



SZENT ISTVÁN EGYETEM

SILÓK GRAVITÁCIÓS ÉS VIBRÁCIÓS ÜRÍTÉSE

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Safranyik Ferenc

Gödöllő
2016

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudományok

vezetője:

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

Témavezető:

Prof. Dr. M. Csizmadia Béla
egyetemi tanár, CSc
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Mechanikai és Géptani Intézet

Társ-témavezető:

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

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	1
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	5
1.1. A téma időszerűsége, jelentősége	5
1.2. Célkitűzések	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	7
2.1. Kísérleti silómodellek	7
2.1.1. <i>Hengeres silók szabad kifolyásának vizsgálata</i>	7
2.1.2. <i>Szögletes silók szabad kifolyásának vizsgálata</i>	8
2.1.3. <i>Hengeres silók vibrációs ürítésének vizsgálata</i>	9
2.2. A diszkrét elemes módszer alkalmazhatósági korlátai	10
2.2.1. <i>A mikromechanikai paraméterek meghatározása</i>	10
2.2.2. <i>A numerikus modellek számításiigényének csökkentése</i>	11
2.3. Silókifolyás mikroszerkezeti modellezése	12
2.3.1. <i>Szemcse- és kapcsolati modell</i>	12
2.3.2. <i>A szimulációs folyamat leírása</i>	13
3. EREDMÉNYEK	15
3.1. A mikroszerkezeti paraméterek meghatározási módszere	15
3.1.1. <i>Paraméterérzékenység vizsgálat</i>	16
3.1.2. <i>A félautomata kalibrációs algoritmus</i>	16
3.2. A diszkrét elemes módszer alkalmazhatóságának kiterjesztése	17
3.2.1. <i>Paraméterérzékenység vizsgálat</i>	17
3.3. Általánosított, numerikus silómodell	19
3.3.1. <i>A kifolyási mód meghatározása</i>	19
3.3.2. <i>A kifolyási tömegáram meghatározása</i>	20
3.4. Az Oldal-féle analitikus kifolyási modell kiterjesztése	21
3.5. Szemestermények vibrációs ürítése	22
3.6. Kohéziós szemcsés halmazok vibrációs ürítése	23
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	24
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	27
6. ÖSSZEFOGLALÁS	28
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK	29

JELÖLÉSJEGYZÉK

Jelölések:

A	rezgésamplitúdó	[mm]
a	a szögletes siló kifolyónyílásának szélessége	[mm]
b, c	a szögletes silótest mélysége és szélessége	[mm]
D	a silótest átmérője	[mm]
d	a kifolyónyílás átmérője	[-]
d_p	a szemcsék jellemző mérete	[mm]
E	rugalmassági modulus	[MPa]
f	rezgésfrekvencia	[Hz]
g	gravitációs gyorsulás	$[\frac{m}{s^2}]$
Q	térfogatáram	$[\frac{m^3}{s}]$
r_p	szemcsesugár	[mm]
W	kifolyási tömegáram	$[\frac{kg}{s}]$

Görög betűk:

$\alpha, \alpha_0, \alpha_1$	fázisszögek	[-]
δ	a boltozat alaktényezője	[-]
θ	silógarat félkúpszöge	[°]
μ_b	a szemcsehalmaz belső súrlódási tényezője	[-]
ν	Poisson-tényező	[-]
ρ_h	halmazsűrűség	$[\frac{kg}{m^3}]$
Ψ	fajlagos kifolyási tömegáram	[-]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A téma időszerűsége, jelentősége

Az alapanyagok, félkész-, késztermékek szinte az ipar valamennyi területén szemcsés anyagalmaz formájában jelennek meg. Ilyenek például az ömlesztett mezőgazdasági anyagok, élelmiszeripari alapanyagok, műanyagok, vegyszerek, ásványi anyagok (gondoljunk akár egy zsák búzára, vagy csavaranyák sokaságára egy gépgyárban). Ezek szállítása, tárolása, feldolgozása során különleges figyelmet kell fordítani a halmazok speciális mechanikai tulajdonságaira. Nem szokványos viselkedésük, a halmazok diszkrét szerkezeti felépítéséből adódik: bizonyos körülmények között egy szemcsehalmaz szilárdtestekhez hasonlóan viselkedik, teherviselésre képes, ám a körülmények megváltozásával ugyanez a halmaz folyadékszerű viselkedést is mutathat. E kettősség megnehezíti az egyes fizikai jelenségek pontos leírását, a halmaz mechanikai viselkedésének előrejelzését.

A fenti kettősségből adódó problémák megoldását segítheti a napjainkban egyre szélesebb körben elterjedő diszkrét elemes módszer alkalmazása. A módszer lényege, hogy a diszkrét felépítésű halmazt nem folytonos tömegeloszlású testként, hanem különálló elemek együtteseként próbáljuk leírni. A szemcsehalmazok különleges mechanikai tulajdonságai miatt a kontinuum modellek csak szűk terhelési- és szemcseméret tartományban használhatóak és ha sok szemcse alkotta, nagy kiterjedésű halmaz mechanikai tulajdonságait kell vizsgálni hibájuk elfogadhatatlanul nagymértékű. A diszkrét rendszert alkotó valamennyi szemcse különálló modellezésével az egyes fizikai jelenségek pontosabban írhatóak le. A diszkrét elemes módszer hátránya, hogy jelenleg is fejlődik, gyakorlati alkalmazása egyelőre erősen korlátozott, ezért a használhatóság korlátait mindenképpen vizsgálni és lehetőségek szerint tágítani kell.

1.2. Célkitűzések

A fentiek alapján kutatómunkám három fő tématerületre terjed ki: a modellezéshez használatos, jelenleg is fejlődő diszkrét elemes módszer alkalmazásának kiterjesztésére, a gravitációs ürítésű, mezőgazdasági silók kifolyási tömegáramának meghatározására, valamint a vibrációs silóürítés vizsgálatára.

A diszkrét elemes módszer alkalmazási lehetőségeinek kiterjesztéséhez olyan új eljárásokat dolgozok ki, amelyekkel a gyakorló mérnökök az eddigieknél egyszerűbben és szélesebb körben használhatják a tervezési folyamatokban ezt a numerikus módszert. A diszkrét elemes módszer gyakorlati kiterjesztésével kapcsolatos céljaim:

- A diszkrét elemes módszerben használatos anyagjellemzők és modellparaméterek meghatározási módjának egyszerűsítése és gyorsítása. Olyan eljárás kidolgozása, amellyel a *kalibrációs folyamat idő- és energiárfordítás igénye csökkenthető* és a kalibráció részben *automatizálható*.
- Olyan *eljárás kidolgozása*, amellyel a nagyszámú szemcséből álló halmazok modellezésének *időszükséglete csökkenthető*. A numerikus modell megoldásakor az erőforrás igények mérséklése oly módon, hogy az ne befolyásolja a számítás eredményét.

Mivel jelenleg nem létezik olyan kifolyási modell, amellyel térfogati kifolyású silók tömegárama elfogadható pontossággal ($\pm 5\%$ -os hibahatáron belül) meghatározható, ezért kutatási céljaim gravitációs silóürítés területén:

- *Térfogati kifolyású* silók tömegáramának pontos meghatározására alkalmas, kísérleti vizsgálatokkal ellenőrzött számítási modell létrehozása.
- A jelenleg kör keresztmetszetű silók tömegáramának számítására használható Oldal-féle kifolyási modell általánosítása. Annak vizsgálata, hogy *eltérő silókeresztmetszet* esetére ez a modell hogyan terjeszthető ki.

Vibrációs kitároló berendezések használatával a kohéziós, finomszemcsés halmazok ürítésekor gyakran kialakuló stabil boltozat megszüntethető, az anyagáram megindítható. Az ilyen berendezések helyes üzemeltetésére vonatkozó ajánlások a mezőgazdasági és takarmánykeverő üzemek kiesési költségeit csökkenthetik, a kívánt kifolyási tömegáram beállítása az üzemek működését hatékonyabbá teheti. Emiatt kutatásom harmadik nagy részterülete a rezgésparaméterek (frekvencia, amplitúdó) silókifolyásra gyakorolt hatásának vizsgálata.

Céljaim vibrációs silóürítés területén:

- A rezgésbevezetés, valamint a rezgésparaméterek (*frekvencia, amplitúdó*) szemes termények kifolyására gyakorolt *hatásának elemzése*. A gerjesztés hatására az áramlási képből, magmozgásokban fellépő változások elemzése.
- Kohéziós, finomszemcsés szemcsés halmazok vibrációs kifolyásának, valamint a kialakuló stabil boltozatok megszüntetési (és kialakulásuk megelőzési) lehetőségeinek vizsgálata. A kifolyási jelenség és a *rezgésparaméterek* (frekvencia, amplitúdó) közötti összefüggések feltérképezése.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

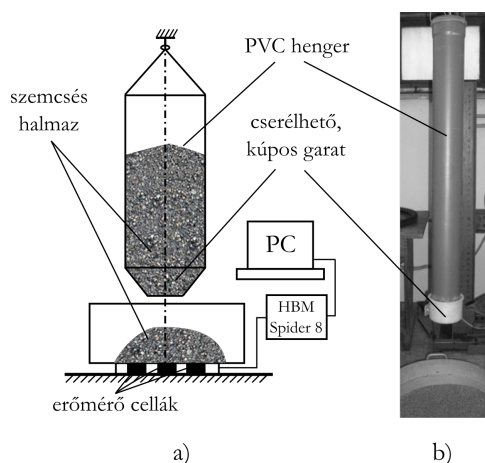
Ebben a fejezetben a kutatási céljaim megvalósításához használt modellezési eljárásokat és kísérleti módszereket mutatom be.

