

DEBRECENI EGYETEM  
**Agrártudományi Centrum**  
Mezőgazdaságtudományi Kar  
Géptani Tanszék

**INTERDISZCIPLINÁRIS AGRÁR- ÉS TERMÉSZETTUDOMÁNYOK  
DOKTORI ISKOLA**

Doktori Iskola vezető:  
Prof. Dr. Nagy János  
az MTA doktora

Témavezető:  
**Dr. Csizmazia Zoltán**  
egyetemi tanár

**DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI**

**MŰTRÁGYASZEMCSÉK FIZIKAI JELLEMZŐI ÉS MOZGÁSUK  
ELEMZÉSE**

Készítette:  
**Battáné Gindert-Kele Ágnes**  
*doktorjelölt*

Debrecen  
2005

## 1. BEVEZETÉS, A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

A növények fejlődésüket a talajból és a légkörből felvett tápanyagokkal biztosítják. A tápanyagvisszapótlás részben műtrágyázással történik. A tápanyagok gazdaságos, hatásos és egyenletes, sőt precíziós kijuttatását egyre korszerűbb gépekkel lehet megvalósítani. A világ mintegy 140 millió tonnányi éves műtrágya termelésének 90%-át röpitőtárcsás műtrágyaszórókkal terítik a termőföldeken. A felhasznált műtrágyák fizikai sajátságai jelentősen eltérnek egymástól, ami a talajra juttatott mennyiség területi eloszlását számottevően befolyásolja.

A gépek tervezése során számítanunk kell a kiröpített szemcsék várható röppályáját, amiből a megkaphatjuk a szemcsehalmaz eloszlását a talajon. A röpitőszerkezet elhagyása után a repülő szemcse pályagörbéjét a szemcse kezdeti mozgásállapota és a levegő közegellenállása határozza meg. A gyakorlat megkívánja, hogy a ballisztikus pályagörbét elfogadható közelítéssel előre tudjuk jelezni. Közelítőleg gömb alakú szemcsék esetén a közegellenállást a sebesség négyzetével arányosnak vehetjük. Szabálytalan alakú szemcsék esetén azonban a pályamenti ellenállás váltakozása a szemcsék becsapódási helyének a szóródását eredményezi. Ennek a dolgozatnak az egyik fontos elvi kérdése az, hogy a bemutatandó kísérleti módszerekben mért légellenállási tényezők alapján számolt pályák a gyakorlattal összhangban lévő eredményekre vezetnek-e? A számításokban alkalmazott közelítések szükségszerűek, mivel egyrészt bizonyos ismereteink korlátozottak, másrészt az elméletileg túlzottan komplikált leírásmód a gyakorlatban nehezen alkalmazható.

### **Kutatási célkitűzéseim:**

- Egy olyan szimulációs program kidolgozása, amely a szemcsék fizikai jellemzőinek ismeretében, továbbá a kezdeti sebesség valamint a hajítási szög mint bemenő adatok felhasználásával elvégzi a ballisztikai számításokat és megadja a talajon kialakuló valószínű szórásképet ("virtuális műtrágyaszóró").
- A vizsgált kereskedelmi forgalmú műtrágyák halmazainak és szemcséinek minél teljesebb körű geometriai és fizikai jellemzőit saját méréseimmel kívántam meghatározni.
- A mérésekhez egyrészt a Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum Mezőgazdaságtudományi Kar Géptani Tanszéken rendelkezésre álló eszközöket használtam illetve alakítottam át, továbbá a mérési eljárásokat tapasztalataimra támaszkodva módosítottam. Másrészt kifejlesztettem két új, a Géptani Tanszéken eddig nem használatos mérőeszközt.

- **Munkám során** megvizsgáltam öt különböző, hazánkban használatos műtrágya azon fizikai tulajdonságait, amelyek befolyásolhatják a kiröpített szemcsék röppályáját és becsapódási helyét. Megmértem és elemeztem a műtrágyaminták szemcséinek méret-, alak-, tömeg- és sűrűségeloszlását, szemcsehalmazának átlagos nedvességtartalmát és porozitását. Az állandónak feltételezett légellenállási tényező meghatározására lebegtetési és süllyesztési méréseket végeztem légáramban illetve petróleumban. A fizikai jellemzők teljessé tételéhez és a további kutatások előkészítéséhez sűrűlódási vizsgálatokat is végeztem. A vizsgált műtrágyák sűrűlódási faktorát – ami a sűrűlódási tényező értékét közelíti - csúsztatási mérésekkel határoztam meg tíz különböző anyagú síklemezen és a szemcsehalmazon.

- A pályagörbék szimulálásához szükséges kezdeti sebességeket a Géptani Tanszéken kísérleti vizsgálatokat végző kollégák segítségével és irodalmi adatok alapján becsültem meg. A szemcsék tárcsán való mozgásának elemzéséből nyerhető kezdeti mozgásállapot számítása és gyakorlati szórási kísérletek végzése nem volt céлом, jóllehet adott konstrukciójú műtrágyaszóró és ismeretlen fizikai jellemzőjű kiszórandó anyag esetén a beállító szórási kísérletek szükségesek. Az általam kidolgozott pályaszimuláció egyik felhasználási területe éppen a kívánt szórásképhez tartozó - műtrágya típustól függő - kezdeti feltételek meghatározása lehet. A tervezők munkáját segíti, ha ennek alapján javaslat tehető a konstrukció módosítására. A szimuláció módot ad a kísérleti költségek csökkentésére, a mért adatok közötti elfogadható pontosságú interpolációra, végeredményben a műtrágya gazdaságosabb kijuttatására. A gyártó cég a kísérletek és a számítások alapján táblázatokat állíthat össze a felhasználók részére a műtrágyaszóró helyes beállításához.

## 2. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

A Géptani Tanszéken évtizedek óta folynak széleskörű, műtrágyaszórással kapcsolatos kutatások Csizmazia Zoltán professzor úr vezetésével. A kutatás időszerű, hiszen az egész világon elterjedt röpítőtárcsás műtrágyaszórókkal igen nagy területteljesítmény érhető el, és további fejlesztésük napirenden van. Olieslagers<sup>1</sup> a saját elméleti modelljével számolt és az azonosan felépített röpítőtárcsával mért szórásképeket hasonlította össze, ám az elméleti és kísérleti eredmények jelentősen különböztek. Moshouék<sup>2</sup> gyakorlatiasabb utat választottak: igazolták, hogy a műtrágyaszóró paraméterek és a műtrágyák fizikai tulajdonságainak

---

<sup>1</sup> OLIESLAGERS, R., RAMON, H. & DEBAERDEMAEKER, J. (1996). *Journal of Agricultural Engineering Research* **63**, 137-152.

<sup>2</sup> MOSHOUE, D., DEPREZ, K. & RAMON, H. (2004). *Mathematics and Computers in Simulation* **65**, 77-85.

ismeretében tanuló algoritmusokkal lehetséges a szórás képek számítógépes előrejelzése. A mérőcsarnokban végzett szórás kísérletek kiváltására Reumersék<sup>3</sup> kisméretű “in situ” gyűjtőrendszert vezettek be a hengeres illetve érintőleges eloszlások mérésére. Grifték<sup>4</sup> a tárcsáról távozó szemcsék jellemzőinek „on-line” mérésével próbálkoztak. Így a várható szórás kép ballisztikai számítással azonnal becsülhető, ami lehetőséget ad a műtrágyaszóró paramétereinek „on line” vezérlésére. Az új elv: „*inkább számítsunk, mint gyűjtsünk*” a precíziós mezőgazdaság igényeihez alkalmazkodik, költségkímélő kísérletezést tesz lehetővé és távlatilag újabb generációs műtrágyaszórók fejlesztését eredményezheti. Dolgozatom az ilyen irányba tett kezdeti lépésnek is tekinthető.

### 3. A VIZSGÁLATOK ANYAGA ÉS MÓDSZERE

A méréseket és a kísérleteket a Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum Mezőgazdaságtudományi Kar Géptani Tanszékének anyagvizsgáló laboratóriumában végeztem 20-22 °C hőmérséklet és 30 - 40 % relatív páratartalom mellett. Típusonként 50-50 kg légmentesen lezárt, zsákos műtrágya állt rendelkezésemre, amelyek:

1. Karbamid (46-0-0, Nitrogénművek Rt. Pétfürdő )
2. Ammóniumnitrát (34% N, Nitrogénművek Rt. Pétfürdő)
3. Granulált Kálisó (0-0-60%, Tiszamenti Vegyiművek Rt. Szolnok)
4. NPK 15-15-15 (Agrolinz Agrochemikalien GmbH, összetett műtrágya 15-15-15% nitrogén, foszfor és kálium tartalommal)
5. Linziszó (mészammonsalétrom 27% N, Agrolinz Melamin GmbH).

#### A szemcsehalmaz tulajdonságainak mérése

A szemcsék nedvessége változtatja a fizikai tulajdonságokat, összetapadást okozhat, ami ronthatja a szórás tulajdonságokat. A műtrágyák *nedvességtartalmának* meghatározásához háromszori ismétléssel egyenként 25 g műtrágyát hevítettem 4 órán át  $103 \pm 1$  °C hőmérsékleten szárítókemencében. A nedvességtartalmat a szárítás előtti és utáni tömegből számítottam. A *szítás méretanalízishez* típusonként 3 különböző, egymástól független 500-500 g tömegű mintát vettem, amit rázógéppel 3 percig kezeltem. Az alkalmazott rostaméret 0.8 mm, 1 mm, 2 mm, 2.5 mm, 4 mm és 6.3 mm volt.

---

<sup>3</sup> REUMERS, J., TIJSKENS, E. & RAMON, H. (2003). *Biosystems Engineering* **86**, 431-439.

<sup>4</sup> GRIFT, T. E. & HOFSTEE, J. W. (2002). *Transactions of the Asae* **45**, 561-567.

