



Por-forgács halmazok eloszlásvizsgálata*

REISZ Lajos¹, MAGOSS Endre¹

¹NymE FMK Gépészeti és Mechatronikai Intézet

Kivonat

A faanyagok forgácsolási megmunkálási elve az évek során nem sokat változott, azonban a forgácsolási paraméterek igen. Új élananyagok, szerszámok, motorok, erőátviteli rendszerek kerültek alkalmazásba. Ezek a változások magukkal hozták a megmunkált faanyag felületi minőségének a javulását is, azonban a keletkező por-forgács frakciók eloszlását is megváltoztatták. Vizsgálatunk során ezeket az eloszlásokat hasonlítottuk össze az irodalmi eloszlásokkal. Azt tapasztaltuk, hogy a forgács halmazokban a finomabb porok mennyisége növekedett meg. Ez viszont a por-forgács elszállítására, illetve leválasztására van nagy hatással. Azonban ha ismerjük a mai gépeken keletkező porok összetételét, illetve a szűrők leválasztását, kiszámolhatjuk, mennyi por marad a levegőben szűrés után.

Kulcsszavak: eloszlásvizsgálat, por-forgács, por leválasztás

Investigation of the distribution of the wood particles

Abstract

In recent decades, wood cutting parameters changed significantly. The aim of most of the developments was to achieve better surface quality and increased productivity. The new tools and modified cutting parameters deeply affected the size distribution of wood dust and chips. We examined the alteration of the size distribution of the wood particles. Our results shows that the proportion of the fine dust is increased. This increases the the health risks of the workers. Therefore the importance of designing the proper extraction system and choosing an effective filter unit is significantly increased.

Key words: wood processing; cutting parameters; size distribution

Bevezetés

A faipari üzemeknél a por-forgács elszívásával a téli időszakban hő is távozik. Ennek mértéke az elszívott levegő tisztításával és jelentős részének (általában 70%) visszatáplálásával csökkenthető. Azonban egy rosszul kiválasztott porleválasztó egység nem szűri ki megfelelően a finompor-frakciókat. A forgácsolás során keletkező finom port teljes mértékben egyébként sem képes eltávolítani az elszívó rendszer. A levegőbe jutó finom por csekély súlya miatt folyamatosan lebeg a légtérben. A legfinomabb frakciót szálló pornak hívják (Particulate Matter: PM).

A szálló por a levegőben szuszpendált szilárd és/vagy folyékony részecskék elegye. A szálló port két nagy csoportra lehet bontani szemcseméret alapján: a 10 mikrométer átmérőjű szemcséket durva részecskéknek (PM10) nevezik, ezek a szemcsék lejutnak az alsó légutakba. A 2,5 mikrométernél kisebb átmérőjű porszemcsék (PM2,5) alkotják a belélegezhető frakciót, ezek lejutnak az alsó légutakon túl a tüdő léghólyagocskákba. A porok ilyen módon veszélyt jelentenek az emberi szervezetre, krónikus hörghurutot (bronchitis), tüdőtágulást (emphysema) vagy akár rákot is okozhatnak. Ezt a kockázatot megfelelő porle-

*A kutatás a Talentum – Hallgatói tehetséggondozás feltételrendszerének fejlesztése a Nyugat-magyarországi Egyetemen c. TÁMOP 4.2.2.B-10/1-2010-0018 számú projekt keretében, az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

This research - as a part of the Development of Student Talent Fostering at WHU, TAMOP 4.2.2. B-10/1-2010-0018 project - was sponsored by the EU/European Social Foundation. The financial support is gratefully acknowledged.

választással minimalizálni lehet. A 0,5 mm alatti szemcseméretű porok nem csak az egészségre károsak, hanem robbanásveszélyesek is. Porok esetében egy alsó robbanási határérték és egy felső robbanási határérték közötti koncentráció esetén történhet robbanás. Faporok esetén az alsó érték 30–60 g/m³, a felső érték 2–6 kg/m³ (World Health Organization 2006). A robbanáshoz szükség van megfelelő mennyiségű oxigénre, illetve valamilyen gyújtó hatásra (pl. elektromos szikra, amely akár világítás kapcsolásakor is keletkezhet). Az említett hatások, kockázatok minimalizálására az elszívást és a porleválasztást kell minél jobb határfokkal üzemeltetni (Kos és tsai. 2004). Azonban minél jobb a határfok, annál költségszebb az üzemeltetés.

