,2679	0,00233



7.29. ábra A reziduális négyzetösszeg változása  $\lambda$  függvényében

A faktorok hatásainak ábrázolása az átlag plusz/mínusz kétszeres hibájához viszonyítva a fafaj erőteljes hatását mutatja, a présnyomás a szignifikanciahatáron található:



7.30. ábra A faktorok hatása a vastagsági dagadásra

A faktorok hatásának teljes regressziós modellje:

$$\hat{y}_G = 9,08 - 2,3x_1 + 0,4x_2 + 0,19x_3 + 0,18x_5 + 0,44x_6 - 0,24x_7 \quad [7.23.]$$

$$R^2 = 0,825 ; R^2_{\text{adj}} = 0,763$$

Redukált modell, a  $p < 0,25$  alatti hatásokkal:

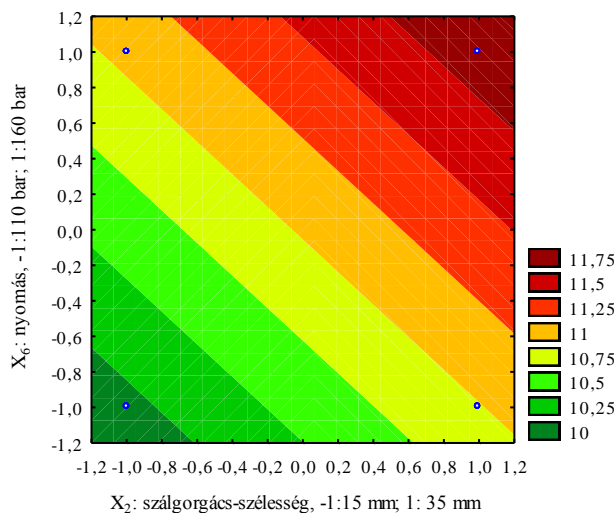
$$\hat{y}_G = 9,08 - 2,3x_1 + 0,4x_2 + 0,44x_6 \quad [7.24.]$$

$$R^2 = 0,807 ; R^2_{\text{adj}} = 0,778$$

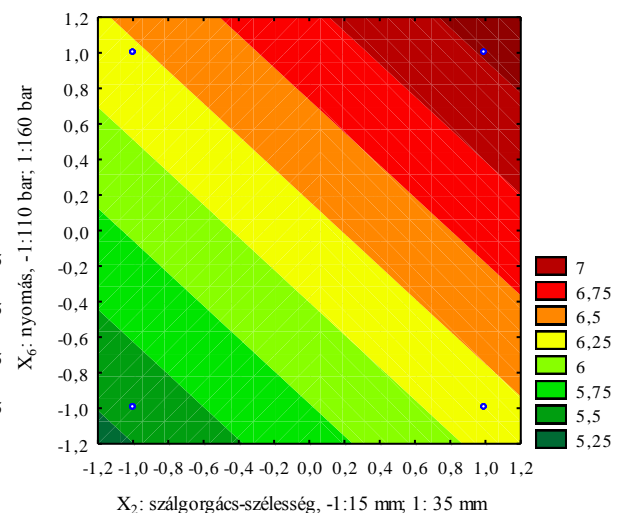
A mért és az utóbbi modellel becsült értékek alapján végzett adekvátság-vizsgálat (11. melléklet) a lineáris összefüggést elégségesnek mutatja, nincs szükség a faktorok magasabb rendű hatásainak bevonására. A mellékletben található maradékok elemzése a variancia- és regresszióelemzés feltételeinek teljesülését bizonyítja.

A faktorok optimális beállítási szintjeinek kiválasztásakor a vastagsági dagadás mértéke bükk lapoknál 9,93%-ra, juharnál 5,34%-ra csökken. Megvizsgálva a fafajon kívüli két legnagyobb hatással rendelkező faktor, a nyomás és szálforgács-szélesség szintvonalas ábráit (7.31. ábra), láthatjuk, hogy a faktorok értékének csökkentése a dagadás egyenletes csökkenését okozza mind a bükk, mind a juhar kompozitoknál. A két faktor hasonló mértékű hatását a szintvonalak közel -45 fokos meredeksége jelzi.

a.) Bükk



b.) Juhar



**7.31. ábra A vastagsági dagadás szintvonalas ábrái a nyomás és szálforgács-szélesség változásának függvényében**

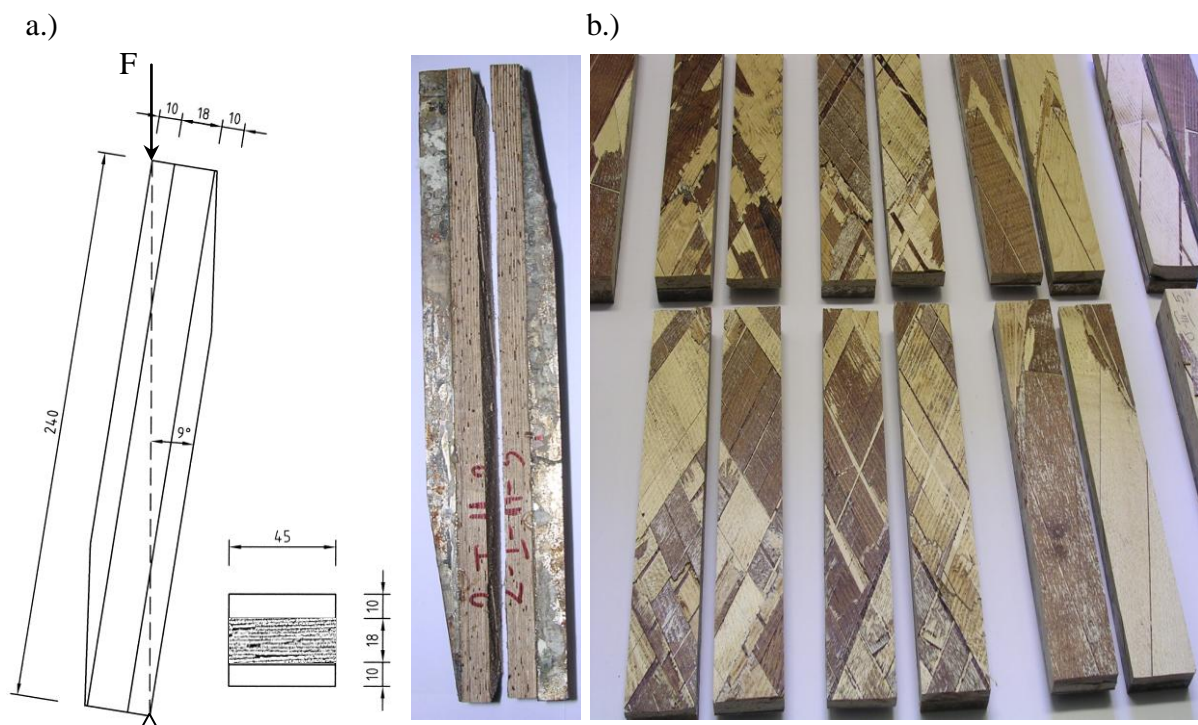
A szálforgács-szélesség hatásának trendjét mérlegelve ellentmondásosnak tűnik, hogy a dagadás a szélesség növekedésével arányosan növekszik, hiszen a szélesebb szálfurnérok kevesebb illesztési hézagot eredményeznek, ami csökkenti a nedvesség beszivárgásának lehetőségét. Magyarázatként szolgálhat egyrészt, hogy a faktor ingadoztató hatása az átlag kétszeres hibáján belül van, másrészt, hogy a terítékképzés és préselés során az illesztési hézagok kellőképpen záródtak.

## 7.6. A nyírószilárdság vizsgálati eredményeinek kiértékelése

A rétegelt ragasztott termékekkel szemben támasztott fontos követelmény a rétegek közötti szilárd kapcsolat létrehozása. Ez a kötés akkor mondható jónak, ha a terhelés hatására bekövetkező tönkremenetel nem a ragasztórétegek elválásában, hanem a fa alkotóelemek szétroncsolódásában nyilvánul meg. Az előállított magas rétegszámú kompozit igen sok belső fa-műgyanta határfelületet tartalmaz, amiből következik, hogy a termék fizikai, mechanikai tulajdonságait a ragasztás minősége jelentősen befolyásolja. További befolyásoló tényező, a préselés során lejátszódó transzportfolyamatokat és a termék végső térfogati sűrűségeloszlását meghatározó lapvastagság (Suzuki, 2003).

A ragasztás minőségének becslésére a színfurnérkompozitok lappal párhuzamos nyírószilárdsági vizsgálatát alkalmaztam, hiszen – a lapsíkra merőleges szakítószilárdság mellett – ez a terhelési mód is lapok belső kötési szilárdságáról ad információt. Egy adott síkban tiszta nyíróigénybevétel létrehozása problematikus, mert a nyírófeszültségek mellett a nyírási síkkal párhuzamos vagy arra merőleges normálfeszültségek is ébrednek, és a feszültségeloszlás a sík mentén nem egyenletes. Mindezek ellenére a nyírószilárdságok meghatározásának jelenlegi módszerei lehetővé teszik a szerkezet terhelhetőségének és a különböző hatások nyírószilárdságra gyakorolt befolyásának vizsgálatát (Szalai, 1994).

A nyírószilárdsági vizsgálatokat az MSZ EN 789:2000 alapján végeztem, a kísérleti elrendezést és a nyírás során keletkező néhány jellegzetes törésképet mutat a 7.32. ábra. A mintákat gyorsan kikötő, kétkomponensű epoxigyantával ragasztottam az acéllapokhoz, majd kézi szorítókkal legalább 6 órán keresztül préseltem. Ez a ragasztótípus igen merev kötést biztosít, a terhelés során kúszás nem lép fel (Suzuki, 2003).



7.32. ábra A lapok síkjában működő nyírás vizsgálati elrendezése (a.) és néhány jellegzetes töréskép (b)

A törésképek a ragasztás minőségének ingadozásáról árulkodnak, sok esetben a próbatestek a műgyanta és furnér határfelületén nyíródtak el, és általában az alacsonyabb sűrűségű középvonal mentén. A ragasztás minőségét az is rontotta, hogy a minden második rétegre felhordott alacsony műgyantamennyiség – különösen a bükk lapoknál – gyorsan

beszívódott, így a száraz rétegek felületére nem jutott elegendő mennyiség a stabil kötés kialakulásához. Mindez a ragasztóanyag egyenletesebb és némileg nagyobb mennyiségben való felhordását indokolja.

A lapok síkjával párhuzamos nyírószilárdságot a [7.25] egyenlettel számíthatjuk ki, figyelembe véve a minták 9°-os átlagos ferdeségét:

$$f_r = \frac{F_{\max} \cdot \cos 9^\circ}{l \cdot b} \tag{7.25.}$$

Ahol:  $f_r$  – lapsíkkal párhuzamos nyírószilárdság (MPa)

$F_{\max}$  – maximális teher MPa

$l$  – a próbatest hossza, mm

$b$  – a próbatest szélessége, mm

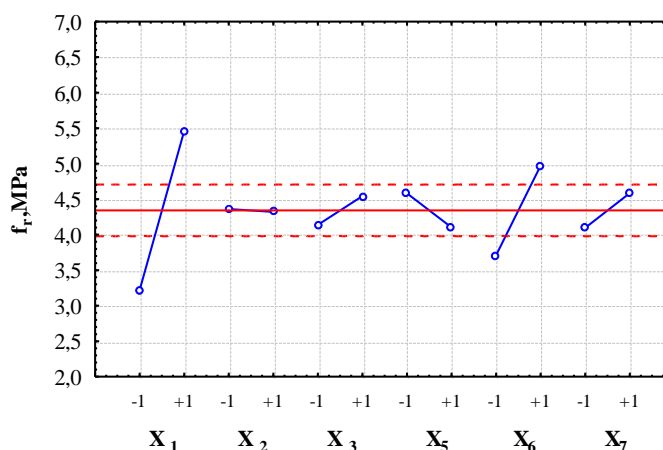
A vizsgálat eredményeit a 7.16. táblázat foglalja össze:

**7.16. táblázat A lapsíkkal párhuzamos nyírószilárdság eredményei**

Beáll.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_1x_2x_3$	Nyírószilárdság, $f_r$ MPa,		
									$\bar{y}$	$s$	COV., %
1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2,546	0,980	38,5
2	+1	+1	-1	-1	+1	1	-1	+1	5,285	0,404	7,6
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	2,229	0,693	31,1
4	+1	+1	+1	-1	-1	1	+1	-1	6,498	1,103	17,0
5	+1	-1	-1	+1	-1	1	+1	+1	4,413	0,660	15,0
6	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	5,201	0,836	16,1
7	+1	-1	+1	+1	+1	1	-1	-1	3,692	1,557	42,2
8	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	4,865	0,387	8,0

A kapott nyírószilárdsági adatok tág határok között változnak, és az egyes beállításoknál a variációs együttható is igen magas értéket mutat. Ez az egyes replikációk közötti jelentős eltérést jelzi. A táblázatban bemutatott értékek meghaladják a szerkezeti célú OSB lapok (4. osztály) lapsíkkal párhuzamos szilárdsági értékeit (Suzuki, 2003; Sretenovic, 2005).

Az átlag-szórás kapcsolatot megvizsgálva azt látjuk, hogy a Box-Cox féle hatványtranszformáció kitevőjének optimális értéke  $\lambda = 1,027$ , vagyis nincs szükség a mért adatok transzformációjára. A reziduális szórásnégyzetnek a transzformáció utáni csökkenését a  $\chi^2$ -próba is a véletlennek tulajdonítja (lásd 12. melléklet), ami igazolja a transzformáció felesleges voltát.



**7.33. ábra A faktorok nyírószilárdságra gyakorolt hatásábrája**

A szórásnégyzet-elemzés és a faktorhatások jelentőségének (7.33. ábra) vizsgálata a fafaj és présnyomás nyírószilárdságra gyakorolt szignifikáns hatását jelzi, az orientáció és hőmérséklet véletlen ingadoztató hatásának valószínűsége kisebb, mint 0,25 ezért a két tényezőt is indokolt a modellben hagyni.

A regressziószámítás után előálló, valamennyi faktor hatását tartalmazó regressziós modell:

$$\hat{y}_f = 4,341 + 1,121x_1 - 0,02x_2 + 0,202x_3 - 0,24x_5 + 0,631x_6 + 0,244x_7 \quad [7.26.]$$

$$R^2 = 0,762 ; R^2_{adj} = 0,679$$

Redukált modell, a  $p < 0,25$  alatti hatásokkal:

$$\hat{y}_f = 4,341 + 1,121x_1 - 0,24x_5 + 0,631x_6 + 0,244x_7 \quad R^2 = 0,745 ; R^2_{adj} = 0,692 \quad [7.27.]$$

A szálfurnér-szélesség és hosszoldás hatásainak maradék szórásnégyzetbe vonása a modell determinációs együtthatóját alig csökkenti. Ha az összes tényező hatását figyelembe vesszük, a faktorok beállítási szintjeinek megfelelő megválasztásával a nyírószilárdság 6,8 MPa-ra növelhető, ha csak a redukált modell együtthatóival számolunk, akkor 6,6 MPa-ra. Ezek az értékek megközelítik a bükk rostokkal párhuzamos átlagos nyírószilárdsági értékeit ( $\tau_{bükk//} = 8$  MPa, Molnár, 2002).

Megismételt kísérleti beállításoknál lehetőség van a kísérleti hibák okozta ingadozások elkülönítésére, ami lehetőséget ad a modell illeszkedési jóságának becslésére. Ha a maradék (a figyelembe nem vett faktoroknak tulajdonítható) szórásnégyzet szignifikánsan nagyobb, mint a kísérleti hibának tulajdonítható szórásnégyzet, akkor olyan statisztikailag jelentős ingadozások vannak még jelen, melyek további – a modellbe be nem vont – tényezőknek tulajdoníthatók, vagy az átlagok közötti különbségeket nem a modell paraméterei okozzák. Ez azt jelenti, hogy az alkalmazott modell nem illeszkedik kellő jósággal a mért pontokra. A kérdés eldöntéséhez a két szórásnégyzet F-próbáját alkalmazzuk. Az F-próba alapján a maradékok szórásnégyzete és a kísérleti hiba között nincs szignifikáns különbség (7.17. táblázat), így megállapítható, hogy az egyes kísérleti beállítások eltérése jól magyarázható az  $x_1$ ,  $x_5$ ,  $x_6$ ,  $x_7$  tényezőket tartalmazó modellel. A maradékok elemzése a varianciaanalízis és a regresszióelemzés feltételeinek teljesülését igazolja (12. melléklet).

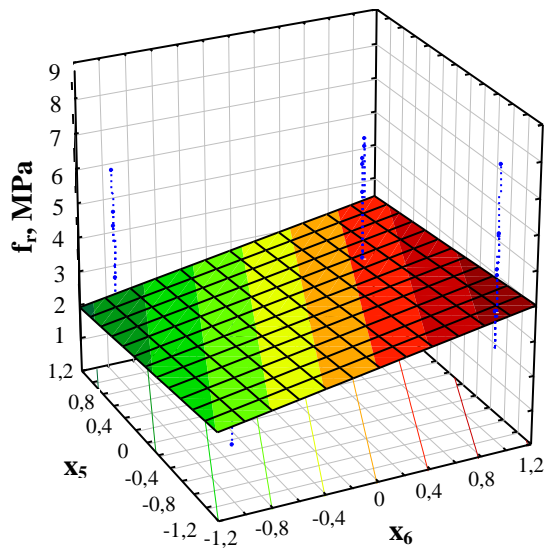
**7.17. táblázat A redukált modell varianciaanalízise**

Faktorok	SS	df	MS	F	p
$x_1$ - fafaj	30,162	1	30,162	36,9611	0,000016
$x_5$ – orientáció	1,377	1	1,377	1,6874	0,212350
$x_6$ - nyomás	9,556	1	9,556	11,7096	0,003495
$x_7$ - hőmérséklet	1,429	1	1,429	1,7514	0,204307
Illeszkedés hiánya	1,478	3	0,493	0,6037	0,622014
Kísérleti hiba	13,057	16	0,816		
Teljes	57,058	23			

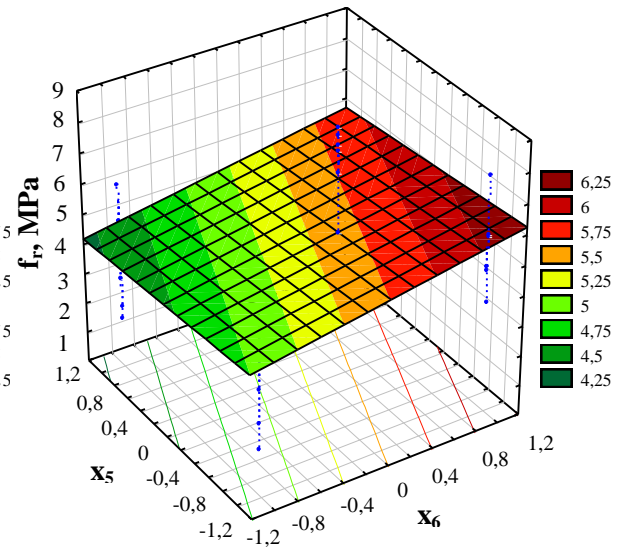
Az orientáció és présnyomás válaszfelületének elemzésekor kitűnik, hogy mind a bükk, mind a juhar alapanyagból készült kompozitoknál a két tényező hatásának jellege teljesen megegyezik (7.34. ábra). Optimális értékeket a szálfurnérok alacsony orientációjánál és magas présnyomáson kapunk. Az OSB lapok nyírószilárdságát meghaladó értékek juharfurnérból készült termékeknél már a faktorok alsó szintjein is biztosíthatók, bükk lapoknál pedig a présnyomás el kell érje a minimum 2,6 MPa értéket.

A présnyomás és préshőmérséklet szintvonalas ábráinak elemzésekor (7.35. ábra) a faktorhatások trendjére vonatkozóan az előzőhöz hasonló következtetésre jutunk. Maximális nyírószilárdsági értékek a faktorok felső szintjén várhatók.

a.) Bükk

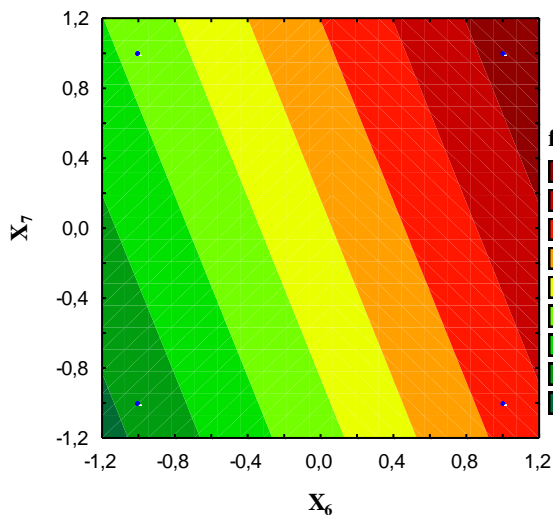


b.) Juhar

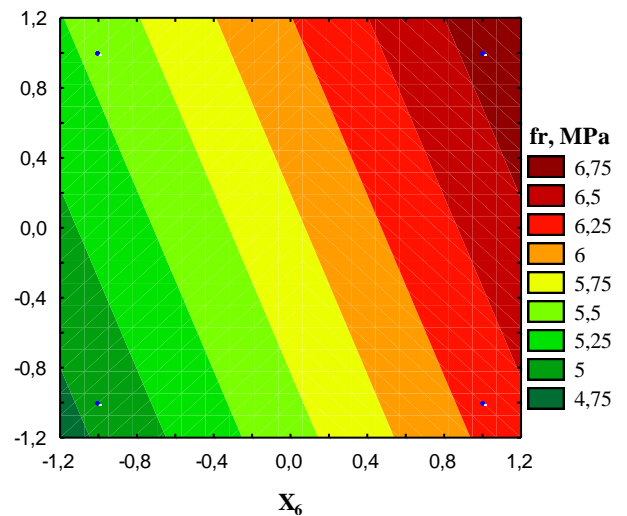


7.34. ábra A nyírószilárdság válaszfelülete az orientáció és présnyomás változásának függvényében

a.) Bükk



b.) Juhar



7.35. ábra A nyírószilárdság szintvonalas ábrái a présnyomás és préshőmérséklet változásának függvényében

## 8. A rugalmas tulajdonságokat befolyásoló technológiai paraméterek vizsgálata $L_9$ típusú Taguchi terv segítségével

Az előző fejezetben a színfurnéroból készült kompozitok legfontosabb tulajdonságait befolyásoló alapanyag, terítékképzési mód és préselési paraméterek hatását vizsgáltam egy kétszintes frakcionált faktoriális terv segítségével. Ebben a fejezetben, második lépésként három technológiai paraméternek, a felhordott ragasztóanyag mennyiségnek, a lapsűrűségnek és a lap középrétegében elhelyezett apróforgács-mennyiségnek a kompozitok rugalmas tulajdonságaira gyakorolt hatását elemzem.

