

Kísérlettervezés alkalmazása új termék kifejlesztéséhez

Dénes Levente, Kovács Zsolt*

Using experimental design for new product development

The utilisation of experimental design to improve the quality of products has gained considerable interest recently. We proposed to try response surface methodology in the development of novel wood-based composites for structural applications, using sliced veneer waste as raw material. A 2IV 7-3 fractional factorial design was used to screen out the significant factors and their first-order interactions on the response of the Modulus of Elasticity of the composite panels. The significant factors were found to be panel thickness and orientation of veneer strips when conducting a regression analysis of the average responses of each experimental run. However, taking the replicates of the individual treatments into consideration involved three more factors, namely wood species, hot-press temperature and pressure, as well as some two-factor interactions. In order to facilitate a robust design, i.e. being on target with least variation, values of the Signal-to-Noise ratio as defined by Taguchi were evaluated from the responses of the replicates. Besides, we determined the factors' dispersion effects for an alternative evaluation of parameter setting with respect to the variability of the response. It was established from the experiments that different parameter settings are optimal depending on whether magnitude or variability of the MOE is of concern, and that variability can only be reduced by lowering the average MOE. It was also concluded that the same amount of effort to conduct a higher number of different runs without replication, rather than producing replicate results of a smaller number of runs, might have cleared up some of the ambiguities concerning the significance of some of the interactions.

Key words: Product development, Experimental design, Robust parameter design, Wood composites

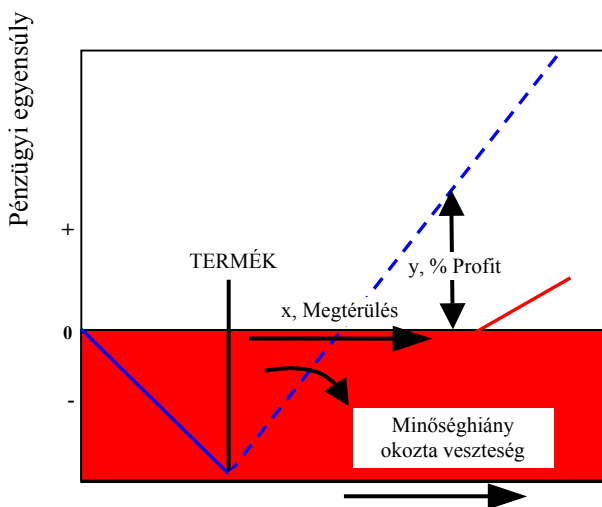
Bevezetés

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

A minőség költségei a termelő vállalatok ráfordításainak akár 30%-át is jelenthetik. Ennek majdnem felét a termék meg nem felelőségével 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.

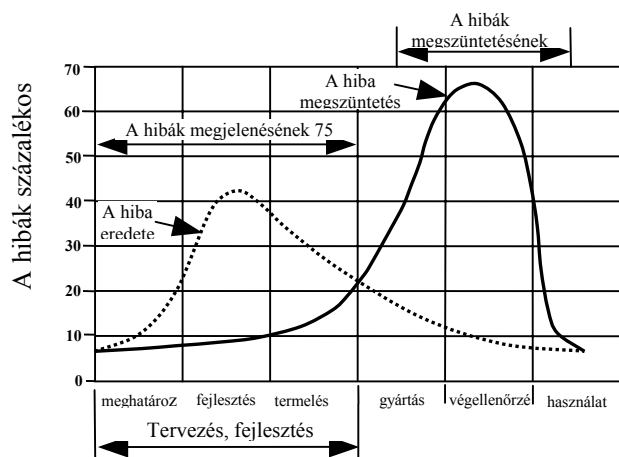
A hibaköltségek, vagy általában a minőséghiány okozta veszteségek érzékenyen érintik a jövedelmezőséget (Booker 2001). Az összefüggéseket az **1. ábra** szemlélteti. Nagyobb hibaköltséghez hosszabb megtérülési idő tartozik, a termék csak ezután lesz nyereséges. Másrészt minél nagyobb a minőséghiány okozta veszteség, annál kisebb az elérhető profit.

