



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

TERMÉNYSZÁRÍTÓK OPTIMÁLIS
ANYAGÁRAMLÁSI CSATORNÁI

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Bablana Adrienn

Gödöllő

2025

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Agrárműszaki Tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
MATE Műszaki Intézet

Témavezető(k): Prof. Dr. Keppler István
egyetemi tanár, PhD
MATE Műszaki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető(k) jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	6
2.1. Kísérleti vizsgálatok.....	6
2.2. Numerikus szimulációk.....	9
3. EREDMÉNYEK	17
3.1. Az egyenetlenségi tényező	17
3.2. A falsúrlódás hatása	17
3.3. A belső súrlódás hatása	18
3.4. A lamella dőlésszög hatása	19
3.5. Optimális lamella geometria	20
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	22
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	24
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	25
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK	26

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A betakarított szemestermények víztartalmának csökkentése (szárítása) elengedhetetlenül fontos része azok további feldolgozásra vagy tárolásra való előkészítésének. Ez a feladat ideális esetben a napenergia közvetlen felhasználásával, természetes szárítással megoldható. A fejlett ipari országok élelmiszer- és alapanyag igényét kielégítő mennyiségű szemestermény természetes úton nem szárítható: mesterséges szárítás szükséges. A mesterséges szárítás igen magas energiaigénye és esetenként környezetkárosító hatása miatt igyekeznünk kell a szárítás feladatát a lehető legnagyobb hatékonysággal elvégezni. Dolgozatomban ezt a hatékonyságnövelést kívánom elérni gravitációs rendszerű keresztáramú szárítóberendezés konstrukciójának módosításával.

A mezőgazdaságban a szárítás a közvetlen energiahordozó felhasználás 60-80%-át is lekötheti. Ez alapján nyilvánvaló, hogy a szárítás hatékonyságának növelése elemi érdeke minden szárítással foglalkozó vállalkozásnak. A hatékonyságnövelésnek két fő iránya lehet, egyrészt a termodinamikai folyamatok optimalizálása (például a felhasznált fosszilis energiahordozók fajlagos mennyiségének csökkentésével), másrészt pedig a szemcsemozgási folyamatok befolyásolásában rejlő lehetőségek kihasználása. Dolgozatomban a második lehetőséget vizsgálom.

A végtermék minőségét jelentősen befolyásolja annak alul- vagy túlszárítása, amit jelentős mértékben befolyásol a szemestermény által a szárítóban eltöltött idő. A szárítóberendezésben eltöltött idő értéke a szemcsemozgás sebességviszonyaitól függ, ennek elemzésére pedig kiválóan alkalmas a diszkrét elemek módszere (DEM).

A korábbi kutatások az egyenes lamellák szögállásának és térbeli eloszlásának változtatásával próbálták elérni az egyenletes anyagáramlási viszonyokat. Azonban az ilyen irányú további módosítások már nem mutatnak szignifikáns javulást az anyagáramlás egyenletességének tekintetében. Dolgozatomban megmutatom, hogy a lamellák (légbefúvó csatornák) geometriájának módosítása további anyagáramlási egyenletesség javulást eredményezhet, mellyel a szárítási veszteségek tovább csökkenthetők.

Kutatásaim célja gravitációs rendszerű keresztáramú szárítóberendezések optimális lamella geometriájának kialakítása. A cél elérése érdekében a következő kérdéseket kívánom megvizsgálni:

1. Milyen mértékegység nélküli jellemzőt használhatunk a szárítóbeli anyagáramlás egyenetlenségének leírására?
2. A szemcsék és a fal közötti kölcsönhatások tribológiai jellemzői hogyan befolyásolják a szárítóbeli anyagáramlás egyenetlensége?
3. A szemcsék közötti kölcsönhatások tribológiai jellemzői hogyan befolyásolják a szárítóbeli anyagáramlás egyenetlenségét?
4. A szárítóberendezés egyenes lamelláinak szögállása hogyan befolyásolja a szárítóbeli anyagáramlás egyenetlenségét?
5. Létezik olyan (az egyenestől eltérő) lamella geometria kialakítás, amellyel tovább javítható az anyagáramlás egyenetlensége és ezáltal a szárítás hatékonysága?

Dolgozatomban megmutatom, hogy egy, a 17. századból származó geometriai probléma analitikus megoldásának felhasználásával és numerikus módszerek együttes alkalmazásával lehetséges az optimális geometria létrehozása.

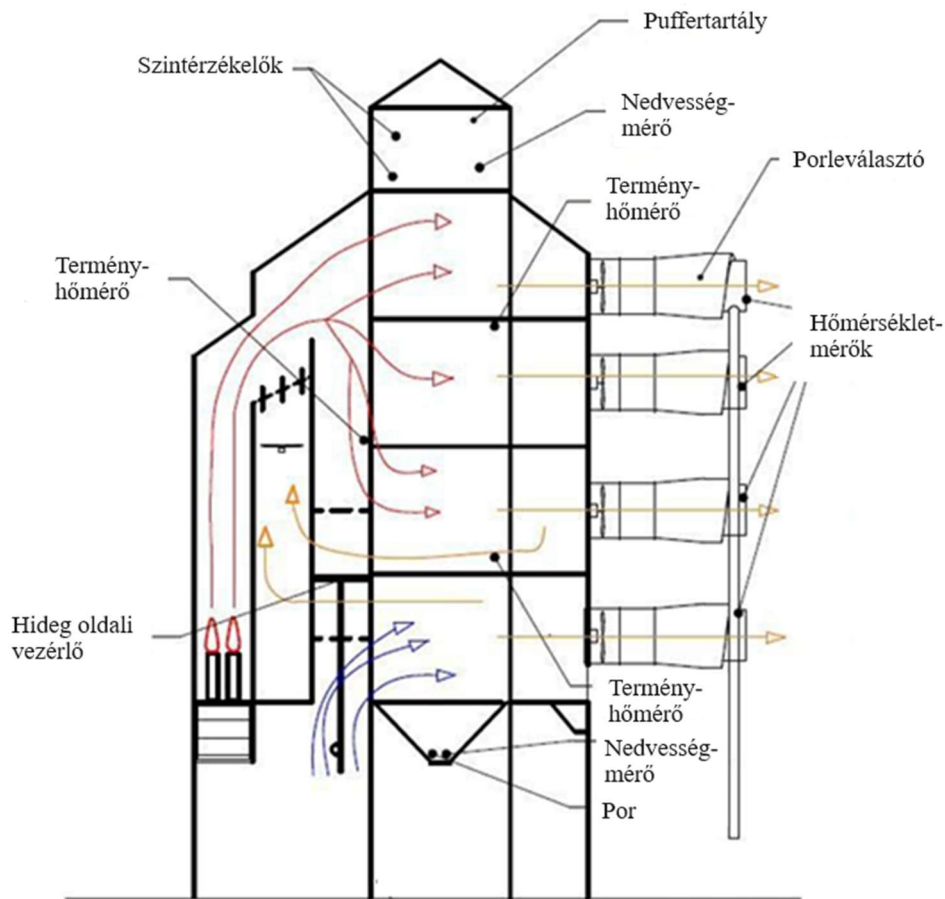
2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Kísérleti vizsgálatok

A szárítóberendezésben lezajló anyagáramlási folyamatok elemzéséhez szükséges kísérleti vizsgálataim három fő részre oszthatók: vizsgálatok az eredeti szárítóberendezésen, a modellszáritón, valamint a diszkrét elemes modellhez szükséges kalibrálási mérések.

A keresztáramú szárítóberendezések jellemzően szakaszos működésűek. Szárítás közben a termény függőleges irányban lefelé halad, a haladás során terelő lamellák biztosítják, hogy megfelelő mennyiségű levegő jusson a berendezésbe, illetve a szemek megfelelő ideig tartózkodjanak a szárítóban.

A magmozgási folyamatok vizsgálata egy HSZ-15 típusú átfolyó rendszerű ipari szárítóberendezésben folyt. Ez az átfolyó rendszerű terményszárító függőleges elhelyezkedésű modulokból áll, melyek két oldalán helyezkednek el a meleg, illetve a hideg oldali légcsatornák. A szárítandó anyag a modulok tetején elhelyezett előtároló (puffer-) tartályon keresztül kerül a szárítóba. A tárolón lévő alsó és felső szintérzékelők biztosítják a szárító folyamatos anyagellátását és a betároló rendszer szabályozását (2.1. ábra). A modulok egyenként 10 db speciálisan kialakított terményoszlopot tartalmaznak, melyeken a termény keresztülhalad, miközben a meleg, száraz szárítólevegő átjárja. A szárítóberendezés magassága 16 méter, a maximális terménytöltet nagysága 50 m³.



