

MŰSZAKI TUDOMÁNY AZ ÉSZAK-KELET MAGYARORSZÁGI RÉGIÓBAN 2017

**KONFERENCIA
ELŐADÁSAI**

Nyíregyháza, 2017. június 01.

**Szerkesztette:
Edited by**

Dr. Bodzás Sándor

Kiadja:

**Debreceni Akadémiai Bizottság
Műszaki Szakbizottsága**

ISBN 978-963-7064-35-7

Debrecen 2017

SZEMCSÉS ANYAGOK KEVERÉSI TELJESÍTMÉNYIGÉNYE KEVERŐS DOBSZÁRÍTÓBAN

DETERMINATION OF MIXING PERFORMANCE AT AGITATED DRUM DRYER

POÓS Tibor¹, TAMÁS Kornél², KATONA Márton³, HORVÁTH Dániel⁴

¹adjunktus, poos@mail.bme.hu

¹ Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

²adjunktus, tamas.kornel@gt3.bme.hu

² Gép- és Terméktervező Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

³MSc hallgató, marci.katona92@gmail.com

³Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

⁴MSc hallgató, daniel.horvath.nk@gmail.com

⁴Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Kivonat: Különböző halmazállapotú anyagok, elegyek keverése gyakran előfordul a vegyiparban, a gyógyszeriparban, az élelmiszeriparban és a mezőgazdaságban. A keverős dobszárítóban szemcsés anyagok szárítása történik, mégpedig folyamatos keverés mellett, amelynek célja szabad szemcsefelület létrehozása annak érdekében, hogy a szárítás sebessége minél gyorsabb legyen. Méréseink során vizsgáltuk a keverős dobszárító keverési teljesítmény szükségletét különböző anyagnedvességtartalmak, fordulatszámok és töltési fokok mellett.

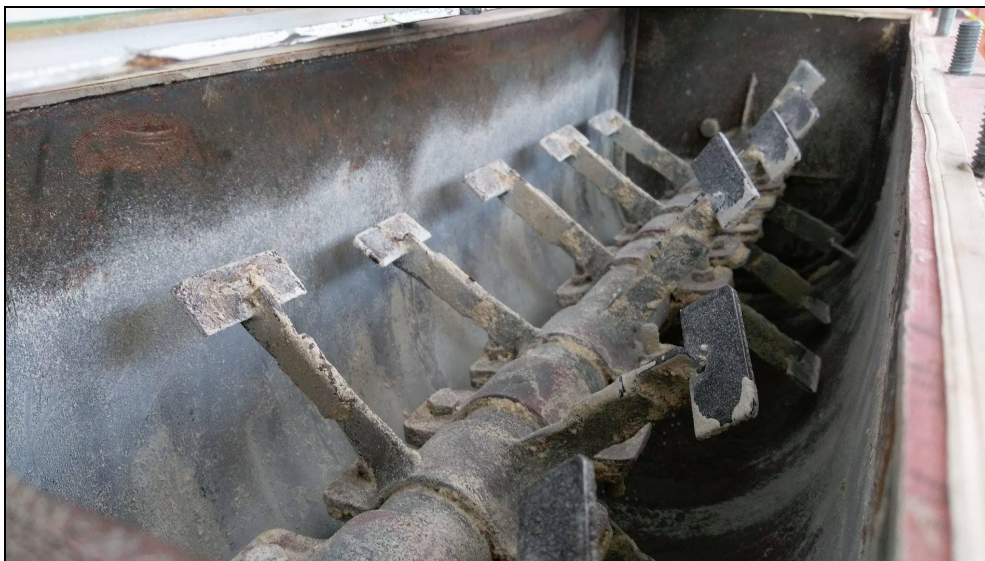
Kulcsszavak: keverős dobszárító, keverési teljesítményszükséglet, szemcsés anyag, nedvességtartalom

Abstract: The mixing of different substances and mixtures is a common procedure in the chemical, pharmaceutical, food and agriculture sectors. In the agitated drum dryer drying of granular materials occurs by continuous mixing to create a free granulate surface in order to achieve faster drying speed. During our measurements the mixing performance of the agitated drum dryer was investigated at different moisture contents, rotary speeds and degrees of filling.

Keywords: agitated drum dryer, performance, granulate, moisture content

1. BEVEZETÉS

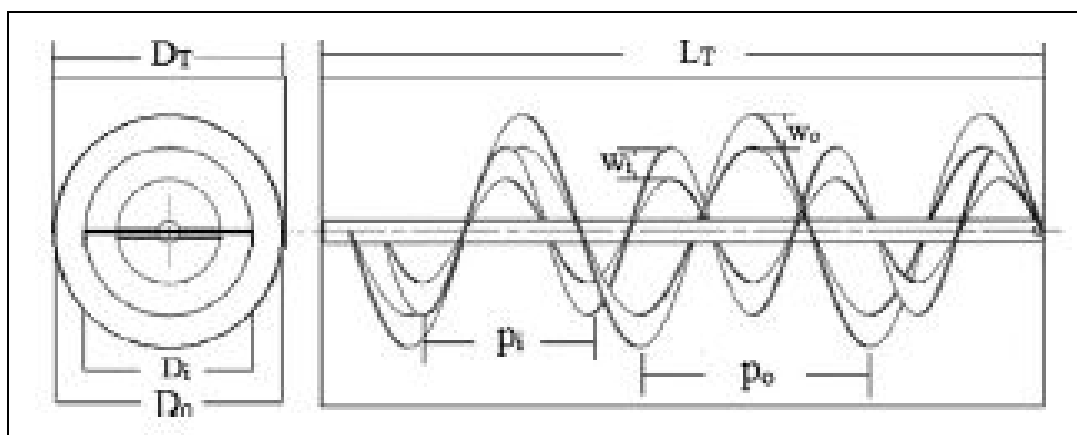
Keverős dobszárítókban történő szemcsés anyagok szárítása során szilárd-szilárd keverésről beszélhetünk. A szárítással egy időben zajló keverési folyamat célja nem csak a homogenizálás, hanem szabad szemcsefelület létrehozása a hatékonyabb szárítás érdekében. Keverős dobszárítók esetén általában homogén anyag szárítása történik. A szárítási folyamat horizontális tartályban történik, ahol a tartályon keresztül áramoltatott levegő veszi fel a szárítandó anyag nedvességtartalmát. A légáram fűtött, az áramlást pedig ventilátor biztosítja. A szárítási folyamat során a tartályban a szemcsés anyag keverése történik, a tartállyal koncentrikusan elhelyezett keverővel. A keverős dobszárítók esetében a keverőelem általában lapátos vagy spirálszalagos.