Tanulmányok igazolják (Russel és Taylor 1995, Booker 2001), 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 (**2. ábra**). Ezért a minőséget a termékciklus legkorábbi szakaszában, a tervezéskor bele kell építeni a termékbe.



1.ábra – A hibák keletkezésének és megszüntetésének helye (DTI, 1992)

* Dénes Levente doktorandusz hallgató, Dr. Kovács Zsolt CSc. Intézetigazgató egy. tanár, NyME Terméktervezési és Gyártástechnológiai Intézet



2. ábra – A hibák keletkezésének és megszüntetésének helye (DTI, 1992)

1. táblázat – A kísérletbe bevont faktorok

Faktor	1. szint	2. szint
1 Fafaj	bükk	juhar
2 Szálforgács szélesség	15 mm	35 mm
3 Hossztoldás	0%	50%
4 Lapvastagság	35 réteg	75 réteg
5 Orientáció	15°	30°
6 Nyomás	2,16 MPa	3,14 MPa
7 Hőmérséklet	130°	160°

A hibák fellépésének tervezéssel való megelőzésére több módszer létezik. Ilyen például a vevői elvárások műszaki jellemzőkké alakításának módszere vagy QFD (Quality Function Deployment), a hibamód- és hatás elemzés (FMEA, Failure Mode and Effect Analysis), a gyártás- és szereléstervezés, valamint nem utolsósorban a kísérlettervezés. Tanulmányunkban ez utóbbit alkalmaztuk. A kutatás célja olyan faipari termék előállítás, amelynek tulajdonságait előre megtervezzük. 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.

Anyagok és módszerek

Az előállítandó termék alapanyagául a színfurnérgyártás késelési eselékét választottuk. Maga a termék az eselék furnérszalakból préselt lap, szerkezeti célú felhasználásra. A furnércsí-

kok jellemzői: 0,59 mm névleges vastagságú, bükk és juhar színfurnér. A vastagság szórása bükk esetében 0,081 mm, juharnál 0,026 mm, nedvességtartalmuk 2,2-4,2 %. Nyomdaipari ollón kétféle, 15 illetve 35 mm-re szélességre vágtuk. Hosszúságuk a lap típusától függ: a hosszoldás nélküli lapoknál 72 cm, a hosszoldott lapoknál az 1. és 3. rétegekben a furnércsíkok hosszúsága szintén 72 cm; a 2. réteg 36 cm-es csíkokból (középen hosszoldott), a 4. réteg pedig 24 cm-es csíkokból (a hosszúság harmadánál toldott) épül fel.

A kutatáshoz alkalmazott módszer a faktoriális kísérlettervezés. Ha egy termék tulajdonságait feltételezhetően sok paraméter befolyásolja, azok hatásait célszerű olyan faktoriális elrendezésben vizsgálni, melyben az egyes befolyásoló paraméterek (faktorok) beállított értékei – szintjei – a kísérleti tartomány széleire esnek (kétszintű kísérletterv). Ha nemlineáris hatásokra is számítani lehet, azok három- vagy többszintes kísérlettervvel vizsgálhatók. A faktoriális kísérlet lehetővé teszi a faktorok egyidejű változtatását, így jóval kevesebb kísérleti beállításból nyerjük az információkat, mintha a tényezőket egyenként változtatnánk a többi rögzített értéken tartva. Ezen túlmenően lehetőségünk van a faktorok közötti kölcsönhatásokat is elemezni.

