

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 sajátosságai 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 szemcsehalmoz eloszlását a talajon. A röpitőszerkezet elhagyása után a repülő szemcse pályagörbjét a szemcse kezdeti mozgásállapota és a levegő közegellenállása határozza meg. A gyakorlat megkívánja, hogy a ballisztikus pályagörbjét 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 célom, 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. Olieslagers¹ a saját elméleti modelljével számolt és az azonosan felépített röpítőtárcsával mért szórásképeket hasonlította össze, ám az elméleti és kísérleti eredmények jelentősen különböztek. Moshouék² gyakorlatiasabb utat választottak: igazolták, hogy a műtrágyaszóró paraméterek és a műtrágyák fizikai tulajdonságainak

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

² MOSHOU, D., DEPREZ, K. & RAMON, H. (2004). *Mathematics and Computers in Simulation* **65**, 77-85.

ismeretében tanuló algoritmusokkal lehetséges a szórási képek számítógépes előrejelzése. A mérőcsarnokban végzett szórási kísérletek kiváltására Reumersék³ kisméretű “in situ” gyűjtőrendszert vezettek be a hengeres illetve érintőleges eloszlások mérésére. Grifték⁴ 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. Linzisó (mészammonsalétrom 27% N, Agrolinz Melamin GmbH).

A szemcsehalmaz tulajdonságainak mérése

A szemcsék nedvessége változtatja a fizikai tulajdonságokat, összetapadást okozhat, ami ronthatja a szórási tulajdonságokat. A műtrágyák *nedvességtartalmának* meghatározásához háromszori ismétléssel egyenként 25 g műtrágyát hevítettem 4 órán át 103 ± 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.

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

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

Az *ömlesztett térfogattömeg* (ρ_b) megállapításához 1000 cm³-es mérőedényt használtam. A „*valódi*” *sűrűségek* (ρ_s) meghatározását háromféle módon végeztem el:

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

A 10 ml-es űrtartalmú folyadékos piknométert petróleummal töltöttem föl. A szemcsék által kizorított 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 ρ_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 kizorítással is meghatároztam. A vizsgált műtrágyák Φ_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 üresjáratú 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 ρ_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

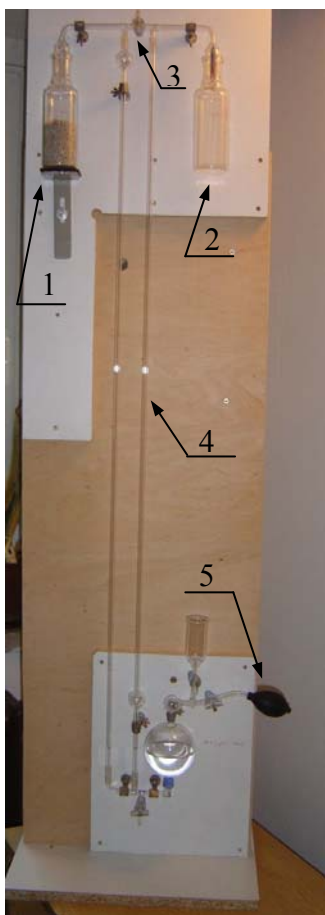
A légellenállási tényezők szemcsénkénti méréséhez függőleges *légcsatornát*⁵ használtam. Az áramló levegő sebességét hógömbbel határoztam meg. A légcsatornában szemcsénként mértem meg a 250 elemű mintákban a lebegtetési sebességeket. Az aerodinamikai jellemzőket az általam kifejlesztett petróleumos ejtőcsővel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

⁵ 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 ρ_s sűrűség értékek ellenőrzésére ugyanazon mintákon a petróleum kizsorításos módszert is alkalmaztam.