2.1. Kísérleti silómodellek

Az egyes jelenségek megértéséhez, az azokat befolyásoló faktorok hatásának feltérképezéséhez és a szakirodalmi áttekintésben bemutatott problémákat, hiányosságokat kezelő új modellek helyességének igazolásához kísérleti vizsgálatokat végeztem. A mérőeszközöket és kiértékelési módszereket a következőkben mutatom be.

2.1.1. Hengeres silók szabad kifolyásának vizsgálata

A hengeres silók kifolyásának kísérleti vizsgálatát a 2.1. ábrán látható mérő- és adatfeldolgozó rendszerrel ellátott modellsilóval végeztem.



2.1. ábra Hengeres silók szabad kifolyásának vizsgálatához használt modellsiló és a mérési elrendezés

A modellsiló teste egy 110 mm átmérőjű, 700 mm hosszúságú PVC henger, amelyhez 35 mm átmérőjű kifolyónyílással ellátott, cserélhető, kúpos kialakítású garat csatlakozik. Az elkészített modellsiló esetén a silótest átmérőjének (D) és a kifolyónyílás átmérőjének (d) aránya 3,14, amely a gyakorlatban alkalmazott gabonátároló silóknak megfelel (általában a $D/d > 2,5$ arány jellemzi a valóságos terménytárolókat). A kifolyónyílás méretének megválasztásakor a tárolt szemcsés halmaz (búza) szemcseméretét is figyelembe kellett vennem. A szabad kifolyás vizsgálatához kohézió nélküli szemesterményt, búzát használtam, amelynek átlagos szemcsenagysága $d_p = 5,5$ mm, átlagos, relatív nedvességtartalma pedig $w = 13 \pm 1,5\%$ volt, és a feltöltött hengerből egy mérés során $4,75 \pm 0,25$ kg anyagot (a garat félkúpszögének függvényében) ürítettem ki. Sitkei (1981) ajánlása szerint búza silós tárolásakor a kifolyónyílásnak legalább 15 mm átmérőjűnek kell lenni, hogy a búzaszemek ne ékelődjenek egymásba a kiömlőnyílás felett. Ez a megállapítás egybevág Jacob (2000) folyási függvényen

alapuló eredményeivel is, melyek szerint a stabil boltozatok kialakulása akkor kerülhető el, ha a hengeres siló kifolyónyílásának átmérője legalább 3,5-4-szerese a tárolt halmaz átlagos szemcseméretének. Mivel a modellsilóban tárolt búza esetén a kifolyónyílás átmérő és az átlagos szemcse nagyság aránya $d/d_p = 6,36$, ezért megállapítható, hogy a bemutatott modellsiló egy valóságos gabonátárolóhoz képest arányosnak tekinthető, tehát a laboratóriumi vizsgálataim eredményei nagyobb méretű silóra is kiterjeszhetőek.

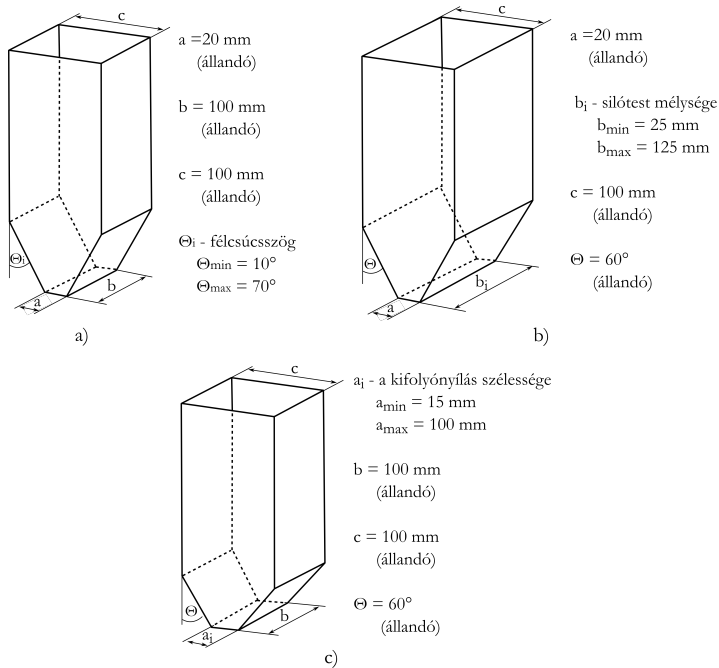
A különböző kifolyási módok vizsgálatához és értékeléséhez hét különböző félkúpszögű poliamid garatot készítettem, a félkúpszög rendre: $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ és 70° volt (így mind térfogati, mind tölséses áramlás esetén mérhettem a siló kifolyási tömegáramát). A kísérletek során a modellsilóból kifolyt búza tömegét három HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik) C9B típusú erőmérő cellával (mérés határa: 500 N, érzékenysége a teljes méréstartományra vonatkozóan: 0,05%) mértem meg. Az adatfeldolgozásért a HBM Spider típusú 8 csatornás mérőerősítő- és adatgyűjtő egység felelt. Valamennyi különböző félkúpszögű garat esetén 5-szörös ismétléssel végeztem ürítési vizsgálatot és a mérések során a mintavételi frekvencia minden esetben 50 Hz volt.

2.1.2. Szögletes silók szabad kifolyásának vizsgálata

Az Oldal-féle, hengeres geometriájú silók tömegáramának számítására kifejlesztett, analitikus modell négyyszög keresztmetszetű, sík áramlású tárolókra való kiterjesztéséhez az előzőekhez hasonló kísérleteket végeztem, függőleges oldalfalú, síkbeli áramlású silómodell alkalmazásával (2.2. ábra). Az ilyen szögletes, függőleges oldalfalú, síkbeli áramlású kifolyógaratoknak leginkább a gyógyszer- és a műanyagiparban van szerepük: az egyes alapanyagok pontos adagolásához, a megfelelő receptúrák elkészítéséhez használnak ilyen típusú tárolókat, adagolókat.

A négyyszög keresztmetszetű modellsiló 0,3 mm vastagságú acéllemezből készült szintén cserélhető toldattal, amelyből ebben az esetben is hét különböző félcsúcscsögű készült (szintén 10° -tól 70° -ig) (2.2\ a ábra). A silótest mérete 100×100 mm, míg a különböző csúcscsögű garatok kifolyónyílása 20×100 mm méretű volt. A silótest szélességét a kísérletek során nem változtattam ($c = 100$ mm). A kiterjesztett modell helyességének igazolása érdekében úgy alakítottam ki a silótestet, hogy 60° -os félcsúcscsögű garat mellett a silótest mélysége (b méret a 2.2\ b ábrán) 25 mm-től 125 mm-ig fokozatmentesen állítható legyen. Ily módon a silótest szélesség - mélység arányát állandó szélesség ($c = 100$ mm) mellett a $c/b = 0,8 - 4$ tartományban változtathattam.

A kiterjesztett modell alkalmazhatósági határait is megvizsgáltam. Ehhez készítettem egy újabb 60° -os félcsúcscsögű ürítőgaratot, amely kifolyónyílásának szélességét (a méret a 2.2\ c ábrán) lehetett változtatni 15 mm-től, a silótest szélességéig (2.2\ c ábra). Így lehetőség nyílt a silótest és a kifolyónyílás szélesség arányának változtatására az $a/c = 0,15 - 1$ tartományban.



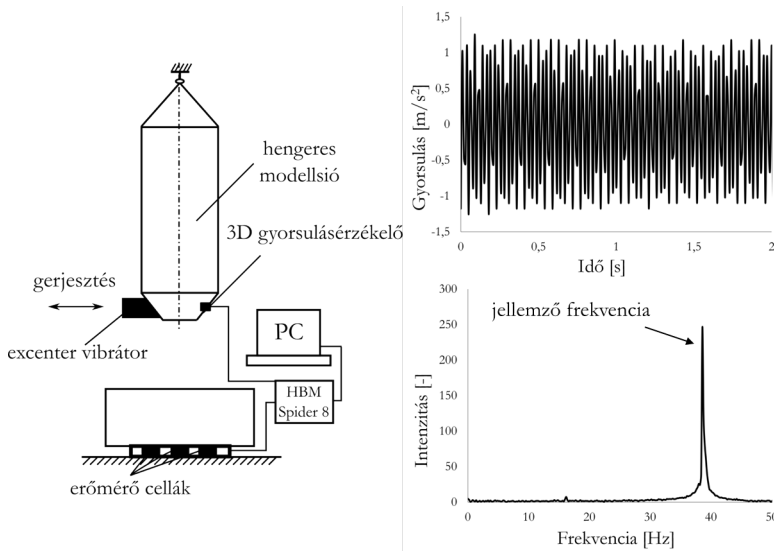
2.2. ábra A négyszög keresztmetszetű silómodellek

2.1.3. Hengeres silók vibrációs ürtésének vizsgálata

A vibrációs elven működő, kifolyást szabályzó berendezések tervezéséhez, megfelelő üzemeltetéséhez elengedhetetlen a gerjesztő paraméterek (a rezgés frekvenciájának, amplitúdójának) kifolyási jellemzőkre gyakorolt hatásának pontos ismerete, ezért a 2.1.1. fejezetben bemutatott hengeres silómodellt kiegészítettem egy változtatható fordulatszámú excenteres vibrátorral és egy ADXL326 típusú, háromtengelyes MEMS (Microelectromechanical system) gyorsulásérzékelő műszerrel.

