

A nem-lineáris rheológia alkalmazása a faalapú anyagok pelletálásával, tömörítésével összefüggésben

II. kísérleti rész

KOCSIS Zoltán¹, CSANÁDY Etele¹

¹ Nyugat-magyarországi Egyetem, Simonyi Károly Kar

Kapcsolat: zoltan.kocsis@skk.nyme.hu

Kivonat

A nagy nyomáson előállított pellet mechanikai tulajdonságai számos tényezőtől függenek. A legfontosabb tényezők a fafaj, a szemcseméret, a nedvességtartalom, a préselési nyomás, a préselési sebesség, a deformáción tartási idő, a nyomófej átmérő és a préselési hőmérséklet. A por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörítése során bekövetkező mechanikai változások leírása a nem-lineáris rheológia módszerével történik, mivel a faanyag nem-lineáris viszkoelasztikus tulajdonsággal rendelkezik. Ebből adódóan a tömörítés folyamata alatt a faanyag halmaz rugalmassági modulusa nagymértékben növekszik, majd a folyamat végén kialakult pellet maradó deformációt szenved. A maradó deformáció mértéke határozza meg a pellet tulajdonságait, elsősorban a sűrűségét. Jelen kutatási szakaszban kidolgozásra került a relatív falsúrlódással összefüggő kitolási erő közelítő mechanikai modellezése. Az elméleti alapokon levezetett összefüggéseket mérésekkel is igazoltuk. A kapott eredmények a gyakorlat számára hasznosíthatók és nagyban hozzájárulnak a por-forgács halmazok tömörítésével összefüggő elméleti ismeretek bővítéséhez.

Kulcsszavak: por-forgács halmazok, tömörítés, rheológia, relatív falsúrlódás

Application of a non-linear rheological model for the compaction of wood-based materials

2th part of the research

Abstract

The mechanical properties of pellets produced under high pressure depend on many factors. The most important factors are wood species, particle size, moisture content, pressure, the rate of compression, the holding time on deformation, the diameter of the ram and the temperature of pressing. The analysis of the resulting mechanical changes during high pressure compression of wood chips is possible using non-linear rheological methods, because wood has non-linear viscoelastic properties. Consequently, during the compression process the elastic modulus of wood chips and dust increases greatly, and the resulting pellet at the end of the process suffers residual deformation. The rates of residual deformation determine the properties of the pellet, especially its density. In the present stage of our research, an approximate model was developed for the description of the force and the required length of press. The derived theoretical correlations have been verified through experimental results. The obtained results are useful for practical applications and contribute greatly to expanding the theoretical knowledge of wood chips and dust behavior.

Keywords: wood chips and dust, rheology, compaction, relative wall friction

Bevezetés

Cikkünk első részében (Kocsis és Csanády, 2014) bemutattuk azokat a főbb kutatási irányokat, melyek segítségével pontosabb képet kaphatunk a por-forgács halmazok nagy nyomáson történő tömörödési folyamatairól. Meghatároztuk azokat a főbb befolyásoló tényezőket (nedvességtartalom, nyomófej átmérő, présnyomás, szemcseméret, stb.), melyek nagyban befolyásolják a kialakult pellet sűrűségét. Megállapítottuk, hogy a faalapú por-forgács szemcsék mérete és szilárdsága jelentős hatással van a kialakult pelletsűrűsége, vagyis minél keményebb a szemcse (minél nagyobb a szemcse szilárdsága), annál jobban ellenáll a pelletálási nyomásnak. Láthattuk, hogy azonos fafajon belül a szemcseméret csökkenésével préselési nyomáson (100–140 MPa) csökkent a faanyag halmaz tömör sűrűsége, melynek okát az ún. póruselmélettel (levegő-szilárd rész arány) magyaráztuk. Megállapítottuk azt is, hogy a nedvességtartalom növekedésével egy adott pelletsűrűség kisebb nyomással érhető el, valamint meghatároztuk azt a nedvességtartalmi küszöbértéket is (~20%), amely felett a pellet töredezetté vált és sűrűsége is csökkent. A pellet sűrűségét a fent említettek kivül a nyomófej átmérője is befolyásolta, aminek magyarázatát a relatív falsúrlódással összefüggő elméletekre vezettük vissza, mely a téma fontossága miatt további, mélyrehatóbb kutatásokat igényelt.

E cikkben tehát a relatív falsúrlódással összefüggő kutatási eredményeinket mutatjuk be, melyek során megalkottuk fenyő és akác por-forgács minták esetében bizonyos elméleti megfontolások alapján a pelletálási folyamatokra jellemző kitolási erő közelítő mechanikai modelljét.

Elméleti megfontolások

Előző cikkünkben már tettünk utalást a relatív falsúrlódás hatásának jelentőségére. A relatív falsúrlódás a tömörítő csatorna átmérőjének (D) – ami közel azonos a pellet átmérővel – és a pellet magasságának (L) a viszonya. Az irodalmak (Biot, 1954; Findley és mtsai, 1989; Heiko és mtsai, 2005; Hofko, 2006) ezt L/D viszonyként említik. Ennek értelmében minél kisebb a tömörítő csatorna átmérője a pellet magasságához képest (vagyis az L/D hányados nagy), annál nagyobb lesz a relatív falsúrlódás mértéke a kompresszió erőkhöz viszonyítva (megnő a relatív súrlódási ellenállás), vagyis nagyobb lesz a nyomáskülönbség és ez által a sűrűség gradiense is a pellet hossza mentén. A pellet hossz mentén létrejövő nyomásváltozás az [1] egyenlet alapján jó közelítéssel meghatározható (Biot, 1954; Sacht, 1967):

$$p_x = p_k e^{-kx} \quad [1]$$

ahol:

p_k – a nyomófej által kifejtett nyomás (N/mm²)

p_x – a csökkent nyomás a pellet hossza mentén (N/mm²)

x – a pellet hosszmenti koordinátája (relatív koordináta hely) (mm)

k – állandó

A nyomáscsökkenés tehát a pellet hossza (x koordináta) mentén az [1] egyenlet alapján exponenciális jellegű. A függvény lefutását, meredekségét nagyban befolyásolja a kitevőben szereplő k állandó értéke. Minél kisebb a k értéke, annál kisebb a nyomásesés a pellet hossza mentén, aminek következtében kisebb lesz a sűrűség hossz menti gradiense is. A kitevőt befolyásolja egyrészt a falfelület (F_{fal})/térfogat (V) viszonya, amely az alábbiak szerint számítható azonos pellet magasságot feltételezve:

$$k' = \frac{F_{fal}}{V} = \frac{D \cdot \pi \cdot L}{\frac{D^2 \pi}{4} \cdot L} = \frac{4}{D} \quad [2]$$