### 8.1. Anyag és módszer

A kompozitok elkészítéséhez ugyanazt a három fafajt (cseresznye, vörös tölgy, juhar) alkalmaztam, mint a 4. fejezetben bemutatott terméktípusokhoz, a fafajok aránya is változatlan maradt. A lapok előállításának módja teljes mértékben megegyezik az ott leírt technológiával. Ahhoz, hogy a kiválasztott technológiai paraméterek négyzetes hatását is vizsgálni tudjam, a faktorok beállítási szintjeinek számát háromra növeltem, így lehetőség van a lineáris hatások meghatározásán kívül a válaszfelület görbeségének becslésére is. Az első faktor a légszáraz eselék tömegéhez viszonyított műgyantamennyiség, amelynek alapszintjét 8%-ban, az alsó és felső szintjét 5%-ban, illetve 11%-ban határoztam meg. A fenti százalékos értékek a fenol-formaldehid alapú műgyanta szárazanyag mennyiségét jelentik, maga a ragasztó 50%-os vizes oldatban került felhasználásra. Fontosnak tartottam megvizsgálni a sűrűségnek, mint a műszaki tulajdonságokkal szoros kapcsolatban álló tényezőnek a hatását is. A beállítási értékek kiválasztásakor figyelembe vettem azt, hogy kellő szilárdságú lapok előállításához az alapanyag sűrűségénél nagyobb sűrűségű lapok gyártása célszerű (Zombori, 2001.). Ezért a lapsűrűség variációs intervallumát  $50 \text{ kg/m}^3$ -ben állapítottam meg,  $700 \text{ kg/m}^3$ -es alapszinttel. A lapsűrűséget a préslapok és távtartó rudak által határolt térfogat, illetve a célsűrűség alapján kiszámított eseléktömeg határozta meg. Harmadik faktorként a középrétegben elhelyezett végeselék mennyiségét választottam, mivel e tényező hatásának ismerete lehetőséget ad arra, hogy egy adott tulajdonságú termékhez meghatározhassuk a felhasználható végeselék-mennyiséget. Ily módon lehetőség nyílik az ollózási eselék teljes körű hasznosítására, hiszen a színfurnérok ollózása során az igen kedvező tulajdonságokkal rendelkező száleseléken kívül jelentős mennyiségben ostyaszzerű, a szilárdsági tulajdonságok szempontjából előnytelen végeselék is keletkezik. Az első laptípus 100%-ban párhuzamosan orientált száleselékből épült fel, a második és harmadik lapféleség végeselék-tartalma 25 és 50% volt. Ennek megfelelően az első lap-, illetve a második, harmadik laptípus fedőrétegei ortotróp jelleget, míg a végeseléket is magába foglaló középrétegek síkbeli izotróp jelleget mutatnak. A kiválasztott független tényezők beállítási szintjeit a 8.1. táblázat összegzi.

#### 8.1. táblázat A kiválasztott faktorok és beállítási szintjeik

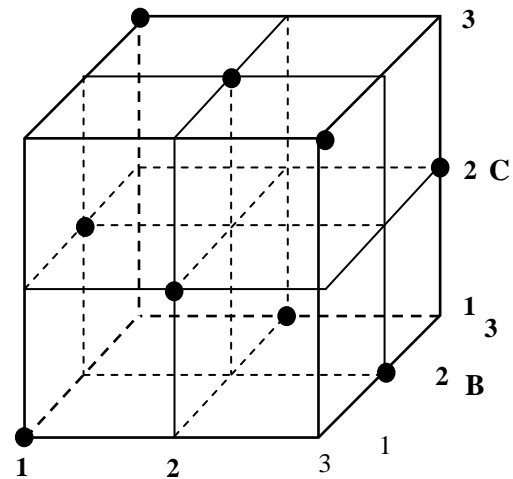
Faktorok	Szintek		
	1	2	3
A – Ragasztóanyag tartalom – $R_t$ , %	5	8	11
B – Lapsűrűség – $\rho_l$ , $\text{kg/m}^3$	650	700	750
C – Végeselék tartalom – $V_t$ , %	0	25	50

A kísérleti elrendezéshez egy  $L_9$  típusú Taguchi tervet választottam, amely legfeljebb négy faktor három szinten történő vizsgálatát teszi lehetővé. Ez a terv, elrendezését tekintve tulajdonképpen egy  $3^{4-2}$  típusú frakcionált faktoriális kísérleti terv, ahol az L indexében szereplő kilences a beállítások számát jelzi.

A kísérleti mátrixot a 8.2. táblázat tartalmazza, a faktorok beállítás-kombinációjának a kísérleti térben elfoglalt helyeit pedig a 8.1. ábra szemlélteti, ahol a fekete pontokkal jelölt helyek az elvégzett kísérleti beállításokat mutatják. A lehetséges negyedik faktor (D) bevonásától eltekintettem, így lehetőségem nyílt a reziduális szórásnégyzet kiszámítására és a hatások szignifikanciájának meghatározására. A szisztematikus hibák hatásának ellensúlyozására a kísérleti beállítások végrehajtása véletlen sorrendben történt.

8.2. táblázat Az  $L_9$  Taguchi terv kísérleti mátrixa

Kísérleti beállítás	Faktorok			
	A	B	C	D
	szintek			
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1



8.1. ábra Az  $L_9$  Taguchi terv geometriai ábrázolása

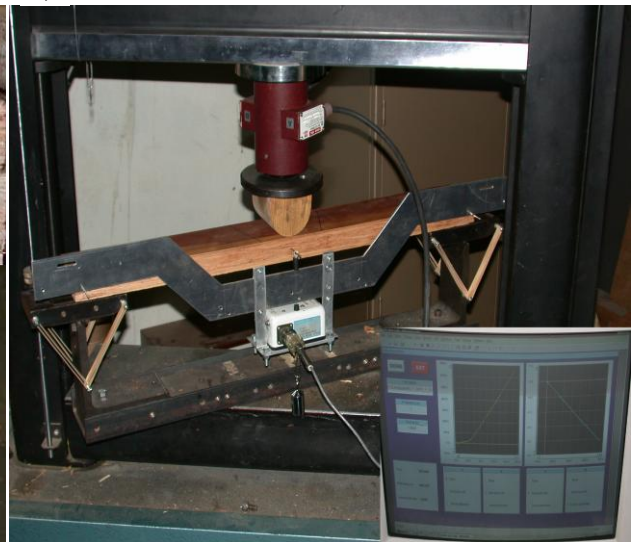
## 8.2. Eredmények

Az elkészített lapok megjelenése és szerkezete hasonlít a 4. fejezetben bemutatott  $E_{11}$ ,  $E_{12}$ , illetve az  $F_1$ ,  $F_2$  jelölésű lapok szerkezetéhez. Ahogy az a 8.2a. ábrán látható, a középréteg vastagsága itt is egyenletlen eloszlást mutat, különösen az 50% végezeléket tartalmazó laptípusok esetében. Ez a terítékképzés tökéletlenségének köszönhető, ami a laptulajdonságok ingadozásának növekedését idézi elő.

a.)



b.)



8.2. ábra Ollózási eselékből készített kompozitok szerkezete (a) és a rugalmassági tulajdonságok meghatározásához alkalmazott mérőberendezés (b)



Minden kísérleti beállításra egy-egy lapot készítettem, a lapokból nyolc-nyolc próbatestet vágtam ki. A minták hajlítószilárdságát és hajlító rugalmassági modulusát az ASTM D-1037 szabvány előírásai alapján mértem (8.2b. ábra). A mérési eredményeket a 8.3. táblázat foglalja össze:

**8.3. táblázat A kísérleti beállításokra kapott rugalmassági tulajdonságok**

Standard beállítás	Elkészítés. sorrendje	Faktor			Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	MOE, MPa	MOR, MPa
		A	B	C			
1	4	1	1	1	676,5	15351,2	109,7
2	5	1	2	2	741,9	15477,6	112,1
3	8	1	3	3	755,5	15124,9	102,9
4	1	2	1	2	679,7	13515,6	81,2
5	6	2	2	3	745,3	14582,4	109,5
6	2	2	3	1	762,3	17671,0	136,6
7	7	3	1	3	707,8	12879,0	85,1
8	3	3	2	1	727,3	15554,1	118,8
9	9	3	3	2	778,3	17087,2	123,6

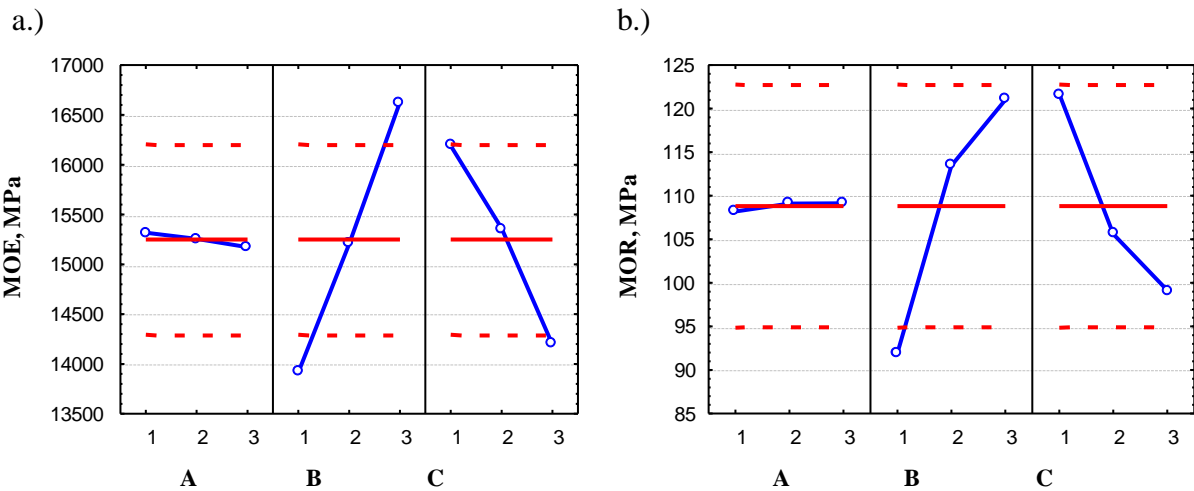
A kísérleti eredmények kiszámítása után először a szabályozható tényezők hatásának nagyságát számítottam ki. Ez az egyes faktorszintek átlagának és a teljes átlagnak a különbsége. A kísérletbe bevont tényezők hatását, illetve a faktorszintek szórását és hibáját összegzi a 8.4. táblázat. Kiolvasható, hogy a ragasztóanyag-tartalom az adott variációs intervallumban alig befolyásolja a rugalmassági modulusot és a hajlítószilárdságot, hatása a faktorszintek szórásánál jóval kisebb. Ezzel szemben, ha a sűrűséget a harmadik szintre állítjuk be, akkor az átlagos rugalmassági modulus 1378,5 MPa-lal, a hajlítószilárdság 12,19 MPa-lal növekszik. Az optimális faktorkombinációt akkor kapjuk, amikor a sűrűséget 750 kg/m<sup>3</sup>-re, a végeselék-tartalmat 0%-ra, a ragasztóanyag-tartalmat a rugalmassági modulusnál 5%-ra, a hajlítószilárdságnál 11%-ra vesszük. Ekkor a kompozitok lapra merőleges rugalmassági modulusának várható átlagértéke 17600 MPa fölé emelkedik, a hajlítószilárdságé pedig megközelíti a 134,2 MPa-t.

**8.4. táblázat A faktorok hatása**

Faktor	Szint	MOE, MPa				MOR, MPa			
		Átlag	Hatás	Szórás	Hiba	Átlag	Hatás	Szórás	Hiba
A	1	15318	<b>68,7</b>	178,7	5,86	108,2	-0,61	4,77	0,958
	2	15256	7,1	2158,1	20,38	109,1	0,29	27,69	2,308
	3	15173	-75,8	2129,7	20,25	109,1	<b>0,32</b>	20,99	2,010
B	1	13915	-1333,9	1283,6	15,72	92,0	-16,83	15,45	1,725
	2	15205	-44,5	540,2	10,20	113,5	4,64	4,77	0,958
	3	16628	<b>1378,5</b>	1333,8	16,02	121,0	<b>12,19</b>	17,00	1,809
C	1	16192	<b>942,9</b>	1284,8	15,72	121,7	<b>12,86</b>	13,68	1,622
	2	15360	110,9	1788,7	18,55	105,6	-3,20	21,91	2,053
	3	14195	-1053,8	1171,9	15,02	99,2	-9,66	12,66	1,561
Átlag		<b>15249</b>				<b>108,81</b>			

A faktorok rugalmassági modulusra gyakorolt hatásdiagramja látható a 8.3a. ábrán. A közepén látható egyenes a teljes kísérleti terv átlagértékét, a szaggatott vonal az átlag körüli  $\pm 2\sigma_{\bar{y}}$  határokat jelöli. A szórás becsléséhez a maradék szórásnégyzetet használtam fel. Ha a faktorhatás a határokon belül van, akkor annak válaszijellemzőre gyakorolt befolyása nem szignifikáns, vagyis az átlagtól való eltérés a véletlennek köszönhető. A diagram a sűrűség jelentőségét emeli ki, a végeselék-tartalom hatása a szignifikancia határán van.

Az 1-2, 2-3 szakaszok közel azonos meredekségei a tényezők jelentéktelen négyzetes hatásaira utalnak. A hajlítószilárdság hatásdiagramjának (8.3b. ábra) 95%-os konfidenciaintervalluma még szélesebb, tehát a sűrűség és végeselék-tartalom hatásának jelentősége még kisebb, ugyanakkor a négyzetes hatások erőteljesebbek.



8.3. ábra Az egyes faktorszintekhez tartozó átlagos hatás

Következő lépésként az egyes hatások szignifikanciáját becsültem a varianciaanalízis segítségével. A beállítások megismétlésének hiánya miatt az egyes beállításokon belüli szórás becslése nem lehetséges, azonban a kísérleti terv utolsó oszlopának szabadon hagyásával a hatások szignifikanciájának vizsgálatához szükséges reziduális szórásnégyzet kiszámítható. Ez a szabadon hagyott oszlop fogja tartalmazni a kísérleti hibákat, és a figyelembe nem vett tényezők hatásait. A faktorok szórásanalízisi táblázatai (8.5a-b.) 95%-os megbízhatósági szinten egyetlen tényező hatását sem mutatják jelentősnek, a faktorok beállítási szintjeinek ingadoztató hatása csupán a véletlennek tulajdonítható. Különösen igaz ez a hajlítószilárdságnál, ahol a  $p$  valószínűségek a rugalmassági modulusnál is nagyobbak.

### 8.5. táblázat A faktorhatások ANOVA-táblája (a - MOE; b - MOR)

a.)

Hatás	SS	szf	MS	F	p*
A	31530	2	15765	0,023007	0,977510
B	11044750	2	5522375	8,059373	0,110383
C	6035056	2	3017528	4,403791	0,185055
Maradék	1370423	2	685211		

\* -  $p$  – a hatás véletlen előfordulásának valószínűsége

b.)

Hatás	SS	szf	MS	F	p
A	1,65	2	0,83	0,005652	0,994380
B	1360,62	2	680,31	4,653976	0,176867
C	806,83	2	403,41	2,759734	0,265976
Maradék	292,36	2	146,18		

A három beállítási szint lehetőséget nyújt a faktorhatások lineáris (L) és kvadratikus (Q) összetevőinek szétválasztására, a felbontást a 8.6. táblázat mutatja. Megfigyelhető, hogy a rugalmassági modulus esetében a B és C faktorok lineáris hatása jóval nagyobb, mint a négyzetes hatásuk, és csak a lapsűrűség hatása éri el a kritikus szintet. Ennek egyik oka a maradék szórásnégyzet alacsony szabadsági foka (szf = 2), hisz ilyen kis szabadságfoknál az F-próba elfogadási tartománya nagyon széles.

A hajlítószilárdsági értékeknél az összetevők közötti különbség mérsékeltebb. Az  $\alpha = 0,05$  szignifikanciaszintet legjobban a B faktor rugalmassági modulusra gyakorolt lineáris hatása közelíti meg.

#### 8.6. táblázat A faktorhatások négyzetösszegeinek felbontása lineáris és kvadratikus összetevőkre

a.) MOE:

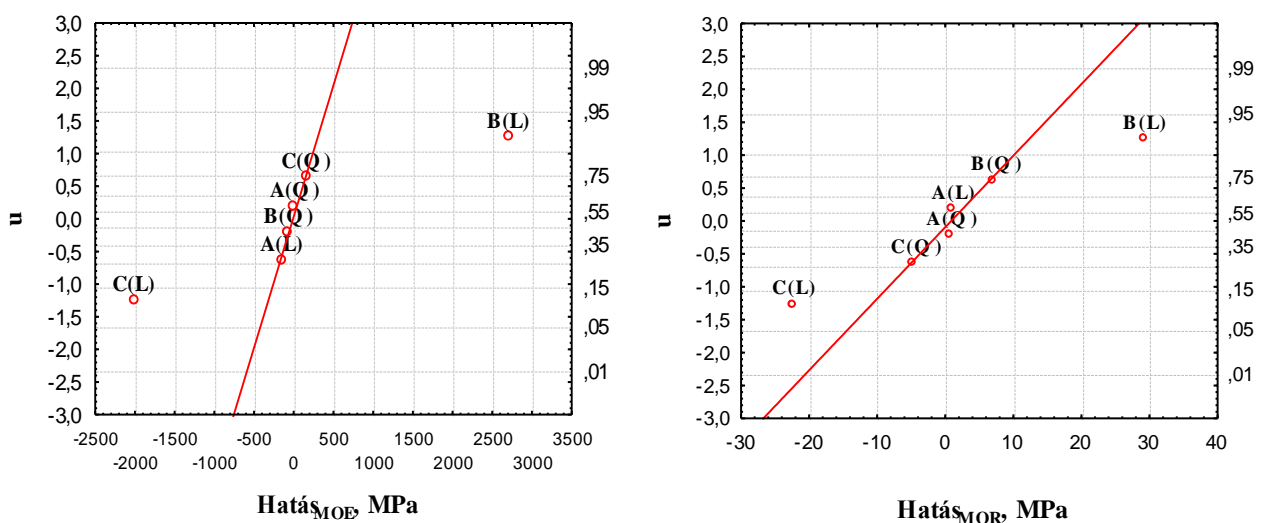
Hatás	SS	szf	MS	F	p	F*	p*
A (L)	31302	1	31302	0,04568	0,850565	-	-
A (Q)	228	1	228	0,00033	0,987098	-	-
B (L)	11035825	1	11035825	16,10572	0,056847	31,48701	<b>0,004956</b>
B (Q)	8925	1	8925	0,01302	0,919563	0,02546	0,880951
C (L)	5979711	1	5979711	8,72681	0,098029	17,06109	<b>0,014488</b>
C (Q)	55345	1	55345	0,08077	0,802978	0,15791	0,711382
Maradék	1370423	2	685211				
Teljes	18481758	8					
Maradék*	1401953	4	350488				

\* - az A faktor hatásának a maradék négyzetösszegbe történő bevonása után végzett varianciaanalízis F-próbastatisztikai és a hozzá tartozó valószínűsége

b.) MOR:

Hatás	SS	szf	MS	F	p	F*	p*
A (L)	1,28	1	1,28	0,008739	0,934042	-	-
A (Q)	0,38	1	0,38	0,002565	0,964208	-	-
B (L)	1263,70	1	1263,70	8,644949	0,098824	17,19272	<b>0,014302</b>
B (Q)	96,92	1	96,92	0,663003	0,501033	1,31855	0,314853
C (L)	760,72	1	760,72	5,204033	0,150072	10,34957	<b>0,032370</b>
C (Q)	46,11	1	46,11	0,315436	0,630904	0,62733	0,472661
Maradék	292,36	2	146,18				
Teljes	2461,45	8					
Maradék*	294,009	4	73,502				

A ragasztóanyag-tartalom hatásának szignifikanciája nagyon alacsony ( $p \gg 0,25$ ), így a lineáris és négyzetes hatásaihoz tartozó négyzetösszegeket bevonhatjuk a maradék szórásnégyzetbe. Az egyesített négyzetösszegek csekély mértékben növekednek, szabadságfokuk négyre emelkedik, következésképpen az F próbastatisztika kritikus értéke kisebb lesz, és most már a B és C faktorok lineáris hatása mind a rugalmassági modulus, mind a hajlítószilárdság tekintetében szignifikánsnak mutatkozik.



8.4. ábra A faktorok hatásának Gauss-papíros ábrázolása

A hatások szignifikanciáját az úgynevezett Gauss-papíros ábrázolással, grafikusan is megjeleníthetjük (8.4. ábra). Látható, hogy a sűrűség és az apróforgács-tartalom lineáris hatásai a nulla várható értékű normális eloszlás elméleti egyenesétől távol helyezkednek el, következésképpen azok rugalmassági modulusra és hajlítószilárdságra gyakorolt hatásainak jelentősége nem hanyagolható el.