1. ábra. Keverős dobszáritó horizontális tartálya keverőlapokkal

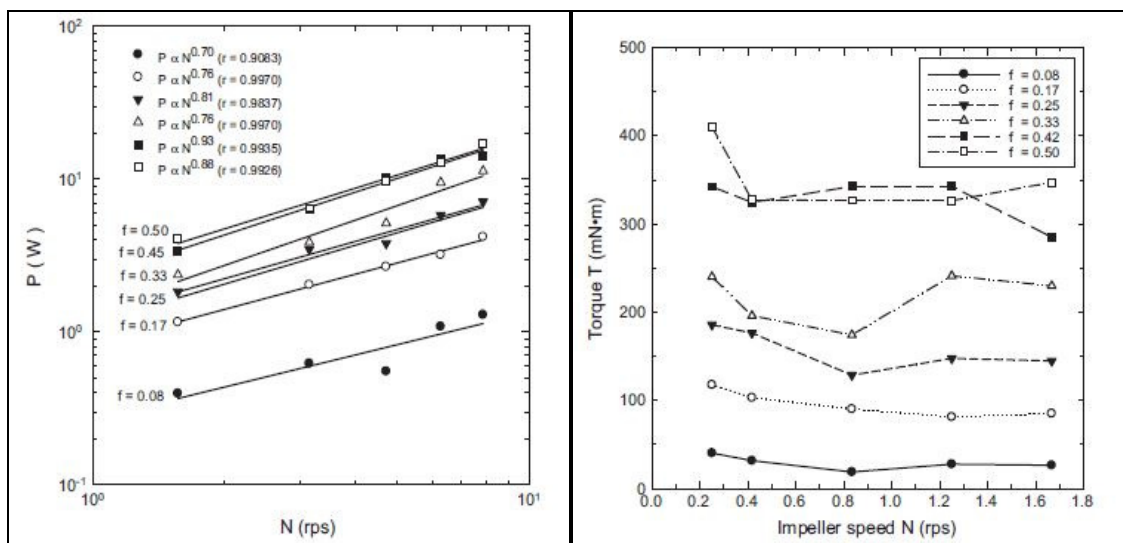
A 1. ábrán látható a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszékén található keverős dobszáritó, melyen a méréseket végeztük.

Szemcsés anyagok keverése során fellépő tengelyteljesítmény szükséglet elméleti meghatározására még nem létezik általános összefüggés. Így hasonló geometriájú keverőt vettünk alapul a kutatásunkhoz [1]. Egy dupla spirálszalagos keverőben, mely a 2. ábrán látható, kukoricakeményítő és jégcukor összekeveréséhez szükséges teljesítményigényt vizsgálták a nedvességtartalom figyelembe vétele nélkül.



2. ábra. A dupla spirálszalagos keverős berendezés sematikus felépítése [1]

A mérés során a fordulatszámot és a töltési fokot változtatva a 3. ábrán található eredményeket kapták.



3. ábra. Baloldalon a keverési teljesítmény, jobb oldalon a felvett nyomaték a fordulatszám függvényében különböző töltési fok esetén [1]

Megfigyelhető, hogy a mérés alapján a töltési fok és a fordulatszám növelésével lineárisan növekedett a keverési teljesítményigény.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

A keverési teljesítmény szükséglet meghatározásakor hántolt kölest töltöttünk a keverős berendezésbe. Az anyagot a kis méretszórása, hidrophil tulajdonsága, megfelelően homogén anyagszerkezete, közel szabályos geometriája, alacsony költsége teszi alkalmassá a vizsgálatra. A köles nedvességtartalmát változtatva méréseket végeztünk keverős dobszáritóban különböző fordulatszám és töltési fok mellett.

2.1. A mérés előkészítése

A hántolt köles por és szennyeződésmentessége, illetve méretének homogenitása szélosztályozó berendezés segítségével lett biztosítva. Az anyag benedvesítésére minden egyes mérés előtt 6 órával került sor. A különböző nedvességtartalmak elérése megfelelő mennyiségű víz hozzáadásával történt. Minden mérés előtt a dobkeverő berendezés $47,1 \text{ dm}^3$ -es térfogatának 25%-ával megegyező ($11,8 \text{ dm}^3$) térfogatnyi köles lett elő készítve.

Az anyag nedvességtartalmak meghatározása szárítókemencébe helyezett kisminták segítségével történt, melynek értékeit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. Táblázat A hozzáadott víz mennyisége és a nedvesség adatok

$V_{\text{víz}} [\text{dm}^3]$	0	0,5	1	1,5	2	2,5
$x [\%]$	8,9	13,9	18,4	22,5	26,3	29,7

ahol:

$V_{\text{víz}}$ – a hozzáadott víz térfogata [dm^3]

x – a nedves anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom [$\text{kg víz/kg n.a.} \cdot 100\%$]

A mérések során a mért teljesítményekből a mechanikai veszteségek miatt kivontuk az

egyes fordulatszámokhoz tartozó üresjárási teljesítményeket. A valós keverési teljesítményadatokat az alábbi formula segítségével számítottuk:

$$P_{\text{valós}} = P_{\text{mért}} - P_{\text{ü}} , \quad (1)$$

ahol:

$P_{\text{valós}}$ – a keverésre fordított teljesítmény [W]

$P_{\text{mért}}$ – teljesítménymérő által mért teljesítmény [W]

$P_{\text{ü}}$ – üresjárási teljesítmény [W].

Innen a felvett nyomatékot az alábbi összefüggéssel számítottuk:

$$M = \frac{P_{\text{valós}}}{\omega} = \frac{P_{\text{valós}}}{2\pi n} , \quad (2)$$

ahol:

M – keveréshez szükséges nyomaték [Nm]

ω – a tengely szögsebessége [rad/s]

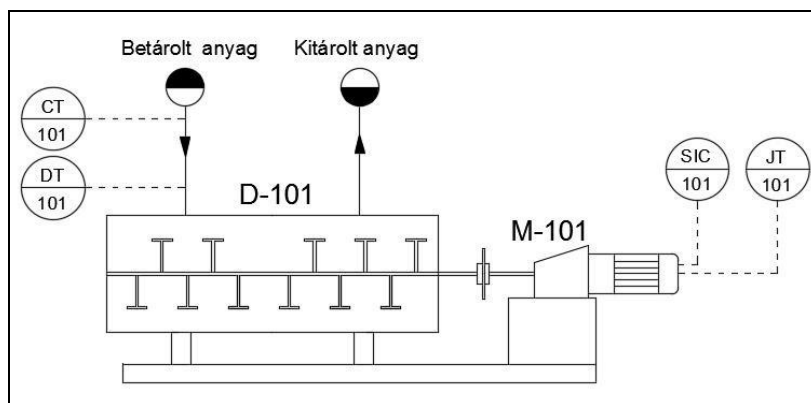
n – a tengely fordulatszáma [1/s].