A méréseket 6, 8, és 16 mm-es nyomófejjel végeztük el, így az F_{fal}/V arány sorban: 0,67; 0,5 és 0,25 1/mm értékre adódott. A gyakorlatban a relatív falsúrlódás meghatározása ennél összetettebb feladat, ugyanis a súrlódási tényező (μ) és a Poisson-tényező (ν) befolyásoló hatását a [3] egyenletben figyelembe kell venni. Ezek alapján a k' állandó értéke az alábbiak szerint módosul (Findley és mtsai, 1989):

$$k = \frac{4}{D} \mu \frac{\nu}{1 - \nu} \quad [3]$$

ahol:

μ – a faanyag halmaz (pellet) és a tömörítő csatorna fala között létrejött súrlódási tényező

ν – a Poisson-tényező (oldalnyomás-tényező)

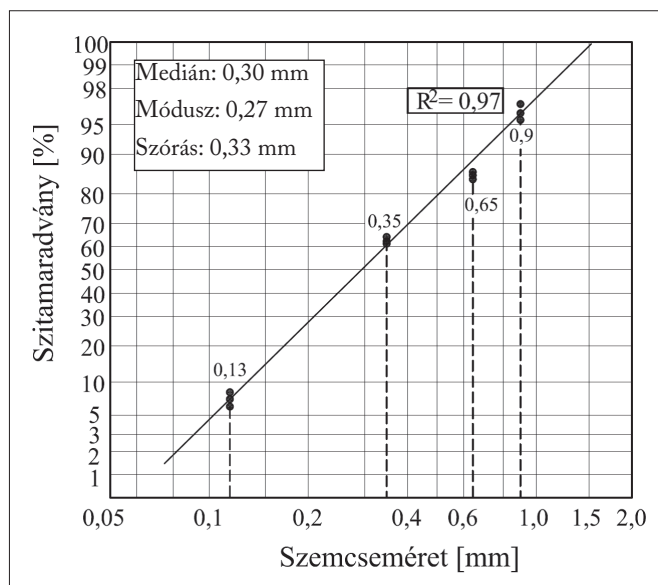
Az [1] egyenlet használatához ismernünk kell az anyagok Poisson-tényezőjét és a μ súrlódási tényező értékét fa-acél súrlódási anyagpárra jellemzően, a nyomás, a nedvességtartalom, a szemcseméret és a fafaj függvényében. A pelletálási tartományban a faanyagalmaz Poisson-tényezője $\nu=0,35-0,45$ között alakul (Sacht, 1967). A súrlódási tényező elsősorban a fafaj, szemcseméret és a nedvességtartalom függvénye, azonban a nyomás is jelentős hatással van rá. Ez utóbbi hatás abban nyilvánul meg, hogy egyrészt a nagy nyomás deformálja a faanyagalmazt, így az érintkező felület módosul, másrészt víz préselődik ki az anyagból, amely a súrlódási felületet keni, csökkentve ezáltal a tényező értékét. Ennek következtében nagy nyomások esetén a súrlódási tényező a nagyobb nedvességtartalmú tartományban csökken. A különféle faporok súrlódási tényezőjével összefüggő kutatások megtalálhatók a következő irodalmakban (a teljesség igénye nélkül: Varga, 1983; Varga, 1993; Sitkei, 1981).

A falsúrlódás hatására bekövetkező nyomáscsökkenés meghatározását egy összetett súrlódási problémára vezethetjük vissza, melyben a súrlódási tényező (μ) és a Poisson-tényező (ν) nem ismert és a meghatározásuk is nehéz. Méréseinkkel kimutattuk, hogy egyrészt a kitolási erő jó közelítéssel lineárisan csökken a pellet hossza mentén, melyből következik, hogy változik a nyomásés függőleges irányban (az x koordináta mentén). Másrészt pedig a kitolási erő csökkenésének hatására a Poisson-tényezővel figyelembe vett súrlódási erő, majd a belőle számított oldalnyomás (σ_x) is változik a kitolási úthossz függvényében. A gyakorlatban, mivel a pelletáláson folyamatos a kitolás (folyamatos az anyagalmaz) a μ értéke közel állandó, de ha egy pelletre vonatkoztatjuk – vagyis véges hosszal vesszük figyelembe –, akkor változik. A későbbiekben levezetett elméletnél bizonyos megfontolások alapján μ értékét állandónak tekintettük. A jelenlegi kutatásunkban jó közelítéssel, iterációs alapon meghatároztuk a kitolási erő változását (F_x) a pellet hosszkoordinátájának (x koordináta) függvényében bevezetve a relatív felületcsökkentési tényező (ψ) fogalmát.

Anyagok és módszerek

Kutatásainkat lucfenyő (*Picea abies*) és akác (*Robinia pseudoacacia*) por-forgács halmazokon 0,063–1 mm-es szemcseméret tartományban, szobahőmérsékleten, 10%-os alapanyag-nedvességtartalom mellett 140 MPa állandó tömörítési nyomáson végeztük el az előző cikkünkben ismertetett mérőeszközök (INSTRON univerzális szilárdságvizsgáló gép, utánaprító, digitális mérleg, stb.) segítségével (Kocsis és Csanády, 2014). A méréseket zárt térben hajtottuk végre, azaz a tömörítő cső egyik vége a tömörítés során le volt zárva, tehát a tömörítést követően a pelletet ki kellett tolnunk a csőből. A tömörítés végén kialakult por-forgács halmazok sűrűségét tömör pellet sűrűségnek neveztük el és cikkünkben ρ_{max} -szal jelöltünk. A kitolást követően a pellet kirugózott, és a megmaradt relatív maradé deformáció határozta meg a pellet sűrűségét, amit ρ_{pellet} -tel jelöltünk. A kitolást állandó sebességgel hajtottuk végre ($v_{kit} = 8$ mm/s) és a kitoláshoz szükséges erőt ($F_{kitolási}$) regisztráltuk. A tömörítést 10 mm/min állandó sebesség mellett végeztük el három nyomófej átmérőnél (6 mm, 8 mm, 16 mm). Fafajonként 90 mérést végeztünk ismétlésekkel együtt (minden mérést háromszor ismételtünk meg). A vizsgált fafajok abszolút száraz sűrűségi értékei Molnár, 1999 alapján: $\rho_{ofenyő} = 430$ kg/m³; $\rho_{akác} = 720$ kg/m³, míg az abszolút tömör faanyag sűrűsége (tisza sejtfa sűrűsége): 1520–1620 kg/m³ (Babos és mtsai, 1979). A fenti szemcseméret tartomány (0,063–1 mm) a jellemző a gyakorlatban utánaprított faalapú por-forgács halmazokra is, melyek a pelletek alapanyagául szolgálnak. A frakció-tartományon belül domináns 0,2–0,5 mm közötti szemcseméret az 1. ábrán látható.

