



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Szabad keverőcsigák környezetében létrejövő  
szemcsemozgások elemzése

Doktori (PhD) értekezés

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.....	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	7
<b>1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége</b> .....	7
<b>1.2. Célkitűzések</b> .....	7
2. SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ.....	9
<b>2.1. Szárítás elmélete és gyakorlata</b> .....	9
2.1.1. <i>Ipari szárítóberendezések</i> .....	10
2.1.2. <i>Vastagrétegű szárítóberendezések</i> .....	11
<b>2.2. Terménykeverő rendszerek</b> .....	13
<b>2.3. Szemcsés halmazok mechanikai viselkedésének leírása</b> .....	18
2.3.1. <i>A diszkrét elemek módszere</i> .....	19
2.3.2. <i>Nyíróvizsgálatok</i> .....	22
2.3.3. <i>A BALL-típusú modellek</i> .....	23
2.3.3.1. <i>A mozgásegyenlet</i> .....	23
2.3.3.2. <i>A DEM-ben alkalmazható időintegrálási eljárások</i> .....	25
2.3.3.4. <i>Hertz-Mindlin csúszásmentes kapcsolati modell</i> .....	27
<b>2.4. A szállító és keverőcsigák diszkrét elemes modellezése</b> .....	29
<b>2.5. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése</b> .....	36
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	37
<b>3.1. Kísérleti berendezés létrehozása</b> .....	37
<b>3.2. A mérési módszer bemutatása</b> .....	38
<b>3.3. Kísérleti berendezés módosítása</b> .....	39
<b>3.4. Szemcsék szilárdságának meghatározása</b> .....	40
<b>3.5. A keverési folyamat diszkrét elemes modellezése</b> .....	41
3.5.1. <i>Szemcsehalmaz és kölcsönhatások modellezése</i> .....	41
3.5.2. <i>A keverő berendezés diszkrét elemes modellje</i> .....	43

---

3.5.3. <i>A szimulációs folyamat leírása</i> .....	45
<b>3.6. A keverési hatékonyság számszerűsítése</b> .....	46
3.6.1. <i>Az effektív sugár definíciója</i> .....	46
3.6.2. <i>Szemcsék keveredésének mértéke</i> .....	47
3.6.3. <i>Az átkevert térfogat meghatározása</i> .....	47
3.6.4. <i>Az átkevert térfogata vizsgálata faktoriális kísérlettel</i> .....	48
<b>4. EREDMÉNYEK</b> .....	52
4.1. <b>A diszkrét elemes modell validálása</b> .....	52
4.2. <b>A keverési hatékonyság meghatározása az effektív sugárral</b> .....	56
4.3. <b>A keverési hatékonyság meghatározása az átkevert térfogattal</b> .....	60
4.4. <b>Az átkevert térfogat empirikus függvényének meghatározása</b> .....	62
4.5. <b>A keverést befolyásoló faktorok hatásának meghatározása</b> .....	65
4.6. <b>Új tudományos eredmények</b> .....	67
<b>5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK</b> .....	71
<b>6. ÖSSZEFOGLALÁS</b> .....	72
<b>7. SUMMARY</b> .....	73
<b>8. MELLÉKLETEK</b> .....	74
<b>M1. Irodalomjegyzék</b> .....	74
<b>M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk</b> .....	78
<b>9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS</b> .....	80

## JELÖLÉSJEGYZÉK

$\mathbf{A}(x, y, z)$	alakváltozás tenzormező	[–]
$\mathbf{a}^i(t)$	az $i$ -edik diszkrét elem gyorsulás vektora	[–]
$a_i$	a közelítő függvény $i$ -edik együtthatója	
$\mathbf{C}(x, y, z)$	anyagállandók mátrixa	[–]
$c_n$	viszkózus csillapítás	$\left[\frac{Ns}{m}\right]$
$C_r$	ütközési tényező	[–]
$D_n$	csillapító erő	[N]
$E_0$	egyenértékű rugalmassági modulus	[MPa]
$E_i$	az $i$ -edik szemcse rugalmassági modulusa	[MPa]
$e$	keverési hatékonyság	[–]
$\mathbf{F}(x, y, z)$	feszültségi tenzormező	[MPa]
$F_N$	normál erő	[N]
$F_T$	nyíróerő	[N]
$G$	csúsztató rugalmassági modulus	[Pa]
$G_0$	egyenértékű csúsztató rugalmassági modulus	[Pa]
$G_1, G_2$	egyenértékű csúsztató rugalmassági modulusa	[Pa]
$I_p$	a $p$ -edik elem tehetetlenségi nyomatéka	[kgm <sup>2</sup> ]
$k_{trans}^p$	a $p$ -edik elem eltolódási merevsége	$\left[\frac{Ns}{m}\right]$
$k_{rot}^p$	a $p$ -edik elem elfordulási merevsége	$\left[\frac{Ns}{m}\right]$
$N$	kísérleti beállítások száma	[–]
$n_i$	az $i$ -edik kísérleti beállítás	[–]
$\mathbf{M}(t)$	a teljes rendszer tömegmátrixa	[–]
$\mathbf{M}^i(t)$	az $i$ -edik elem tömegmátrixa	[–]
$M_r$	gördülési súrlódásból adódó nyomaték	[Nm]
$M_t$	érintőirányú erőből adódó nyomaték	[Nm]
$m_0$	redukált tömeg	[kg]
$m_i$	az $i$ -edik szemcse tömege	[kg]

$R$	csigalevél sugara	$[mm]$
$R_{eff}$	effektív sugár	$[m]$
$R_i$	az $i$ -edik szemcse sugara	$[mm]$
$R_0$	egyenértékű sugár	$[mm]$
$\mathbf{u}^i(t)$	az $i$ -edik diszkrét elem elmozdulás vektora	$[m]$
$\mathbf{u}(x, y, z)$	elmozdulási vektormező	$[m]$
$s_j$	a kísérleti beállításokhoz tartozó $i$ -edik szórás	$[-]$
$s_y^2$	a közelítő függvény szórásnégyezete	$[-]$
$x_i$	a vizsgálati paramétert leíró $i$ -edik faktor	$[-]$
$y$	vizsgálati paraméter	$[-]$
$\mathbf{v}^i(t)$	az $i$ -edik diszkrét elem sebesség vektora	$[m]$
$V$	átkevert térfogat	$[m^3]$

**Görög betűk:**

$\alpha_i$	az $i$ -edik transzformált faktor	$[-]$
$\Delta t$	szimulációs időlépték	$[sec]$
$\Delta \varepsilon$	hibahatár	$[-]$
$\delta$	átfedés a két szemcse között	$[mm]$
$\mu_s$	gördülési súrlódási együttható	$[-]$
$\mu_0$	súrlódási tényező	$[-]$
$\mu_r$	gördülési ellenállás tényezője	$[-]$
$\nu$	Poisson tényező	$[-]$
$\rho$	sűrűség	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$\omega_i$	az $i$ -edik szögsebessége	$\left[\frac{1}{s}\right]$

**Operátorok:**

$\nabla$	Hamilton-féle differenciáloperátor	$[-]$
----------	------------------------------------	-------

## 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 (tehveriselésre 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 halmaz 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 technológiához 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 szemes terményszárítók 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 járjanak 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. SZAKIRODALMI ÖSSZEFOGLALÓ

A második fejezetben áttekintem a szárítással kapcsolatos alapfogalmakat, a vastagrétegű szárító berendezések felépítését, a szemcsés halmazok mechanikai viselkedésének modellezési módjait, valamint a keveréssel kapcsolatos szakirodalmi kutatásokat.

### 2.1. Szárítás elmélete és gyakorlata

A szárítás az egyik legfontosabb és legalapvetőbb művelet számos nemzetgazdasági ágazatban. Valójában a termelők lehetetlen helyzetbe kerülnének, ha szárítás nélkül kéne végterméket előállítani. A szárítási folyamatok rendkívül energiaigényesek, és sok esetben még környezetbarátnak sem tekinthetők a technológiák, ami abból következik, hogy a szárításhoz szükséges hőenergiát többnyire fosszilis tüzelőanyagok elégetésével biztosítják. Jelenleg az iparilag fejlett országok az energiaszükségletük 15-30%-át szárításra fordítják. Például Amerikában, Angliában, Franciaországban, Kanadában, Magyarországon 10-15 %-át, Dániában és Németországban pedig 20-25%-át teszi ki az összes energiaigénynek. Ezek az értékek azonban a világgazdaság növekedése miatt folyamatosan növekedni fognak (Mujumdar és Beke, 2002).

Ezért a szárítási technológiák fejlesztésében résztvevő kutatók, mérnökök elsődleges feladata, hogy a lehető legkisebb energiafelhasználással valósítsák meg a folyamatokat. E cél elérése érdekében a mérnöknek folyamatosan lépést kell tartani az a technológiák fejlődésével és fogékonyak kell lenni az új tudományos eredmények iránt. A szárításban a kutatás és fejlesztés csupán néhány évtizede kezdődött, annak ellenére, hogy rég ismert eljárásról van szó. A szilárd anyagok tudományos elemzését vegyészmérnökök kezdeményezték. A szárítás gyakorlatilag mindenütt jelen van (például élelmiszeripar, mezőgazdaság, biotechnológia, gyógyszeripar, vegyészet, fafeldolgozó ipar), sőt ma már nagyon nehéz lenne olyan végterméket találni, amelynél a gyártási folyamatokban ne szerepelne a szárítás. A nem megfelelő nedvességtartalom károsíthatja az anyagot a további feldolgozás, valamint a tárolás során (Tsotsas és Mujumdar, 2007). Többek közt ezért is kulcsfontosságú a szárítás technológia fejlesztése (Mujumdar és Beke, 2002).

Szárításon esetünkben azokat a folyamatokat értjük, amelyek során szilárd vagy gáznemű anyagok nedvességtartalmának csökkenése fázisváltás közben megy végbe. A szárítási folyamatra az anyag nedvesség- és szárazanyag-tartalmának változása a jellemző. A szárítás tulajdonképpen szétválasztó művelet, melynek során a félkemény (pl: porózus, polidiszperz, növényi) vagy folyékony nyersanyagot alakítja át szilárd terméké a nedvességtartalom elpárologtatásával. A folyamat magába foglalja az átmeneti hő-és anyagátadás különböző sebességű műveleteit. Ilyenek például a fizikai és/vagy kémiai átalakulások. A fizikai változásokhoz tartoznak a zsugorodás, duzzadás, kristályosodás és az üvegátmenet. A fizikai változások mellett bekövetkezhetnek kívánatos és nem kívánatos kémiai és biológiai reakciók, melyek például szín-, szövet-, szag tulajdonságok változásokhoz vezethetnek. A szárítás során energiaközlés hatására a folyadék párolog. Az energiaközlés lehet konduktív (kontakt vagy közvetett szárítók), konvektív (közvetlen szárítók) és sugárzásos hőközlés. Létezik egy negyedik fajtája is az energiaközlésnek. Ez az úgynevezett térfogati hőközlés, melyről akkor

beszélünk, ha a nedves anyagot mikrohullámú vagy rádiófrekvenciás elektromágneses térbe helyezik (Mujumdar és Beke, 2002).

A gyakorlatban az ipari szárítók több mint 85% konvektív típusú. A szárító közegként meleg levegőt vagy füstgáz-levegő keveréket alkalmaznak.

A szárítási folyamat közben változik az anyag fizikai szerkezete és ennek következtében a nedvességelvonás mechanizmusának is változni kell. A vízelvonásban kulcsfontosságú szerepet játszik a levegő.

A szárítási eljárások rendkívül sokféle szempont szerint csoportosíthatók. Ezek leggyakrabban ilyen szempontok az energiaforrás eredete, a folyamatok alatt fennálló nyomás, a hőközlés módja, a szárítóközeg hőmérséklete, a száradó anyag mozgásához viszonyított áramlás, a szárított réteg vastagsága, az energiahordozó és a száradó anyag kapcsolata. A következőkben a gyakorlatban alkalmazott szárítási eljárásokat szeretném röviden jellemezni.

A konvektív szárítási eljárás lényege, hogy a szárítandó anyag nedvességtartalmának elpárologtatásához szükséges hőenergiát levegő vagy füstgáz-keverék segítségével juttatjuk a szárítótérbe. A hőenergiát hordozó gáznak vagy más néven szárítóközegnek három feladata van: a hőenergia felvétele és továbbítása, másrészt a nedves terményből kilépő vízgőz magába fogadása, és elszállítása a szárítótérből. A konvektív szárítási folyamatok az esetek döntő többségében légköri nyomáson zajlanak. Ezt a szárítási folyamatot atmoszférikus szárításnak nevezik (Mujumdar és Beke, 2002).

### *2.1.1. Ipari szárítóberendezések*

A megfelelő szárítók kiválasztása a gyakorlatban megszerzett tapasztalatoktól és a kereskedők ajánlataitól függ leginkább. A feladatot egyes tényezők tovább nehezítik, mint például a szigorú minőségi előírások betartása, a termelékenység igénye, a magas energiaárak és a szigorú környezetvédelmi előírások. Egy olyan mérnöknek, aki a szárítók vagy még inkább a szárítórendszer kiválasztásáért felelős, tudnia kell, hogy melyek azok a fő kritériumok, amelyeket szem előtt kell tartani a helyes szárítási technológia kiválasztásánál. Ebben a helyzetben egy rossz döntés súlyos anyagi következményekkel járhat. Az utóbbi években egy felmérés szerint Európa legnagyobb vegyipari társaságainak 80%-a rosszul választotta meg a szárítótechnológiáját. Ez nagy érték, mivel ezek mindegyike körülbelül 1000 szárítóberendezéssel rendelkezik. Nem vették figyelembe, hogy egy technológia, ami az egyik helyen megfelelő választás, az más földrajzi helyen évekkel később rossznak bizonyulhat. A SPIN (Solids Processing Industrial Network) egyik tanulmánya szerint a vállalatok 90%-a hibát vét a szárítók kiválasztásánál.

A műszaki szakirodalmakban több mint 400 szárító leírása található, azonban a gyakorlatban ezekből legfeljebb 50-et alkalmaznak. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy ugyanazon feladatra több típusú szárító is alkalmazható. A lehetséges típusok számának csökkentése nagyon pontos követelmény rendszer felállításával oldható meg.

Baker (1997) megfogalmazott egy szerkezeti közelítésen alapuló kiválasztási módszert, melynek lépései:

- valamennyi fontos műveleti jellemző megfogalmazása,
- az előzetes kiválasztás elvégzése,
- a funkcionális és anyagminőségi tesztek elvégzése,
- a választási lehetőségek gazdaságossági számítása,
- próbakísérletek lefolytatása,
- a leginkább alkalmas szárító típus kiválasztása.

A típusok közötti árkülönbség sem mindegy, ezért is alapvető fontosságú a széleskörű ismeret.

A gyakorlatban legelterjedtebbek a konvektív, vagy más néven közvetlen szárítók. A leggyakoribb szárító közeg a meleg levegő, amit közvetett melegítéssel, vagy közvetlen fűtéssel hoznak létre.

A hőenergia közvetítése sugárzásos hőközléssel, vagy térfogati hőközléssel is megvalósítható. Utóbbi akkor valósul meg, ha a száradó anyagghalmazt mikrohullámú vagy rádiófrekvenciás dielektromos mezőbe helyezik. A nedves felület gyors szárítását az teszi lehetővé, hogy a sugárzási hőfluxus helyileg széles határok között állítható. Konvekciós vagy vákuum eljárással eltávolítható az elpárolgott nedvességtartalom. A mikrohullámú szárítás hátránya, hogy az üzemeltetési és beruházási költségei igen magasak. Az elektromos áram 50%-a alakul elektromágneses mezővé és ennek is csak egy részét nyeli el a szárított anyag (Tsotsas és Mujumdar, 2009).

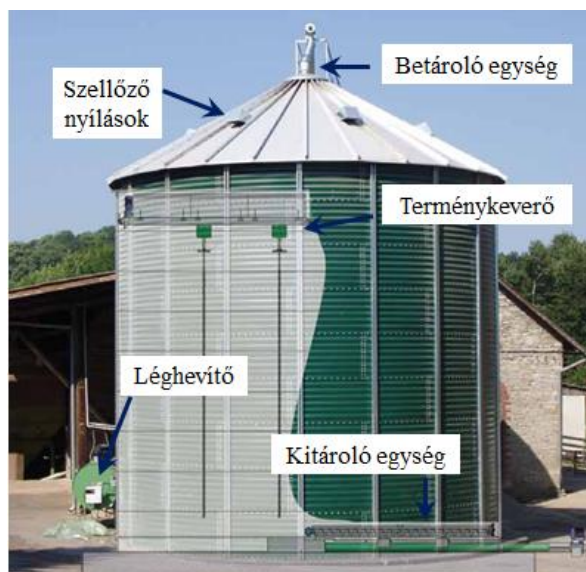
A különféle hőközlési módokat gyakran kombinálják (pl. konvektív-konduktív, konvektív-sugárzásos, konvektív-dielektromos) annak érdekében, hogy a szárítóközeg mennyiségét csökkentsék a szárítási folyamat során. A kombinált energiaközlési módok ugyan növelik a beruházási költségeket, de a jobb minőségű termény és az üzemeltetési költségek csökkenése kompenzálja ezt a hátrányt.

Az üzemeltetést befolyásoló tényezők nagy száma miatt, a helyes döntés meghozásához szinte kötelező a folyamatok matematikai modellezése (Beke, 2002; Mujumdar, 1995; Vas 1985).

### *2.1.2. Vastagrétegű szárítóberendezések*

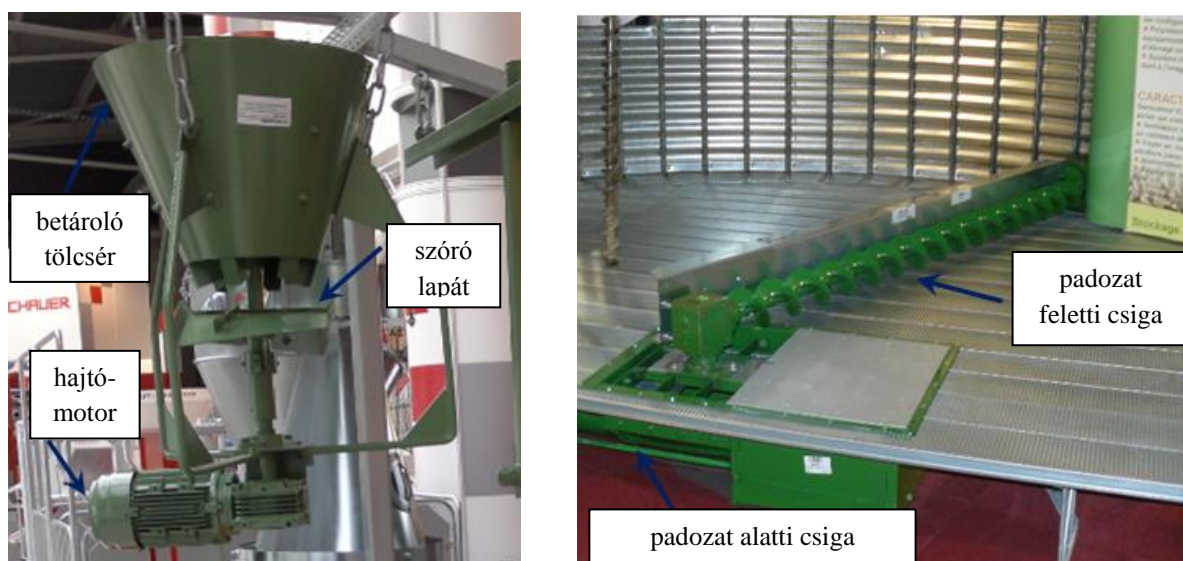
Az ipari szárítóberendezések egyik csoportját a szemestermény szárítók alkotják. A termény főleg víz tartalmának elvonása a szárítótérben történik. A szárítótér egy vagy több szárítózónából állhat, melyek szerkezeti kialakítása adott berendezés esetén azonos. Konstrukciós szempontból a szemes termények szárítóberendezései 3 nagy csoportot képeznek: kényszer anyagmozgatású, gravitációs anyagtovábbítású, és vastagrétegű szárítók.

A vastagrétegű szárítók esetén a szárítani kívánt anyagréteg több méter vastagságú. Éppen ezért a szárítási ideje sokkal több, mint a gravitációs és a kényszertovábbítású szárítók esetén. Ezek a szárítók a termény tárolására is kiválóan alkalmasak (Mujumdar, 1995; Beke, 2002). Az ilyen berendezéseket silószárítóknak is nevezik. A jelenleg is alkalmazott szárítók többsége szakaszos üzemmódban működik. Többféle kialakításban léteznek. Az egyik tároló rendszerű szárító felépítését az 2.1. ábra mutatja.



2.1. ábra Silószárító felépítése

Az anyaghalmoz bejuttatása a silóba betároló szerkezetek segítségével történik. A betároló szerkezet egy tölcserből, szórólapátokból és egy hajtó motorból áll (2.2. ábra).

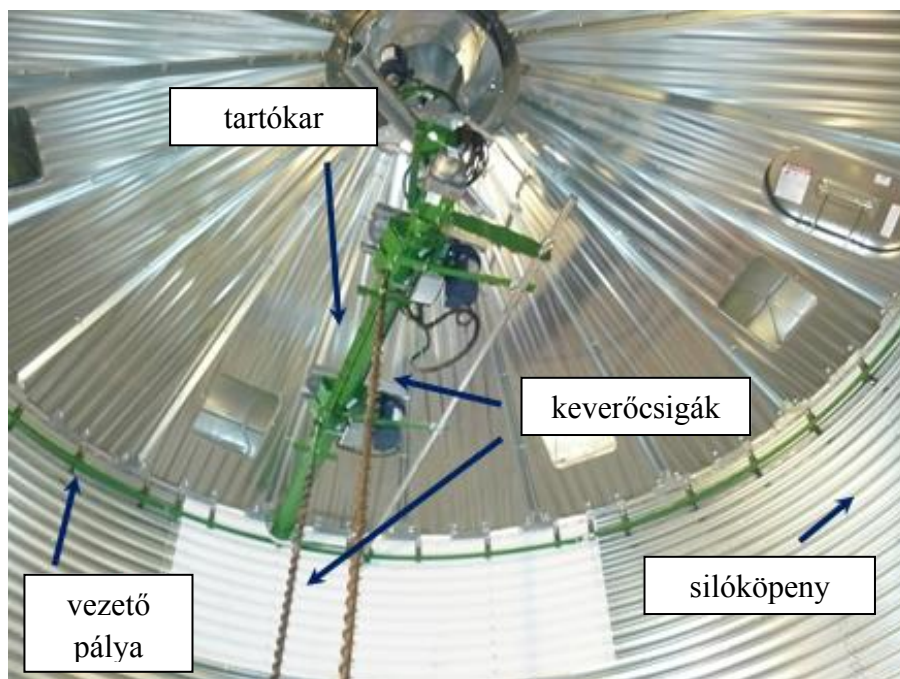


2.2. ábra A be-, és kitároló rendszer felépítése

A betároló rész legfontosabb feladata, hogy a betöltés során biztosítsa az egyenletes szemelosztást a silóban. A motorral hajtott szórólapátok szórási szélessége a lapátokon mechanikusan állítható. Ez a konstrukciós kialakítás lehető teszi a betároló rész alkalmazását különböző átmérőjű silószárítók esetén is. A termény kitárolása két csigás kitároló szerkezet segítségével történik. A padozat feletti kitároló csiga a termény teljes kitárolását végzi el körkörös mozgással. A padozat alatti csiga beömlő ún. surrantókon keresztül tárolja ki a felette elhelyezkedő terményt. A kitároló rendszer szintén a 2.2. ábrán látható.

## 2.2. Terménykeverő rendszerek

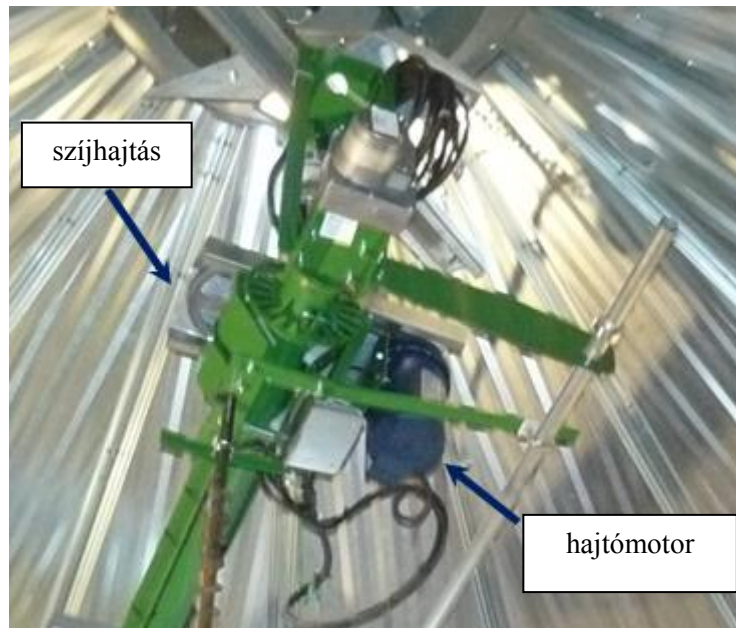
A vastagrétegű szárítóberendezések esetében a legnagyobb problémát az jelenti, hogy a folyamat végeztével az anyag nedvességtartalmának eloszlása nem lesz homogén. Az inhomogenitás csökkentésére úgynevezett terménykeverő berendezéseket alkalmaznak. Ezeket a konstrukciókat főleg kukorica és búza szárításánál alkalmazzák (Carl et al., 1982). A keverőrendszerek számos kivitele ismert. Az eltérő szerkezeti megoldások ellenére működési módjuk hasonló. Működésük lényege, hogy a siló tetejére rögzített tartókar hajtóműves motorok segítségével körbe fordul a siló fala mentén. A tartókar egy, a köpeny falán körbefutó sínnel van megvezetve. A tartókaron a siló méretétől függően 2-4 keverőcsiga helyezkedik el. A keverőcsigák csavarorsókon periodikus mozgást végeznek a tartókar mentén. Így biztosítva van a pontos előhajtás. A csavarorsót szintén egy hajtómotor mozgatja. A csigák ejtését úgy kell kialakítani, hogy megfelelően átkeverjék az anyagot. A keverőrendszer részei kopásmentes anyagból készülnek, hogy hosszú élettartalmúak legyenek. A keverőrendszerek általános felépítését a 2.3. ábra szemlélteti.



2.3. ábra A keverőrendszer részei

A keverés művelete három mozgás szuperpozíciójából tevődik össze. A csigák a tartókarral együtt körmozgást, a tartókar mentén periodikus mozgást és a tengelyük körül pedig forgó mozgást végeznek. A különböző konstrukciók közti eltérés ezen mozgások megvalósításában van. A tartókar mentén a csigák mozgását lehet dörzshajtással vagy csavarorsó segítségével is biztosítani. A keverőcsigák forgómozgását általában szíjhajtással vagy hajtóműves motor segítségével oldják meg. Az alábbi ábrákon jól lehet látni az egyes szerkezeti megoldásokat (2.4-2.5. ábra).





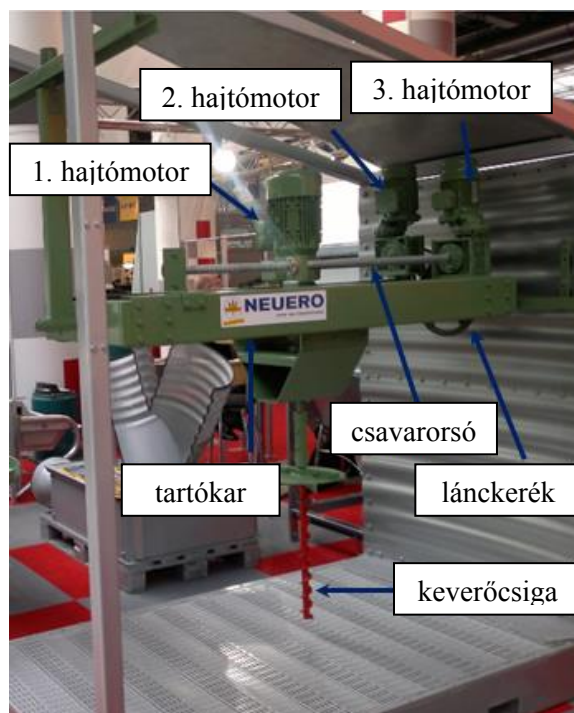
2.4. ábra Szerkezeti megoldások



2.5. ábra Szerkezeti megoldások egy kísérleti berendezésen

A baloldali részen egy kísérleti berendezés látható, amellyel azt vizsgálják, hogy a csiga mekkora anyagrészt mozgat meg keverés közben. Jól látszik, hogy a csigák dörzshajtás segítségével végzik a periodikus mozgást. A csigák forgó mozgását szíjhajtás biztosítja. A konstrukció hátránya, hogy tűz- és robbanásveszélyes, ezért a világ legtöbb részén tiltott a szíjhajtás alkalmazása poros környezetben.

Az előbb bemutatott berendezéshez felépítésében és működésében nagyon hasonló konstrukció látható a 2.6. ábrán. Ebben az esetben is mindhárom mozgás hajtóműves motorok segítségével jön létre, azonban a tartókar egy lánckerék hajtás segítségével fordul körbe a pályán. A keverőcsigák egy csavarorsón mozognak, amely a tartókaron fut végig.