Az excenter vibrátort a siló szimmetriatengelyére merőleges irányban rögzítettem a silógaraton (így a silótest tengelyére merőlegesen történt a rezgésbevezetés), a háromtengelyes gyorsulásérzékelőt pedig szintén a silógaraton rögzítettem (a vibrátorral ellentétes oldalon), így lehetségessé vált a rezgésbevezetés és ezzel egy időben három egymásra merőleges irányban meg tudtam mérni a silógarat gyorsulását is (párhuzamosan a silóból kifolyt anyag tömegének mérésével) (2.3. ábra).

A mérési összeállítás lehetővé tette, hogy vibrátor fordulatszámának és kiegyensúlyozatlanságának változtatásával a modellsiló rezgésének frekvenciáját 0-145 Hz között, amplitúdóját pedig 0-0,11 mm között változtathassam. A mért gyorsulás jelekből Fourier-transzformációval létrehoztam a jelek frekvencia spektrumát, amelyből a siló rezgésének frekvenciáját és amplitúdóját meg tudtam állapítani (2.3. ábra).



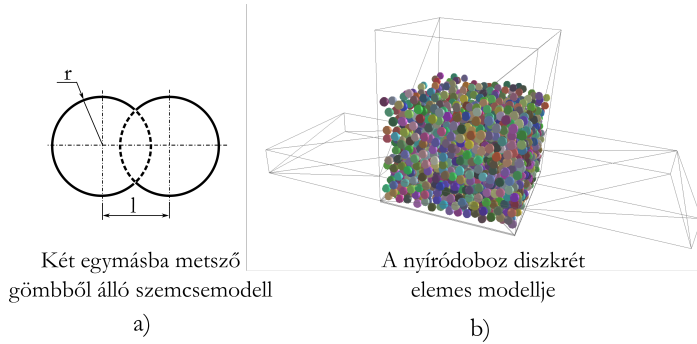
2.3. ábra Mérési összeállítás gerjesztett silók kifolyásának vizsgálatához és egy mért gyorsulás jel, valamint az ahhoz tartozó frekvencia spektrum

2.2. A diszkrét elemes módszer alkalmazhatósági korlátai

A kutatók között egyre szélesebb körben elterjedő diszkrét elemes módszer a modellparaméterek meghatározási nehézségei és a numerikus modellek megoldásának jelentős számítási igénye miatt a gyakorló mérnökök munkájában egyelőre hatékonyan nem használható. A módszer gyakorlati elterjedését elősegítendő egy új kalibrációs eljárást, valamint a modellek számításiigény-csökkentésének egy módját dolgoztam ki.

2.2.1. A mikromechanikai paraméterek meghatározása

A diszkrét elemes modellek paramétereinek meghatározási (kalibrációs) folyamata nagymértékben egyszerűsíthető és gyorsítható, ha ismerjük az egyes mikromechanikai paraméterek változásának a halmaz makromechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását. Ennek feltérképezéséhez a nyíróvizsgálat diszkrét elemes modellezésén és az azzal meghatározott tönkremeneteli határgörbén alapuló paraméterérzékenység vizsgálatot végeztem. A modellparaméterek rendszerezett változtatásához a YADE, nyílt forráskódú, diszkrét elemes programrendszert használtam. Az eredmények könnyebb általánosíthatósága érdekében kohéziós kapcsolati modell mikromechanikai paramétereire vonatkozóan végeztem az érzékenységvizsgálatot. A szemcsemodellt két egymásba metsző gömbből építettem fel és ennek geometriai méreteit is a vizsgált paraméterek közé soroltam (2.4\ a ábra). Az érzékenységvizsgálathoz létrehozott diszkrét elemes modellben 100 mm × 100 mm × 50 mm nagyságú nyíródoboz geometriai modelljét hoztam létre (2.4\ b ábra).



2.4. ábra Az érzékenységvizsgálathoz használt szemcsemodell és a nyíródoboz modellje

2.2.2. A numerikus modellek számításiigényének csökkentése

A szemcsés halmazokkal kapcsolatos gyakorlati problémák diszkrét elemes megoldását sok esetben – főként amikor a berendezés méreteihez képest nagyságrendekkel kisebb a szemcsék mérete – lehetetlenné teszi a modellek kiugróan magas számításiigénye. Nem ritka, hogy minden egyes iterációs lépésben több millió elemre vonatkozóan kell megoldani a dinamikai alapegyenleteket, és ez a mai modern munkaállomásokkal is hetekig, hónapokig eltarthat.

A DEM modellek számításiigényének csökkentésére számos módszert dolgoztak ki a kutatók. Az első megoldások a szimulációs keretszoftver és a számítógép erőforrásai közti kommunikáció optimalálásán alapulnak, így növelve az algoritmus számítási sebességét (pl.: a YADE szoftver). A numerikus modellek megoldását tovább gyorsíthatja az elemek merevségének csökkentése, állandó elemméret használata, vagy a modellezett szemcsék számának csökkentése. A modellezett elemek száma alapvetően kétféleképpen csökkenthető: vagy a technológia berendezés méreteit kell csökkenteni, vagy a szemcsék méretét kell növelni (a két módszer egymással párhuzamosan is alkalmazható). Természetesen bárhogy járunk is el, a modell pontos megoldáshoz a teljes halmaz makromechanikai viselkedésének nem szabad megváltoznia. Ez alapján az elemek méretének növelésével párhuzamosan azok mikromechanikai paramétereit is meg kell változtatni, hogy a halmaz kiindulási tönkremeneteli jellemzőit kapjuk. A nagyméretű szemcsékhez tartozó paraméterhalmaz megtalálásához meg kell ismernünk, hogyan megy végbe a teljes halmaz deformációja.

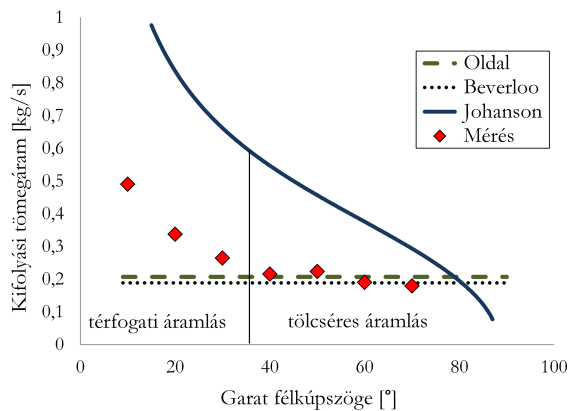
A gerjesztett és áramló, finomszemcsés, por állagú vagy nagy kohéziójú szemcsés rendszerek alakváltozása nem az egyes szemcsék, hanem több elemből álló szemcsecsoportok (ún. klaszterek) elmozdulásával megy végbe. Ennek oka a halmaz belsejében kialakuló egyenlőtlen energia-eloszlás, amely miatt néhol lokálisan lecsökken a porozitás (tehát összetorlódnak a szemcsék), és emiatt a kölcsönhatások gyakorisága is nagyobb mint a halmaz más részein. A rendszerben fellépő energiadisszipáció miatt az egyes szemcsék ütközése a halmaz ezen zónáiban közel teljesen plasztikussá válik, így az egymással kölcsönhatásba lépő

szemek összeállnak, ún. klasztereket alkotnak. Az összekapcsolódó szemcsékből kialakuló egységeken belül az egyes elemek bizonyos mértékben képesek elmozdulni, emiatt a klaszterek mechanikai tulajdonságai (alakjuk, méretük, merevségi-, és súrlódási jellemzőik) jelentősen eltérnek az azokat alkotó szemcsék tulajdonságaitól. Emiatt ha úgy akarjuk csökkenteni a modellek számításgényét – a klaszter megközelítés alapján – hogy növeljük az elemek méretét, elengedhetetlen, hogy pontosan ismerjük az egyes szimulációs paraméterek és a szemcseméret változásának a halmaz makro jellemzőire gyakorolt hatását. Ezen hatások feltérképezéséhez az előző pontban bemutatott nyíróvizsgálat diszkrét modelljén alapuló paraméterérzékenység vizsgálatot végeztem.

2.3. Silókifolyás mikroszerkezeti modellezése

Mivel a jelenlegi, gyakorlatban használható analitikus számítási módszerek egyike sem megfelelő közelítés a térfogati kifolyású silók tömegáramának számításához, ezért a napjainkban – a számítástechnika rohamos fejlődésével – egyre szélesebb körben elterjedő diszkrét elemes módszert használom a modellezéshez.

A szakirodalomban található néhány numerikus silómodellt, *azonban ezek egyikében sem térnek ki a szerzők a kifolyási tömegáram számítására alkalmas analitikus és diszkrét elemes modellek közötti összefüggésekre, az egyes közelítések korlátaira, illetve az alkalmazhatósági határookra* (2.5. ábra). Kutatásaim során a silókifolyást leíró numerikus modellek megoldásához az EDEM Academic diszkrét elemes programrendszert használtam, amelyet a szemcsés anyaghalmozokat leíró, összetett numerikus modellek megoldására fejlesztettek ki 2003-ban, az Egyesült Királyságban.



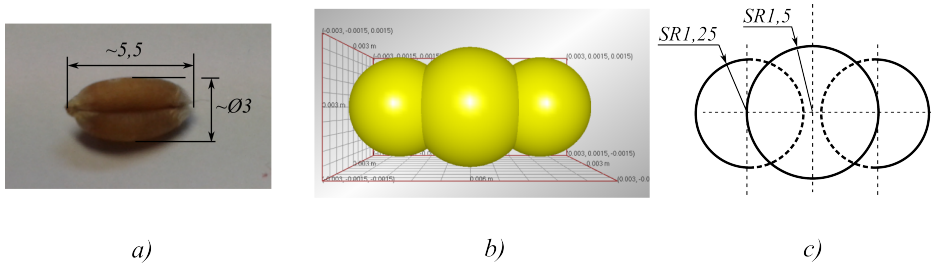
2.5. ábra A gyakorlatban használható kifolyási modellek és mérési eredmények búza kiömlése esetén

2.3.1. Szemcse- és kapcsolati modell

A gravitációs silókifolyás diszkrét elemes modellezéséhez a Hertz-Mindlin-féle "csúszásmentes" kapcsolati modellt használtam. A búzaszemeket 50 db búzaszem

jellemző geometriai méreteinek lemérése alapján három egymásba metsző gömbbel modelleztem. A gömbök sugara 1,5 mm és 2,5 mm, középpontjuk közötti távolság pedig szimmetrikusan, mindkét irányban 1,5 mm volt (2.6. ábra).