3.1.2. Folyadékos 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 folyadékos 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: ρ_p : a petróleum sűrűsége [kg/m³]

ρ_m : a műtrágya sűrűsége [kg/m³]

m : a műtrágyaszemcsék tömege [kg]

g : a gravitációs állandó [m/s²]

A : a műtrágyaszemcsék keresztmetszete az áramlás irányára merőlegesen [m²]

C_D : dimenzió nélküli alaktényező

K_p : a vitorlahatási tényező petróleumban [m⁻¹]

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 (ρ_l : a levegő sűrűsége):

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

A v_T végsebesség ismeretében pedig:

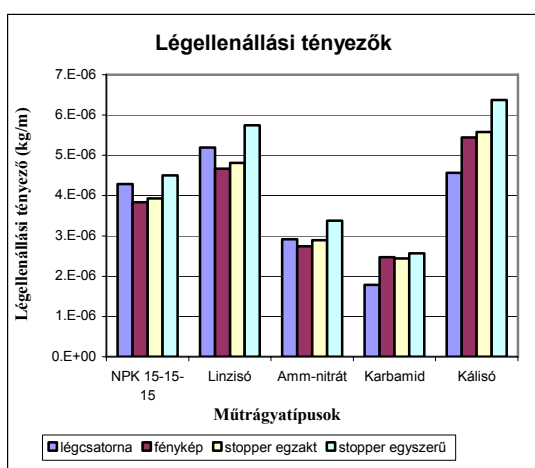
$$k_l = K_l m = \frac{mg}{v_T^2} \left(\frac{\rho_m}{\rho_p} - 1 \right) \frac{\rho_l}{\rho_m} \quad \text{Re} = d v \rho_p / \eta_p$$

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"⁶ 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.

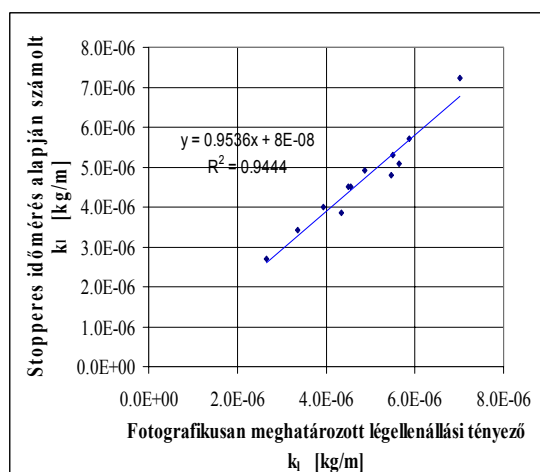
⁶ GRIFT, T. E., WALKER, J. T. & HOFSTEE, J. W. (1997). *Transactions of the Asae* **40**, 13-20.

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_l légellenállási értékeket hasonlítja össze a légcsatornás adatokkal (műtrágyánként 15-20 szemcsén). Jól látható, hogy az ejtőcső esetén a fényképes és a fenti egyenletekkel 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 légcsatornás eredmények pozitív és negatív irányban is eltérnek a legjobbnak vélt két módszertől.



4. ábra Műtrágyánként mért átlagos légellenállási tényezők, módszerenként



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 légcsatornában korábban mért légellenállási adatok a karbamid kivételével minden esetben magasabbak voltak. Hofstee (1992) szerint a légcsatornával mérhető lebegtetési sebességek kisebbek, mint a levegős ejtőcsővel mért végsebességek, ezért a légcsatornás mérés túlbecsli a légellenállási tényező értékét. Hofstee ezt azzal magyarázta, hogy a függőleges légcsatorna pitot csőves érzékelője nem a tényleges lebegtetési sebességet méri. A szemcsék szabálytalan mozgása szintén növelheti a légellenállási tényező látszólagos értékét.

A folyadékos ejtőcsőves 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 légcSATORNÁS 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