2.6. ábra Egy másik lehetséges szerkezeti megoldásai

A 2. hajtómotor meghajtja a lánckereket, ami egy tengelyen és egy kereken keresztül elmozdítja a tartókart a pályán. A 3. hajtómotor felelős a keverőcsigák mozgatásáért a tartókar mentén. Az 1. hajtómotor forgatja a keverőcsigát a tengelye körül. A csigákat tengelykapcsoló rögzíti a hajtómotorhoz.

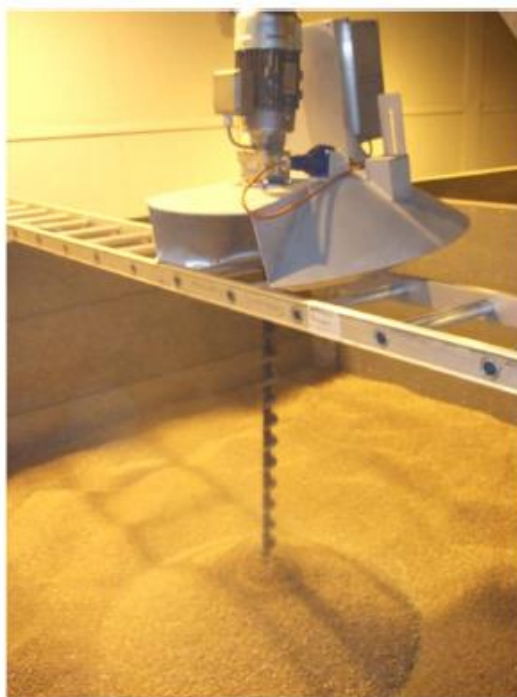
A keverőrendszerek tervezésének a legfontosabb kérdései, hogy a keverés során a keverőcsigák az adott idő alatt mekkora utat járnak be és mennyi anyagot mozgatnak meg. A tervezés során úgy kell kialakítani a konstrukciót, hogy optimálisan végezze a keverést, azaz minél egyenletesebben, minél több anyagrészt keverjen át.

Az ipar és a mezőgazdaság területén a keverő- illetve szállítócsigákat széles körben alkalmazzák a szemcsés anyagok rövid és közepes távolságra való szállításához. Nagyon fontos a geometria és az üzemeltetési beállítások pontos megadása. Ha ezeket a paramétereket rosszul választják meg, akkor a teljesítmény sem lesz optimális. Maga a szállítási folyamat egyszerűnek tűnik, azonban a folyamat modellezése nehéz és összetett (Bridgwater, 2012). Az ezen a területen dolgozó kutatók és mérnökök a tervezésnél és a fejlesztéseknél javarészt empirikus adatokra támaszkodnak (Huang és Kuo, 2014).

A szállítócsigáknál a térfogatáram alakulása (Darnell és Mol, 1956; Metcalf, 1965; Burkhardt, 1967; Reugler, 1967; Rautenbach és Schumacher, 1987; Dai és Grace, 2008) és a csiga forgatásához szükséges nyomaték (Metcalf, 1965; Reugler, 1967; Rautenbach és Schumacher, 1987; Colijin, 1985) voltak a vizsgálatok tárgyai. Későbbiekben Tsai és Lin (1994) azt vizsgálták, hogyan változik szállítócsigák teljesítménye, ha a szállítási folyamatot meghatározó paramétereket (levélátmérő, menetemelkedés, szállítócsiga dőlés szöge stb.) változtatják. Uchida és Okamoto (2008) kísérleti vizsgálatokkal igazolták, hogy a szállítási teljesítmény növelhető a menetemelkedés növelésével.

Néhány tanulmány foglalkozott bolygatott szárítóberendezések üzemeltetésével (Brooker et al., 1974; FS Services, 1976; Bern és Charity, 1978). Később kísérleti vizsgálatokat végeztek és bizonyossá vált, hogy a keverőrendszerek alkalmazásával növelhető a keverési hatékonyság. Carl és társai (1982) kukoricahalmaz légellenállását mérték és azt tapasztalták, hogy egyrészt a keverés fellazítja a halmazt, másrészt a keverés hatására a halmazon keresztül haladó levegő sebessége egy ideig növekszik, majd beáll egy konstans értékre. Az egyenletes légáram miatt csökken a nedvességtartalom inhomogenitása a halmazon belül.

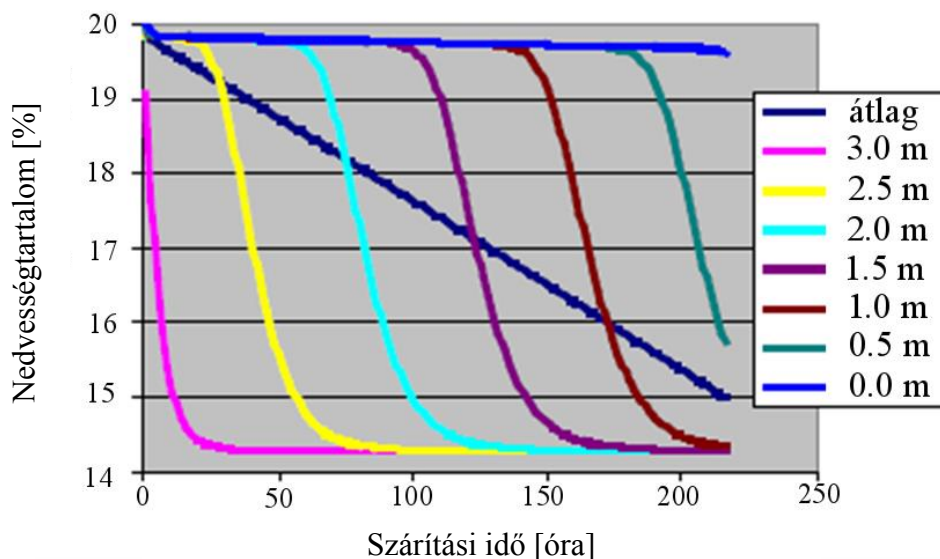
A HGCA (Home-Grown Cereals Authority) egyik tanulmányában (Bruce D.M. et al., 2013) kísérleti vizsgálatokkal bebizonyították, hogy a különböző rétegekben mért nedvességtartalmak hogyan változnak a keverés hatására a statikus (nem kevert) esethez képest. Egy rögzített tengelyű csigát alkalmaztak a méréseknél (2.7. ábra). A szárító levegő hőmérséklete  $38^{\circ}\text{C}$  volt.



2.7. ábra A keverőcsiga elhelyezése (Bruce D.M. et al., 2013)

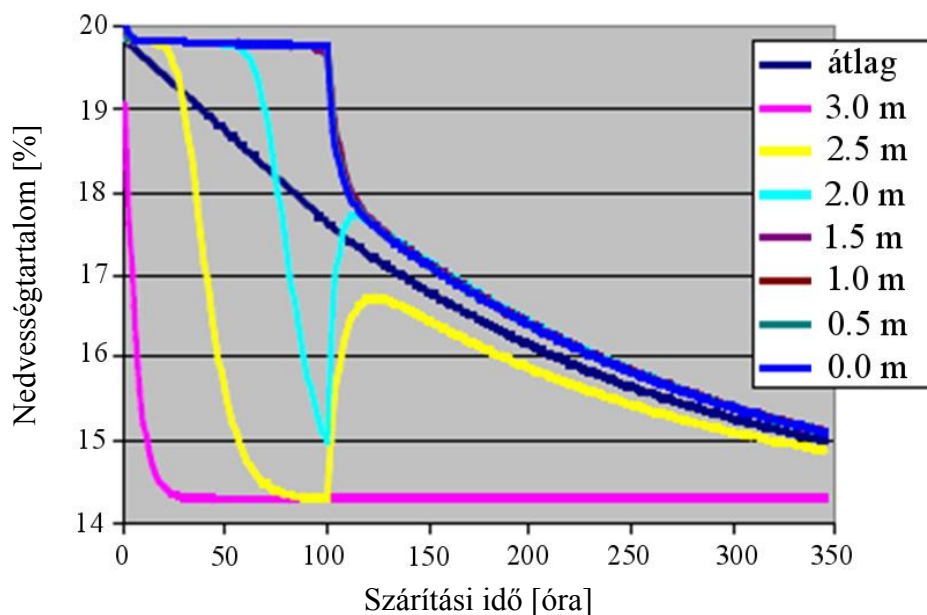
A következő ábrán látható a nedvességtartalom változása a magasság függvényében keverés nélküli esetben. Háromméteres mélységben 7 szinten mérték a nedvességtartalmat. Az ábráról látszik, hogy a halmaz a legalsó szinten éri el először (legrövidebb idő alatt) az egyensúlyi állapotot, mivel a meleg levegő is alulról érkezik. Felfelé haladva egyre több idő szükséges a kívánt nedvességtartalom eléréséhez (2.8. ábra).





2.8. ábra A keverés nélküli eset (Bruce et al., 2013)

A 2.9. ábrán már a kevert halmazon vizsgálták a nedvességtartalom változását. Az ábráról leolvasható, hogy adott idő után az eloszlás sokkal egyenletesebb lesz, mint a keverés nélküli esetben. Érdekessége a vizsgálatnak, hogy a 2.5 és a 2 méteres mélységekben a nedvességtartalom először csökken, majd növekszik, tehát egy visszanedvesítési folyamat figyelhető meg.



2.9. ábra A keveréssel történő vizsgálat (Bruce et al., 2013)

A fenti diagramokból is látszik, hogy a keverés jelentős szerepet játszik a szárítási folyamatokban.

### 2.3. Szemcsés halmazok mechanikai viselkedésének leírása

A terménykeverő berendezés által létrehozott szemcsemozgás viszonyok modellezéséhez elengedhetetlen a szemcsés anyagok mechanikai viselkedésének kellő ismerete.

Szemcsés halmaznak nevezzük azokat az anyagokat, amelyek kiterjedésükhöz képest kisméretű, szilárd részekből álló, összetett mechanikai rendszerek, és viselkedésüket alapvetően meghatározza, hogy egyértelműen elkülönülő, egymástól elválni, egymáson elcsúszni és elgördülni képes elemekből állnak (Sitkei, 1981; Bagi, 2007).

Szemcsés anyaghalmozatokkal a mérnöki gyakorlat számos területén találkozhatunk. Mechanikai modellezésük komoly kihívást jelent a gyakorló mérnökök számára. A szemcsés anyaghalmozatok bizonyos körülmények között hasonlóan viselkednek a szilárd anyagokhoz (teherviselésre képesek, megőrzik alakjukat). Más körülmények között ugyanaz a korábban szilárd testként modellezett szemcsehalmoz a folyadékhoz hasonló tulajdonságokat mutat (Csizmadia, 2009). Jó példa erre a silóban történő tárolás. A silóból általában gravitációs ürítéssel távolítják el az anyaghalmozatot. Bizonyos feltételek mellett a kifolyó nyílás felett szilárd boltozat jön létre és a silóból történő kiáramlás megszűnik. A szemcsés halmazok ekkor kettős tulajdonsága előnyösen is kihasználható (pl. anyagmozgatás esetén), ugyanakkor számos kezelési probléma elsődleges okozója is lehet (Tomay, 1982). A szemcsés anyagokkal kapcsolatos elméleti vizsgálatok sokszor olyan közelítéseket és elhanyagolásokat tartalmaznak, hogy az ezekből származó becslések és a mérési eredmények között jelentős az eltérés. A vizsgálatok során a mechanikai modell megválasztása jelenti a legnehezebb feladatot. A szemcsés halmazok modellezésére (bármennyire is gyakran viselkednek úgy, mint a folyadékok) a folyadékok mechanikája nem alkalmas. Ugyanez igaz a szilárd testek mechanikájára vonatkozásában is. A szemcsés anyaghalmozatok viselkedésének leírására kétféle módszer terjedt el. Az egyik a klasszikus kontinuummechanika eszköztárából alkalmazza (pl. szilárdságtan). A másik módszer az úgynevezett diszkrét elemes módszer, mely az egyes szemcsék mozgásegyenleteit felírva, a szemcsék közötti kölcsönhatásokat leírva próbálja modellezni a szemcsehalmozatok viselkedését (Csizmadia, 2009; Bagi, 2007).

A kontinuummodell esetében a halmaz sajátosságait a mérésekkel meghatározott anyagjellemzők segítségével írjuk le (Kozák, 1995; Keppler, 2006). Azon a feltételezésen alapszik, hogy a szemcsés halmaz folytonosan tölti ki az adott térfogatot, ezért a jellemző mechanikai mennyiségek folytonos függvényekkel leírhatóak. A halmaz állapotát is folytonos függvények írják le, az állapotváltozást pedig differenciálegyenletek segítségével lehet megadni speciális anyagjellemzők figyelembevételével (Keppler, 2006; Oldal, 2007). A szemcsés anyaghalmozatok nemlineáris és nem rugalmas anyagok, azaz egyrészt tömöredésükkel rugalmassági modulusuk folyamatosan változik, másrészt a terhelés megszűnése után a halmaz nem nyeri vissza eredeti alakját (Kézdi, 1965). A legegyszerűbb és a kontinuum-mechanikai modellezés során leggyakrabban használt modell mégis a homogén, izotróp lineárisan rugalmas anyagmodell, amely akkor használható, ha a nyomás csak szűk tartományban változik és csak a terhelési szakaszt vizsgáljuk, mivel ekkor a részleges visszarugózás nem okoz problémát (Oldal, 2007). A kontinuum modell esetén a szemcsehalmozatok állapotát, az  $\mathbf{F}(x, y, z)$  feszültségi tenzormező, az  $\mathbf{A}(x, y, z)$  alakváltozási tenzormező és az  $\mathbf{u}(x, y, z)$  elmozdulás vektormező segítségével lehet megadni. A szilárd

testek rugalmas deformációjának lineáris közelítésénél a test bármely pontjában a feszültségi és alakváltozási tenzormezők között, a legáltalánosabb formában egy negyedrendű tenzor, a  $\mathbf{C}(x, y, z)$  teremt kapcsolatot (Asszonyi, 2007). A szemcsehalmazok esetében, a mechanikai állapotot jellemző mennyiségek kapcsolatát és a környezettel való kölcsönhatását a rugalmasságtani egyenletek és azok peremfeltételei írják le. Elsőrendű közelítésnél a következő alakban lehet felírni az egyenleteket (Csizmadia és Nándori, 2002; Égert és Keppler, 2007):

$$\mathbf{F} \cdot \nabla + \mathbf{f} = \mathbf{0}, \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{2}(\mathbf{u} \circ \nabla + \nabla \circ \mathbf{u}) = \mathbf{A}, \quad (2.2)$$

$$\mathbf{C}\mathbf{A} = \mathbf{F}, \quad (2.3)$$

$$\mathbf{u}|_{A_u} = \mathbf{u}_0, \quad (2.4)$$

$$\mathbf{F}\mathbf{n}|_{A_p} = \mathbf{p}_0. \quad (2.5)$$

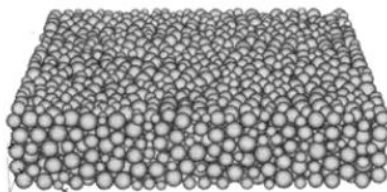
Ennek a parciális differenciálegyenlet-rendszernek az egzakt úton történő megoldása a gyakorlati problémák többségénél szinte reménytelen feladat. A modellezésnél a fő bajt a halmaz szétválása és újra összeállása jelenti, a vágási folyamatokat nagyon nehéz kontinuum modellel kezelni. Éppen ezért közelítő megoldásokat kell keresni (Csizmadia, 2009).

### 2.3.1. A diszkrét elemek módszere

Az előző fejezetben kiderült, hogy a kontinuum-mechanikai alapú mérnöki számítási eljárások a szemcsehalmazok jellegzetességeit vagy egyáltalán nem, vagy csak igen nehézkesen tudják modellezni. Az ilyen problémák numerikus vizsgálatára alakultak ki az 1970-es évektől az ún. diszkrét elemes modellek, amelyek a számítógépek gyors fejlődésének köszönhetően az 1990-es években váltak elterjedtté a mérnöki gyakorlatban is (Bagi, 2007). Sikeresen alkalmazták porkohászatban, gyógyszeriparban (pl. Foo et al., 2004; Ketterhagen et al., 2007), élelmiszeriparban (Yuan et al., 2011) a talaj modellezésénél (pl. Calvetti et al., 2004), a hó vagy az úszó jégtáblák viselkedésének leírására (pl. Hopkins et al., 1996), aszfalt mikro-szerkezetének vagy vasúti ágyazat tömörödésének vizsgálatához (pl. Lu és McDowell, 2007), szemes termények tárolásánál (Coetzee és Els, 2009; Gonzalez-Montanello et al., 2011), sőt az emberi tömeg is modellezhető diszkrét elemekkel (Helbing et al., 2000).

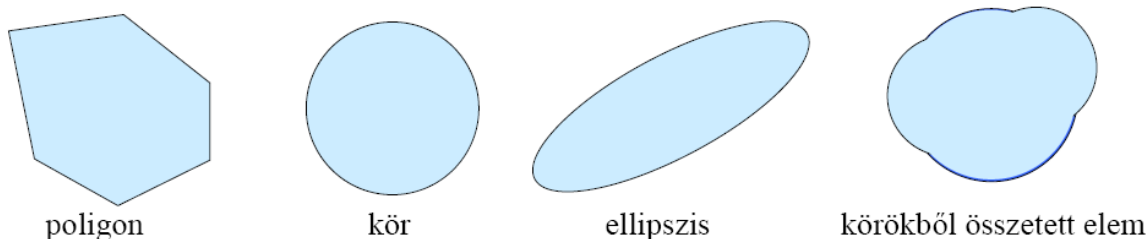
Minden diszkrét elemes modell egymástól különálló elemekből és az elemek érintkezéséből adódó kapcsolatokból áll. A diszkrét elemes módszer egyes eljárásai az egyes szemcsék mozgásegyenleteivel és a köztük létrejövő kapcsolatok figyelembe vételével, míg az eljárások másik része a klasszikus mátrix-elmozdulásmódszert alkalmazva írja le a halmaz valóságos viselkedését.

(Bagi, 2007; Oldal et al., 2012). A modelleknél az egyes elemek a halmazt alkotó egységeknél (szemcséknek) feleltethetők meg. Ez azonban nem minden esetben szükséges, mivel egy több millió szemcséből álló halmaz gyakran megbízhatóan modellezhető több tízezer diszkrét elem együtteseként (2.10. ábra). Ehhez azonban szükséges a modell anyagjellemzőinek megfelelő beállítása (Cundall és Strack, 1979).



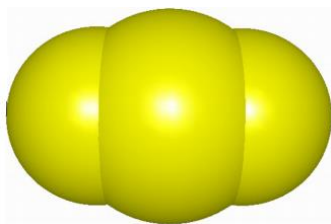
2.10. ábra Több millió szemcséből álló homokrég modellezése 3500 gömb alakú diszkrét elemmel (Bagi, 2007)

Egy numerikus eljárást diszkrét elemes modellnek tekinthetünk, ha egymástól egyértelműen elkülöníthető elemekből épül fel, és ezek az elemek önálló elmozdulási szabadságfokokkal rendelkeznek oly módon, hogy a modell képes követni az elemek véges nagyságú eltolódásait és elfordulásait (esetleg deformációit is). A modellt alkotó elemek között új kapcsolatok jöhetnek létre és meglévő kapcsolatok szűnhetnek meg (Cundall és Hart 1992). Eltérően a véges elemes modellektől, a diszkrét elemes modellekben az elemek önálló elmozdulásokra képesek, akár úgy is, hogy nem is érintkeznek egymással. Továbbá amíg a szokásos kontinuum-mechanikai alapú keretprogramok vagy törésmechanikai szoftverek legfeljebb az elemek közötti kapcsolatok megszűnését tudják csak követni, egy diszkrét elemes modell az új kapcsolatok létrejöttét is az állapotváltozási folyamat szerves részeként kezeli. A modellezés első lépése a szemcsék alakjának illetve a rendszer geometriájának megadása. A különféle DEM szoftverekben a szemcsék alakja nagyon változatos. A leggyakoribb síkbeli elemalakokat a 2.11. ábra mutatja (Bagi, 2007).



2.11. ábra Gyakori elemalakok síkbeli modellezés esetén (Bagi, 2007)

Térbeli diszkrét elemeknél a szemcséket gömbként vagy gömbökből poliéderekként modellezzük. A 2.12. ábrán egy búzaszem diszkrét elemes modellje látható (Keppler et al., 2012).



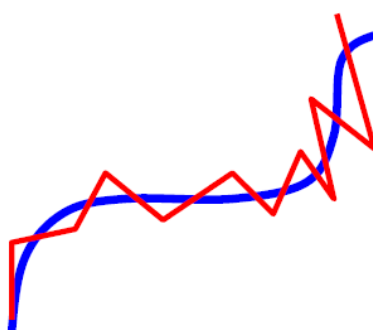
2.12. ábra Három gömbből összerakott diszkrét elem modellje (Keppler et al., 2012)

A kör és gömb alakú elemeket a középpont helyének és az elem sugarának, a poliéder alakú elemek helyzetét a sarokpontjaik helykoordinátáinak megadásával lehet definiálni. Összetett

alakzatoknál az elem lokális koordináta-rendszerében definiálva az elem alakját, majd megadva a vizsgálat globális koordináta-rendszerében a lokális koordináta-rendszer origójának helyét és a lokális tengelyek irányát, az elem alakja és helyzete egyértelműen leírható.

A modell által szimulált mechanikai viselkedés részben a geometriai jellemzőktől, részben pedig az elemek és a kapcsolatok mechanikai anyagjellemzőitől függ. Ahogy a véges elemes modellekben, laboratóriumban meghatározott jellemzőket (pl. rugalmassági modulus, Poisson-tényező) rendelünk az egyes elemekhez, ugyanúgy a diszkrét elemes modellek kialakítása esetén is tényleges fizikai mérések alapján adjuk meg és ellenőrizzük a szükséges anyagi paramétereket.

A diszkrét elemes modellek a keresett állapotváltozási folyamatot kis elmozdulások sorozataként állítja elő. A tényleges nagy elmozdulás pedig a kis elmozdulások (elmozdulás-növekmények) összegeként kapható meg (2.13. ábra).



2.13. ábra Egy szemcse valódi (kék) és számított (piros) pályája (Bagi, 2007)

Egy számítási ciklus lényege, egy elmozdulás-növekmény meghatározása egy adott teher-növekményre. A teher-növekményt nem csak külső erők, hanem az elemekre ható még kiegyensúlyozatlan erők is okozhatják. A számítási ciklus elején

- ismert az elemek helyzete, geometriája, és a kapcsolatok geometriája (pl. normálirány);
- ismert az elemek és kapcsolatok statikai állapota (pl. az épp aktuális kapcsolati erők);
- ismertek az elemek és a kapcsolatok aktuális anyagjellemzői.

A modell ekkor meghatározza a ciklus során létrejövő elmozdulás-növekményeket, majd frissíti a geometriai, topológiai, statikai és anyagi jellemzőket. Ezután következhet az újabb számítási ciklus (Bagi, 2007).

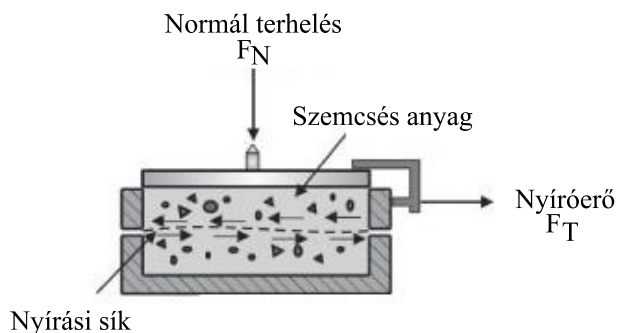
A diszkrét elemes szimulációk főbb lépései tehát a következők: szemcsék generálása, szemcsék közötti kapcsolatok meghatározása, a szemcsék között ébredő erők és nyomatékok meghatározása, mozgásegyenlet megoldása, az új pozíciók számítása, az új kölcsönhatások (erők) meghatározása (Raji és Favier, 2004). Az esetleges modellhibák a szemcsék tulajdonságainak (merev vagy deformálható), valamint a szemcsék közötti kölcsönhatásokat meghatározó mikromechanikai paraméterek vagy a szemcsék alakjának nem megfelelő megválasztásából adódhatnak.

Szemes termények esetén a halmaz mechanikai viselkedésének modellezésére az EDEM nevű diszkrét elemes szoftvert használtam. A szoftver a számításokban BALL-típusú elemeket

alkalmaz, melyek az időléptetéses integrálásos módszer alapján számolják az elmozdulásokat. A mozgásegyenletet és a BALL-típusú elemeket a következő fejezetben részletesen ismertetem.

### 2.3.2. Nyíróvizsgálatok

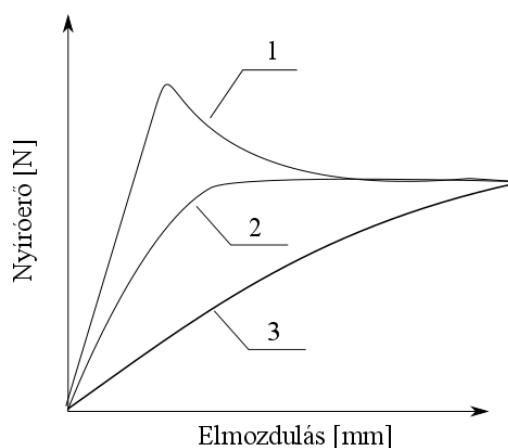
A makroszintű belső súrlódási szög és a kohézió meghatározása legegyszerűbben nyíróvizsgálatok segítségével történik. Az ehhez a vizsgálathoz alkalmazott berendezés az úgynevezett nyírókészülék (2.14. ábra).



2.14. ábra A nyírókészülék vázlati rajza

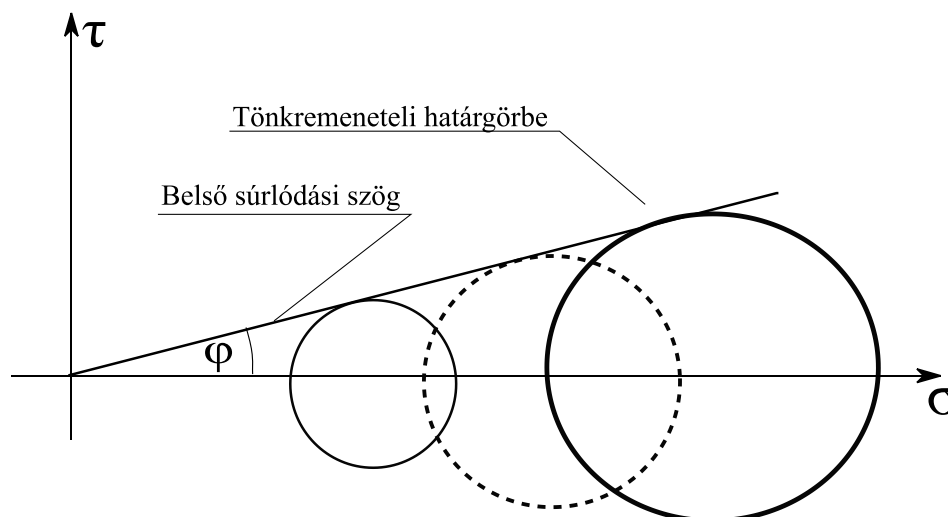
A nyírókísérlet során meghatározott mennyiségek (a belső súrlódás és a kohézió) a szemcsehalmazok tönkremeneteli jellemzői. Feltételezzük, hogy az anyaghalmaz tulajdonságait legnagyobb mértékben ezek a jellemzők határozzák meg.

A nyírás folyamán a készülék nyírótégelyébe ömlesztett szemcsehalmazt egy normál irányú erővel ( $F_N$ ) elő kell terhelni, majd elvégezni a nyírást ( $F_T$ ) (Janssen, 1895; Sitkei, 1981; Keppler, 2006; Csizmadia, 2009) Az elméleti nyírási diagramokat a 2.15. ábra mutatja.



2.15. ábra Ideális nyíróerő-elmozdulás diagram (EFCE SSTT, 1989)

Törekedni kell a 2. számú görbe (kritikus tömörítettség) kialakulására. A vizsgálatot több előterheléssel kell elvégezni. A kapott előterhelő és nyíróerőket a nyírási felület méretétől való függetlenség érdekében normál- és nyírófeszültségekké kell átszámolni. A feszültségekhez tartozó Mohr-köröket egy diagramban ábrázolva, és ezekre burkológörbét fektetve meghatározható a szemcsehalmaz tönkremeneteli határgörbéje (2.16. ábra).



2.16. ábra A szemcsés halmaz Mohr-Coulomb szerinti tönkremeneteli határgörbéje (EFCE SSTT, 1989)

A tönkremeneteli határgörbét a gyakorlatban egyenessel közelítjük. Az egyenes meredeksége megadja a szemcsés halmaz belső súrlódási szögét, függőleges tengelymetszete pedig a kohézió értékét. Az előzőekben leírt nyíróvizsgálat elvégzésének és kiértékelésének részletes módszerét az EFCE SSTT szabványa tartalmazza. Számos tanulmány foglalkozott a szemcsés halmazok tönkremenetelének vizsgálatával kísérleti úton (Schönert, 2004; Subero - Ghadiri, 2001; Wu et al., 2004) és numerikus módszerekkel egyaránt (Carmona et al., 2008; Kafui – és Thornton, 2000; Thornton és Liu, 2004).