Az *ömlesztett térfogattömeg* ( $\rho_b$ ) megállapításához 1000 cm<sup>3</sup>-es mérőedényt használtam. A „*valódi*” *sűrűségek* ( $\rho_s$ ) meghatározását háromféle módon végeztem el:

- folyadékos piknométerrel ~ 1 – 5 g mennyiségű mintán
- légpiknométerrel ~150-200 g mintán
- petróleum kiszorítással mérőhengerben, a légpiknométerrel már megmért műtrágyamintán (~150-200 g minta)

A 10 ml-es ürtartalmú folyadékos piknométert petróleummal töltöttem föl. A szemcsék által kiszorított petróleum tömege és sűrűsége alapján meghatároztam a szemcsehalmaz térfogatát, majd a halmaz tömegének ismeretében kiszámoltam a műtrágya átlagos sűrűségét. A *légpiknométeres módszer* segítségével is megállapítottam a műtrágyák  $\rho_s$  sűrűségét. (Ez saját fejlesztésű eszköz, melynek leírása a **3.1** eszköz fejlesztések cím alatt szerepel.) Ellenőrzésképpen a légpiknométerrel már megmért minták sűrűségét egy petróleummal feltöltött mérőhengerben, folyadék kiszorítással is meghatároztam. A vizsgált műtrágyák  $\Phi_t$  teljes *porozitásának* megállapítására a  $\Phi_t = 1 - \rho_b / \rho_s$  összefüggést alkalmaztam (a sűrűségek definícióját lásd fentebb).

### **Súrlódási jellemzők vizsgálatára alkalmas berendezések és módszerek**

A műtrágyaszemcsék súrlódási jellemzőinek meghatározását a Géptani Tanszéken korábban fejlesztett csúsztatókészülékkel végeztem. A műtrágyaszórók lapátjain történő mozgás kis tömegáramnál egy szemcserétegű, nagyobb tömegáramnál több szemcserétegű is lehet. (Súrlódásmérő berendezéseink inkább a nagy tömegáramú körülményeknek felelnek meg.) Egy átlagos paraméterű röpítőtárcsát és műtrágya típust feltételezve, a tárcsán történő magányos szemcse mozgására vonatkozó dinamikai egyenlet alapján az egy szemcsére jutó maximális erőhatás nem lehet nagyobb 0.1-0.2 N értéknél. A csúsztatókészüléket változó súlyokkal terhelve az egy szemcsére jutó nyomóerőt a 0.01-0.3 N tartományban változtattam, (az adott, 200 x 200 mm felületű lapon, 25-750 N terheléssel, a becsült szemcseszám alapján számítva) így az üzemi körülményekhez hasonló terhelési tartományban mértem a *súrlódási faktort*. A csúsztatási sebesség az 50 mm úthosszon mintegy 4.6 mm/s volt.

A műtrágyaszemcsék csúsztatását az alább felsorolt felületeken vizsgáltam: rozsdamentes acél, fekete acél, horganyzott acéllemez, alumínium, teflon bevonatú acéllemez, bakelit, PVC, plexi, üveg, és rétegelt fa. A belső súrlódás meghatározására körforgó csúsztatókészüléket alkalmaztam. Vékony műtrágyarétegeket vizsgáltam, minden esetben hat különböző terhelést használtam, és a mérés előtt meghatározott üresjárati vonóerőt figyelembe vettem.

A műtrágya halmazok természetes *dinamikus rézsűszögét* mérődobozzal állapítottam meg. Az eszközt a vizsgált műtrágyával feltöltöttem, majd a homlokfalát hirtelen eltávolítva suvadást idéztem elő. A dinamikus rézsűszögből a belső súrlódást a  $\mu = \operatorname{tg}\alpha = a/b$  összefüggéssel közelítettem, ahol (a) a dobozban a kifolyónyílás felett mérhető műtrágyaszint, (b = 300 mm) a doboz kifolyónyílásra merőleges mérete.

## **Szemcsénként mért fizikai jellemzők meghatározása**

### **Méret, alak, tömeg, sűrűség**

A szemcsék méretének és tömegének meghatározásához műtrágya típusonként, véletlenszerű mintavételezéssel 250 elemszámú mintákat választottam. A szemcse geometriai jellemzéséhez a leghosszabb méretét ( $d_1$ ) és az arra merőleges két tengely mentén mért értékeket ( $d_2 > d_3$ ) 0.01 mm pontosságú digitális tolómérővel mértem meg. A szemcsék tömegének méréséhez 0.1 mg mérési pontosságú mérleget használtam. A szemcse „gömbalakúság” meghatározása a geometriai középátmérő és a  $d_1$  aránya alapján történt:  $g_a = (d_1 d_2 d_3)^{1/3} / d_1$ . A szemcsénkénti sűrűség  $\rho_{sz,i}$  közelítő értékeit azzal a feltételezéssel számoltam ki, hogy a szemcsetérfogatok a három merőleges méret szorzatával arányosak és a mért halmaz szemcséinek tömeg és térfogatösszegéből számított sűrűségnek meg kell egyeznie a műtrágya valódi  $\rho_s$  sűrűségével. A szemcsék érzékszervi megfigyelése alapján a kálisó kristályok szabálytalan hasáb alakúak, a többi cseppentett típus gömbhöz hasonló alakú; állagukat bevonat védi. Szemrevételezés alapján az összetapadás, porlás friss mintáknál elhanyagolható.

### **Aerodinamikai jellemzők mérése**

A légellenállási tényezők szemcsénkénti méréséhez függőleges *légcsatornát*<sup>5</sup> használtam. Az áramló levegő sebességét hógömbbel határoztam meg. A légcsatornában szemcsénként mértem meg a 250 elemű mintákban a lebegtetési sebességeket. Az aerodinamikai jellemzőket az általam kifejlesztett petróleumos ejtőcsővel más módon is meghatároztam.

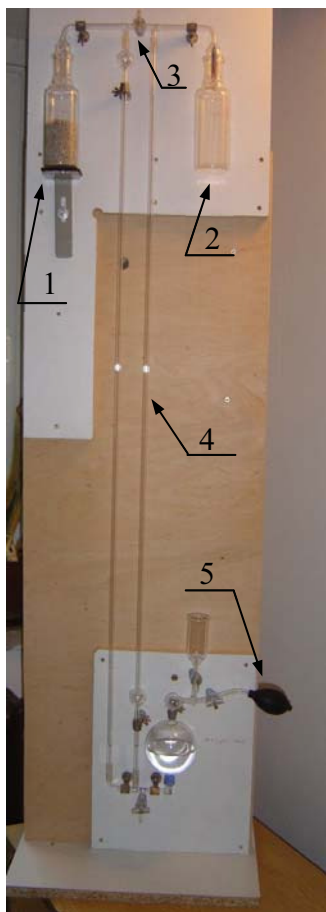
## **3.1. Eszköz fejlesztések**

### **3.1.1. Légpiknométer fejlesztése és alkalmazása a műtrágyák sűrűségmérésére**

A légpiknométerekkel üreges testek valódi térfogata határozható meg, mivel a levegő be tud hatolni a zárványokba. A szimmetrikus felépítésű száraz piknométer (**1. ábra**) részei a két

---

<sup>5</sup> CSIZMAZIA, Z., LAJOS, T., MARSHALL, J. & POLYÁK, N. I. (2000). *Mezőgazdasági Technika*, 2-5.



1. ábra Légpiknométer

azonos térfogatú mérőedény (1, 2), a két kamrát összekötő csőben elhelyezett szelep (3) és a hozzájuk kapcsolódó differenciál manométer (4). A mérés kezdetekor a manométer két függőleges szárában a vízszlop azonos alsó szintről indul, atmoszférikus nyomáson. A csapok elzárása után a kézi szivattyúval (5) növelem a két mérőkamrában a levegő nyomását. A Boyle–Mariotte gáztörvényen alapuló számításaim szerint a légpiknométeres mérésnél nem szükséges a folyadékszintek azonos szintre hozása, mivel az új kalibrálási módszer (dolgozat, 57-58. oldal) tetszőleges manométer állás esetén is pontos térfogatmérést tesz lehetővé. Ez a felismerés megkönnyíti a légpiknométer használatát a korábbi eljárásokhoz képest.

A műszer hitelesítése után a méréseket öt különböző típusú műtrágyára legalább háromszori ismétléssel végeztem el. A légpiknométer segítségével meghatározott  $\rho_s$  sűrűség értékek ellenőrzésére ugyanazon mintákon a petróleum kizorítási módszert is alkalmaztam.

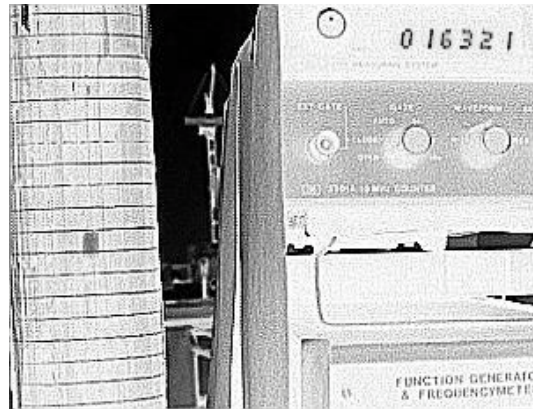
### 3.1.2. Folyadékös ejtőcső mérőeszköz fejlesztése

A szabálytalan alakú műtrágyaszemcsék légellenállási tényezőjének mérése függőleges légcsatornában vagy hosszú ejtőcsőben, nyugvó légoszlopban ejtéssel történhet. Egyszerűbb és pontosabb mérésekre kínál lehetőséget egy folyadékkal feltöltött ejtőcső. Az általam tervezett ejtőcső (2. ábra) egy 1.4 m magas 60 mm belső átmérőjű üvegcső, felül és alul állandó skálabeosztással. Fönt egy 6 mm-es koncentrikus bevezető nyílással ellátott zárósapka található, amelyen keresztül középen lehet  $v_0 \cong 0$  kezdősebességgel beejteni a szemcséket a folyadékoszlopba. A mérő közegként használt petróleum előnye, hogy abban a kémiaiilag só összetételű műtrágyák kevésbé oldódnak mint a vízben, másrészt kisebb sűrűsége miatt könnyű szemcsék is vizsgálhatók süllyedéssel (pl. növényi magvak).