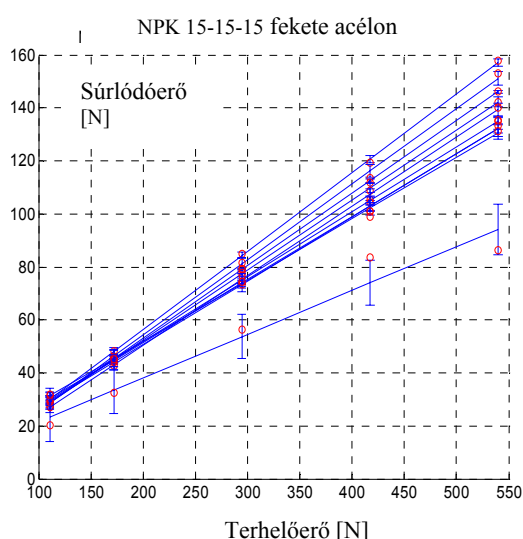
Mindegyik típus esetén megállapítható, hogy a zsákosan tárolt műtrágyák gyártás utáni nedvességtartalma nem jelentős: 0.05 %-tól (kálisó) 1.25 %-ig (NPK) terjed. A tárolás folyamán a nedvességtartalom növekedhet, ami kedvezőtlenül hat az ömlesztett műtrágya állagára, kezelhetőségére és szórási tulajdonságaira. 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 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 ρ_s „valódi” sűrűség átlagosan legfeljebb 10%-al haladhatja meg a ρ_g „látszólagos” szemcse-sűrűséget, ezért a későbbi ballisztikai számításokhoz a légpiknométerrel mért ρ_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 Φ_t porozitása a legkisebb. A porozítások meglehetősen egységesek: értékük a 0.4-0.45 sávban mozog, jó összhangban egy egyszerű modellből számított $\Phi_t = 0.52$ elméleti felső korláttal. A porozitást a szemcsék méretbeli változatossága csökkenheti.

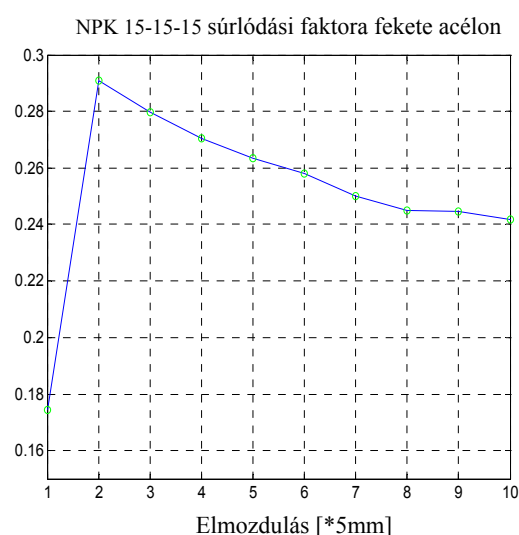
4.2 Felületi csúsztatás és súrlódás

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 tekintettem. A súrlódási faktorokat az elmozdulás függvényében is meghatároztam („b” típusú értékelés) úgy, hogy adott elmozdulásnál a vonóerőt a terhelés függvényében egyenessel illesztettem, 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

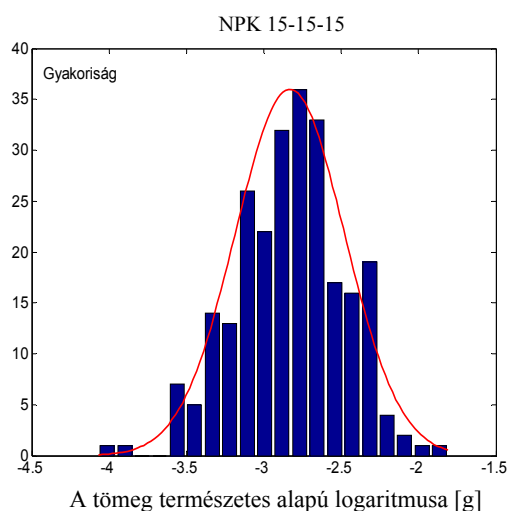
4.3 Belső súrlódás

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 nitrát és a karbamidé a legkisebb (0.40-0.41). A dinamikus rézsűszögből nyert μ_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

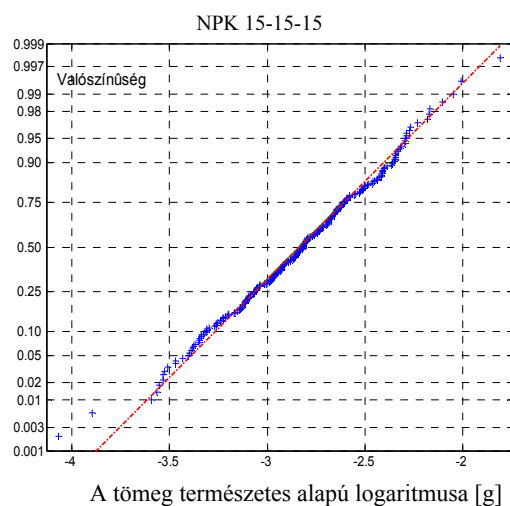
rézsűszög értékek függhetnek a mérőkészüléktől is: az általunk használt berendezésnél felléphet suvadás, míg a szokásos dinamikus és statikus „természetes” rézsűszögmérők csak az adott kísérleti körülményekre érvényes rézsűszöget adnak.

