



MEZŐGAZDASÁGI SZEMCSEHALMAZOK
MECHANIKAI VISELKEDÉSÉNEK
MODELLEZÉSE

MTA Doktori értekezés

Dr. Keppler István

Gödöllő

2024

TARTALOM

JELÖLÉSJEGYZÉK	4
1. BEVEZETÉS	7
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	11
A diszkrét elemek módszere	11
A diszkrét elemes modellek kalibrálása	17
Talajművelő szerszámok vonóerőigénye	21
Statikus keverőberendezések	23
Szárító magmozgás vizsgálatok	25
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	33
Nyíróvizsgálat alapú kalibrálási módszerek	33
Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye	42
Statikus keverőberendezések	45
Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái	50
4. EREDMÉNYEK	63
Nyírókísérlet alapú kalibrálási módszerek vizsgálata	63
Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye	72
Galton keverő működési hatékonysága	76
Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái	79
Új tudományos eredmények	86
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	87
6. ÖSSZEFOGLALÁS	89
7. SUMMARY	91
MELLÉKLETEK	93
M1. Irodalomjegyzék	93
M2. Az értekezés témaköréhez tartozó fontosabb saját publikációk	98
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	99

JELÖLÉSJEGYZÉK

Skalármennyiségek

a	cikloist generáló kör sugara [m]
a_1, a_j	szemcse sugár [m]
a_n	adhézió normálirányban [N]
a_s	adhézió érintő irányban [N]
c	szemcsehalmoz látszólagos kohéziója [N/m ²]
C	ciklois görbe egyenletének konstansa [-]
C_r	ütközési tényező [-]
E	rugalmassági modulus [N/m ²]
E_0	redukált rugalmassági modulus [N/m ²]
F_n	normálirányú erőkomponens [N]
F_t	érintő irányú erőkomponens [N]
G	csúsztató rugalmassági modulus [N/m ²]
G_0	redukált csúsztató rugalmassági modulus [N/m ²]
K	vonatkoztatási rendszer
k	rugómerevség [N/m]
k_n	rugómerevség normálirányban [N/m]
k_t	rugómerevség érintő irányban [N/m]
L	Lacey index
m	tömeg [kg]
m_i	az i -edik szemcse tömege [kg]
N	cellák száma
$nCoh$	kohézív kötés normál irányú szilárdsága [N/m ²]
$sCoh$	kohézív kötés nyírósilárdsága [N/m ²]
t	idő [s]
t_c	ütközés időtartama [s]
t_0	kezdeti időpillanat [s]
T_R	Rayleigh időlépték [s]
Δt	időintervallum [s]
x_0	kezdeti helykoordináta [m]
y_0	kezdeti helykoordináta [m]
y_{max}	színezett csík legnagyobb y koordinátája [m]
y_{min}	színezett csík lekisebb y koordinátája [m]

v_{x0}	kezdősebesség x irányú komponense [m/s]
v_{y0}	kezdősebesség y irányú komponense [m/s]
v_s	nyírás sebessége [m/s]
γ	csillapítás [Ns/m]
δ_{ij}	szemcsék közötti átfedés [m]
δ_n	normál átfedés [m]
δ_t	érintőirányú átfedés [m]
φ	szemcsehalmaz belső súrlódási szöge [-]
ϕ_i	koncentráció az i -edik cellában
ϕ_m	koncentráció a teljes mintában
μ_0	nyugvásbeli súrlódási tényező [-]
μ	mozgásbeli súrlódási tényező [-]
ν	Poisson-tényező [-]
ρ	szemcse sűrűsége [kg/m ³]
σ^2	szórásnégyzet
σ_0^2	maximális keveredés
σ_r	minimális keveredés
$\sigma_{\max}$	kohéziv kötés szilárdsága [N/m ²]
$\tau_{\max}$	kohéziv kötés nyírószilárdsága [N/m ²]
ϑ	sebességtényező [-]
θ	hajítás szöge [Rad]
ξ	egyenetlenségi tényező [-]

Vektor- és tenzormennyiségek

$\mathbf{c}_{ij}$	szemcsék érintkezési pontjába mutató helyvektor [m]
$\mathbf{F}$	erő [N]
$\mathbf{F}_{ij}$	az i -edik és j -edik szemcse közötti erő [N]
$\mathbf{g}$	nehézségi gyorsulás [m/s ²]
$\mathbf{M}$	nyomaték [Nm]
$\mathbf{M}_{ij}$	az i -edik szemcsére a j -edik szemcse által kifejtett nyomaték [Nm]
$\mathbf{n}$	érintkezési normális [m]
$\mathbf{n}_{ij}$	az i -edik és j -edik szemcse érintkezési normálisa [m]
$\mathbf{r}_0$	kezdeti helyzet [m]
$\ddot{\mathbf{r}}_i$	az i -edik szemcse gyorsulása [m/s ²]

$\mathbf{r}(t, \mathbf{r}_0)$ pályagörbe a Lagrange-féle leírásban [m]

$\mathbf{v}$ sebesség [m/s]

$\boldsymbol{\omega}_i$ szögsebesség [Rad/s]

$\mathbf{J}$ tehetetlenségi nyomatéki tenzor [kgm^2]

$\mathbf{J}_i$ az i -edik szemcse tehetetlenségi nyomatéki tenzora [kgm^2]

1. BEVEZETÉS

A mezőgépészet elsődleges feladata az élő anyag és a gépek közötti kölcsönhatások tervezése. A mezőgazdasági termelés alapanyagainak és végtermékeinek nagy része – mechanikai viselkedés szempontjából – szemcsés anyagként modellezhető. A mezőgépészetben alkalmazott technológiai eljárások nagy része értelmezhető úgy emiatt, mint egy szemcsehalmoz és az azzal érintkező, vagy abban mozgó test kölcsönhatása. A mezőgazdasági termelési folyamatok műszaki tervezése során legtöbbször a szemcsehalmoz és az azzal érintkező vagy benne mozgó test határfelületénél fellépő jelenségek helyes értelmezése és pontos modellezése jelenti a legnagyobb nehézséget. Ezek a határfelületi jelenségek jelentősen befolyásolják az adott folyamat energiaigényét, a szerszámok, gépek kopását, élettartamát, pontosságát és különösen az előállított vagy megtermelt végtermék minőségét. A szemcsehalmozok mechanikai viselkedésének megismerése így közvetlen kapcsolatban van a termelési folyamatok hatékonyságának növelésével. A szemcsehalmozok különleges viselkedése – sem folyadékként, sem szilárd testként nem igazán modellezhetők – számos nehézséget támaszt az ezekkel az anyagokkal kapcsolatos tervező munkát végző szakemberek előtt.

Kutatásaim célja a szemcsehalmozokat az egyes szemcsék mozgása és a köztük lezajló kölcsönhatások szintjén modellező diszkrét elemes módszer (DEM) mezőgépészeti feladatok hatékony megoldására alkalmassá tétele elsősorban a DEM alkalmazásával kapcsolatos műszaki bizonytalanságok feloldásával.

1. A diszkrét elemes módszer alkalmazásával kapcsolatos egyik legnagyobb nehézséget a mechanikai kölcsönhatásokat vezérlő mikromechanikai paraméterek meghatározása (kalibrálás) jelenti. Ez egy rendkívül számításigényes eljárás, számos kísérleti vizsgálat végrehajtását is megköveteli és általában tovább tart, mint magának a konkrét műszaki problémának a megoldása. Kutatómunkám során megvizsgáltam több különböző kalibrálási eljárást, meghatároztam a kalibrálási eljárások különböző mikromechanikai paraméterekre vonatkozó érzékenységet, ezzel lehetőséget adva kalibrálás felgyorsítására, a mezőgépészeti gyakorlati problémákkal kapcsolatos modellezési feladatok idő- és számítási erőforrásigényének csökkentésére.
2. Sokszor jelent problémát az, hogy egy anyagmintát el kell szállítanunk valamilyen mérés helyszínére. Különösen igaz a talajmintákra az, hogy bolygatásuk után azok mechanikai jellemzői jelentős mértékben eltérnek az eredeti helyszínen mérhetőtől. Kísérleti vizsgálatokat és numerikus modellezési módszereket használva kidolgoztam egy olyan kalibrációs eljárást, amely a talajminták mechanikai tulajdonságainak helyszínen mért értékét használja fel a mikromechanikai jellemzők meghatározására, elkerülve így a

bolygatás okozta problémákat. Ennek az eljárásnak is megvizsgáltam a mikromechanikai paraméterekre való érzékenységet, lehetővé téve a kalibrációs eljárás felgyorsítását, és ezzel a modellezés idő- és erőforrás igényének lecsökkentését.

3. A talajművelő szerszám és a talaj kölcsönhatása területén, a rezgő talajművelő szerszámokkal kapcsolatban elért eddigi kutatási eredményeket kibővítve kimutattam, hogy a talajművelő szerszámról a talajba továbbterjedő rezgések – bizonyos körülmények között – képesek lehetnek a talaj fellazítására, így módon a vonóerőigény és ezen keresztül a talajművelés energiaigényének csökkentésére. Létrehoztam egy, a gyakorlat számára elfogadható pontossággal működő diszkrét elemes modellt, amely képes a rezgő talajművelő szerszám mozgatásához szükséges vonóerőigény előrejelzésére. Ebben az esetben is elemeztem a mikromechanikai jellemzők változtatásának hatását a vonóerő értékére, lehetőséget adva az új típusú talajművelő szerszámok tervezésével kapcsolatos munka hatékonyságának növelésére, az idő- és erőforrásigényes szántóföldi mérések számának csökkentésére. Talajművelő szerszám – talaj kölcsönhatással kapcsolatos eredményeimből kiindulva lehetőség nyílt olyan új típusú szerszámok, szerszám felfüggesztések kifejlesztésére, melyek segítségével a talajművelés erőforrásigénye, költsége, környezetszennyező hatása csökkenthető.
4. Szemestermények tárolása, különféle élelmiszerek és takarmányok előállítása során fontos feladat a szemcsehalmazok optimális mértékű keveredésével kapcsolatos műszaki feladatok hatékony megoldása. A keverési folyamat modellezésével kapcsolatos kutatási eredményeim lehetőséget adnak a műszaki gyakorlat számára a folyamat pontosabb modellezésére, ennek segítségével pedig az optimális keverés műszaki paramétereinek meghatározására. A keverés energiaigényének csökkentése és hatékonyságának növelése érdekében kimutattam, hogy bizonyos szemcsehalmazokat mozgó alkatrész nélküli, statikus keverőberendezésekkel is hatékonyan össze lehet keverni. Megvizsgáltam a Galton deszka elvén működő statikus keverőberendezések keverési hatékonyságának a kérdéskörét, lehetőséget adva konkrét keverőberendezések tervezéséhez szükséges konstrukciós és működési paraméterek előzetes becslésére, a keverési folyamat modellezésére.
5. A betakarított szemestermények víztartalmának csökkentése (szárítása) elengedhetetlenül fontos része azok további feldolgozásra vagy tárolásra való előkészítésének. A mesterséges szárítás igen magas energiaigénye (Beke, 1997, Baker, 1997, Mujumdar és Beke 2002) és esetenként környezetkárosító hatása miatt igyekeznünk kell a szárítás feladatát a lehető legnagyobb hatékonysággal elvégezni. Kutatásaim eredményeként ezt a hatékonyságnövelést tudtam elérni gravitációs rendszerű keresztáramú

szárítóberendezésben lejátszódó anyagáramlási folyamatok modellezésével, a szárítóberendezés konstrukciójának módosításával. Kimutattam, hogy milyen mechanikai jelenség okozza a termények alul- vagy túlszáritásából eredő minőségromlást, anyagi veszteséget. Megmutattam, hogy milyen konstrukciós módosítással lehet minimalizálni ezt a minőségromlást. Az elméleti megfontolások eredményeként kapott konstrukciót pedig gyártástechnológiai megfontolások alapján tovább módosítva kidolgoztam egy könnyen legyártható lamella geometriát, amely jelentősen csökkenti a szárítóbeli magmozgás egyenetlenségét, javítva a végtermék minőségét.

Ezen kérdésekre adott válaszaimmal – számos más kutató munkájával együtt – talán nekem is részem lehetett abban, hogy sikerült a diszkrét elemes modellezést, mint módszert megismertetni a mezőgépezettel foglalkozó szakemberekkel. Kicsivel talán közelebb jutottunk ahhoz a célhoz, ahová a végeelem módszer már évtizedek óta eljutott: a mindennapi tervezés jól megszokott, gyakran használt eszköze lett. Ha a diszkrét elemek módszere még nem is tart itt, mégis egyre több alkalmazását láthatjuk a mezőgépezetben.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A mezőgépezet területén dolgozó mérnökök gyakran találkoznak a szemcsés anyagalmazok különleges mechanikai tulajdonságaiból eredő problémákkal. A szemcsés anyagalmazok bizonyos körülmények között szilárd anyagokhoz hasonlóan viselkednek. Teherviselésre képesek, megőrzik alakjukat. Más körülmények között ugyanaz a szemcsealmaz, amely korábban szilárd testként volt modellezhető, folyadékhoz hasonló tulajdonságokat mutat. Viselkedése azonban mégsem pontosan ugyanolyan, mint az áramló folyadéké. Számos kutató szerint az anyag külön halmazállapotának tekinthetjük a szemcsés halmazokat. Ugyan alkotóelemeik szilárd testek, mégis a „mennyiségi változások minőségiébe való átcsapása” következményként a nagyszámú szilárd test együttes viselkedése nem jelezhető előre könnyen a szilárd testek mechanikájának sem a kontinuumok mechanikájának fogalmaival. Különösen igaz ez azokra a problémákra, ahol a szemcsealmaz folytonossága megszakad, alkotóelemei összekeverednek. A kontinuum-mechanika Euler-féle leírási módon (mezőleírás) alapuló megközelítése ilyenkor csak igen komoly megszorításokkal alkalmazható. Sokkal inkább célravezető ezekben az esetekben a Lagrange-féle leírási mód (részecskeleírás) alkalmazása.

A diszkrét elemek módszere

A Cundall és Strack (1979) által kidolgozott diszkrét elemek módszere (DEM) egy numerikus eljárás, amelyet elsősorban olyan mechanikai rendszerek modellezésére használnak, ahol különálló, diszkrét részecskék kölcsönhatásai játszanak szerepet (Bagi 2007). Ilyenek például szemcsés anyagok, szemestermények, a talaj, különféle porok vagy egyéb részecske alapú rendszerek. A módszer a Lagrange-féle leírási módra épül, hiszen egyes szemcséket követ nyomon az idő folyamán, és azok mozgását, egymással és a határoló falakkal való kölcsönhatásait vizsgálja.

Egy K vonatkoztatási rendszert kiválasztva minden egyes szemcse mozgását az egyes szemcsék tömegközéppontjához mutató helyvektor időbeli változása adja meg. Ha $\mathbf{r}_0$ jelöli a vizsgált szemcse helyét a $t = t_0$ kezdőpillanatban, emiatt a szemcse mozgását leíró függvény nemcsak az időnek, hanem az $\mathbf{r}_0$ kezdeti konfigurációnak is függvénye lesz:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t, \mathbf{r}_0). \quad 2.1$$

A Lagrange-féle leírási mód minden fizikai mennyiség változását az előbbi módon adja meg. A diszkrét elemes módszer ennek a leírási módnak bizonyos értelemben további egyszerűsítéseként a halmaz mechanikai viselkedését az egyes szemcsék egymással, valamint a halmazt körülvevő vagy az abban mozgó falakkal való mechanikai kölcsönhatás direkt modellezésével írja le. Működési elve a következő algoritmus lépéseiként értelmezhető a legkönnyebben:

1. Kezdeti állapot, kezdeti- és peremfeltételek definiálása.

- b. Az egyes időlépésekben mért állapotváltozások alapján nyerhetőek a rendszer viselkedésére vonatkozó információk (pl. hogyan alakul a szemcsék eloszlása, hogyan reagálnak a rendszerben fellépő erőhatásokra).

A DEM algoritmus lehetővé teszi, hogy egy szemcsehalmoz mechanikai viselkedését modellezzük, figyelembe véve a szemcsék közötti kölcsönhatásokat, mozgásukat és ütközéseiket egy időben változó környezetben.

A mechanikai kölcsönhatások modellezése során tehát a lendület- és a perdülettételt kell felhasználnunk. Számos különböző szoftvert használtunk fel a modellezési feladatok megoldására, ezek közül itt a Mercury DPM nevű programrendszer működésének részleteit olvashatjuk (Weinhart et al. 2019).

A szemcsék haladó mozgását a lendülettétel felhasználásával vizsgáljuk:

$$m_i \ddot{\mathbf{r}}_i = \sum_{j=1}^n \mathbf{F}_{ij}. \quad 2.2$$

Itt $\mathbf{r}_i$ az adott szemcse tömegközéppontjához mutató helyvektor, m_i a szemcse tömege $\sum \mathbf{F}_{ij}$ pedig az i -edik szemcsére ható erők eredője. A szemcsék pillanatnyi forgó mozgását a perdülettétel felhasználásával tudjuk leírni:

$$\mathbf{J}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i = \sum_{j=1}^m \mathbf{M}_{ij}. \quad 2.3$$

Itt $\mathbf{J}_i$ az i -edik szemcse tehetetlenségi tenzora, $\boldsymbol{\omega}_i$ a szögsebességvektora, $\sum \mathbf{M}_{ij}$ pedig az i -edik szemcsére ható erők nyomatékának összege.

A szemcsék szemcsékkel vagy falakkal lezajló kölcsönhatása érintkezési kapcsolaton keresztül jön létre. A szemcsék a modell szerint nem deformálhatók, hanem „fedésbe kerülnek egymással”. A legegyszerűbb, gömb alakú, a_i és a_j sugarú $\mathbf{r}_i$ és $\mathbf{r}_j$ pozíciójú szemcsék esetében, a δ_{ij} fedés és az $\mathbf{n}_{ij}$ érintkezési normális definíciója a következő

$$\delta_{ij} = \max(0, a_i + a_j - |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|), \quad 2.4$$

$$\mathbf{n}_{ij} = \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}. \quad 2.5$$

Az érintkezési pont meghatározható mint

$$\mathbf{c}_{ij} = \mathbf{r}_i - \left(a_i - \frac{\delta_{ij}}{2} \right) \mathbf{n}_{ij}. \quad 2.6$$

A szemcsékre ható erő lehet belső- és külső erő:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^{\text{külső}} + \sum_{i \neq j} \mathbf{F}_{ij}. \quad 2.7$$

A párkölcsönhatásokból származó belső erők követik a hatás-ellenhatás törvényét: $\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji}$.

A külső erők általában a nehézségi erő, a falakkal való kölcsönhatásból származó erő, esetleg egyéb inerciaerők:

$$\mathbf{F}_i^{\text{külső}} = \tilde{\mathbf{F}}_i + m_i \mathbf{g} + \sum_{i=1}^{N_w} \mathbf{F}_{ij}^w. \quad 2.8$$

Itt $\tilde{\mathbf{F}}_i$ jelöli az inerciaerőket, N_w a szemcsével érintkezésbe lépő falak számát $\mathbf{F}_{ij}^w$ pedig az érintkezési erőket.

Az erőhatások eredményeként természetesen nyomatékok is létrejöhetnek:

$$\mathbf{M}_i = \mathbf{M}_i^{\text{külső}} + \sum_{i \neq j} (\mathbf{c}_{ij} - \mathbf{r}_i) \times \mathbf{F}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}. \quad 2.9$$

A kontakterők modellezésére számos modell közül választhatunk, itt például a Hertz-Mindlin (Hertz 1882, Mindlin és Deresiewicz 1953) féle kapcsolati modellt láthatjuk:

$$\mathbf{F}_{ij} = (k\delta_{ij} + \gamma\dot{\delta}_{ij})\mathbf{n}_{ij}, \quad \text{ha } \delta_{ij} > 0. \quad 2.10$$

Itt k jelenti az érintkezési pontba képzelte rugó (Zhang 1996) merevségét, γ a szintén az érintkezési pontba képzelte csillapító dugattyú csillapítása, $\dot{\delta}_{ij}$ pedig az átfedés létrejöttére jellemző sebesség.

A szemcsék viselkedését jelentős mértékben meghatározza az egymással és a falakkal létrejövő ütközésük. Az ütközés előtti és az ütközés utáni sebességek közötti kapcsolatot, az ütközés során fellépő mechanikai energiaveszteséget az ütközési tényező fejezi ki:

$$C_r = -\frac{\mathbf{v}_{ij}^{n,\text{után}}}{\mathbf{v}_{ij}^{n,\text{előtte}}}. \quad 2.11$$

Itt $\mathbf{v}_{ij}^n$ az egymással ütköző szemcsék relatív sebességének normális komponense.

Az ütközés lezajlása során eltelt idő

$$t_c = \frac{\pi}{\sqrt{\frac{k}{m_{ij}} - \left(\frac{\gamma}{2m_{ij}}\right)^2}}, \quad 2.12$$

ahol $m_{ij} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$. Az ütközési tényező és az ütközési idő a következőképpen kapcsolódnak egymáshoz:

$$C_r = \exp\left(-\pi \frac{\gamma}{2m_{ij}} t_c\right). \quad 2.13$$

Az EDEM (EDEM 2012) szoftverben alkalmazott „Hertz-Mindlin with no slip” kapcsolati modell használata során az erők normál komponensei a következőképpen számíthatók:

$$F_n = \frac{4}{3} E_0 \delta^{\frac{3}{2}} \sqrt{R_0} - 2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln C_r}{\sqrt{\ln^2 C_r + \pi^2}} \sqrt{2 E_0^4 \sqrt{R_0} \delta} \sqrt{m_0} v_{\text{rel}}, \quad 2.14$$

ahol az $\frac{1}{E_0} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$ összefüggésből megkaphatjuk az E_0 redukált rugalmassági moduluszt. A δ normál átfedés jelentős szerepet játszik a kapcsolati erők számítása során, mely a következőképpen határozható meg: legyen két szemcse, melyet i és j jelöl, a súlypontok egymáshoz képest viszonyított helyzete legyen x_i és x_j , a sugaruk pedig R_i és R_j . Ekkor $\delta = R_i + R_j - (x_j - x_i)$. A redukált sugár a következőképpen számítható: $R_0 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$, a redukált tömeg hasonlóképpen számítható: $m_0 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$. v_{rel} pedig a szemcsék közötti relatív sebesség normál komponense.

Két szemcse közötti érintőirányú erőkomponens a következőképpen számítható:

$$F_t = -8G_0\sqrt{R_0}\delta\delta_t - 2\sqrt{\frac{5}{6}}\frac{\ln C_r}{\sqrt{\ln^2 C_r + \pi^2}}\sqrt{2G_0^4}\sqrt{R_0}\delta\sqrt{m_0}v_{\text{rel}}, \quad 2.15$$

ahol a redukált rugalmassági moduluszhoz hasonló összefüggést írhatunk fel a G_0 redukált csúsztató rugalmassági modulus esetére, azaz $\frac{1}{G_0} = \frac{2-\nu_1}{G_1} + \frac{2-\nu_2}{G_2}$, ahonnan a G_0 számítható. δ_t a két szemcse közötti érintőirányú átfedés, a v_{rel} pedig a szemcsék közötti relatív sebesség érintőirányú komponense.

A szemcsék közötti F_n és F_t erőkomponensek között a Coulomb féle súrlódási törvény termet kapcsolatot, azaz $F_t \leq \mu_0 F_n$, ahol a μ_0 a nyugvásbeli súrlódási tényező. Ez az összefüggés biztosítja, hogy az érintőirányú komponens nem lehet nagyobb a normál irányú komponensnél.

A szemcsékre ható erőkön kívül definiálható még az adott komponensekből származó nyomaték, azaz $M_r = -\mu F_n R_i \omega_i$, ahol R_i jelöli az i -edik szemcse súlypontja és az érintkezési pont közötti távolságot, ω_i a szögsebességvektor irányába eső egységvektor, mely az i -edik szemcse forgásirányát jelöli ki, μ pedig a mozgásbeli súrlódási tényező. Hasonlóan határozható meg az F_t érintőirányú erőkomponens M_t nyomatéka: $M_t = F_t R_i$.

Kohézív anyagmodell alkalmazása esetén a kohézív kötések bekapcsolásának pillanatában az érintkezésben- valamint az egymástól a kohézív kötési sugárnál kisebb távolságra lévő szemcsék között kapcsolódás jön létre. Ezek a kötések képesek terhelések felvételére és el is tudnak szakadni. A kötési erők kezdeti értéke zérus, majd minden egyes időléptékben az alábbi összefüggések szerint változik értékük:

$$\delta F_n = -v_n S_n R^2 \pi \delta t, \quad 2.16$$

$$\delta F_t = -v_t S_t R^2 \pi \delta t, \quad 2.17$$

$$\delta M_n = -\omega_n S_t \frac{R^4}{2} \pi \delta t, \quad 2.18$$

$$\delta M_t = -\omega_t S_n \frac{R^4}{2} \pi \delta t, \quad 2.19$$

ahol $S_{n,t}$ a szemcséket összekötő kohézív „híd” felületegységre eső normál és tangenciális merevsége, δt a szimuláció időlépése, $v_{n,t}$ és $\omega_{n,t}$ a kapcsolatban lévő szemcsék relatív sebességének és szögsebességének normál- és tangenciális összetevője. Ez a kohézív kötés csak addig tart, amíg a normál- és nyírófeszültségek túl nem lépnek egy-egy előre meghatározott értéket:

$$\sigma_{\max} = -\frac{F_n}{A} + \frac{4M_t}{R^3\pi}, \quad 2.20$$

$$\tau_{\max} = -\frac{F_t}{A} + \frac{2M_t}{R^3\pi}. \quad 2.21$$

A kohézív kötésben keletkező erők hozzáadódnak a Hertz-Mindlin kontakt modellben szereplő erőkhöz.

A kohézív kötések más módon is modellezhetjük pl. a Yade szoftver alkalmazása esetén (Kozicki és Donzé, 2009; Smilauer, 2010) a szemcsék között keletkező normálerő

$$F_n = \min(k_n \delta, a_n) \quad 2.22$$

ahol k_n a normálirányú rugómerevség, δ a szemcsék közötti normálirányú átfedés, a_n pedig a normálirányú adhézió. A szemcsék között átvihető tangenciális erő értékét a YADE DEM szoftver az $F_t = k_t \delta_t$ összefüggéssel határozza meg, Itt k_t az érintő irányú rugómerevség, δ_t pedig az érintő irányú átfedés. A kötések terhelhetőségét a nyíróerő maximális értéke szabja meg:

$$F_t^{\max} = \mu_0 F_n + a_s, \quad 2.23$$

ahol a_s az érintőirányú adhézió. Egy r_1 és r_2 sugarú szemcse érintkezésekor ezen adhézió értékek a következő módon kerülnek meghatározásra:

$$a_n = nCoh \cdot \min(r_1, r_2)^2, \quad a_s = sCoh \cdot \min(r_1, r_2)^2. \quad 2.24$$

Itt $nCoh$ a kohézív kötés normál irányú szilárdsága, $sCoh$ pedig a kohézív kötés nyírószilárdsága. A maximális normál- vagy érintő irányú terhelhetőség elérésekor a szemcsék közötti kohézív kapcsolat megszűnik. Látható, hogy DEM különféle numerikus megvalósításai jellegében azonos, de kismértékben egymástól eltérő definíciókat használnak az egyes mechanikai kölcsönhatások modellezése során. Ennek az az egyik sajnálatos következménye, hogy az egyik szoftver segítségével kalibrált mikromechanikai paraméterek nem használhatók fel a másikban.

A diszkrét elemes modellezés elsődleges problémája a módszer számítási kapacitás igénye. Nagyszámú szemcse esetén, mivel az időlépték stabilitási okokból nem lehet nagyobb, mint az ütközésekből keletkező lökéshullámok legkisebb szecsén való áthaladásának T_R ideje

$$T_R = (0.1631\nu + 0.8766)^{-1} \pi R \left(\frac{\rho_p}{G_p} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad 2.25$$

(Rayleigh időlépték), a módszer számítási időigénye még szuperszámítógépes környezetben is igen magas lehet. További nehézséget okoz az, hogy az egyes szemcsék egymással és falakkal

való kölcsönhatását vezérlő mikromechanikai jellemzők értékét nem ismerjük, azokat a modellezési feladat előtt egyszerű kísérleti vizsgálatok DEM modellezésével, a mikromechanikai paraméterek tervszerű módosításával végrehajtott nagy mennyiségű számítás elvégzésével kalibrálnunk kell. A kalibrálás időigénye általában jóval magasabb, mint magának a konkrét modellezési feladaté. Emiatt minden olyan kutatási eredmény, ami a kalibrálás idő- és erőforrás igényét csökkenti, a gyakorlat számára nagy jelentőséggel bír.

A diszkrét elemes modellek kalibrálása

A szemcschalmaz alkotóelemei közötti kölcsönhatásokat az úgynevezett mikromechanikai jellemzők segítségével írhatjuk le. Ezek a mikromechanikai jellemzők a következők:

- Anyagjellemzők
 - Az egyes szemcsék anyagának sűrűsége.
 - Az egyes szemcsék anyagának rugalmassági modulusa.
 - Az egyes szemcsék anyagának Poisson tényezője.
 - A falak anyagának sűrűsége.
 - A falak anyagának rugalmassági modulusa.
 - A falak anyagának Poisson tényezője.
- Kapcsolati jellemzők
 - Súrlódási tényező az egyes szemcsepárok között.
 - Súrlódási tényező a szemcse-fal kapcsolathoz.
 - Gördülési ellenállás szemcse-szemcse kölcsönhatás esetén
 - Gördülési ellenállás szemcse-fal kölcsönhatás esetén.
 - Ütközési tényező szemcse-szemcse kölcsönhatás esetén.
 - Ütközési tényező szemcse-fal kapcsolat esetén.
 - Kohézió anyagmodell esetén:
 - a kohézió kötések merevsége,
 - a kohézió kötések szilárdsága,
 - a kohézió kötések nyírószilárdsága,
 - a kohézió kötés sugara.

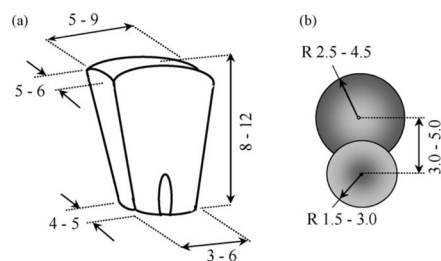
A diszkrét elemes modellezés eredménye a fenti mikromechanikai paraméterek értékeitől függ, így ezek helye értékének megadása elengedhetetlenül fontos része a modellezési feladatnak. (Horabik et al., 2020) és (Coetzee, 2017). Egyes mikromechanikai jellemzők értékének megmérése önmagában is nehéz feladat, ráadásul nem is biztos, hogy a mért értékek felhasználhatók a diszkrét elemes modellben, hiszen nemcsak a szemcsék alakja és méreteloszlása különbözhet a modellben a valóságtól, hanem maguk az egyes szemcsék közötti

kölcsönhatásokat modellező fizikai összefüggések is sokszor csak közelítések (Marigo et. al 2015). A mikromechanikai paraméterek meghatározásának szokásos módszere a kalibrálás eljárása: egyszerű kísérleteket végzünk a szemcsehalommal, majd ugyanezt a folyamatot modellezzük a DEM segítségével. A diszkrét elemes modell nagyszámú mikromechanikai paraméterét tervszerűen addig módosítgatjuk (a modellt az új paraméterekkel újra és újra lefuttatva), amíg a modell ugyanazt a makromechanikai viselkedést nem mutatja, mint amit kísérleti úton is megfigyelhettünk, a valódi szemcsehalommal. Már is érzékelhető, mi okozza az egyik problémát: a diszkrét elemes szimulációt újra és újra le kell futtatunk, minden mikromechanikai paraméter módosítás után. A modellek futtatása rendkívül időigényes feladat. A mikromechanikai jellemzők kalibrálása általában sokkal több időt igényel, mint a vizsgálni kívánt jelenség modellezése. Másik probléma lehet az, hogy potenciálisan több különböző mikromechanikai paraméter-kombináció is létrehozhatja ugyanazt a makromechanikai viselkedést. Ez „probléma” azonban lehetőséget is rejt magában: lehetőség adódik olyan paraméterkombináció kiválasztására, mely kisebb szimulációs erőforrásigénnyel is helyes eredményt adhat. Azt azonban nem szabad elfelejtenünk, hogy semmi nem garantálja emiatt azt, hogy egy jelenség modellezése érdekében elvégzett kalibrálásunk eredménye felhasználható lesz egy másik jelenség modellezésére is. Ilyen megközelítés alapján az tűnik célszerűnek, hogy magát a vizsgálni kívánt jelenséget használjuk fel a kalibrálás végrehajtására. Ez a megoldás azonban sajnos általában nem használható (Coetzee 2017). Ha ezt az eljárást alkalmazzuk, az általunk létrehozott modell nem lesz képes annak előrejelzésére például, hogy egy esetleges konstrukciós módosítás hogyan változtatná meg az általunk vizsgált berendezés működését. Ez pedig a mezőgépeszeti tervezésnek éppen a célját, a berendezés hatékonyságának növelését, a végtermék minőségének javítását, a környezetterhelés csökkentését lehetetlenítené el. A kalibrációs eljárást tehát egyszerű, a modellezni kívánt jelenséghez hasonló, de azzal nem egyező fizikai folyamattal célszerű elvégezni.

A mikromechanikai jellemzők kalibrálásának első lépéseként el kell döntenünk, hogy a szemcsehalom alkotó egyes szemcsék alakja milyen lesz modellünkben, a valódi méretet és méreteloszlást hogyan fogjuk figyelembe venni. A diszkrét elemes modellek nagy többsége gömbökből összerakott alakzatokat, „clump”-okat használ. A gömbök alkalmazásának fő oka az, hogy sokkal könnyebb két gömb érintkezését matematikailag leírni, mint síklapokkal (vagy bármilyen más felületekkel) határolt testekét. Ez a könnyebbség a modell számítási erőforrásigényében jelentkezik. Egy poliéderekből álló szemcsehalom vagy egy gömbökből álló szemcsehalom segítségével modellezve ugyanazt a folyamatot, tízszeres időigény növekedést tapasztalhatunk poliéder-modell használata esetén (Sinnott és Cleary, 2016). Tisztán gömbök használata sem célravezető, mert egyrészt a gömbökből alkotott halmaz belső súrlódása sokkal

kisebb, mint a valóságos halmazé (ezen a gördülési ellenállás segítségével tudunk bizonyos mértékig javítani), másrészt a gömbök kristályrácsszerű elrendeződést vehetnek fel, ami a valóságtól teljesen különböző anyagviselkedést eredményezhet a modellben. (Ming et al. 1995 és Lu et al. 2015) szerint a szemcsealak az egyik legfontosabb jellemző, amelynek minél pontosabb követése nélkül nem számíthatunk arra, hogy a DEM modellből levont következtetések, és főleg előrejelzéseink helyesek lesznek. Clumpok használata esetén megnő a szemcsék „összeakadásának” gyakorisága (Saint-Cyr et al. 2011), ez a halmaz elnyírásával kapcsolatos problémák esetén bírhat különös jelentőséggel. A szemcsék forgására is nyilvánvaló hatással van azok alakja, a szemcseforgás pedig jelentős hatással van a halmazok nyírószilárdságára, a nyírási zónák alakjára (Oquendo et al 2011, Zhou et al. 2013). Az energiadiSSIPációs folyamatok tekintetében sem elhanyagolható a szemcsealak hatása. A szemcseforgás következtében jelentkező mechanikai energiaveszteség két fő okra vezethető vissza: érintkezés során lezajló mechanikai folyamatok, valamint a szemcsealak hatása. (Wensrich és Katterfield 2012) szerint a szemcsealak nagyságrendekkel erősebb hatással van az energiadiSSIPációs folyamatokra, mint a kontakt jelenségek. A szemcsealak tehát az egyik legfontosabb paraméter, amely a DEM modell használhatóságát és pontosságát befolyásolja.

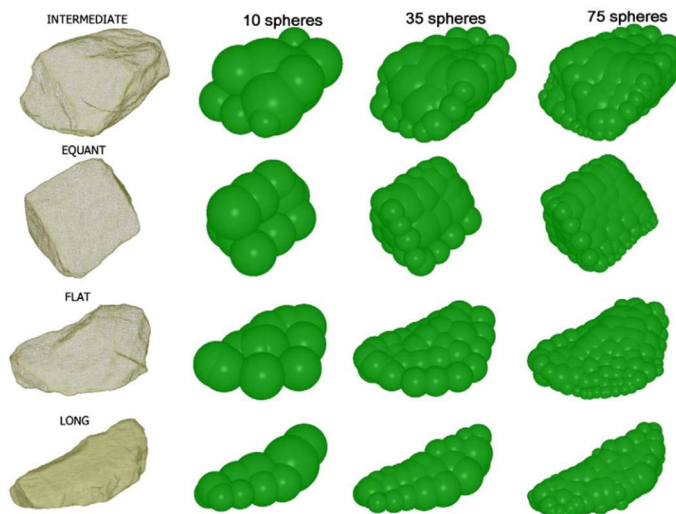
Kukorica szemcsék síkbeli mozgásának modellezésére Coetzee és Els (2009) például kétdimenziós, két körből álló szemcsealakot használt (2.1. ábra).



2.1. ábra: 2D kukoricaszem modell két körből (Coetzee és Els, 2009)

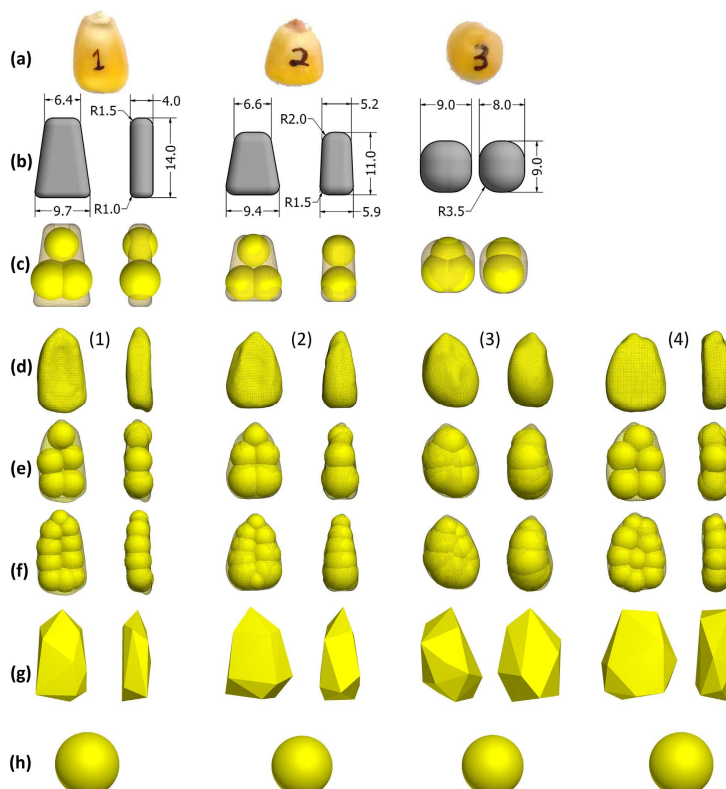
Az így kapott szemcse geometria felhasználásával nyíróvizsgálat, illetve rézsűszög mérés diszkrét elemes modelljét készítették el. Vizsgálati eredményeik szerint a halmaz belső súrlódási szöge függött a szemcsék közötti súrlódási tényezőtől, illetve a szemcsék rugalmassági modulusának értékétől. Ebből az következik, hogy a kalibrálást, valamint a valódi modellezési feladatot ugyanazon szemcse rugalmassági modulus értékkel kell végeznünk (Simons et al., 2015, Oldal et al., 2017, Talafha et al., 2022, Talafha és Oldal, 2022). Coetzee és Nel (2014) 3D szemcse modelleket használt annak a kérdésnek a vizsgálatához, hogy a gömbtől eltérő szemcsealakok alkalmazása során mennyire érdemes pontosan modellezni a szemcse geometriát. Kövek geometriáját modellezték különböző számú gömbből összeállított diszkrét elemes modellekkel (2.2. ábra). A vizsgálatokból azt a következtetést vonták le, hogy a valós geometriát nem célszerű túlzott pontossággal közelíteni, mivel a felhasznált szemcsék száma is nagyban befolyásolja a

szimulációs időt, azonban egy határon túl a szimulációk pontossága már nem fog érdemben nőni (Kuhn és Bagi, 2009). További probléma, hogy a szemcsék „összeragasztásakor” az átlapolás miatt a szemcsék anyagsűrűségére különösen figyelni kell.



2.2. ábra: Kövek geometriájának közelítése különböző számú gömbbel (Coetzee és Nel, 2014)

Coetzee (2020) kukoricaszemekből álló halmazokat vizsgált, a szimulációk során többféle közelítő geometriai alakzattal végzett vizsgálatokat (2.3. ábra). Coetzee eredményei azt mutatták, hogy a rézsűszög mérés már önmagában elegendő a súrlódási tényező és a gördülési ellenállás kalibrálásához. Érdekes megfigyelni, hogy itt már megjelenik a poliéderek használata, ami nem túl gyakori még, ugyanis poliéderek használata esetén a modellek számításigénye radikálisan megnövekszik.



2.3. ábra: Kukoricaszem alakok közelítése különböző geometriákkal (Coetzee 2020)

A kalibrálásra használt egyszerű kísérlet igen sokféle lehet, példaként felsorolva néhányat: penetrációs vizsgálat (Asaf et al. 2007), egytengelyű nyomóvizsgálat (Coetzee és Els 2009), rézsűszög mérés (Grima és Wypych, 2011), dinamikus rézsűszögmérés forgódobban (Jensen et al. 2014), siló kifolyásvizsgálatok (González-Montellano et al. 2011), triaxiális teszt (Obermayr et al. 2014), nyíróvizsgálat (Coetzee és Els, 2009). Kutatásaim során leginkább a klasszikus nyírókísérletet és a rézsűszög mérést (Bablina et al. 2021) használtam fel kalibrálási célokra.

Talajművelő szerszámok vonóerőigénye

A talajművelő szerszámok és a talaj kölcsönhatása során keletkező vonóerőigény meghatározása, a folyamat modellezése és a vonóerőigény csökkentése (a talajművelés minőségének megtartása mellett) a mezőgépeszet egyik klasszikus problémája, hiszen a talajművelés az egyik legenergiaigényesebb, legnagyobb környezetterhelést okozó területe a mezőgazdaságnak. Új talajművelő szerszámok tervezése is jelentősen egyszerűbbé válik, ha rendelkezésünkre állnak olyan modellezési eljárások, amelyek a drága és időigényes kísérleti vizsgálatok számát csökkenthetik.

Godwin szerint (Godwin, 2007) a talaj ellenállásából származó erők következő két összetevőjét kell figyelembe venni: a vízszintes (vontatási) erőt, amely a szerszám talajon való áthúzásához szükséges, valamint a függőleges erőt, amely elősegíti vagy akadályozza a szerszám talajba való behatolását. Ideális esetben a vízszintes erőnek a lehető legkisebbnek kell lennie, míg a függőleges erőnek lefelé kell irányulnia. Ezek az erők a haladási iránnyal bezárt szög, a szár mélysége, a szerszám szélessége és a sebesség függvényei (rezgő talajművelő szerszámok esetében fontos különbséget tennünk a vontató traktor sebessége és a szerszám talajban való mozgásának sebessége között). A tervezés két fő változója a mélység/szélesség arány és a haladási iránnyal bezárt szög.

A klasszikus analitikus számítások időnként 150%-os eltérést is mutatnak az elméletileg megjósolt és a mért vonóerőigény között (Onwualu és Watts, 1998). Ez a bizonytalansági szint a legtöbb esetben elfogadhatatlan. Nagyon hasznos lenne, ha – megfelelő numerikus szimulációk elvégzésével – ezek az erők pontosabban előre jelezhetők lennének. A mért vonóerő nem állandó, többé-kevésbé periodikusan változik a legtöbb esetben körülbelül $\pm 20\%$ -os értékkel. Jayasuriya és munkatársai részletes áttekintő cikkükben (Jayasuriya és Salokhe, 2001) kimutatták, hogy a talaj és a talajművelő szerszám kölcsönhatásának elméleti és kísérleti modellezésében alkalmazott különböző megközelítések olyan körülményeket eredményeztek, hogy „egy egyedi vagy univerzális modell felé haladni lehetetlen feladat lenne” Azt javasolták, hogy „számítógéppel támogatott módszereket alkalmazzanak egy olyan adatbázis létrehozásához, amely a

modellparamétereket bármely specifikus körülményhez vagy tervezési célhoz felhasználhatóvá teszi.” Ennek a megközelítésnek felel meg a diszkrét elemes módszer használata.

A rezgés csökkentheti a talajművelő szerszám vontatási ellenállását, ha a rezgés maximális sebessége meghaladja a szerszámhordozó berendezés haladási sebességét. Feltételezhető, hogy a rezgő szerszám alsó része az oszcillációs ciklus egy részében hátrafelé nyomja a talajt, ami csökkenti a vontatási erőt (Yow és Smith, 1976). Ez a feltételezés igaz az úgynevezett aktív szerszámrezgés esetén, amikor valamilyen külső eszközt használnak a szerszám rezgésének előidézésére. Az aktív szerszámrezgés ugyan a vonóerőt csökkenti, de a talajművelő gép terhelését és energiafelhasználását növeli, hiszen az aktív szerszámrezgés létrehozása munkavégzést igényel. Feltételezésünk szerint a talaj-szerszám kölcsönhatás által kiváltott (passzív) szerszámrezgés (ami nem igényel plusz munkavégzést a gép oldaláról) esetén a vontatási erő csökkenésének oka a rezgés által okozott változás a talaj szilárdsági és törési tulajdonságaiban. (Roberts és Scott 1978) szerint egy adott szemcsés anyaghalmoz nyírószilárdsága csökkenthető mechanikai rezgések alkalmazásával. A szilárdság csökkenése a frekvencia függvénye, ahol egy adott kritikus frekvencia vagy frekvencia-kombináció esetén a nyírószilárdság helyi minimumot ér el. Szélessávú véletlen rezgésekkel szintén elérhető a nyírószilárdság csökkenése. Van Der Linde irodalmi áttekintése (Van der Linde, 2007) szerint számos kísérleti tanulmány több mint 50 százalékos vontatási erőcsökkenést eredményezett rezgő szerszámok esetén, amelyek aktívan rezgő szerszámok voltak. (Fenyvesi 2009) megállapította, hogy a passzívan rezgő talajművelő szerszámok, amelyek a vágó-forgó mozgás elvén működnek (pl. ekék, kultivátorok), 50 Hz alatti frekvenciatartományban csökkenthetik a vontatási erőt. (Niyamapa és Salokhe 2000) kísérletileg kimutatták, hogy a szerszámra ható vízszintes és függőleges erők is csökkentek az oszcillációs frekvencia növekedésével. Kísérleteik szerint a penge felületén jelentkező normál talajnyomás is jelentősen változott. Bandalan és munkatársai (Bandalan et al. 1999) kísérleteik során azt találták, hogy az oszcilláló szerszám csökkentette a vontatási erőt, csökkentette a talajtömörödést, és ezáltal könnyebb traktorok használatát tette lehetővé.

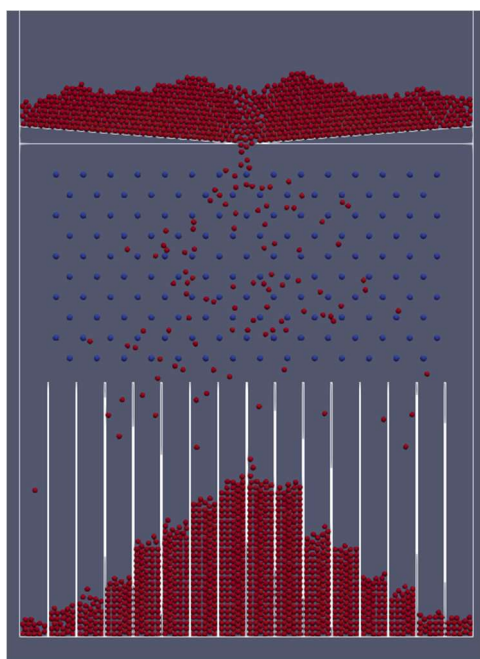
Mindezek alapján feltehetjük tehát, hogy passzív szerszámrezgések csökkenthetik a talajművelő szerszám vonóerőigényét, miközben nem jelentenek teljesítményigény növekedést a traktor részéről. Nagyon nehéz azonban olyan passzív rezgésfrekvenciát előállítani, amely ténylegesen jelentős vonóerőigény csökkenést okoz, így a jelenség numerikus modellek segítségével történő vizsgálata fontos eredményeket adhat a talajművelő szerszámok tervezésével foglalkozó gyakorlati szakemberek számára. Az analitikus modellezés korábban említett kudarca és a kísérleti vizsgálatok jelentős költsége jól használható numerikus modellek alkalmazásának igényét veti fel, A diszkrét elemek módszere pedig különösen alkalmas ilyen jellegű problémák modellezésére (Obermayr et al 2011, 2014).

Statikus keverőberendezések

Két fő kérdés merül fel minden keverési folyamat tervezése során: a keverék minősége (homogenitása) és a keverésre rendelkezésre álló idő (Paul et al. 2004). Mezőgazdasági alkalmazási szempontból egy harmadik kérdés, a keverési folyamat energiaigénye is felmerül. Nyilvánvalóan szeretnénk a keverést a legkisebb energiafelhasználással elvégezni. Mozgó alkatrészt nem tartalmazó, úgynevezett statikus keverőberendezések segítségével a keverés energiaigénye a lehető legkisebbre csökkenthető (Göbel et. al 2019). Még akkor is hasznunkra lehetnek, ha a teljes keverést nem, de bizonyos komponensek előkeverését elvégezhetjük velük. Statikus keverőberendezések alkalmasak arra is, hogy az üzemi működés során fennálló anyagáramba helyezve egy folyamatos keverést biztosítsanak, ezzel megakadályozva a szemcsehalmoz mozgás közbeni szegregációját pl. különféle anyagáramlási csatornáknban.

Statikus keverőberendezést hozhatunk létre oly módon, hogy az áramló szemcsehalmozatra kényszerítjük, hogy mozgása során tervszerűen elhelyezett akadályokba ütközzön. Hatékony keverést azonban csak akkor tudunk elérni, ha nyomon tudjuk követni az ütközések során lezajló folyamatokat, amire a diszkrét elemes modellezési módszer jó lehetőséget biztosít számunkra.

Kiváló lehetőséget biztosít az ütközésen alapuló statikus keverőberendezések vizsgálatára a Galton deszka működési mechanizmusának elemzése. Francis Galton készítette el először a később róla elnevezett készüléket 1873-ban. Két fő részből áll, melyek egyike a felső, ütközősorokat (bütyköket) tartalmazó- másik pedig az alsó rész, melyek oszlopai között gyűlnek fel az ütközősorokon áthullott golyók (2.4. ábra). Minden ütközés a golyó balra vagy jobbra elpattanásával végződik, az egymást követő ütközések így egy sztochasztikus folyamatot eredményeznek melynek végén a golyók mindegyike valamelyik „tartályban” végzi útját.



2.4. ábra: Galton deszka működésének modellje

Az azonos valószínűségű, balra vagy jobbra történő elpattanás egy haranggörbe alakú szemeloszlást eredményez, egy binomiális eloszlás közelítő sűrűségfüggvényét kapjuk. A Galton deszka számos különböző numerikus modelljét készítették már el korábbi szerzők, de ezek legtöbbje konkrétan a binomiális eloszlás statisztikai tulajdonságait használja fel a jelenség leírására (Aslah és Daud, 2014). Ebben a dolgozatban a konkrét mechanikai folyamatot modellezzük. A mechanikai modell létrehozásának első lépése az egyes szemcsék különálló mozgásának leírása, figyelmen kívül hagyva azt, hogy az egyes szemcsék esetleg egymással is ütközhetnek. A mozgás (Aslah és Daud, 2014) szerint három fő részre bontható: szabadesés, ütközés a büttyökkel, gördülés a büttyök felületén. A modellünkben a büttyök mérete olyan kicsi, hogy a gördülés elhanyagolható. A szabadesés mozgásegyenlete:

$$\frac{d^2}{dt} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g \end{bmatrix}. \quad 2.26$$

Ennek megoldása

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + v_{x0}t \\ y_0 + v_{y0}t - \frac{1}{2}gt^2 \end{bmatrix}, \quad 2.27$$

valamint

$$\begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{x0} \\ v_{y0} - gt \end{bmatrix}. \quad 2.28$$

x_0, y_0, v_{x0}, v_{y0} kezdeti feltételek felhasználásával. A golyók szabad mozgásának parabolikus pályagörbéje valamelyik büttyök felszínének ütközve végződik. A büttyök egyenlete

$$(x(t) - p)^2 + (y(t) - q)^2 = R^2 \quad 2.29$$

ahol p és q a büttyök középpontjának koordinátái, R pedig a büttyök sugara.

A mozgás további fázisának vizsgálatához célszerű áttérni arra természetes koordinátarendszerre, melyet a golyó büttyökkel érintkezésének pontjából rajzolhatunk meg (**n** normál- és **t** tangenciális egységvektorral). Ebben a koordinátarendszerben a beérkezési sebesség két komponense (v_n normális és v_t tangenciális):

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_n \\ v_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \cos \theta - v_y \sin \theta \\ v_x \sin \theta + v_y \cos \theta \end{bmatrix}. \quad 2.30$$

A $\mathbf{v}'$ visszapattanási sebesség meghatározható mint

$$\mathbf{v}' = \begin{bmatrix} v'_n \\ v'_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -C_{rn}(v_x \cos \theta - v_y \sin \theta) \\ C_{rt}(v_x \sin \theta + v_y \cos \theta) \end{bmatrix}, \quad 2.31$$

ahol C_{rn} és C_{rt} a normális és tangenciális irányhoz tartozó ütközési tényezők. Érdeemes megjegyezni, hogy ebben az egyszerű modellben a beérkező golyók forgásának szögsebességét nem vesszük figyelembe. További egyszerűsítés, hogy a későbbiekben feltételezzük, hogy $C_{rn} = C_{rt}$. Az ütközés után újra kezdődik a golyó szabad mozgása. A golyók látszólagos véletlenszerű

mozgása abból adódik, hogy 50-50% esély van arra, hogy az ütközés a bütők legfelső pontjától balra vagy jobbra lévő helyen történik. Egy valódi, a Galton deszka működésére alapozott működési mechanizmusú statikus keverőberendezésben a szemcsék nem egyesével haladnak át a bütőksoron, emiatt mozgásuk során egymással is ütköznek. Ennek figyelembevétele már csak valamilyen numerikus módszer alkalmazásával lehetséges, erre használtuk a diszkrét elemek módszerét.

A keverési index egy kulcsfontosságú paraméter, amely a keverés minőségét jelzi. Az 1-es érték teljes keveredést jelent, míg a 0-ás érték teljes szegregációt. (Chou et al. 2017). Számos különféle keverési index létezik, mi az egyik legegyszerűbbet használjuk, az úgynevezett Lacey keverési indexet (Lacey et al. 1954).

A keverési index meghatározása érdekében a vizsgálati tartományt N cellára osztjuk. Jelentse ϕ_i a vizsgált komponens mennyiségét az i -edik cellában, ϕ_m pedig legyen a vizsgált komponens teljes halmazbeli koncentrációját. A vizsgált komponens koncentrációjának σ^2 szórásnégyzete minden egyes cellában meghatározható:

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\phi_i - \phi_m)^2}{N - 1}. \quad 2.32$$

Kétkomponensű keverék esetén a σ_0 maximális keveredés kifejezhető mint

$$\sigma_0^2 = \phi_m(1 - \phi_m). \quad 2.33$$

A minimum keveredés σ_r

$$\sigma_r^2 = \frac{\phi_m(1 - \phi_m)}{n}, \quad 2.34$$

ahol n az egy cellában elhelyezkedő szemcsék száma. A Lacey index a következő összefüggéssel definiálható

$$L = \frac{\sigma_0^2 - \sigma^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2}. \quad 2.35$$

Az általam létrehozott statikus keverőberendezés működési hatékonyságát ennek az indexnek a felhasználásával vizsgáltam.

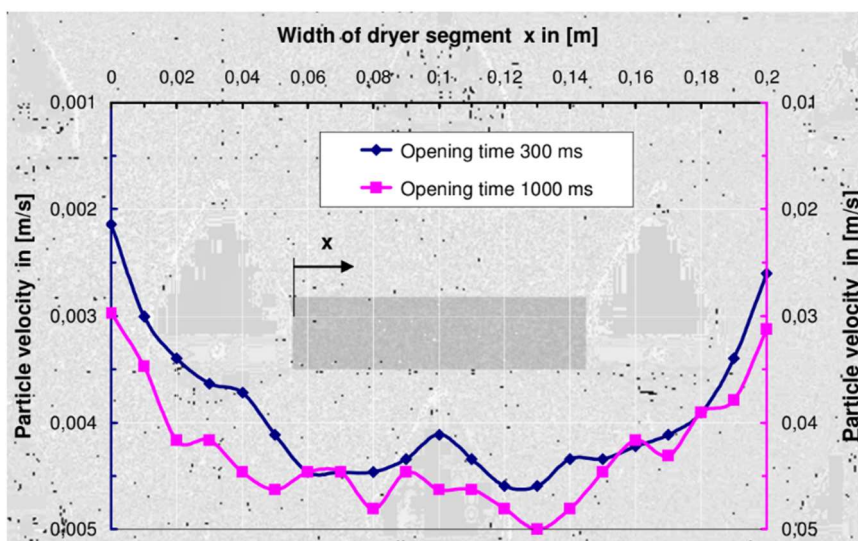
Szárító magmozgás vizsgálatok

A szemestermények különleges mechanikai viselkedésére utaló első kísérleti eredmények Janssen 1895-ös vizsgálataihoz kapcsolódnak (Janssen, 1895). Annak ellenére, hogy az elmúlt több, mint száz év alatt az elmélet jónéhány hiányosságára rámutattak a témával foglalkozó kutatók, az Európai Unió szabványgyűjteményében (EUROCODE 1, Part IV.: Actions in silos and tanks) megfogalmazottak tulajdonképpen Janssen 1895-ben elért eredményeinek alkalmazásai. Az ideális folyadékokkal ellentétben a szemestermény halmazok bizonyos mértékig képesek

nyírófeszültségek felvételére. A falsúrlódás miatt a töltet tömegét részben a siló fala hordozza, ezért a függőleges feszültségösszetevő értéke nem lineárisan növekszik a mélység függvényében. Ennek a változásnak a jellegét Janssen vizsgálta elsőként kísérleti úton. Janssen analitikus megoldást is adott a problémára a silóban lévő szemcschalmaz egy Δy vastagságú szeletének egyensúlyát vizsgálva, a silóban tárolt anyagot folytonos közegnek tekintve. A falsúrlódás figyelembevétele a siló falnyomás értékének lineáristól való eltérését eredményezte, a kapott összefüggés pedig a barometrikus magasságformulához hasonlít.

A szárítóberendezések csatornaszűkületei tovább bonyolítják a fent leírt jelenséget (Jenike, 1964a). A csatornaszűkületek hatásának kísérleti vizsgálatával és analitikus modellezésével foglalkozott több más szerző mellett (Artoni et al. 2011, Enstad, 1975, Tardos, 1997, Vanel et al., 2000, Ayuga et al., 2001, Keppler et al. 2012). Az analitikus modellek alkalmazási lehetőségét jelentős mértékben korlátozta a nagyszámú, térben elosztott csatornaszűkület jelenléte. Emellett az analitikus modellek nem tudták leírni az anyagáramlás megszakadása során létrejövő diszkontinuitásokat.

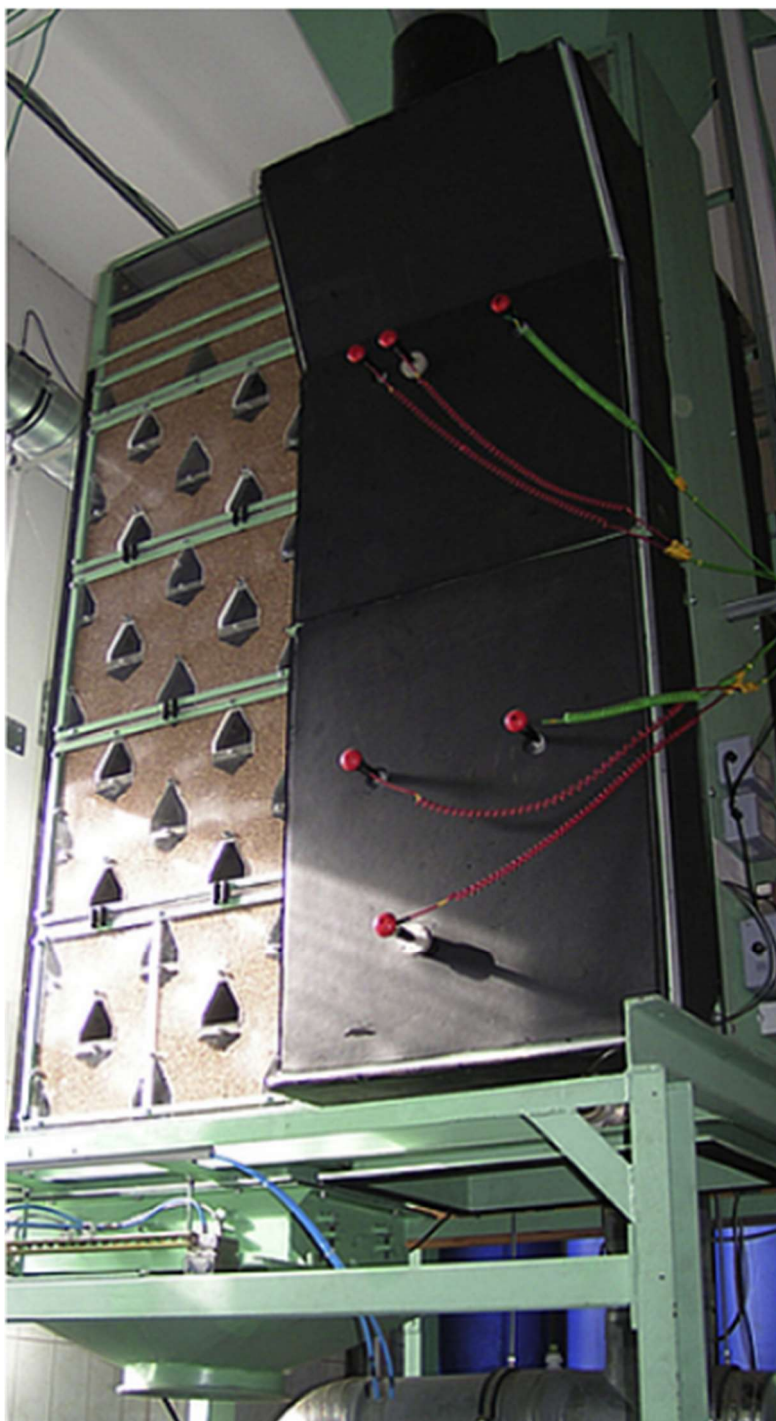
A szárítóberendezésben lezajló anyagáramlási folyamatok kísérleti vizsgálatát végezte el Kocsis et al. (2008), vizsgálataik kimutatták a szárítóberendezés légcsatornái közötti anyagmozgás sebességének egyenetlenségét (2.5. ábra).



2.5. ábra: Egyenetlen sebességeloszlás a légvezeték környezetében (Kocsis et. al 2008)

Mellmann modellszárítón végzett kísérleti vizsgálatai (Mellmann és Teodorov, 2011, Mellmann et al., 2011) azt mutatták, hogy a jelenlegi szárító konstrukciók a szárítóbeli tartózkodási idő, a szárított anyag nedvességtartalmának és hőmérsékletének jelentős szórását eredményezik. Kimutatták, hogy a nedvességtartalom egyenetlenségét elsősorban az alkalmazott légcsatorna elrendezés befolyásolja. A kísérleti vizsgálataik során alkalmazott modellszárító (2.6. ábra) két párhuzamosan, függőlegesen elhelyezett szárítóaknából áll, az egyiket a szemcséáramlási

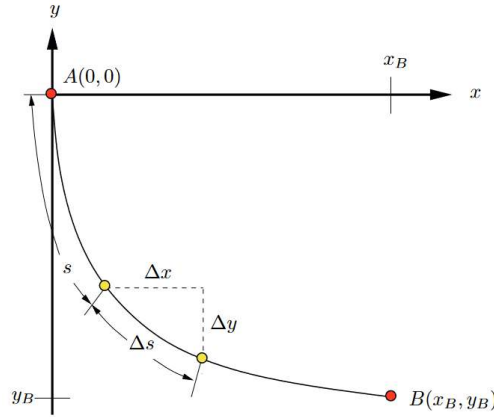
vizsgálatokhoz, a másikat a szárítási kísérletekhez használják. A szárítóberendezés kb. 2 m magas, 0,6 m széles és 0,4 m vastagságú, összesen 26 be- és kilépő légsatornával rendelkezik.



2.6. ábra: Modellszáritó felépítése (Mellmann et. al. 2011)

Mellmann kísérleti vizsgálatai, valamint az analitikus modellek megmutatták, hogy elsősorban a ferde falakkal való kölcsönhatás okozza az anyagáramlási egyenetlenségeket. Mellmann azonos tartózkodási időre vonatkozó hipotézisét tovább gondolva feltételeztük, hogy az optimális anyagáramlási viszonyok elérése érdekében mind a fal mellett, mind az anyagáramlási csatorna középvonalában lefelé haladó szemcséknek ugyanannyi idő alatt kéne áthaladnia a szárítóberendezés egy modulján.

Egy szemcse lefelé haladó mozgásának kérdése tulajdonképpen a variációszámítás egyik klasszikus problémája: a brachisztokron (a legrövidebb idő) probléma (Bernoulli 1696, Newton 1697, Leibnitz 1697): milyen alakú az a súrlódásmentes pálya, amelyen az egymás alatt, de nem ugyanazon a függőleges egyenesen elhelyezkedő A és B pont közötti utat a legrövidebb idő alatt teszi meg egy pontszerű test (2.7. ábra)? A feladat matematikai megfogalmazása (Taylor, 2005):



2.7. ábra: A Brachisztokron-probléma (Pesch, 2012)

Az A pontból B pontig történő mozgás ideje:

$$\int_A^B \frac{ds}{v} = \int_A^B \frac{ds}{\sqrt{2gy}} \quad 2.36$$

Az A és B pont távolsága: $ds = \sqrt{x'(y)^2 + 1} dy$, így

$$t_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_0^{y_B} \frac{\sqrt{x'(y)^2 + 1}}{\sqrt{y}} dy. \quad 2.37$$

Ebben az esetben egy integrált minimalizáló $x(y)$ függvény egyenletét keressük. Ennek meghatározására felírjuk a probléma Euler-Lagrange egyenletét:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{d}{dy} \frac{\partial f}{\partial x'} \quad 2.38$$

ahol $f(x, x', y) = \frac{\sqrt{x'^2 + 1}}{\sqrt{y}}$. A differenciálegyenlet megoldásaként egy ciklois egyenletét kapjuk:

$$\begin{aligned} x &= a(\theta - \sin \theta) \\ y &= a(1 - \cos \theta), \end{aligned} \quad 2.39$$

ahol az a paramétert geometriai feltételek alapján választjuk.

A súrlódás figyelembevétele esetén is létezik analitikus megoldás, mely jóval bonyolultabb. Számos kutató foglalkozott ezzel a témával, (Wensrich, 2004, Hayen, 2005, Čović és Vesković, 2008, Sumbatov, 2017), az eredményül kapott görbék a gyakorlat szempontjából csak elhanyagolható mértékben térnek el a súrlódásmentes esetben kapott ciklois alakú görbétől (Barsuk és Paladi, 2023):

$$x(\theta) = \frac{C}{2}(\theta - \sin \theta + \mu(1 - \cos \theta))$$

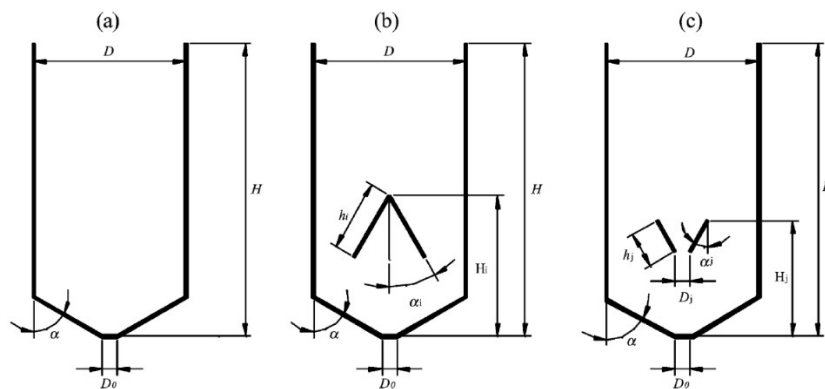
2.40

$$y(\theta) = \frac{C}{2}(1 - \cos \theta + \mu(\theta + \sin \theta)) + y_0,$$

ahol a C és y_0 paramétereket a geometriai peremfeltételek alapján választjuk.

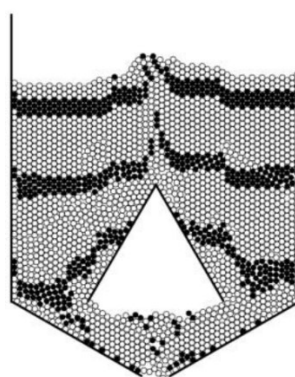
Természetesen a teljes szemcsehalmaz mozgása egy szárítóberendezésen belül jóval bonyolultabb probléma, hiszen ebben az esetben figyelembe kell venni a szemcsék közötti kölcsönhatásokat is, numerikus megoldásra van szükség. Az anyagáramlás folytonosságának időnkénti megszakadása nem teszi lehetővé a végelem alapú numerikus módszerek alkalmazását, ezért a diszkrét elemek módszere mutatkozik ismét jól használható eljárásként, amely a silóbeli nyomásviszonyok modellezésére, silóból történő kifolyás, illetve terelőelemek alkalmazásának vizsgálatára is alkalmasnak bizonyult (Ristow, 1997, Masson és Martinez, 2000; Yang és Hsiau, 2001, Anand et al., 2008, Gonzalez-Montanello et al., 2012, Horabik et al., 2016).

Yang és Hsiau (2001) geometriájú terelőlemezek szemcsemozgásra és a falnyomásra kifejtett hatását vizsgálta kétdimenziós diszkrét elemes modell segítségével (2.8. ábra).



2.8. ábra: Yang és Hsiau (2001) kétdimenziós silómodellje

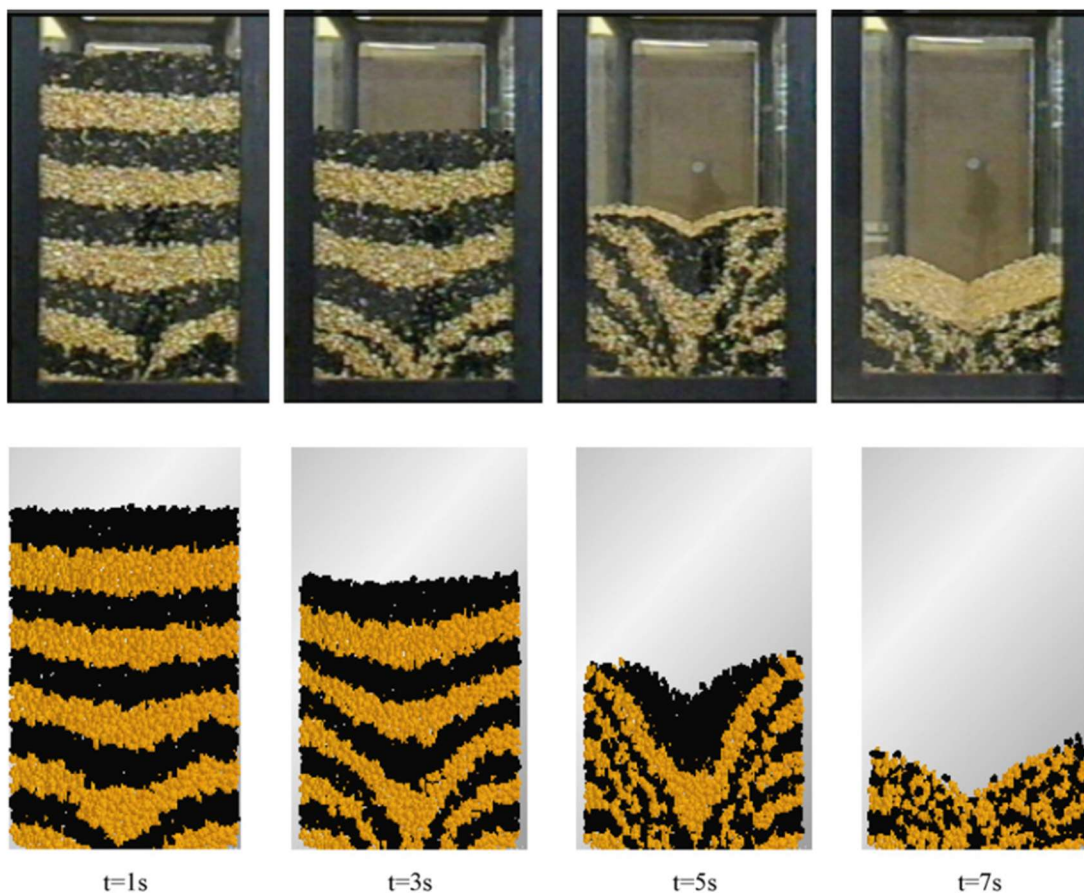
Yang és Hsiau (2001) Színezett csíkok „deformációjával” vizsgálta a sebességviszonyok alakulását az akadályok környezetében (2.9. ábra). Egyszerű, kör alakú szemcsékből álló kétdimenziós modelljük is azt mutatja, hogy a ferde falak környezetében lelassul az anyagáramlás. Ez a szárítóberendezésben kialakuló mozgásviszonyok szempontjából is fontos eredmény.



2.9. ábra: Színezett csíkok Yang és Hsiau (2001) modelljében

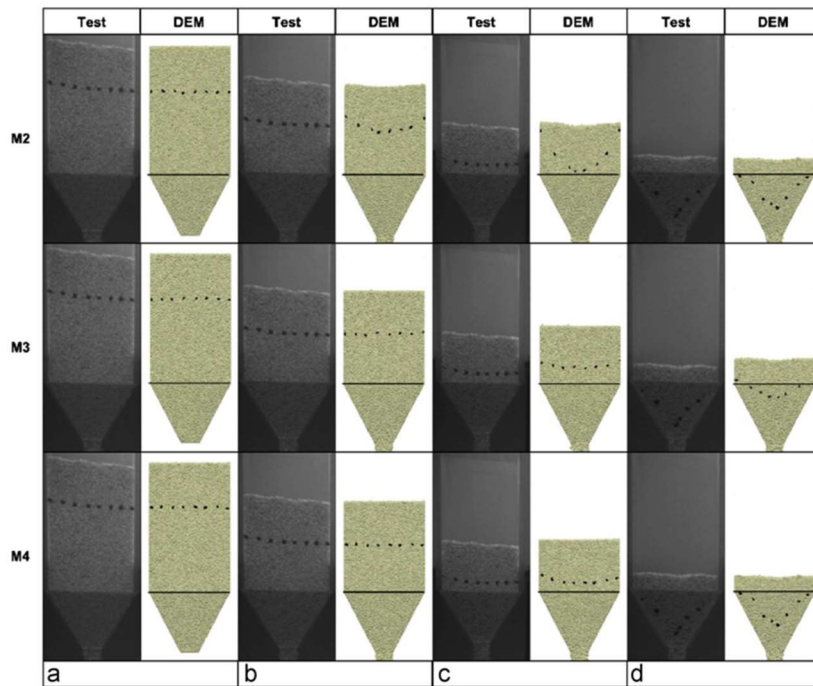
A szemcsehalmaz a szűkülő keresztmetszeteken való átfolyás során olyan öntartó boltíveket alkothat, ezek pedig képesek lehetnek az anyag kiömlésének megakadályozására (Jenike, 1964b, Keppler, 2009). Oldal és társai kimutatták (Oldal et al., 2012), hogy a boltívek kialakulásának és összeomlásának folyamata jelentős hatással van az anyagáramlás sebességviszonyaira. Kruggel-Emden et al. (2009) megmutatta, hogy a kifolyási idő és a sebességviszonyok jelentős mértékben függenek a szemcse súrlódási tényező értékétől.

Tao et. al. (2010) egy téglalap alapú, lapos aljú, szintén téglalap alakú ürítőnyílással ellátott tartályból való kiürülést vizsgált. Kimutatták, hogy a tartályból való kifolyás esetén a halmaz középső, illetve a fal mellett haladó fele közötti függőleges sebességkülönbség jóval nagyobb a gömbtől eltérő alakú szemcsék, mint gömb alakú szemcsék alkalmazása esetén. A mozgásviszonyok bemutatására mind a kísérleteikben, mind a szimulációkban színezett csíkokat használtak (2.10. ábra).



2.10. ábra: Szemcsék kifolyása kísérlet és szimuláció (Tao et al., 2010)

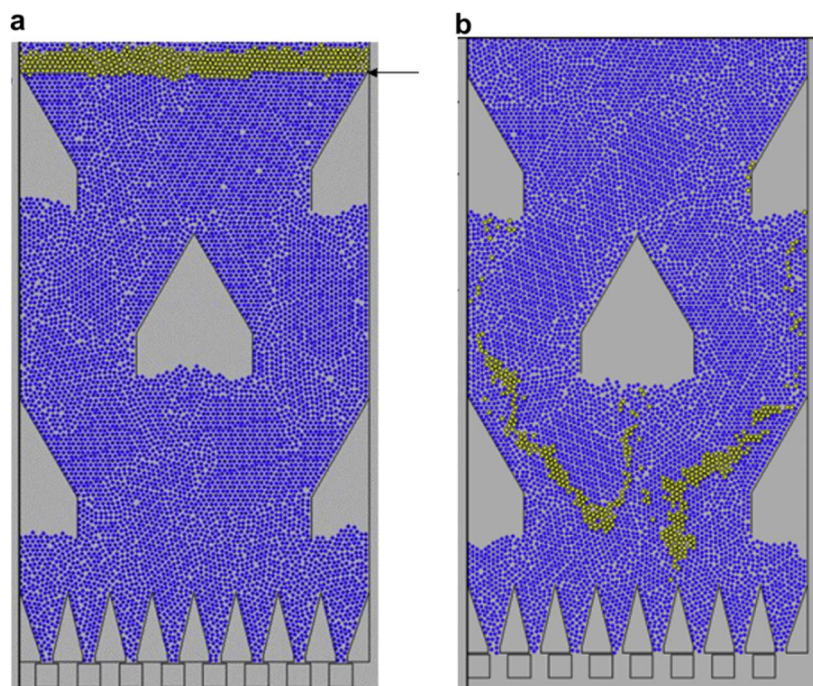
Hasonló eredményeket kapott González-Montellano et al. (2011) szintén téglalap alapú, de gúla alakú kifolyótérrel rendelkező tartály vizsgálata során gömb alakú, illetve gömbökből összeállított szecsek esetén (2.11. ábra).



2.11. ábra: Szemcsék kifolyása kísérlet és szimuláció (González-Montellano et al., 2011)

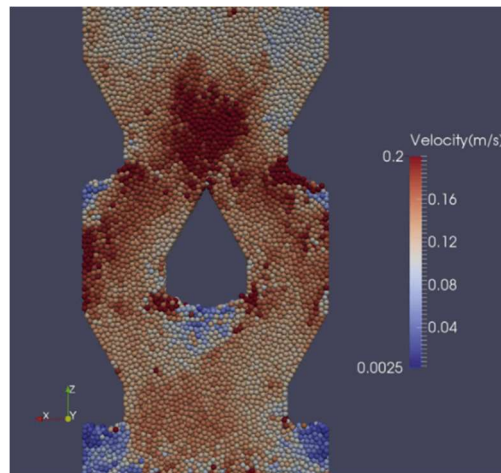
Oldal és Safranyik (2015) korábbi analitikus kifolyási modelljüket pontosították diszkrét elemek módszerének alkalmazásával. A DEM a nemstacionárius állapot modellezésére is kiválóan alkalmasnak bizonyult, a mért és a szimulációban meghatározott kifolyási tömegáramok jó egyezést mutattak.

A keresztáramú szárítóberendezéseken végzett kísérleti vizsgálatok áttekintése során Mellmann et al. (2011) munkájában szerepel egy egyszerű, kétdimenziós diszkrét elemes modell a szárítóberendezésben lezajló magmozgási folyamatokról (2.12. ábra).



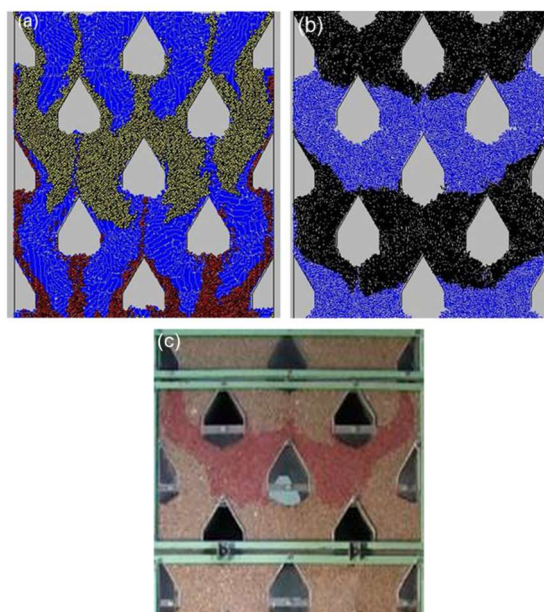
2.12. ábra: Két dimenziós diszkrét elemes szárítómodell [Mellmann et al. 2011]

Noha az ürítőmechanizmus modellje elfogadható pontossággal modellezte a valóságos ürítést, a kapott anyagáramlási kép csak nagy vonalakban felel meg a kísérleti vizsgálatokkal meghatározottnak. Hasonló eredményeket ért el kétdimenziós modelljével Rumsey és Rovedo (2001), (Giner et al. 1998). Khatchatourian et al. (2013, 2014) szőjabab keresztáramú szárítóberendezésből való kiáramlását vizsgálták (2.13. ábra), a szimulációban gömb alakú szemcséket alkalmazva. Ebben az esetben a szemcsék áramlási képe jó egyezést mutatott a kísérleti vizsgálatokkal.



2.13. ábra: Sebességeloszlás a DEM modellben (Katchatourian et al., 2014)

Weigler és Mellmann (2014) későbbi munkájukban már öt körből álló, ellipszis alakot közelítő szemcsékkel végeztek további kétdimenziós szimulációkat, összehasonlítva a korábbi, kör alakú szemcsékkel végzett szimulációkkal és a kísérleti vizsgálatokkal (2.14. ábra). Az áramlás során a szemcsék sebességviszonyai már jóval nagyobb egyezést mutattak a kísérleti vizsgálatokkal, mint gömb alakú szemcsék esetén. Ugyanez igaz más szerzők munkájára is (Golshan et al. 2020)

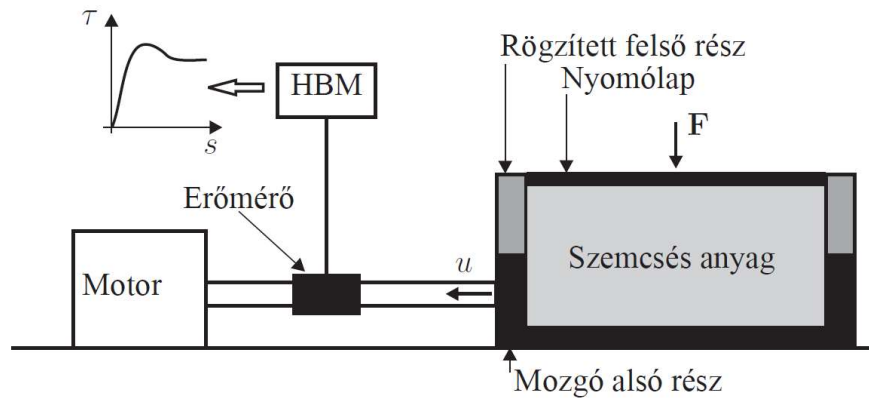


2.14. ábra: Szemek mozgásviszonyai kör alakú (a), ellipszis alakú (b) szemcsék használata során a szimulációkban, illetve a kísérleti vizsgálat (c) esetén (Weigler és Mellmann, 2014)

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

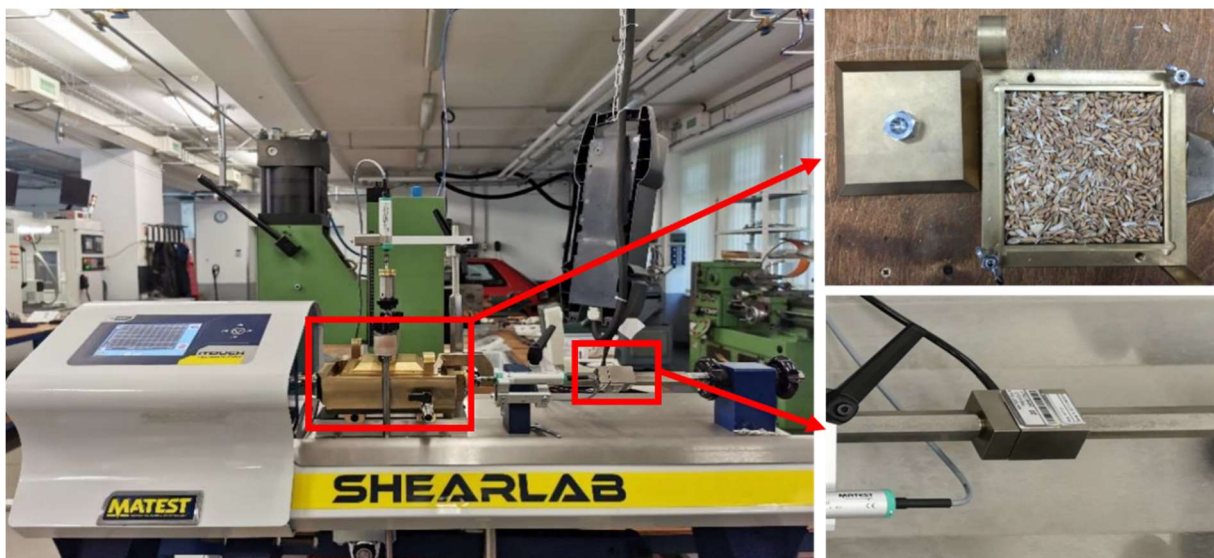
Nyíróvizsgálat alapú kalibrálási módszerek

A klasszikus nyírókísérlet során egy függőleges erővel előtömörített halmazt terhelünk egyre nagyobb vízszintes erővel, amíg a halmaz el nem „nyíródik” (3.1. ábra).



3.1. ábra: Nyírókészülék leegyszerűsített működési modellje (Keppler et al., 2016)

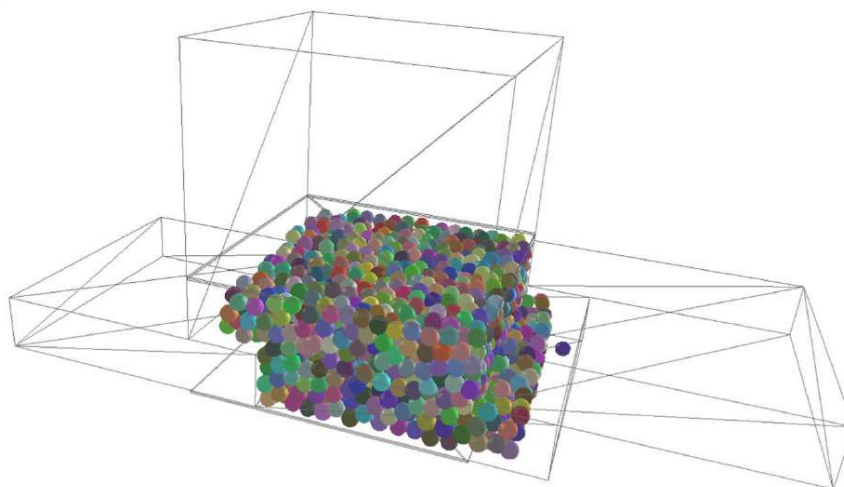
Különböző előtömörítő erők felhasználásával meghatározhatjuk a halmaz nyírási tönkremeneteli határgörbéjét. Ennek a görbének lineáris közelítés esetén két paramétere, a c látszólagos kohézió és a φ belső súrlódási szög jól jellemzi a szemcsehalmoz mechanikai viselkedését. Jenike (Jenike 1964) dolgozta ki a kísérleti eljárást, melynek számos módosított változata létezik napjainkban. Vizsgálataink szempontjából nincs különösebb jelentősége annak, hogy kísérleti vizsgálataink mennyire követik a „szabványos” nyírókísérlet módszertanát, csupán arra kell ügyelnünk, hogy a kísérleti vizsgálat és annak diszkrét elemes modellje a lehető legjobban hasonlítson egymásra.



3.2. ábra. Nyírókészülék (Junhao et. al. 2024)

A nyíróvizsgálat diszkrét elemes modellezéséhez a Jenike-féle klasszikus (EFCE 1989) készülék kissé módosított változatát alkalmaztuk (3.2. ábra). A fő különbséget a négyzet alakú nyomólap

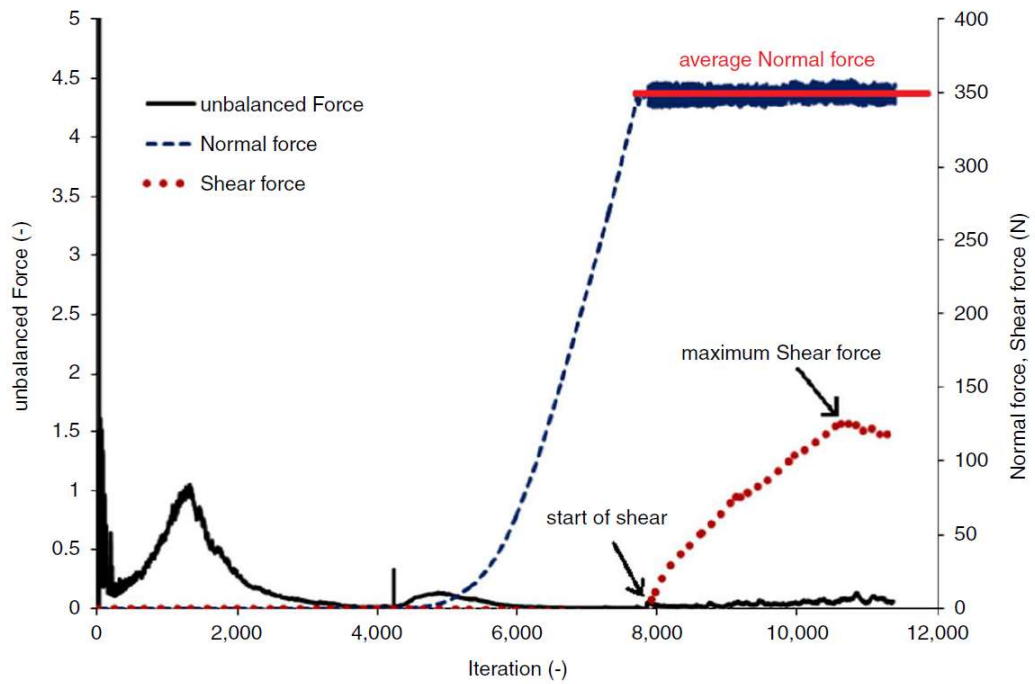
és nyíródoboz jelenti, mely eltér a Jenike által alkalmazott kör alaktól. A nyíródoboz mérete 0,1x0,1x0,05 m volt (3.3. ábra). A vizsgálathoz használt két 3mm-es sugarú gömbből összeállított szemcsék legnagyobb mérete 6,3 mm. A szemcse – nyíródoboz méretarány így $0,1/0,0063=15,87$ -re adódott.



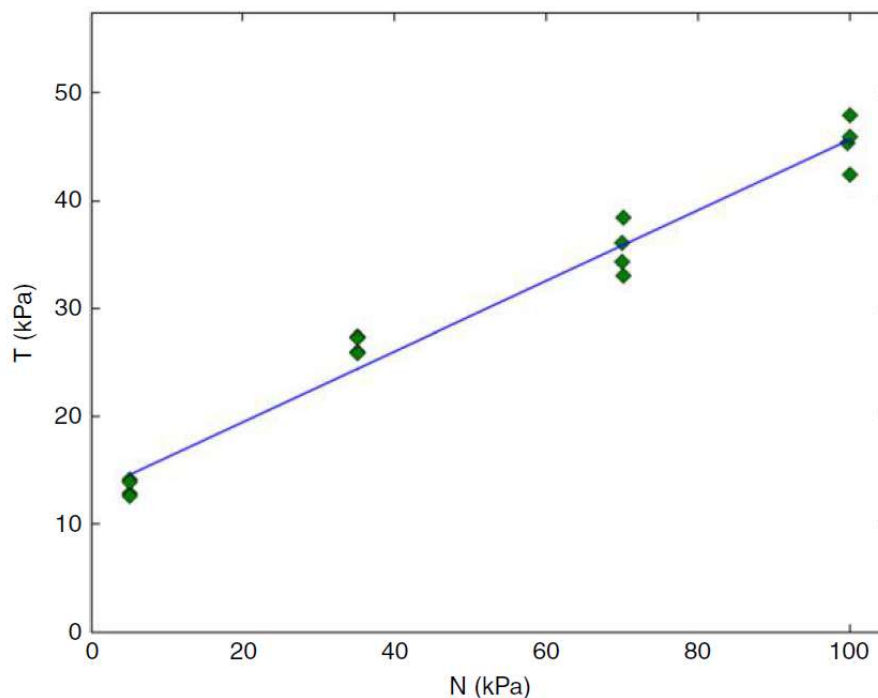
3.3. ábra: Nyírókészülék modellje (Keppler et al. 2015)

A nyíróvizsgálat diszkrét elemes modellje a következő fő lépések végrehajtásával működött

1. Szemcsehalmaz generálása a nyírókészülék feletti térfogatrészben.
2. Várakozás a halmazt alkotó összes szemcse lehullásáig, majd a lehullást követő halmaz rezgések lecsillapodásáig. A csillapodás időigénye az „unbalanced force” (a szemcsére ható maximális érintkezésből származó erő és a szemcsére ható maximális erő hányadosa: ennek az értéke a halmaz mozgásának csillapodásával nullához tart) értékéből határozható meg. Esetünkben e megadott érték 0.01 volt (3.4. ábra).
3. A halmaz lassú összenyomása a mozgó felső lap segítségével az előre definiált nyomóerő érték eléréséig.
4. Újabb várakozás a halmaz rezgéseinek lecsillapodásáig.
5. A kohézió „bekapcsolása” a modellben.
6. A nyírás elindítása a nyírókészülék alsó részének lassú mozgásával. Az alsó rész mozgása során a nyomóerő kismértékű szabályozott fel-le mozgása tartja fent a konstans függőleges nyomóerő értékét.
7. A nyírási folyamat addig tart, amíg a nyíróerő a maximális értékénél 10%-kal kisebb értékre nem csökken.

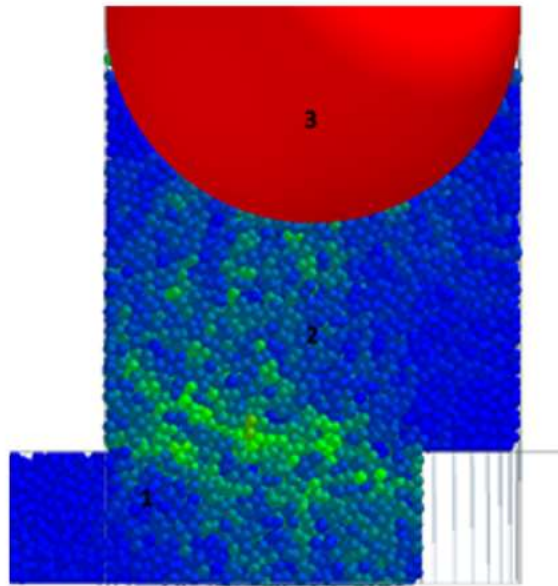


3.4. ábra: Normál-és nyíróerő változása az iterációs lépések függvényében (Keppler et al. 2015.)
A linearizált nyírási tönkremeneteli határgörbe létrehozásához négy különböző terhelési értéken négyszeres ismétléssel végeztük el a vizsgálatot 3.5. ábra (egyres pontok túl közel vannak egymáshoz, hogy különálló pontként jelenjenek meg).



3.5. ábra: Linearizált nyírási tönkremeneteli határgörbe (Keppler et al. 2015).

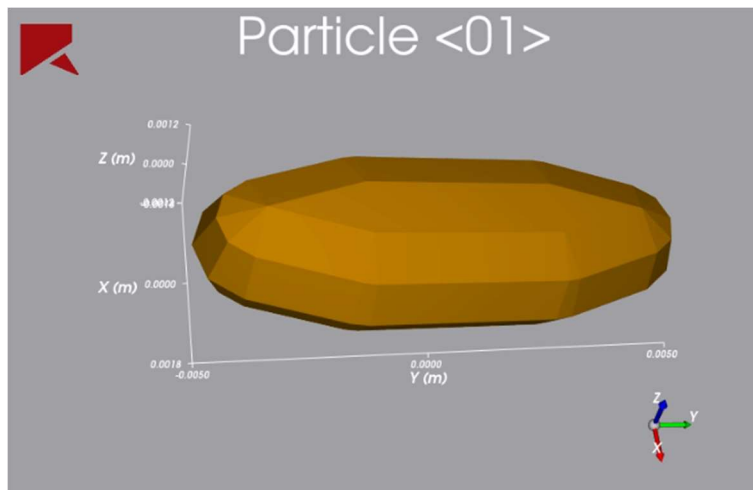
A felső nyomólap fel-le mozgásával fenntartott állandó normálerő problémáját más esetekben úgy küszöböltük ki, hogy egyetlen, a normál terhelés értékének megfelelően megválasztott súlyú szemcsével hoztuk létre a szemcsehalmaz függőleges terhelését (ebben az esetben természetesen hengeres nyírókészüléket alkalmazva (3.6. ábra)).



3.6. ábra: Hengeres nyírókészülék 1: alsó mozgó rész, 2 nyugvó hengeres rész 3 nyomóterhelést biztosító golyó (Keppler et al. 2022)

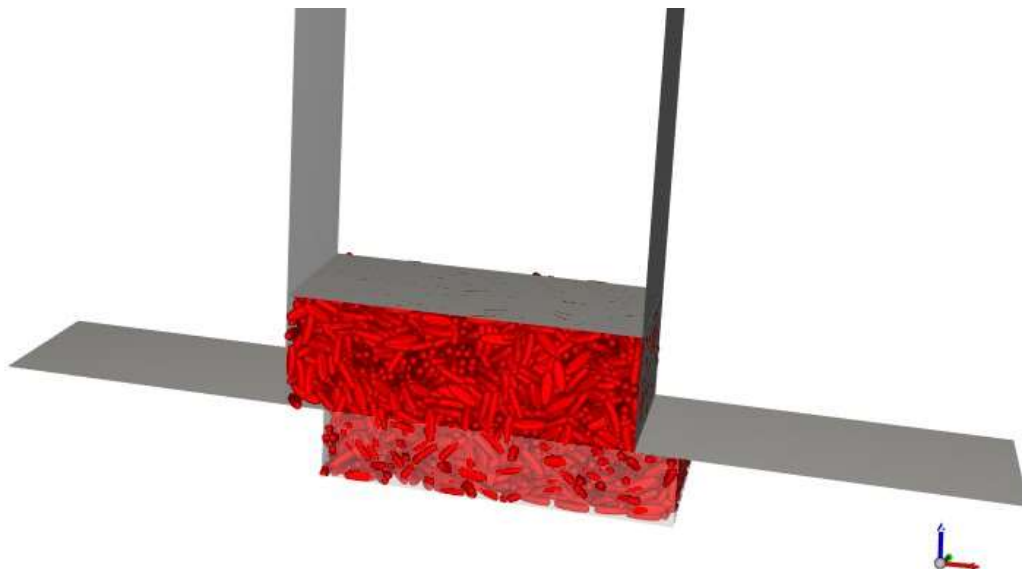
A nyírási síktól kellő távolságra elhelyezett test alakja a nyírási síkban keletkező terhelési viszonyok szempontjából közömbös (Saint-Venant elv), a gömb alak választása pedig lehetővé teszi, hogy a terhelő elem esetleges elbillenésével ne kelljen foglalkozni.

Poliéderekkel határolt szemcsealakkal is végeztünk nyíróvizsgálat szimulációkat (3.7. ábra). A nyíróvizsgálat ebben az esetben is a korábbiakban leírt módon történt, a szemcsealak volt más.



3.7. ábra: Poliéderekkel határolt szemcse (Junhao et. al 2024)

A nyírókészülék-modell működésében nem volt az előbb leírtaktól számottevő eltérés (3.8. ábra).



3.8. ábra: Nyírókísérlet modellje poliéderekkel határolt szemcsék esetén (Junhao et. al 2024)

A talajmintákon végzett nyíróvizsgálat során igen jelentős nehézséget okoz a bolygatatlan talajminta biztosítása. A talajminták kiemelése, laboratóriumba szállítása során csak igen körülményes módon vagy egyáltalán nem oldható meg a bolygatatlan talajminta biztosítása. Ennek a problémának a kiküszöbölése érdekében megvizsgáltuk egy olyan nyíróvizsgálat alkalmazásának lehetőségeit, amely a helyszínen elvégezhető.

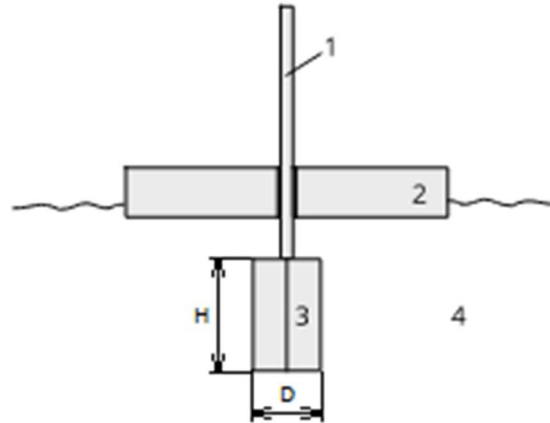
Torziós elven működő talajnyíró készülék (3.9. ábra) segítségével lehetőség adódik olyan helyszíni vizsgálatok elvégzésére, amelyek DEM modell kalibrálás céljaira is felhasználhatók.



3.9. ábra: Torziós elven működő talajnyíró készülék

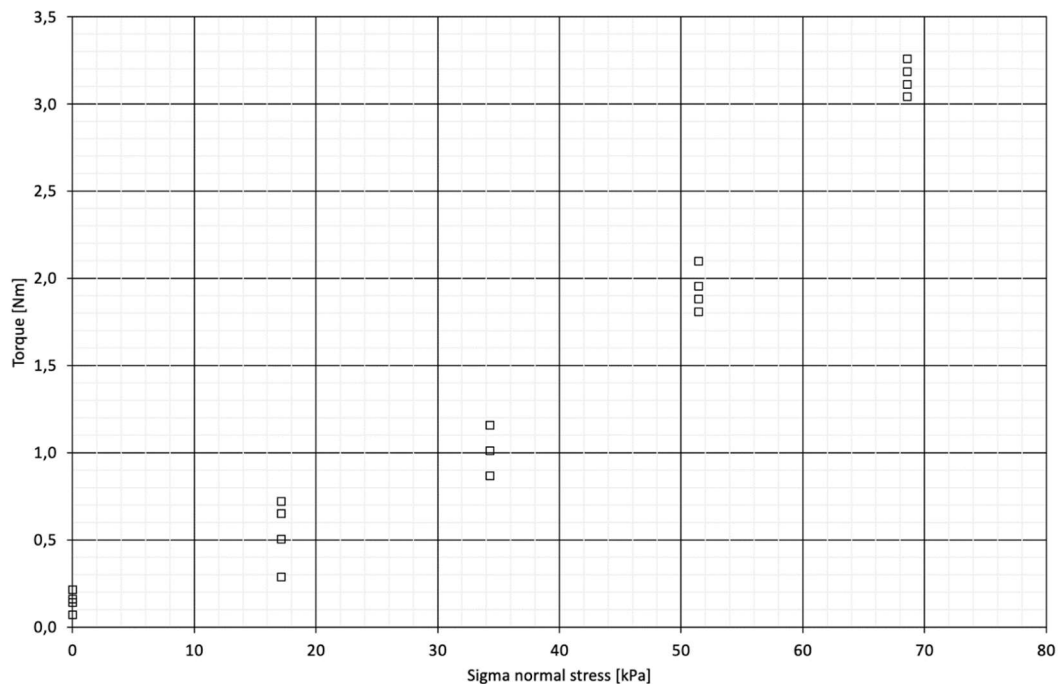
A NAIK Mezőgazdasági Gépesítési Intézet talajvályújában végeztünk arra vonatkozó vizsgálatokat, hogy elegendő információt tud-e biztosítani a torziós talajnyíró kísérlet a talaj diszkrét elemes modelljének kalibrálásához. A klasszikus laboratóriumi torziós vizsgálatot (Bauer et al. 2007, He et al. 2018) úgy módosítottuk, hogy a talajfelszínre helyezett különböző nagyságú

függőleges terhelésekkel megváltoztattuk az elnyírni kívánt talajminta feszültségállapotát, a klasszikus nyírókísérlethez hasonlóan előterhelést alkalmaztunk. A 3.10. ábrán látható módosított torziós talajnyíró készülék fő részei a tengely (1), a nyomóterhelés (2) a talajmintában elforduló nyírólapok (3) és maga a talaj (4).



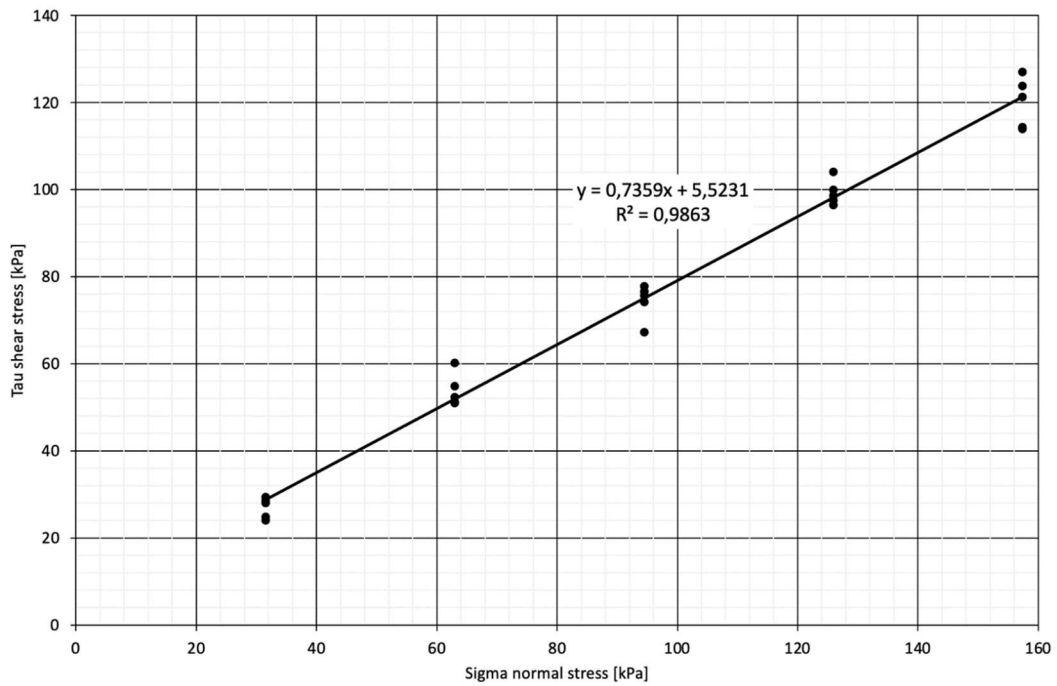
3.10. ábra: Módosított torziós talajnyíró készülék vázlata

A torziós nyírókísérletet több nyomóterheléssel elvégezve a 3.11. ábrán látható csúsztatófeszültség értékeket kaptuk.



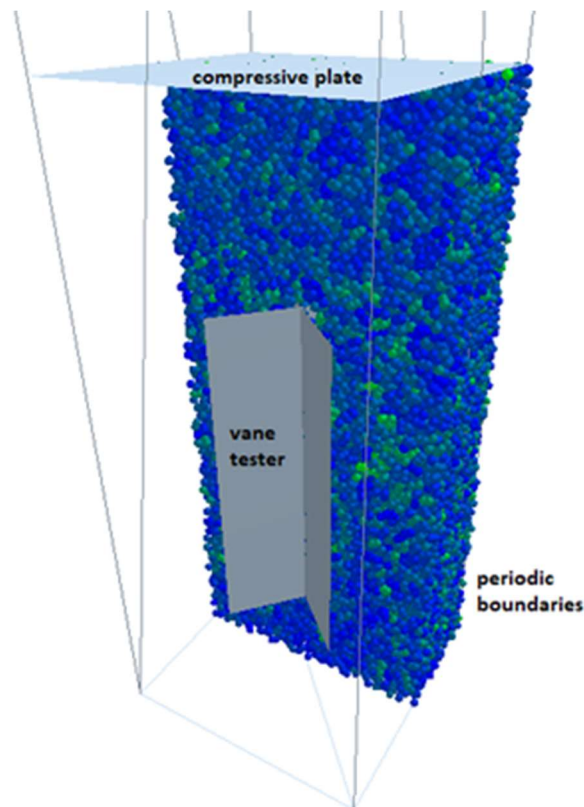
3.11. ábra: Különböző normálirányú előterhelésekhez tartozó nyomtatékok

Ugyanennek a talajmintának klasszikus nyírókísérlet elvégzésével meghatároztuk a nyírási tönkremeneteli határgörbét is (3.12. ábra).



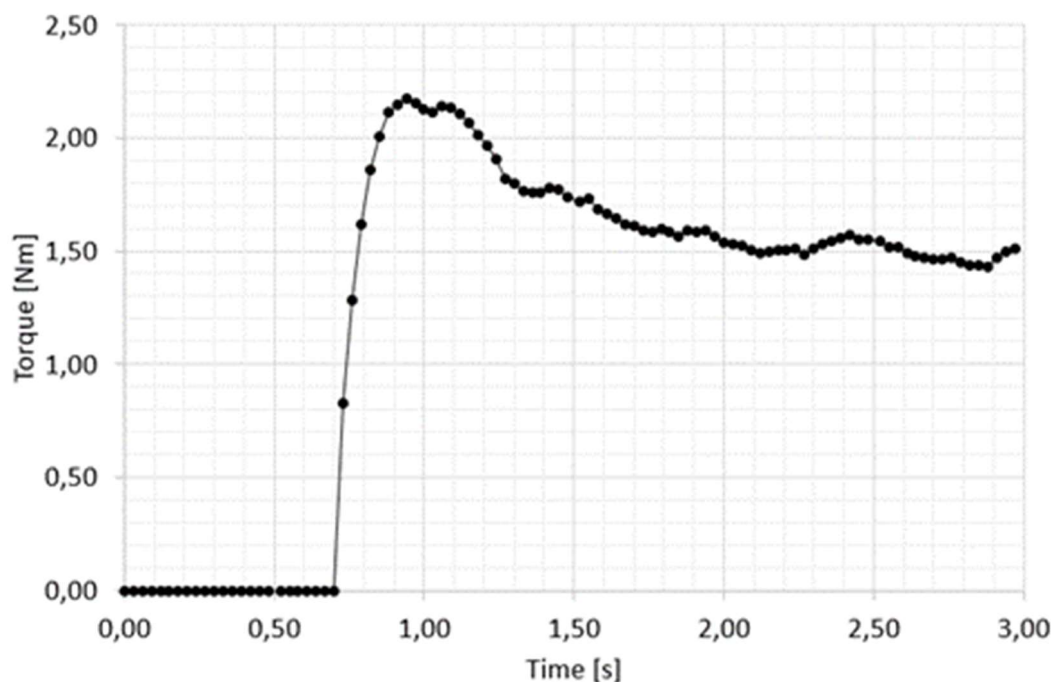
3.12. ábra: A torziós nyírókísérlethez használt talajminta klasszikus nyírókísérlettel meghatározott nyírási tönkremeneteli határgörbéje

A kísérleti eredmények birtokában elkészítettük a torziós nyírókísérlet diszkrét elemes modelljét (3.13. ábra). Az ábrán a nyírókészülék modelljét körülvevő talajminta félbe van vágva, hogy láthatóvá váljanak a készülék lapátjai.



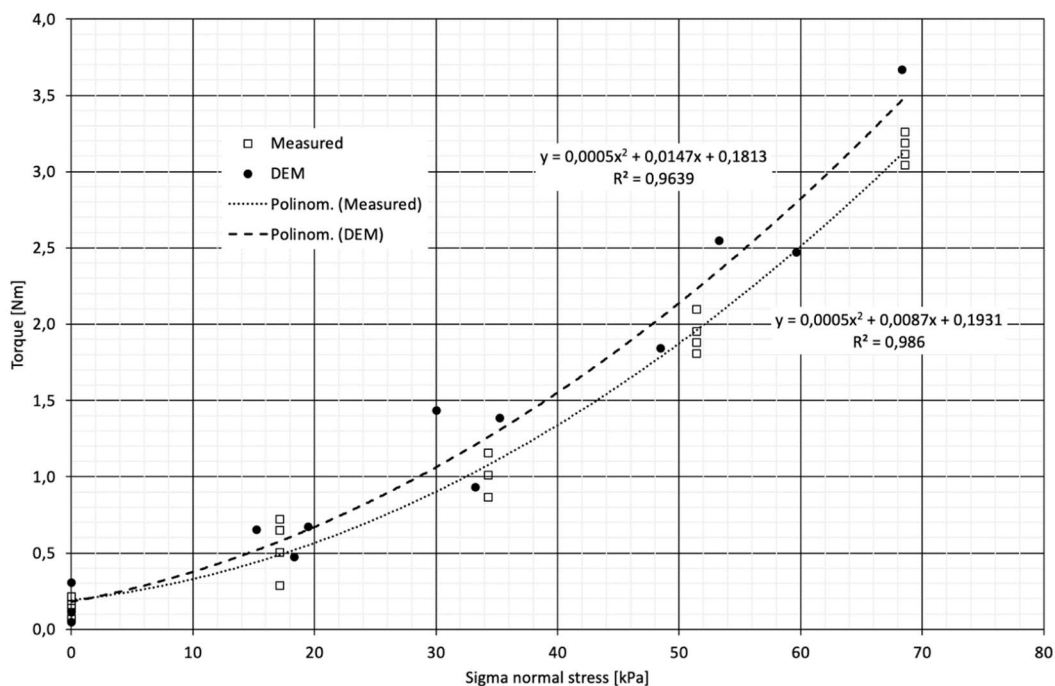
3.13. ábra: Torziós nyírókísérlet diszkrét elemes modellje

A modelltartomány oldalfalainál periodikus peremfeltétel alkalmazásával hoztunk létre „végtelen” méretű talajmintát. A talajmodellhez használt szemcsék két, egyenként 1mm átmérőjű, egymástól 1,4mm távolságra lévő gömbből lettek létrehozva. A vizsgálati tartományt gravitációs ülepedéssel töltöttük fel a szemcsékkel, kb. 45000 szemcse felhasználásával. A gravitációs ülepedés lezajlása után egy lassan lefelé mozgatott nyomólap segítségével létrehoztuk a függőleges előterhelést, majd a halmaz lecsillapodása után elindítottuk a lapát forgását. A lapátra ható nyomatékot az idő függvényében ábrázoltuk (3.14. ábra).



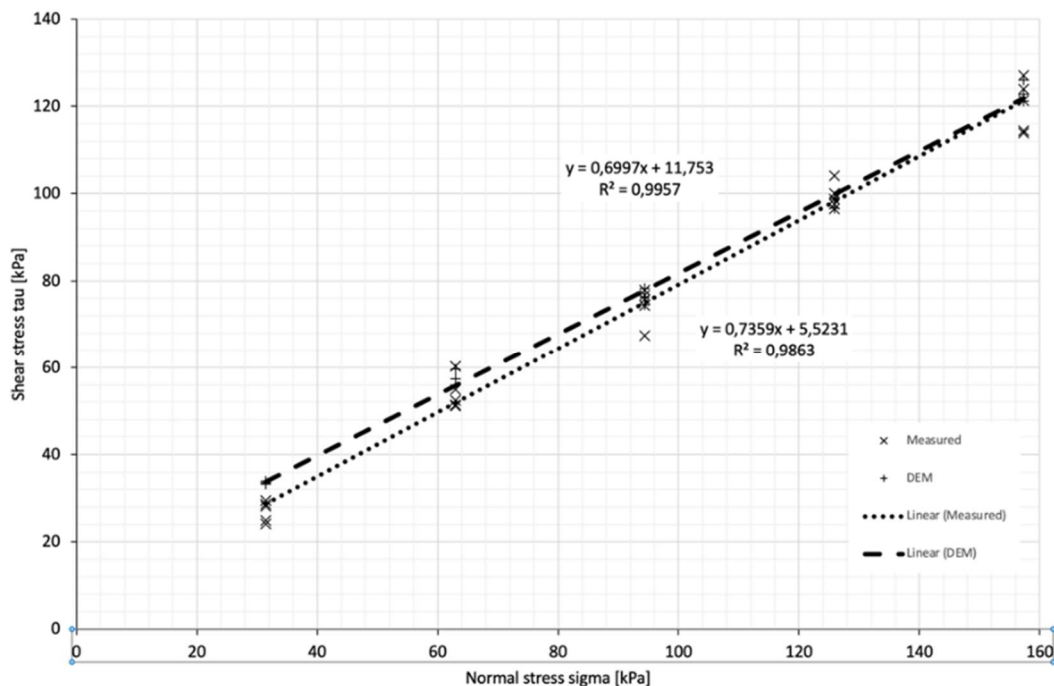
3.14. ábra: A torziós nyírókészülék forgatásához szükséges nyomaték szimulációból származó értéke

A torziós nyírókészülék központi tengelyén mérhető nyomatékból a nyírófeszültség feszültség meghatározható, ha ismerjük a torziós készülék nyomaték – nyírófeszültség karakterisztikáját, amit méréssel meghatároztunk. Így lehetőség adódott a mért és szimulációval meghatározott normálfeszültség – nyírófeszültség diagramok összehasonlítására. Ezt követően a diszkrét elemes modell mikromechanikai paramétereit addig változtattuk, amíg elfogadható egyezést nem kaptunk a mért és a szimulációval meghatározott értékek között (3.15. ábra).



3.15. ábra: Mért és szimulációval meghatározott normálfeszültség – nyírófeszültség karakterisztikák

Az így meghatározott mikromechanikai paramétereket használtuk fel a klasszikus nyírókísérletet modellező szimulációban. A nyíróvizsgálathoz tartozó (a torziós kísérlet modelljéből meghatározott mikromechanikai paramétereket használó) szimulációk lefuttatása után összehasonlítottuk a talajminta méréssel és szimulációkkal meghatározott nyírási tönkremeneteli határgörbéjét (3.16. ábra).



3.16. ábra: Méréssel és szimulációval meghatározott nyírási tönkremeneteli határgörbe összehasonlítása

Az itt elvégzett vizsgálatok segítségével bebizonyítottuk, hogy a módosított torziós nyírókísérlet alkalmas olyan helyszíni mérések elvégzésére, amit felhasználva a diszkrét elemes modell kalibrálása elvégezhető, valamint azt, hogy a torziós mérés diszkrét elemes modellje jó közelítéssel képes visszaadni a méréssel meghatározott talajszilárdságot.

Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye

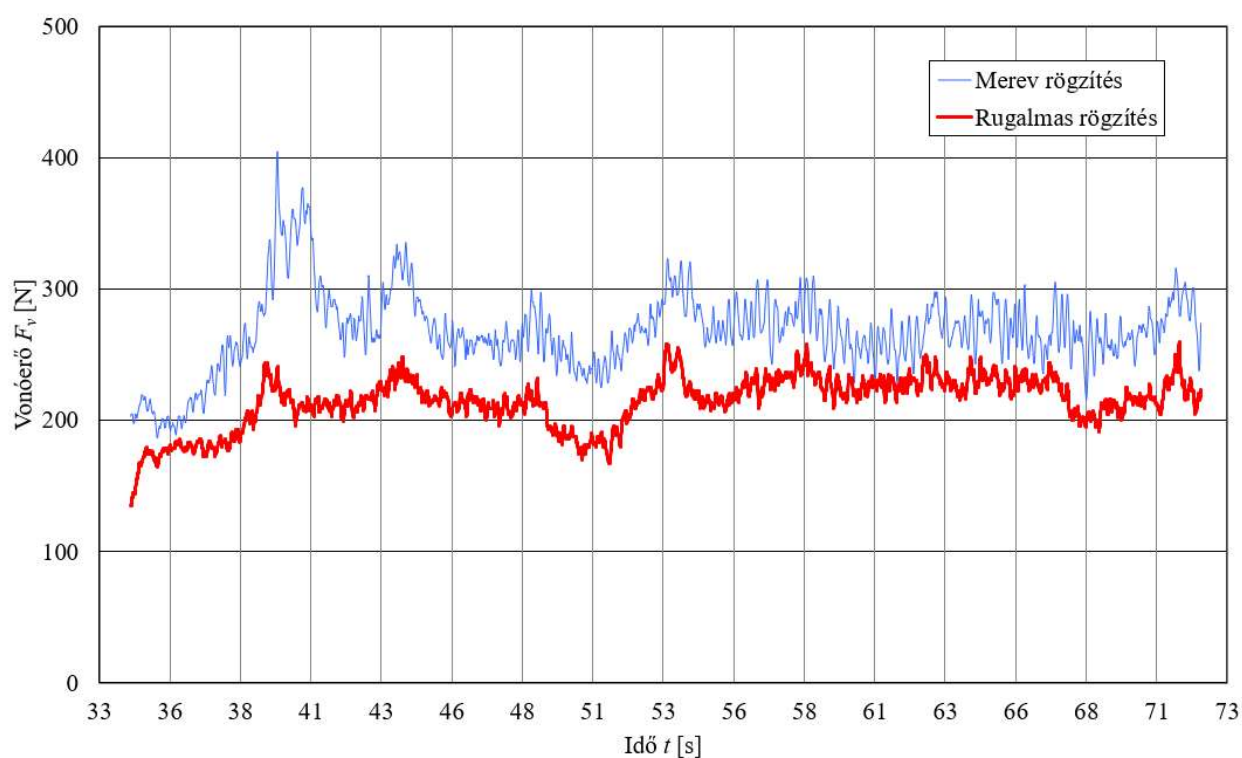
Talajművelő szerszámok vonóerőigényével kapcsolatos kísérleti vizsgálatainkat a NAIK MGI talajvályójának és mérőrendszerének felhasználásával végeztük. A mérések során egymással párhuzamosan mozgatva (3.17. ábra) hasonlítottunk össze egymással egy mereven és egy rugalmas támasztással rögzített (3.18. ábra) azonos geometriájú szerszámot. A munkamélység mindkét szerszám esetében 250mm volt, a haladási sebesség 0,5 és 2,5 m/s között változott. A kísérleti vizsgálatok azt mutatták, hogy a rugalmasan felfüggesztett szerszám vonóerőigénye minden esetben kisebb volt, mint a mereven rögzített szerszámé. Erre látunk példát a 3.19. ábrán.



3.17. ábra: Összehasonlító vonóerőigény mérés a NAIK MGI talajvályójában



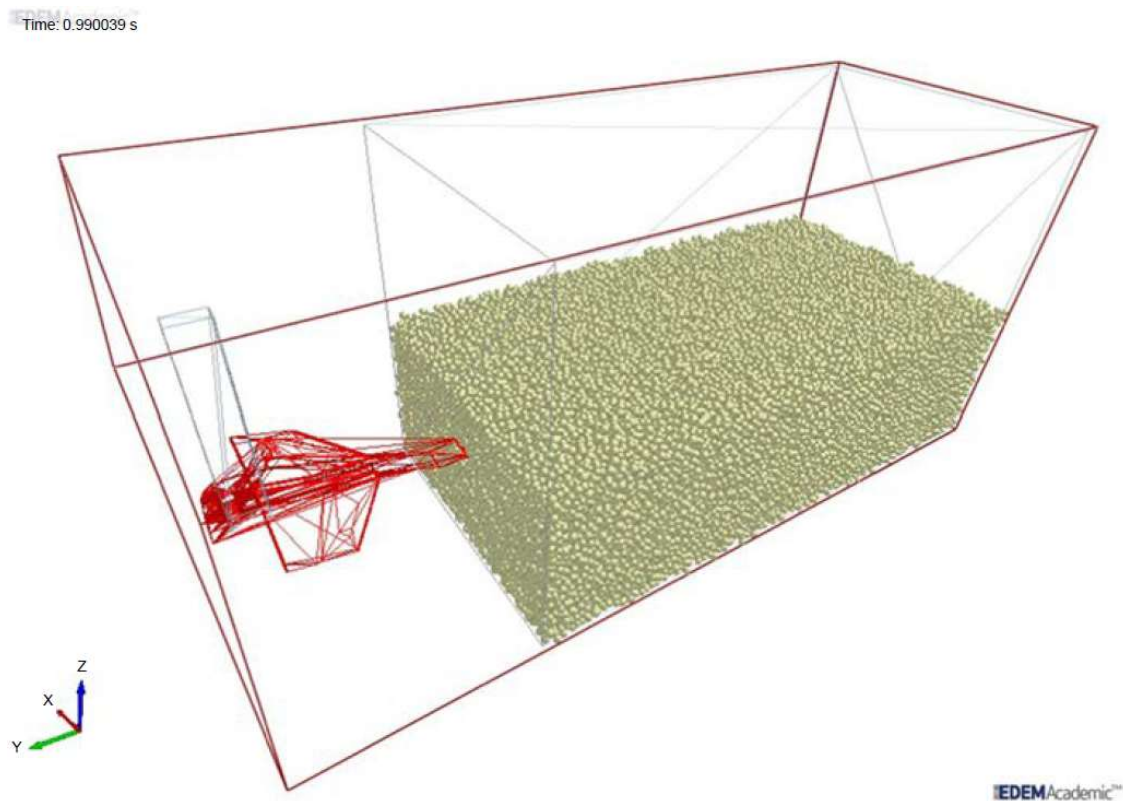
3.18. ábra: Talajművelő szerszám rugalmas rögzítése



3.19. ábra: A rugalmasan felfüggesztett és a mereven rögzített talajművelő szerszám vonóerőigénye, példa összehasonlító mérésre

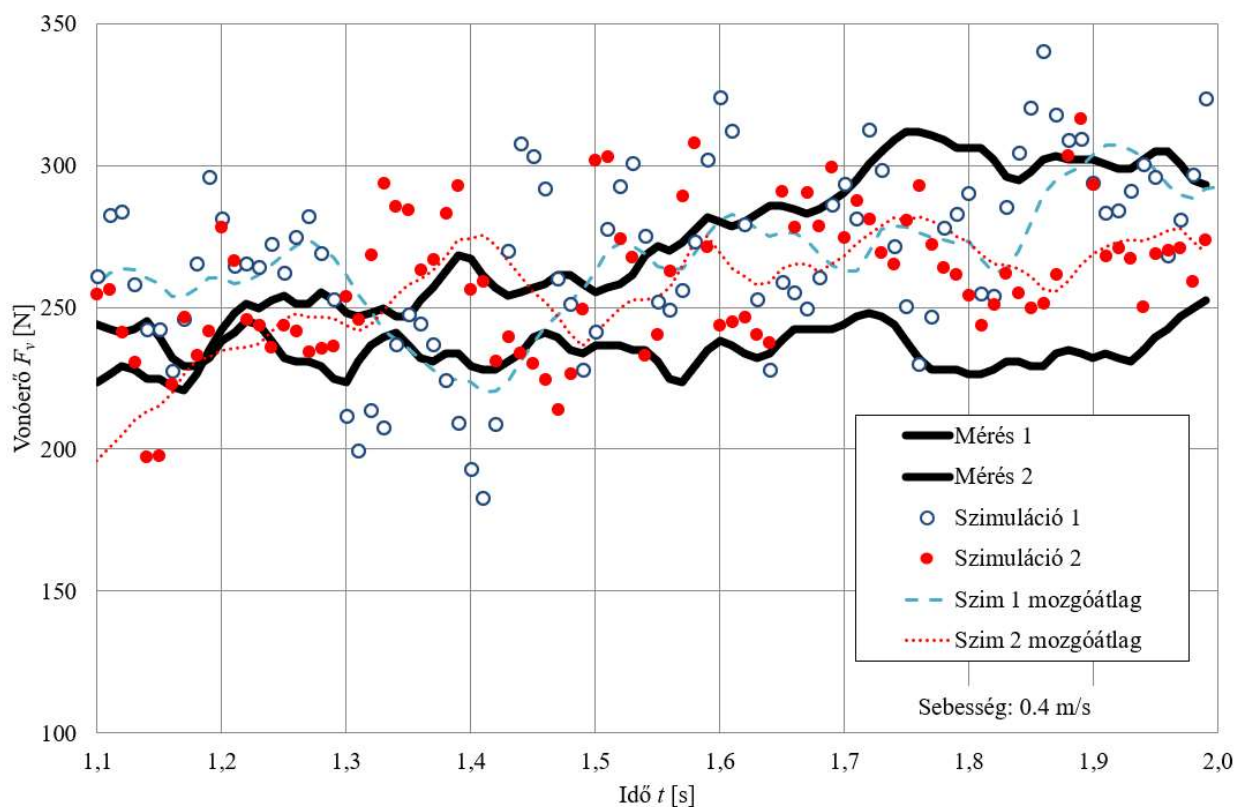
A talajművelő szerszám – talaj kapcsolat modellezéséhez elsőként a korábban bemutatott nyíróvizsgálat segítségével meghatároztuk a talajvályóban alkalmazott talaj mikromechanikai paramétereit, majd elkészítettük a talajvályú diszkrét elemes modelljét. A diszkrét elemes

modellhez csak a talajvályú egy 1 méteres szakaszának a modelljét készítettük el, a haladási irányra merőlegesen periodikus peremeket alkalmazva. A szemcsés anyagot alkotó halmaz legkisebb szemcséihez két 5mm-es gömbből alkotott szemcsét használtunk, melyek 8mm-es távolságra helyezkedtek el egymástól, legnagyobb szemcsék pedig ebből arányosan megnövelt méretekké 7,5mm-es szemcsékből álltak. A szemcsék mérete a legkisebb és legnagyobb itt megadott méret között véletlenszerűen szórtak, egyenletes eloszlásban. A talajművelő szerszám geometriáját 3D szkenneléssel határoztuk meg (3.20. ábra).



3.20. ábra: Talajművelő szerszám – talaj kapcsolat DEM modellje

A szimulációval meghatározott vonóerőigény értéke nagyobb szórást mutatott, mint a méréssel meghatározott érték, ennek a modellben használt (számítási megfontolások miatt alkalmazott) nagyobb szemcseméret volt az oka, de maga a vonóerő átlagos értéke jó egyezést mutatott a mért eredményekkel mindhárom szerszámgeometria esetében példaként lásd: (3.21. ábra).

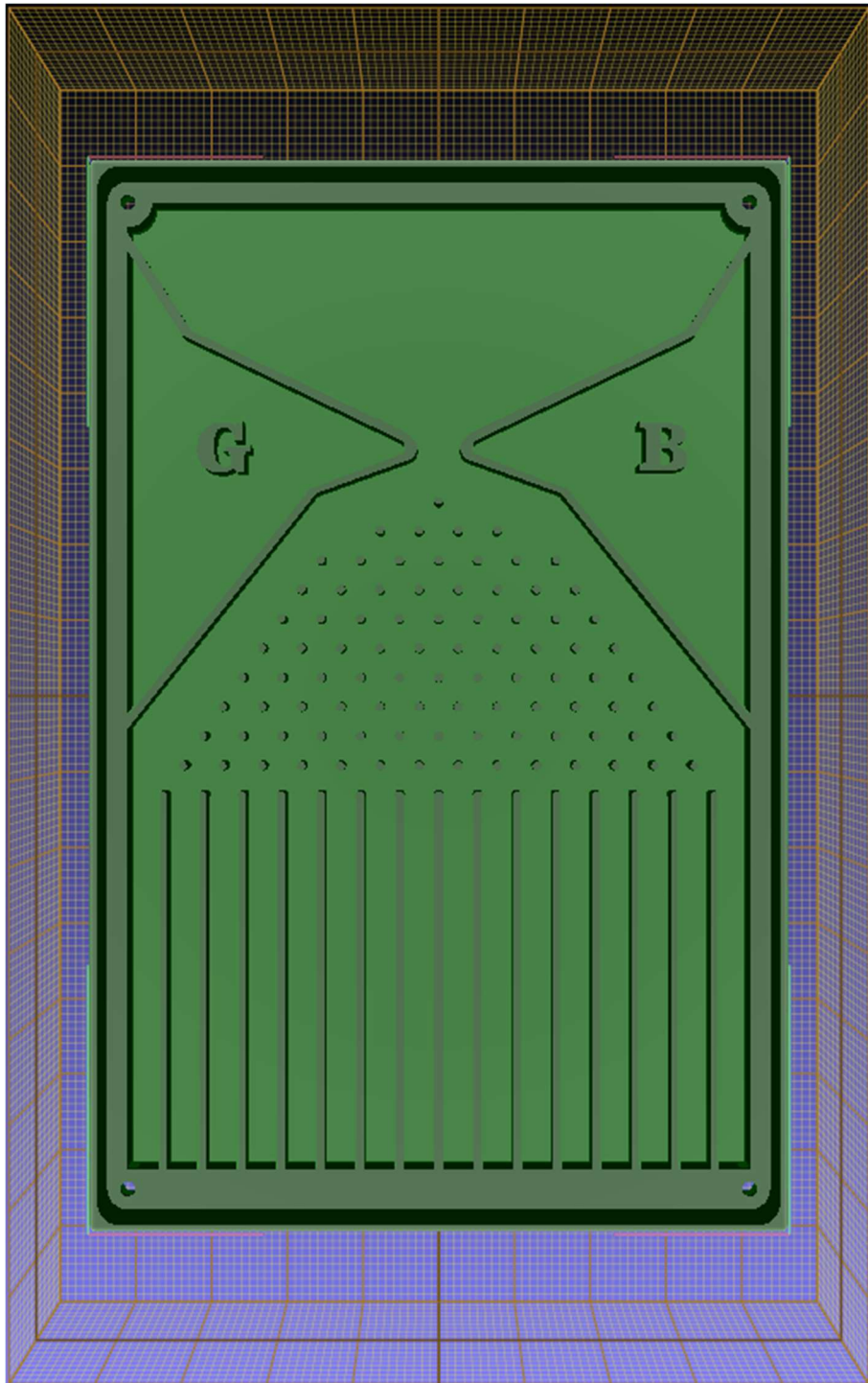


3.21. ábra: Vonóerő mért és numerikus szimulációval meghatározott értéke

Az így kapott eredmények azt mutatták, hogy az általunk kidolgozott numerikus eljárás alkalmas a jelenség modellezésére.

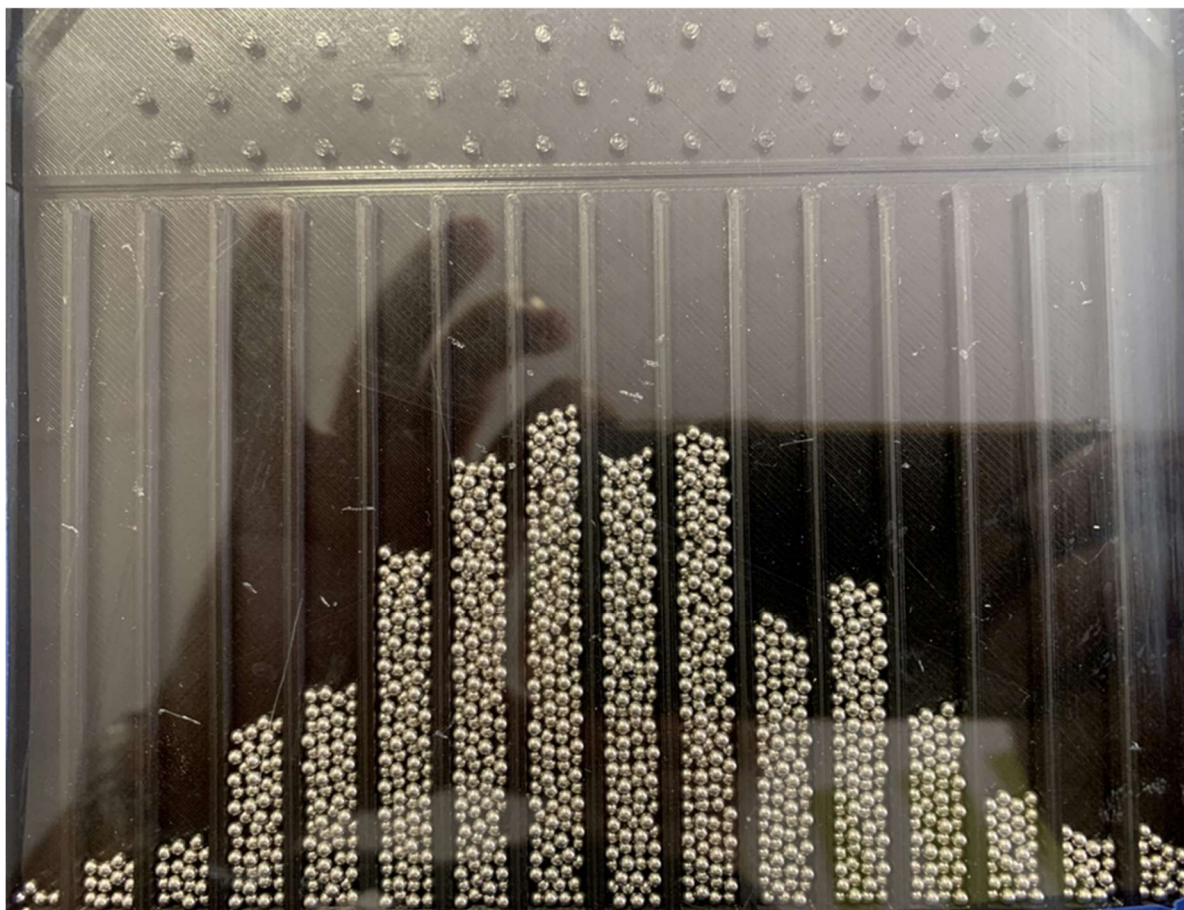
Statikus keverőberendezések

A statikus keverőberendezések működésének vizsgálatához Galton deszkát használtunk. A Galton deszka 3D modelljét felhasználva 3D nyomatással készítettük el a keverőberendezést. A 3.22. ábrán felrajzol milliméter skála segítségével a berendezés fő méretei könnyen meghatározhatóak.



3.22. ábra: A Galton deszka 3D modellje

A következő ábrán a 3D nyomtatással megvalósított Galton deszka látható, 1mm-es acélgolyókkal megtöltve (3.23. ábra). A 3.1. táblázat a tízszer megismételt kísérletek eredményeit tartalmazza. A táblázat oszlopai az ismétléseket jelölik, míg a sorok a Galton-deszka egyes rekeszeiben mért halmazmagasságokat tartalmazzák.

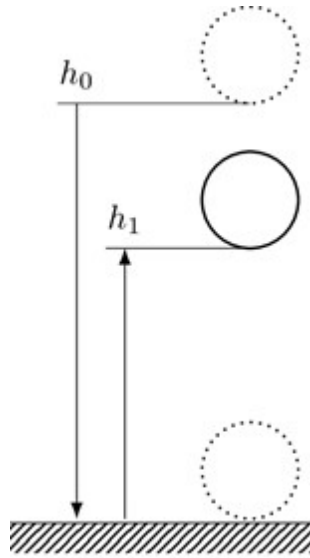


3.23. ábra: Galton deszka kísérlet eredménye

3.1. táblázat: Galton deszka mérés eredményei

Column/Meas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average	%
1	10	0	2	7	10	0	6	7	4	7	5,3	0,0103
2	10	4	9	12	9	10	11	7	8	5	8,5	0,01652
3	16	12	14	16	12	16	12	10	10	14	13,2	0,02566
4	27	21	25	25	18	24	18	19	24	23	22,4	0,04354
5	30	43	40	36	38	37	30	37	28	25	34,4	0,06686
6	47	54	50	46	49	45	50	49	46	48	48,4	0,09407
7	55	57	62	57	55	61	60	50	58	58	57,3	0,11137
8	60	62	56	57	55	60	63	67	64	61	60,5	0,11759
9	62	63	66	62	60	66	60	63	58	66	62,6	0,12167
10	54	55	60	57	58	60	60	57	61	67	58,9	0,11448
11	41	45	42	45	47	46	52	46	38	42	44,4	0,0863
12	37	35	33	38	31	35	33	36	42	35	35,5	0,069
13	25	21	25	23	26	25	27	25	36	30	26,3	0,05112
14	14	12	15	17	15	12	15	17	16	17	15	0,02915
15	7	10	12	11	16	12	8	20	10	17	12,3	0,02391
16	18	5	10	14	10	11	10	5	9	3	9,5	0,01846

A Galton deszka kísérlet diszkrét elemes modelljének megalkotásához szükségünk volt az acélgolyó 3D nyomtatott anyagból készült falnak ütközése során lezajló energiadisszipáció mértékét kifejező ütközési tényezőre, ezt ejtőkísérlettel határoztuk meg (3.24. ábra).



3.24. ábra: Ejtőkísérlet az ütközési tényező meghatározására

Az ejtőkísérletre felírva a munkatételt, az ütközési tényező könnyen meghatározható:

$$E_1 - E_0 = W \quad 3.1$$

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - 0 = mgh_0. \quad 3.2$$

Innen a golyó ütközés előtti sebessége meghatározható:

$$v_1 = \sqrt{2gh_0} \quad 3.3$$

Ugyanígy a h_1 visszapattanási magasságból a golyó ütközés utáni u_1 sebessége:

$$u_1 = \sqrt{2gh_1} \quad 3.4$$

Az ütközés előtti és ütközés utáni sebességek összehasonlításával az ütközési tényező meghatározható:

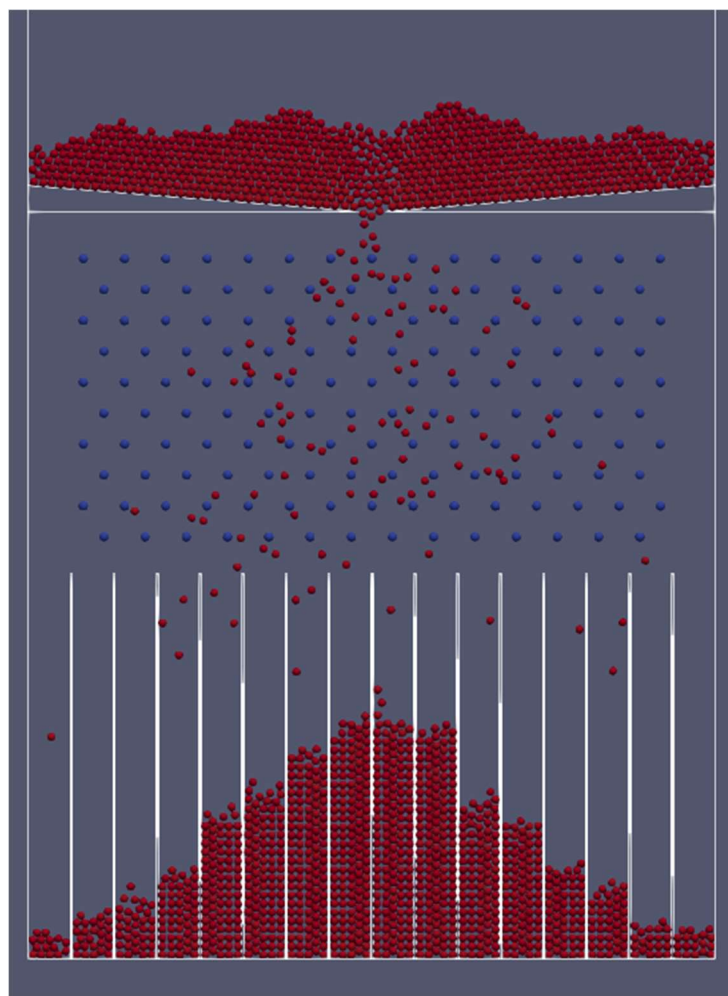
$$C_{rn} = \frac{u_1}{v_1} = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}. \quad 3.5$$

20 ismételt mérésből $h_1 = 244.4 \pm 7.0$ mm visszapattanási magasságot kaptunk $h_0 = 661$ mm kiindulási magasság esetén. Ebből az ütközési tényező

$$C_{rn} = \sqrt{\frac{244.4}{661}} = 0.61. \quad 3.6$$

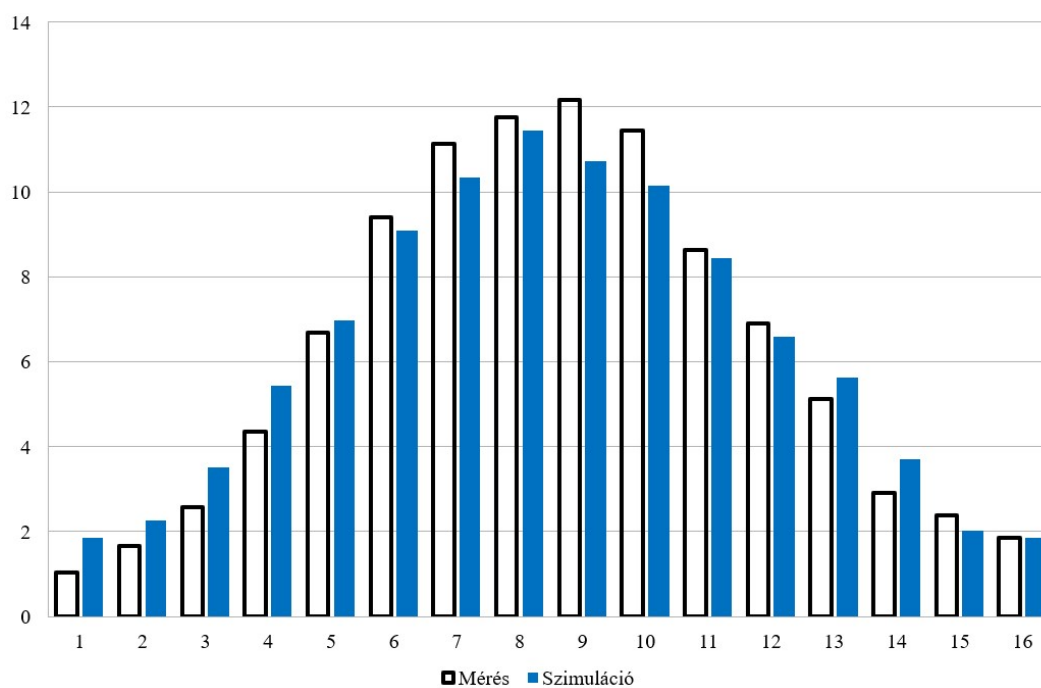
Ugyanennek az egyszerű kísérletnek a diszkrét elemes modelljét elkészítve a kapcsolati jellemzőket addig változtattuk, amíg 244mm visszapattanási magasságot nem kaptunk.

A diszkrét elemes szimulációk első lépéseként megvizsgáltuk, hogy a DEM modell (3.25. ábra) és a kísérletsorozat által kapott eloszlások sűrűségfüggvényei elfogadható egyezést mutatnak-e.



3.25. ábra: Galton deszka diszkrét elemes modellje

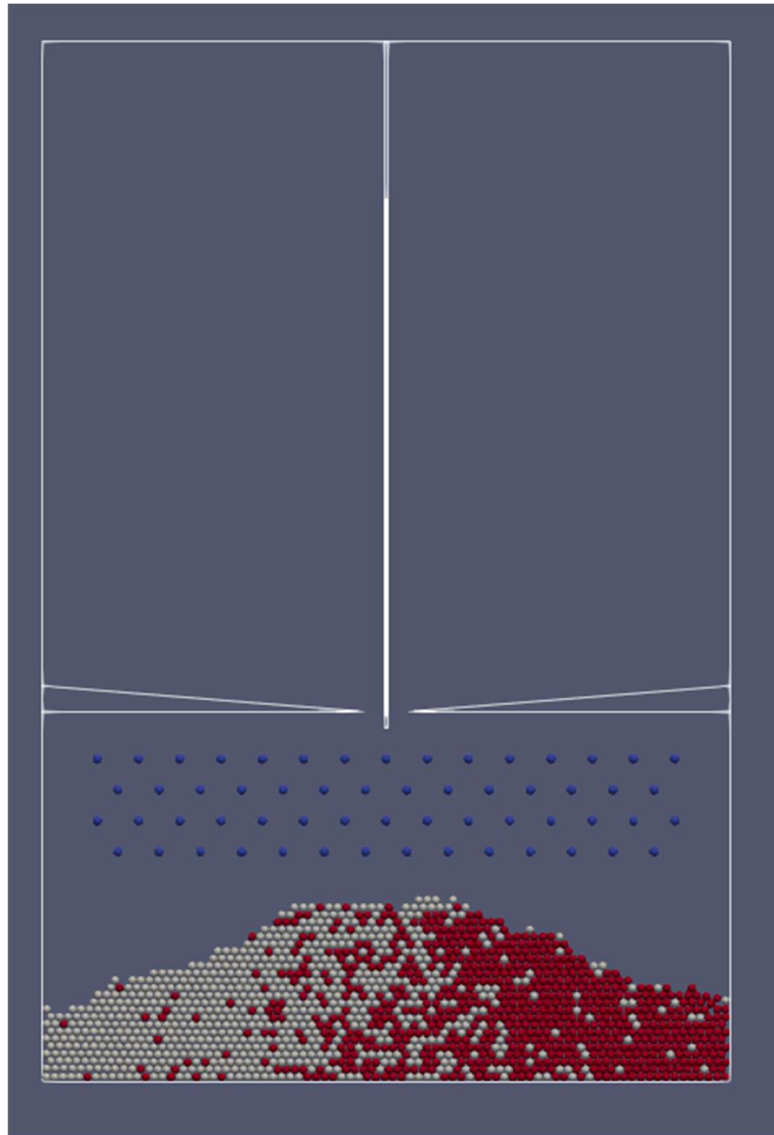
A méréssel és a szimulációkkal meghatározott átlagos oszlopmagasságokat egymással összevetve nagyon jó egyezést találtunk a két eloszlás sűrűségfüggvénye között (3.26. ábra).



3.26. ábra: Galton deszka mérés és szimuláció sűrűségfüggvénye

A fentiek alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a Galton deszka diszkrét elemes modellje jó közelítéssel a valóságban lezajló folyamatot írja le.

Ezt követően elkészítettük egy, a Galton deszka működési elvét felhasználó statikus keverőberendezés DEM modelljét (3.27. ábra). A keveredést a két külön oszlopban betöltött piros és szürke színű szemcsék között vizsgáltuk.



3.27. ábra: Galton keverő DEM modellje

Ennek a modellnek a geometriai tulajdonságait változtatva vizsgáltuk meg a keverési hatékonyság változását.

Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái

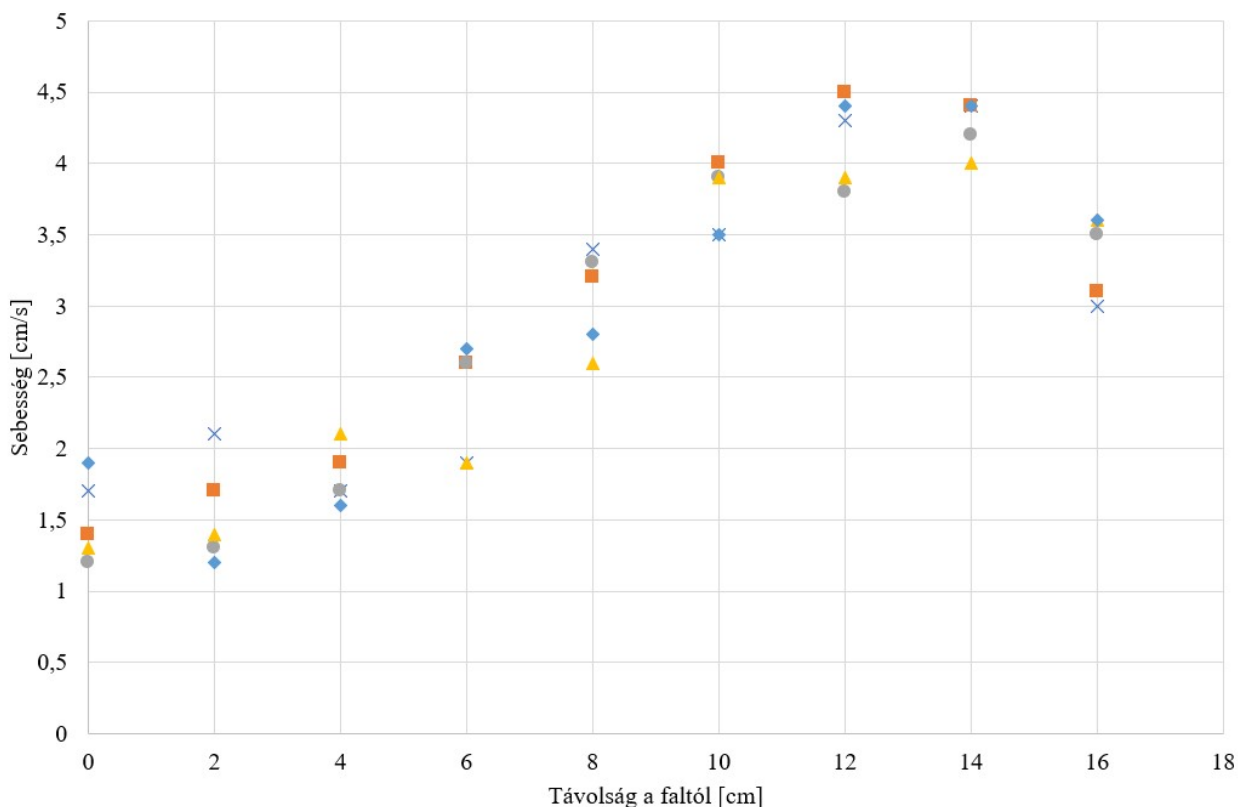
A szárítóberendezések anyagáramlási viszonyaival kapcsolatos kísérleti vizsgálatokat egy HSZ-15 típusú ipari szárítóberendezésen, valamint egy modellszárítón végeztük. A modellszárítón végzett kísérletek eredményeit az ipari szárítóberendezésen végzett mérésekkel összehasonlítva azt tapasztaltuk, hogy a modellszárító kellő pontossággal képes az ipari szárítóban lezajló magmozgási folyamatok modellezésére. Az anyagáramlási vizsgálatokhoz betekintő ablakokat

szereltünk a magcsatornák oldalára, amelyeken keresztül videofelvételeket készítettünk a szemestermények üzemi áramlásáról. A szárítóberendezés összeszerelése során szintén lehetőség nyílt a különálló modulokban lezajló magmozgási folyamatok megfigyelésére, légbefúvás nélkül (3.28. ábra).



3.28. ábra: Betekintő ablakok és endoszkóp kamera szondanyílások a szárító modulon

A szárítómodul üritése során öt különböző időpontban készült videofelvétel, így öt sebességeloszlás került rögzítésre. Ezek a felvételek jellegükben hasonlóak voltak, az egyes sebességértékek csak kis mértékben tértek el egymástól. Az öt egymást követő mérés eredményeit a 3.29. ábra mutatja be.



3. 29. ábra: Sebességviszonyok a lamella környezetében

Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a lamellák jelenléte jelentősen befolyásolja a szemcsék áramlási sebességét. Az áramlás egyenetlenségét jellemezhetjük a

$$\vartheta = \frac{v_{\max} - v_{\min}}{v_{\max}} \quad 3.7$$

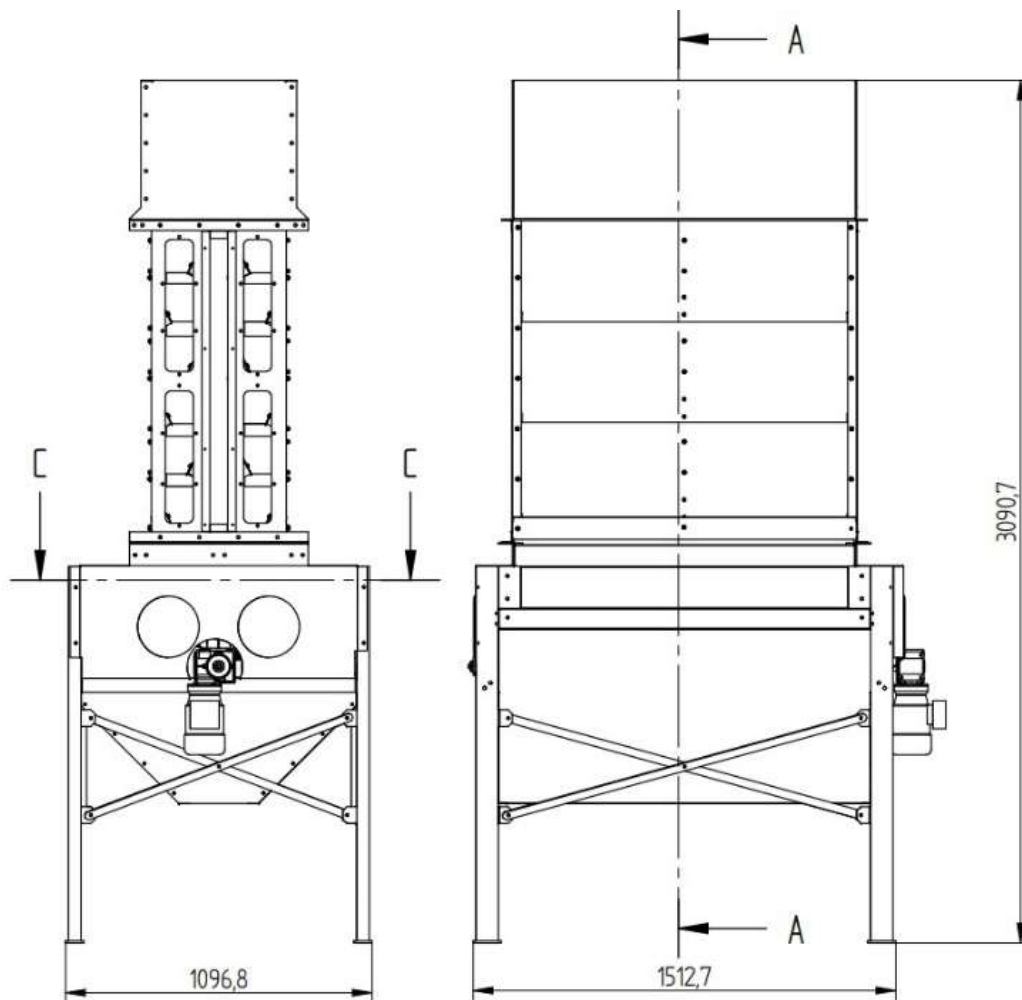
mennyiséggel (sebességtényező), melynek értéke egyenletes áramlás esetén 0, és az egyenetlenség növekedésével egyre jobban megközelíti az 1 értéket.

A magmozgás vizsgálatokat mind a különálló szárítómodulon, mind a működő ipari szárítóberendezés belsejében elvégeztük. A két berendezés magmozgásviszonyainak összehasonlítása során nem mutatkozott jelentős különbség a sebességtényező értékek között.

Az elvégzett mérések alapján két fő következtetés vonható le:

1. A lamellák jelenléte jelentősen befolyásolja a sebességviszonyokat, ezáltal a szemcsék áramlásának egyenetlenségét.
2. A működő szárítóberendezésben zajló légáramlási folyamatok nem gyakorolnak számottevő hatást a szemcsemozgási folyamatokra.

Mivel a nagy szárítón végzett mérések azt mutatták, hogy a lamellák jelentős mértékben befolyásolják a szemcseáramlás egyenetlenségét, szükségessé vált a lamellák dőlésszögének hatásának vizsgálata a sebességviszonyokra. Ennek megkönnyítése érdekében elkészítettek egy modellszáritó berendezést, amely az eredeti szárítómodul két oszlopát tartalmazta (3.30. ábra).



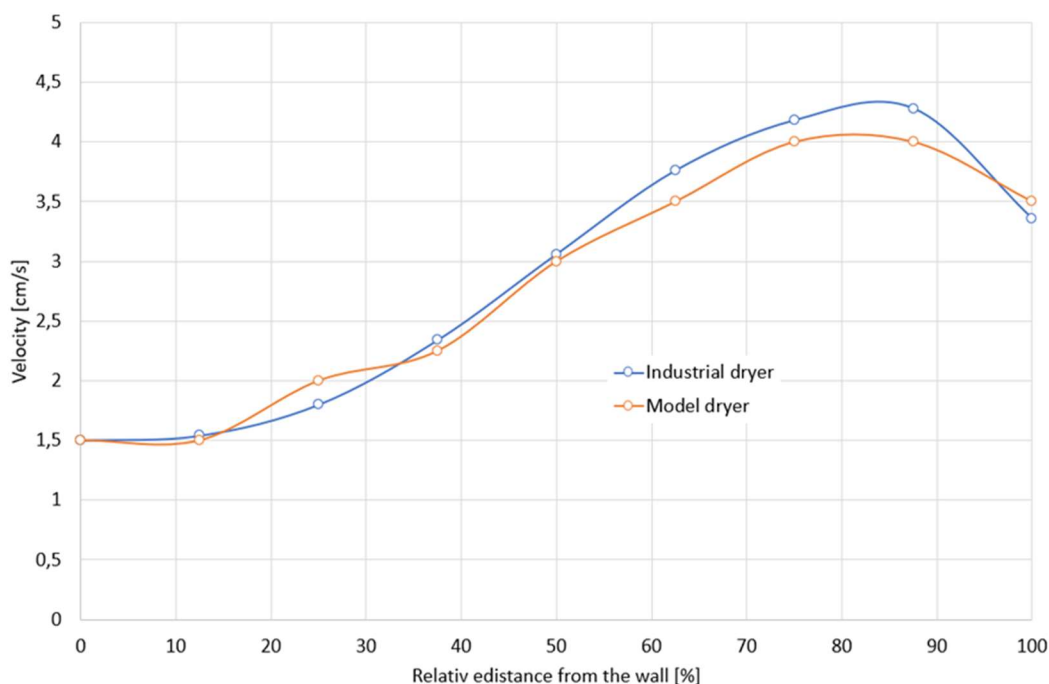
3.30. ábra: Modellszárító felépítése és méretei

A modellszárítóval kapcsolatos méréseinknek két fő célja volt. Egyrészt megvizsgáltuk, hogy a modellszárítóban lezajló anyagáramlási folyamatok mennyiben térnek el a valós méretű szárítóban tapasztalt szemcsemozgási viszonyoktól. Másrészt pedig összegyűjtöttük a későbbi diszkrét elemes modellek validálásához szükséges mérési adatokat is. A modellszárítón festett terményhalmaz sávokat (3.31. ábra) használtunk az anyagáramlási egyenetlenség meghatározására. Kísérleti vizsgálataink során három különböző lamella szögállás értékére is megvizsgáltuk az áramlás egyenetlenségét.



3.31. ábra: Színezett sávok a modellszárítóban

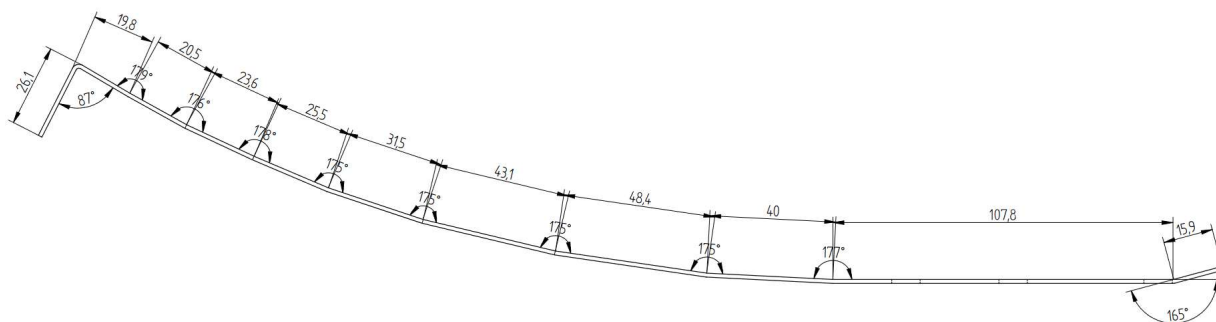
A modellszárító forgó kitároló egységének fordulatszámát úgy állítottuk be, hogy a lehető legjobban reprodukáljuk az ipari szárító sebességértékeit a modellszárítóban. Ahogy a 3.32. ábrán is látható, a modellszárító és az ipari szárítóberendezés sebességviszonyai között jó egyezést sikerült elérnünk a kitároló egység nyitási idejének megfelelő beállításával.



3.32. ábra: Az ipari és a modellszárító anyagáramlási viszonyai

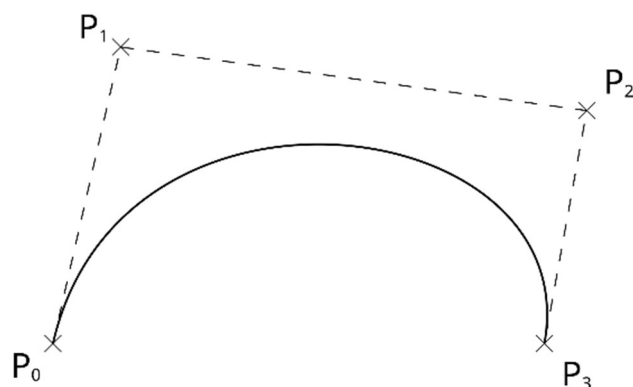
Mindezek alapján kijelenthettük, hogy a modellszárító berendezés alkalmas a valós szárítóberendezésben lezajló anyagáramlási viszonyok modellezésére.

A korábban bemutatott analitikus vizsgálatok (brachisztokron probléma) alapján azt a következtetést vontuk le, hogy ciklois alakú lamella geometria alkalmazásával javíthatunk az áramlás egyenletességén (Keppler és Bablena 2024). Ciklois alakot közelítő (3.33. ábra) lamella geometriával is elvégeztük az áramlás egyenletlenségére vonatkozó kísérleti vizsgálatokat.



3.33. ábra: Ciklois lamella alak közelítése

Gyártástechnológiai megfontolások alapján arra a következtetésre jutottam, hogy Bézier görbe alakú lamellák könnyebben előállíthatók, így azok esetére is végeztem numerikus szimulációkat. A modellezéshez harmadfokú Bézier görbéket alkalmaztunk. Ezeket a görbéket 4 pont (P_0 , P_1 , P_2 és P_3) definiálja (3.34. ábra).



3.34. ábra: Harmadfokú Bézier görbét definiáló pontok

Ezek a pontok könnyen illeszthetők a meglévő szárító konstrukciójához. A harmadfokú Bézier görbe egyenlete:

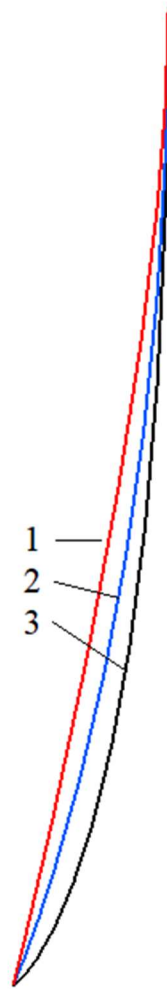
$$\mathbf{B}(t) = (1-t)^3\mathbf{P}_0 + 3(1-t)^2t\mathbf{P}_1 + 2(1-t)t^2\mathbf{P}_2 + t^3\mathbf{P}_3, \quad t \in [0,1]. \quad 3.8$$

Az általam alkalmazott Bézier görbék pontjait úgy választottam meg, hogy kezdő és végpontjukon illeszkedjen a ciklois lamellához. Ennek eredményeként a következő koordinátákat kellett választanom. $\mathbf{P}_0$ és $\mathbf{P}_1$ minden esetben $x = 133\text{mm}$, $y = 0$, $z = 0$ koordinátákkal rendelkezett. A $\mathbf{P}_2$ pont y koordinátája változott az egyes konstrukcióknak megfelelően, x és z koordinátái ennek a pontnak sem változtak $P_{2x} = 203\text{mm}$, $P_{2z} = 0$. $\mathbf{P}_3$ koordinátái sem változtak, $x = 203\text{mm}$, $y = 347\text{mm}$, $z = 0$. A koordináták ilyen módon történő változtatásával sikerült elérni, hogy a Bézier görbe jól illeszkedett a ciklois kezdő és végpontjához, közben pedig a görbe P_{2y} változtatásának hatására egyre jobban eltért az eredeti alaktól (3.2. táblázat).

3.2. Táblázat: Bézier görbe alakjának változtatása

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P_{2y}	0	25	50	75	100	125	150	175	200

Három különböző koordináta esetét egy ábrában bemutatva láthatjuk a P_{2y} érték változtatásának hatását a görbe alakjára (3.35. ábra).



3.35. ábra: P_{2y} változtatásának hatása a Bézier görbe alakjára. 1: $P_{2y} = 200\text{mm}$, 2: $P_{2y} = 100\text{mm}$, 3: $P_{2y} = 0$

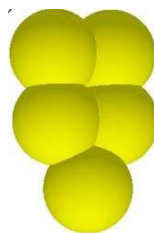
Négy különböző szemcseformát alkalmaztunk a diszkrét elemes vizsgálatokhoz (3.3. táblázat és 3.36. ábra).

3.3. táblázat: Szárítóban mozgó szemcsék alak szerinti csoportosítása

	Átlagos hossz [mm]	Átlagos szélesség [mm]	Átlagos vastagság [mm]	A teljes halmazban előforduló arány [%]
Lapos	12,1	9,1	4,7	36
Hosszúkás	11,8	8,0	4,7	20
Szögletes	12,0	8,5	5,8	32
Kerek	9,4	9,0	7,6	12



Lapos



Hosszúkás



Szögletes



Kerek

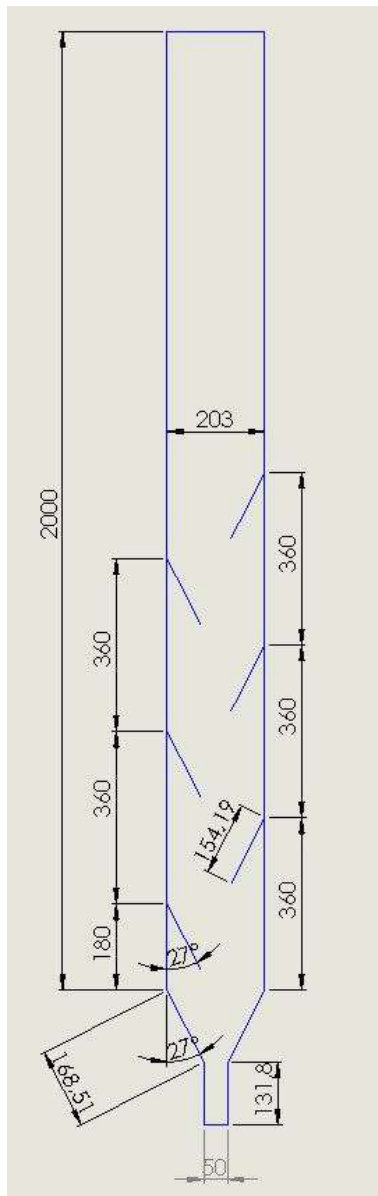
3.36. ábra: A DEM modellben használt szemcselalakok

Mivel a kísérleti vizsgálatokat egy működő terményszárító telephelyén végeztük, igyekeztünk a telep üzemszerű működését a lehető legkevésbé megzavarni. Ennek érdekében a rézsűszög mérését választottuk kalibrálási módszerként. A kukorica rézsűszögének mérését egy 200 mm átmérőjű és 250 mm magas acélhengerrel végeztük. A hengert színültig töltöttük kukoricával, majd lassan felemeltük, így a halmaz szétterült a padlón. Ugyanennek a vizsgálatnak a numerikus modelljét létrehozva, a diszkrét elemes modell szemcse-szemcse súrlódási tényezőjét addig módosítottuk, amíg a méréssel meghatározott átlagos rézsűszög és a szimulációból meghatározható rézsűszög jó egyezést nem mutatott (3.4. táblázat).

3.4. táblázat: A diszkrét elemes kukoricaszem modell mikromechanikai paraméterei

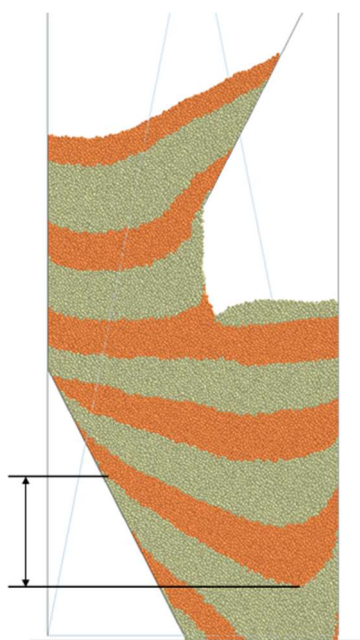
<i>Mikromechanikai paraméterek</i>		<i>Kapcsolati tulajdonságok</i>	
Poisson-tényező [-]	0,31	Ütközési tényező [-]	0,1
Anyagsűrűség $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	1180	Súrlódási tényező [-]	0,2
Csúsztató rugalmassági modulus [Pa]	$3 \cdot 10^7$	Gördülési ellenállási tényező [m]	0,01

A szárítóberendezésbeli magmozgásviszonyok vizsgálatához elkészítettük egy szárítómodul geometriai modelljét (3.37. ábra).

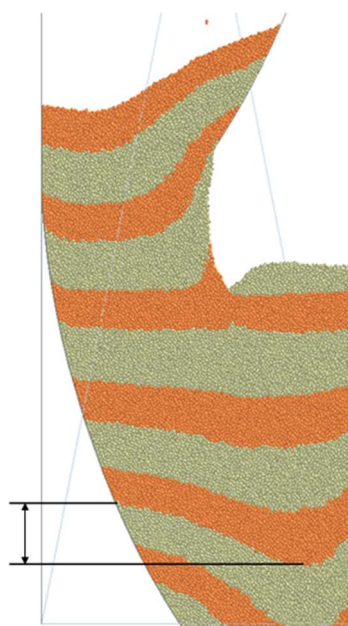


3.37. ábra: A szárítómodul geometriai modellje

A modul alján látható kitároló rész nyitó-záró mechanizmus működésének kinematikai paramétereit a valóságban használt forgó kitároló berendezés üzemi működési viszonyaihoz igazítottuk. A numerikus modellben lehetőségünk nyílt a szemcsék megszínezésére, így a kísérleti vizsgálatokban alkalmazott festett csíkokhoz teljesen hasonló módszert alkalmazhattunk az anyagáramlási viszonyok egyenetlenségének elemzésére (3.38. és 3.39. ábra). Az ábrákon látható, hogy a lamella alak megválasztása jelentős hatással van a bejelölt csíkok torzulásának mértékére, ezáltal az anyagáramlás egyenletességére.



a., egyenes lamella



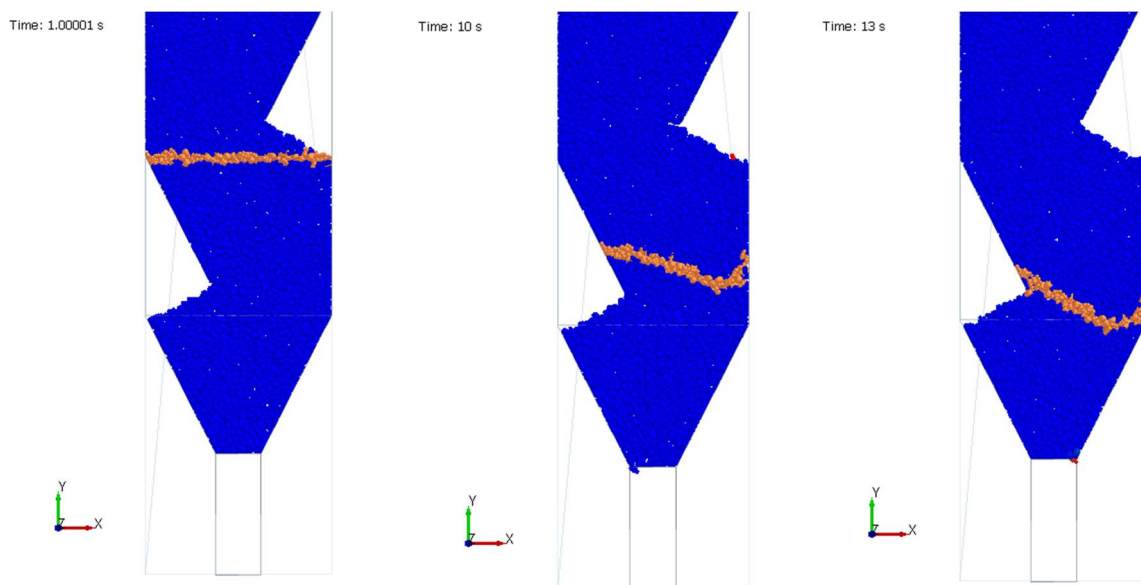
b., ciklois lamella

3.38. ábra: Anyagáramlás egyenetlensége különböző lamella geometriák esetén

A sebességtényező helyett célszerűbb volt az elmozdulás alapján meghatározható egyenetlenségi tényező használata:

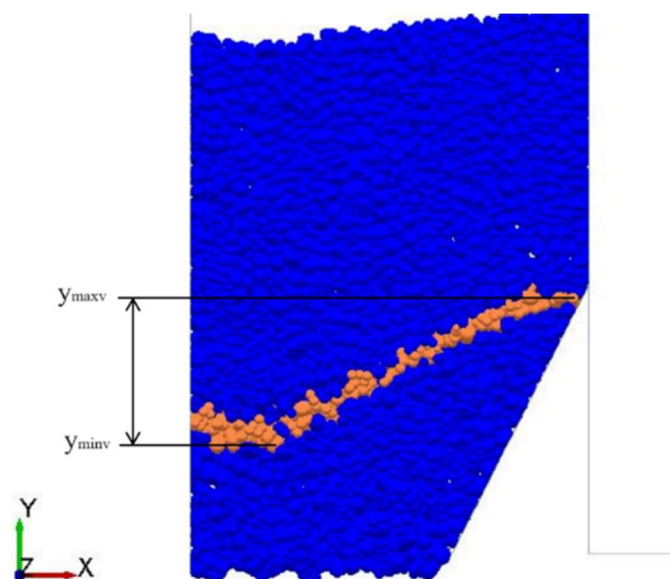
$$\xi = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{y_{\max}}, \quad 3.9$$

ahol $y_{\max}$ és $y_{\min}$ értelmezésére lásd a 3.40. ábrát. Az y koordináták a szoftverből egyszerűen lekérdezhetők, és a számítási módszer mellett szól az is, hogy az elmozdulás nem származtatott mennyiség, hanem közvetlenül mérhető, így pontosabban meghatározható. Minél egyenletesebb az áramlás, a ξ értéke annál inkább közelít a 0-hoz.



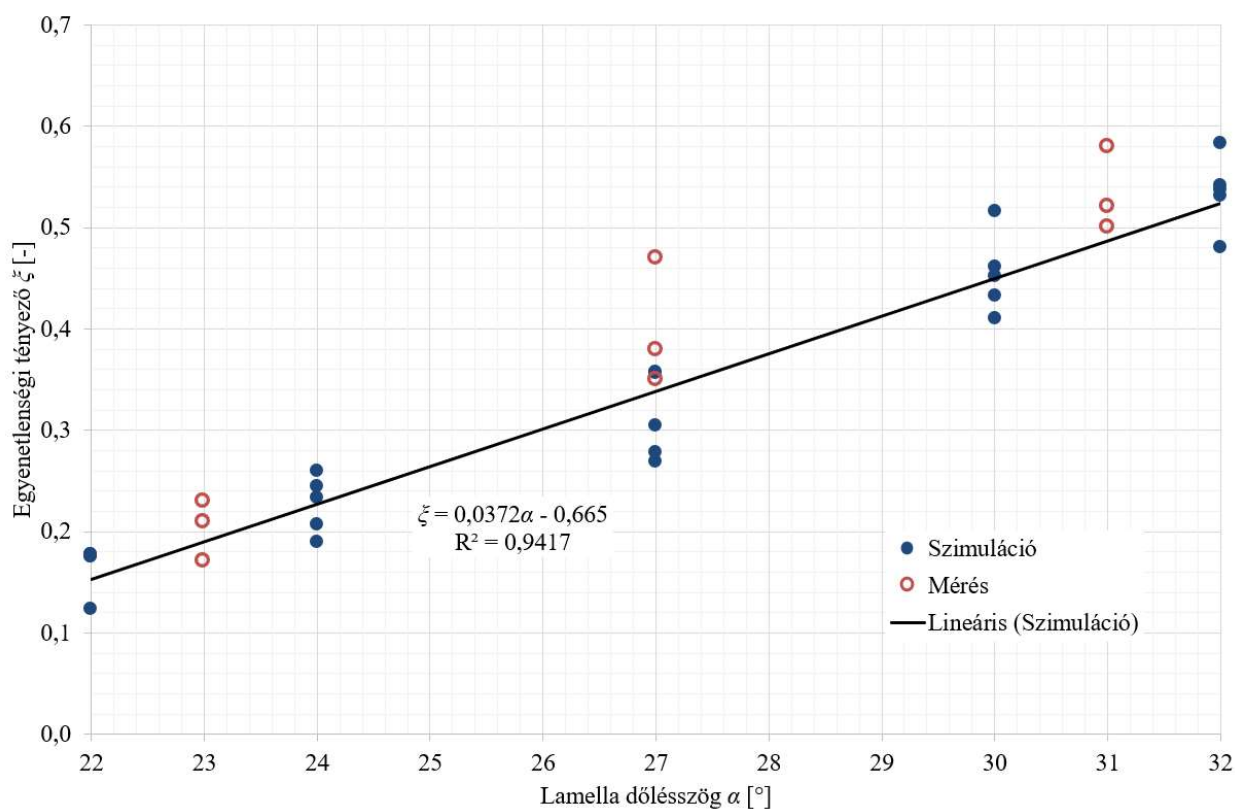
3.39. ábra: Színezett szemcsék mozgása a szimuláció során

Az áramlás egyenetlenségét a korábban bevezetett egyenetlenségi tényezőt felhasználva tudtuk számszerűsíteni.



3.40. ábra: Egyenetlenségi tényező meghatározása

Mindezek alapján lehetőségünk nyílt egyrészt a lamella hajlásszög egyenetlenségre kifejtett hatásának elemzésére, valamint a szimuláció eredményinek mérésekkel való összehasonlítására (3.41. ábra).



3.41. ábra: Áramlási egyenetlenség a lamella szögállás függvényében.

A numerikus szimulációk és a kísérleti vizsgálatok segítségével meghatározott egyenetlenségi tényezők jó egyezést mutattak. Eredményeink azt mutatták, hogy a szárítóberendezésbeli magmozgásviszonyok jól közelíthetők az általunk létrehozott numerikus modell segítségével.

4. EREDMÉNYEK

Nyírókísérlet alapú kalibrálási módszerek vizsgálata

A nyírókísérleten alapuló kalibrálási eljárás hatékonyságának növelése és a kalibrálási folyamat időigényének csökkentése érdekében megvizsgáltam az eljárás érzékenységét a következő mikromechanikai jellemzők értékére:

1. A halmazt alkotó szemcsék ρ sűrűsége.
2. A halmazt alkotó szemcsék E rugalmassági modulusa.
3. A halmazt alkotó szemcsék ν Poisson tényezője.
4. A szemcsék közötti súrlódási tényezőtől számolt súrlódási félkúpszög ρ_0 .
5. A kohézív anyagmodell normál kohéziós erőssége $nCoh$.
6. A kohézív anyagmodell tangenciális kohéziós erőssége $sCoh$.
7. A nyírás v_s sebessége.
8. A clumpot alkotó szemcsék sugarának és középponti távolságainak aránya $\gamma = \frac{l}{r}$.
9. A szimuláció Δt időléptéke (A Rayleigh időlépték százalékában megadva).

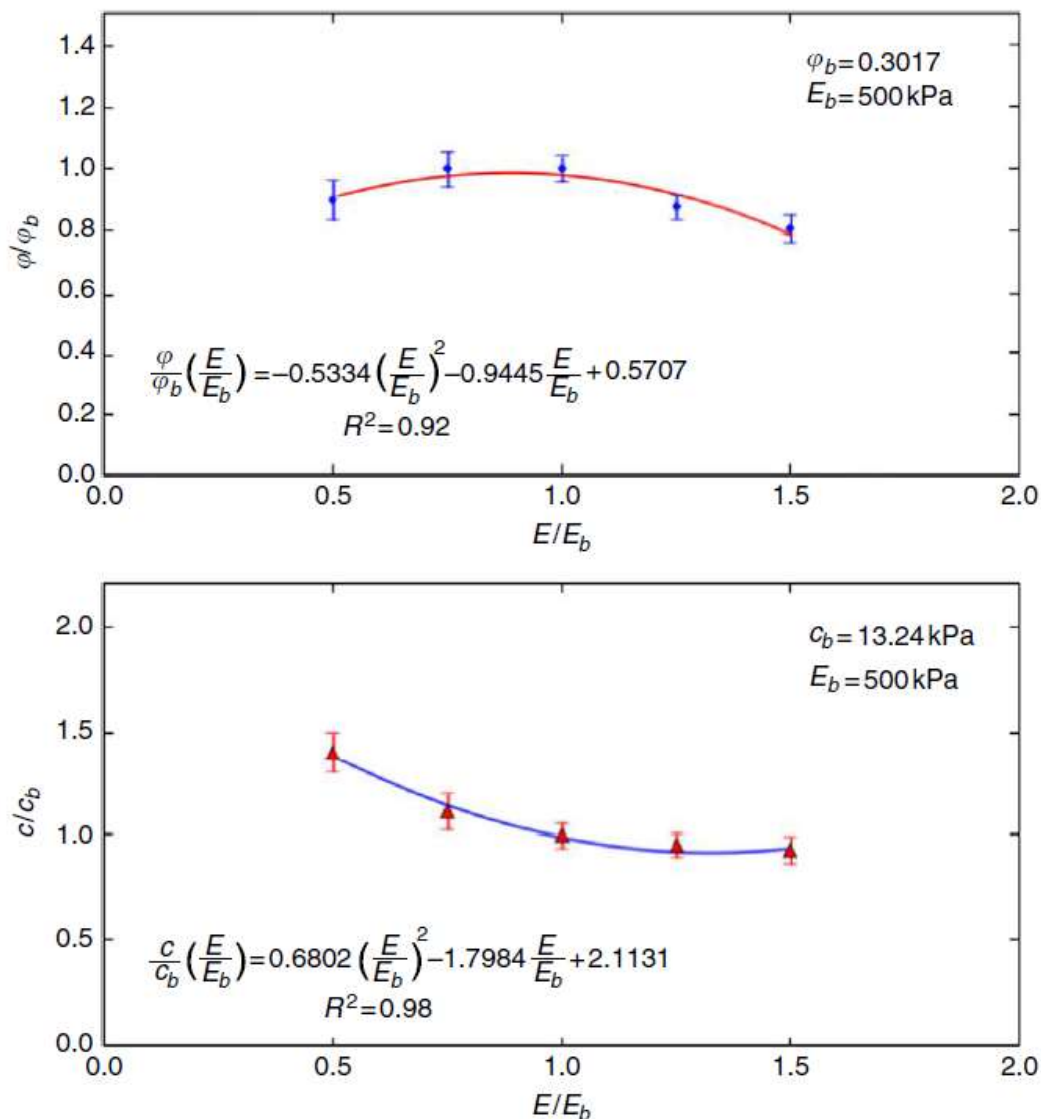
A vizsgált paraméterek kiinduló értékeit a 4.1. táblázat tartalmazza.

4.1. táblázat: Az érzékenységvizsgálat kezdő paraméterei		
Jelölés	Érték	Mértékegység
Szemcsék anyagának sűrűsége ρ	2600	kg/m ³
Szemcsék rugalmassági modulusa E	500	kPa
Poisson tényező ν	0,4	-
Szemcse- szemcse súrlódási tényező ρ_0	0.5	-
Kohézív kötés szilárdsága $nCoh$	1000	kPa
Kohézív kötés nyírószilárdsága $sCoh$	100	kPa
A nyírás sebessége v_s	0,1	m/s
Szemcsesugár r	3	mm
Clump hossz – szemcsesugár arány $\gamma = \frac{l}{r}$	0,1	-
Szimulációs időlépték Δt	50	% T_R

A kezdeti paramétereket egyenként, szisztematikusan változtatva (a kezdeti érték felétől annak 1,5-szereséig terjedő intervallumban) minden új paraméter értékkel lefuttatva a nyírókísérletet, összesen 37 tönkremeneteli határgörbét határoztam meg, minden paraméter esetében a tönkremeneteli határgörbe meredekségére (belső súrlódási szög φ) és tengelymetszetére (látszólagos kohézió c) kifejtett hatást vizsgálva. A kiinduló adatok felhasználásával

meghatározott belső súrlódási szög értéke $\varphi_b = 0,3017$, a látszólagos kohézió értéke pedig $c_b = 13,24$ kPa volt. Az érzékenységvizsgálat eredményei a következők voltak.

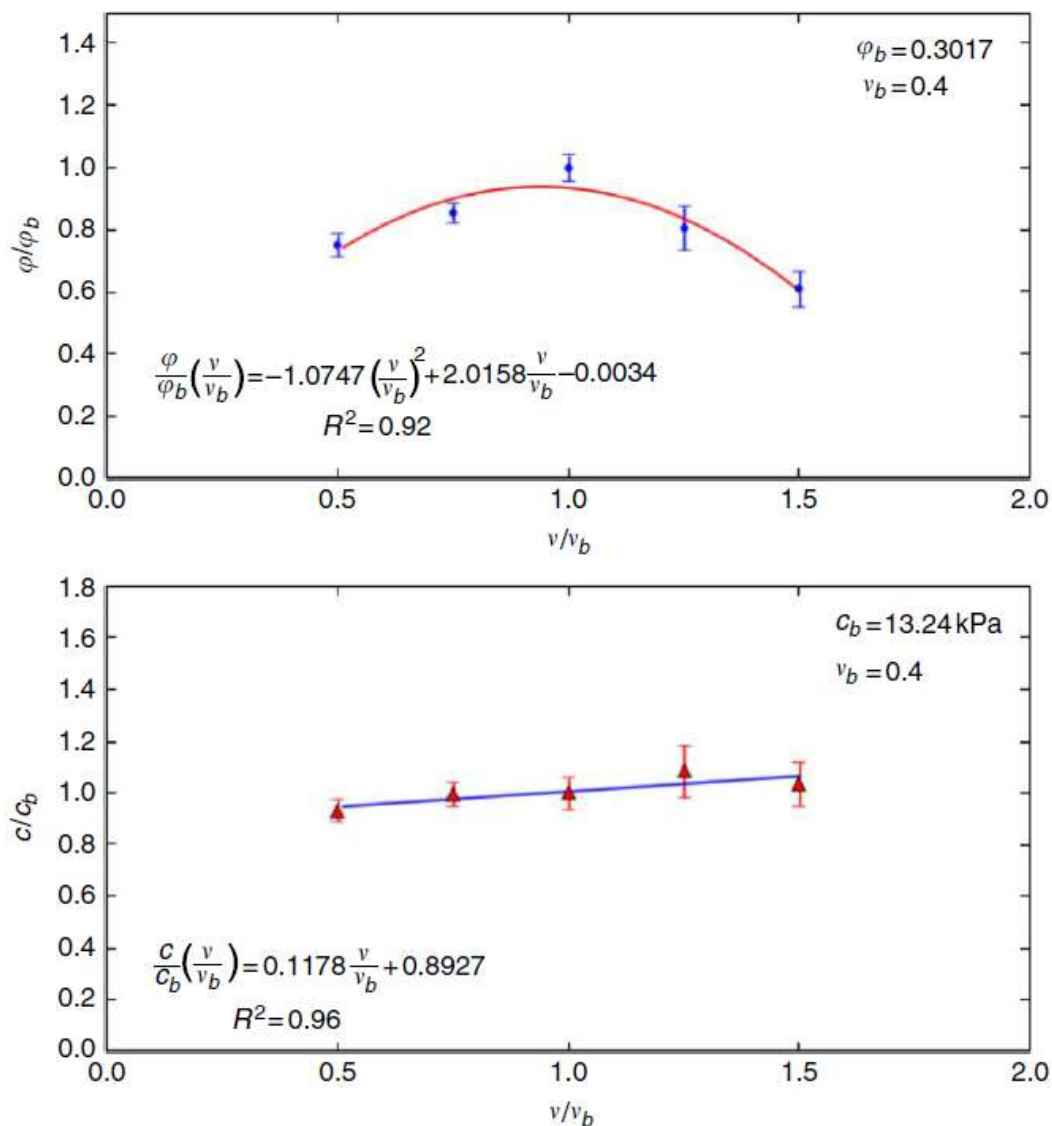
A szemcsék sűrűségének megváltoztatása nem volt jelentős hatással sem a belső súrlódási tényező, sem a kohézió értékére a vizsgált tartományban. Mivel a szecsek sűrűségének értéke hatással van a Rayleigh időléptékre és ezáltal a szimulációk futtatási időtartamára, ez a gyakorlat számára fontos eredmény, melynek felhasználásával csökkenteni lehet a szimulációk időigényét. A 4.1 ábra a rugalmassági modulus hatását mutatja mind a belső súrlódási szög, mint a kohézió értékére. A hatást kifejező matematikai összefüggések az egyes ábrákon vannak feltüntetve.



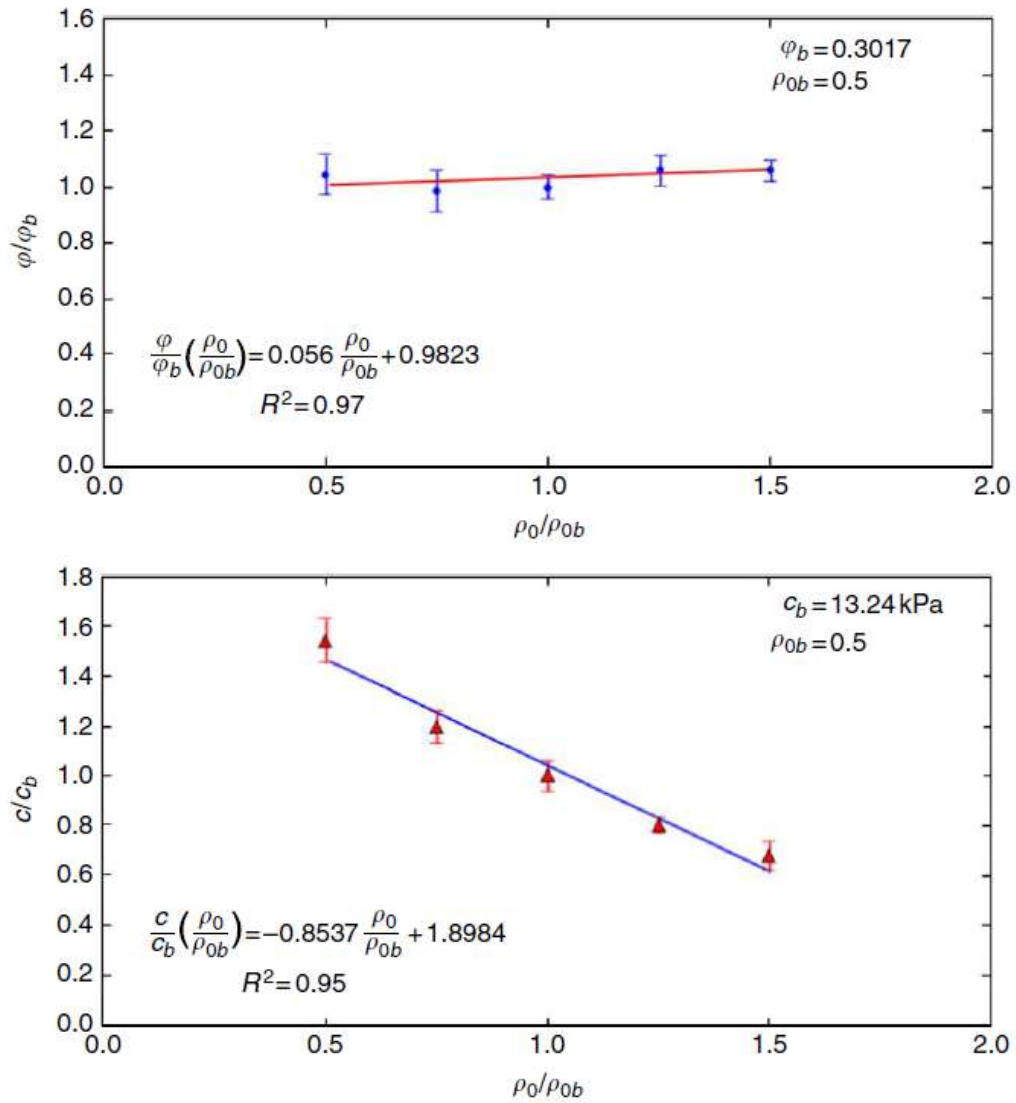
4.1. ábra: A szemcsék rugalmassági modulusának hatása a kohézió és a belső súrlódási szög értékére

Láthatjuk, hogy a rugalmassági modulus megváltoztatásának hatása mindkét makromechanikai paraméter értékére számottevő hatással van, így annak megváltoztatása során (ez szintén hatással van a Rayleigh időléptékre, értékét szokás a lehető legkisebbre választani) nagy körültekintéssel

kell eljárni. Vizsgálataim azt mutatják, hogy a Poisson tényező értékének változtatása is jelentős hatással lehet a makromechanikai viselkedésre (4.2. ábra).

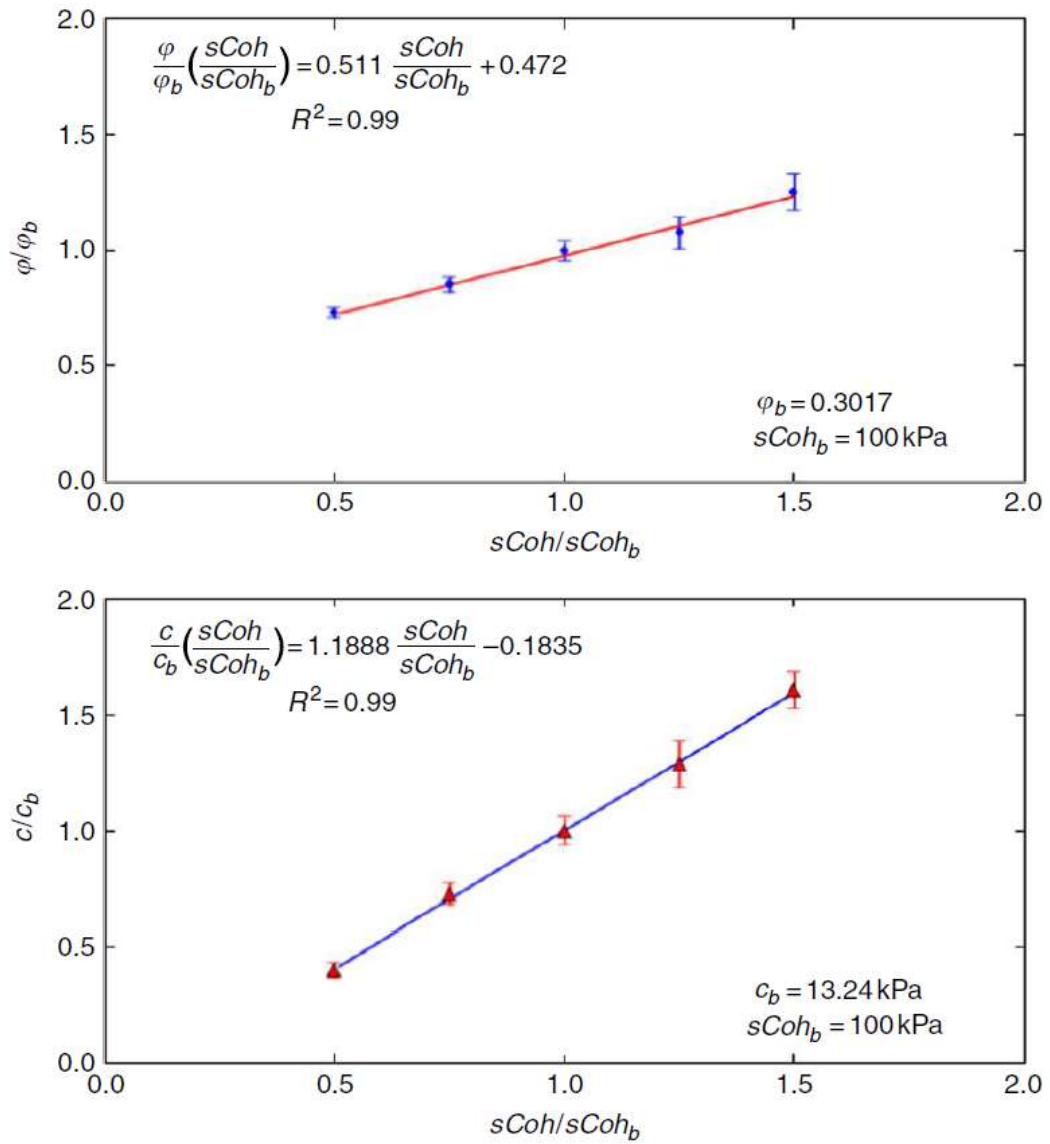


4.2. ábra: A szemcsék Poisson tényezőjének hatása a kohézió és a belső súrlódási szög értékére
Érdekes módon azt tapasztaltam, hogy a szemcsék közötti súrlódási tényező értékének megváltoztatása (a vizsgálati intervallumon belül) csak kismértékű hatással van a nyírási tönkremeneteli határgörbe meredekségére, viszont jelentős mértékben hat a látszólagos kohézió értékére (4.3. ábra).



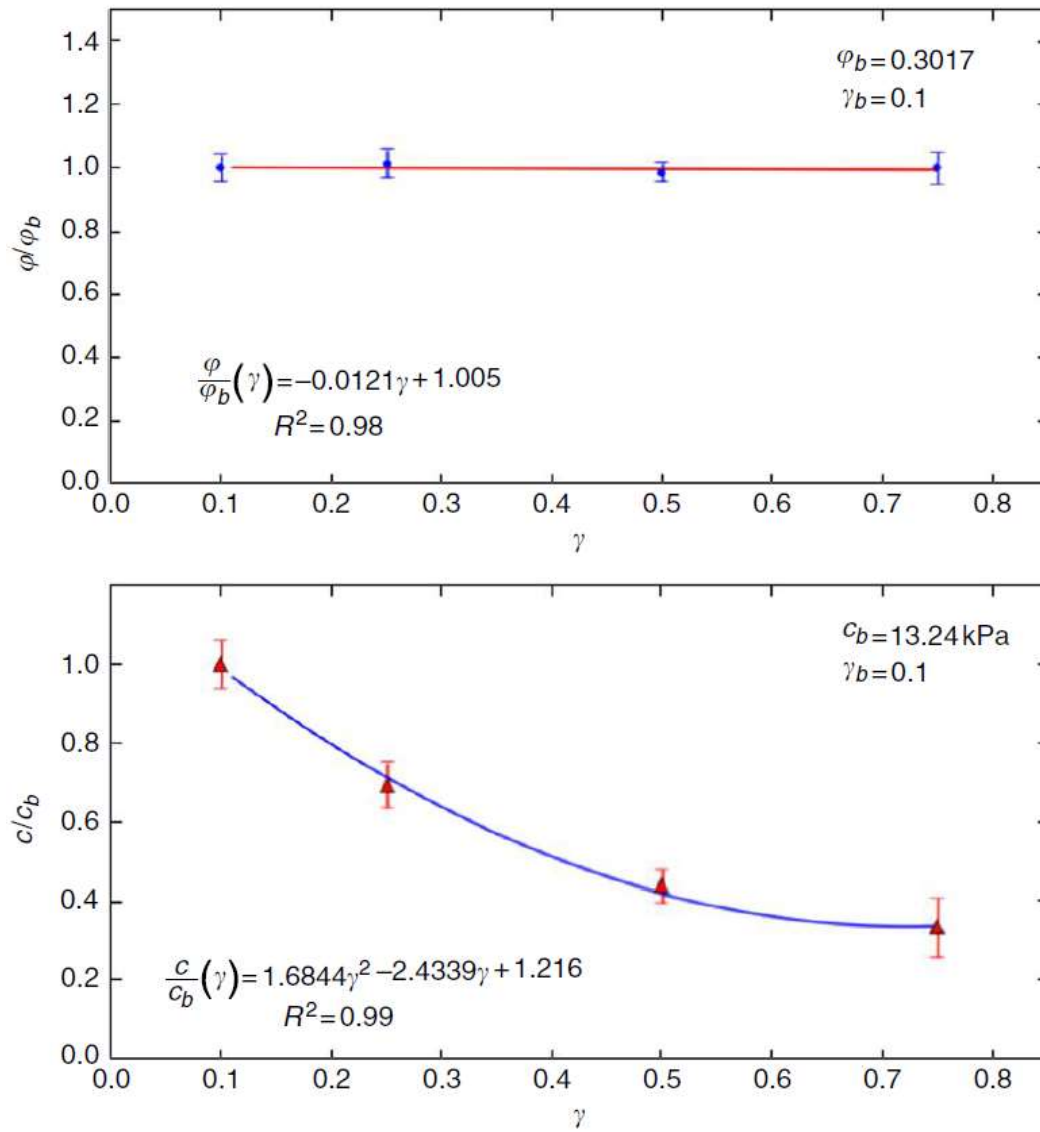
4.3. ábra: A szemcsék közötti súrlódás hatása a kohézió és a belső súrlódási szög értékére

Az alkalmazott anyagmodell kohézív kötéseinek normális irányú szilárdsága nincs jelentős hatással a makromechanikai jellemzőkre, viszont ugyanennek a kohézív kötésnek a nyírószilárdsága igen erős hatással van mindkét makromechanikai jellemző értékére (4.4. ábra).



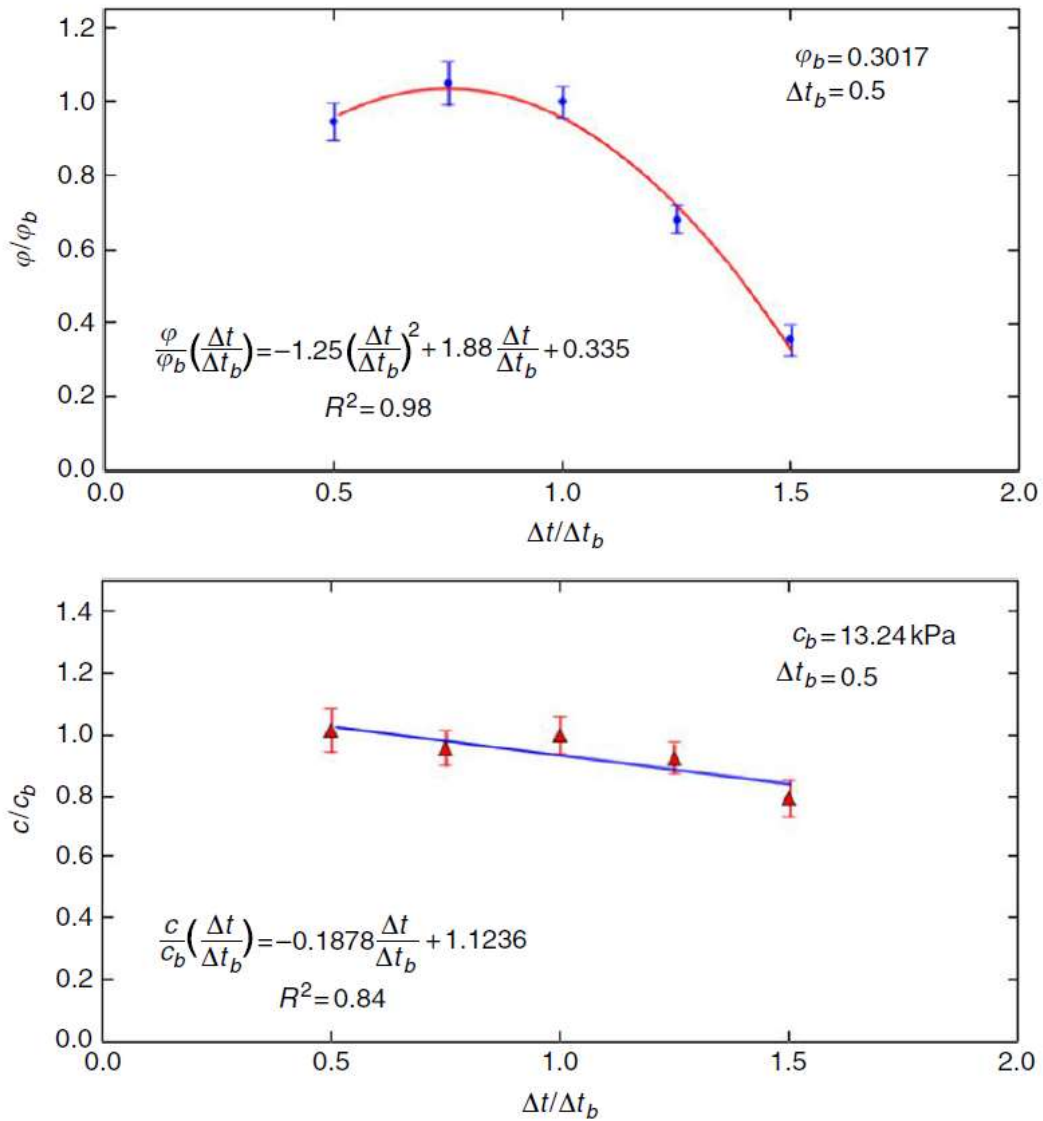
4.4. ábra: A szemcsék közötti kohézív kapcsolat nyírószilárdságának hatása a látszólagos kohézió és a belső súrlódási szög értékére

A nyírási sebesség vizsgálati intervallumon belüli változtatása nem volt számottevő hatással egyik mikromechanikai paraméter értékére sem. A halmazt alkotó clumpok gömb alaktól való eltérésére jellemző $\gamma = \frac{l}{r}$ mennyiség változtatása nem volt hatással halmaz belső súrlódásának értékére, viszont jelentős mértékben befolyásolta a halmaz látszólagos kohéziójának értékét (4.5. ábra).



4.5. ábra: A szemcsék gömb alaktól való eltérésének hatása a látszólagos kohézió és a belső súrlódási szög értékére

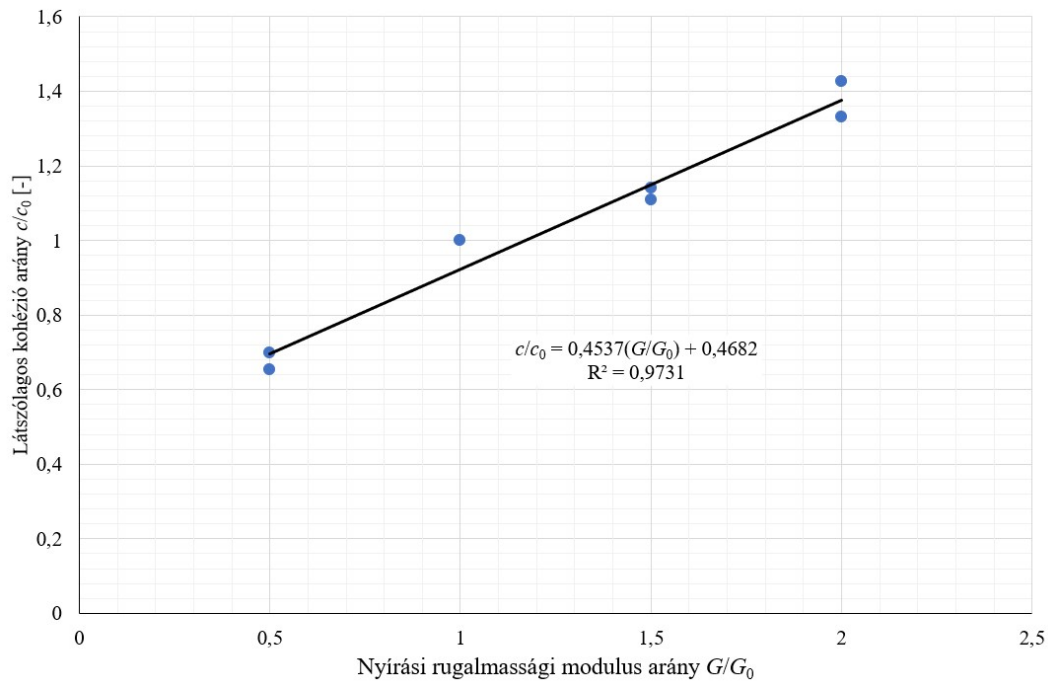
A szimuláció időléptékének megváltoztatása jelentős hatással volt mindkét makromechanikai jellemző értékére (4.6. ábra).



4.6. ábra: Az időlépték hatása a látszólagos kohézió és a belső súrlódási szög értékére

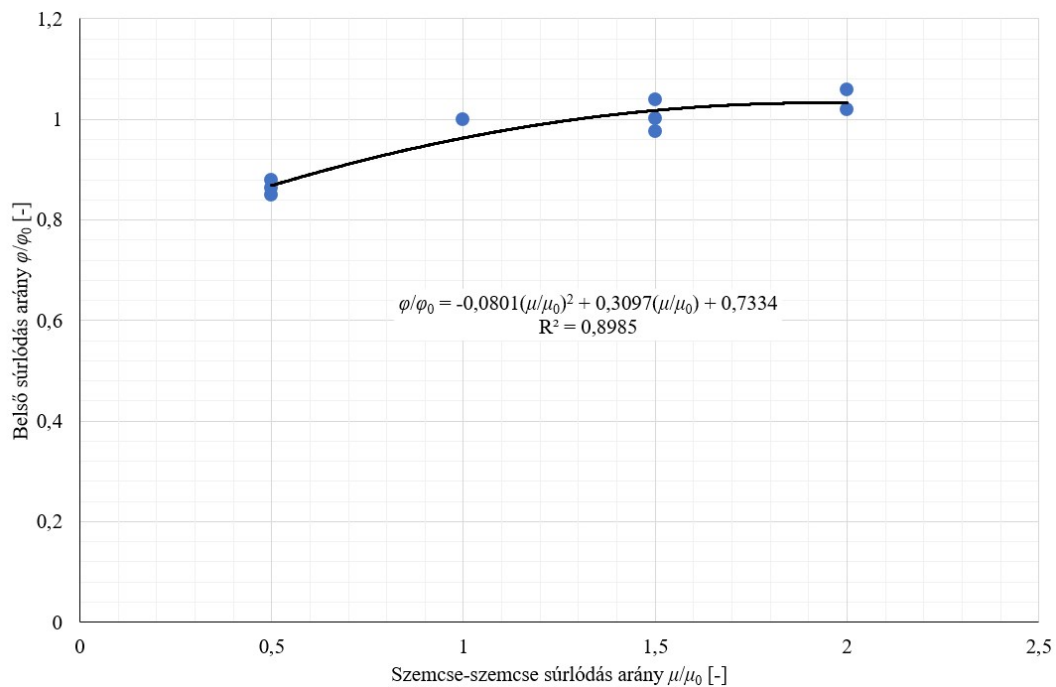
Poliéder alakú szemcsék esetére is végeztem nyírókísérletet, itt is a mikromechanikai jellemzők makroviselkedésre kifejtett hatását vizsgáltam, a mikromechanikai jellemzők értékének szisztematikus változtatásával. Ebben az esetben kohézió nélküli anyagmodellt használtam. Eredményül az kaptam, hogy csak a poliéder szemcsék közötti súrlódási tényező van számottevő hatással a makroviselkedésre: a súrlódási tényező növelése mindkét makromechanikai jellemző növekedését okozta.

A torziós nyírókísérlet mikromechanikai paraméterekre való érzékenységet is megvizsgáltam. Elsőként a csúsztató rugalmassági modulus hatását elemeztem, G változtatása nem mutatott jelentős hatást a halmaz belső súrlódásának értékére, de a látszólagos kohézió értékére igen (4.7. ábra).

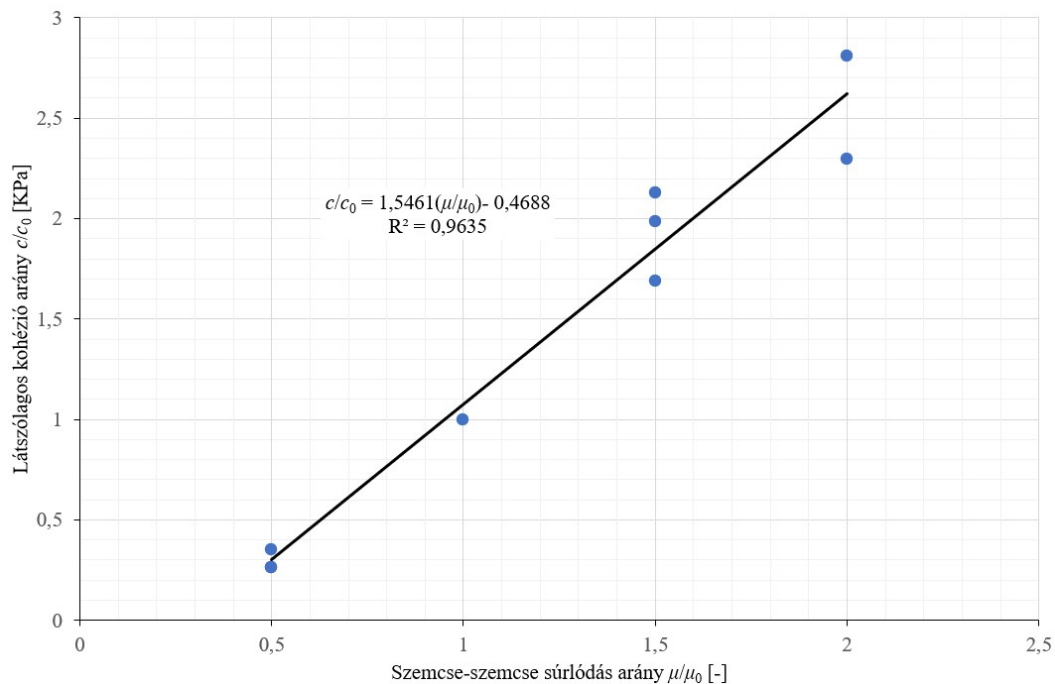


4.7. ábra: A szemcsék csúsztató rugalmassági modulusának hatása a halmaz látszólagos kohéziójának értékére torziós kísérlet esetén

A szemcsék közötti súrlódási tényező értéke jelentősen befolyásolta mind a látszólagos kohézió, mint a halmaz belső súrlódási szögének értékét (4.8. ábra, 4.9. ábra).



4.8. ábra: Szemcsék közötti súrlódási tényező változtatásának hatása a halmaz belső súrlódási szögére torziós kísérlet esetén



4.9. ábra: Szemcsék közötti sűrűlési tényező változtatásának hatása a halmaz látszólagos kohéziójára torziós kísérlet esetén

A diszkrét elemes modellek szabványos nyírókísérleten alapuló kalibrálása felgyorsítható, ha ismert a mikromechanikai paraméterek hatása a szemcsés halmaz makromechanikai viselkedésére. Nagyszámú nyírókísérlet-szimuláció alapján az alábbi következtetéseket vontam le:

1. A szemcsék sűrűségének hatása mindkét makromechanikai paraméterre (a nyírási tönkremeneteli határgörbére) elhanyagolható.
2. Mindkét makromechanikai paraméter, a kohézió és a belső sűrűlés jelentősen változik a szemcsék rugalmassági modulusának növekedésével.
3. A halmaz látszólagos kohéziója enyhén növekszik a Poisson-tényező értékének növelésével. A belső sűrűlésnek a vizsgált tartományban helyi maximuma van.
4. A szemcsék közötti sűrűlési együttható erősen befolyásolja a halmaz látszólagos kohézióját. A szemcsék közötti sűrűlési együttható változtatása nem gyakorol jelentős hatást a belső sűrűlésre.
5. A kohézív kötések normálszilárdsága nincs hatással a halmaz makroszintű viselkedésére nyírási problémák modellezése esetén.
6. A kohézív kötések tangenciális szilárdságának növelése jelentősen növeli mindkét makromechanikai paraméter értékét.
7. A nyírási sebesség nem befolyásolja jelentősen a makromechanikai paramétereket (a szimulációink során vizsgált tartományban).
8. A clump alakja jelentős hatással van a makromechanikai paraméterekre, ez a hatás nem egyszerűen lineáris, és ellentmondhat az intuícióknak: a csomón belüli részecskék közötti

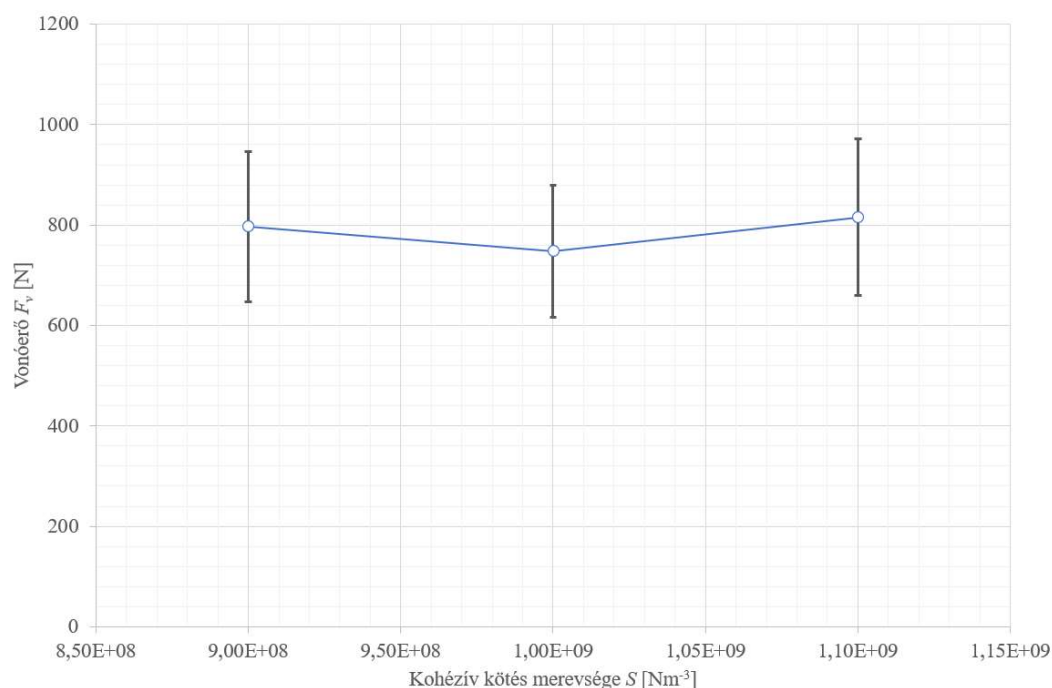
távolság növelésével mindkét makromechanikai paraméter értéke csökken a köralakúságtól való eltérés növekedésével. A nyírókísérlet eredményeinek szórása szintén jelentősen növekszik a clumpot alkotó szemcsék távolságának növekedésével. Ennek a viselkedésnek az oka a kohéziós kapcsolatok számának különbsége lehet. Megállapítottuk, hogy a clumpot alkotó két szemcse középpontja közötti távolság növelésével a kohézív kötések száma csökken.

9. A szimulációs időlépés növelése jelentős hatást gyakorol a szimulált makromechanikai paraméterekre.
10. A torziós kísérlet segítségével végzett helyszíni mérések jól helyettesíthetik a talajmintákon végzett laboratóriumi vizsgálatokat, ezzel elkerülhető a talajminták bolygatásából eredő mechanikai tulajdonság változás.

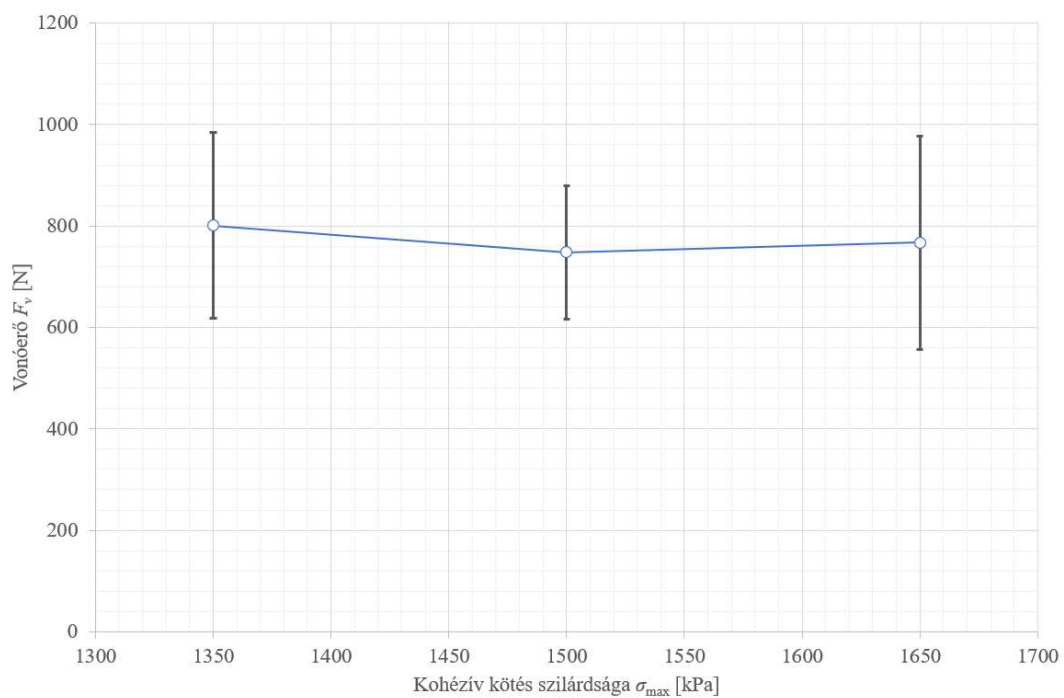
Az adott következtetésekhez tartozó közelítő matematikai függvények a megfelelő ábrákban láthatók.

Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye

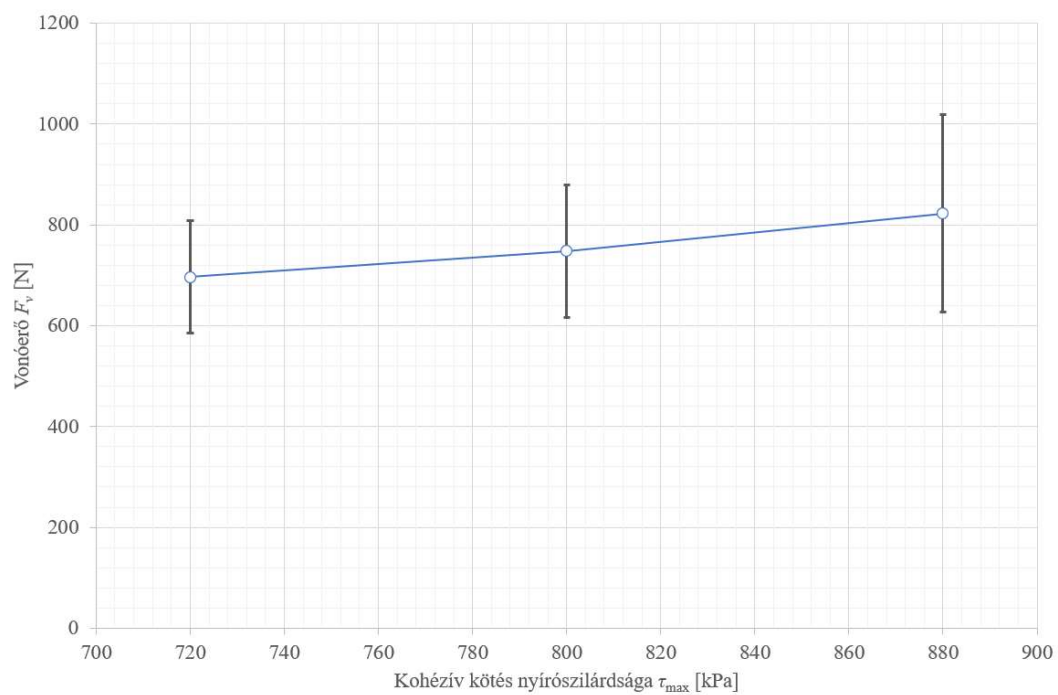
Rezgő talajművelő szerszámok esetén is megvizsgáltam a mikromechanikai paraméterekre való érzékenységet. Elsősorban a szimulációknál használt kohézív anyagmodell paramétereit vizsgáltam. Céлом annak eldöntése volt, hogy a rezgő talajművelő szerszám modell mennyire érzékenyen reagál a kohézív kötési paraméterek megváltoztatására (4.10 – 4.14. ábrák).



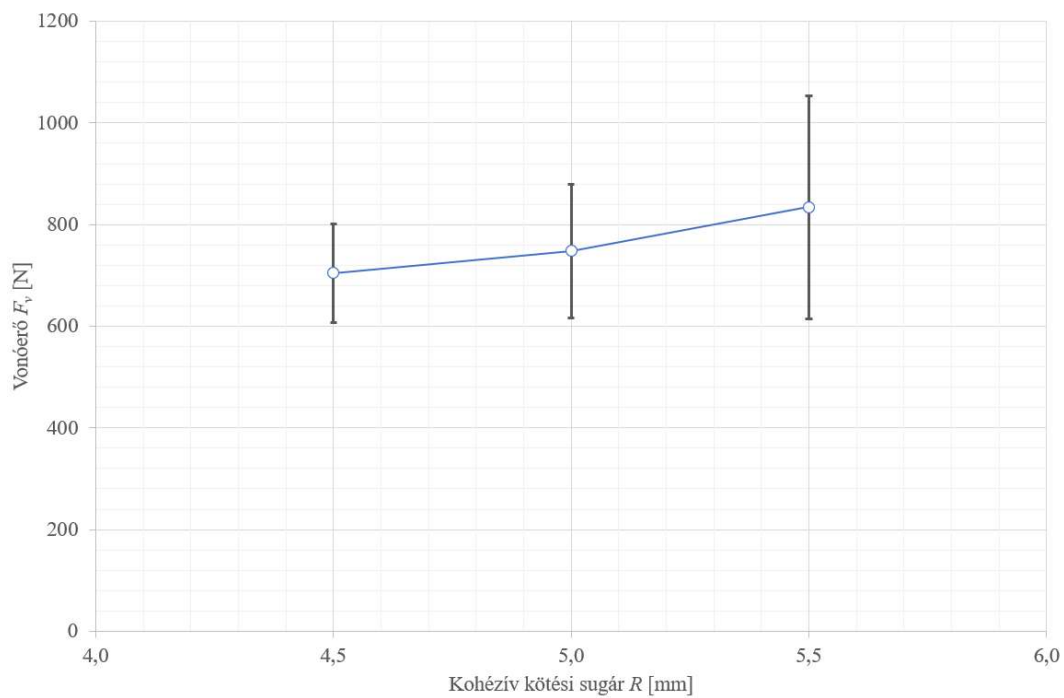
4.10. ábra: A kohézív kötés merevségének hatása a vonóerőre



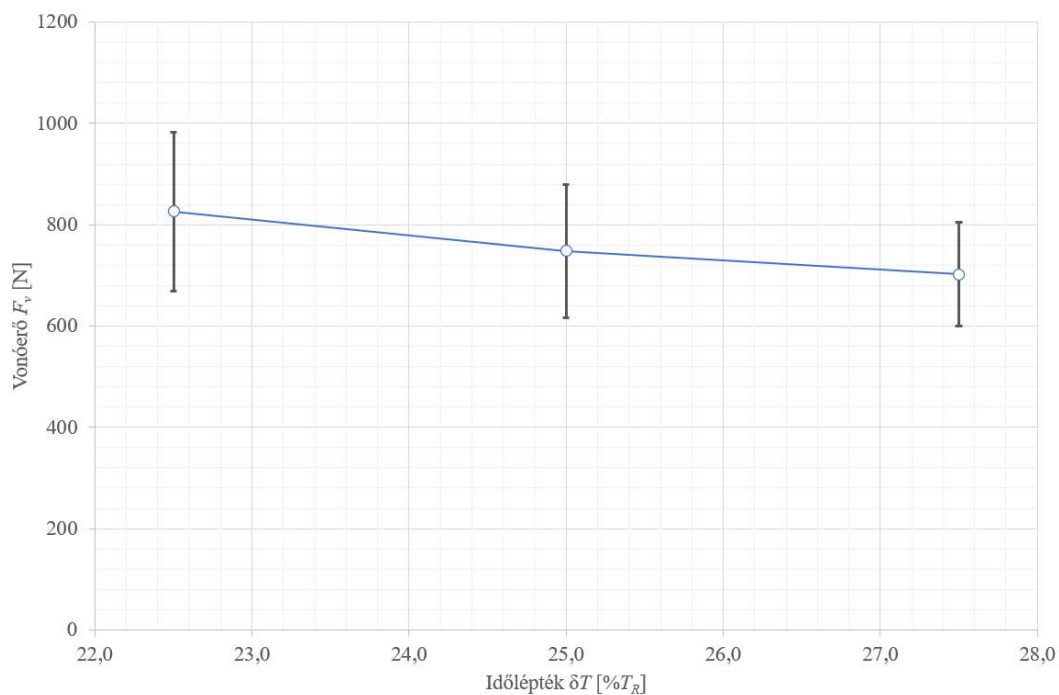
4.11. ábra: A kohézív kötés szilárdságának hatása a vonóerőre



4.12. ábra: A kohézív kötés nyírósilárdságának hatása a vonóerőre

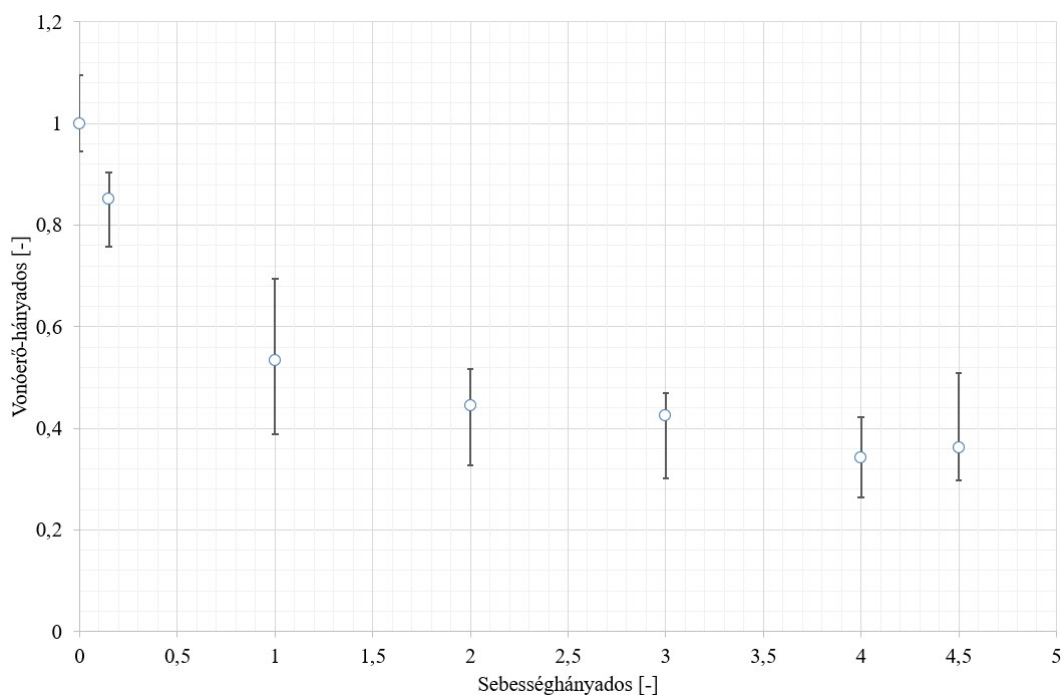


4.13. ábra: A kohézív kötés sugarának hatása a vonóerőre



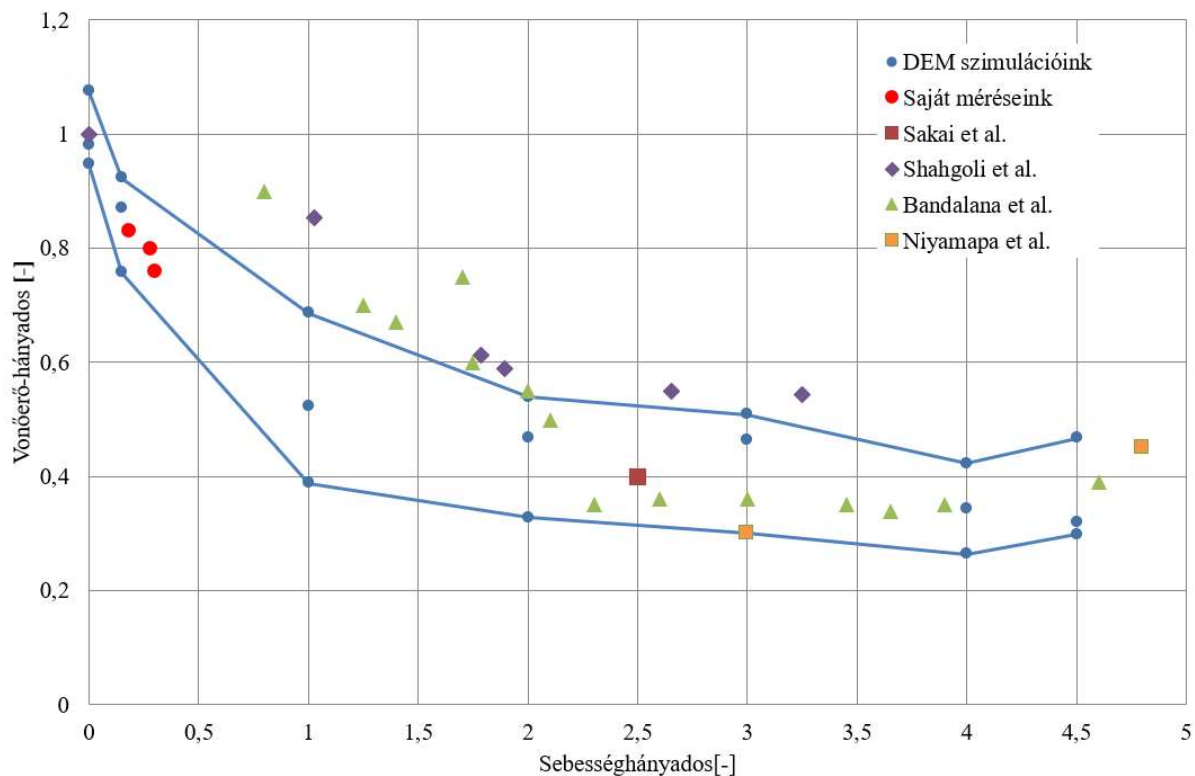
4.14. ábra: A szimulációs időlépték hatása a vonóerőre

A sebességhányados fogalmát bevezetve (szerszámcsúcs sebesség / haladási sebesség) ábrázolhatjuk a talajművelő szerszámra ható erő nagyságát. Vizsgálataim azt mutatták, hogy a szerszámsebesség növekedésével a rugalmas rögzítésű talajművelőszerszámra ható vonóerő értéke csökkent (4.15. ábra).



4.15. ábra: Vonóerő csökkenés a sebességhányados függvényében

A sebességhányados bevezetésével egységes diagramon tudtam ábrázolni számos szerző kísérleti eredményét valamint a mi vizsgálataink eredményét is (4.16. ábra). Az ábrán szimulációinkban az adott beállításokhoz tartozó maximális és minimális vonóerő értékeket összekötve jelöltem ki a szimulációval kapott eredmények tartományát.

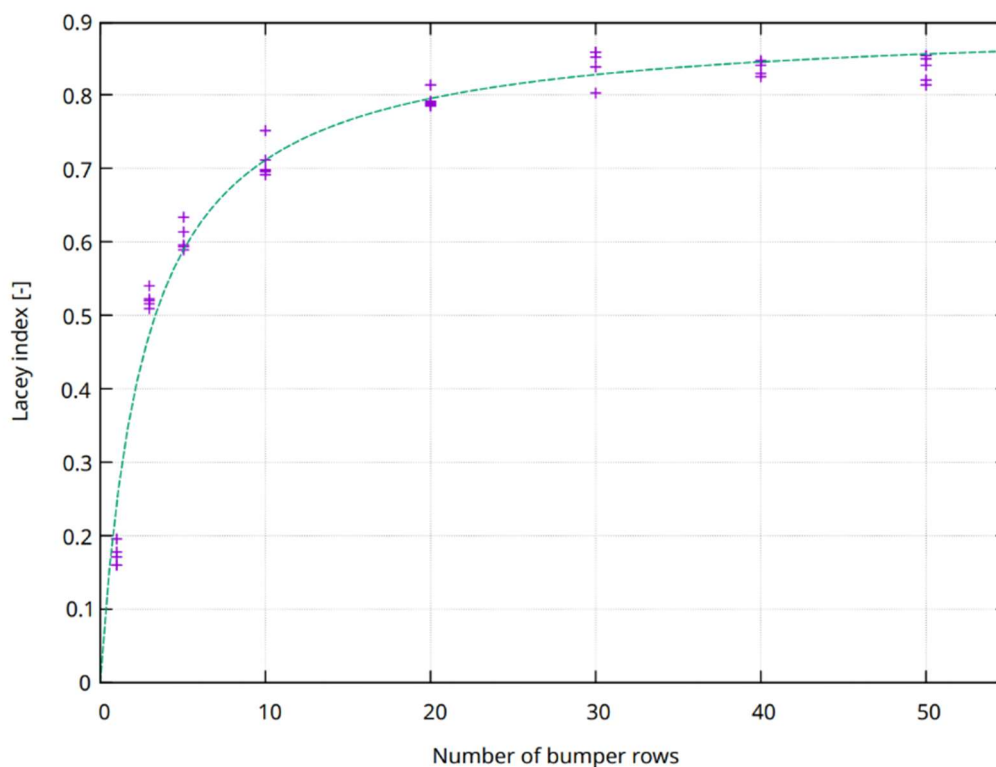


4.16. ábra: Szimulációink, kísérleti eredményeink és más szerzők kísérleti eredményei közös diagramon

Arra a következtetésre jutottam, hogy a vonóerő arány (mereven rögzített szerszám vontatásához szükséges erő / rezgő szerszám vontatásához szükséges erő) a szerszám geometriától függetlenül csökken.

Galton keverő működési hatékonysága

Numerikus szimulációk segítségével megvizsgáltam, hogyan változik a Galton keverő keverési hatékonysága a berendezés geometriai tulajdonságainak változtatásával. Elsőként az ütközősorok számának hatását elemeztem (4.17. ábra).



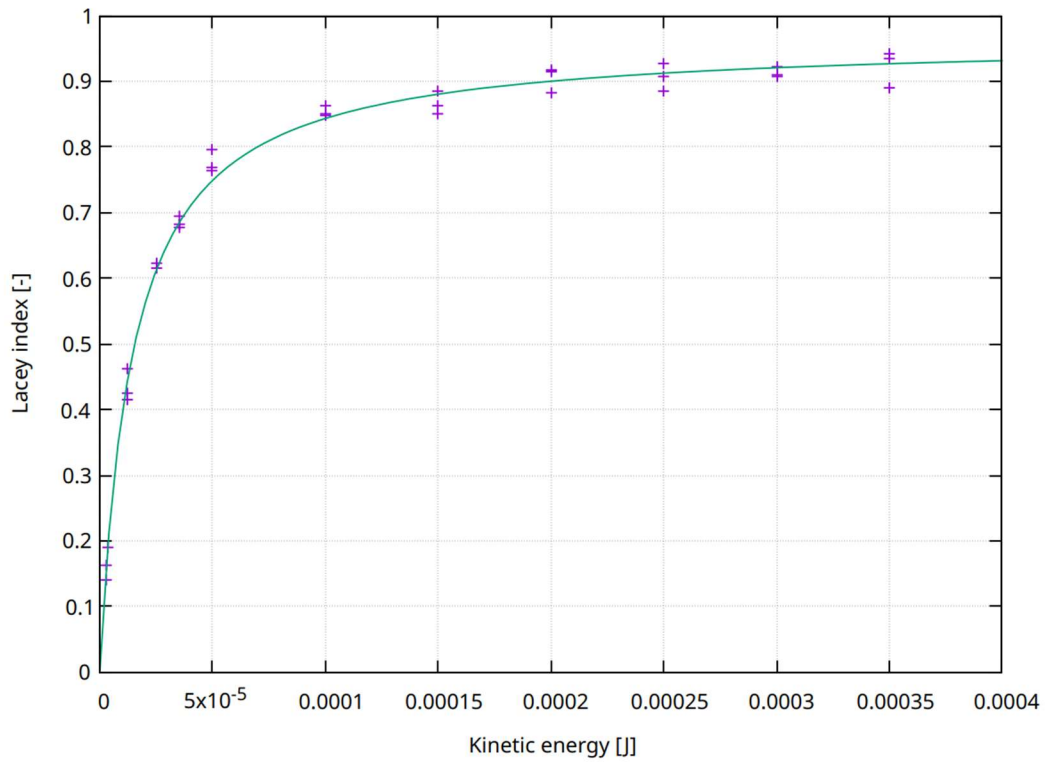
4.17. ábra: Galton keverő keverési hatékonysága az ütközősorok számának függvényében

A keverőberendezés hatékonyságának függése az ütközősorok számától a következő függvénnyel írható le a 0-tól 50 ütközőig vizsgált tartományban.

$$L(n) = a \frac{n}{n + b}, \quad 4.1$$

ahol L a keverési index (Lacey-index), n az ütközősorok száma (értelmszerűen csak egész szám lehet), $a = 0.902153 \pm 0.01097$ and $b = 2.67239 \pm 0.1582$. $R^2 = 0.9734$. Az eredményekből látható, hogy nem érdemes az ütközősorok számát (és így a keverőberendezés méretét) egy bizonyos érték fölé emelni.

További érdekes, a keverés hatékonyságát befolyásoló fizikai mennyiség az első ütközősorra érkező szemesék mozgási energiája. Ennek értékét az első ütközősor és a kifolyónyílás közötti távolság értékével tudtam szabályozni. A 4.18. ábra a mozgási energia és a keverési hatékonyság kapcsolatát mutatja két ütközősoros Galton keverő esetére.

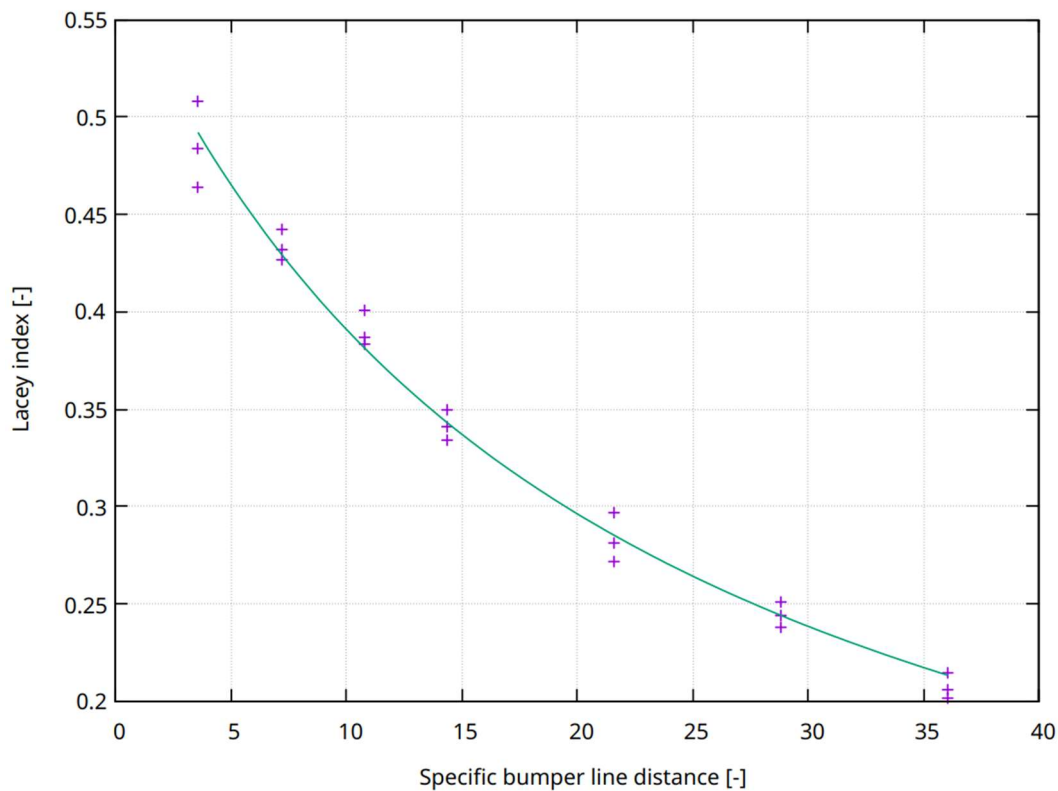


4.18. ábra: Galton keverő hatékonysága az egyes szemcsék mozgási energiájának függvényében
Az előző esethez hasonló telítődési függvény alkalmazható a keverési hatékonyság jellemzésére:

$$L(E) = c \frac{E}{E + d} \quad 4.2$$

ahol $c = 0.964811 \pm 0.006221$ és $d = 1.44043\text{e-}05 \pm 5.16\text{e-}07$. Itt is látható a csökkenő hozadék törvényének érvényesülése.

Megvizsgáltam az ütközősorok egymástól mért távolságának hatását is fajlagos ütközősor távolságot: (s =ütközősor távolság/golyó sugár) használva (4.19. ábra).



4.19. ábra: Keverési hatékonyság az ütközősor távolság függvényében

Az alábbi tapasztalati függvény jól illeszkedik a kapott eredményekre:

$$L(s) = \frac{1}{fs + g} \quad 4.3$$

ahol $f = 0.0818534 \pm 0.002617$, $g = 1.73881 \pm 0.02851$.

Érdekes módon azt tapasztaltam, hogy minél távolabb helyezkedik el egymástól a két ütközősor, a Galton keverő hatékonysága annál rosszabb.

Az eredményeket összefoglalva azt mondhatjuk, hogy a Galton-deszkán a sorok számának jelentős hatása van a keverés hatékonyságára. A sorok növelésével, több ütközési sor hozzáadásával kezdetben javul a keverés, azonban egy bizonyos pont után a további növelés csökkenő hozadékot eredményez. A szemcsék mozgási energiája egy bizonyos küszöbig befolyásolja a keverés hatékonyságát. Ezen küszöbérték fölött a kinetikus energia növelése már nem javítja számottevően a keverés hatékonyságát. Az ütközőelemek mérete csekély hatással van a keverés hatékonyságára, amíg túl nagyra nem válnak, mert ekkor a részecskék nem tudnak megfelelően átesni, pattogni. Az ütközősorok közötti távolság szintén befolyásolja a keverés hatékonyságát: a nagyobb távolságok csökkentik a hatékonyságot.

Vizsgálataim megmutatták, hogy a statikus keverők, amelyek hasonlóan vannak elrendezve, mint a Galton-deszka (Galton keverők), alkalmasak lehetnek szemcsés anyagok energiabefektetés nélkül történő keverésére. Az ilyen eszközök tervezésekor érdemes figyelembe venni a fent vázolt következtetéseket.

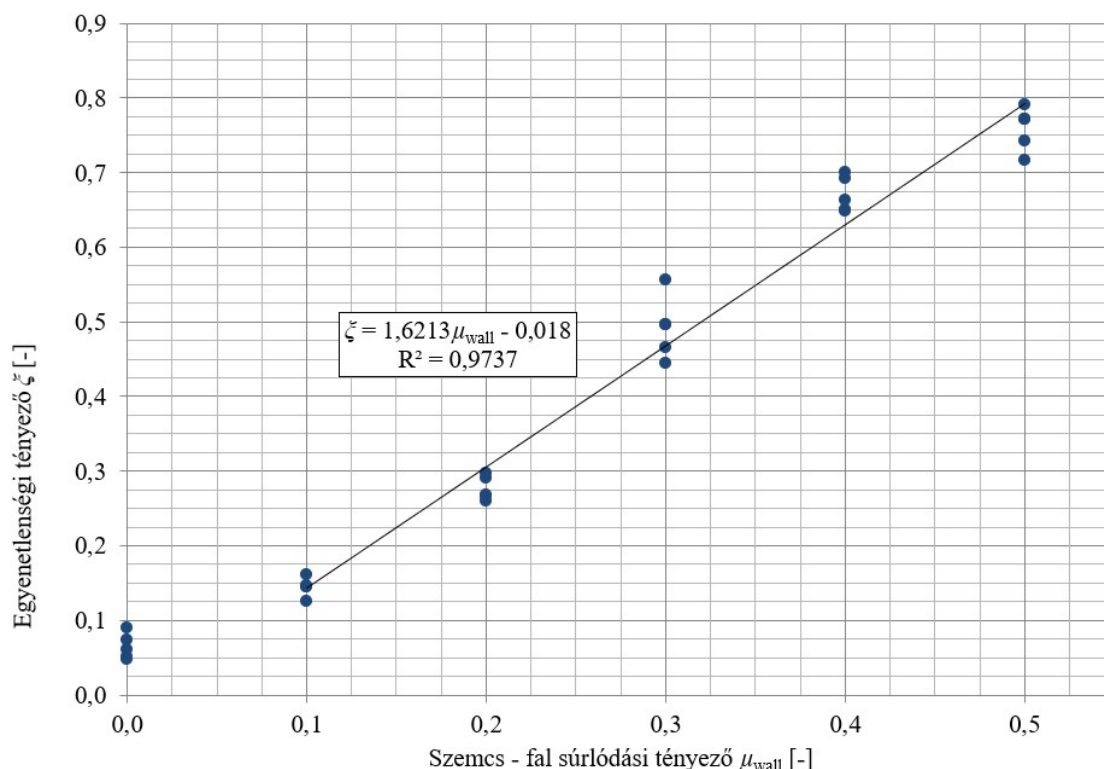
Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái

Bevezettünk egy mértékegység nélküli jellemzőt, amely alkalmas az anyagáramlás egyenetlenségének számszerűsítésére. Míg a szakirodalom jellemzően a „residence time” (tartózkodási idő) fogalmát használja ennek leírására, mi a szemcsék függőleges irányú elmozdulásában jelentkező egyenetlenséget a ξ egyenetlenségi tényezővel írtuk le, ahol:

$$\xi = \frac{y_{max} - y_{min}}{y_{max}}. \quad 4.4$$

Ez az egyenetlenségi tényező 0 és 1 közötti értékeket vehet fel, ahol a 0 érték a tökéletesen egyenletes áramlást jelöli.

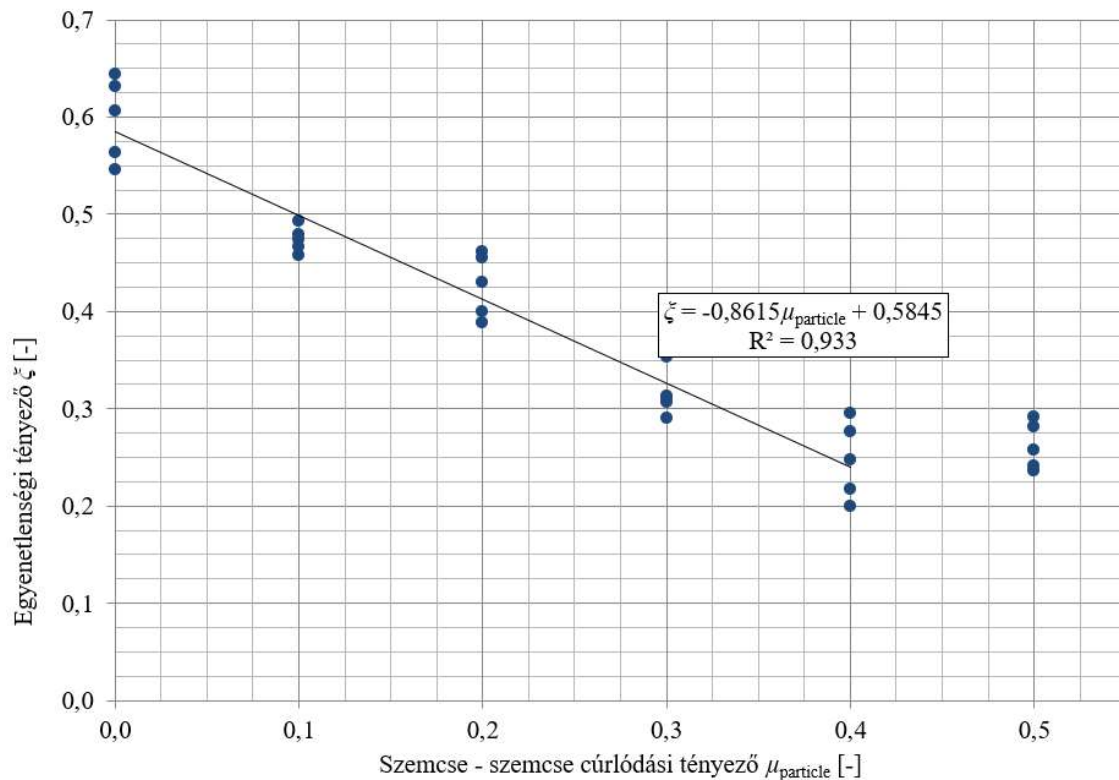
Az egyenetlenségi tényezőt felhasználva megvizsgálatuk, hogy azonos lamella szögállás (27°) és szemcsék közötti súrlódási tényező ($\mu_{szemcse} = 0,2$) mellett a falsúrlódás értékének megváltoztatása hogyan befolyásolja az anyagáramlás egyenetlenségét. A 4.20. ábra mutatja a vizsgálat eredményeit, ahol a falsúrlódási tényező értékei 0 és 0,5 között mozogtak.



4.20. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-fal súrlódási tényező függvényében

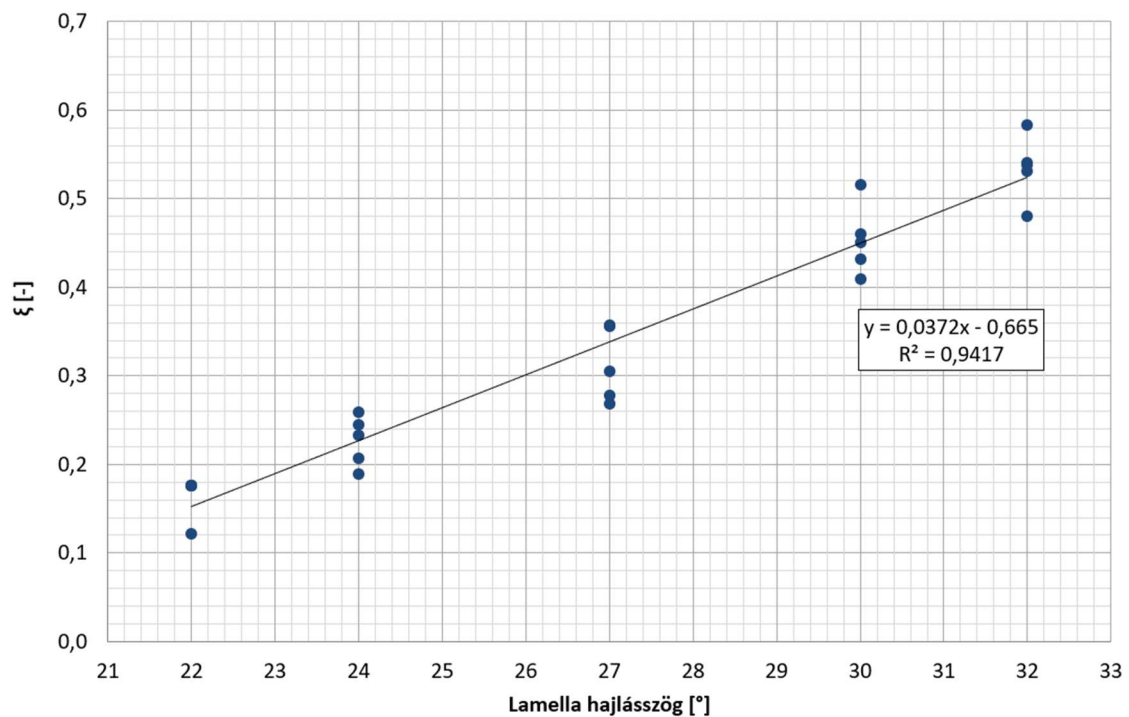
A falsúrlódás növekedése egyértelműen „rontja” az anyagáramlás egyenletességét, mivel magasabb súrlódási tényező esetén a fal erőteljesebben akadályozza a szemcsék mozgását.

A következő lépésben azt vizsgáltuk, hogy 27° -os lamella szögállás és azonos falsúrlódási tényező ($\mu_{fal} = 0,25$) mellett a szemcsék közötti súrlódási tényező értékének változása hogyan befolyásolja az anyagáramlás egyenetlenségét. A 4.21. ábra mutatja a vizsgálat eredményeit, ahol a szemcse-szemcse súrlódási tényező értékei 0 és 0,5 között mozogtak.



4.21. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-szemcse súrlódási tényező függvényében. A szemcsék közötti súrlódás növekedésével csökken az anyagáramlás egyenetlensége, mivel nagyobb súrlódási tényező esetén a szemcsék jobban együtt mozognak, ezáltal a falsúrlódás hatása kevésbé érvényesül.

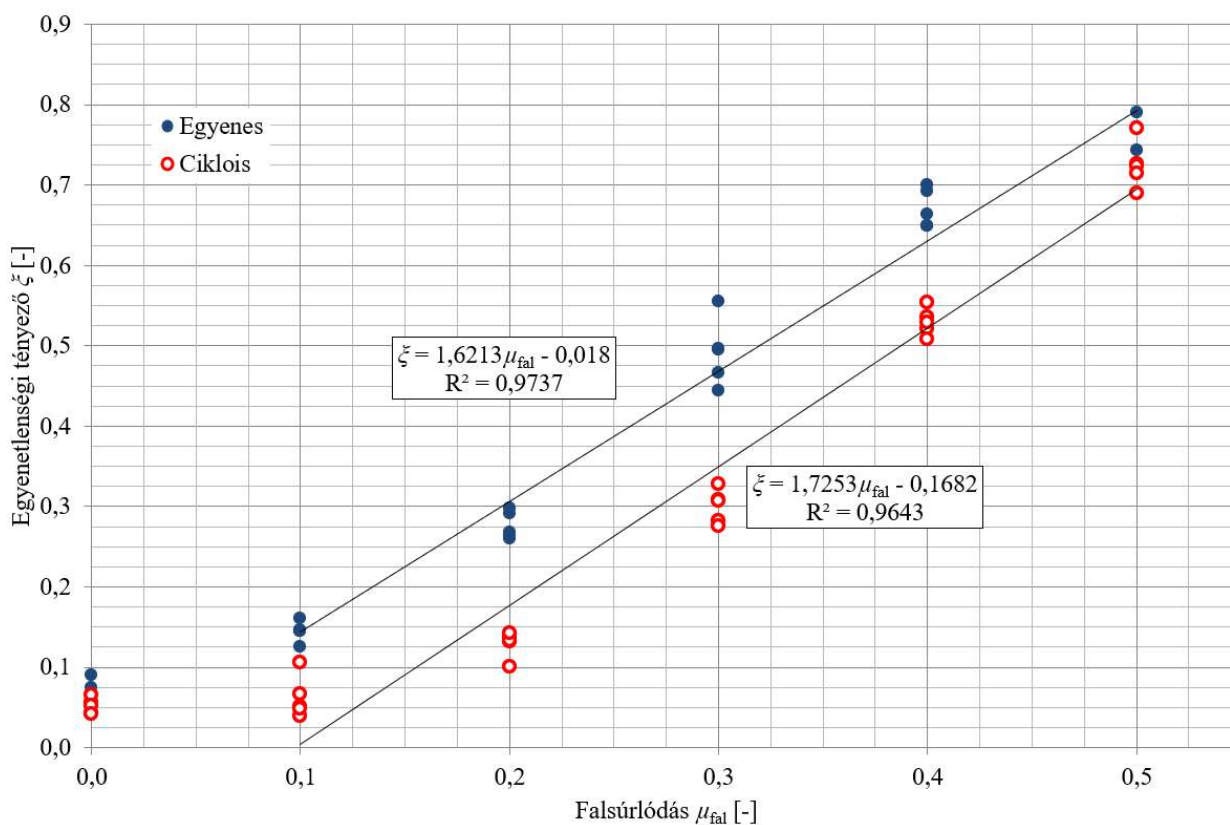
Egyenes lamella esetén megvizsgáltuk a lamella dőlésszög hatását a szemcseáramlás egyenetlenségére, miközben a súrlódási tényezők értékek $\mu_{fal} = 0,25$ és $\mu_{szemcse} = 0,2$. A vizsgált lamella dőlésszögek 22° és 32° között változtak (4.22. ábra). Az ábrán jól látható, hogy a lamella hajlásszög csökkentése egyértelműen javítja az anyagáramlás egyenetlenségét. Ez a hajlásszög csökkentés viszont rontaná a szárítólevegő befúvás hatékonyságát, így ezzel a módszerrel nem lehet sokat javítani a terményáramlás egyenetlenségén.



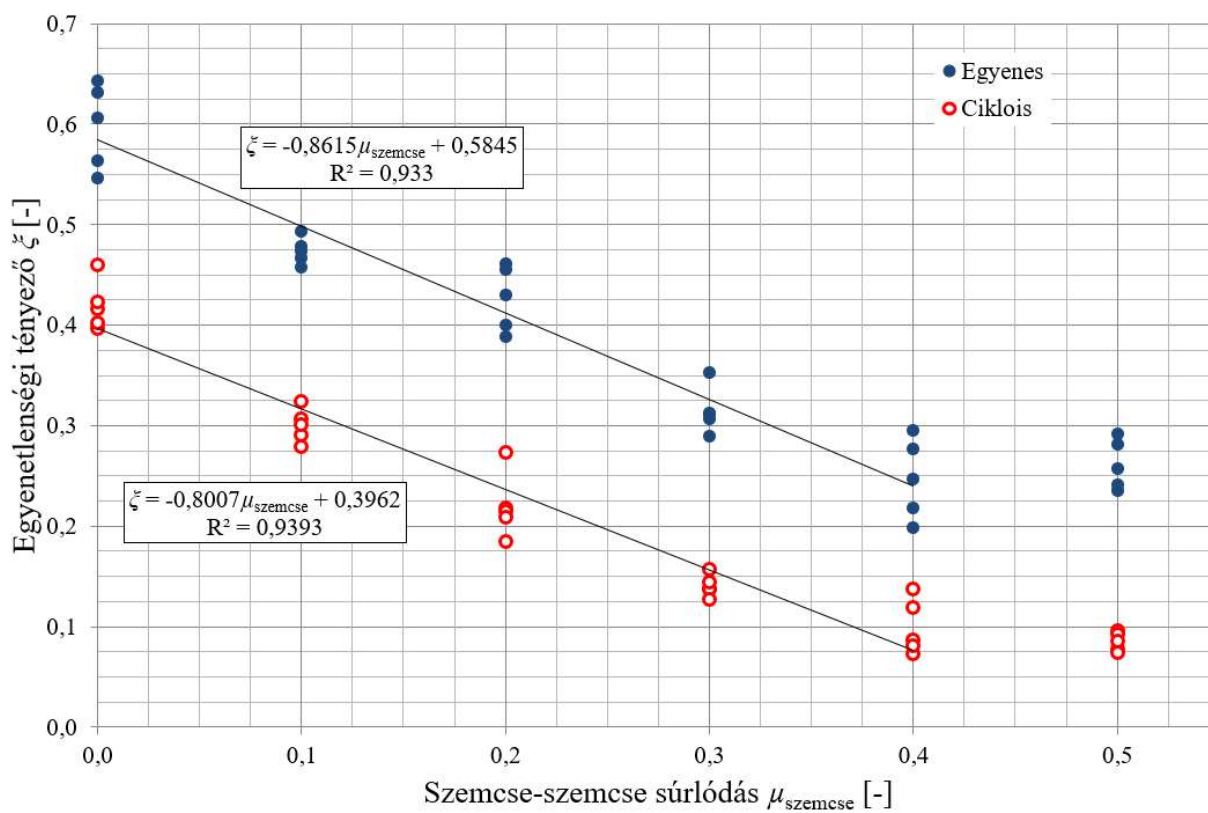
4.22. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a lamella dőlésszög függvényében

Az optimális lamella geometria meghatározásához a brachisztokron-problémát vettük alapul. Eszerint konzervatív erőterben, a súrlódás figyelmen kívül hagyásával, két különböző x és y koordinátájú pont között a leggyorsabban bejárható út egy ciklois görbe. Ezen elv alapján a lamella geometriáját is ciklois alakra terveztük, a ciklois egyenletének meghatározásához figyelembe vettük a meglévő lamella konstrukcióhoz való illeszkedés peremfeltételeit.

Ciklois alakú lamella esetén is megvizsgáltuk a falsúrlódás és a szemcsék közötti súrlódás hatását az áramlás egyenetlenségére. A vizsgálatok eredményeit a 4.23. ábra és 4.24. ábra szemlélteti, ahol a lineáris szakaszokra illesztett egyenesek egyenletei is láthatók.

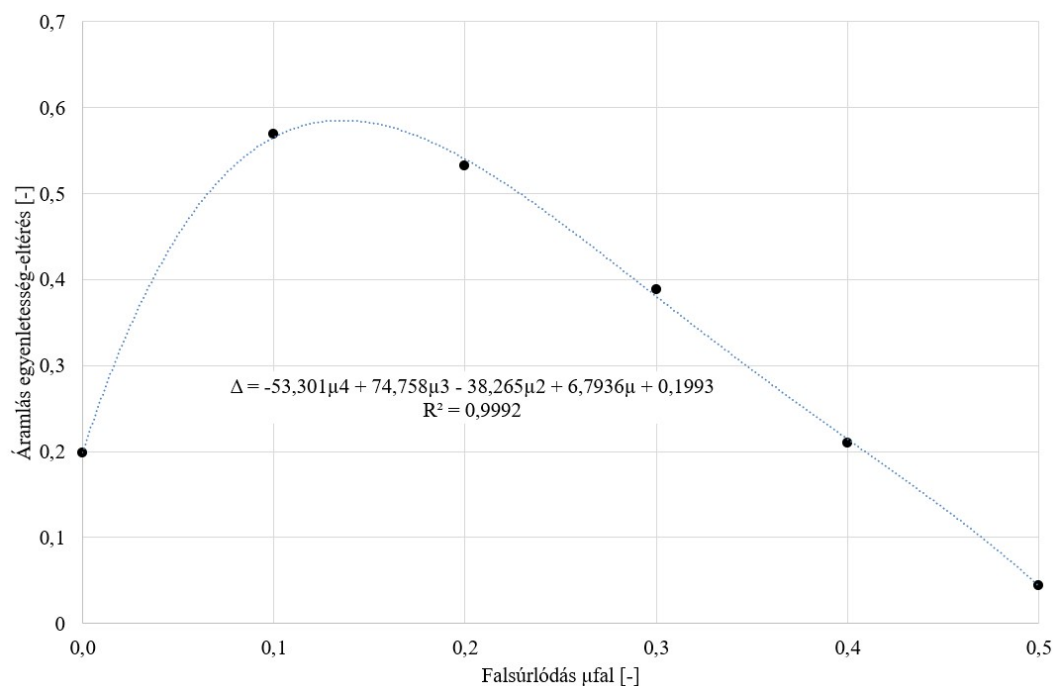


4.23. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-fal súrlódási tényező függvényében egyenes és ciklois lamella esetén

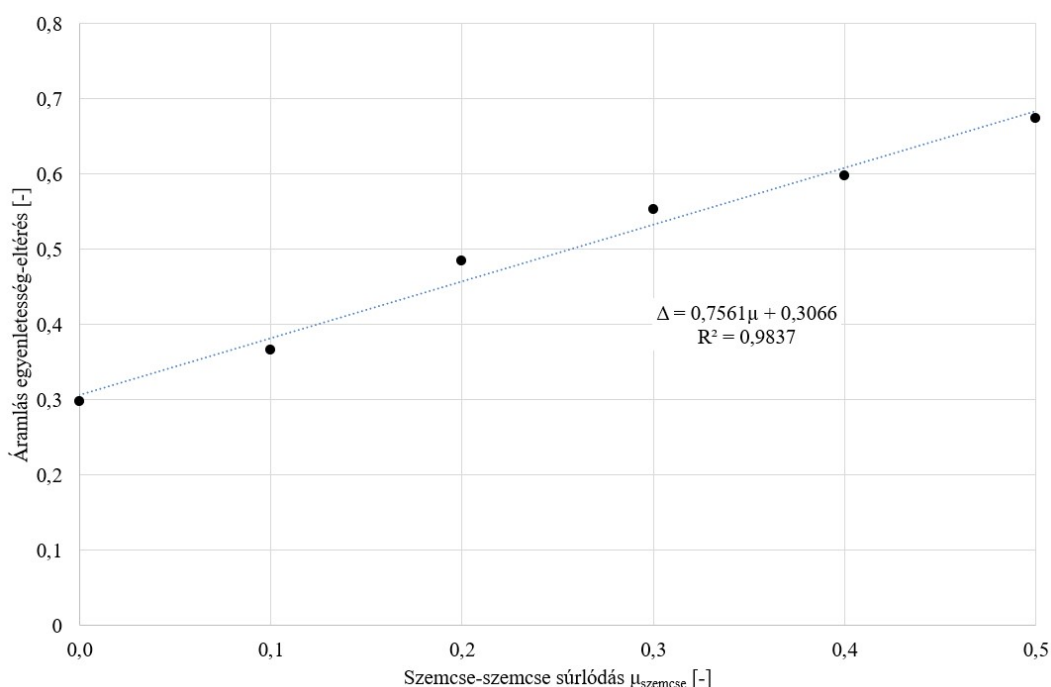


4.24. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-szemcse súrlódási tényező függvényében egyenes és ciklois lamella esetén

A diagramokon egyértelműen látható, hogy a ciklois alakú geometria a vizsgált súrlódási tényezők szinte mindegyikére kisebb ζ áramlási egyenetlenség értéket eredményez. Az eltérések százalékos értékét mutatja a következő két ábra (4.25 és 4.26).



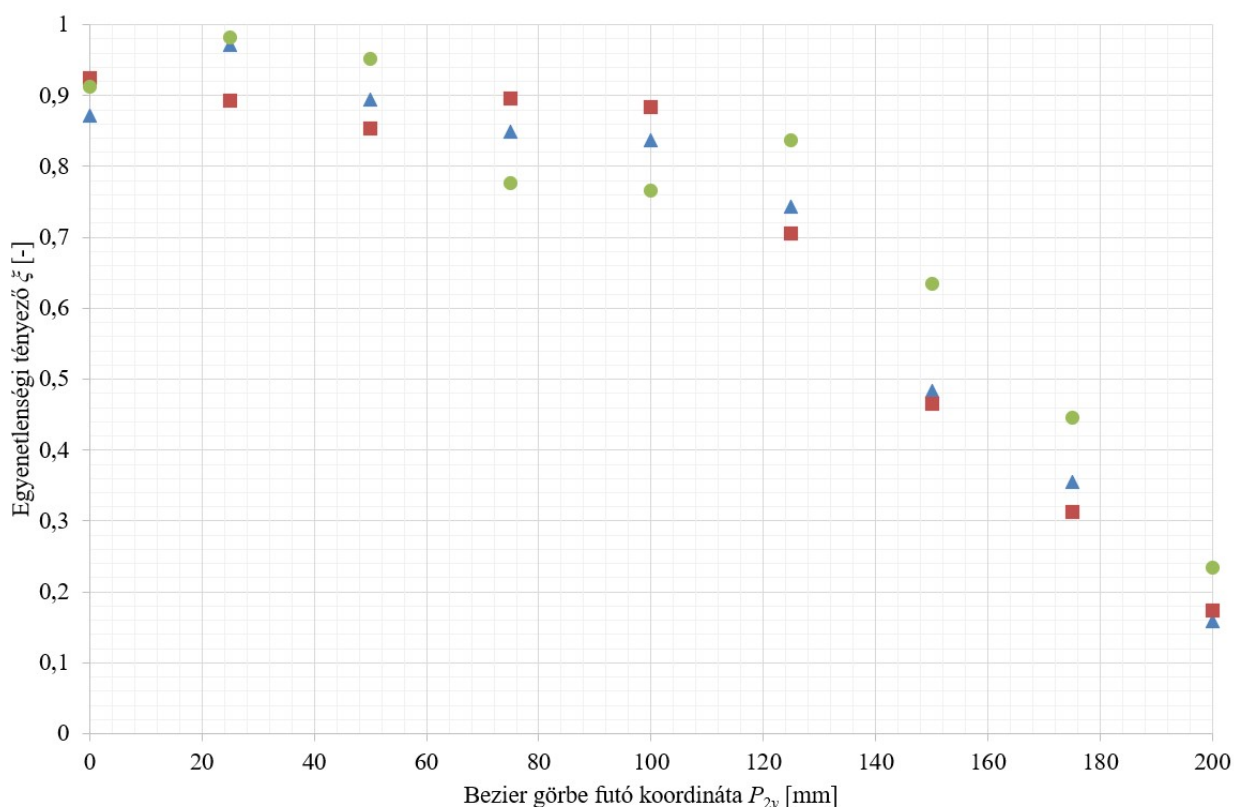
4.25. ábra: Az áramlás egyenetlenség eltérés egyenes és ciklois lamella esetén, a falsúslúdlós függvényében



4.26. ábra: Az áramlás egyenetlenség eltérés egyenes és ciklois lamella esetén, a szemcsék közötti súrlódás függvényében

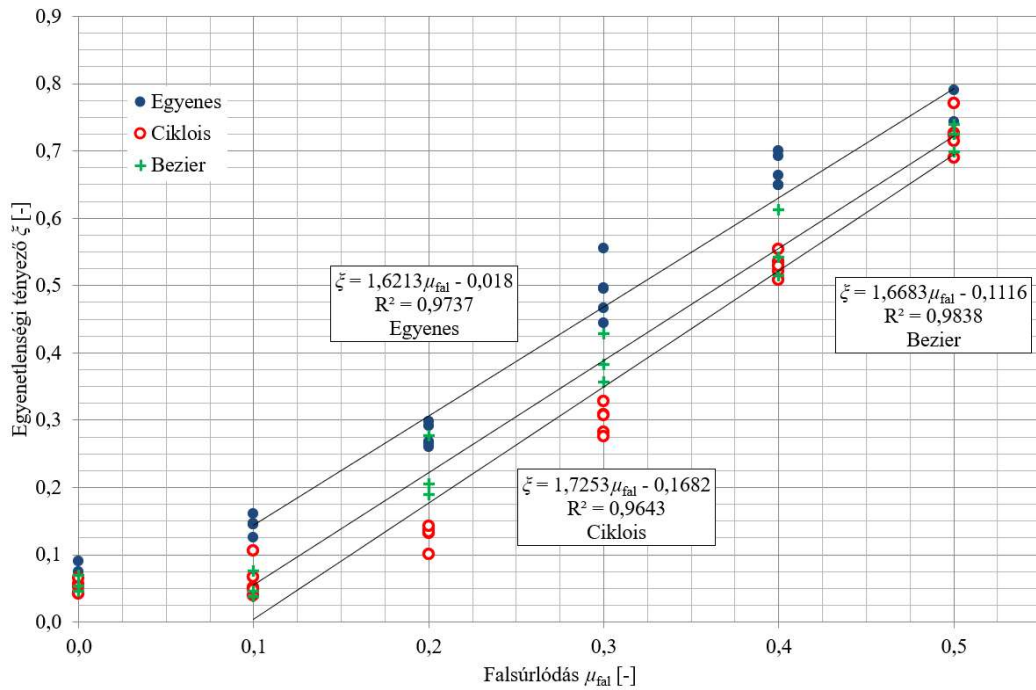
Az eredmények azt sugallják, hogy a ciklois alakú geometria alkalmazása jelentős mértékben javíthatja az anyagáramlás egyenletességét, ami közvetlenül hozzájárulhat a szárítási folyamat minőségének javításához.