Műtrágyatípusonként 15-20 szemcsét vizsgáltam. Először minden szemcse három egymásra merőleges méretét és tömegét határoztam meg, majd egyenként a függőleges légcsatorna áramló levegőjébe helyezve megállapítottam a lebegési sebességeket. Ezután ugyanazon műtrágyaszemcséket egyenként ejtettem a folyadékös ejtőcsőbe és mértem azt az időt, amely alatt a kalibrált távolságot megtették. Ezzel egyidejűleg a szemcse mozgásáról az ejtőcső



**2. ábra** Folyadékös ejtőcső



**3. ábra** Süllyedő műtrágyaszemcse az ejtőcső középső szakaszán (bal oldal), jeladó és számláló (jobb oldal)

középső szakaszán digitális fényképezőgéppel sorozatfelvételt készítettem (**3. ábra**). A fényképeken rögzített, a jeladón és a számlálón látható értékekből a süllyedési idő pontosan mérhető. A fényképezőgéppel mért határsebességen kívül a süllyedés teljes tartamára kiértékeltem a mozgásegyenletet, majd a két módszerrel kapott légellenállási tényezőket összehasonlítottam a hagyományos légcatornás mérés eredményeivel.

### A folyadékös ejtőcső elméleti vonatkozásai

A petróleummal töltött ejtőcsőben a süllyedő részecskére a súlyerő, a felhajtóerő és a változó közegellenállási erő hat. A mozgásegyenlet Newton II. törvénye alapján - átrendezés után - az alábbi formában írható fel:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + C_D A \frac{1}{2} \rho_p \left( \frac{dy}{dt} \right)^2 = mg \frac{\rho_m - \rho_p}{\rho_m}$$

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{C_D A \rho_p}{m}$$

ahol:  $\rho_p$ : a petróleum sűrűsége [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_m$ : a műtrágya sűrűsége [kg/m<sup>3</sup>]  
 $m$ : a műtrágyaszemcsék tömege [kg]  
 $g$ : a gravitációs állandó [m/s<sup>2</sup>]  
 $A$ : a műtrágyaszemcsék keresztmetszete az áramlás irányára merőlegesen [m<sup>2</sup>]  
 $C_D$ : dimenzió nélküli alaktényező  
 $K_p$ : a vitorlahatási tényező petróleumban [m<sup>-1</sup>]

A másodrendű differenciálegyenlet általános megoldása a  $C_1$  és  $C_2$  integrálási konstansokkal Grift (1997) megoldását kiterjesztve a következő:

$$y(t) = \frac{1}{K_p} \left\{ \ln \left[ \cosh \left( (t - C_1) \sqrt{g K_p \frac{\rho_m - \rho_p}{\rho_m}} \right) \right] \right\} + C_2$$

(ha a szemcse 0 magasságból, 0 sebességgel indul, akkor  $C_1=0$  és  $C_2=0$ )

A mért idő ( $t$ ) és az esési út  $y(t)$  ismeretében az egyenletet  $K_p$ -ra numerikusan megoldottam. Feltételezve, hogy a  $C_D$  alaktényezők a két közegben kialakuló áramlási körülmények között azonosak, a  $k_l$  légellenállási tényező  $K_p$  ismeretében származtatható ( $\rho_l$ : a levegő sűrűsége):

$$k_l = m K_p \frac{\rho_l}{\rho_p}$$

A  $v_T$  végsebesség ismeretében pedig:

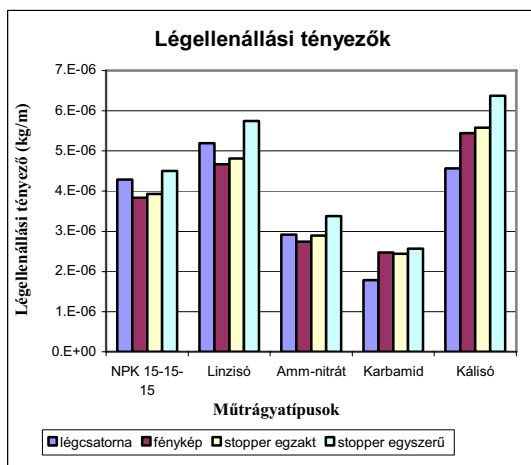
$$k_l = K_l m = \frac{mg}{v_T^2} \left( \frac{\rho_m}{\rho_p} - 1 \right) \frac{\rho_l}{\rho_m} \quad \text{Re} = d v \rho_p / \eta_p$$

A mozgásegyenlet segítségével az ismert fizikai tulajdonságú műtrágyákra elméletileg kiszámoltam a Grift-féle levegős illetve a petróleumos ejtőcső közötti eltéréseket. A petróleumos (a petróleum sűrűsége  $\rho_p = 793 \text{ kg/m}^3$ , viszkozitása  $\eta_p = 2.14 \cdot 10^{-3} \text{ Pa s}$ ) ejtőcső esetén egy  $d \approx 4 \text{ mm}$  átmérőjű műtrágyaszemcsére a Re "Reynolds szám"<sup>6</sup> már az első 0.1-0.2 cm megtétele után nagyobb 50-nél és 3-5 cm út megtétele után eléri a végső 500 körüli értéket, miután az esési sebesség gyakorlatilag állandósul s így az állandó  $C_D$  feltételezése jó közelítés. A levegős ejtőcső esetén viszont a szemcse sebessége, a Reynolds szám és ebből következően a  $C_D$  értéke a szemcse 16 méternyi esése során folyamatosan változik.

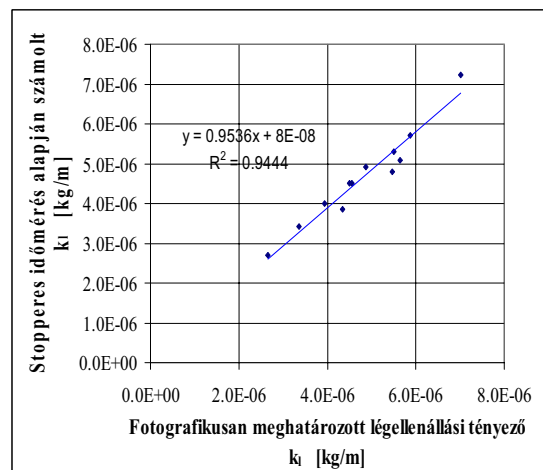
<sup>6</sup> GRIFT, T. E., WALKER, J. T. & HOFSTEE, J. W. (1997). *Transactions of the Asae* **40**, 13-20.

## A folyadékos ejtőcsővel nyert kísérleti eredmények

A petróleumos ejtőcső középső, (a tető alatt 60 cm-nél kezdődő, 25 cm hosszú) szakaszát használtam a fényképezéshez. A petróleumban mért tényezőket a fenti egyenlet segítségével számítottam át a levegőben várható értékre. A **4. ábra** a folyadékos módszerrel mért átlagos  $k_1$  légellenállási értékeket hasonlítja össze a légcatornás adatokkal (műtrágyánként 15-20 szemcsén). Jól látható, hogy az ejtőcső esetén a fényképes és a fenti egyenlettel értékelt kézi időmérésű értékek egyeznek a legjobban. A **5. ábrán** a linzisó esetén szemcsénként is bemutatom a kétféle értékelést. A stopperes mérések közelítő értékelése mindig nagyobb légellenállási értéket ad, hiszen az átlagsebességet alulbecsüli. A légcatornás eredmények pozitív és negatív irányban is eltérnek a legjobbnak vélt két módszertől.



**4. ábra** Műtrágyánként mért átlagos légellenállási tényezők, módszerekenként



**5. ábra** Linzisó szemcsék légellenállási tényezői a fényképes ill. időmérés alapján

## A folyadékos ejtőcső kísérleti alkalmazásából levont következtetések

A jelen mintáktól különböző 250 szemcsés mintákon a légcatornában korábban mért légellenállási adatok a karbamid kivételével minden esetben magasabbak voltak. Hofstee (1992) szerint a légcatornával mérhető lebegtetési sebességek kisebbek, mint a levegős ejtőcsővel mért végsebességek, ezért a légcatornás mérés túlbecsüli a légellenállási tényező értékét. Hofstee ezt azzal magyarázta, hogy a függőleges légcatorna pitot csöves érzékelője nem a tényleges lebegtetési sebességet méri. A szemcsék szabálytalan mozgása szintén növelheti a légellenállási tényező látszólagos értékét.

A folyadékos ejtőcsöves méréseket egyszerűségük és az elhanyagolásoktól mentes kiértékelés különösen vonzóvá teszi. A készülék további előnye hogy olcsó, kisméretű, nem igényel kalibrálást, a mérések fényképesen dokumentáltak és a mérési pontosság még javítható.

Vizsgálataim azt mutatták, hogy az azonos mintákon mért stopperes és digitális fényképezőgépes módszerek hasonló értékeket adnak, míg az ugyanazon mintán végzett légcatornás mérések szórása nagyobb. A készülék félautomatikus labor berendezéssé fejlesztése lehetséges a műtrágyák minőségének ellenőrzésére.

## **4. AZ ÉRTEKEZÉS FŐBB MEGÁLLAPÍTÁSAI**

### **4.1 A műtrágyák nedvességtartalma, szemcseösszetétele, sűrűsége és porozitása**

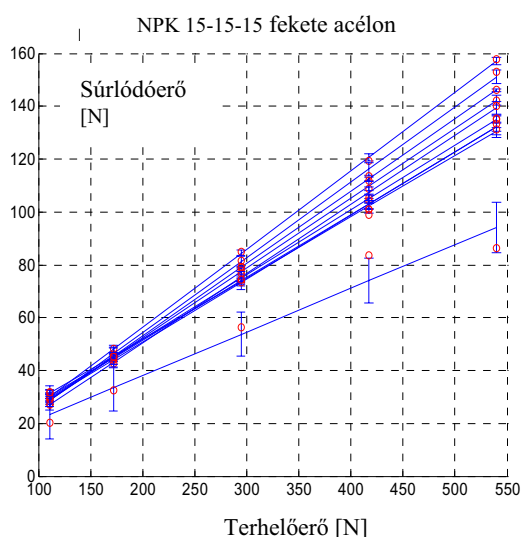
Mindegyik típus esetén megállapítható, hogy a zsákosan tárolt műtrágyák gyártás utáni nedvességtartalma nem jelentős: 0.05 %-tól (kálisó) 1.25 %-ig (NPK) terjed. A tárolás folyamán a nedvességtartalom növekedhet, ami kedvezőtlenül hat az ömlesztett műtrágya állagára, kezelhetőségére és szórási tulajdonságaira. Azt találtam, hogy az NPK 15-15-15 esetében a 2.5 – 4.0 mm, míg a linzisonál a 4.0 – 6.3 mm-es mérettartományba jutnak legnagyobb mennyiségben a szemcsék. Ez a munkaszélességre kedvező hatású. A karbamid tartalmazza legnagyobb arányban a legkisebb méretű 1.0 – 2.0 mm-es szemcsefrakciót.