A választott kísérleti terv pontjaira a legkisebb négyzetek módszerével illesztett, csak a főhatásokat tartalmazó matematikai modellek alakja másodfokú polinom lesz:

$$\hat{y}_{MOE} = 15322,7 - 72,2 \cdot A - 10,7 \cdot A^2 + 1356,2 \cdot B + 66,8 \cdot B^2 - 998,3 \cdot C - 166,4C^2 \quad [8.1.]$$

$$(R^2 = 0,926; R^2_{adj} = 0,703)$$

$$\hat{y}_{MOR} = 110,53 + 0,47 \cdot A - 0,4 \cdot A^2 + 14,52 \cdot B - 6,95 \cdot B^2 - 11,27 \cdot C + 4,8 \cdot C^2 \quad [8.2.]$$

$$(R^2 = 0,881; R^2_{adj} = 0,526)$$

ahol A,B,C – a ragasztóanyag-tartalom ( $R_t$ ), lapsűrűség ( $\rho_l$ ), és végeselék-tartalom ( $V_t$ ) kódolt értékeit jelenti. A kódolt értékeket a következő transzformációval kapjuk (lásd még 6. Fejezet):

$$A = \{R_{t_i} - [\max(R_t) + \min(R_t)]/2\} / [\max(R_t) - \min(R_t)]/2$$

$$B = \{\rho_{l_i} - [\max(\rho_l) + \min(\rho_l)]/2\} / [\max(\rho_l) - \min(\rho_l)]/2$$

$$C = \{V_{t_i} - [\max(V_t) + \min(V_t)]/2\} / [\max(V_t) - \min(V_t)]/2, i = 1,2,3 \quad [8.3.]$$

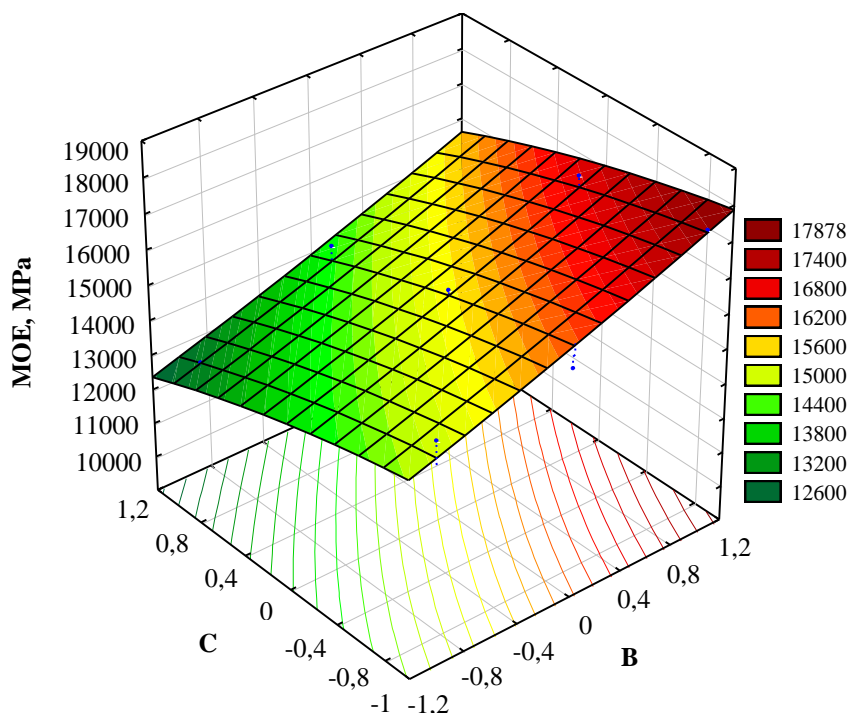
Az A,B,C faktorok folytonos jellegéből következik, hogy a fenti regressziós függvények nemcsak egy adott faktorszint-kombináció becslésére alkalmasak, hanem lehetőséget adnak a rugalmassági tulajdonságok variációs intervallumon belüli bármely pontban való becslésére is. A becslés megkönnyítésére a fenti regressziós függvényeket átírhatjuk a faktorok kódolatlan értékeire is:

$$\hat{y}_{MOE} = 10373,96 - 5,11 \cdot R_t - 1,19 \cdot R_t^2 - 10,27 \cdot \rho_l + 0,03 \cdot \rho_l^2 - 26,62 \cdot V_t - 0,27 \cdot V_t^2 \quad [8.4.]$$

$$\hat{y}_{MOR} = -1442,92 + 0,867 \cdot R_t - 0,044 \cdot R_t^2 + 4,182 \cdot \rho_l - 0,0028 \cdot \rho_l^2 - 0,835 \cdot V_t + 0,0077 \cdot V_t^2 \quad [8.5.]$$

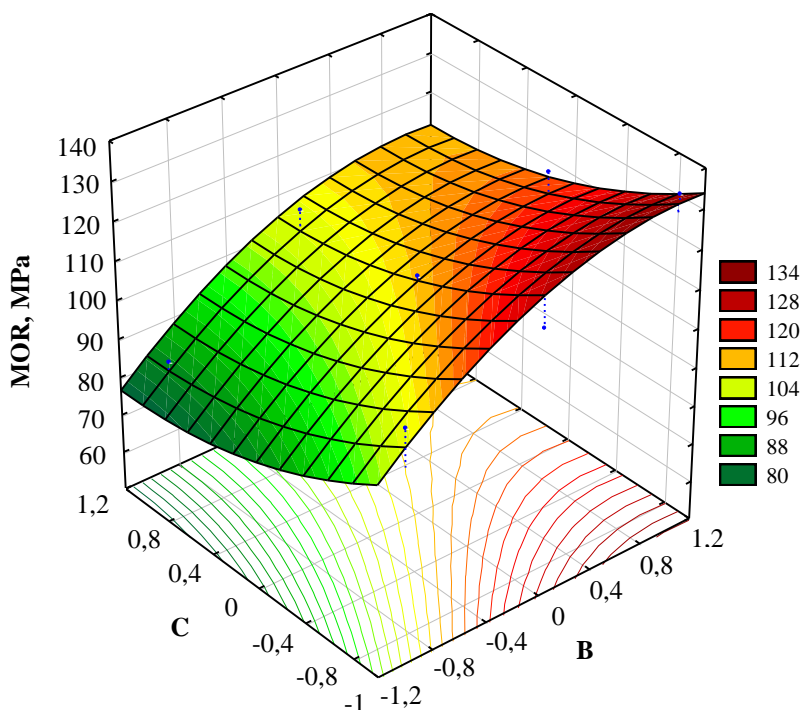
A folyamatot jelentősen befolyásoló tényezők felderítése (a folyamat jellemzése) és a regressziós modell felállítása után áttérhetünk a folyamat optimalizálására. Ekkor a faktorok azon beállítási tartományát keressük, amelyre a válaszjellemző a lehető legjobb értékeket adja. Ebben az esetben – mechanikai tulajdonságokról lévén szó – a minél nagyobb értékek elérése a cél. A ragasztóanyag-tartalom az 5-11% tartományban jelentősen nem befolyásolja a kompozitok rugalmassági tulajdonságait, így a maximális érték a maradék két faktor optimális beállításainak meghatározásával érhető el. Ha elkészítjük a [8.4-5.] regressziós modellek térbeli ábráját – az úgynevezett válaszfelületeket –, láthatóvá válik, hogy a rugalmassági modulus és a hajlítószilárdság várható értéke miképpen változik a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében. Ilyen válaszfelületek láthatók a 8.5-6. ábrákon, ahol a ragasztóanyag-tartalom a középszintre (8%) van beállítva. További válaszfelületek a 14. mellékletben találhatóak.

A 8.5. ábra jól szemlélteti, hogy a lapok rugalmassági modulusa jóval nagyobb mértékben növelhető a sűrűsénöveléssel, mint a végeselék-tartalom csökkentéssel, a B, C faktorok kvadrátikus hatása nem jelentős, a válaszfelület közel sík. Alacsony sűrűségű lapoknál magas rugalmassági értékek elérése csak a végeselék tartalom igen alacsony (0-5%) értékeinél lehetséges. A felület nem csavarodott, amiből következtetni lehet a faktorok közötti kölcsönhatások elhanyagolhatóságára. A 17500 MPa maximális rugalmassági modulus a lapsűrűség felső, a végeselék-tartalom alsó beállítási szintjén adódik.



8.5. ábra A rugalmassági modulus válaszfelülete a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében

A ragasztóanyag-tartalom és lapsűrűség válaszfelülete (14. melléklet), amikor a végeselék-tartalom a középszinten rögzített, szintén közel sík, igen nagy meredekséggel a lapsűrűség növekvő értékei irányába. A ragasztóanyag-mennyiség növelése alig van hatással a rugalmassági modulusra, a 17000 MPa körüli maximális értékeket a lapsűrűség felső szintjén kapjuk. Ha a végeselék- és műgyantatartalom válaszfelületét elemezzük ( $B = 700 \text{ kg/m}^3$ ), megállapítható, hogy a lapközépből elhelyezett végeselék-mennyiség és rugalmassági modulus között a kapcsolat nem lineáris, hanem a  $-1 - 0$  intervallumban enyhébb, majd a  $0 - +1$  szakaszban erőteljesebb negatív korreláció tapasztalható.



8.6. ábra A hajlítószilárdság válaszfelülete a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében

Közepes lapsűrűségnél magas rugalmassági modulus értékek csak igen alacsony végeselék-tartalomnál érhetőek el.

A hajlítószilárdság, lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében ábrázolt válaszfelülete látható a 8.6. ábrán. A B és C faktorok négyzetes hatásai okozta felületgörbeség itt erőteljesebb mint a rugalmassági modulusnál tapasztalt, és az is megfigyelhető, hogy a 740-760 kg/m<sup>3</sup> lapsűrűség, illetve 35-55% végeselék-tartalom tartományban a faktorok hajlítószilárdságra gyakorolt hatása mérséklődik. A 750 kg/m<sup>3</sup>-es lapsűrűségnél a szintvonalak csúcsértéket mutatnak. Az A-B (C= 25%) válaszfelület (14. melléklet) a szilárdság exponenciális növekedését tükrözi, a ragasztóanyag mennyiségének változtatása nincs hatással a hajlítószilárdságra. A ragasztóanyag-tartalom és végeselék-mennyiség változásának függvényében ábrázolt hajlítószilárdsági válaszfelület (B= 700 kg/m<sup>3</sup>) alapján a végeselék-tartalom növelése először a szilárdság meredek csökkenését okozza, 25% körül ez a csökkenés mérséklődik, majd a 40-50% közelében konstans lesz.

Figyelembe véve, hogy a ragasztóanyag-tartalom, illetve a lapsűrűség és végeselék-tartalom négyzetes tagjainak hatása jelentéktelen mind a rugalmassági modulusra, mind a hajlítószilárdságra, a két polinom a következő formára egyszerűsíthető:

$$\hat{y}_{MOE} = 15249,2 + 1356,2 \cdot B - 998,3 \cdot C \quad (R^2 = 0,921; R^2_{adj} = 0,894) \quad [8.6.]$$

$$\hat{y}_{MOR} = 108,83 + 14,52 \cdot B - 11,27 \cdot C \quad (R^2 = 0,823; R^2_{adj} = 0,764) \quad [8.7.]$$

A fenti regressziós egyenletek, melyek tulajdonképpen egy sík egyenletei, a kódolatlan értékekre a következőképpen módosulnak:

$$\hat{y}_{MOE} = -2739,48 + 27,12 \cdot \rho_l - 39,93 \cdot V_t \quad [8.8.]$$

$$\hat{y}_{MOR} = -83,133 + 0,2903 \cdot \rho_l - 0,4507 \cdot V_t \quad [8.9.]$$

### 8.3. Az eredmények korrigálása a lapsűrűség értékei alapján

Az L<sub>9</sub> Taguchi terv végrehajtásánál feltételeztem, hogy a faktorok beállítási szintjeit pontosan be tudom állítani. Ugyanis, ha a beállítás bizonytalansága nem elhanyagolható a variációs intervallumhoz képest, vagy az intervallum túl kicsi, akkor a faktorok hatástalannak mutatkozhatnak. Ezzel a jelenséggel is magyarázhatók a B és C lineáris hatások véletlen előfordulási valószínűségének a 0,05-nél magasabb *p* értékei.

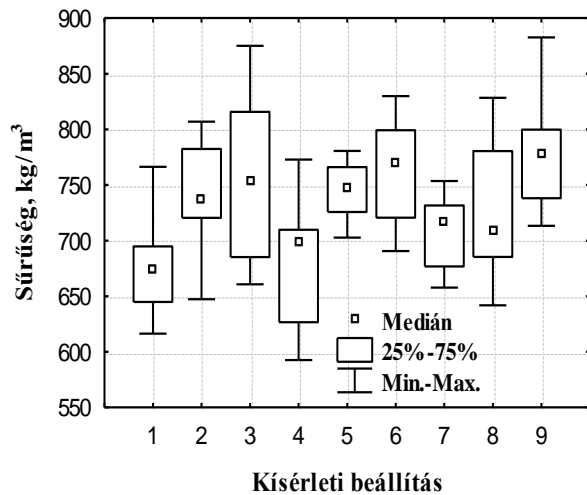
A 8.3. táblázat sűrűségoszlopa szerint az egyes kísérleti beállítások alapján gyártott lapok átlagsűrűsége jelentősen eltér az előírt értékektől, néhány esetben 30-40 kg/m<sup>3</sup>-rel is meghaladja azt. A sűrűségek mindig pozitív irányba tolódtak el, így a beállítás pontatlanságának hibája szisztematikusnak tekinthető, melynek egyik oka a kézi terítékképzés. Általában a kézi terítékképzés során a formázókeret széleihez kevesebb eselékmenyiség kerül, következésképpen a középrészek sűrűsége nagyobb lesz. Ezt nevezzük szélhatásnak.

A szélhatás ebben a kísérletsorozatban is erőteljesen jelentkezett, azonban a kész lapok formatizálásakor az alacsony sűrűségű szélrészeket eltávolítottam, így a kompozitok végső sűrűsége a beállítási értékekhez képest nagyobb lett. A kézi terítékképzés nem csak a szélhatás megjelenéséhez vezetett, hanem az egyes lapokon belüli minták sűrűségingadozásának növekedéséhez is. A próbatestek sűrűségének eloszlását a 8.7a-b. dobozos ábrák szemléltetik.

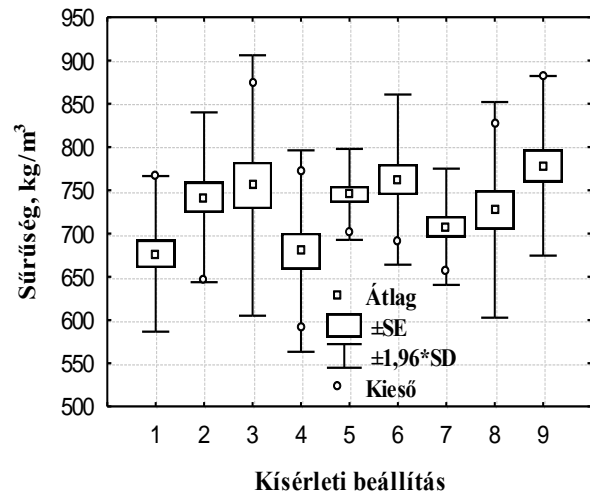
Az adatok eloszlása többnyire szimmetrikus (8.7a.), a szórások eltérőek, de egyetlen mért érték sem esik a 95%-os konfidencia-intervallumon ( $\pm 1,96 \cdot SD$ ) kívül (8.7b.).

A próbatestek sűrűségeinek grafikus illeszkedésvizsgálata az adatok normális eloszlását mutatja (8.8. ábra), illetve a Kolmogorov-Smirnov-, Shapiro-Wilk-próbák próbastatisztikái is ezt támasztják alá (8.7.táblázat). A  $\chi^2$ -próba az adatok kis száma miatt itt nem alkalmazható.

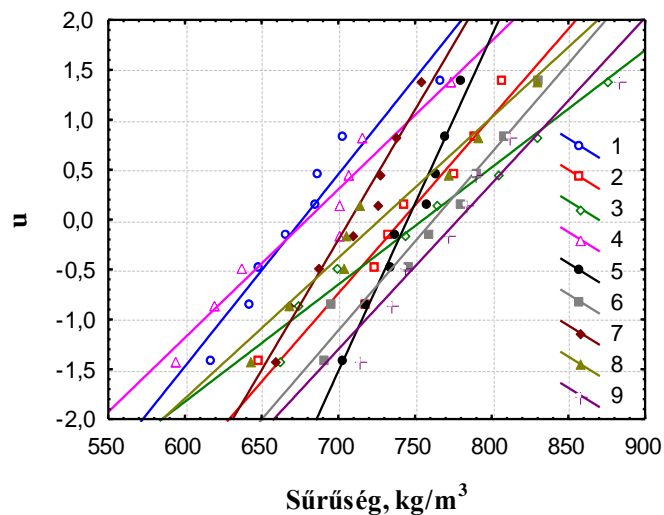
a.)



b.)



8.7. ábra Az egyes kísérleti beállításokra kapott lapok próbatesteinek sűrűség-eloszlása



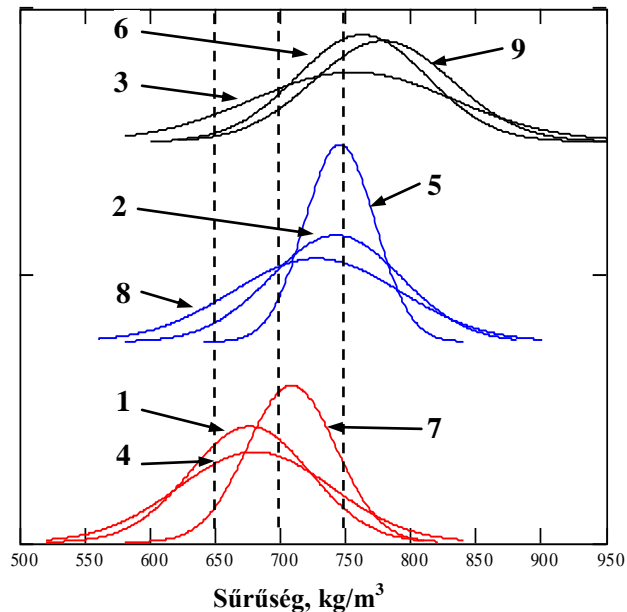
8.8. ábra A kompozitok térfogati sűrűségének Gauss-papíros ábrázolása (1-9 kísérleti beállítások)

8.7. táblázat Eredmények a sűrűségek illeszkedésének statisztikai próbáira

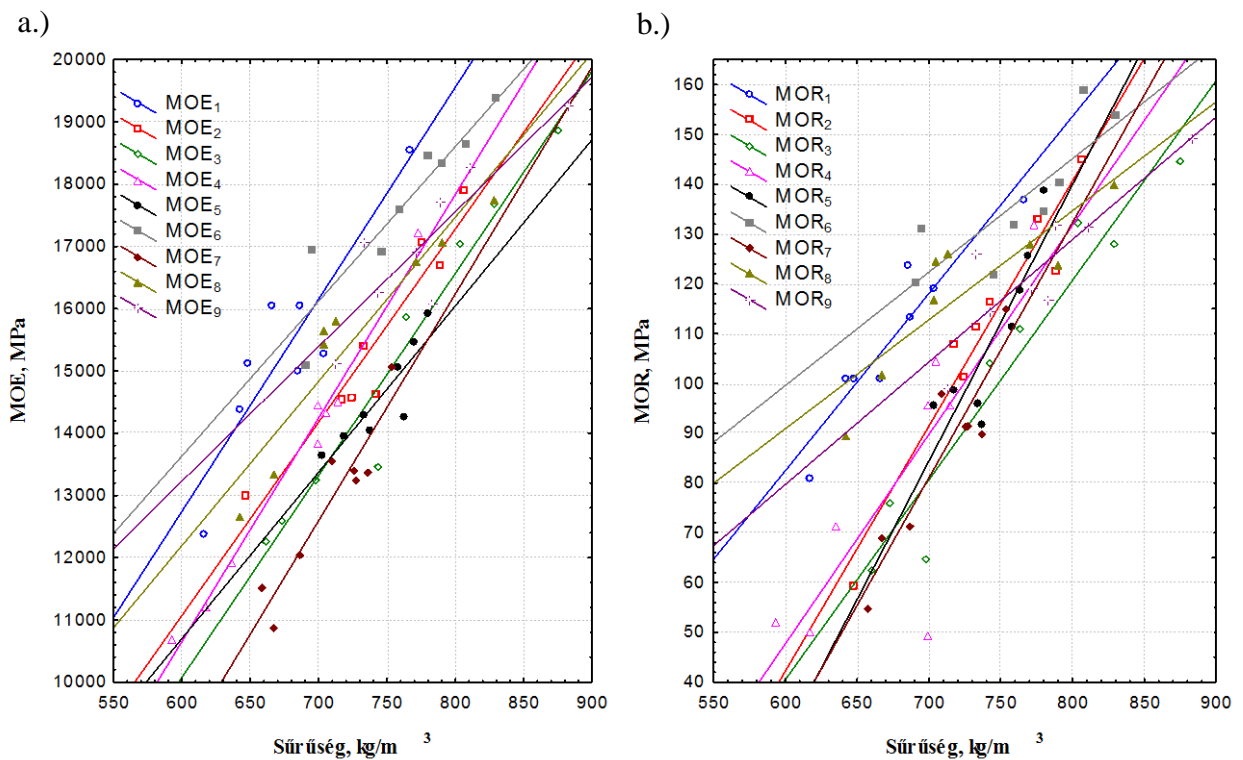
Kolmogorov-Smirnov-próba	Shapiro-Wilk próba
$D_1=0,16361$	$W_1=0,94656$
$D_2=0,18331$	$W_2=0,94711$
$D_3=0,14904$	$W_3=0,95521$
$D_4=0,25465$	$W_4=0,93357$
$D_5=0,17476$	$W_5=0,96182$
$D_6=0,15858$	$W_6=0,94148$
$D_7=0,19885$	$W_7=0,94050$
$D_8=0,21638$	$W_8=0,95120$
$D_9=0,17338$	$W_9=0,93807$
$D_{(0,05, 8)} = 0,454$	$W_{(0,05, 8)} = 0,932$

Az elkészített lapok sűrűségeit (B faktor) a beállítási értékek szerint csoportosíthatjuk, és megbizonyosodva az adatok normális eloszlásáról, elkészíthetjük azok sűrűségfüggvényeit (8.9.

