



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Szabad keverőcsigák környezetében létrejövő
szemcsemozgások elemzése

Doktori (PhD) értekezés tézisei
Varga Attila

Gödöllő
2018

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudományok

vezetője:

Prof. Dr. Farkas István
egyetemi tanár, DSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar

Témavezető:

Dr. Fenyvesi László
egyetemi tanár, PhD
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Mechanikai és Géptani Intézet

Társ-témavezető:

Dr. habil Keppler István
egyetemi docens, PhD
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Mechanikai és Géptani Intézet

.....
a témavezető jóváhagyása

.....
az iskolavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	5
1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége	5
1.2. Célkitűzések	6
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	7
2.1. Kísérleti berendezés létrehozása	7
2.2. Mérési módszer bemutatása	7
2.3. Kísérleti berendezés módosítása	8
2.4. Szemcsék szilárdságának meghatározása	9
2.5. A keverési folyamat diszkrét elemes modellezése	9
2.5.1. Szemcsehalmoz és kölcsönhatások modellezése	9
2.5.2. A szimulációs folyamat leírása	11
2.6. A keverési hatékonyság számszerűsítése	12
2.6.1. Az effektív sugár definíciója	12
2.6.2. Az átkevert térfogat meghatározása	12
3. EREDMÉNYEK	14
3.1. A diszkrét elemes modell validálása	14
3.2. A keverési hatékonyság meghatározása az effektív sugárral	17
3.3. A keverési hatékonyság meghatározása az átkevert térfogattal ..	19
3.4. Az átkevert térfogat empirikus függvényének meghatározása	20
3.5. A keverést befolyásoló faktorok hatásának meghatározása	20
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	22
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	24
6. ÖSSZEFOGLALÁS	25
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	26

JELÖLÉSJEGYZÉK

d	levélátmérő	[mm]
C_r	ütközési tényező	[–]
G	csúsztató rugalmassági modulus	[Pa]
h	keverőcsiga menetemelkedése	[mm]
R	csigalevél sugara	[mm]
R_{eff}	effektív sugár	[m]
V	átkevert térfogat	[m ³]

Görög betűk:

Δt	szimulációs időlépték	[sec]
μ_0	súrlódási tényező	[–]
μ_r	gördülési ellenállás tényezője	[–]
ν	Poisson tényező	[–]
ρ	sűrűség	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az első fejezetben a téma aktualitását ismertetem és munkám célkitűzéseit fogalmazom meg.

1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége

A mérnöki gyakorlat számos területén találkozhatunk szemcsehalmozok különleges mechanikai viselkedéséből eredő problémákkal. A szemcsés anyaghalmozok ugyanis bizonyos körülmények között hasonlóan viselkednek a szilárd anyagokhoz (teherviselésre képesek, megőrzik alakjukat), azonban más körülmények között ugyanaz a korábban szilárd testként modellezett szemcsehalmoz a folyadékhoz hasonló tulajdonságokat mutat. Ez a kettősség nagyban megnehezítheti a halmoz mechanikai viselkedésének leírását, sőt bizonyos esetekben egyik modell sem alkalmazható (pl. silóból történő kifolyás). Emiatt azoknál a technológiáknál, melyeknél jelentős szerepet játszanak a szemcsehalmozok (pl. építőipar, mezőgazdaság, gyógyszeripar stb.) legtöbbször kísérleti úton történik az adott technológiákhoz tartozó folyamat vagy eszköz meghatározása/kiválasztása. Sok esetben nem megfelelő a kiválasztási vagy meghatározási módszer, ami számos technológiai problémát okozhat. Szemes termények szárításánál különösen fontos a megfelelő technológia használata egyrészt azért, mert az üzemeltetési költség nagyon magas, másrészt a szárítandó anyag mennyisége jelentős, valamint magasak a minőségi követelmények (a takarmány költségében az alapanyag költség a legnagyobb tétel).

Az ipari szárítóberendezések egyik csoportját a vastagrétegű szemestermény-szárítók alkotják. A vastagrétegű szárítóberendezéseknél a legnagyobb problémát az jelenti, hogy a folyamat végén az anyag nedvességtartalmának eloszlása nem lesz homogén. Az inhomogenitás csökkentésére úgynevezett terménykeverő berendezéseket alkalmazhatnak. Ezt a megoldást a legtöbb silószárítónál még nem alkalmazzák, pedig bizonyítottan javítja a száradó anyaghalmoz nedvességeloszlásának homogenitását.

A keverőrendszerek tervezésének a legfontosabb kérdései, hogy a keverési folyamat során a keverőcsigák az adott idő alatt mekkora utat járnak be és mennyi anyagot mozgassanak meg. A tervezés során úgy kell kialakítani a konstrukciót, hogy optimálisan végezze a keverést, azaz minél egyenletesebben, minél több anyagrészt keverjen át. Az ipar és a mezőgazdaság területén használt keverő- és szállítócsigák esetében nagyon fontos a geometriai jellemzők és az üzemeltetési beállítások pontos megadása. Ha ezeket a paramétereket rosszul választják meg, akkor a

teljesítmény sem lesz megfelelő. Maga a szállítási folyamat egyszerűnek tűnik, azonban a folyamat modellezése nehéz és összetett feladat. Az ezen a területen dolgozó kutatók és mérnökök a tervezésnél és a fejlesztéseknél javarészt empirikus adatokra támaszkodnak, mert nem áll rendelkezésükre megfelelő pontosságú információ a keverőcsigák környezetében lezajló anyagáramlási folyamatokról.

1.2. Célkitűzések

Kutatómunkám témája a keverőcsigák körül kialakult szemcseáramlási folyamatok vizsgálata. Dolgozatomban bemutatom az általam létrehozott, kísérleti vizsgálatokkal validált diszkrét elemes modellt, mellyel megbízható eredményeket kaphatnak a gyakorló mérnökök.

A diszkrét elemes modellezéssel kapcsolatos céljaim:

- Olyan modell létrehozása, mely a műszaki gyakorlat számára elfogadható pontossággal írja le a valóságos keverési folyamatot és az idő- és energiaigénye mérsékelt marad.
- A diszkrét elemes szimulációk során kapott áramlási kép alapján az átkevert tartomány határait leíró függvények meghatározása.

Mivel nem létezik olyan mérőszám, amellyel a különböző geometriával és szögsebességgel rendelkező keverőcsigák hatékonyságát jellemezni lehet, ezért a kutatási céljaim a nyitott keverő csigák területén:

- Nyitott keverőcsigák keverési hatékonyságának definiálása, számszerűsítése, mellyel összehasonlíthatóvá válnak a különböző fordulatszám mellett futtatott szimulációk
- A keverési hatékonyság meghatározása keverést befolyásoló paraméterek függvényében paraméterérzékenységi vizsgálattal.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben a kutatási céljaim elérése érdekében alkalmazott modellezési eljárásokat és kísérleti módszereket mutatom be.

2.1. Kísérleti berendezés létrehozása

A keverőcsigák által létrehozott szemcsemozgás-viszonyok meghatározására első lépésben egy olyan kísérleti berendezést kellett létrehozni, mely képes reprezentálni az ipari szárítóokban létrejövő anyagáramlási folyamatokat, valamint amiben jól megfigyelhető a szemcsék mozgása.