A különböző sűrűségmeghatározási módszerekkel nyert adatok szerint a karbamid a legkisebb sűrűségű ( $1244 \text{ kg/m}^3$ ), míg a másik négy műtrágya egymáshoz hasonló sűrűségű ( $1720 \pm 100 \text{ kg/m}^3$ ). Mivel a különböző módszerekkel mért sűrűségek elfogadható egyezést mutattak és irodalmi adatok szerint a  $\rho_s$  „valódi” sűrűség átlagosan legfeljebb 10%-al haladhatja meg a  $\rho_g$  „látszólagos” szemcse-sűrűséget, ezért a későbbi ballisztikai számításokhoz a légpiknométerrel mért  $\rho_s$  sűrűség adatokat használtam, mivel ez hasonlít leginkább a levegőben történő mozgás feltételeihez. A vizsgált műtrágyák térfogattömeg és az ebből származtatható porozitás értékeit meghatároztam. A karbamid térfogattömege a legkisebb, ezért tárolásnál, szállításnál ez igényli a legnagyobb kapacitásokat. Viszont a kálisó magas térfogattömeg értéke valószínűleg a szabálytalan alaknak tulajdonítható. Az NPK 15-15-15 műtrágya teljes  $\Phi_t$  porozitása a legkisebb. A porozitások meglehetősen egységesek: értékük a 0.4-0.45 sávban mozog, jó összhangban egy egyszerű modelltől számított  $\Phi_t = 0.52$  elméleti felső korláttal. A porozitást a szemcsék méretbeli változatossága csökkenheti.

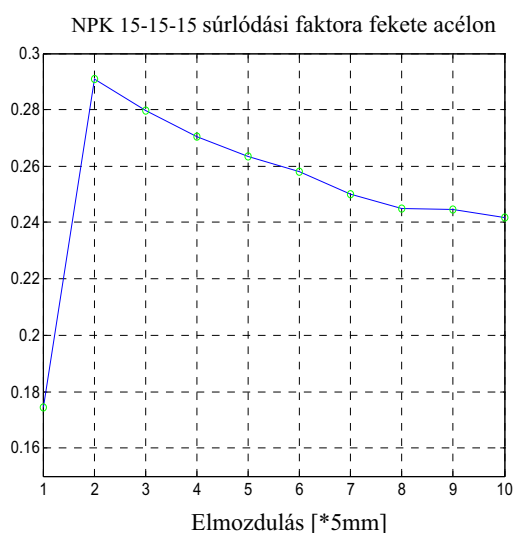
### **4.2 Felületi csúsztatás és súrlódás**

Tapasztalataim szerint a mért súrlódási együttható a terhelés növelésével – a felület és műtrágya fajtától függően - növekedhet, csökkenhet vagy éppen közel állandó, de nagyobb terheléseknél általában észlelhető egy közel állandó szakasz. A terhelés növelése a felső 300-

500 N tartományig - a tapasztalatok szerint - stabilizálja a mért súrlódási együttható értékét. Ezért az „a” típusú értékelésnél a súrlódási faktor értékének a három legnagyobb terhelésnél kapott érték átlagát tekintetem. A súrlódási faktorokat az elmozdulás függvényében is meghatároztam („b” típusú értékelés) úgy, hogy adott elmozdulásnál a vonóerőt a terhelés függvényében egyenessel illeszttem, majd az illesztésből adódó maximális vonóerőt osztottam a hozzá tartozó normális irányú terhelő erővel. Az így kapott súrlódási faktorokat az első és utolsó elmozdulási pont kizárásával átlagoltam. Az **a.** illetve **b.** módszerekkel kapott *átlagok* hibahatáron belül egyeztek. Az **6.** és **7. ábrán** a súrlódóerőt illetve a súrlódási faktort ábrázolom a terhelés illetve az elmozdulás függvényében (**b.** módszer). A szerkezeti anyagként alapvető fontosságú rozsdamentes acél esetében – méréseim szerint - a felületi súrlódási faktorok műtrágya típustól függően a 0.2-0.35 tartományba esnek. A teflon felületen a legkisebb, míg a fekete acélon a legnagyobb a súrlódás. Az általam mért felületi súrlódási faktorok az irodalomban közölt adatok (0.2-0.7) alsó sávjába esnek.



**6. ábra** NPK 15-15-15 és fekete acél: súrlódó erők illesztése a terhelés függvényében



**7. ábra** NPK 15-15-15 és fekete acél közötti súrlódási faktor változása az elmozdulás során

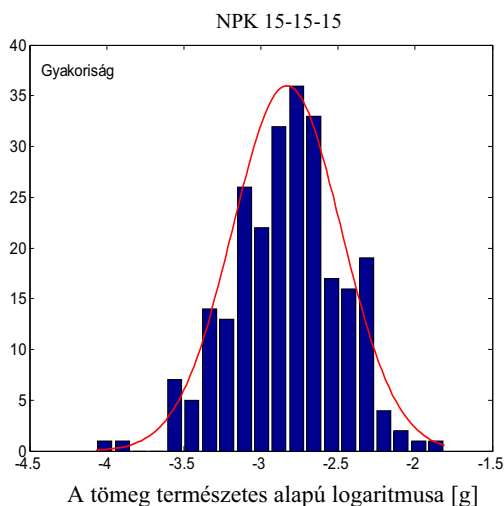
### 4.3 Belső súrlódás

A belső súrlódást ugyanazzal a készülékkel mértem, mint a felületi súrlódásokat, de a körforgó berendezéshez szükséges tartozékokkal kiegészítve. A kálisó belső súrlódása volt a legnagyobb (0.62), az ammónium nitráté és a karbamidé a legkisebb (0.40-0.41). A dinamikus rézsűszögből nyert  $\mu_i$  értékek mindig 0.1-0.2 értékkel nagyobbak bizonyultak, mint a csúsztatókészülékkel mért adatok. Sitkei is kiemeli, hogy a természetes rézsűszög és a belső súrlódási szög nem függetlenek egymástól, azonban értékük csak ritkán azonos. A mért

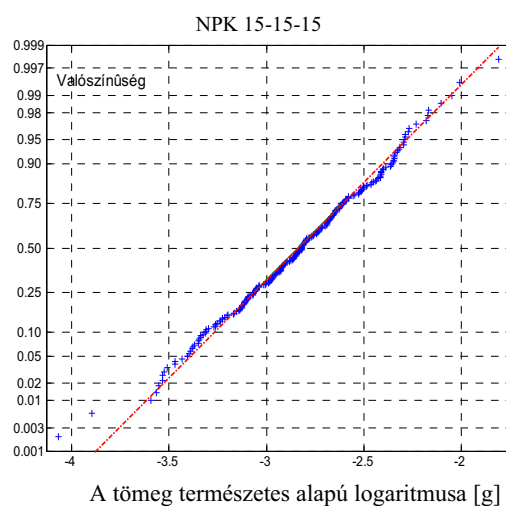
rézsűszög értékek függhetnek a mérőkészüléktől is: az általunk használt berendezésnél felléphet suvadás, míg a szokásos dinamikus és statikus „természetes” rézsűszögmérők csak az adott kísérleti körülményekre érvényes rézsűszöget adnak.

#### 4.4 A műtrágyák szemcsénként mért fizikai tulajdonságai és statisztikus jellemzésük

Az alábbi fizikai jellemzőket illetve azok logaritmusát valószínűségi változóknak tekintve hipotézis vizsgálatokat végeztem. A *három merőleges méret „d” átlagát* vizsgálva azt kaptam, hogy csak az ammónium-nitrát esetében zárható ki a normál eloszlás. A legkisebb a karbamid „d” szemcsemérete, a legnagyobb pedig a linzisóé. Az átlagos sugarak sorrendje ugyanaz, mint a szemcseméretké, és a  $d \approx 2r$  összefüggés a közel gömb alakú szemcséknél teljesül a legpontosabban. A *gömbalakúság* a kálisó esetén a legrosszabb, míg a karbamidnál a legjobb: a többi műtrágyánál 0.9 fölötti átlag értéket mértem (a tökéletes gömbre lenne egységnyi). A karbamid *átlagos szemcsetömege* a legkisebb (a szemcsék kis mérete miatt), de az ammóniumnitráté is kisebb, mint a másik három műtrágyáé. A *tömegeloszlás* az NPK 15-15-15 esetében lognormál eloszlású (**8. és 9. ábra**), az ammóniumnitráté és kálisóé biztosan nem az, míg a többi nem egyértelmű. Azt kaptam, hogy egyedül a kálisó *szemcsénkénti sűrűsége* lognormál eloszlású, az NPK-15-15-15 és a linzisó bizonytalan. A szemcsék sűrűsége a karbamid esetén a leghomogénebb (5.9 % inhomogenitás), míg a kálisónál a legkevésbé egységes (12.6%).