### 2.3.3. A BALL-típusú modellek

#### 2.3.3.1. A mozgásegyenlet

Minden diszkrét elemes eljárás alapján képezi az elmozdulások meghatározása. Az egyes módszerekben a különbség abban rejlik, hogy egy adott eljárás milyen egységeknek (csomópontoknak, elemeknek) milyen fajta elmozdulásait (eltolódásait, elfordulásait, deformációit) tekinti a modell viselkedésére jellemzőnek. Ennek értelmében a modell mozgásegyenlete, ami a számítások alapját képezi más-más alakban írható fel. A különféle eljárások különböző fizikai és geometriai tulajdonságú elemeket használnak.

A leggyakrabban használtak a következők:

- végtelen merev elemek;
- tartományokra osztott deformálható elemek;
- deformálható, de részekre nem osztott elemek.

Az általam használt szoftver BALL-típusú modellt használ, melyben az elemek végtelen merevek és a kölcsönhatások diszkrét, pontszerű tartományokban jönnek létre. Ebben az esetben a modellt  $N$  számú merev térbeli elem alkotja, amelyek alakjukat és méretüket nem változtatják. A számítások megkezdéskor ismerjük:

- az elemek helyzetét;
- az elemek között átadódó (ún. kapcsolati) erőket és nyomatékokat

- az elemekre ható külső erőket (pl. gravitáció, közegellenállásból származó erőket)
- valamint időléptetéses eljárások esetén ismert a szemcsék kezdősebessége is.

A  $p$ -edik elem elmozdulásvektora a referenciapont eltolódásának komponenseiből és az elem referenciapont (ez legtöbb esetben a tömegközéppont) körüli elfordulásának komponenseiből áll (Bagi, 2007):

$$\mathbf{u}^p(t) = \begin{bmatrix} u_x^p(t) \\ u_y^p(t) \\ u_z^p(t) \\ \varphi_x^p(t) \\ \varphi_y^p(t) \\ \varphi_z^p(t) \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Mindegyik szemcsére felírva az eltolódás és elfordulásvektorokat, az egész rendszer elmozdulásvektorát kapjuk (Bagi, 2007):

$$\mathbf{u}^p(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{u}^1(t) \\ \mathbf{u}^2(t) \\ \vdots \\ \mathbf{u}^N(t) \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Ha az elmozdulásokat egy-egy iterációs lépésen belül megfelelően kicsinynek feltételezzük, akkor a teljes rendszer elmozdulásait ezek sorozatával közelítjük. A rendszer sebesség – és gyorsulásvektora (Bagi, 2007):

$$\mathbf{v}(t) = \frac{d\mathbf{u}(t)}{dt}, \quad \mathbf{a}(t) = \frac{d^2\mathbf{u}(t)}{dt^2}. \quad (2.8)$$

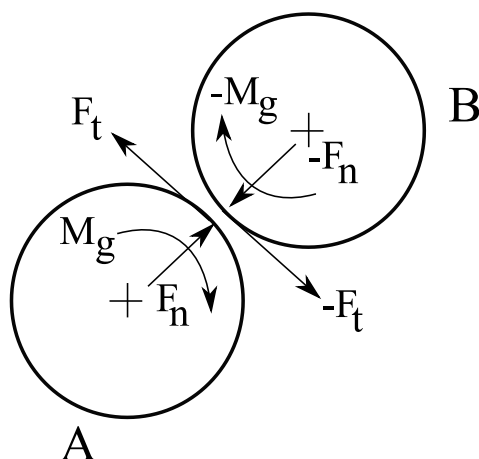
A  $p$ -edik elem sebesség- és gyorsulásvektora (Bagi, 2007):

$$\mathbf{v}^p(t) = \begin{bmatrix} v_x^p(t) \\ v_y^p(t) \\ v_z^p(t) \\ \omega_x^p(t) \\ \omega_y^p(t) \\ \omega_z^p(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}^p(t) = \begin{bmatrix} a_x^p(t) \\ a_y^p(t) \\ a_z^p(t) \\ \varepsilon_x^p(t) \\ \varepsilon_y^p(t) \\ \varepsilon_z^p(t) \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Egy általános alakú térbeli merev elem mozgásegyenletét megkapjuk, ha valamennyi szemcsére felírjuk a kinetikai alaptételeket (a lendület- és a perdülettételt). Ez azt jelenti, hogy egy szemcsé mozgásegyenlete hat skalár egyenletből áll.



A lendület- és a perdülettelben szereplő erőket és nyomatékokat megkapjuk, ha a szemcsékre ható külső erőrendszereket a szemcsék referenciapontjába redukáljuk (2.17. ábra).



2.17. ábra Két szemcse között érintkezés hatására fellépő erők és nyomatékok

A fentiek alapján a  $p$ -edik szemcse mozgásegyenlete (Bagi, 2007):

$$\mathbf{M}_p(t)\mathbf{a}_p(t) = \mathbf{f}_p(t, \mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t)), \quad (2.10)$$

amelyben az  $\mathbf{f}_p$  vektor függ a  $p$  elem elmozdulásától, sebességétől és a  $p$ -vel esetleg érintkező többi elemétől is. Az  $\mathbf{M}_p$  mátrix a  $p$  elem tömegét és inerciáit tartalmazza. Az  $\mathbf{M}_p$  mátrix szintén időfüggő, hiszen az elem fordulásai módosítják az inerciákat (kivételet képeznek a gömbszimmetrikus elemek).

Hasonlóan elmozdulásvektorokhoz, ha minden szemcse mozgásegyenletét felírjuk, akkor megkapjuk a teljes rendszer mozgásegyenletét (Bagi, 2007):

$$\mathbf{M}(t)\mathbf{a}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{u}(t), \mathbf{v}(t)), \quad (2.11)$$

ahol  $\mathbf{M}(t)$  az  $\mathbf{M}_p(t)$  blokkokból összeállított blokkdiagonál-mátrix, az ún. inerciamátrix. A mozgásegyenlet mindig azonos alakú, nem függ az alkalmazott elemek típusától (Bagi, 2007).

### 2.3.3.2. A DEM-ben alkalmazható időintegrálási eljárások

Az időintegrálási eljárásoknak a lényege, hogy az ismert kezdeti állapotból kiindulva, kis időlépéseken keresztül írják le a rendszer mozgását oly módon, hogy a mozgásegyenlet (2.10) minden vizsgált  $t_i$  időpontban minél pontosabban teljesüljön (Bagi, 2007). A megoldásra használt explicit eljárás lényege, hogy a  $t_{i+1}$  időponthoz tartozó  $\mathbf{u}$  és  $\mathbf{v}$  értékeket a korábbi időpontokhoz (pl. a legegyszerűbb esetben a  $t_i$  időponthoz) tartozó, már kiszámított  $\mathbf{u}$  és  $\mathbf{v}$  értékekből, a  $t_i$  időpontban felírva állítják elő a mozgásegyenletet (Bagi, 2007). A BALL-típusú rendszerek is explicit eljárást használnak.

A módszerek egy másik fajtája az implicit eljárás, amelyeknél a  $t_{i+1}$  időponthoz tartozó  $\mathbf{u}$  és  $\mathbf{v}$  értékeket úgy állítják elő a korábbi időpontokhoz tartozó értékekből, hogy a mozgásegyenletet a  $t_{i+1}$  időpontban írják föl (Bagi, 2007).

Az explicit eljárások nagy előnye, hogy a számítások jóval egyszerűbbek és gyorsabbak, mint az implicit eljárások esetében. Mivel azonban nem ellenőrzik a vizsgált időlépések végén a mozgásegyenlet teljesülését, a számítások során elkövetett hibák összegeződnek, és a számított viselkedés egyre messzebbre kerülhet a modellezni kívánt valós folyamattól. Az implicit eljárások ezzel szemben minden vizsgált időlépés végén addig iterálnak, amíg a mozgásegyenlet kellő pontossággal nem teljesül, és csak ezután lépnek tovább a következő időlépés vizsgálatára.

A korábbiakban ismertettem, hogy a mozgásegyenlet általános alakú, merev szemcsék estén 6 skaláregyenletből áll. Az egyenletek numerikus megoldása a centrális differenciák módszerével történik. Egy  $\Delta t(t_i, t_{i+1})$  időintervallum vizsgálatához a következő adatokra van szükségünk:

- elemek helyzetére  $t_i$ -kor;
- az előző intervallumra vonatkozó átlagsebességekre ( $v_{i+1}$ );
- $t_i$ -kor az elemre ható külső erőkre, melyekből kiszámolhatjuk a rendszer minden egyes elemére a rájuk ható eredőerőket és eredőnyomatékokat, a referenciapontra redukálva (Bagi, 2007).

A fenteket figyelembe véve a  $p$ -edik szemcse mozgásegyenletének diszkretizált alakja a következő:

$$\mathbf{M}_i^p \frac{\mathbf{v}_{i+1/2}^p - \mathbf{v}_{i-1/2}^p}{\Delta t} = \mathbf{f}_i^p. \quad (2.12)$$

Átrendezve:

$$\mathbf{v}_{i+1/2}^p = \mathbf{v}_{i-1/2}^p + \Delta t \cdot (\mathbf{M}_i^p)^{-1} \cdot \mathbf{f}_i^p. \quad (2.13)$$

Ez alapján a vizsgált intervallumra jellemző átlagsebesség meghatározható. Így a  $p$  elem új helyzete (Bagi, 2007):

$$\mathbf{u}_{i+1/2}^p = \mathbf{u}_i^p + \Delta t \cdot \mathbf{v}_{i+1/2}^p. \quad (2.14)$$

Az explicit eljárások hátránya, hogy a számításokban a  $\Delta t$  alatt keletkező elmozdulás növekményeket a számítás törvényszerűen túlbecsüli. Ha a túlbecsülés mértéke nagy, akkor bizonyos esetekben túl nagy belső erők keletkezhetnek az elmozdulások irányban és ezek az erők a következő iterációnál „visszalökhetik” a rendszert, a pontos megoldáshoz tartozó helyzetnél jobban (Bagi, 2007). Így lényegében egyfajta oszcilláló mozgás jön létre a pontos megoldás körül.

E hatás csökkentése érdekében a BALL-típusú modellek egyrészt korlátozzák a felvehető időlépés hosszát, másrészt csillapításokat alkalmaznak. Az időlépés megengedhető maximális hossza:

$$\Delta t \leq \min_{(p)} \left\{ \min \left( \sqrt{\frac{m^p}{k_{trans}^p}}, \sqrt{\frac{I^p}{k_{rot}^p}} \right) \right\}, \quad (2.15)$$

ahol  $k_{trans}^p$  és  $k_{rot}^p$  a  $p$  elem legnagyobb eltolódási ill. elfordulási merevsége,  $I_p$  pedig a legnagyobb elfordulási merevség irányához tartozó tehetetlenségi nyomaték.

### 2.3.3.3. Csillapítások

A csillapítások alkalmazásának kettős célja van. Az egyik, hogy a rendszer mozgási energiáját csökkentsek, az előző fejezetben említett okok miatt (túlbecsült elmozdulás-növekmények). A másik, hogy a valóságban lejátszódó energiaveszteséget (disszipációt) megfelelően közelítsék. A sokféle csillapítások közül a legelterjedtebbek a lokális és kapcsolati viszkózus csillapítások. A lokális csillapítás lényege, hogy a mozgásegyenlet (2.10) jobb oldalon lévő tagjához (elemekre ható erőkhöz) hozzáadunk egy, az elem sebességével ellentétes irányú csillapító erőt, melynek nagysága a megfelelő erőkomponens  $\alpha$ -szorososa. Az egyik egyenlet módosítását a következő példa szemlélteti.

A  $p$  elem mozgásegyenletének első skalár egyenlete csillapítás nélkül (Bagi, 2007):

$$v_{x,i+1/2}^p = v_{x,i-1/2}^p + \Delta t \cdot \frac{1}{m^p} \cdot f_{x,i}^p. \quad (2.16)$$

lokális csillapítással:

$$v_{x,i+1/2}^p = v_{x,i-1/2}^p + \Delta t \cdot \frac{1}{m^p} \cdot f_{x,i}^p - \alpha \cdot |f_{x,i}^p| \cdot \frac{v_{x,i-1/2}^p}{|v_{x,i-1/2}^p|}. \quad (2.17)$$

A lokális csillapításnak egyik speciális tulajdonsága, hogy nem függ az elemek sebességének nagyságától, ezáltal egyensúlyi helyzet akkor is kialakulhat, ha állandó sebesség mellett áramlanak a szemcsék.

Kapcsolati viszkózus csillapítás esetén a kapcsolati erők mindegyik komponenséhez hozzáadunk egy-egy olyan erőt (ill. nyomatékot), melynek iránya olyan, hogy lassítsa a relatív sebességet és nagysága arányos a kapcsolati relatív elmozdulás-sebesség megfelelő komponenseinek nagyságával.

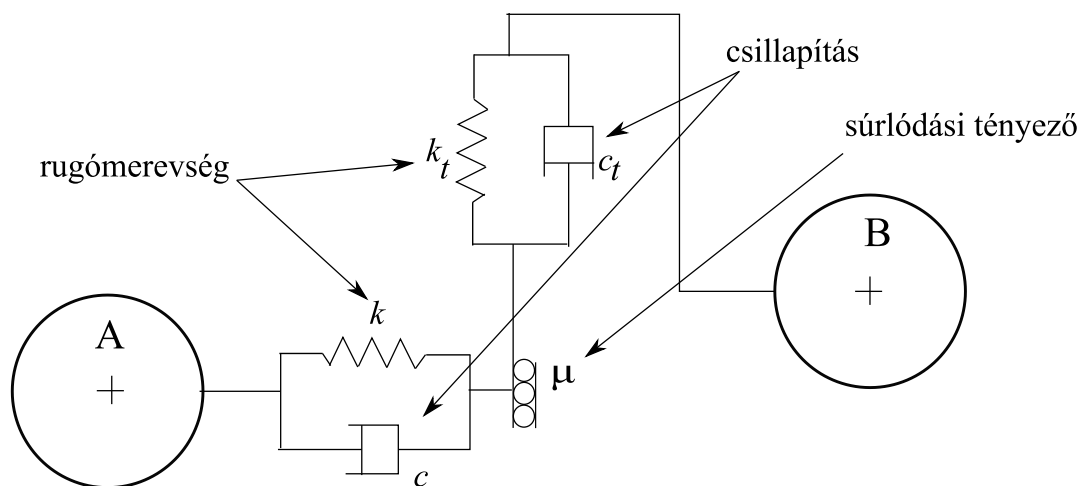
A normálerő esetében a komponens nagysága (Bagi, 2007):

$$|D_n| = C_n \cdot v_{n,i-1/2}^c. \quad (2.18)$$

Ez a fajta csillapítás az energiaveszteség modellezése szempontjából közelebb áll a valósághoz.

### 2.3.3.4. Hertz-Mindlin csúszásmentes kapcsolati modell

Az elemek kölcsönhatásai következtében létrejövő erők és nyomatékok meghatározására a diszkrét elemes módszer ún. kapcsolati modelleket használ (Tsuji et al., 1992). A kapcsolati modellek állandóit a szemcsehalmaz mikromechanikai paramétereinek nevezzük (Cundall és Strack, 1979). Kohézió nélküli, mezőgazdasági termények mechanikai viselkedésének leírására a Hertz-Mindlin-féle csúszásmentes („no slip”) kapcsolati modell (2.18. ábra) alkalmazható a leghatékonyabban (Raji és Favier, 2004; Keppler et al., 2012), ezért az elemek közötti kapcsolatok leírása ezt a kapcsolati modellt alkalmaztam, melyet viszkózus csillapításokkal egészítettem ki a kölcsönhatások modellezéséhez.



2.18. ábra A Hertz-Mindlin csúszásmentes kapcsolati modell

A diszkrét elemes modellben a folyamat kezdetétől a szimuláció kiszámolja az érintkezésből adódó erőket a Hertz-Mindlin csúszásmentes kapcsolati modellhez. Az anyagi és kapcsolati paramétereknek hatása van a normál, illetve az érintőirányú erőkre. Ezek az erők illetve nyomatékok hatnak a szemcsék között a következő összefüggésnek megfelelően:

A normál irányú erő:

$$F_n = \frac{4}{3} E_0 \delta^{\frac{2}{3}} \sqrt{R_0} - 2 \sqrt{\frac{5}{6} \frac{\ln C_r}{\sqrt{\ln^2 C_r + \pi^2}}} \sqrt{2 E_0^4 \sqrt{R_0} \delta} \sqrt{m_0} v_{nrel}. \quad (2.19)$$

ahol  $C_r$  az ütközési tényező, az

$$\frac{1}{E_0} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2.20)$$

az egyenértékű Young modulusza a két kölcsönhatásban lévő szemcsének és  $\delta$  az átfedés a két szemcse között. A normál irányú átfedés mutatja meg a normál irányú deformációját egy kapcsolatnak. A normál átfedés  $\delta$ , az  $x_i$  és  $x_j$  pozícióban lévő  $i$  és  $j$  jelű szemcse között (ahol  $x$  a két szemcse közti középpontokat összekötő egyenesen mért távolság)  $R_i$  és  $R_j$  sugárral:

$$\delta = R_i + R_j - (x_j - x_i). \quad (2.21)$$

Az  $R_0$  egyenértékű sugár, az  $m_0$  redukált tömeg

$$R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2.22)$$

$$m_0 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (2.23)$$

és a  $v_{nrel}$  normális irányú komponense a relatív sebességnek a szemcsék között (Tsuji et al. 1992).

Az érintő irányú erő:

$$F_t = -8 G_0 \sqrt{R_0} \delta \delta_t - 2 \sqrt{\frac{5}{6} \frac{\ln C_r}{\sqrt{\ln^2 C_r + \pi^2}}} \sqrt{2 G_0^4 \sqrt{R_0} \delta} \sqrt{m_0} t_{nrel}, \quad (2.24)$$

ahol

$$\frac{1}{G_0} = \frac{2 - \nu_1}{G_1} + \frac{2 - \nu_2}{G_2} \quad (2.25)$$

az egyenértékű nyírási modulusza két egymással kapcsolatba lépő szemcsének,  $\delta$  az átfedés a két szemcse között.  $\delta_t$  az érintőirányú átfedés a két részecske között, a  $v_{trel}$  pedig az érintőirányú komponense a szemcsék közötti relatív sebességnek. Az érintőirányú átfedés az érintőirányú elmozdulása az érintkezési pontnak, egészen addig a pontig ameddig az érintkezés véget nem ér vagy a szemcse el nem kezd gördülni vagy csúszni. Az érintő irányú átfedés az adott szemcsének az érintőirányú deformációját reprezentálja. Az érintőirányú erőt a Coulomb törvény korlátozza:  $\mu_s F_n$  ahol  $\mu_s$  a csúszási súrlódási együttható (a súrlódási félkúpszög tangense).

A gördülési súrlódásból adódó nyomaték:

$$M_r = -\mu_r F_n R_i \omega_i, \quad (2.26)$$

ahol  $R_i$  az  $i$  szemcse középpontjának távolsága az érintkezés pontjától,  $\omega_i$  pedig a szögsebesség vektor, amely dimenzió nélküli mennyiség és csak az I. szemcse forgásának az irányát mutatja meg.  $\mu_r$  a gördülési súrlódási együttható. Az érintő irányú erőnek szintén van nyomatéka a szemcsére:

$$M_t = F_t R_i. \quad (2.27)$$

A szimulációk során lendülettétel illetve a perdülettétel segítségével fel kell írni a mozgási egyenleteket az összes különálló szemcse esetén. A felhasznált időléptéknek nagy hatása van a numerikus modell stabilitására. Az egyik gyakran alkalmazott időlépték a Rayleigh-féle időlépték (Keppler et al., 2012):

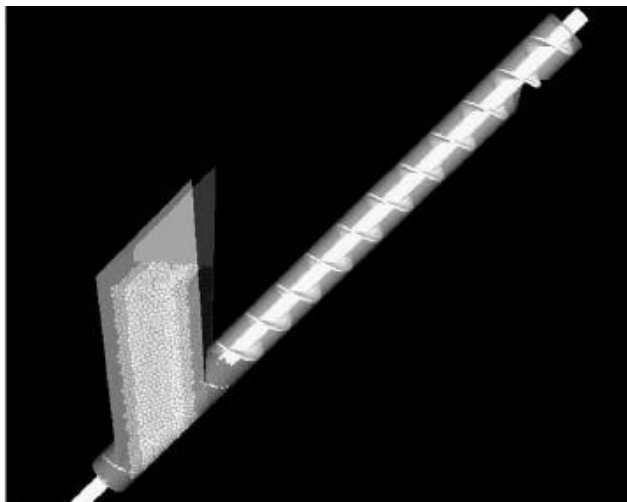
$$T_R = (0,1631\nu + 0,8766)^{-1} \pi R \left( \frac{\rho_p}{G_p} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.28)$$

Kohéziómentes szemcsés halmazok diszkrét modellezésénél használatos mikromechanikai paraméterek például a következők:

- a szemcsék Poisson tényezője,
- a szemcsék közti és a szemcsék és a falak közti ütközési tényező,
- a szemcsék közti és a szemcsék és a falak közti súrlódási tényező,
- a szemcsék közti és a szemcsék és a falak közti gördülési ellenállási tényező.

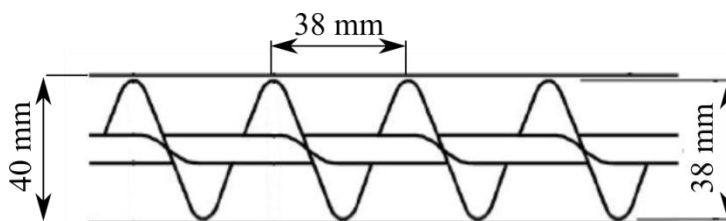
#### 2.4. A szállító és keverőcsigák diszkrét elemes modellezése

A szállítócsigákban kialakult szemcseáramlási viszonyok meghatározására már használták a diszkrét elemes módszert (Owen és Cleary, 2009). A cél az volt, hogy meghatározzák, hogy milyen áramlási viszonyok keletkeznek egy adott geometriájú csigában, ha a szállítócsiga teljesítményét befolyásoló tényezőket változtatják. Ezek a tényezők például a csiga szögsebessége és dőlésszöge. A 2.19. ábrán látható egy szállítórendszer, melynek három főrésze van: a tároló, a cső és a szállítócsiga. A csiga dőlésszöge  $45^\circ$ .



2.19. ábra A szállítórendszer 3D-s modellje (Owen és Cleary, 2009)

A szemcséket gömbökként modellezték. A modellben ugyanolyan szállítócsiga geometriát alkalmaztak, mint egy korábbi ténylegesen elvégzett kísérletnél (Robert és Willis, 1962). A szállítócsiga geometriája a 2.20. ábrán látható. A csigalevél vastagsága 1mm.



2.20. ábra A szállítócsiga geometriája

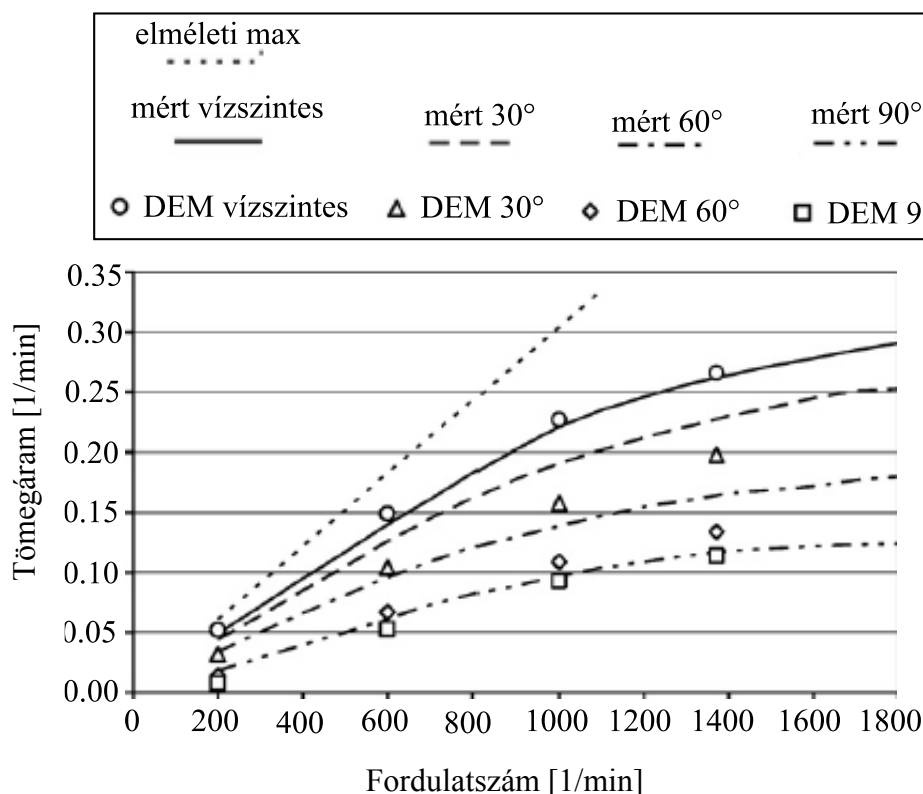
Robert és Willis (1962) a kísérleteiket kölessel végezték el, melyek a valóságban is közel gömb alakúak. A diszkrét elemes modellben 2 és 3 mm átmérőjű gömbökkel modellezték a köles halmazát és a sűrűségét  $700 \text{ kg/m}^3$ -re becsülték. A szimulációhoz használt mikro-mechanikai paraméterek értékei a következők: a szemcsék közötti súrlódási tényező 0,7; a szemcsék és a fal közötti súrlódási tényező 0,5; a szemcsék közti ütközési tényező 0,1 és a szemcsé és a fal közötti ütközési tényező 0,3. A szimulációkat négy különböző szögsebesség mellett végezték el úgy, hogy a csiga dőlés szögét  $0-90^0$ -ig változtatták  $10^0$ -os lépésként.

A kiértékelés során megállapították, hogy a dőlési szög növelésével a csigalevélen lévő szemcséknek lesz maximális a sebessége, valamint itt nagyobb a kisebb átmérőjű szemcsék koncentrációja. Ezt azt jelzi, hogy a különböző méretű szemcsék szétváltak a szegregáció miatt. A szegregáció annál látványosabb, minél nagyobb szemcsék méreteinek szórása (Owen et al., 2003). Ebből az következik, hogy minél jobban nő a dőlési szög, annál több szemcsé fog kölcsönhatásba kerülni a csigalevéellel.

A szimuláció során megfigyelhető volt, hogy a gyors és a lassabb szemcsék jól láthatóan elkülönültek egymástól.

A szimulációval kapott eredményekből meg lehet határozni a szemcsék átlagsebességét és a kialakult tömegáramot. A szimulációs eredmények validálhatók, ha összehasonlítjuk őket a

kísérleti vizsgálatok során kapott eredményekkel (Robert és Willis, 1962). A 2.21. ábrán látható az összehasonlítás.



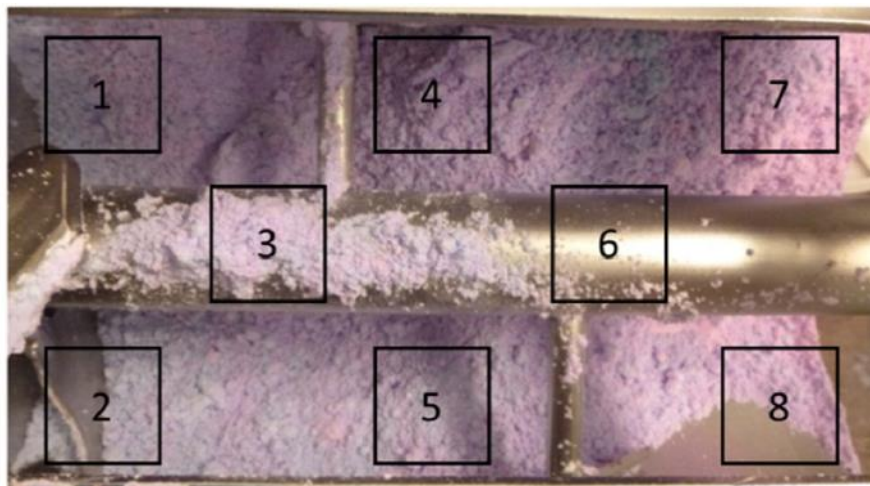
2.21. ábra A szimuláció és a kísérleti vizsgálatok összehasonlítása (Owen és Cleary, 2009)

Az ábráról leolvasható, hogy a csigán áthaladó elméleti maximális tömeg arányos a csiga fordulatszámaival. Az is látszik továbbá, hogy 0 és 90°-nál a számított és mért eredmények jó közelítéssel megegyeznek. A 30 és 60°-nál az eltérés a szemcse és a fal közötti súrlódásból, valamint a diszkrét elem alakjának nem megfelelő megválasztásából adódhat. Cleary (2007) megállapította, hogy a tároló garat része is „érzékeny” a szemcsék alakjára éppen ezért befolyásolhatja a szemcsék áramlását.

Szemcsés halmazok keverésénél illetve keveredésénél a számolt és a mért eredmények összehasonlítása már jóval bonyolultabb feladat.