Az 1. ábrán látjuk, hogy a faanyag megmunkálásához felhasznált energia közel azonos a por-elszíváshoz felhasznált energiával (Ressel 1985, Seeger és Tönsing 1999). A világításhoz, fűtéshez illetve sűrített levegő előállításához felhasznált energia is közel azonos. A porelszívó hálózatok modernizálásával az anyagmozgatás költségét, míg a megfelelő porleválasztás kiválasztásával a fűtés költségét lehet csökkenteni, az egészség károsításának minimalizált kockázata mellett.

A vizsgálat célja, hogy megállapítsuk, a jelenlegi forgácsolási paraméterek (fordulatszám, egy fogra eső előtolás), illetve a modern élananyagok (keményfém lapkák) alkalmazása miatt elért kisebb élszögek, illetve éltartósság mennyire befolyásolják a por-forgács halmazok szemcseméret szerinti eloszlását. Az általunk mért elosztást egy korábbi (Sitkei 1994)

analízis végeredményével is összehasonlítjuk. Az új eredményeket felhasználhatjuk a porleválasztás pontos méretezéséhez, adott esetben felülvizsgálatához, ugyanis a cikkben ismertetett módszerrel ki tudjuk számolni a leválasztás után a levegőben maradó finom por mennyiségét, amivel minimalizálhatjuk a fent említett kockázatokat.

Anyagok és módszerek

A vizsgálatot erdeifenyő (*Pinus sylvestris*) faanyagon végeztük el. A faanyag nedvességtartalmát GANN LAUBER Hydromette HT65 típusú, beütő szeges nedvességmérő műszerrel határoztuk meg. A faanyag sűrűségének meghatározása az abszolút száraz tömeg és a térfogat hányadosaként történt.

A vizsgált faanyagon a következő megmunkálásokat vizsgáltuk:

- hosszvágás körfűrészszel
- keresztvágás körfűrészszel
- hosszvágás szalagfűrészszel
- egyengető gyalulás.

Az alkalmazott megmunkáló berendezések paramétereit az 1. táblázat mutatja.

A forgácsgyűjtés mindegyik gépen a szerszámok élezése után történt. A forgács begyűjtése az elszívó fejre csatlakoztatott mobil zsákos porelszívó berendezéssel történt.

A forgácsminták frakcionálása szitaanalízis alkalmazásával történt. Az analízis során felülről lefelé folyamatosan csökkent a szitákon a nyílás mérete. Legalul helyezkedett el egy gyűjtőtál, ami a legkisebb szitaméret alatti porokat fogta fel.

1. táblázat A vizsgálatban alkalmazott megmunkáló berendezések paramétereit

Table 1 Parameters of investigated machines

Paraméterek	Körfűrész	Szalagfűrész	Egyengető gyalu
Gép típusa	Rojek PK 300	Griggio 700	Houfek 400
Tengely fordulatszáma [1/min]	3755	720	4700
Motorteljesítmény [kW]	2,2	2,2	3,0
A vezető tárcsa átmérője	-	700	-
Szerszám élkörátmérő	300	-	120
A forgácsoló élek száma	42	-	4
Előtolás [m/min]	keresztirányban: 6, hosszirányban: 4,5	4	6
Fogásmélység [mm]	-	-	3,0
Vágásrés [mm]	3,2	3,0	-
Egy fogra eső előtolás [mm]	0,6	0,15	0,2
A szerszám kerületi sebessége [m/s]	59	26,4	29,5

A paraméterek számítása Csanády és Magoss (2011) alapján történt.



Az általunk alkalmazott szitasor a következő volt: 2,5 mm, 2 mm, 1,6 mm, 1 mm, 800 mm, 500 mm, 400 mm, 315 mm, 200 mm, 125 mm, 80 mm, 63 mm, gyűjtőtál (<63 mm).