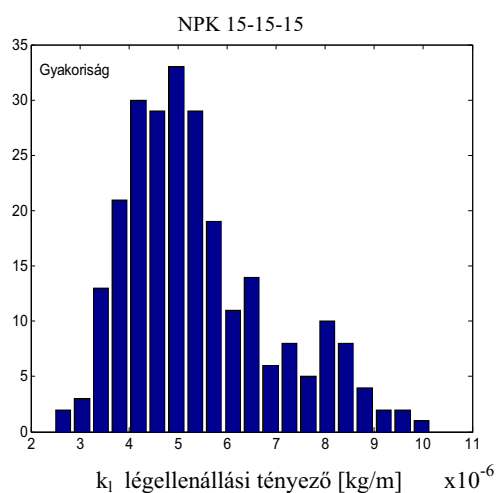
**8. ábra** NPK 15-15-15 szemcsék:  
a tömeg logaritmusának eloszlása



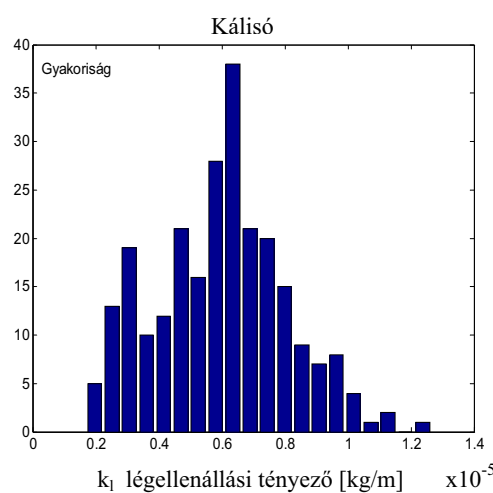
**9. ábra** NPK 15-15-15 szemcsék:  
a lognormál eloszlás próbája

Egyedül a kálisó **légellenállási tényezői** mutatnak egyértelműen normál eloszlást. A **10. és 11. ábrán** a légellenállási tényezők eloszlás ábráját mutatom be párba állítva. Jól látszik az NPK 15-15-15 és a kálisó légellenállása közti lényeges különbség: az utóbbinak

kedvezőtlenebbek az aerodinamikai tulajdonságai. A kálisó légellenállása a legnagyobb, és a  $C_D$  alaktényezője is kiugróan magas. Ezek a sajátságok feltehetően a szabálytalan kristály alakokkal magyarázhatók. Az átlagos sugárból illetve szemcseméretekből származtatott átlagos  $C_D$  alaktényezők - a kálisó esetét kivéve - jól egyeznek (dolgozat, 4.6 táblázat). Jelen munkában a ballisztikai számításokat szemcsénként végeztem, és az eredmények azt mutatják, hogy a kiszórás során a statisztikai eloszlásokban rejlő szabálytalanságok öröklődhetnek a szórási képben, de a szórás folyamata össze is moshatja a nagyobb eltéréseket.



**10. ábra** NPK 15-15-15 szemcsék légellenállási tényezőinek eloszlása



**11. ábra** Kálisó szemcsék légellenállási tényezőinek eloszlása

#### 4.5. A ballisztikai számítások

A ballisztikus problémát részletesen elemezte Kármán Tódor, míg a hazai mezőgazdasági alkalmazások kimunkálásában Soós Pál és munkatársai vettek részt. E helyen csak az általam alkalmazott összefüggéseket adom meg.

$$k_1 = m g / v_t^2$$

$$k_1 = C_D A \rho_l / 2$$

$$m_c = m(\rho - \rho_l) / \rho$$

ahol " $k_1$ " a légellenállási tényező, " $C_D$ " pedig dimenzió nélküli alaktényező, " $v_t$ " az elméleti határsebesség, „ $A$ ” a részecske legnagyobb keresztmetszete, és „ $\rho_l$ ” a levegő sűrűsége. Ha az aerosztatikai nyomás nem hanyagolható el, Archimedes törvénye alkalmazandó és „ $m$ ” helyettesíthető a felhajtóerő miatt korrigált „ $m_c$ ”-vel. Ha egy szemcsét pályájának egy adott pontján a  $v$  sebesség vektorával illetve a  $v$  és a vízszintes  $x$  tengely által bezárt  $\beta$  szöggel jellemzünk, akkor a szemcse mozgásegyenlete az alábbi:

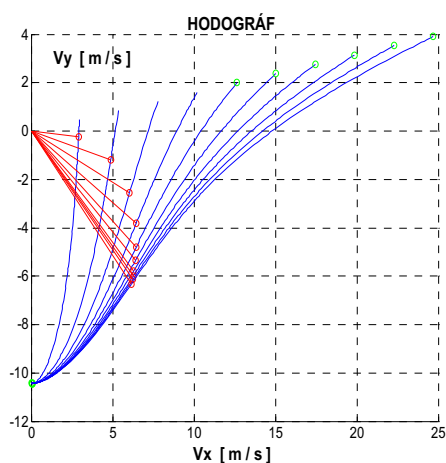
$$dv/d\beta = v \operatorname{tg} \beta - k_1 v^3 / (m g \cos \beta)$$

Ez v-re nézve elsőrendű differenciálegyenlet  $\beta$  függvényeként, amit numerikusan oldottam meg. Így a sebesség nagyságát kapom a  $\beta$  szög függvényében, amit sebesség *velográf*nak nevezek. (A szokásosabb *hodográf* a  $v_x$  és a  $v_y$  merőleges sebességkomponenseket rendeli egymáshoz.) A pálya paraméteres egyenletrendszere:

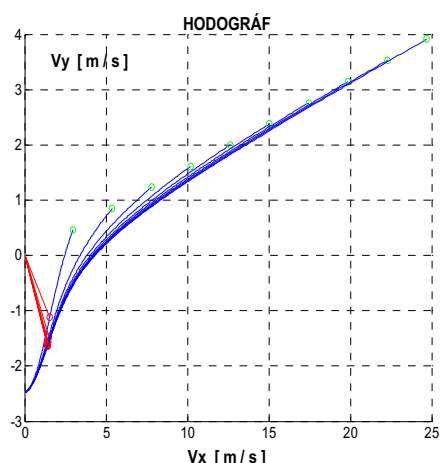
$$x = v_0^2 / g \int f(\beta)^2 / \cos^2 \beta \, d\beta \qquad y = v_0^2 / g \int f(\beta)^2 / \cos^3 \beta \sin \beta \, d\beta$$

$$f(\beta) = \{ 1 + k_1 (v_0 \cos \alpha)^2 / (mg) [\ln(\cos \alpha (1 + \sin \beta) / (\cos \beta (1 + \sin \alpha))) + \sin \beta / \cos^2 \beta - \sin \alpha / \cos^2 \alpha] \}^{-1/2}$$

A hodográf sorozat jól mutatja (**12. ábra**), hogy az NPK-15-15-15 műtrágya átlagos paramétereit használva ( $\alpha = -9^\circ$  a ferde hajítás  $\alpha$  szöge fölfelé negatív,  $v_0 = 3 - 25$  m/s,  $C_D = 0.69$ ,  $r = 2$  mm) 10.6 m/s végsebességet kapunk. A hodográf  $v_x = 0$  sebességénél olvasható le az elméleti  $v_y$  határsebesség, amikor a szemcse hosszú idő elteltével, már majdnem pontosan függőlegesen esik. Ez nem függhet a kezdeti feltételektől, így a kezdeti sebességtől sem.



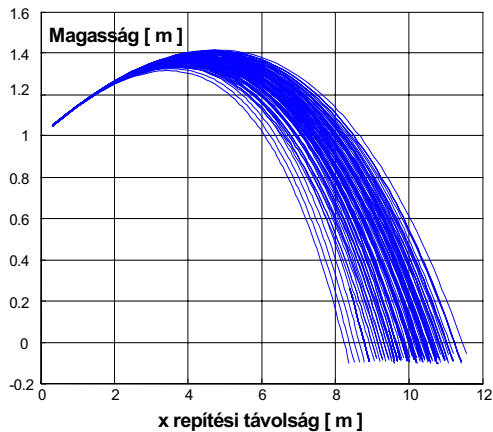
**12. ábra** NPK 15-15-15 műtrágyaszemcsék hodográfjai



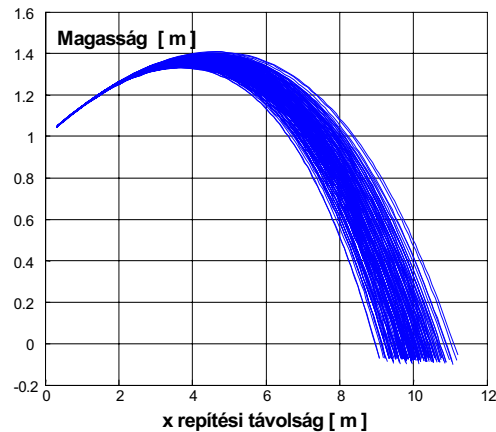
**13. ábra** Könnyű szemcse hodográfjai

Igen érdekesek egy könnyű szemcse hodográfjai (**13. ábra**). Ezt a 12. ábra paramétereivel megegyező adatokkal számoltam ki, kivéve a szemcse sűrűséget, ami itt  $100 \text{ kg/m}^3$ . Könnyű részecskék esetén a hodográf alig függ a kezdeti sebességtől, és a süllyedési végsebesség csak  $\sim 2.4$  m/s.

A röpítőtárcsás műtrágyaszóró tárcsája gyűrű alakban teríti a műtrágyát. E szórási gyűrű sugárirányú metszetében mért eloszlás számolására az x,y paraméteres egyenletek  $\beta$  szerinti integrálása révén nyert pályagörbékéből (**14. és 15. ábra**) van lehetőség. A metszetre jellemző hisztogramokat közvetlenül a pályagörbékéből számoltam.

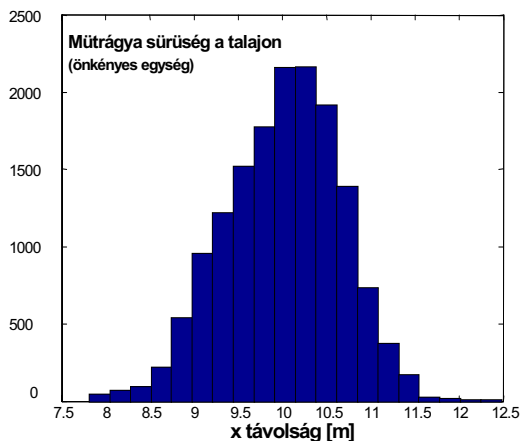


**14. ábra** NPK 15-15-15 szemcsék számított repítési pályái

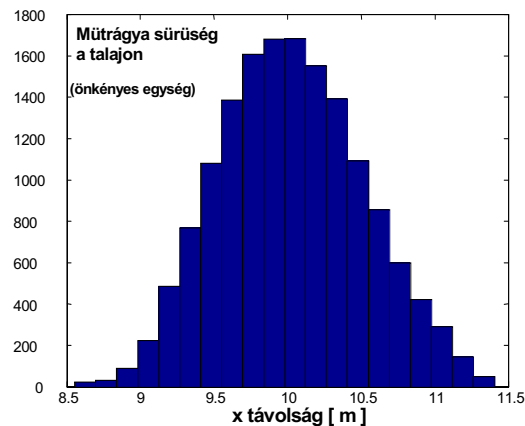


**15. ábra** Linzisó szemcsék számított repítési pályái

A legszembevetőbb különbség az NPK-15-15-15 műtrágya szórási gyűrűje sugárirányú metszetének egyenetlensége és aszimmetriája (**16. ábra**), amely csaknem 3 méteres sávot ad szemben a linzisó 2 m-nél valamelyest szélesebb sávjával (**17. ábra**). Ennek