ábra). Az ábra alapján megállapítható, hogy a lapok sűrűségének beállítási pontatlansága nagyobb, mint a választott variációs intervallum, a sűrűségfüggvények között jelentős átfedések vannak. A szélhatás miatt bekövetkező sűrűsénövekedés is jól kivehető.



8.9. ábra A kompozitok térfogati sűrűségének sűrűségfüggvénye  
(1-9 – a kísérleti beállítások száma)



8.10. ábra A sűrűség és mechanikai tulajdonságok lineáris függvénykapcsolata

Ha szoros kapcsolat mutatható ki a különböző faktorkombinációkra kapott lapok sűrűsége és rugalmassági tulajdonságai között, akkor lehetőség van a sűrűsénövekedés korrigálására. Megvizsgálva ezt az összefüggést, láthatjuk, hogy a sűrűség, mind a rugalmassági modulussal,



mind hajlítószilárdsággal jól korrelál (8.10a-b. ábrák), a kapcsolat egyszerű lineáris függvénnyel jól leírható. E függvénykapcsolatok segítségével kiszámíthatjuk a beállítási szinteken várható rugalmassági értékeket, és újabb, a faktorok hatására vonatkozó elemzéseket végezhetünk.

A sűrűség (x) és rugalmassági tulajdonságok (y) regressziós egyenletei:

**MOE:**

$$y_1 = 34,09 \cdot x - 7706,9; \quad R^2 = 0,8079$$

$$y_2 = 31,06 \cdot x - 7563,4; \quad R^2 = 0,9098$$

$$y_3 = 32,47 \cdot x - 9406,5; \quad R^2 = 0,9539$$

$$y_4 = 35,92 \cdot x - 10901,2; \quad R^2 = 0,9843$$

$$y_5 = 26,73 \cdot x - 5336,7; \quad R^2 = 0,7751$$

$$y_6 = 34,09 \cdot x - 1287,8; \quad R^2 = 0,8596$$

$$y_7 = 36,46 \cdot x - 12926,1; \quad R^2 = 0,8719$$

$$y_8 = 26,39 \cdot x - 3642,8; \quad R^2 = 0,8971$$

$$y_9 = 21,64 \cdot x + 242,5; \quad R^2 = 0,8079$$

**MOR:**

$$y_1 = 0,356 \cdot x - 131,09; \quad R^2 = 0,8885$$

$$y_2 = 0,492 \cdot x - 253,29; \quad R^2 = 0,9325$$

$$y_3 = 0,401 \cdot x - 200,11; \quad R^2 = 0,9303$$

$$y_4 = 0,421 \cdot x - 204,61; \quad R^2 = 0,6732$$

$$y_5 = 0,555 \cdot x - 304,38; \quad R^2 = 0,7700$$

$$y_6 = 0,228 \cdot x - 37,21; \quad R^2 = 0,6881$$

$$y_7 = 0,513 \cdot x - 277,79; \quad R^2 = 0,8587$$

$$y_8 = 0,219 \cdot x - 40,49; \quad R^2 = 0,7526$$

$$y_9 = 0,246 \cdot x - 67,95; \quad R^2 = 0,7656 \quad [8.10-27.]$$

A regressziós függvények illeszkedése különösen a rugalmassági modulus esetén mondható jónak, de a determinációs együtthatók a hajlítószilárdságnál is elfogadható értékeket mutatnak. A lineáris függvénykapcsolatok segítségével – a kísérleti beállításoknak megfelelő sűrűségeknél – kiszámított rugalmassági értékeket tartalmazza a 8.8. táblázat. A korrekció a hajlítási jellemzők általános csökkenését eredményezte, de a 6. beállítás még így is kimagasló értékeket mutat.

**8.8. táblázat A sűrűség tervezett beállítási szintje szerint korigált rugalmas tulajdonságok**

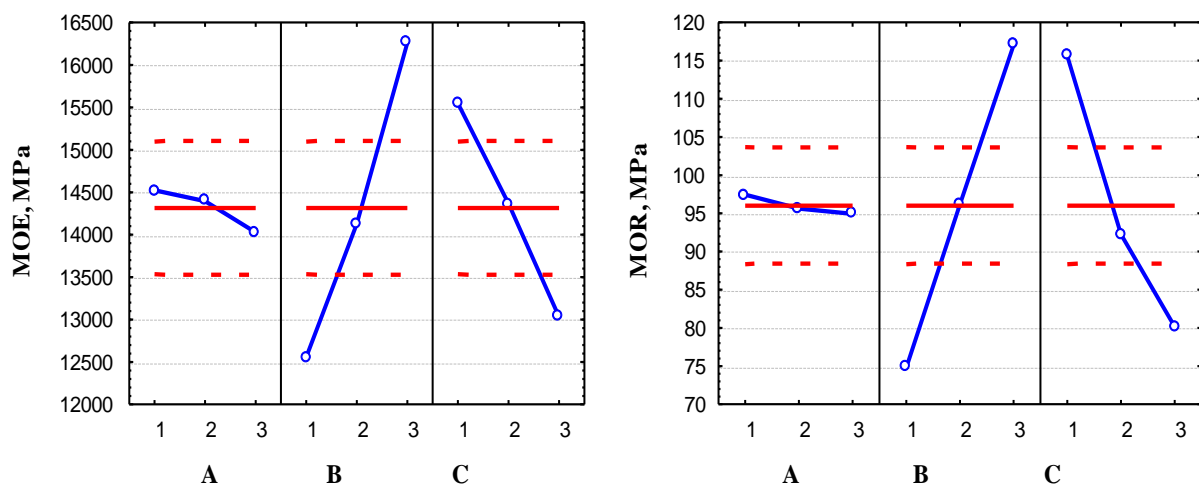
Standard beállítás	Elkészítés. sorrendje	Faktor			Sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	MOE, MPa	MOR, MPa
		A	B	C			
1	4	1	1	1	650	14449,0	100,26
2	5	1	2	2	700	14176,3	91,43
3	8	1	3	3	750	14946,6	100,67
4	1	2	1	2	650	12449,8	68,72
5	6	2	2	3	700	13373,0	84,40
6	2	2	3	1	750	17363,9	133,76
7	7	3	1	3	650	10771,2	55,41
8	3	3	2	1	700	14833,3	112,78
9	9	3	3	2	750	16474,8	116,61

A korigált hatásokat elemezve kitűnik, hogy azok nagysága jelentősen növekedett az eredeti hatásokhoz képest (lásd 8.9. táblázat), ami a sűrűség-beállítási pontatlanság mesterséges megszüntetésének és ennek következményeként a variációs intervallum növekedésének köszönhető. Kisebb mértékben ugyan, de nőtt a szórások nagysága is.

A korigált hatásdiagramokon (8.11. ábra) az eredetihez hasonló tendenciák figyelhetők meg, kivételt képez a hajlítószilárdságnál a sűrűség négyzetes hatásának enyhe csökkenése. A reziduális négyzetösszegek csökkenése a konfidencia-intervallum szűkülését eredményezi, ami a B és C faktorok hatását még jobban kiemeli. Ehhez természetesen hozzájárul a variációs intervallum növekedése is.

## 8.9. táblázat A faktorok korrigált hatása

Faktor	Szint	MOE, MPa				MOR, MPa			
		Átlag	Hatás	Szórás	Hiba	Átlag	Hatás	Szórás	Hiba
A	1	14524	208,7	390,6	8,67	97,5	1,45	5,22	1,002
	2	14396	80,3	2611,8	22,42	95,6	-0,38	33,94	2,556
	3	14026	-288,9	2936,2	23,77	94,9	-1,07	34,28	2,568
B	1	12557	-1758,7	1841,2	18,82	74,8	-21,20	23,03	2,105
	2	14128	-187,8	731,4	11,86	96,2	0,20	14,78	1,687
	3	16262	1946,4	1222,7	15,34	117,0	21,01	16,55	1,785
C	1	15549	1233,4	1583,7	17,46	115,6	19,60	16,92	1,805
	2	14367	51,7	2019,2	19,71	92,3	-3,75	23,95	2,147
	3	13030	-1285,1	2108,7	20,15	80,2	-15,84	22,92	2,100
Átlag		<b>14315</b>				<b>96,0</b>			



8.11. ábra A korrigált faktorszintekhez tartozó hatásdiagramok

Az eredeti adatok kiértékeléséhez hasonlóan, a korrigált értékekre is elvégeztem a varianciaanalízist, ennek eredményeit a 8.10. táblázat összegzi. Látható, hogy a B és C faktorok lineáris hatása itt már szignifikánssá válik, és az A faktor szórásnégyzetének a maradék szórásnégyzettel való egyesítése után végzett varianciaanalízis a lapsűrűség és végeselék-tartalom lineáris hatásának jelentőségét még jobban megerősíti.

## 8.10. táblázat ANOVA táblázatok a korrigált értékekre (a – MOE; b – MOR)

a.)

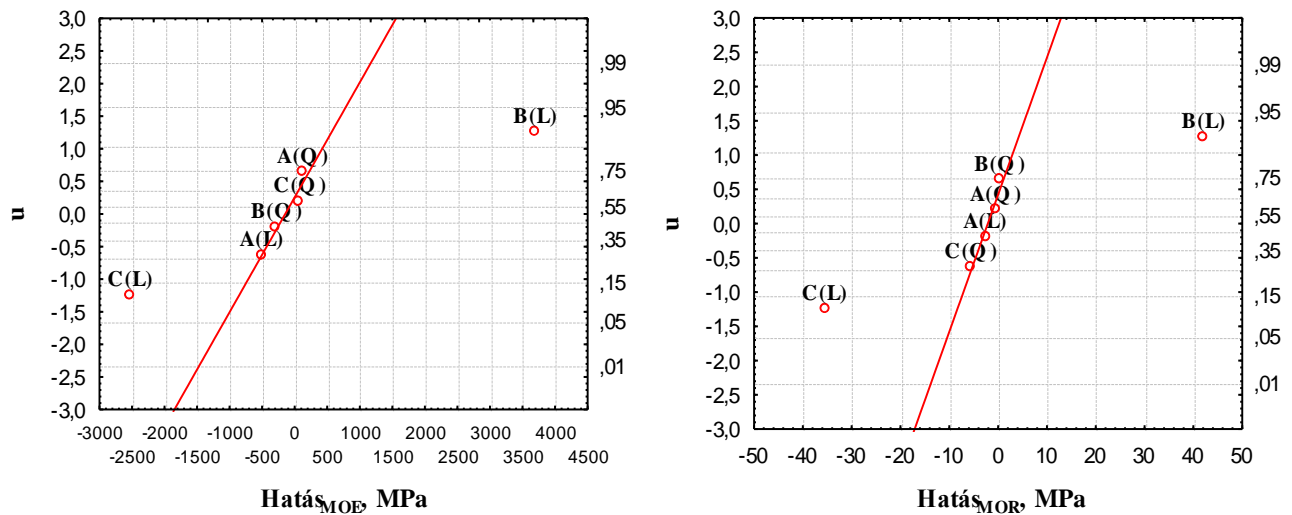
Hatás	SS	df	MS	F	p	F*	p*
A (L)	371353	1	371353	0,81308	0,462381	-	-
A (Q)	28988	1	28988	0,06347	0,824618	-	-
B (L)	20591616	1	20591616	45,08532	<b>0,021468</b>	62,69369	<b>0,001377</b>
B (Q)	158694	1	158694	0,34746	0,615272	0,48316	0,525258
C (L)	9514130	1	9514130	20,83118	<b>0,044803</b>	28,96693	<b>0,005761</b>
C (Q)	12008	1	12008	0,02629	0,886089	0,03656	0,857675
Maradék	913451	2	456726				
Teljes	31590240	8					
Maradék*	1313792	4	328448				

\* - az A faktor hatásának a maradék négyzetösszegbe történő bevonása után végzett varianciaanalízis F-próbastatisztikai és a hozzá tartozó valószínűségei

b.)

Hatás	SS	df	MS	F	p	F*	p*
A (L)	9,517	1	9,517	0,21567	0,688008	-	-
A (Q)	0,646	1	0,646	0,01463	0,914781	-	-
B (L)	2672,557	1	2672,557	60,56602	<b>0,016113</b>	108,6239	<b>0,000479</b>
B (Q)	0,178	1	0,178	0,00404	0,95508	0,0073	0,936225
C (L)	1883,903	1	1883,903	42,69338	<b>0,022631</b>	76,5697	<b>0,000940</b>
C (Q)	63,34	1	63,34	1,43541	0,353603	2,5744	0,183874
Maradék	88,253	2	44,126				
Teljes	4718,393	8					
Maradék*	98,415	4	24,604				

A faktorhatások Gauss-papíros ábrázolása (8.12. ábra) továbbra is a sűrűség és végeselék-tartalom lineáris hatását mutatja jelentősnek, a valószínűségek nagyságrendjében azonban számottevő különbségek észlelhetők.



8.12. ábra A korrigált faktorhatások Gauss-papíros ábrázolása

A faktorok optimális beállítását az A és C faktor 1-es szintje, a B faktor 3-as szintje jelenti. Ekkor a rugalmassági modulus becsült értéke 24%-kal, a hajlítószilárdságé pedig 44%-kal növekedik az átlaghoz képest (8.11. táblázat). Az optimális beállítás-kombináció nem szerepel a kísérleti tervben.

8.11. táblázat Az optimális faktorkombinációkhoz tartozó hatások

Faktor	MOE, MPa		MOR, MPa	
	Szint	Hatás	Szint	Hatás
A	1	208,7	1	1,45
B	3	1946,4	3	21,01
C	1	1233,4	1	19,60
Becsült érték		<b>17703,8</b>		<b>138,05</b>

A regresszióval korrigált rugalmassági értékekre illesztett másodfokú polinomok paraméterei a faktorok kódolt értékeire kiszámítva, a következőképpen módosulnak:

$$\hat{y}_{MOE} = 14259,4 - 248,8 \cdot A^2 - 120,4 \cdot A^2 + 1852,6 \cdot B + 281,7 \cdot B^2 - 1259,2 \cdot C - 77,5 \cdot C^2 \quad [8.28.]$$

$(R^2 = 0,971; R^2_{adj} = 0,884)$

$$\hat{y}_{MOR} = 92,07 - 1,26 \cdot A + 0,57 \cdot A^2 + 21,11 \cdot B - 0,3 \cdot B^2 - 17,72 \cdot C + 5,63 \cdot C^2 \quad [8.29.]$$

$(R^2 = 0,981; R^2_{adj} = 0,925)$

Ugyanezek a regressziós függvények a kódolatlan értékekre:

$$\hat{y}_{MOE} = 44523,29 + 131,1 \cdot R_t - 13,38 \cdot R_t^2 - 120,69 \cdot \rho_l + 0,1127 \cdot \rho_l^2 - 44,17 \cdot V_t - 0,124 \cdot V_t^2 \quad [8.30.]$$

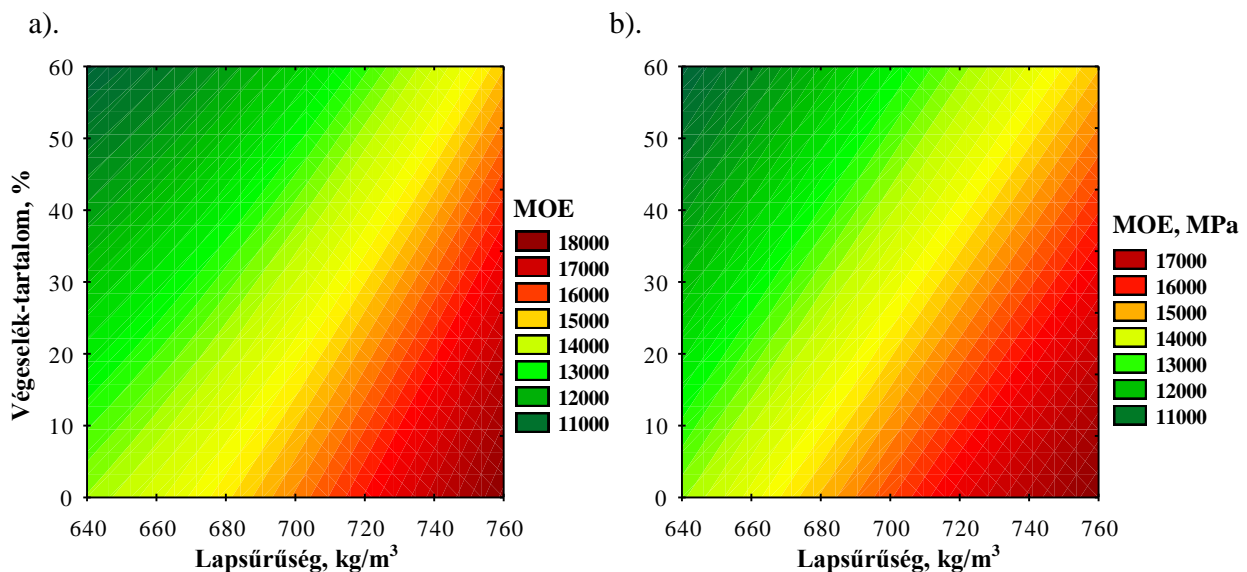
$$\hat{y}_{MOR} = -231,2 - 1,43 \cdot R_t + 0,063 \cdot R_t^2 + 0,589 \cdot \rho_l - 0,00012 \cdot \rho_l^2 - 1,159 \cdot V_t + 0,009 \cdot V_t^2 \quad [8.31.]$$

Az eredeti értékek elemzéséhez hasonlóan a korrigált adatok varianciaanalízise is a ragasztóanyag-tartalom, illetve lapsűrűség és végeselék-tartalom négyzetes hatásainak véletlenszerűségét jelzik. Ennélfogva a [8.30.], [8.31.] regressziós egyenletekből a felsorolt jelentéktelen hatások elhagyhatók:

$$\hat{y}_{MOE} = -10361 + 37,05 \cdot \rho_l - 50,37 \cdot V_t \quad [8.32.]$$

$$\hat{y}_{MOR} = -187,75 + 0,422 \cdot \rho_l - 0,709 \cdot V_t \quad [8.33.]$$

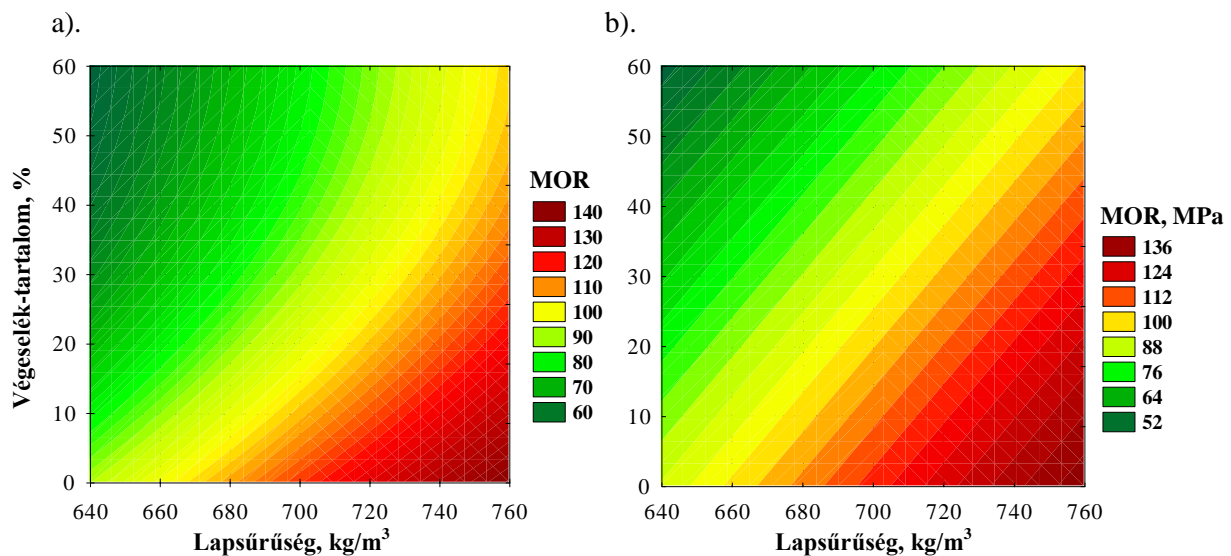
A fenti regressziós függvények segítségével ismételten előállíthatók azok a válaszfelületek, amelyek a rugalmassági jellemzők változását a kiválasztott tényezők függvényében jelenítik meg. A rugalmassági modulus változásának szintvonalas ábrája látható a 8.13. ábrán. Az első ábra (a) a teljes modellre illesztett válaszfelületet mutatja, a második (b) a jelentéktelen hatások elhagyásával kapott regressziós modellt.



**8.13. ábra A hajlítórugalmassági modulus változásának szintvonalas ábrázolása a lapsűrűség és végeselék-tartalom függvényében ( $R_t=8\%$ ); a – teljes modell; b- csökkentett modell**

A két válaszfelület között nem tapasztalható jelentős különbség, tehát az eredményfelület lineáris függvénnyel (síkkal) is kellő pontossággal becsülhető. A teljes modellre kapott felület szintvonalai kevésbé görbültek, mint az eredeti értékek válaszfelületének (8.5. ábra) szintvonalai, ami a négyzetes hatások vagy a faktorok között fellépő kölcsönhatások kisebb voltára utal. Magas rugalmassági modulus értékek nagy lapsűrűségnél, alacsony végeselék-tartalomnál és már mérsékelt műgyanta felhasználással is biztosíthatók.