A mérést Fritsch analysette 3 PRO típusú (2.ábra) rezgőszítán végeztük el. A szítálás 1,5 mm amplitúdóval, 10 percen keresztül történt. A széles szítaskála miatt első lépésben a 2,5 mm–500 mm-es tartományt, majd a 400 mm – gyűjtőtál tartományt szítáltuk. A súlymeghatározás Precisa 3100 D típusú analitikus mérleggel történt. Minden mintából 10 mérés készült, a szitamadarvány súlyt ezek átlaga adta. Az 1. számú táblázatban az egyik mérés táblázatát közöljük. A frakciók százalékos eloszlását az alábbi [1] képlettel számítottuk:

$$m_{\text{frakció}\%} = \frac{m_{\text{minta}}}{m_{\text{frakció}}} \cdot 100 \quad [1]$$

A frakciónkénti eloszlásokat a 2,5 mm-es frakciótól kezdve halmozva összegeztük, így megkaptuk a szitamadarvány százalékos értékét [2]. A por- és forgácshalmazok méreteloszlása mindig aszimmetrikus, ezért leírásukra a log-normál eloszlás, vagy az empirikus RRB-eloszlás (Rosin-Rammler-Benett) használható. A kísérletek azt mutatták, hogy a legtöbb esetben a log-normál eloszlás egyenletével az eloszlások jól leírhatók (Sitkei 1994). A szitaanalízis miatt az eloszlás mindig az adott méretű szemcsék súlyszázalékára vonatkozik. A log-normális eloszlás a következő egyenlettel írható le:

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} X \sigma e^{\sigma^2/2}} \cdot e^{-\left(\frac{\ln \frac{x}{\bar{X}}}{\sigma}\right)^2} \quad [2]$$

ahol:

$$\begin{aligned} y &- \text{eloszlási változó} \\ \bar{X} &- \text{a módusz} \\ \sigma &- \text{a szórás} \end{aligned}$$

Ez az egyenlet az ún. differenciálgörbét adja, amellyel egy Δx intervallumba eső szemcséhányad határozható meg. Az egyenlet integrálásával az integrálgörbe nyerhető, amely a görbe végpontjától ($x=0$ vagy $x=\infty$) egy adott x_1 méretig adja meg a szemcsék mennyiségét. A szitaanalízis során kapott értékek alapján az integrálgörbe rajzolható meg, melyet a 3. számú ábra szemlélteti. Az integrálgörbét a megfelelő transzformációval az ún. valószínűségi háló kiegyenesíti, ez lényeg-

esen leegyszerűsíti a mérési adatok ábrázolását és összehasonlítását. Ezt mutatja a 4. számú ábra. Az integrálgörbe ismeretében meghatározható a differenciálgörbe két eloszlás paramétere (\bar{X} és σ). Az integrálgörbéről leolvassuk a 25, 50 és 75%-hoz tartozó szemcseméretet (kvartilok) és ezekből képezzük a következő kvartilviszonyt:

$$QV = \frac{x_3 - Mi}{Mi - x_1} \quad [3]$$

ahol:

$$\begin{aligned} x_3 &- \text{a 75\%-hoz tartozó szemcseméret,} \\ x_1 &- \text{a 25\%-hoz tartozó szemcseméret,} \\ Mi &- \text{a mediánhoz tartozó méret (50\%-hoz tartozó szemcseméret).} \end{aligned}$$

A kvartilviszony a σ szórás egyértelmű függvénye, amelyből a szórás kiszámítható:

$$QV = e^{0,675 \cdot \sigma} \quad [4]$$

Fennáll még a következő közelítő összefüggés:

$$\frac{Mi}{\bar{X}} = e^{\sigma^2} \quad [5]$$

Az előző egyenletekből ezek után egyértelműen meghatározhatók az eloszlás paraméterei. Ezen paraméterek felhasználásával [2] megoldható, így az y eloszlási változó értékét megkaphatjuk. Az y értékét a továbbiakban felhasználjuk.

A gyakorlatban mindig létezik egy x_{max} maximális szemcseméret, ami azt jelenti, hogy az eloszlás nem teljes, de esetünkben éppen a finomabb frakcióknak van jelentősége. A teljes eloszlás és az x_{max} -nál levágott eloszlás közti különbség a következő integrállal számítható:

$$X_{\text{átlag}}^{\infty} = \frac{100}{\sqrt{2\pi} X \sigma e^{\sigma^2/2}} \cdot \int_{x_{\text{max}}}^{\infty} e^{-\left(\frac{\ln \frac{x}{\bar{X}}}{\sigma}\right)^2} dx \quad [\%] \quad [6]$$