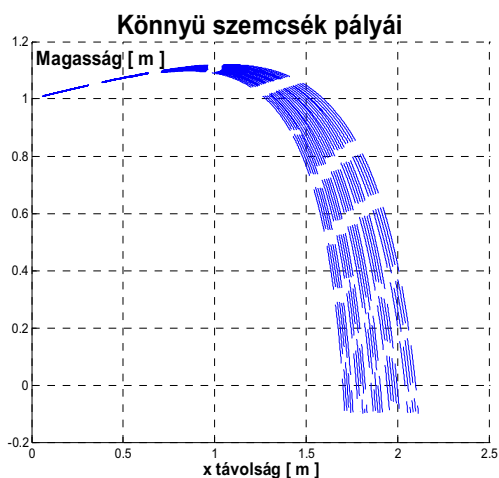
**16. ábra** NPK 15-15-15 szemcsék szórási gyűrűjének sugárirányú metszete



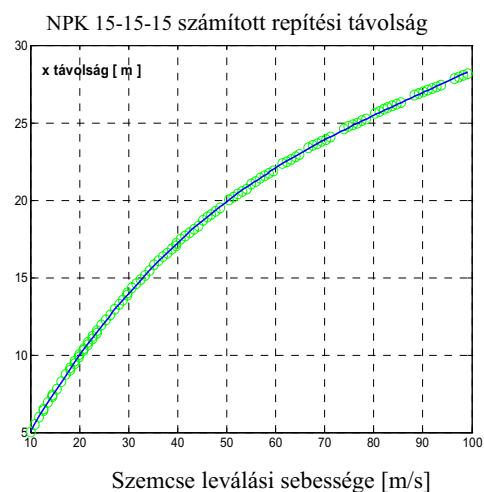
**17. ábra** Linzisó szemcsék szórási gyűrűjének sugárirányú metszete

valószínű magyarázata a linzisó szemcsék eltérő fizikai tulajdonságában rejlik. A három komponensű NPK műtrágya komplexebb gyártása nagyobb szórási bizonytalanságot eredményezhet. Ugyanakkor a legvalószínűbb sugárirányú kiszórási távolság mindkét műtrágyánál kb. 10 m-re tehető. Ha könnyű anyagot ( $100 \text{ kg/m}^3$ ) szórunk ki (**18. ábra**), és minden egyéb paraméter egyezik, akkor az átlagos repítési távolság mindössze 1.9 m. A repítési távolság növelhetőségével kapcsolatos számításaim szerint (**19. ábra**) az NPK 15-15 esetén a leválási sebesség növelése 10-ről 20 m/s értékre még 5 m-el növeli a repítési távolságot, míg a 60-ról 70 m/s-ra növelés már csak 1.9 m-el. A tapasztalattal összhangban azt kaptam, hogy a leválási sebesség növelése nem növeli arányosan a repítési távolságot.

Szimulációkat végeztem az  $\alpha$  leválási szög és a H tárcsamagasság változtatásának hatását illetően is. Azt állapíthatom meg, hogy ezeknek a paramétereknek a változtatása a szokásos konstrukciókhoz képest már nem hozna ésszerű javulást a szórás szélességének javítására.



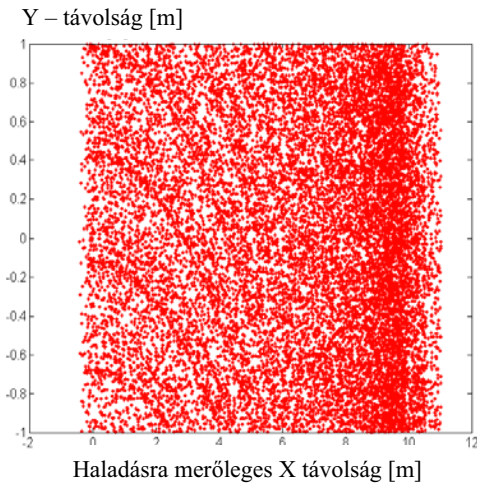
18. ábra Könnýű szemcsék számított repítési pályái



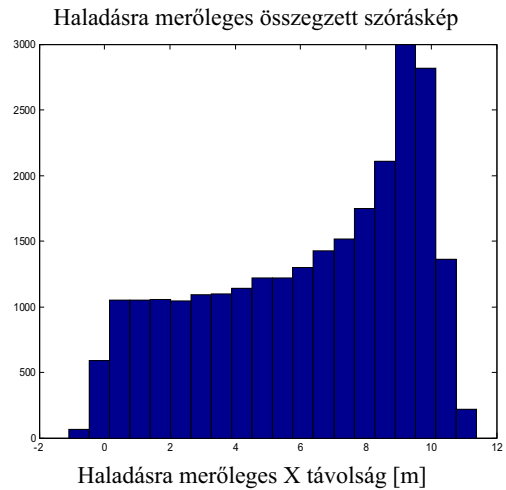
19. ábra Az átlagos NPK 15-15-15 szemcse számított repítési távolsága a leválási sebesség függvényében

### A teljes szóráskép számítása

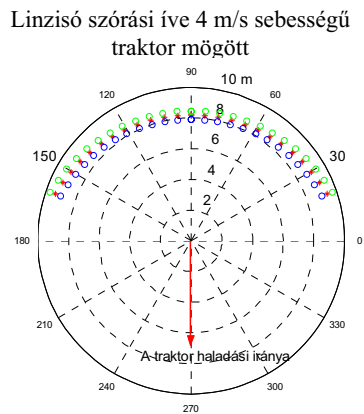
Az előzőekben kiszámolt sugárirányú hisztogramokat bemenő adatként használva kiszámítható a szántóföldön várható teljes szórási kép. Ehhez két egymást követő geometriai transzformációt kell végrehajtani. Először a röpitőtárcsa elfordulását veszem figyelembe oly módon, hogy a kiindulási hisztogramot  $\Phi = 0$ -tól  $90^\circ$  -ig növekvő szöggel elforgatom. Így egy teljes gyűrű negyedéhez jutok. Ezután a kapott negyed gyűrű pontjait sokszorozom kis, y-irányú eltolásokkal, ami a traktor haladását helyettesíti. Végül is a forgatással és eltolással megsokszorozott pontok új koordinátái adják a termőföld felszínére érkező műtrágyaszemcsék koordinátáit (20. ábra). Az elfordulási szög léptetésének randomizálásával „utánozható” a valós röpitőtárcsa működése. A szimmetria miatt elegendő csak a jobboldali szóráskép kiszámítása. A traktor sebességét elhanyagolhatom a lerepülő szemcsék sebességéhez képest. A 21. ábra mutatja az y haladási irányra merőleges szórásképet. Ez hasonlít a korai elméleti eredményekhez és a gyakorlati tapasztalatokhoz, és jól mutatja a röpitőtárcsás gép ismert szórás egyenlőtlenségét. A két műtrágya szórás képét összehasonlítva azt kaptam, hogy az összetett NPK 15-15-15 műtrágya kiszórása valamelyest egyenetlenebb mint a linzisóé.



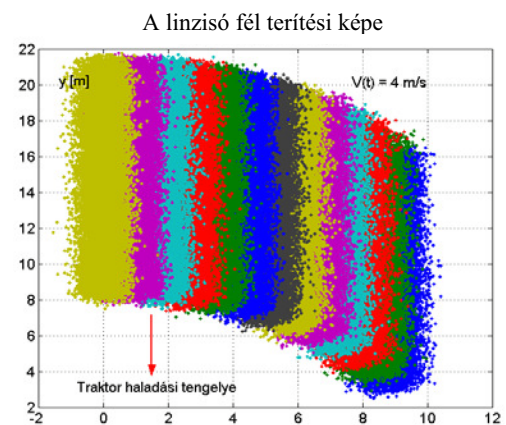
**20. ábra** Linziszó szemcsék eloszlása a felületen ( $\Phi = 0-90^\circ$ )



**21. ábra** Linziszó haladási irányra merőleges szórásképe ( $\Phi = 0-90^\circ$ )



**22. ábra** Linziszó szemcsék kezdeti szórási gyűrűje haladó traktor mögött ( $\Phi = 30-150^\circ$ )

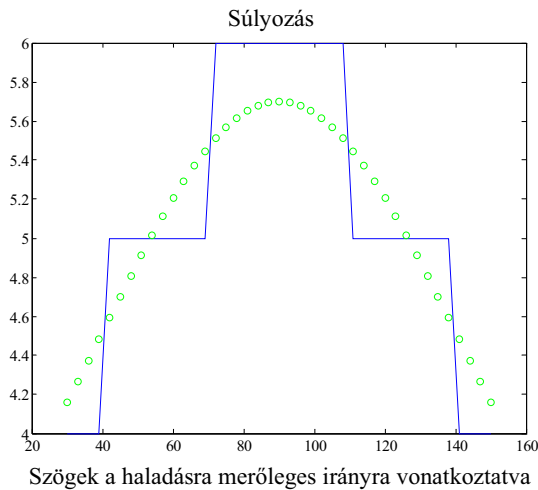


**23. ábra** Linziszó szemcsék szórásképe a haladó traktor mögött ( $\Phi = 30-150^\circ$ )

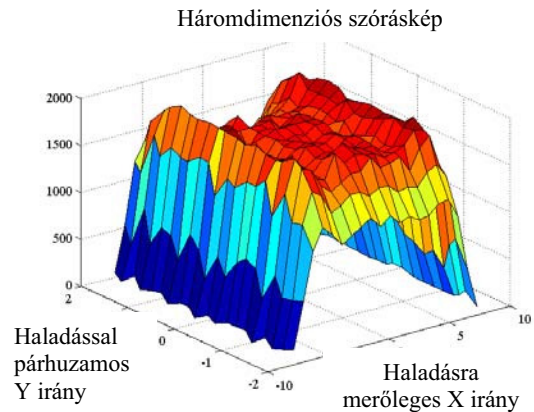
A traktor  $v_t$  sebességű haladásának figyelembe vételét a szántóföldi vonatkoztatási rendszerre való áttéréssel oldottam meg, a következő transzformációkkal:

$$v_y = v_o \cos\alpha \sin\beta - v_t \quad v_x = v_o \cos\alpha \cos\beta \quad \text{és a hajítás új iránya } \text{tg } \gamma = v_y/v_x.$$