A kísérleti vizsgálatokat a Mechanika és Műszaki Ábrázolás Tanszék laboratóriumában végeztem. A megfigyelhetőség érdekében a berendezés tároló része egy 450 mm átmérőjű és 3 mm falvastagságú átlátszó plexi henger volt. A keverőcsigát egy frekvenciaváltóval felszerelt hajtómotor forgatta ékszíjhajtás segítségével (1. ábra).



1. ábra A kísérleti berendezés 3D-s modellje

2.2. Mérési módszer bemutatása

A szemcsék mozgásának meghatározásához egy színezett búza réteget helyeztem el adott magasságban, a hengerben. Négy mintavevő pontot helyeztem el a csiga tengelyétől különböző távolságban: egyet közvetlenül a csiga mellett, a többit 100, 200 és 300 mm-es távolságban. A motor fordulatszáma 15 rad/sec volt. A mérést 10 fordulat megtétele után állítottam le. A mérési eredmények azt mutatták, hogy közvetlenül a csiga mellett a

függőleges elmozdulás 90 mm volt. Sugárirányban 10 cm-re már nem volt elmozdulás, azaz a halmaz többi része nyugalomban maradt.

Az így kapott mérési eredményeket felhasználtam a diszkrét elemes szimulációk validálására. Ezek után megalkottam a mérőberendezés diszkrét elemes modelljét és ugyanazon fordulat megtétele után vizsgáltam az elmozdulás mezőt.

2.3. Kísérleti berendezés módosítása

Az előző alfejezetben bemutatott mérési eljáráson kívül egy másik módszert is alkalmaztam a diszkrét elemes modellem validálására. A hengeres tartály hátránya, hogy nem lehet látni, hogy mi történik a csiga közvetlen környezetében. Ezen probléma megoldására a plexihenger helyére egy olyan plexidobozt helyeztem, melynek a szélessége megegyezett a csigalevél átmérőjével (2. ábra). A doboz méretinek megválasztásánál ügyelni kellett arra, hogy a keverési folyamat során a halmazban a nyugvó és mozgó részek jól elkülönüljenek egymástól. Az előzetes számítások alapján a doboz hosszát 570 mm-re választottam. A módosított berendezéssel kapcsolatban a legfontosabb kérdés az volt, hogy az anyaghalmaz mennyire fog hasonlóan viselkedni az hengeres tartályban végzett mérésekhez képest.



2. ábra A módosított kísérleti berendezés

A vizsgálatok azt mutatták, hogy a dobozban lejátszódó keverési folyamat nagyon hasonló a hengeres tartályban történő keveréshez (3. ábra).



3. ábra Az álló és nyugvó zónák elkülönülése

A keverés során jól látszott, hogy nyugvó és a mozgó részek jól láthatóan elkülönülnek egymástól.

2.4. Szemcsék szilárdságának meghatározása

A keverőcsigák optimális fordulatszámának meghatározásánál az átkevert anyag mennyisége mellett a szemcsék között fellépő erők is jelentős szerepet kapnak. Ha egy adott fordulatszám felett a szemcsék között ható erők meghaladják a szemcsék töréséhez szükséges határértéket, akkor az anyaghalmoz minősége jelentősen csökkenhet. Ahhoz, hogy a későbbiekben vizsgálni tudjam azt, hogy adott az sebesség mellett károsodnak-e a szemcsék először meg kellett határoznom egy szemcse töréséhez szükséges erőt. A szilárdsági vizsgálatokat egy INSTRON 5581-es univerzális anyagvizsgáló berendezés segítségével végeztem.

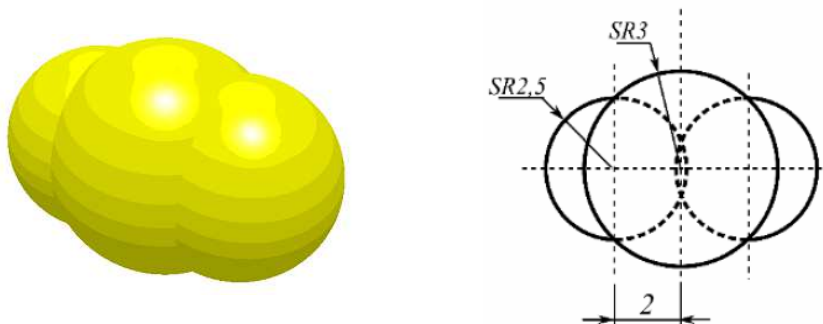
2.5. A keverési folyamat diszkrét elemes modellezése

A modellezéshez a mérnöki gyakorlatban egyre nagyobb teret hódító diszkrét elemes módszert alkalmaztam. A szimulációkat az EDEM diszkrét elemes programrendszerrel végeztem.

2.5.1. Szemcsehalmoz és kölcsönhatások modellezése

A keverőcsiga körül kialakult áramlási viszonyok modellezéséhez a Hertz-Mindlin csúszásmentes kapcsolati modellt alkalmaztam. A búzaszemeket három egymásba metsző gömb segítségével modelleztem. A búzaszem

méretei és diszkrét elemes modellje a 4. ábrán látható. Egy búzaszem tömege 0,238 g, főtehetetlenségi nyomatékai $1,434 \cdot 10^{-9} \text{ kgm}^2$ és $8,015 \cdot 10^{-10} \text{ kgm}^2$. A diszkrét elemes szimulációknál a 1. táblázatban feltüntetett mikromechanikai paramétereket használtam.



4. ábra Egy búzaszem diszkrét elemes modellje

1. táblázat A búza és az acél mikromechanikai paraméterei

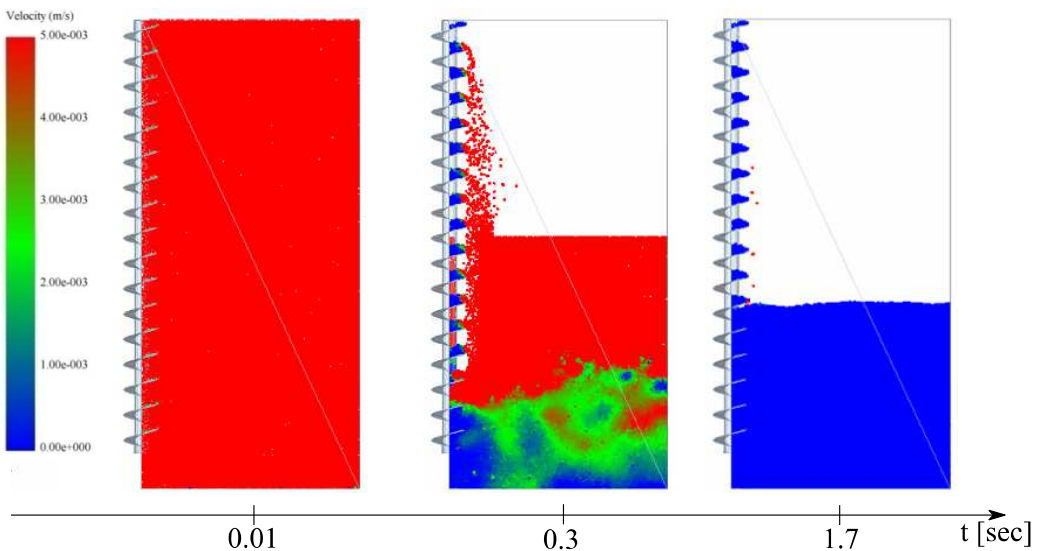
Mikromechanikai jellemző	Búza	Acél
Poisson tényező, ν	0,4	0,3
Csúsztató rugalmassági modulus, G , Pa	$3,58 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^8$
Sűrűség, ρ , kg/m^3	1460	7500
Ütközési tényező, C_r	Búzára v.: 0,5	-
	Acélra v.: 0,6	Búzára v.: 0,5
Súrlódási tényező, μ_0	Búzára v.: 0,3	-
	Acélra v.: 0,25	Búzára v.: 0,25
Gördülési ellenállás tényezője, μ_r , m	Búzára v.: 0,01	-
	Acélra v.: 0,01	Búzára v.: 0,01