2.2. Mérőberendezés ismertetése



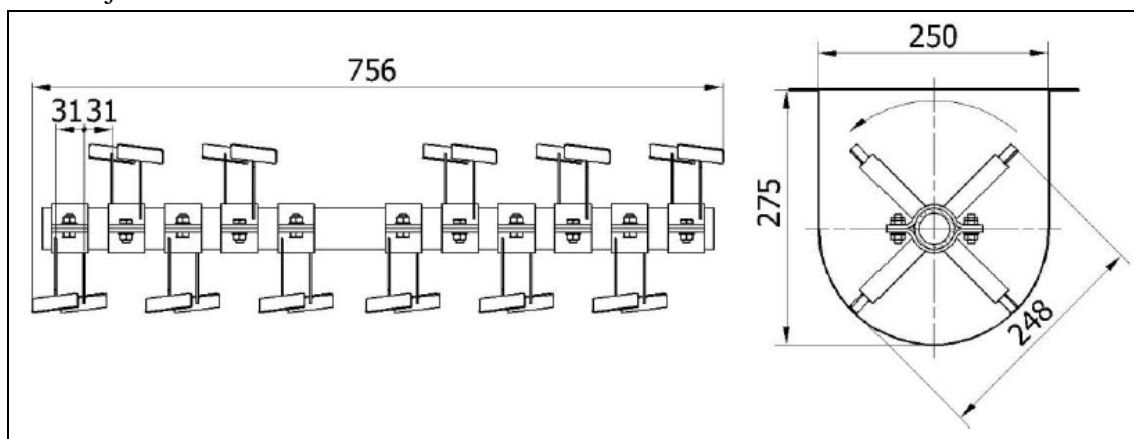
4. ábra. A mérőberendezés fényképe

A 4. ábrán látható a mérések során alkalmazott berendezés, mely egy szakaszos üzemű, vízszintes tengelyű dobszárító. A dobszárító keverőelemét hajtóműves villanymotor hajtja, melynek fordulatszáma frekvenciaváltóval állítható be 0÷50 1/min tartományban. A teljesítmény háromfázisú multifunkcionális teljesítmény távadó műszer (Datcon PQRM5100 31) segítségével számítógépen került rögzítésre. A mérés folyamatábrája az 5. ábrán látható.



5. ábra. A mérőberendezés műszerezett folyamatábrája

Az M-101-es keverő villanymotor típusa NORD Typ SK 80 L/4. A mérőberendezés központi eleme a D-101 jelű dobszáritó. A szakaszos működésű szárító 765 mm hosszú, 250 mm széles és 275 mm magas U-keresztmetszetű dobból áll, amelyet sík lemez fed. 22 db keverőlapát helyezkedik el a dob tengelyével megegyező tengelyen, amelyek felülete egyenként 32,5 cm². A dobszáritóban az anyag átmozgatását az M-101 jelű elektromos motorral hajtott speciális kialakítású keverő végzi. A motorhoz csatlakozik az SIC-101 jelű fordulatszám szabályzó, illetve a JT-101 jelű teljesítménytávadó. A CT-101 jel a bemenő anyag mért nedvességtartalmát, a DT-101 jel pedig a betárolt anyag töltési fokát jelöli. A dobszáritó keverőelemeinek elhelyezkedését, valamint a szárítóterének keresztmetszetét a 6. ábra mutatja.



6. ábra. A dobszáritó keresztmetszete és a keverő kialakítása

2.3. Mérési módszer és kiértékelés

A 2.1 alfejezetben a leírtak alapján benedvesített kölest a 2. táblázat szerint adagoltuk a keverődobba. A töltési fok mérésenként 2,36 dm³ köles hozzáadásával, 5%-os léptékkal lett emelve 25%-ig.

$$V_{\text{köles}} = \frac{\varphi}{100} \cdot V_1, \quad (3)$$

ahol:

φ – a töltési fok [%]

$V_{\text{köles}}$ – a dobban lévő köles mennyisége [dm^3]

V_T – a keverődob térfogata [dm^3]

A 2. táblázatban foglaltuk össze az keverős dobszáritó töltési fokaihoz tartozó köles mennyiségét.

2. Táblázat A dobban lévő köles térfogata a különböző töltési fokok esetén

ϕ [%]	5	10	15	20	25
$V_{\text{köles}}$ [dm^3]	2,4	4,7	7,1	9,4	11,8

Egy mérési sorozat folyamán 9 különböző fordulatszám értéknél vizsgáltuk a teljesítményt, melyet frekvenciaváltóval állítottuk be.

A teljesítmény értékek másodpercenként lettek rögzítve, így az egy perc alatt összegyűjtött adatokat összesítve, az adott időszakra vonatkozó átlagteljesítményt kaptuk.

$$n = f \cdot \frac{19}{10 \cdot 60} , \quad (4)$$

ahol:

f – a frekvenciaváltó segítségével beállított frekvencia [Hz].

Az általunk beállított frekvenciákat és az abból számított tengely fordulatszámokat a 3. táblázatban foglaltuk össze.

3. Táblázat a fordulatszámok különböző frekvenciák esetén

f [Hz]	10	15	20	25	30	35	40	45	50
n [1/s]	0,3	0,5	0,6	0,8	1	1,1	1,3	1,4	1,6

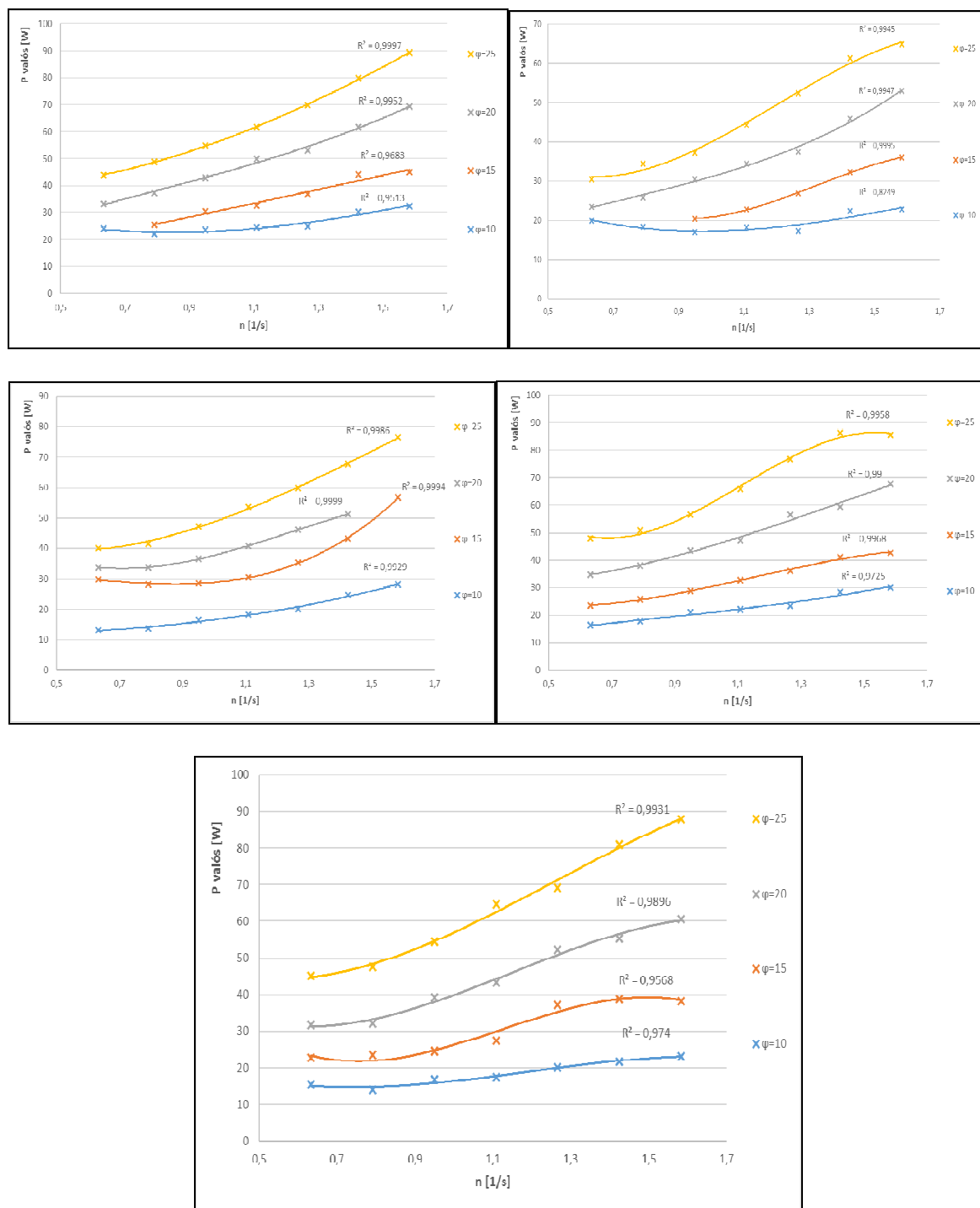
3. EREDMÉNYEK

A kiértékelés során nem lehetett figyelembe venni az 5%-os töltési fokhoz tartozó nyomatékot, mivel azok alacsony teljesítmény értékeket vettek fel. Továbbá 10 és 15 Hz fordulatszámhoz tartozó nyomatékértékek rendre kiugróan magasak voltak. Feltehetően az alacsony fordulatszámnak köszönhetően a teljesítménymérő berendezés nem működött megfelelően, annak mérési hibái miatt nem lehet értékelni ezeket az eredményeket.

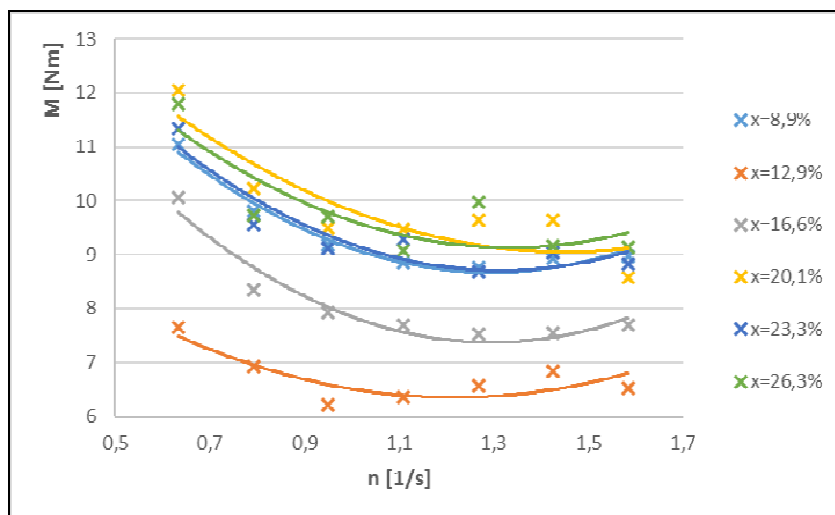
A 7. ábrán látható a keveréshez szükséges teljesítmények a fordulatszám függvényében. A 1. fejezetben bemutatott keverős készüléken [1] mért adatokkal összehasonlítva azonos tendenciájú eredményeket kaptunk a méréseink során. A fordulatszám és a töltési fok növelésével nagyobb tengelyteljesítményre volt szükség a szemcsés anyag keveréséhez.

A nedvességtartalom változása is befolyásolta az eredményeket, növelésével először a teljesítmény csökkenése volt tapasztalható, majd ismételt növekedése.

A 8. ábrán a 15%-os töltési fokhoz tartozó nyomatékok láthatók a fordulatszám függvényében különböző nedvességtartalmakra. Azt tapasztaltuk, hogy úgynevezett kádgörbék alakultak ki, azaz inflexiós pontja van a görbéknek.



7. ábra. A mért teljesítmények a fordulatszám függvényében különböző töltési fok esetén, balról jobbra rendre az első sorban a 8,9% és 13,9%, a második sorban a 18,4% és 22,5%, a harmadik sorban a 29,7%-os nedvességtartalomnál



8. ábra. A nyomaték a fordulatszám függvényében különböző nedvességtartalmak esetén 15%-os töltési foknál

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk során keverős dobszárítóban különböző nedvességtartalmú hántolt kölest kevertünk és mértük a fellépő teljesítmény szükségletet. Méréssorozatot végeztünk el a keverős dobszárító berendezésen, ahol három különböző paraméter, a nedvességtartalom, a dobszárító töltési foka, illetve a keverési fordulatszám változtatása esetén egy teljesítménymérő berendezéssel mértük a keverős dobszárító teljesítményszükségletét. 6 különböző nedvességtartalom, 5 különböző töltési fok, illetve 9 különböző fordulatszám esetén mértük a keverési teljesítményszükségletet. Megállapítható volt, hogy a töltési fok növelésével nő mind a keverési teljesítményszükséglet, mind a keverési nyomatékszükséglet. A fordulatszám növelése szintén a keverési teljesítményszükséglet növekedését eredményezi. Ezzel szemben a keverési nyomatékszükséglet alacsonyabb fordulatszámok esetén magasabb, a fordulatszám növelésével pedig változó tendenciákkal csökken és egy adott értékhez közelít. A nedvességtartalomról elmondható, hogy növelésével nőnek a vizsgált értékek, azonban a legalacsonyabb vizsgált nedvességtartalom szintén magasabb eredményeket produkált, mint az azt követő két nedvességtartalom.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet a Richter Gedeon Talentum Alapítványnak (1103 Budapest, Gyömrői út 19-21.) és az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramnak (NKFIH/PD-116326) a munkában nyújtott anyagi támogatásért.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] **GIJÓN-ARREORTÚA, I., TECANTE, A.,** *Mixing time and power consumption during blending of cohesive food powders with horizontal helical double-ribbon impeller.* Journal of Food Engineering, 2014.
- [2] **HORVÁTH, D., HEGEDŰS, K., VARJU, E.:** *Keverős dobszárító keverési teljesítmény szükségletének meghatározása,* Tudományos Diákköri Konferencia, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2016.

DISZKRÉT ELEMES MÓDSZERREL ÉS MÉRÉSSSEL MEGHATÁROZOTT RÉZSÚSZÖGEK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA

THE COMPARE OF ANGLES OF REPOSE WITH DISCRETE ELEMENT METHOD AND MEASUREMENT

POÓS Tibor¹, HORVÁTH Dániel², TAMÁS Kornél³

¹adjunktus, poos@mail.bme.hu

¹ Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

²MSc hallgató, daniel.horvath.nk@gmail.com

² Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

³adjunktus, tamas.kornel@gt3.bme.hu

³ Gép- és Terméktervező Tanszék, Gépészmérnöki Kar,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Kivonat: A kutatás során különböző nedvességtartalmú hántolt köles rézsűszögeit vizsgáltuk méréssel és diszkrét elemes modellezéssel, majd a kapott eredmények összehasonlításra kerültek. Fő célunk az ismeretlen szimulációs mikromechanikai paraméterek meghatározása volt, mivel azok további kutatás során felhasználásra fognak kerülni a választott szemcsés anyaggal történő további berendezések vizsgálatánál.

Kulcsszavak: rézsűszög, diszkrét elemes módszer, kohézió, nedvességtartalom, hántolt köles

Abstract: In this study the angle of repose of hulled millet with different moisture content was investigated with measurement and discrete element method. The result of the simulation and measurement were compared. The aim of this study to define the unknown micromechanic parameter set of the simulation. In further studies the calibrated parameter set of the modeling of equipments could be used for the chosen granular material.

Keywords: angle of repose, discrete element method, cohesion, moisture, hulled millet

1. BEVEZETÉS

Az élelmiszer- és a gyógyszeripar számos olyan technológiát alkalmaz, ahol szemcsés anyagalmaz keverését, szárítását, mozgását kell elvégezni.

Elsődleges célunk a szemcsés anyagokat feldolgozó berendezések és az azokkal történő mérések validálása diszkrét elemes szimulációval. A mai kor rohamos technológiai fejlődése során ezzel a módszerrel javasolt megfelelő pontossággal, gyorsan és költséghatékonyan közelíteni a szemcsés halmazokban lejátszódó kinetikai és termikus folyamatokat.

Az alapvető problémát az jelentette, hogy ismeretlenek voltak számunkra a vizsgált anyagok mechanikai tulajdonságai, illetve egyes szimulációs beállítási paraméterek is. Ilyen volt például a vizsgált szemcsés anyagnak, a hántolt kölesnek rézsűszög meghatározása. Az anyagválasztás mellett szólt a vizsgálat léptékének megfelelő közel homogén anyagszerkezet és a gömbként közelíthető geometria.

A rézsűszögek meghatározásának főleg a mezőgazdaságban és azon belül a gépek tervezésénél és üzemeltetésénél van nagy szerepe. Ilyenek például a vetést, szórást, betakarítást, anyagmozgatást, szárítást és az adagolást végző berendezések, tároló tartályok. A tényező meghatározásával választ kaphatunk a szemcsés anyagok belső súrlódási jellemzőire.

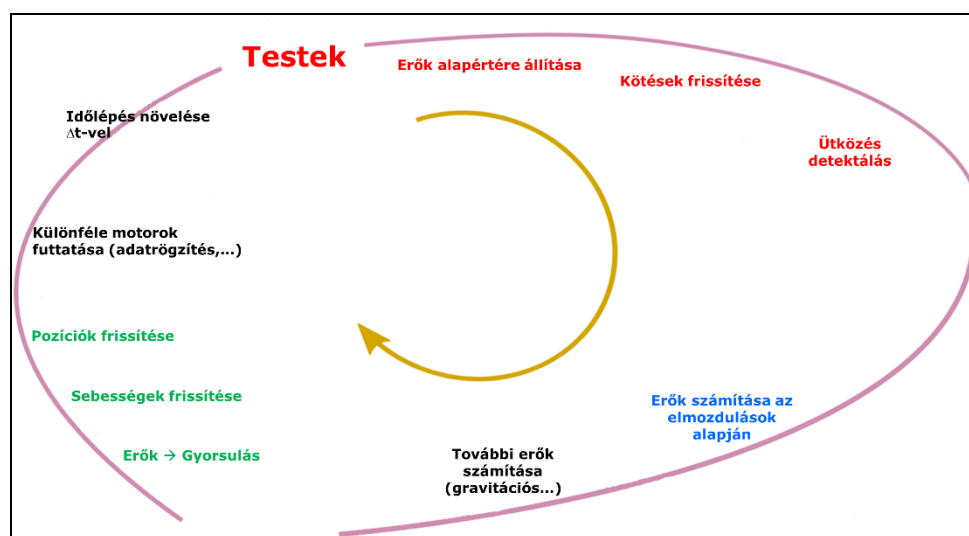
2. A DISZKRÉT ELEMES MODELL BEMUTATÁSA

Jelenleg több diszkrét elemes modellező szoftver áll rendelkezésre kutatások végzésére. Választásunkat segítette, hogy az alkalmazott program ingyenesen elérhető és számos, hasonló szakterületen dolgozó kutató vesz részt a folyamatos fejlesztésében.

2.1. A DEM szimulációs program

Kutatásunkban a *Yade* [1] nyílt forráskódú diszkrét elemes szoftvert alkalmaztuk melyben a modellépítés *Python* nyelven történt.

Többféle úgynevezett belső motor, mint szemcsekapcsolati modell áll rendelkezésünkre a szemcsék között lezajló reológiai folyamatok leírására (például súrlódásos, kohéziós és kapilláris, stb...). A szimuláció során a szoftver explicit időintegrálásos módszert alkalmaz, ami a mozgás- és az erő-elmozdulás törvény közötti iterációjával számol, melynek ciklus diagramja az 1. ábrán látható.



1. ábra. Számítási ciklus a Yade diszkrételemes szoftverrel [1]

Az explicit időintegrálás módszerének első lépése az erők alapértékre állítása, majd a különböző kötések frissítése. Ezek után következik az ütközések érzékelése, majd az általunk meghatározott belső motort leíró törvény alapján a szoftver kiszámítja az elmozdulásokból adódó erőket, melyekből meghatározza a gyorsulásokat, majd frissíti a sebességeket és a pozíciókat. Ezt követően rögzíti a lekért adatokat (pl. erők, elmozdulások, stb.). Végül pedig növeli az időlépést Δt idővel és frissíti a program grafikus megjelenítőjén a testeket és kezdi előlről az egész folyamatot.

Annak érdekében, hogy biztosítsa az explicit időintegrálásos séma stabilitását, a program meghatároz egy felső határt a Δt időlépésre az (1) egyenlet alapján.

$$\Delta t_{krit} = \min_i R_i \cdot \sqrt{\frac{E_i}{E_i}} \quad (1)$$

ahol:

Δt_{krit} – a kritikus időlépés [s]
 R – a szemcsék sugara [m]

- ρ – a szemcsesűrűség [kg/m^3]
 E – a szemcsék mikromechanikai rugalmassági modulusa [Pa]

2.2. A szimulációs környezet felépítése

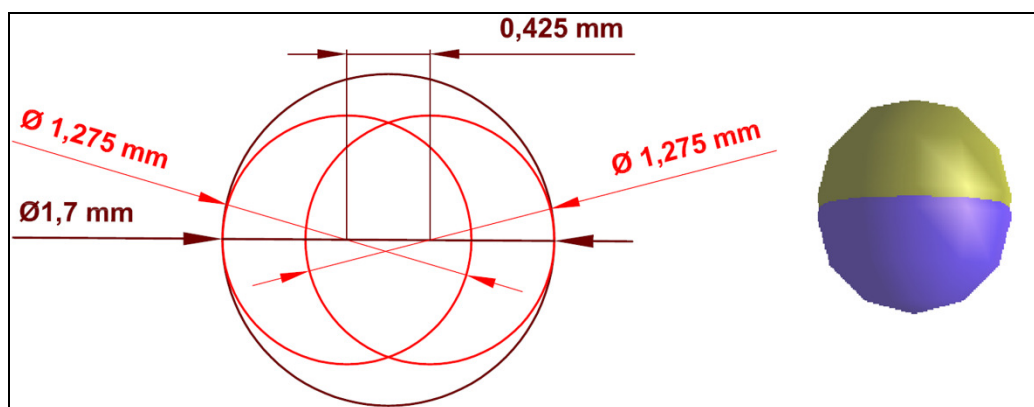
A vizsgálatunkban alkalmazott szemcsés anyag a már korábban említett hántolt köles volt, melynek képe a 2. ábrán látható.



2. ábra. Hántolt köles halmaz

A vizsgálataink célja az anyag nedvességtartalmának hatása az anyaghalmoz mechanikai tulajdonságára.

Mivel a kutatás során eltérő nedvességtartalmakat alkalmaztunk, ezért a folyamatok leírásához úgynevezett kohéziós motort (azaz kohéziós kapcsolati modellt) választottunk, ami az adhézióval is számol. A szemcsék alakját szabályos gömbbel és úgynevezett „clump”-pal közelítettük. A „clump”-ok több gömbből felépített szemcsék, melyek fedhetik is egymást. Segítségükkel jobban lehet modellezni a szemalak hatását a teljes halmaz viselkedésében, ahol az elforgások korlátozottá válnak, illetve a befeszülések és kiékelődések a gömbbel ellentétben könnyebben alakulnak ki. Az általunk felépített „clump” sematikus és valós programbeli kinézete a 3. ábrán látható.



3. ábra. Baloldalon sötét színnel jelölve a gömb, pirossal a „clump” méretei, jobb oldalon a YADE programban létrehozott „clump”

A 3. ábrán sötét színnel jelöltük a közelítésre használt gömb elemet, míg pirossal a „clump”-ot. A méretezésénél figyelembe vettük, hogy a legnagyobb mérete megegyezzen a szabályos gömb átmérőjével (1,7 mm), valamint egymástól egy sugárnyi értékkel (0,425 mm) toltuk el a középpontjukat.

2.3. A szimulációs beállítási paraméterek

Az ismeretlen paraméterek közül sok már korábban meghatározásra került mérések alapján, viszont kalibrációkat is kellett végeznünk, mert a mikro- és makromechanikai paraméterek közvetett módon adhatók meg.

Meghatározásra kerültek a szemcsés anyag belső súrlódási szögei különböző nedvességtartalmaknál nyíródobozos vizsgálat [2] alkalmazásával. Továbbá szitaanalízis segítségével meghatároztuk a szemcseméretnek nagyságának az eloszlása, valamint porozitás mérésekből a szemcsesűrűséget.

A diszkrét elemes modellben használt mikromechanikai rugalmassági modulust és a nyíródobozos vizsgálat alapján a kohéziós erők jellemző nyíró- és normálszilárdságokat előzetes szimulációs tapasztalatok, illetve szakirodalmi adatok [3-5] alapján vettük fel.

A meghatározandó ismeretlen szimulációs paramétereink a dimenzió nélküli gördülő (*etaRoll*) és csavaró (*etaTwist*) szilárdságok, melyeket úgy vizsgáltunk, hogy a két paramétert egyenlővé tettük és egyszerre változtattuk [1]. Ezeket a továbbiakban *etanak* jelöljük.

A beállítási paramétereink gömb és „clump” esetén az 1. táblázatban láthatóak. Időlépésnek mindkét esetben körülbelül $5 \cdot 10^{-5}$ másodpercet alkalmaztunk a kritikus időlépés (1) alapján.

1. Táblázat A diszkrét elemes modellezés beállítási paraméterei

x	ρ	φ	Gömb			"Clump"		
			E	$\tau_{nyíró}$	$\sigma_{normál}$	E	$\tau_{nyíró}$	$\sigma_{normál}$
12,5	1381	42,2	2	6,1	6	0,2	0,7	0,5
14,5	1385	42,2	2	5,2	5	0,2	1,2	1
19,4	1394	41,5	2	4,2	4	0,2	1,7	1,5
21,9	1399	40,5	2	3,4	3	0,2	2	1,8
24,7	1404	39,3	2	1,71	1,5	0,2	2,2	2
29,8	1413	36,1	2	2,22	2	0,2	2,5	2

ahol:

- x – a nedves anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom százalékos értéke [%]
- ρ – a szemcsesűrűség [kg/m^3]
- E – a mikromechanikai rugalmassági modulus [MPa]
- φ – a belső súrlódási szög [$^\circ$]
- $\tau_{nyíró}$ – a kohéziós vagy kötési nyírószilárdság [kPa]
- $\sigma_{normál}$ – a kohéziós vagy kötési normálszilárdság [kPa]

„Clump”-ok esetén, mivel a két gömb fedi egymást, ezért a közös térfogatban a sűrűségek a duplájára növekednek.

