

DEBRECENI EGYETEM
Agrártudományi Centrum
Mezőgazdaságtudományi kar
Géptani Tanszék

**INTERDISZCIPLINÁRIS AGRÁR- ÉS TERMÉSZETTUDOMÁNYOK DOKTORI
ISKOLA**

Doktori Iskola vezető:
Prof. dr. Nagy János
MTA doktora

Témavezető:
Dr. Csizmazia Zoltán
egyetemi tanár

MŰTRÁGYASZEMCSÉK FIZIKAI JELLEMZŐI ÉS MOZGÁSUK ELEMZÉSE

PhD értekezés

Készítette:
Battáné Gindert-Kele Ágnes
doktorjelölt

Debrecen
2005

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS	6
2.1. A műtrágyaszemcsék mozgása a röpítőtárcsán	7
2.2. Szórási kísérletek	16
2.3. A szóráskép előrejelzése	19
2.4. A műtrágyaszemcsék fizikai tulajdonságai.....	24
2.4.1. A visszapattanási tényező	26
2.4.2. A légellenállási tényező	27
2.4.2.1. A légellenállási tényező mérési módszerei	28
2.4.2.1.1. Levegős ejtőcső.....	29
2.4.2.1.2. Folyadékos ejtőcső.....	31
2.4.2.1.3. Függőleges légcsatorna (elutriátor)	32
2.4.3. Műtrágyaszemcsék alak- és méretjellemzői	33
2.4.3.1. Szitaanalízis	33
2.4.3.2. Szemcsénkénti alak és méretmeghatározás	35
2.4.3.3. Fényképezőgépes módszer a szemcse alak és méret meghatározásához... 35	
2.4.4. Nedvességtartalom (%).....	36
2.4.5. Sűrűségmérési módszerek.....	36
2.4.6. Sűrűlási jellemzők.....	38
2.4.6.1. Rézsűszög és belső sűrűlási szög.....	40
3. A VIZSGÁLATOK ANYAGA ÉS MÓDSZERE.....	43
3.1. A kísérletek célja	43
3.2. A mérési körülmények és a vizsgált műtrágyatípusok	43
3.3. A vizsgálataimnál használt módszerek	44
3.3.1. Nedvességtartalom mérése	44
3.3.2. A műtrágyák szemcseösszetétele.....	44
3.3.3. Térfogattömeg és porozitás.....	44
3.3.4. A műtrágyák sűrűségének meghatározása.....	45
3.3.5. Csúsztatási jellemzők vizsgálata.....	46
3.3.5.1. Csúsztatókészülék	46
3.3.5.2. Körforgó csúsztatókészülék.....	49
3.3.5.3. Műtrágyahalmaz csúsztatása sík lemezeken.....	49
3.3.5.4. Belső sűrűlási meghatározása	50
3.3.6. Szemcsénként mért fizikai jellemzők meghatározása	52
3.3.6.1. Műtrágyaszemcsék mérete, tömege	52
3.3.6.2. Gömbalakúság	52
3.3.6.3. Szemcsénkénti sűrűség	52
3.3.7. Aerodinamikai jellemzők.....	53
3.3.7.1. A függőleges légcsatorna műszaki leírása	53
3.3.7.2. Függőleges légcsatorna alkalmazása szemcsénkénti vizsgálatra.....	55
3.4. Saját fejlesztésű mérőberendezések és módszerek	55
3.4. 1. Légpiknométer fejlesztése és alkalmazása a műtrágyák sűrűségmérésére.. 56	
3.4. 2. Folyadékos ejtőcső fejlesztése légellenállási tényező mérésére	59
3.4.2.1 Az ejtőcső és a mérések kísérleti megvalósítása	59
3.4.2.2. A folyadékos ejtőcsővel mért adatok értékelési módszere	61
3.4.2.3 A folyadékos ejtőcsővel mérések elemzése	62
3.4.2.4. A folyadékos ejtőcső fejlesztés összefoglalása.....	65

4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS ELEMZÉSÜK.....	67
4.1. A műtrágyák nedvességtartalma és szemcseösszetétele.....	67
4.2. Térfogattömeg, porozitás.....	68
4.3. A műtrágyák sűrűségének meghatározása.....	69
4.4. Sűrűlési jellemzők.....	71
4.4.1. Felületi sűrűlés.....	71
4.4.2. A sűrűlési faktorok összehasonlító elemzése.....	75
4.4.3. Belső sűrűlés.....	75
4.5. Szemcsénként mért fizikai jellemzők.....	76
4.5.1. A szemcsénként mért paraméterek elemzése.....	78
4.6. A szemcsék pályájának számítása.....	79
4.6.1. A ballisztikai számítás módszere.....	80
4.6.2. Műtrágyaszemcsék pályaszámítása.....	82
4.6.3 A műtrágyaszemcsék talajra érkezése.....	84
4.7. A teljes szórás kép számítása.....	88
4.8. A műtrágya szemcse jellemzők és a kiszórás összefüggéseinek elemzése.....	93
5. KÖVETKEZTETÉSEK, ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, JAVASLATOK.....	98
5.1. Következtetések.....	98
5.2. Új tudományos eredmények. Tézisek.....	99
5.3. Javaslatok.....	101
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	102
7. HIVATKOZÁSOK.....	105
8. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓI.....	111
9. MELLÉKLETEK.....	113

1. BEVEZETÉS

A mezőgazdasági termelés során a tápanyagok pótlásában az 50-es évektől egyre nagyobb szerepet kaptak a szervetlen műtrágyák, ami azzal magyarázható, hogy a műtrágya kezelése egyszerű, a szállítási-, tárolási- és kijuttatási munkálatok pedig teljes mértékben gépesíthetők. A műtrágyaszóró gépekkel – például az egész világon általánosan alkalmazott röpítőtárcsás változatokkal – igen nagy területteljesítmény érhető el. A műtrágyát elsősorban a kémiai hatóanyag tartalmaért vásárolják, azonban műszaki, gazdasági és termelési szempontból egyaránt lényegesek a fizikai sajátságai. Olyan műtrágyákat is alkalmaznak, amelyben szerves trágya adalék található (Allaire & Parent, 2004a). A termőföld tápanyagszolgáltató képessége tápanyagvisszapótlás nélkül korlátozottá válna. Hibás volna a tápanyagkészlet „kizsárolását” azzal indokolni, hogy a csökkent tápanyag-felhasználásból eredő károk mellett ökológiai, környezetgazdálkodási előnyök jelentkeznek. A talaj természetes tápanyagtőkéjének kifosztása ennél sokkal veszélyesebb ökológiai katasztrófát okozhat és a biológiai egyensúly megbomlásához vezethet (Máté & Jolánkai, 2001). Napjainkban a hazai műtrágya alkalmazásában kismértékű növekedés tapasztalható, de a felhasználás csak a 40 évvel ezelőtti mennyiséget éri el. A korszerű tápanyaggazdálkodási rendszer a környezet károsítása nélkül biztosítja a kultúrnövények terméshozamát és minőségét. A hagyományos műtrágyázás a talajok tápanyagvizsgálatán alapul; a növény fajlagos tápanyagigénye és a termésterv alapján állapítja meg a visszapótlandó tápanyagok mennyiségét, így a „szokásos” cél a megfelelő összetételű és mennyiségű tápanyag egyenletes kijuttatása. A jövő környezet- és költségkímélő módszere a helyspecifikus, „precíziós” tápanyagpótlás, amellyel a táblán belüli helyi viszonyokhoz és igényekhez igazodó tápanyagkijuttatás valósul meg, aminek a talajmintavétel, a terméshozam térkép és a digitális táblatérkép az alapja. Alapkövetelmény hogy csak a környezet és a fogyasztók által tolerálható, az élelmiszeripari szabványok határértékei alatt lévő szermaradványok maradhassanak a termékekben.

A világ mintegy 140 millió tonnás éves műtrágya termelésének 90%-át röpítőtárcsás 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 számítani kell a kiröpített szemcsék várható röppályáját, amiből a megkaphatjuk a szemcsehalmaz eloszlását a talajon. A

röpítőszerkezet elhagyása után a repülő szemcse pályagörbjét a szemcse kezdeti mozgásállapota és a levegő közegellenállása határozza meg. A tervezéshez alapvetően fontos, hogy a ballisztikus pályagörbjét elfogadható közelítéssel előre tudjuk jelezni. Közelítőleg gömb alakú szemcsék esetén a közegellenállást a sebesség négyzetével arányosnak tekinthetjük. 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 kidolgozását terveztem, 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 a Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum Mezőgazdaságtudományi Kar Géptani Tanszéken rendelkezésre álló eszközöket használtam illetve alakítottam át, továbbá a mérési eljárásokat tapasztalataim alapján módosítottam. Kifejlesztettem két új, a Géptani Tanszéken eddig nem használatos mérőeszközt.
- **Vizsgálataim során** tanulmányoztam 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 sorának teljessé tételéhez és a további kutatások előkészítéséhez súrlódási vizsgálatokat is végeztem. A vizsgált műtrágyák súrlódási faktorát – ami a

súrlódási tényező értékét közelíti - csúsztatási mérésekkel határoztam meg tíz különböző anyagú síklemezen és a szemcsehalmon.

- 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 szórás képhez 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. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

R. P. Feynman Nobel díjas, a magyarul is megjelent „Mai Fizika” című sorozat szerzője azt írja, hogy számára a hidrogén molekula egyszerű, ám a lehulló falevél mozgása követhetetlenül bonyolult. A mezőgazdasági problémák egy része - elméleti szempontból - közelebb áll az utóbbi példához. Ezért nem meglepő, hogy a jelen dolgozat keretében tanulmányozott szakirodalomban általában nem található végső, „legjobb” megoldás. Ehelyett a módszerek fokozatos javítása figyelhető meg, ami többek között a modern elektronika és informatika által kínált lehetőségeket aknázza ki. A korszerű, precíziós mezőgazdasági termelés kívánalmai szerint a magvak vetése, a műtrágyák kijuttatása a termőföldre egyre inkább „on-line” (egyidejű) szabályozást igénylő optimalizálási probléma, amit igen sok tényező befolyásolhat.

A következőkben a dolgozatomban hangsúlyosan szereplő röpítőtárcsás műtrágyaszóró gépek elméleti és kísérleti vizsgálatához általam fontosnak tekintett irodalmi eredményeket, előzményeket tekintem át - két nagyobb témakör szerint csoportosítva.

- **A műtrágyaszemcsék mozgása a röpítőtárcsán és a szórási kép jóslása a ballisztikai probléma megoldásával**
- **A műtrágyaszemcsék fizikai tulajdonságai**

A téma irodalmi áttekintése azért időszerű, mert az utóbbi években a szemcsék röpítőtárcsán történő mozgásának leírására jelentős új eredmények születtek, másrészt a ballisztikai számításokhoz a kezdeti feltételeket a tárcsáról való szemcse leválás paraméterei adják. A tárcsán való szemcsemozgás témaköre érinti a dolgozat érdemi részét, hiszen a fizikai tulajdonságok mérése sorában a súrlódási tényező mérése is szerepel, amelynek értéke jelentősen befolyásolja a szemcsék mozgását a tárcsán. Továbbá a repítési pályák számítása lehetőséget ad számunkra a szórási kép jóslásra. Az irodalom feldolgozásához a legfrissebb áttekintő jellegű munkákat használom kiinduló pontként, és annak a néhány fontos kutatócsoportnak a legfontosabb munkáit részletezem, akikre a témakörben a leggyakrabban hivatkoznak. Léteznek azonban olyan összefoglaló alpművek is, mint pl. Nuri N. **Mohsenin** 1968-ban kiadott könyve (Mohsenin, 1968), amely rendkívül részletes és alapos. Inkább a sztatikus tulajdonságokat és a gyakorlati tudnivalókat összegezte egy másik korai összefoglaló mű (Hoffmeister, 1979). Számos újabb, alapvetően fontos közlemény származik

Hofstee (Goense, Hofstee & vanBergeijk, 1996; Hofstee, 1992; Hofstee, 1994; Hofstee, 1995a; Hofstee, 1995b; Hofstee & Goense, 1997; Hofstee & Goense, 1999; Hofstee & Huisman, 1990; Walker, Grift & Hofstee, 1997), **Ramon** (Anthonis & Ramon, 2003; Anthonis et al., 2003; De Baerdemaeker et al., 2001; Dintwa et al., 2004a; Dintwa et al., 2004b; Hennens et al., 2003; Moshou, Deprez & Ramon, 2004; Moshou et al., 2003; Olieslagers, Ramon & DeBaerdemaeker, 1996; Reumers, Tijskens & Ramon, 2003a; Reumers, Tijskens & Ramon, 2003b; Tijskens, Ramon & De Baerdemaeker, 2003; Tijskens et al., 2002; van Staeyen, Tijskens & Ramon, 2003) és **Grift** (Bansal et al., 1998; Grift, 2003; Grift, 2000; Grift, 2001; Grift & Hofstee, 1997a; Grift & Hofstee, 1997b; Grift & Hofstee, 2002; Grift, Walker & Gardisser, 2000; Grift, Walker & Hofstee, 1997; Grift, Walker & Hofstee, 2001) „műhelyéből”. Hasonló témájú (Soleymangoli, 1998) Ph.D. értékezése is. Számtalan olyan „alkalmazás” is megjelent és jelenik meg, amelyek „újak” és csak bizonyos mezőgazdasági terményre vagy műtrágyára vonatkozik. *Az irodalmi részhez fűzött, fontosabbnak vélt megjegyzéseimet dőlt betűvel szedtem.*

2.1. A műtrágyaszemcsék mozgása a röpitőtárcsán

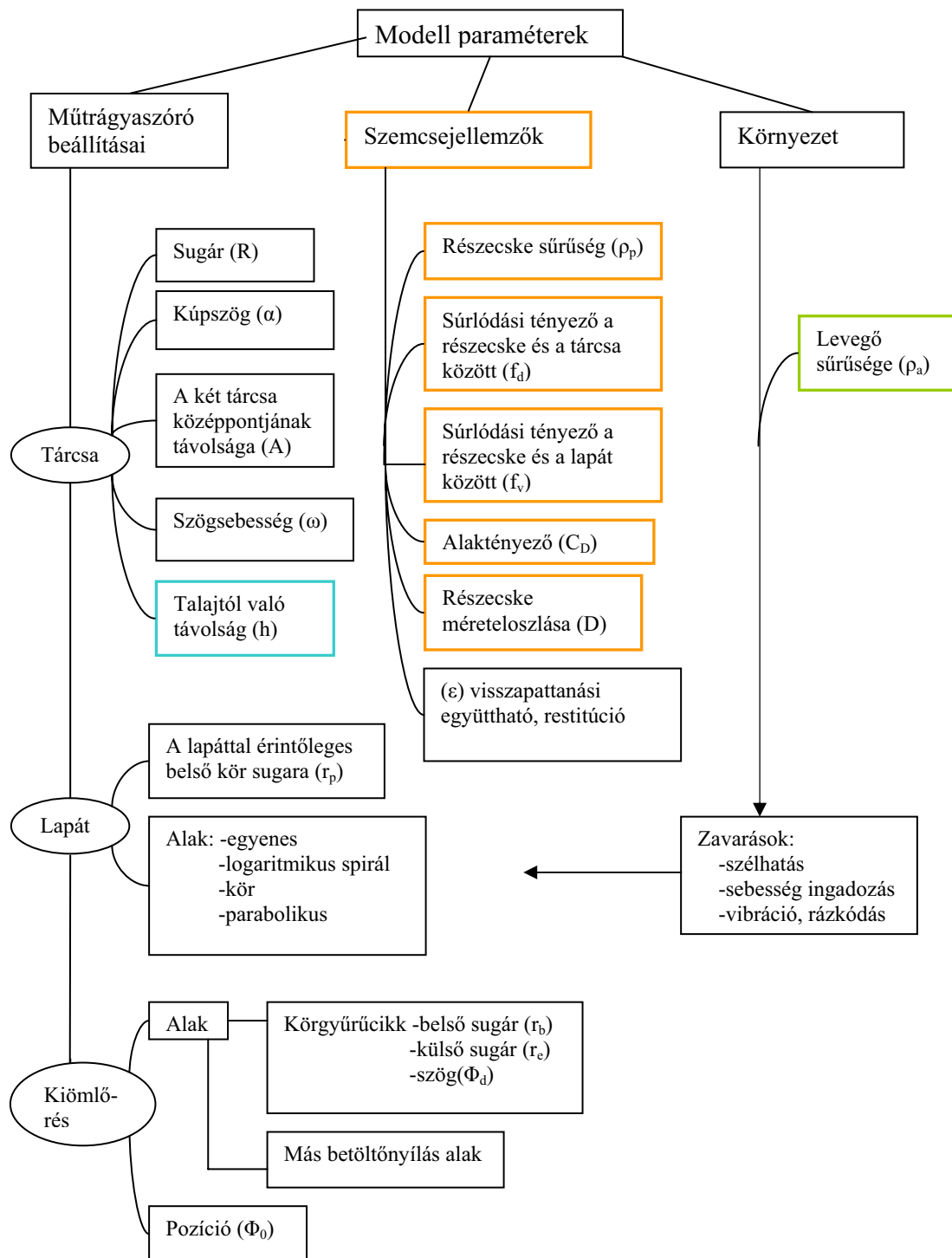
A centrifugális repítés elvén működő műtrágyaszórók világszerte népszerűek, amit olcsóságuk, könnyű karbantartásuk és nagy munkaszélességük (akár 48 m is lehet) indokol. A röpitőtárcsás műtrágyaszórók egy- vagy kéttárcsás gépek. A gyakorlatban inkább a kéttárcsás kialakításút alkalmazzák, ahol a műtrágya két, ellentétes irányban forgó, lapátokkal ellátott tárcsára kerül. Tradicionálisan az egyenletes szórást tekintették a legfontosabbnak. Azonban kiderült, hogy a mezőgazdasági termelés során jelentős helyi egyenlőtlenségek alakulnak ki, például a nitrogén (N), foszfor (P) és kálium (K) tápanyagok eloszlásában. Ha a további tápanyag kijuttatás ennek figyelembevételével történne, akkor csökkenteni lehetne a műtrágya felhasználást, és a műtrágyák felszíni és felszín alatti vizekkel történő elszivárgását is. A műtrágyák túlادagolása ugyanúgy termés-csökkenést okoz, mint a műtrágya hiánya.

A precíziós, helyfüggő műtrágyázáshoz automatikus szabályzásra van szükség (Dintwa et al., 2004b). A szabályzás bemenő adatait a termőföld tápanyagszükségletének megfelelő (távérzékelővel felvett) táblatérképei és a műtrágyaszóró gép pozicionálása (műholdas, GPS rendszer) adják. A szabályzáshoz azonban nélkülözhetetlen a

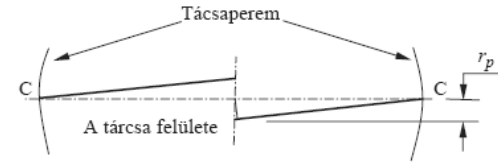
műtrágyaszóró gép tulajdonságainak modellezése. (Olieslagers et al., 1996) leírta a röpítőtárcsás műtrágyaszóró elméleti modelljét. Ebben a szemcsék mozgását a tárcsán, majd a leválás után a levegőben követi a fizika törvényei szerint. Nagyszámú részecske becsapódásából jósolta a talajon történő eloszlást. A korábbi modellek többnyire vízszintes tárcsával és sugárirányú lapátokkal számoltak. Ezeket általánosította és módosította Olieslagers. (Patterson & Reece, 1962) elméleti képletet vezetett le a sík tárcsán egyenes, sugárirányú lapátokkal befolyásolt szemcsemozgásra. Ebben az egyszerű esetben középen beadagolt műtrágyát feltételeztek, így a lapáton történő pattogást elhanyagolták. Megkülönböztették a szemcsék csúszó és gördülő súrlódását. (Inns & Reece, 1962) aszimmetrikus adagoló helyzetet feltételezett és figyelembe vette a szemcsék pattogását a lapáton. (Cunningham, 1963) nem sugárirányú ill. hajlított lapáttal és kúpos tárcsa esetén is vizsgálta a részecskék mozgását. (Cunningham & Chao, 1967) összetett egyenes-ívelt lapát kombináció esetén határozta meg a tárcsán történő mozgás pályaeqnyenletét. (Dobler & Flatow, 1968) majd (Griffis, Ritter & Matthews, 1983) egy-egy részecske pályáját adta meg a tárcsán.

A levegőben történő mozgás (ballisztika) leírása is lényegesen fejlődött az évek során. (Timoshenko & Young, 1948) a vízszintes hajítás pályaeqnyenletére adott közelítő analitikus formulát. (Mennel & Reece, 1963) ferde hajítás esetén modellezte a szemcsemozgást a levegőben. (Reints & Yoerger, 1967) valamint (Dobler & Flatow, 1968) egy részecske pályáját szimulálták. (Pitt, Farmer & Walker, 1982) közelítő egyenleteket származtatott a szemcse pálya meghatározására. (Hofstee & Huisman, 1990) számos fizikai tulajdonság – szemcseméret, súrlódási tényező, légellenállás, stb.-hatását vizsgálta a tárcsán és a levegőben történő mozgás elemzésére.

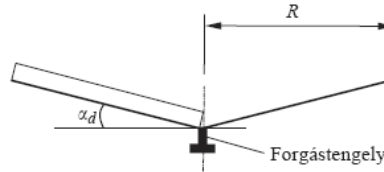
(Olieslagers et al., 1996) a **2.1. ábrán** bemutatott modell sémával foglalta össze a műtrágyaszóró szabályozásához a változtatható és a rögzített paraméterek összeségét. Azokat a paramétereket, melyeket magam is vizsgáltam, narancs színű kerettel jelöltem.