A porleválasztók közös tulajdonsága, hogy a kis méretű szemcséket választják le nehezebben. A porleválasztók tehát sohasem választják le az összes szemcsét, azok egy része átmegy a leválasztókon, és a már a bevezetésben említett következményekkel jár. Egy porleválasztó integrált hatásfokán az

$$\eta = \frac{G_{be} - G_{ki}}{G_{be}} \quad [7]$$

összefüggéssel számolható értéket értjük, ahol G_{be} és G_{ki} a bemenő, illetve kimenő por mennyisége. A porleválasztót sokkal jobban jellemzi a frakció szerinti hatásfok, amelynek definíciója a következő:

$$\eta_{fr} = \frac{\Delta G_{be} - \Delta G_{ki}}{\Delta G_{be}} \quad [8]$$

ahol:

ΔG_{be} és ΔG_{ki} – az adott Δx méretintervallumba eső bemenő, illetve kimenő por mennyisége.

A leválasztási hatások definíciójából következik, hogy míg az integrált hatások egy számértéket ad, addig a frakció szerinti hatások egy görbével jellemezhető.

A különböző típusú szűrőberendezések frakció szerinti hatásfoka jól közelíthető a következő egyenlettel:

$$\eta_{fr} = 100 \left(1 - e^{-(x-X_k)^n} \right) \quad [9]$$

ahol: X_k – a karakterisztikus szemcseméret

Zsákos porszűrők alkalmazásakor $X_k=5-10\mu m$ értékek, míg ciklonok esetén $X_k=15-25\mu m$ értékek fordulnak elő. Az n kitevő értéke általában 0,9–1,3 között változik. Az [1] és [5] képlet alkalmazásával számítható a szűrőből kimenő pormennyiség:

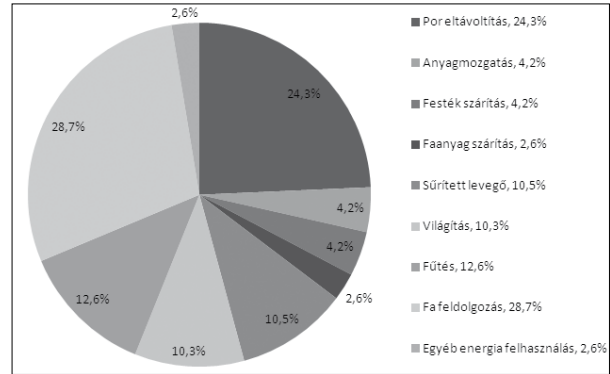
$$\Delta Q = (1 - \eta_{fr}) \cdot y \quad [10]$$

Eredmények és értékelés

A faanyag nedvességtartalma $16,2\% \pm 1\%$ volt. Ezt az értéket kaptuk a beütő szeges fanedvesség mérővel, illetve a faanyag minták szárítással meghatározott nedvességtartalmának mérésével is. Hét minta átlagaként a faanyag sűrűsége 753 kg/m^3 .

A mérési adatokat és azok kiértékelését a 2. és 3. táblázat tartalmazza. A szitaanalízis során kapott eredményeket ábrázolhatjuk normál skálán; ekkor kapjuk az integrál görbét (3. ábra). Azonban a könnyebb összehasonlíthatóság miatt, ha kettős logaritmikus skálán ábrázoljuk az eredményeket, akkor az integrál

görbe helyett egyeneseket kell ábrázolnunk. A saját méréseinket kettős logaritmikus skálán ábrázolva láthatjuk a 4. ábrán, a korábbi méréseket (Sitkei 1994) az 5. ábra szemlélteti. A mérési eredmények a nagyon kicsi, illetve a nagyon nagy szemcseméret



1. ábra Villamosenergia-felhasználás a német faiparban, 1999-ben (Ressel, 1985; Seeger, Tönsing, 1999)