Az szemcsemodell tömege 0,0356 g, a főtengelytengely menti nyomatékok pedig $2,918 \cdot 10^{-11} \text{ kgm}^2$ és $7,654 \cdot 10^{-11} \text{ kgm}^2$. A búzára (és általában a mezőgazdasági szemesterményekre) jellemző a viszonylag egyenletes szemcseméret-eloszlás, ezért a számítások során azonos méretű szemcsékkel dolgoztam. Az alkalmazott mikromechanikai paraméterek a 2.1. táblázatban láthatóak.



2.6. ábra Egy búzaszem geometriai modellje

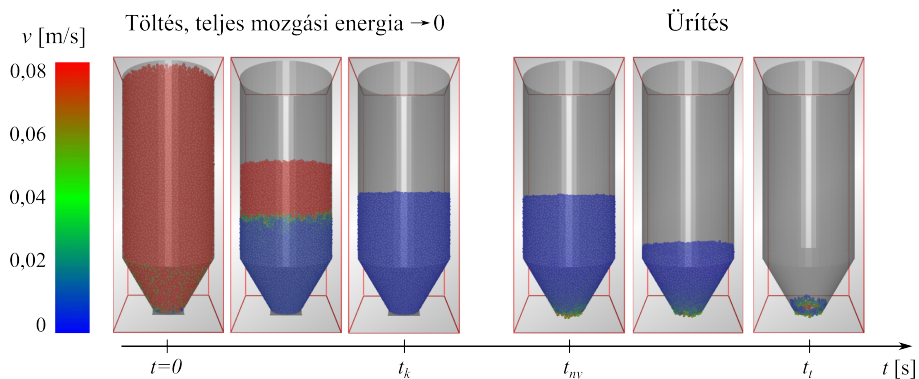
2.1. táblázat A búzaszemek mikromechanikai paraméterei

Mikromechanikai jellemző	Búza	Acél
Poisson-tényező, ν	0,4	0,3
Sűrűség, ρ , kg/m^3	1430	7500
Csúsztató rugalmassági modulus, G , Pa	$3,58 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$
Ütközési tényező, C_r	Búzára: 0,5 Acélra: 0,6	Búzára: 0,6 -
Súrlódási tényező, μ_0	Búzára: 0,3 Acélra: 0,25	Búzára: 0,25 -
Gördülési ellenállás tényezője, f	Búzára: 0,01 Acélra: 0,01	Búzára: 0,01 -

2.3.2. A szimulációs folyamat leírása

A szabad kifolyású silók kísérleti vizsgálatához hasonlóan hengeres és négyszög keresztmetszetű geometriával is készítettem diszkrét elemes szimulációkat. Mindkét típus esetén $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ és 70° -os félcsúcsszögű garattal ellátott geometriai modelleket készítettem, a modellsilókkal egyező méreteken.

A szimulációs folyamat lépései valamennyi geometriai változat esetén megegyeztek. Elsőként a silótestnek megfelelő térfogatban véletlenszerűen létrehoztam az elemeket (ez geometriától és a garat csúcshögtől függően 45 000 – 65 000 db szemcsét jelentett). Ezután a gravitáció hatására lehullottak az elemek a zárt silóban, majd a kifolyónyílás kinyitásáig meg kellett várni, hogy a halmaz mozgási energiája közel zérusra csökkenjen, vagyis hogy kvázistatikus állapotba kerüljön a halmaz. Erre a lépésre azért volt szükség, mivel a kapcsolati modell rugókból és csillapító elemekből álló lengőrendszerekkel írja le a szemcsék kölcsönhatásait és bizonyos időnek el kell telnie a rezgések lecsillapodásáig.



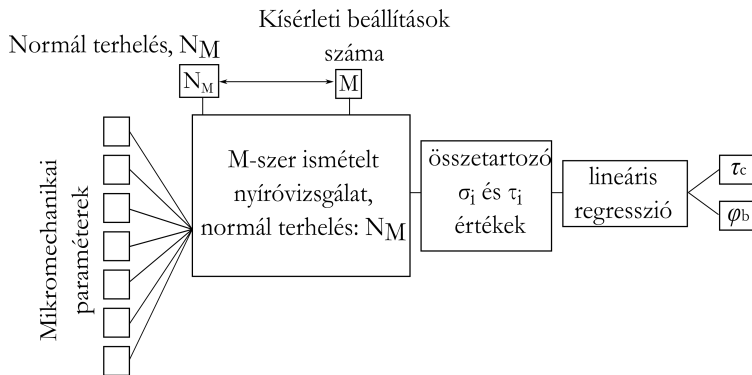
2.7. ábra A szimuláció lépései

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben mutatom be a kutatás során elért új tudományos eredményeket és a kifejlesztett szimulációs eljárásokat, amelyek a szemcsés halmazok modellezéséhez, illetve a silók tervezésével, üzemeltetésével kapcsolatban fellépő problémák megoldásához nyújtanak segítséget.

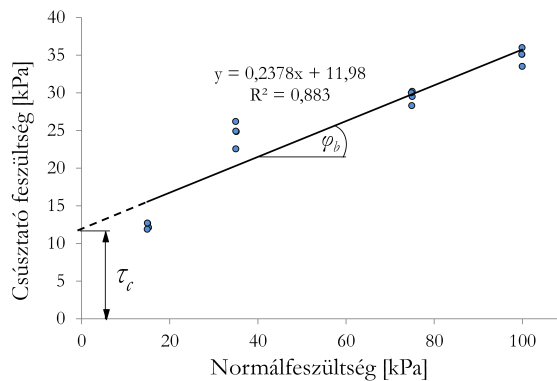
3.1. A mikroszerkezeti paraméterek meghatározási módszere

A nyíróvizsgálat diszkrét elemes modelljét felhasználva olyan eljárást készítettem, amellyel a számítás több, különböző normálterheléssel elvégezhető (3.1. ábra). A nyíróvizsgálatokból meghatározott, összetartozó normál- és csúsztató feszültség értékek alapján az algoritmus megrajzolja a halmaz tönkremeneteli határgörbéjét, és lineáris regresszióval kiszámítja az azt leíró jellemzőket, vagyis a halmaz makromechanikai jellemzőit (a kohézió és belső súrlódási szög értékét).



3.1. ábra A tönkremeneteli határgörbét elkészítő eljárás folyamatábrája

A 3.2. ábrán az eljárással négy különböző normálterheléssel, minden esetben négyszeres ismétléssel végzett nyíróvizsgálat alapján meghatározott tönkremeneteli határgörbe látható.



















3.2. ábra Tizenhat nyíróvizsgálat szimulációjával kapott tönkremeneteli határgörbe

Ezzel a módszerrel tetszőleges számú nyíróvizsgálatot végezhetünk el külső beavatkozás nélkül, csupán a mikromechanikai paramétereket és a kísérleti beállítások számát kell definiálnunk a futtatás előtt. *Eddig ilyen automatizált módszer nem állt rendelkezésre*, a tönkremeneteli határgörbe valamennyi pontjának kiszámításához egyesével kellett beállítanunk és futtatnunk a szimulációkat (amelyek számítási ideje akár több nap is lehet), majd kiértékelnünk azokat.

3.1.1. Paraméterérzékenység vizsgálat

Az eljárást felhasználva a kohéziós kapcsolati modell egyes mikromechanikai paramétereinek a teljes halmaz kohéziójára (τ_c) és belső súrlódási tényezőjére (μ_b) gyakorolt hatását vizsgáltam. A paraméterek kezdeti értékét korábban, finomszemcsés homoktalajra vonatkozó, kézi kalibráció alapján vettem fel. Az egyes mikromechanikai paramétereknek a kohéziós halmaz makro viselkedésére gyakorolt hatását összegezve a 3.1 táblázatban láthatjuk.

3.1. táblázat A paraméterérzékenység vizsgálat eredményei

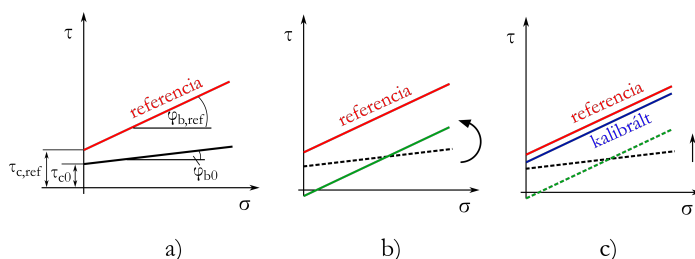
Szimulációs paraméter	Látszólagos kohézió változásának jellege	Belső súrlódási szög változásának jellege
Szemcsesűrűség	Lineáris 	Lineáris 
Rugalmassági modulus	Másodfokú 	Másodfokú 
Poisson-tényező	Lineáris 	Másodfokú 
Súrlódási tényező	Lineáris 	Lineáris 
Kötési híd húzószilárdsága	Állandó 	Állandó 
Kötési híd nyírószilárdsága	Lineáris 	Lineáris 
Elemek alakja	Másodfokú 	Állandó 
Időlépték	Lineáris 	Másodfokú 

3.1.2. A félautomata kalibrációs algoritmus

Az előző pontban bemutatott érzékenységvizsgálat eredményeit felhasználva a különböző szemcsés anyagalmazok mikromechanikai paramétereinek meghatározása (a diszkrét elemes modellek kalibrációja) nagymértékben gyorsítható, és az érzékenységvizsgálat eredményei egy részben automatizált kalibrációs módszer fejlesztésének is alapjául szolgálnak.