Az olyan kísérleti tervet, amelyben az egyes faktorok beállított értékeinek – szintjeinek – összes lehetséges kombinációja megvalósul, teljes faktoriális kísérletnek nevezünk. Az ilyen típusú tervek lehetőséget adnak a faktorok és valamennyi kölcsönhatásuk becslésére. Ha a faktorok száma nagy, akkor olyan méretű kísérleti tervet kapunk, amelynek megvalósítása idő- és költségigényes, ugyanakkor nem biztos, hogy minden beállításhoz szükség van. Ilyenkor a terv redukálásával csökkenthető a beállítások száma. Ebben az esetben információt veszítünk, tehát arra kell ügyelnünk, hogy csak olyan adatokat veszítsünk, amelyek a modell előállításában nem játszanak jelentős szerepet.

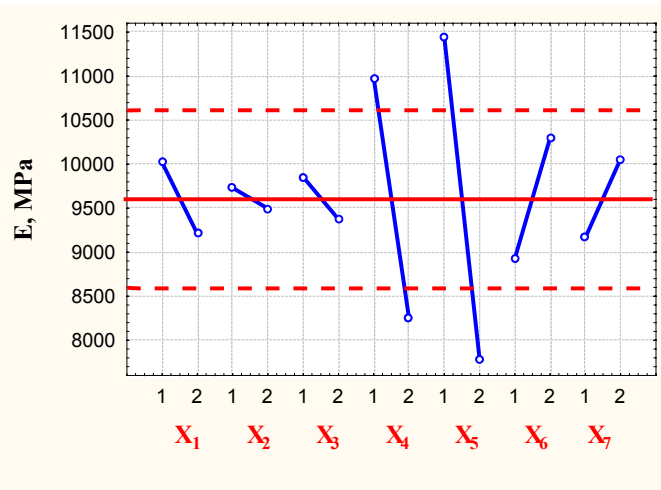
Kísérleteinkhez hét faktort vettünk fel, mindegyiket két szinten. Nem követelmény, hogy a faktorok mennyiségi változók legyenek, kategorikus jellemzők is lehetnek. Az egyes faktorokat és azok beállítási szintjeit az 1. táblázat tartalmazza.

A hét faktor hatásának vizsgálatára egy négyfaktoros, kétszintes tervből indultunk ki. Az így kialakuló lehetséges szintkombinációk száma 2^4 , azaz 16. Az egyes faktorok szintjeit a 16 beállítás során a **2. táblázat** kísérleti mátrixa mutatja. Itt a kölcsönhatások oszlopai is szerepelnek, melyben a szintek szorzással adódnak (azonos szintek szorzata 2-es, a különbözőké 1-es). Ha feltételezzük, hogy a három-faktoros kölcsönhatások nem jelentősek, akkor ezek helyébe újabb faktorok helyezhetők, ily módon olyan fraktált tervet kapunk, amely a 2^{4+3} , azaz 128 kísérleti beállítás helyett csupán 16 beállítást tartalmaz. Jelen esetben a fennmaradó három faktort helyeztük így el. A fraktálásból az

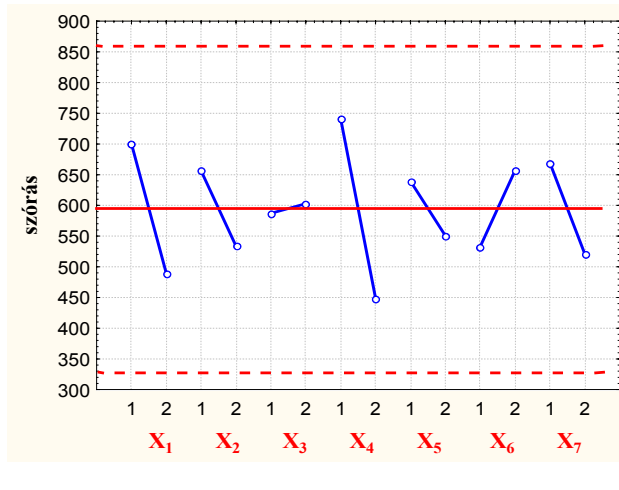
is következik, hogy bizonyos hatások és kölcsönhatások egymással keverednek. Ha azonban a behelyettesítést megfelelően választjuk meg, az előálló keveredési rendszer kezelhető. Jelen esetben a három új faktort generáló összefüggések:

$$x_5 = x_1x_2x_4; \quad x_6 = x_1x_3x_4; \quad x_7 = x_2x_3x_4.$$

A generáló összefüggésekből kiindulva megkapjuk a keveredési rendszert. A három- és annál több-faktoros kölcsönhatásokat nem szignifikánsnak feltételeztük, ezek hatásától eltekintve a következő egyszerűsített keveredési rendszer érvényes (b_i – a lineáris modell kiszámított együtthatói; β_i – az együtthatók ismeret-