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 szemcseméreteké, 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%).



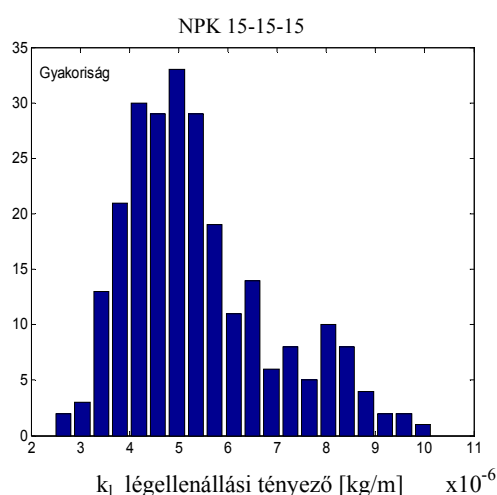
8. ábra NPK 15-15-15 szemcsék:
a tömeg logaritmusának eloszlása



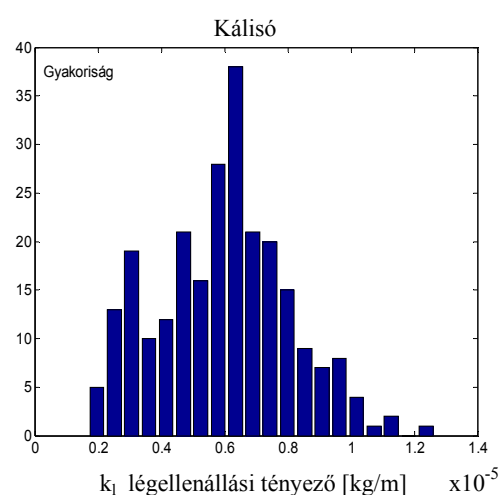
9. ábra NPK 15-15-15 szemcsék:
a lognormál eloszlás próbája

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.

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

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

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

ahol " k_l " a légellenállási tényező, " C_D " pedig dimenzió nélküli alaktényező, " v_t " az elméleti határsebesség, „ A ” a részecske legnagyobb keresztmetszete, és „ ρ_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 β szöggel jellemzünk, akkor a szemcse mozgásegyenlete az alábbi:

$$dv/d\beta = v \tan \beta - k_l v^3 / (mg \cos \beta)$$

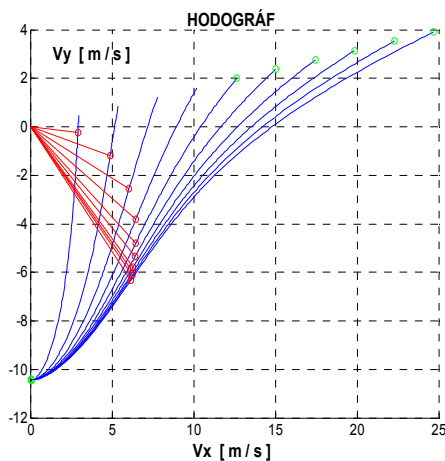
Ez v -re nézve elsőrendű differenciálegyenlet β függvényeként, amit numerikusan oldottam meg. Így a sebesség nagyságát kapom a β szög függvényében, amit sebesség *velográfnak* nevezek. (A szokásosabb *hodográf* a v_x és a v_y merőleges sebességkomponenseket rendeli egymáshoz.) A pálya paraméteres egyenletrendszere:

$$x = v_o^2 / g \int f(\beta)^2 / \cos^2 \beta \, d\beta$$

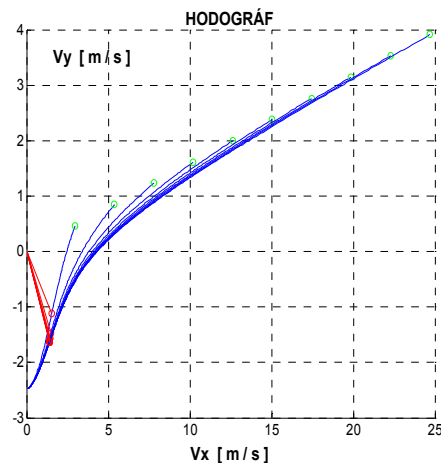
$$y = v_o^2 / g \int f(\beta)^2 / \cos^3 \beta \sin \beta \, d\beta$$