2.1. ábra: A szárítóberendezés fő részei

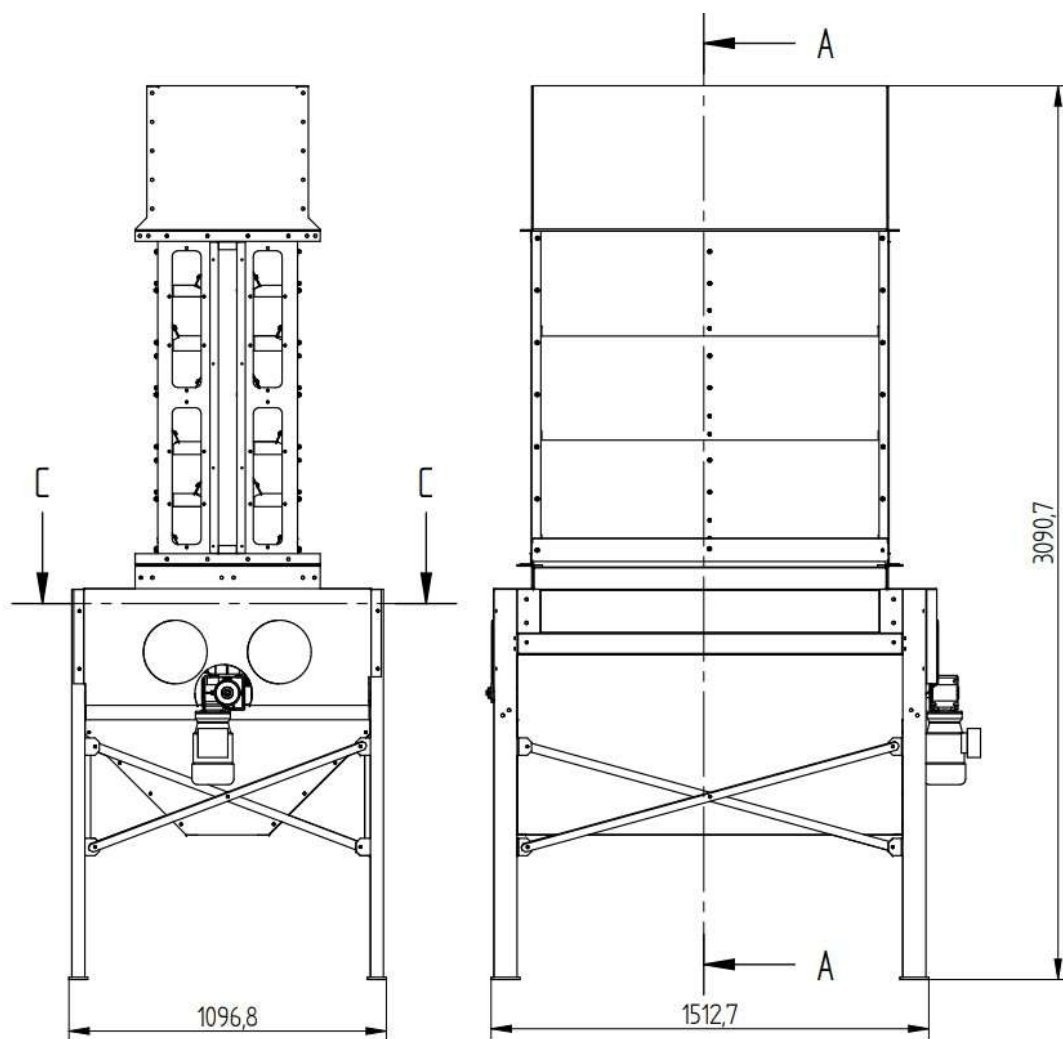
Az anyagáramlási vizsgálatok elvégzéséhez betekintő ablakok kerültek a magcsatornák oldalára, majd azokon keresztül videofelvételek készültek a szemestermények üzem közbeni áramlásáról. A szárítóberendezés összeszerelése során is lehetőség nyílt a különálló modulok magmozgási folyamatainak vizsgálatára, légbefúvás nélkül.

A magmozgás vizsgálatok mind a különálló szárító modulon, mind a működő ipari szárítóberendezés belsejében is elvégzésre kerültek. A különálló szárítómodul és a működő ipari szárítóberendezés magmozgásviszonyait összehasonlítva a sebességértékek között számottevő különbség nem volt tapasztalható.

Az ipari szárítón elvégzett mérésekből tehát két következtetés vonható le:

- A lamellák jelenléte jelentős mértékben befolyásolja a sebességviszonyokat, így a szemcsék áramlásának egyenetlenségét.
- A működő szárítóberendezésben lezajló légáramlási folyamatok nincsenek számottevő hatással a szemcsemozgási folyamatokra.

Mivel a nagy szárítón végzett mérések eredményei szerint a lamellák jelentősen befolyásolják a szemcseáramlás egyenetlenségét, meg kellett vizsgálni a lamellák dőlésszögének hatását a sebességviszonyokra. Ennek a feladatnak a könnyebb elvégzése érdekében elkészült egy modellszáritó berendezés, amely az eredeti szárítómodul két oszlopából állt. A modellszáritó felépítése a 2.2. ábrán látható:



2.2. ábra: A modellszáritó felépítése és fő méretei

A modellszáritóval kapcsolatos méréseknek két fő célja volt. Egyrészt annak vizsgálata, hogy a modellszáritóban lezajló anyagáramlási folyamatok mennyiben térnek el a valós méretű szárítóban lezajló szemcsemozgási viszonyoktól, másrészt a későbbi diszkrét elemes modellek validálásához szükséges mérési adatokat is össze kellett gyűjteni.

A modellszáritóval kapcsolatos mérések során jóval egyszerűbb volt az anyagáramlási viszonyok vizsgálata, ugyanis a nagy szárítón végzett mérésekkel ellentétben itt már a szemcsehalmazban egyes sávokat meg lehetett festeni és így a festett csíkok mozgását követve könnyebben meg lehetett határozni a sebességviszonyokat.

Az anyagáramlási sebességet elsősorban a kitároló rendszer nyitvatartási ideje szabja meg. A modellszárító forgó kitároló egységének fordulatszáma úgy lett beállítva, hogy az az ipari szárítóéval a lehető legjobban egyező sebesség értékeket hozzon létre a modellszárítóban. A modellszárító és az ipari szárítóberendezés sebességviszonyai között igen jó egyezés hozható létre a kitároló egység nyitási idejének megfelelő beállításával. Mindezek alapján elmondható, hogy a modellszárító berendezés alkalmas arra, hogy a valóságos szárítóberendezésben lezajló anyagáramlási viszonyokat ezen modellezzük.