Fontos megemlíteni a vizsgált fafajok anatómiai sajátosságait is a szemcsemérettel összefüggésben. Látni fogjuk, hogy a szemcseméretnek jelentős hatása van a pellet sűrűségére, melyek magyarázatát az



1. ábra A frakcióanalízis eredményeként kapott log-normális eloszlás integrálgörbéje

Figure 1 Integral curve of the log-normal distribution

előző cikkünkben tárgyalt póruselmélet (levegő-szilárd rész arány) adta, vagyis a faanyag sajátosságából adódó természetes pórrendszer por-forgács állapotban kiegészül egy plusz pórrendszerrel (levegő), mely alapján külső és belső pórusokról beszélhetünk. Tömörítéskor először a szemcsék közötti külső pórus csökken, majd egy adott nyomás felett (~25 MPa) a szemcse belső pórusának csökkenését figyeltük meg. Érdekes kérdést vet fel az a határszemcse méret, melynél még belső pórusról beszélhetünk. Ennek a vizsgálata további kutatásokat igényel. Láthatjuk, hogy vizsgálataink során a szemcseméret elérte az 1 mm-t, ami azt jelenti, hogy akác esetében ez az 1 mm-es méret lehet akár egy teljes sértetlen libriform rost is, míg fenyőnél ez már csak a tracheida hosszának kb. negyede, tehát mindenképpen roncsolt rostokról beszélhetünk. Ezekből a faanatómiai sajátosságokból eredő fafaji különbségek is befolyásolják a por-forgács halmazok feszültség-deformáció (σ - ε) viszonyait.

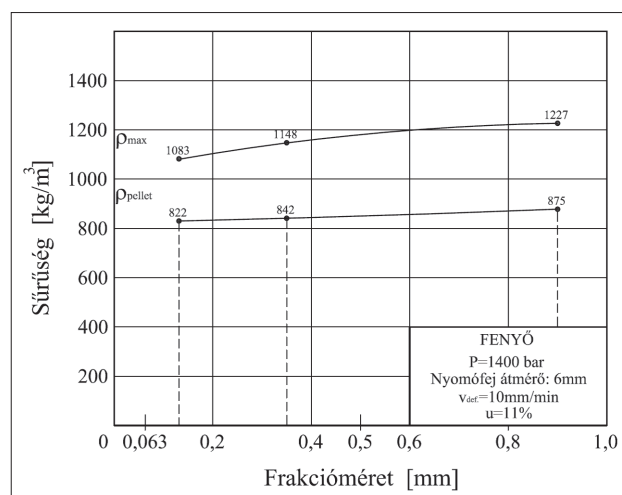
Mérési eredmények, következtetések

A kapott eredmények továbbra is három azonos mérés átlagából származnak. A kutatási eredményeinket először 6 mm-es nyomófej átmérő mellett ismertetjük.

A vizsgálatokat a 2–3. ábrákon látható szemcseméret tartományokban végeztük el, konkrétan: 0,063–0,2 mm; 0,2–0,5 mm; 0,8–1 mm. Mivel a frakcióintervallum közepén szerepeltettük a kapott adatokat. Megfigyeltük, hogy azonos fafajnál a szemcseméret csökkenésével a pelletsűrűség (ρ_{pellet}) is csökkent. A csökkenés mértéke mind a két fafaj esetében azonos nagyságú volt, vagyis 4–6%. A pelletsűrűséggel együtt a tömör sűrűség (ρ_{max})¹ is csökkent a szemcseméret csökkenésével mind a két fafaj esetében 12–14%-kal. A változás összefügg a relatív kirugózással és a relatív maradó deformációval. Megállapítottuk, hogy a fenyő jobban összetömöríthető, mint a nála keményebb akác, vagyis fenyő esetében a fajlagos alakváltozási értékek tömörítéskor (140 MPa nyomáson) $\varepsilon=0,8$ – $0,85$ között adódtak, míg akácnál $\varepsilon=0,75$ – $0,8$ értékeket kaptunk. A 2. és 3. ábrán látható, hogy fenyő esetében 140 MPa nyomáson és 0,063–1 mm-es szemcseméret tartományban az akáchoz viszonyított nagyobb tömör sűrűség ellenére szisztematikusan kisebbek lettek a pelletsűrűségi értékek az akáchoz képest. Ez azzal magyarázható, hogy a fenyőnek a tehermentesítést követően nagyobb volt a relatív visszarugózása (4. ábra), mint az akácnak, ezzel összefüggésben kisebb relatív maradó deformációt szenvedett (5. ábra), és ezáltal a pelletsűrűségi értékek is kisebbre adódtak. Ezt úgy is megfogalmazhatjuk, hogy ugyanazt a sűrűségi értéket a fenyő nagyobb nyomással éri el, mint az akác. Ez a gyakorlatban összefüggésben van a pelletmatrica szélességével, ugyanis pelletáláskor a puhább (kisebb szilárdságú) fafajokhoz szélesebb matricát alkalmaznak.

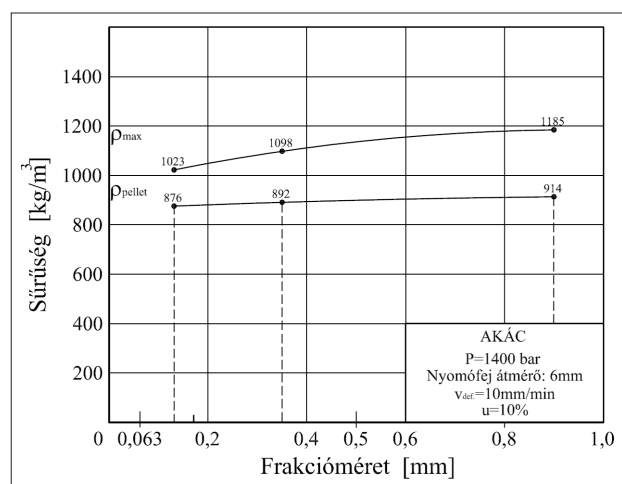
A 4. ábrán látható, hogy a fenyő adott nyomáson relatíve jobban visszarugózik, mint az akác. A szemcseméret csökkenésével a relatív visszarugózás csökkent, a

¹A tömör pellet (ρ_{max}) sűrűség a préselés folyamán összenyomott por-forgács halmaz sűrűsége, vagyis nem azonos a végleges (kirugózott) pellet (ρ_{pellet}) sűrűséggel.