Figure 1 Electric energy consumption of the German Wood Industry, 1999



2. ábra Rezgőszita és a szitasor

Figure 2 Mechanical shaker and the sieves

2. táblázat Mérési eredmények körfűrészén történő megmunkálás esetén

Table 2 Results of circular saw

mintaszám	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	átlag	eloszlás %	szitamaradvány %
2,5 mm	1,0	1,0	1,0	1,4	0,6	1,2	1,0	1,1	0,9	0,9	1,0	0,67	0,67
2 mm	1,0	1,1	0,7	0,9	1,0	1,0	1,1	0,8	1,0	1,1	1,0	0,65	1,32
1,6 mm	2,6	3,1	1,9	2,9	2,0	2,3	2,8	2,1	2,5	2,2	2,4	1,63	2,94
1 mm	10,6	12,9	10,2	12,5	9,1	11,1	12,5	11,3	12,0	11,6	11,4	7,58	10,52
800 μm	8,0	8,8	8,2	7,9	6,2	8,3	9,0	8,2	7,8	8,0	8,0	5,35	15,88
500 μm	28,1	31,8	28,7	30,5	22,9	25,3	25,2	33,0	27,7	28,6	28,2	18,77	34,65
400 μm	19,3	19,1	19,1	16,7	18,0	19,2	19,2	18,0	17,7	18,0	18,4	12,28	46,92
315 μm	19,4	19,6	19,5	20,5	19,4	19,7	19,0	19,5	19,5	19,8	19,6	13,05	59,97
200 μm	25,7	23,0	26,7	15,0	26,7	23,7	22,6	21,5	23,7	23,5	23,2	15,46	75,43
125 μm	21,5	19,2	20,6	21,8	25,5	22,2	22,3	20,0	21,8	21,5	21,6	14,41	89,84
90 μm	8,0	6,7	8,6	11,7	10,9	9,1	9,0	9,1	9,8	9,1	9,2	6,13	95,97
63 μm	3,9	2,9	4,6	5,9	5,7	5,4	4,8	4,2	4,1	4,5	4,6	3,06	99,03
tálca	1,2	0,4	1,1	2,3	2,3	1,7	1,3	1,4	1,4	1,4	1,5	0,97	100,00
szita	150,3	149,6	150,9	150,0	150,3	150,2	149,8	150,2	149,9	150,2	150,1		

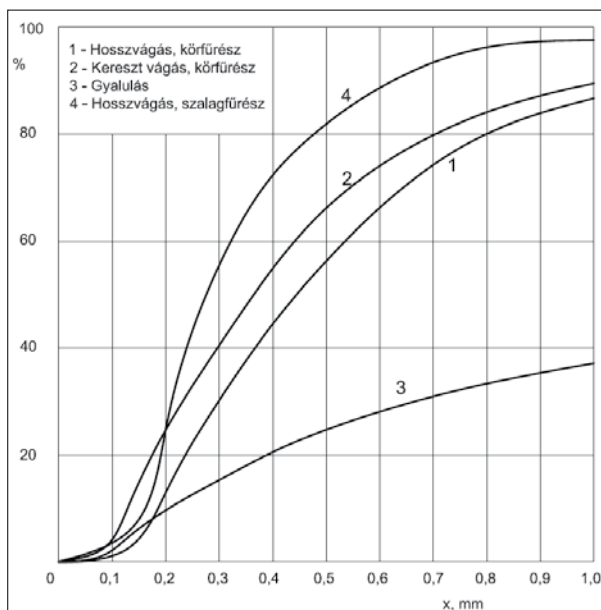
3. táblázat Fapороk eloszlás-paraméterei

Table 3 Parameters of distribution of the wood particles

Művelet	x_1	x_3	$Mi = x_3$	QV	σ	$\bar{x} = Mo$	$x_{\infty}^{átlag}$
Hosszvágás körfűrészsel	0,32	0,76	0,48	1,75000	0,82906	0,24140	0,6769
Keresztvágás körfűrészsel	0,23	0,80	0,39	2,56250	1,39405	0,05586	1,0305
Hosszvágás szalagfűrészgéppel	0,49	3,80	1,40	2,63736	1,43671	0,17770	3,9296
Egyengető gyalulás	0,18	0,59	0,35	1,41176	0,51087	0,26960	0,3988

tartományban (80 mm alatt, illetve 2,5 mm fölött) nem illeszkednek az egyenesre. Ennek oka, hogy ezeknek a szemcséknek a mennyisége nagyon kicsi. A kis frakciókat szitalással 63 mm-ig tudjuk mérni, az alatta lévő frakciók megoszlásáról nincs ismeretünk; feltételezzük, hogy mennyiségük végtelenül kicsi részecskék esetén lesz jó közelítéssel nulla, tehát könnyen belátható, hogy az egyenes exponenciális függvényként folytatódna. Hasonló a helyzet a 2,5 mm-nél nagyobb részecskék esetén is. Azonban mivel ezeknek a frakcióknak a mennyisége nagyon kicsi, ezért jelen vizsgálataink során nem foglalkozunk velük.