2.5.2. A szimulációs folyamat leírása

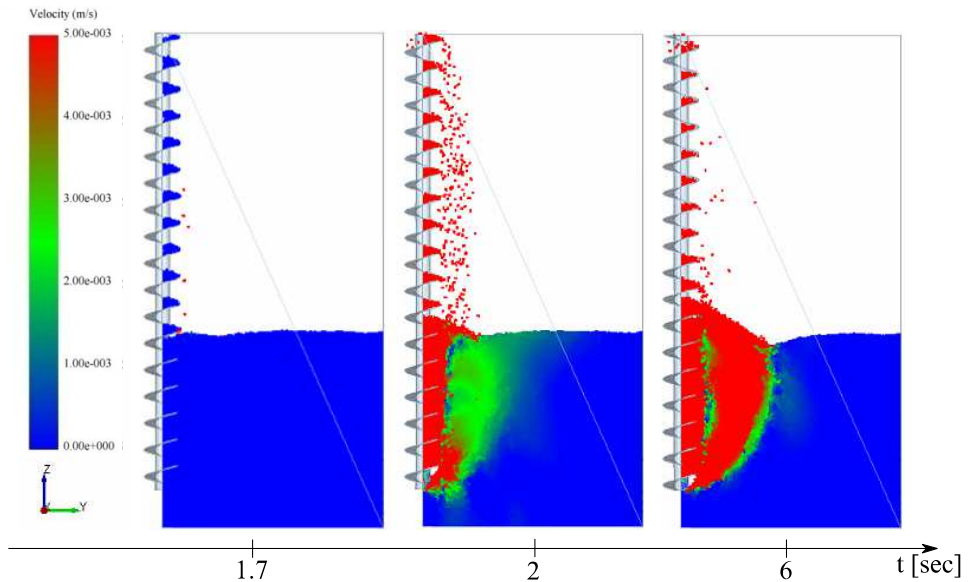
A szimulációk során a keverőcsigák geometriáját és fordulatszámát változtattam. Kezdetben a modell méretei megegyeztek a kísérleti berendezés méreteivel. A plexihenger térfogata és a benne lévő szemcsék nagy száma miatt egy futás ideje több mint 2 hét volt. Több futtatás esetén, a számítás során kinyert adatokat – nagyságuk miatt – szinte lehetetlen tárolni. Ezért szükséges volt a modell egyszerűsítése.

A kiinduló feltevésem az volt, hogy a szemcsék függőleges irányú mozgása van a legnagyobb hatással a szárítás hatékonyságára, ezért a szimulációknál a plexihengernek csak egy „szeletét” vizsgáltam

A szimuláció első lépésében véletlenszerűen generált szemcséket helyeztem el a modelltérben, amik a gravitáció hatására lehullnak a modelltér aljára. A keverési folyamatot akkor indítottam el, amikor a rendszer elérte az egyensúlyi állapotot. A keverést az egyensúlyi állapot elérése után tudtam indítani. A „kezdési” időpillanat minden esetben 1,7 s volt, geometriától függetlenül. A méréseknél és a szimulációknál is megfigyelhető volt, hogy az alulról felhordott szemcsék egy kúpos felületet képeznek a halmaz tetején, mely egy idő után már nem nő tovább, eléri a maximális magasságát és egy dinamikus egyensúly alakul ki. A szimulációs folyamatot a szemcsegenerálástól a dinamikus állapot eléréséig az 5. és 6. ábra mutatja. A színek a szemcsék sebességét jelölik. A szimulációk során alkalmazott időlépték $\Delta t = 4,21 \cdot 10^{-5} sec$ volt.



5. ábra A keverési folyamat szimulációja az egyensúlyi állapot eléréséig



6. ábra A keverési folyamat szimulációja a dinamikus egyensúlyi állapot eléréséig

A dinamikus egyensúlyi állapot eléréséig szükséges időt tapasztalati úton lehetett meghatározni. Különböző geometriák, fordulatszámok esetében ez az idő változott. A keverőrendszer kalibrált diszkrét elemes modelljének megalkotása után a következő lépésben meg kellett oldani a különböző geometriákkal és fordulatszámokkal futtatott szimulációk összehasonlítását.

2.6. A keverési hatékonyság számszerűsítése

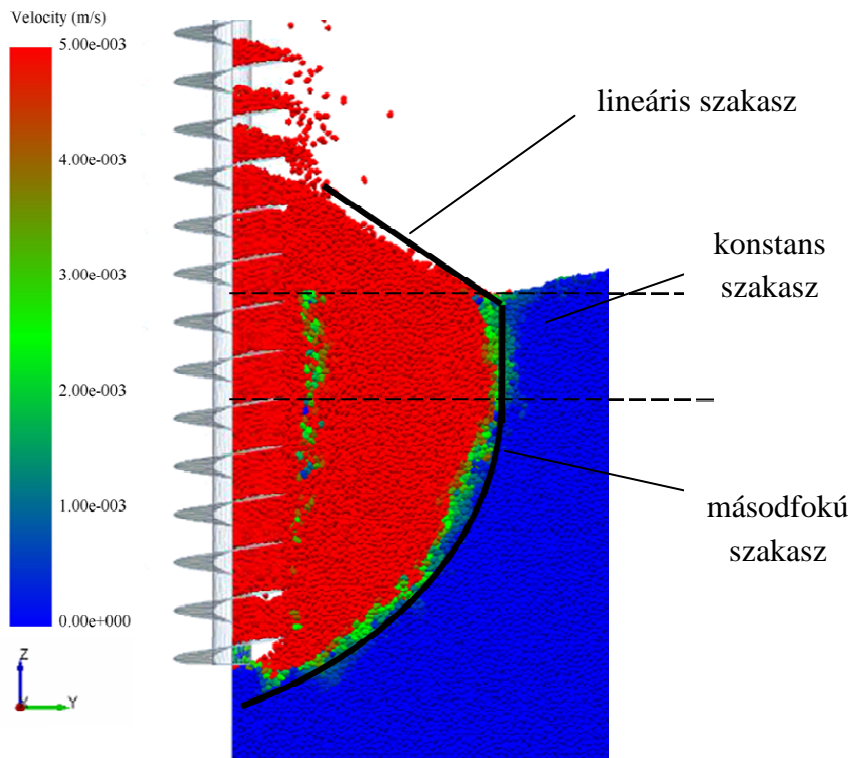
2.6.1. Az effektív sugár definíciója

A fellelhető szakirodalmak egyike sem tér ki a nyitott függőlegesen elhelyezett keverőcsigák szállítási vagy keverési teljesítményének meghatározására. A keverés hatékonyságának meghatározásához bevezettük az effektív sugár fogalmát. Ez az a csiga hossz tengelyétől mért távolság, amelynél a szemcsék csigatengely irányú sebessége a sugár mentén fellépő maximális csigatengely irányú sebesség értékének 20%-ával egyenlő. A 20% egy önkényes felvett érték, mellyel jól szemléltethetők az effektív sugarak alakulása.

2.6.2. Az átkevert térfogat meghatározása

A keverőcsigák teljesítményét először az effektív sugárral határoztam meg. Azonban, ha a fordulatszám túl kicsi, a visszaáramlás még nem alakul ki és ez befolyásolhatja az eredményeket. Előnyösebbnek ígérkezik, ha a

dinamikus egyensúlyi állapot elérése után az átmozgatott térfogatot vizsgáljuk. A szemcséket sebesség szerint megszínezve jól elkülönül az átmozgatott és a nyugalomban lévő réteg. Az átmozgatott réteg határaitra három függvényt lehet illeszteni, melyekkel a tartomány jól körbehatárolható (7. ábra).



7. ábra Az átkevert réteg határaitra illesztett függvények

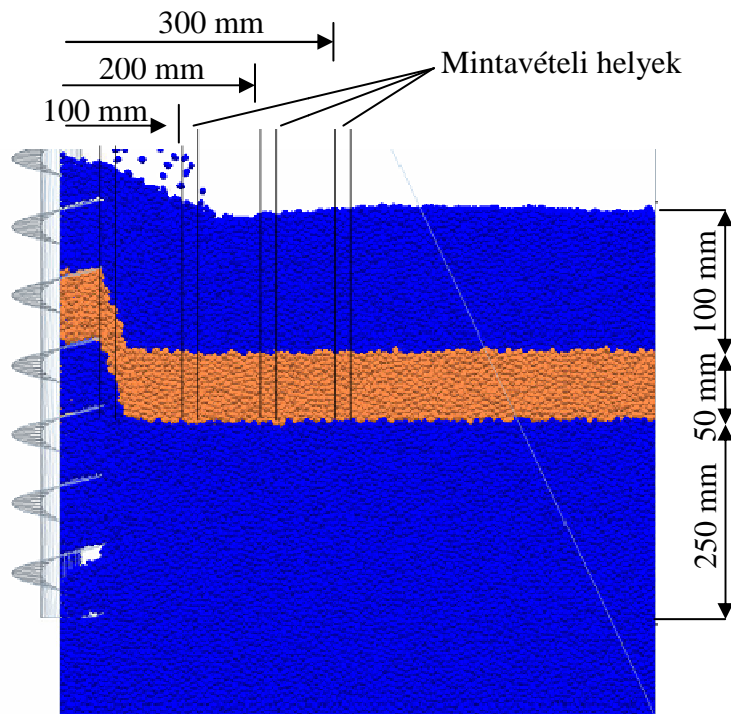
A függvényeket a függőleges tengely körül megforgatva forgástestet kapunk, melynek a térfogata lesz az átkevert térfogat. A szimulációs időt minden esetben minimum 6 sec – ra állítottam. Ennyi idő alatt kis sebességek esetén is ($20 \text{ rad/s} > \omega > 0$) kialakul a halmaz végleges alakja. A továbbiakban ezen térfogatok nagyságát befolyásoló paraméterek hatását vizsgáltam, valamint különböző szemcségeometriák esetén is megvizsgáltam az átkevert tartomány jellegét. A vizsgálatokhoz faktoriális kísérletet alkalmaztam. Az eljárás lényege, hogy a jelenséget meghatározó vizsgálati paramétert (mely jelen esetben az átkevert térfogat) a kiválasztott faktorok (levélátmérő, menetemelkedés, szögsebesség) függvényében kívánjuk leírni.

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom során elért új tudományos eredményeket, melyek segítséget nyújtanak a silószárítóban lévő nyitott keverőcsigák optimális üzemeltetéséhez.

3.1. A diszkrét elemes modell validálása

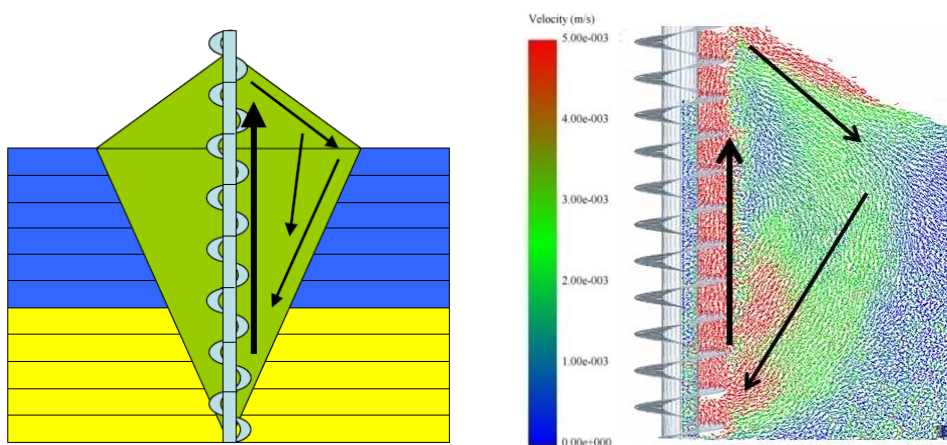
A 2.2. fejezetben bemutatott mérési eredményeket használtam fel a 2.5. fejezetben bemutatott egyszerűsített modellem validálására. Az EDEM diszkrét elemes szoftverben lehetőség van arra, hogy a szemcséket megszínezzük és nyomkövessük a mozgásukat. A szemcséket az egyensúlyi állapot elérése után színeztem meg. A következő ábrán látható a színezett szemcsék helyzete 10 fordulat után (8. ábra).



8. ábra A szemcsék elhelyezkedése 10 fordulat után

A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy a csiga mellett a szemcsék elmozdulása (95mm) közel azonos a kísérleti vizsgálatoknál mért értékekkel (90-100mm). A halmaz többi részén nem történt elmozdulás.

Ezek után a csigát tovább forgatva összehasonlítottam a DEM szimulációval kapott áramlási képeket a Home-Grown Cereals Authority (HGCA) egyik tanulmányában található áramlási képpel (9. ábra).

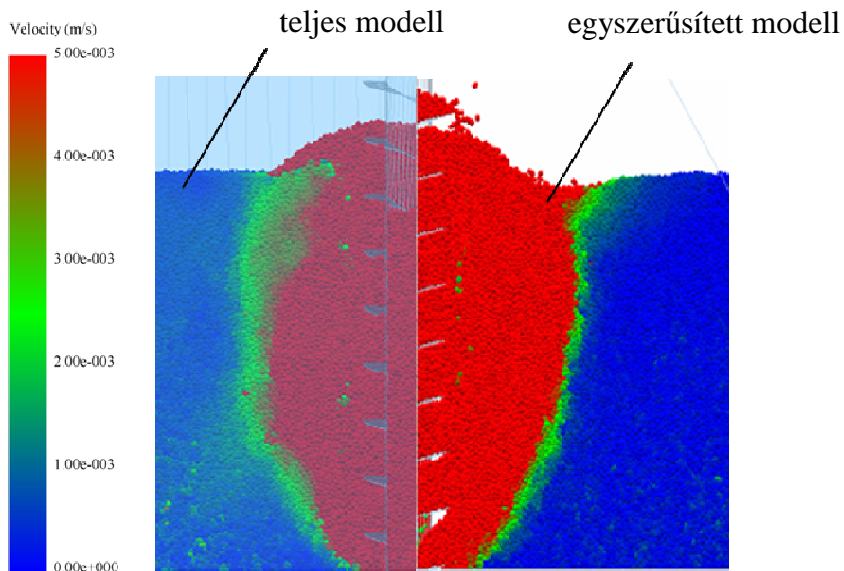


9. ábra A szakirodalomban található (HGCA) és a szimulációkban kialakult áramlási kép

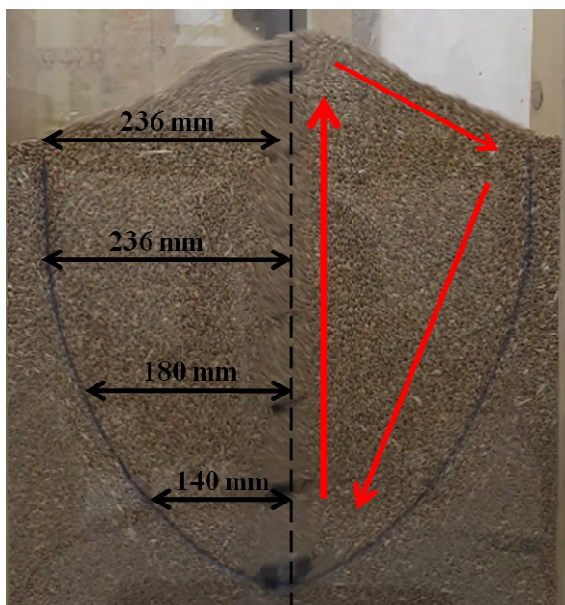
A szimulációban (jobb oldali kép) a szemcsék sebességvektorai láthatóak. Mindkét ábrán a nyilak mutatják az áramlási irányt és a vastagságuk pedig a sebesség nagyságát reprezentálja. (A baloldali ábrán a sárga tartomány jelöli a szárító levegővel melegített halmazt, a kék a hidegebb, nedvesebb tartományt. Dolgozatomban a hőtani hatásoktól eltekintettem, csak a szemcsemozgások leírása volt célom). Mindkét ábrán a nyilak mutatják az áramlási irányt és a vastagságuk pedig a sebesség nagyságát reprezentálja. Mindkét esetben egy visszaáramlási folyamat figyelhető meg.

A modell helyességének igazolása érdekében szükséges volt további vizsgálatokat végezni. A következő lépésben összehasonlítottam a teljes modellel, az egyszerűsített modellel és a módosított kísérleti berendezéssel kapott elmozdulásmezőket. Ha az így kapott áramlási képet összehasonlítjuk az egyszerűsített modellben létrejött szemcseáramlási viszonyokkal, akkor azt tapasztalható, hogy a mozgó zóna mérete és jellege közel azonos mindkét esetben (10. ábra).

A módosított kísérleti berendezéssel történő keverés során létrejövő anyagáramlási folyamatok igen jól láthatóak a tároló doboz méretei és az átlátszó plexi henger miatt. A 11. ábrán látható a valóságos folyamatban a mozgó zóna határainak helyzete. A jobb láthatóság miatt a mozgó zóna határait kék vonallal jelöltem meg a plexi lemezen.

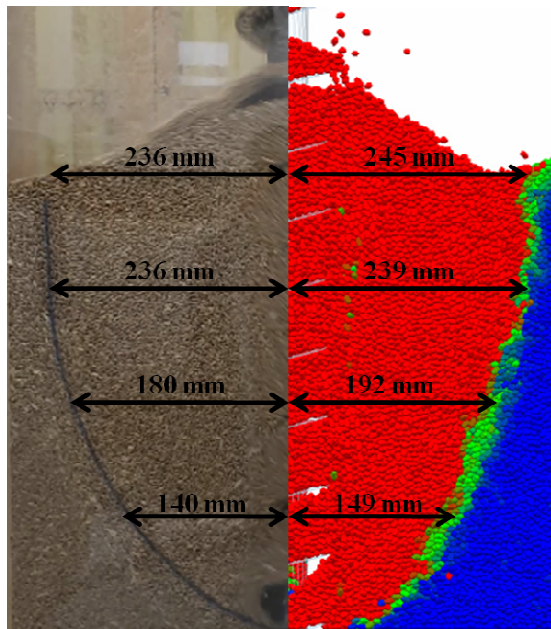


10. ábra A szimulációk összehasonlítása



11. ábra A kísérleti vizsgálat során kialakult mozgó zóna helyzete

A szimulációk és a kísérleti vizsgálatok összehasonlításánál azt tapasztaltam, hogy a diszkrét elemes modellben kialakult szemcsék mozgása a valósághoz hasonló, valamint az eredmények jó egyezést mutatnak (12. ábra).

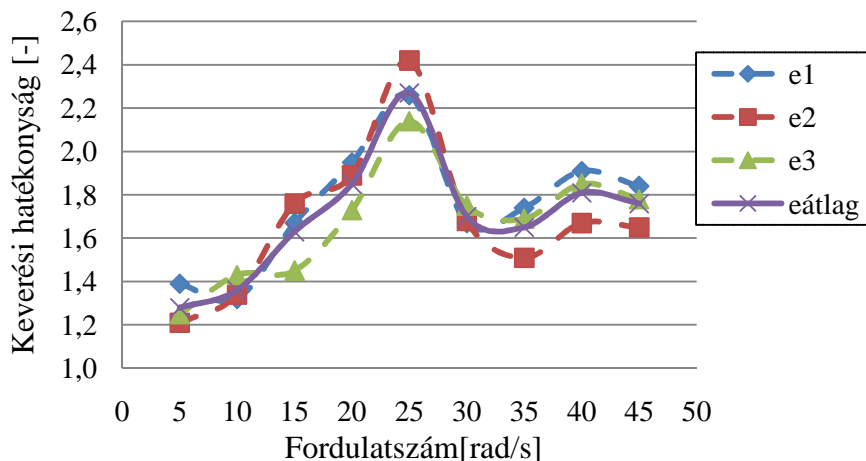


12. ábra A kísérleti vizsgálat és a szimulációk összehasonlítása

Az általam felépített diszkrét elemes modell lehetővé teszi a keverőcsigák körül kialakult szemcsemozgások rövid időn belüli (1-1,5 nap) meghatározását.

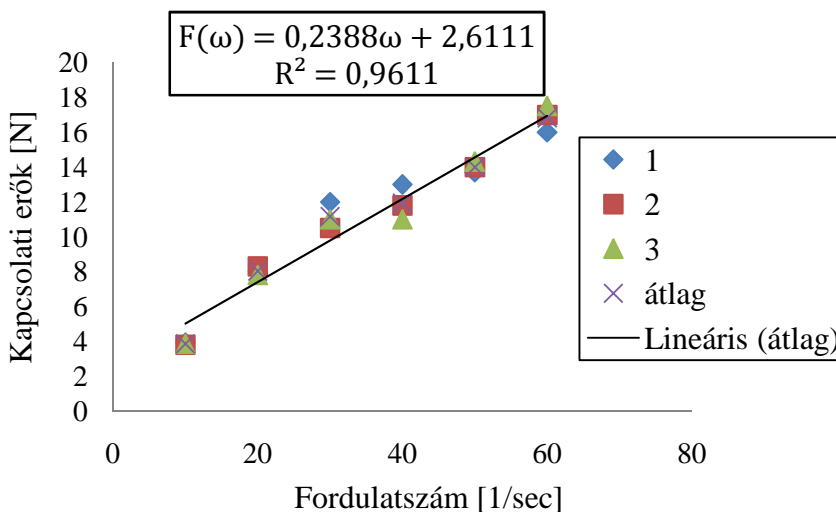
3.2. A keverési hatékonyság meghatározása az effektív sugárral