A mintavételezésnek számos módja ismert. Az anyagáram, a keveredés és a szegregáció meghatározására különféle „roncsolásmentes” technikákat alkalmaznak. Ilyenek például a pozitronemissziós tomográfia (Armstrong, 2011; Lim et al., 2003; Kuo et al., 2005), röntgen tomográfia (Yang és Fu, 2004) és a mágneses rezonancia képalkotás (Sommier et al., 1996). Az imént említett eljárások rendkívül pontos képet adnak az anyaghalmaz viselkedéséről, azonban rendkívül költségesek és a hozzáférésük sem egyszerű. Egy olcsóbb egyszerűbb megoldás az ún. részecske-képen alapuló sebesség-meghatározás. Hátránya, hogy alkalmazása csak 2D nézetmezőre korlátozódik, ezért csak a halmaz felületi határain alkalmazzák. Azonban ha ezek a technikák nem állnak rendelkezésre, akkor maradnak az ún. „roncsolásos” mintavételezési módszerek, melyek esetében halmaznak egy részét kivéve és azt vizsgálva próbálunk az egész halmazra vonatkozó következtetéseket levonni.

Az egyik tanulmányban (Pantaleev et al., 2016) egy laboratóriumi lapátkeverőben létrejövő keverési viszonyokat vizsgálták diszkrét elemes szimulációk segítségével. A lapátkeverő egy 350 mm hosszú és 220 mm átmérőjű hengerben helyezkedik el. A mérések során különböző nedvességtartalmú alumínium-szilikát (zeolit) szemcsékkel töltötték fel a lapátkeverő berendezést, majd a keverés megkezdése után adott időközönként mintákat vettek a halmazból. A mintavételezés 8 különböző helyről történt (2.22. ábra).



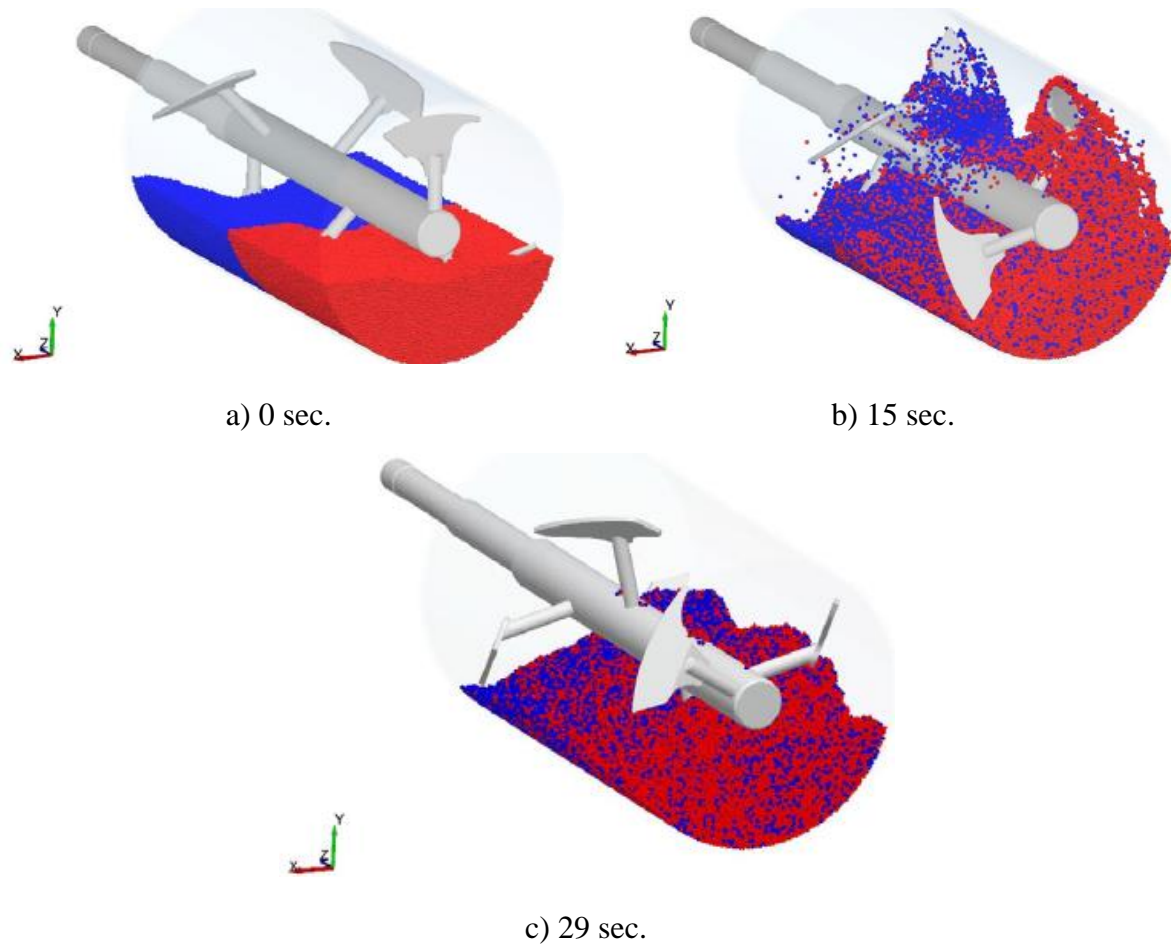
2.22. ábra A lapátkeverőben kijelölt mintavételi helyek (Pantaleev et al., 2016)

A keverési arány meghatározásához a mérés előtt a különböző nedvességtartalmú zeolit szemcséket eltérő színűre festették. A mintavételezést követően egy koloriméter segítségével megállapították, hogy a minták hány százalékban tartalmazza a nedvesebb és a szárazabb szemcsét.

A keverési arányt először a szemcsekonzentráció relatív szórásaival határozták meg. A relatív szórás időbeli változása mutatja a keverési arány alakulását, melyet egyben a keverési folyamat teljesítményének neveznek a szerzők.

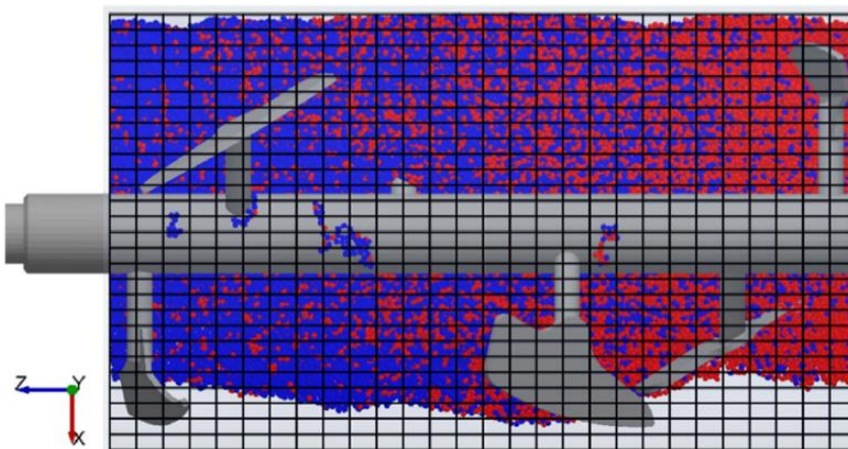
A méréseknél alkalmazott eljárást a diszkrét elemes szimulációknál is elvégezték. A keverési folyamatot modellezéshez az EDEM Academic diszkrét elemes programrendszert használták. A henger és a keverő anyaga acél volt. A szemcsék méretét két nagyság renddel megnövelték a számítási idő csökkentése érdekében. A zeolit szemcsék közötti kohéziós kapcsolatok leírására egy elasztovizkoplasztikus kontakt modellt (Thakur et al., 2014) alkalmaztak. A modell paramétereit egy reométer segítségével határozták meg. A méréseknél és a szimulációknál is 600-600g nedves illetve száraz szemcsét helyeztek el. A lapátkeverő fordulatszáma 100 fordulat/perc volt. A keverési folyamat kiindulási, köztes és végállapotait mutatja a következő ábra.





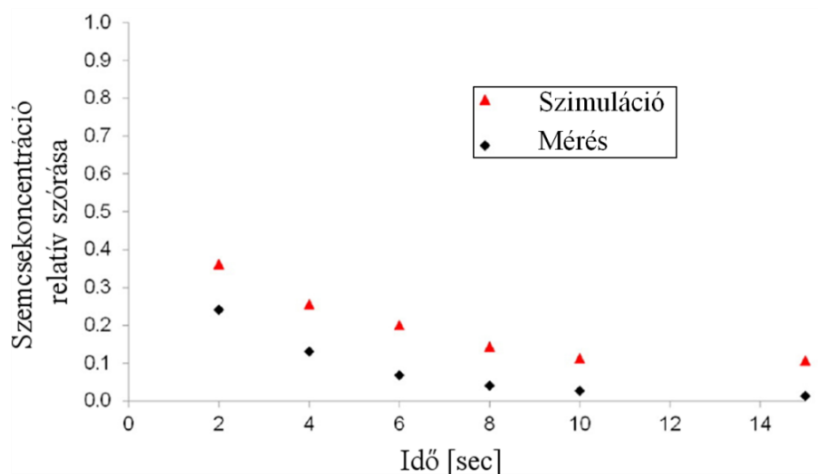
2.23. ábra A keverés DEM szimulációja a) keverés előtt b) keverés közben c) keverés után (Pantaleev et al., 2016)

A szimulációkban a szemcsekonzentráció meghatározásához kis térfogatú cellákat helyeztek el a modell térben (ábra). Az EDEM szoftverkörnyezetben lehetőség van az egyes cellákban lévő szemcsék mozgási energiájának, számának, sebességének, tömegáramának, stb. lekérdezésére (2.24. ábra).



2.24. ábra A modell teret felosztó cellák

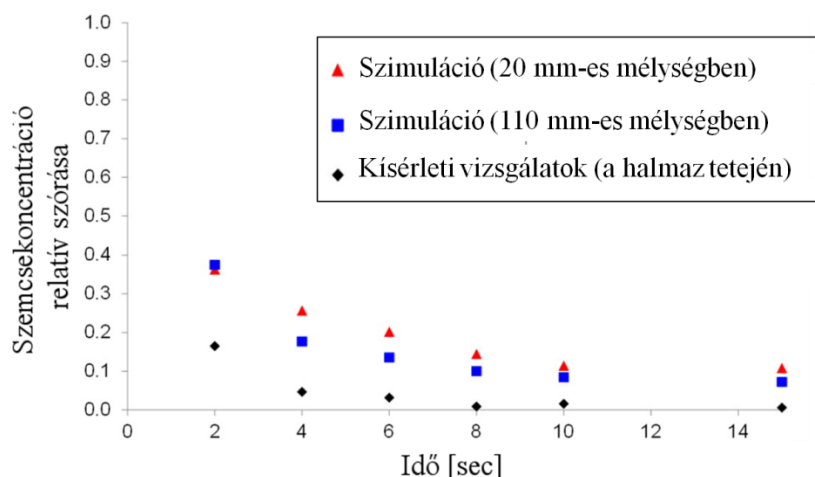
A mérési és a szimulációs eredmények összehasonlításánál azt tapasztalták, hogy a szimuláció a szemcsekoncentrációt túlbecsüli, azaz a keverési arány kisebb lesz, mint a valóságban (2.25. ábra).



2.25. ábra A mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása a keverő közepéről vett minták esetében

Ez az eltérés csökken, ha a keverő közepéről (3-as és 6-os mintavételi helyek) veszik a mintákat. Az összehasonlítási eljárás során tapasztalt eltéréseknek számos oka lehet. Ilyenek például a szimulációban alkalmazott növelt szemcseméret hatása, valamint a modellteret felosztó cellák mérete (Alian et al., 2015).

A kérdés az volt, hogy a halmaz tetején kialakult szemcsekoncentráció mennyire reprezentatív a teljes halmaz szempontjából. A kísérleti vizsgálatok során az anyaghalmaz tetejéről vették a mintákat. Az szemcsehalmaz közepéről nem lehetett mintát venni anélkül, hogy a szemcsék ne keveredjenek tovább. A szimulációkban azonban egyszerűen meg lehetett határozni az adott mélységben kialakult szemcsekoncentrációt (2.26. ábra).

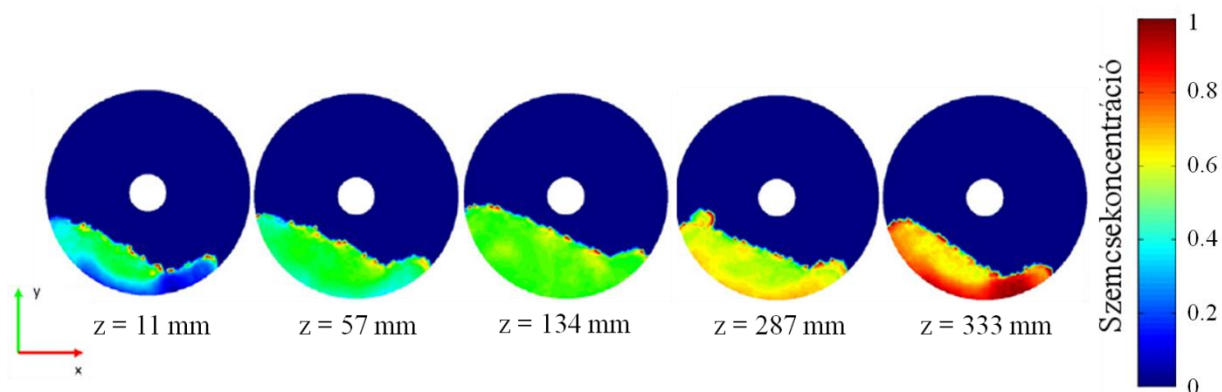


2.26. ábra A mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása a keverő közepéről vett minták esetében

Az ábrán látható eredmények között jelentős az eltérés. Ebből következik, hogy az anyagalmaz felületén kialakult keverési aránnyal nem lehet az egész halmazra vonatkozó következtetéseket levonni.

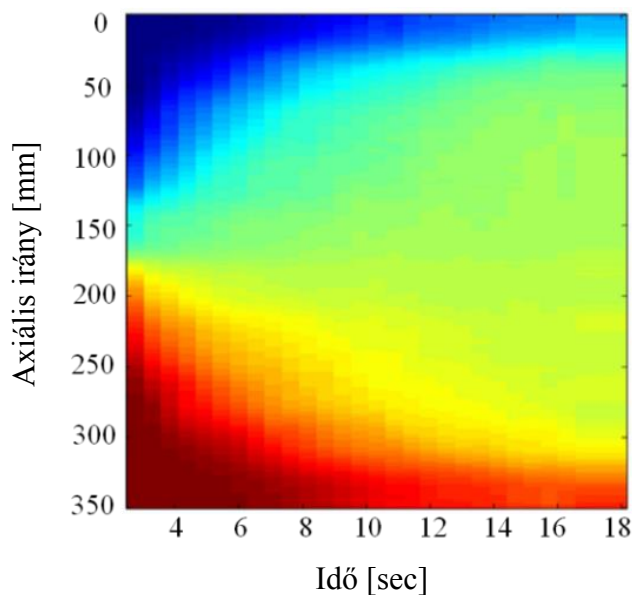
Egy másik módszert is alkalmaztak a keverési folyamat hatékonyság meghatározása. A Particle Analytics Limited cég kifejlesztett egy olyan szoftvert (2016), mely a DEM szimulációk eredményét felhasználva kontinuum alapú számításokat végez. Ezzel a számítási eljárással meghatározható a kialakult feszültségmező, a hőátadás hatékonysága, valamint a különböző tulajdonságú szemcsék eloszlása a halmazon belül.

A szoftver segítségével több függőleges síkot vettek fel a keverő tengelye mentén és a metszetekben nézték a szemcsekonzentrációt a folyamat végén (2.27. ábra).



2.27. ábra A szemcsekonzentráció alakulása a keverő hossz tengelye mentén

A skálán az 1-es és a 0 értéknél teljesen elkülönül a két féle szemcse. Az ideális keverésnél a szemcsekonzentráció értéke 0,5. Az ábrán látható, hogy a keverő szélein (z = 11 mm és z = 333 mm) a keverés hatása már nem érvényesül. Középen azonban egyenletes keverés valósul meg. A szoftverben lehetőség van arra is, hogy az axiális irányban a kikért értékeket átlagoljuk (2.28. ábra).



2.28. ábra A keverés időbeli alakulása a keverő tengelyirányában

Az ábrán látható, hogy kezdetben a szemcsék elkülönülnek, majd az idő függvényében a kevert zóna egyre növekszik (kezdeti szegregáció csökken). A keverő szélein azonban a keverőhatás már nem érvényesül és emiatt holt zónák alakulnak.

A szimulációs eredmények arra utalnak, hogy halmaz felszínén kialakult keverési arány nem reprezentálja a teljes térfogatban lejátszódó keveredést. A tanulmányból kiderül, hogy a keverés hatékonyságának meghatározása néhány módszer már létezik (szemcsekoncentráció relatív szórása, a szemcsekoncentráció átlagolása különböző tengelyek mentén stb.). Azonban ezeknek az eljárásoknak a megbízhatósága kérdéses. Ez abból is látható, hogy a szakirodalomban a keveréssel foglalkozó cikkek és tanulmányok nagy része 2-3 módszert is használ a keverési arány meghatározására (Golshan et al., 2017).

Összességében kimondható, hogy a diszkrét elemes módszer alkalmas a szállító/keverő csigákban lezajló anyagáramlási folyamatok modellezésére, elemzésére.

## **2.5. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése**

Munkám során részletesen tanulmányoztam a silószárítókban alkalmazott terménykeverő berendezések felépítését, működési elvüket valamint az üzemeltetésük során felmerülő főbb problémákat. Ezek után összefoglaltam a szemcsés anyagkeverők különleges mechanikai viselkedésből eredő problémákat, valamint bemutattam a diszkrét rendszerek modellezésére kifejlesztett új numerikus eljárást.

A szakirodalom áttekintése és egy keverő berendezéseket forgalmazó cég felkeresése után megbizonyosodtam arról, hogy a tervezés és az üzemeltetési paraméterek meghatározása tapasztalati úton történik. A HGCA tanulmányában (Bruce et al., 2013) kísérleti vizsgálatokkal bebizonyították, hogy a halmaz keverésével csökkenthető a nedvességtartalom inhomogenitása, arra azonban nem tértek ki, hogy mi történik akkor, ha a keverést befolyásoló paramétereket (levélátmérő, fordulatszám, menetemelkedés) változtatják. Az ehhez szükséges elméleti háttér még nincs kidolgozva. Az üzemeltetési paraméterek rossz megválasztása jelentős többlet- költségekkel és a termény minőségének romlásával is járhat.

Szintén fontos kérdés a szemcsés halmazok esetében a keverési hatékonyság definiálása és meghatározása, hiszen a kísérleti és a számított eredményeket össze kell hasonlítani valamilyen módon. Ez azonban nem egyszerű feladat, mert már a kísérleti vizsgálatoknál alkalmazott mintavételi módszereknek is számos hátránya lehet. A hatékonyság számszerűsítésére már léteznek megoldások azonban megbízhatóságuk kérdéses.

A szemcsés halmazok mechanikai viselkedésének leírására a kontinuummechanika nem alkalmas. A számítástechnika gyors fejlődésének köszönhetően a 1990-es években vált elterjedtté a DEM a mérnöki gyakorlatban. A módszer folyamatosan fejlődik, egyre bonyolultabb problémák modellezhetők ezzel az eljárással. A módszer hátránya, hogy nagyszámú szemcserendszerek esetén a számítások heteket sőt, akár hónapokat is igénybe vehetnek.

A szakirodalomban lévő hiányosságokat figyelembe véve határoztam meg a kutatómunkám során kitűzött célokat és fogalmaztam meg téziseimet.

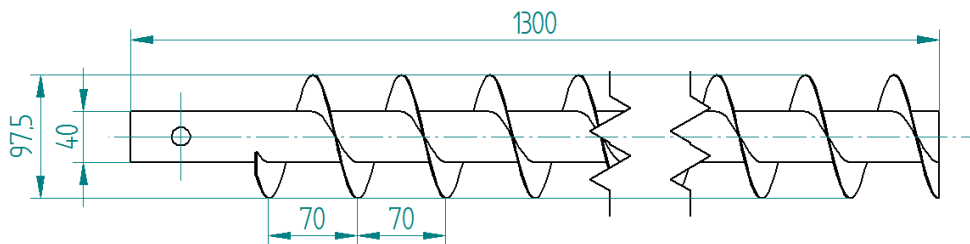
### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

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

#### 3.1. Kísérleti berendezés létrehozása

A keverőcsigák által létrehozott szemcsemozgás-viszonyok meghatározására első lépésben egy olyan kísérleti berendezést kellett létrehozni, mely képes reprezentálni az ipari szárítóknál 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. A henger közepén helyezkedik el a keverőcsiga. Az iparban használatos keverőcsigák geometriája gyártótól függően változik. Az általam választott keverőcsiga méretei a 3.1. ábrán láthatóak. A keverőcsigát egy frekvenciaváltóval felszerelt hajtómotor forgatta ékszíjhajtás segítségével (3.2. ábra).



3.1. ábra A kísérleti berendezéshez használt keverőcsiga méretei



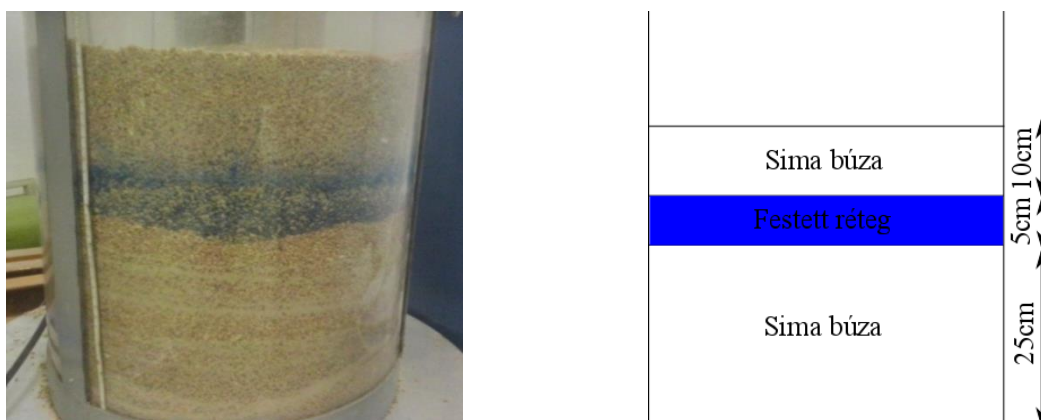
3.2. ábra A kísérleti berendezés 3D-s modellje

Fontos megemlíteni, hogy a létrehozott kísérleti berendezés keverőcsigája álló, rögzített tengely körül forog. A valóságban ezek a csigák meghatározott mozgáspályákon mozognak a szárító-, tárolótérben elhelyezett anyagalmazban, mely jelentősen nehezíti a

szemcsemozgások leírását. Célom elsősorban az volt, hogy a haladó mozgást nem végző tengely körül kialakult mozgásokat meghatározzam.

### 3.2. A mérési módszer bemutatása

A vizsgálatokat búza halmazzal végeztem. Annak ellenére, hogy a plexihenger átlátszó, a csiga közvetlen környezetében létrejövő szemcsemozgásokat nem lehet megfigyelni, hiszen ahhoz „félbe kéne vágni” a hengert és a csigát. A szemcsék mozgásának meghatározásához egy színezett búza réteget helyeztem el adott magasságban, a hengerben (3.3. ábra). Négy mintavevő pontot helyeztem el a csiga tengelyétől különböző távolságban: egyet közvetlenül a csiga mellett, a többi 100, 200 és 300 mm-es távolságban. A motor fordulatszáma 15 rad/sec volt. A mérést 10 fordulat megtétele után állítottam le. Magasabb fordulatszámon nem lehetett kivitelezni a méréseket, mert egyszerűen nem lehetett látni, hogy pontosan mikor szállítja fel a színezett réteget a keverőcsiga. A mérés leállítását követően kis átmérőjű, alul zárható plexi csövek segítségével, mintákat vettem a halmazból (3.4-3.5. ábra). A mintavevő csőben a színezett réteg elhelyezkedéséből adódóan meghatározható, hogy mekkora a színezett szemek függőleges elmozdulása. A méréseket háromszoros ismétléssel végeztem.



3.3. ábra Az egyes rétegek elhelyezkedése a tartályban



3.4. ábra A berendezés és a mintavevő pontok



3.5. ábra A mintavevő cső



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. A mért eredményeket a 3.1. táblázat mutatja.

3.1.táblázat A mért függőleges elmozdulások

-	1. mérés	2. mérés	3. mérés
Távolság a csiga szélétől [mm]	90 mm	85 mm	95 mm

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.

### 3.3. 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 (3.6. ábra). A doboz méretének 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.



3.6. ábra A módosított kísérleti berendezés

A vizsgálatok azt mutatták, hogy a dobozban lejátszódó keverési folyamat nagyon hasonló a hengeres tartályban történő keveréshez (3.7. ábra).



3.7. ábra Az álló és nyugvó zónák elkülönülése

A keverés során jól látszott, hogy nyugvó és a mozgó részek jól láthatóan elkülönülnek egymástól. A 3.7. ábrán ez onnan látszik, hogy a nyugvó zónában sokkal több a por és emiatt nehezebben lehet látni a szemcsék alakját.

### 3.4. Szemcsék szilárdságának meghatározása

A keverősigák optimális fordulatszámának meghatározásánál az átkevert anyag mennyisége mellett a szemcsék között fellépő erők is jelentős szerepet kapnak. Hiszen, 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 (3.8. ábra).



3.8. ábra Az INSTRON 5581-es anyagvizsgáló berendezés



A gép terhelhetősége egy tengelyű húzásra és nyomásra 50 kN. A keresztfej maximális elmozdulása 2 méter (a helyzet-pontossága +/-0,02 mm). A keresztfej sebességét 0.001 mm/perctől 1000 mm/perces tartományban (a sebesség pontossága 1%) lehet változtatni.

A berendezést számítógép vezérelte, az elektronikai mintavételi frekvencia 500 Hz, az A/D átalakító 32 bites. A méréseknél alkalmazott hitelesített mérő cella terhelhetősége 0.5 N-tól 500 N-ig terjed (pontossága 0,5% a mért értékre vonatkoztatva).

Az anyagvizsgáló gépet úgy programoztam, hogy ha a nyomóerő hirtelen (0.001 sec alatt) 40%-ot csökken, akkor a gép álljon le és térjen vissza alaphelyzetbe.

A vizsgálatok során a keresztfej sebessége 3mm/perc volt. A következő ábrán látható a nyomó lapok elhelyezkedése. A mérési eredmények a 4.2. alfejezetben láthatóak.



3.9. ábra A szemcsék nyomóvizsgálatokhoz használt nyomólapok

### 3.5. A keverési folyamat diszkrét elemes modellezése

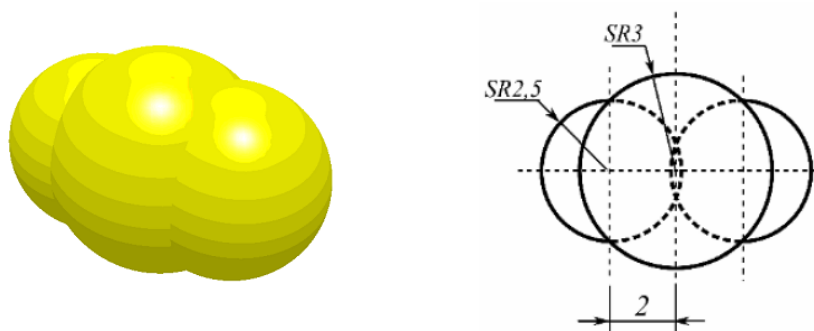
A szakirodalomban fellelhető cikkek és tanulmányok legnagyobb része az anyagmozgató gépekben található szállítócsigákban kialakult szemcseáramlást vizsgálja. Ezek egyike sem tér ki a függőleges, nyitott keverőcsigák által létrehozott áramlási viszonyokra. A modellezéshez a mérnöki gyakorlatban egyre nagyobb teret hódító diszkrét elemes módszert alkalmaztam. A szimulációkat az EDEM diszkrét elemes programrendszerrel végeztem, melyet az Egyesült Királyságban fejlesztettek ki.

#### 3.5.1. Szemcsehalmaz és kölcsönhatások modellezése

A gyakorlatban jelentkező problémák többségénél a diszkrét elemes modellezést még nehéz hatékonyan használni. Ennek legfőbb oka, hogy a (valóságban) több millió szemcséből álló halmaz viselkedését kell modellezni, amit a mai, modern számítástechnikai eszközökkel is nehezen lehet megoldani. Bizonyos esetekben a számítások hónapokig is eltarthatnak. A számítás időigényét különféle módszerekkel lehet csökkenteni. A berendezés méreteinek csökkentésével, a szemcsék méreteinek növelésével illetve ezek kombinációjával kisebb nagyobb mértékben csökkenthető a számítás ideje. Az időlépték megválasztása is jelentős

szerepet játszik a futtatás idejében. Bármelyik megoldást is választjuk, nagyon kell figyelni arra, hogy a halmaz viselkedése ne változzon meg a valósághoz képest.

A keverőcsiga körül kialakult áramlási viszonyok modellezéséhez a 2.3.3.4. fejezetben bemutatott Hertz-Mindlin csúszásmentes kapcsolati modellt alkalmaztam. A modellezést Keppler és társai munkája (2012) alapján végeztem. E tanulmányban a búzaszemeket három egymásba metsző gömb segítségével modellezték. A számításigény csökkentése céljából a szerzők a valóságosnál nagyobb méretű szemcséket alkalmaztak. A búzaszem méretei és diszkrét elemes modellje a 3.10. 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 szerzők a 2.3.1. fejezetben bemutatott nyíróvizsgálattal határozták meg a szemcsék mikromechanikai paramétereit, melyek értékei a 3.2. táblázat mutatja. A kölcsönhatásba lépő testek között értelmezni kell az ütközési-, súrlódási- és gördülési ellenállási tényezőket. A mikromechanikai paramétereket kevertáramú szárító berendezésen végzett mérésekkel hitelesítették (Keppler et al., 2012).