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

A hodográf sorozat jól mutatja (12. ábra), hogy az NPK-15-15-15 műtrágya átlagos paramétereit használva ($\alpha = -9^\circ$ a ferde hajítás α szöge fölfelé negatív, $v_o = 3 - 25$ 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.



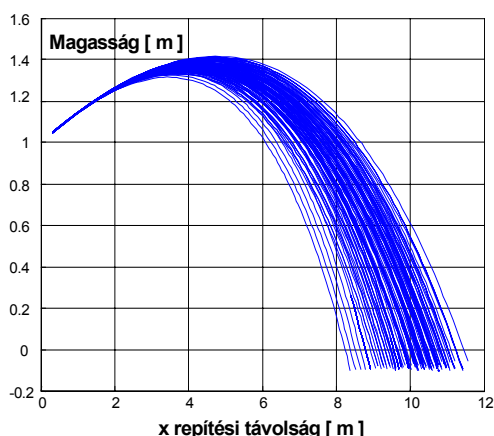
12. ábra NPK 15-15-15 műtrágyaszemcsék hodográfjai



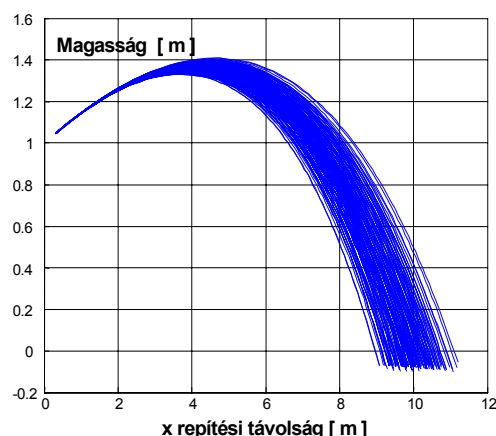
13. ábra Könnyű szemcse hodográfjai

Igen érdekesek egy könnyű szemcse hodográfjai (13. ábra). Ezt a 12. ábra paramétereivel megegyező adatokkal számoltam ki, kivéve a szemcse sűrűséget, ami itt 100 kg/m^3 . Könnyű részecskék esetén a hodográf alig függ a kezdeti sebességtől, és a süllyedési végsebesség csak ~ 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 β szerinti integrálása révén nyert pályagörbékből (14. és 15. ábra) van lehetőség. A metszetre jellemző hisztogramokat közvetlenül a pályagörbékből számoltam.