A kalibrációs algoritmust (az eljárás programkódját lásd a 4-es számú mellékletben) úgy hoztam létre, hogy működtetéséhez valamennyi mikromechanikai paraméterre vonatkozóan meg kell adni egy kiinduló értéket, és az elérni kívánt, mérésekkel meghatározott tönkremeneteli jellemzőket is

(referencia kohézió-, és belső súrlódási tényező értékét). A folyamat első lépése minden esetben az előzőekben bemutatott érzékenységvizsgálat elvégzése a kiindulási mikromechanikai paraméterhalmazra vonatkozóan (tetszőlegesen választott, de a kalibrációs folyamatban állandó szemcsemodell mellett), illetve a kiindulási paraméterhalmazzal kapott makro jellemzők meghatározása (3.3\ a ábra). A következő lépés az érzékenységvizsgálat alapján a halmaz belső súrlódási tényezőjét legnagyobb mértékben befolyásoló mikromechanikai paraméter kiválasztása, majd a tönkremeneteli határgörbe meredekségének beállítása a referencia érték alapján. Ehhez a halmaz belső súrlódási tényezőjét (vagyis a tönkremeneteli határgörbe meredekségét) legjobban befolyásoló paramétert változtatja az algoritmus, a referencia érték és az érzékenységvizsgálattal meghatározottak alapján kijelölt irányba, egészen addig míg az előre definiált hibán belüli belső súrlódási tényezőt nem kapjuk (3.3\ b ábra).



3.3. ábra A kalibrációs algoritmus lépései

A kalibrációs algoritmus utolsó lépése a halmaz kohéziójának (vagyis a tönkremeneteli határgörbe tengelymetszetének) beállítása, azaz a függvény eltolása önmagával párhuzamosan (3.3\ c ábra). Ezt a belső súrlódási tényező meghatározásához hasonlóan végzi az algoritmus, azzal a különbséggel, hogy a kohéziót legnagyobb mértékben, ugyanakkor a belső súrlódási tényezőt legkisebb mértékben befolyásoló mikromechanikai paramétert választja ki és azt változtatja a referencia kohézió értékének megfelelő irányba.

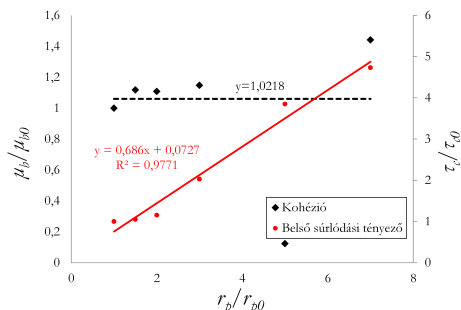
3.2. A diszkrét elemes módszer alkalmazhatóságának kiterjesztése

A 2.2.2. pontban ismertetett klaszter elmélet alapján (a kiindulási mikromechanikai paramétereket használva) megvizsgáltam, hogy a kohéziómentes diszkrét modellek paraméterei, illetve az elemek méretének növelése milyen hatással van a halmaz makro jellemzőire, illetve ez hogyan befolyásolja a tönkremeneteli határgörbe számításigényét.

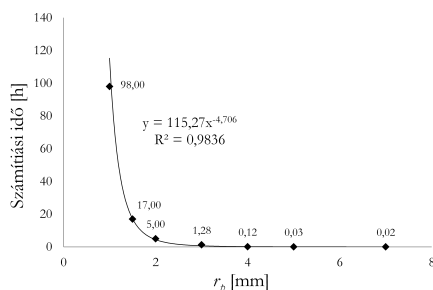
3.2.1. Paraméterérzékenység vizsgálat

A diszkrét elemes szimulációk számításigényének csökkentéséhez szemcsesugarat az alábbi tartományban változtattam: 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, 7 mm. Ez alapján az elemméret növelésével párhuzamosan a halmaz belső súrlódási tényezője lineáris függvény szerint növekedett, illetve a kohézió nélküli

kapcsolati modell alkalmazása miatt a halmaz kohéziója elhanyagolható mértékű volt és az elemméret háromszorosára növeléséig számottevően nem is változott (3.4. ábra). 3 mm-es szemcsesugár felett viszont igen nagy szórást mutatott a kohézió és értelmezhetetlenné váltak az eredmények. Ennek oka, hogy e felett már a szemcseméret túlságosan nagy a nyíródoboz méreteihez képest.

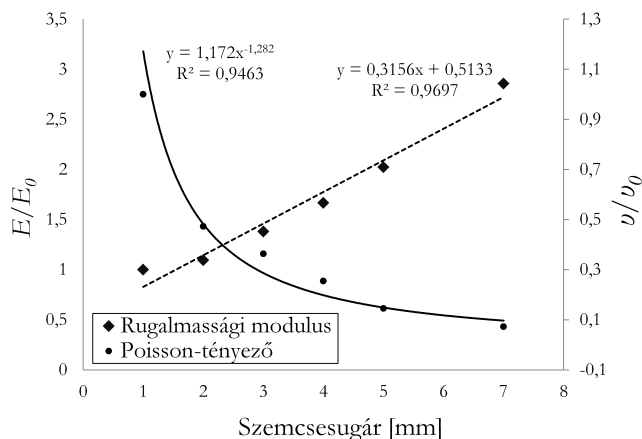


3.4. ábra Az elemek méretváltozásának hatása



3.5. ábra A szimuláció számítási ideje a szemcsék méretének függvényében

A kiindulási elemméret ($r_0 = 1$ mm) esetén igen jelentős volt a szimuláció számítási igénye, közel 98 óra, ami az elemméret háromszorosára növelésével már 1,5 órára csökkent, viszont ekkor a halmaz kiindulási kohéziója 22,3%-kal, belső sűrűdési tényezője pedig 197,1%-kal változott (3.5. ábra). Ezt a két ellentétes hatást kellett kompenzálni a megfelelő mikromechanikai paraméterek módosításával. Mivel a klaszter elmélet alapján a szemcsecsoportok dilatációra képesek, így a paraméterérzékenység vizsgálat szerint az elemek méretének növelésével, rugalmassági modulusukat és Poisson-tényezőjüket egymással párhuzamosan változtattam.



3.6. ábra A rugalmassági modulus és Poisson-tényező szükséges változtatása a szemcsesugár függvényében

Az érzékenységvizsgálat eredményei alapján a szemcsék rugalmassági modulusát az elemméret függvényében lineáris függvény szerint:

$$E(r_p) = 91,52r_p + 148,86; \quad (3.1)$$

míg a Poisson-tényezőt hiperbolikus függvény szerint kellett változtatni, hogy a halmaz kiindulási tönkrementeli jellemzői számottevő mértékben ne változzanak:

$$\nu(r_p) = 0,2344 \cdot r_p^{-1,282}. \quad (3.2)$$

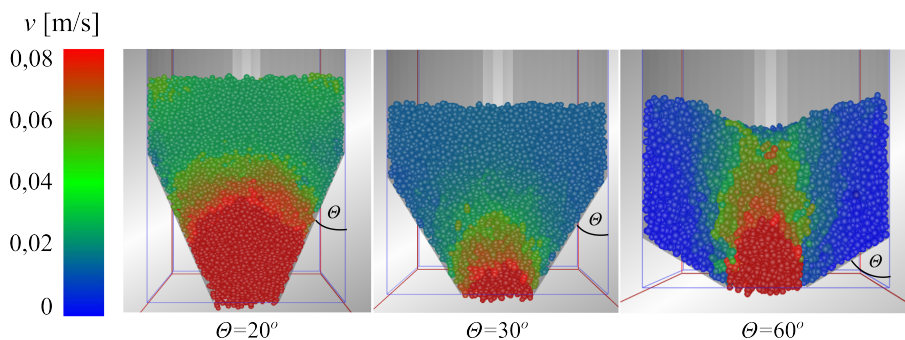
A 3.1-es és a 3.2-es összefüggések alapján meghatározott rugalmassági modulussal és Poisson-tényezővel kapott makrojellemzők 3-szor nagyobb szemcseméret esetén (amellyel a számítási idő több, mint 98%-kal csökkent) is csak 5%-nál kisebb mértékben térnek el a kiindulási paraméterhalmazzal meghatározott értékektől.

A bemutatott függvényekkel kiszámított mikromechanikai paraméterek alkalmazásával, a vizsgált szemcseméret tartományban a halmaz belső sűrűláadási tényezője minden esetben 15%-nál kisebb mértékben tér el a kiindulási paraméteregyüttessel kapott értéktől, a halmaz kohéziója viszont 4 mm feletti szemcseméretnél már jelentősen különbözik a kiindulási paraméterekkel kapottaktól (ennek oka, hogy a 4 mm-nél nagyobb sugarú szemcsék már túlságosan nagy méretűek a nyíródobozhoz képest). Ez a vizsgálat is alátámasztja tehát, hogy a szemcseméret növelésének a modellezni kívánt *berendezésben található legkisebb nyílásméret és a szemcsék méretének aránya szab határt.*

3.3. Általánosított, numerikus silómodell

3.3.1. A kifolyási mód meghatározása

A 2.3. pontban ismertetett numerikus modell jóságának igazolásához elsőként meghatároztam a különböző garatcsúcshögek esetén a silóban kialakuló áramlási képet. Búza ürítésekor a térfogati- és tölcseres áramlás közötti átmenet 25 – 40°-os félkúpszög tartományban található (természetesen a két áramlási mód között nincsen éles átmenet). E tartomány alatt térfogati, míg felette tölcseres áramlásról beszélünk.