2.1.ábra A röpítőtárcsás műtrágyaszóró szabályozásának paraméterei
(Olieslagers et al., 1996)

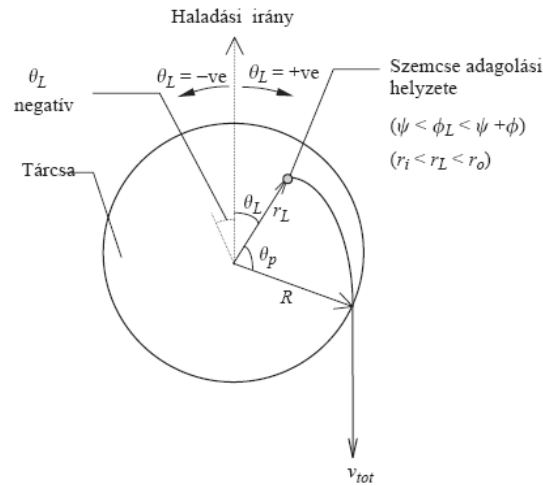


(a) Felülnézet

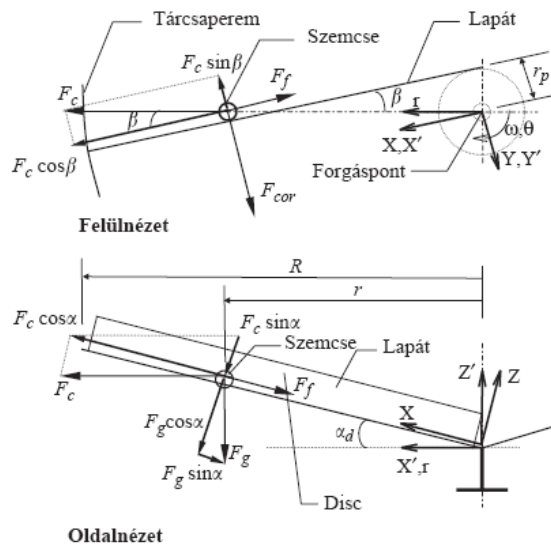


(b) Oldalnézet C-C

2.2. ábra Tárcsarészlet felülnézetben és oldalnézeti metszetben a lapáttal (Dintwa, 2004b)



2.3. ábra A részecske pályája a tárcsán felülnézetben (Dintwa, 2004b)



2.4. ábra A tárcsán mozgó részecskére ható erők: F_c centrifugális-, F_{cor} Coriolis-, F_f súrlódó- és F_g tömegelő. (Dintwa, 2004b)

Sík tárcsán, a sugárirányú lapáton és a tárcsán egyaránt csúszó szemcse esetén a mozgás leírásához a tárcsához rögzített forgó vonatkoztatási rendszerben a súlyerő és a súrlódási erők mellett figyelembe kell venni az ún. inercia erőket; a centrifugális és a *Coriolis* erőket. A fenti egyszerű esetben adódik a mozgásegyenlet, amely analitikusan is megoldható (Patterson & Reece, 1962).

$$\frac{d^2r}{dt^2} + 2\omega \frac{dr}{dt} \mu_v - \omega^2 r = -\mu_d g \quad (2.1)$$

ahol: r : részecske távolsága a tárcsa középpontjától

ω : a tárcsa szögsebessége

g : gravitációs állandó

μ_v, μ_d : a szemcse súrlódási tényezője a lapáttal ill. a tárcsával

Az általánosabb esetben, amikor a tárcsa kúpos ($\alpha_d \neq 0$) és az egyenes lapát nem sugárirányú ($\mathbf{r}_p \neq 0$), sokkal bonyolultabb összefüggések adódnak a szemcsemozgás leírására (Olieslagers et al., 1996) és (Dintwa et al., 2004b) az alábbiak szerint. A tárcsa rajzai Dintwa (2004b) munkája alapján a **2.2. – 2.6. ábrákon** láthatók.

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} + 2\mu_v \omega \cos \alpha \frac{dx}{dt} - \omega^2 r (\cos \alpha \cos \beta + \mu_v \sin \beta - \mu_d \sin \alpha) \\ + g (\sin \alpha \cos \beta + \mu_d \cos \alpha + \mu_v \sin \alpha \sin \beta) = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

ahol x : a lapát irányában történő elmozdulás a lapáthoz rögzített derékszögű koordinátarendszerben

α : a nem sugárirányú egyenes lapát és a vízszintes által bezárt szög (**2.2. és 2.4. ábra** oldalnézet)

β : a lapát és a tárcsa sugara által bezárt szög (**2.4. ábra**, felülnézet)

ω : a tárcsa szögsebessége

g : gravitációs állandó

μ_v és μ_d : a szemcse súrlódási tényezője a lapáttal ill. a tárcsával

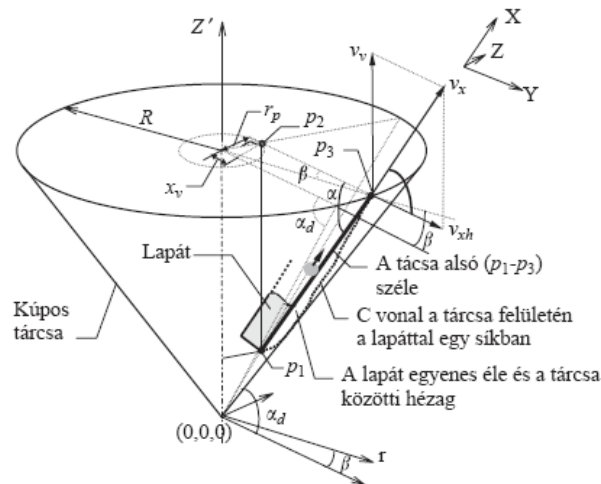
Ez az egyenlet áttaszformálható tisztán henger koordinátarendszerbe, és így

$$C_a \frac{d^2r}{dt^2} + C_b \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + C_c \frac{dr}{dt} + C_d r + C_e = 0 \quad (2.3)$$

A fenti egyenletben szereplő C együtthatók az **M1. mellékletben** találhatók a 113. oldalon.

A 2.3 nem lineáris differenciál egyenlet numerikusan megoldható, és adott kezdeti feltétel mellett a részecske pálya számítható a tárcsán.

A kezdeti feltétel $t = 0$ esetén, $r = r_L$ a szemcsé tárcsára esésének helye (adagolási hely) és a kezdeti sebesség $dr/dt = 0$.



2.5. ábra A szögek definíciója kúpos tárcsa esetében (Dintwa, 2004b)

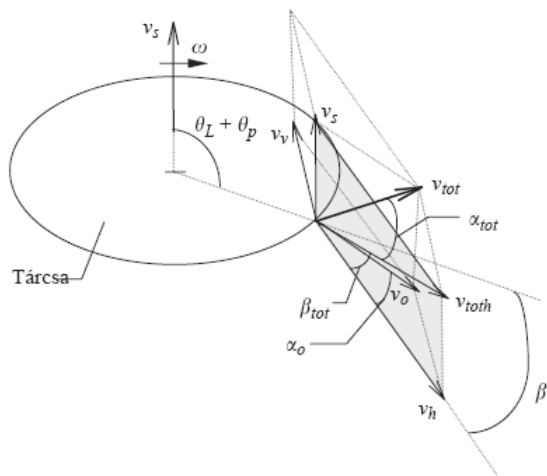
Szöget bezáró egyenes lapát nem fekszen fel a kúpos felület palástján, mert csak a két végpontján érintkezik a felülettel. Így rés keletkezik a lapát és a tárcsa között, ahová a szemcsék beszorulhatnak. A gyakorlatban a lapát alját úgy képezik ki, hogy ne keletkezzen alatta rés, illetve a szokásos ($160-170^\circ$) tárcsaszög még nem okoz problémát.

Kúpos tárcsa esetén az α szög nem egyezik meg az α_d (a tárcsa emelkedési szöge), azaz $\alpha \neq \alpha_d$ (**2.5. ábra**). Az α meghatározására szolgáló összefüggés az **M1. mellékletben** található.

Előnyös az L vagy U profilú lapátok (az elnevezés a hosszirányra merőleges metszetre utal) használata, ami a szemcséket a lapáton tartja, s így állandó α szöget biztosít. A tárcsa kúposágától függően van azonban egy határ, amit a lapát sugárhoz képesti elfordítása nem léphet túl, amit az α_d/r_p határértékkel adnak meg.

A tárcsáról lerepülő részecske további sorsának követéséhez - a ballisztikához - a tárcsáról való leválás „kimeneti” paramétereire van szükség (**2.6. ábra**). Ezen adatok a tárcsa szöghelyzete θ_p és a $\mathbf{v}_{tot}$ sebességvektor a „leválás” pillanatában, ahol $\mathbf{v}_{tot}$ a

sebesség nagysága, α_{tot} a leválási irány és a vízszintes sík által bezárt szög, míg β_{tot} a haladási irány és a leválási irány által bezárt szög a vízszintes síkban. (A szerzők a gép mozgásától eltekintenek.) A szórási kép kiszámításához figyelembe kell venni az alapvető fontosságú adagolási helyet (r_L , θ_L). A megengedett sávban szisztematikusan kell változtatni r_L és θ_L értékeit az $r_i - r_o$ ill. $\Psi - \Psi + \Phi$ határok között. Mivel a modell csak csúszó súrlódást feltételez (gördülőt nem), a számítások elvileg függetlenek a szemcse sugarától és a -mozgásegyenlet szerkezetéből adódóan - a szemcsék tömegétől is. Így elegendő, ha a tárcsán megtett pályák számítását csak az adagolási hely



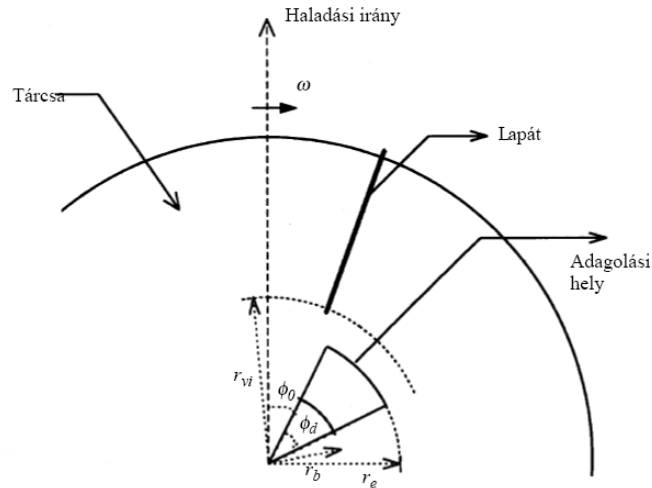
2.6. ábra A lerepülő szemcse sebességkomponensei a tárcsa szélén (Dintwa, 2004b)

függvényében végzik el. A tárcsáról történő leválást követően, a levegőben történő mozgás követésére azonban szükséges a szemcse méret és tömeg és/vagy sűrűség adatok ismerete amit később, a ballisztikai résznél ismertetek.

A mezőgazdaságban alkalmazott műtrágyaszórók bizonyos vonatkozásokban eltérhetnek a fent ismertetettől, ezért a modell további pontosítására szükség lehet. Ilyen változatok közé tartozik, amikor az adagoló nyílás nem szegmens alakú, vagy a lapát belső vége nagyobb sugárnál van mint a szegmens belső sugara, vagy a lapát nem egyenes. (Cunningham, 1963) ill. (Cunningham & Chao, 1967) tárgyalták a logaritmikus profilú és az egyenes-kör összetett profilú lapátok alkalmazását. (Hofstee, 1995b) az előbbieket is összehasonlította az általa vizsgált szemcsemozgásokkal kör, parabolikus és logaritmikus lapát alak esetén.

(Olieslagers et al., 1996) a saját elméleti modelljével azonosan felépített kísérleti berendezéssel (vízszintes tárcsa, sugárirányú lapátokkal) nyert szórásképeket

hasonlította össze. A haladásra merőleges irányban vizsgált elméleti és kísérleti műtrágya eloszlás jelentősen különbözött. Az ellentmondást nem lehetett feloldani a gördülő mozgások figyelembevételével sem. Megfigyelte, hogy az elméleti szórásképek erősen függenek az adagolónyílás alakjától.



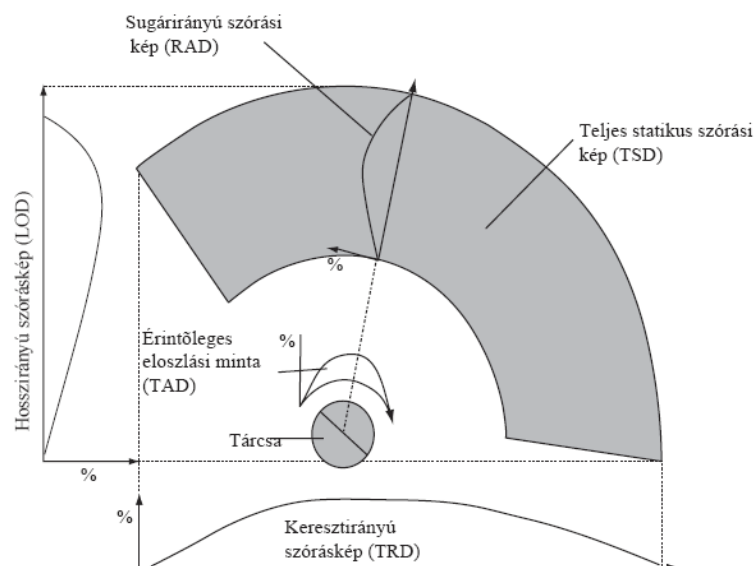
2.7. ábra Az adagolónyílás elhelyezkedése (Olieslagers et al., 1996)

A szórásképek előrejelzését úgy tudta lényegesen pontosítani, hogy a szemcsék tárcsára érkezésének helyét definiáló szegmens négy paraméterének (**2.7. ábra**) az értékét a kísérleti adatokhoz való legjobb illesztés során optimalizálta. Ezek érzékeny paraméterek, és virtuálisan helyettesítik a leírásokból hiányzó szemcse kölcsönhatásokat. Például a nagy mennyiségben a tárcsára érkező szemcse szétterül, így a kezdeti részecske terület duplája is lehet a szegmens nyílásszögének. Másrészt a szemcsék a vártnál később hagyják el a tárcsát, mert a többi szemcse lelassítja a mozgásukat. Ez úgy vehető figyelembe, mintha az adagoló helyzetét jellemző szöget növelnénk, és így a szemcsék rövidebb ideig érintkeznének a lapáttal.

A Dintwa modell nem ad – és nem is adhat – közvetlenül számot a részecskék kollektív viselkedéséről. A probléma megkerüléséhez (Dintwa et al., 2004a) Olieslagers módszeréhez hasonlót választott, azaz a szemcsék kollektív viselkedését az adagolónyílás jellemzőinek - valóságostól eltérő - paraméter optimalizálásával helyettesítette. Az optimalizálás a kísérletileg mért és a fenti elmélet szerint számított szórásképek közti különbség minimalizálásával történik. A módszer elvi alapja az, hogy a valóságban a szemcsék beérkezéskor a tárcsán jóval nagyobb területen szóródnak, mint a betöltőnyílás felülete. Ez a szóródás, mint kezdeti feltétel, elméletileg nemigen

jósolható, és kísérletileg sem kalibrálható. A kísérleti-elméleti eredmények összevetéséből származó A_L „adagolási felület” fizikai jelentése nem pontos, mert az optimalizálás során nyert eredmény a nagyszámú részecske kollektív viselkedésétől is függ. Az egyszerűség kedvéért azonban azt feltételezték, hogy A_L öröklí az adagolónyílás szegmens alakját. Nem meglepő az sem, - lévén a szemcsék közti kölcsönhatások függenek a műtrágyától és a műtrágyaszóró aktuálisan beállított paramétereitől - hogy emiatt szükséges a beállításoktól függő kalibrálás is.

A kísérleti megvalósítás során (Dintwa et al., 2004a) szerint (**2.8. ábra**) háromféle szórásképet mértek. A érintőleges eloszlási mintázatot („TAD”) kis távolságban (1-1.5 m), a tárcsával azonos magasságban, félkörívben elhelyezett edényekkel mérték. A teljes statikus szórásképet („TSD”) speciális mérőcsarnokban, a talaj szintjén határozták meg. A merőleges eloszlást ugyanezen mérésekből kapták a megfelelő sorok kiválasztásával. A „TAD” érintőleges eloszlást lehetett legjobban optimalni (3.6% eltéréssel), miközben a „virtuális” adagoló szegmens helyzetét -45° -ról -10° -ra változtatták, a nyílászögét 60° -ról 115° -ra emelték, míg a külső sugarát 100 mm-ről 280 mm-re növelték. Az is kiderült, hogy az A_L értéket a tömegáram, a tárcsa szögsebessége és sugara, az adagoló szegmens külső és belső sugarai, valamint a lapát elállítása a sugáriránytól befolyásolják. A növekvő A_L beérkezési felület szükségességét feltehetően a részecske kölcsönhatások okozzák.



2.8. ábra A különböző típusú szórásképek meghatározása (Dintwa, 2004a)

Azonban a fenti módszer esetén is műtrágyánként és eltérő gépbeállításonként kalibrálásra van szükség. A precíziós, helyspecifikus műtrágyaszóráshoz a szabályzott paraméterek száma nem lehet túl nagy. Így pl. szóba jöhet az adagoló helyzete, nyílásszöge és a tárcsa szögsebessége. Mivel a leírásokban a részecske kölcsönhatások és a tömegáram leírása tisztázatlan, ezért más módszerek, mint pl. a „diszkrét elemek módszere” = DEM, előtérbe kerülhetnek (Van Liedekerke, 2003), amellyel a részecske kölcsönhatásokat explicit módon lehet kezelni. A repülés kezdeti sebességének és irányának szóródásáról nem túl sok kísérleti adat ismert. Ilyen adatok részben szerepelnek Grift és Hofstee 2002-es munkájában (pl. a tömegeloszlás irányfüggése, lásd **2.9. ábra** 21. oldal). Ők irányfüggetlen sebességeloszlást kaptak, kb. 20 m/s átlaggal, a 15-25 m/s sávban.

Ezek után felvethető a szkeptikus kérdés, hogy nem volna-e egyszerűbb a beállítások függvényében kísérletileg nyert szórásképeket tárolni, és a kívánt szórásképhez szükséges beállításokat a tárolt adatok alapján meghatározni? (Moshou et al., 2004) munkájukban egy tanuló algoritmus, az idegi hálózatok („Neural Networks, röviden NN”) matematikai módszerével éppen ehhez hasonló megoldásra tettek biztató kísérletet. Azt demonstrálták, hogy a szórási képek tendenciáinak becslése lehetséges a műtrágyaszóró paraméterek és a műtrágyák fizikai tulajdonságainak függvényében. Ehhez matematikai modellként önszerveződő idegi hálózatot használtak. Az úgynevezett önszerveződő térkép („SOM”) a magasabb dimenzionalitású terek között képez bemenet-kimenet kapcsolatot. A tanulás végén új műtrágya és gépbeállítás esetén is nagy pontossággal jósolták meg a szórásképet.

2.2. Szórási kísérletek

A mérőcsarnokban végzett szórási kísérletek még nagyfokú automatizáltság mellett is rendkívül időigényesek és drágák. Az ilyen típusú kísérletek kiváltására alkalmasnak látszik a (Reumers et al., 2003b) és (Reumers et al., 2003a) szerint bevezetett hengeres illetve érintőleges eloszlás mérése. A gyűjtő edényeket a forgó tárcsa középpontjától 1m távolságra, egy hengeres felület mentén helyezik el 10° -onként, így vízszintes irányban 36 cella fedi le a henger palástot. A függőleges irányú eloszlást a tárcsa szintjéhez képest -15...+50 cm magasságig mérték oly módon, hogy a gyűjtőedényeket egy adott magasság alatt leárnyékolták a szemcsebecsapódástól. Az árnyékoló palást helyzetének

1cm-el történő fokozatos változtatásával mért tömeg értékek közti különbségek kiszámításával kapták a függőleges irányú eloszlást. Az érintőleges eloszlást pedig a függőleges irány mentén történt összegzéssel nyerték. Az eloszlásokból úgy kaptak tömegáramot, hogy a gyűjtött műtrágyatömeget elosztották a 15 másodperc mérési idővel. A méréseket a teljes kiszórt össztömegre (10 kg-ra vetítve) normálták. Az 1m távolságban mért eloszlásokból következtek a tárcsa szélénél elvileg mérhető eloszlásokra. A kísérleti berendezést felülről fényképezték 1/30 s expozíciós idővel. A nagyszámú részecske által a fényképen húzott egyenes csíkok alapján meghatározhatók a tárcsáról történő lerepülések irányai, s ebből következtetni lehet az adott cellákhoz tartozó tárcsa helyzetekre. Az így nyert vízszintes irányú β szögekből a tárcsa szögsebességének, sugarának és a lapát állásának ismeretében a szemcsék vízszintes sebességének nagysága meghatározható. Mivel a függőleges irányban is ismert az eloszlás, a virtuális „becsapódási hely” és a lapátról való távozás helyzetéből geometriailag közvetlenül adódik a ferde hajítás α_0 kezdeti szöge. A ballisztikai probléma kezelése a kezdeti feltételek ismeretében elvileg nem okoz különösebb nehézséget, és a szerzők az alábbi differenciál egyenletek szerint numerikusan oldották meg, ahol x a vízszintes, míg z a függőleges irányú mozgás koordinátája.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{3C\rho_a}{4d\rho_p} \frac{dx}{dt} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (2.4)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -g - \frac{3C\rho_a}{4d\rho_p} \frac{dz}{dt} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (2.5)$$

Azonban csak közelítésnek tekinthetjük az általuk feltételezett tökéletes gömbi alaktényező esetén érvényes $C_D = 0.44$ értéket. Az eltérő d szemcseátmérőket a szitaanalízis során nyert tartományok átlagértékeivel vették figyelembe. Perrson-ra hivatkozva (Persson, 1996) megjegyzik, hogy helyesebb volna a mozgásegyenletekben az ejtőcsöves kísérletekben mérhető végsebességből nyerhető légellenállási tényezőket használni. *(Megjegyzem, hogy munkámban ezt az utat követtem).* Reumers munkáiból néhány érdekes kísérleti megfigyelést érdemes kiemelni. Azt kapták, hogy a vízszintes β távozási szög kevésbé függ a lapáthosszától és a tömegáramtól. Viszont a leválási

sebesség függ a részecske méretétől és/vagy tömegétől és alakjától. Nagyobb sebességük miatt a nagyobb részecskék korábban távoznak a tárcsáról, és a β távozási szögük is kisebb. Az utóbbi kísérleti tapasztalatok ellentétben vannak a fentebb tárgyalt (Dintwa et al., 2004b) (Dintwa, 2004), egyrészecskés elméleti modellel, amennyiben ott csak a súrlódási tényezők hatásával számolnak, szemcsetömeggel és mérettel nem.

A tárcsán és azt követően a levegőben vizsgálta a szemcsék dinamikáját (Aphale et al., 2003). Az Aphale által használt kísérleti berendezés a lehető legegyszerűbb: vízszintes tárcsa, négy sugárirányú lapáttal. Különválasztja a tiszta csúszó és tiszta gördülő szemcsemozgás esetét, és azonos mozgásegyenletekre ill. megoldásokra jut mint (Patterson & Reece, 1962). Természetesen a ballisztikai probléma kezelése is egyezik a korábbi irodalommal. Aphale munkájának kísérleti jelentősége abban áll, hogy 16 különböző granulált műtrágya esetén hasonlította össze az elméleti és a kísérleti eredményeket. Az elemzésekhez több új kísérleti módszert vezetett be, így pl. a folyadékos ejtőcsövet a légellenállási tényező mérésére, és a nagysebességű videokamerát a szemcsemozgás tárcsán való mozgásának követésére. Szemcse alakvizsgálatról nem számolt be. A méreteloszlást a szokásos szitaanalízissel, a műtrágya sűrűségét folyadékkiszorításból határozták meg. A forgó tárcsa szögsebességét stroboszkóppal mérték, az egyenként adagolt szemcsék pályáját pedig egy 500 kép/s sebességű videokamerával rögzítették. A távolságokat a tárcsához rögzített beosztás segítségével mérték ± 0.1 mm pontossággal. A szemcsék 3-6 m repülési távolságát a sugárirányban egysorosan elhelyezett 15 gyűjtőedénnyel mérték, ebből származtatták a sugárirányú eloszlást. Az elméleti és kísérleti eredmények összehasonlításából néhány érdekes következtetésre jutottak. Az elméleti modell akkor egyezett legjobban a kísérletekkel, ha a tárcsán való mozgást a csúszó súrlódási együttható $\mu = 0.5$ értékétől a tiszta gördülés határesetéig szimulálták. A becsapódási távolságokat az elméleti modellek kisebb-nagyobb mértékben szisztematikusan túlbecsülték. A nagyobb tárcsa fordulatszámánál adódó kisebb hibákat azzal magyarázták, hogy nagyobb kezdeti repítési sebességnél a sebesség bizonytalansága kevésbé befolyásolja a repítési távolságot. Ez elméletileg megalapozott, mert adott kísérleti körülmények között létezik egy elméleti határtávolság, aminél távolabbra a szemcse nem juttatható el, bármekkora legyen is a kezdő sebesség. Valószínű, hogy az elméleti várakozás és a kísérleti eredmény különbözőségéhez a szemcsekölcsönhatások hozzájárulnak.