3.ábra – A faktorok hatásábrája



4.ábra – A faktorok szórásának változása

2. táblázat – 27-31V típusú kétszintes, ortogonális, részleges faktoriális terv

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	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4=x_5$	$x_1x_3x_4=x_6$	$x_2x_3x_4=x_7$	$x_1x_2-x_3x_4$
1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2
2	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1
3	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	1	2	1
4	1	2	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2
5	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1
6	1	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	2	2
7	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	1	1	2	2	1	2
8	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	1	1
9	1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	1	1	2	2	2	1
10	1	2	1	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	2
11	1	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2
12	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1
13	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	1	1	2
14	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1
15	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	1	1	1	2	1
16	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

len, valódi értékei):

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

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

$$y = \beta_0 x_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_7 x_7 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \dots + \beta_{67} x_6 x_7 + \varepsilon, \quad [1]$$

Eredmények és értékelésük

A 16 kísérleti beállítást háromszor ismételtük meg véletlenszerű sorrendben, így összesen 48 lapot préseltünk. A kutatási eredményeket a lapra merőleges rugalmassági modulusra, mint optimalizációs paraméterre ismertetjük.

Az ismétlések figyelembe vétele nélkül elvégzett varianciaanalízis két faktor, a vastagság és az orientáció hatását mutatta szignifikánsnak, a szaggatott vonallal jelzett 95%-os megbízhatósági intervallumon e kettő esik kívül. A két faktor optimális szintekre történő beállítása az optimalizációs paraméter mintegy

25 %-os javulását eredményezi az átlaghoz képest (**3. ábra**).

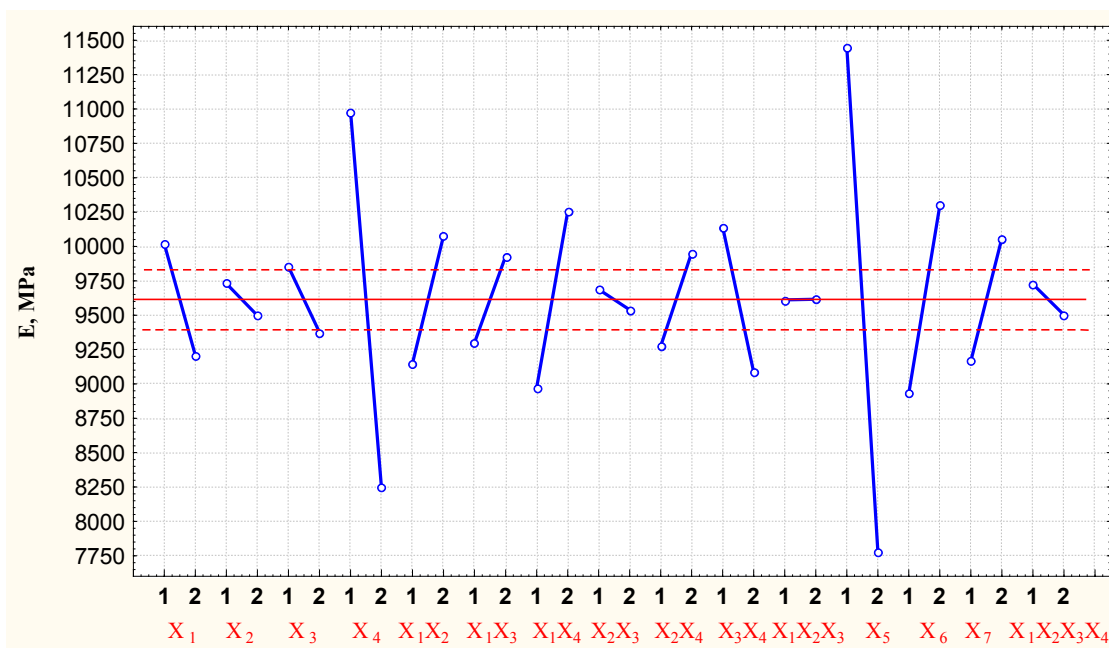
Ha a minőség tényleges javulásának mértékéről akarunk információt nyerni, az optimalizációs paraméter szórását is vizsgálni kell. A minőség mérőszámaként alkalmazhatjuk a Taguchi által definiált jel/zaj viszonyszámok közül az esetünknek megfelelő, „minél nagyobb annál jobb” típusú jellemzőre vonatkozót. Ha erre a jel/zaj viszonyszámra dolgozzuk fel az adatokat, továbbra is az említett két faktor hatása marad szignifikáns.