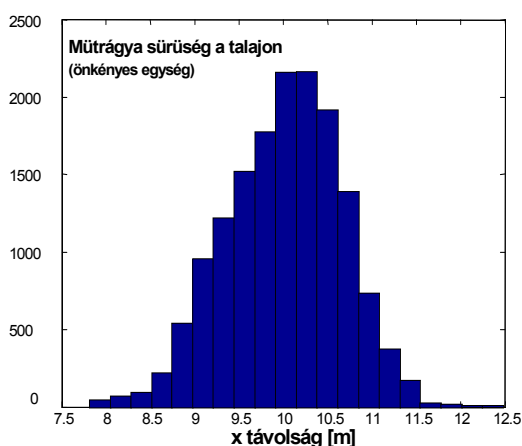


14. ábra NPK 15-15-15 szemcsék számított repítési pályái

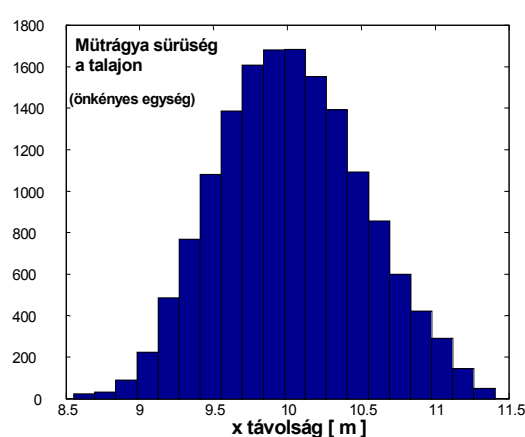


15. ábra Linzisó szemcsék számított repítési pályái

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



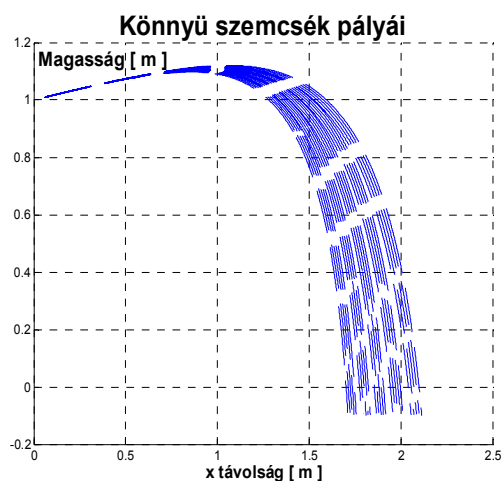
16. ábra NPK 15-15-15 szemcsék szórási gyűrűjének sugárirányú metszete



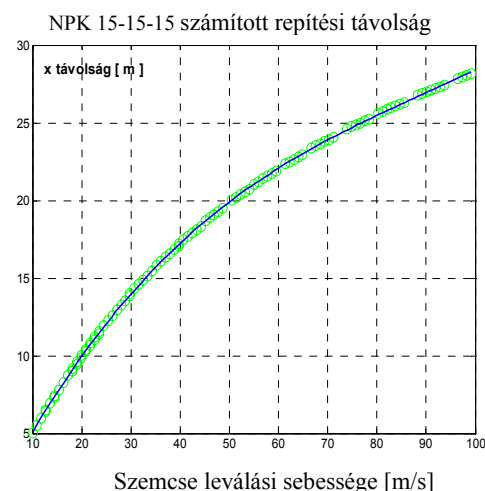
17. ábra Linzisó szemcsék szórási gyűrűjének sugárirányú metszete

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 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 15-15-15 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 α 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.



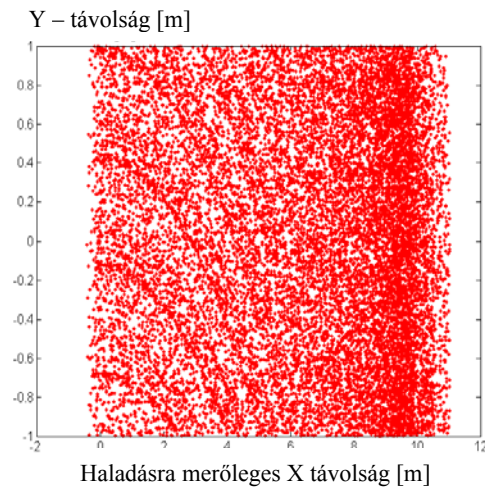
18. ábra Könnyű szemcsék számított repítési pályái



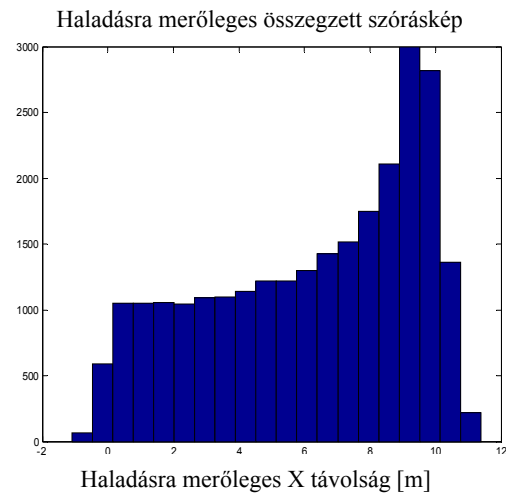
19. ábra Az átlagos NPK 15-15-15 szemcse számított repítési távolsága a leválási sebesség függvényében