2.3. A szóráskép előrejelzése

Mivel a szemcse mozgás tárcsán való követésére a legfrissebb munkákban is csak egyrészeske modellt alkalmaznak, eléggé általános az a vélekedés, hogy ez az elméleti modellek legfőbb korlátja.

A szóráskép előrejelzéséhez az előbbiekhöz képest eltérő módszert javasol (Grift & Hofstee, 2002). A szemcse sokaság tárcsán való mozgásának komplikált elmélete miatt, illetve az „off-line”, utólagos sebességmérés (Reumers et al., 2003b) nehézségei miatt Grifték ezúttal a tárcsáról távozó szemcsék jellemzőinek „on-line” mérésével próbálkoztak. Az ötlet lényege, hogy a ballisztikához szükséges paramétereket műtrágyaszórás közben mérik. Így a várható szóráskép a kijuttatással egyidejűleg becsülhető, ami lehetőséget ad a műtrágyaszóró beállításainak azonnali szabályozására. Az új elv: „inkább számítsunk, mint gyűjtsünk” (Hofstee, 1994) a precíziós mezőgazdaság igényeihez alkalmazkodik és költségkímélő kísérletezést tesz lehetővé.

(Grift & Hofstee, 1997b) egy infravörös fotodetektort fejlesztettek ki, amely két sorozat infra érzékelőből áll, a szemcsék árnyékát pedig egy lencserendszer nyolcszorosra nagyítja. A részecskesebességet az ismert távolságú érzékelősorok közt mért repülési időből számítják. Az ismert sebességű részecske mérete folytán egy ideig egyidejűleg mindkét infrasort leárnyékolja. A kettős árnyékolási idő és a sebesség szorzata adja az átmérőt. Érdekes módon, a szerzők nem adtak korrekciós tagot, amit az infrasorok közti véges távolság miatt hozzá kellene adni a mért átmérőhöz.

A ballisztikához általuk használt két csatolt, nem-lineáris differenciálegyenlet-rendszer azonos a korábban bemutatottal. Ők is megjegyzik, hogy noha a C_D alaktényező és ezáltal a légellenállási tényező a repülés során gyakorlatilag állandó, a részecskék gömbi modellje nem megfelelő. Korábbi levegős ejtőcsöves kísérleteiben (Walker et al., 1997) bevezette az „ekvivalens gömb” átmérőjének a fogalmát. Eszerint az ideális gömbnél lassabban süllyedő szemcsékhez rendelt „ekvivalens gömb” átmérője annak az értéknek felel meg, amivel egy tökéletes gömb azonos végsebességet érne el, mint a vizsgált szemcse. A gyakorlatban a tényleges átmérőt egy egynél kisebb q számmal kell megszorozni (pl. $q = 0.87$ adódott a kalcium-ammónium nitrát műtrágya esetén). A pályaszámításokhoz – az ismert állandók mellett - szükség volt a kísérletileg mért kezdeti sebesség és átmérő adatokra, továbbá a műtrágya típustól függő q korrekciós faktorokra. A szemcsék becsapódási helyét először a ballisztikai egyenletek

megoldásával kapták. Az 1-5 mm szemcse sugár tartományban ill. a 2-40 m/s kezdeti sebesség sávban előre meghatározták a becsapódási helyeket, így a becsapódási mátrixot kapták. Ebből a mátrixból interpolálással lehet következtetni a köztes értékek esetén a repítési távolságra. Többféle mátrixot kell előzetesen kiszámolni a hajítási magasság, a műtrágya sűrűsége és a q faktor függvényében. Belátható, hogy a q tényezőkkel lényegében a közvetlen légellenállási tényezők mérését helyettesítik a szerzők. Mindenesetre a „becsapódási” mátrixok előzetes kiszámítása és tárolása után a becsapódási helyek megállapítása jóval gyorsabb, mintha a ballisztikai számításokat minden szemcsére külön-külön elvégeznék. Ez a módszer különösen fontos lehet, ha szántóföldi alkalmazásra kerül sor. Az optikai érzékelővel mért szemcseméret és a sugárirányú sebesség eloszlási hisztogramok aszimmetrikusak voltak. Az optikai érzékelőt mintegy 180°-os szögtartományban, három egymást követő ciklusban mozgatták a forgótárcsa körül, így a mért paraméterek eloszlását különböző irányokban kapták meg. Meglepő módon, a két adagoló résen betáplált műtrágyából aszimmetrikusan, a 30°-90° szögtartományban észlelték a legtöbb szemcsét (a 90°-150° sáv szegényebb volt). A mért szemcseátmérőkből és kezdeti sebességekből a „becsapódási” mátrix ismeretében kiszámították a „TSD” teljes (álló) szórásképet. Az előzetes várakozásnak megfelelően, (mivel a becsapódási távolságok elsősorban az indítási sebességtől függnék és csak nagy sebesség és kis szemcsék esetén érzékenyek a szemcseméretre) a számolt szórásképet egy adott távolságú félkörív ($r \sim 4\text{m}$) mentén adott egy szűk sávot (**2.9. ábra**). A becsült teljes szórási sáv szélesség ($\sim 10\text{ m}$) azonban kisebb a gyártó által specifikált 12.2 m értéknél, aminek oka a szerzők szerint az lehet, hogy az általuk mért sugárirányú sebesség kisebb a valós sebességnél.

Grifték kísérleteiből nyilvánvalóan következik, hogy a precíziós szántóföldi alkalmazásokhoz igen fontos lenne a műtrágya tömegáramának „on line” mérése. Erre számos fizikai mérési módszer alkalmas, amelyek közül néhányat az utóbbi években publikáltak.

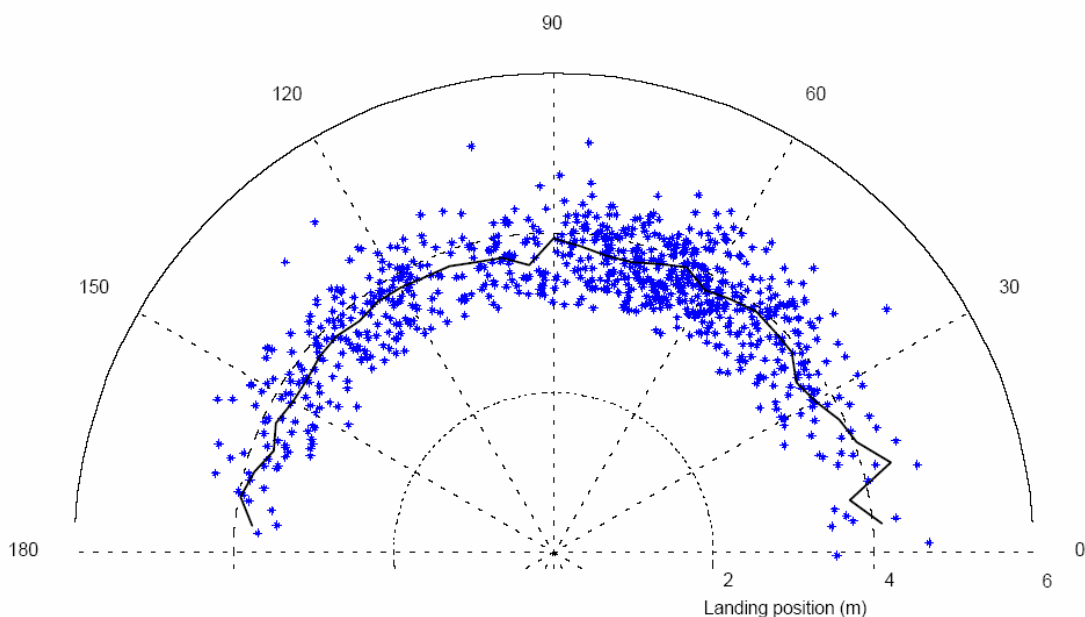


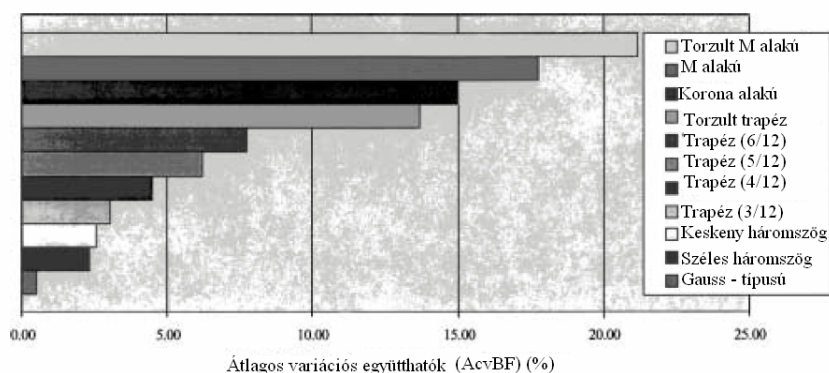
Figure 9. Predicted landing positions of 832 urea fertilizer particles.

2.9. ábra A Grifték által számított statikus szórási kép

(Hofstee, 1994) a mozgó szemcsék által kiváltott Doppler ultrahang frekvenciaeltolódást használta fel a sebességek nagyságának és irányának mérésére. Ugyanezen mérésekben a visszavert jelek amplitúdójából becsülte a szemcseátmérőt – meglehetősen pontatlanul. Tíz évvel ezelőtt a mérések számítógépes feldolgozása még igen lassú volt (mintegy fél nap). Ramon és munkatársai (Anthonis et al., 2003) erőérzékelő segítségével valósítottak meg tömegárammérést, amit a súrlódási tényezőtől nagymértékben függetleníteni tudtak. (Grift, 2000; Grift, 2001) légi alkalmazásokra is használta az általuk korábban bevezetett digitális optikai érzékelőt. Nagyobb tömegáramok mérésére a szemcsecsomagok mérésére volt szükség, amihez az „exponenciális becslés” algoritmusát vezette be. A kísérletileg mért és/vagy elméletileg számolt szórásképek jelentősen módosulnak a gyakorlatban, amint a traktor ismételten áthalad egy-egy területen. A kijuttatásnál fontos az elfogadható egyenletesség, ugyanakkor a gép üzemeltetési költségeinek minimalálása is lényeges. Elsősorban légi, de földi kijuttatású műtrágyaszórásra is használható Matlab alkalmazást írt (Grift, 2000). A program bemenő adatait a szabványok szerint gyűjtött szórási minta adatai képezik. A szántóföldi alkalmazásoknál a gép oda-vissza irányú, vagy azonos irányú, átlapoló szórásokat eredményező mozgását veszi figyelembe.

A számítógépes elemzéssel két fontos adatot kell meghatározni: **1.** a kijuttatott mennyiség (kg/ha) **2.** a szórás egyenletessége. A kiszórt műtrágya eloszlásának egyenlőtlenségét a C_v (%) variációs együtthatóval jellemzik, ami a középérték százalékában kifejezett szórás. Gyakorlati tapasztalatként elfogadott, hogy 15%-nál kisebb C_v értékek már nem okoznak károkat a termelésben. A következő transzverzális eloszlások esetén vizsgálták a többszöri áthaladás után várható szórásképet: **a**, Gauss-eloszlás- haranggörbe szerint folytonosan változó függvények összege sima szórásképet ad. **b**, a széles háromszög vonzó sajátsága, hogy elméletileg tökéletesen egyenletes kijuttatást eredményez, ha a szórási szélesség felénél van az átlapolás **c**, a keskeny háromszöget összehasonlították a széles esetével, **d**, a trapéz alakok népszerűek, mivel nagy munkaszélességre adnak lehetőséget és megfelelő átlapolás esetén elvileg zérus a C_v értékük. A trapézokat a vízszintes, párhuzamos oldalaik arányával jellemzik, amelyek közül a nagyobbik a teljes szórási szélesség. **e**, vizsgálták továbbá a döntött „trapéz” alakot, amikor a trapéz pl. az erős szél miatt torzul.

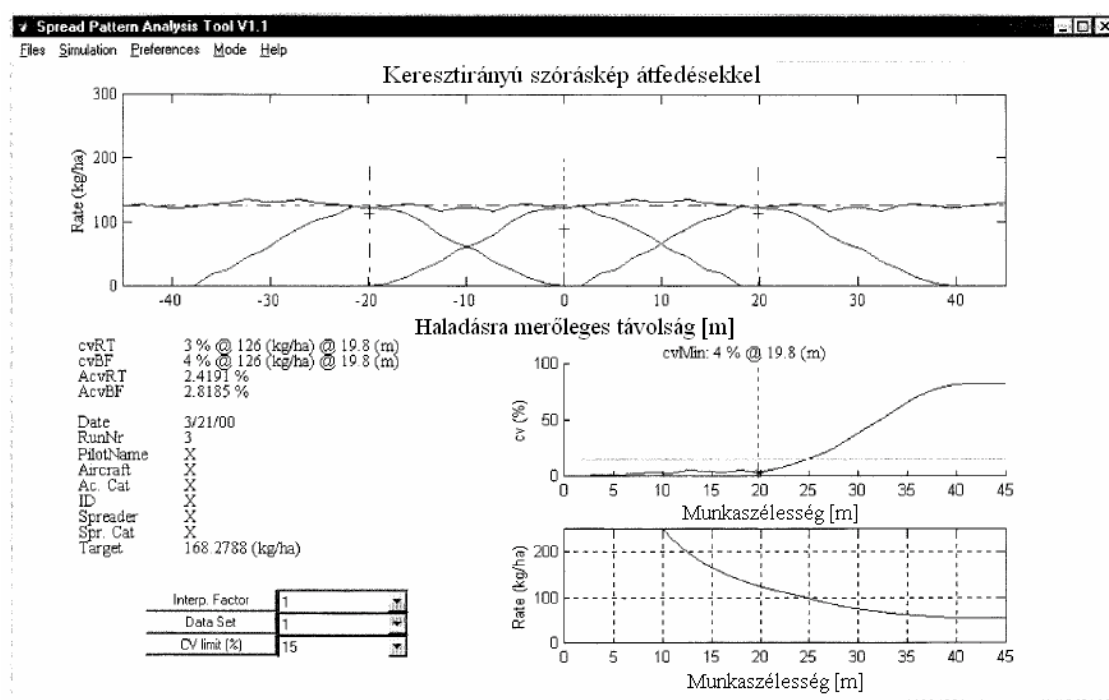
Grift számításai szerint a harang, a háromszög és a 3/12 arányú trapéz alakú, haladásra merőleges szórásképek esetén a terület műtrágyázása kellően egyenletes, 5% alatti C_v értékkel. $C_v = 5$ -15% értékek még elfogadhatók, azonban a 15% -nál nagyobb C_v -nek megfelelő szórás egyenlenség nem ajánlott. A **2.10. ábrán** a különböző alakú eloszlásokhoz tartozó C_v értékek láthatók.



2.10. ábra Átlagos variációs együtthatók a különböző alakú eloszlások esetén

Grift és munkatársai (Grift et al., 2000) az általuk kifejlesztett elemző program hasznát néhány légi alkalmazás esetén mutatták be. A program minden további nélkül használható földi műtrágyakijuttatás esetén is. Grifték gyakorlati tapasztalatokból

kiindulva bevezették a szórás jóságát jellemző paramétert. Hogy a nagy távolságokban természetesen növekvő egyenetlenséget kihagyják a számításból, a Cv értékek átlagát (Acv) nulla távolságtól a maximális munkaszélességnél található lokális Cv minimum helyzetéig képezték. Ha az $Acv < 5\%$, akkor a szórás kiválónak tekinthető. Jellemző esetet mutat a **2.11. ábra**.



2.11. ábra Háromszög alakú szórásképek illesztése optimális szórás egyenlőtlenség mellett

Hasonló kísérletes munkát végzett Csizmazia a Magyarországon használatos néhány röpitőtárcsás műtrágyaszóró esetén (Tornado, Kuhn Rauch, Sulky DPX) illetve vizsgálta az egyenletes szórás feltételeit is (Ancza & Csizmazia, 2002; Csizmazia, 1993; Csizmazia & Demes, 1990; Csizmazia & Kókuti, 2001).

Kezdeti eredmények a precíziós mezőgazdasági termelésben

A lokálisan változó mennyiségű műtrágyaszórás kapcsán nemrégiben ígéretes vizsgálatokról számoltak be. A farmerek aktív közreműködésével végrehajtott kísérletsorozat egyértelműen igazolta, hogy a távérzékelők segítségével jellemzett szántóföldön a nitrogén műtrágya igény helyspecifikus. A talaj igénye szerint, változó mennyiségben kijuttatott műtrágya javította a terméseredményeket (Seelan et al., 2003).

Hazánkban is folynak a precíziós mezőgazdasághoz kapcsolódó vizsgálatok és kutatások, amelyek biztató eredményeket mutatnak. Neményi és munkatársai tanulmányukban ismertették a precíziós növénytermesztés megvalósításához szükséges technológiákat (hozammérés, talajmintavétel, szilárd és folyékony halmazállapotú anyagok szabályozott kijuttatása), és elemezték a technológia és a környezetvédelem kapcsolatát. Vizsgálták a precíziós-helyspecifikus gazdálkodás meglévő feltételrendszerének lehetőségeit, és a továbbfejlesztéshez szükséges műszaki, térinformatikai és biológiai kutatások irányát. (Neményi, Mesterházi & Gyulai, 2001a; Neményi et al., 2001b).

Összefoglalásul azt mondhatjuk, hogy a mérőcsarnokos műtrágyaszóró beméréseket részben kiváltották a tárcsa közelében elhelyezett felfogó cellákkal. A fejlett egyszemcsés elméleti modellekkel kúpos röpitőtárcsák, ferdén elhelyezett lapátokkal is leírhatók. Az egyrészcseke modell korlátait az adagoló nyílás paramétereinek kísérleti eredményeken alapuló optimalizálásával lehet kiterjeszteni. Sok kísérleti eredmény alapján a tanuló algoritmusok is megfelelően becsülhetik a szórás képet. Különböző fizikai elven működő érzékelőkkel egyre jobban lehet jellemezni a tárcsát elhagyó részecskeáramot. Az utóbbi módszereket gyors ballisztikai elemzéssel kombinálva - a GPS rendszerben – „on line” szabályzott módon, helyspecifikusan lehetne kijuttatni a kívánt tápanyagot. Ezek a trendek biztatóak a jövő műtrágyaszóróival ellátott precíziós mezőgazdasági termelés távlatait illetően.

2.4. A műtrágyaszemcsék fizikai tulajdonságai

A tárcsán és a levegőben történő szemcsemozgások és ennek következtében a tényleges szórás kép az elmélet és a tapasztalatok alapján is jelentősen függ a választott műtrágya típusától. A kiszórás szempontjából kevésbé fontosnak tűnő fizikai tulajdonságok viszont azt a folyamatot befolyásolják, amíg a műtrágya a gyártótól eljut a felhasználó gépéhez: kezelés, tárolás, csomagolás, szállítás, stb. A teljesség igénye nélkül két csoportba sorolva adhatjuk meg a fontosabb jellemzőket. Más csoportosítás is lehetséges: pl. statikus és dinamikus jellemzők.

- **szemcsénként mért jellemzők:**
 - alak (méretek, gömbölyűség)
 - tömeg

- lebegési sebesség
- süllyedési sebesség
- **szemcsehalmoz jellemzők:**
 - sűrűség, térfogattömeg
 - nedvességtartalom
 - felületi súrlódás
 - belső súrlódás

(Gorial & Ocallaghan, 1990) szemcsék és szalmaszerű anyagok aerodinamikai vizsgálata során nagyszámú részecskének mérte meg a dimenzió nélküli alaktényezőjét. (Hofstee & Huisman, 1990) első, irodalmat áttekintő munkájában a részecskék mozgását döntően befolyásoló öt tényezőt részletezi. Nevezetesen:

1. a részecskék méretét és azok eloszlását,
2. a súrlódási tényezőt,
3. a visszapattanási (restitúciós) tényezőt,
4. a légellenállást
5. a részecske szilárdságát.

Egyébként csaknem húsz különböző „fizikai” sajátságot lehet megkülönböztetni. Mindegyik tulajdonság egy vagy több folyamatot érint. A folyamatok közé tartozik a gyártás, tárolás, szállítás, keverés, részecske mozgás a tárcsán és a levegőben, a növényzet reakciója. Az előbb említett öt tulajdonság mellett továbbiakat is felsorol Hofstee. Így az alábbiak következnek:

6. szemcse sűrűség,
7. ömlesztett anyag sűrűsége („térfogattömeg”),
8. ömlesztett anyag rézsűszöge,
9. szemcse alak,
10. nedvességtartalom,
11. kritikus relatív nedvesség
12. összesülési hajlam
13. elkülönülési tulajdonságok
14. törmelék és kondicionáló tapadás
15. olvadáspont
16. kémiai kompatibilitás
17. só index

A részecske mozgását alapvetően a részecske méret, a súrlódás, a visszapattanási hajlam és a légellenállás szabja meg. A teljesség kedvéért Hofstee munkájából idézem azoknak a mennyiségeknek a fogalmát, amelyek másutt nem szerepelnek. Viszont nem tárgyalom ismét azokat a mozgásegyenleteket, amelyeket az újabb munkák szerint már részleteztem az irodalmi rész elején.