3.10. ábra Egy búzaszem diszkrét elemes modellje (Keppler et al., 2012)

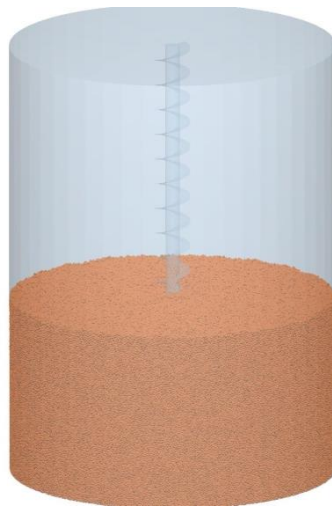
3.2. táblázat A búza és az acél mikromechanikai paramétereit (Keppler et al., 2012)

Mikromechanikai jellemző	Búza	Acél
Poisson tényező, $\nu$	0,4	0,3
Csúsztató rugalmassági modulus, $G$ , Pa	$3,58 \cdot 10^9$	$8 \cdot 10^8$
Sűrűség, $\rho$ , $\text{kg/m}^3$	1460	7500
Ütközési tényező, $C_r$	Búzára $\nu$ : 0,5	-
	Acélra $\nu$ : 0,6	Búzára $\nu$ : 0,5
Súrlódási tényező, $\mu_0$	Búzára $\nu$ : 0,3	-
	Acélra $\nu$ : 0,25	Búzára $\nu$ : 0,25
Gördülési ellenállás tényezője, $\mu_r$ , m	Búzára $\nu$ : 0,01	-
	Acélra $\nu$ : 0,01	Búzára $\nu$ : 0,01

A diszkrét elemes szimulációknál a fent említett szemcsegeometriát illetve mikromechanikai paramétereket használtam. Bár az alkalmazott szemcseméret nagyobb a valóságosnál (számítási igény csökkentése miatt), a kísérleti vizsgálatok és a szimulációk összehasonlításánál azt tapasztaltam, hogy az eredmények jó egyezést mutatnak. Ebből az következett, hogy a keverési folyamat modellezhető Keppler és tsai (2012) által definiált diszkrét elemmel. A szimulációk során azonos méretű szemcsékkel dolgoztam.

### 3.5.2. A keverő berendezés diszkrét elemes modellje

A számítások megkezdéséhez létre kellett hozni a keverőcsiga és a plexihenger diszkrét elemes modelljét. A plexihengert az EDEM szoftverben lehetett definiálni, a keverőcsigát azonban CAD modellként kellett beimportálni (3.11. ábra). A modell méretei megegyeztek a kísérleti berendezés méreteivel.



3.11. ábra A keverő rendszer diszkrét elemes modellje

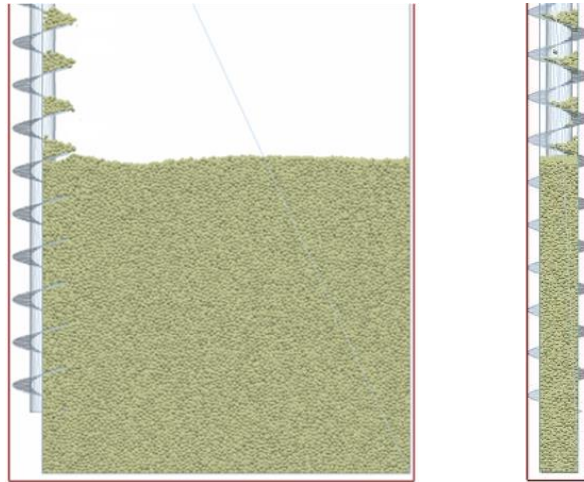
A modell összesen 1 208 210 db szemcsét tartalmazott. Mivel a szemcsés anyaghalmozok mechanikai viselkedését legnagyobb mértékben a halmaz belső szerkezetére jellemző súrlódási viszonyok határozzák meg, ezért a szimulációk során a plexi henger anyagjellemzői megegyeztek az acélével. A határoló fal anyagának nincs hatása a szemcsemozgásokra mivel a szimulációk esetében is ki kell alakulnia a mozgó és nyugvó zónáknak, tehát a fal közvetlen környezetében már nem mozognak a szemcsék.

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 feltevés az volt, hogy a szemcsék függőleges irányú mozgása van a legnagyobb hatással a szárítás hatékonyságára, ezért a szimulációknál a plexihengernek csak egy „szeletét” vizsgáltam (3.12. ábra).

A határoló falakat (modellteret) súrlódásmentes anyagként definiáltam (3.3. táblázat), azért hogy ne legyen hatással az áramlási viszonyokra.

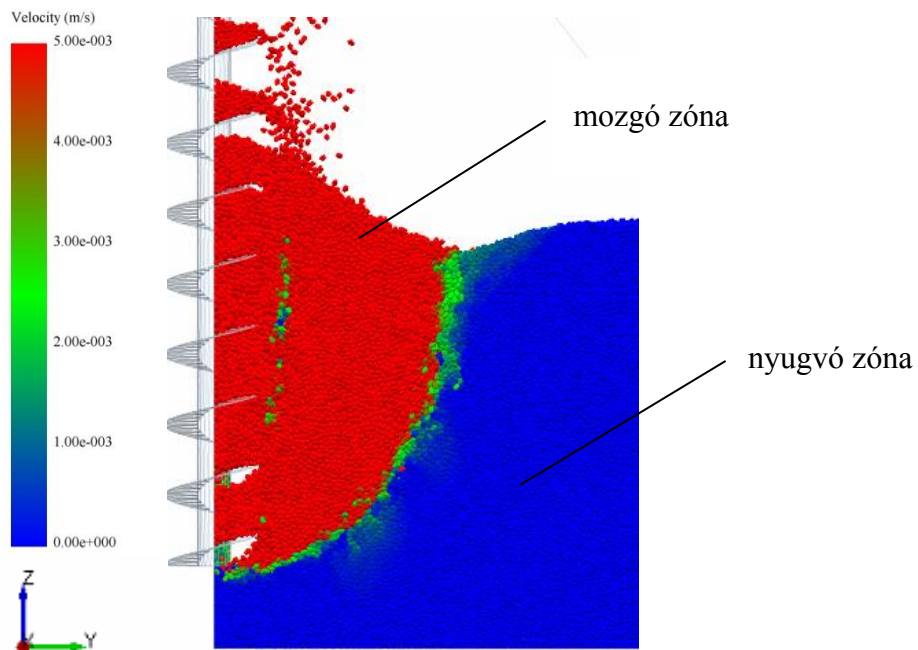
3.3.táblázat A súrlódásmentes fal mikromechanikai paramétere

Poisson tényező, $\nu$	Csúsztató rugalmassági modulus, $G$ , Pa	Sűrűség, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Ütközési tényező, $C_r$	Súrlódási tényező, $\mu_0$	Gördülési ellenállás tényezője, $\mu_r$ , m
0,25	1e+08	2500	0	0	0



3.12. ábra A keverő berendezés egyszerűsített diszkrét elemes modellje

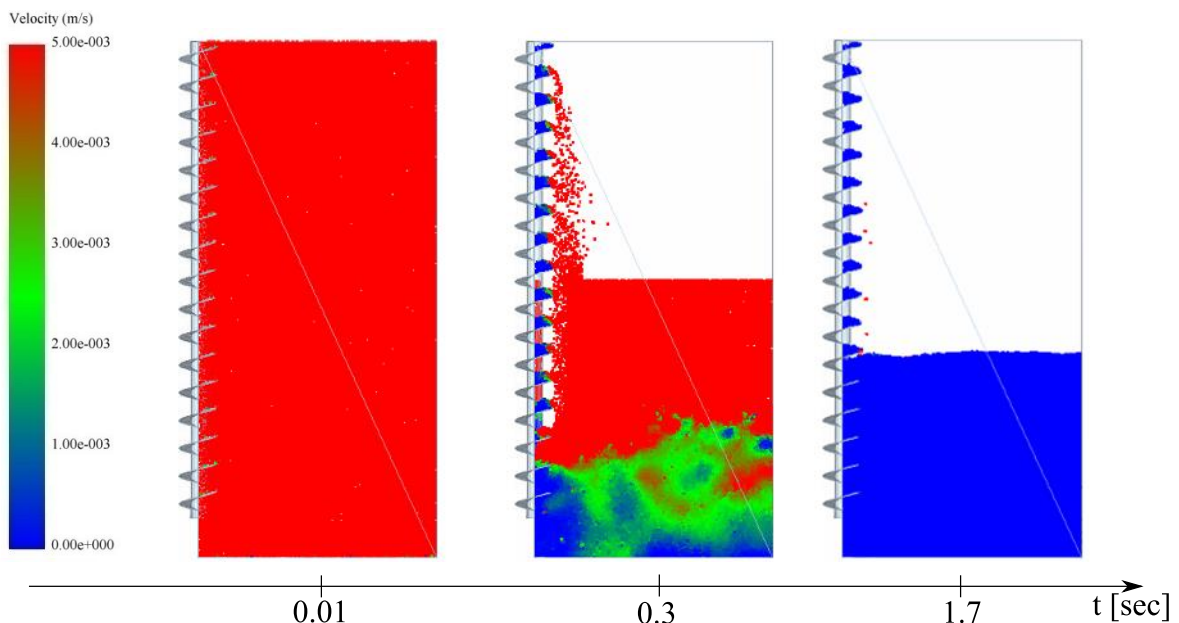
A számításoknál a legnagyobb problémát az jelentette, hogy a kezdeti modelleknél a szimuláció során nem alakult ki az a nyugvó réteg a halmazban, amely viszont a méréseknél is megfigyelhető volt (Kuo et al., 2003). Ha a modellter határoló falát elég messze helyeztem el a csigától ( $> 0,4$  m) és sebesség szerint megszíneztem a szemcséket, jól elkülönült egymástól a nyugvó és a mozgó zóna.



3.12. ábra A nyugvó és mozgó zónák elkülönülése a szimulációk során

### 3.5.3. A szimulációs folyamat leírása

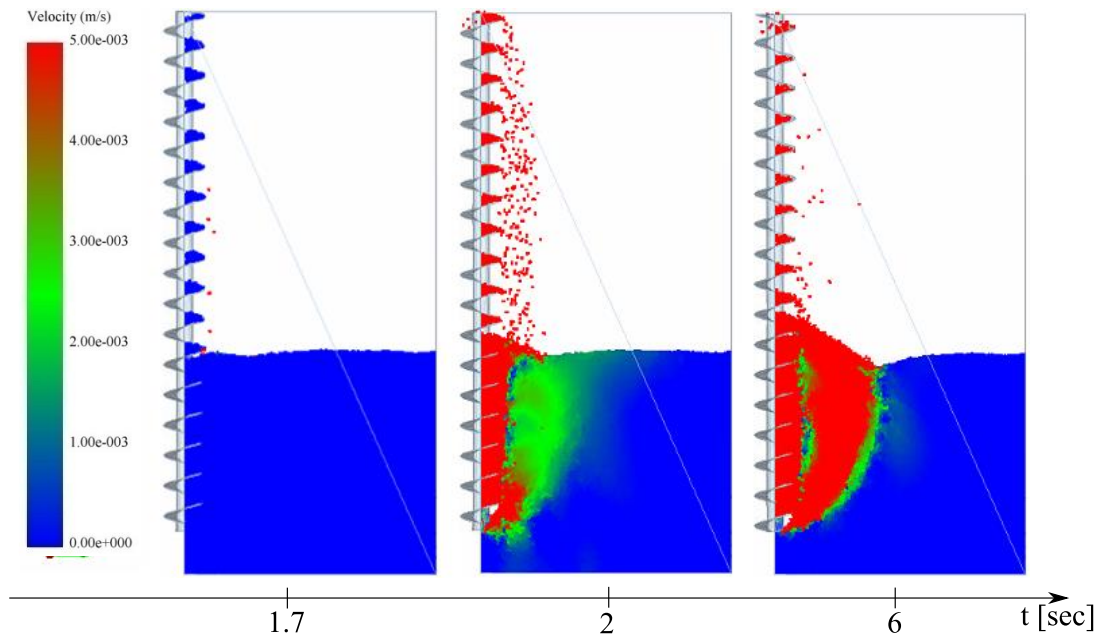
A szimulációk során a keverőcsigák geometriáját és fordulatszámát változtattam, azonban a keverési folyamat modellezése minden esetben azonos módon történt. Az első lépés a szemcsék véletlen generálása a modellterben. Szabályos elrendeződést könnyű ugyan létrehozni, azonban ez a halmazgenerálási eljárás torzíthatja a halmaz viselkedését. A véletlenszerű halmazgenerálási eljárás lehetőségeit számos fejlesztő mérnök kutatja. Az EDEM szoftver gravitációs eljárás segítségével éri el a szemcsék véletlenszerű elhelyezkedését. Ez azt jelenti, hogy a szimuláció első lépésében véletlenszerűen generált szemcséket helyeztem el a modellterben, amik a gravitáció hatására lehullnak a modellter aljára. A keverési folyamatot akkor indítottam el, amikor a rendszer elérte az egyensúlyi állapotot. Mivel a számítás ezen fázisában a keverés még nem indult el, a „kezdesi” időpillanat minden esetben 1,7 s volt, geometriától függetlenül. Ez után az időpillanat után lehetett a keverési folyamatot indítani. A szimulációs folyamatot a szemcsegenerálástól a statikus állapot eléréséig a 3.13. ábra mutatja. A színek a szemcsék sebességét jelölik. A szemcsék közötti kapcsolat leírására a 2.3.2.4 alpontban bemutatott Hertz-Mindlin kapcsolati modellt alkalmaztam, mely rugókból és csillapításokból áll és ez által meg kellett várni, míg a rezgések lecsillapodnak. A csillapodáshoz szükséges időt tapasztalati úton lehetett meghatározni. A szemcseszám geometriától függően 137600-138000 db volt.



3.13. ábra A szemcsehalmaz generálása és az egyensúlyi állapot elérése

A számítási idő és a mérések ideje megegyeztek a modell validálásánál, tehát akkor állítottam le a szimulációt, ha elérte a kísérleti vizsgálatoknál mért időt. A további vizsgálatoknál máshogy jártam el. 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.





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

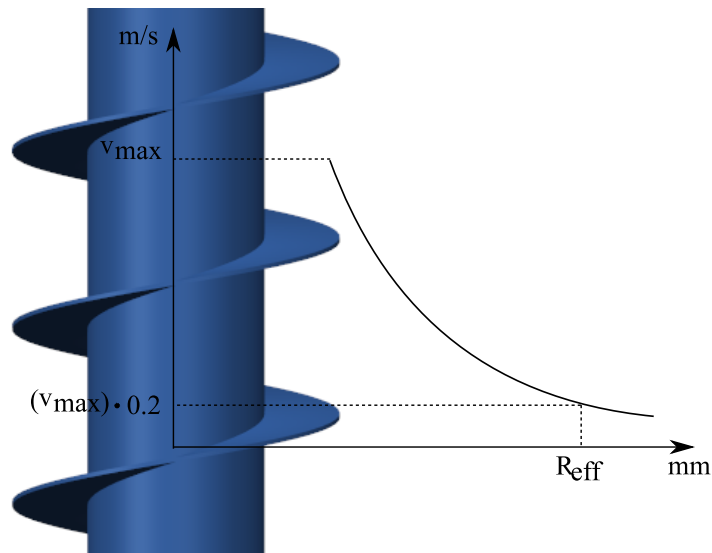
A dinamikus egyensúlyi állapot eléréséig szükséges időt tapasztalati úton lehetett meghatározni. Különböző geometriák, fordulatszámok esetében ez az idő változott.

A 3.14. ábra mutatja a szimulációs folyamatot a keverés elkezdésétől a dinamikus egyensúlyi állapot eléréséig. A szimulációk során alkalmazott időlépték  $\Delta t = 4,21 \cdot 10^{-5} \text{ sec}$  volt. Ezen állapot kialakulása függ a fordulatszámtól, a menetemelkedéstől és a levélméretől, ezért a különböző beállításoknál más-más időpillanatban alakult ki a végleges áramlási kép. Ennek az átkevert térfogat számításánál lesz jelentősége, melyet egy későbbi fejezetben szeretnék bemutatni. A keverőrendszer kalibrált diszkrét elemes modelljének megalkotása után a következő lépésben meg kellett oldani a különböző geometriákkal és fordulatszámmal futtatott szimulációk összehasonlítását. A következő fejezetben bemutatom a keverési hatékonyság számszerűsítésének menetét.

### 3.6. A keverési hatékonyság számszerűsítése

#### 3.6.1. 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 (3.15. ábra). A 20% egy önkényes felvett érték, mellyel jól szemléltethetők az effektív sugarak alakulása. A sebesség értékeket a halmaz magasságának a felénél határoztuk meg.



3.15. ábra Az effektív sugár meghatározása

Az effektív sugár definíciója:

$$v(x = R_{eff}) = 0,2 \cdot v_{max}. \quad (3.1)$$

A keverési hatékonyság definíciója:

$$e = \frac{R_{eff}}{R}. \quad (3.2)$$

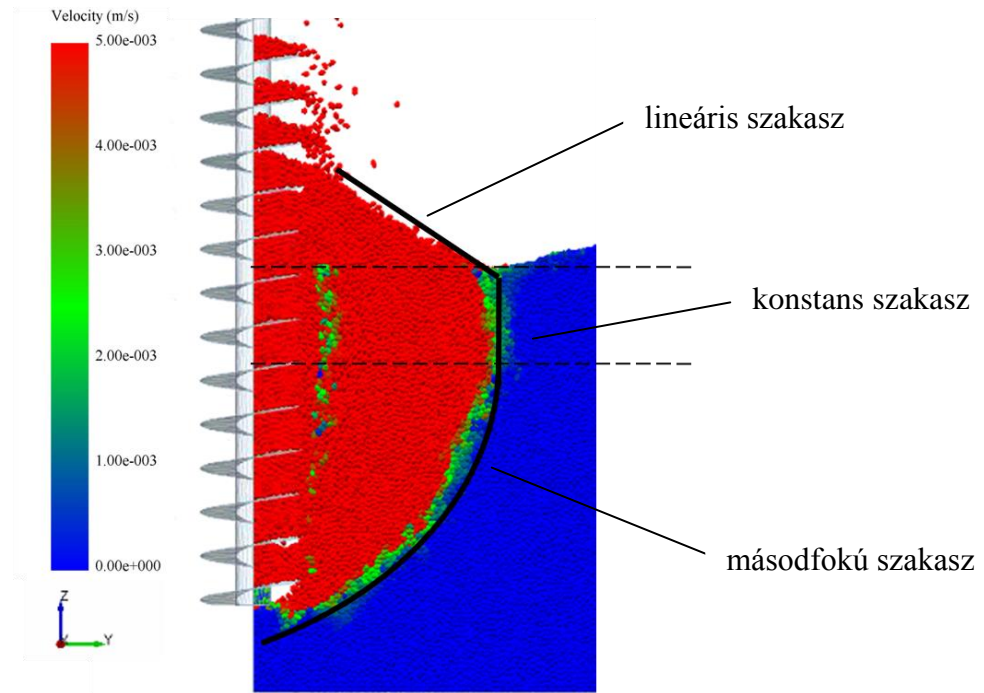
Az effektív sugár bevezetésével összehasonlíthatóvá válnak a különböző csigalevel-átmérővel, különböző fordulatszám mellett kapott eredmények.

### 3.6.2. Szemcsék keveredésének mértéke

Az effektív sugáron kívül egy másik módszert is alkalmaztam a keverés hatékonyságának jellemzésére. A módszer lényege az volt, hogy a szimuláció során a hengerben elhelyeztünk 5000 db jelölt szemcsét, majd az így kapott halmaz tetejére még további 15000 db jelöletlen szemcse került. A keverés elindítása után meghatároztuk, hogy mennyi jelölt szemcse keveredett az eredeti 15000 db jelöletlen szemcse közé.

### 3.6.3. Az átkevert térfogat meghatározása

A keverőcsigák teljesítményét az effektív sugárral határoztam meg. Azonban, ha a fordulatszám túl kicsi, a visszaáramlás még nem alakul ki és ez befolyásolhatja az eredményeket, mint azt az előző fejezetben is láthattuk. 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 határait három függvényt lehet illeszteni, melyekkel a tartomány jól körbehatárolható (3.16. ábra).



3.16. ábra Az átkevert réteg határait illesztett függvények

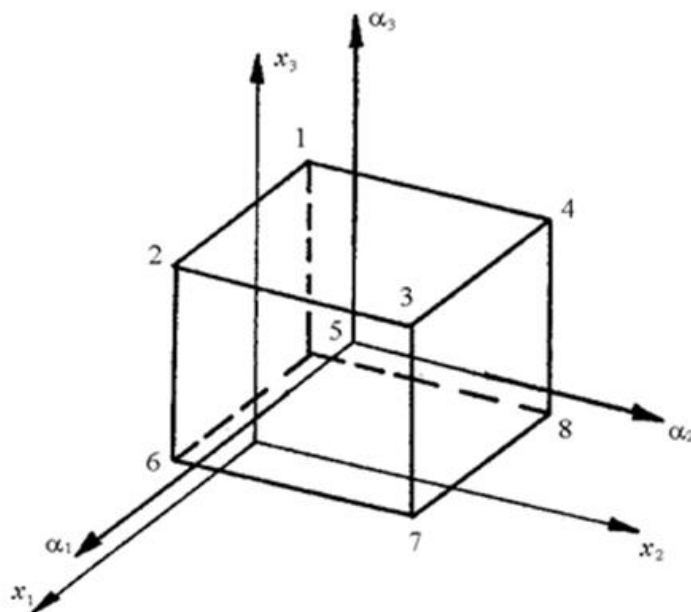
A függvényeket a függőleges tengely körül megforgatva forgástestet kapunk, melynek a térfogata lesz az átkevert térfogat. A forgástesteket illetve azok térfogatait a Wolfram Mathematica szoftver segítségével határoztam meg. A szimulációs időt minden esetben minimum 6 sec – ra állítottam. Ennyi idő alatt 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 szemcsegeometriák esetén is megvizsgáltam az átkevert tartomány jellegét. A vizsgálatokhoz faktoriális kísérletet alkalmaztam, melynek menetét a következő fejezetben ismertetem.

#### 3.6.4. Az átkevert térfogata vizsgálata faktoriális kísérlettel

A továbbiakban azt vizsgáltam, hogy az átkevert térfogat hogyan változik, ha a keveredést befolyásoló paramétereket változtatom. Ezek a paraméterek a keverőcsiga levélmérője, menetemelkedése és a fordulatszáma. Az átkevert térfogat vizsgálatát teljes faktoriális kísérlettel végeztem. Az eljárás lényege, hogy a jelenséget meghatározó vizsgálati paramétert (mely jelen esetben az átkevert térfogat) a kiválasztott faktorok (levélmérő, menetemelkedés, szögsebesség) függvényében kívánjuk leírni (Csizmadia, 2016). A kísérleti terv és annak értékelése több faktor esetén, azaz a közelítő, jelenséget leíró többváltozós függvény meghatározása igen összetett feladat. A faktoriális kísérlet segítséget nyújt e függvények leírására.

Ha a vizsgálati paraméter és a faktorok adottak, a következő lépésben definiálni kell a vizsgálati tartományt (faktortér). A vizsgálati eredmények e tartományon belül lesznek érvényesek. A faktortér határoló pontjaiban kell kijelölnünk a kísérleti beállításokat. A faktortér háromfaktoros esetben egy téglalapot (3.16. ábra).





3.16. ábra A faktortér szemléltetése háromfaktoros esetben (Csizmadia, 2016)

A vizsgálatok egyszerűsítése érdekében koordináta transzformációt kell alkalmazni, melynek első lépése, hogy minden faktorra megállapítunk egy alapszintet:

$$\bar{x}_i = \frac{x_{imax} + x_{imin}}{2}. \quad (3.3)$$

A transzformált faktort  $\alpha_i$ -nek nevezzük és a koordináta rendszere kezdőpontját helyezzük valamennyi faktor alapszintje által meghatározott pontba. A transzformált faktor vizsgálati tartománya -1 és +1 között kell, hogy legyen. Az  $x_i$  és az  $\alpha_i$  kapcsolata leírható (Csizmadia, 2016):

$$\frac{x_i + \bar{x}_i}{x_{imax} - \bar{x}_i} = \frac{\alpha_i}{1}. \quad (3.4)$$

A transzformációt valamennyi faktorra elvégezve, az  $y$  vizsgálati paramétert az

$$y = y(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m) \quad (3.5)$$

függvényében értelmezzük. A mérési vagy szimulációs eredményekre egy függvényt kell illeszteni a legkisebb négyzetek módszere alapján. A közelítő függvény faktorokban lineáris és háromfaktoros esetben az alakja (a transzformált koordinátarendszerben):

$$y = a_0 + a_1\alpha_1 + a_2\alpha_2 + a_3\alpha_3 + a_{12}\alpha_1\alpha_2 + a_{23}\alpha_2\alpha_3 + a_{13}\alpha_1\alpha_3 + a_{123}\alpha_1\alpha_2\alpha_3 \quad (3.6)$$

Háromfaktoros esetben  $N = 2^3$  azaz 8 kísérleti beállítást kell megvalósítani (Csizmadia, 2016). A 3.4. táblázat összefoglalja a kísérleti beállításokat. A táblázatban minden transzformált faktor +1 és -1 értéket vehet fel.

3.4. táblázat A kísérleti beállítások és a transzformált faktorok előjelei (Csizmadia, 2016)

$\alpha_1$	+				-			
$\alpha_2$	+		-		+		-	
$\alpha_3$	+	-	+	-	+	-	+	-
Jel	$\alpha_1\alpha_2\alpha_3$	$\alpha_1\alpha_2$	$\alpha_1\alpha_3$	$\alpha_1$	$\alpha_2\alpha_3$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	-
Sorszám	1	2	3	4	5	6	7	8

Az együtthatók egyszerű számításához egy ú.n. előjelmátrixot is létre kell hozni (3.5. táblázat). Az első sorba a meghatározandó együtthatókat írjuk, az ez alatti sorba az együtthatókhoz tartozó faktorszorzatokat (Csizmadia, 2016).

3.5.táblázat Az együtthatók előjel mátrixa (Csizmadia, 2016)

E.h.	$a_i$	$a1$	$a2$	$a3$	$a12$	$a13$	$a23$	$a123$	Mérési eredm.		
Sorsz.	-	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_1\alpha_2$	$\alpha_1\alpha_3$	$\alpha_2\alpha_3$	$\alpha_1\alpha_2\alpha_3$	$y_i$	$s_i^2$	$n_i$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	$y_1$	$s_1^2$	$n1$
2	+	+	+	-	+	-	-	-	$y_2$	$s_2^2$	$n2$
3	+	+	-	+	-	+	-	-	$y_3$	$s_3^2$	$n3$
4	+	+	-	-	-	-	+	+	$y_4$	$s_4^2$	$n4$
5	+	-	+	+	-	-	+	-	$y_5$	$s_5^2$	$n5$
6	+	-	+	-	-	+	-	+	$y_6$	$s_6^2$	$n6$
7	+	-	-	+	+	-	-	+	$y_7$	$s_7^2$	$n7$
8	+	-	-	-	+	+	+	-	$y_8$	$s_8^2$	$n8$

A táblázat utolsó három oszlopába a mérési eredmények, a szórásnégyzet és az ismétlések száma szerepel. A (3.6) függvény együtthatóit az

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \alpha_j y_i. \tag{3.7}$$

előjeles átlagszámítással határozhatóak meg. Az eredeti közelítő függvényt úgy kapjuk, hogy a transzformált függvény  $\alpha_i$  faktorai helyére a (3.4) transzformációs összefüggést helyettesítjük (Csizmadia, 2016).