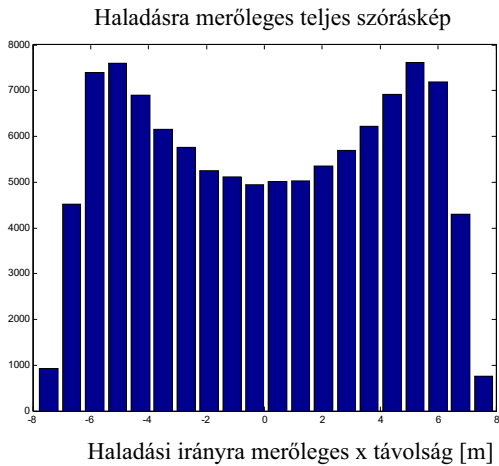
Az eredmények grafikus megjelenítése a **22-23. ábrákon** látható. A szórás egyenlőtlenesség numerikus értékeléséből azt kaptam, hogy a traktor szokásos (4 m/s) munkasebessége a haladásra merőleges szórás kép egyenletességét csak elhanyagolható mértékben rontja. A szórás egyenlőtlenesség mértéke elvileg csökkenthető, ha a tárcsáról távozó szemcseáram eloszlása nem izotróp (szögfüggetlen eloszlású), hanem a haladási irányban maximális. Ilyen „kísérlet” eredménye látható a **24.-27. ábrákon**, amely egyértelműen mutatja a haladási irányban súlyozott részecskeáram jótékony hatását.



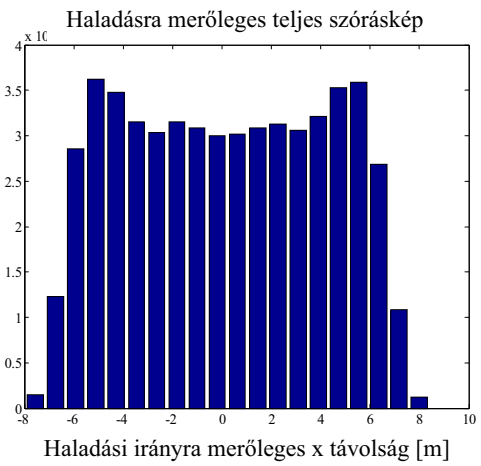
**24. ábra** Karbamid elméletileg súlyozott részecskeárama ( $\Phi = 30-150^\circ$ )



**25. ábra** Karbamid 3D szórásképe súlyozott részecskeáram esetén



**26. ábra** Karbamid haladásra merőleges szórásképe homogén részecskeáram esetén



**27. ábra** Karbamid haladásra merőleges szórásképe egyenletesebb a súlyozott részecskeáram hatására

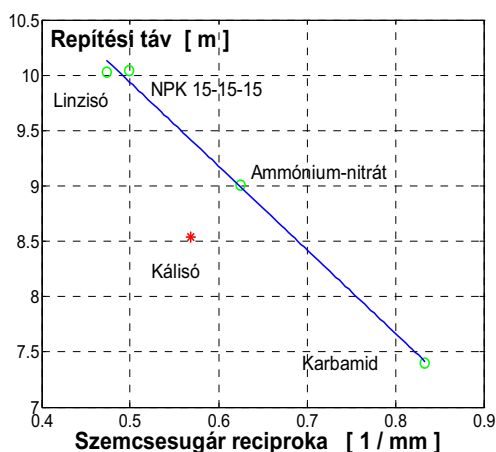
Öt különböző műtrágyának mértem meg a szóráskép előrejelzéséhez szükséges paramétereit, amelyeket az **1. táblázatban** foglalkozok össze. A szórás kép számításához azt a legegyszerűbb (izotróp) modellt választottam, amelyben a szórótárcsáról lerepülő szemcsék tömegárama minden megengedett irányban egyenletes. A valós röpitőtárcsákhoz képest az izotróp modell a szélre szórást hangsúlyozza. Ennek ellenére, a szórás adatok változása jelzi, hogy a szórás minőségi jellemzői milyen paraméterekre érzékenyek. Például érthető, hogy a karbamid kis mérete és kis sűrűsége miatt nem repül messzire, míg a kálisó rövidebb röppályáját a rossz aerodinamikai tulajdonsága okozza. Bár az NPK 15-15-15 és a linzisó hasonló távolságra repül, mégis az összetett NPK 15-15-15 kevésbé egyenletesen szórható. A különböző

műtrágyákat összehasonlítva azt kaptam, hogy a  $C_D$  alaktényező a gömbszerűség lineáris függvénye, ( $R^2 = 0.90$ ), míg a repítési távolság a szemcse tömegével növekszik.

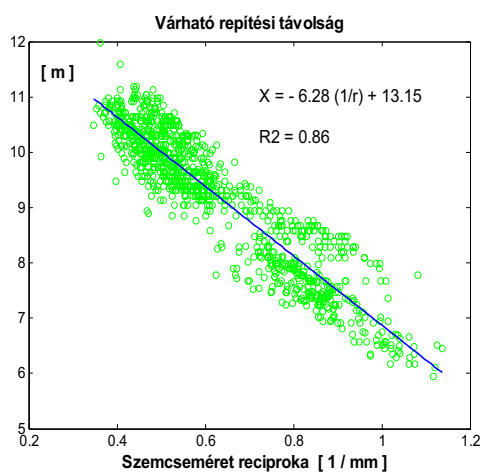
### 1. táblázat

Műtrágyák	NPK 15-15-15	Linzisó	Karbamid	Amm.nitr.	Kálisó
d- méret [mm]	$3.97 \pm 0.47$	$4.25 \pm 0.63$	$2.39 \pm 0.29$	$3.08 \pm 0.67$	$3.83 \pm 0.56$
tömeg [mg]	$62.6 \pm 22.1$	$67.7 \pm 28.6$	$9.55 \pm 3.31$	$28.2 \pm 16.2$	$45.7 \pm 17.3$
sűrűség [ $\text{kg/m}^3$ ]	$1758 \pm 146$	$1676 \pm 132$	$1244 \pm 73$	$1611 \pm 103$	$1840 \pm 231$
gömbalakúság	$0.91 \pm 0.06$	$0.90 \pm 0.06$	$0.96 \pm 0.02$	$0.92 \pm 0.04$	$0.78 \pm 0.07$
Légellenállás [ $10^{-6} \text{kg/m}$ ]	$5.4 \pm 1.5$	$5.8 \pm 2.0$	$1.7 \pm 0.4$	$3.2 \pm 1.5$	$6.0 \pm 2.1$
alaktényező ( $C_D$ )	$0.69 \pm 0.08$	$0.63 \pm 0.06$	$0.59 \pm 0.04$	$0.63 \pm 0.06$	$0.80 \pm 0.12$
repítési táv. [m]	$10.0 \pm 0.7$	$10.0 \pm 0.5$	$7.4 \pm 0.6$	$9.0 \pm 0.6$	$8.5 \pm 0.5$

A legérdekesebb eredmény azonban az, hogy adott kezdeti sebességet feltételezve az *átlagos repítési távolság lineárisan csökken az átlagos szemcse sugár reciprokával* ( $R^2 = 0.99$ , ha a nagyon szabálytalan alakú kálisótól eltekintünk, **28. ábra**).



**28. ábra** A szemcsék várható repítési távolságainak *átlaga*



**29. ábra** Négyféle műtrágya 1000 szemcséjének várható repítési távolságai

A négyféle műtrágya 1000 szemcséjére illesztett  $1/r$  típusú függvény esetén  $R^2 = 0.86$  (**29. ábra**). Ez a szoros kapcsolat – ami ráadásul *négy műtrágya esetén a műtrágya típusától sem függ* - összefüggésben van azzal, hogy a keresztmetszet/tömeg arány hasonló sűrűségű részecskék esetén  $\sim 1/r$ -el arányos. Az  $1/r$  kapcsolatban a vitorlahatási tényező ( $K_v$ ) játszik fontos szerepet, hiszen  $K_v$  a felület/térfogat ( $\sim 1/r$ ) hányadosal arányos és a mozgásegényletből ismert, hogy a levegő fékező ereje arányos a vitorlahatási tényezővel és a

sebesség négyzetével. A vízszintes hajítás speciális esetére érvényes közelítő összefüggés szintén alátámasztja az  $1/r$  szabály érvényességét. Az NPK műtrágya esetében használt állandó paraméterekkel ( $\alpha = -9^\circ$ ) kiszámítottam a várható repítési távolságot a szélsőséges 0.1 - 4 mm szemcsesugár tartományban. Azt kaptam, hogy a tipikus 1-3 mm szemcsesugár tartományban a repítési távolság  $1/r$  függvényében lineáris vagy enyhe másodfokú függvénnyel jól illeszthető. Ha az  $\ln(1/r)$  függvényében illeszték, akkor a másodfokú illesztés a teljes 0.1 - 4 mm tartományra jó illeszkedést ad. Az  $1/r$  szabály biztató a tekintetben, hogy a szántóföldi műtrágyaszórás közben mérhető szemcseméret és sebesség alkalmas lehet a szórás kép azonnali becslésére – ballisztikai számítás nélkül. Grift és Hofstee 2002-ben hasonló módszert javasoltak, amikor a 'becsapódási mátrix' előzetes kiszámítása után interpolálással számolták a becsapódási helyeket a ballisztikus probléma szemcsénkénti megoldása helyett.