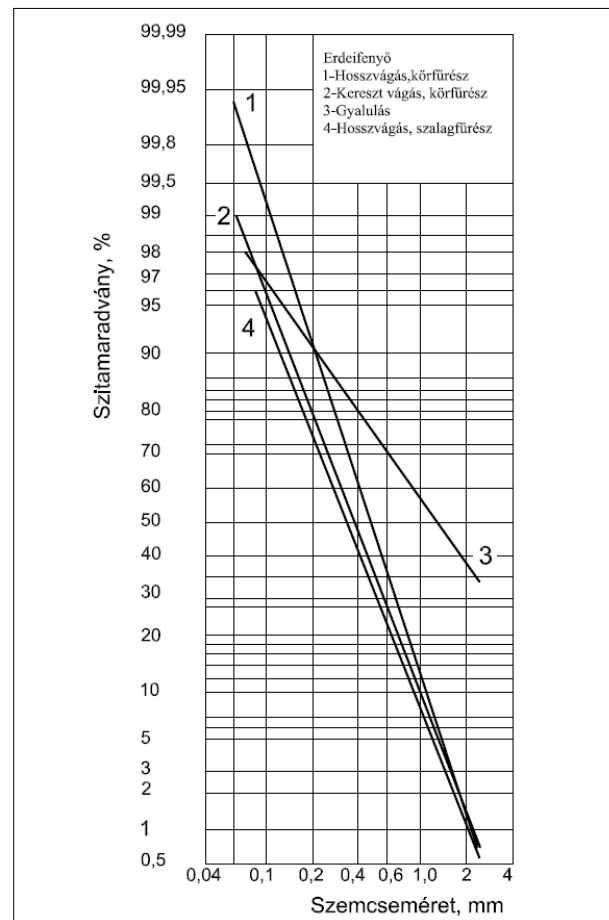
A 4. ábráról le tudjuk olvasni, hogy különböző megmunkálások esetén, egy adott szemcseméret-tartomány milyen százalékos arányban van jelen a rendszerben. Tekintsük a 3-as számmal jelölt gyalulást. Leolvasható, hogy a 2 mm fölötti részecskék aránya kb. 37%, az 1 mm fölötti részecskék aránya pedig kb. 56%. Amennyiben az 1 és 2 mm közötti részecskék arányára vagyunk kíváncsiak, a két értéket ki kell vonni egymásból, így kapunk 21%-ot. Ha összehasonlítjuk a 4. ábrán a megmunkálásokat, az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:



3. ábra A log-normál eloszlás integrál görbéje

Figure 3 Integral curve of the log-normal distribution

- A hosszvágás körfűrészén, illetve szalagfűrészén keletkező forgács nagyon hasonló eloszlást mutat, annak ellenére, hogy a körfűrészén keményfém lapkás szerszám, a szalagfűrészén gyorsacél szerszám végezte a forgácsolást. Az előtolás mindkét esetben 4 m/min volt, azonban az egy fogra eső előtolás a szalagfűrészénél negyedekora (0,15 mm), mint a körfűrészén (0,6 mm). Valószínűleg ez okozta a hasonló eloszlást.
- Hosszvágás és keresztvágás (körfűrész) esetén a finomabb frakcióknál a különbség nem nagy (pl. 0,1 mm-nél 2%), azonban a 0,2–1 mm közötti tartományban közel mindenhol 10%-os eltérést találunk, ami hosszvágás esetén