A következő lépésben a sebességeloszlást vizsgáltam a diszkrét elemes modellben különböző szögsebesség-értékek mellett. A vizsgálati tartomány szélső értékei 5 rad/s és 45 rad/s volt. A szimulációkat háromszoros ismétléssel végeztem mindegyik szögsebesség esetében. A keverési hatékonyságot az effektív sugár és a csigalevél sugarának hányadosaként definiáltam. A kiértékelésnél azt tapasztaltam, hogy az adott ismétlésekhez tartozó eredmények kis szórást mutatnak. A 13. ábráról leolvasható, hogy a fordulatszám növekedésével a keverési hatékonyság is nő, azonban egy adott érték elérése után visszaesik. A piros vonallal jelölt határtól balra eső sebességértékeknél a dinamikus egyensúlyi állapot nem alakul ki. Ezt azt jelenti, hogy létezik egy optimum érték, amely felett már nem indokolt a fordulatszám növelése. A mérnöki gyakorlatban az optimális fordulatszám meghatározásával energiát tudunk megtakarítani.



13. ábra A keverési hatékonyság adott szögsebesség mellett lesz maximális

A szemcsék között fellépő kapcsolati erő alakulását is megvizsgáltam a fordulatszámok függvényében. A fordulatszám növelésével a szemcsék között fellépő maximális kapcsolati erők is nőnek (14. ábra). Azt tapasztaltam, hogy az általam vizsgált sebességtartományban a szemcse-szemcse és szemcse-csiga kölcsönhatásokból (ütközésből) származó erők értéke nem éri a szemcsék töréséhez szükséges határértéket (110-130 kN), azonban a kapcsolati erők növekedése és a szemcsék ütközéseinek száma kedvezőtlen hatással lehet az átkevert termék minőségére.



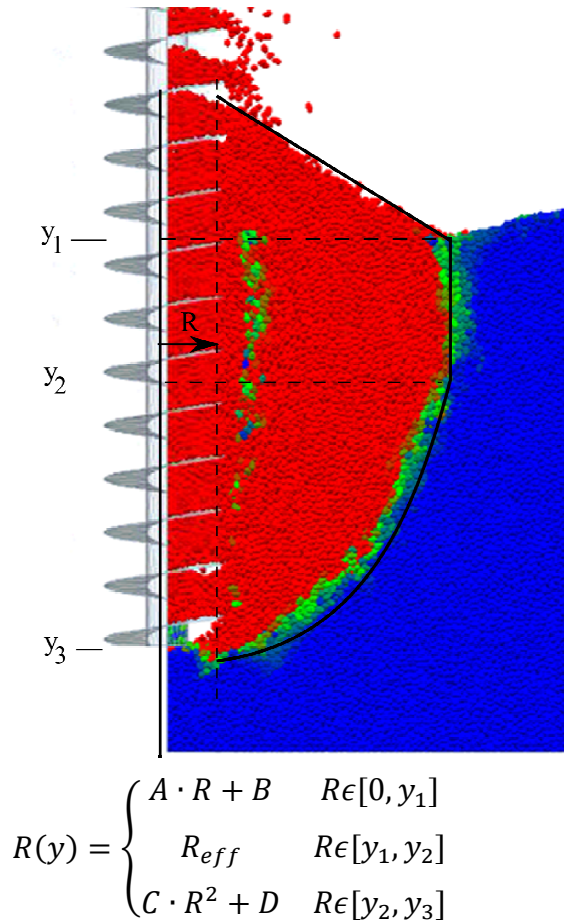
14. ábra A kapcsolati erők változása az adott tartományban

3.3. A keverési hatékonyság meghatározása az átkevert térfogattal

A diszkrét elemes szimulációk során kapott áramlási kép vizsgálatánál azt tapasztaltam, hogy az átkevert tartomány peremének alakját 3 függvénnyel lehet közelíteni. Ha ismertek ezek a függvények, akkor a következő matematikai művelettel meg lehet határozni az átkevert térfogatot:

$$V = \int_a^b 2\pi z(f(z) - g(z))dz . \quad (1)$$

Elegendő, ha a lineáris és a másodfokú függvények ismertek. Az integrálási határok a csigalevél széle és az átkevert térfogat határa voltak. A 15. ábra mutatja a három függvény jellegét.



15. ábra Az átkevert zónát leíró függvények

A 3 gömbből álló elemen kívül egy sima gömb elemmel és két gömbből álló elemmel is elvégeztem a számításokat. A sima gömb átmérője 3mm volt.

Két gömbből álló elem esetén a szemcsét alkotó gömbök átmérője 2 mm, míg a távolság a két gömb középpontja között 1 mm volt. Azt tapasztaltam, hogy az átkevert tartomány jellege nem változik, azaz a szemcsegeometriától független, ezáltal az átkevert térfogattal minden esetben jellemezhető az állótengelyű csiga keverési hatékonysága.

3.4. Az átkevert térfogat empirikus függvényének meghatározása

A szimulációs eredmények alapján kellett meghatároznom a $V = V(d, h, \omega)$ függvény kapcsolatát, ahol:

- d – levélátmérő,
- h – menetemelkedés,
- ω - szögsebesség.

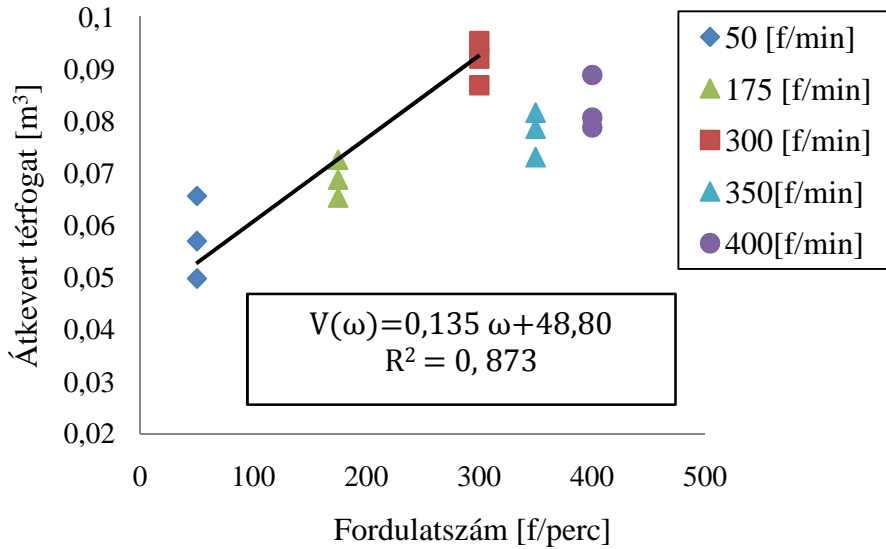
A függvényt a $d = 60\sim 120$ mm; $h = 50\sim 80$ mm; $\omega = 50\sim 300$ fordulat/perc tartományban kerestem.

Az egész függvényt a teljes vizsgálati tartományban jellemző hibahatár számításához először az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzeteket határoztam meg. Ezután ellenőriztem, hogy az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak-e. A Fisher és a Bartlett próba elvégzése után azt tapasztaltam megvizsgált nyolc tapasztalati szórásnégyzet nem tartozik azonos elméleti szórásnégyzethez, tehát a jelenség az adott vizsgálati tartományban nem írható le faktorokban lineáris függvényvel.