2. ábra A pelletsűrűség változása a frakcióméret függvényében fenyő mintánál 6 mm-es nyomófej átmérőnél

Figure 2 The changes of pellet density as a function of fraction size for spruce. The diameter of ram is 6 mm



3. ábra A pelletsűrűség változása a frakcióméret függvényében akác mintánál 6 mm-es nyomófej átmérőnél

Figure 3 The changes of pellet density as a function of fraction size for black locust. The diameter of ram is 6 mm

relatív maradó deformáció pedig nőtt. A keményebb és nagyobb szilárdságú szemcse jobban ellenállt a nyomásnak, ezért a tömörítés során kisebb fajlagos alakváltozást (ε) szenvedett, ezáltal csökkent a faanyaghalmozba bevitt deformációs feszültség nagysága is, mint azt a későbbiekben majd látni fogjuk. Minél kisebb a szemcseméret, annál kisebb mértékben rugózott vissza a faanyaghalmoz, tehát annál nagyobb lett a relatív maradó deformáció. Ez megfigyelhető akác és fenyő minták esetében az 5. ábrán. A gyakorlatban az elvárt minőségi követelményeknek megfelelően $\sim 1100 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű pelletet vizsgálataink alapján minimum 0,8-as relatív maradó deformáció mellett érhetünk el, amihez kutatásaink alapján tömörítéskor $\varepsilon=0,8-0,85$ fajlagos alakváltozás szükséges.

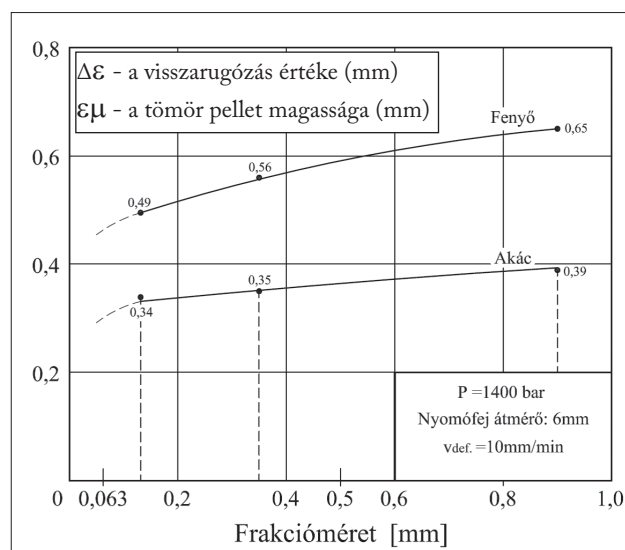
A további két átmérettartományban (8 mm és 16 mm) végzett kutatási eredményeinket a következőkben ismertetjük röviden. A 8 mm-es nyomófejjel végzett mérési adatok szisztematikusan a 6 mm és a 16 mm nyomófejjel végzett mérési eredmények közé estek.

A 6. és 7. ábrán látható, hogy a tömörítő csatorna átmérőjének növelésével a pelletsűrűség is növekedett, tehát kisebb volt a relatív falsúrlódás hatása (csökkent a tengelyirányú súrlódási ellenállás) és ezáltal a nyomás-, és vele együtt a sűrűség gradiense is a pellet hossza mentén. Érdekes, hogy a 7. ábrán látható görbék alakja ellentétes a korábbiakkal. A 6 mm és a 8 mm átmérővel végzett mérések során ugyanis a szemcseméret csökkenésével a tömör- és a pelletsűrűség is csökkent, 16 mm-nél viszont pont fordított a helyzet. Ennek az oka a relatív falhatásban keresendő, vagyis 16 mm-es átmérőnél a falhatás sokkal kisebb, méréseink alapján mintegy 15%-a a 6 mm-es átmérőhöz képest. Ebből adódóan a kisebb szemcsék jobban tömöríthetők, aminek következtében a tömör- és a pelletsűrűség nagyobb lett. Ugyanez a jelenség megfigyelhető akác mintánál is (8–9. ábra).

Akác mintánál – követve az eddigi tendenciát – nagyobb pelletsűrűségi értékeket kaptunk kisebb tömör sűrűség mellett, mint a fenyő minta esetében. A relatív visszarugózási értékek 16 mm-es átmérőnél csökkentek a 6 mm-es átmérőhöz képest a falhatás csökkenése következtében. A csökkenés mértéke átlagosan 15% volt. A maradó deformáció ezzel szemben 16 mm-es átmérőnél növekedett átlagosan mintegy 20%-kal a 6 mm átmérőhöz képest.

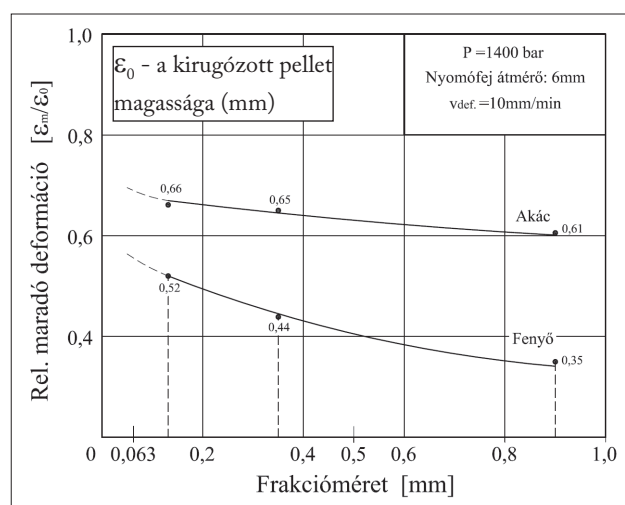
A kitolási erő közelítő modellezése

A nyomás hossz menti gradiensek változását – mint ahogyan azt a fentiekben is tárgyaltuk – egy összetett súrlódási problémára vezettük vissza, ahol a μ és a ν értékét csak mérésekkel lehet közelítőleg meghatározni, ugyanis véges pellethossznál ezek nem állandók. Ezért célul tűztük ki – a relatív falsúrlódás kutatására alapozva –, hogy a vizsgálati frakciótartományban (0,063–1 mm) meghatározzuk a kitolási erő változását a pellethossz mentén (x koordináta) három átmérőnél, amellyel kimutatható a falhatás és p_x is nagyobb pontossággal számítható a mérési eredményeink alapján. Másrészt pedig az elméleti összefüggés felhasználásával a rugalmas deformációból származó feszültség is meghatározható, amely elsősorban a pellet radiális kirugóztatását (kitágulását) okozza a kitolást követően fenyő és akác mintáknál. Első lépésben megmértük fenyő és akác mintánál az előzetesen 140 MPa



4. ábra A relatív visszarugózás változása a frakcióméret függvényében 6 mm-es nyomófej átmérőnél