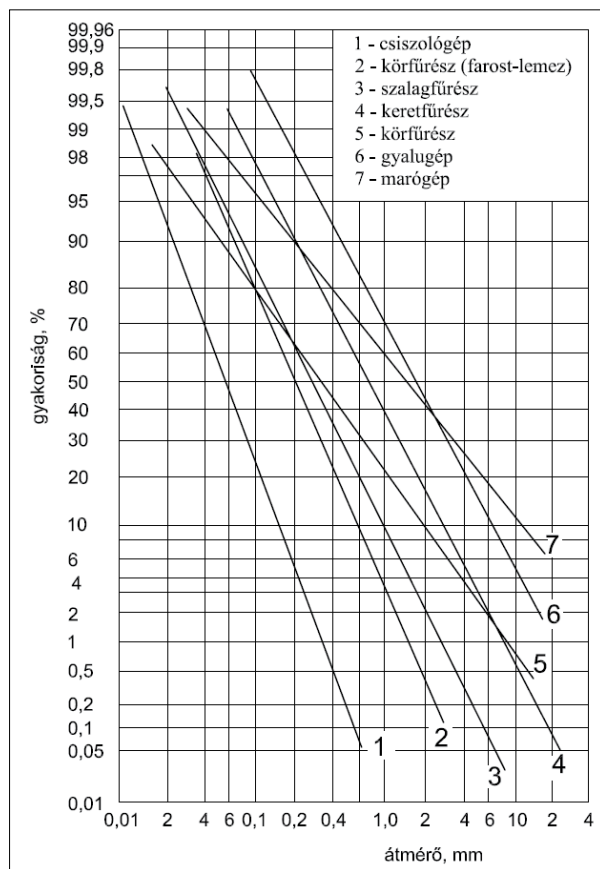
4. ábra Szemcseméret szerinti eloszlás a mérési adatok alapján

Figure 4 The distribution of wood particles

a finom frakciók felé való eltolódást jelent. Ez a faanyag anatómiai felépítésére vezethető vissza. A különbség viszont nem olyan jelentős, ha figyelembe vesszük, hogy a por leválasztásnál épp a finom por bír nagyobb jelentőséggel, és épp ebben a tartományban kicsi a különbség.

Ha összehasonlítjuk a 4. és az 5. ábrákat, az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- A gyalulás során keletkező forgács összetétele eltolódott a finomabb frakciók felé. Az egyenes meredeksége közel azonos maradt. Ez a magasabb fordulatszám miatti kisebb egy fogra eső előtolásra, illetve a keményfém lapkák alkalmazható kisebb élszögére vezethető vissza.
- A fűrészelés során keletkező forgácseloszlási görbe meredeksége növekedett. Ez azt jelenti, hogy a finom por mennyisége csökken (tehát a veszélyes frakció mennyisége is csökken). A magasabb forgácsolási sebesség, kisebb élszög, és az ezzel együtt járó magasabb egy fogra eső előtolási sebesség együttes hatása miatt figyelhető meg ez a jelenség.



5. ábra Szemcseméret szerinti eloszlás irodalmi adatok szerint (Sitkei, 1994)

Figure 5 The distribution of wood particles – literary data (Sitkei, 1994)

Összefoglalás

Összességében megállapítható, hogy a körfűrész és szalagfűrész történő megmunkálás során keletkező por-forgács halmazok görbéi eltolódtak egymás felé. Ez megkönnyítheti a porelszívó hálózatok tervezését, illetve a porleválasztó egységek méretezését.

Egyértelműen leolvasható a szemcseméret szerinti eloszlás diagramjáról, hogy az új forgácsolási paraméterek hatására a kisebb méretű porfrakciók tömege növekedett, ami a porleválasztás méretezésére, illetve a leválasztók kiválasztására gyakorol jelentős hatást.

A méréseket csak erdeifenyőre végeztük el, de mivel az eloszlás jelentős változást mutat, indokolt további fenyő és lombos fafajok esetén is megvizsgálni az eloszlást.

Irodalomjegyzék

- World Health Organisation 2006. Air Quality Guidelines. Global Update 2005 <http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/78638/E90038.pdf> Megtekintve: 2012. szept. 30.
- Sitkei György (1994) A faipari műveletek elmélete [Theory of Wood Processing] Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó Kft., Budapest, 485-488, 503-506
- Csanády E., Magoss E. (2011) Mechanics of wood machining. Verlag Springer Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-29954-4, p. 57-61, 67-80.
- A. Kos, R. Beljo-Lučić, K. Šega and A. O. Rapp (2004) Influence of woodworking machine cutting parameters on the surrounding air dustiness. European Journal of Wood and Wood Products, Volume 62, Number 3, 169-176
- Seeger K., Tönsing E. (1999) Stromeinsparpotentiale in der Holzverarbeitende Industrie, in: Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Strom, Modellvorhaben und Fachartikel gefördert durch das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Hrsg.: Radgen P.; Jochem E., Karlsruhe, 26. 10.
- Ressel J. (1985) Energieanalyse der Holzindustrie der Bundesrepublik Deutschland, BMFT-Forschungsbericht PLE/5/DV, O3E-8573-A, Bundesanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg