



MEZŐGAZDASÁGI SZEMCSEHALMAZOK
MECHANIKAI VISELKEDÉSÉNEK
MODELLEZÉSE

MTA Doktori értekezés tézisei

Keppler István

Gödöllő

2024

TARTALOM

1. BEVEZETÉS	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	9
Nyíróvizsgálat alapú kalibrálási módszerek.....	9
Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye	15
Statikus keverőberendezések.....	18
Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái	21
3. EREDMÉNYEK	29
Nyírókísérlet alapú kalibrálási módszerek vizsgálata	29
Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye	35
Galton keverő működési hatékonysága.....	38
Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái	41
Új tudományos eredmények.....	47
MELLÉKLETEK	48
M2. Az értekezés témaköréhez tartozó fontosabb saját publikációk	48
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	49

1. BEVEZETÉS

A mezőgépezés 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 mezőgépezésben 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) mezőgépezési 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 mezőgépezési 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 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,

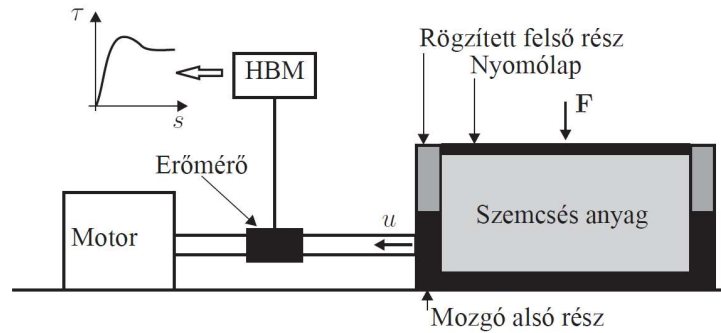
a szárítóberendezés konstrukciójának módosításával. Kimutattam, hogy milyen mechanikai jelenség okozza a termények alul- vagy túlszáritásából eredő minőségromlást, anyagi veszteséget. Megmutattam, hogy milyen konstrukciós módosítással lehet minimalizálni ezt a minőségromlást. Az elméleti megfontolások 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. ANYAG ÉS MÓDSZER

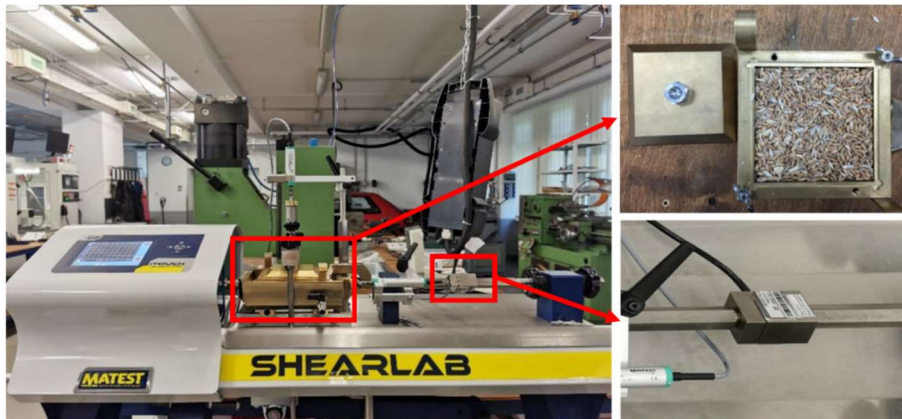
Nyíróvizsgálat alapú kalibrálási módszerek

A klasszikus nyírókísérlet során egy függőleges erővel előtömörített halmazt terhelünk egyre nagyobb vízszintes erővel, amíg a halmaz el nem „nyíródik” (2.1. ábra).



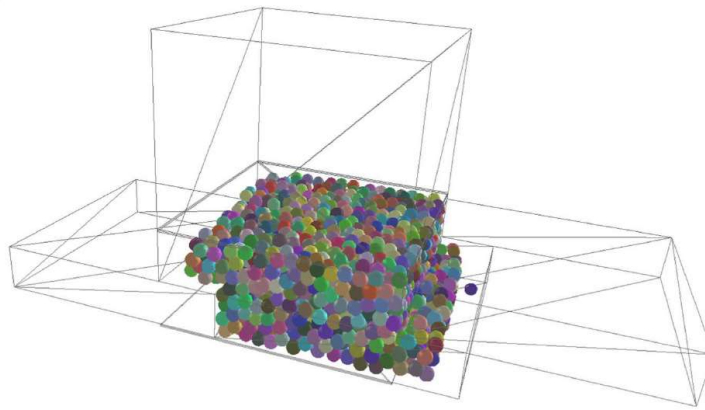
2.1. ábra: Nyírókészülék leegyszerűsített működési modellje

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 szemcsehalmaz mechanikai viselkedését. Jenike 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.



2.2. ábra. Nyírókészülék

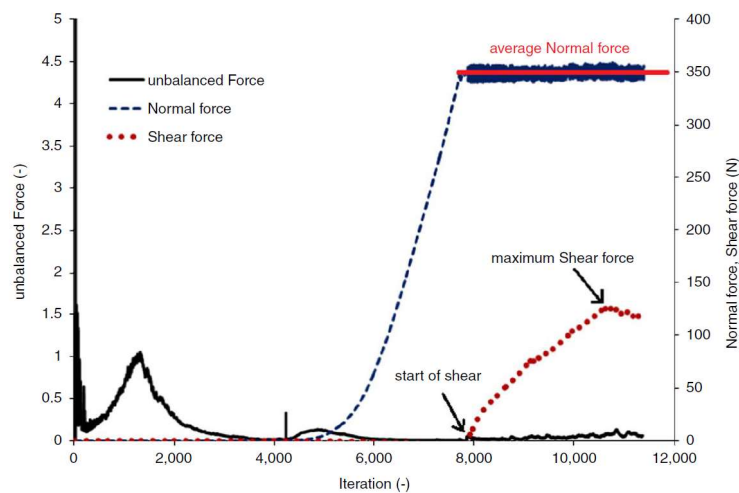
A nyíróvizsgálat diszkrét elemes modellezéséhez a Jenike-féle klasszikus készülék kissé módosított változatát alkalmaztuk (2.2. ábra). A fő különbséget a négyzet alakú nyomólap és nyíródoboz jelenti, mely eltér a Jenike által alkalmazott kör alaktól. A nyíródoboz mérete $0,1 \times 0,1 \times 0,05$ m volt (2.3. ábra). A vizsgálatához 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.



2.3. ábra: Nyírókészülék modellje

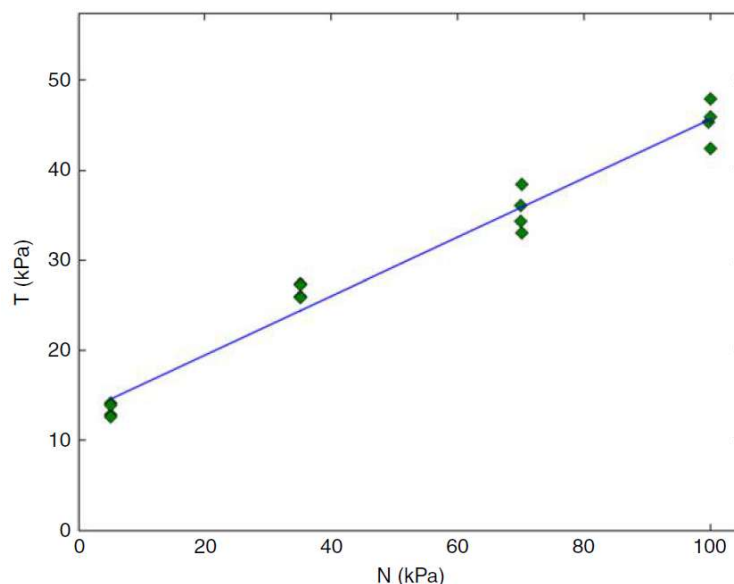
A nyíróvizsgálat diszkrét elemes modellje a következő fő lépések végrehajtásával működött

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 (2.4. 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.



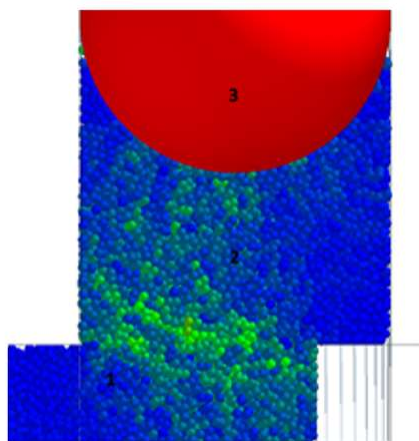
2.4. ábra: Normál-és nyíróerő változása az iterációs lépések függvényében

A linearizált nyírási tönkremeneteli határgörbe létrehozásához négy különböző terhelési értéken négyszeres ismétléssel végeztük el a vizsgálatot 2.5. ábra (egyres pontok túl közel vannak egymáshoz, hogy különálló pontként jelenjenek meg).



2.5. ábra: Linearizált nyírási tönkremeneteli határgörbe

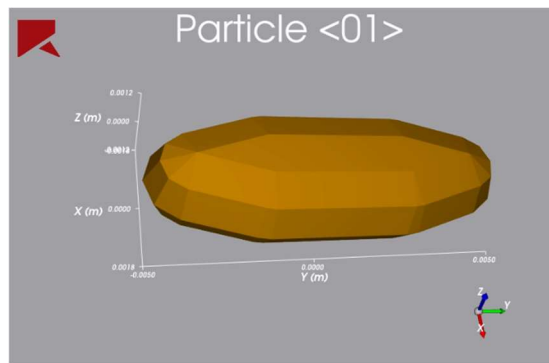
A felső nyomólap fel-le mozgatasával fenntartott állandó normálerő problémáját más esetekben úgy küszöböltük ki, hogy egyetlen, a normál terhelés értékének megfelelően megválasztott súlyú szemcsével hoztuk létre a szemcsehalmaz függőleges terhelését (ebben az esetben természetesen hengeres nyírókészüléket alkalmazva (2.6. ábra)).



2.6. ábra: Hengeres nyírókészülék 1: alsó mozgó rész, 2 nyugvó hengeres rész 3 nyomóterhelés

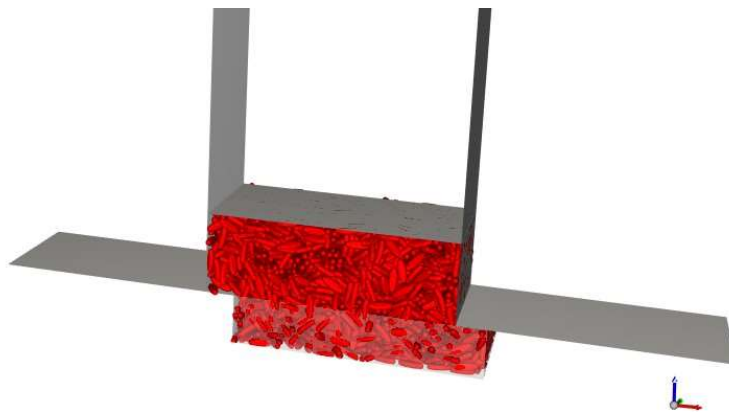
A nyírási síktól kellő távolságra elhelyezett test alakja a nyírási síkban keletkező terhelési viszonyok szempontjából közömbös (Saint-Venant elv), a gömb alak választása pedig lehetővé teszi, hogy a terhelő elem esetleges elbillenésével ne kelljen foglalkozni.

Poliéderekkel határolt szemcsealakkal is végeztünk nyíróvizsgálat szimulációkat (2.7. ábra). A nyíróvizsgálat ebben az esetben is a korábbiakban leírt módon történt, a szemcsealak volt más.



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

A nyírókészülék-modell működésében nem volt az előbb leírtaktól számottevő eltérés (2.8. ábra).



2.8. ábra: Nyírókísérlet modellje poliéderekkel határolt szemcsék esetén

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.

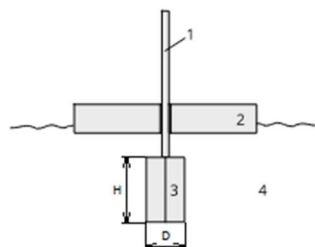
Torziós elven működő talajnyíró készülék (2.9. ábra) segítségével lehetőség adódik olyan helyszíni vizsgálatok elvégzésére, amelyek DEM modell kalibrálás céljaira is felhasználhatók.



2.9. ábra: Torziós elven működő talajnyíró készülék

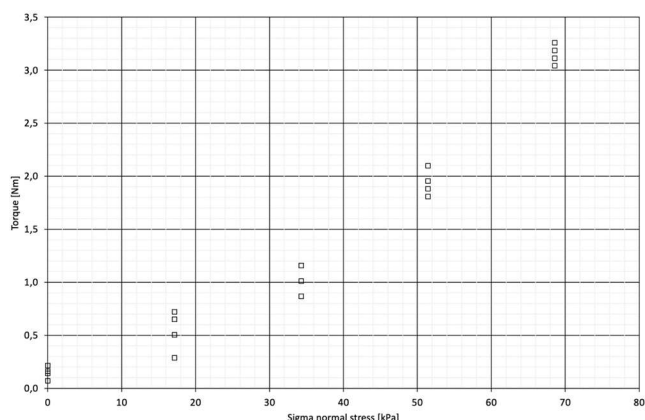
A NAIK Mezőgazdasági Gépesítési Intézet talajvályójában végeztünk arra vonatkozó vizsgálatokat, hogy elegendő információt tud-e biztosítani a torziós talajnyíró kísérlet a talaj

diszkrét elemes modelljének kalibrálásához. A klasszikus laboratóriumi torziós vizsgálatot úgy módosítottuk, hogy a talajfelszínre helyezett különböző nagyságú függőleges terhelésekkel megváltoztattuk az elnyírni kívánt talajminta feszültségállapotát, a klasszikus nyírókísérlethez hasonlóan előterhelést alkalmaztunk. A 2.10. ábrán látható módosított torziós talajnyíró készülék fő részei a tengely (1), a nyomóterhelés (2) a talajmintában elforduló nyírólapok (3) és maga a talaj (4).



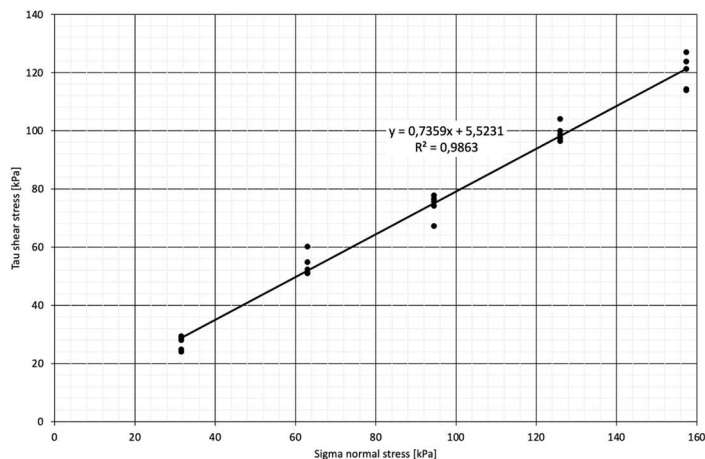
2.10. ábra: Módosított torziós talajnyíró készülék vázlata

A torziós nyírókísérletet több nyomóterheléssel elvégezve a 2.11. ábrán látható csúsztatófeszültség értékeket kaptuk.



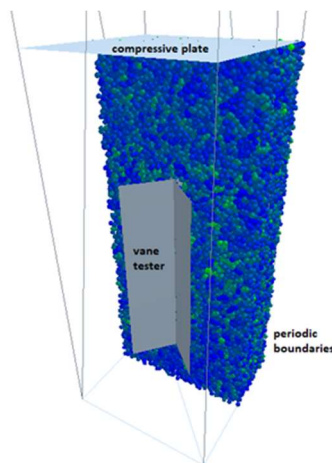
2.11. ábra: Különböző normálirányú előterhelésekhez tartozó nyomtatékok

Ugyanennek a talajmintának klasszikus nyírókísérlet elvégzésével meghatároztuk a nyírási tönkremeneteli határgörbét is (2.12. ábra).



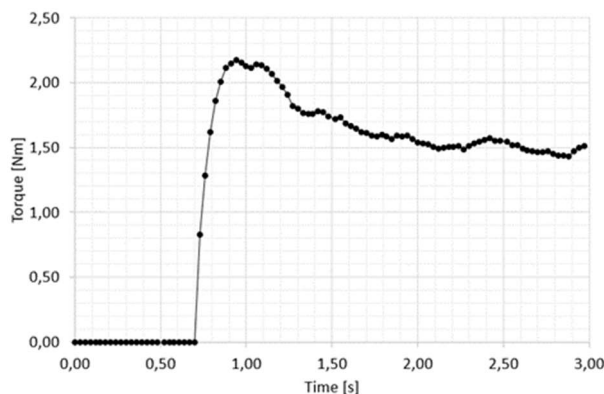
2.12. ábra: nyírási tönkremeneteli határgörbe

A kísérleti eredmények birtokában elkészítettük a torziós nyírókísérlet diszkrét elemes modelljét (2.13. ábra). Az ábrán a nyírókészülék modelljét körülvevő talajminta félbe van vágva, hogy láthatóvá váljanak a készülék lapátjai.



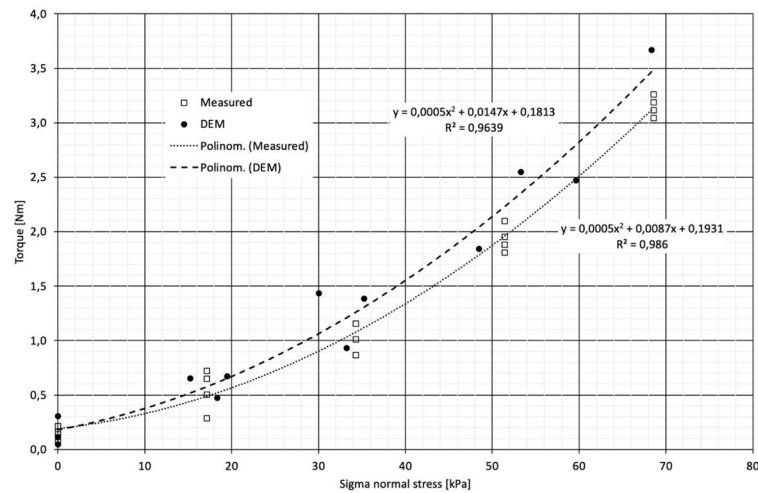
2.13. ábra: Torziós nyírókísérlet diszkrét elemes modellje

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 szemcsse 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 (2.14. ábra).



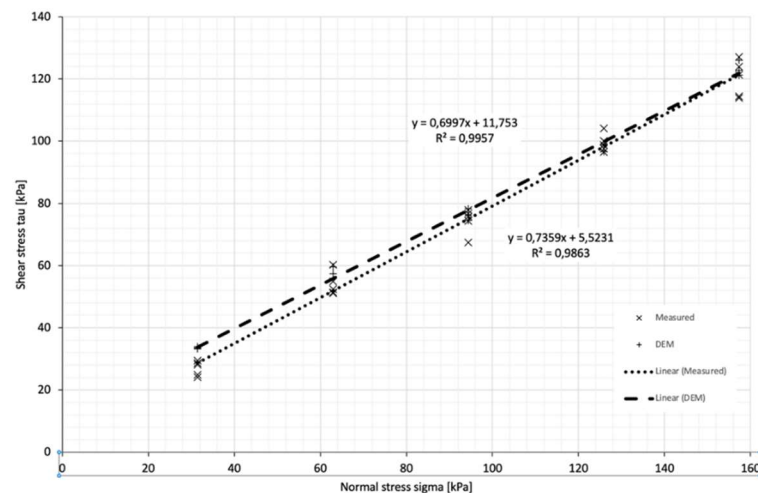
2.14. ábra: A torziós nyírókészülék forgatásához szükséges nyomaték

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 (2.15. ábra).



2.15. ábra: Mért és szimulált normálfeszültség – nyírófeszültség karakterisztikák

Az így meghatározott mikromechanikai paramétereket használtuk fel a klasszikus nyírókísérlet modellező szimulációban. A nyíróvizsgálathoz tartozó (a torziós kísérlet modelljéből meghatározott mikromechanikai paramétereket használó) szimulációk lefuttatása után összehasonlítottuk a talajminta mérésével és szimulációkkal meghatározott nyírási tönkremeneteli határgörbéjét (2.16. ábra).



2.16. ábra: Mért és szimulált 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 mérésével meghatározott talajszilárdságot.

Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye

Talajművelő szerszámok vonóerőigényével kapcsolatos kísérleti vizsgálatainkat a NAIK MGI talajvályújának és mérőrendszerének felhasználásával végeztük. A mérések során egymással párhuzamosan mozgatva (2.17. ábra) hasonlítottunk össze egymással egy mereven és egy rugalmas támasztással rögzített (2.18. ábra) azonos geometriájú szerszámot. A munkamélység

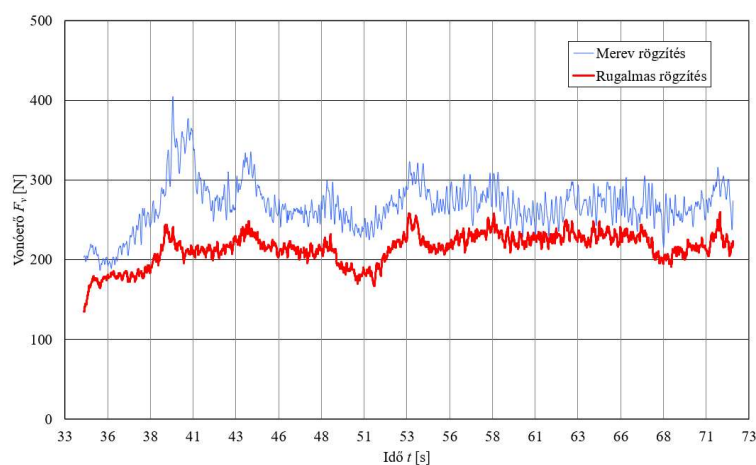
mindkét szerszám esetében 250mm volt, a haladási sebesség 0,5 és 2,5 m/s között változott. A kísérleti vizsgálatok azt mutatták, hogy a rugalmasan felfüggesztett szerszám vonóerőigénye minden esetben kisebb volt, mint a mereven rögzített szerszámé. Erre látunk példát a 2.19. ábrán.



2.17. ábra: Összehasonlító vonóerőigény mérés a NAIK MGI talajvályójában

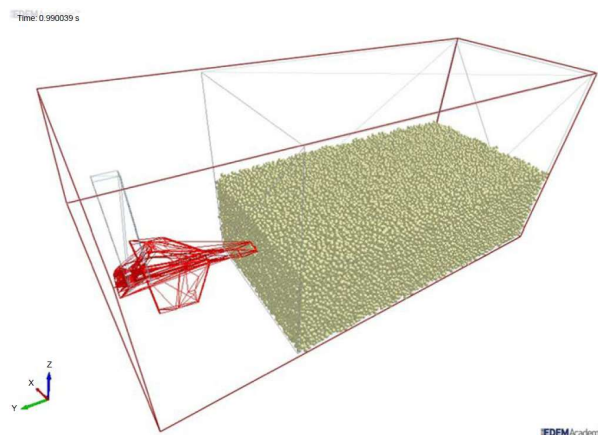


2.18. ábra: Talajművelő szerszám rugalmas rögzítése



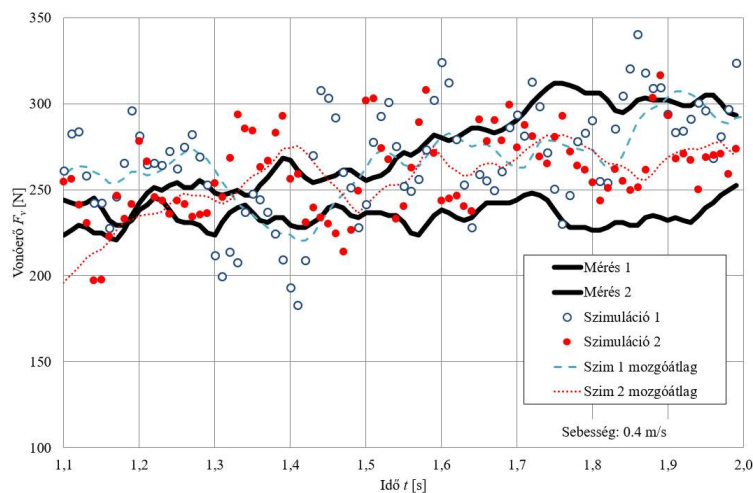
2.19. ábra: A rugalmasan felfüggesztett és a mereven rögzített talajművelő szerszám vonóerőigénye, példa összehasonlító mérésre

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 méretekkkel 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 (2.20. ábra).



2.20. 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: (2.21. ábra).

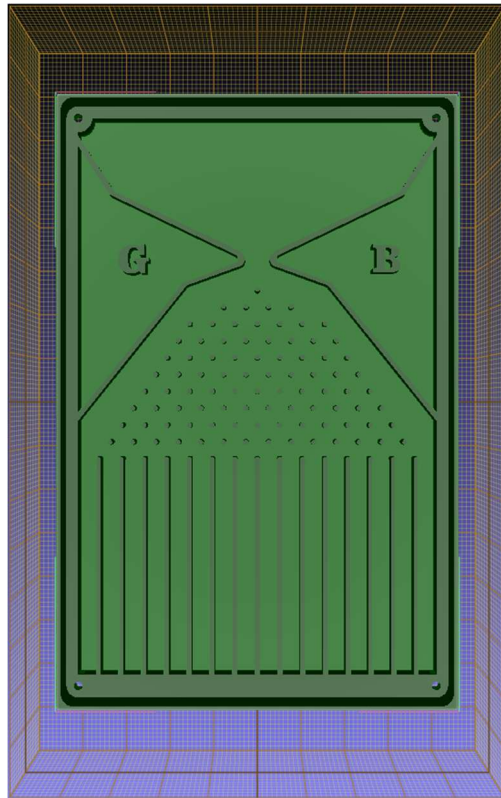


2.21. ábra: Vonóerő mért és numerikus szimulációval meghatározott értéke

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

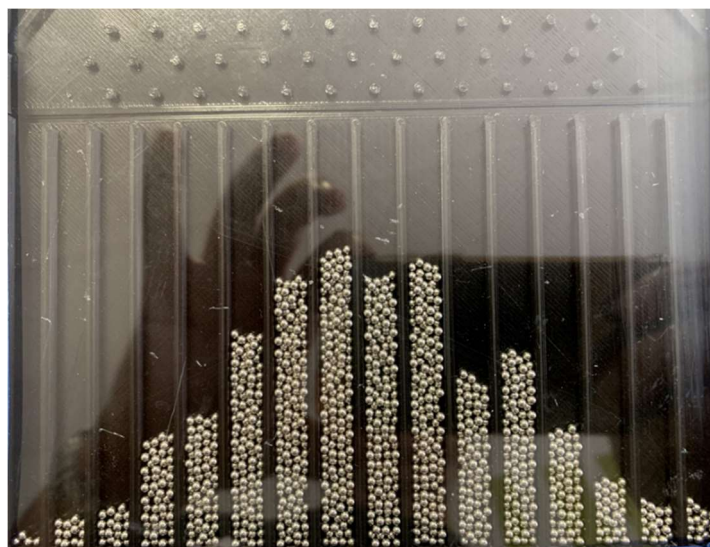
Statikus keverőberendezések

A statikus keverőberendezések működésének vizsgálatához Galton deszkát használtunk. A Galton deszka 3D modelljét felhasználva 3D nyomtatással készítettük el a keverőberendezést. A 2.22. ábrán felrajzol milliméter skála segítségével a berendezés fő méretei könnyen meghatározhatóak.



2.22. ábra: A Galton deszka 3D modellje

A következő ábrán a 3D nyomtatással megvalósított Galton deszka látható, 1mm-es acélgolyókkal megtöltve (2.23. ábra). A 2.1. táblázat a tízszer megismételt kísérletek eredményeit tartalmazza. A táblázat oszlopai az ismétléseket jelölik, míg a sorok a Galton-deszka egyes rekeszeiben mért halmazmagasságokat tartalmazzák.

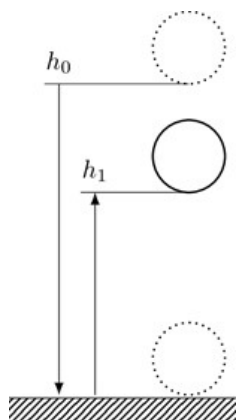


2.23. ábra: Galton deszka kísérlet eredménye

2.1. 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 nyomatott anyagból készült falnak ütközése során lezajló energiadisszipáció mértékét kifejező ütközési tényezőre, ezt ejtőkísérlettel határoztuk meg (2.24. ábra).



2.24. ábra: Ejtőkísérlet az ütközési tényező meghatározására

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

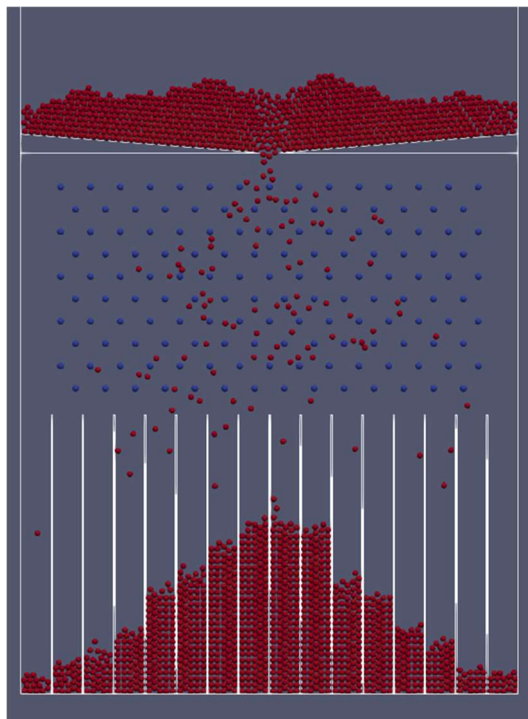
$$C_{rn} = \frac{u_1}{v_1} = \sqrt{\frac{h_1}{h_0}}. \quad 3.5$$

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

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

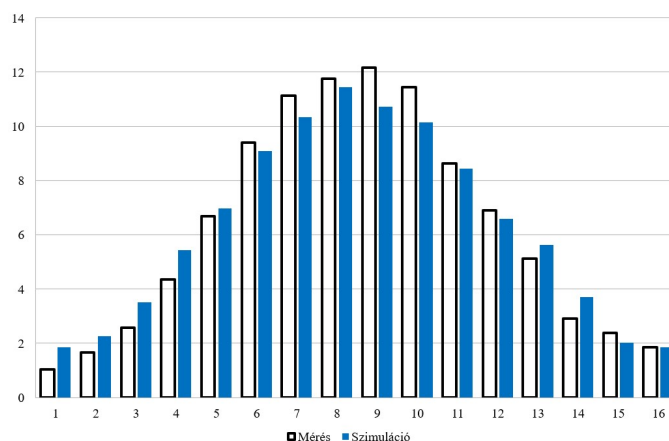
Ugyanennek az egyszerű kísérletnek a diszkrét elemes modelljét elkészítve a kapcsolati jellemzőket addig változtattuk, amíg 244mm visszapattanási magasságot nem kaptunk.

A diszkrét elemes szimulációk első lépéseként megvizsgáltuk, hogy a DEM modell (2.25. ábra) és a kísérletsorozat által kapott eloszlások sűrűségfüggvényei elfogadható egyezést mutatnak-e.



2.25. ábra: Galton deszka diszkrét elemes modellje

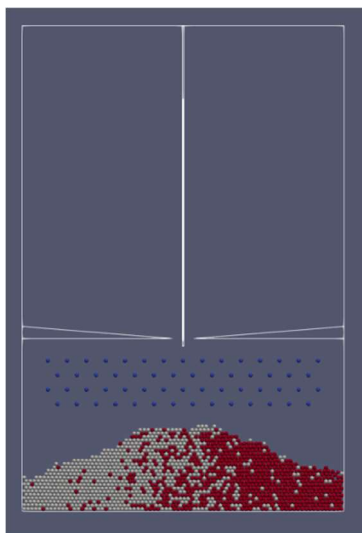
A méréssel és a szimulációkkal meghatározott átlagos oszlopmagasságokat egymással összevetve nagyon jó egyezést találtunk a két eloszlás sűrűségfüggvénye között (2.26. ábra).



2.26. 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 (2.27. ábra). A keveredést a két külön oszlopban betöltött piros és szürke színű szemcsék között vizsgáltuk.



2.27. ábra: Galton keverő DEM modellje

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

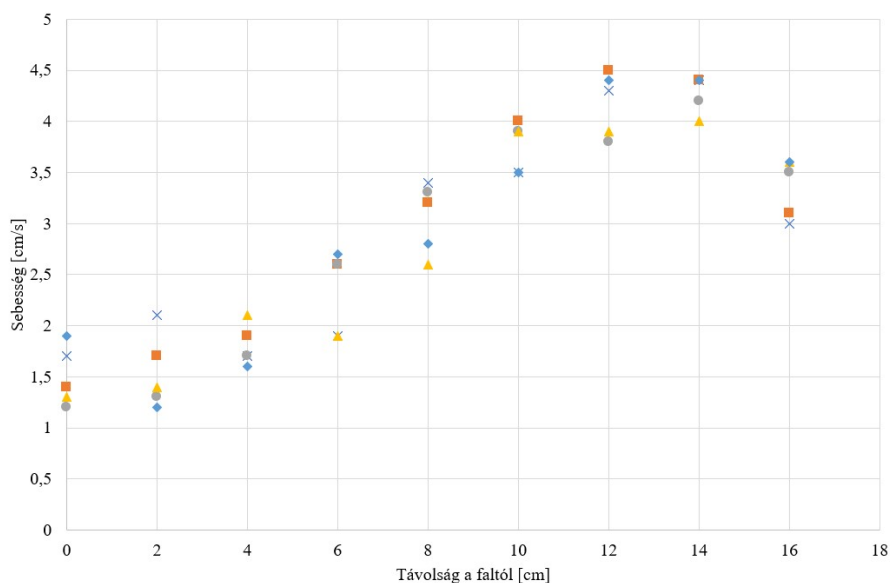
Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái

A szárítóberendezések anyagáramlási viszonyaival kapcsolatos kísérleti vizsgálatokat egy HSZ-15 típusú ipari szárítóberendezésen, valamint egy modellszáritón végeztük. A modellszáritón végzett kísérletek eredményeit az ipari szárítóberendezésen végzett mérésekkel összehasonlítva azt tapasztaltuk, hogy a modellszáritó 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 (2.28. ábra).



2.28. 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 2.29. ábra mutatja be.



2. 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

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

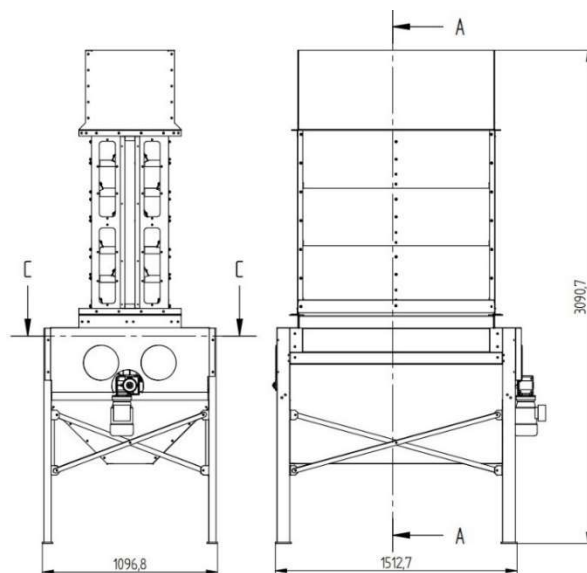
mennyiséggel (sebességtényező), melynek értéke egyenletes áramlás esetén 0, és az egyenetlenség növekedésével egyre jobban megközelíti az 1 értéket.

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 modellszárító berendezést, amely az eredeti szárítómodul két oszlopát tartalmazta (2.30. ábra).



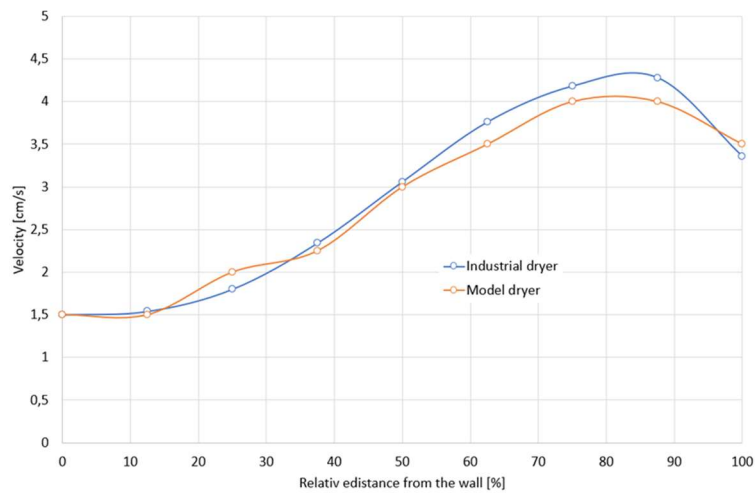
2.30. ábra: Modellszárító felépítése és méretei

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 (2.31. ábra) használtunk az anyagáramlási egyenetlenség meghatározására. Kísérleti vizsgálataink során három különböző lamella szögállás értékére is megvizsgáltuk az áramlás egyenetlenségét.



2.31. ábra: Színezett sávok a modellszárítóban

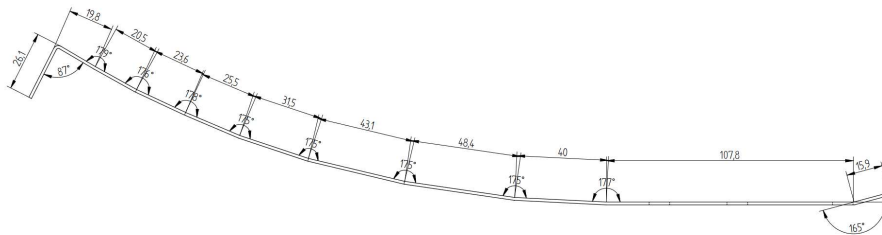
A modellszárító forgó kitaroló egységének fordulatszámát úgy állítottuk be, hogy a lehető legjobban reprodukáljuk az ipari szárító sebességértékeit a modellszárítóban. Ahogy a 2.32. ábrán is látható, a modellszárító és az ipari szárítóberendezés sebességviszonyai között jó egyezést sikerült elérnünk a kitaroló egység nyitási idejének megfelelő beállításával.



2.32. ábra: Az ipari és a modellszárító anyagáramlási viszonyai

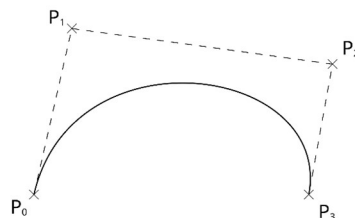
Mindezek alapján kijelenthettük, hogy a modellszárító berendezés alkalmas a valós szárítóberendezésben lezajló anyagáramlási viszonyok modellezésére.

A korábban bemutatott analitikus vizsgálatok (brachisztokron probléma) alapján azt a következtetést vontuk le, hogy ciklois alakú lamella geometria alkalmazásával javíthatunk az áramlás egyenletességén. Ciklois alakot közelítő (2.33. ábra) lamella geometriával is elvégeztük az áramlás egyenletlenségére vonatkozó kísérleti vizsgálatokat.



2.33. ábra: Ciklois lamella alak közelítése

Gyártástechnológiai megfontolások alapján arra a következtetésre jutottam, hogy Bezier görbe alakú lamellák könnyebben előállíthatók, így azok esetére is végeztem numerikus szimulációkat. A modellezéshez harmadfokú Bezier görbéket alkalmaztunk. Ezeket a görbéket 4 pont (P_0 , P_1 , P_2 és P_3) definiálja (2.34. ábra).



2.34. ábra: Harmadfokú Bézier görbét definiáló pontok

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

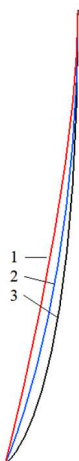
$$\mathbf{B}(t) = (1 - t)^3 \mathbf{P}_0 + 3(1 - t)^2 t \mathbf{P}_1 + 2(1 - t) t^2 \mathbf{P}_2 + t^3 \mathbf{P}_3, \quad t \in [0, 1].$$

Az általam alkalmazott Bézier görbék pontjait úgy választottam meg, hogy kezdő és végpontjukon illeszkedjen a ciklois lamellához. Ennek eredményeként a következő koordinátákat kellett választanom. P_0 és P_1 minden esetben $x = 133\text{mm}$, $y = 0$, $z = 0$ koordinátákkal rendelkezett. A P_2 pont y koordinátája változott az egyes konstrukcióknak megfelelően, x és z koordinátái ennek a pontnak sem változtak $P_{2x} = 203\text{mm}$, $P_{2z} = 0$. 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 (2.2. táblázat).

2.2. 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 (2.35. ábra).



2.35. ábra: P_{2y} változtatásának hatása 1: $P_{2y} = 200\text{mm}$, 2: $P_{2y} = 100\text{mm}$, 3: $P_{2y} = 0$

Négy különböző szemcseformát alkalmaztunk (2.3. táblázat és 2.36. ábra).

2.3. 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

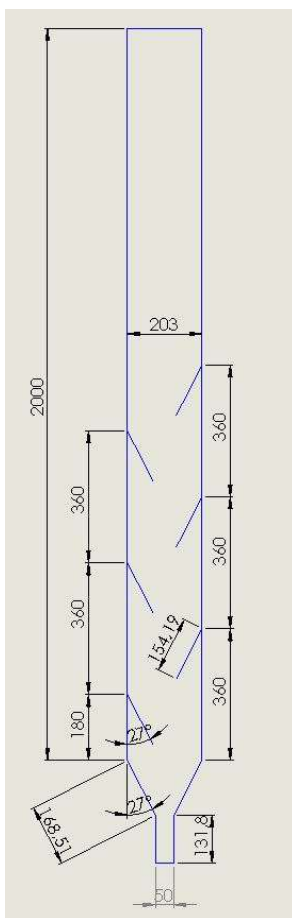
2.36. ábra: A DEM modellben használt szemcselalakok

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 (2.4. táblázat).

2.4. 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

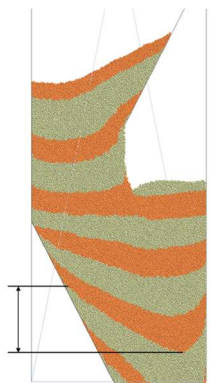
A szárítóberendezésbeli magmozgásviszonyok vizsgálatához elkészítettük egy szárítómodul geometriai modelljét (2.37. ábra).



2.37. ábra: A szárítómodul geometriai modellje

A modul alján látható kitérő rész nyitó-záró mechanizmus működésének kinematikai paramétereit a valóságban használt forgó kitérő 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 (2.38. és 2.39. ábra). Az ábrákon látható, hogy a lamella alak megválasztása jelentős hatással van a bejelölt csíkok torzulásának mértékére, ezáltal az anyagáramlás egyenletességére.



a., egyenes lamella



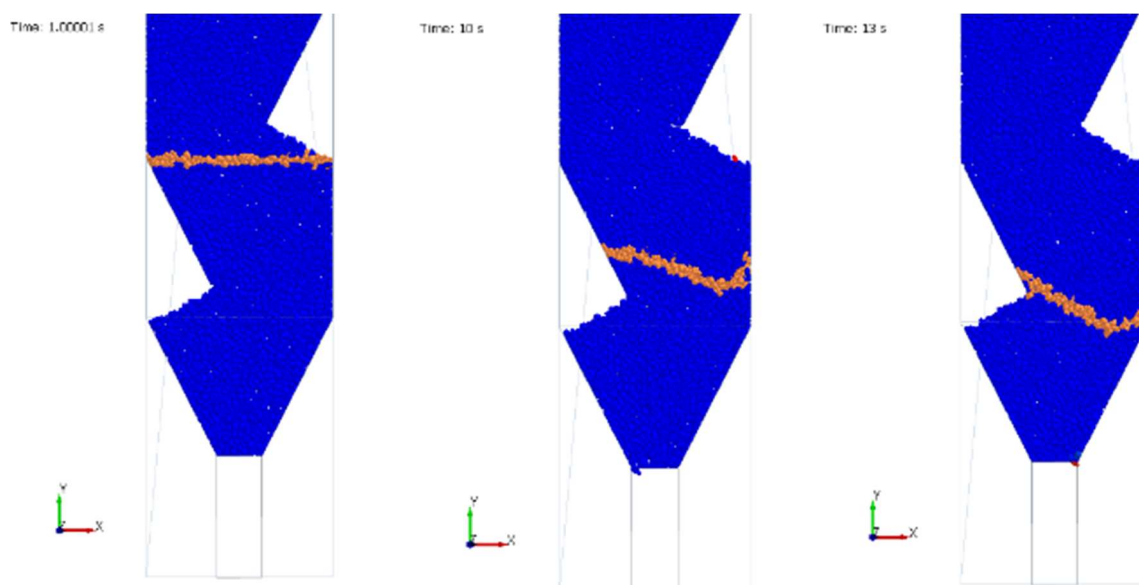
b., ciklois lamella

2.38. ábra: Anyagáramlás egyenetlensége különböző lamella geometriák esetén

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

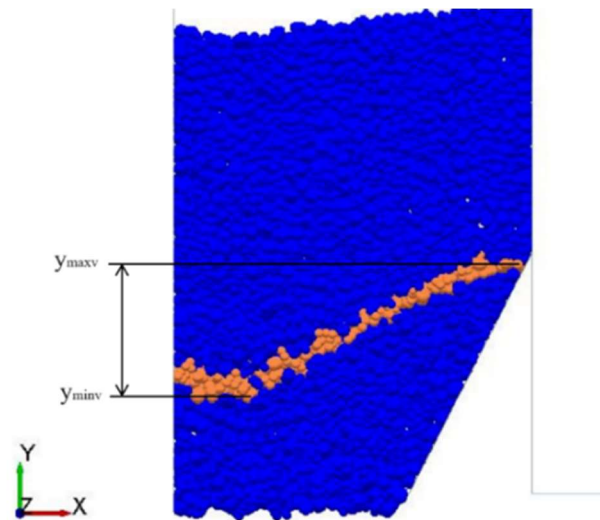
$$\xi = \frac{y_{max} - y_{min}}{y_{max}}, \quad 3.9$$

ahol y_{max} és y_{min} értelmezésére lásd a 2.40. 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.



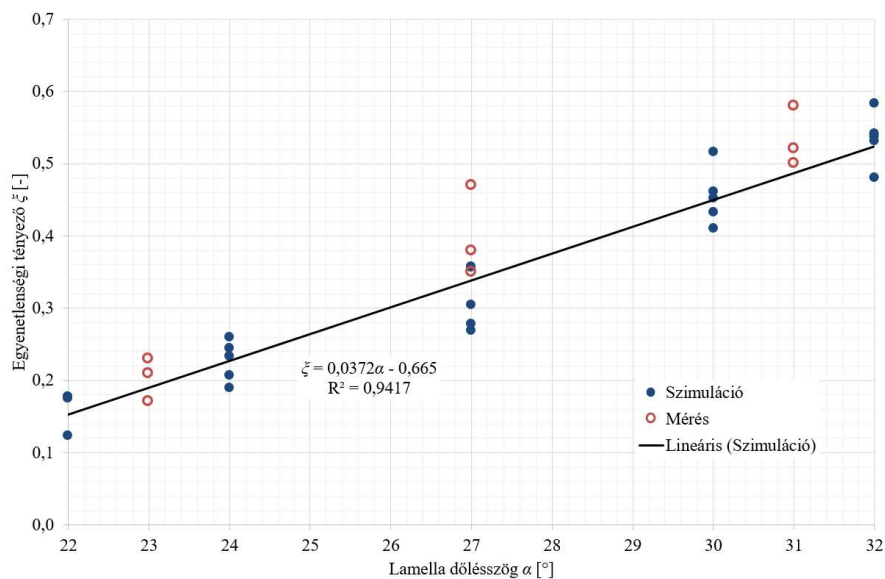
2.39. ábra: Színezett szemcsék mozgása a szimuláció során

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



2.40. ábra: Egyenetlenségi tényező meghatározása

Mindezek alapján lehetőségünk nyílt a lamella hajlásszög egyenetlenségre kifejtett hatásának elemzésére, valamint a szimuláció eredményinek mérésekkel való összehasonlítására (2.41. ábra).



2.41. 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.

3. 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).

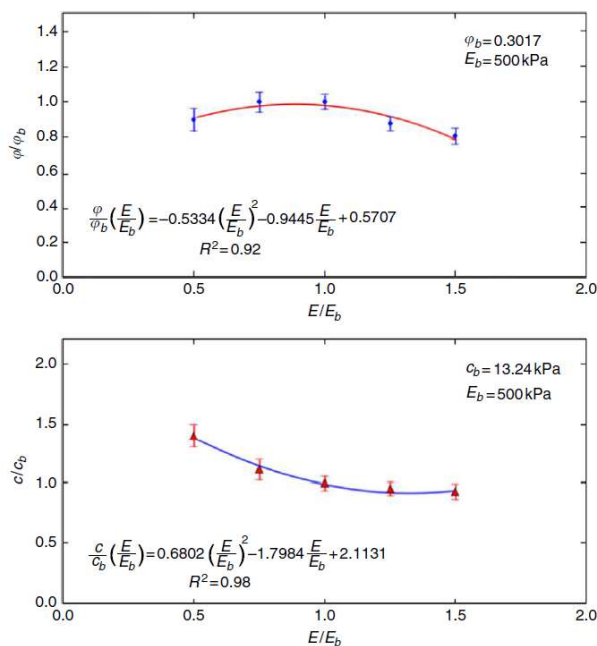
A vizsgált paraméterek kiinduló értékeit a 3.1. táblázat tartalmazza.

3.1. 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

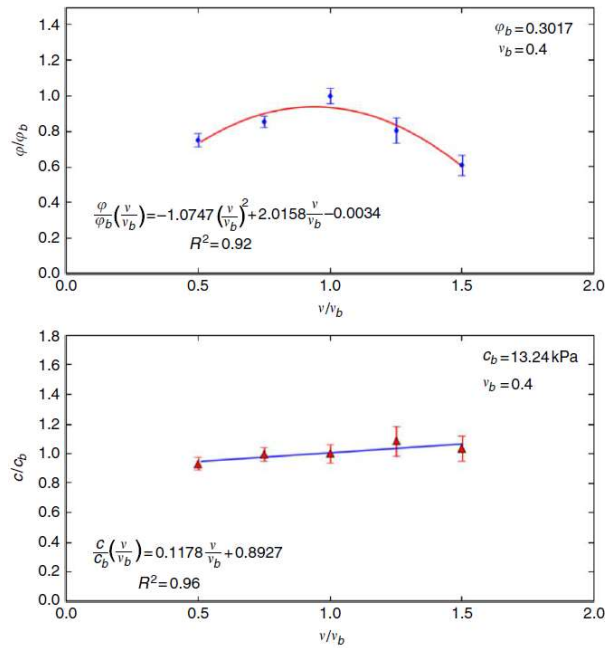
meghatározott belső súrlódási szög értéke $\varphi_b = 0,3017$, a látszólagos kohézió értéke pedig $c_b = 13,24$ kPa volt. Az érzékenységvizsgálat eredményei a következők voltak.

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 3.1 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.

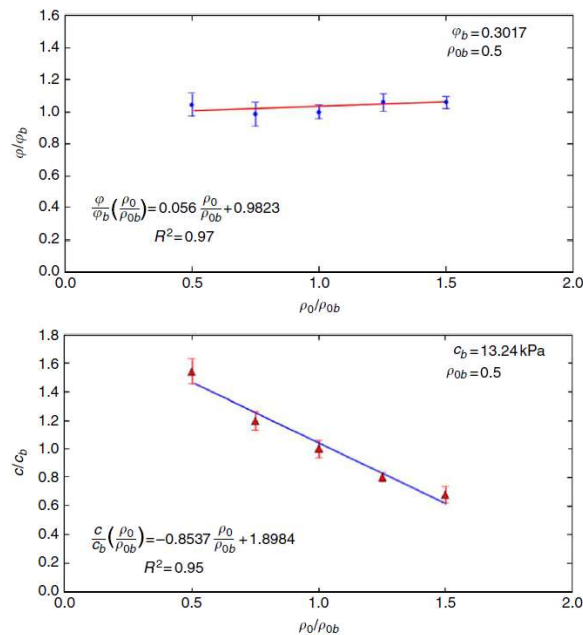


3.1. ábra: A szemcsék rugalmassági modulusának hatása a kohézió és a belső súrlódási szög értékére

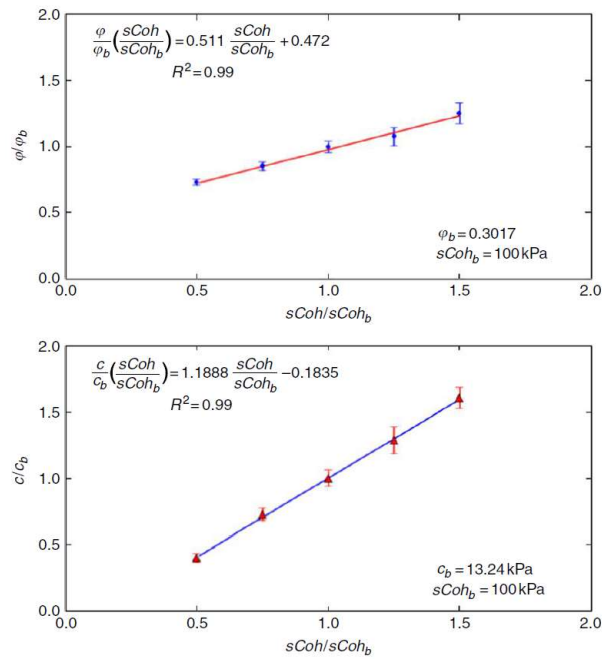
Láthatjuk, hogy a rugalmassági modulus megváltoztatásának hatása mindkét makromechanikai paraméter értékére számottevő hatással van, így annak megváltoztatása során (ez szintén hatással van a Rayleigh időléptékre, értékét szokás a lehető legkisebbre választani) nagy körültekintéssel kell eljárni. Vizsgálataim azt mutatják, hogy a Poisson tényező értékének változtatása is jelentős hatással lehet a makromechanikai viselkedésre (3.2. ábra).



3.2. 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 (3.3. ábra).

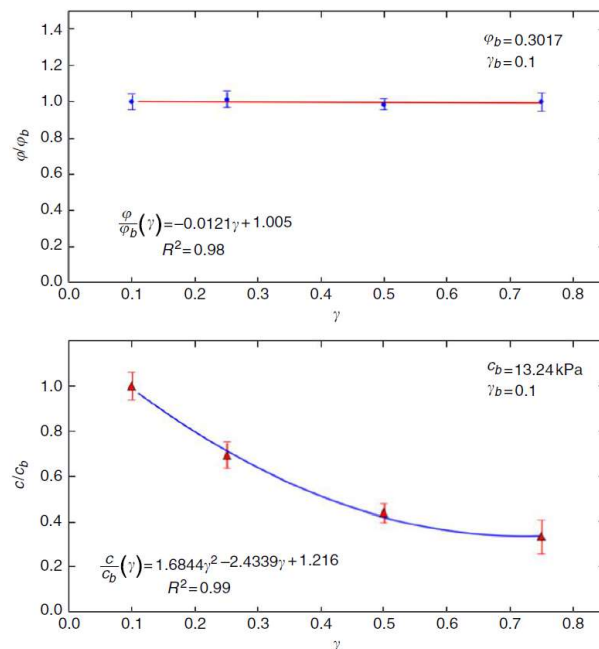


3.3. ábra: A szemcsék közötti súrlódás hatása a kohézió és a belső súrlódási szög értékére
 Az alkalmazott anyagmodell kohézív kötéseinek normális irányú szilárdsága nincs jelentős hatással a makromechanikai jellemzőkre, viszont ugyanennek a kohézív kötésnek a nyírószilárdsága igen erős hatással van mindkét makromechanikai jellemző értékére (3.4. ábra).



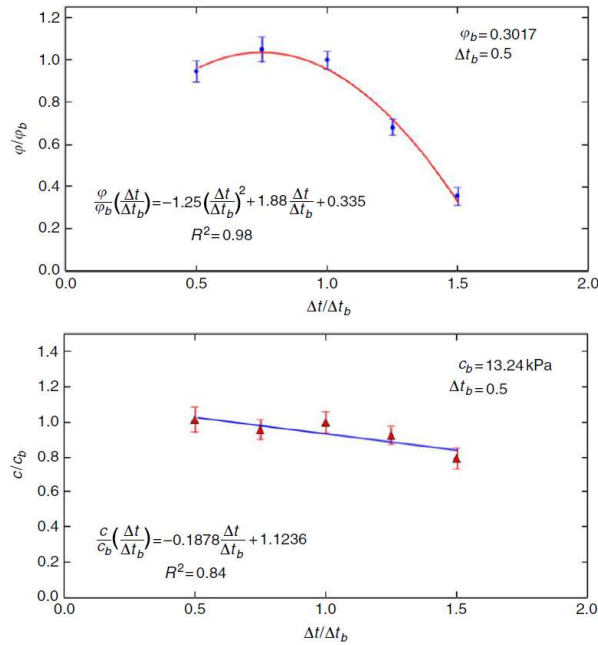
3.4. ábra: A szemcsék közötti kohézív kapcsolat nyírószilárdságának hatása a látszólagos kohézió és a belső súrlódási szög értékére

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 (3.5. ábra).



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

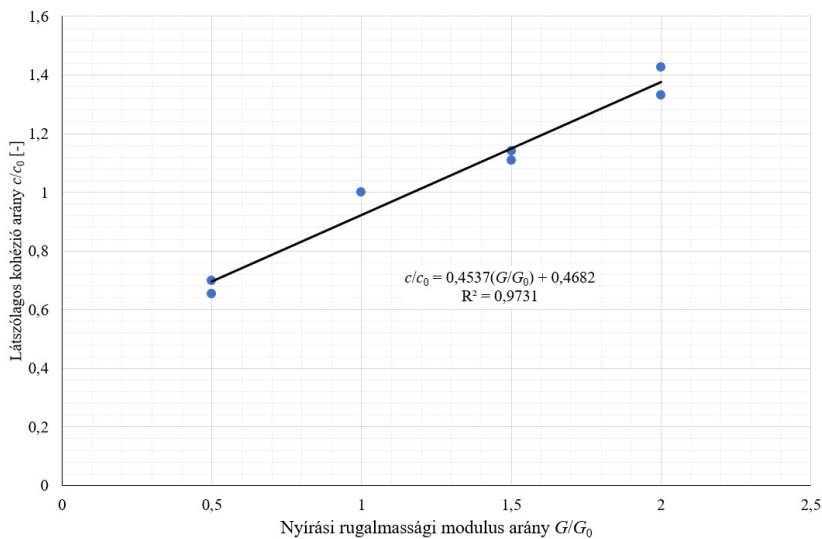
A szimuláció időléptékének megváltoztatása jelentős hatással volt mindkét makromechanikai jellemző értékére (3.6. ábra).



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

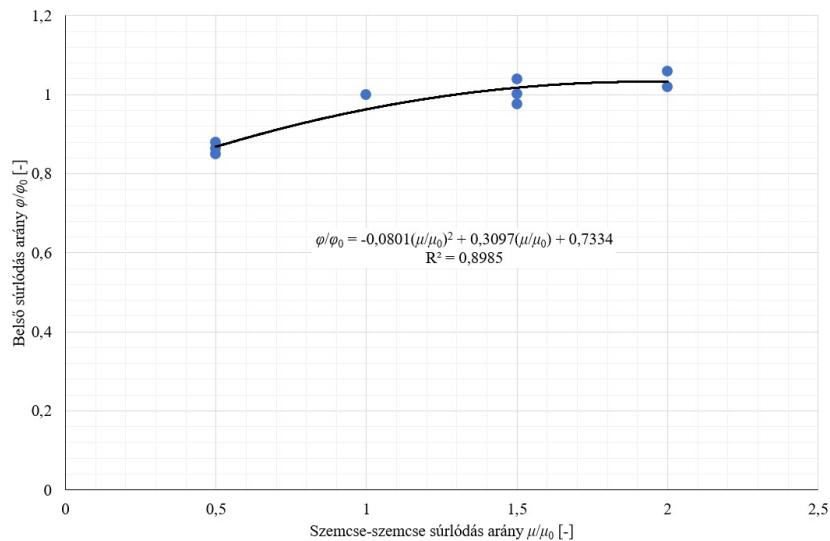
Poliéder alakú szemcsék esetére is végeztem nyírókísérletet. Itt is a mikromechanikai jellemzők makroviselkedésre kifejtett hatását vizsgáltam, a mikromechanikai jellemzők értékének szisztematikus változtatásával. Ebben az esetben kohézió nélküli anyagmodellt használtam. Eredményül az kaptam, hogy csak 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 érzékenységét 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 (3.7. ábra).

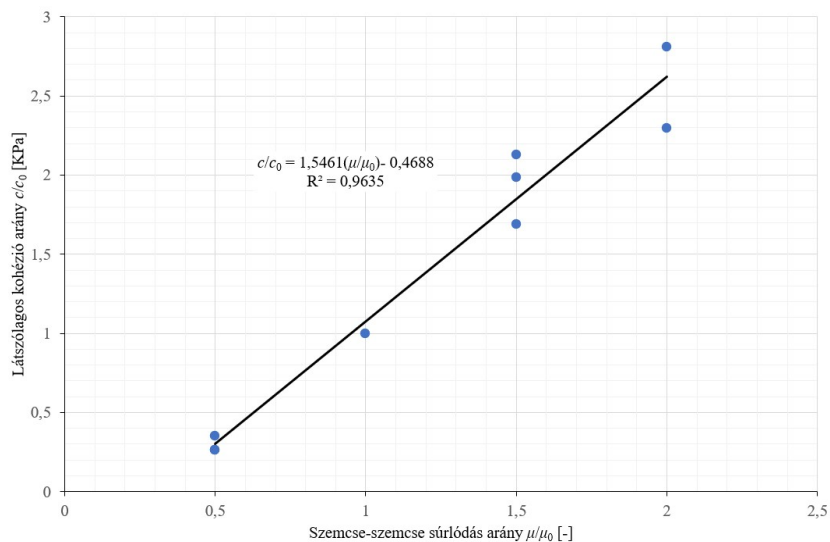


3.7. ábra: A szemcsék csúsztató rugalmassági modulusának hatása a halmaz látszólagos kohéziójának értékére torziós kísérlet esetén

A szemcsék közötti súrlódási tényező értéke jelentősen befolyásolta mind a látszólagos kohézió, mint a halmaz belső súrlódási szögének értékét (3.8. ábra, 3.9. ábra).



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



3.9. ábra: Szemcsék közötti súrlódási 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:

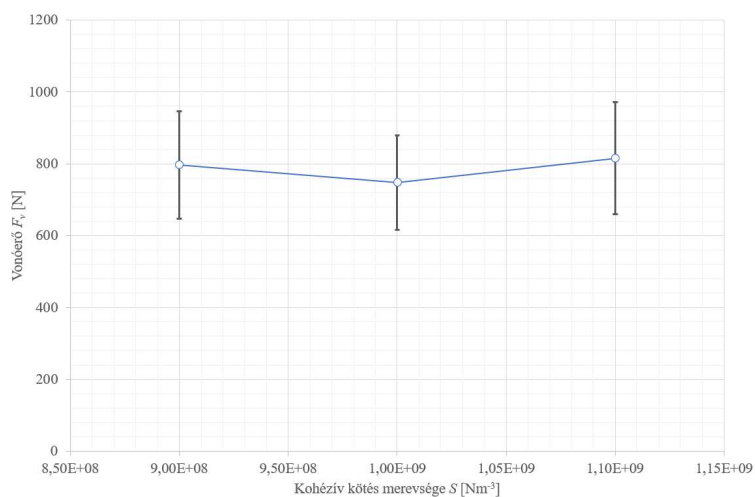
1. A szemcsék sűrűségének hatása mindkét makromechanikai paraméterre (a nyírási tönkremeneteli határgörbére) elhanyagolható.
2. Mindkét makromechanikai paraméter, a kohézió és a belső súrlódás jelentősen változik a szemcsék rugalmassági modulusának növekedésével.
3. A halmaz látszólagos kohéziója enyhén növekszik a Poisson-tényező értékének növelésével. A belső súrlódásnak a vizsgált tartományban helyi maximuma van.

4. A szemcsék közötti súrlódási együttható erősen befolyásolja a halmaz látszólagos kohézióját. A szemcsék közötti súrlódási együttható változtatása nem gyakorol jelentős hatást a belső súrlódásra.
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 intuíciónak: 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 végzet helyszíni mérések jól helyettesíthetik a talajmintákon végzett laboratóriumi vizsgálatokat, ezzel elkerülhető a talajminták bolygatásából eredő mechanikai tulajdonság változás.

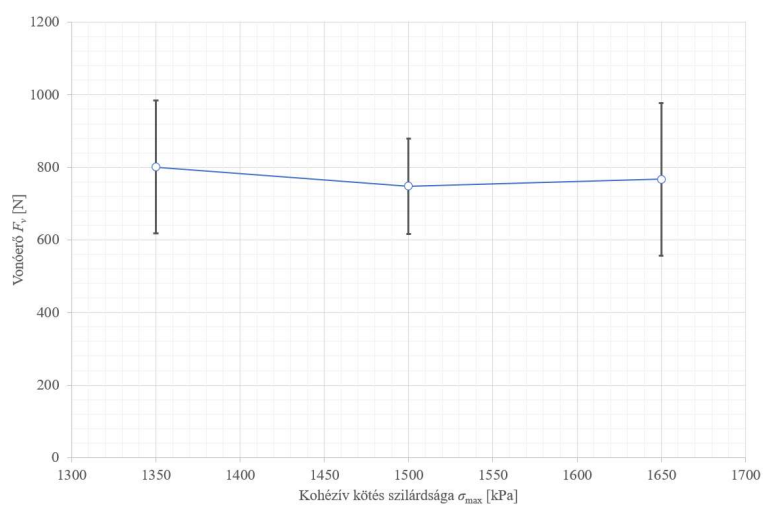
Az adott következtetésekhez tartozó közelítő matematikai függvények a megfelelő ábrákon láthatók.

Rezgő talajművelő szerszámok vonóerőigénye

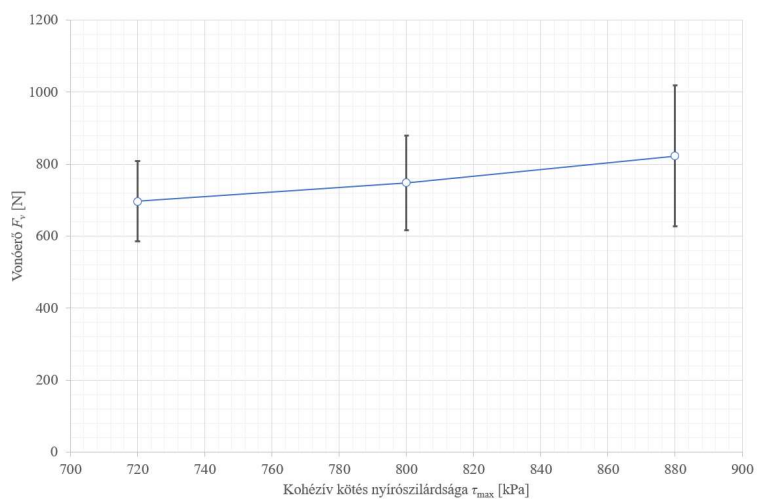
Rezgő talajművelő szerszámok esetén is megvizsgáltam a mikromechanikai paraméterekre való érzékenységet. Elsősorban a szimulációknál használt kohézív anyagmodell paramétereit vizsgáltam. Célom annak eldöntése volt, hogy a rezgő talajművelő szerszám modell mennyire érzékenyen reagál a kohézív kötési paraméterek megváltoztatására (3.10 – 3.14. ábrák).



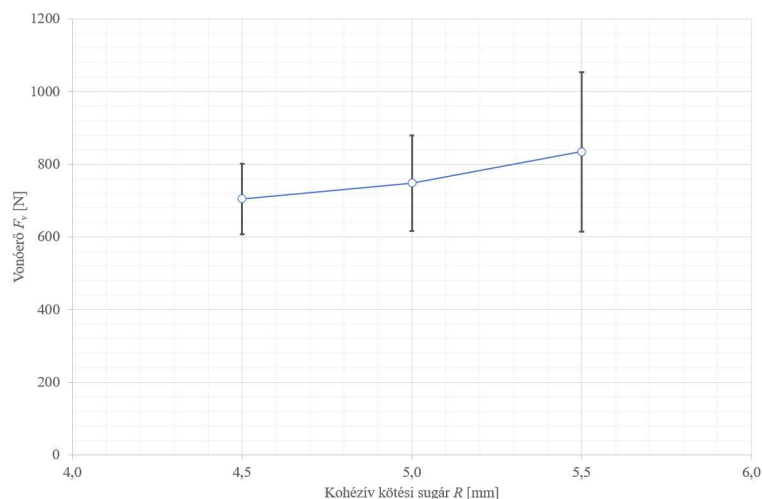
3.10. ábra: A kohézív kötés merevségének hatása a vonóerőre



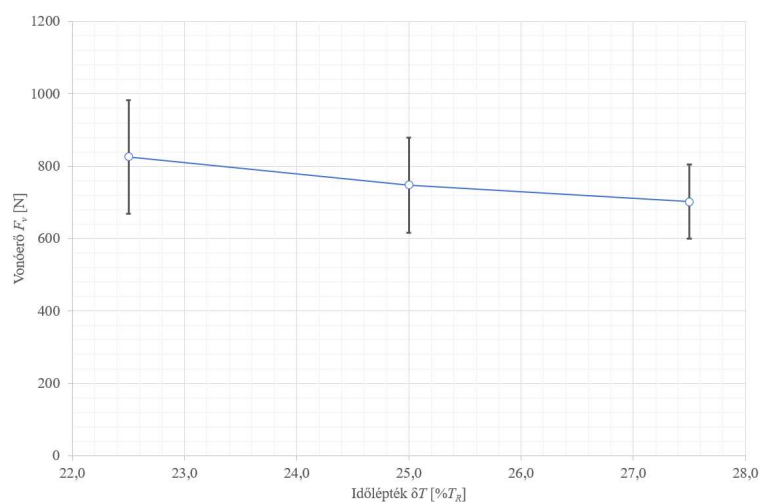
3.11. ábra: A kohézív kötés szilárdságának hatása a vonóerőre



3.12. ábra: A kohézív kötés nyírószilárdságának hatása a vonóerőre

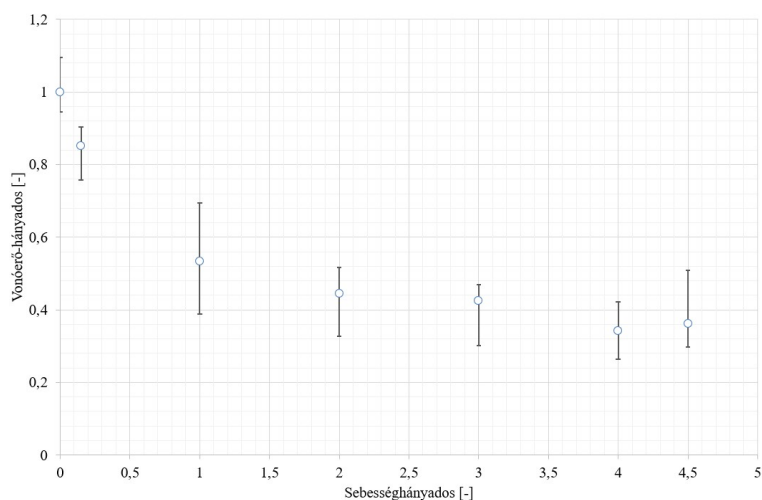


3.13. ábra: A kohézió kötési sugarának hatása a vonóerőre



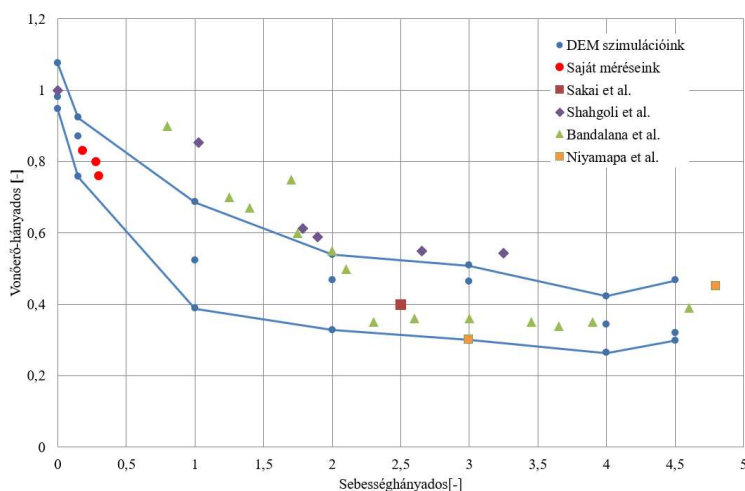
3.14. ábra: A szimulációs időlépték hatása a vonóerőre

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 (3.15. ábra).



3.15. ábra: Vonóerő csökkenés a sebességhányados függvényében

A sebességhányados bevezetésével egységes diagramon tudtam ábrázolni számos szerző kísérleti eredményét valamint a mi vizsgálataink eredményét is (3.16. ábra). Az ábrán szimulációinkban az adott beállításokhoz tartozó maximális és minimális vonóerő értékeket összekötve jelöltem ki a szimulációval kapott eredmények tartományát.

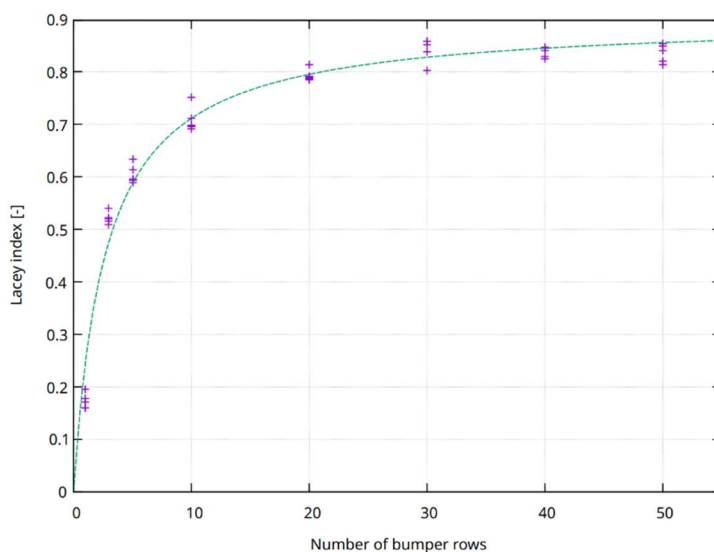


3.16. ábra: Szimulációink, kísérleti eredményeink és más szerzők kísérleti eredményei közös diagramon

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 (3.17. ábra).



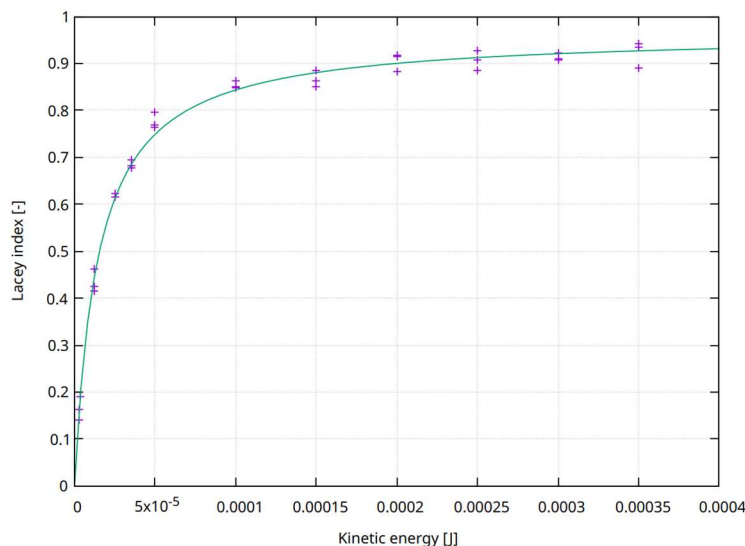
3.17. ábra: Galton keverő keverési hatékonysága az ütközősorok számának függvényében

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 szemcsék mozgási energiája. Ennek értékét az első ütközősor és a kifolyónyílás közötti távolság értékével tudtam szabályozni. A 3.18. ábra a mozgási energia és a keverési hatékonyság kapcsolatát mutatja két ütközősoros Galton keverő esetére.

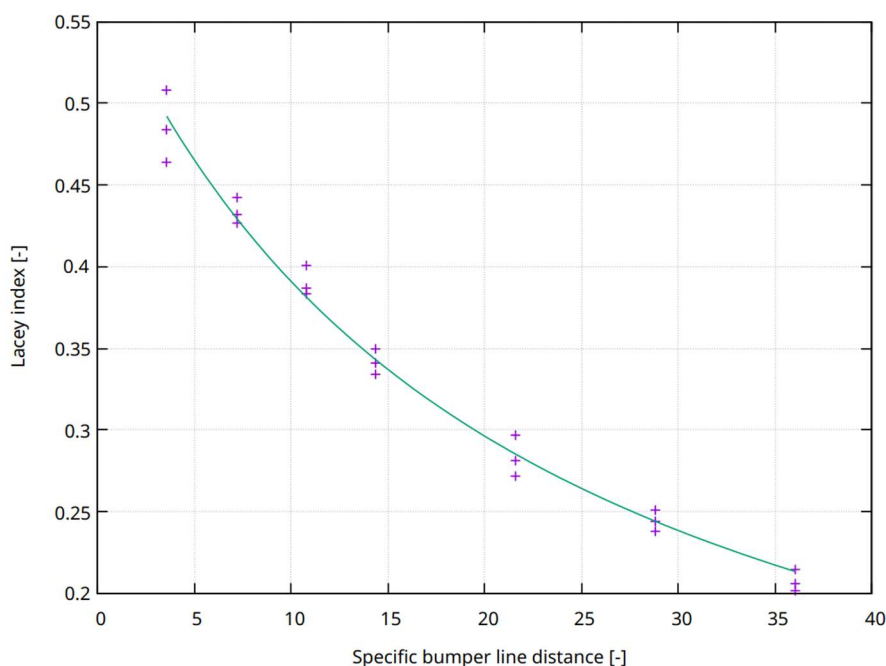


3.18. ábra: Galton keverő hatékonysága az egyes szemcsék mozgási energiájának függvényében
Az előző esethez hasonló telítődési függvény alkalmazható a keverési hatékonyság jellemzésére:

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

ahol $c = 0.964811 \pm 0.006221$ és $d = 1.44043e-05 \pm 5.16e-07$. 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 (3.19. ábra).



3.19. 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.

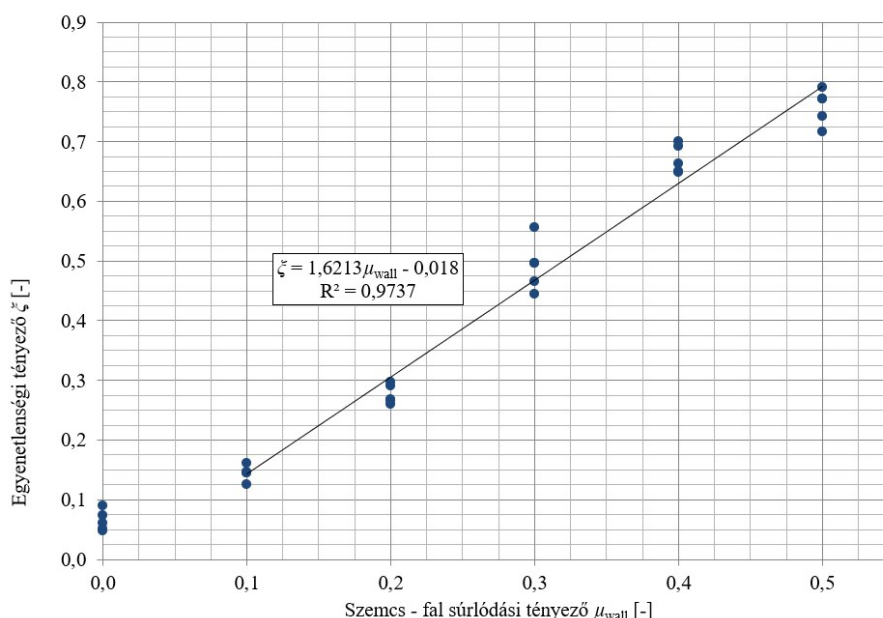
Terményszárítók optimális anyagáramlási csatornái

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.

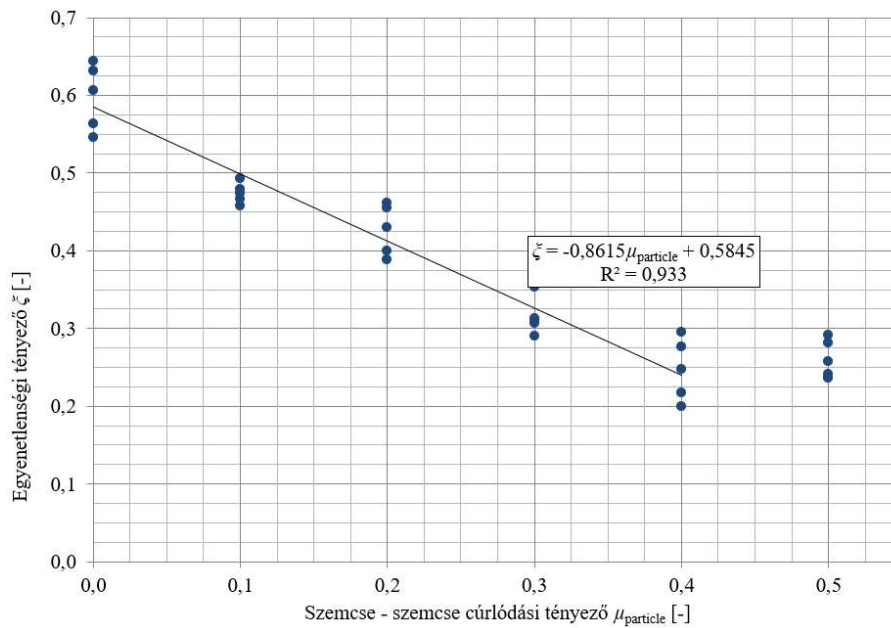
Az egyenetlenségi tényezőt felhasználva megvizsgálatuk, hogy azonos lamella szögállás (27°) és szemcsék közötti súrlódási tényező ($\mu_{szemcse} = 0,2$) mellett a falsúrlódás értékének megváltoztatása hogyan befolyásolja az anyagáramlás egyenetlenségét. A 3.20. ábra mutatja a vizsgálat eredményeit, ahol a falsúrlódási tényező értékei 0 és 0,5 között mozogtak.



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

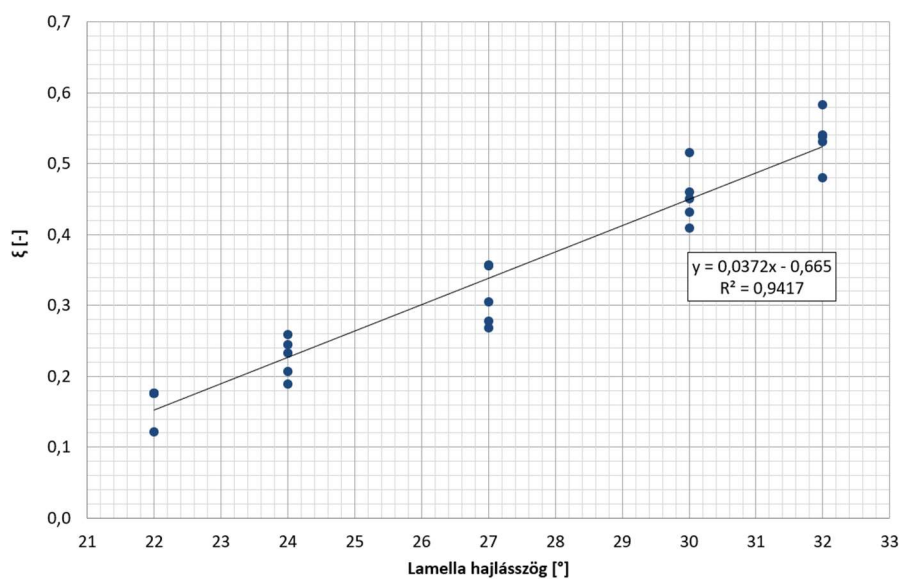
A falsúrlódás növekedése egyértelműen „rontja” az anyagáramlás egyenletességét, mivel magasabb súrlódási tényező esetén a fal erőteljesebben akadályozza a szemcsék mozgását.

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 3.21. ábra mutatja a vizsgálat eredményeit, ahol a szemcse-szemcse súrlódási tényező értékei 0 és 0,5 között mozogtak.



3.21. 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.

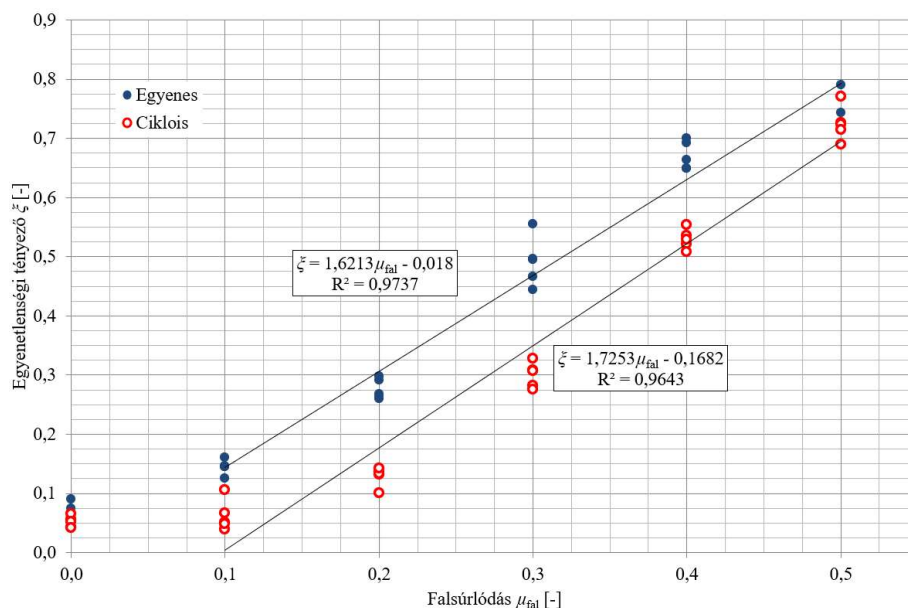
Egyenes lamella esetén megvizsgáltuk a lamella dőlésszög hatását a szemcseáramlás egyenetlenségére, miközben a súrlódási tényezők értékek $\mu_{fal} = 0,25$ és $\mu_{szemcse} = 0,2$. A vizsgált lamella dőlésszögek 22° és 32° között változtak (3.22. ábra). Az ábrán jól látható, hogy a lamella hajlásszög 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.



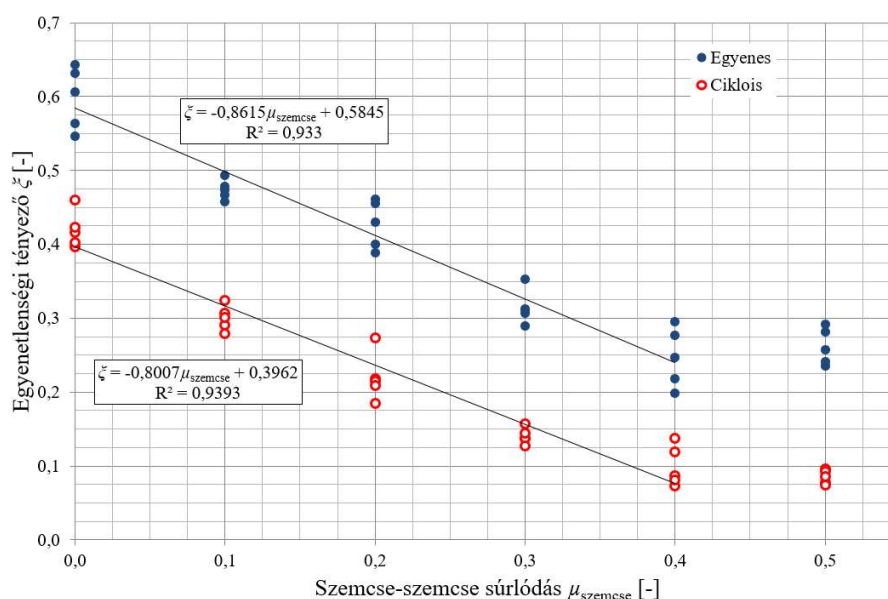
3.22. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a lamella dőlésszög függvényében

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 3.23. ábra és 3.24. ábra szemlélteti, ahol a lineáris szakaszokra illesztett egyenesek egyenletei is láthatók.

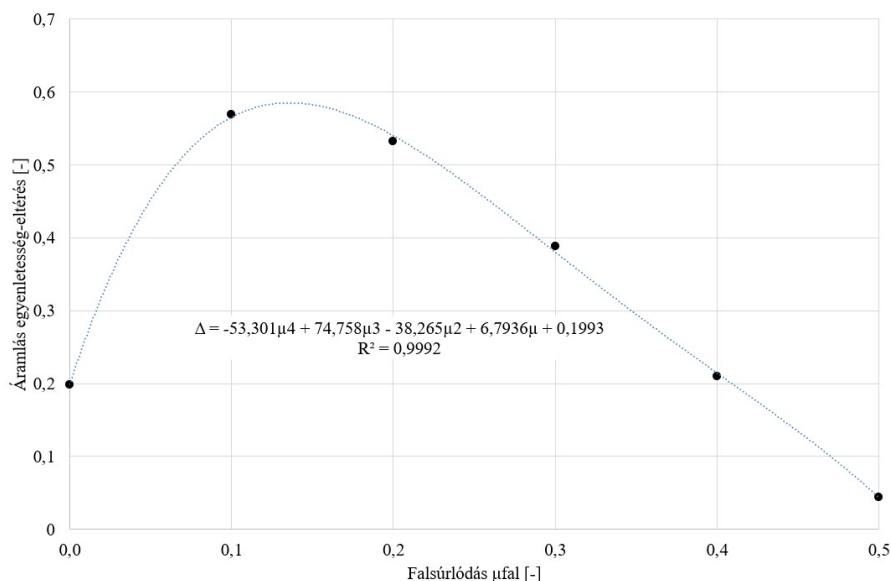


3.23. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-fal súrlódási tényező függvényében egyenes és ciklois lamella esetén

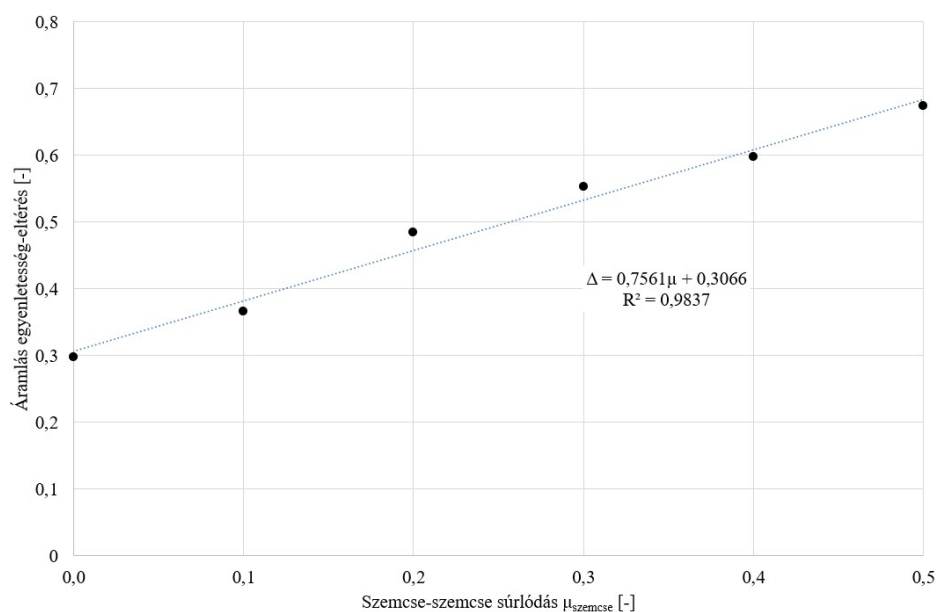


3.24. ábra: Az anyagáramlás egyenetlensége a szemcse-szemcse súrlódási tényező függvényében egyenes és ciklois lamella esetén

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 (3.25 és 3.26).



3.25. ábra: Az áramlás egyenetlenség eltérés egyenes és ciklois lamella esetén, a falsúrlódás függvényében

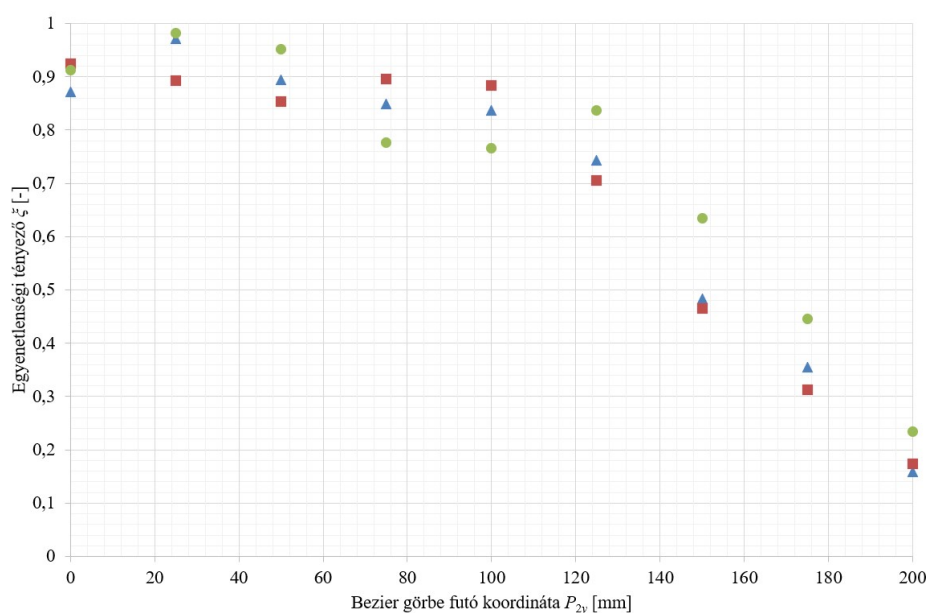


3.26. ábra: Az áramlás egyenetlenség eltérés egyenes és ciklois lamella esetén, a szemcsék közötti súrlódás függvényében

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

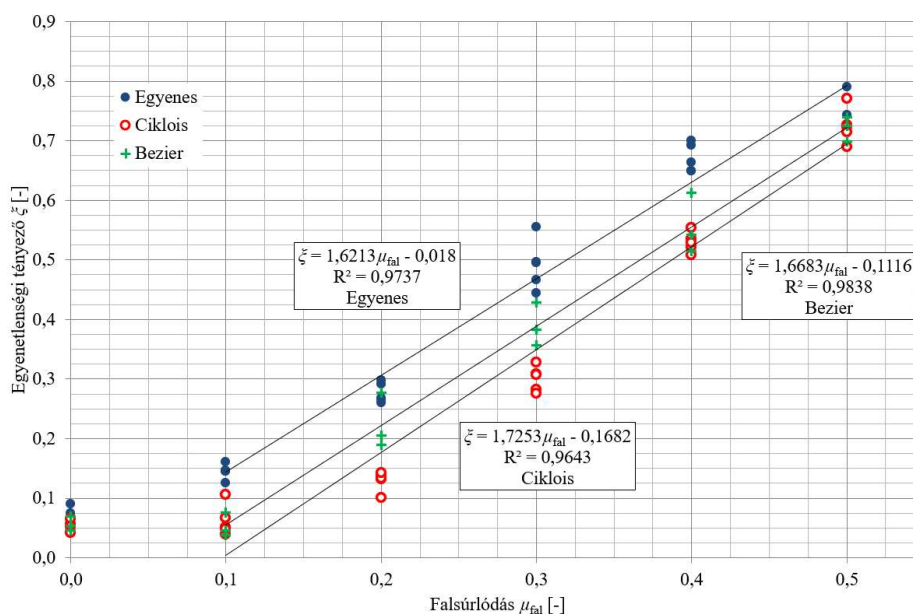
Gyártástechnológiai megfontolások alapján arra jutottam, hogy ciklois alakú lamellák alkalmazása helyett célravezető lenne Bezier-görbe alakú lamellákat alkalmazni. Elsőként különböző, az

eredeti egyenes lamellához illeszthető Bezier görbék közül kiválasztottam azt, amelyik a legjobb egyenetlenségi tényezőjű (3.27. ábra)

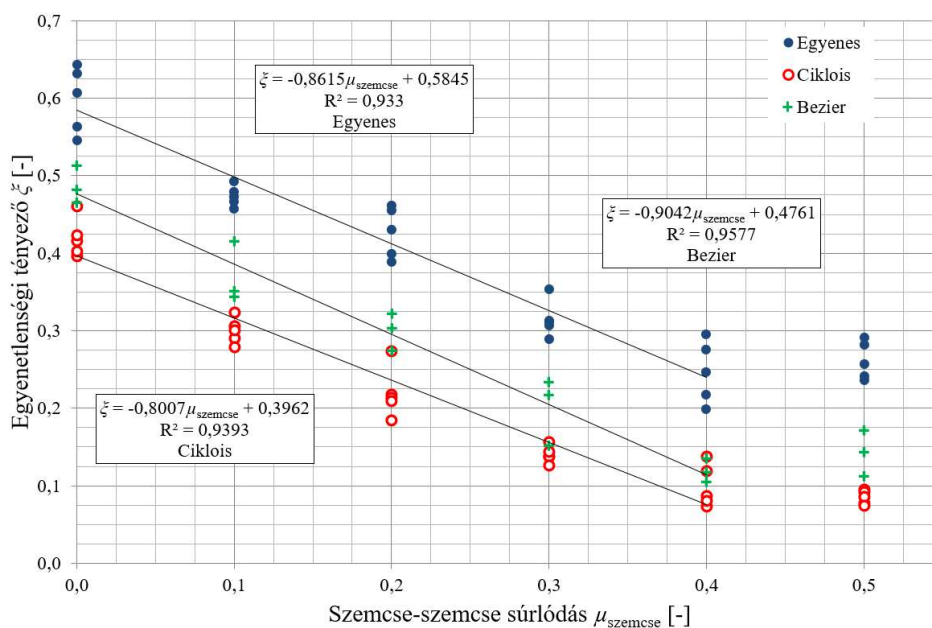


3.27. ábra: Egyenetlenségi tényező változása P_{2y} függvényében

A 3.27. ábrán látható P_{2y} értékek közül kiválasztva a legjobb egyenetlenségi tényezőt adó értéket (a Bezier 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 egyenetlenségre gyakorolt hatása hogyan függ a szemcse-fal (3.28. ábra) és a szemcse-szemcse (4.29. ábra) súrlódási tényező értékétől.



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



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

A 3.28 és 3.29-es ábrák alapján azt a következtetést vonhattam le, hogy Bezier görbe alakú lamella alkalmazásával is jelentős javulás érhető el az áramlás egyenetlenség és így a szárított végtermék homogenitás tekintetében. Amennyiben a Bezier 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 Bezier 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 energiafelhasználását.

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. (megjelenés alatt)
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 (2024) Shear Test as Calibration Experiment for DEM Simulations: Spheropolygonal Particle Model Fme Transactions (1451-2092 2406-128X): 52 4 pp 659-670
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 (2012), Grain velocity distribution in a mixed flow dryer, Advanced Powder Technology 23, 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 lehetőség anélkül, hogy arra nincs mód. Egyvalakiről azonban mindenképpen szeretnék itt megemlíteni.

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.