Figure 4 The changes of relative rebound as a function of fraction size. The diameter of ram is 6 mm



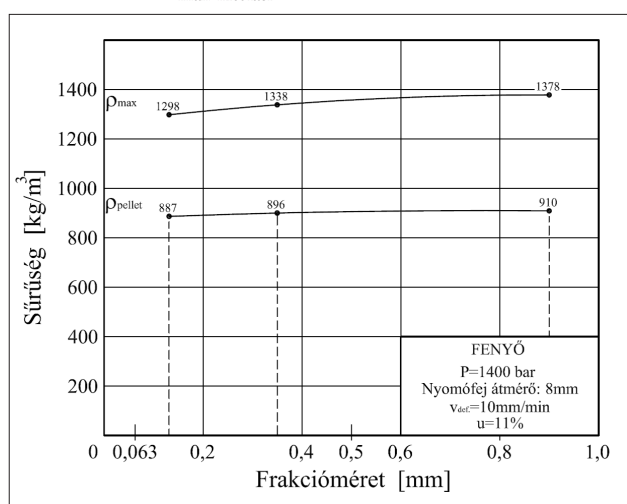
5. ábra A relatív maradó deformáció változása a frakcióméret függvényében 6 mm-es nyomófej átmérőnél

Figure 5 The changes of relative permanent deformation as a function of fraction size. The diameter of ram is 6 mm

nyomáson tömörített faanyagalmazok kitolási erő csökkenését a pellet hosszkoordinátája (x koordináta) mentén a vizsgálati frakció intervallumban (0,063–1 mm) a három nyomófej átmérőnél (6 mm, 8 mm, 16 mm) állandó kitolási sebesség ($v_{kit.} = 8$ mm/s) mellett. A kapott mérési adatok alapján megállapítottuk, hogy a kitolási erő jó közelítéssel lineárisan csökken a pellet hosszkoordinátájának (x koordináta) függvényében (9. ábra szaggatott vonal). Méréseink során a kitolási erő értékekre illesztett görbék korrelációs koefficiens (R^2) értéke 0,95–0,98 között alakult az átlagos pellethossz (25 mm) figyelembevételével (9. ábra). A következő lépésben mérésekkel meghatároztuk a három nyomófej átmérőnél a frakcióintervallumra (0,063–1 mm) jellemző maximális kitolási erőt fenyő és akác mintánál, amely alapját képezte az elméleti levezetésnek. Megállapítottuk, hogy a maximális kitolási erő fafajon belül közel azonos volt mind a három átmérőtartományban. Ebből is érzékelhető a relatív falsúrlódás jelentős hatása.

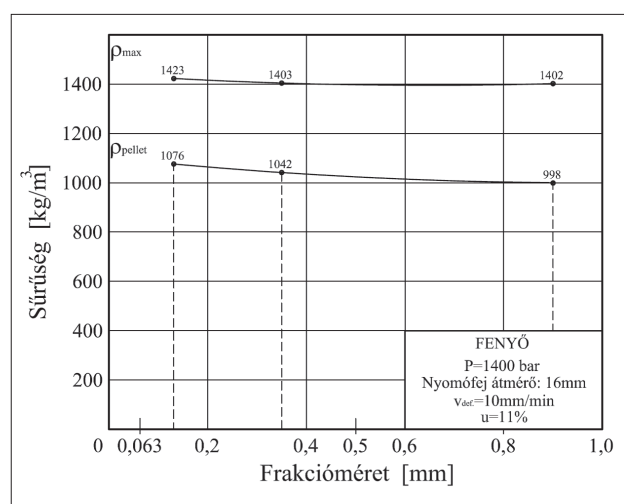
A maximális kitolási erő változását láthatjuk a 10. ábrán a vizsgált frakcióintervallumban a három nyomófej átmérőnél fenyő és akác mintánál. A maximális kitolási erők az alábbiak szerint alakultak:

- Fenyő: $F_{max\ kitolási} = 3500$ N
- Akác: $F_{max\ kitolási} = 4500$ N



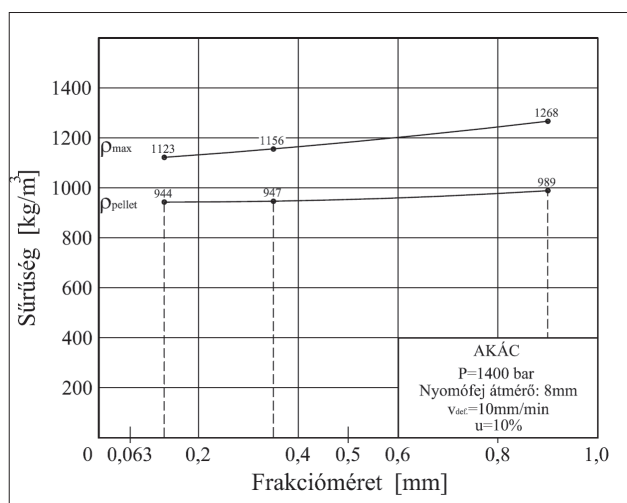
6. ábra A pelletsűrűség változása a frakcióméret függvényében fenyő mintánál 8 mm-es nyomófej átmérőnél

Figure 6 The changes of pellet density as a function of fraction size for spruce. The diameter of ram is 8 mm



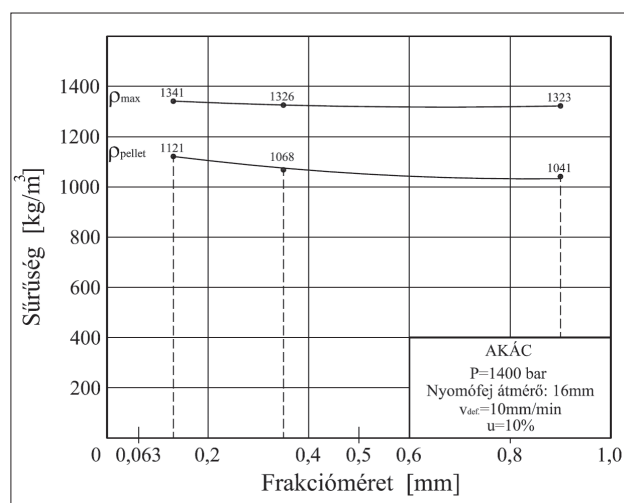
7. ábra A pelletsűrűség változása a frakcióméret függvényében fenyő mintánál 16 mm-es nyomófej átmérőnél

Figure 7 The changes of pellet density as a function of fraction size for spruce. The diameter of ram is 16 mm



8. ábra A pelletsűrűség változása a frakcióméret függvényében akác mintánál 8 mm-es nyomófej átmérőnél