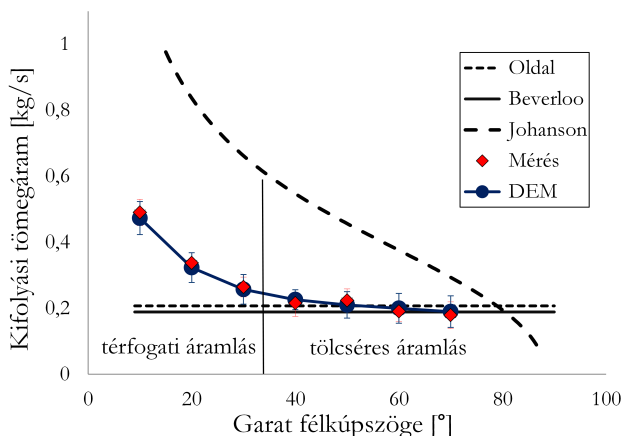


3.7. ábra Áramlási képek különböző kifolyási módok esetén

A 3.7. ábrán a kör keresztmetszetű siló szimmetriasíkja mentén elmesztve látható, mindhárom áramlási mód esetén (a szögletes geometriai modellel dolgozva az egyes csúcshögekhez tartozóan hasonló sebességmezők alakultak ki). A fenti ábrán az elemeket függőleges irányú sebességük alapján színeztem meg: a legnagyobb sebességű elemek színe piros, míg az állók színe kék. Jól látható, hogy 20°-os garat félkúpszög esetén a teljes halmaz mozgásban van, a valóságnak megfelelően tehát térfogati áramlás alakul ki. A 60°-os félkúpszögű garat esetén csakis a kifolyónyílás feletti szemcsék mozognak és megfigyelhető a halmaz felső határfelületén kialakuló tölcsér, a garatfalon pedig az álló zónák. 30°-os félkúpszög esetén a kettő közötti átmenet látható: nincs a teljes halmaz mozgásban, viszont nem alakul ki az áramlás tisztán tölcséres jellege sem (érdekes megfigyelni, hogy a kifolyónyílástól felfelé haladva az egyre csökkenő sebességű elemcsoportok parabolához hasonló alakban helyezkednek el – Oldal vizsgálatai alapján (2012) az instabil boltozatok is parabola alakúak).

3.3.2. A kifolyási tömegáram meghatározása

A sebességeloszlás vizsgálata után valamennyi szimulációban meghatároztam a silóban lévő anyag tömegének változását az idő függvényében.



3.8. ábra Számított, mért és szimulációval kapott kifolyási tömegáram értékek

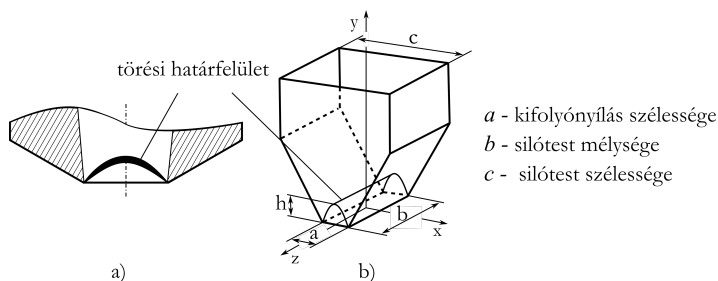
A 3.8. ábrán látható, hogy az Oldal-féle analitikus modell és Beverloo empirikus modellje megfelelő közelítést ad tölcséres áramlás kialakulásakor, a Johanson-féle modell pedig térfogati áramlás esetén követi a mérési eredmények jellegét, azonban hibája a gyakorlat számára túlságosan nagy. Az új numerikus modell viszont mind térfogati, mind tölcséres áramlási mód esetén alkalmas kör keresztmetszetű silók kifolyási tömegáramának elfogadható pontosságú meghatározására (a vizsgált tartományban, valamennyi félkúpszög esetén a kísérletekhez képesti eltérés kisebb 5%-nál és szögletes silógeometria is esetén ilyen pontosságú közelítést kaptam).

Numerikus modellem az első, amely bizonyítottan, kifolyási módtól függetlenül elfogadható pontossággal használható. Az eddigiekben először meg kellett határozni az adott siló kifolyási módját, majd ez alapján ki kellett választani a megfelelő modellt, ezután lehetett (bizonyos esetekben elfogadhatatlanul nagy hibával) meghatározni a kifolyási tömegáramot. Ez a folyamat az új numerikus modell alkalmazásával nagymértékben egyszerűsödik. A bemutatott diszkrét elemes modell megfelelően kalibrált mikromechanikai paraméterekkel szinte bármilyen szemestermény kifolyásának leírására alkalmas és nemcsak állandósult állapotban, de határhelyzetekben (tehát a kifolyás megindulásakor és kiürülő garat esetén is) leírja a jelenséget.

3.4. Az Oldal-féle analitikus kifolyási modell kiterjesztése

A szakirodalomban bemutatottak szerint a megfelelő pontossággal alkalmazható analitikus kifolyási modellek közül az Oldal-féle összefüggés az egyetlen, amely magyarázatot ad a silókifolyásra, mint fizikai jelenségre, sőt leírja a kifolyónyílás felett kialakuló sebességeloszlást is. A modell hátránya, hogy hengeres silókra érvényes és a garat geometriai jellemzői közül csak a kifolyónyílás átmérőjét veszi figyelembe, félkúpszögét nem, emiatt ezzel a formulával csakis tölcséres áramlás esetén számítható elfogadható pontossággal a kifolyási tömegáram. Kutatásom következő fázisában megvizsgáltam, hogy az Oldal-féle elmélet keresztmetszettől függetlenül alkalmazható-e. Ehhez a modell négyszög keresztmetszetű silókra vonatkozó kiterjesztheségét vizsgáltam.

A kifolyónyílás mentén a sebességeloszlást az instabil boltozat alakjának (másodfokú parabola) felhasználásával, szabadesésként írta le a szerző, azt a kinematikai peremfeltételt felhasználva, hogy tölcséres kifolyás esetén a boltozat szélső pontjaiban (a kifolyónyílás peremén) a szemcsék sebessége zérus (hiszen tölcséres áramláskor csak a kifolyónyílás felett mozog a halmaz). Ezt a peremfeltételt tölcséres kifolyású, négyszög keresztmetszetű silóra is alkalmazhatjuk (hiszen ez a kifolyási mód következménye), azonban figyelembe kell venni, hogy míg hengeres silók esetén forgási paraboloid alakú az instabil boltozat (a törési határfelület), addig négyszög keresztmetszetű silók esetén ez egy parabola alapú hasáb (3.9. ábra).



3.9. ábra A törési határfelület és jellemző méretei négyszög keresztmetszetű siló esetén

A törési határfelület alakjának (parabola alapú hasáb) leírása az x, y, z koordináta-rendszerben:

$$f(x, z) = h \left(1 - \left(\frac{2x}{a} \right)^2 \right), \quad x \in \left[-\frac{a}{2}; \frac{a}{2} \right], \quad z \in \left[-\frac{b}{2}, \frac{b}{2} \right]. \quad (3.3)$$

A sebességeloszlást ettől a felülettől kiinduló, zérus kezdősebességű szabadesésként számíthatjuk:

$$v(x, z) = \sqrt{2g\delta a} \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{a} \right)^2}. \quad (3.4)$$

A sebességeloszlás alapján a térfogatáram:

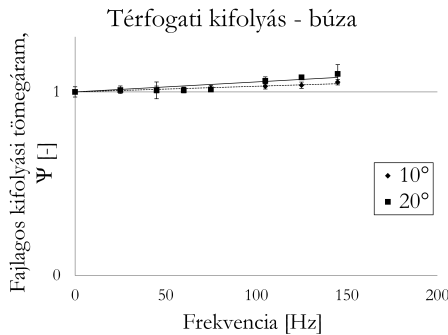
$$Q = \int_A v \, dA = \frac{\pi}{4} \sqrt{2g\delta a} \cdot ab. \quad (3.5)$$

A halmazsűrűség (ρ_h) felhasználásával a kifolyási tömegáram:

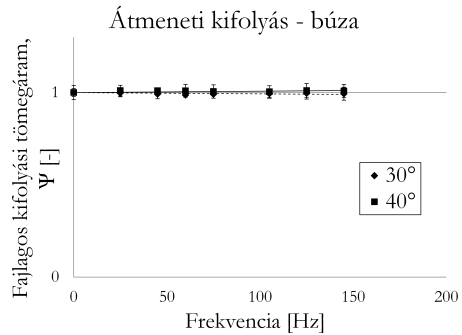
$$W = \frac{\pi \sqrt{2g}}{4} \sqrt{\delta} \cdot \rho_h \cdot b(a - d_p)^{3/2}. \quad (3.6)$$

3.5. Szemestermények vibrációs ürtése

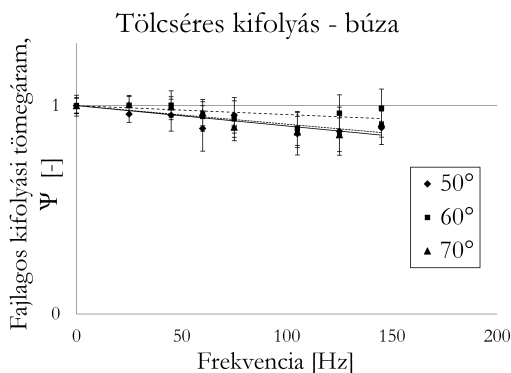
Állandó frekvenciaszinteken változtatva a gerjesztés amplitúdóját, nem tapasztaltam a kifolyási tömegáram érdemleges változását sem térfogati, sem tölcseres áramlás esetén. Tehát a vizsgálati tartományban (0 – 0,11 mm) a gerjesztés amplitúdójának nem volt hatása a kifolyási tömegáramra és az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó tapasztalati szórás egyik esetben sem haladta meg az 5%-ot.