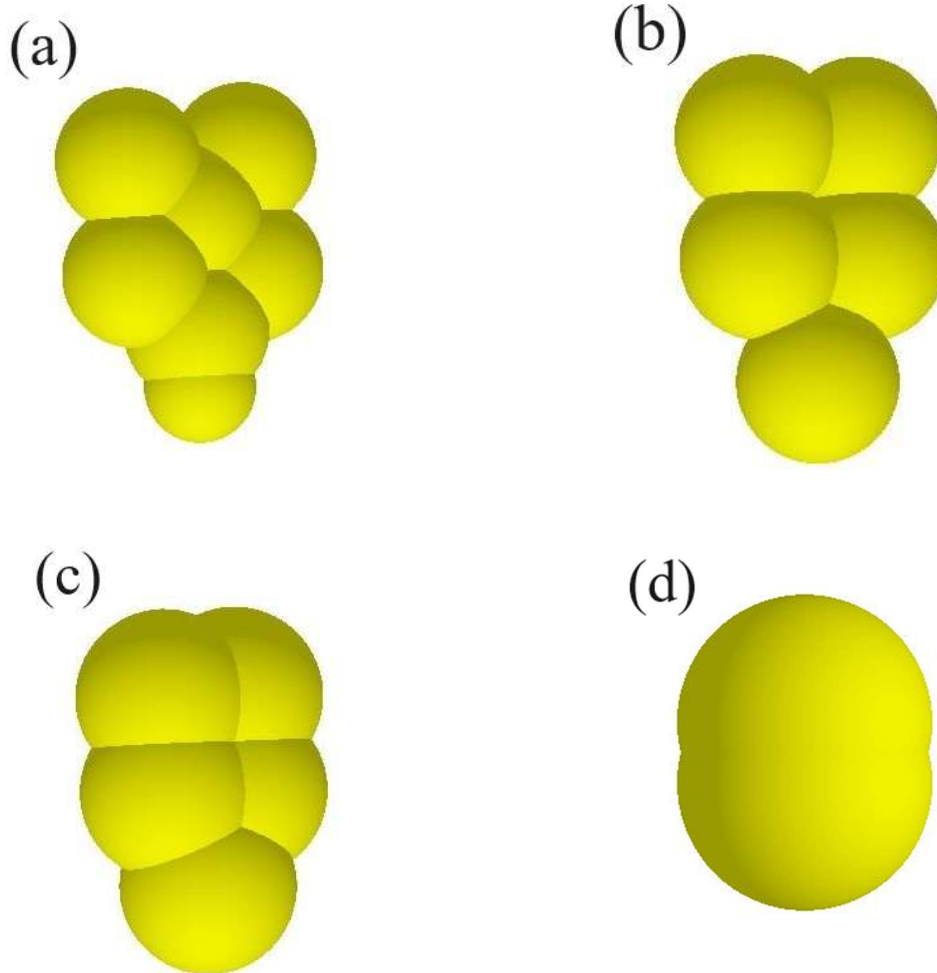
2.2. Numerikus szimulációk

A numerikus modell megalkotásához szükség volt a halmazban előforduló kukoricaszemek alakjának meghatározására. Mintavételezés alapján négyféle szemalakot különböztettem meg (2.3. ábra).



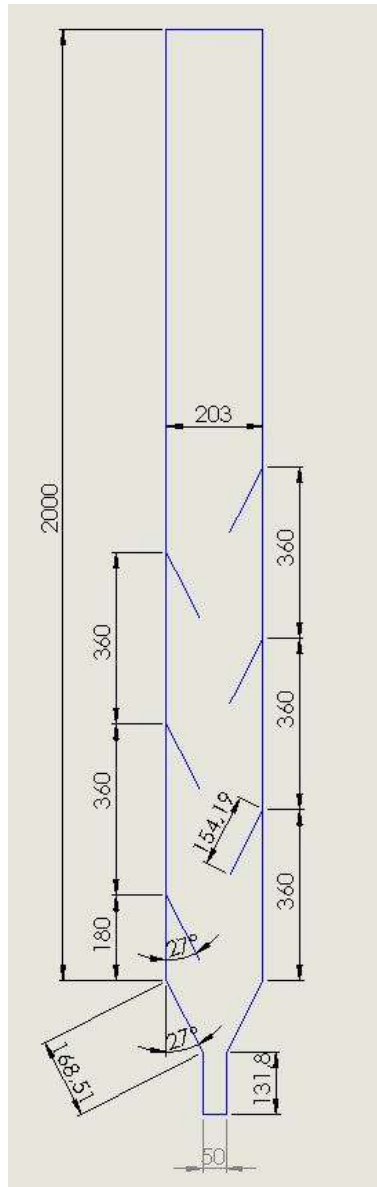
2.3. ábra: A mintában szereplő kukoricaszemek és alak szerinti osztályozásuk

A diszkrét elemes szimulációban az adott alakra vonatkozó átlagos méretek segítségével hoztam létre a különböző szemcsealakokat a 2.4. ábra szerint.



2.4. ábra: A diszkrét elemes szimulációkban szereplő szemcsealakok: (a) lapos, (b) hosszúkás, (c) szögletes, (d) kerek

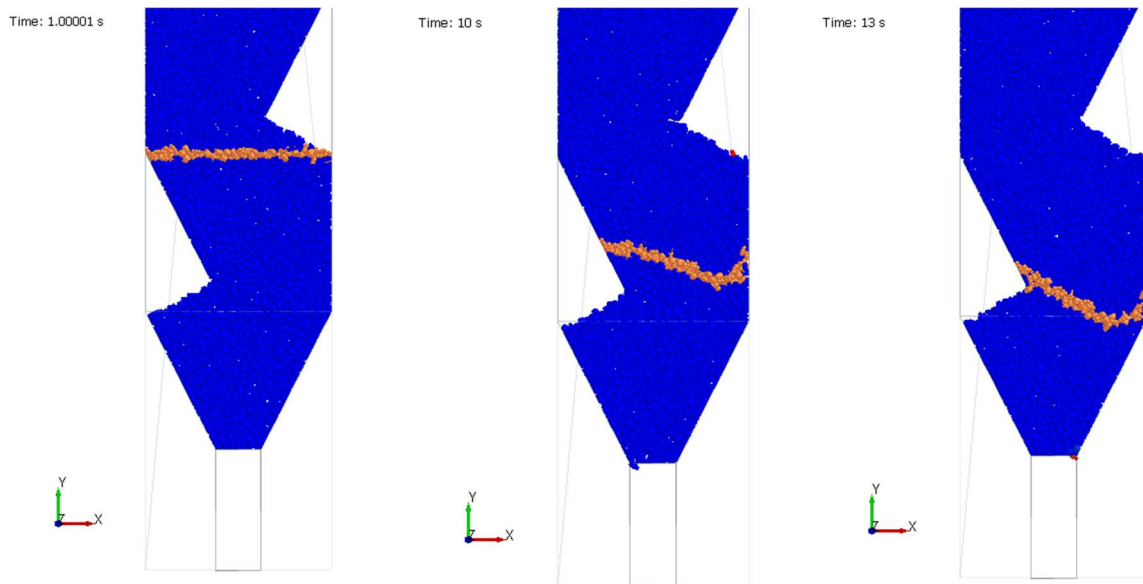
Mivel a kísérleti vizsgálatokat egy működő terményszárító telephelyen végeztem, a telep üzemszerű működésének lehető legkisebb mértékű megzavarásával kellett dolgozni. Ezért a rézsűszög mérést választottam kalibrálási módszernek. A mért szögértékek: $\alpha_1 = 19,2^\circ$; $\alpha_2 = 18,8^\circ$; $\alpha_3 = 17,4^\circ$. A szárítóberendezésben lezajló magmozgások vizsgálatához a 2.2. ábrán látható modellszárító geometriáját vettem alapul (2.5. ábra).



2.5. ábra: A numerikus modellben szereplő tároló geometriája

A lamella dőlésszög hatásának vizsgálata során az α értéket az alábbiak szerint változtattam: $\alpha = 22^\circ$; $\alpha = 24^\circ$; $\alpha = 27^\circ$; $\alpha = 30^\circ$; $\alpha = 32^\circ$. Amint a 2.5. ábrán is látszik, ezek közül a 27° -os érték az eredeti szögállás. A szimulációk ötszörös ismétléssel futottak le.

A magmozgás vizsgálata során a halmaz nyugalmi állapotában egy vékony festett csíkot helyeztem el a halmaz közepén és ennek a csíknak a deformációját vizsgáltam. Minden egyes szimuláció esetén úgy vettem figyelembe a festett csíkok pozícióját, hogy az adott sáv egy lamellán végig menjen, de a festett szemcsék még ne potyogjanak le az adott lamelláról (2.6. ábra).



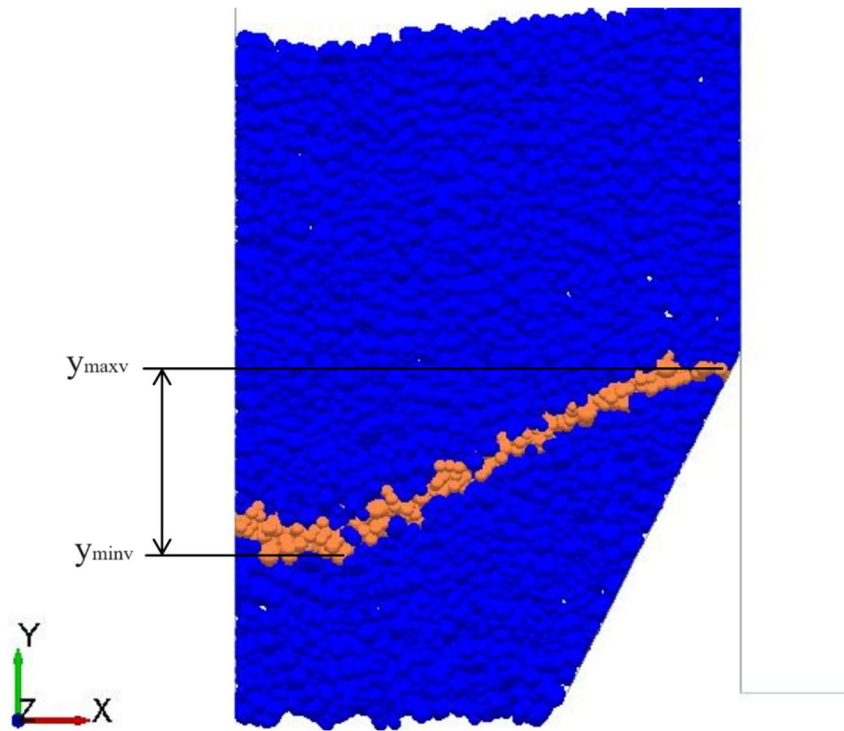
2.6. ábra: A festett sávok elhelyezkedése a kiindulási időpontban (1 s), illetve 10 s és 13 s után
27°-os lamella szögállás esetén

Az anyagáramlás egyenetlenségének leírására bevezettem a ξ hányadost (egyenetlenségi tényező) az alábbiak szerint:

$$\xi = \frac{y_{max} - y_{min}}{y_{max}}, \quad (2.1)$$

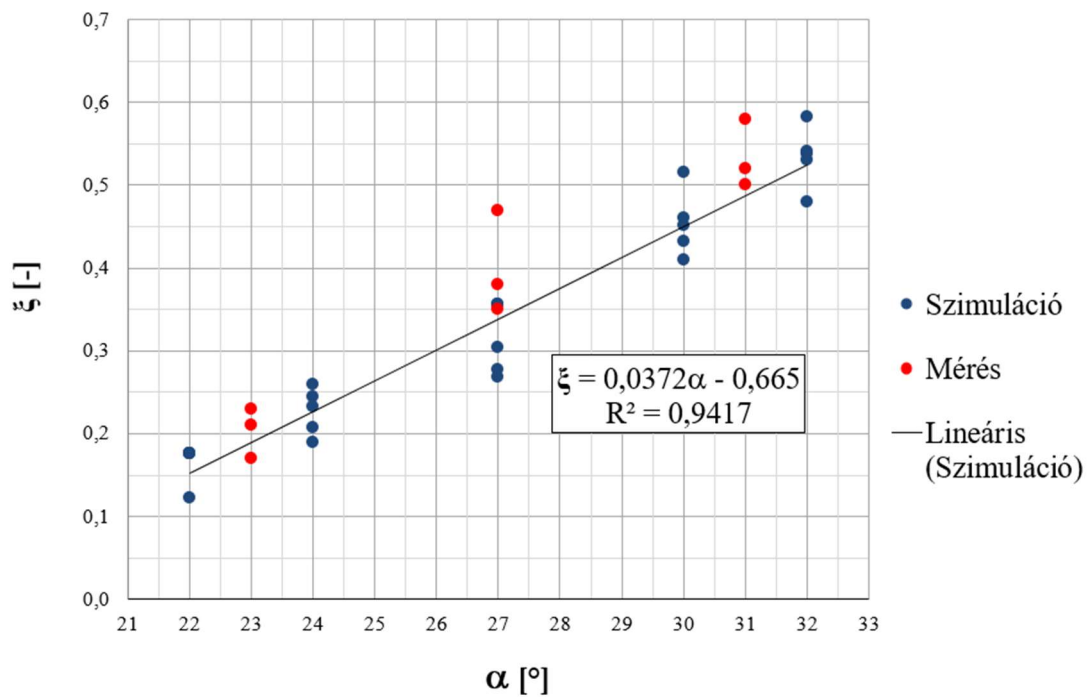
ahol y_{max} a legmagasabb pozícióban elhelyezkedő szemcse súlypontjának y koordinátája, y_{min} a legalacsonyabb pozícióban elhelyezkedő szemcse súlypontjának y koordinátája (2.7. ábra).

Ezek az y koordináták a szoftverből egyszerűen lekérdezhetőek, ráadásul a számítási módszer mellett szól még az is, hogy az elmozdulás nem származtatott mennyiség, hanem közvetlenül mérhető, így pontosabban meghatározható. Minél egyenletesebb az áramlás, a ξ értéke annál inkább közelít a 0-hoz.



2.7. ábra: Áramlási egyenetlenség meghatározása a szemcsék elmozdulásából

A 2.8. ábrán látható a modellszárítóban mért adatokból, illetve a szimulációs eredményekből számított ξ hányados különböző lamella hajlásszögek esetén.



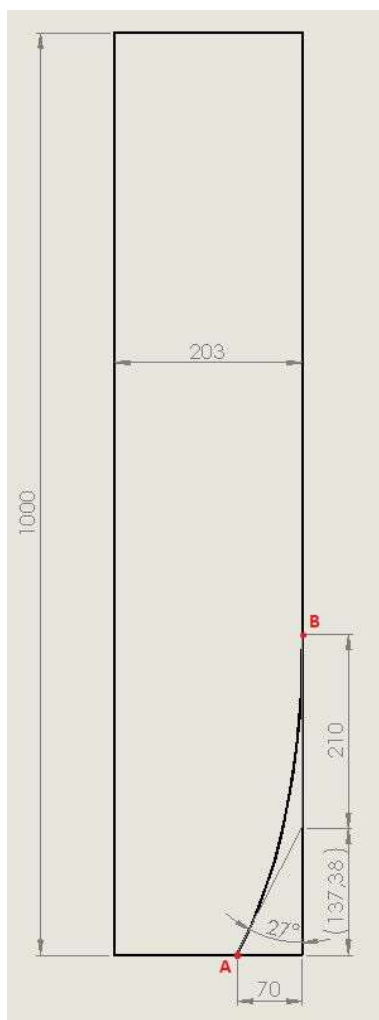
2.8. ábra: A mért és a numerikus módszerrel meghatározott egyenetlenségi tényező értékek összehasonlítása

A szimulációs eredményekre való lineáris illesztés eredményeképpen kapott függvény egyenlete:

$$\xi = 0,0372\alpha - 0,665, \quad (2.2)$$

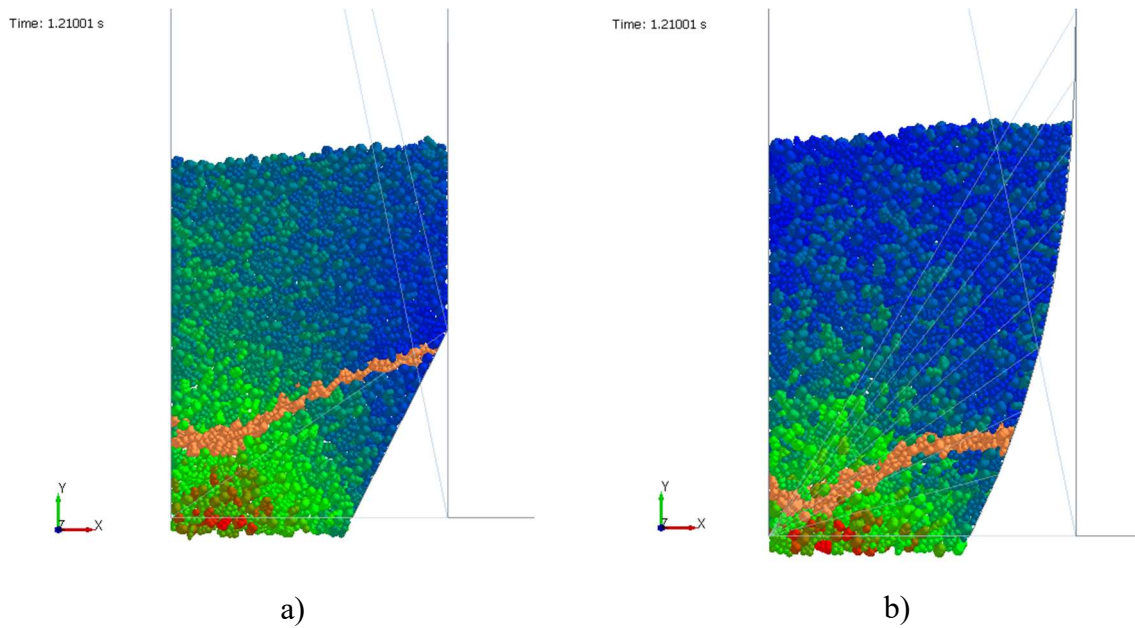
a korrelációs együttható értéke $R^2 = 0,9417$. A vizsgált anyag jellegét figyelembe véve ez az R^2 érték megfelelőnek mondható.

Az egyenes és a ciklois lamella geometria összehasonlítása során az alkalmazott egyenes lamella az eredeti, a modellszárítóban is használt $\alpha = 27^\circ$ -os hajlásszögű lamella. A ciklois alakú lamella geometriáját konstrukciós okokból úgy alkottam meg, hogy a görbe érintője a lamella végén található A pontban maga az egyenes lamella, a B pontban pedig az érintő a függőleges egyenes (2.9. ábra).



2.9. ábra: Tároló geometriája az egyenes és ciklois alakú lamella összehasonlításához

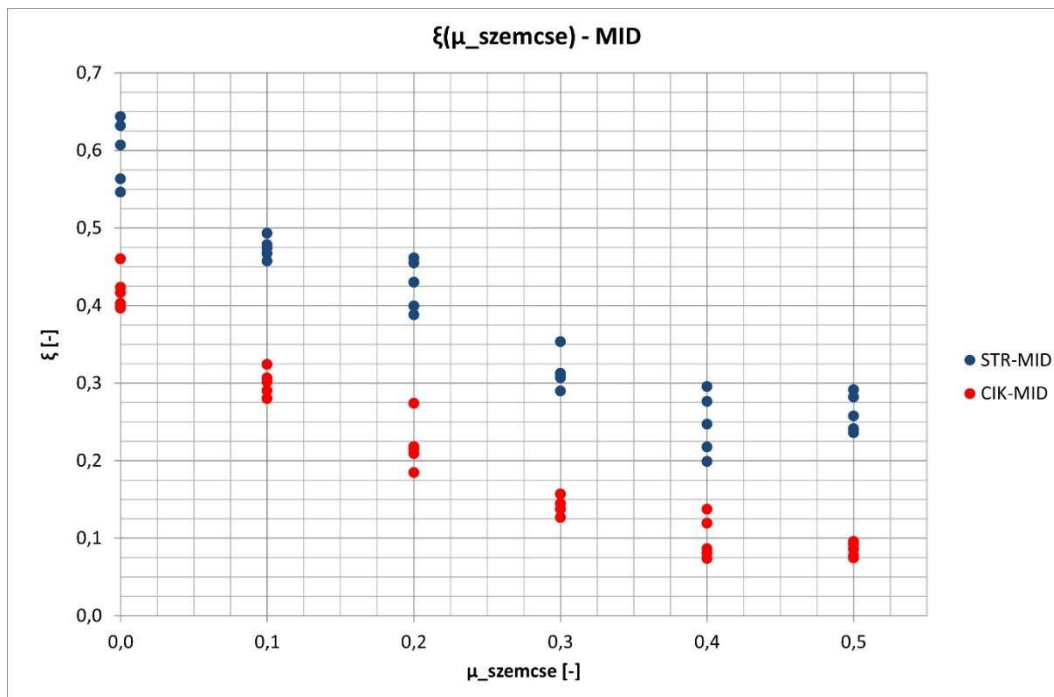
A mozgás egyenetlenségét ebben az esetben is a $\xi = \frac{y_{max} - y_{min}}{y_{max}}$ összefüggéssel határoztam meg (2.10. ábra).



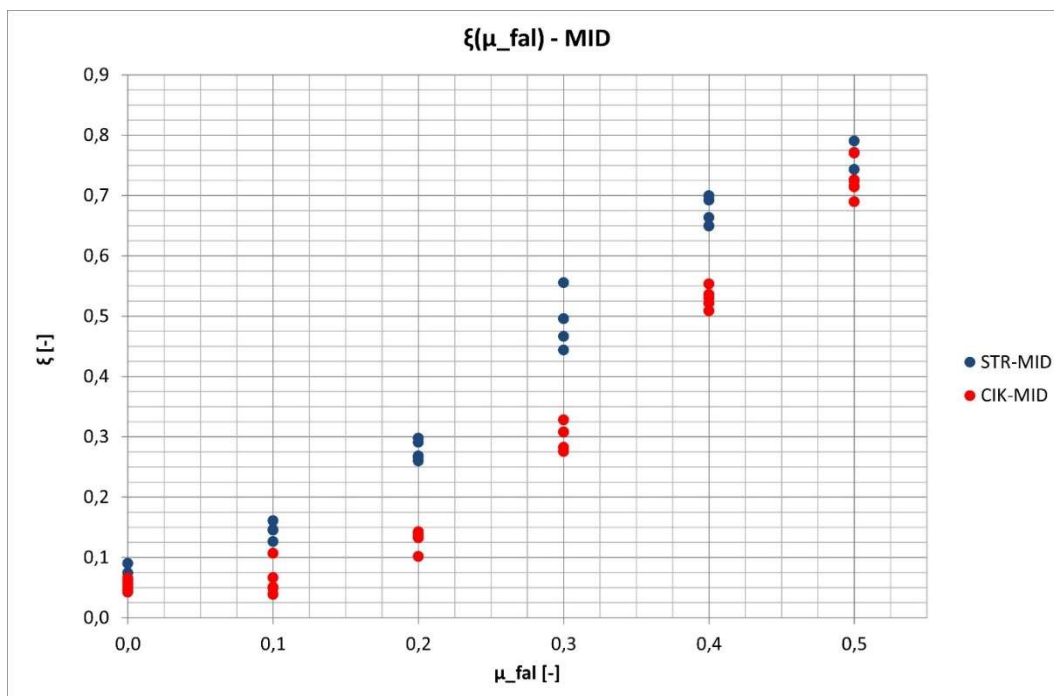
2.10. ábra: A középben elhelyezett festett sávok alakja a) egyenes, illetve b) ciklois alakú lamella esetén $\Delta t = 0,21$ s elteltével

Megvizsgáltam a szemcse-fal (μ_{fal}) és a szemcse-szemcse ($\mu_{szemcse}$) közötti súrlódási tényezők hatását a mozgás egyenetlenségére egyenes és ciklois lamella esetén is, az előző esethez hasonlóan a halmaz közepén kijelölt sávokat figyelembe véve.

A μ_{fal} és $\mu_{szemcse}$ súrlódási tényező értékek változtatása során kapott ξ egyenetlenségi tényező értékek változása a 2.11. - 2.12. ábrákon található diagramokon láthatók.



2.11. ábra: A festett sávok esetén meghatározott ξ értékek egyenes (STR) és ciklois (CIK) lamella esetén, a szemcsék közötti súrlódási tényező függvényében



2.12. ábra: A festett sávok esetén meghatározott ξ értékek egyenes (STR) és ciklois (CIK) lamella esetén, a szemcse-fal közötti súrlódási tényező függvényében

3. EREDMÉNYEK

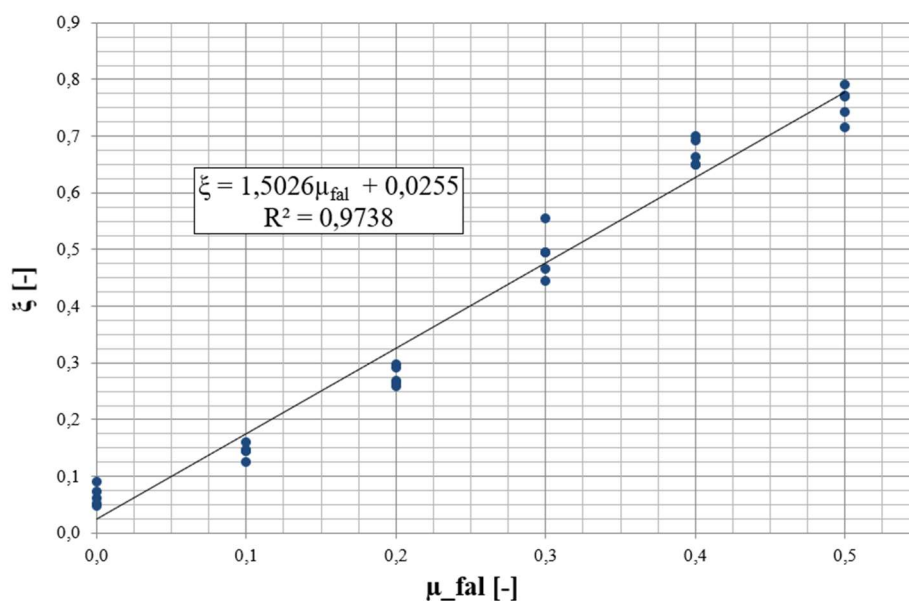
A szakirodalmi források és a saját mérési tapasztalatok szerint is igen jelentős minőségbeli romlást okoz a szárítóberendezések alul- és túlszárítása, amit a szárítóbeli anyagáramlási egyenetlenségek okoznak. A szárító belsejében az anyagáramlási útvonalakat lamellák szabályozzák. Disszertációmban ezeknek a lamelláknak az anyagmozgásra kifejtett hatását vizsgáltam és javaslatot tettem olyan konstrukciós módosításokra, amelyek az áramlási egyenetlenségeket lecsökkentve javítják a szárítás hatékonyságát és a végtermék minőségét.