Figure 8 The changes of pellet density as a function of fraction size for black locust. The diameter of ram is 8 mm



9. ábra A pelletsűrűség változása a frakcióméret függvényében akác mintánál 16 mm-es nyomófej átmérőnél

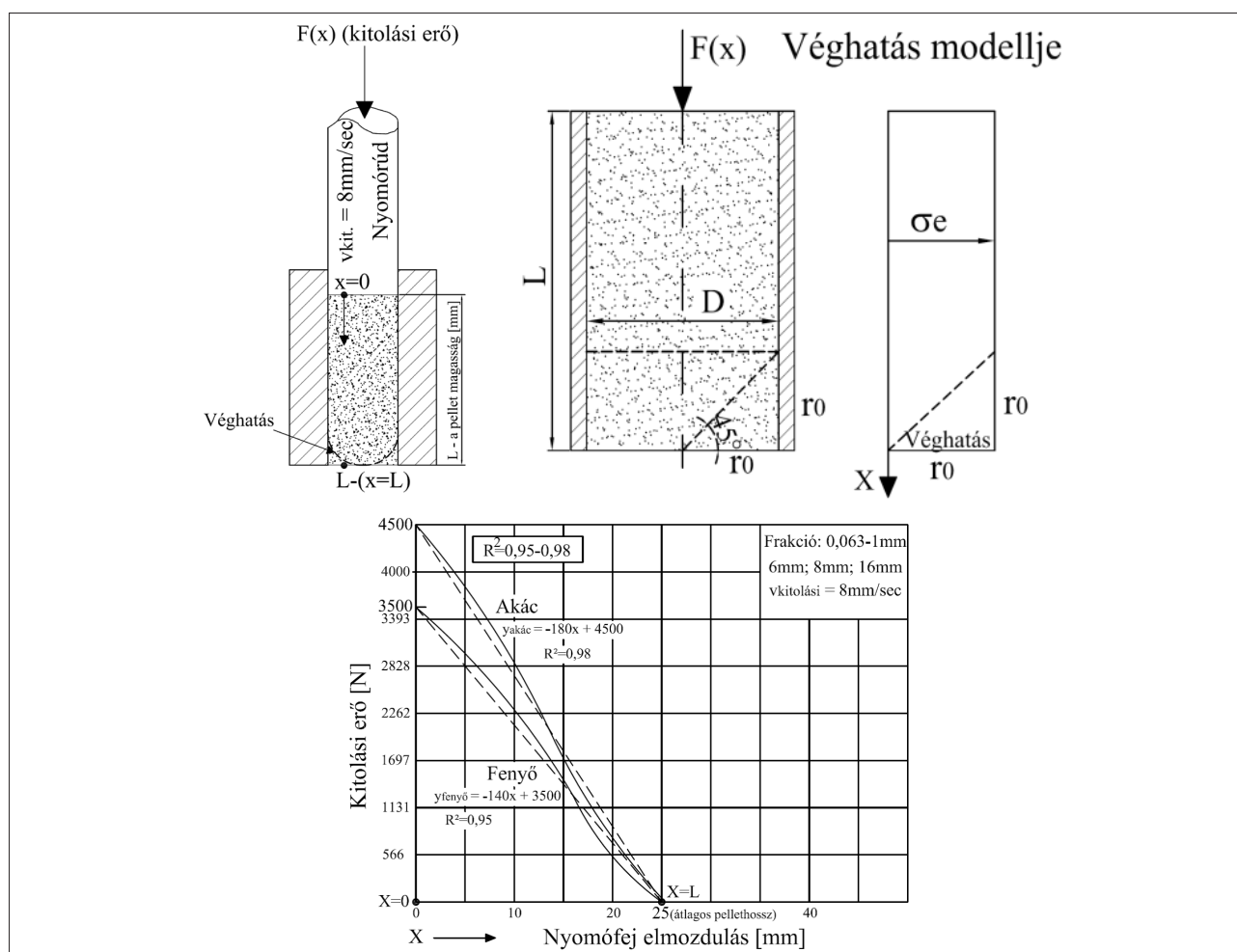
Figure 9 The changes of pellet density as a function of fraction size for black locust. The diameter of ram is 16 mm

A maximális kitolási erő ($F_{max\ kitolási}$) arányának változása fenyő és akác mintánál az adott tömörítési nyomáshoz (140 MPa) tartózkodó nyomóerőkhöz képest ($F_{max\ kitolási}/F_{max}$, [%]):

- Fenyő, 6 mm átmérőnél: 88% Akác, 6 mm átmérőnél: 112%
- Fenyő, 8 mm átmérőnél: 50% Akác, 8 mm átmérőnél: 64%
- Fenyő, 16 mm átmérőnél: 12% Akác, 16 mm átmérőnél: 16%

Láthatjuk, hogy a kapott kitolási erő arányok akác esetében mindhárom átmérőnél szisztematikusan nagyobbak adódtak, mint a fenyőnél. Mivel az akác szemcsék nagyobb szilárdságúak és ezáltal ridegebbek is a fenyő szemcséknél, ezért a szemcsék az adott tömörítési nyomáson (140 MPa) feltehetően jobban töredeztek, így változott a relatív sűrűlási felület nagysága. A relatív sűrűlási felület változásával (növekedésével) megnőtt a kitolási erő a fenyőhöz képest, sőt előfordult, hogy meghaladta a maximális tömörítési nyomásból származó nyomóerő értékeket is (ld. 112%). Ezen kívül természetesen a kezdeti szemcsék alakja is nagyban befolyásolja a sűrűlási tényező értékét, amellyel kapcsolatban további kutatásokat végzünk.

Tömörítéskor a por-forgács halmaz szabad végén ún. véghatás lép fel, tehát expandál (kirugózik) a halmaz (9. ábra „véghatás modellje”). Ennek következtében a szabad végnél a faanyag halmaz leépíti a σ_e oldalnyomásból származó feszültséget. A gyakorlatban a kirugózás valamilyen függvény szerint változik. Ezt a változást ún. relatív felületcsökkentési tényezővel (ψ) vettük figyelembe. A rugalmas féltér elméleteknek megfelelően az egyes irodalmak a σ_e feszültség csökkenést tömör anyagok esetében 45° -os sűrűlási félkúpszög alatt veszik figyelembe (Timoshenko és Woinowsky-Krieger, 1966; Csanády és Magoss, 2013). Jó közelítéssel a pellet is tömör anyagnak tekinthető, tehát nem tévedünk nagyot, ha a levezetett elméletnél a 45° -os sűrűlási félkúpszöget vesszük alapul. Az x koordináta mentén halad kifelé a pellet a tömörítő csőből. A nyomófej elmozdulása, tehát az x koordináta mentén történik (9. ábra).