A hajlítószilárdság szintvonalas ábráinak elemzésekor (8.14. ábra) látható, hogy a modellredukálás a becslés jóságát mérsékli, hiszen különösen a magasabb végeselék-tartalom tartományban a matematikai modell redukálásával az erősen görbült szintvonalak „kiegyenesednek”. A nagy szilárdsági értékek elérését célzó faktorbeállítások a rugalmassági modulusához hasonlóak, különbség csupán a szintvonalak ellentétes görbületében tapasztalható.



8.14. ábra A hajlítószilárdság változásának szintvonalas ábrázolása a lapsűrűség és végeselék-tartalom függvényében ( $R_f=8\%$ ); a – teljes modell; b- csökkentett modell

Szerkezeti célú termék fejlesztéséről lévén szó, az egyes kísérleti beállítások középértékén túl, fontos a rugalmassági tulajdonságok jellemző (karakterisztikus) értékeinek megadása, ugyanis a valószínűségelméleten alapuló méretezési módszer a korábbiaktól eltérően nem csupán biztonsági tényezőkkel, hanem az előfordulás valószínűségével is korlátozza a tönkremenetel kockázatát. Így ez a méretezési eljárás a jellemző értékeket használja a tervezéshez, melyet további biztonsági tényezőkkel módosít (anyagtulajdonságok, terhelési idők, használati körülmények tényezői). mert Jellemző értékek ( $R_k$ ) a mintákra kapott eredményekből kiszámított azon küszöbértéket nevezzük, melynél a kisebb értékek előfordulásának valószínűsége 5% (azaz az alulmaradás valószínűsége 5%). A minősítő szilárdsági értékek ismerete azért is fontos, mert ez alapján lehet a termékeket kategorizálni, illetve az alkalmazási területeket meghatározni. A kategorizálás a vizsgált jellemző és a minősítő szilárdság korrelációjától is függ (Wittmann, 2000). Alapkövetelmény, hogy ez a szorosság, vagyis a korrelációs együttható elérje a 0,8 értéket. Jelen esetben a sűrűség, a rugalmassági modulus és a hajlítószilárdság mért értékei 95%-os megbízhatósággal nem mondanak ellent annak a hipotézisnek, hogy az adatok normális eloszlásból származnak, így a három tulajdonság 5%-os kvantiliseit a következő képletekkel számíthatjuk ki:

$$MOE_{0,05} = \overline{MOE} - t_{(0,95;n-1)} \cdot s_{MOE} \quad [8.34.]$$

$$MOR_{0,05} = \overline{MOR} - t_{(0,95;n-1)} \cdot s_{MOR} \quad [8.35.]$$

$$\rho_{0,05} = \overline{\rho} - t_{(0,95;n-1)} \cdot s_{\rho} \quad [8.36.]$$

Ahol:  $\overline{MOE}, \overline{MOR}, \overline{\rho}$  - az egyes kísérleti beállításokra előállított lapok próbatestein mért átlagos rugalmassági modulus, hajlítószilárdság és sűrűség

$s_{MOE}, s_{MOR}, s_{\rho}$  - a rugalmassági modulus, hajlítószilárdság és sűrűség lapon belüli átlagos szórása

$t_{(0,95;n-1)}$  - a próbatestek számától (n) függő Student szám 95%-os megbízhatósági szinten,  
 $t_{(0,95;7)} = 1,895$

A kísérletsorozatban előállított kompozitok rugalmassági tulajdonságainak és sűrűségének 5%-os kvantiliseit foglalja össze a 8.12. táblázat, ahol a számításokhoz az egyes kísérleti

beállítások átlagos szórását használtam. A tulajdonságok értékeléséhez és a termék felhasználási területeinek meghatározásához érdemes a kapott értékeket összehasonlítani a hasonló terméktípusok megfelelő értékeivel, vagy esetleg a szerkezeti faanyagok különböző szilárdsági osztályaihoz tartozó jellemző küszöbértékeivel. Utóbbi esetben a szerkezeti faanyagok vonatkozó szabványban (MSZ EN 338) előírt küszöbértéke képezi az úgynevezett minősítő tulajdonságot. Ha például a szilárdság jellemző értéke egyenlő vagy nagyobb a minősítő értéknél, az anyag szilárdsági szempontból megfelel.

**8.12. táblázat A hajlítórugalmassági tulajdonságok 5%-os kvantilisei**

Beállítás	Faktor			$\rho_{0,05}$ , kg/m <sup>3</sup>	MOE <sub>0,05</sub> , MPa	MOR <sub>0,05</sub> , MPa
	A	B	C			
1	1	1	1	576,0	12132,0	68,66
2	1	2	2	641,5	12258,3	71,04
3	1	3	3	655,1	11905,7	61,84
4	2	1	2	579,2	10296,4	40,17
5	2	2	3	644,8	11363,2	68,50
6	2	3	1	661,9	14451,7	95,54
7	3	1	3	607,4	9659,8	44,03
8	3	2	1	626,9	12334,8	77,73
9	3	3	2	677,9	13868,0	82,54

Az előállított furnérkompozit termékekhez hasonló, a kereskedelemben is megtalálható épületfa kompozitok tulajdonságait és jellemző hajlítószilárdsági értékeit tartalmazza a 8.13. táblázat:

**8.13. táblázat Néhány műszaki fatermék rugalmas jellemzője**

Tulajdonság	Termék			
	KERTO-S LVL, Rétegelt furnérfa	Parallam PSL 2.0E, Párhuzamos szál-furnérfa	TimberStrand LSL 1.3E, Rétegelt szál-forgácsfa	Eurostrand OSB 8000 Irányított szál-forgács lemez
Alkotóelemek	furnér	szál-furnér	szál-forgács	szál-forgács
Elemek mérete, mm: - hosszúság - szélesség - vastagság	változó 1200 3,2	1200-2400 12 2,4-4,0	300 25-40 0,9	a fedőrétegben >150 4-30 0,7-0,9
Térfogati sűrűség, kg/m <sup>3</sup>	450-670	670	610-640	>600
Hajlítószilárdság (//), N/mm <sup>2</sup>	50	50 <sup>1</sup>	34 <sup>1</sup>	35
Hajl. rugalmassági modulus <sup>2</sup> , // N/mm <sup>2</sup>	13500	14500	10300	6500

<sup>1</sup> a megengedett szilárdsági értékekből visszszámolt jellemző érték

<sup>2</sup> átlagértékek

Az Eurocode 5 alapján a szilárdsági értékekből a karakterisztikus értéket a következő képlettel számíthatjuk ki:

$$x_d = k_{\text{mod}} \cdot x_k / \gamma_M; \quad [8.37.]$$

$x_d$  – tervezési érték

$x_k$  – jellemző érték

$k_{\text{mod}}$  – anyagjellemzőkre vonatkozó biztonsági tényező, faanyagokra  $k_{\text{mod}} = 1,3$

$\gamma_M$  – kitettségi osztály,  $\gamma_M = 0,5$  a 3. osztályra

A szerkezeti faanyagra vonatkozó szilárdsági osztályok lombos fafajokra vonatkozó jellemző értékeit a 8.14. táblázat ismerteti:

**8.14. táblázat Szilárdsági osztályok és jellemző értékek lombos fafajokra (MSZ EN 338 szerint)**

			D30	D35	D40	D50	D60	D70
Hajlítószilárdság	$f_{m,k}$	N/mm <sup>2</sup>	30	35	40	50	60	70
Rostirányú rugalmassági modulus középértéke	$E_{0,mean}$	N/mm <sup>2</sup>	10	10	11	14	17	20
Rostirányú rugalmassági modulus 5%-os kvantilise	$E_{0,05}$	kN/mm <sup>2</sup>	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Sűrűség	$q_k$	kg/m <sup>3</sup>	530	560	590	650	700	900
Sűrűség középértéke	$q_{mean}$	kg/m <sup>3</sup>	640	670	700	780	840	1080

Az új termék tulajdonságait a fenti táblázatokkal összehasonlítva megállapítható, hogy a lapok sűrűsége megegyezik a hasonló műszaki fatermékek sűrűségével, de egyik sem éri el a D60 szilárdsági osztály küszöbértékét. A legmagasabb értéket adó 6. kísérleti beállításnál a rugalmassági modulus 5%-os kvantilise megegyezik a párhuzamos szálfurnérfa átlagos rugalmassági modulusával, és meghaladja a D60 osztály küszöbértékét. Négy beállításnál a hajlítószilárdság jellemző értéke meghaladja a legmagasabb követelményszintet is. Összegzésként elmondható, hogy az előállított laptípusok a hasonló felépítésű műszaki fatermékekkel megegyező sűrűséget és hajlítórugalmassági modulusot mutatnak, hajlítószilárdságuk pedig még a szerkezeti faanyag legszigorúbb követelményét is képes teljesíteni.

Mivel a jellemző értékek kiszámításához a lapokon belüli ingadozások átlagát használtam, az 5%-os kvantilisokra elvégzett varianciaanalízis eredményei megegyeznek az átlagértékekre kapott adatokkal (lásd 8.6 táblázat). A regressziós egyenleteknél is eltérés csupán a szabad tagoknál jelentkezik, hiszen a felületillesztéshez felhasznált kísérleti pontokat tulajdonképpen egyenletesen eltoljuk egy alsóbb tartományba.

Az 5%-os kvantilisok kódolatlan értékeire illesztett regressziós modellek a következők:

$$\hat{y}_{MOE_{0,05}} = 7158,1 - 5,09 \cdot R_t - 1,19 \cdot R_t^2 - 10,28 \cdot \rho_l + 0,027 \cdot \rho_l^2 - 26,62 \cdot V_t - 0,266 \cdot V_t^2 \quad [8.38.]$$

$$\hat{y}_{MOR_{0,05}} = -1486,31 + 0,92 \cdot R_t - 0,048 \cdot R_t^2 + 4,19 \cdot \rho_l - 0,0028 \cdot \rho_l^2 - 0,835 \cdot V_t - 0,0077 \cdot V_t^2 \quad [8.39.]$$

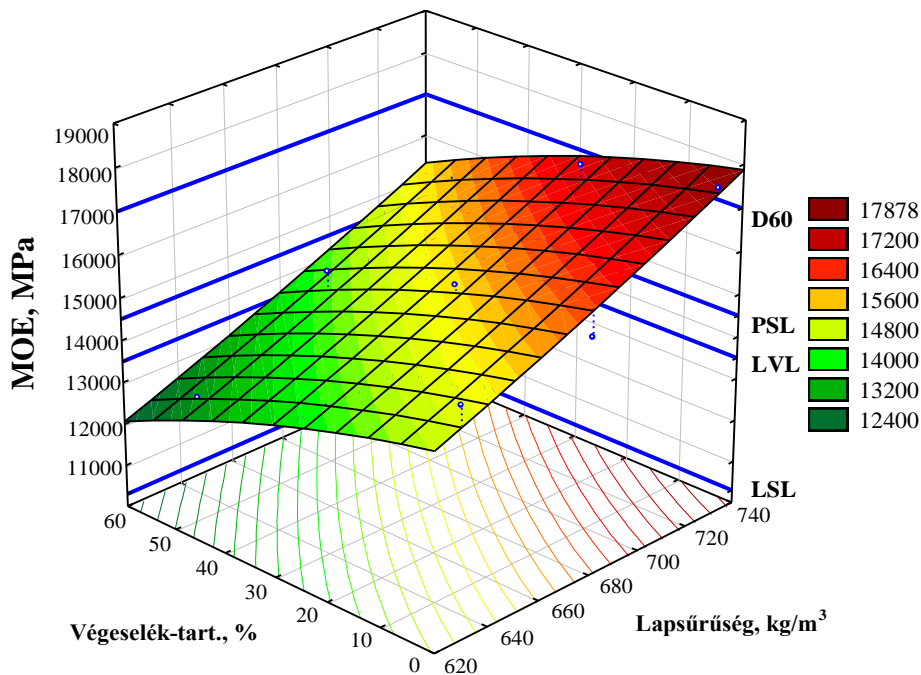
A faktorhatások szignifikanciáját figyelembe véve a fenti függvények az alábbi polinomokra egyszerűsíthetők:

$$\hat{y}_{MOE} = -5958,6 + 27,12 \cdot \rho_l - 39,93 \cdot V_t \quad [8.40.]$$

$$\hat{y}_{MOR} = -124,13 + 0,29 \cdot R_t - 0,45 \cdot V_t \quad [8.41.]$$

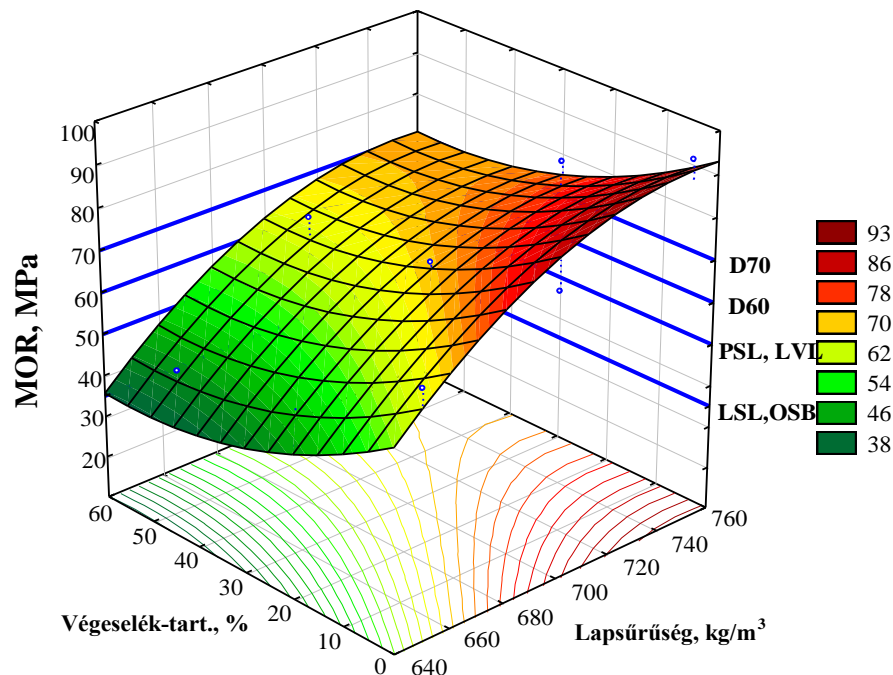
A teljes matematikai modellek felhasználásával elkészített válaszfelületek a 8.15-16. ábrákon, illetve a mellékletben láthatók, a z tengelyen a műszaki fatermékek és a szerkezeti faanyagok egyes szilárdsági osztályainak küszöbértékei is fel vannak tüntetve. Az ábrákon a ragasztóanyag-tartalom a 8%-os középértéken található.

A rugalmassági modulus átlagértékeinek válaszfelülete (8.15. ábra) alapján a párhuzamos szálfurnérfához és rétegelt furnérfához hasonló rugalmasságú színfurnérlapok már közepes sűrűségnél és közepes végeselék-tartalomnál is előállíthatók, a küszöbértékeket már széles tartományban lehet biztosítani. A lapsűrűség növelése lehetővé teszi a középréteg végeselék-tartalmának emelését anélkül, hogy a rugalmassági modulus csökkenne. A D60 szilárdsági osztályú faanyaggal egyenértékű furnérkompozit csak igen magas sűrűségnél és csekély végeselék-tartalomnál állítható elő.



8.15. ábra Az átlagos hajlítórugalmassági modulus válaszfelülete a lapsűrűség és a végeselék-tartalom változásának függvényében ( $A = 8\%$ )

A jellemző hajlítószilárdság lapsűrűség – végeselék-tartalom válaszfelülete (8.16. ábra) kissé csavarodott, ami bizonyos kölcsönhatások jelenlétére utal. A PSL, LVL jellemző hajlítószilárdságánál kisebb értékek csak  $660 \text{ kg/m}^3$  alatt és 30%-os végeselék-tartalom fölött érhetők el, ha a lapsűrűség  $720 \text{ kg/m}^3$  fölött van, a D70-es osztály küszöbértéke a végeselék-tartalom 0 – 60%-os variációs intervallumában bárhol biztosítható. A mellékletben található A – C, A – B válaszfelületek a ragasztóanyag jelentéktelen hatását jelzik. Például 25%-os végeselék-tartalomnál ahhoz, hogy a jellemző hajlítószilárdság elérje az  $50 \text{ MPa}$ -t a sűrűséget – a műgyanta mennyiségétől függetlenül – minimum  $660 \text{ kg/m}^3$ -re kell választani.  $700 \text{ kg/m}^3$  sűrűségű lapoknál a  $60 \text{ MPa}$  nagyságú jellemző hajlítószilárdság a ragasztó- és végeselék-tartalom variációs intervallumában akárhol biztosítható.



8.16. ábra A jellemző hajlítószilárdság válaszfelülete a lapsűrűség és a végeselék-tartalom változásának függvényében ( $A = 8\%$ )



### 8.4. Optimalizálás

A hajlítási tulajdonságok külön-külön történő vizsgálatakor láthattuk, hogy a rugalmassági modulus és a hajlítószilárdság azonos faktorkombinációira elkészített válaszfelületek hasonló jellegűek, de az optimális tartományok szélső értékei sok esetben különböznek. Ezért célszerű egy olyan összetett célfüggvényt bevezetni, amely magába foglalja az összes vizsgált tulajdonságot. Az új furnérkompozit sűrűségének, rugalmassági modulusának és hajlítószilárdságának együttes optimalizálására egy olyan kívánatossági függvény (Kemény, 2000) definiálása indokolt, amely magába foglalja a mindhárom tulajdonsággal szemben támasztott követelményeket. Mivel a szerkezeti faanyag szilárdsági osztályainak küszöbértékei a legszigorúbbak, ezért a követelményszinteket az egyes szilárdsági osztályok 8.14. táblázat szerinti küszöbértékeinek megfelelően vettem. E szerint a függvényérték 0, ha a legkisebb osztálynál alacsonyabbak a minőségi jellemzők és 1, ha a D70 osztály előírt értékeit meghaladják. A sűrűség és rugalmassági modulus értékei nem egyenletesen növekednek, ezért a kívánatossági függvény előállításakor ezt úgy vettem figyelembe, hogy a D50 osztálynak megfelelő értékek alatt és fölött eltérő meredekségű egyeneseket határoztam meg.

Az egyes tulajdonságok kívánatossági függvényei a következők:

Sűrűségre:

$$d_{\rho_{0.05}}(\hat{y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{ha } \hat{y}_i(x) < 530 \text{ kg/m}^3 \\ \frac{\hat{y}_i(x) - 530}{2 \cdot (650 - 530)} & \text{ha } 530 \leq \hat{y}_i(x) \leq 650 \text{ kg/m}^3 \\ \frac{\hat{y}_i(x) - 650}{2 \cdot (900 - 650)} + 0,5 & \text{ha } 650 \leq \hat{y}_i(x) \leq 900 \text{ kg/m}^3 \\ 1.0 & \text{ha } \hat{y}_i(x) > 900 \text{ kg/m}^3 \end{cases} \quad [8.42]$$

Rugalmassági modulusra (átlagértékek):

$$d_{MOE}(\hat{y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{ha } \hat{y}_i(x) < 10 \text{ GPa} \\ \frac{\hat{y}_i(x) - 10}{2 \cdot (14 - 10)} & \text{ha } 10 \leq \hat{y}_i(x) \leq 14 \text{ GPa} \\ \frac{\hat{y}_i(x) - 14}{2 \cdot (20 - 14)} + 0,5 & \text{ha } 14 \leq \hat{y}_i(x) \leq 20 \text{ GPa} \\ 1.0 & \text{ha } \hat{y}_i(x) > 20 \text{ GPa} \end{cases} \quad [8.43.]$$

Hajlítószilárdságra:

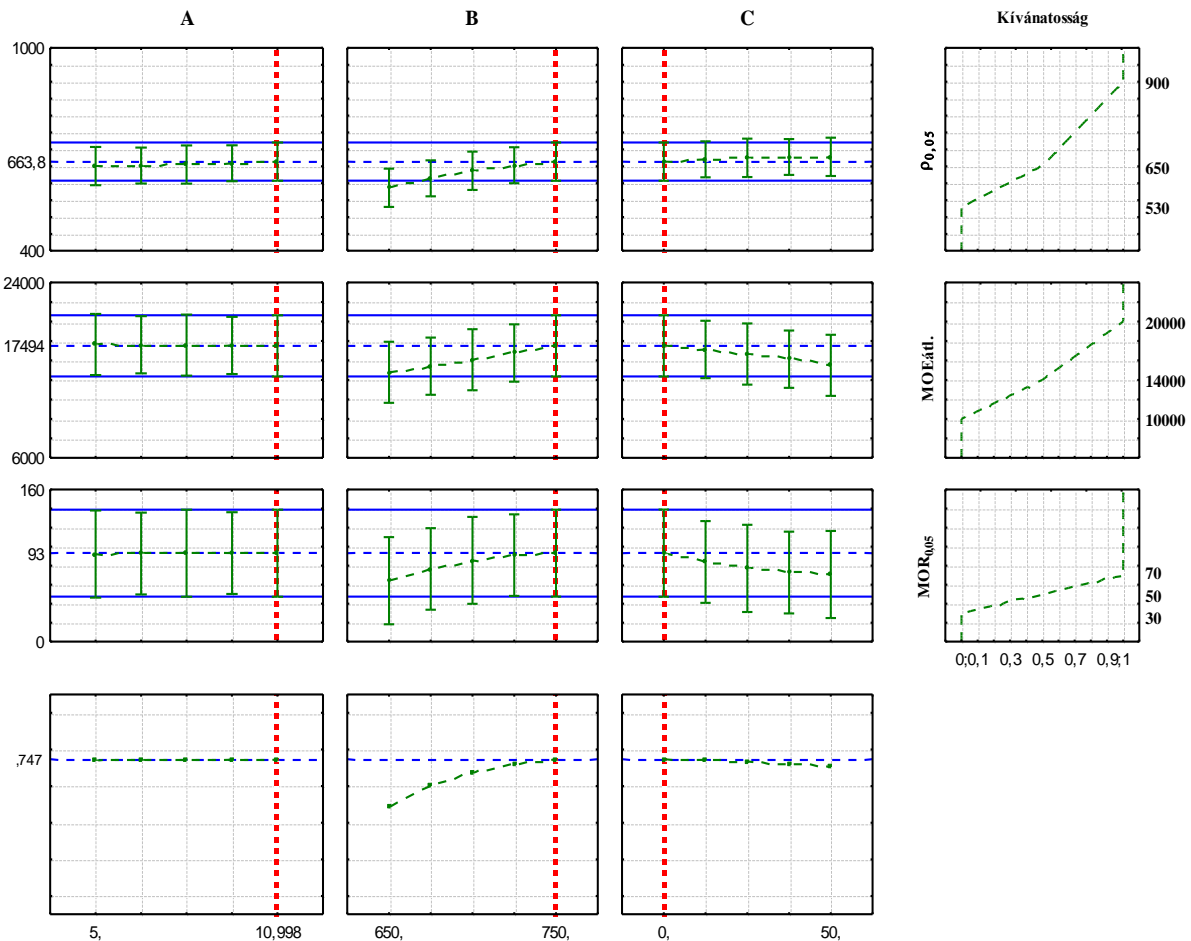
$$d_{MOR_{0.05}}(\hat{y}_i) = \begin{cases} 0 & \text{ha } \hat{y}_i(x) < 30 \text{ MPa} \\ \frac{\hat{y}_i(x) - 30}{40} & \text{ha } 30 \leq \hat{y}_i(x) \leq 70 \text{ MPa} \\ 1.0 & \text{ha } \hat{y}_i(x) > 70 \text{ MPa} \end{cases} \quad [8.44.]$$