3.1. Az egyenetlenségi tényező

Elsőként olyan mértékegység nélküli jellemzőt kerestem, amelynek segítségével számszerűsíteni tudtam az anyagáramlás egyenetlenségét. Míg a szakirodalom elsősorban a „residence time”, azaz tartózkodási idő fogalmát használja ennek leírására, én a szemcsék függőleges irányú elmozdulásában jelentkező egyenetlenséget írtam le a ξ egyenetlenségi tényezővel.

3.2. A falsúrlódás hatása

Elsőként megvizsgáltam, hogy a 2.9. ábrán bemutatott modell esetén, azonos lamella szögállás (27°) és szemcsék közötti súrlódási tényező érték ($\mu_{szemcse} = 0,2$) esetén a falsúrlódás értékének megváltoztatása milyen hatással van az anyagáramlás egyenetlenségére. Az alábbi diagram tartalmazza a vizsgálataim eredményeit 0 és 0,5 közötti falsúrlódási tényező értékek esetén (3.1. ábra).



3.1. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-fal súrlódási tényező függvényében 27° -os lamella szögállás esetén

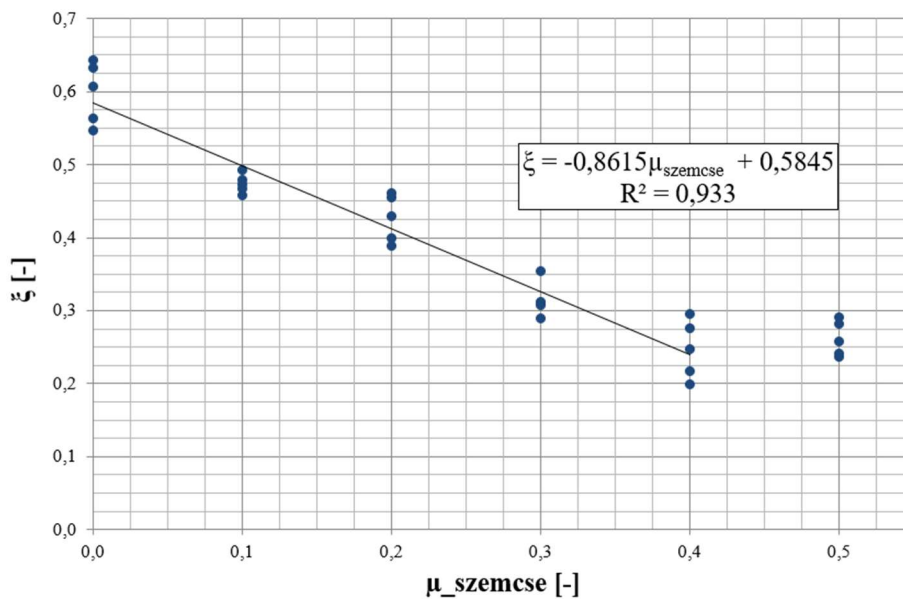
Az egyenetlenségi tényező értékét az alábbi közelítő egyenlet írja le a falsúrlódási tényező függvényében:

$$\xi = 1,5026 \cdot \mu_{fal} + 0,0255. \quad (3.1)$$

A falsúrlódás növekedése láthatóan „rontja” az anyagáramlás egyenetlenségét, mivel a szemcsék mozgását nagyobb súrlódási tényező esetén a fal jobban tudja akadályozni.

3.3. A belső súrlódás hatása

A következő lépésben megvizsgáltam, hogy szintén a 2.9. ábrán bemutatott modellt felhasználva, 27°-os lamella szögállás esetén és azonos falsúrlódási tényező értékek ($\mu_{fal} = 0,25$) mellett a szemcsék közötti súrlódás értékének változtatása milyen hatással van az anyagáramlás egyenetlenségére. Az alábbi diagram tartalmazza a vizsgálataim eredményeit 0 és 0,5 közötti szemcse-szemcse súrlódási tényező értékek esetén (3.2. ábra).



3.2. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-szemcse súrlódási tényező függvényében 27°-os lamella szögállás esetén

Ebben az esetben az egyenetlenségi tényező értékét az alábbi közelítő egyenlet írja le a szemcsék közötti súrlódási tényező függvényében, 0 és 0,4 közötti tartományban:

$$\xi = -0,8615 \cdot \mu_{szemcse} + 0,5845. \quad (3.2)$$

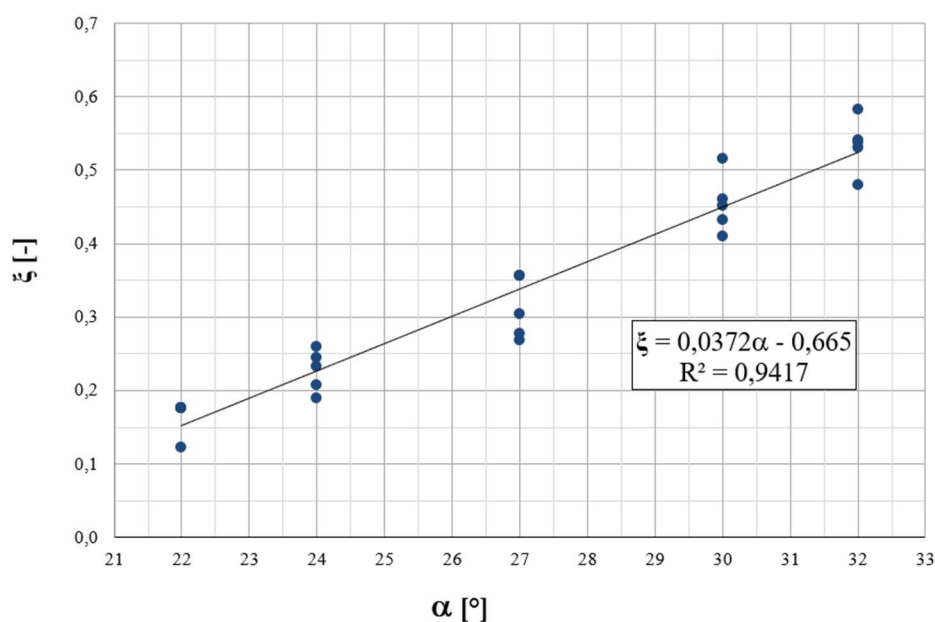
A 0,4 fölötti súrlódási értékek esetén a függvényt konstansnak tekintettem, 0,5-nél nagyobb súrlódási tényező értéket nem vizsgáltam, mivel a kísérletek során ilyen nagy súrlódási tényezővel rendelkező anyaggal nem találkoztam.

Véleményem szerint a szemcsék közötti súrlódás növekedésének hatására csökkenő egyenetlenség magyarázata, hogy a nagyobb súrlódási tényező értékek esetén a szemcsék könnyebben mozognak együtt, mondhatni egymással összekapaszkodva, és így a falsúrlódás hatása kevésbé tud érvényesülni.

Az érzékenységvizsgálatokat egyéb mikromechanikai paraméterekre (szemcsék közötti ütközési tényező, rugalmassági modulusz, szimuláció időléptéke) is elvégeztem, de az egyenetlenség ezekre a paraméterekre nem volt szignifikánsan érzékeny.

3.4. A lamella dőlésszög hatása

A 2.5. ábrán látható modellt felhasználva egyenes lamella esetén megvizsgáltam a lamella dőlésszög hatását a szemcseáramlás egyenetlenségére, ebben az esetben a súrlódási tényező értékek $\mu_{fal} = 0,25$ és $\mu_{szemcse} = 0,2$. A vizsgált lamella dőlésszögek 22° és 32° között változtak (3.3. ábra).



3.3. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a lamella dőlésszög függvényében

Az adatokra illesztett közelítő függvény egyenlete a vizsgált intervallumon:

$$\xi = 0,0372 \cdot \alpha - 0,665$$

Ebben az esetben az látszik, hogy a közelítő függvény egy negatív értéknél metszi a függőleges tengelyt, amelynek a ξ érték értelmezési tartományát figyelembe véve nincs értelme, ebben az esetben különösen fontos, hogy a közelítő függvény csak a vizsgált hajlásszög tartományban érvényes. Elképzelhető, hogy kisebb α értékeket is figyelembe véve a függvény jellege megváltozik, ezt a dolgozatomban nem vizsgáltam.