3.10. ábra A gerjesztési frekvencia változásának hatása a fajlagos kifolyási tömegáramra, térfogati kifolyás esetén



3.11. ábra A gerjesztési frekvencia változásának hatása a fajlagos kifolyási tömegáramra, átmeneti kifolyás esetén



3.12. ábra A gerjesztési frekvencia változásának hatása a fajlagos kifolyási tömegáramra, tölcséres kifolyás esetén

Ezek után állandó gerjesztési amplitúdó mellett ($A = 0,11$ mm) változtattam a rezgés frekvenciáját valamennyi különböző félkúpszögű garat (tehát tölcséres és térfogati kifolyás) esetén. Azt tapasztaltam, hogy a gerjesztési frekvencia kifolyási módtól függően különböző hatással van a búza kifolyási tömegáramára. Meredek, kis félkúpszögű (10° és 20°) garatok, azaz térfogati áramlás esetén a gerjesztési frekvencia növekedésével a kifolyási tömegáram kis mértékben növekedett, azaz a fajlagos kifolyási tömegáram minden esetben nagyobb volt 1-nél. Az egyes kísérleti beállításokhoz tartozó tapasztalati szórás egyik esetben sem haladta meg az 5%-ot (3.10. ábra). Átmeneti kifolyás (30° és 40° -os félkúpszögű garat) esetén a kísérletek alapján jelentős mértékben nem változott a kifolyási tömegáram, azaz a fajlagos kifolyási tömegáram értéke 1-hez közeli volt. Az egyes beállításokhoz tartozó tapasztalati szórás szintén egyik esetben sem haladta meg az 5%-ot (3.10. ábra és 3.11. ábra). Tölcséres áramlás (50° , 60° és 70° -os félkúpszögű garat) esetén a kifolyási tömegáram csökkenését figyeltem meg. Ezzel párhuzamosan a tapasztalati szórások növekedtek, bizonyos esetekben elérték a 15%-ot is (3.12. ábra).

3.6. Kohéziós szemcsés halmazok vibrációs ürítése

A szemesterményekhez képest fontos különbség, hogy az összetapadó, kohéziós ($\sigma_I/\sigma_c < 2$) korpa kizárólag 10° -os vagy annál kisebb félkúpszögű (tehát igen nagy lejtésű) garattal szerelt, térfogati kifolyású silóból üríthető ki gravitációs úton. 10° feletti félkúpszögű garatok esetén gravitációs úton nem indult meg a kifolyás, stabil boltozat alakult ki, amely a gerjesztés hatására, bizonyos „kiömlési határfrekvencia” elérésekor összeomlott és megindult az áramlás.

A gerjesztési amplitúdó változásának észlelhető hatása ez esetben sem jelentkezett a vizsgálati tartományban, azonban állandó rezgésamplitúdó mellett, a gerjesztő frekvencia növelésével, egy bizonyos érték elérésekor megindult az anyagáram. Ezt a frekvenciát kiömlési határfrekvenciának nevezem. A kifolyás megindulása után a gerjesztő frekvencia további növelésének érzékelhető hatása azonban nem jelentkezett, a kifolyási tömegáram közel állandó maradt.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. A mikroszerkezeti paraméterek meghatározási módszere

Kidolgoztam egy, a tönkrementeli határgörbe szimulációs meghatározásán alapuló, félautomata kalibrációs algoritmust, amellyel *kohéziós* szemcsés halmazok, *YADE* diszkrét elemes rendszerben használható mikroszerkezeti paraméterei meghatározhatóak. Az algoritmussal kiszámított paramétersereget felhasználva olyan folyamatok diszkrét elemes modellezése lehetséges, amelyek nyomásviszonyai megfelelnek a tönkrementeli határgörbe felvételénél vizsgált nyomástartománynak. Az új, félautomata eljárással a diszkrét modellek kalibrációja a próbálgatásos módszerhez képest ~ 5 -ször gyorsabban és hatékonyabban lehetséges, valamint az így kapott paraméterhalmaz széles nyomástartományban, anyagjellemzőként használható.

2. A diszkrét elemes módszer alkalmazhatóságának kiterjesztése

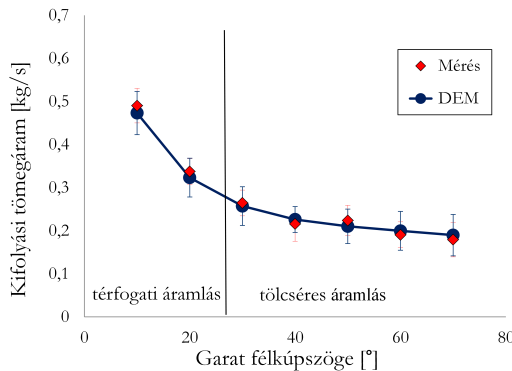
Bizonyítottam, hogy a *YADE* rendszerben létrehozott, kohézió nélküli diszkrét elemes modellek számításigénye csökkenthető. Ilyen esetben az elemek méretének növelésével párhuzamosan rugalmassági modulusukat lineáris, míg Poisson – tényezőjüket hiperbolikus jellegű függvény szerint javaslom változtatni:

$$E(r_p) = A r_p + B;$$
$$\nu(r_p) = C \frac{1}{r_p^D}.$$

Az általam kidolgozott összefüggések alkalmazásakor az elemméret kétszeresére növelésével a numerikus modell számításigénye közel egy nagyságrenddel csökkenthető és a teljes halmaz tönkrementeli jellemzői $\pm 5\%$ -os hibahatáron belül változnak. Numerikus számításokkal igazoltam, hogy az A , B , C és D konstansok értékét a kiindulási paraméterhalmaz határozza meg.

3. Általánosított, numerikus silómodell

Kidolgoztam egy numerikus (diszkrét elemes) modellt, amellyel hengeres testű, gravitációs ürítésű silókból kifolyó kohézió nélküli szemcsés halmazok tömegárama kifolyási módtól függetlenül, a teljes félkúpszög tartományban 5% -nál kisebb hibával kiszámítható.



4.1. ábra Kifolyási tömegáram értékek búza hengeres silóból történő ürítésekor

4. Az Oldal-féle analitikus kifolyási modell kiterjesztése

Gravitációs ürítésű, sík áramlású, szögletes silók tömegáramának számításához az Oldal-féle kifolyási modell kiterjesztésével bevezettem az alábbi összefüggést:

$$W = \frac{\pi\sqrt{2g}}{4}\sqrt{\delta} \cdot \rho_h \cdot b(a - d_p)^{3/2},$$

ahol: - g , a gravitációs gyorsulás nagysága,
 - δ , a boltozat alaktényezője,
 - ρ_h , a szemcsés anyag halmazsűrűsége,
 - a , a kifolyónyílás szélessége,
 - b , a silótest mélysége,
 - d_p , a szemcsék mérete.

Kísérletileg és numerikusan igazoltam, hogy az összefüggés tölcséres kifolyás és az alábbi silótest szélesség – mélység és kifolyónyílás szélesség – silótest szélesség tartományban 5%-os hibahatárral alkalmazható. A modell érvényességi határai:

$$1 \leq \frac{c}{b} \leq 4,$$

$$0,15 \leq \frac{a}{c} \leq 0,7,$$

ahol: - a , a kifolyónyílás szélessége,
 - b , a silótest mélysége,
 - c , a silótest szélessége.

5. Szemestermények vibrációs ürítése

Kísérletileg igazoltam, hogy a siló tengelyére merőleges irányú gerjesztés hatására a hengeres silóból kifolyó kohézió nélküli szemcsés halmazok (szemestermények, pl.: búza) tömegáramára a vizsgálati tartományban a gerjesztés amplitúdójának nincsen érzékelhető hatása. A rezgés frekvenciájának növelésével térfogati áramlású garat esetén növekszik a tömegáram, átmeneti áramlású garat esetén nem jelentkezik a gerjesztés hatása, tölcséres áramlású garat esetén pedig a gerjesztés hatására *megváltozik az áramlási kép*, emiatt a *tapasztalati szórások jelentősen növekednek* és a rezgésfrekvencia növelésével *csökken a kifolyási tömegáram*.

Továbbá megállapítottam, hogy a hengeres siló tengelyére merőleges irányú gerjesztés hatására a vizsgálati tartományban ($A = 0 - 0,11$ mm és $f = 0 - 125$ Hz)

- a silóban tárolt anyag tömege lineárisan csökken az idő függvényében,
- a gerjesztési amplitúdó hatása elhanyagolható,

- a gerjesztő frekvencia hatása domináns és a garat geometriájának függvényében eltérő,
- a gerjesztés hatására nem minden esetben növekszik a kifolyási tömegáram.

6. *Kohéziós szemcsés halmazok vibrációs üritése*

Laboratóriumi vizsgálatokkal bizonyítottam, hogy nagy kohéziójú ($\sigma_t/\sigma_c < 2$) szemcsés halmazokban (pl.: finomszemcsés korpa) stabil boltozat kialakulása esetén létezik egy, a vizsgálati tartományban ($A = 0 - 0,11$ mm és $f = 0 - 125$ Hz) *gerjesztési amplitúdótól független* frekvencia, amelynél megindul az anyagáram. Ezt a gerjesztési frekvenciát *kiömlési határfrekvenciának* neveztem el.