2.4.1. A visszapattanási tényező

(Inns & Reece, 1962) vezették be az ε restitúciós (visszapattanási) tényezőt a részecskék tárcsán történő ütközéseinek jellemzésére. Ez a paraméter lényeges lehet azokban a modellekben, ahol figyelembe veszik a többé-kevésbé rugalmas ütközések hatását.

$$\varepsilon = -\frac{v_{p2}}{v_{p1}} \quad (2.6)$$

ahol v_{p2} és v_{p1} : a visszapattanás utáni és előtti sebesség

Ez a kifejezés a felülettel való ütközés után a részecske által elvitt impulzus hányadot mutatja. A rugalmatlan ütközés határesetében $\varepsilon = 0$, a rugalmas ütközés határesetében pedig $\varepsilon = 1$. Irodalmi adatok szerint különböző műtrágyákat különböző felületeken mérve ε értéke a 0.04 - 0.73 tartományban változik. A „pattogás” hatására a tárcsára ejtett szemcse „rögtön”, vagy a lapáton történő csúszás folyamán megszökhet a tárcsáról. Modellszámítások szerint a **2.1** egyenlet alapján várható értékekhez képest a pattogás miatt a részecskék távozási sebessége 3-8%-al csökken, és a leválási szög is 3-6%-al kisebb lesz. ε értékét kísérletileg többféle módszerrel lehet meghatározni: **a.**, a tárcsával történő ütközések közt eltelt idő mérésével, **b.**, a szemcse pályák fényképes elemzésével, **c.**, külön „miscue” eszközzel. *Mivel a visszapattanási jelenséget csak egyrészecskés modellekben tárgyalták, ami a gyakorlati tömegáramoknál érvényét veszti, ezért részletezésével nem foglalkozom. A jelenség integrálódhat a kollektív szemcseviselkedés elméleti leírását megkerülő „becsapódási felület” módszerben, amit (Grift & Hofstee, 2002) nyomán már ismertettem.*

2.4.2. A légellenállási tényező

A tárcsáról távozó szemcse mozgását alapvetően meghatározó légellenállási tényező fogalma nem bonyolult, néha mégis ellentmondásosan használják a szakirodalomban. Ezt a magyar szakirodalomban is fellelhető zavart tisztázza (Soós, Szüle & Petróczki, 1996) (Soós, 1998) munkája. Egy levegőben szabadon eső test egyensúlyban van, amikor eléri a v_t végsebességet. Ekkor a súlyerő megegyezik a sebesség négyzetével arányos közegellenállási erővel. A tapasztalat szerint az alábbi összefüggés nagyobb sebességek esetén teljesül.

$$F = mg = k v_t^2 \quad (2.7)$$

Ebből következően:

$$k = mg / v_t^2 \quad (2.8)$$

ahol: k : légellenállási tényező [kg/m]

m : a részecske tömege [kg]

g : gravitációs állandó [m/s^2]

v_t : végsebesség [m/s]

Gyakran használják a K vitorlahatási tényezőt is, aminek a definíciója:

$$K = k / m \quad (2.9)$$

és így mértékegysége [m^{-1}]

Ismeretes, hogy a k légellenállási tényező a szemcse és a közeg tulajdonságaitól függ:

$$k = C_D A \rho_l / 2 \quad (2.10)$$

ahol C_D : a dimenziótlan alaktényező

A : az áramlással szemben mutatott felület

(a szemcse legnagyobb keresztmetszete az áramlás irányára merőlegesen)

ρ_l : a levegő sűrűsége.

C_D értékére az áramlás lamináris/átmeneti/turbulens/ voltára utaló „ Re ” Reynolds szám értékétől függő közelítéseket szoktak adni.

$$Re = d v \rho_l / \eta_l \quad (2.11)$$

ahol d : a szemcse átmérője [m]

η_l : a közeg viszkozitása [Pa s]

A 2.11 Reynolds számot eredetileg egy d átmérőjű csőben áramló folyadékra definiálták. A levegőben mozgó szemcsére való kiterjesztése figyelmet igényel. Nincs analitikus kapcsolat C_D és a Reynolds szám között. Léteznek viszont táblázatok, diagramok és közelítő egyenletek. A szabálytalan alakú műtrágyaszemcsék esetén már alacsony Reynolds szám (50 fölött) is teljesülhet, hogy C_D állandó (Lapple, 1951) (Mennel & Reece, 1963). Ha lamináris az áramlás és $Re < 0.1$, akkor a Stokes törvény miatt $C_D = 24/Re$. Gömbszerű részecskékre $Re > 2000$ fölött $C_D = 0.44$, gyakorlatilag állandó. A $0.1 < Re < 2000$ átmeneti tartományra (Lapple, 1951) és (von Zabeltitz, 1967) adtak közelítő egyenleteket.

2.4.2.1. A légellenállási tényező mérési módszerei

1. levegős ejtőcső
2. folyadékos ejtőcső
3. függőleges légcsatorna (elutriátor) a szemcsék egyenkénti vizsgálatára
4. függőleges légcsatorna függőleges irányú sebességgradienssel, sok szemcse egyidejű vizsgálatára

(Mohsenin, 1968) is a sebesség négyzetével arányos közegellenállási erővel számolt, és azzal a feltevéssel oldotta meg analitikusan a függőlegesen eső szemcse mozgásegyenletét, hogy a mozgás során K és így C_D is állandó. A mozgás szakaszolásával a sebességtől függő Reynolds számból becsült változó C_D értékekkel is kiszámolta a függőleges ejtési trajektóriákat és a 3 mm-es részecskénél kapta a legjobb egyezést. Grifték (Walker et al., 1997) lényegében a Mohsenin féle megoldással azonosan kapták az $y(t)$ függvényt). Állandó K feltételezésével a v_t végsebességgel fejezték ki az esési távolság - idő kapcsolatot. Ha elegendően hosszú távolságon határozták meg kísérletileg az összetartozó $y(t)$ pontokat, akkor a lineáris szakasz meredekségéből (érintő) a v_t meghatározható. Várható, hogy ez a közelítés kicsi és könnyű részecskék esetén nem elég pontos, mert a Reynolds számok az átmeneti tartományban vannak. (Keck & Goss, 1965) azt tapasztalta, hogy a szabályos gömb alaktól jobban eltérő magok esési ideje hosszabb volt.

2.4.2.1.1. Levegős ejtőcső

A levegős ejtőcső módszerét (Grift et al., 1997) dolgozta ki alaposan. Itt egy csaknem 16 méteres, zárt, függőleges csövet alkalmaztak és az esési időt egy optikai (fent) és egy piezoelektromos (lent) jeladó segítségével igen pontosan ($0.1\mu\text{s}$) mérték.

Egy szabadon eső szemcse mozgásegyenlete a levegő felhajtóerejének elhanyagolásával, Newton II. törvénye alapján az alábbiak szerint írható fel:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + C_D A \frac{1}{2} \rho_{air} \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = mg \quad (2.12)$$

$$K = \frac{1}{2} \frac{C_D A \rho_{air}}{m} \quad (2.13)$$

A 2.13 kifejezést behelyettesítve a 2.12 egyenletbe, kapjuk:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + K \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = g \quad (2.14)$$

ahol: ρ_{air} : a levegő sűrűsége [kg/m^3]

m : a műtrágyaszemcsék tömege [kg]

g : a gravitációs állandó [m/s^2]

A : a műtrágyaszemcsék keresztmetszete az áramlás irányára merőlegesen [m^2]

C_D : dimenzió nélküli alaktényező

K : levegőben a vitorlahatási tényező [m^{-1}]

A fenti egyenletből - amikor a gyorsulás zérus - a v_t végsebesség triviálisan adódik:

$$v_t = (g / K)^{1/2} \quad (2.15)$$

A másodrendű differenciálegyenlet általános megoldása C_1 és C_2 integrálási konstansokkal a következő:

$$y(t) = \frac{1}{K} \left\{ \ln \left[\cosh \left((t - C_1) \sqrt{gK} \right) \right] \right\} + C_2 \quad (2.16)$$

(A $\cosh(x) \equiv (e^x + e^{-x}) / 2$ definícióból következően a megoldás ekvivalens a (Ponomarjov, 1969)-ben közölttel.) Ha a kezdeti feltételek $y(0) = y_0$ és $dy/dt(0) = v_0$, akkor az integrálási konstansokra az alábbi értékek adódnak:

$$C_1 = \frac{-1}{\sqrt{gK}} \left[\arctan h \left(\sqrt{\frac{K}{g}} v_0 \right) \right] \quad (2.17)$$

$$C_2 = y_0 - \frac{1}{K} \left\{ \ln \left[\cosh \left(\arctan h \left(\sqrt{\frac{K}{g}} v_0 \right) \right) \right] \right\} \quad (2.18)$$

Az átmeneti áramlási tartományra (von Zabeltitz, 1967) által bevezetett közelítő egyenletek átlapoló tartományokat adnak, és így egy Reynolds számhoz két C_D érték tartozna. Ezt elkerülendő Grift módosította a határokat az alábbiak szerint:

$$\text{Re} < 22.1 \quad C_D = \frac{21}{\text{Re}} + \frac{6}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.28 \quad (2.19)$$

$$22.1 < \text{Re} < 2084 \quad C_D = \frac{26.4}{\text{Re}} + \frac{4.87}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.276 \quad (2.20)$$

$$2084 < \text{Re} < 4000 \quad C_D = \frac{18.5}{\text{Re}} + \frac{6.23}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.276 \quad (2.21)$$

$$4000 < \text{Re} \quad C_D = 0.3531 \quad (2.22)$$

Grift a változó Reynolds szám ill. C_D problémáját a függőleges ejtőcsőben úgy kezelte, hogy a csövet sok kis szakaszra osztotta fel, amelyekben a C_D állandónak tekinthető. A kis szakaszokra kiszámolta az esési időket, majd az esési idők összegeként kapta a teljes repülési időt. Gömb alakú műanyag szemcsékre az elméleti és kísérleti esési idők általában néhány tized százalékon belül egyeztek, ami igazolta a módszer helyességét. Valós műtrágyaszemcsék esetén a nem gömbszerű szemcsék d_c átmérőjét először a szemcse tömeg és az átlagos sűrűség ismeretében becsülték:

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{6}{\pi} \left(\frac{m}{\rho} \right)} \quad (2.23)$$

A műtrágya szemcsét ejtőcsőben elengedték, és a mért esési időhöz megkeresték az elméletileg legjobban megfelelő, „ekvivalens” gömb átmérőjét (d_e). A két átmérő hányadosa adja Hofstee definíciója szerint a q-faktort:

$$q = d_e / d_c \quad (2.24)$$

A háromféle műtrágyára (CAN 27N, NPK 12-10-28, Potassium 60) Grifték által kísérletileg mért átlagos q-faktorok szignifikánsan eltértek (0.87, 0.75, 0.62) egymástól. A kisebb érték kisebb ekvivalens átmérőt és így hosszabb esési időt, azaz nagyobb légellenállási tényezőt jelent. Az eső részecske 2.14. mozgásegyenletét (Hofstee, 1992) is változó Reynolds szám mellett oldotta meg oly módon, hogy minden integrálási lépés után újra számolta a K értékét. Az esési távolság-sebesség kapcsolatot leíró modellszámításai szerint konstans $C_D = 0.44$ - el számolva a sebességek 3-4 mm-es szemcseátmérőnél elég jól egyeznek a változó, $C_D = f(Re)$ modellel. Kicsi, 1 mm-es szemcséknél viszont jelentős eltérések adódnak. Nomogramokat szerkesztettek a v_t végsebesség és a K tényező meghatározására a szemcse sűrűség, az ekvivalens gömb átmérő és a q-faktor függvényében.

Nem találtam irodalmi adatot arról, hogy a fenti eredményeket a ballisztikai számításokban kamatoztatták volna oly módon, hogy a ferde hajításnál figyelembe veszik a változó C_D hatását. Ennek több oka is lehet:

1., Nincs bizonyíték arra nézve, hogy a szabálytalan alakú műtrágyaszemcsék C_D értékei követnék a gömbre érvényes empirikus összefüggéseket. Éppen ellenkezőleg, egyes megfigyelések szerint szabálytalan részecskék esetén a C_D már $Re > 50$ esetén is meglehetősen állandó (Lapple, 1951).

2., Többé-kevésbé nyilvánvaló, amit később a saját részben a velográfus módszerrel is bizonyítok, hogy a szokásos röpitőtárcsás gépek esetén a szemcsék sebessége a pálya teljes nyomvonalán jelentős, így a Reynolds szám többeszes értékű és a C_D meglehetősen állandó.

2.4.2.1.2. Folyadékös ejtőcső

(Aphale et al., 2003) szellemes és egyszerű módszert javasolt a K vitorlahatási tényező mérésére. Vízrel töltött fel egy 1.5 m magasságú 7.6 cm átmérőjű ejtőcsövet, majd az egyenként beejtett műtrágyaszemcsék esési idejét stopperrel mérte. Ebben a kísérleti elrendezésben a szemcsék pár cm út megtétele után elérik a néhány tized m/s

végsebességüket, ahol a Reynolds szám biztosan 50 fölötti és a C_D gyakorlatilag állandó. Az állandó v_t sebességgel eső részecskére a súlyerő, a felhajtóerő és a közegellenállás hatnak. Egyszerű számítással adódott, hogy

$$K_{air} = \frac{g}{v_t^2} \left(\frac{\rho}{\rho_{water}} - 1 \right) \frac{\rho_{air}}{\rho} \quad (2.25)$$

és $v_t = H/dt$, ahol H a mérésre használt ejtőcső szakasz hossza, dt pedig az esési idő. Az Aphale mért K értékek a $0.12-0.45 \text{ m}^{-1}$ tartományban voltak, amelyek valamelyest nagyobbak mint a (Hofstee & Huisman, 1990) által mért mennyiségek, de hasonlóak (Law & Collier, 1973) adataihoz.

2.4.2.1.3. Függőleges légcsatorna (elutriátor)

Mások után (Law & Collier, 1973) írták le a függőleges légcsatorna alkalmazását műtrágyaszemcsék aerodinamikai vizsgálatára (C_D meghatározására). Az áramló levegő sebességét pitot-csővel mérték, manométeres leolvasás alapján. Szabályozható légárammal látták el a 6:1 hosszúság/átmérő arányú csatornát. Így a felső szakaszban a sebesség profil kellően homogén volt. A mozgásegyenlet felírásakor elhanyagolták a levegő felhajtó erejét, és így egyensúlyi esetben adódik a szokásos összefüggés:

$$k = mg / v_t^2$$

A különböző kísérleti megvalósításoknál (Gorial & Ocallaghan, 1990) (Henderson & Perry, 1976) a sebesség gradiens vízszintes irányban elérheti az 5-10%-ot. (Hofstee, 1992) tizenhét féle műtrágyán hasonlította össze az elutriátoros és a levegős ejtőcsővel nyert végsebességeket. A függőleges légcsatornában szitaméretenként mintegy 200 szemcsét lebegtetett, és a szemcsék lebegésének kezdete jelentette a sáv alsó határát, míg a sáv felső határának azt tekintette, amikor az összes szemcse lebegett. Az derült ki, hogy a függőleges légcsatornában mért lebegési sebesség értékek szignifikánsan, 1-3 m/s-al kisebbek, mint az ejtőcsővel kapott értékek. Az eltérés okairól csak találgatni tudott a szerző. Lehet, hogy a lomha pitot-csőves sebességmérő nem érzékeli az áramlásban meglevő csúcsokat, amelyek képesek a szemcséket magukkal ragadni. Az is lehet, hogy a bukácsoló, pörgő szemcsék nagyobb légellenállást és így alacsonyabb lebegési sebességet adnak. A vizsgálatok összegzéseként (Hofstee, 1992) kétségét

fejezte ki az elutriátoros módszer megbízhatóságát illetően. Tanszékünkön (Csizmazia et al., 2000) és munkatársai konstruáltak új rendszerű légcsatornát. Megállapították, hogy az általuk épített, perforált falú függőleges cső használatánál a fal melletti néhány mm-es tartományt kivéve, a légsebesség a cső vízszintes metszeteiben kellően homogén. A függőleges irányú sebesség lineárisan változott a függőleges irányú távolság függvényében, a tervezett 20%-os sebességtartományban. A mérőeszközt hógömbös anemométerrel kalibrálták és számos mérésre alkalmazták. *Többek között, a jelen dolgozatban is tárgyalom az elutriátorral végzett szemcsénkénti méréseimet.*

2.4.3. Műtrágyaszemcsék alak- és méretjellemzői

Mint ahogy az első fejezetből is sejthető, az 1 mm-nél kisebb műtrágyaszemcsék kedvezőtlenek, mert csökkentik a munkaszélességet és növelik a szórás egyenetlenségét (Hollmann, 1962). A 2 mm-nél kisebb szemcsék mennyiségét is érdemes a lehető legalacsonyabb értéken tartani. Ha műtrágyákat kevernek, akkor a szétválás elkerüléséhez szerencsés ha a fajták átlagos szemcsemérete 10%-nál jobban nem tér el egymástól (Hoffmeister, Watkins & Silverberb, 1964). A szemcseméretet szitaanalízissel vagy szemcsénként végrehajtott hosszmérésekkel határozzák meg.

2.4.3.1. Szitaanalízis

Egy szemcsehalmaz szemcséinek nagyság szerinti osztályozására, a szemcseösszetétel megállapítására szitaanalízist alkalmazhatunk. A szitaanalízis elemző szitasoron végezhető, amely lefelé csökkenő lyukméretű szitákból áll. Az egymás utáni sziták lyukméreteit szabvány tartalmazza. A sorozat általában vagy $\sqrt{2}$ vagy $\sqrt[4]{2}$ arányban csökkenő lyukméretekkel vagy a Renard-számsor szerint készül. (Szabó, Csury & Hidegkúti, 1987). (Hignett, 1985) leír néhány USA-ban és Európában használt módszert. Hollandiában pl. 1.0, 1.4, 1.7, 2.0, 2.36, 2.8, 3.35, 4.0, 4.75 és 5.6 mm lyukméretű négyszögletes nyílású szitát használnak. A részecske méret mérőszámai a szita méret és a d_{50} (közepes 50%-os átmérő), ami azt jelenti, hogy ennél az átmérőnél kisebb szemcsék tömegaránya a teljes minta tömegének 50%-a. Sokan megadják a részecskeméret alsó határát, a felső határ viszont gyakran nem ismert. A gyártásnál sokszor 4 - 4.75 mm a felső határ. Általában igaz, hogy a munkaszélesség növekszik a d_{50} átmérővel, de a méret eloszlás egyéb hatásai tisztázatlanok. A szemcseméretek

heterogenitása kedvezően simíthatja a szórási képet, ha nincsenek 1mm-nél kisebb szemcsék. Úgy tűnik, hogy a szemcseeloszlások és hatásvizsgálatuk mindmáig népszerű kutatási terület. (Allaire & Parent, 2004a) hagyományos értelemben vett szervetlen és olyan műtrágyák szemcseméret eloszlását is vizsgálta, amelyben bizonyos mennyiségű szerves trágya is található. 40g műtrágyát tett egy méretbecslő Sylvite dobozba, az (European Blenders Association, 1997) előírása szerint, vagy egy Tyler szita sorozatba (Canadian Fertilizer Institute, 2001) szerint. Az előbbinél a méret sorozat 0.7, 1.0, 1.4, 2.0, 2.8, 4.0 míg az utóbbinál 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, és 8.0 mm. A dobozt vagy a szita sorozatot vízintesen és függőlegesen is gyengén rázzák. A szitákat utána lemérik, hogy a rajtuk maradt szemcsék tömegét megkapják. A linearizált Rosin-Rammler egyenletet (Perfect, Xu & Terry, 1998) használták (Allaire & Parent, 2003) a méreteloszlás leírására.

$$\ln(-\ln(P(X>x)/100)) = \beta \ln(x) - \beta \ln(\alpha) \quad (2.26)$$

ahol: P azon részecskék *tömegszázaléka*, amelyeknek a mérete nagyobb mint az x szitaméret, α az a részecskeméret, amelyik az összegzett valószínűségeloszlás 36.86%-ánál van, és β empirikus érték, ami a függvény alakját szabja meg. Kis β érték heterogén méreteloszlást jelez. A méretbecslő szám, N_{SG} és az I_U méret-homogenitási index az alábbiak szerint adódik.

$$N_{SG} = \alpha / \exp(-0.3661/\beta) \quad (2.27)$$

$$I_U = 100 \exp(-3.804/\beta) \quad (2.28)$$

A méretbecslő szám jele SGN (size guide number) is lehet, ami a szitával mért közepes részecske átmérőt jelenti század-milliméter egységben. Néha megadják az SGN_{16} és SGN_{84} értékét is (Aphale et al., 2003), ami azt jelenti, hogy az adott átmérőnél kisebb szemcséjű a műtrágya össztömegének 16 ill. 84%-a. A tápanyagfelvétel hatásossága nagyban függ a szemcsék teljes felületétől. Az egységnyi tömegre jutó felület (A , m^2/kg) becsülhető a részecske eloszlásból (ASAE Standards, 2000).

$$A = \beta_s / (\beta_v \rho_g) \exp(4.5 \sigma_{\ln}^2 - \ln \mu_{gw}) \quad (2.29)$$

ahol ρ_g a műtrágya sűrűsége (kg/m^3), $\sigma_{\ln}$ a tömeg szerinti eloszlás log-normál geometriai standard deviációja, μ_{gw} a részecske tömegek geometriai átlaga, β_s a szemcse felület kiszámítására használt alak faktor, β_v pedig a szemcse térfogat kiszámításához

használható faktor. Ezek a számok ismert geometriai alakzatokra kiszámíthatók, illetve ismertek pl. (Allaire & Parent, 2004a) munkájából.

2.4.3.2. Szemcsénkénti alak és méretmeghatározás

A szitaanalízisnél fáradságosabb, ámde pontosabb a szemcsék egyenként történő méretvizsgálata. Célszerű a legnagyobb méret irányára merőleges két további mérettel jellemezni a szemcséket (hosszúság, szélesség és vastagság) (Sitkei, 1981). Ezek a méretek digitális tolómérők segítségével könnyen mérhetők 0.01 mm pontossággal (Csizmazia, Kasza & Polyák, 1994; Polyák, 2001). Találkozhatunk azonban 0.001 mm pontosságú méretmeghatározással is (Olaoye, 2000). A szabálytalan alakú testek jellemzésére a három merőleges méret megadása általában kielégítő (Mohsenin, 1968), és a legtöbben ezt a módszert használják (Neményi, 1993; Singh & Goswami, 1996). Hasznos a szemcsék közepes méretének és gömbalakúságának meghatározása is. A gömbalakúság (Sitkei, 1981) szerint a következőképpen számítható:

$$g_a = \frac{\sqrt[3]{abc}}{c} \quad (2.30)$$

ahol: a, b, c értékek sorban a legkisebb, közepes és legnagyobb méretek. A közepes méret meghatározására a számtani átlagot használják (Gupta & Prakash, 1992).

2.4.3.3. Fényképezőgépes módszer a szemcse alak és méret meghatározásához

A munkaszélesség a repítés miatt jelentősen függ a szemcsemérettől, hiszen a szemcsetömeg az átmérő köbével, míg a levegő fékező ereje csak a négyzetével arányos. Nyilvánvaló, hogy az ideális gömbtől való eltérés is befolyásolja a repítési távolságot. A Walker és munkatársai által készített eszközzel (Walker et al., 1997) két, egymásra merőleges irányban fényképezték a szemcsék vetületét. A szabálytalan alakú vetületekhez a legkisebb négyzetek módszere szerint illesztéssel megkeresték a legjobban illő kört, amelynek középpontja a vetület súlypontja. A kör és a szemcse vetület közti távolságok abszolút értékeit fokonként (a 360°-os teljes szögre) összegezték, majd elosztották a kör átmérőjével. Így egy dimenziótlan mérőszámhoz jutottak. A két egymásra merőleges vetületre kapott számokat összeadták. Ez a szám a kissé szabálytalan alakok miatt még a gömb alakú modellek esetén sem volt zérus; értéke kb. 5 és 50 között változott. Az ejtőcsöves kísérletekből származtatott C_D

értékeket összehasonlítva a fent definiált „S” alaktényezőkkel nem túlságosan meggyőző lineáris korrelációt találtak ($R^2 = 0.58$).

2.4.4. Nedvességtartalom (%)

Sok műtrágya erősen higroszkópos. A tárolás során a levegő nedvességtartalmát oly mértékben fölvehetik, hogy fizikai-mechanikai tulajdonságaik döntően megváltoznak (Sitkei, 1981). (Allaire & Parent, 2004a; Allaire & Parent, 2004b) a műtrágyák teljes víztartalmát az alábbiak szerint határozza meg: az (AOAC, 1995) ajánlása szerint 5 g műtrágyát megdaráltak és 1mm-es szitán engedtek át, majd 100°C hőmérsékleten szárították öt órán keresztül. Ezután ezt a műtrágyát foszfor-pentoxid (P_2O_5) fölött egy szárítóban tartották 16 órán keresztül, szobahőmérsékleten ($\sim 20^\circ C$). Ezt követően a tömegét újra mérték.

Polyák, N.I. (Polyák, 2001) búza nedvességtartalmát vizsgálta. A légszáraz vetőmagból mintaként 250 szemet vett, amit 4 órán keresztül $103 \pm 1^\circ C$ hőmérsékleten tartott, majd 24 órán keresztül levegőtől elzárva exikátorban tárolt, ahol a levegő nedvességtartalmát a szilikagél vonta el.

2.4.5. Sűrűségmérési módszerek

A magyar szakirodalomban térfogattömegként ismert „bulk density” (ömlesztett anyag sűrűsége) ρ_b értékét (Allaire & Parent, 2004a) az (ISO, 1984) szabvány szerint határozta meg kb. 500 ml össztérfogatú műtrágyán. Gupta és munkatársai (Gupta & Prakash, 1992) magvak térfogattömegének megállapítására az 1 literes mérőhengert 150 mm magasról töltötték meg. Szemcsés anyagok sűrűségének meghatározására piknométer alkalmazható. A piknométerbe töltött folyadék felületi feszültségének kicsinek kell lennie, hogy a szemcse kis mélyedéseit is jól kitöltse, ne szívja magába a mérendő anyag és ne oldja azt (Sitkei, 1981). Régebben erre a célra toluolt alkalmaztak, ami azonban rákkeltő. Polyák, N. I.(2001) mérőfolyadékként petróleumot választott. Létezik higannyal feltöltött eszköz (Hoffmeister, 1979) is, aminek hátránya, hogy a higany nem tud behatolni a mikrozárványokba. A granulátum ρ_g sűrűségét úgy mérik, (Blake & Hartge, 1986) hogy a szemcsékben lévő üregek beszámítsanak, viszont a szemcsék közötti teret kizárják. Ehhez a szemcséket vékonyan méhviasszal vonták be, (kb. 1% tömegarányban) hogy a piknométerbe töltött kerozin ne tudjon a szemcsékbe

hatolni. A szemcsés anyagok szilárd részének piknométeres sűrűségméréséhez (ρ_s) viszont mind a szemcsék közötti, mind pedig a szemcséken belüli térrészt ki kell zárni a térfogatmérésből. Nyilván fennállnak a következő egyenlőtlenségek: $\rho_b < \rho_g < \rho_s$.

A sűrűségekből adódnak a porozitás definíciói:

$$\Phi_t = (1 - \rho_b / \rho_s) 100 \quad (2.31)$$

$$\Phi_g = (1 - \rho_g / \rho_s) 100 \quad (2.32)$$

$$\Phi_b = (1 - \rho_b / \rho_g) 100 \quad (2.33)$$

Az Allaire által vizsgált termékekre az ömlesztett műtrágya Φ_t teljes porozitása a 42-60 % tartományban, míg a granulált műtrágyák Φ_g belső porozitása a 4 - 23 % sávban mozgott. A **száraz piknométeres** módszer előnye (Gorial & Ocallaghan, 1990) a folyadékkiszorítással szemben az, hogy a levegő áthatol a szemcsék pórusain, ugyanakkor a gáz nem nedvesíti a műtrágyát, így kedvezőbb a szilárd anyag tényleges sűrűségének mérésére. A módszer az ideális gáztörvényen alapul. A mérőeszköz egy U alakú csőből kialakított manométerből és egy hozzá csatolt ismert térfogatú mérőhengerből áll, amibe ismert tömegű anyagot helyeznek atmoszférikus nyomáson, majd a rendszert légmentesen lezárják. A manométer egyik szárában a folyadékszint emelésével új egyensúlyi nyomást alakítanak ki, majd a bezárt anyag térfogatát számítják.

Az orvosi légzésfunkciós vizsgálatokban bevezetett test „pletizmográfok” (Gundlach, Nijkrake & Hautvast, 1980) szintén alkalmazhatók valódi térfogat mérésére.

A nemzetközi és hazai gyakorlatban egyaránt alkalmaznak gázpiknométert a térfogat ill. sűrűség mérésére. Elméletileg bármely gáz lehet mérőközeg. (Chang, 1988) héliumot, (Fang & Campbell, 2000) nitrogént használt a gabonamagvak sűrűségének megállapításakor. (Gyimes, 2003) a búza valódi sűrűségét egy gyári QUANTACHROME Stereopycnometer segítségével mérte. A mérőgáz hélium volt.

A saját vizsgálatok részben részletesen ismertetem az általam fejlesztett légpiknométert. Ez a légpiknométer (Sitkei, 1981) által ismertetett eszközhöz hasonlít azzal a különbséggel, hogy nem szükséges a két szárban lévő folyadékoszlop magasságát azonos szintre hozni az új nyomás kialakítása után. A ballisztikai számításokhoz inkább a ρ_g sűrűséget kellene használni, mivel a szemcsék önálló egységként mozognak, a befoglalt zárványokkal együtt. Ezt a sűrűséget a gyakorlatban nehéz meghatározni,

mivel a szükséges speciális bevonatok a hazai kereskedelmi forgalomban nem kaphatók. Szerencsére, ρ_g az irodalmi adatok szerint nem tér el túlságosan a ρ_s értékétől.

2.4.6. Súrlódási jellemzők

A gyakorlatban súrlódás minden érintkező felület között létrejön. A műtrágyákra is érvényesnek tartott jól ismert összefüggés szerint az F_s súrlódási erő arányos a felületet nyomó F_n erővel és a μ súrlódási tényezővel.

$$F_s = \mu F_n \quad (2.34)$$

Ez az erő az érintkezési pontokat tartalmazó felület síkjában hat az elmozdulás irányával ellentétesen. Ha elhanyagolható a „ragasztó” hatás, akkor a súrlódási tényező a feszültségvektor $\tau_{\max}$ érintő irányú csúsztatási határfeszültsége és a σ normális irányú komponense közti arányossági tényezővel azonos.

$$\tau_{\max} = \mu \sigma \quad (2.35)$$

Természetszerűleg van különbség a statikus és a dinamikus súrlódási erők között, mivel a mozgás elindításához nagyobb erőre van szükség. Az indítási többletellenállást a gyorsítással együttjáró tömegegerőkön kívül még olyan adhéziós hatás (leragadás) is befolyásolja, amelyet az elmozduláshoz el kell szakítani. Amint a csúszás bekövetkezik, a súrlódási erő általában lecsökken. Ennek megfelelően a magyar terminológiában tapadási és csúszási (vagy statikus és dinamikus) súrlódási együtthatókról szokás beszélni. A szemcsés anyagok súrlódási tényezőjének mérése úgy történik, hogy méri azt a vizsgált felülettel párhuzamos erőt, ami ahhoz szükséges, hogy fenntartsa a mozgást a súllyal terhelt pl. műtrágya és a szerkezeti felület között. A súrlódási erővel kapcsolatban (Mohsenin, 1968) az alábbi szabályszerűségeket figyelte meg:

1. A súrlódási erő – *feltehetően állandó tangenciális feszültség esetén* - arányos a tényleges érintkezési felülettel .
2. A súrlódási erő függ a csúszó felületek sebességétől.
3. A súrlódási erő függ az anyagok fajtájától.
4. A súrlódási erő első közelítésben nem függ a vizsgált anyag felületi érdességétől, kivéve a nagyon durva vagy túl sima felületeket.

A magyar terminológiában (Balássy, 1989) a mérési módszertől függően kétféle dinamikus, csúszási súrlódást különböztet meg. Ha a szemcsék gördülését, belső mozgását meggátoljuk (pl. ragasztással), a súrlódási tényezőt kapjuk. Ha viszont a belső

mozgások akadálytalanok, akkor beszélünk - Balássy szerint - a súrlódási faktorról. A súrlódási faktor kisebb is lehet mint a súrlódási tényező. Az elnevezésből adódóan a műtrágyákkal kapcsolatosan inkább a „súrlódási faktor” ismeretére van szükség. Ha a szemcséket nem rögzítik, akkor az utóbbi értéket mérik.

A v súrlódási faktor egy csúsztatási mérés során mért F'_{Tmax} maximális tangenciális és F'_N normális erő hányadosa.

$$v = F'_{Tmax} / F'_N \quad (2.36)$$

A csúsztatási kísérlet során egy adott x elmozduláshoz és $F_{Nmin} \dots F_{Nmax}$ terhelési tartományhoz rendelhető $v_{(x, FN)}$ értékét úgy határozhatjuk meg, hogy a vizsgált terheléseknél mért vontató erőket egyenessel illesztjük, amelynek meredeksége G , tengelymetszete K . Ebből kiszámítjuk F'_{Tmax} értékét:

$$F'_{Tmax} = G F'_{Nmax} + K \quad (2.37)$$

Így a súrlódási tényező értékét közelítő súrlódási faktor 2.36. alapján:

$$v_{(x, FN)} = G + K / F'_{Nmax} \quad (2.38)$$

Ez az érték természetesen egy adott, állandó „ v ” vontatási sebességre vonatkozik.

(Sitkei, 1981) megállapította, hogy a biológiai anyagok már kisebb felületi nyomások esetén is deformálódhatnak, így megváltozik a csúszó felületük. A súrlódás eredményeképpen az érintkezési felületek hőmérséklete növekszik, ami szintén okozhatja a súrlódási tényező változását. Az érintkezési felületen kialakuló folyadékfilm befolyásolja az adhéziós- és súrlódási erőket. A nedvességtartalommal a súrlódási tényező általában növekszik. Sitkei arra a következtetésre jutott, hogy a súrlódási tényező szempontjából elsősorban a felületi finomság és az anyagminőség a mértékadó. A felületi finomság növelése általában nem csökkenti a súrlódási tényezőt, sőt sok esetben növeli a jobb tapadás miatt. A festett felületeken a jó tapadás miatt szintén nagy a súrlódási tényező. A durvábban megmunkált felületeken a tapadás kisebb, így általában kisebb a súrlódási tényező is. Sitkei szerint a környezet relatív páratartalma is jelentős befolyásoló tényező, mivel a vizsgálandó anyag felületi nedvességtartalma rövid idő alatt megváltozhat, így vele együtt a súrlódási tényező értéke is. Ez különösen igaz nedvszívó anyagok vizsgálatánál. Több kutató is felhívta a figyelmet arra, hogy a mérések alatt a környezeti tényezők hatását figyelembe kell venni, és azokat állandó értéken kell tartani (Mohsenin, 1968). A tapadási súrlódási tényezőt (Inns & Reece, 1962) igen egyszerű módon határozták meg. A műtrágyaszemcséket ragasztószalaggal

rögzítették a vizsgált felületen a gördülés megakadályozására. Óvatosan növelték a lap dőlésszögét a vízszinteshez képest addig, amíg a csúszás éppen bekövetkezett. A mért dőlésszög tangense így a tapadási súrlódási tényező értékét adja. Ez a mérési módszer kizárja a szemcsék belső mozgását. Sitkei a mozgásbeli súrlódási tényező meghatározására forgótárcsát vagy forgótengelyt mutat be. (Brubaker & Pos, 1965) forgó tányérral mérték a súrlódást. (Brübach & Göhlich, 1973) egy súllyal terhelt fém lapot mozgattak egy nyitott, műtrágyával töltött tálca fölött és mérték a mozgáshoz szükséges erőt. Így a mérés során figyelembe vehető, hogy a szemcsék elfordulhatnak. (Huisman, 1978) módszerével egyetlen szemcsén is mérhető a súrlódási tényező. Számos szerző mérte a műtrágyák súrlódási tényezőit különböző felületeken, sokszor nehezen ellenőrizhető körülmények között. Acélon például a $\mu = 0.2-0.7$ tartományban kaptak értékeket. (Aphale et al., 2003) a súrlódási tényezőt úgy mérte, hogy egy fakeretbe öntötte a műtrágyát, majd a vízszintes alumínium felületre helyezést követően a fokozatos döntés során észlelték az első megmozdulást. Ezzel a módszerrel a statikus súrlódási tényezőre 0.5 ± 0.1 értéket kaptak az összes vizsgált műtrágya esetén. (Hofstee, 1992) dinamikus súrlódási tényezőket mért, amelyek a $0.33-0.44$ tartományban szóródtak. A súrlódási tényező ismerete lényeges, mert értéke a röpitőtárcsás műtrágyaszórók esetén befolyásolja a szemcsék leválási sebességét, szögét és helyét (a tárcsán való tartózkodás idejét). Az elméleti számításokhoz (2.1 egyenlet) a lapáton és a tárcsán való mozgás egymástól eltérő súrlódási együtthatóit (μ_v , μ_d) szokás megadni, amelyek az anyagi minőségtől függenek. Az irodalomban a súrlódási együtthatók értékeit tekintve nagyok a különbségek; nyilván az alkalmazott módszerek sokfélesége miatt. Még azt sem lehet kizárni, hogy a szemcsék csúszó súrlódási együtthatója változik a röpitőtárcsán történő mozgás során. Ráadásul ez nem feltétlenül csak a részlegesen gördülő mozgások eredménye, hanem a mozgás során növekvő erőhatás következménye is lehet. A lapátokon történő mozgás kis tömegáramnál egy szemcserétegű, nagyobb tömegáramnál több szemcserétegű is lehet.

2.4.6.1. Rézsűszög és belső súrlódási szög

Az ömlesztett anyagok fontos súrlódási jellemzői a belső súrlódási szög és a természetes rézsűszög. A belső súrlódási szög (Sitkei, 1981) az egyes szemcsék között fellépő, a súrlódási folyamat hatására jelentkező súrlódási szög: $\mu_i = \tan \Phi_i$, ahol μ_i : a belső súrlódás tényezője, Φ_i : a belső súrlódás szöge. A természetes rézsűszög (Φ_r) az a

vízszintessel bezárt szög, amely szög mentén az ömlesztett anyag a felhalmozásakor megáll. A két szög nem független egymástól, de nem is azonos. (Allaire & Parent, 2004a) a rézsűszöget úgy mérte meg, hogy egy alul - felül lyukas mérőhengert megtöltött 0.5 l műtrágyával, és a hengert állandó 10 m/s sebességgel emelte fel. A műtrágya kúpot egy fénysugáral a falra vetítette és a kúpszöget megmérte. A vizsgált granulált – szerves anyagot is tartalmazó – műtrágyák rézsűszöge a 29° - 46° -os tartományban volt. (Mohsenin, 1968) megkülönböztet statikus és dinamikus rézsűszöget. A statikus rézsűszög az egymáson elmozduló magvak, szemcsék súrlódási szöge, míg a dinamikus rézsűszög a mozgásban lévő anyagra jellemző. (Sitkei, 1981) a statikus rézsűszög meghatározására lejtőt, míg a dinamikus rézsűszög mérésére egy alsó szabad kifolyású mérődobozt mutat be. Meghatározta a magvak nedvességtartalma és a rézsűszögek közötti összefüggést, miszerint a nedvességtartalom növekedésével a súrlódási szögek is nagyobbak. (Balássy, 1988b) a búza rézsűszögét olyan mérődobozzal határozta meg, melynek egyik oldalán állítható magasságú gát található. Fölötte az ömlesztett anyag szabadon kifolyhat a dobozból. A rézsűszögre eredményül 27.6° és 29.7° közötti értékeket kapott.

A hazai irodalomban a szemcsés anyagok belső súrlódásának mérésére alkalmas triaxiális vizsgálati módszert (Balássy, 1988a) írta le, amikor búzából készített hengeres próbatestet korongalakú véglapok és vékony gumiköpeny segítségével vizsgált. A próbatestet a fém fedőlapján át F_1 axiális erővel állandó deformációsebességgel terhelte, és mérte a nyomóerő és a tengelyirányú deformáció kapcsolatát. A mérésekből az első esetben a búzára kapott belső súrlódási szög 25.7° , azaz a belső súrlódási tényező 0.481, míg a második esetben 25.1° , illetve 0.468 volt. (Mohsenin, 1968) a triaxiális vizsgálati alapján megállapította, hogy azonos nedvességtartalmú magvak rézsűszöge mindig nagyobb volt, mint a belső súrlódási szögük.

Sitkei a belső súrlódási szög mérésére speciális nyírókészüléket ismertet, mely két egymáson elmozdítható részből áll. Méréskor a felső gyűrű a készülékben elhelyezett ömlesztett anyaggal együtt vízszintesen elmozdul, így a szemcsés anyag egy sík mentén elcsúszik egymáson. Az anyag normális irányban terhelhető, a nyírási síkban fellépő (τ) feszültségek legyőzésére fordított erő mérhető. Bemutatja, hogy az elmozdulás függvényében a nyíróerő kezdeti szakasza függ az előtömörítés mértékétől. Ismerteti az anyag viselkedésétől függően a maximális (τ) nyírófeszültség és a normálfeszültség (σ)

összefüggését. Ideális ömlesztett anyag esetén $\tau = \sigma \operatorname{tg}(\Phi_i)$, ahol Φ_i a belső súrlódási szög, egyben az egyenes iránytangense.

(Balássy, 1988b) az ömlesztett anyagok belső súrlódási szögének meghatározására hasonló elven alapuló 200x200 mm keresztmetszetű gördülőkocsis-nyíródobozos készüléket alkalmazott. Átszerelés után ugyanezt a készüléket használta (Balássy, 1989) a búzamag és sikkveg közötti súrlódási tényező és súrlódási faktor meghatározására, illetve egyéb magvak nyírási és csúsztatási vizsgálataira (Balássy, 1991). (Csizmadia & Balló, 1988) „körforgó nyírókészüléket” fejlesztettek a belső súrlódási szög vizsgálatára. A készülékben a szemcsés anyagot a 110 mm belső átmérőjű két egymáson elmozdítható gyűrűbe helyezik. Az ömlesztett anyag a fedőlapon keresztül normális irányban terhelhető. A terhelő- és a forgatáshoz szükséges erő mérését mechanikus mérőcellával oldották meg.

3. A VIZSGÁLATOK ANYAGA ÉS MÓDSZERE

3.1. A kísérletek célja

Dolgozatom egyik fontos célkitűzése olyan szimulációs program kidolgozása volt, amely a műtrágyaszemcsék 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 program kipróbálásához és alkalmazásához szükséges "bemenő" fizikai adatokat kísérletileg meg kellett mérni. Ezért a hazánkban gyakran használt műtrágyák közül öt kereskedelmi forgalmú műtrágya halmazainak és szemcséinek minél teljesebb körű geometriai és fizikai jellemzőit igyekeztem saját kísérleteimben meghatározni.

3.2. A mérési körülmények és a vizsgált műtrágyatípusok

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

A vizsgálataimhoz a következő műtrágyákat választottam:

Karbamid (46-0-0, Nitrogénművek Rt. Pétfürdő)

Ammóniumnitrát (34% N, Nitrogénművek Rt. Pétfürdő)

Granulált Kálisó (0-0-60%, Tiszamenti Vegyiművek Rt. Szolnok)

NPK 15-15-15 (Nitrogén, Foszfor, Kálium hatóanyag tartalom egyaránt 15%, Agrolinz Agrochemikalien GMBH)

Linzisó (mészammonsalétrom 27% N, Agrolinz Melamin GMBH).

A szemcsék érzékszervi megfigyelése alapján a kálisó kristályok szabálytalan hasáb alakúak, a többi cseppentett típus gömbalakhoz hasonlítható; állagukat esetenként bevonat védi. Szemrevételezés alapján az összetapadás, porlás friss mintáknál elhanyagolható.

3.3. A vizsgálataimnál használt módszerek

3.3.1. Nedvességtartalom mérése

A műtrágyák nedvességtartalma jelentősen befolyásolhatja az egyéb fizikai jellemzőket, ezért először célszerű volt a vizsgált műtrágyák nedvességtartalmát meghatározni. Háromszori ismétléssel 25 g tömegű mintát hevítettem 4 órán át 103 ± 1 °C hőmérsékleten szárítókemencében, majd 24 órán keresztül levegőtől elzárva exikátorban tartottam, ahol a levegő nedvességtartalmát szilikagél vonta el. A minták tömegét 0.1 mg pontosságú analitikai mérleggel mértem meg. A szárítás előtt és után mért tömegből számítottam a nedvességtartalmat.

3.3.2. A műtrágyák szemcseösszetétele

A szemcsehalmaz méreteloszlásának százalékos meghatározását szitaanalízissel végeztem. Típusonként 3 különböző, egymástól független 500-500 g tömegű mintát vettem, amit rázógéppel 3 percre kezeltem. Az alkalmazott rostaméret 0.8 mm, 1 mm, 2 mm, 2.5 mm, 4 mm és 6.3 mm volt. A mintát és a rostamaradékokat 0.1 g pontosságú mérlegen mértem meg.

3.3.3. Térfogattömeg és porozitás



3.1. ábra Mérőedény térfogattömeg meghatározására

Az ömlesztett térfogattömeg megállapításához 100 mm átmérőjű, 127.4 mm magasságú 1000 cm³-es mérőedényt használtam (**3.1. ábra**). A műtrágyát 150 mm magasságból csurgatva, tömörítés nélkül, háromszori ismétléssel púpozottan öntöttem a mérőhengerbe, majd a tetejét lesimítottam és a befoglalt tömeget megmértem.

A vizsgált műtrágyák porozitásának meghatározására az (Allaire & Parent, 2004a) által közölt összefüggést alkalmaztam:

$$\Phi_t = 1 - \rho_b / \rho_s$$

ahol: Φ_t : az ömlesztett műtrágya teljes porozitása

ρ_b : a műtrágya térfogattömege

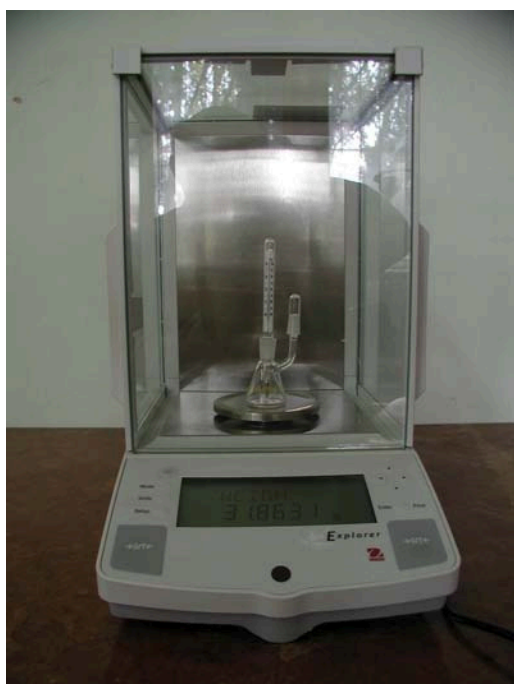
ρ_s : szilárd részének sűrűsége szemcsék közötti és a szemcséken belüli térrészek kizárásával (légpiknométeres sűrűségmérés átlaga)

(Tapasztalatokat, eredményeket lásd: 68-69. old.)

3.3.4. A műtrágyák sűrűségének meghatározása

A sűrűség értékek meghatározását háromféle módon végeztem el:

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



3.2. ábra Piknométer az analitikai mérlegen

A sűrűségeket először nagy tisztaságú petróleummal feltöltött 10 ml-es űrtartalmú piknométerrel (3.2. ábra) mértem. A tömegmérésekhez 0.1 mg pontosságú Explorer típusú analitikai mérleget alkalmaztam. A petróleum sűrűségének meghatározásához 20⁰ C-os desztillált vizet használtam. A mért 791-793 kg/m³ érték az irodalomban leírt 760-800 kg/m³ tartományon belül volt. A különböző műtrágyákból először kisebb (1 g), majd nagyobb (2.5 g és 5 g) tömegű mintákat választottam. Így háromszori ismétléssel végeztem el a méréseket. Megmértem a piknométer súlyát petróleummal feltöltve és

a petróleumba helyezett szemcsékkel is. A kiszorított petróleum tömegének és

sűrűségének ismeretében meghatároztam a műtrágyaszemcsék térfogatát, majd a szemcsék tömegét ismerve kiszámítottam azok átlagos sűrűségét.

A légpiknométeres módszer segítségével is meghatároztam a műtrágyák sűrűségét. Mivel ez saját fejlesztésű eszköz, a műszer részletes leírása a 3.4.1. pont alatt található meg. A légpiknométer 337 cm^3 űrtartalmú mérőedénye lehetővé teszi viszonylag nagy mennyiségű minták vizsgálatát. A mérőedényt minden műtrágyatípus esetében körülbelül felég-kétharmadáig töltöttem meg szemcsékkel, így a bemért tömeg 150 - 200 g között változott, majd a berendezés segítségével meghatároztam a minták térfogatát. A méréseket műtrágya típusonként háromszori mintavételezéssel végeztem el. A térfogatmérés előtt 0.01 g mérési pontosságú mérlegen mértem meg a minták tömegét és ebből kiszámítottam a műtrágya sűrűségét.

Harmadik sűrűségmérő módszerként a légpiknométerrel már megmért mintákat petróleummal feltöltött 500 cm^3 űrtartalmú mérőhengerbe öntöttem. A szemcsék által kiszorított petróleum térfogata a mérőhenger skálájáról leolvasható volt, így az ismert térfogat és tömeg alapján a sűrűség számítható. (A mérési eredményeket lásd: 70. old.)

3.3.5. Csúsztatási jellemzők vizsgálata

A csúsztatási vizsgálatokat a Géptani Tanszéken folyó egyéb kutatások indokolják, amelyeknek célja a szemcsék lapáton való mozgásának leírása. A jelen munka szempontjából azért hasznosak a csúsztatási adatok, mert támpontot adhatnak a tárcsáról távozó részecskék kinematikai tulajdonságait illetően. A műtrágyaszemcsék csúsztatási jellemzőinek meghatározását a tanszékünkön fejlesztett súrlódásmérő készülékkel (Csizmazia et al., 2001) végeztem, amely csúsztatókészülékkel és körforgó csúsztatókészülékkel egyaránt felszerelhető.

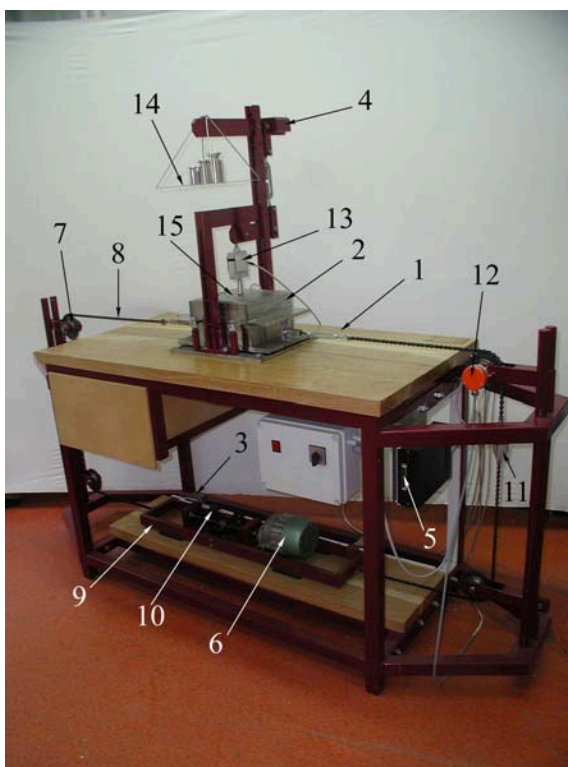
3.3.5.1. Csúsztatókészülék

A készülék rendeltetése:

1. Adott normális erővel terhelt halmaz saját anyagán történő vízszintes irányú elcsúsztatásához szükséges erő meghatározása laboratóriumi körülmények között számítógépes adatgyűjtés alkalmazásával.
2. Egy megadott felületen elcsúszó anyaghalmoz esetén az átlagos súrlódó erő mérése különböző terhelés mellett, számítógépes adatgyűjtéssel.

A készülék bemutatása

A **3.3. ábrán** a csúsztatódobozzal felszerelt berendezés látható, melynek fő egységei a mérőasztal (1), a csúsztatódoboz (2), a vontató berendezés (3), a terhelő szerkezet (4) és a mérő- és adatgyűjtő egység (5). A mérőasztal zárt szelvényből készült, merev vázra épült, amely az összes egységet hordozza. A csúsztatódoboz két darab 200 x 200 mm keresztmetszetű 60 mm belső magasságú keretből áll, amelyek között a rés csavarokkal beállítható. A mérés során 2 db. edzett és csiszolt prizmapályán, golyóson mozgó és így csekély ellenállású alsó keret mozdul el. A vonó keretet egy 220V/50Hz-es egyfázisú motor (6) mozgatja, irányváltó kapcsolók segítségével oda-vissza.



3.3. ábra. Súrlódásvizsgáló készülék a nyíródobozzal

A vonó keret és a csúsztatódoboz között két lánckeréken (7) és két kötélkeréken vezetett hevederes lánc (8) és drótkötél biztosítja a kapcsolatot (zárt hurok). A hajtómotor a vonó keretet (9) két helyen csapágyazott csavarorsó-anya kapcsolaton (10) keresztül mozgatja. A vonólánc függőleges húzó ágába van beépítve a vonóerőt mérő cella (11). Az elmozdulás és ezzel együtt a vontatási sebesség mérésére egy fordulatonként 2000 jelet adó inkrementális forgó jeladó (12) szolgál ($2\pi/2000$ radián szögű bármely irányú elfordulás esetén ad egy impulzust). Ez az érzékelő a húzó oldalon lévő lánckerék csapágyazott tengelyéhez kapcsolódik. A

csúsztatódoboz fedeléhez csatlakozik az 1000 N méréshatárú erőmérő cella (13). A terhelés karrendszeren keresztül, serpenyőre (14) helyezhető súlyokkal történik 25 szörös áttétellel, így az alkalmazható legnagyobb terhelés 4 kg tömegű terhelő súllyal elérhető. Ahhoz, hogy a mérés során a valóságos terhelést kapjuk, a mérőcella által mért erő értékéhez hozzá kell adni a mérőcella, a fedőlap (15) és a csúszó felület feletti anyag tömegéből számított erőt is.

A mérő-és adatgyűjtő rendszer a két erőmérő cella és az út jeladó által továbbított adatokat gyűjti és dolgozza fel. Az adatokat egy többcélú számítógépes adtagyűjtő kártya két analóg és egy impulzusszámláló bemeneten fogadja. A mérőkártya típusa Advantech PCL 818HG. Az elektromos csatlakoztatásra egy PCL 8115 típusú kártya szolgál, amely a mérőasztalhoz szerelt dobozban található. A számítógéppel szemben támasztott minimális követelményeket a berendezéshez használt VisiDAQ szoftver határozza meg: IBM kompatibilis PC, 66 MHz órajelű 486 típusú processzorral.

A berendezés fontosabb műszaki adatai:

Elektromos feszültség: 220 V/50 Hz

A motor teljesítménye: 0.4 kW

A motor fordulatszáma: 275 f/perc

A legnagyobb vonóerő: 1000 N

A vonókeret legnagyobb elmozdulása: 220 mm

A fedőlap tömege (a terhelő golyóval): 2260 g

Névleges vontatási sebesség: 4.58 mm/s

A vonóorsó menetemelkedése: 1 mm

Az erőmérő cellák adatai:

Típus: 8961

Terhelhetőség: 1000 N

Sorozatszámok: 0001206 (nyomott oldalú beépítés)

0001205 (húzott oldalú beépítés)

Pontossági osztály: 0.05

A mérési összeállítás

A VisiDAQ adatgyűjtő és ellenőrző fejlesztő rendszerrel készített rutin indításával adja a másodpercben eltelt időt. Az inkrementális útjeladó által adott impulzusok, a függőleges erőt mérő cella, valamint a vonóerőt mérő cella által adott elektromos feszültség értékek mint kimenő jelek egy gyűjtő egységre kerülnek, amely 31 jel/sec gyakorisággal a kívánt nevű fájlba írja a mért értékeket.

3.3.5.2. Körforgó csúsztatókészülék

A csúsztatódoboz eltávolítása után, annak helyére rögzíthető fel a körforgó csúsztatókészülék (3.4. ábra), mely a szemcsés anyagok belső súrlódásának vizsgálatára alkalmazható. Míg a csúsztatódoboznál a nyírt felület fokozatosan csökken a csúsztatási folyamat alatt, a körforgó készüléknél állandó marad a mérés során. A jó összehasonlíthatóság érdekében a csúsztatódoboznál a csúsztatott felület feletti réteg és a körforgó csúsztatókészüléknél a csúsztatott anyag rétegvastagsága megegyezik. A csúsztatási felület 0.04 m^2 , az anyag rétegvastagsága mindkét esetben 60 mm.



3.4. ábra Körforgó csúsztató készülék

A körforgó csúsztatóberendezés két 247 mm belső átmérőjű gyűrűből áll, amelyek közül a felső álló terhelhető, az alsó elfordítható. A gyűrűk agyrésze 100 mm átmérőjű. A gyűrűket 120° -ban elhelyezett elválasztó lapok három rekeszre bontják. A gyűrűk belső magassága 60-60 mm. Az álló és forgó gyűrű közötti rés csavarokkal szabályozható. A vizsgált anyagra a rekeszekhez igazodó méretű és alakú fedőlapokkal és háromlábú golyós támasszal vihető át a terhelés. A terhelés módja és minden további funkció a csúsztatódobozzal megegyező.

A méréssorozat megkezdése előtt a mérőcellák és az útjeladó hitelesítése is megtörtént. A mérésekhez használt erőmérő cellák rendkívül stabilak, és a terhelés függvényében lineáris feszültség választ adnak ($R^2 > 0.999$). A kalibrációs egyenes meredeksége 4 év alatt mindössze 1.3 %-ot változott

3.3.5.3. Műtrágyahalmaz csúsztatása sík lemezeken

A műtrágyaszemcsék különböző felületeken történő súrlódásának vizsgálatát a leírt csúsztatókészülékkel végeztem. Vizsgálataimhoz a gépgyártásban leggyakrabban alkalmazott és más ipari anyagok közül 10 felületet választottam (3.5. ábra).



3.5. ábra A vizsgált felületek

A vizsgált felületek:

1. rozsdamentes acél
2. hidegen hengerelt finomlemez (fekete acél)
3. horganyzott acéllemez
4. teflon bevonatú acéllemez
5. alumínium
6. bakelit
7. PVC
8. plexi
9. üveg
10. rétegelt fa

A csúsztatódoboz alsó részére elhelyezett 300 x 220 mm méretű súrlódó felületek helyzetét illesztő furatok határozzák meg, melyek egyben a mérés közbeni elmozdulásukat is megakadályozzák. A csúsztatási vizsgálat alatt az alsó csúsztatódobozt pontos méretre készített fa betét tölti ki, mely egyben a súrlódó felület deformáció nélküli alátámasztását is biztosítja. A mérések megkezdése előtt a csúsztatódoboz felső és alsó része között 0.5 mm-es rést állítottam be. Az elmozdulás mindig azonos 50 mm volt, amit a beállított végálláskapcsolók garantáltak. A terhelési mérések előtt mindig meghatároztam az üresjáratú vonóerőt. Ezután a felső keretet megtöltöttem annyi műtrágyával, hogy a fedél a kerettel szintbe kerüljön. Így műtrágyánként más volt a bemért mennyiség: NPK 15-15-15 esetében 2.2 kg, linzisóból és kálisóból 2.0 kg, ammóniumnitrátból 1.8 kg és karbamidból 1.5 kg. Mérés közben a különböző felületű lemezek a csúsztatódoboz alsó részével együtt csúsztak el a műtrágya réteg alatt. Minden felület esetében 6 fokozatban változtattam a terhelő tömeget: 100 g, 200 g, 500 g, 1000 g, 1500 g és 2000 g. A 25 szörös karáttételt figyelembe véve a terhelési fokozatok: 24.5 N, 49 N, 122.6 N, 245.2 N, 490.5 N, 735.7 N. A felületeket az alkalmazott terheléseken kívül a felső keretben elhelyezett műtrágya tömegéből (14.7 N – 21.6 N), a fedőlap tömegéből (22.2 N) és az erőmérő cella tömegéből (3.6 N) adódó erő terhelte.

3.3.5.4. Belső súrlódás meghatározása

A csúsztatódobozzal mért belső súrlódási jellemzők alapján Polyák és Csizmazia (Polyák & Csizmazia, 2003) megállapították, hogy a súrlódási tényező értékei az elmozdulás során változnak és a kezdeti rész után, az állandónak várt szakaszban

csökkennek. Ugyanis a csúsztatódoboz használata esetén a csúsztatott anyag felülete állandóan változik és a műtrágya az elmozdulás során egyre növekvő mértékben csúszik fém felületen. Így a csúsztatódobozos belső súrlódás mérése esetén nem a vizsgált anyag tényleges belső súrlódását méri, hanem részben az anyag-anyagon történő súrlódását, részben a csúsztatódoboz fém felületén csúszó anyag súrlódását. Ezért dolgozatomban a belső súrlódás meghatározására a körforgó csúsztatókészüléket és a rézsűszögmérő berendezést alkalmaztam.

A körforgó csúsztatókészüléknél a mérések megkezdése előtt a felső és alsó gyűrűk közötti rést 0.5 mm-re állítottam be. Végálláskapcsolók segítségével a vonólánc elmozdulását oda-vissza irányban 125 mm-re határoltam, ami az alsó gyűrű 54°-os elfordulását eredményezte. A mérést minden műtrágya esetében az üresjáratú erő meghatározásával kezdtem, melyhez az alsó gyűrűt a csúsztatási síkig töltöttem fel műtrágyával. A terheléses mérésekhez a felső gyűrűt is föltöltöttem műtrágyával (típusonként változó mennyiséggel 1350 g – 1950 g). A terhelést most is 6 fokozatban változtattam. A csúsztatási síkban ható normális irányú erő a felső gyűrűben elhelyezett műtrágya tömegéből, a három darab fedőlap szegmens és golyók tömegéből (13.8 N), a 3 lábú golyóstámasz tömegéből (8.3 N), és a cella tömegéből (4.6 N) összegződik.

Rézsűszög meghatározása



3.6. ábra Rézsűszögmérő készülék

A műtrágya halmazok természetes rézsűszögét (α) 300x300 mm keresztmetszetű, 400 mm magasságú mérődobozzal (**3.6. ábra**) határoztam meg, amelynek homlokfala 100 mm magasság kivételével eltávolítható. A dobozt a vizsgált műtrágyával feltöltöttem, majd a homlokfalat hirtelen, de rázkódásmentesen távolítottam el. A dinamikus rézsűszögből a belső súrlódási együttható a $\mu = \operatorname{tg} \alpha = a/b$ összefüggéssel számítható, ahol (a) a dobozban a kifolyónyílás felett mérhető műtrágyaszint, (b = 300 mm) a doboz kifolyónyílásra merőleges mérete. Az

eredményeket háromszori ismétlés átlagaként állapítottam meg. Meg kell jegyezni, hogy a szabad részünek és az itt bemutatott készülékkel mért suvadásnak a szöge nem feltétlenül azonos. (A mérési eredmények a 69. oldalon találhatók.)

3.3.6. Szemcsénként mért fizikai jellemzők meghatározása

3.3.6.1. Műtrágyaszemcsék mérete, tömege

A szemcsék méretének és tömegének meghatározásához műtrágya típusonként, véletlenszerű mintavételezéssel 250 elemszámú mintákat választottam. A szemcse geometriai jellemzéséhez a legnagyobb méretét és az arra merőleges két tengely mentén mért értékeket (legnagyobb d_1 , közepes d_2 és legkisebb d_3) mértem meg. A méreteket digitális tolómérővel határoztam meg, ami 0.01 mm pontosságot biztosít. A szemcsénkénti tömegméréshez Explorer típusú analitikai mérleget használtam, amely 0.1 mg mérési pontosságú.

3.3.6.2. Gömbalakúság

Meghatározása a geometriai középátmérő és a legnagyobb átmérő aránya alapján történt (Sitkei, 1981) szerint: $g_a = (d_1 d_2 d_3)^{1/3} / d_1$, ahol d_1 a legnagyobb méret, d_2 és d_3 a rá merőleges két méret. Szabályos gömb esetében ez az érték egységnyi.

3.3.6.3. Szemcsénkénti sűrűség

A szemcsénkénti sűrűség $\rho_{sz\ i}$ közelítő értékeit azzal a feltételezéssel számolom, hogy a szemcsék hasonlóak, és térfogatuk a három merőleges méretük szorzatával arányos. (Ez gömb és téglatest esetén természetesen igaz.) A közelítéshez a szemcse „befoglaló hasábok” térfogatából a szemcsék tömegének ismeretében először szemcsénként meghatározom a „virtuális” sűrűségeket (ρ_{vi}), majd a teljes mintára vonatkozó össztömeg / össz-hasábtérfogat hányadosából adódó $\rho_v(átl)$ átlagos „virtuális” sűrűséget. Ez nyilván kisebb lesz a műtrágya tényleges sűrűségénél. Ezért ha a tényleges ρ_s sűrűség és az előbbi módon számolt átlag hányadosával szorzom a korábbi, szemcsénkénti értékeket, akkor megkapom az új, $\rho_{sz\ i}$ korrigált szemcse sűrűségeket, összhangban az ömlesztett műtrágya tényleges ρ_s sűrűségével.

$$\rho_{vi} = m_i / (d_1 d_2 d_3)_i; \quad \rho_v (\text{átl}) = \sum m_i / \sum (d_1 d_2 d_3)_i; \quad \rho_{sz i} = \rho_{vi} \rho_s / \rho_v (\text{átl})$$

Így a műtrágya szemcsék sűrűség eloszlására statisztikus jellemzést kaphatunk. A szemcsénkénti sűrűségmérés és annak statisztikai értékelése támpontot adhat a gyártási technológia ellenőrzéséhez, így az összetétel változására összetett műtrágyáknál vagy a légzárványok képződésére.

3.3.7. Aerodinamikai jellemzők

A szemcsénkénti aerodinamikai ellenállási tényező megállapítására függőleges légcsatornát és folyadékos ejtőcsövet használtam.

3.3.7.1. A függőleges légcsatorna műszaki leírása

A Csizmazia és munkatársai (Csizmazia et al., 2000) által konstruált mérőberendezés a **3.7. ábrán** látható. A levegő a berendezés alján lép be a változtatható fordulatszámú ventilátorba. A ventilátorból a közeg egyenletesítő kamrába jut, amelyben egyenirányító rácsok és sziták helyezkednek el. A kamrából egy negyed kör alkotójú konfúzoron keresztül áramlik a levegő a sebesség mérő csőszakaszba. A mérőszakasz és az egyenletesítő kamra csőkivezetései ferdecsőví manométer kapcsolását teszik lehetővé.



3.7. ábra. Függőleges légcsatorna

A ferdecsőví manométerrel megbízható módon mérhető a dinamikus nyomás, amelynek ismeretében a függőleges mérőcső belépő keresztmetszetében számolható az átlagsebesség. A mérőszakaszban az áramló levegő sebessége más módon is meghatározható. A berendezés tartozéka egy hógömbös áramlási sebességmérő, amely az áramlási sebesség mellett az áramló közeg hőmérsékletét is méri. A hógömbbel történő sebességmérésre a mérőszakasz mentén négy furat található, amelyen keresztül a mérőszonda a cső keresztmetszetének különböző pontjaiba helyezhető.

A mérőcső 400 mm hosszú mérőszakaszán számításokkal meghatározott keresztmetszetű, számú és eloszlású furat található a levegő egy részének kibocsátására, azért hogy a csőben a légsebesség az adott csőszakaszon közel lineárisan kb. 20 %-kal csökkenjen. A perforáció miatt a határrétegből kiengedett levegő a turbulenciát is csökkenti. A berendezés tartozéka egy perforáció nélküli mérőcső, amellyel szemcsehalmozok kritikus légsebesség szerinti szétválasztása lehetséges. A mérőcsőből a szemcsék ütközéses leválasztóba kerülnek. Az ütközéses leválasztó áramlási ellenállása az ütközőlap helyzetének függvényében változik, amely szabályzó csavarral állítható. A ventilátor fordulatszám szabályozása egy meghatározott feszültség lépcsőket előállító kapcsolóval és az ezzel sorba kötött fokozatmentes tirisztoros szabályozóval történik. A két nagyobb feszültség fokozattal és a fokozatmentes szabályozóval 5-15 m/s légsebesség tartomány biztosítható.

A szemcseleválasztó ellenállása

Az ütközőlap állításával egyszerűen növelhető a leválasztó ellenállása, és ezzel a magányos szemcse mérésénél a mérési szakaszban a sebesség csökkenés mértéke. Erre akkor lehet szükség, ha egy adott szemcse süllyedési sebessége a szemcse relatív megfúvási sebességhez képesti helyzetétől függően nagyobb mértékben változik, mint a jelenleg beállított kb. 20%.

A légsebesség eloszlása a mérési keresztmetszetben

A sebességeloszlás egyenletessége a mérési pontosság alapja. Mérésekkel megállapították, hogy az egyenirányító működése megfelelő: a mérőcsőből kilépő közeg sebességének iránya párhuzamos a mérőcső tengelyével. Különböző sebességeknél, a mérőcső alján elhelyezkedő szitával és anélkül mérték az áramlási sebesség keresztmetszet menti változását. Kiderült, hogy a sebesség kielégítően egyenletes, a fal mellett elkerülhetetlenül létrejövő határréteg vastagsága 2-3 mm. A függőleges irányú sebességgradienst a levegő egy részének a perforált mérőszakaszon történő távozása biztosítja. Így a légsebesség a mérőcső tengelye mentén fölfelé közel lineárisan csökken, ami a lebegtetési kísérletekhez kedvező.