Az összetett célfüggvény az egyes komponensekre vonatkozó d függvényértékek geometriai átlaga:

$$D = \left( \prod_{i=1}^k d_i \right)^{\frac{1}{S}} = [d_{\rho}(\hat{y}_i) \cdot d_{MOE}(\hat{y}_i) \cdot d_{MOR}(\hat{y}_i)]^{\frac{1}{3}} \quad [8.45.]$$

A fenti összefüggések segítségével meghatározhatjuk azt az optimális faktorszint-

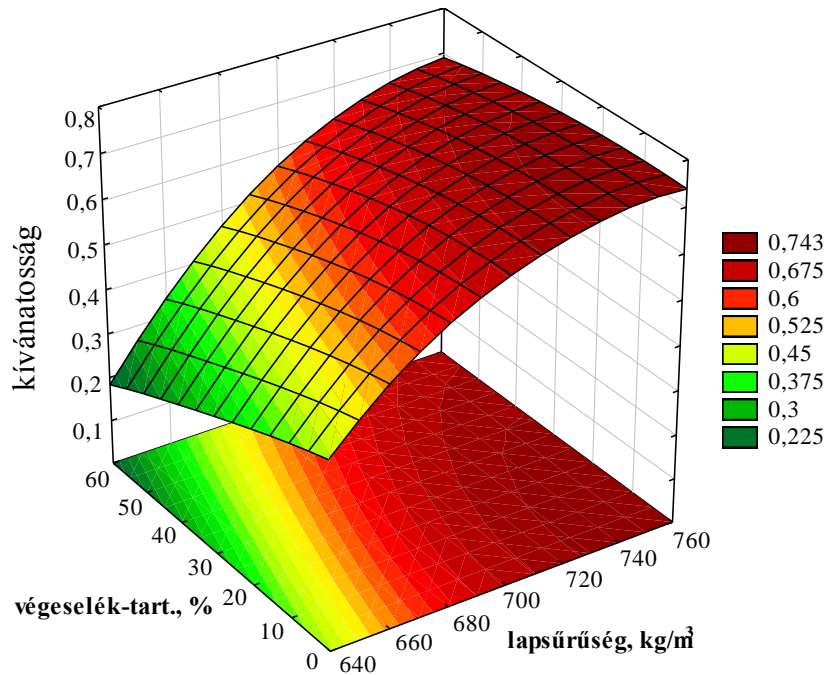
kombinációt, amelyre az összetett célfüggvény a maximális értéket eredményezi. A 0,5 körüli kívánatossági értékek tulajdonképpen megegyeznek a PSL, LVL értékeivel, így minden olyan faktorszint-kombináció, ami ezt túllépi, teljesíti a két műszaki fatermék követelményeit. A becslt válaszjellemzők változásának és a kívánatosságnak kapcsolatát a következő ábra szemlélteti:



8.17. ábra A becslt értékek és a kívánatosság kapcsolata

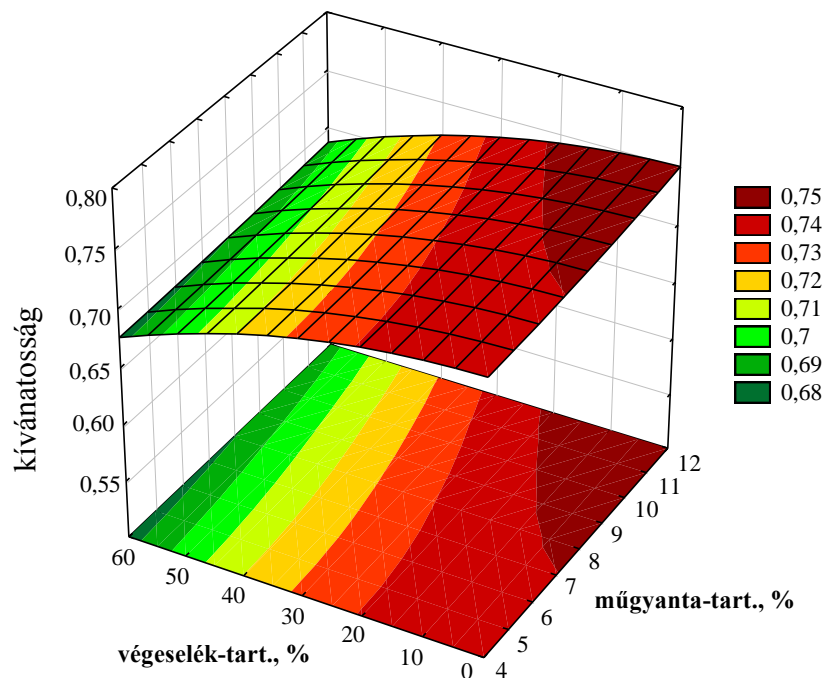
A jobboldalon az egyes minőségi jellemzők kívánatossági függvényei láthatók. A sűrűségnél és rugalmassági modulusnál az eltérő meredekségű szakaszok jelzik a szilárdsági osztályok küszöbértékei közötti különbségek növekedését. A baloldali grafikonok a válaszjellemzők becslt válaszfelületeinek metszetei a faktorok síkjában, a becsléshez a független változók optimális beállítási értékeit alkalmaztam ( $A = 11\%$ ;  $B = 750 \text{ kg/m}^3$ ;  $C = 0\%$ ). A grafikonok a becslési értékek konfidencia intervallumait is tartalmazzák. A kiválasztott faktorszintekhez tartozó becslt értékeket a jobboldali kívánatossági függvényekhez viszonyítva látható, hogy a hajlítórugalmassági modulusnál a konfidencia intervallum alsó határértéke meghaladja a 0,5-öt, míg a sűrűségnél az intervallum felső határértéke sem éri el az 1-es kívánatossági szintet. A hajlítószilárdság konfidencia intervalluma igen széles, ez a becslések pontosságát rontja. Az utolsó grafikon sor az összetett kívánatossági függvény változását mutatja mindhárom független változóra, jelezve a maximális kívánatosság eléréséhez szükséges beállítási értékeket. A kívánatosság 0,747 maximális értékét az  $R_t = 10,998\%$ ,  $\rho = 750 \text{ kg/m}^3$  és  $V_t = 0\%$  faktorszint kombinációra kapjuk, ami megegyezik a faktorhatások alapján is meghatározott optimális értékekkel. A független változók különböző kombinációinak hatását a

kívánatosság változására, az előző elemzésekhez hasonlóan, válaszfelületekkel ábrázolhatjuk. A 8.18. ábra a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának a kívánatosságra gyakorolt hatását mutatja. A maximum közeli értékek a 720 – 760 kg/m<sup>3</sup> lapsűrűség és 0 – 30% végeselék-tartalom tartományban találhatók.



**8.19. ábra Kívánatossági válaszfelület a lapsűrűség és végeselék-tartalom változásának függvényében**

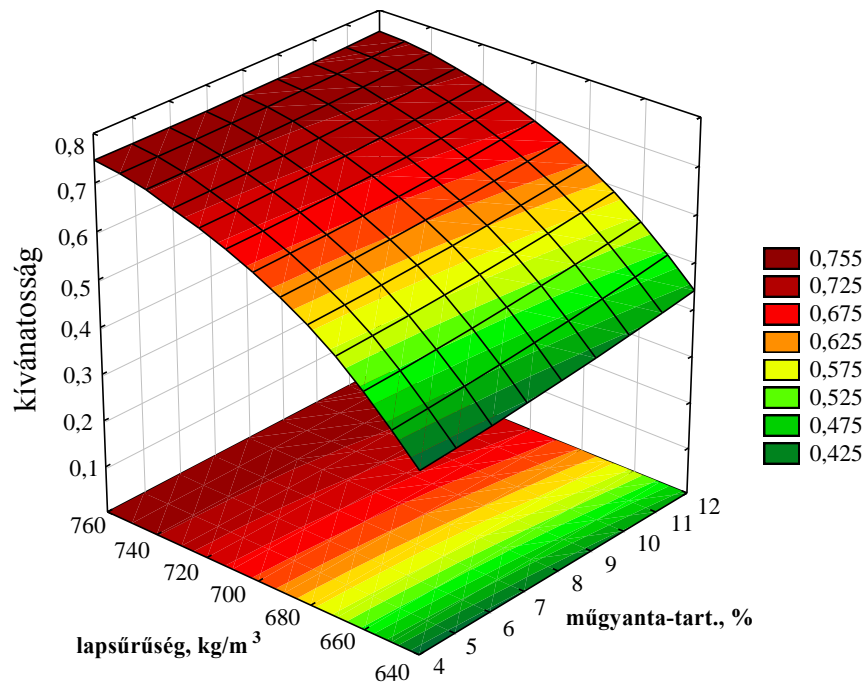
A végeselék- és ragasztóanyag-tartalom kívánatosságra gyakorolt hatását ábrázolja 8.19. ábra, amely szerint a középrétegben akár 20% végeselék is felhasználható a kívánatosság jelentős csökkenése nélkül. A gazdasági megfontolások miatt alacsony ragasztóanyag felhasználás indokolt, de 10% végeselék-tartalom fölött a műgyanta-tartalom hatása



**8.18. ábra Kívánatossági válaszfelület a végeselék-tartalom és ragasztóanyag-tartalom változásának függvényében**

jelentéktelen, ezért a variációs intervallum alsó tartományából választhatunk értéket.

A 8.20. ábra a lapsűrűség és ragasztóanyag-tartalom változásának a kívánatosságra gyakorolt hatását mutatja. Megállapítható, hogy 0,7 fölötti kívánatosság csak 700 kg/m<sup>3</sup> fölötti lapsűrűségnél biztosítható, ekkor a ragasztóanyag-tartalom széles skálán mozoghat anélkül, hogy a kívánatossági értékeket jelentősen befolyásolná.



**8.20. ábra Kívánatossági választfelület a lapsűrűség és ragasztóanyag-tartalom változásának függvényében**

Mindhárom kívánatossági választfelületre érvényes, hogy az optimum közelében a felület viszonylag lapos, ami azt jelenti, hogy a független változók optimális értékeitől való kisebb eltérés a termék kívánatossági értékeit jelentősen nem csökkenti. Ha a sűrűség jellemző értékeit nem vesszük figyelembe, az értékelésnél a kívánatosság akár a 0,89-et is elérheti.

## 9. Az eredmények összefoglalása

Az európai fávagyon alakulását vizsgáló felmérések és jövőre vonatkozó becslések az ipar számára rendelkezésre álló alapanyagbázis mennyiségi és minőségi változását mutatják. Az előrejelzések szerint a jövőben elégséges mennyiségű alapanyag áll rendelkezésre, de az erdők termelte fa minősége, mérete és fafajösszetétele jelentős változásokon megy át, ami szükségszerűen a feldolgozási technológiák változását is maga után vonja. Ennek megfelelően a kutatás, fejlesztés a megváltozott erőforrások optimális és hatékony felhasználására, új, rugalmas és környezetbarát technológiák kidolgozására, a feldolgozás vagy az elhasználódás során keletkező hulladékok hasznosítására kell összpontosuljon. Az erőforrások megőrzésének egy másik fontos lehetősége a környezeti hatások ingadoztató hatásával szemben ellenálló, úgynevezett robusztus termékek gyártása. A fenti követelményeknek megfelelő termékek fejlesztési törekvéseinek eredményeként, olyan új műszaki fatermékek (LVL, PSL, LSL, OSB), fa-műanyag kompozitok, módosított faanyagok jelentek meg, amelyek képesek a fának, mint megújuló erőforrásnak a leghatékonyabb felhasználására, a faalapú hulladékok újrahasznosítására. Ilyen hasznosítható másodnyersanyagnak minősülhet a színfurnérgyártás során keletkező hulladék is, hiszen a fa alapanyagbázis legjobb alakú és szövetszerkezeti tulajdonságokkal bíró választékából kerül ki.

Az elvégzett kísérleti-fejlesztési munka a színfurnérgyártás ollózási eselékének hasznosítási lehetőségeit vizsgálja, illetve az elkészített új termékek mechanikai, fizikai tulajdonságait befolyásoló paraméterek hatását elemzi. A fejlesztés gazdasági szempontból is indokolt, hiszen az európai színfurnérgyártás során jelentős eselékennyiség keletkezik.

A fejlesztés első szakaszában három, a színfurnérgyártáshoz az Apalache (USA) régióban gyakran használt fafaj keverékét alkalmaztam, amiből különböző összetételű és réteg-felépítésű lapok készültek. Az elkészített kompozitok rugalmas jellemzői bizonyították, hogy – akár más strand típusú anyaggal keverve, akár önmagában felhasználva – a színfurnérgyártás ollózási hulladékából építőipari alkalmazásokra is megfelelő termékek állíthatók elő. Ezen termékek tulajdonságai a keverési arányok és a szálanyagok irányítottságának változtatásával befolyásolhatók, szabályozhatók. A késztermék előállításán kívül ultrahangos és statikus módszerekkel vizsgáltam két hazai fafajból, bükkből és hegyi juharból készült színfurnérok hajlítórugalmassági modulusának anizotrópiáját. Megállapítottam a hangsebesség és a dinamikus rugalmassági modulus rostiránytól függő értékeit és ezen értékek eloszlásjellemzőit. A hangsebesség és rugalmassági modulus ortotrópiáját gyakorlatilag egyformán jól írja le az általánosított Hankinson-formula és a Szalai által levezetett, tenzor-elméleten alapuló összefüggés is. A vizsgálati eredmények alapján a statikus hajlítási vizsgálat papíriparban alkalmazott szabványos eljárása a statikus rugalmassági modulusra a reálisnál alacsonyabb értékeket ad, a fóliászerű anyagokra, mint például a színfurnér is, reprodukálható minősítést tesz lehetővé. A mérés pontosságát a késelési repedések átlagos mélységének figyelembe vételével növelhetjük. A színfurnér lapok bevonása műgyantával, és hőprésben való kikeményítése a kisméretű egyedi farészecskék kompozit termékben mutatkozó tulajdonságainak megismerését célozta. Megállapítható, hogy a fafaj a hangsebességet csak a rosttal közel párhuzamos irányban (0-15°) befolyásolja, ennél nagyobb rostszőgeknél a műgyanta hatása érvényesül. A kezelt furnér látszólagos dinamikus rugalmassági modulusa a technológiai hatásoknak betudhatóan nagyobb, mint a kezeletlené. A növekedés – a kísérleteinkben alkalmazott kezelés mellett – a rostiránnyal bezárt szög függvényében növekszik, a növekedés első megközelítésben lineáris függvénnyel jellemezhető. A vizsgált két fafajra a dinamikus rugalmassági modulus kísérletekben meghatározott ortotrópia függvények, eloszlásjellemzők, valamint a kezelt és kezeletlen furnérok értékei közötti összefüggések, mint bemeneti jellemzők, felhasználhatók az adott hulladék-

furnéranyagból készített, PSL jellegű kompozit lapok hajlítómerevségének a matematikai modell alapján való előrejelzésére. A terméktulajdonságokat befolyásoló paraméterek nagy száma a kísérlettervezés módszerének alkalmazását indokolta, amely lehetővé teszi az oksági törvényszerűségek feltárását, az ok-okozati összefüggések matematikai leírását, a független változók optimális működési tartományának kiválasztását, a környezeti hatásokkal szemben érzéketlen termék megvalósítását. A robusztus tervezés tulajdonképpen egy szisztematikus és hatékony módszer a teljesítmény-, minőség- és költségközpontú tervezés optimalizálására. A módszer lényege a környezeti feltételek ingadoztató hatásával szembeni érzéketlen termékek biztosítása már a tervezési szakaszban, a kísérlettervezés segítségével. A Taguchi-féle minőségjavító stratégia a kísérleti erőfeszítések lényeges csökkentéséhez vezet, használata lehetővé teszi a termékek és folyamatok optimalizálását, növeli a fejlesztések, kutatások hatékonyságát. A minőség tervezési szakaszba történő beépítésével a környezeti feltételekkel és egyéb zajtényezőkkel szemben érzéketlen termékek tervezését eredményezi. Ez folyamaton kívüli (off-line) minőség szabályozást tesz lehetővé. Egy rendszerezett és hatékony módszer a tervezési paraméterek beállítási értékeinek, a költségek kísérleti úton történő optimális meghatározására. Újdonság, hogy a szórás okozta pénzügyi veszteségek csökkentésére a kísérlettervezés módszerét használja. A veszteségfüggvény segítségével kimutatható a vásárlónál jelentkező globális veszteségek nagyságrendje, becsülhető a szórás csökkentésből adódó költségmegtakarítás. A Taguchi által megadott ortogonális kísérleti tervek közül néhányban a főhatások másodrendű kölcsönhatásokkal vagy egymással keverednek. Ez hamis következtetések levonását eredményezheti, ha csak nem ismerjük a részfaktorális tervek keveredési rendszerét és a faktorok között fennálló kölcsönhatásokat. A módszer a kísérleti tervek és adatelemzési módok továbbfejlesztésével még hatékonyabb minőségtervezést tesz lehetővé.

A fejlesztés második, Sopronban végzett szakaszában az alapanyag-jellemzők, terítékképzés és hőpréslés paramétereinek, összesen hét faktornak, a lapok rugalmasságára, vastagsági dagadására és lappal párhuzamos nyírószilárdságára gyakorolt hatását vizsgáltam egy  $2^{7-3}_{IV}$  típusú frakcionált faktoriális terv segítségével. A kiválasztott kísérleti terv alkalmasnak bizonyult a kísérletekbe bevont hét tényező hatásának elemzésére, és a válaszjellemzők változásának regressziós egyenletekkel való leírására. A frakcionálás azonban elvette a lehetőséget az elemzések során szignifikánsnak mutató másodrendű kölcsönhatások független értékelésére.

A lapok hajlítórugalmassági és hajlítószilárdsági tulajdonságait befolyásoló tényezők hatásainak ismeretében, a kifejlesztett termékek eme tulajdonságai előre megtervezhetők, a faktorok optimális működési tartományai meghatározhatók. A vizsgált tulajdonságokra legnagyobb hatást a lapvastagság, a furnérszálak orientációja és a présnyomás gyakorolta, a fafaj az élre merőleges hajlítószilárdságot és rugalmassági modulust erőteljesebben befolyásolta. A terhelés irányának függvényében mind az átlagértékek, mind a faktorhatások nagysága változik, élre merőleges irányban az átlagértékek jelentősen nagyobbak. A kísérleti terv háromszori megismétlése lehetőséget teremtett a beállítások ingadozásának becslésére, a regressziós egyenletek adekvátságának ellenőrzésére. A létező kölcsönhatások figyelmen kívül hagyása csökkentette a regressziós modellek becslési pontosságát. Az ismétlések szórása jóval nagyobb, mint az egyes faktorok szórásra gyakorolt hatása, illetve a szórások mérséklése csak az átlagértékek csökkenése árán lehetséges.

A kifejlesztett színfurnérkompozitok vastagsági dagadása kedvezően alacsony értékeket mutat, melyek az optimális faktorszint-kombináció kiválasztásával tovább csökkenthetők. A vastagsági dagadást csupán a fafaj befolyásolja jelentősen, de a regressziós modell a  $p < 0,25$  értékkel rendelkező szálforgács-szélességet és a présnyomást is tartalmazza. A redukált modell adekvát és jól illeszkedik a mérési adatokra.

A színfurnérkompozitok lapsikkal párhuzamos nyírószilárdsági értékeit más műszaki fatermékek hasonló értékeivel összehasonlítva ( $\tau_{//LSL}=2,8$ ;  $\tau_{//PSL}=2,2$ ;  $\tau_{//OSB}=1,38-2,1$  N/mm<sup>2</sup>, www.trustjoist.com) megállapítható, hogy a kifejlesztett új termék alkalmas szerkezeti célú felhasználásra. A bükk lapok variációs együtthatói igen magasak, juharfurnérból mind az átlagértékek, mind a szórások tekintetében stabilabb lapok készíthetők. A faktorhatások varianciaanalízise a szálfurnérok szélességét és hosszoldását jelentéktelennek mutatja, a maradék tényezők együtthatóiból előállított regressziós modell jól illeszkedik a mért adatokra. A ragasztás minőségének javításával az átlagos nyírószilárdsági értékek valószínűleg tovább növelhetők. A fejezetben elvégzett kísérletek megerősítették, hogy a színfurnérok ollózási eselékéből igen kedvező hajlítórugalmassági és hajlítószilárdsági tulajdonságokkal rendelkező, szerkezeti felhasználásra is alkalmas termékek állíthatók elő. A kompozitok mechanikai tulajdonságai az alkalmazott technológia finomításával tovább növelhetők.