A teljes szóráskép számítása

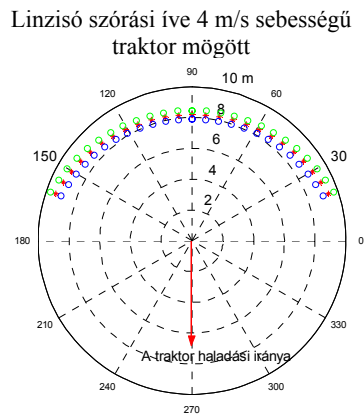
Az előzőekben kiszámolt sugárirányú hisztogramokat bemenő adatként használva kiszámítható a szántóföldön várható teljes szórási kép. Ehhez két egymást követő geometriai transzformációt kell végrehajtani. Először a röpitőtárcsa elfordulását veszem figyelembe oly módon, hogy a kiindulási hisztogramot $\Phi = 0^\circ$ -tól 90° -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.



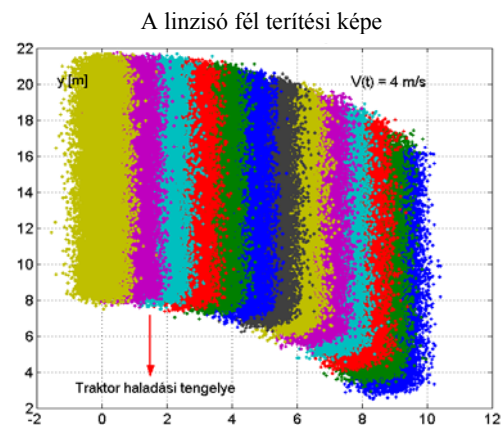
20. ábra Linziso szemcsék eloszlása a felületen ($\Phi = 0-90^\circ$)



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



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

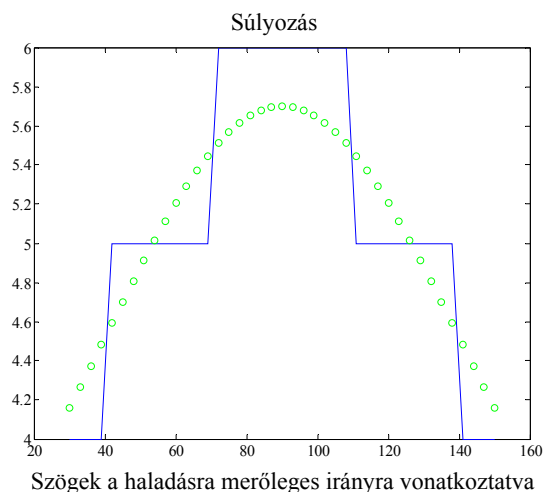


23. ábra Linziso szemcsék szórásképe a haladó traktor mögött ($\Phi = 30-150^\circ$)

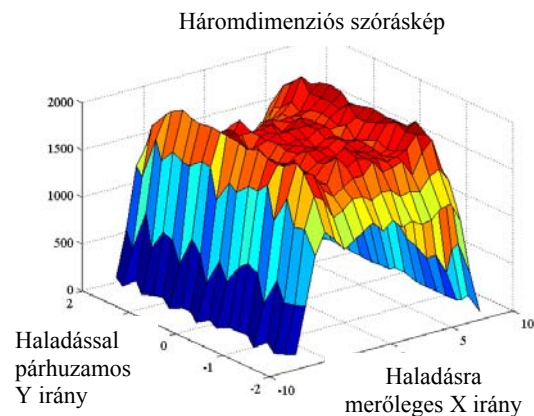
A traktor v_t sebességű haladásának figyelembe vételét a szántóföldi vonatkoztatási rendszerre való áttéréssel oldottam meg, a következő transzformációkkal:

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

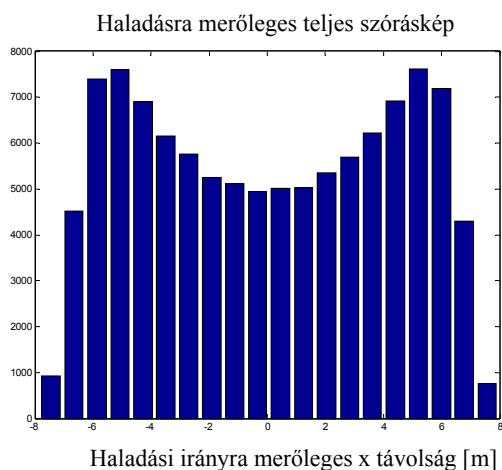
Az eredmények grafikus megjelenítése a **22-23. ábrákon** látható. A szórás egyenlőtlenség numerikus értékeléséből azt kaptam, hogy a traktor szokásos (4 m/s) munkasebessége a haladásra merőleges szórás kép egyenletességét csak elhanyagolható mértékben rontja. A szórás egyenlőtlenség mértéke elvileg 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.



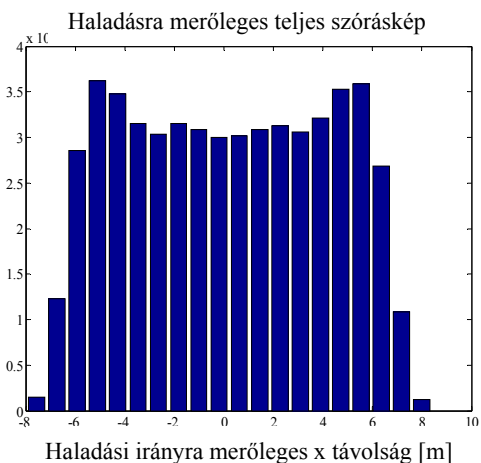
24. ábra Karbamid elméletileg súlyozott részecskeárama ($\Phi = 30-150^\circ$)



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

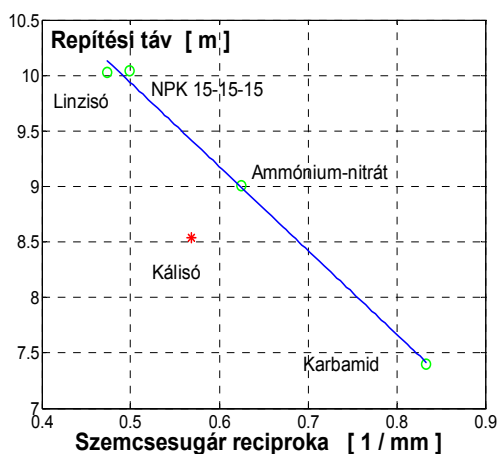
Öt különböző műtrágyának mértem meg a szórás kép előrejelzéséhez szükséges paramétereit, amelyeket az **1. táblázatban** foglalkozok össze. A szórás kép számításához azt a legegyszerűbb (izotróp) modellt választottam, amelyben a szórótárcsáról lerepülő szemcsék tömegárama minden megengedett irányban egyenletes. A valós röpítőtárcsákhoz 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.

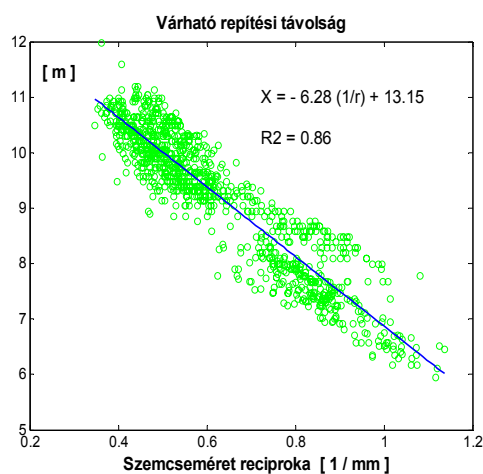
1. táblázat

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

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) Sűrűlődmérő 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 sűrűlődsi viszonyainak vizsgálata. Georgikon Napok. Keszthely. 1136-1139.p.
3. Ancza B.E. - Csizmazia Z. – **Gindert-Kele Á.** - Hagymássy Z. (2002) Műtrágyaszemcsék sűrűlődsi vizsgálata különböző felületeken. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 127-131.p.
4. Hagymássy Z. - Csizmazia Z – **Gindert-Kele Á.** - Ancza B.E. (2002) Műtrágyaszemcsék belső sűrűlődsi vizsgálata. 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. Nemzetközi 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 légszórás módszerrel. Mezőgazdasági Technika, 1. sz. 2-4.p.