10. ábra A maximális kitolási erő csökkenése a pellet hossz függvényében

Figure 10 The reduction of maximum pushing force as a function of pellet length

A pellet a nyomócső falával érintkező felülete: $A_x = D\pi(L - x)$ [4]

ahol:

L – a pellet hossza (mm)

D – a nyomófej átmérő (mm)

x – a pellet függőleges irányú elmozdulása az x koordináta mentén (mm) (kezdetben $x=0$)

A kitolási erő: $F_{(x)} = A_x \sigma_e \mu$ [5]

ahol:

σ_e – a megmaradt rugalmas deformációból származó nyomófeszültség (oldalnyomás) (N/mm²)

μ – a pellet és a tömörítő csatorna fala között fellépő súrlódási tényező

A súrlódási tényező nem függ a felület nagyságától, csak akkor, ha adhézió jön hozzá (Varga, 1993). Esetünkben az adhézió nem jelentős, ezért elhanyagolhatjuk.

A felületet helyettesítve: $F_{(x)} = D\pi\sigma_e\mu(L - x)$, induláskor $x = 0$ [6]

A pellet radiális irányú kitágulása (kirugózása) meghatározható az alábbi módon, a Hooke-törvény értelmében:

$$\frac{\Delta r}{r_0} = \frac{1-\nu}{E} \sigma_e, \quad r_0 = D/2 \quad [7]$$

ahol:

Δr – a pellet radiális irányú kirugózása (mm)

r_0 – a nyomófej sugara (mm)

ν – a Poisson-tényező

E – a rugalmassági modulus, amely a falterhelést adja (N/mm²)

A [7] egyenlet átrendezésével σ_e kifejezhető: $\sigma_e = \frac{E}{1-\nu} \cdot \frac{\Delta r}{r_0}$ [8]

A pellet szabad végén tehát leépül a σ_e feszültség a D/L viszony függvényében, ezért az effektív felület csökken (9. ábra „véghatás modellje”). Ha a feszültség leépítést a végeken 45°-os súrlódási félkúpszög szerint vesszük, akkor a relatív felületcsökkentési tényező felírható az alábbi módon:

$$\psi_{\left(\frac{D}{L}\right)} = \frac{D\pi(L - r_0)}{D\pi \cdot L} = \frac{L - r_0}{L} \quad [9]$$

Esetünkben az átlagos pellet hossza: $L_{\text{pellet}} = 25$ mm. Ebben az esetben a relatív felületcsökkenés a három átmérrőnél, sorra:

$$\psi_6 = 0,88$$

$$\psi_8 = 0,84$$

$$\psi_{16} = 0,68$$

A kitolási erő (F_x) közelítő elméleti kifejezése ezzel:

$$F_{(x)} = 2\pi \frac{E}{1-\nu} \mu \Delta r (L - x) \psi_{\left(\frac{D}{L}\right)} \quad [10]$$

A radiális és a relatív radiális kirugózás (Δr_i , illetve $\Delta r_i / r_{0i}$) méréseink alapján fenyőre és akácra a három vizsgált átmérrőnél:

$$\phi 6 \rightarrow \Delta r_6 \cong 0,25 \text{ mm} \quad \Delta r_6 / r_{06} = 0,0833 \quad (8,3\%)$$

$$\phi 8 \rightarrow \Delta r_8 \cong 0,3 \text{ mm} \quad \Delta r_8 / r_{08} = 0,075 \quad (7,5\%)$$

$$\phi 16 \rightarrow \Delta r_{16} \cong 0,52 \text{ mm} \quad \Delta r_{16} / r_{016} = 0,065 \quad (6,5\%)$$

A $\Delta r_i \cdot \psi_i$ szorzatok értékei, ennek megfelelően:

$$\phi 6 \rightarrow \Delta r_6 \cdot \psi_6 = 0,25 \cdot 0,88 = 0,22$$

$$\phi 8 \rightarrow \Delta r_8 \cdot \psi_8 = 0,3 \cdot 0,84 = 0,25 \quad (\text{átlag} : 0,27)$$

$$\phi 16 \rightarrow \Delta r_{16} \cdot \psi_{16} = 0,52 \cdot 0,68 = 0,35$$

A súrlódási tényező értékei 10%-os nedvességtartalom esetén 0,2–1 mm-es szemcseméret tartományban, fa-
acél súrlódási anyagpárosítás mellett (Varga, 1983):

Fenyő: $\mu = 0,65$

Akác: $\mu = 0,55$

A fenti adatokkal és az ismert maximális kitolási erővel a rugalmassági modulus, amely létrehozza a σ_c feszültséget meghatározható, felhasználva a [10] egyenletet:

$$\text{Fenyő: } \frac{E}{1-\nu} = 129 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Akác: } \frac{E}{1-\nu} = 193 \text{ N/mm}^2$$

Ez az $\frac{E}{1-\nu}$ által meghatározott feszültség van a pelletbe „bezárva” összenyomott állapotban és ez fogja a radiális irányú tágulást okozni. A tehermentesítés után ezzel a feszültséggel fog expandálni (kirugózni) a pellet. A porforgács halmazok súrlódási tényezőinek vizsgálataival kapcsolatos korábbi kutatásokban (Varga, 1983; Varga, 1993) találhatunk a pelletálásra jellemző szemcseméretnek és nedvességtartalomnak megfelelő súrlódási tényező értékeket, melyek alapján a fenti feszültség jó közelítéssel már meghatározható a vizsgált frakciótartományban (0,063–1 mm).

Ha a tömörítési folyamatoknál ν értékét 0,35-re választjuk, akkor a falterhelést adó rugalmassági modulus a [10] egyenlet felhasználásával már meghatározható:

Fenyő: $E = 83,85 \text{ N/mm}^2$

Akác: $E = 125,45 \text{ N/mm}^2$

A fenti rugalmassági modulusok a falterhelést adják. Nem szabad összetéveszteni a „deformáció modulusal”, amely a tömörítő erőre vonatkozik. Utóbbi a kompresszió görbe egyenletéből határozható meg. Alapul véve az 140 MPa nyomáson előállított pelletet, aminek átlagosan $\varepsilon=0,8$ a fajlagos alakváltozása, ekkor a kompresszió görbe kitevője jó közelítéssel $n=2$. Ezek alapján a nem-lineáris rheológiai egyenletek (Sitkei, 1981) felhasználásával az alábbiak számolhatók:

A feszültség-alakváltozás (σ - ε) összefüggés alapján A -állandó értéke meghatározható:

$$\sigma = P = A \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^n \Rightarrow 140 = A \left(\frac{0,8}{1-0,8} \right)^2 \rightarrow A = 8,75$$