## 5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK. TÉZISEK

1. Komplex mérési és adatfeldolgozási módszert dolgoztam ki nagyszámú műtrágyaszemcse fizikai jellemzőinek mérésére. Az általam javított száraz-piknométeres módszerrel a teljes porozitást a szemcsehalmazok valódi térfogatából határoztam meg. A teljes porozitás elméleti felső korlátját egy geometriai modellből vezettem le, amelynél az általam kísérletileg mért összes porozitás érték kisebb volt (dolgozat 69. oldal). A szemcsénkénti sűrűséget a szemcseméretekből határoztam meg.
2. A szemcsék légellenállási tényezőjének közvetett mérésére bevezettem a petróleumos ejtőcsöves módszert. Tapasztalataim szerint az új eszközzel mért aerodinamikai jellemzők megbízhatóbbak, mint a légsatornás lebegtetési módszerrel mérték. Az eltérő módszerekkel kapott légellenállási tényezők hasonlósága kísérletileg alátámasztja az új módszer alkalmazhatóságát. A meghatározott állandók használhatók a ballisztikai pályák közelítő számításához és a becsapódási hely meghatározásához.
3. A műtrágyaszemcsék levegőben történő ferde hajításának számítására kidolgoztam a „virtuális műtrágyaszóró” nevű szimulációs programot, amely a kezdeti feltételek

alapján nagyszámú ismert fizikai tulajdonságú szemcse pályaelemzésére alkalmas, és első lépésben kiszámítja a szemcsék becsapódási helyét.

- 3.a. A hodográfos ábrázolás  $v_y = f(v_x)$  kiegészítésére bevezettem a „velográfos” megjelenítést ( $v = f(\beta)$ , a sebesség nagysága a sebesség irányának függvényében), amely közvetlenül mutatja a szemcse által bejárt sebességtartományt. A velográfos elemzéssel elméletileg igazoltam, hogy a szokásos kezdeti feltételekkel, gömbök esetén a  $C_D$  ellenállási tényező változása a pálya mentén  $\pm 3\%$ -on belül marad. Ezért a becsapódási pontok számításához egy effektív, állandó  $C_D$  feltételezése jó gömbalakúságú szemcsék esetén indokolható (dolgozat, 83. oldal).
- 3.b A vizsgált műtrágyák kiválasztott kezdeti paramétereinek elemzéséből műtrágyánként megadtam a várható repítési távolságot a leválási sebesség, a leválási szög és a tárcsa pozíció függvényében. Megállapítottam, hogy ezen paraméterek változtatása a napjainkban szokásos konstrukciókhoz képest jelentős előrelépést már nem hozhat a szórásszélesség növelésében (dolgozat, 86-87. oldal).
4. A ballisztikából nyert becsapódási pontok feldolgozására megvalósítottam a „virtuális műtrágyaszóró” második feladatát, a szórási kép előrejelzését a szántóföldön. Így a haladó gép mögött képződő szórási kép, valamint a kereszt és hosszirányú szórásképek számíthatók, megjeleníthetők és jellemzőik is számíthatók. Bemutattam az általam karakterizált műtrágyák eltérő szórás képét, a paraméter változtatások hatását és numerikusan igazoltam néhány elhanyagolás indokoltságát.
  - 4.a Számításaim szerint az általam vizsgált műtrágyaszemcsék tömegeloszlásából származtatott tömegközéppont legfeljebb 4%-al tolódik el - a nagyobb repítési távolságok irányába - a szemcseszámok alapján kapott geometriai középponthez képest. Ezért az eloszlások leírására a szemcseszámok használata is megfelelő (dolgozat 93. oldal).
  - 4.b Megállapítottam, hogy sebességarányos tömegáramot biztosítva a traktor vontatási sebességének növelése nulláról 4-8 m/s értékre a haladásra

merőleges szórás egyenlőtlenségét mindössze 1-2% -al növeli, ezért hatása első közelítésben elhanyagolható (dolgozat 91. oldal).

- 4.c Megállapítottam, hogy a traktor mögötti irányokban egyenletes szemcseáramot adó „elméleti” egytárcsás műtrágyaszórónál a haladási tengely mentén a legkisebb a szemcsesűrűség a talajon. Az ilyen jellegű „hiba” számításaim szerint kompenzálható olyan tárcsakonstrukcióval, amely a haladási irányban adja a legnagyobb részecskeáramot (dolgozat 92. oldal).
5. Megállapítottam, hogy az általam vizsgált műtrágyáknál - a szabálytalan alakú kálisó kivételével - a repítési távolság a műtrágya típusától függetlenül a szemcseátmérő reciprokával arányosan csökken. Ez az összefüggés lehetővé teszi a működő gépen üzem közben megmért szemcsék hajítási távolságának becslését ballisztikai számítás nélkül.

## **6. AZ EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTHATÓSÁGA**

1. A petróleumos ejtőcsővel a műtrágyák aerodinamikai tulajdonsága felhasználás előtt vizsgálható. Az ejtőcső alkalmassá tehető mezőgazdasági szemcsés termények vizsgálatára is. Az aerodinamikai vizsgálatokhoz a függőleges légcsatorna helyett inkább a petróleumos ejtőcső használatát javaslom.
2. A szemcsénkénti sűrűségmérés automatizálást követően a műtrágya termékek gyártásközi minőségének követésére alkalmassá tehető.
3. A „virtuális műtrágyaszóró gép”, ballisztikai és szemcseterítési modulját elkészítettem. A legújabb irodalmi eredmények alapján a szemcsék tárcsán való mozgását szimuláló első modul egy újabb munka keretében megvalósulhat. Ennek birtokában a számított és mért szórásképek összehasonlításával hatékony tervezési segédeszközhöz lehet jutni, amely az oktatásban is jól használható.
4. Alternatív módszerként a helyspecifikus műtrágyázás megvalósításához a röpitőtárcsás eszközöket optikai méret és sebesség mérő érzékelőkkel kellene ellátni. A műtrágya típustól és a gép beállításától függő „on line” szóráskép

becslést „tanuló algoritmusokkal” lehetne javítani. Ezek után a fedélzeti számítógép/GPS kombináció alkalmas lenne a helyspecifikus műtrágya kijuttatás vezérlésére.

## 7. PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN

1. Csizmazia Z. - Balló B. - Kasza F. - Polyák N. I. - Hagymássy Z. - Ancza B. E. – **Gindert-Kele Á.** (2001) Súrlódásmérő készülék fejlesztése. Mezőgazdasági Technika. 42. évf. 7. sz. 4-6. p.
2. Csizmazia Z. - Hagymássy Z. – **Gindert-Kele Á.** - Ancza B.E. (2001) Összetett műtrágya súrlódási viszonyainak vizsgálata. Georgikon Napok. Keszthely. 1136-1139.p.
3. Ancza B.E. - Csizmazia Z. – **Gindert-Kele Á.** - Hagymássy Z. (2002) Műtrágyaszemcsék súrlódása különböző felületeken. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 127-131.p.
4. Hagymássy Z. - Csizmazia Z – **Gindert-Kele Á.** - Ancza B.E. (2002) Műtrágyaszemcsék belső súrlódása. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 160-164.p.
5. **Gindert-Kele Á.** - Csizmazia Z. - Ancza B.E. - Hagymássy Z. (2002) Műtrágyaszemcsék néhány fizikai jellemzője. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 165-169.p.
6. **Gindert-Kele Á.** - Csizmazia Z. - Ancza B.E. - Hagymássy Z. (2002) Műtrágyák fizikai jellemzőinek összehasonlító vizsgálata. Wellmann Oszkár Tudományos Tanácskozás. Hódmezővásárhely. 63.p.
7. Hagymássy Z. - Csizmazia Z - **Gindert-Kele Á.** (2002) Parcella műtrágyaszóró gép fejlesztése. Wellmann Oszkár Tudományos Tanácskozás. Hódmezővásárhely. 64. p.
8. Csizmazia Z.-Ancza B.E. - **Gindert-Kele Á.** -Hagymássy Z. (2002) Internal friction of fertilizers. AgEng International Conference on Agricultural Engineering. Budapest. 170-171. p.
9. **Gindert-Kele Á.** (2002) Összetett műtrágya fizikai jellemzői. EU konform mezőgazdaság és élelmiszerbiztonság Tudományos Konferencia. Debrecen 356-361. p.
10. **Gindert-Kele Á.** - Hagymássy Z. - Ancza B.E. - Csizmazia Z. (2002) Műtrágyák aerodinamikai jellemzőinek vizsgálata. V. Nemzetközi Élelmiszertudományi Konferencia, Szeged 119-120.p.
11. Ancza B.E. - **Gindert-Kele Á.** - Hagymássy Z. - Csizmazia Z. (2002) Műtrágyaszóró gép munkaminőségi jellemzői, V. Nemzetközi Élelmiszertudományi Konferencia. Szeged 147-148. p.
12. Hagymássy Z. - Csizmazia Z. - **Gindert-Kele Á.** - Ancza B.E. (2002) Módosított parcella szórógép vizsgálata, V. Nezetközi Élelmiszertudományi Konferencia. Szeged 125-126. p.
13. E. Ancza - Z. Csizmazia - **A. Gindert-Kele** - Z. Hagymássy (2002) Friction between fertilizer particles and different types of surfaces, Hungarian Agricultural Engineering, No. 15. 41-43. p.

14. **Gindert-Kele Á.** (2003) A pétisó sűrűlódási jellemzői, Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 3. kötet 46-50. p.
15. **Gindert-Kele Á.** (2003) Valós szórás kép jóslása nitrogén és összetett műtrágyák esetén a ballisztikus probléma megoldásával, Mezőgazdasági Technika 4. sz. 2-4.p.
16. **Gindert-Kele Á.** (2003) Predicting fertilizer spreading pattern, Natural Resources and sustainable development Oradea
17. **Á. Gindert-Kele** (2003) Fertiliser pattern prediction of spinning disc spreaders Hungarian Agricultural Research, No. 9. 6-8. p
18. **Gindert-Kele Á.** - Hagymássy Z. - Ancza E. (2004) Műtrágyák szórás képének jóslása a szemcsék vizsgálata alapján Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 1. kötet 160-164. p.
19. Hagymássy Z. - **Gindert-Kele Á.** - Ancza E. (2004) Mikroparcella műtrágyaszóró gép vizsgálata Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 1. kötet 34-38. p.
20. **Gindert-Kele Á.** (2005) Új mérőeszközök alkalmazása műtrágyaszemcsék vizsgálatára Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő
21. **Gindert-Kele Á.** (2005) Folyadékos ejtőcső fejlesztése műtrágyaszemcsék aerodinamikai jellemzőinek mérésére. Összehasonlítás a légcSATORNÁS módszerrel. Mezőgazdasági Technika, 1. sz. 2-4.p.