Utolsó lépésként három technológiai paraméter hajlítórugalmassági modulusra és hajlítószilárdságra gyakorolt hatását vizsgáltam. A három tényező a műgyanta-tartalom, a lapsűrűség és a középrétegben elhelyezett végeselék-tartalom volt. Kísérleti tervként egy L9 típusú Taguchi tervet választottam. A színfurnérkompozitok előállítására a 4. fejezetben bemutatott módszerrel és préselési paraméterekkel történt, az eredmények pedig ismételtlen igazolták, hogy lombos fafajokból gyártott színfurnérok késelési eselékéből szerkezeti célra is alkalmas, nagy hajlítószilárdságú laptermékek állíthatók elő. Az L9 Taguchi terv kiértékelése a lapsűrűség és lapközépből elhelyezett végeselék-tartalom rugalmassági modulusra és hajlítószilárdságra gyakorolt lineáris hatását mutatja szignifikánsnak. A ragasztóanyag-tartalom az 5-11%-os variációs intervallumban jelentősen nem befolyásolja a lapok rugalmassági tulajdonságait. A lapkészítés során megjelenő szélhatás a lapsűrűség beállítási pontatlanságát idézte elő, melyet a sűrűség és rugalmassági tulajdonságok között fennálló regressziós összefüggések segítségével részben korrigáltam. Mind az eredeti, mind a korrigált értékekre a folyamatot kellő pontossággal becsülő regressziós modelleket illesztettem. E függvények segítségével a faktorok variációs intervallumán belül a rugalmassági tulajdonságok becsülhetők. A regressziós modelleket mind a kódolt, mind a kódolatlan értékekre meghatároztam. A folyamat optimalizálása céljából a kísérleti pontokra válaszfelületeket illesztettem, így az egyes minőségi jellemzők optimális működési tartományai kijelölhetők.

A szerkezeti felhasználás lehetőségét szem előtt tartva a kísérleti eredmények alapján kiszámítottam a sűrűség, rugalmassági modulus és hajlítószilárdság jellemző értékeit. Az optimális faktorkombináció becsült értékei szerint a rugalmassági modulus teljesíti a szerkezeti faanyagra vonatkozó D60 szilárdsági osztály követelményét, a hajlítószilárdság pedig a legmagasabb D70-es követelményszintet is jóval túlteljesíti. Ez egyben azt is jelenti, hogy a kifejlesztett új termék rugalmassági tulajdonságai jobbak a kereskedelemben is megtalálható hasonló felépítésű műszaki fatermékek hasonló tulajdonságainál. A szilárdsági osztályok küszöbértékeit felhasználva, a sűrűség és hajlítószilárdság jellemző értékeinek, illetve a rugalmassági modulus átlagos értékének együttes optimalizálására kívánatosági függvényt állítottam fel, melyek segítséget nyújtanak egy adott szilárdsági osztálynak megfelelő kompozit faktorszintjeinek megállapítására. A gazdaságossági (alacsony ragasztóanyag-tartalom), a technológiai (végeselék feldolgozás) és a szerkezeti felhasználás (alacsony sűrűség) szempontjait is figyelembe véve, olyan lapok állíthatók elő, melyek rugalmassági tulajdonságai teljesítik a PSL, LVL és a D50-es szilárdsági osztály követelményeit.

A kutatás eredményei lehetővé teszik a teljes mértékben tervezett tulajdonságú, és a szerkezeti felhasználás igényeit is kielégítő színfurnér alapú kompozitok előállítását, valamint tulajdonságaik előrejelzését a felhasznált alapanyag ortotróp jellemzői és gyártási paraméterei alapján.

## 10. Új tudományos eredmények és azok hasznosítása

### 10.1. Tézisek

**I.** Először vizsgáltam lombos fafajokból (bükk, juhar, cseresznye, vörös tölgy) előállított színfurnérok ollózási eselékének laptípusú terméként való hasznosítási lehetőségét. Laboratóriumi kísérletekkel bebizonyítottam, hogy az ollózási eselékből akár önmagában, akár más szálforgács típusú alapanyaggal keverve nagy szilárdságú, szerkezeti célra is alkalmas termékek állíthatók elő.

**II.** A száraz és a rezol típusú fenol-formaldehid műgyantával bevont bükk és juhar színfurnérok síkbeli anizotrópiájának ultrahangos módszerrel és statikus hajlítással történő vizsgálata alapján a következő megállapításokra jutottam:

- A hajlítórugalmassági modulus anizotrópiája mind a módosított Hankinson, mind a tenzorelméleten alapuló modellekkel jól becsülhető. A módosított Hankinson egyenlet optimális  $n$  kitevői a következők:
  - A hangsebesség anizotrópiájára  $n = 1,88$  száraz furnéroknál,  $n = 1,78$  fenolformaldehid műgyantával bevont furnéroknál.
  - A dinamikus hajlítórugalmassági modulus esetében  $n = 2,25$  száraz furnéroknál,  $n = 1,99$  fenolformaldehid műgyantával bevont furnéroknál.
- A rosttal közel párhuzamos irányban ( $0-15^\circ$ ) a dinamikus rugalmassági modulusok elkülönülése a fafajok eltérő sűrűségének és a felületre felvitt műgyanta sűrűség-növelő hatásának köszönhető, ennél nagyobb rostszőgeknél a tömörödés és a ragasztóanyag repedéskitöltő hatása is érvényre jut.
- A színfurnér alapanyag fenol-formaldehid műgyantával való bevonása és hőpréselése jelentősen megváltoztatja a színfurnér rugalmassági tulajdonságait, ezért a késztermék modellezésekor e hatásokat figyelembe kell venni. Megállapítottam, hogy a bevonás és préselés során a színfurnérok sűrűséggel korrigált dinamikus hajlítórugalmassági modulusa a  $0-10$  fokos rostszőg tartományban jelentősen nem változik, a  $10-75$  fokos tartományban a műgyantás furnérok modulusa a rostszőg növekedésével a száraz furnérok modulusához viszonyítva  $1,75$ -szörösére nő, a növekedés közel lineáris és a következő egyenlettel írható le:

$$MOE_{dm} = 1 + 0,0101 \cdot MOE_{dsz}$$

A  $75-90$  fokos rostszőg tartományban a változás statisztikailag nem szignifikáns.

**III.** Elsőként alkalmaztam nagyméretű frakcionált faktoriális és Taguchi-féle kísérleti terveket új faalapú termékek kifejlesztésére. Felhasználásukkal megállapítottam, hogy a színfurnér-kompozitok hajlítási, lappal párhuzamos nyírási és vastagsági dagadási tulajdonságainak változásában lényeges szerepet az ortotrópia, a lapsűrűség, a fafaj, a présnyomás és végeselék-tartalom játszanak. A választott variációs intervallumban a szálfurnérok szélessége és a hossztoldás nem bizonyultak szignifikánsnak.

**IV.** A fafajnak, a terítékképzési és préselési paramétereknek a kifejlesztett új termék mechanikai és fizikai tulajdonságaira gyakorolt hatását  $2^{7-3}_{IV}$ ,  $2^{6-3}_{III}$  típusú frakcionált faktoriális kísérleti tervekkel megvizsgálva kimutattam, hogy:

- Az alkalmazott présciklus alapján a hajlítórugalmassági modulusot legnagyobb mértékben a lapvastagság, a szálfurnérok orientációja, a présnyomás és a fafaj befolyásolja, a terhelési irány függvényében az egyes faktorok hatása változik. A főhatásokon kívül egyes kölcsönhatások is szignifikánsak, azonban a keveredési rendszer következtében ezek a kölcsönhatások egymástól függetlenül a választott kísérleti tervvel nem



becsülhetők. A hajlítórugalmassági modulus regressziós modelljei a terhelési irány függvényében:

$$\hat{y}_{MOE_{up}} = 9613 - 404x_1 - 117x_2 - 239x_3 - 1367x_4 - 1833x_5 + 684x_6 + 446x_7 + \\ + 464x_1x_2 + 316x_1x_3 + 640x_1x_4 + 339x_1x_5 - 529x_1x_6$$

$$\hat{y}_{MOE_{el}} = 10236 - 894x_1 + 53x_2 - 1144x_4 - 1646x_5 + 681x_6 + 18x_7 + 342x_1x_2 + \\ + 409x_1x_4 - 573x_1x_6 + 268x_1x_7$$

- A hajlítószilárdságra a lapvastagság, orientáció, présnyomás és préselési hőmérséklet hatása jelentős, de élre merőleges hajlításkor a fafaj is szignifikánssá válik. A kölcsönhatások tekintetében a fenti megállapítások érvényesek, a regressziós modellek pedig a következők:

$$\hat{y}_{MOR_{up}} = 72 + 0,22x_1 + 2,07x_2 - 30,16x_4 - 9,62x_5 + 5,65x_6 + 4,74x_7 + 4,08x_1x_2 + \\ + 7,54x_1x_4 - 3,18x_1x_7$$

$$\hat{y}_{MOR_{el}} = 90,3 - 4,84x_1 + 1,6x_2 - 4,48x_3 - 13,5x_4 - 10,82x_5 + 5,85x_6 + 3,73x_7 + 1,58x_1x_2 \\ + 1,69x_1x_3 + 3,37x_1x_4 + 2,43x_1x_5 - 3,62x_1x_6$$

- A lapok vastagsági dagadását kizárólag a fafaj befolyásolja jelentősen, a regressziós modell a következő polinom:

$$\hat{y}_G = 9,08 - 2,3x_1 + 0,4x_2 + 0,44x_6$$

- A színfurnérkompozitok lappal párhuzamos nyírószilárdsági vizsgálatai alapján megállapítottam, hogy a fafaj és a présnyomás hatása szignifikáns, a felállított modell pedig a következő:

$$\hat{y}_f = 4,341 + 1,121x_1 - 0,24x_5 + 0,631x_6 + 0,244x_7$$

**V.** L<sub>9</sub> típusú Taguchi terv alkalmazásával három technológiai paraméter, a ragasztóanyag-tartalom, a lapsűrűség és a végeselék-tartalom hatását vizsgáltam a lapok rugalmassági tulajdonságaira. Megállapítottam hogy:

- A ragasztóanyag-tartalom az 5-11%-os variációs intervallumban nincs jelentős hatással a rugalmassági tulajdonságokra
- A vizsgált faktorok négyzetes hatásai nem szignifikánsak
- A faktorhatások szignifikanciája alapján a jellemző hajlítórugalmasság és hajlítószilárdság regressziós modelljei a következők:

$$\hat{y}_{MOE} = -5932,25 + 27,21 \cdot \rho_l - 38,03 \cdot V_l$$

$$\hat{y}_{MOR} = -124,13 + 0,29 \cdot R_l - 0,45 \cdot V_l$$

- A sűrűség, a hajlítórugalmassági és hajlítószilárdsági jellemző értékek szilárdsági osztályok szerinti optimális értékei a ragasztóanyag-tartalom 10%-os, a lapsűrűség 750 kg/m<sup>3</sup>-es és a végeselék-tartalom 0%-os beállítási szintjein adódnak.

## 10.2. Az eredmények hasznosítása, további feladatok

A kísérleti eredmények igazolták, hogy a színfurnérgyártás során keletkező ollózási eselékből nagy szilárdságú lemez típusú termékek állíthatók elő. Következésképpen a kutatások megalapozhatják egy új kompozit termékcsalád végleges kifejlesztését és a kereskedelemben való megjelenését. A kiváló minőségű hulladék szerkezeti célú termékként történő hasznosítása lehetőséget teremt a színfurnér-gyártó üzemeknek termékkínálatuk bővítésére, és ezáltal új, alternatív bevételi források elérésére. A laptulajdonságokat lényegesen befolyásoló tényezők hatásának ismerete lehetővé teszi a termékjellemzők további optimalizálását, tervezett tulajdonságú kompozitok gyártását.

Mindezen pozitívumok ellenére további jelentős fejlesztő-kutató munkára van szükség, hiszen a levont következtetések csupán a laboratóriumi körülmények között előállított kompozitokra érvényesek.

A műgyanta színfurnérokra gyakorolt hatásának vizsgálatát még több fafajon és nagyobb mintanagysággal tovább kell folytatni, a kísérletekbe újabb ragasztóanyag típusok (például izocianát alapú) bevonása is indokolt.

A késztermék roncsolásmentes minősítésének megvalósítása érdekében szükség van a statikus és dinamikus jellemzők közötti kapcsolatok felállítására, a kapcsolat szorosságának megállapítására. A hajlítórugalmassági és nyírószilárdsági tulajdonságokra már történtek mérések, az eredmények kiértékelése folyamatban van.

A Faipari Mérnöki Karon jelenleg rendelkezésre álló, és a közeljövőben megvalósuló kutatási infrastruktúra lehetővé teszi a színfurnérkompozitok szerkezeti méretben történő előállítását és vizsgálatát, ezért az ilyen irányú kutatások jelenthetik a leghatékonyabb továbblépést. Itt a tartó vagy gerenda típusú termékek előállítása is indokolt.

További fejlesztési lehetőség a szerkezeti méretben előállított lemeztermékek beépítése különböző tartószerkezetekbe (pl. I-tartó, rétegelt ragasztott tartó, stb.).

Egy következő fejlesztési szakaszban a terítékképzés és a szálfurnérok orientációjának gépesítésére kell megoldást találni, amelyhez kiindulópontot jelenthetnek a jelenleg alkalmazott tárcsás és terelőlemezes módszerek.

Gazdaságossági szempontból nagyon fontos a présidő jelentős csökkentése. Ehhez a prés ciklus optimalizálása, a gőz-befecskendezéses eljárás vagy a nagyfrekvenciás melegítés adoptálása indokolt.

E két probléma megoldása egyben a félipari/ipari gyártás korlátainak jelentős feloldását is jelenti, elősegítve egy piacképes, szerkezeti felhasználásra tervezett termék megjelenését.

## 11. Irodalomjegyzék

- ADLER, J.P. MARKOVA, E.V., GRANOVSKIJ, J.V., 1977: *Kísérletek tervezése optimális feltételek meghatározására*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- ANDREWS, C. K., WINISTORFER, P.M., BENNETT, R.M., 2001: *The influence of furnish moisture content and press closure rate on the formation of vertical density profile in oriented strandboard*, Forest Product Journal, Vol. 51(5), pp. 32-39.
- ARMSTRONG, J.P., PATTERSON, D.W., SNECKENBERG, J.E., 1991: *Comparison of three equations for predicting stress wave velocity as a function of grain angle*, Wood and Fiber Science Vol.23, No 1, 32-43 pp.
- ASHKENAZI, E. K., 1978: *Anisotropy of Wood and Wood-Base Materials. First edition.*(in Bejő, 2000)
- AU, K.C., GERTJEJANSEN, R.O., LARNTZ, K., 1992: *Use of response surface methodology to maximize paper birch utilization in a three-layer, two-species oriented strandboard*, Wood and Fiber Science: Vol. 24, No. 4, pp. 432–441.
- BAESLER, F.F., ARAYA, E., RAMIS, J.F., SEPÚLVEDA, A.J., 2004: *The use of simulation and design of experiments for productivity improvement in the sawmill industry*, Proceedings of the Winter Simulation Conference, Washington D.C.
- BARNES, D., 2000: *An integrated model of the effect of processing parameters on the strength properties of oriented strand wood products*, Forest Products Journal Vol. 50(11-12), pp. 33-42
- BARNES, D., 2001: *A model of the effect of strand length and strand thickness on the strength properties of oriented wood composites*, Forest Products Journal Vol. 51 (2), pp. 36-46
- BARRY, A., LÉPINE, R., LOWELL, R., RAYMOND, S., 2001: *Response surface methodology study of VOCs in plywood press emissions*, Forest Products Journal Vol.51 No. 1, pp. 65-73.
- BEALL, F.C., 2002: *Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties*. Wood Science and Technology (36): 197-212.
- BEJÓ, L., 2000: *Simulation based modeling of the Elastic Properties of Wood Based Composite Lumber*, PhD. Dissertation, West Virginia University, Morgantown, WV. 224 pp.
- BEKHTA, P.A., NIEMZ, P., KUCERA, L., 2000: *The study of sound propagation in the wood-based composite materials*, Proceedings of the 12<sup>th</sup> NDTW, University of Western Hungary, Sopron
- BERKE M., 2000: *Nondestructive material testing with ultrasonics – introduction to the basic principles*- NDT.net – September 2000, Vol. 5 No. 09. (<http://www.ndt.net/article/v05n09>)
- BIERNACKI, M.J., BEALL, C.F., 1996: *Acoustic monitoring of cold-setting adhesive curing in wood laminates: effect of clamping pressure and detection of defective bonds*, Wood and Fiber Science, Vol. 28(1), pp. 7-14
- BINKLEY, S.C., 2000: *Squaring the Circle: Meeting Global Demands for Solid Wood Products*, Marcus Wallenberg Prize Symposium, Stockholm, October 13, 2000, <http://www.mwp.org/proceedings/>
- BISGAARD, S., ELLEKJAER, M.R., 1997: *Designing Quality into Products During the Design Development Phase*, Report No. 155, Center for Quality and Productivity Improvement
- BODIG, J.,: 2001: *The process of NDE research for wood and wood composites*, NDT.net – March 2001, Vol. 6 No. 03. (<http://www.ndt.net/article/v06n03>)
- BODIG, J., JAYNE, A.B., 1982: *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold Company, 712 pp.

- BOOKER, J.D., RAINES, M., SWIFT, K.G., 2001: *Designing Capable and Reliable Products*. Butterworth Heinmann.
- BOX, G.E.P., 1988: *Signal to Noise Ratios, Performance Criteria and Transformations*, Technometrics, Vol. 30(1), pp. 1-40
- BOX, G.E.P., JONES, S., 1990: *Designing Products That Are robust to the Environment*, Report No. 56, Center for Quality and Productivity Improvement
- BRASHAW, K., ROSS, J.R., PELLERIN, R., 1996: *Stress wave nondestructive evaluation of green veneer*, Proceedings of the 10<sup>th</sup> NDTW, Lausanne, Switzerland
- BRENNEMAN, A.W., MYERS, R.W., 2003: *Robust Parameter Design with Categorical Noise Variables*, Journal of Quality Technology, Vol. 35(4), pp. 335-342
- BROOKS, J.D., 1997: *Demand for wood and forest products: macroeconomic and management issues*, in: Proceedings of the XI World Forestry Congress (Antalys, Turkey: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1997)
- BROWN, C., 1998: *Thematic Study on Plantations*, in: Global Forest Products Outlook FAO Rome, 1998.
- BUCUR V., 1999: *Acoustics as a tool for the nondestructive testing of wood*, NDT.net – November 1999, Vol. 4 No. 11. (<http://www.ndt.net/v04n11>)
- BUCUR, V., 1988: *Wood Structural Anisotropy Estimated by Acoustic Invariants*, IAWA Bulletin, Vol. 9, no. 1, pp. 67-74.
- CASSENS, D., LENG, Y., MCCABE, G., 2003: *Face check development in veneered furniture panels*, Forest Products Journal, Vol. 53(10), pp. 79-90
- CHA, J.K., PEARSON, R.G., 1994: *Stress analysis and prediction in 3-layer laminated veneer lumber, Response to crack and grain angle*, Wood and Fiber Science Vol. 26 No. 1, 97-106.
- CHEN, S., WELLWOOD, R., 2002: *Nondestructive evaluation of oriented strandboard*, Proceedings of the 13<sup>th</sup> NDTW, University of California, Berkeley Campus, California, USA
- CHEN, W., ET AL., 2000: *An Affordable Approach for Robust Design of Thick Laminated Composite structure*, Optimization and Engineering, Vol. 1(3), pp. 305-322
- CLOUSTON, P.L., LAM, F., 2001: *Computational modeling of strand-based wood composites*, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 127(8), 844-851 pp.
- COSTA, H.C. ET AL., 2000: *Statistical experimental design and modeling of polypropylene-wood fiber composites*, ELSEVIER: Polymer Testing Vol. 19, pp. 419-428 [www.eisz.hu](http://www.eisz.hu) 2005.08.01.
- DAI, C., P. R. STEINER. 1993. *Compression behavior of randomly formed wood flake mats*. Wood and Fiber Sci. 25(4):349-358.
- DAI, C., P. R. STEINER. 1994b. *Spatial structure of wood composites in relation to processing and performance characteristics. Part II. Modeling and simulation of a randomly-formed flake layer network*, Wood Sci. and Technol. Vol. 35-146 pp
- DAI, C., P. R. STEINER. 1994c. *Spatial structure of wood composites in relation to processing and performance characteristics. Part III. Modeling the formation of multi-layered random flake mats*. Wood Sci. and Technol. Vol. 28:229-239 pp
- DAI, C., YU, C., ZHOU, X., 2005: *Heat and mass transfer in wood composite panels during hot-pressing: Part II Modeling void formation and mat permeability*, Wood and Fiber Science Vol. 37(2), pp.242-257
- DIVÓS, F., 1999: *Roncsolásmentes faanyagvizsgálat*, Egyetemi jegyzet, Sopron
- DIVÓS, F., TANAKA, T., 1997: *Lumber strength estimation by multiple regression*, Holzforschung Vol. 51, pp. 467-471

- DIVOS, F., 2000: *Stress Wave Based Tomography for Tree Evaluation*, Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Symposium on Nondestructive Testing of Wood University of Western Hungary, Sopron
- DTI, 1992: *Quality Assurance Program*, Federal Ministry of Research and Technology, Germany
- EIKLENBORG, M., ET AL. : *Taguchi Methods for achieving quality*, <http://userwww.sfsu.edu/~gtarakji/engr801/wordoc/taguchi.html>
- ENGEL, J., HUELE, A. F., 1996: *Taguchi parameter design by second order response surfaces*, Quality and Reliability Engineering International Vol. 12, pp. 95-100
- FAO, 2003: *State of the World's Forests*, [www.fao.org](http://www.fao.org).
- FREENY, A.E., NAIR, V.N., 1992: *Robust Parameter Design with uncontrolled Noise Variables*, Statistica Sinica No. 2, pp. 313-334
- FULLER, J.J., ROSS, R.J., DRAMM, J.R., 1994: *Honeycomb and Surface Check Detection Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Research Note FPL-RN-0261, USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- GERHARDS, C.C., 1982: *Longitudinal stress wavw for lumber stress grading: facotrs affecting application; state of art*, Forest Products Journal, 32(2), 20-25 pp.
- GRIMBERG, R., SAVIN, A., LUPU, A., ROTUNDU, C., IANCU L., 2000: *A Method to Determine the Debonding Zones in Multilayers Wood Materials*, Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne, CH
- GUAN, X.L., MELCHERS, R.E., 2000: *A Parametric Study on the Response Surface Method*, Proceeding og the 8<sup>th</sup> ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability
- HAMADA, M., BALAKRISHNAN, N., 1998: *Analyzing Unreplicated Factorial Experiments: A Review with Some New Proposals*, Statistica Sinica Vol. 8, pp., 1-41 pp.
- HAMADA, M., WU, C.F.J., 1992: *Analysis of Designed Experiments with Complex Aliasing*, Journal of Quality Technology, Vol. 24, pp. 130-137
- HANKINSON, R. L. 1921. *Investigation of Crushing Strength of Spruce ate Varying Angles of Grain*. Air Service Information Circular No. 259, U.S. Air Service, 1921. (not seen)
- HICKS, R.C., 1993: *Fundamental Concepts in the Design of Experiments*, 4th Edition, Saunders College Publishing, New York, 509 pp.
- HOOVER, WILLIAM L., MICHAEL O. HUNT, ROBERT C. LATTANZI, JAMES H. BATEMAN, JOHN A., YOUNGQUIST, 1992: *Modeling Mechanical Properties of Single-Layer, Aligned, Mixed-Hardwood Strand Panels*. Forest Products Journal. 42(5). 1992. pp. 12-18
- HOUTS, J., BHATTACHARYYA, D., JAYARAMAN, K., 2003: *Viscoelastic behavior of wood fibres during the hot pressing of medium density fibreboard*, Holzforschung Vol. 57, pp. 391-399
- HSU, W.E., 1996: *Optimization of pressing parameters for waferboard/OSB panels*, Canadian Forest Service Report No19., Forintek Canada Corporation. 27 pp.
- IANCU, L., GRIMBERG, R., MITIȘOR, AL., LUPU A., IANCU, C., 2000: *Use of ultrasonic method in association with the imagistic method for detection of structural defects in gluing of the plywood*, Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, British Columbia, Canada
- ILIC J., 2001: *Relationship among the dynamic and static elastic properties of air-dry Eucalyptus delegatensis R. Baker*, Holz als Roh- und Werkstoff 59:169-175 pp.
- JOHN, L., MCGOVERN, 1994: *A critique of the Taguchi Approach – Part I, Part II*, Journal of Coating Technology, Vol. 66, No. 830-831. March-April, 1994
- JUNG, J., 1979: *Stress-Wave Grading Techniques on Veneer Sheets*. Gen. Tech Rep. FPLGTR-27. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.