A faktorok különböző szintjeihez tartozó szórását vizsgálva megállapíthatjuk, hogy ezek közül egy sem esik kívül a 95%-os megbízhatósági intervallumon, bár az egyes faktorok esetében jelentős különbségek látszanak (**4. ábra**).

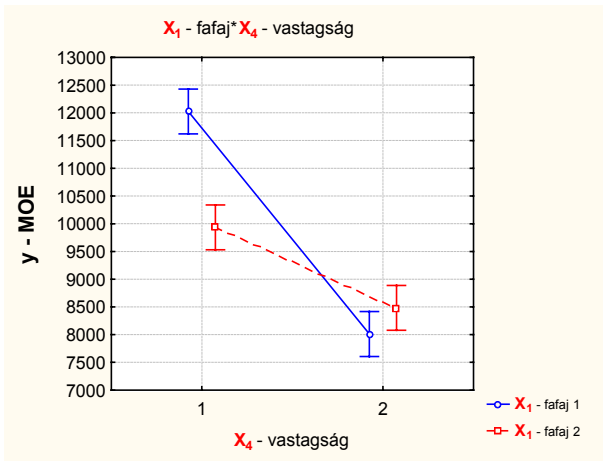
Grafikusan megvizsgáltuk a szórások átlagtól való függését: ha összefüggést tapasztalunk, úgynevezett Box-Cox transzformációt alkalmazhatunk. Jelen esetben a javasolt transzformáció a mért értékek négyzetgyöke. A transzformált adatokon végzett varianciaanalízis továbbra sem jelzi, hogy más faktorok is jelentősek lennének.

Az ismétlések figyelembevételével elvégzett lineáris regresszióanalízis azonban már hat faktor és öt kölcsönhatást mutat szignifikánsnak (**5. ábra**).