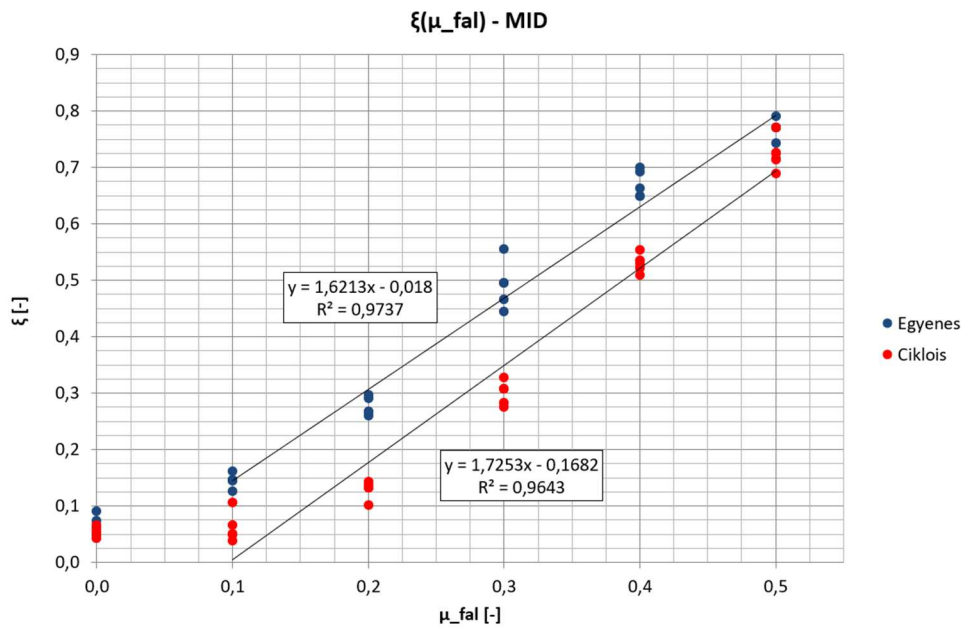
Az áramlás egyenetlensége szempontjából nyilvánvalóan a 0° -os lamella dőlésszög lenne a legjobb (amikor gyakorlatilag nincsenek lamellák), azonban a szárító berendezésen való áthaladást vizsgálva gyakorlati szempontokat is figyelembe kell venni, emiatt a lamella dőlésszög értékére létezik egy minimális és egy maximális érték, amely alkalmazható.

A szemeknek bizonyos időt el kell tölteniük a szárítóban, hogy a kívánt nedvességtartalom-értéket elérjük, emiatt szükség van a terelő elemekre, továbbá a levegő beáramlásához is szükség van befúvó nyílásokra. Ez az időtartam mérhető lehet, figyelembe véve a bejuttatott levegő hőmérsékletét, illetve a kezdeti és a kívánt nedvességtartalom értékeket, ezáltal meghatározható a lamella dőlésszög minimális értéke. A maximális értéket pedig a halmaz rézsűszöge határozza meg, ha a dőlésszög ennél nagyobb, a halmaz könnyen beboltozódhat. Ezeket a határértékeket azonban a dolgozatomban nem vizsgáltam.

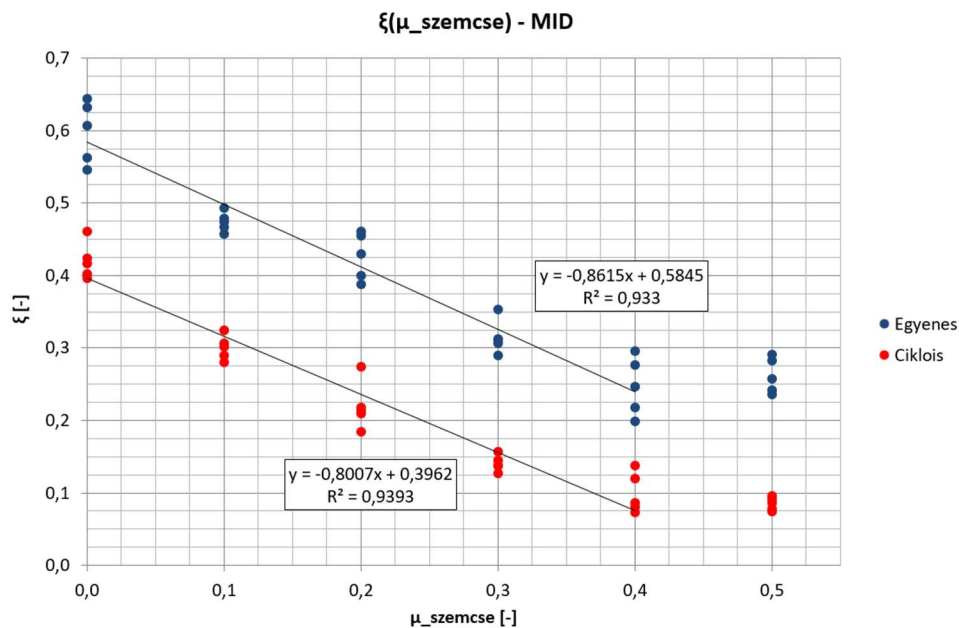
3.5. Optimális lamella geometria

A lamella geometriájának megválasztásakor a brachisztokron-problémát vettem kiindulási alapként, amely szerint konzervatív erőterben, a súrlódást elhanyagolva két pont között (ahol a két pont x és y koordinátái nem azonosak) a leggyorsabban bejárható útvonal egy ciklois görbe, ez alapján a lamella geometriájának is a ciklois alakot választottam.

A 2.9. ábrán bemutatott modellt felhasználva, ciklois alakú lamella esetén is megvizsgáltam a falsúrlódás és a szemcsék közötti súrlódás hatását az áramlás egyenetlenségére. A vizsgálatok eredményeit a 3.4. és 3.5. ábra mutatja be, amely ábrákon a lineáris szakaszokra illesztett egyenletek is láthatók.



3.4. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-fal súrlódási tényező függvényében egyenes (27°-os) és ciklois lamella esetén



3.5. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-szemcse súrlódási tényező függvényében egyenes (27°-os) és ciklois lamella esetén

A diagramokon látható, hogy a ciklois alakú geometria szinte minden vizsgált súrlódási tényező értékre kisebb ξ áramlási egyenetlenség értéket ad. Az eredmények azt mutatják, hogy ciklois alakú geometria alkalmazása jelentős mértékben javíthatja az anyagáramlás egyenetlenségét, ezen belül pedig a szárítás minőségét.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. *Egyenetlenségi tényező:* Az anyagáramlás egyenetlenségének jellemzésére (az anyaghalmozban kijelölt sáv mozgását vizsgálva) a modellezés során bevezettem a $\xi = \frac{y_{max} - y_{min}}{y_{max}}$ egyenetlenségi tényezőt, melynek értéke 0 és 1 között változhat. Értéke minél kisebb, annál egyenletesebb az áramlás. Az y_{max} és y_{min} értékeket a következőképpen definiáltam:

- y_{max} adott idő alatt a kijelölt sávban a legmagasabb pozícióba kerülő szemcse súlypontjának y koordinátája,
- y_{min} adott idő alatt a kijelölt sávban a legalacsonyabb pozícióba kerülő szemcse súlypontjának y koordinátája.

Ez a mértékegység nélküli jellemző alkalmas a szárítóbeli anyagmozgási folyamatok egyenetlenségének összehasonlítására.

2. *A falsúrlódás hatása:* Kísérleti vizsgálatok és numerikus szimulációk felhasználásával kimutattam, hogy a falsúrlódás értéke jelentős hatással van az anyagáramlás egyenetlenségére (ξ). A kapcsolatot leíró közelítő lineáris függvény (kukoricaszemek mozgása esetén) a $\mu_{fal} \in [0; 0,5]$ intervallumban, $\mu_{szemcse} = 0,2$ súrlódási tényező és $\alpha = 27^\circ$ lamella dőlésszög esetén a következő:

$$\xi = 1,5026 \cdot \mu_{fal} + 0,0255 \quad R^2 = 0,9738$$

3. *A szemcsék közötti súrlódás hatása:* Kísérleti vizsgálatok és numerikus szimulációk felhasználásával kimutattam, hogy a szemcsék közötti súrlódás értéke jelentős hatással van az anyagáramlás egyenetlenségére (ξ). A kapcsolatot leíró közelítő lineáris függvény (kukoricaszemek mozgása esetén) a $\mu_{szemcse} \in [0; 0,4]$ intervallumban, $\mu_{fal} = 0,25$ súrlódási tényező és $\alpha = 27^\circ$ lamella dőlésszög esetén a következő:

$$\xi = -0,8615 \cdot \mu_{szemcse} + 0,5845 \quad R^2 = 0,933$$

4. *A lamella dőlésszög hatása:* Kísérleti vizsgálatok és numerikus szimulációk felhasználásával egyenes lamellák esetén meghatároztam a lamella szögállás (α) hatását az áramlás egyenetlenségére (ξ). A kapcsolatot leíró közelítő lineáris függvény (kukoricaszemek mozgása esetén) az $\alpha \in [22^\circ; 32^\circ]$ intervallumban, $\mu_{fal} = 0,25$ és $\mu_{szemcse} = 0,2$ súrlódási tényező értékek esetén a következő:

$$\xi = 0,0372 \cdot \alpha - 0,665 \quad R^2 = 0,9417$$

5. *Optimális lamella alak:* Analitikus megfontolásokból kiindulva, kísérleti vizsgálatok és numerikus szimulációk segítségével megmutattam, hogy a szárítóberendezésekben ciklois alakú lamellát célszerű alkalmazni. A ciklois alakú lamella alkalmazásával minden általam vizsgált esetben egyenletesebb szemcseáramlást értem el, mint egyenes lamella alkalmazása esetén.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Dolgozatomban keresztáramú szárítóberendezésekben lezajló szemcsemozgásviszonyok optimalizálásával foglalkoztam. A szakirodalom szerint a szemcsemozgás egyenetlensége alul- és túlszárítást, jelentős veszteségeket okoz. Munkám során kimutattam, hogy az egyenes lamella állásszög változtatása jelentős hatással van a szárítás egyenetlenségére és ezen keresztül a végtermék minőségére. Az egyenetlenség javítása érdekében egyenes lamella esetén elméletben szóba jöhet például súrlódáscsökkentő bevonatok alkalmazása, ez azonban a kopás miatt csak ideiglenes megoldást jelent, ráadásul a költségei is magasak.

A szárítólevegő áramlásával kapcsolatos követelmények minél nagyobb lamella állásszöget, míg az egyenetlenséggel kapcsolatosak minél kisebb állásszöget igényelnek. Ez a két, egymással ellentétes hatás egy optimális állásszög érték létezésére utal, ennek az optimális állásszögnek a meghatározása azonban további vizsgálatokat igényel.

Figyelembe vehető még, hogy a falsúrlódási és a szemcsék közötti súrlódási tényező értékek a szárítóberendezés belsejében nem állandók, a hőmérséklet és a nedvességtartalom változás miatt különböző zónák alakulnak ki, amelyekben a súrlódási tényező más-más értékeket vesz fel. Emiatt a szárítás hatékonyságának növelésére megoldás lehet még, hogy a szárítóberendezésen belül a különböző zónákban a lamellák dőlésszögét megváltoztatjuk, ennek hatását azonban a kutatás során szintén nem vizsgáltam.

A fentieket figyelembe véve látható, hogy az egyenes lamella alkalmazásának megvannak a korlátai, a hatékonyság egy bizonyos határon túl már nem növelhető. További megoldást jelenthet a lamella geometriájának megváltoztatása, mely lehetőség vizsgálata volt a jelen kutatás tárgya.

Bevezettem egy kísérleti úton és numerikus szimulációkban is könnyen felhasználható mértékegység nélküli mennyiséget, amely az áramlás egyenetlenségére jellemző szám. Megmutattam, hogy a szemcsék közötti, illetve a szemcse-fal közötti súrlódás, valamint az egyenes lamella dőlésszöge milyen hatással van az anyagáramlás egyenetlenségére. Analitikus megfontolásokból kiindulva, kísérleti vizsgálatok és numerikus szimulációk segítségével megmutattam, hogy ciklois alakú lamella alkalmazásával egyenetlesebb szemcseáramlás érhető el, mint egyenes lamella alkalmazása esetén.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A betakarított szemestermények víztartalmának csökkentése (szárítása) elengedhetetlenül fontos része azok további feldolgozásra vagy tárolásra való előkészítésének. A fejlett ipari országok élelmiszer- és alapanyag igényét kielégítő mennyiségű szemestermény természetes úton nem szárítható: mesterséges szárítás szükséges. A mesterséges szárítás igen magas energiaigénye és esetenként környezetkárosító hatása miatt igyekeznünk kell a szárítás feladatát a lehető legnagyobb hatékonysággal elvégezni.

A keresztáramú szárítóberendezések jellemzően szakaszos működésűek. Szárítás közben a termény függőleges irányban lefelé halad, a haladás során terelő lamellák biztosítják, hogy megfelelő mennyiségű levegő jusson a berendezésbe, illetve a szemek megfelelő ideig tartózkodjanak a szárítóban.

Korábbi kutatások kimutatták, hogy a keresztáramú szárítóberendezésekben a terelőlemezek (lamellák) körül megjelenő egyenetlen szemcseáramlás egyenetlen száradáshoz és ezáltal a termény felhasználhatatlanná válásához vezethet. Egy klasszikus mechanikai probléma, a brachisztokron-probléma és a korszerű numerikus módszerek (jelen esetben a diszkrét elemek módszere) segítségével sikerült optimalni a lamellák geometriáját és ezáltal csökkenteni a szemcseáramlás egyenetlenségét.

A szárítóberendezésen belüli szemcsemozgás egyenetlenségére bevezetésre került a ξ egyenetlenségi tényező, amely paraméter segítségével a szemcsehalmaz különböző sávjaiban leírhatók és összehasonlíthatóak a szemcseáramlási folyamatok. Kimutattam, hogy a ξ egyenetlenségi tényező lineárisan függ a szemcse-fal közötti és a szemcsék közötti súrlódási tényező értékektől.

Ipari, illetve modellszárítón elvégzett kísérletek segítségével és numerikus modellek felhasználásával kimutattam, hogy az egyenes lamellák helyett célszerű ciklois alakú terelőelemeket alkalmazni. Figyelembe véve a megvizsgált szemcse-fal és szemcse-szemcse súrlódási tényező értékeket úgy találtam, hogy a ciklois alakú lamella alkalmazása akár 30%-al is csökkentheti a szemcseáramlás egyenetlenségét.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ TARTOZÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

IF-es, Q1, Q2 idegen nyelvű folyóiratcikk

KEPPLER, I., BABLENA, A., DAWOOD SALMAN, N., KISS, P. (2022): Discrete element model calibration based on in situ measurements. *Engineering Computations*, 39 (5), 1947-1961. p. (Q2 in Engineering (miscellaneous), IF: 1,593)

KEPPLER, I., BABLENA, A. (2024): Optimal Lamella Geometry for Mixed Flow Dryers. *Archive of Applied Mechanics*, 94 (4) 961-972. p. – (Q2 in Mechanical Engineering, IF: 2,8)

Lektorált cikk világnyelven

OLDAL, I., KEPPLER, I., BABLENA, A., SAFRANYIK, F., VARGA, A. (2014): On the Discrete Element Modeling of Agricultural Granular Materials. *Mechanical Engineering Letters*, 11, 8-17. p.

KEPPLER, I., OLDAL, I., SAFRANYIK, F., BABLENA, A. (2016): Calibration of discrete element models, *Mechanical Engineering Letters*, 14, 140-151. p.

BABLENA, A., SCHREMPF, N., KEPPLER, I. (2021): The effect of particle shape on the angle of repose test based calibration of discrete element models. *Hungarian Agricultural Engineering*, 40, 39-46. p.

HUANG, J., KEPPLER, I., BABLENA, A. (2024): Breakage and shear testing of corn and wheat particles, *Mechanical Engineering Letters*, 25, 182-195. p.

KEPPLER, I., BABLENA, A. (2024): Optimal material flow channels of cross flow dryers, *Hungarian Agricultural Engineering*, 43, 26-36. p.

BABLENA, A., BEKE, J., KEPPLER, I. (2025): Particle motion in mixed flow dryers: the effect of wall inclination angle, *Research in Agricultural Engineering*, in press.

Lektorált cikk magyar nyelven

BABLENA, A., KEPPLER, I. (2019): Szárítóberendezésben lezajló térbeli anyagáramlási folyamatok modellezése. *Mezőgazdasági Technika*, 60 (5), 2-5. p.

BABLENA A. (2024): Diszkrét elemes modellek kalibrálási lehetőségei, *Mezőgazdasági Technika*, 65 (8), 2-5. p.

Nemzetközi konferenciakiadványok

BABLENA, A. (2009): Discrete element modeling of pressure distribution in silos. ZTS International Technical Conference, 2009. május 10-17., Temesvár, 309-315. p.

SAFRANYIK, F., KEPPLER, I., BABLENA, A. (2017): DEM Calibration – A complex optimization problem. International Conference of Control, Artificial Intelligence, Robotics & Optimization, 2017. május 20-22., Prága, 198-202. p.