3.5. A keverést befolyásoló faktorok hatásának meghatározása

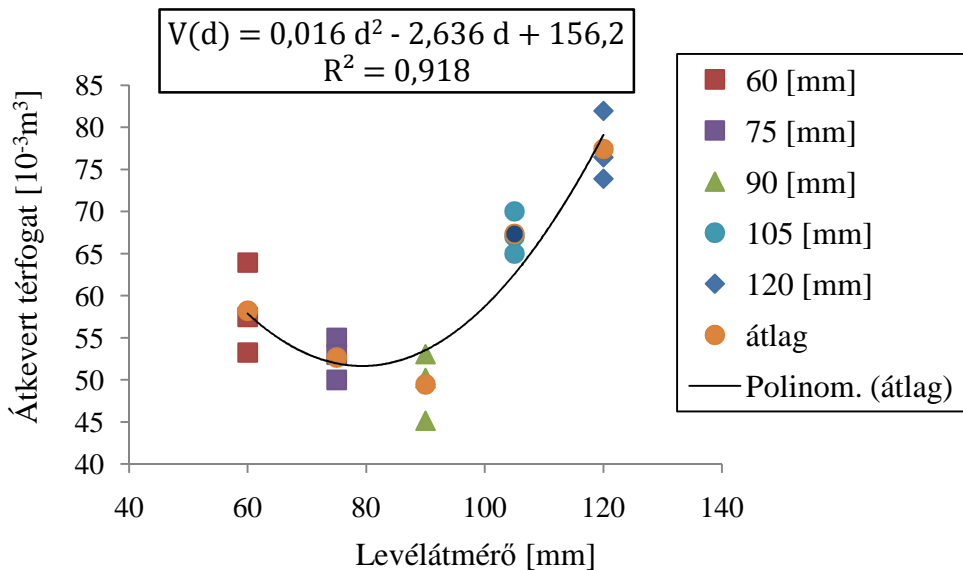
Az előző fejezetben kiderült, hogy az átkevert térfogat nem írható le faktorokban lineáris függvényvel. A vizsgálatok tovább folytatásának három lehetséges módja van. A faktortér csökkentése, magasabb fokú (lineáris helyett pl. másodfokú) közelítés, valamint az átkevert térfogat vizsgálata paraméterérzékenységi vizsgálattal. A felsorolt lehetőségek közül az utóbbit választottam, azaz az átkevert térfogat változását vizsgáltam, úgy hogy a három faktor közül kettőt változatlanul hagytam, a harmadikat változtattam. A 16. ábrán láthatóak az eredmények különböző fordulatszámok esetén. A levélátmérő 120 mm, a menetemelkedés 85 mm volt. Az ábráról leolvasható, hogy (csak úgy, mint az effektív sugár esetében) van egy optimális fordulatszám, melynél a csiga a legtöbb anyagot keveri át. Az optimális fordulatszám jelen esetben $300 \text{ f/min} = 31,42 \text{ rad/s}$. Ezen érték felett a csiga már nem kever át több anyagot.

Eredmények



16. ábra A keverési hatékonyság (átkevert térfogat) változása az időfüggvényében

Következő lépésben a csigalevél átmérőjének hatását vizsgáltam. A fordulatszám 300 f/min, a menetemelkedés 50 mm volt. Az eredményeket a 17. ábra mutatja.



17. ábra A keverési hatékonyság (átkevert térfogat) változása a levélátmérő függvényében

4.ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A diszkrét elemes modell validálása

Kísérleti vizsgálatok és a szimulációk segítségével igazoltam, hogy az általam definiált diszkrét elemes modell a gyakorlatban alkalmazott keverőcsigák esetében kellő pontossággal írja le a keverőcsigák körül kialakult szemcse mozgásviszonyokat. Ezzel az új diszkrét elemes modellel sokkal gyorsabban (1-1,5 nap) és hatékonyabban lehet eredményre jutni, mint ha az egész tartályt vizsgálnánk (utóbbi esetben a számítási idő közel 3 hét).

2. A keverési hatékonyság meghatározása az effektív sugárral

Az effektív sugár bevezetésével összehasonlíthatóvá válnak a különböző fordulatszám mellett futtatott szimulációk. Ez az a csiga hossz tengelyétől mért távolság, amelynél a szemcsék csiga-tengely irányú sebessége a sugár mentén fellépő maximális csiga-tengely irányú sebesség értékének 20%-ával egyenlő:

$$v(x = R_{eff}) = 0,2 \cdot v_{max} .$$

A keverési hatékonyság az effektív sugárral kifejezve:

$$e = \frac{R_{eff}}{R} .$$

Az eredmények azt igazolják, az általam vizsgált sebességtartományban – a műszaki gyakorlat számára alkalmas fordulatszám határok között - a keverési hatékonyság egy adott fordulatszám mellett lesz maximális. A fordulatszám további növelése nem javítja a keverési hatékonyságot.

3. A fordulatszám növelésével a szemcsék között fellépő kapcsolati erők is nőnek

Számításokkal igazoltam, hogy a szemcsék között fellépő kapcsolati erők változása az általam vizsgált tartományban az

$$F(\omega) = 0,2388 \omega + 2,611 \quad \omega \in [10,60] ,$$

függvénnyel leírható a 1. táblázatban szereplő mikromechanikai jellemzők mellett.

4. A keverési hatékonyság meghatározása az átkevert térfogattal

Munkám során különböző szemcsegeometriákkal és sebességekkel meghatároztam a keverőcsigák körül kialakult szemcsemozgási viszonyokat. A diszkrét elemes szimulációk során kapott áramlási kép vizsgálatánál azt

tapasztaltam, hogy az átkevert tartomány három résztartományból áll, amelynek a peremét a következő 3 függvénnyel lehet közelíteni:

$$R(y) = \begin{cases} A \cdot R + B & R \in [0, y_1] \\ R_{eff} & R \in [y_1, y_2] \\ C \cdot R^2 + D & R \in [y_2, y_3]. \end{cases}$$

Az eredmények azt igazolják, hogy az átkevert tartomány alakja nem függ a sebességtől illetve a szemcsegeometriától. Az átkevert tartomány függőleges tengely körüli forgatásával kapjuk az átkevert térfogatot. Az átkevert térfogattal is jellemezhető a keverési hatékonyság.

5. Az keverést befolyásoló faktorok hatásának meghatározása

Paraméterérzékenységi vizsgálattal megállapítottam, hogy az átkevert térfogatot jelentősen befolyásoló faktorok a szögsebesség és a csiga levélátmérője. A szögsebesség növelése kezdetben javítja a keverési hatékonyságot, azonban egy adott érték után a csiga már nem képes több anyagot átkeverni.

A keverési hatékonyság változását az adott sebességtartományban a következő függvény írja le 120 mm-es levélátmérő és menetemelkedés 85 mm-es mellett:

$$V(\omega) = 0,135 \omega + 48,8 \quad \omega \in [50,300].$$

A keverési hatékonyságot az átmérő függvényében az

$$V(d) = 0,016 d^2 - 2,636 d + 156,2 \quad d \in [60,120],$$

függvény írja le. A levélátmérő növelésével a keverési hatékonyság 90 mm – ig csökken, majd 90-120 mm-ig növekszik.