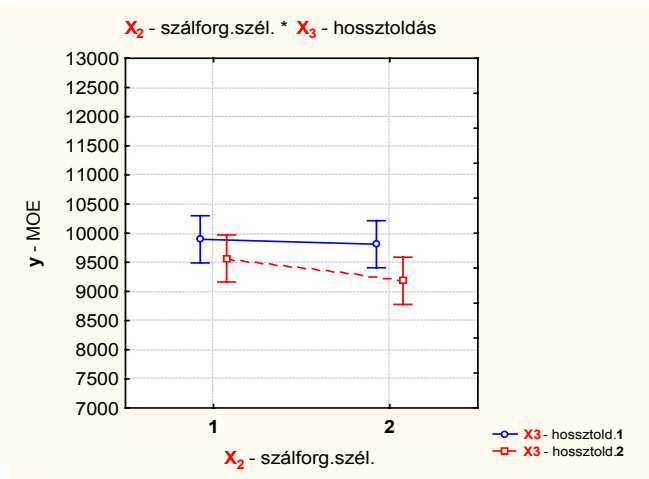
A szignifikáns faktorok együtthatóinak



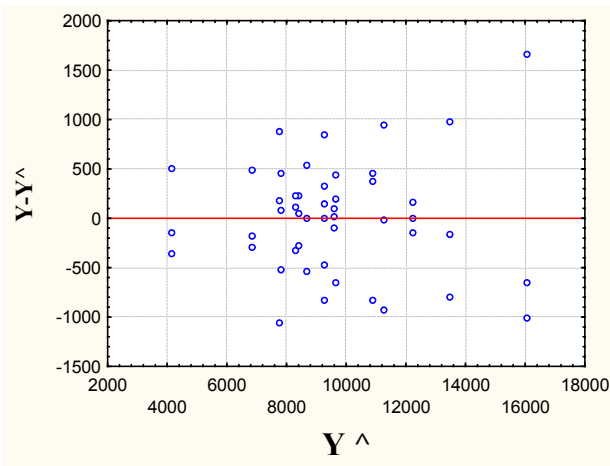
5. ábra – A faktorok hatásdiagramja 3 ismétlés esetén



6.ábra – A fafaj és vastagság kölcsönhatása



7.ábra – A szálforgács-szélesség és hosszoldás kölcsönhatása



8.ábra – A maradékok grafikus ábrázolása

kiszámítása után a következő polinomot kapjuk:

$$\begin{aligned}
 Y_E = & 9613,7 - 404,6X_1 - 238,7X_3 - 1366,8X_4 - \\
 & -1832,9X_5 + 683,2X_6 + 446,9X_7 + 436,2X_1X_2 + \\
 & + 315,7X_1X_3 + 640,1X_1X_4 + 339,5X_2X_4 + \\
 & + 528,4X_3X_4, \quad [2]
 \end{aligned}$$

Az optimális szintekre történő beállítás a rugalmassági moduluszt a kísérleti átlaghoz képest 60 %-kal, 10,5 MPa-ra növelni.

Ha a faktorok legkisebb szórását eredményező szintjeire számítjuk ki a válaszfüggvény értékét, akkor javulás helyett csökkenést eredményeznek a beállítások, vagyis a szórás csak a rugalmassági modulus csökkenése mellett csökkenthető.

A kölcsönhatások grafikus ábrázolásával megállapíthatjuk azok jelentőségét. Például bükk esetében a vastagság növelése sokkal nagyobb mértékben csökkenti a rugalmassági moduluszt, mint a juhar esetében, a vastagság és fajfaj kölcsönhatása nyilvánvaló. (6. ábra). Ugyanakkor a szálforgács szélessége és a hosszoldás között nincs kölcsönhatás, hisz az egyik változása nem okoz szignifikáns eltérést a másikkal a rugalmassági modulusra gyakorolt hatásában. (7.ábra). A többi kölcsönhatást is hasonló módon vizsgálva megállapíthatjuk azokat a válaszfüggvényre gyakorolt hatását.

A mért és becsült értékek különbségét grafikusán ábrázolva (8.ábra) kijelenthetjük, hogy jó az illeszkedés, a lineáris matematikai modell alkalmas a becslésre, a vizsgált faktorok 95%-ban magyarázzák a rugalmassági modulusz változását.

Következtetések

A kísérlettervezés módszerével megoldást nyertünk arra, hogy ismert tulajdonságú alapanyagból a részecskék geometriájától, elrendezésétől, valamint a technológiai paramétereiktől függő, meghatározható tulajdonságú agglomerált terméket állítsunk elő, illetve adott határok között a termék tulajdonságait előre tervezzük. A hulladék anyagból előállított termék egyik legfontosabb jellemzője a hajlító rugalmassági modulusz, ami az adott fajfaj tömör, hibamentes faanyagának rugalmassági moduluszát meghaladhatja.