- KABIR M. F., 2001: *Prediction of ultrasonic properties from grain angle*, Journal of the Institute of Wood Science, vol. 15 no.5 (89):235-246.
- KACKER, R.N., 1985: *Off-line Quality Control, Parameter Design and the Taguchi Method*, Journal of Quality Technology Vol. 17, pp. 176-209
- KANG H., BOOKER R. E., 2002: *Variation of stress wave velocity with MC and temperature*, Wood Science and Technology 36:41-54.
- KANGAS, K., BAUDIN, A., 2003: *Modeling and Projections of Forest Products Demand, Supply and Trade in Europe*, ECE/TIM/DP/30.
- KEMÉNY, S., 1998: *Statisztikai minőség- (megfelelőség-) szabályozás*, Műszaki Könyvkiadó,- Magyar Minőség Társaság, 370 old.
- KEMÉNY, S., DEÁK, A., 2000: *Kísérletek tervezése és értékelése*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 492 old.
- KOLLMAN, F.P.P., W. A. COTE, 1968: *Principles of Wood Science and Technology. Volume I. – Solid Wood*. Springer-Verlag, New York. 592 pp.
- KOVÁCS ZSOLT, SZALAI JÓZSEF, LÁNG ELEMÉR, BEJÓ LÁSZLÓ 2002.: *Szerkezeti célú fakompozitok tulajdonságtervezése alacsony értékű hazai lombos faanyagok ortotrop jellemzői alapján*, OTKA zárójelentés OTKA T 025985
- KOVÁCS, Zs., 2001: *Tervezett tulajdonságú termékek*, in: Alap- és alkalmazott kutatások a faiparban, az MTA Erdészeti Bizottság Faanyagtudományi Albizottság és a Veszprémi Akadémiai Bizottság Erdészeti Szakbizottság Faipari Munkabizottsága közös kiadványa Sopron 2001.
- KOVLER K., SCHAMBAN I., 2000: *Mathematical methods of experimental design in nondestructive testing*, NDt.net – February 2000, Vol. 5 No. 02. (<http://www.ndt.net/article/v05n02>)
- KÖKSOY, O., DOGANAKSOY, N., 2003: *Joint Optimization of Mean and Standard Deviation Using Response Surface Methods*, Journal of Quality Technology, Vol. 35(3), pp. 239-253
- LÁNG, E., BEJÓ, L., SZALAI, J., KOVÁCS, Zs., 2000: *Orthotropic Strength and Elasticity of Hardwood in Relation to Composite Manufacture Part I.: Orthotropy of Shear Strength*, Wood and Fiber Science, 32(4), 2000, pp. 502-519.
- LÁNG, E., BEJÓ, L., SZALAI, J., KOVÁCS, Zs., ANDERSON, R.B., 2002: *Orthotropic Strength and Elasticity of Hardwood in Relation to Composite Manufacture Part II.: Orthotropy of Compression Strength and Elasticity*, Wood and Fiber Science, 34(2), 2002, pp. 350-365.
- LANG, M. E., M. P. WOLCOTT. 1996a. *A model for viscoelastic consolidation of wood-strand mats. Part I. Structural characterization of the mat via Monte Carlo simulation*. Wood and Fiber Sci. 28(1):100-109.
- LANG, M. E., M. P. WOLCOTT. 1996b. *A model for viscoelastic consolidation of wood-strand mats. Part II. Static stress-strain behavior of the mat*. Wood and Fiber Sci. 28(3):369-379.
- LEE, Y., NELDER, A.J., 2003: *Robust Design via Generalized Linear Models*, Journal of Quality Technology, Vol. 35(1), pp. 2-13
- LESPERANCE, M.L., PARK, S.M., 2003: *GLMs for the Analysis of Robust Design with Dynamic Characteristics*, Journal of Quality Technology, Vol. 35(3), pp. 253-264
- LI, W.W., WU, C.F.J., 1996: *An Integrated Method of Parameter Design and Tolerance Design*, Technical Report No. 271, The University of Michigan, Dep. of Statistics
- LORENZEN, T.J., ANDERSON, V.L., 1993: *Design of experiment. A no-name approach*, Marcel Dekker, New York
- LUNANI, M., NAIR, V., WASSERMAN, G.S., 1995: *Robust Design with Dynamic Characteristics: A Graphical Approach to Identifying Suitable Measures of Dispersion*, Technical Report No. 253, The University of Michigan, Dep. of Statistics

- MARTÍNEZ, M.E., CALIL, C.J., 2003: *Statistical design and orthogonal polynomial model to estimate the tensile fatigue strength of wooden finger joints*, ELSEVIER: Int. Journal of Fatigue, Vol. 25, pp. 237-243
- MATTHEWS, E., HAMMOND, A., 1999: *Critical consumption trends and implications degrading earth's ecosystems*, World Resources Institute, <http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/consumption>
- MATTHEWS, E., PAYNE, R., ROHWEDER, M., SIOBHAN, M., 2000: *Pilot Analysis Of Global Ecosystems*, World Resources Institute, Washington, DC.
- MCGRATH, N.R., 2003: *Separating Location and Dispersion Effects in Unreplicated Fractional Factorial Designs*, Journal of Quality Technology, Vol. 35(3), pp. 306-317
- MILLER, A., 2002: *Analysis of Parameter Design Experiments for Signal-Response Systems*, Journal of Quality Technology Vol. 34(2), pp. No. 2, 139-151 pp.
- MILLER, A., WU, C.F.J., 1995: *Parameter Design for Signal-Response Systems*, Technical Report No. 251, The University of Michigan, Dep. of Statistics
- MIRO-QUESADA, G., CASTILLO, D.E., 2003: *Two Approaches for Improving the Dual Response Method in Robust Parameter Design*, Journal of Quality Technology, Vol. 36(1), pp. 154-169
- MISHIRO, A. 1996: *Effects of grain and ring angles on ultrasonic velocity in wood*, Mokuzai Gakkaishi Vol. 42(2), pp. 211–215
- MOLNÁR, S. Szerk., 2000: *Faipari Kézikönyv I.*, Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron 428 old.
- MONTGOMERY, C.D., 1999: *Experimental Design for Product and Process Design and Development*, Journal of the Royal Statistical Society, Series D (The Statistician) Vol 48/2, pp. , 159-177 pp.
- MONTGOMERY, D. C., 1997: *Introduction to statistical process control*, John Wiley & Sons, Inc., 1997, 677 pp.
- MOSES, D.M., PRION, H.G.L., BOEHNER, W., 2003: *Composite behavior of laminated strand lumber*, Wood Science and Technology Vol. 37, 59-77 pp.
- MUNIKOTI K. V., 2001: *On the propagation of elastic waves in acoustically anisotropic austenitic materials and their boundaries during nondestructive inspection with ultrasound*, NDT.net – June 2001, Vol. 6 No. 06. (<http://www.ndt.net/article/v06n06>)
- MYERS, H.R. ET AL., 2004: *Response Surface Methodology: A Retrospective and Literature Survey*, Journal of Quality Technology, Vol. 36(1), pp. 53-78
- MYERS, R.H., MONTGOMERY, D.C., 1995: *Response Surface Methodology*, John Wiley&Sons, New York
- NABUURS, G.J. ET AL., 2003: *Future wood supply from European forests, Implications on the pulp and paper industry*, Alterra-rapport, Green World Research, Wageningen, 2003.
- NAGY, B. N., 2000: *A bútörípari termelésirányítás új módszereinek vizsgálata és bevezetésük gyakorlati ellenőrzése*, Doktori (PhD) értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem, 115 old.
- NAIR, V. N. ET AL., 1992: *Taguchi's Parameter Design: A Panel Discussion*, Technometrics, Vol. 34, pp., 127-161 pp.
- NAVARA, C., THEODORE, T.A., DENG, H., 2003: *Optimal experimental design for systems involving both quantitative and qualitative factors*, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference
- NELSON, S., 1997: *Engineered Wood Products; A Guide for Specifiers, Designers and Users: Chapter 6 – Structural Composite Lumber*, PFS Research Foundation; in Yadama, V., 2002: *Characterization and Modeling of Oriented Strand Composites*, PhD. Dissertation, Washington State University

- NÉMETH, A. 2000: *Fás és nem-fás növények környezetbarát delignifikációja*, Doktori (PhD) értekezés, Nyugat-Magyarországi Egyetem
- NÉMETH, J., SZABADHEGYI, GY., 2003: *Furnérok és furnéralapú rétegelt termékek gyártása*. Egyetemi jegyzet, Sopron.
- OTTO, N.K., ANTONSSON, K.E., 1993: *Extensions to the Taguchi Method of Product Design*, Journal of Mechanical Design, Vol. 115(1) No. 1., pp. 5-13 pp.
- OUDEJHANE, A., LAM, F., 1998a: *Forming and pressing processes of random and oriented wood composite mats*, Composites Part B, 29B 211-215 pp
- OUDEJHANE, A., LAM, F., 1998b: *On the density profile within random and oriented wood-based composite panels: horizontal distribution*, Composites Part B, 29B 687-694 pp.
- PANDEY, D., BALL, J., 1998: *The role of industrial plantations in future global fiber supplies* Unasylva 193, Vol. 49:37-43.
- PASSIALIS C., ADAMOPOULOS S., 2002: *A comparison of three NDT methods for determining the modulus of elasticity in flexure of fir and black locust small clear wood specimens*, Holz als Roh- und Werkstoff 60:323-324.
- PHADKE, M.S., 1989: *Quality Engineering Using Robust Design*, Englewood Cliffs, Prentice Hall
- PLAHOV, V.N., 1975: *Késeléssel előállított termékek*, Erdészeti és Faipari Kiadó, Moszkva, 127 old.
- RICCATI, J.. 1747: *Verae et Germanae virim elasticarum leges ex phaenomenis demonstratae*. De Bononiensi Schientarium Academia Commentarii 1:523. Bogona. In: Bejó, 2001
- ROSS, R.J., PELLERIN, R.F., 1988: *NDE of wood-based composites with longitudinal stress wave*, Forest Products Journal, 38(5), 39-45 pp.
- RUSSELL, R., TAYLOR, B., 1995: *Production and Operations Management: Focusing on Quality and Competitiveness*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc.
- Russian) Izdatelstvo Lesnaja Promuslennosty. Moscow, USSR (not seen)
- SAKAI, H., MINAMISAWA, A., TAKAGI, K., 1990: *Effect of moisture content on ultrasonic velocity and attenuation in woods*. Ultrasonic Vol. 28(6), pp. 382-385.
- SANCHEZ, M.S, 2000: *Robust Design: Seeking The Best Of All Possible Worlds*, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference
- SANDOZ J. L., 1996: *Ultrasonic Solid Wood Evaluation In Industrial Applications*, Proceedings of the 10th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Lausanne, CH
- SASAKI Y., ANDO K., 1999: *Acoustoelastic phenomena of wood* NDT.net - November 1999, Vol. 4 No. 11. (<http://www.ndt.net/v04n11>)
- SASAKI Y., HASEGAWA M., IWATA T., 2001: *Acoustoelastic stress measurement of wood in bending – A new attempt at determining stress condition of wood*, Holz als Roh- und Werkstoff 59:237-243.
- SCHULTZ, H., 1993: *The development of wood utilization in the 19<sup>th</sup>, 20<sup>th</sup>, and 21<sup>st</sup> centuries*. Forestry Chronicle 69(4):413-418.
- SEMPLE, K.E., CUNNINGHAM, R.B., EVANS, P.D., 1999: *Cement hydration tests using wood flour may not predict the suitability of Acacia mangium and Eucalyptus pellita for the manufacture of wood-wool cement boards*, Holzforshung, Vol. 53, pp. 327-332
- SHEW, Y.W., KWONG, C.K., 2002: *Optimization of the Plated Through Hole (PTH) Process Using Experimental Design and Response Surface Methodology*, Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 20, pp. , 758-764 pp.
- SHOEMAKER, A.C., TSUI, K.L., WU, C.F.J., 1991: *Economical Experimentation Methods for Robust Design*, Technometrics Vol. 33, pp., 415-427 pp.



- SOLODOV, I., PFLEDERER, K., BUSSE, G., 2004: Nondestructive characterization of wood by monitoring of local elastic anisotropy and dynamic nonlinearity, *Holzforschung*, Vol. 58, pp. 504-510
- SONG, M.X., HWANG, J.-Y., 2001: *Mechanical properties of composites made with wood fiber and recycled tire rubber*, *Forest Products Journal*, Vol. 51(5), pp. 45-51
- SRETENOVIC, A., MÜLLER, U., GINDL, W., 2005: *Comparison of the in-plane shear strength of OSB and plywood using five point bending and EN 789 steel plate test methods*, *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 63(2), pp. 160-164
- STEINER, P.R., DAI, C., 1994a: *Spatial structure of wood composites in relation to processing and performance characteristics Part 1. Rationale for model development*. *Wood Sci. and Technol.* Vol. 28:45-51 pp.
- SUCHSLAND, O. 1967. *Behavior of a particleboard mat during the pressing cycle*, *Forest Products Journal*, 17(2): 51-57
- SUCHSLAND, O. AND H., XU. 1989. *A simulation of the horizontal density distribution in a Flakeboard*, *Forest Products Journal*, 39(5): 29-33
- SUN, Y.C. AND ARIMA, T., 1998: *Structural mechanics of wood composite materials 1: Ultrasonic evaluation of internal bond strength during accelerated aging test*, *Journal Wood Science* 44, 348-353 pp.
- SUTAN N. M., 2002: *The influence of porosity to the accuracy of ultrasonic pulse velocity method*, *NDt.net* – November 2002, Vol. 7 No. 11. (<http://www.ndt.net/article/v07n11>)
- SUZUKI, H., SASAKI, E., 1990: *Effect of grain angle on the ultrasonic velocity of wood*, *Mokuzai Gakkaishi* Vol. 36(2), pp.103–107
- SUZUKI, S., MIYAGAWA, H., 2003: *Effect of element type on the internal bond quality of wood-based panels determined by three methods*, *Journal of Wood Science*, Vol. 49, pp. 513-518
- SZALAI, J., 1994: *A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana, I. rész: A mechanikai tulajdonságok anizotrópiája*, Egyetemi jegyzet, Sopron.
- TAGUCHI, G., 1986: *Introduction to quality engineering, Designing quality into products and processes*, Asian Productivity Organization, 189 pp.
- THOMAS B. BARKER, T.B., 1990: *Engineering quality by design*, Marcel Dekker Inc., 250 pp.
- TROCINE, L., MALONE, C. L., 2000: *Finding important independent variables through screening design: a comparison of methods*, *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*
- TRUSJOIST TECHNICAL GUIDE, 2003: *Silent floor and roof framing systems, Residential and Light Commercial Applications*, [www.trusjoist.com/PDFFiles](http://www.trusjoist.com/PDFFiles)
- UNAL, R., DEAN, E.B., 1991: *Taguchi approach to design optimization for quality and cost*, *Proceedings of the 13th Annual Conf. of the International Society of Parametric Analysts*
- UNAL, R., STANLEY, O.D., 1993: *Parametric Design Optimization Using Response Surface Methods*, *Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts*, Vol. XII, pp. 87-96
- UNECE/FAO, 1996: *European timber trends and prospects: into the 21st century*, Geneva Timber and Forest Study Papers, ECE/TIM/SP/11.
- UNECE/FAO, 2003: *Forest products markets: prospects for 2004*, *Timber Bulletin* Vol. LVI, No. 6.
- UNECE/FAO, 2003: *UNECE timber committee yearbook*, Economic commission for Europe timber and forest information series.
- UNECE/FAO, 2004: *Forest products annual market review*, *Timber Bulletin* Vol. LVII, No. 3.
- USA BUREAU OF CENSUS, 2004: *Global population profile: 2002*, [www.census.gov](http://www.census.gov)
- VICTOR G.D., AUSUBEL H.J., 2000: *Restoring the forests*, *Foreign Affairs*, vol.79 no.6:127-144. *Volume I. – Solid Wood*. Springer-Verlag, New York. 592 pp.

- WANG J., BIERNACKI M. J., LAM F., 2001a: *Nondestructive evaluation of veneer quality using acoustic wave measurements*, Wood Science and Technology 34:505-516.
- WANG, K., LAM, F., 1999: *Quadratic RSM models of processing parameters for three-layer oriented flakeboards*, Wood and Fiber Science: Vol. 31, No. 2, pp. 173–186.
- WANG, S.Y., CHEN, B.J., 2001b: *The flake's alignment efficiency and orthotropic properties of oriented strand board*, Hozforschung Vol. 55, No 1: 97-103 pp.
- WARREN, W.G., AND HAILEY, J.R.T., 1980: *Using response surface methodology to evaluate veneer yield and quality*, Wood Science 12(3), pp. 132-140
- WIENER U.R., VICTOR G.D., *Industrial Roundwood Demand Projections to 2050: A brief review of the literature* Paper presented at The Great Restoration: The Potentials for Forest Protection to 2050 meeting convened by the Council on Foreign Relations and the World Bank/World Wildlife Fund Alliance, Washington, D.C., USA, <http://greatrestoration.rockefeller.edu/>
- WITTMANN GY., 2000: *Mérnöki faszerkezetek I-II.*, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 671 old.
- WORLD WIDE FUND (WWF), 2002: *The forest industry in the 21<sup>st</sup> century*, WWF Report, <http://www.wwf.org.uk/filelibrary/pdf/forestind21century.pdf>
- WU, C.F.J., MAO, S.S., MA, F.S., 1990: *SEL: A Search Method Based on Orthogonal Arrays*, Statistical Design and Analysis of Industrial Experiments, Marcel Dekker, pp. 279-310
- XU, W., SUCHSLAND, O., 1998: *Modulus of Elasticity of Wood Composite Panels with Uniform Vertical Density Profile: A Model*. Wood and Fiber Sci. 30(3):293-300.
- YOUNGQUIST A.J., HAMILTON E.T., 1999: *Timber and wood composites for the next century*, in: Proceedings of the international conference on effective utilization of plantation timber, Taiwan, 1999.
- YOUNGQUIST, J. A., HAMILTON, T. E., 2000: *A look at the world's timber resources and processing facilities*, in: Proceedings, 11th IUFRO World Congress Vol. 1; 2000 August 7-12; Kuala Lumpur, Malaysia.
- ZHU, E.C., GUAN, Z.W., RODD, P.D., POPE, D.J., 2005: *A constitutive model for OSB and its application in finite element analysis*, Holz als Roh- und Werkstoff, Vol. 63(2), pp. 87-93
- ZHU, S., TOMBERLIN, D., BUONGIORNO, J., 1998: *Global forest products consumption, production, trade and prices: Global forest products model projections to 2010*, Working Paper No: GFPOS/WP/01, Forestry Policy and Planning Division, Rome, 1998.
- ZOMBORI, B., 2001: *Modeling the transient effects during the hot-pressing of wood-based composites*, PhD. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 212 pp.
- ZUO, X., BUEHLMANN, U., THOMAS, E.R., 2004: *Investigating the linearity assumption between lumber grade mix and yield using design of experiments (DOE)*, Wood and Fiber Science, Vol. 36(4), pp. 547-559

**12. Mellékletek**