Gyártástechnológiai megfontolások alapján arra jutottam, hogy ciklois alakú lamellák alkalmazása helyett célravezető lenne Bézier-görbe alakú lamellákat alkalmazni. Elsőként különböző, az eredeti egyenes lamellához illeszthető Bézier görbék közül kiválasztottam azt, amelyik a legjobb egyenletlenségi tényezőjű (4.27. ábra)

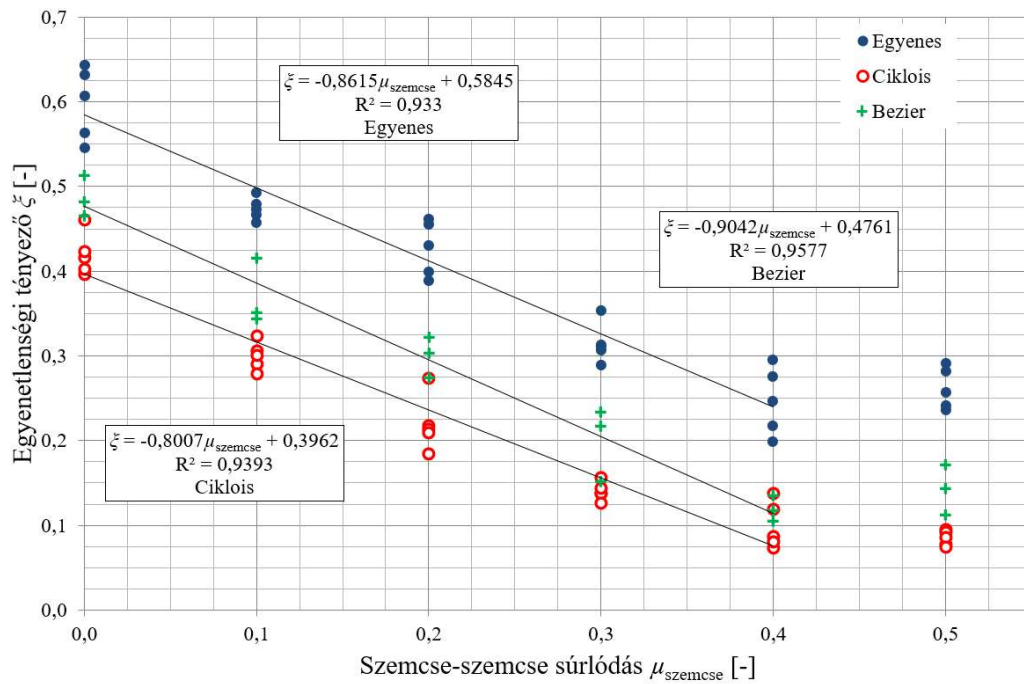


4.27. ábra: Egyenletlenségi tényező változása P_{2y} függvényében

A 4.27. ábrán látható P_{2y} értékek közül kiválasztva a legjobb egyenletlenségi tényezőt adó értéket (a Bézier görbe annál jobban hozzásimult az eredeti ciklois lamellához, minél nagyobb értéket választottam P_{2y} -ra.) ($P_{2y} = 200\text{mm}$) megvizsgáltam, hogy az új lamella geometria áramlási egyenletlenségre gyakorolt hatása hogyan függ a szemcse-fal (4.28. ábra) és a szemcse-szemcse (4.29. ábra) súrlódási tényező értékétől.



4.28. ábra: Egyenetlenségi tényező változása a szemcse-fal súrlódási tényező függvényében



4.29. ábra: Egyenetlenségi tényező változása a szemcse-szemcse súrlódási tényező függvényében

A 4.28 és 4.29-es ábrák alapján azt a következtetést vonhattam le, hogy Bézier görbe alakú lamella alkalmazásával is jelentős javulás érhető el az áramlás egyenetlenség és így a szárított végtermék homogenitás tekintetében. Amennyiben a Bézier görbe jól illeszkedik a ciklois lamellához, az áramlás egyenetlenség értékek is a lamellához közeli eredményeket adnak.

Új tudományos eredmények

1. *Klasszikus nyírókísérlet, mint DEM kalibrálási eljárás.* A klasszikus nyírókísérlet diszkrét elemes modelljét létrehozva matematikai összefüggések segítségével megadtam a szemcsehalmazok makromechanikai viselkedését meghatározó jellemzők (c látszólagos kohézió és a φ belső súrlódási szög) értékeinek mikromechanikai paraméterektől való függését. Kimutattam, hogy melyek azok a mikromechanikai paraméterek, amelyekre a nyírókísérlet leginkább érzékeny. Ezen új tudományos eredmények felhasználása rövidebb idő alatt vezethet sikeres kalibrációhoz, a kalibrálási folyamat idő- és erőforrás igénye így lecsökkenthető.
2. *Torziós nyírókísérlet mint DEM kalibrálási eljárás.* Kidolgoztam egy olyan kalibrációs eljárást, amely lehetővé teszi a szemcsehalmazok (főleg talaj) mechanikai tulajdonságának helyszíni meghatározását, majd ennek a vizsgálatnak az eredményei alapján a kalibrálás elvégzését. Meghatároztam a makroviselkedés mikromechanikai paraméterektől való függésének matematikai alakját is, lehetővé téve a kalibrálási eljárás idő- és erőforrás igényének csökkentését.
3. *Rezgő talajművelő szerszám és talaj kölcsönhatásának modellezése.* Igazoltam, hogy a talajművelő szerszámok szabad rezgéseinek lehetővé tétele bizonyos esetekben csökkenti a talajművelési eljárás vonóerő igényét. Kimutattam, hogy a szerszámcsúcs sebesség és haladási sebesség hányadosának (sebességtényező) növelése vonóerőigény csökkenésre vezet, a vonóerőigény csökkenés pedig függetlennek mutatkozik a szerszám alakjától.
4. *Galton deszka, mint statikus keverő.* Kimutattam, hogy a Galton deszkához hasonló felépítésű ütközéses alapon működő, mozgó alkatrészt nem tartalmazó készülékek alkalmasak nem kohézív szemcsehalmazok (például szemesterményhalmazok) keverésére. Matematikai összefüggések felírásával meghatároztam a keverés hatékonyságának függését a készülék geometriai felépítésétől, lehetőséget adva ezzel a működési hatékonyság növelésére, a keverési művelet energiaigényének csökkentésére.
5. *Optimális lamella geometria.* Megmutattam, hogy a szárítóberendezésekben az alul- vagy túlszárítás csökkentése érdekében elméletileg ciklois alakú lamellát célszerű alkalmazni. Gyártástechnológiai megfontolásokat is figyelembe véve kimutattam, hogy megfelelően kialakított Bézier görbe alakú lamella geometriák felhasználásával is elérhető az egyenes lamelláénál sokkal jobb anyagáramlási egyenletesség. Az új típusú lamella geometria felhasználása csökkenti a szárítás egyenetlenségét, ezáltal javítja a végtermék minőségét, csökkenti a szárítás energiaszükségletét.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Az elmúlt húsz év során elért kutatási eredmények és a számítástechnika fejlődése lehetővé tette azt, hogy a DEM alkalmassá váljon konkrét műszaki tervezési feladatok megoldására. A diszkrét elemek módszerének mezőgépészetben történő alkalmazása még éppen csak elkezdődött. A szemcsehalmozokkal kölcsönhatásba lépő gépelemek tervezése során egyre több esetben kerül szóba a DEM felhasználásának lehetősége.

A DEM alapú technológiákra alapozott tervezés lehetővé teszi a gyakorló mérnökök számára azt, hogy a szemcsehalmoz egyes szemcséinek szintjén megismerjék a kezelő eszközök, anyagmozgató berendezések és tároló berendezések szemcsehalmozokkal való kölcsönhatását. Ezen ismeretek birtokában lehetőség nyílik az adott folyamat energiaigényének, a szerszámok, gépek kopásának csökkentésére, élettartamuk, működési pontosságuk növelésére.

Különösen fontos eredmény lehet az előállított vagy megtermelt végtermék minőségének jelentős javulása, hiszen ismerve a kölcsönhatásokat az egyes szemestermények, magvak, gyümölcsök sérülésének esélye igen jelentős mértékben lecsökkenthető. A talaj pedig az egyik legfontosabb nemzeti kincsünk, amely hatékony felhasználása nélkül nem érhető el XXI. századi színvonalú mezőgazdasági termelés. A szerszám-talaj, vagy általánosságban szerszám - szemcsés anyag kölcsönhatás pontosabb megismerése pedig nemcsak a hatékonyabb talajművelő szerszámok létrehozását teszi lehetővé, hanem a talajművelésre felhasznált üzemanyag mennyiségének csökkentésével a mezőgazdasági munkák környezetterhelését is csökkenti.

A nemzetközi viszonylatban is új mezőgépészeti, illetve gépészeti területen megszerzett modellezési ismeretek pedig az ipar minden olyan területén felhasználhatóak, ahol valamely szemcsehalmoz mechanikai viselkedését kell modellezni.

Dolgozatomban megmutattam, hogy a számítástechnika mai fejlettségi szintje mellett már érdemes diszkrét elemes módszert alkalmazni konkrét mezőgépészeti tervezési feladatok megoldására. Az általam kifejlesztett és itt bemutatott módszerek használata lehetőséget nyújt a tervezési munka idő- és erőforrás igényének csökkentésére, a kifejlesztésre kerülő új, optimálishoz közelebb álló működési paraméterekkel bíró gépek, gépalkatrészek felhasználása a mezőgépészetben lehetővé teszi a végtermék minőségromlásának minimalizálását, az energiafelhasználás, a mezőgazdasági termeléssel együtt járó környezetterhelés csökkentését.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásaim célja a szemcsehalmozokat az egyes szemcsék mozgása és a köztük lezajló kölcsönhatások szintjén modellező diszkrét elemes módszer (DEM) mezőgépeszeti feladatok hatékony megoldására alkalmassá tétele elsősorban a DEM alkalmazásával kapcsolatos műszaki bizonytalanságok feloldásával.

1. A diszkrét elemes módszer alkalmazásával kapcsolatos egyik legnagyobb nehézséget a mechanikai kölcsönhatásokat vezérlő mikromechanikai paraméterek meghatározása (kalibrálás) jelenti. Ez egy rendkívül számításigényes eljárás, számos kísérleti vizsgálat végrehajtását is megköveteli és általában tovább tart, mint magának a konkrét műszaki problémának a megoldása. Kutatómunkám során megvizsgáltam több különböző kalibrálási eljárást, meghatároztam a kalibrálási eljárások különböző mikromechanikai paraméterekre vonatkozó érzékenységet, ezzel lehetőséget adva kalibrálás felgyorsítására, a mezőgépeszeti gyakorlati problémákkal kapcsolatos modellezési feladatok idő- és számítási erőforrásigényének csökkentésére.
2. Sokszor jelent problémát az, hogy egy anyagmintát el kell szállítanunk valamilyen mérés helyszínére. Különösen igaz a talajmintákra az, hogy bolygatásuk után azok mechanikai jellemzői jelentős mértékben eltérnek az eredeti helyszínen mérhetőtől. Kísérleti vizsgálatokat és numerikus modellezési módszereket használva kidolgoztam egy olyan kalibrációs eljárást, amely a talajminták mechanikai tulajdonságainak helyszínen mért értékét használja fel a mikromechanikai jellemzők meghatározására, elkerülve így a bolygatás okozta problémákat. Ennek az eljárásnak is megvizsgáltam a mikromechanikai paraméterekre való érzékenységet, lehetővé téve a kalibrációs eljárás felgyorsítását, és ezzel a modellezés idő- és erőforrás igényének lecsökkentését.
3. A talajművelő szerszám és a talaj kölcsönhatása területén, a rezgő talajművelő szerszámokkal kapcsolatban elért eddigi kutatási eredményeket kibővítve kimutattam, hogy a talajművelő szerszámról a talajba továbbterjedő rezgések – bizonyos körülmények között – képesek lehetnek a talaj fellazítására, így módon a vonóerőigény és ezen keresztül a talajművelés energiaigényének csökkentésére. Létrehoztam egy, a gyakorlat számára elfogadható pontossággal működő diszkrét elemes modellt, amely képes a rezgő talajművelő szerszám mozgásához szükséges vonóerőigény előrejelzésére. Ebben az esetben is elemeztem a mikromechanikai jellemzők változtatásának hatását a vonóerő értékére, lehetőséget adva az új típusú talajművelő szerszámok tervezésével kapcsolatos munka hatékonyságának növelésére, az idő- és erőforrásigényes szántóföldi mérések számának csökkentésére. Talajművelő szerszám – talaj kölcsönhatással kapcsolatos

eredményeimből kiindulva lehetőség nyílhat olyan új típusú szerszámok, szerszám felfüggesztések kifejlesztésére, melyek segítségével a talajművelés erőforrásigénye, költsége, környezetszennyező hatása csökkenthető.

4. Szemestermények tárolása, különféle élelmiszerek és takarmányok előállítása során fontos feladat a szemcsehalmazok optimális mértékű keveredésével kapcsolatos műszaki feladatok hatékony megoldása. A keverési folyamat modellezésével kapcsolatos kutatási eredményeim lehetőséget adnak a műszaki gyakorlat számára a folyamat pontosabb modellezésére, ennek segítségével pedig az optimális keverés műszaki paramétereinek meghatározására. A keverés energiaigényének csökkentése és hatékonyságának növelése érdekében kimutattam, hogy bizonyos szemcsehalmazokat mozgó alkatrész nélküli, statikus keverőberendezésekkel is hatékonyan össze lehet keverni. Megvizsgáltam a Galton deszka elvén működő statikus keverőberendezések keverési hatékonyságának a kérdéskörét, lehetőséget adva konkrét keverőberendezések tervezéséhez szükséges konstrukciós és működési paraméterek előzetes becslésére, a keverési folyamat modellezésére.
5. A betakarított szemestermények víztartalmának csökkentése (szárítása) elengedhetetlenül fontos része azok további feldolgozásra vagy tárolásra való előkészítésének. A mesterséges szárítás igen magas energiaigénye és esetenként környezetkárosító hatása miatt igyekeznünk kell a szárítás feladatát a lehető legnagyobb hatékonysággal elvégezni. Kutatásaim eredményeként ezt a hatékonyságnövelést tudtam elérni gravitációs rendszerű keresztáramú szárítóberendezésben lejátszódó anyagáramlási folyamatok modellezésével, a szárítóberendezés konstrukciójának módosításával. Kimutattam, hogy milyen mechanikai jelenség okozza a termények alul- vagy túlszáritásából eredő minőségromlást, anyagi veszteséget. Megmutattam, hogy milyen konstrukciós módosítással lehet minimalizálni ezt a minőségromlást. Az elméleti megfontolások eredményeként kapott konstrukciót pedig gyártástechnológiai megfontolások alapján tovább módosítva kidolgoztam egy könnyen legyártható lamella geometriát, amely jelentősen csökkenti a szárítóbeli magmozgás egyenetlenségét, javítva a végtermék minőségét.

7. SUMMARY

The primary objective of agricultural and biosystems engineering is the design of interactions between living materials and the machines that process or move them. Most raw materials and end products in agricultural production can be modelled as granular materials from a mechanical behaviour perspective. Consequently, many technological processes in agricultural machinery can be understood as interactions between granular assemblies and bodies in contact with or moving through them. The technical design of agricultural production processes often faces significant challenges in accurately interpreting and modelling phenomena at the boundary interfaces between granular assemblies and interacting objects. These boundary phenomena greatly influence the energy requirements of the process, wear and lifespan of tools and machines, operational precision, and, most importantly, the quality of the resulting end product. Understanding the mechanical behaviour of granular assemblies is therefore directly linked to improving the efficiency of production processes. However, this unique behaviour – which cannot be fully described as either fluids or solids – presents substantial difficulties for professionals involved in their design and analysis.

This research aims to enhance the applicability of the discrete element method (DEM), which models granular assemblies at the level of individual particles and their interactions, for solving agricultural and biosystems engineering problems. A key focus is addressing technical uncertainties associated with the application of DEM.

1. *Calibration of Micromechanical Parameters.* One of the main challenges in using DEM is the determination (calibration) of micromechanical parameters governing mechanical interactions. This process is computationally intensive, often requiring extensive experimental investigations and taking more time than solving the actual technical problem. This research evaluated various calibration methods, identifying their sensitivity to different micromechanical parameters. These findings enable faster calibration, reducing the time and computational resources needed for modelling tasks in agricultural machinery engineering.
2. *On-Site Calibration method:* Transporting material samples to measurement sites often alters their mechanical properties, particularly for soil samples, which differ significantly after disturbance. Using experimental investigations and numerical modelling, a calibration method was developed that employs on-site measurements of soil mechanical properties to determine micromechanical parameters. This approach avoids issues caused by sample disturbance and facilitates faster calibration, thereby reducing the time and resource demands of modelling.

3. *Soil-tool interactions.* Extending research on vibrating tillage tools, it was demonstrated that vibrations propagating from the tool into the soil can, under certain conditions, loosen the soil. This reduces draft force requirements and the energy demand for tillage. A DEM-based model was developed to predict draft force with practical accuracy. The effects of altering micromechanical parameters on draft force were analysed, providing insights for designing new types of tillage tools. These advancements enable more efficient design processes, minimizing the need for labour-intensive field measurements. The results also open possibilities for designing innovative tools and suspensions that reduce tillage resource demands, costs, and environmental impacts.
4. *Static mixers.* Efficient mixing of granular assemblies is crucial in storage, food production, and feed manufacturing. Research findings offer improved modelling accuracy for mixing processes, facilitating the determination of optimal mixing parameters. It was shown that certain granular assemblies can be effectively mixed using static mixers without moving components. The efficiency of Galton board-based static mixers was analysed, providing guidance for designing mixers with precise operational parameters, enabling accurate modelling and optimization of mixing processes.
5. *Improving drying efficiency.* Reducing the moisture content of harvested grains is essential for subsequent processing or storage. Artificial drying is energy-intensive and can have environmental consequences, necessitating efficiency improvements. This research enhanced drying efficiency by modelling material flow in gravity-driven cross-flow dryers and modifying their design. The study identified mechanical phenomena causing over- or under-drying, leading to quality degradation and material losses. Design modifications to minimize these issues were proposed, culminating in an easily manufacturable lamella geometry. This innovation significantly reduces uneven material flow in dryers, improving final product quality.

Through these contributions, this work advances the use of DEM in agricultural machinery engineering, offering practical solutions for process optimization, resource efficiency, and quality improvement.

M1. Irodalomjegyzék

1. ANAND, A., CURTIS, J.S., WASSGREN, C.R., HANCOCK, B.C., KETTERHAGEN, W.R. (2008): Predicting discharge dynamics from a rectangular hopper using discrete element method (DEM), *Chemical Engineering Science*, 24, 5821-5830 p.
2. ARTONI, R., ZUGLIANO, A., PRIMAVERA, A., CANU, P., SANTOMASO, A. (2011): Simulation of dense granular flows: Comparison with experiments, *Chemical Engineering science*, 66, 548-557 p.
3. ASAF, Z., RUBINSTEIN, D. AND SHMULEVICH, I. (2007), Determination of discrete element model parameters required for soil tillage, *Soil & Tillage Research*, Vol. 92 Nos 1-2, pp. 227-242.
4. AYUGA, F., GUAITA, M., AGUADO, P. (2001): Static and Dynamic Silo Loads using Finite Element Models, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78 (3), 299-308 p.
5. AUNI ASLAH, MAT DAUD (2014): Mathematical modelling and symbolic dynamics analysis of three new Galton board models, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Volume 19, Issue 10, Pages 3476-3491,
6. BABLENA, A., SCHREMPF, N., KEPPLER, I. (2021): The effect of particle shape on the angle of repose test based calibration of discrete element models. *Hungarian Agricultural Engineering*, 40 39-46. p.
7. BAGI, K. (2007): A diszkrét elemek módszere, *BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék*, Budapest, 73 p.
8. BAKER, C.G.J. (1997): *Industrial Drying of Foods*, Springer US, 978-0-7514-0384-8
9. BANDALAN, E.P., SALOKHE, V.M., GUPTA, C.P. AND NIYAMAPA, T. (1999), Performance of an oscillating subsoiler in breaking a hardpan, *Journal of Terramechanics*, Vol. 36 No. 2, pp. 117-125.
10. BARSUK, A.A., PALADI, F. (2023): On parametric representation of brachistochrone problem with Coulomb friction. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 148,
11. BEKE J. (1997): Terményszárítás, *Agroinform*, Budapest, 419 p.
12. BERNOULLI, J. (1696): Problema novum ad cujus solutionem Mathematici invitatur. *Acta Eruditorum*, 18, 269 p.
13. BAUER, E., DE SOUSA, J.G.G., GUIMARÃES, E.A., SILVA, F.G.S., (2007): Study of the laboratory Vane test on mortars. *Build. Environ.* 42, 86–92.
14. C.J. COETZEE, D.N.J. ELS (2009): Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. *Computers and Electronics in AgR.*, 65. pp. 198–212.
15. C.J. COETZEE (2017), Review: Calibration of the discrete element method, *Powder Technology*, Volume 310, pp. 104-142,
16. C.J. COETZEE, D.N.J. ELS (2009): Calibration of discrete element parameters and the modelling of silo discharge and bucket filling. *Computers and Electronics in AgR.*, 65. pp. 198–212.
17. COETZEE, C.J. (2020): Calibration of the discrete element method: Strategies for spherical and non-spherical particles. *Powder Technology*, 364, 851-878. p.
18. COETZEE, C.J., NEL, R.G. (2014): Calibration of discrete element properties and the modeling of packed rock beds. *Powder Technology*, 264, 332-342. p.
19. ČOVIĆ, V., VESKOVIĆ, M. (2008): Brachistochrone on a surface with Coulomb friction. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 40, 437-450 P.

20. CUNDALL, P.A. AND STRACK, O.D.L. (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, Vol. 29 No. 1, pp. 47-65.
21. DEM SOLUTIONS (2012), *EDEM User's Guide*, Dem Solutions, Edinburgh.
22. EDWARD L. PAUL, VICTOR A. TIEMO-OBENG, SUZANNE M. KRESTA (2004): *Handbook of industrial mixing*. Wiley Interscience.
23. ENSTAD, G. (1975): On the theory of arching in mass flow hoppers, *Chemical Engineering Science*, 30, 1273-1283 p.
24. FENYVESI, L. (2009), *Interaction Between Vibrating Soil Tillage Tool and Draught Force Mechanical Engineering Letters*, Vol. 1, Szent István University, Budapest, Gödöllő, pp. 188-199.
25. GINER, S.A., BRUCE, D.M., MORTIMORE, S. (1998): Two-Dimensional Simulation Model of Steady-state Mixed-flow Grain Drying. Part 1: The Model, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71 (1), 37-50 p.
26. GINER, S.A., BRUCE, D.M. (1998): Two-Dimensional Simulation Model of Steady-state Mixed-flow Grain Drying. Part 2: Experimental Validation, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71 (1), 51-66 p.
27. GODWIN, R.J. (2007), "A review of the effect of implement geometry on soil failure and implement forces", *Soil & Tillage Research*, Vol. 97 No. 2, pp. 331-340.
28. GODWIN, R.J. AND O'DOHERTY, M.J. (2007), "Integrated soil tillage force prediction models", *Journal of Terramechanics*, Vol. 44 No. 1, pp. 3-14.
29. GOLSHAN, S., ESGANDARI, B., ZARGHAMI, R., BLAIS, B., SALEH, K. (2020): Experimental and DEM studies of velocity profiles and residence time distribution of non-spherical particles in silos. *Powder Technology*, 373, 510-521. p.
30. GONZÁLEZ-MONTELLANO, C., RAMÍREZ, Á., GALLEGU, E. AYUGA, F. (2011): Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science*, 66 (21), 5116-5126. p.
31. GONZALEZ-MONTANELLO, C., RAMÍREZ, A., FUENTES, J.M., AYUGA, F. (2012): Numerical effects derived from en masse filling of agricultural silos in DEM simulations, *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 113-123 p.
32. FILIPP GÖBEL, SHAHAB GOLSHAN, HAMID REZA NOROUZI, REZA ZARGHAMI, NAVID MOSTOUFI (2019), Simulation of granular mixing in a static mixer by the discrete element method, *Powder Technology*, Volume 346, Pages 171-179.
33. GRIMA, A.P. AND WYPYCH, P.W. (2011a), Development and validation of calibration methods for discrete element modelling, *Granular Matter*, Vol. 13 No. 2, pp. 127-132.
34. GRIMA, A.P. AND WYPYCH, P.W. (2011c), Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle – structure interactions under impact conditions, *Powder Technology*, Vol. 212 No. 1, pp. 198-209.
35. HAYEN, J.C. (2005): Brachistochrone with Coulomb friction. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 40, 1057-1075 p.
36. HE, C., YOU, Y., WANG, D., WU, H., (2018): Estimating soil failure due to torsion via vane shear test by varying vane diameter and soil properties. *Soil Till. Res.* 177, 68–78.
37. HERTZ H. (1882) On the contact of elastic solids. *Journal fur die Reine und Angewandte Mathematik*, 1882(92): p. 156-171.
38. HORABIK, J., WIACEK, J., PARAFINIUK, P., BANDA, M., KOBYLKA, R., STASIAK, M., MOLENDU, M., (2020), Calibration of discrete-element-method model parameters of bulk wheat for storage. *Biosyst. Eng.* 200, 298–314.

39. HORABIK, J., PARAFINIUK, P., MOLEND, M. (2016): Experiments and discrete element method simulations of distribution of static load of grain bedding at bottom of shallow model silo, *Biosystems Engineering*, 149, 60-71 p.
40. ICHME, EFCE (1989), Standard Shear Testing Technique for Particulate Solids Using the Jenike Shear Cell (SST), Rugby, Warwickshire.
41. JANSSEN, H.A. (1895): Versuche über Getreidedruck in Silozellen. *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, 39 (35), 1045-1049. p.
42. JAYASURIYA, H.P.W. AND SALOKHE, V.M. (2001), A review of soil-tine models for a range of soil conditions, *J. agric. Engng Res.*, Vol. 79 No. 1, pp. 1-13.
43. JENIKE, A.W. (1964a): Steady Gravity Flow of Frictional–Cohesive Solids in Converging Channels. *Journal of Applied Mechanics*, 31 (1), 5-11. p.
44. JENIKE, A.W. (1964b): Storage and flow of solids, Bulletin No. 123, Utah Engineering Experiment Station, University of Utah, Salt Lake City, UT.
45. A. JENSEN, K. FRASER, G. LAIRD, (2014) Improving the Precision of Discrete Element Simulations through Calibration, 13th Int. LS-DYNA Users Conf. pp. 1–12.
46. JUNHAO HUANG, SAFRANYIK FERENC, TÓTH JÁNOS, KEPLER ISTVÁN (2024): Shear Test as Calibration Experiment for DEM Simulations: Spheropolygonal Particle Model FME TRANSACTIONS (1451-2092 2406-128X): 52 4 pp 659-670
47. KEPLER, I. (2009): Arching in silos, a new model. *Bulletin of SZIE*, 331-342 p.
48. KEPLER, I., KOCSIS, L., OLDAL, I., FARKAS, I., CSATÁR, A. (2012): Grain velocity distribution in a mixed flow dryer. *Adv. Powder Technology*, 23, 824-832. p.
49. KEPLER, I., SAFRANYIK, F., OLDAL, I. (2016): Shear test as calibration experiment for DEM simulations: a sensitivity study. *Engineering Computations*, 33 (3), 742-758. p.
50. KEPLER, I., BABLENA, A., SALMAN, N.D., KISS, P. (2022): Discrete element model calibration based on in situ measurements. *Engineering Computations*, 39 (5), 1947-1961. p.
51. KEPLER, I., BABLENA, A. (2024): Optimal lamella geometry for mixed flow dryers. *Archive of Applied Mechanics*, 94 (4), 961-972. p.
52. KHATCHATOURIAN, O.A., VIELMO, H.A., BORTOLAIA, L.A. (2013): Modelling and simulation of cross flow grain dryers. *Biosystems Engineering*, 116, 335-345 p.
53. KHATCHATOURIAN, O.A., BINELO, M.O., LIMA, R.F. (2014): Simulation of soya bean flow in mixed-flow dryers using DEM, *Biosystems Engineering*, 123, 68-76. p.
54. KOCSIS, L., TEODOROV, T., MELLMANN, J., GOTTSCHALK, K., MÉSZÁROS, Cs., FARKAS, I. (2008): Analysis of grain mass flow experiments in a mixed flow dryer, *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, Szöul, Dél-Korea, 2008. július 6-11., 1608-1612 p.
55. KOZICKI, J. AND DONZÉ, F.V. (2009), Yade-open DEM: an open-source software using a discrete element method to simulate granular material, *Engineering Computations*, Vol. 26 No. 7, pp. 786-805.
56. KRUGGEL-EMDEN, H., RICKELT, S., WIRTZ, S., SCHERER, V. (2009): A Numerical Study on the Sensitivity of the Discrete Element Method for Hopper Discharge, *Journal of Pressure Vessel Technology*, 131 (3), 031211
57. KUHN, M.R., BAGI, K. (2009): Specimen Size Effect in Discrete Element Simulations of Granular Assemblies, *Journal of Engineering Mechanics*, 135 (6), 485–492 p.
58. LACEY, P. M. (1954). Developments in the Theory of Particle Mixing. *Journal of Applied Chemistry*, 4; 257-268.
59. LEIBNITZ, G.W. (1697): *Acta Eruditorum*, 19, 201-205 p.

60. LU, G., THIRD, J.R., MÜLLER, C.R. (2015): Discrete element models for non-spherical particle systems: From theoretical developments to applications. *Chemical Engineering Science*, 127, 425-465 p.
61. M.D. SINNOTT, P.W. CLEARY (2016), The effect of particle shape on mixing in a high shear mixer, *Comput. Part. Mech.* 3 (4) 477–504.
62. M. MARIGO, E.H. STITT (2015), Discrete Element Method (DEM) for industrial applications: comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets, *Kona Powder Part. J.* 32 236–252.
63. MASSON, S., MARTINEZ, J. (2000): Effect of particle mechanical properties on silo flow and stresses from distinct element simulations, *Powd. Techn.*, 109 (1-3), 164-178 p.
64. MELLMAN, J., TEODOROV, T. (2011): Solids transport in mixed-flow dryers. *Powder Technology*, 205, 117-125. p.
65. MELLMANN, J., IROBA, K.L., METZGER, T., TSOTSAS, E., MÉSZÁROS, Cs., FARKAS, I. (2011): Moisture content and residence time distributions in mixed-flow grain dryers. *Biosystems Engineering*, 109, 297-307. p.
66. MINDLIN R.D. AND DERESIEWICZ H. (1953) Elastic Spheres in Contact under Varying Oblique Force. *ASME, Journal of Applied Mechanics*, 20: p. 327-344.
67. MING, M.J., MEACHHUM, L. AND ROWELL, J.D. (1995), Effect of particle shape on the strength and deformation mechanics of ellipse-shaped granular assemblages, *Eng. Computations*, Vol. 12 No. 2, pp. 99-108.
68. MUJUMDAR, A.S., BEKE J. (2002): Gyakorlati szárítás, *Szakt. Kiad.*, Budapest, 247 p.
69. NEWTON, I. (1697): *Philosophical Transactions*, 19, 424-425 p.
70. NIYAMAPA, T. AND SALOKHE, V.M. (2000), “Force and pressure distribution under vibratory tillage tool”, *Journal of Terramechanics*, Vol. 37 No. 3, pp. 139-150.
71. OBERMAYR, M., DRESSLER, K., VRETTOS, C. AND EBERHARD, P. (2011), “Prediction of draft forces in cohesionless soil with the discrete element method”, *Journal of Terramechanics*, Vol. 48 No. 5, pp. 347-358.
72. M. OBERMAYR, C. VRETTOS, P. EBERHARD, T. DÄUWEL (2014), A discrete element model and its experimental validation for the prediction of draft forces in cohesive soil, *J. Terramech.* 53 93–104
73. ONWUALU, A.P. AND WATTS, K.C. (1998), Draught and vertical forces obtained from dynamic soil cutting by plane tillage tools, *Soil & Tillage Research*, Vol. 48 No. 4, pp. 239-253.
74. OLDAL, I., KEPPLER, I., CSIZMADIA, B., FENYVESI, L. (2012): Outflow properties of silos: The effect of arching. *Advanced Powder Technology*, 23, 290-297. p.
75. OLDAL, I., SAFRANYIK, F. (2015): Extension of silo discharge model based on discrete element method. *Journal of Mech. Sc. and Techn.*, 29 (9), 3789-3796. p.
76. OLDAL, I., SAFRANYIK, F., KEPPLER, I. (2017): Reducing computational time of cohesionless discrete simulations based on part. clusters, *Eng. Comp.*, 34 (2), 648-663 p.
77. OQUENDO, W.F., MUÑOZA, J.D. AND LIZCANO, A. (2011), Influence of rotations on the critical state of soil mech., *Comp. Phys. Comm.*, Vol. 182 No. 9, pp. 1860-1865.
78. PESCH H. J. (2012): The Princess and Infinite-Dimensional Optimization Documenta Mathematica Extra Volume ISMP 345–356 p.
79. P. GRIMA, P. W. WYPYCH (2011): Discrete element simulations of granular pile formation: Method for calibrating DEM models, *Eng. Comp.*, 28(3). pp. 314-339.
80. RISTOW, G.H. (1997): Outflow rate and wall stress for two-dimensional hoppers, *Physica A*, 235, 319-326 p.

81. ROBERTS, A.W. AND SCOTT, O.J. (1978), An investigation into the effects of sinusoidal and random vibrations on the strength and flow properties of bulk solids, *Powder Technology*, Vol. 21 No. 137, pp. 45-53.
82. RUMSEY, T.R., ROVEDO, C.O. (2001): Two-dimensional simulation model for dynamic cross-flow rice drying, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 40 (4), 355-362 p.
83. B. SAINT-CYR, E. AZEMA, J.-Y. DELENNE, F. RADJAI, P. SORNAY (2011), Effect of particle shape non-convexity on the rheology of granular media : 3D contact dynamics simulations, II Int. Conf. Part. based Methods - Fundam. Appl. 1–8.
84. SHIH-HAO CHOU, YUE-LOU SONG AND SHU-SAN HSIAU (2017): A Study of the Mixing Index in Solid Particles KONA Powder and Particle Journal No. 34 275–281
85. SIMONS, T.A.H., WEILER, R., STREGE, S., BENSMANN, S., SCHILLING, M. KWADE, A. (2015): A ring shear tester as calibration experiment for DEM simulations in agitated mixers – a sensitivity study. *Procedia Engineering*, 102 (1), 741-748. p.
86. ŠMILAUER, V. AND CHAREYRE, B. (2010), Yade dem formulation. In Yade documentation, in Šmilauer, V. (Ed.), *The Yade Project*, 1st ed.
87. SUMBATOV, A.S. (2017): Brachistochrone with Coulomb friction as the solution of an isoperimetrical variational problem. *Int. J. of Non-Linear Mechanics*, 88, 135-141 p.
88. TALAFHA, M., OLDAL, I. (2022): The Effect of Triple Particle Sizes on the Mechanical Behaviour of Granular Materials using Discrete Element Method (DEM), *FME Transactions*, 50 (1), 139-148 p.
89. TALAFHA, M., OLDAL, I., GARNEOUI, S. (2022): Study the particle size impact on the mechanical behaviour of granular material by discrete element method, *FME Transactions*, 50 (3), 473-483 p.
90. TAO, H., JIN, B., ZHONG, W., WANG, X., REN, B., ZHANG, Y., XIAO, R. (2010): Discrete element method modeling of non-spherical granular flow in rectangular hopper. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 49, 151-158. p.
91. TARDOS, G.I. (1997): A fluid mechanistic approach to slow, frictional flow of powders, *Powder Technology*, 92, 61-74 p.
92. TAYLOR, J.R. (2005): *Classical Mechanics*. University Science Books, Colorado, 786 p.
93. VAN DER LINDE, J. (2007), Discrete element modeling of a vibratory subsoiler:, MSc thesis, University of Stellenbosch, Stellenbosch.
94. VANEL, L., CLAUDIN, Ph., BOUCHAUD, J.-Ph., CATES, M.E., CLÉMENT, E., WITTMER, J.P. (2000): Stresses in Silos: Comparison Between Theoretical Models and New Experiments, *Physical Review Letters*, 84 (7), 1439-1442 p.
95. WEIGLER, F., MELLMANN, J. (2014): Investigation of grain mass flow in a mixed flow dryer. *Particuology*, 12, 33-39. p.
96. WENSRICH, C.M.: Evolutionary solutions to the brachistochrone problem with Coulomb friction. *Mechanics Research Communications*, 31, 151-159 p.
97. YANG, S.C., HSIAU, S.S. (2001): The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts, *Powder Technology*, 120 (3), 244-255 p.
98. ZHOU, B., HUANG, R., WANG, H., WANG, J. (2013): DEM investigation of particle anti-rotation effects on the micromechanical response of granular materials. *Granular Matter*, 15 (3), 315-326 p.
99. YOW, J. AND SMITH, J.L. (1976), Sinusoidal vibratory tillage, *Journal of Terramechanics*, Vol. 13 No. 4, pp. 211-226.

100. Zhang D. and Whiten W.J. (1996) The calculation of contact forces between particles using spring and damping models. *Powder Technology*, 88(1): p. 59-64.
101. WEINHART, OREFICE, POST, VAN SCHROJENSTEIN LANTMAN, DENISSEN, TUNUGUNTLA, TSANG, CHENG, SHAHEEN, SHI, RAPINO, GRANNONIO, LOSACCO, BARBOSA, JING, ALVAREZ NARANJO, ROY, DEN OTTER, THORNTON (2019). Fast, flexible particle simulations — An introduction to MercuryDPM. *Computer Physics Communications* 107129.
102. C.M. WENSRICH, A. KATTERFELD (2012), Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM, *Powder Technol.* 217 409–417.

M2. Az értekezés témaköréhez tartozó fontosabb saját publikációk

1. KEPPLER, I., BABLENA, A. (2024): Optimal lamella geometry for mixed flow dryers. *Archive of Applied Mechanics*, 94 (4) 961-972. p.
2. KEPPLER, I. (2024): Bézier curve shaped lamellae in cross flow dryers. *Hungarian Agricultural Engineering*. 43/2024 65-73. p.
3. ISTVÁN KEPPLER, GÁBOR BÉRCESI, JÁNOS TÓTH (2025): Galton board as colliding static mixer, *Journal of Engineering Mechanics* (bírálat alatt)
4. JUNHAO HUANG, SAFRANYIK FERENC, TÓTH JÁNOS, KEPPLER ISTVÁN Shear Test as Calibration Experiment for DEM Simulations: Spheropolygonal Particle Model *Fme Transactions* (1451-2092 2406-128X): 52 4 pp 659-670 (2024)
5. KEPPLER ISTVÁN; BABLENA ADRIENN (2004) Optimal material flow channels of cross flow dryers, *Hungarian Agricultural Engineering* (0864-7410 2415-9751): 43 pp 26-36
6. KEPPLER, I., BABLENA, A., DAWOOD SALMAN, N., KISS, P. (2022): Discrete element model calibration based on in situ measurements. *Engineering Computations*, 39 (5), 1947-1961. p.
7. KEPPLER I., SAFRANYIK F., OLDAL I. (2015): Shear test as calibration experiment for DEM simulations: a sensitivity study, *Engineering Computations*, Volume 33, Issue 3, pp. 742 – 758, 2016
8. KEPPLER I., HUDOBA Z., OLDAL I., CSATAR A., FENYVESI L. (2014): Discrete element modeling of vibrating tillage tools, *Engineering Computations*, Volume 32, Issue 2, Pages 308-328. 2015.
9. ISTVAN KEPPLER, LASZLO KOCSIS, ISTVAN OLDAL, ISTVAN FARKAS, ATTILA CSATAR, Grain velocity distribution in a mixed flow dryer, *Advanced Powder Technology* 23 (2012), pp. 824-832,

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a legtöbb esetben nem magányos tevékenység. Különösen igaz ez a műszaki tudományok esetében, ahol egy-egy kísérleti vizsgálat elvégzéséhez szükséges erőforrások biztosítása önmagában sem triviális feladat. A mezőgépészeti problémák esetében a helyszíni mérések szükségessége, az időjárás változékonysága, valamint a termelési folyamatok időszakossága további szervezési nehézségeket okozhat. A modellezési feladatok megoldása is megkövetelhet olyan speciális ismereteket, amivel egy átlagos kutató nem biztos, hogy rendelkezik. A dolgozatomban bemutatott kutatási eredmények sem születtek volna meg nagyon sok kolléga segítségével nélkül. Olyan sok ember önzetlen segítségét kéne ezen a helyen megköszönnöm, hogy arra nincs mód. Egyvalakiről azonban mindenképpen szeretnék itt megemlékezni.

Köszönettel tartozom Csizmadia Béla professzornak, aki nem különösen kiemelkedő egyetemi tanulmányi eredményeim ellenére meglátott bennem valamit, doktorandusza lehettem és megszerettette velem a műszaki mechanikát. Csizmadia professzor szakmai területen (nemcsak másokkal, hanem saját magával szemben is) kérlelhetetlen szigora, emberi kapcsolatok terén pedig szívélyes kedvessége sokak számára élethosszig tartó példakép marad. Megtiszteltetés, hogy én is egy lehetek közülük.