A kutatás jelen fázisában alkalmazott kísérleti terv eredményességére vonatkozóan az alábbi megállapításokat tehetjük:

- Az ismétlések nélküli és az ismétléseket is figyelembe vevő elemzés eltérő eredményeket ad, az utóbbi további faktorokat von be a szignifikáns faktorok körébe.
- A célparaméter helyzeti értékére vonatkozó hatásábrák más beállítást jelölnek optimálisnak, mint a szórás hatásábrái.
- A kísérleti terv eredményeire illesztett lineáris modell adekvát.

Az elemzés során öt kétfaktoros kölcsönhatás szignifikánsnak mutatkozott. Mivel ezek egymás között keverednek, hatásukat illetően egyértelmű következtetést nem vonhatunk le. Független becslésükre újabb kiegészítő kísérleteket kellene elvégezni.

Az ismétlésekkel együtt 48 kísérleti beállítást végeztünk. Ismétlés nélküli, vagy kisebb ismétlési számú (esetünkben 3 helyett 2) kísérlet esetén (1/8-os replikáció helyett 1/4-es, vagy 1/2-es replikáció alkalmazásával) a beállítások ugyanakkora, vagy nem lényegesen nagyobb számával a kétfaktoros kölcsönhatásokra is egymástól független becsléseket nyerhettünk volna. Tekintetbe véve azt a jelentős munkát, amit az egyes kísérleti beállítások elvégzése igényel, előzetes ismeretekre támaszkodva, illetve komp-

romisszum alapon érdemes előre elhatározni, hogy a nagyobb ismétlési szám, vagy a különböző beállítások nagyobb száma által biztosított többletinformáció-e a fontosabb. Kísérleteink esetében úgy tűnik, hogy az ismétlések mellőzése okozta hátrányt részben ellensúlyozhatja az, hogy a kevésbé fraktált tervvel a kölcsönhatások szignifikáns voltára vonatkozó megállapítások is differenciáltabbak lesznek. A kísérleteinkben alkalmazott ismétlések viszont lehetővé tették a modell adekvátságának közvetlen értékelését.

Irodalomjegyzék:

1. J.D. Booker, M. Raines, K.G. Swift 2001 *Designing Capable and Reliable Products*. Butterworth Heinmann, Oxford, 400 pp.
2. DTI 1992 *Quality Assurance Programme 1992-1996*. Federal Ministry of Research and Technology, Germany.
3. Kemény S. 1998 *Statisztikai minőség-(megfelelőség-) szabályozás*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 394 old.
4. Kemény S., Deák A. 2000 *Kísérletek tervezése és értékelése*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 492 old.
5. Russell, R., B. Taylor 1995 *Production and Operations Management: Focusing on Quality and Competitiveness*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 916 pp.

Faipari kézikönyvek

Tóth Sándor^{*}

Wood processing handbooks

The fifth Hungarian wood handbook came out in 2000. This article presents a short summary of the contents of the handbooks published in 1922, 1927, 1963, 1976 and finally in 2000 (Volume I.) The first two books dealt mainly with joinery, whereas the ones published after the WWII discussed mass production. The authors of the first two books were trade school teachers, the latter ones were edited by the professors of the University of Sopron

A 2000. évben jelent meg a faiparos szakma ötödik kézikönyve. Az 1922-ben, 1927-ben, majd 1963-ban, 1976-ban és végül 2000-ben (I. Kötet) megjelent faipari kézikönyvek tartalmát röviden ismertetjük. Sorrendben az első kettő inkább az asztalos kézműiparral foglalkozott,

míg a II. Világháború utániak már a nagyüzemi gyártással. Az első kettő szerzői a felső ipariskola tanárai voltak, utóbbiakat a soproni főiskola, majd egyetem tanárai szerkesztették.

Íparról általában akkor beszélhetünk, ha megvalósul az azonos terméket többször előál-

^{*} Dr. Tóth Sándor szakfőtanácsos, FVM Vagyongazdálkodási Önálló Osztály