A vizsgálati tartományban jellemző hibahatár számításához először az egyes kísérleti beállításhoz tartozó szórásnégyzeteket kell meghatározni (Csizmadia, 2016)

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_{ji} - \bar{V}_j)^2. \quad (3.8)$$

A közelítő függvény szórásnégyzetét az egyes kísérleti szórásnégyzetek átlagolásával kapjuk:

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2. \quad (3.9)$$

A hibahatárt a Student-féle eloszláspróba felhasználásával, 5%-os szignifikancia –szint mellett határozzuk meg (Csizmadia, 2016):

$$\Delta \varepsilon = t s_\varepsilon. \quad (3.10)$$

A következő lépésben ellenőrizni kell, hogy a tapasztalati szórások azonos elméleti szórásokhoz tartoznak-e. A Fisher-próba (F-próba) alkalmas 2 szórásnégyzet összehasonlítására. Jelen esetben 8 kísérleti beállításhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartozását kell ellenőrizni. Az F-próba mégis alkalmazható, mivel ha a maximális és minimális szórásnégyzet egyezését igazolja, akkor a többi is azonos elméleti szórásnégyzethez tartozik (Csizmadia, 2016):

$$F_{kis} = \frac{s_{\max}^2}{s_{\min}^2}. \quad (3.11)$$

Ha teljesül az

$$F_{kis} \leq F_{\text{táblázat}}, \quad (3.12)$$

akkor a szórásnégyzetek egyezése igazolt. Ha nem teljesül a feltétel, akkor még nem biztos, hogy valamennyi szórásnégyzet nem azonos elméleti szóráshoz tartozik (Csizmadia, 2016). Ekkor a  $\chi^2$ -próbával végezhetjük az ellenőrzést (Bartlett-próba):

$$B = \frac{1}{c} \left[ f_0 \lg s_y^2 - \sum_{j=1}^N f_j \lg s_j^2 \right] \leq \chi^2, \quad (3.13)$$

ahol  $c$  értéke pedig:

$$c = 0,4343 \left[ 1 + \frac{1}{3(N-1)} \left\{ \sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j} - \frac{1}{f_0} \right\} \right]. \quad (3.14)$$

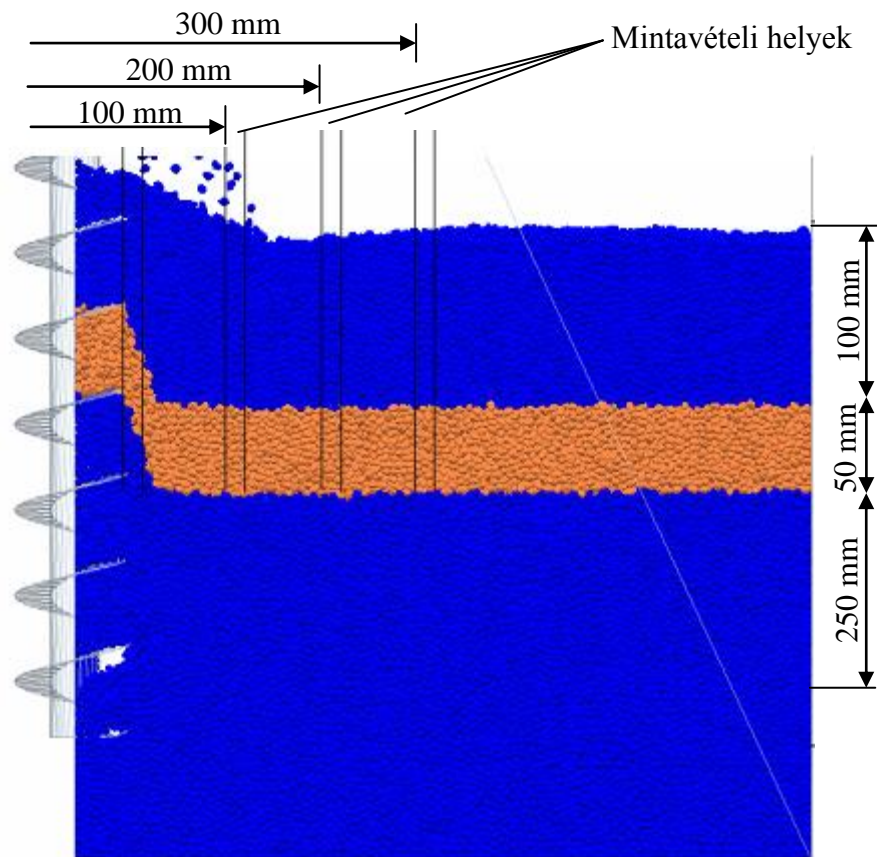
Ha a  $\chi^2$ -próba sem mutat egyezést, akkor szűkíteni kell a vizsgálati tartományt vagy a probléma további műszaki elemzésével kell folytatni a hibák feltárását. Az utóbbi megoldásnál például további faktorokat veszünk figyelembe vagy az esetleges faktorok közötti függetlenséget megszüntetjük.

## 4. EREDMÉNYEK

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

### 4.1. A diszkrét elemes modell validálása

A 3.2. fejezetben bemutatott mérési eredményeket használtam fel a 3.5.2. fejezetben bemutatott egyszerűsített modellem validálására. Az EDEM diszkrét elemes szoftverben lehetőség van arra, hogy a szemcséket megszínezzük és nyomonkövessük a mozgásukat. A szemcséket az egyensúlyi állapot elérése után színeztem meg. A következő ábrán látható a színezett szemcsék helyzete 10 fordulat után (4.1. ábra).



4.1. ábra A szemcsék elhelyezkedése 10 fordulat után

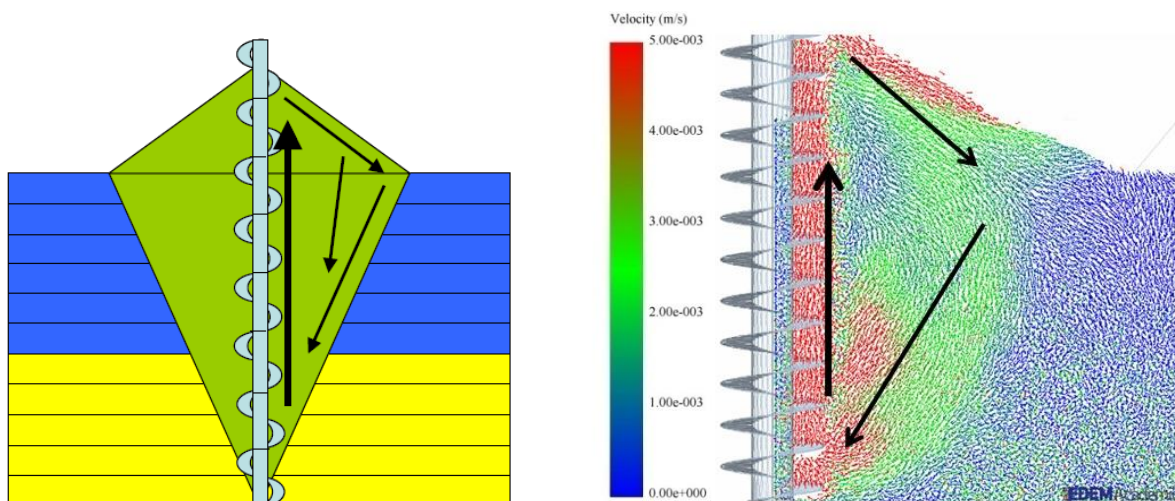
A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy a csiga mellett a szemcsék elmozdulása (95mm) közel azonos a kísérleti vizsgálatoknál mért értékekkel (90-100mm). A halmaz többi részén nem történt elmozdulás.

Ezek után a csigát tovább forgatva összehasonlítottam a DEM szimulációval kapott áramlási képet a szakirodalomban található áramlási képpel (4.3. ábra). Az áramlási képet kísérleti berendezések segítségével határozták meg (4.2. ábra). Azonban az átkevert halmaz alakját

pusztán szemrevételezés alapján adták meg, nem tértek ki a szemcsemozgások részletes meghatározására (Bruce D.M. et al., 2013).



4.2. ábra Kísérleti berendezés



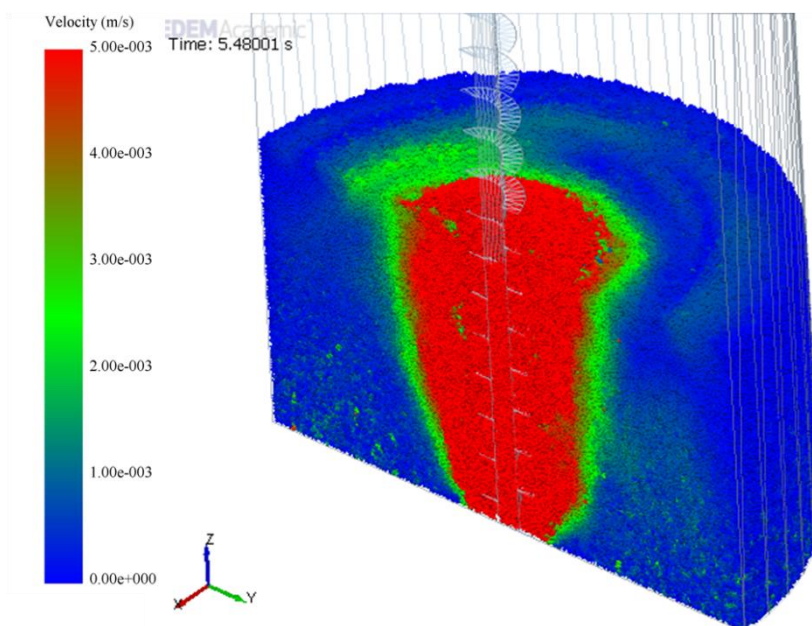
4.3. ábra A szakirodalomban található (Bruce D.M. et al., 2013) és a szimulációkban kialakult áramlási kép

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 esetben egy visszaáramlási folyamat figyelhető meg. A csiga a közvetlen környezetében lévő szemcséket felfelé szállítja. Az elszállított szemcsék helyére új szemcsék áramlanak be oldalról. A halmaz tetején, a csigától bizonyos távolságra a szemcsék lefelé-irányú mozgása figyelhető meg. Ebből a három mozgásból tevődik össze a keverés folyamata. A keverési folyamat során a halmaz többi része - a valósághoz hasonlóan - nyugalomban marad.

A modell helyességének igazolása érdekében szükséges volt további vizsgálatokat végezni.

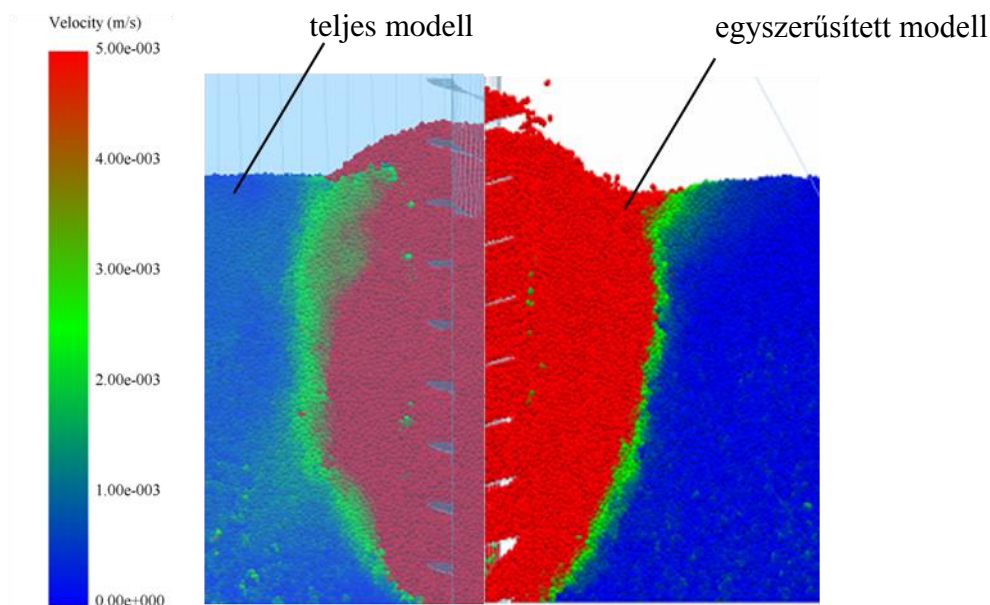
A következő lépésben összehasonlítottam a teljes modellel, az egyszerűsített modellel és a módosított kísérleti berendezéssel kapott elmozdulásmezőket. Az EDEM szoftverben

lehetőség van arra, hogy a halmazt adott síkokkal elmetsszük és megnézzük a halmazon belüli szemcsemozgásokat. A 4.4. ábrán látható a teljes modellben kialakult elmozdulásmező.



4.4. ábra A teljes modellben kialakul sebességmező

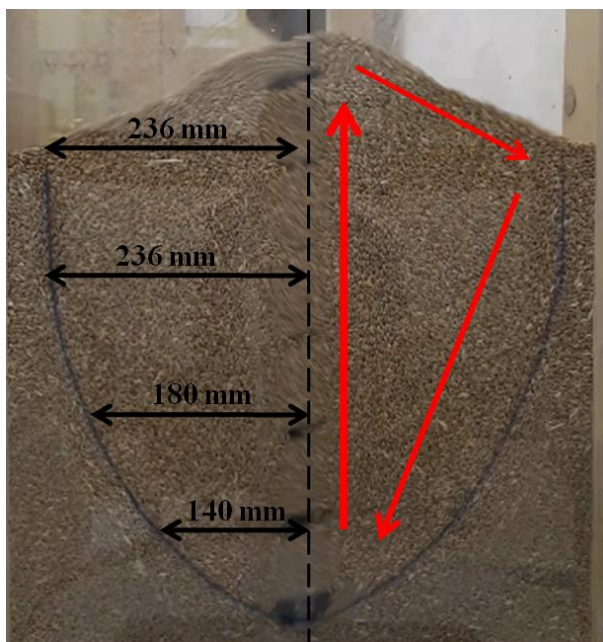
Ha az így kapott áramlási képet összehasonlítjuk az egyszerűsített modellben létrejött szemcseáramlási viszonyokkal, akkor azt tapasztalható, hogy a mozgó zóna mérete és jellege közel azonos mindkét esetben (4.5. ábra).



4.5. ábra A szimulációk összehasonlítása

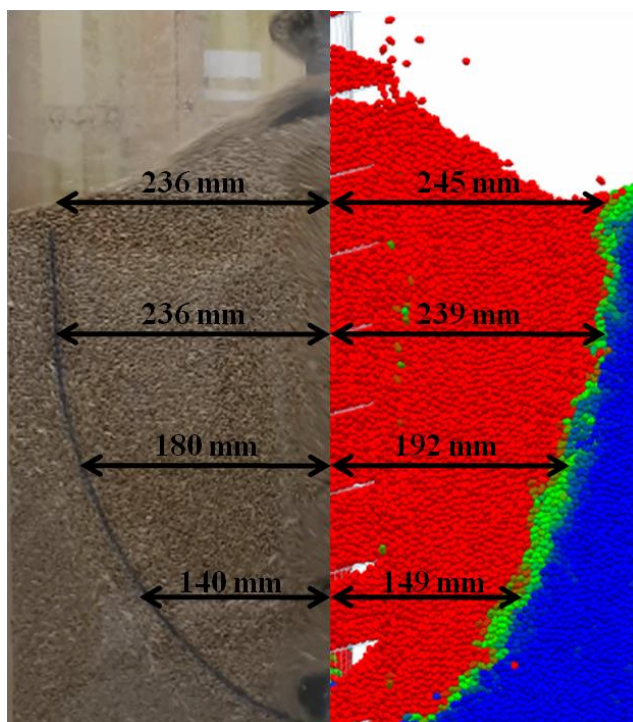
A módosított kísérleti berendezéssel történő keverés során létrejövő anyagáramlási folyamatok igen jól láthatóak a tároló doboz méretei és az átlátszó plexi henger miatt. A 4.6. ábrán látható a valóságos folyamatban a mozgó zóna határainak helyzete. A jobb láthatóság miatt a mozgó zóna határait kék vonallal jelöltem meg a plexi lemezen.





4.6. 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 (4.7. ábra).



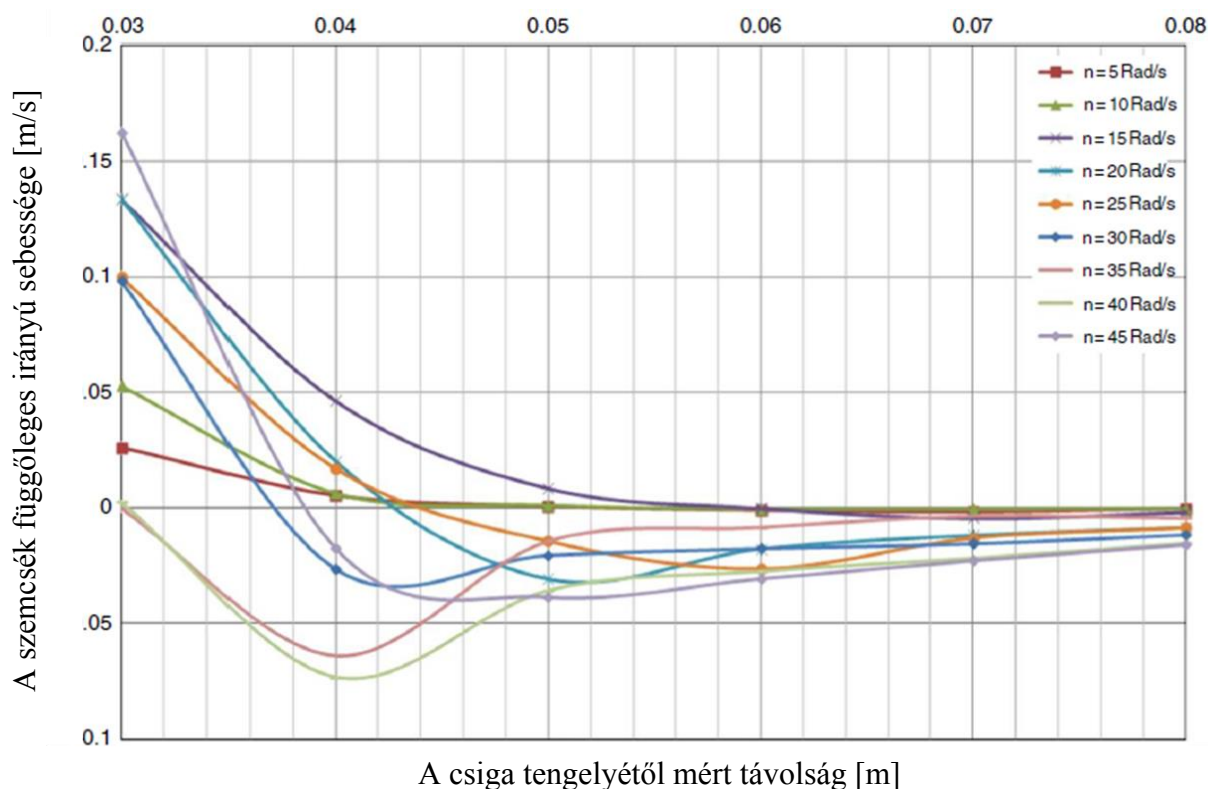
4.7. ábra A kísérleti vizsgálat és a szimulációk összehasonlítása

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

Kimondható, hogy a diszkrét elemes módszer alkalmas a keverőcsigákban és körülöttük kialakult mozgásviszonyok modellezésére.

#### 4.2. 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. Az ismétlések közti eltérés a szemcsék véletlenszerű generálásából adódik. Az effektív sugarakat a halmaz magasságának felénél határoztam meg. A 4.8. ábrán láthatóak a szemcsék függőleges irányú sebességkomponensei a csigalevél szélétől mért távolság függvényében.



4.8. ábra A sebességek változása különböző fordulatszámok esetén

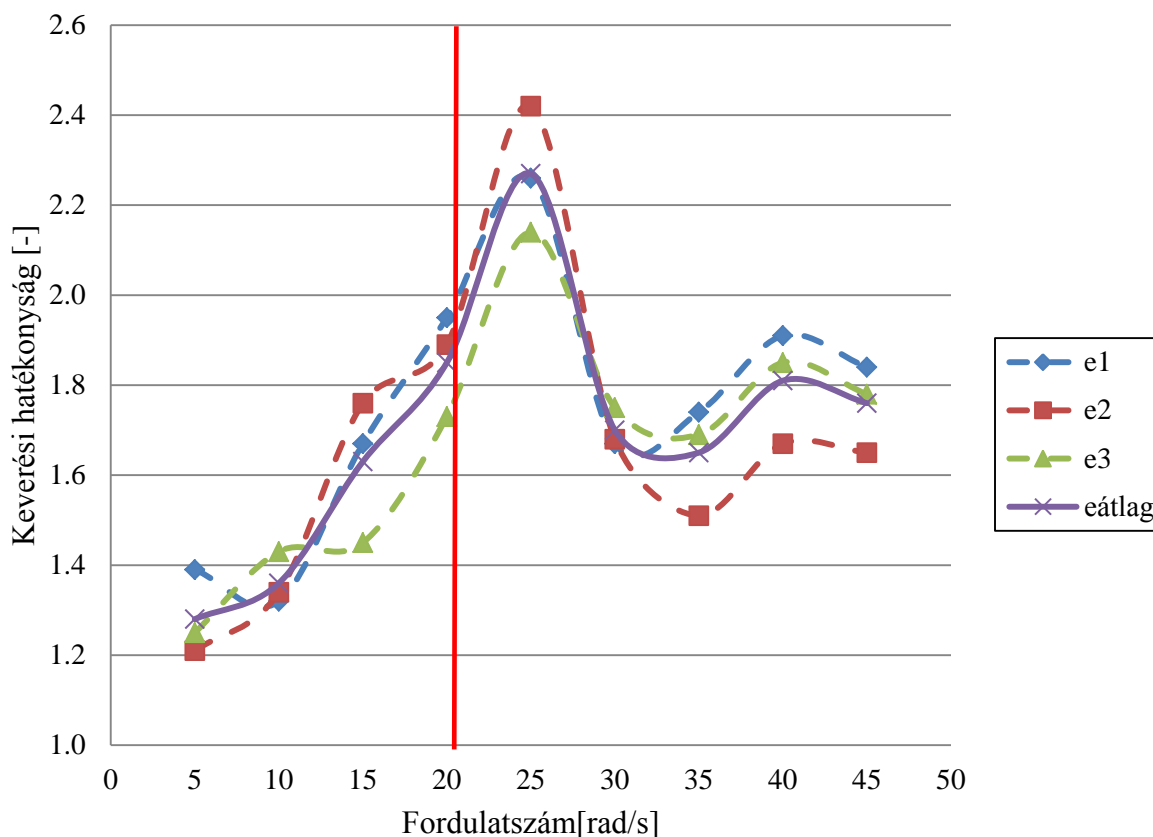
Látható, hogy a sebességeknek negatív értékük is lehet. Ez a szemcsék visszaáramlásával magyarázható. Az első három sebességértéknél (5 rad/s, 10 rad/s, 15 rad/s) látható, hogy a szemcsék sebessége nem vagy csak éppen átlépi a negatív tartományt. Ez azt jelenti, hogy a kis sebességek miatt halmaz nem érte el a 3.5.3 fejezetben említett dinamikus egyensúlyi állapotot, ezért többi eredménnyel való összehasonlításuk nem lehetséges. Azonban szemléltetésképpen ezekkel a sebességekkel is elvégeztem a szükséges számításokat. Az effektív sugarak leolvasása után minden esetben a 3.6.1. fejezetben ismertetett összefüggéssel meghatároztam a keverési hatékonyságokat. A kiértékelésnél azt tapasztaltam, hogy az adott ismétlésekhez tartozó eredmények kis szórást mutatnak. A jobb szemléltetés érdekében kiszámoltam az ismétlésekhez tartozó átlag értékeket is. Az eredményeket a 4.1. táblázatban foglaltam össze.



4.1. táblázat A keverési hatékonyságok értékei különböző fordulatszámok esetén

$\omega$ [rad/s]	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_{\text{átlag}}$
5	1,39	1,21	1,25	1,28
10	1,32	1,34	1,43	1,36
15	1,67	1,76	1,45	1,63
20	1,95	1,89	1,73	1,85
25	2,26	2,42	2,14	2,27
30	1,67	1,68	1,75	1,70
35	1,74	1,51	1,69	1,65
40	1,91	1,67	1,85	1,81
45	1,84	1,65	1,78	1,76

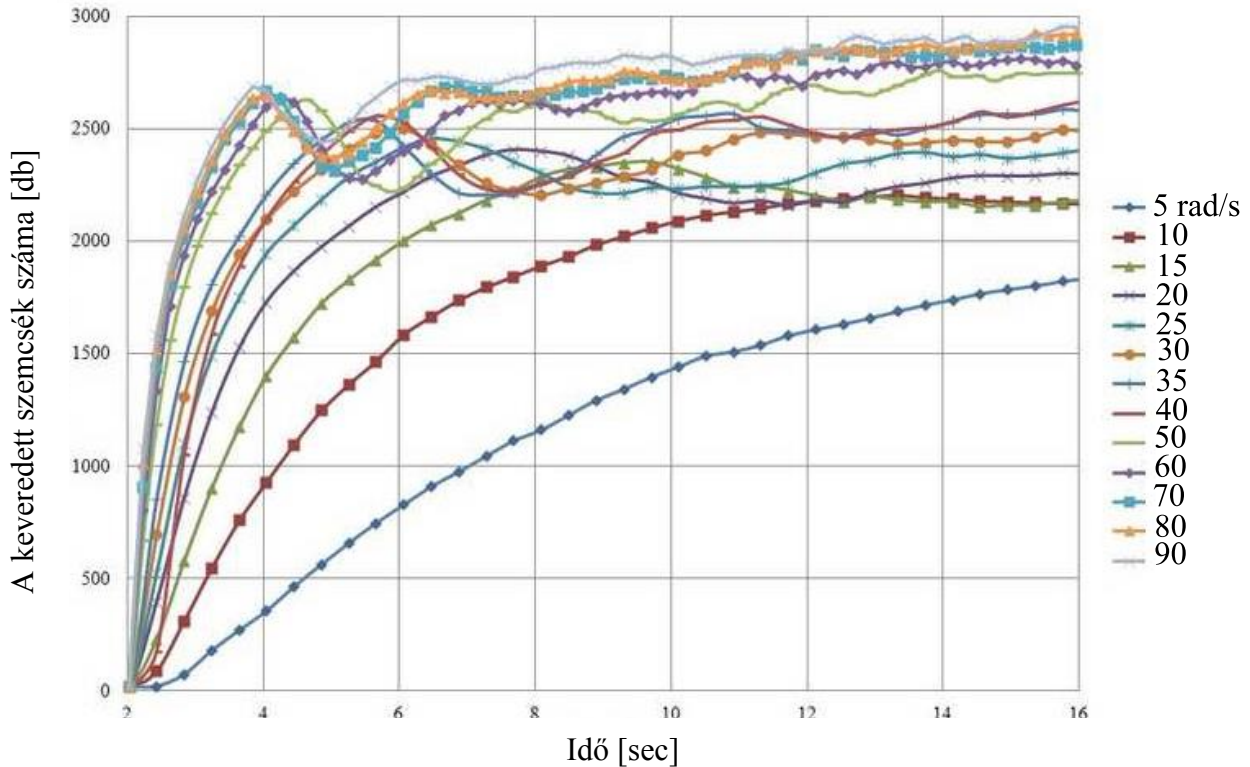
A 4.9. ábráról leolvasható, hogy a fordulatszám növekedésével a keverési hatékonyság is nő, azonban egy adott érték elérése után visszaesik. A piros vonallal jelölt határtól balra eső sebességértékeknél a dinamikus egyensúlyi állapot nem alakul ki.



4.9. ábra A keverési hatékonyságok változása a szögsebesség függvényében

Ezt azt jelenti, hogy létezik egy optimum érték, amely felett már nem indokolt a fordulatszám növelése. A 3.6.2. alfejezetben ismertetett módszerrel kapott eredményeket mutatja a 4.11. ábra. A fordulatszám növelésével egyre több jelölt szemcse keveredik el, ami abból adódik, hogy a gyorsabban forgó csiga több anyagot kever át. Azonban egy adott fordulatszám elérése után az elkeveredett szemcsék száma, azaz a keverési hatékonyság ebben az esetben sem nő tovább. Ez azt jelenti, hogy egy bizonyos optimális fordulatszám elérése után már hiába

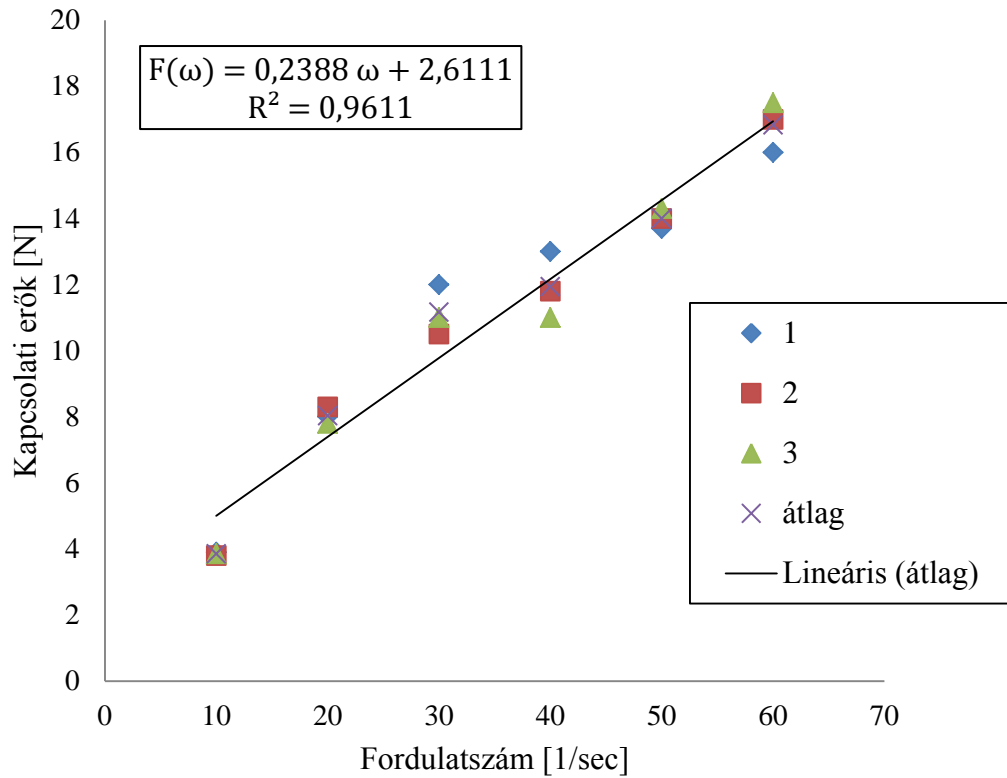
növeljük a sebességet, a keverési hatékonyság nem fog tovább nőni. A 20 rad/s alatti sebességeknél a görbék jellege eltér a többitől. mivel a 20 rad/s és az e feletti sebességek esetében, a 4-6 sec időintervallumban egy ugrás tapasztalható a keveredésben. Ez szintén a dinamikus egyensúlyi állapot el nem érésével magyarázható. A mérnöki gyakorlatban az optimális fordulatszám meghatározásával energiát tudunk megtakarítani.