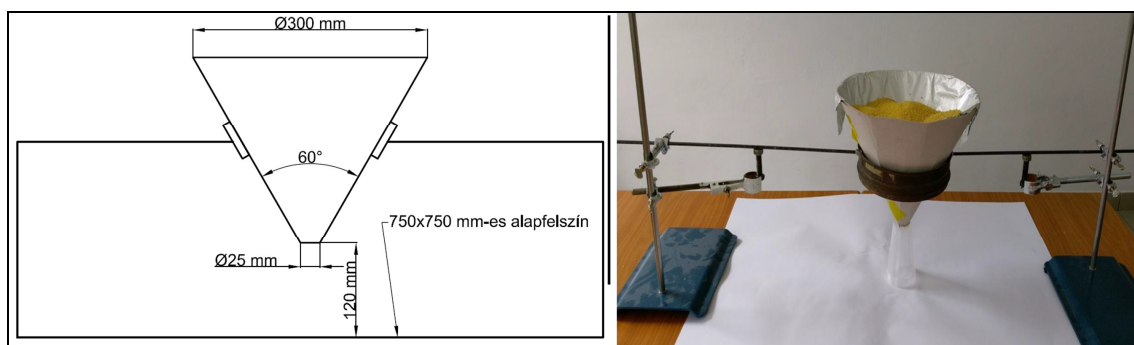
Továbbá a programban a kohéziós erők működésbe léptetéséhez két mód áll rendelkezésünkre. Az egyik lehetőség, melyet ebben a kutatásban alkalmaztunk, az egyszeri, adott időpillanatban történő kohéziós kapcsolatok létesítése a jelenleg érintkező szemcsék között. Ilyenkor egy időlépéssel később új kapcsolatok már nem alakulnak ki. A másik lehetőség a folyamatos, új kontaktok esetén is kialakuló kohéziós kapcsolatok létesítése.

3. MÉRÉSI MÓDSZER

A szemcsés anyagok rézsűszögének meghatározásának módszerét szabvány írja elő. A szemcseátmérő függvényében más és más mérési elrendezést javasolnak. A hántolt kölesre jellemző 1,7 mm-es szemcseátmérőhöz tartozó mérőberendezés kialakítást az alábbiakban kerül ismertetésre.

3.1. A laboratóriumi mérőberendezés

A mérőberendezés MSZ EN szabvány [6] alapján került megépítésre, melynek sematikus és valós elrendezése a 4. ábrán látható.



4. ábra. Baloldalon a mérőállomás szabvány szerinti mérete, jobboldalon annak megfelelően megépített elrendezése látható

A tölcsér kialakítása 1,5 mm vastag kartonpapírból történt, valamint alufóliával lett bevonva belülről a szemcsés anyag nedvességtartalma miatt. A tölcsért az állványhoz egy tartógyűrű segítségével rögzítettük.

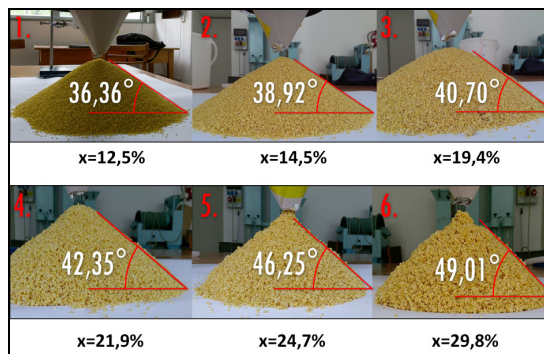
3.2. A laboratóriumi mérés

A mérendő hántolt kölest először az állandó szemcseméret elérése érdekében szétosztályozó segítségével szeparáltuk, majd adott mennyiségű víz hozzáadásával, 24 órával a mérés előtt folyamatos óránkénti keveréssel nedvesítettük be az anyagot (12,5%, 14,5%, 19,4%, 21,9%, 24,7%, 29,8% értékekre).

A mérés a szabványban [6] meghatározott módon történt. Addig kellett a tölcsérből kölest kiengedni, amíg a keletkezett kúpszerű szemcsehalmaz teteje elérte a kiömlőnyílást.

3.3. A kiértékelés menete

A kiértékelés kétféle módon lehetséges. Az egyik az 5. ábrán látható, ahol a kúpos szemcsehalmazra érintők behúzásával válik leolvashatóvá a rézsűszög. Ezt a módszert használtuk a szimulációs eredmények kiértékelése során, mivel a számítási kapacitásigény miatt kevesebb szemcsemennyiséggel dolgoztunk és a tölcsér kiömlőnyílásának magasságát is csökkentettük.



5. ábra. Az érintők behúzásával történő kiértékelés különböző nedvességtartalmak esetén

A másik módszer a szabványban [6] leírt módon történhet, ezt alkalmaztuk a laboratóriumi mérések kiértékelésénél. Az alapra 45°-os osztásközü egyeneseket húztunk, majd lemértük a halmaz átmérőit az egyenesek mentén és átlagoltuk az eredményeket. Ezek után a szabványban előírt képlet alapján kiszámítottuk a rézsűszög értékét:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{240}{\bar{d} - 25} \right), \quad (2)$$

ahol:

α – a számított rézsűszög [°]

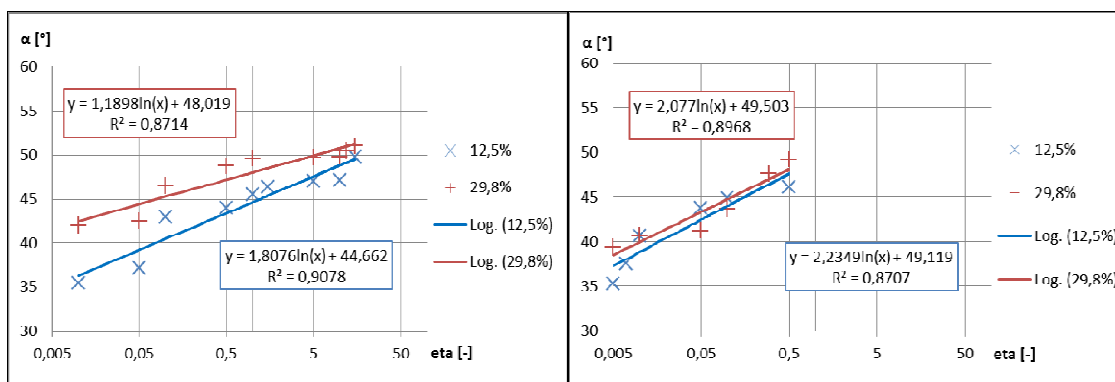
$\bar{d}$ – a leolvasott átmérők alapján átlagolt átmérő [mm].

4. EREDMÉNYEK

Szabványos mérési eljárás alapján kapott eredmények segítségével meghatároztuk a diszkrét elemes modellezésnél használt dimenzió nélküli gördülő és csavaró szilárdság értékeket.

4.1. A szimulációval és méréssel kapott eredmények és a hozzá tartozó eta beállítási paraméterek

Először szimulációval érzékenységi vizsgálatokat végeztünk a legnagyobb és legkisebb nedvességtartalmaknál az eta értékek logaritmikus változtatásával, melynek hatása a 6. ábrán látható. Ennek oka a szimulációs időtartam csökkentése volt.



6. ábra. Baloldalon gömb, jobb oldalon „clump” esetén a modellezett rézsűszögek az eta függvényében logaritmikus léptékezésű skálán, 12,5%-os és 29,8%-os nedvességtartalmaknál

Mint látható „clump” esetén a legnagyobb és a legkisebb nedvességtartalmaknál felvett munkapontokra illesztett trendvonalak szűkebb tartományt fednek le a gömbhöz képest. Ennek oka a „clump”-ok elforgásának korlátozottsága, illetve a befeszülések és kiékelődések könnyebb kialakulása.