Amennyiben gravitációs úton nem indul meg a kifolyás (korpa esetén, ha a garat félkúpszöge: $\theta < 10^\circ$) gerjesztést kell alkalmazni az anyagáram megindításához. A képződött stabil boltozat akkor törhető fel, ha a tárolt anyagra jellemző *kiömlési határfrekvenciának* megfelelő gerjesztést alkalmazunk.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A mezőgazdaság és az ipar szinte valamennyi területén a legtöbb alapanyag, a félkész- és késztermékek szemcsés halmaz formájában van jelen, ezért az ilyen anyagok kiemelt jelentőséggel bírnak a tervezési- és optimalizációs folyamatokban. Ugyanakkor a szemcsés halmazokkal kapcsolatba kerülő berendezések tervezése, az egyes fizikai jelenségek modellezése a legtöbb esetben problémát jelent a gyakorló mérnököknek, az anyagok speciális fizikai-, mechanikai tulajdonságai miatt.

Kutatásom egyik fő területe a szemcsés halmazok modellezésére használatos, jelenleg is fejlődő numerikus eljárás, a diszkrét elemes módszer gyakorlati alkalmazhatóságának javítása. Ehhez két eljárást dolgoztam ki: egy *félautomata kalibrációs algoritmust* és egy *szemcseméret korrekciós eljárást*. A saját fejlesztésű kalibrációs algoritmussal az eddigieknél sokkal kevesebb energia- és időráfordítással, pontosabban határozhatóak meg egy szemcsés halmaz mikromechanikai jellemzői. Az így kalibrált paramétersereg széles nyomástartományban használható a halmaz különböző folyamatokban mutatott viselkedésének leírásához. A klaszter elméleten alapuló szemcseméret korrekciós eljárás szintén a gyakorló mérnökök munkáját könnyíti meg, mivel a nagy számításigényű numerikus modellek megoldását gyorsítja.

A kutatás második fő területe a mezőgazdasági üzemekben használt silók gravitációs kifolyásának vizsgálata. A technológia lánc folytonosságának biztosításához elengedhetetlen a silóhoz kapcsolódó anyagmozgató berendezések megfelelő tervezése vagy kiválasztása. Ennek feltétele, hogy ismerjük a tárolóból egységnyi idő alatt kifolyó anyagmennyiséget. A jelenleg használatos kísérleti és elméleti kifolyási modellekkel viszont a térfogati áramlású silók tömegáramának meghatározása csak elfogadhatatlanul nagy hibával lehetséges. Az *általam kidolgozott numerikus silómodellel* áramlási módtól függetlenül meghatározható a kifolyási tömegáram, amely pontos ismerete szavatolja az anyagmozgatói lánc folytonosságát. Az időegység alatt kifolyó anyagmennyiség ismerete különösen fontos a takarmánykeverőkben vagy a vegyipari keverési folyamatokban is, amelyekben különösen nagy szerepe van a pontos adagolásnak az egyes receptúrák előállításakor. Ennek érdekében dolgoztam ki a sík áramlású, szögletes garatokból kifolyó anyag tömegáramának számítására használható analitikus kifolyási modellt is.

Szintén a technológiai sor elakadását okozza és a takarmánykeverő üzemek költségeit növeli, ha stabil boltozat képződik a silógaratban. Ennek megakadályozására általában vibrofenekű silókat alkalmaznak. Az ilyen kifolyást segítő berendezések tervezése és üzemeltetése jelenleg azonban tapasztalati úton történik, mivel a rezgésbevezetés hatására a kifolyó halmazban lezajló változások nem ismertek. Ezért kutatásom harmadik fő területe a vibrációs silóürités kísérleti vizsgálata. A problémák megoldása érdekében kísérletileg bizonyítottam, hogy *szemestermények vibrációs üritése során áramlási módtól függően változtathatjuk a kifolyás sebességét*. Térfogati áramlás esetén növelhető, míg tölcséres áramlás esetén csökkenthető a kifolyási tömegáram a gerjesztés frekvenciájának növelésével. A kohéziós, nehezen folyó korpa kísérleti vizsgálatából pedig azt állapítottam meg, hogy valamennyi garatkialakítás esetén létezik egy *kiömlési határfrekvencia*.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Mivel a mezőgazdaságban állandó problémát jelent a szemcsés halmazok tárolás, feldolgozása az anyagok speciális mechanikai tulajdonságai miatt, ezért fontosnak tartom a diszkrét rendszerek mechanikájának megértését, a különböző modellezési lehetőségek vizsgálatát. A terménytároló telepek, takarmánykeverő üzemek gazdaságos működésének szavatolásához elengedhetetlen a tároló berendezések jellemző működési paramétereinek ismerete, valamint hatékony, jól használható tervezési módszerek fejlesztése.

A fentiek miatt kutatásom célja a szemcsés anyaghalmozok modellezési módszereinek fejlesztése, a silós tárolás tervezhetőségének korszerűsítése, illetve az ürtés során fellépő problémák leírása, megoldási módok ajánlása volt. A kitűzött célok megvalósítása érdekében áttekintettem a tématerület szakirodalmát, amely alapján kiválasztottam a megfelelő modellezési eljárásokat, majd megvizsgáltam ezek hiányosságait, illetve feltérképeztem a silós tárolás során fellépő problémák gyakorlatban alkalmazott megoldási, megelőzési módjait. Az egyes jelenségek megfelelő pontosságú leírásához egy viszonylag új numerikus eljárást, a diszkrét elemes módszert használtam. A jelenleg is fejlődő módszer gyakorlati alkalmazása egyelőre erősen korlátozott, univerzálisan használható anyagkönyvtárak még nem állnak a mérnökök rendelkezésére, ezért új eljárásokat dolgoztam ki a modellparaméterek meghatározásához, valamint a numerikus számítások időigényének csökkentéséhez.

Ezután megvizsgáltam, hogyan használható a diszkrét módszer a silók tömegáramának számítására, ugyanis a jelenlegi rendelkezésre álló modellek csak bizonyos határok között használhatóak megfelelően. Az általam fejlesztett kifolyási modell helyességét kísérleti vizsgálatokkal igazoltam. Ezen eredmények alapján a numerikus modellel a silók kifolyási tömegárama a garat félkúpszögétől függetlenül számítható. Ezután az Oldal-féle kifolyási modell általánosításával létrehoztam egy olyan elméletileg megalapozott analitikus összefüggést, amellyel sík áramlású, szögletes garatok kifolyási tömegárama számítható. Ennek az olyan keverési folyamatokban van jelentősége, amelyek az egyes alkotóelemek pontos adagolását követelik meg.

A kutatás utolsó szakaszában a silós tárolás során – főként takarmánykeverő üzemekben – fellépő problémák megoldása érdekében végeztem laboratóriumi vizsgálatokat. Kísérletileg igazoltam, hogy szemestermények kifolyási tömegárama a siló áramlási módjának függvényében változik a gerjesztési frekvencia növelésével. Végül a boltozódó, kohéziós korpa kifolyását vizsgáltam. A laboratóriumi kísérletek alapján megállapítottam, hogy valamennyi silógeometria esetén létezik kiömlési határfrekvencia. Amennyiben ilyen, vagy ennél nagyobb frekvenciájú gerjesztést alkalmazunk, akkor megindul a kifolyás, viszont a vizsgált tartományban ezután a tömegáram nem változott.

Összefoglalásként megállapítom, hogy a bemutatott új tudományos eredmények, módszerek megkönnyíthetik a gyakorló mérnökök munkáját, egyszerűsíthetik a tervezési folyamatokat, valamint hozzájárulhatnak a terménytárolók, takarmánykeverők üzemeltetési költségeinek csökkentéséhez.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. Keppler I., Safranyik F., Oldal I. (2016), Shear test as calibration experiment for DEM simulations: a sensitivity study, *Engineering Computations* (IF: 0.691*), Vol. 33 (3), pp. 742–758.
2. Oldal I., Keppler I., Bablena A., Safranyik, F., Varga, A. (2014), On the discrete element modeling of agricultural granular materials, *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 11, pp. 8-17.
3. Oldal I., Safranyik F. (2015), Extension of silo discharge model based on discrete element method, *Journal of Mechanical Science and Technology* (IF: 0.761*), Vol. 29 (9), pp. 3789-3796.
4. Oldal I., Safranyik F., Keppler I. (2016): Reducing computational time of cohesionless discrete simulations based on particle clusters, accepted for publication in *Engineering Computations* (IF: 0.691*) on 15. 04. 2016
5. Safranyik F., Csátár A., Varga A. (2015), Experimental Method for Examination of State Dependent Friction, *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, Vol. 11 (1), pp. 29-42.
6. Safranyik F., Oldal I. (2013), 3D DEM model of silo discharge, *Poljoprivredna tehnika*, Vol. 38 (2), pp. 23-34, ISSN 0554-5587

Lektorált cikk magyar nyelven

1. Safranyik F. (2016), A diszkrét elemes módszer alkalmazása lengőrosták hatékonyságának vizsgálatára, *GÉP LXVII. évfolyam* (2016/4.), 44-47. o.
2. Safranyik F., Oldal I., M. Csizmadia B. (2015), Gerjesztett silók kísérleti elemzése, *Mezőgazdasági Technika*, LVI. évfolyam, 2015. június, 2-5. o.
3. Safranyik F., M. Csizmadia B., (2015), Kalibrációs módszer szemcsés halmazok mikromechanikai jellemzőinek meghatározásához, *Műszaki Tudományos Közlemények*, 2015 (3), 267-271 o.