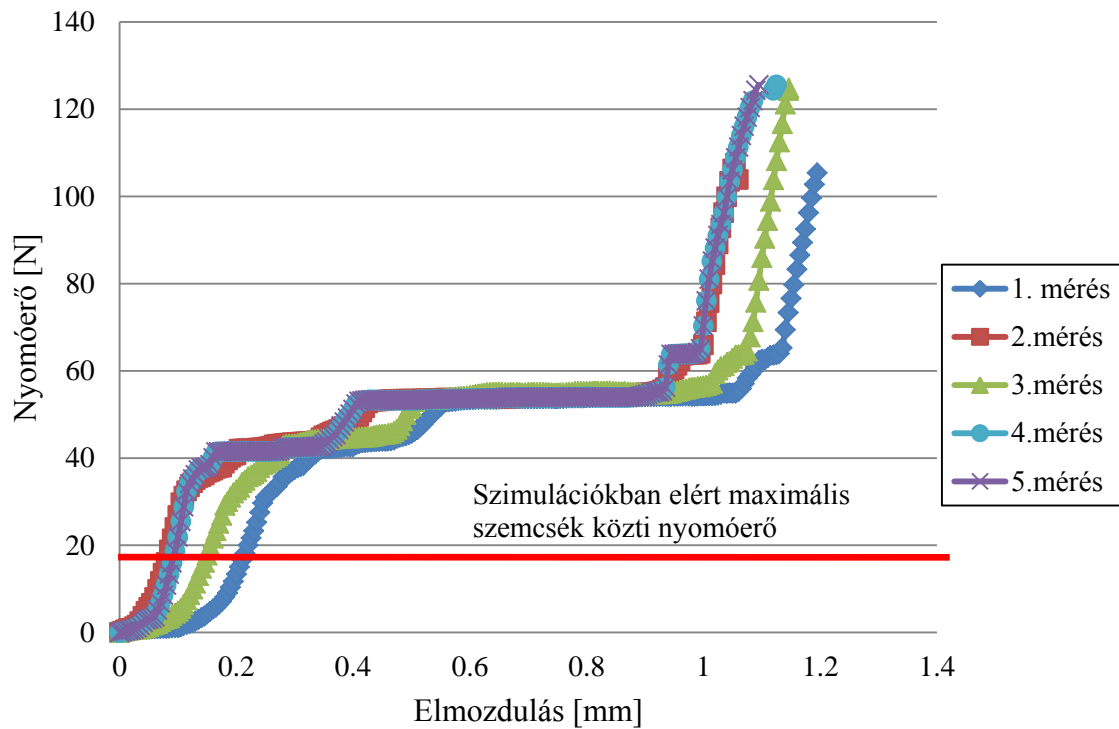
4.10. ábra Az elkeveredett szemcsék számának alakulása különböző szögsebességek esetén

A szemcsék között fellépő kapcsolati erő alakulását is megvizsgáltam a fordulatszámok függvényében. A fordulatszám növelésével a szemcsék között fellépő maximális kapcsolati erők is nőnek (4.11. ábra). A szimulációkban a két szemcse között fellépő maximális nyomóerő értékét összehasonlítottam a 3.4. alfejezetben bemutatott anyagvizsgáló gép által regisztrált értékekkel (4.12. 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.

Munkám célja elsősorban a keverési hatékonyság számszerűsítése volt. Az elvégzett számítások és vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy az effektív sugár alkalmas a függőleges nyitott keverő csigák hatékonyságának számszerű összehasonlítására.



4.11. ábra A szemcsék között fellépő maximális kapcsolati erők változása a fordulatszám függvényében



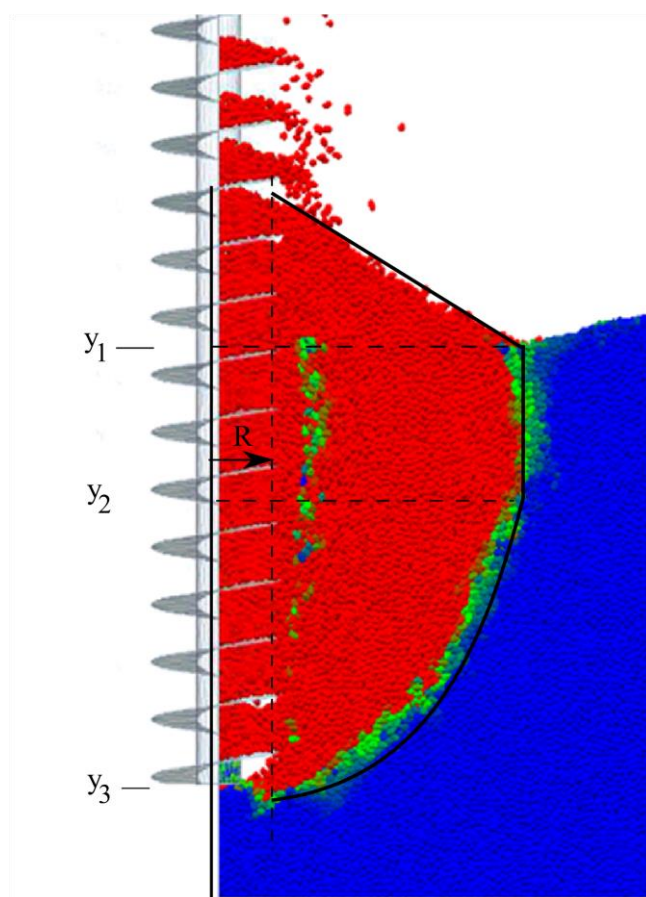
4.12. ábra A szemcsék nyomóvizsgálatának összehasonlítása a szemcsék között fellépő maximális kapcsolati erővel

### 4.3. 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:

$$V = \int_a^b 2\pi z(f(z) - g(z))dz . \quad (4.1)$$

Elegendő, ha a lineáris és a másodfokú függvények ismertek. Az integrálási határok a csigalevél széle és az átkevert térfogat határa voltak. Az így kapott térfogathoz még hozzá kellett adni a csigalevélen belül szállított anyag térfogatát. A 4.13. ábra mutatja a három függvény jellegét.



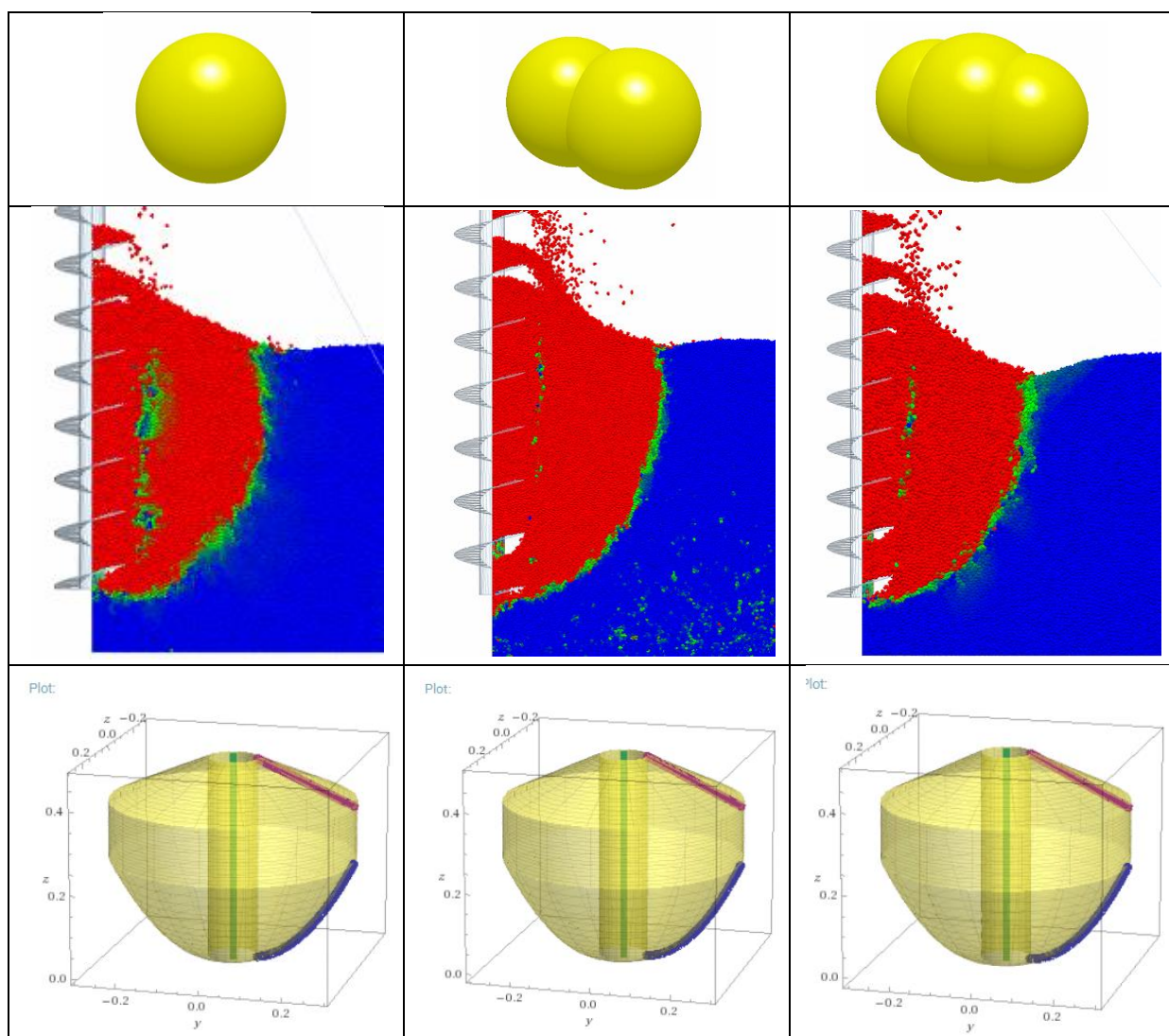
$$R(y) = \begin{cases} A \cdot R + B & R \in [0, y_1] \\ R_{eff} & R \in [y_1, y_2] \\ C \cdot R^2 + D & R \in [y_2, y_3] \end{cases}$$

4.13. ábra Az átkevert zónát leíró függvények

Az  $A, B, C, D$  konstansok, melyeket a függvények illesztésekor határoztam meg. A középső szakaszon az effektív sugár látható. Az előző vizsgálataimat ebben a szakaszban végeztem. A függvények alakulását többféle szemcségeometriával is megvizsgáltam. A levélátmérő 120

mm, a menetemelkedés 85mm és a fordulatszám 300 fordulat/perc volt a szimulációk során. A 3 gömbből álló elem (Keppler et al, 2011) kívül egy sima gömb elemmel és két gömbből álló elemmel is elvégeztem a számításokat. A sima gömb átmérője 3 mm volt. Két gömbből álló elem esetén a szemcsét alkotó gömbök átmérője 2 mm, míg a távolság a két gömb középpontja között 1mm volt. A 4.2. táblázatban láthatóak a szemcsegeometriák, valamint a sebesség szerint megszínezett szemcsék, valamint a 4.9 ábra mutatja a Wolfram Mathematica szoftverrel kirajzolt 3 dimenziós térfogatot. Látható, hogy az átkevert tartomány jellege a szemcsegeometriától független, ezáltal az átkevert térfogattal minden esetben jellemezhető az állótengelyű csiga keverési hatékonysága.

4.2. táblázat Különböző szemcsegeometriák az átkevert tartományok és az átkevert térfogatok



#### 4.4. Az átkevert térfogat empirikus függvényének meghatározása

A 3.6.4. fejezetben bemutatott lépésekkel oldottam meg a feladatot. A szimulációs eredmények alapján kellett meghatároznom a  $V = V(d, h, \omega)$  függvény kapcsolatát, ahol:

- $d$  – levélmérő,
- $h$  – menetemelkedés,
- $\omega$  - szögsebesség.

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

4.3. táblázat A kísérleti beállítások és a szimulációs eredmények

$d$	+				+			
$h$	+		-		+		-	
$\omega$	+	-	+	-	+	-	+	-
Beállítás	1	2	3	4	5	6	7	8
$V_{j1}[m^3]$	0,0868	0,0569	0,0738	0,0499	0,0394	0,0019	0,0574	0,0021
$V_{j2}[m^3]$	0,0920	0,0656	0,0819	0,0462	0,0483	0,0027	0,0532	0,0018
$V_{j3}[m^3]$	0,0953	0,0497	0,0764	0,0474	0,0460	0,0024	0,0739	0,0018

Az egyes faktorok alapszintjei:

$$\bar{d} = \frac{d_{max} + d_{min}}{2} = \frac{120 + 60}{2} = 90 \text{ mm},$$

$$\bar{h} = \frac{h_{max} + h_{min}}{2} = \frac{85 + 50}{2} = 67,5 \text{ mm},$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_{max} + \omega_{min}}{2} = \frac{300 + 50}{2} = 175 \text{ mm}.$$

A faktortér középpontjába helyezett koordináta-rendszerben a transzformált faktorok a következők:

$$\alpha_1 = \frac{d - \bar{d}}{d_{max} - \bar{d}} = \frac{d - 90}{120 - 90} = \frac{d - 90}{30},$$

$$\alpha_2 = \frac{h - \bar{h}}{h_{max} - \bar{h}} = \frac{h - 67,5}{85 - 67,5} = \frac{h - 67,5}{17,5},$$

$$\alpha_3 = \frac{\omega - \bar{\omega}}{\omega_{max} - \bar{\omega}} = \frac{\omega - 175}{300 - 50} = \frac{\omega - 175}{250}.$$

A 4.4. táblázatban az  $\alpha_i$  együtthatókat határozzuk meg a szimulációs eredményekből.

4.4. táblázat Az előjel mátrix a szimulációs eredmények alapján

	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_1\alpha_2$	$\alpha_1\alpha_3$	$\alpha_2\alpha_3$	$\alpha_1\alpha_2\alpha_3$	-	
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_{12}$	$a_{13}$	$a_{23}$	$a_{123}$	$a_0$	$V_j$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	0,0914
2	+	+	-	+	-	-	-	+	0,0574
3	+	-	+	-	+	-	-	+	0,0774
4	+	-	-	-	-	+	+	+	0,0479
5	-	+	+	-	-	+	-	+	0,0446
6	-	+	-	-	+	-	+	+	0,00238
7	-	-	+	+	-	-	+	+	0,06154
8	-	-	-	+	+	+	-	+	0,0019
$\alpha_i$	0,0204	0,0008	0,0206	0,0050	0,0047	0,0016	0,0027	0,0480	

Ezzel a transzformált faktorokra vonatkozó matematikai modell ismertté vált:

$$V = 0,048 + 0,0204\alpha_1 + 0,0008\alpha_2 + 0,0206\alpha_3 + 0,005\alpha_1\alpha_2 + 0,0047\alpha_1\alpha_3 + 0,0016\alpha_2\alpha_3 + 0,0027\alpha_1\alpha_2\alpha_3. \quad (4.2)$$

Az egész függvényt a teljes vizsgálati tartományban jellemző hibahatár számításához először az egyes kísérleti beállításhoz tartozó szórásnégyzeteket határozzuk meg,

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_{ji} - \bar{V}_j)^2, \quad (4.3)$$

ahol az ismétlések száma  $n=3$ . Így

$$s_1^2 = 1,823 \cdot 10^{-5} \quad s_2^2 = 6,332 \cdot 10^{-5} \quad s_3^2 = 1,698 \cdot 10^{-5} \quad s_4^2 = 3,627 \cdot 10^{-6} \quad s_5^2 = 2,127 \cdot 10^{-5} \\ s_6^2 = 1,328 \cdot 10^{-7} \quad s_7^2 = 1,194 \cdot 10^{-4} \quad s_8^2 = 2,693 \cdot 10^{-8}.$$

A közelítő függvény szórásnégyzete:

$$s_y^2 = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 s_j^2 = 3,03745 \cdot 10^{-5}.$$

Ezek után ellenőrizni kell, hogy az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó szórásnégyzetek azonos elméleti szórásnégyzethez tartoznak-e. Az ellenőrzést előzőekben számolt szórásnégyzetekből a Fisher-próbával lehet elvégezni:

$$F_{kis} = \frac{s_{\max}^2}{s_{\min}^2} = \frac{s_3^2}{s_8^2} = \frac{1,194 \cdot 10^{-4}}{2,6938 \cdot 10^{-8}} = 4432,35. \quad (4.4)$$

Az  $f_3 = 2$  és  $f_8 = 2$  szabadságfokhoz  $F_{\text{táblázat}} = 19.2$  [Csizmadia, 2016] azaz  $F_{kis} > F_{\text{tábl}}$ , így a Fisher-próba szerint nincs egyezés. Ezzel azonban még nem biztos, hogy a nyolc szórásnégyzet együttes vizsgálata is ezt mutatja. Az ellenőrzést a Bartlett-próbával kell folytatni:

$$c = 0,4343 \left[ 1 - \frac{1}{3(8-1)} \left\{ 8 \cdot \frac{1}{2} - \frac{1}{24} \right\} \right] = 0,352438,$$

mivel

$$f_0 = \sum f_j = 8 \cdot 3 = 24.$$

Most már a (4.17)-et felhasználva

$$\sum_{j=1}^8 f_j \lg s_j^2 = 2(\lg 1,823 \cdot 10^{-5} + \lg 6,332 \cdot 10^{-5} + \lg 1,698 \cdot 10^{-5} + \lg 3,627 \cdot 10^{-6} + \lg 2,127 \cdot 10^{-5} + \lg 1,328 \cdot 10^{-7} + \lg 1,194 \cdot 10^{-4} + \lg 2,693 \cdot 10^{-8}) = -97,146.$$

és

$$B = \frac{1}{c} \left[ f_0 \lg s_e^2 - \sum_{j=1}^N f_j \lg s_j^2 \right] = \frac{1}{0,35238} (24 \lg 3,03745 \cdot 10^{-5} + 97,146) = 275,686$$

Az  $f=N-1=8-1=7$  szabadsági fokhoz [Csizmadia, 2016]

$$\chi^2 = 5,991.$$

Mivel nem áll fenn a

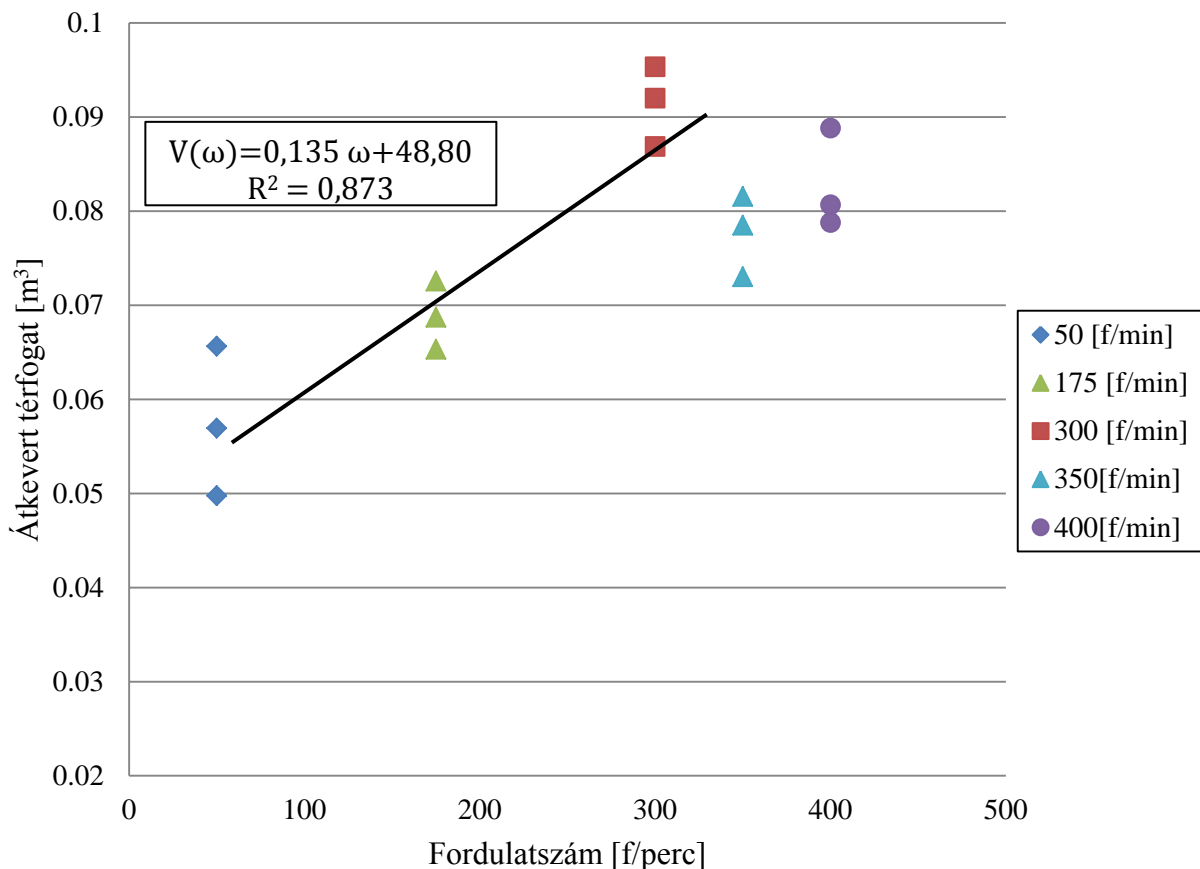
$$B < \chi^2$$

összefüggés, így a megvizsgált nyolc tapasztalati szórásnégyzet nem tartozik azonos elméleti szórásnégyzethez, tehát a jelenség az adott vizsgálati tartományban nem írható le egy függvénnyel.



#### 4.5. A keverést befolyásoló faktorok hatásának meghatározása

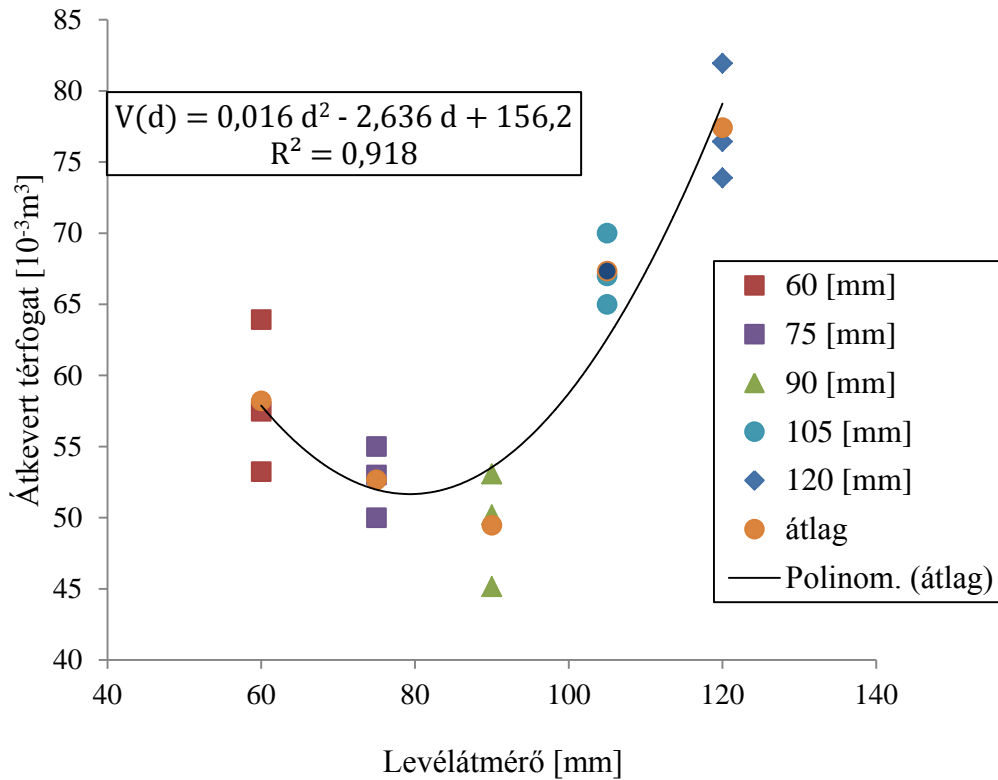
Az előző fejezetben kiderült, hogy az átkevert térfogat nem írható le faktorokban lineáris függvénnyel. A vizsgálatok tovább folytatásának három lehetséges módja van. A faktortér csökkentése, magasabb fokú (lineáris helyett pl. másodfokú) közelítés, valamint az átkevert térfogat vizsgálata paraméterérzékenységi 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 4.14. ábrán láthatóak az eredmények különböző fordulatszámok esetén. A levélátmérő 120 mm, a menetemelkedés 85 mm volt.



4.14. ábra Az átkevert térfogat változása adott levélátmérő és menetemelkedés mellett

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 f/min = 31,42 rad/s. Ezen érték felett a csiga már nem kever át több anyagot.

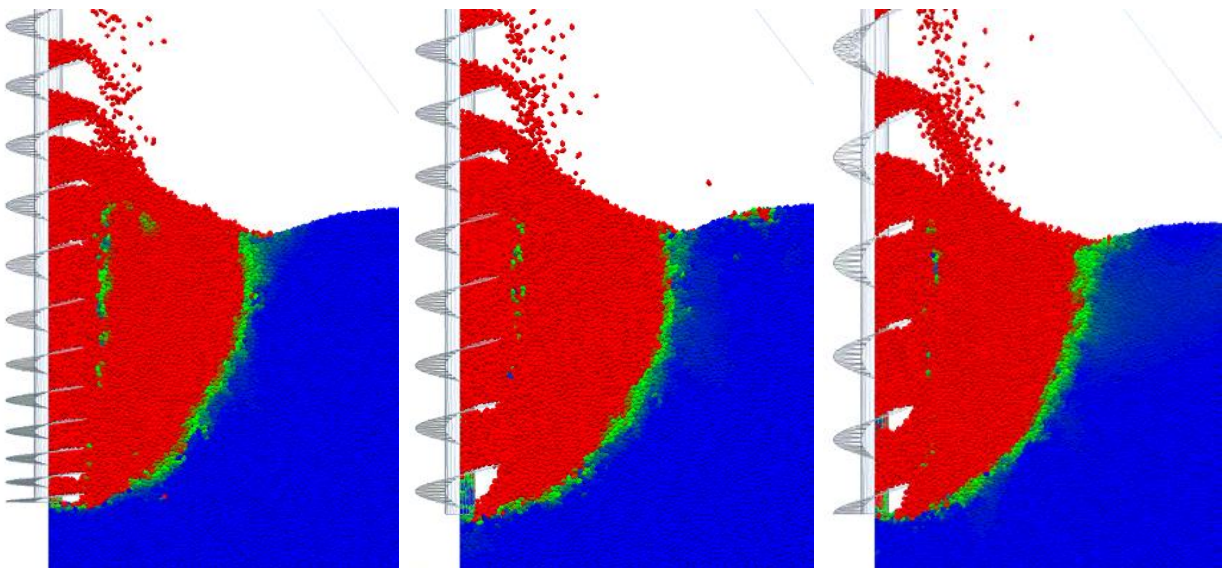
Következő lépésben a csigalevél átmérőjének hatását vizsgáltam. A fordulatszám 300 f/min, a menetemelkedés 50 mm volt. Az eredményeket a 4.15. ábra mutatja.



4.15. ábra Az átkevert térfogat változása adott fordulatszám és menetemelkedés mellett

A különböző levélátmérekkel végzett számítások esetében is azt tapasztaltam, hogy a méretek indokolatlan növelése nem javítja a keverési hatékonyságot.

A menetemelkedés változtatásának esetében azt tapasztaltam, hogy ez a faktor nem befolyásolja az átmozgatott anyaghalmaz nagyságát. Azonban hatással van a dinamikus egyensúlyi állapot kialakulásáig eltelt időre, ami abból következik, hogy a sűrűbb menetemelkedésű csiga lassabban, a nagyobb menetemelkedéssel rendelkező csiga gyorsabban szállítja az anyagot (4.16. ábra).



4.16. ábra Az átkevert térfogatok változó menetemelkedés mellett

Mindhárom esetben a levélátmérő 120 mm, a szögsebesség 300 f/perc volt. A baloldali csiga menetemelkedése 25 mm-85 mm, a középső csigánál 85 mm, a jobb oldalinál 100mm-160mm volt. A 4.5. táblázat mutatja az eredményeket.

4.5. táblázat Különböző menetemelkedésű csigák összehasonlítása

	Menetemelkedés	Átkevert térfogat	Dinamikus egyensúlyi állapotig eltelt idő
1. eset	25-85[mm]	0,0954051 [m <sup>3</sup> ]	2,3 [sec]
2. eset	85 [mm]	0,0914169 [m <sup>3</sup> ]	2,1 [sec]
3. eset	100-160 [mm]	0,0903465 [m <sup>3</sup> ]	1,9 [sec]

#### 4.6. Új tudományos eredmények

A következőkben szeretném összefoglalni a kutatómunkám során elért új tudományos eredményeket.