A menetemelkedés a dinamikus egyensúlyi állapot kialakulásáig eltelt időt befolyásolja. A levélátmérő növelése növeli az átkevert térfogat nagyságát, ezért nő a keverési hatékonyság. Adott fordulatszám esetén létezik „legrosszabb” csigalevél átmérőválasztás, hiszen itt a hatékonyságnak minimuma van.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Az ipar és a mezőgazdaság területén használt keverő- és szállítócsigák esetében nagyon fontos a geometriai jellemzők és az üzemeltetési beállítások pontos megadása. Ha ezeket a paramétereket rosszul választják meg, akkor a teljesítmény sem lesz megfelelő. Az ezen a területen dolgozó kutatók és mérnökök a tervezésnél és a fejlesztéseknél javarészt empirikus adatokra támaszkodnak, mert nem áll rendelkezésükre megfelelő pontosságú információ a keverőcsigák környezetében lezajló anyagáramlási folyamatokról.

Kutatásom egyik főterülete a szabad keverőcsigák körül kialakult áramlási viszonyok leírása volt. Szimulációk és a kísérleti vizsgálatok segítségével igazoltam, hogy a szemcsék függőleges áramlási sebessége nagyságrenddel nagyobb a sugárirányú sebességnél. Emiatt nem szükséges az egész tartályt vizsgálni, elegendő a tartálynak csupán egy szeletét beépíteni a modellezés során. Kutatásom során megállapítottam, hogy a keverési folyamat során kialakul egy mozgó és egy nyugvó zóna, melyek jól elkülönülnek egymástól. A mozgó zónán belül egy visszaáramlási folyamat alakul ki, melynek az intenzitása egy adott idő után már nem változik és egy úgynevezett dinamikus egyensúlyi állapot alakul ki.

A kutatás második főterülete a keverési hatékonyság számszerűsítése volt. Az effektív sugár segítségével megállapítottam, hogy a rögzített tengelyű, szabad keverőcsigák esetében létezik egy optimális fordulatszám, hogy létezik egy optimum érték, amely felett már nem indokolt a fordulatszám növelése. A keverési hatékonyság számszerűsítésére egy másik módszert is kidolgoztam. Megállapítottam, hogy az átkevert tartományt három függvénnyel lehet határolni szemcsegeometriától függetlenül. A három határoló függvény segítségével kiszámítható az átkevert térfogat, mellyel egyben jellemezhető a keverőcsigák hatékonysága. Elvégeztem a teljes faktoriális kísérletet, melyben a vizsgálati paraméter az átkevert térfogat volt. Azt tapasztaltam, hogy az átkevert térfogat nem írható le faktorokban lineáris függvénnyel. Ezt követően paraméterérzékenység vizsgálattal megállapítottam, hogy az átkevert térfogatot befolyásoló faktorok a csiga levélátmérője és fordulatszáma. Igazoltam, hogy adott fordulatszám esetén létezik egy „legrosszabb” csigalevél átmérőválasztás, valamint a szögsebesség növelése kezdetben javítja a keverési hatékonyságot, azonban egy adott érték után a csiga már nem képes több anyagot átkeverni. A menetemelkedés csak a dinamikus egyensúlyi állapotig eltelt időt befolyásolja.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A mezőgazdasági termények vastagrétegű szárításánál a legfőbb problémát az jelenti, hogy a szárítás folyamat végén az anyagalmaz nedvességtartalmának eloszlása nem lesz homogén. Az inhomogenitás csökkentésére napjainkban egyre jobban elterjedő terménykeverő berendezéseket alkalmaznak. Ha az üzemeltetési paramétereket rosszul választják meg egy adott szárító vagy szárítandó anyag esetében, akkor az jelentős többletköltségekhez vezethet.

A fentiek miatt a kutatási feladatom célja a vastagrétegű szárítóban alkalmazott (rögzített tengelyű) keverőcsigák körül kialakult szemcseáramlási viszonyok modellezése volt. A kitűzött célok megvalósítása érdekében áttekintettem a témához szorosan kapcsolódó szakirodalmakat. A szakirodalomban lévő hiányosságok feltérképezése és a megfelelő modellezési eljárások kiválasztása után kísérleti berendezést hoztam létre a jelenség vizsgálatára. A jelenség leírására egy új numerikus eljárást, a diszkrét elemes módszert alkalmaztam. A számítás igény csökkentése érdekében csökkentenem kellett a tároló méretén, oly módon, hogy a halmaz viselkedése ne változzon meg a valósághoz képest.

A különböző paraméterekkel futtatott szimulációk összehasonlítására bevezettem az effektív sugár fogalmát. Az effektív sugár segítségével megállapítottam, hogy adott geometriával rendelkező csiga esetén létezik egy optimális fordulatszám, mely felett már nem nő tovább a keverési hatékonyság, valamint a fordulatszám növelésénél azt is figyelembe kell venni, hogy a szemcsék közötti ütközések és az azokból származó kapcsolati erők is nőnek.

Megállapítottam, hogy az átkevert tartományt 3 függvénnyel lehet határolni és a függvények jellege független a szemcsegeometriától. Az így kapott függvények függőleges tengely körüli megforgatásával megkapjuk az átkevert térfogatot. Az átkevert térfogat nagyságát befolyásoló paraméterek hatásának meghatározásához faktoriális kísérletet végeztem. Igazoltam, hogy az adott vizsgálati tartományban nem írható le faktorokban lineáris függvénnyel. Ezt követően paraméterérzékenység vizsgálattal bebizonyítottam, hogy az átkevert térfogatot befolyásoló tényezők a levélátmérő és a fordulatszám. Igazoltam, hogy a menetemelkedés nem befolyásolja az átkevert halmaz térfogatát.

Összefoglalásként megállapítom, hogy az új tudományos eredmények segíthetik a terménykeverők berendezések tervezését, a silószárítók üzemeltetését és csökkenthetik a felmerülő költségeket.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. Keppler I., **Varga A.**, Szabo I., Katai L., Fenyvesi L. (2016): Particle motion around open mixing screws: optimal screw angular velocity, *Engineering Computations*, Vol. 33 (3), pp. 896-906. (IF: 0,691*)
2. Oldal I., Keppler I., Bablena A., Safranyik, F., **Varga A.** (2014): On the discrete element modeling of agricultural granular materials, *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 11, pp. 8-17.
3. Safranyik F., Csatár A., **Varga A.** (2015): Experimental method for examination of state Dependent Friction, *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, Vol. 11 (1), pp. 29-42.
4. Csatár A., **Varga A.** (2015): Examination of velocity dependent friction in case of steel probes, *Hungarian Agricultural Engineering*, Vol. 27, pp. 24-26.
5. **Varga A.**, Keppler I., Fenyvesi L. (2017): Investigation of mass flow properties of particles in silodryers, *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*, Vol. 4 (4), pp. 42-46.

Lektorált cikk magyar nyelven

1. **Varga A.**, Keppler I., Fenyvesi L. (2016): Keverőcsigák körül kialakult szemcseáramlási viszonyok meghatározása diszkrét elemek módszerével, *Mezőgazdasági Technika*, LVII. évfolyam, 2-4. o.
2. **Varga A.**, Fenyvesi L., Keppler I. (2017): Keverési hatékonyság meghatározása diszkrét elemek módszerével, *GÉP LXVIII. évfolyam* (2017/1.), 52-55. o.
3. **Varga A.**, (2015): Silószáritók szemcse mozgásviszonyainak elemzése, *Műszaki Tudományos Közlemények*, 2015 (3) 319-322. o.