A mért és modellezett rézsűszögek a 2. táblázatban láthatóak, ahol a kiértékelési és leolvasási bizonytalanságok miatt a modellezéssel kapott eredményeket intervallumokba foglaltuk.

2. Táblázat A méréssel és modellezéssel kapott eredmények

		x	12,5	14,5	19,4	21,9	24,7	29,8
Mérés		α_m	36,4	38,9	40,7	42,4	46,3	49
Modellezés	Gömb	α_{sz}	35,5-37,2	38,7-40,5	39,7-41,1	42,3-43,3	45,7-46,5	48,8-49,6
		Eta	0,01-0,05	0,01-0,05	0,05-0,07	0,01-0,03	0,1-0,3	0,5-1
	"Clump"	α_{sz}	35,3-37,5	37,2-40,7	37,9-41,4	41,9-42,7	46,6-48,8	47,6-49,2
		Eta	0,005-0,007	0,005-0,007	0,01-0,03	0,07-0,1	0,5-0,7	0,3-0,5

ahol:

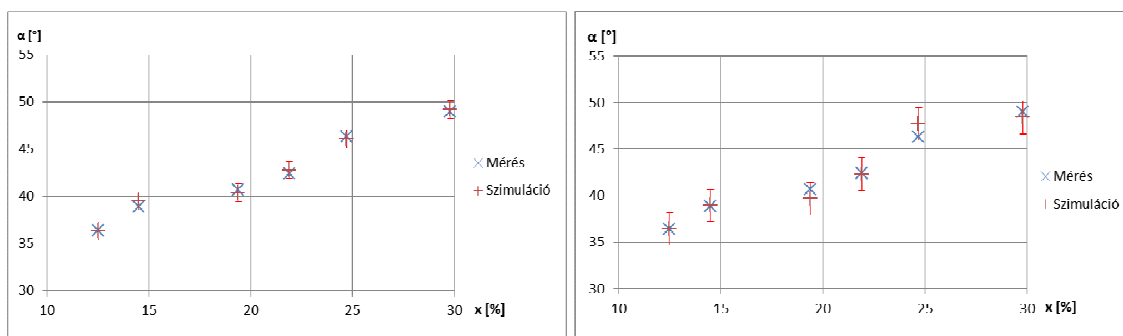
α_m – a méréssel meghatározott rézsűszög [°]

α_{sz} – a diszkrét elemes modellezéssel meghatározott rézsűszög [°]

Eta – a dimenzió nélküli gördülő és csavaró szilárdság [1]

4.2. Méréssel és modellezéssel kapott rézsűszögek összehasonlítása

A méréssel és modellezéssel kapott rézsűszögek a 7. ábrán láthatók, hibasávval jelöltük a 4.1. alfejezetben megadott intervallumokat.



7. ábra. Baloldalon gömb, jobb oldalon „clump” esetén a rézsűszögek a nedves anyagra vonatkoztatott nedvességtartalom függvényében

Azt tapasztaltuk, hogy a nedvességtartalom növelésével a rézsűszög nőtt és ezt a megfigyelést az elvárások szerint a diszkrét elemes modellezés során is megkaptuk. Annak ellenére, hogy a gömb alkalmazása esetén a kohéziós nyíró- és normálfeszültségek növelésével a szemcsék a szimulációban jobban összetapadtak, a nyíródobozos vizsgálattal [2] ellentétben a nedvességtartalom növekedésével csökkenő tendenciát mutattak, viszont így is hozták az elvárt eredményeket. „Clump” esetén ezeket a feszültségeket növeltük a nedvességtartalom növekedésével, de így is az elvárt eredményeket kaptuk. Tehát a rézsűszög mérésénél inkább az eta paraméterek befolyásolták a rézsűszögek alakulását.

4. ÖSSZEFOGLALÁS, KÖVETKEZTETÉSEK

Kutatásunk során hántolt köles esetén szabvány szerinti méréssel és diszkrét elemes modellezéssel (DEM) meghatároztuk a rézsűszögeket különböző nedvességtartalmak esetén. A szemcsék geometriáját gömbbel és több gömbből felépített úgynevezett „clump”-pal közelítettük a modellezések során.

Megfigyelhető volt, hogy a nedvességtartalom növekedésével a rézsűszög értéke is nőtt, amit a számítógépes szimuláció alkalmazásával, megfelelő beállítási paraméterekkel jó közelítéssel modelleztünk.

A mérési adatok segítségével meghatároztuk a diszkrét elemes modellezés során alkalmazott dimenzió nélküli gördülő és csavaró szilárdságokat (*eta*) különböző nedvességtartalmakhoz. Az érzékenységi vizsgálattal elért eredmények, tapasztalatok későbbi kutatásunk során kerülnek felhasználásra.

További tapasztalatunk volt, hogy a szimulációs beállítási paraméterek közül a mikromechanikai rugalmassági modulus növelésével szintén növekedtek a szimulált rézsűszögek nagysága. Valamint a diszkrét elemes modellezés során a rézsűszögek mérésénél a szemcsék közötti összetapadást biztosító kohéziós nyíró- és normálszilárdságok nem befolyásolták számottevően az eredményeket, hanem inkább az *eta* paraméter változtatása volt nagyobb hatással.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönet Iván Lászlónak a mérések elvégzéséért, valamint a Richter Gedeon Talentum Alapítványnak (1103 Budapest, Gyömrői út 19-21.) és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak (NKFIH/PD-116326) a munkában nyújtott anyagi támogatásért.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ŠMILAUER, V., et al., *Reference manual. In Yade Documentation 2nd ed The Yade Project, 2015*, DOI 10.5281/zenodo.34073 (<http://yade-dem.org/doc/>)
- [2] HORVÁTH, D., HEGEDŰS, K., VARJU, E.: *Keverős dobszárító keverési teljesítmény szükségletének meghatározása*, Tudományos Diákköri Konferencia, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2016.
- [3] HORABIK, J., MOLENDÁ, M.: *Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: A review*, Biosystems Engineering 147, p. 206-225, 2016.
- [4] TAMÁS, K., FÖLDESI, B., RÁDICS, J. P., JÓRI, J. I., FENYVESI, L.: *A Simulation Model for Determining the Mechanical Properties of Rapeseed using the Discrete Element Method*, Periodica Polytechnica Civil Engineering, p. 575-582, 2015, DOI: 10.3311/PPci.8173.
- [5] Cundall, P. A., Strack, O. D. L.: *A discrete numerical model for granular assemblies*, Geotechnique 29, p. 47-65, 1979.
- [6] MSZ EN 12047:1998 szabvány: *Szilárd műtrágyák. A statikus rézsűszög meghatározása (az ISO 8398:1989 módosítása)*, 1998.