A hőgömbös anemométer kalibrálása

A kalibrálás forgóállvány és szélcsatorna segítségével történt. A mérőműszeren leolvasott v_{le} [m/s] és a valóságos v_{val} [m/s] között a mérési pontokra lineáris regresszióval az 1-22 m/s sebességtartományban az alábbi összefüggés érvényes:

$$v_{val} = 1.172 \cdot v_{le}$$

3.3.7.2. Függőleges légcsatorna alkalmazása szemcsénkénti vizsgálatra

A függőleges légcsatornát szemcsénkénti vizsgálatra alkalmaztam. Mind az öt műtrágyatípusból azt a 250 darabszámú mintát használtam, amelynek már előzőleg egyenként megmértem a méreteit és a tömegét. A vizsgálatokhoz perforált falú mérőcsövet szereltem be a légcsatornába. Az áramló levegő sebességmérését hőgömbbel határoztam meg, amely a mérés alatt a mérőszakasz középső részén volt elhelyezve. A mérőcső alján lévő szita megakadályozta a szemcsék beesését az egyenletesítő kamrába. Az állandó sebességgel felfelé áramló közegben süllyedő szemcse esetén a szemcse elfordulása, helyzetének megváltozása azt eredményezheti, hogy a szemcse lehull, vagy az áramló levegő magával ragadja. A szitára esett szemcse az áramló levegő sebességének fokozatos növelésével fölfelé emelkedik. A felfelé áramló közeg sebességét addig kell változtatni, amíg a szemcsék lebegni kezdenek. Megfelelő mérési tapasztalatot szerezve úgy próbáltam a fölfelé áramló levegő sebeségét beállítani, hogy a perforált cső egyik felső furatán az áramlásba bedobott szemcse csak kis mértékben süllyedjen, és lehetőleg ne essen le a szitára. Majd a levegő sebességét finoman növelve leolvastam a hőgömbös sebességmérő digitális kijelzőjéről azt az értéket, amikor a szemcse a perforált mérőcső középső kijelölt szakaszában lebegni kezd. A légellenállási és az alakí tényező számítását és a mért értékeket a 4. fejezetben adom meg. A szemcsénkénti aerodinamikai ellenállási tényező megállapítására saját fejlesztésű folyadékos ejtőcsövet is használtam (lásd 3.4.2. fejezet).

3.4. Saját fejlesztésű mérőberendezések és módszerek

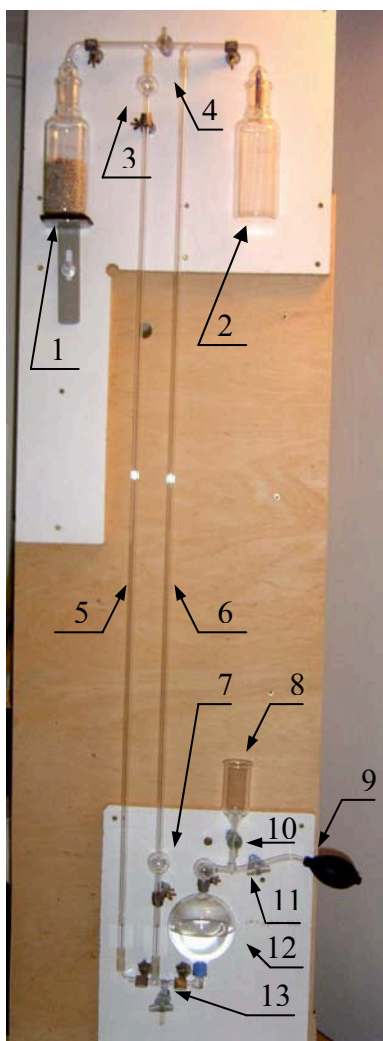
Egyszerű üvegeszközöket fejlesztettem mezőgazdasági szemcsék (műtrágya, magvak) térfogatának és légellenállásának mérésére. A Mester-Sitkei féle légpiknométer

módosított, egyszerűen kezelhető változata $150\text{--}200\text{ cm}^3$ ömlesztett anyag valódi térfogatának mérését teszi lehetővé. Segítségével a levegő által átjárható zárványok és a szemcsék közti térfogatot nem mérjük, így a tömeg mérésével a valódi anyagsűrűséget lehet meghatározni. A szemcsék légellenállási tényezőinek közvetett meghatározására egy új, petróleummal töltött rövid ejtőcsövet fejlesztettem, amelyben a süllyedési sebességek stopperrel vagy digitális gyorsfényképezéssel értékelhetők.

3.4. 1. Légpiknométer fejlesztése és alkalmazása a műtrágyák sűrűségmérésére

A műtrágyák térfogatméréséhez Sitkei-Mester típusú (Sitkei, 1981) légpiknométert konstruáltam, amely a bevezetett új kiértékelési módszer miatt egyszerűbben használható mint az eredeti változat. A műszer segítségével a legtöbb szemcsés anyag valódi térfogata meghatározható, hiszen a levegő be tud hatolni a zárványokba. Ezt követően a műtrágya halmaz tömegének ismeretében a műtrágya valódi sűrűsége (ρ_s) meghatározható. Műtrágyaszemcsék vizsgálatára a légpiknométer előnyösebb mint a folyadékos, mert az utóbbiban oldódás is bekövetkezhet. A szemcséket alkalmas, vékony filmbevonattal (méhviasz) elvileg elzárhatjuk a levegő behatolásától, így a szemcsék ρ_g látszólagos sűrűsége is megállapítható. A repítési pályaszámításokhoz inkább a látszólagos sűrűséget kellene használni, ha ilyen adat rendelkezésre áll. Az ömlesztett anyag sűrűségéből és a másik két módon mért sűrűségekből meghatározhatók a műtrágyára jellemző porozitás értékek.

A szimmetrikus felépítésű száraz piknométer (3.8. ábra) részei a két azonos térfogatú mérőedény (1, 2), a két kamrát összekötő csőben elhelyezett szelep (4) és a hozzájuk kapcsolódó differenciál manométer. A műszer alsó részén található egy gömb alakú tartály a manométer működtetéséhez szükséges folyadék elhelyezésére (12), fölötté a feltöltő tölcsér (8) és a kézi szivattyú (9). Szükség van egy leeresztő szelepre (13), és a rendszer külső levegőtől történő elzárásához a feltöltő tölcsér alá (10), illetve a kézi szivattyúhoz elhelyezett szelepre (11). A mérőedények térfogata egyenként 337 cm^3 , a csővezetékek 5 mm belső átmérőjűek, a differenciál manométer szárain kialakított gömbök (3, 7) térfogata 9.8 cm^3 , a folyadékot tartó gömb $\sim 300\text{ cm}^3$ -es. (A differenciál manométer 1 m -nél hosszabb függőleges csövekből áll). A baloldali mérőedénybe (1) helyezendő a mérendő minta.



3.8. ábra Légpiknométer

A pontos mérésekhez elengedhetetlen a gáztömörség ellenőrzése. Túl kicsi ($<100 \text{ cm}^3$) vagy túl nagy ($>150 \text{ cm}^3$) mintatérfogat csökkentheti a pontosságot.

A mérés kezdetekor a manométer két függőleges szárában (5, 6) a folyadékoszlop azonos alsó szintről indul, atmoszférikus nyomáson. A csapok elzárása után a kézi szivattyúval növeljük a két mérőkamrában a levegő nyomását. A jobboldali kamrában a levegő nyomása eleinte nagyobb lesz, mivel abban az ágban az alsó gömb vízzel való feltöltődése jelentősen csökkenti a jobb térfél térfogatát. A nyomáskülönbséget jelzi a két vízoszlop magasságkülönbsége. További víz beadagolása esetén a manométer két szárában a nyomás kiegyenlítődhet – ekkor azonos vízoszlop magasságot kapunk - mert érvényesül a szemcsék által elfoglalt térfogat hatása. Még tovább növelve a beadott víz térfogatát, a jobb oldalon is lehet magasabb a vízoszlop, azaz lehet kisebb a nyomás. Számításaim szerint a piknométer esetén nem szükséges a folyadékszintek azonos szintre hozása a pumpálás során, mert az elvégzett kalibrálás tetszőleges manométer állás esetén

is pontos térfogatomérést tesz lehetővé. Ez a fejlesztés megkönnyíti a légpiknométer használatát a korábbi eljárásokhoz képest. A kalibrálás korrigál a nem pontosan ismert holtterefogatok (manométer és összekötő részek) által okozott hibára. A számítások alapja a *Boyle–Mariotte* gáztörvény: $pV=\text{állandó}$, mely szerint az ideális gáz térfogatának és nyomásának szorzata zárt gáztömeg és változatlan hőmérséklet mellett állandó.

$$(V_h + V_g - V_m)p_o = (V_h + V_g - V_m - \Delta V_b)p_b \quad (3.1)$$

$$(V_h + V_g)p_o = (V_h - \Delta V_j)p_j \quad (3.2)$$

$$p_j - p_b = \Delta p \quad (3.3)$$

ahol: V_h : a hengeres mérőedény térfogata

- V_g : a manométer mindkét szárán található kis gömbök térfogata
 V_m : a meghatározni kívánt műtrágya térfogat
 ΔV_b : a bal térfélben lévő levegő térfogatváltozása
 ΔV_j : a jobb térfélben lévő levegő térfogatváltozása
 p_o : légköri nyomás
 p_j : a levegő nyomása a jobboldali térben
 p_b : a levegő nyomása a baloldali térben
 Δp : a levegő nyomáskülönbsége a manométer bal és a jobb oldala között

A fentiekből származtattam a meghatározni kívánt V_m műtrágya térfogatot.

$$V_m = \frac{(V_h - \Delta V_j) \left[p_o (V_h + V_g) + \Delta p (V_h + V_g - \Delta V_b) \right] - p_o (V_h + V_g) (V_h + V_g - \Delta V_b)}{(V_h - \Delta V_j) (p_o + \Delta p) - p_o (V_h + V_g)} \quad (3.4)$$

A légpiknométer hitelesítéséhez ismert térfogatú vízmennyiségeket töltöttem a baloldali mérőhengerbe. Leolvastam a differenciál manométeren a vízoszlop magasságát a bal és jobb oldalon, majd háromszori ismétlés után egy Matlab program segítségével meghatároztam a 4. egyenlet alapján számított térfogatokat. A hitelesítési pontokra a legkisebb négyzetek módszerével egyenest illesztettem, amelynek egyenletére az alábbi összefüggés adódott:

$$V_{\text{tényleges}} = 1.62 + 1.0705 V_m$$

A műszer hitelesítése után a méréseket öt különböző típusú műtrágyára (NPK 15-15-15, linziszó, karbamid, ammóniun-nitrát, kálisó) négyszer ismételve végeztem el. A légpiknométer segítségével meghatározott sűrűség (ρ_{lp}) értékek ellenőrzésére ugyanazon mintákon a folyadékkiszorítás módszerét is alkalmaztam, azaz a mintát egy petróleummal töltött mérőhengerbe töltve leolvastam a térfogatnövekedést. A kapott értékek általában jól egyeztek, ami arra utal, hogy a petróleum is behatol az esetleges légzárványokba. A mért sűrűség adatok a 70. oldalon a 4.3 táblázatban szerepelnek. A légpiknométeres és a petróleum kiszorításos módszerrel azonos mintán mért sűrűség értékek között a legnagyobb eltérést a linziszó esetén kaptam (7%), míg a többinél 4%-nál kisebb az eltérés. Az utóbbi különbségek a két módszer együttes hibásávjába esnek, a linziszónál pedig előfordulhat hogy a petróleum nem ér el olyan zárványokat amelyekbe a levegő behatolhat.

3.4. 2. Folyadékos ejtőcső fejlesztése légellenállási tényező mérésére

A közelmúltban egy 15.8 m magas, levegős zárt ejtőcsővel végeztek aerodinamikai méréseket műtrágyaszemcséken (Grift „et al”, 1997). Ennél a módszernél a robusztos ejtőcső telepítése nehéz feladat, és a hosszú úton jelentősen változó sebesség miatt a változó Reynolds számot is figyelembe kell venni. A Grift-módszert gömb alakú műanyag szemcsékkel ellenőrizve a kísérleti és az elméleti eredmények - a kicsi és könnyű szemcsék kivételével - igen jól egyeztek. A módszer azonban a telepítés nehézsége miatt a szerzők szerint sem alkalmas rutinszerű megvalósításra. Ellenben a Grift által bevezetett mozgás elemzést tovább fejlesztettem egy folyadékkal feltöltött ejtőcső ejtési kísérleteinek elemzésére. A légellenállás méréséhez a vízzel feltöltött ejtőcső szellemes ötletét 2003-ban közölték (Aphale „et al”, 2003). Ennek egyik előnye az, hogy a szemcsék hatásosan fékeződnek és alig néhány cm-es távolság megtétele után eléri végsebességüket, s így egy 1-1.5 m magas, labor asztalon elhelyezhető ejtőcső is használható. Ugyanakkor a részecskék végsebessége is jelentősen kisebb (néhány tized m/s), ezért nincs szükség speciális elektronikára a pontos esési idő méréshez. Aphale szerint a végsebesség a megtett útból és kézi stopperrel mérhető időből jó közelítéssel meghatározható. Az általam továbbfejlesztett változatban a stopperes mérést a mozgásegyenlet egzakt megoldásával is kiértékeltem, illetve a végsebességet digitális fényképezéssel is meghatároztam.

3.4.2.1 Az ejtőcső és a mérések kísérleti megvalósítása

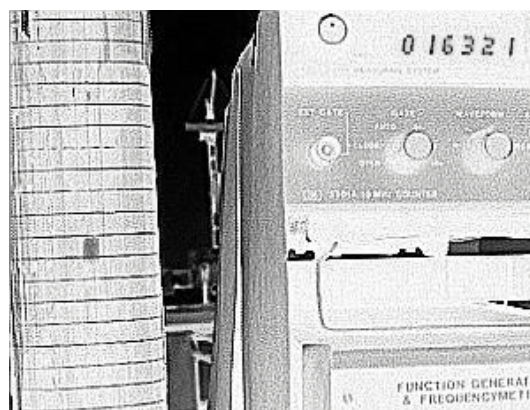
Az általam tervezett ejtőcső (**3.9.a ábra**) egy 1.4 m magas 60 mm belső átmérőjű átlátszó üvegcső, felül és alul állandó skálabeosztással. Fönt egy 6 mm-es koncentrikus bevezető nyílással ellátott zárósapka található, amelynek segítségével középen lehet beejteni a szemcséket a folyadékoszlopba. A cső alján egy kivehető, üveg szűrőt helyeztem el, így a vizsgált szemcsék a folyadék leengedése nélkül eltávolíthatóak a berendezésből. A folyadék leengedése az ejtőcső alján lévő leeresztő csapon lehetséges. Mérőfolyadékként petróleumot használtam, aminek az az előnye, hogy a kémiaiilag só összetételű műtrágyák kevésbé oldódnak benne mint a vízben, illetve kisebb sűrűsége miatt a könnyebb szemcsék is vizsgálhatók.

A méréseket ötféle műtrágyával végeztem, típusonként 15-20 szemcsét vizsgáltam és két módszerrel mértem a légellenállási tényezőket. Először a szemcsék három egymásra

merőleges méretét és tömegét határoztam meg, majd egyenként a függőleges légcsatorna áramló levegőjébe helyezve megállapítottam a lebegtetési sebességeket. Ezek után ugyanazon műtrágyaszemcséket egyenként ejtettem a folyadékos ejtőcsőbe a zárósapkán keresztül, és stopperrel mértem azt az időt, amely alatt a felső és az alsó jel közötti távolságot (1.353 m) megtették. Ezzel egyidejűleg a szemcse mozgásáról az ejtőcső középső szakaszán - ahol már beállt az állandó süllyedési sebesség - digitális fényképezőgéppel sorozatfelvétel is készült; 16 képkocka mintegy 650 ms alatt. Az ejtőcső ezen szakaszán fekete háttérű skála biztosítja, hogy az előtte elhaladó szemcsék jól láthatóak legyenek a felvételeken (**3.9.b ábra**, negatív kép). Az ejtőcső mellé egy jeladóból és egy számlálóból álló egységet is



3.9.a ábra Folyadékos ejtőcső



3.9.b ábra Süllyedő műtrágyaszemcse a folyadékos ejtőcső középső szakaszán (bal oldal), jeladó és számláló (jobb oldal)

elhelyeztem, amely az idő pontos mérésére szolgál. A jeladó 20 Hz frekvenciájú, 0.1 Hz pontosságú, amely impulzusaival 50 ms-onként eggyel lépteti a számlálót. A felvételek alapján ± 2 mm pontossággal meghatározható a szemcsék által megtett mintegy 20 cm-es út (± 1 %-os hiba) és a hozzá tartozó idő. A 16 képkocka felvétele során a számláló átlagosan tizenkettőt ugrik, így a leolvasási pontosság hibája mintegy ± 4 %. A digitális fényképezőgépes és a stopperes átlagsebesség mérés mellett az utóbbi adataiból – a mozgásegyenlet megoldásával - a légellenállást közvetlenül is meghatároztam; így a

három, új módon meghatározott légellenállást össze tudtam hasonlítani a hagyományos légcsatornás mérés eredményeivel.

3.4.2.2. A folyadékös ejtőcsővel mért adatok értékelési módszere

A petróleummal töltött ejtőcsőben a süllyedő részecskére a súlyerő, a felhajtóerő és a változó közegeellenállási erő hat. A mozgásegyenlet Newton II. törvénye szerint az alábbi formában írható fel:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + C_D A \frac{1}{2} \rho_p \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = mg \frac{\rho_m - \rho_p}{\rho_m} \quad (3.5)$$

$$K_p = \frac{1}{2} \frac{C_D A \rho_p}{m} \quad (3.6)$$

A 3.6 kifejezést behelyettesítve a 3.5 egyenletbe, kapjuk:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + K_p \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = g \frac{\rho_m - \rho_p}{\rho_m} \quad (3.7)$$

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 válaszott közegben (petróleumban) a vitorlahatási tényező [m⁻¹]

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

$$y(t) = \frac{1}{K_p} \left\{ \ln \left[\cosh \left((t - C_1) \sqrt{g K_p \frac{\rho_m - \rho_p}{\rho_m}} \right) \right] \right\} + C_2 \quad (3.8)$$

a kezdeti feltételek:

a szemcse 0 magasságból, 0 sebességgel indul, tehát

$$y(0)=0 \quad \text{és} \quad \frac{dy}{dt} = 0$$

$$\text{ekkor } C_1=0 \quad \text{és} \quad C_2=0$$

Az 3.8. egyenlet segítségével könnyen modellezhetők a petróleumos illetve levegős ejtőcsöves kísérletek, és becsléseket tehetünk ismert légellenállású szemcsék viselkedésére. A mért idő (t) és a megtett távolság $y(t) = dH$ ismeretében az 3.8 egyenlet K_p -ra numerikusan megoldható a $dH-y(t) = 0$ formában, a Matlab program „fzero” beépített programjával. K_p ismeretében a k_l szokásosan használt légellenállási tényező [kg/m] az alábbiak szerint fejezhető ki (ρ_l : a levegő sűrűsége [kg/m³]):

$$K_l = K_p \frac{\rho_l}{\rho_p} \quad (3.9)$$

$$k_l = mK_p \frac{\rho_l}{\rho_p} \quad (3.10)$$

Ha a fényképes elemzéssel az állandósult sebességet mérjük - v_T = állandó - , akkor a részecske egyensúlyban van:

$$K_p v_T^2 + g \left(\frac{\rho_p}{\rho_m} - 1 \right) = 0 \quad (3.11)$$

$$K_p = \frac{g}{v_T^2} \left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_m} \right) \quad (3.12)$$

A 3.12 egyenletet behelyettesítve 3.9 -be kapjuk:

$$K_l = \frac{g}{v_T^2} \left(\frac{\rho_m}{\rho_p} - 1 \right) \frac{\rho_l}{\rho_m} \quad (3.13)$$

végül:

$$k_l = K_l m = \frac{mg}{v_T^2} \left(\frac{\rho_m}{\rho_p} - 1 \right) \frac{\rho_l}{\rho_m} \quad (3.14)$$

ez az eredmény természetesen egyezik az Aphale féle irodalmi összefüggéssel.

3.4.2.3 A folyadékos ejtőcsöves mérések elemzése

A mozgásegyenlet segítségével elméletileg is megbecsültem a levegős illetve a petróleumos ejtőcső közötti különbségeket. Egy „tipikus” műtrágyaszemcsére ($\rho_m =$

1700 kg/m³, $m = 5 \cdot 10^{-5}$ kg, $d = 4 \cdot 10^{-3}$ m, $k_l = 4 \cdot 10^{-6}$ kg/m) vonatkozó számításaim szerint a petróleumos ejtőcső (a petróleum sűrűsége $\rho_p = 793$ kg/m³, viszkozitása $\eta_p = 2.14 \cdot 10^{-3}$ Pa s) esetén a Reynolds szám már az első 0.1-0.2 cm megtétele után 50-nél magasabb értékű és 3-5 cm út megtétele után eléri a végső 4-500 körüli értéket, amikor az esési sebesség közel állandó. Ezek a becslések azért fontosak, mert a tapasztalat szerint (Lapple, 1951), ha a Reynolds szám 50 fölött van, akkor a légellenállás nem függ lényeges mértékben a Reynolds számtól. C_D változását elemezve a 22.1-2084 Reynolds szám (Re) tartományban, az alábbi összefüggés feltételezésével Grift (1997),

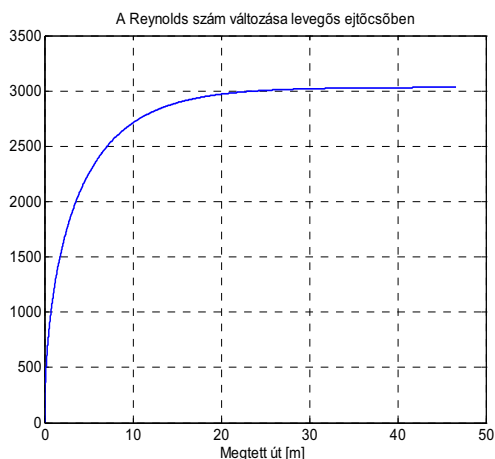
$$C_D = \frac{26.4}{Re} + \frac{4.87}{\sqrt{Re}} + 0.276 \quad \text{ahol: } Re = \frac{dv\rho_p}{\eta_p} \quad (3.15)$$

azt kapjuk, hogy C_D értéke a petróleumos ejtőcsőben az első 3 cm út megtétele után már 1%-nál kevesebbet változik, és a $C_D = 0.55$ értéken stabilizálódik. Az ejtőcső méretezéséhez a 3.7 egyenletből levezethető a 3.16 összefüggés, (Balássy Z. személyes közlése) amellyel meghatározható, hogy a folyadékban süllyedő test milyen s_n út megtétele után közelíti meg a v_T határsebességét adott pontossággal, v értékkel.