##### 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, a az effektív sugárral

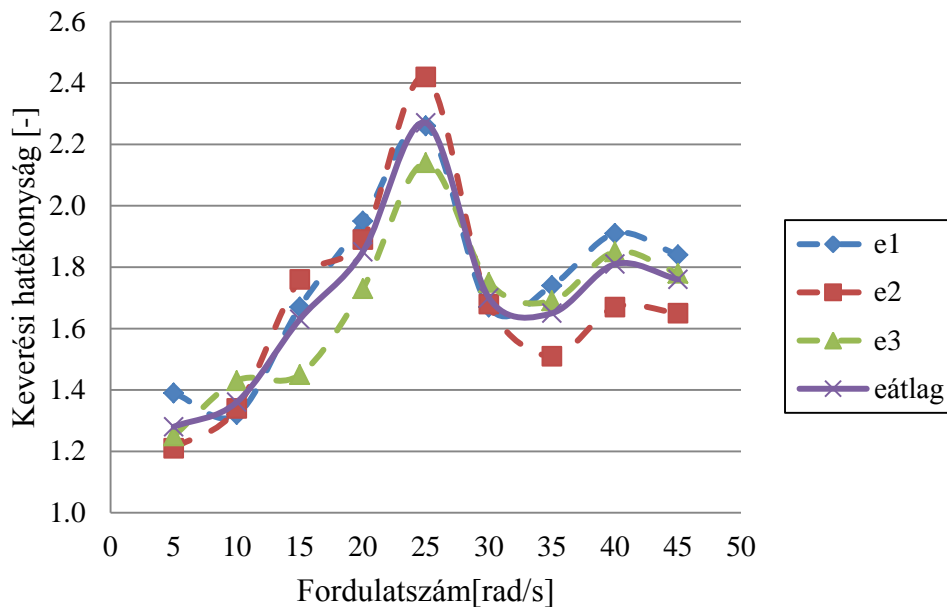
Az effektív sugár bevezetésével összehasonlíthatóvá válnak a különböző fordulatszám mellett futtatott szimulációk. Ez az a csiga hossz tengelyétől mért távolság, amelynél a szemcsék csiga-tengely irányú sebessége a sugár mentén fellépő maximális csiga-tengely irányú sebesség értékének 20%-ával egyenlő:

$$v(x = R_{eff}) = 0.2 \cdot v_{max}.$$

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.



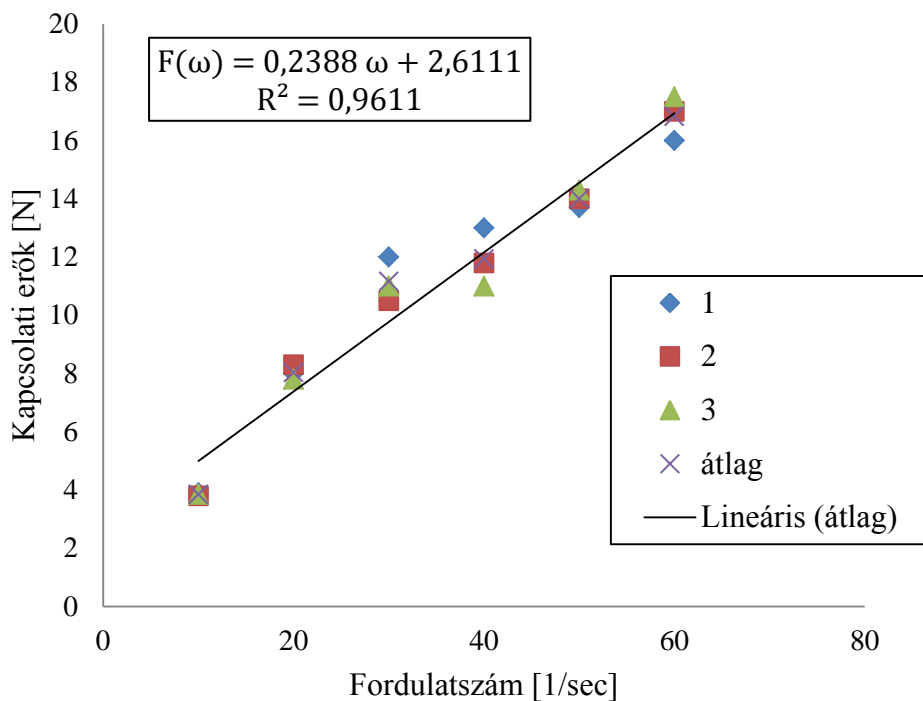
4.17. ábra A keverési hatékonyság adott szögsebesség mellett lesz maximális

### 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 3.2 táblázatban szereplő mikromechanikai jellemzők mellett.



4.18. ábra A kapcsolati erők változása az adott tartományban

#### 4. A keverési hatékonyság meghatározása az átkevert térfogattal

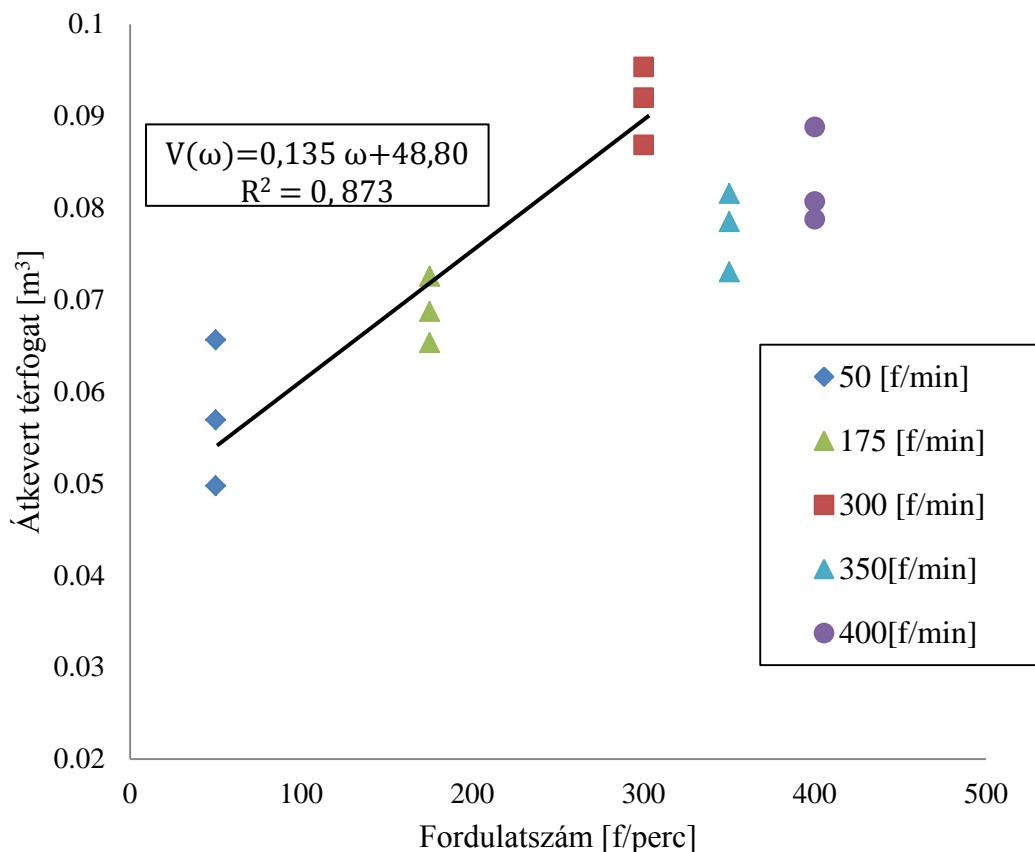
Munkám során különböző szemcsegeometriákkal és sebességekkel meghatároztam a keverőcsigák körül kialakult szemcsemozgási viszonyokat. A diszkrét elemes szimulációk során kapott áramlási kép vizsgálatánál azt tapasztaltam, hogy az átkevert tartomány három résztartományból áll, amelynek a peremét a következő 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

Az átkevert térfogat adott tartományon belüli változásának leírására faktoriális kísérletet végeztem. Az eredmények azt mutatták, hogy a jelenség az adott tartományon belül nem írható le faktorokban lineáris függvénnyel. Paraméterérzékenységi vizsgálattal megállapítottam, hogy az átkevert térfogatot jelentősen befolyásoló faktorok a szögsebesség és a csiga levélmérete. A szögsebesség növelése kezdetben javítja a keverési hatékonyságot, azonban egy adott érték után a csiga már nem képes több anyagot átkeverni (4.19. ábra).



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

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

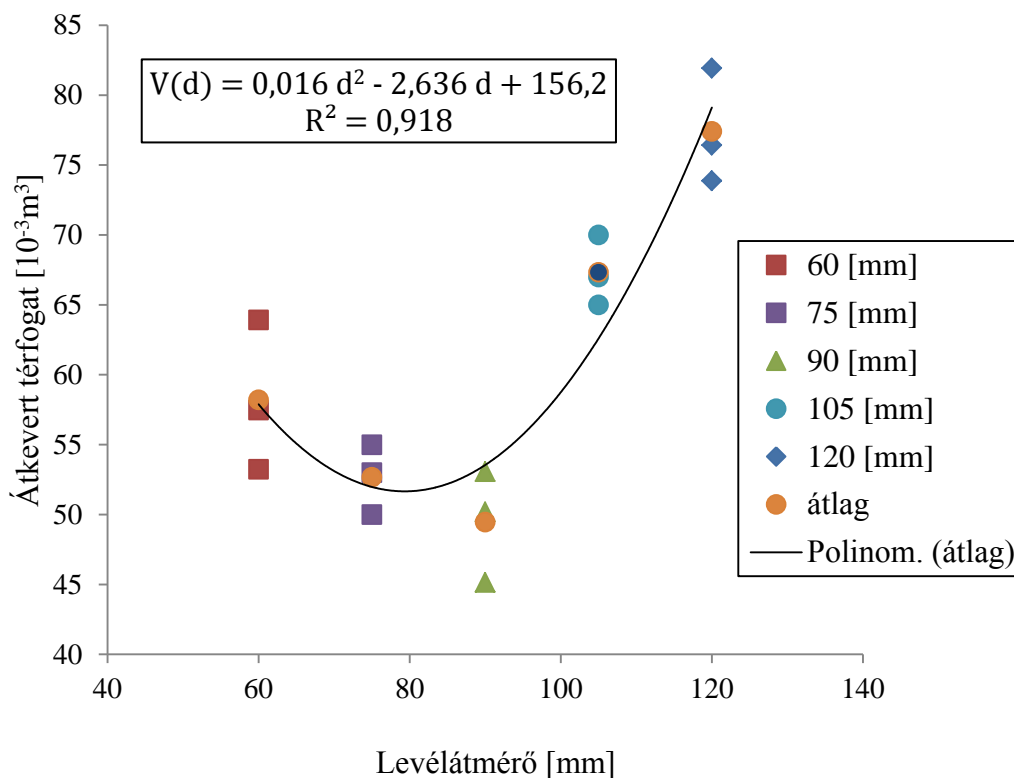
$$V(\omega) = 0,135 \omega + 48,8 \quad \omega \in [50,300] .$$

A levélátmérő esetében a keverési hatékonyság a 4.20. ábrának megfelelően alakul az adott tartományban. 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. Az ábráról leolvasható, hogy 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.



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

## 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. 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.

Kutatásom egyik főterülete a szabad keverőcsigák körül kialakult áramlási viszonyok leírása volt. Az áramlási viszonyok modellezésére a mérnöki gyakorlatban is egyre szélesebb körben elterjedő diszkrét elemes módszert alkalmaztam. 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. Az általam definiált diszkrét elemes modellel sokkal gyorsabban és hatékonyabban lehet eredményre jutni, mint ha az egész tartályt vizsgálnánk. 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 általam definiált effektív sugár bevezetésével összehasonlíthatóvá válnak a különböző csigalevél-átmérővel, különböző fordulatszám mellett kapott eredmények. 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. Az átkevert térfogat változását megvizsgáltam a keveredést befolyásoló paramétereket függvényében. Ezek a paraméterek a keverőcsiga levélátmérője, menetemelkedése és a fordulatszáma. Elvégeztem a teljes faktoriális kísérletet, melyben a vizsgálati paraméter az átkevert térfogat volt. Azt tapasztaltam, hogy az átkevert térfogat nem írható le az adott tartományban 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

### SZABAD KEVERŐCSIGÁK KÖRNYEZETÉBEN LÉTREJÖVŐ SZEMCSEMOZGÁSOK ELEMEZÉSE

A mezőgazdasági termények vastagrétegű szárításánál a legfőbb problémát az jelenti, hogy a szárítás folyamat végén az anyaghalmoz nedvességtartalmának eloszlása nem lesz homogén. Ezek az inhomogén zónák ronthatják a termény minőségét. Az inhomogenitás csökkentésére napjainkban egyre jobban elterjedő terménykeverő berendezéseket alkalmaznak. Ezeknek a konstrukcióknak a kialakítását (csigák száma, sebességük, geometriájuk) tapasztalati úton határozták meg. A legtöbb esetben a mozgáspálya és a sebesség változtatására nincs lehetőség. 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 mérési metódus kidolgozása után többszörös ismétléssel meghatároztam a szemcsék függőleges irányú elmozdulását. Ezeket az eredményeket használtam fel a modellem validálására. 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 kísérleti berendezésem módosítása után igazoltam, hogy a szemcsék függőleges irányú mozgása van a legnagyobb hatással a szárítás hatékonyságára, ezért a szimulációknál a plexihengernek csak egy „szeletét” vizsgáltam.

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. SUMMARY

### ANALYSIS OF PARTICLE MOVEMENT CONDITIONS OF OPEN MIXING SCREWS

In case of the drying process of agricultural grains in silos the main problem is that the distribution of the moisture content is not homogeneous within the granular assembly. These inhomogeneous zones could worsen the quality of the dried product. To reduce this effect mixing systems are used within the silos. The number of such screws, the geometry and kinematical parameters of their operation are determined by using experimental investigations, but little is known about what happens around the rotating mixing screw, and because of this, there are no clear guidelines for planning of them. In most of the cases the motion path and velocity of the screws are unchangeable. If the operational parameters are not set adequate then significantly additional costs could appear.

The aim of my research was to determine the particle-flow about the mixing screws. To reach this goal I studied the literature in every detail. After to map the deficiency of the literature and choose the suitable modeling technique, an experimental apparatus was built. Next step was to define the measurement's methods and determine the vertical displacement of the particles. The results of this measurement made it possible to verify the usability of my discrete element model. To describe the mixing phenomenon discrete element method was used which is a fairly new proceeding to model the mechanical properties of bulk materials. I had to decrease the simulation time, therefore the container's size had to be reduced. In the case of size reduction, attention must be paid that the original behavior of the bulk material does not change. After the modification of the experimental apparatus, it was proved that the vertical displacement has the largest influence over the mixing efficiency. Due to this statement, it was sufficient to examine the slice of the plexiglass cylinder.

Based on the test and the simulation results it can be supposed that the DEM model of the mixing apparatus can be used for the determination of the particle displacement field around open mixing screws.

To compare the simulations with different parameters the effective radius has been determined. It can be found there is an optimal screw rotation angular velocity above which there is no reason to operate the mixing apparatus, as the mixing efficiency does not increase with the increase of screw angular velocity, as the change in the efficiency of mixing becomes smaller and smaller by increasing the angular velocity and the causeless increase of screw angular velocity results higher compressive forces acting on the mixed particles.

I established that the mixed domain can be described with three functions and the shape of this volume does not depend on the particle's geometry. The mixed volume can be evaluated with the rotations of these functions about the vertical axis. The volume is affected by the following factors: leaf diameter and angular velocity of the screw. I proved that the pitch of the screw has no effect to mixed volume.

Summarizing it can be said, the new scientific results could help the design and operation processes of mixing systems and decrease the costs.

## 8. MELLÉKLETEK

**M1. Irodalomjegyzék**

1. Alian, M., Ein-Mozaffari, F., Upreti, S.R. (2015): Analysis of the mixing of solid particles in a plowshare mixer via discrete element method (DEM), Powder Technology, Vol. 274, pp.77-87.
2. Armstrong, B. (2011) The study of pharmaceutical powder mixing through improved flow property characterization and tomographic imaging of blend content uniformity, PhD dissertation, Birmingham University, pp.205-208.
3. Asszonyi, Cs., Ván, P., Szarka, Z. (2007): Izotróp kontinuumok rugalmas és képlékeny állapota, Mérnökgeológia-Kőzetmechanika Kiskönyvtár 5, Műegyetemi Kiadó, Budapest
4. Baker, C.G.J. (1997): Industrial Drying of Foods, Springer US, 978-0-7514-0384-8
5. Bagi, K. (2007): A diszkrét elemek módszere, BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék, Budapest
6. Bern, C.J., Charity, L.F. (1978): Disturbance effects of auger-stirring corn, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers Vol. 21 (2), pp. 371-374.
7. Bridgwater, J. (2012), Mixing of powders and granular materials by mechanical means – a perspective, Particuology, Vol. 10( 4), pp. 397-427.
8. Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F.W., Hall, C. W. (1974): Drying cereal grains. AVI Publishing Co., Westport, CT.
9. Bruce, D. M., Wontner-Smith, T.J., Bartlee, D.I., Cardwell S.K. (2013): Optimising the use of grain stirrers to enhance on-floor drying, HGCA Project Report No. 520.
10. Burkhardt, G.J. (1967): Effect of pitch radial clearance, hopper exposure and head on performance of screw feeders, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, Vol 10(1), pp. 685-690.
11. Calvetti, F., Nova, R., Castellanza, R. (2004): Modelling the subsidence induced by degradation of abandoned mines, Modelling of Cohesive-Frictional Materials, eds. Vermeer, Ehlers, Herrmann & Ramm, Taylor & Francis Group, London, pp. 137-148.
12. Carl J. Bern, M. E. Anderson, W. F. Wilcke, Charles R. Hurburgh Jr. (1982): Auger-stirring wet and dry corn—airflow resistance and bulk density effects, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers Vol. 25 (13), pp. 217-220.
13. Carmona, H. A., Wittel, F. K., Kun, F., Herrmann, H. J. (2008): Fragmentation processes in impact of spheres, Physical Review Letters E, Vol. 77(5),015302.
14. Cleary, P.W. (2007): DEM modelling of particulate flow in a screw feeder, Progress in Computational Fluid Dynamics 7 (Nos. 2/3/4) pp. 128-138.

15. Coetzee, C.J., Els, D.N.J. (2009): Calibration of discrete element parameters and the modeling of silo discharge and bucket filling, *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol 65 (2), pp. 198-212.
16. Colijn, H. (1985): *Mechanical conveyors for bulk solids*, Elsevier Science Publishing Co., New York
17. Cundall, P.A. , Hart, D.H. (1992): Numerical modelling of discontinua, *Journal of Engineering Computations* Vol. 9, pp. 101-113.
18. Cundall, P.A., Strack, O.D.L (1979).: A discrete numerical model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol. 29 (1), pp. 47-65.
19. Csizmadia, B., Nándori E. (Szerk.) (2002):*Mechanika Mérnököknek: Szilárdságtan (második kiadás)*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest-Gödöllő-Győr, 595 o.
20. Csizmadia, B. (2009): Sajátos anyagmodellek alkalmazása a mezőgazdaságban, FVM Mezőgazdasági Gépesítési Intézet (MGI), Gödöllő, 145 o.
21. Csizmadia, B. (2016): Kísérletek tervezése, Szent István Egyetemi Kiadó, 51-75. o.
22. Dai, J., Grace, J.R. (2008), A model for biomass screw feeding, *Powder Technology*, Vol. 186 (1), pp. 40-55.
23. Darnell W.H., Mol, E.A. (1956): Solid conveying in extruders, *SPE Journal*, Vol. 12 (20), pp. 20-29.
24. Égert, J., Keppler, I. (2007): A végeelem módszer mechanikai alapjai, MSc jegyzet, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 205 o.
25. F. S. Services (1976): *FS Grain Drying Guide*, F. S. Services, Inc., Bloomington, IL.
26. Foo, Y.Y, Sheng, Y., Briscoe, B.J. (2004): An experimental and numerical study of the compaction of alumina aggregates, *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 41 (21), pp. 5929-5943.
27. Golshan, S., Zarghami, R., Norouzi, H.R., Mostoufi, N. (2017): Granular mixing in nauta blenders, *Powder Technology*, Vol. 305, pp. 279-288.
28. Gonzalez-Montanello, C., Ramírez, Á., Gallego, E., Ayuga, F. (2011): Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silo, *Chemical Engineering Science*, Vol. 66 (21), pp. 5116-5126.
29. Helbing, D., Farkas, I., Vicsek, T. (2000): Simulating dynamical features of escape panic, *Nature* Vol. 407 (28), pp. 487-490.
30. Hopkins, M.A., S.F. Daly, J. H. Lever (1996): Three dimensional simulation of river ice jams, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers 8th International Conference on Cold Regions Engineering*, Fairbanks, AK.
31. Huang, A.N., Kuo, H.P. (2014): Developments in the tools for the investigation of mixing in particulate systems – a review, *Advanced Powder Technology*, Vol. 25 (1), pp. 163-173.

32. IChemE, EFCE (1989): Standard shear testing technique for particulate solids using the Jenike shear cell (SSTT), Rugby, Warwickshire, UK
33. Janssen, H.A. (1895): Getreidedruck in Silozellen, Z. Ver. Dt. Ing. 39, pp. 1045-1049.
34. Kafui, K. D., Thornton, C. (2000): Numerical simulations of impact breakage of a spherical crystalline agglomerate, Powder Technology, Vol. 109, (1-3), pp. 113-132.
35. Keppler, I. (2006): Szemcsés anyagok természetes boltozódása, GÉP, 57 (1), 29-33. o.
36. Keppler, I., Kocsis, L., Oldal, I., Farkas, I., Csatár, A. (2012): Grain velocity distribution in a mixed flow dryer, Advanced Powder Technology, Vol. 23, pp. 824-832.
37. Ketterhagen, W.R., Curtis, J.S., Wassgren, C.R., Kong, A., Narayan, P.J., Hancock, B.C. (2007): Granular segregation in discharging cylindrical hoppers: A discrete element and experimental study, Chemical Engineering Science, Vol. 62 (22), pp. 6423-6439.
38. Kézdi, Á. (1965): Talajmechanika, Tankönyvkiadó, Budapest, 275 o.
39. Kozák, I. (1995): Kontinuummechanika, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, 218 o.
40. Kuo, H.P., Knight, P.C., Parker, D.J., Scott, D.M., Seville, J.P.K. (2005): Solids circulation and axial dispersion of cohesionless particles in a V-mixer, Powder Technology, Vol. 152, pp. 133-140.
41. Laurent, B.F.C., Cleary, P.W. (2012): Comparative study by PEPT and DEM for flow and mixing in a ploughshare mixer, Powder Technology, Vol. 228, pp. 171-186.
42. Lim, S.Y., Davidson, J.F., Forster, R.N., Parker, D.J., Scott, D.M., Seville, J.P.K. (2003): Avalanching of granular material in a horizontal slowly rotating cylinder: PEPT studies, Powder Technology, Vol. 138, pp. 25-30.
43. Lu, M., McDowell, G.R. (2007): The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. Granular Matter, Vol. 9 (1-2), pp. 69-80.
44. Metcalf, J.R. (1965): The mechanics of the screw feeder, Proceedings of the institution of mechanical engineers, Vol. 180, pp. 131-140.
45. Mujumdar, A. S. (1995): Handbook of Industrial Drying, 2nd edition, Marcell Dekker, New York
46. Mujumdar A.S., Beke, J. (2002): Gyakorlati szárítás, Szaktudás Kiadó Ház Budapest
47. Oldal, I. (2007): Szemcsés anyagok kifolyási és boltozódási tulajdonságai, Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő, 80 o.
48. Oldal, I., Keppler, I., Csizmadia, B., Fenyvesi, L. (2012): Outflow properties of silos: The effect of arching, Advanced Powder Technology, Vol. 23 (3), pp. 290-297.
49. Owen, P.J., Cleary P.W. (2009): Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM), Powder Technology, Vol. 193, pp. 274-288.

50. Owen, P.J., Cleary P.W., McBride, B. (2003): Simulated granular flow in screw feeders using 3D discrete element method (DEM), CHEMECA 2003, 31st Australasian Chemical Engineering Conference, ISBN: 0-86396-829-5, p. 203.
51. Pantaleev, S., Yordanova, S., Janda, A., Marigo, M., Ooi, J.Y. (2017): An experimentally validated DEM study of powder mixing in a paddle blade mixer, Powder Technology, Vol. 311, pp. 287-302.
52. Particle Analytics, <http://particle-analytics.com/> (accessed June 21, 2016).
53. Raji, A.O., Favier, J.F. (2004): Model for deformation in agricultural and food particular materials under bulk compressive loading using discrete element method, Theory, model development and validation, Journal of Agricultural Engineering Research, Vol. 60, pp. 359-371.
54. Rautenbach R., W. Schumacher (1987): Theoretical and experimental analysis of screw feeders, Bulk Solids Handling, Vol. 7, pp. 675-680.
55. Rehkugler, G. E. (1967): Screw conveyors--the state of the art, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers Vol.10 (5), pp. 615-618
56. Roberts, A.W., Willis, A.H. (1962): Performance of grain augers, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Vol. 176 (8), pp. 165-194.
57. Schönert, K. (2004): Breakage of spheres and circular discs, Powder Technology, Vol. 143/144, pp. 2-18.
58. Sitkei, Gy. (1981): A mezőgazdasági anyagok mechanikája, Akadémia Kiadó, Budapest, 460 o.
59. Sommier, N., Porion, P., Evesque, P., Leclerc, B., Tchoreloff, P., Couarraze, G. (2011): Magnetic resonance imaging investigation of the mixing-segregation process in a pharmaceutical blender, International Journal of Pharmaceutics, Vol. 222, pp. 243-258.
60. Subero, J., Ghadiri, M. (2001): Breakage patterns of agglomerates, Powder Technology, Vol. 120 (3), pp. 232-243.
61. Thakur, S.C., Ahmadian, H., Sun J., Ooi, J.Y. (2014): An experimental and numerical study of packing, compression, and caking behaviour of detergent powders, Particuology, Vol.12, pp. 2-12.
62. Thornton, C., Liu, L. (2004): How do agglomerates break, Powder Technology, Vol. 143/144, pp. 110-116.
63. Tomay, T. (1982): Keveréktakarmány-gyártás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 411 o.
64. Tsai, W.R., Lin, C.I (1994): On the mixing of granular materials in a screw feeder, Powder technology Vol. 80, pp. 119-126.
65. Tsotsas, E., Mujumdar A.S. (2007): Modern Drying Technology, Computational Tools at Different Scales, Wiley-VCH verlag GmbH & Co.KGAA, Weinheim
66. Tsotsas, E., Mujumdar, A.S. (2009): Modern Drying Technology, Experimental Techniques, Wiley-VCH verlag GmbH & Co.KGAA, Weinheim

67. Tsuji, Y., Tanaka T., Ishida T. (1992): Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe, Powder Technology, Vol. 71, pp. 239-250.
68. Uchida, K., Okamoto, K. (2008): Measurement technique on the diffusion coefficient of powder flow in a screw feeder by X-ray visualization, Powder Technology, Vol. 187 (2), pp. 138-145.
69. Vas, A. (1985): Mezőgazdasági termények szárítása, Mezőgazdasági Kiadó
70. Wu, S.Z., Chau, K.T., Yu, T.X. (2004): Crushing and fragmentation of brittle spheres under double impact test, Powder Technology, Vol. 143/144, pp. 41-55.
71. Yang, C.Y., Fu, X.Y. (2004): Development and validation of a material-labeling method for powder process characterization using X-ray computed tomography, Powder Technology, Vol. 146, pp. 10-19.
72. Yuan, C., Zongquan, D., Bing, L. (2011): Numerical simulations of motion behaviors of pan mechanism in a cooking robot with granular cuisine, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 25 (3), pp. 803-808.

## **M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját 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): Silószárítók szemcse mozgásviszonyainak elemzése, Műszaki Tudományos Közlemények, 2015 (3) 319-322. o.

*Magyar nyelvű konferencia kiadvány:*

1. **Varga A.**, Szabó, M. (2014): Silószárítók szemcse mozgásviszonyainak elemzése, Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka, XIX, Kolozsvár, 433-436. o.

*Nemzetközi konferencia abstract:*

1. Csatár A., Safranyik F., **Varga A.** (2015), Development of experimental apparatus for examination of velocity dependent friction, CD-ROM Proceedings of the Synergy and Technical Development International Conference, October 12-15, 2015, Gödöllő, Hungary, p. 28, ISBN 978-963-269-506-8.



## 9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. Fenyvesi Lászlónak és Dr. Keppler Istvánnak, hogy hasznos tanácsaikkal mindvégig segítettek, szakmailag irányították a kutatómunkámat.

Külön köszöneti illeti Dr. Fenyvesi László professzor urat, akihez a nehéz időszakokban is bátran fordulhattam.

Hálával tartozom a Mechanika és Műszaki Ábrázolás Tanszék valamennyi munkatársának az évek során nyújtott segítségükért.

Külön köszönet illeti Dr. M. Csizmadia Béla professzor urat, aki annak idején látta bennem a lehetőséget, mindvégig biztatott és ajtaja mindig nyitva állt előttem. Szakmai elhivatottsága, oktatói és kutatói munkája példaként állt előttem.

Köszönettel tartozom kollegáimnak, a Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Kft. Műszaki Számítások Osztályán támogatásukért és biztatásukért.

Köszönet Dr. Felhős Dávidnak és †Potyka Csabának, hogy támogatták a doktori disszertációm elkészítését.

Hálásan köszönöm szüleimnek, nagyszüleimnek és az egész családomnak a biztatásukat és nem utolsósorban a türelmüket.

Gödöllő, 2018. január

Varga Attila