A deformáció modulus az A -állandó ismeretében már számítható:

$$E = \frac{\partial P}{\partial \varepsilon} = A \cdot n \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right)^{n-1} / (1-\varepsilon)^2 = 8,75 \cdot 2 \left(\frac{0,8}{1-0,8} \right)^{2-1} / (1-0,8)^2 = 1750 \text{ N/mm}^2$$

Vagy a közepes (szekáns) modulus:

$$E_K = A \frac{\varepsilon^{n-1}}{(1-\varepsilon)^n} = 8,75 \frac{0,8^{2-1}}{(1-0,8)^2} = 175 \text{ N/mm}^2$$

A rugalmas komponens az előzőek szerint a deformáció modulusnak kb. az egytizede. A tehermentesítés után (kirugózás) a pellet deformáció modulusa csökken a számítottéhoz viszonyítva minimum a rugalmas komponensnek megfelelően. Látható, hogy a tömörítés folyamán a pellet deformációs modulusa akár ezerszeresére is változhat (1750 N/mm²). A fenti példa megfelel a fenyő mintánál kapott kutatási eredményeknek. Akác mintánál átlagosan $\varepsilon=0,75$ fajlagos alakváltozást kaptunk. Ezek alapján a deformációs modulusa 1590 N/mm²-re adódott. A fenyő esetében nagyobb volt a faanyagalmazba bevitt deformációs feszültség nagysága, de ezzel együtt csökkent a tömörített halmaz magassága is az akáchoz képest. Az ok, amiért a fenyő jobban kirugózik, mint az akác abban keresendő, hogy a tömörítés végén nagyobb a faanyagalmazba bevitt deformációs feszültség nagysága, ezáltal nagyobb a belső erők szemcsékre gyakorolt hatása is. A fafaji sajátosságokból adódóan a fenyő szemcsék kisebb szilárdságúak és sűrűségűek, mint az akác, így azokra a nagyobb belső feszültségből származó ellenerők jobban kifejtik hatásukat, tehát a faanyag nem-lineáris viskoelasztikus tulajdonsága miatt visszarugózásuk is nagyobb lesz.

Összefoglalás

A relatív falsúrlódással kapcsolatos kutatásaink alapján megállapítottuk, hogy a tömörítő csatorna átmérőjének növelésével a préselési nyomás és a préselési sebesség állandó értéken tartása mellett a pelletsűrűség növekedett, vagyis az átmérő növekedésével arányosan csökkent a relatív falsúrlódás hatása (csökkent a tengelyirányú súrlódási ellenállás) és ezáltal a nyomás-, és vele együtt a sűrűség gradiens is a pellet hossza mentén. Amíg 6 mm-es és 8 mm-es nyomófej átmérőnél a szemcseméret csökkenésével csökkent a pelletsűrűség, addig 16 mm-nél megfordult ez a tendencia. Ennek az oka az, hogy 16 mm-nél a falhatás sokkal kisebb, méréseink alapján mintegy 15%-a a 6 mm-es átmérőhöz tartozó falhatáshoz képest. Méréseinkkel igazoltuk, hogy azonos nyomófej átmérő esetén egy adott pelletsűrűség eléréséhez fenyőnél ~30 százalékkal nagyobb nyomás szükséges az akáchoz képest. Továbbá nagyobb nyomófej átmérőnél (16 mm) ~ 40 százalékkal kisebb nyomás és durvább frakció (1–2,5 mm) is elegendő a kisebb nyomófejhez (6 mm) képest a kívánt pelletsűrűség (~1000–1100 kg/m³) elérése érdekében. Meghatároztuk fenyő és akác minta esetében, hogy 1 mm nyomófej átmérő növekedés az adott mérési paraméterek mellett a vizsgált nyomástartományban (100–140 MPa) és frakciótartományban (0,063–1 mm) átlagosan 2–3% pelletsűrűség-növekedést eredményezett. A relatív falsúrlódás, mint láthattuk, jelentősen befolyásolja a pelletsűrűséget, ezért bevezettük a relatív felületcsökkentési tényező (ψ) fogalmát, melynek segítségével, valamint mérési eredményeinkkel bizonyos elméleti megfontolások alapján közelítőleg modellezni tudtuk a kitolási erő változását a pellet hossz függvényében.

Köszönetnyilvánítás

Ez a cikk a Környezettudatos energia hatékony épület című TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0068 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Irodalomjegyzék:

- Babos K., Filló Z., Somkuti E. (1979) Haszonfák. Műszaki Könyvkiadó, Budapest
- Biot M. A. (1954) Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena. J. Appl. Phys. Vol. 25, No. 11, pp. 1385-1391.
- Csanády E., Magoss E. (2013) Mechanics of Wood Machining. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013. DOI 10.1007/978-3-642-29955-1. pp. 25-30.
- Findley W. N., J. S. Lai and K. Onaran (1989) Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials with an Introduction to Linear Viscoelasticity. Dover Publication, Inc., Mineola, New York
- Heiko T. et al. (2005) Modeling the physical processes relevant during hot pressing of wood-based composites. Part II. Rheology. Published online: 28 September 2005. Springer-Verlag
- Hofko B. (2006) Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten; Betreuer/in(nen): R. Blab, K. Kappl; Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung; Abschlussprüfung: 24.11.2006. pp. 145-268.
- Kocsis Z., Csanády E. (2014) A nem-lineáris rheológia alkalmazása a faalapú anyagok pelletálásával, tömörítésével összefüggésben I. kísérleti rész. FAIPAR – A faipar tudományos folyóirata, [S.l.], v. 62, may. 2014. ISSN 0014-6897. Elérhető: <<http://www.woodscience.hu/Woodscience/article/view/1/4>>. DOI: http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN_2014_1.
- Molnár S. (1999) Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
- Sacht H. (1967) Über den Verdichtungsvorgang bei landwirtschaftlichen Halmgütern und die dabei auftretende Wandreibung. Grundl. Landtechn. Bd. 17 (1967) Nr. 2. DK 621-5: 631.358.44: 631.362: 633.004.12. pp. 47-52.
- Sitkei Gy. (1981) A mezőgazdasági anyagok mechanikája. Akadémiai Kiadó, Budapest
- Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S. (1966) Lemezek és héjak elmélete. Műszaki könyvkiadó, Budapest
- Varga M. (1983) Por-forgács halmazok mechanikai tulajdonságai, különös tekintettel a tartályból való kifolyásra. Doktori értekezés. Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron
- Varga M. (1993) Fapor és forgács halmazok mechanikai tulajdonságainak vizsgálata. Kandidátusi értekezés, Sopron