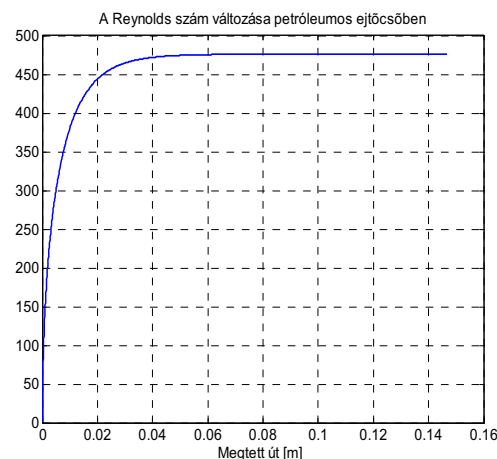
Ha $n = v / v_T = 0.99$, akkor a pontosság 1%-os, ekkor $n = 0.99$ értékkel számoltam.

$$s_n = 0.5/K_p \ln(1/(1-n^2)) \quad (3.16)$$

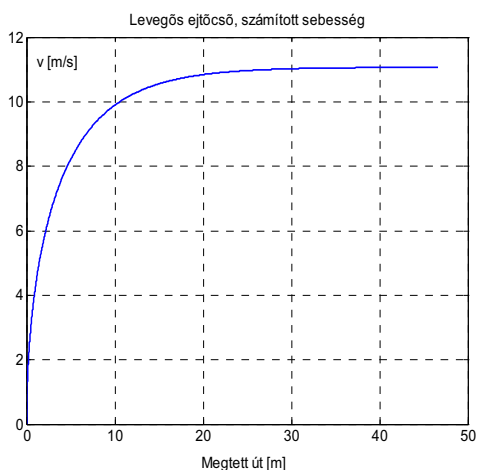
A 3.16 alapján nyert értékek teljes összhangban vannak a mozgásegyenlet megoldásából származó eredményekkel: karbamid esetén a határsebesség 1.7 cm süllyedés után 1% pontossággal közelíthető, míg a linzisorra 3.6 cm-nél érünk el ilyen pontosságot. A dolgozat 4.8 táblázatának átlagos adataiból kiindulva azt kaptam, hogy a határsebességet bármelyik műtrágya esetében 1% -nál jobb pontossággal érjük el 4 cm süllyedési távolságon belül és 0.1 % a pontosság 6 cm süllyedés után. Ezért a mérőcső aktív szakaszában mérhető sebesség gyakorlatilag megegyezik a határsebességgel. Az is kimutatható, hogy az a szemcse beejtését követő időtartam, amíg a $Re < 22.1$ alacsony értékű, 0.1% nagyságrendben van a teljes kísérlet idejéhez képest. Mindez eltér a levegős ejtőcsőtől, ahol a szemcse sebessége, a Reynolds szám és ebből következően a C_D értéke a szemcse 15 méternyi esése során folyamatosan változik (**3.10.-3.13. ábrák**). Ezért érthető, hogy a Grifték által leírt levegős ejtőcső esetén az eredmények kiértékelése bonyolultabb.



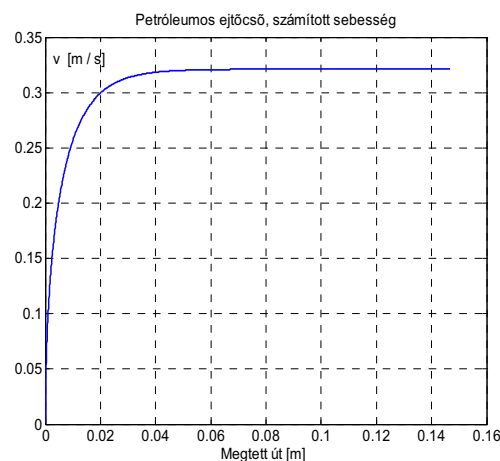
3.10. ábra A Reynolds szám értéke levegős ejtőcsőben



3.11. ábra A Reynolds szám értéke petróleumos ejtőcsőben



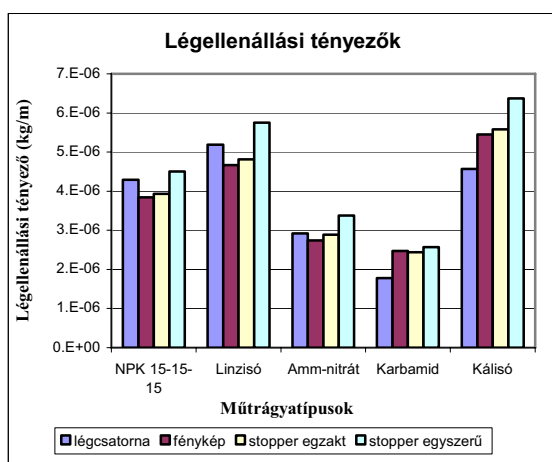
3.12. ábra A szemcse számított sebessége levegős ejtőcsőben az esési út függvényében



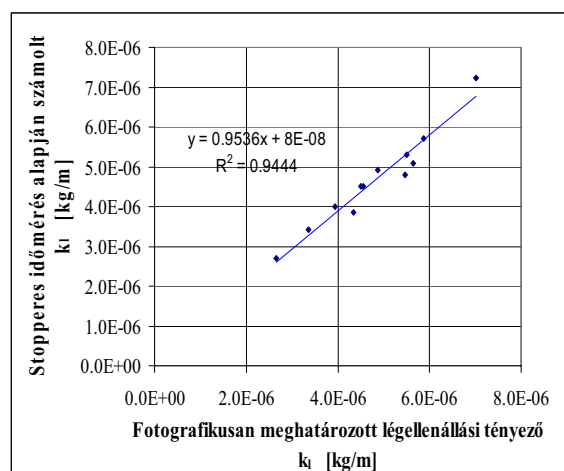
3.13. ábra A szemcse sebessége petróleumos ejtőcsőben az esési út függvényében

A kísérleteket az elméleti résznek megfelelően írt Matlab programokkal értékeltem ki. A műtrágyánként 15-20 szemcsén mért átlagos k_l légellenállási értékeket hasonlítja össze a **3.14. ábra**. Jól látható, hogy a fényképes és a pontos értékelésű (3.5. egyenlettel) stopperes mérések egyeznek a legjobban. A linzisó esetén szemcsénként is bemutatom a kétféle értékelést, **3.15. ábra**, amelyek jó egyezést mutatnak. A stopperes mérések közelítő értékelése (amely állandó sebességet feltételez a cső teljes hosszára) mindig nagyobb légellenállási értéket ad, hiszen az átlagsebességet alulbecsüli. Az elutriátoros eredmények pozitív és negatív irányban is eltérnek a legjobbnak vélt két módszertől. A jelen mintáktól különböző 250 szemcsés mintákon a légcsatornában

korábban mért légellenállási adatok a karbamid kivételével minden esetben magasabbak voltak, az NPK 15-15-15 esetén pl. kb. 40% -al. (A nagyobb eltérések a minták inhomogenitására is utalhatnak.) Hofstee, 1992 ugyancsak azt találta, hogy az elutriátoros mérésnél kapott lebegési sebesség jelentősen kisebb lehet mint a levegős ejtőcsővel mért érték, vagyis a szélcsatornás mérés túlbecsüli a légellenállási tényező értékét. Hofstee ezt azzal magyarázta, hogy a függőleges szélcsatorna pitot csöves érzékelője nem a tényleges lebegtetési sebességet méri. Másrészt a szemcsék pörgő, bukdácsoló mozgása (ami néha a folyadékos ejtőcsőben is megfigyelhető) szintén növeli a légellenállási tényező látszólagos értékét.



3.14. ábra Műtrágyánként mért átlagos légellenállási tényezők, módszerenként



3.15. ábra Linzisó szemcsék légellenállási tényezői a fényképes ill. időmérés alapján

A **3.1. táblázatban** összehasonlítom a hagyományos légcsonnás és a folyadékos ejtőcsőves módszerek tulajdonságait (lásd 66. oldal).

3.4.2.4. A folyadékos ejtőcső fejlesztés összefoglalása

A szabálytalan alakú műtrágyaszemcsék légellenállási tényezőjének mérése nehéz feladat, amit függőleges légcsonnában vagy nagyméretű ejtőcsővekkel szoktak mérni. Pontosabb és egyszerűbb mérésekre kínál lehetőséget az általam javasolt, petróleummal feltöltött ejtőcső. Az ejtőcsőves méréseket egyszerűségük és elhanyagolásuktól mentes kiértékelésük különösen vonzóvá teszi. A készülék előnye hogy olcsó, kisméretű, nem igényel kalibrálást, a mérések fényképesen dokumentáltak és kiértékelésük elhanyagolások nélkül történik. Vizsgálataim azt mutatták, hogy az azonos mintákon

mért manuális (kézi stopper) és digitális fényképezőgépes módszerek hasonló értékeket adnak, míg az ugyanazon mintán végzett légcSATornás mérések szórása nagyobb. A mérési pontosság könnyen javítható jobb minőségű digitális fényképezőgép alkalmazásával. A készülék félautomatikus labor berendezéssé fejlesztése lehetséges a gyártási technológia ellenőrzésére, amit minőségellenőrzésre lehetne használni.

3.1. táblázat Az elutriátor és a folyadékos ejtőcső összehasonlítása

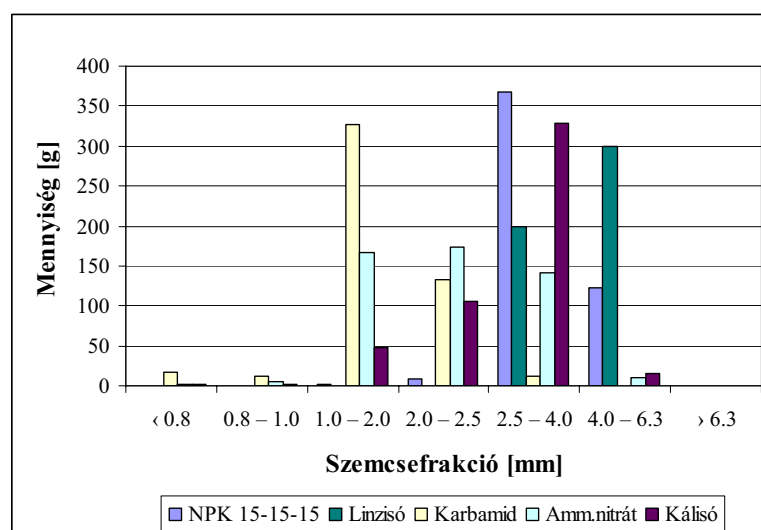
Függőleges légcSATorna (Elutriátor)	Petróleumos ejtőcső
anemométeres sebesség kalibrálást igényel	nem igényel kalibrálást
drága	olcsó
„szubjektív” különösen szabálytalan szemcsealak esetén	„objektív”
Fényképesen nem dokumentálható	fényképesen dokumentálható
pontossága nem ismert	$\pm 5\%$ -os pontossága lényegesen javítható jobb fényképezőgéppel
alkalmas könnyű részecskék mérésére	nem alkalmas könnyű részecskék mérésére
a mérés időigényes	a mérés gyors
az értékelés gyors	fényképek értékelése időigényes
szabálytalan mozgás nem vizsgálható	szabálytalan mozgás is dokumentált

4. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ÉS ELEMZÉSÜK

4.1. A műtrágyák nedvességtartalma és szemcseösszetétele

Az általam vizsgált műtrágyák nedvességtartalmát és szemcseösszetételét a **4.1 táblázat** tartalmazza. Mindegyik típus esetén megállapítható, hogy a zsákosan tárolt műtrágyák gyártás utáni nedvességtartalma nem jelentős: tömegszázalékban az elhanyagolható 0.05%-tól (kálisó) a csekély 1.25 %-ig (NPK 15-15-15) terjed. A tárolás folyamán a nedvességtartalom növekedhet, ami kedvezőtlenül hat az ömlesztett műtrágya állagára, kezelhetőségére és szórási tulajdonságaira. Helytelen tárolás közben az erősen nedvszívó, főleg nitrogén alapú műtrágyák összetapadása, csomósodása következhet be, amit a kiszórás előtt meg kell szüntetni. Ez viszont az ép szemcsék aprítódását is eredményezheti. Így a gyárilag beállított szemcsefrakció arány megváltozna, ami a fontos szórási tulajdonságokat (pl. munkaszélesség, szórás egyenlőtlenség) jelentősen befolyásolná. Fontos tehát a megfelelő tárolási körülmények biztosítása.

A 4.1 táblázatból megállapítható, hogy az Agrolinz Agrochemikalien GmbH által gyártott NPK 15-15-15 esetében a 2.5 – 4.0 mm, és az Agrolinz Melamin GmbH által gyártott linzisonál a 4.0 – 6.3 mm-es mérettartományba esnek a szemcsék a legnagyobb mennyiségben. Ez a munkaszélességre kedvező hatású. A karbamid tartalmazza legnagyobb arányban a legkisebb méretű 1.0 – 2.0 mm-es szemcsefrakciót. A szemcseméret eloszlás grafikus megjelenítése a **4.1. ábrán** látható.



4.1. ábra A műtrágyaszemcsék szemcsefrakciói szitaelemzés alapján

4.1. táblázat. A vizsgált műtrágyák nedvességtartalma és szemcseösszetétele

Műtrágya típus	NPK 15-15-15		Linzió		Karbamid		Amm.nitrát		Kálisó	
Nedves-ségtart.	1.21 %		0.49 %		0.14 %		0.34 %		0.05 %	
Szemcse méret [mm]	g	%	g	%	g	%	g	%	g	%
< 0.8	–	0	–	0	16.9	3.38	1.1	0.22	1.0	0.2
0.8 – 1.0	–	0	0.1	0.02	12.6	2.52	5.6	1.12	2.5	0.5
1.0 – 2.0	1.2	0.24	0.1	0.02	326.6	65.35	166.4	33.27	48.1	9.62
2.0 – 2.5	8.0	1.6	0.5	0.1	132.4	26.49	174.4	34.87	105.1	21.02
2.5 – 4.0	368.5	73.71	198.3	39.66	11.3	2.26	141.9	28.37	328.8	65.76
4.0 – 6.3	122.2	24.44	300.4	60.08	–	0	10.8	2.16	14.5	2.9
> 6.3	–	0	0.6	0.12	–	0	–	0	–	0
összesen	499.9	100	500	100	499.8	100	500.2	100	500	100

4.2. Térfogattömeg, porozitás

A vizsgált műtrágyák térfogattömeg és porozitás értékei a **4.2. táblázatban** találhatóak. Megfigyelhető, hogy a karbamid térfogattömege a legkisebb, ezért tárolásnál, szállításnál ez igényli a legnagyobb kapacitásokat. Viszont a kálisó magas térfogattömeg értéke valószínűleg a rossz gömbalakúságnak tulajdonítható. A különböző módon mért sűrűségekből egyszerű számításokkal következtethetünk a műtrágyák térfogati porozitására (lásd 37. old. 2.31-2.33 egyenletek és 45. old.). Az ömlesztett műtrágyák teljes porozitása $\Phi_t = 1 - \rho_b / \rho_s$, amely az összetett NPK 15-15-15 esetén a legkisebb. A porozítások meglehetősen egységesek: értékük 0.4-0.45 sávban mozog, összhangban az elméleti várakozás alapján nyert felső határral. Ugyanis egy 70.5°-os kúpszögű kúpba illesztett négygömbös elméleti modell geometriai számításaim

alapján (lásd: **M2. melléklet**, 114. oldal) 0.52 porozitás értéket ad ($\Phi_{\text{elm}} = 1 - V_{\text{gömbök}} / V_{\text{kúp}}$). A porozitást csökkentheti a szemcsék méretbeli változatossága is, hiszen a kis szemcsék beférhetnek a nagyok közé. A szemcsék belső porozitását (Φ_g) légmentesen záró szemcsebevonatok hiányában egyelőre nem lehet megadni.

4.2. táblázat. A vizsgált műtrágyák térfogattömege és teljes porozitása

Műtrágya típus	NPK 15-15-15	Linzisó	Karbamid	Ammónium nitrát	Kálisó
Térfogattömeg [kg/m ³]	1052	914	731	935	1056
Porozitás (Φ_t)	0.402	0.455	0.412	0.420	0.426

4.3. A műtrágyák sűrűségének meghatározása

A különböző sűrűségmeghatározási módszerekkel (lásd: 45-46. old.) nyert eredményeket a **4.3. táblázat** tartalmazza. E szerint a karbamid meglehetősen könnyű (1244 kg/m³), míg a másik négy műtrágya nagyon hasonló átlagos sűrűségű (1720 ± 100 kg/m³). A „klasszikus” petróleumos piknométeres módszert (1.sor) kisebb anyagmennyiségeken (~ 1- 5g minta) lehet végrehajtani. A mérések reprodukálhatósága általában ezzel a módszerrel is elég jó, azonban a kis mintamennyiség miatt az eredmény nem kellően pontos nagymennyiségű műtrágyára vetítve. A petróleumos módszereknél a részleges oldódás miatt a folyadék eljuthat olyan mikrozárványokba is, amelyek a levegő számára egyébként átjárhatatlanok. A kálisó esetében ez a jelenség valószínű. A linzisónál tapasztalt „fordított” irányú eltérés viszont azt valószínűsíti, hogy szemcséiben a petróleum nem ér el minden olyan zárványt, amely a levegő számára átjárható. Az alkalmazott kísérleti módszerekkel nem dönthető el, hogy a petróleumos sűrűségmérésekben a szilárd anyag „valódi” sűrűséget (ρ_s) kapjuk-e. A légpiknométeres módszer elvileg a ρ_s „valódi” sűrűséget adja, ám a feltételezett mikrozárványok bennfoglalásával. A mikrozárvány hipotézist meg lehetne vizsgálni ha a szemcséket alkalmas eszközzel finom porrá törnénk; a porítás előtti és utáni sűrűségek légpiknométeres méréséből. Eredménytelen volt az a számos próbálkozás, hogy a hazai kereskedelemben beszerezhető impregnálószerrel, vagy oldott méhviasszal

légmentesen „becsomagoljam” a műtrágya szemcséket, és így az összes belső zárványt befoglalva mérjem meg a (ρ_g) szemcsesűrűséget. Mivel a különböző módszerekkel mért sűrűségek elfogadható egyezést mutattak és az ismert irodalmi adatok szerint szervetlen (ásványi) műtrágyák esetén a ρ_s „valódi” sűrűség átlagosan legfeljebb 10%-al haladhatja meg a ρ_g „látszólagos” szemcsesűrűséget, ezért a későbbi ballisztikai számításokhoz a légpiknométeres ρ_s sűrűség adatokat használtam (4.3. táblázat, 3. sor átlaga) abból a megfontolásból, hogy ez áll legközelebb a levegőben történő mozgás feltételeihez és a várható eltérés sem lehet jelentős.

4.3. táblázat. A vizsgált műtrágyák halmazainak sűrűségei

Műtrágya típus	NPK 15-15-15	Linzisó	Karbamid	Amm.nitrát	Kálisó
Mérési módszerek sorszama	Sűrűségértékek [kg/m ³]				
1.	1885	1649	1324	1638	2009
2.	1820	1600	1250	1610	1910
3.	1820 1716 1739	1700 1669 1630	1250 1238 1247	1620 1603 1615	1840 1925 1763
3. átlaga	1758 ± 55	1663 ± 35	1245 ± 7	1613 ± 9	1843 ± 81

1. hagyományos petróleumos piknométer módszerrel mérve (átlagos értékek)
2. petróleum kizorítása mérőhengerben (átlagos értékek), a 3. sorban szereplő, a légpiknométerrel is megmért műtrágyával
3. légpiknométerrel mért műtrágyaminta, minden külön érték legalább háromszori ismétléssel mért adatok átlaga

4.4. Súrlódási jellemzők

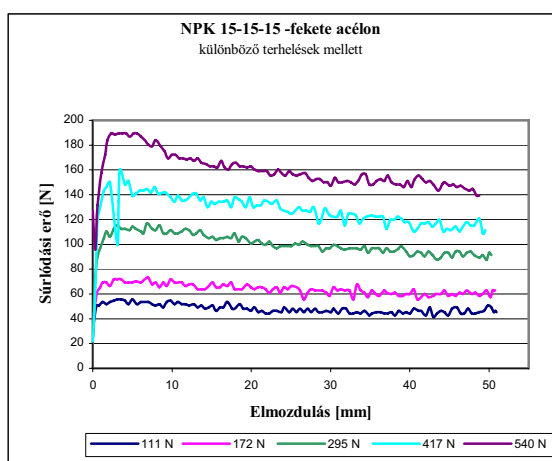
4.4.1. Felületi súrlódás

A súrlódásmérő kísérleti berendezésünk inkább a tárcsán történő nagy tömegáramú körülményeket modellezi. Ugyanis egy átlagos paraméterű röpitőtárcsát és műtrágya típust feltételezve (pl. NPK-15-15-15) a 2.1 egyenlet alapján az egy szemcsére jutó maximális erőhatás nem lehet nagyobb 0.1-0.2 N értéknél. A tanszékünkön fejlesztett nyírókészüléket változó súlyokkal terhelve (200x200 mm-es mérőkeretben 2500 db 4 mm átmérőjű szemcsét feltételezve) az egy szemcsére jutó nyomóerőt a 0.01-0.3 N tartományban változtatjuk, így az üzemi körülményekhez hasonló tartományban mértem a *súrlódási faktort*. A nyíródoboz elmozdulása 50 mm, ezen a távolságon átlagosan 100-110 erő (feszültség) jelet (adatot) rögzítettem. Az elmozdulást három főbb szakaszra osztva a következő nehézségek adódhatnak, amelyek a pontosságot csökkenthetik:

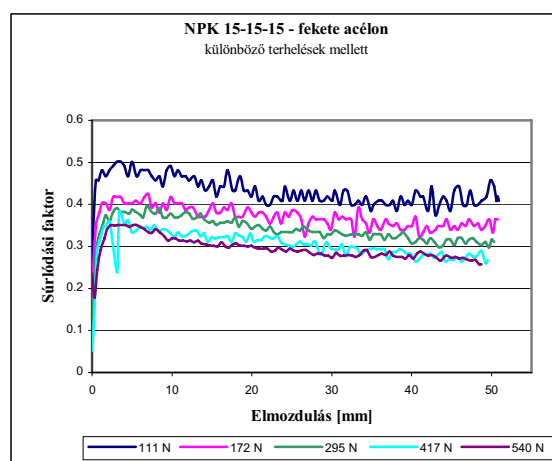
1. Kezdeti szakasz:
 - a. mozgó rész felgyorsítása
 - b. szemcsék rendeződése, tömörödése
 - c. alacsony terhelésnél lényeges az üresjárási korrekció
2. Középső szakasz:
 - a. periodikus oszcilláció a vonó szerkezet berezgése miatt (nem értékelhető, figyelmen kívül hagyott adatok)
3. Végző szakasz:
 - a. szemcsék törése, tömörödése
 - b. véghelyezethez közeli mechanikai kényszerek változása

A tárolt adatok feldolgozása Excel és Matlab programokkal történt. A mérési tapasztalatok alapján az értékelést a következő módon végeztem. Az üresjárat terhelés átlagának meghatározásából mindig elhagytam az első 10 pontot. Ha az üresjárat terhelés hirtelen ugrást mutatott, az utána következő adatokat már nem használtam. Az átlagos üresjárat erőt kivontam a tényleges vonóerőből. A jellemző üresjárat terhelés kb. 20 N, ezért nagyobb terheléseknél ennek hibája kevésbé számít. A vonóerő görbék értékelésénél mindig elhagytam az első és az utolsó 30 pontot, így a mérési görbe ~ 40%-a hasznosult. Ebből meghatároztam a vonóerő átlagát és standard deviációját. A terhelés növelése a felső 300-500 N tartományig - a tapasztalatok szerint - stabilizálja a

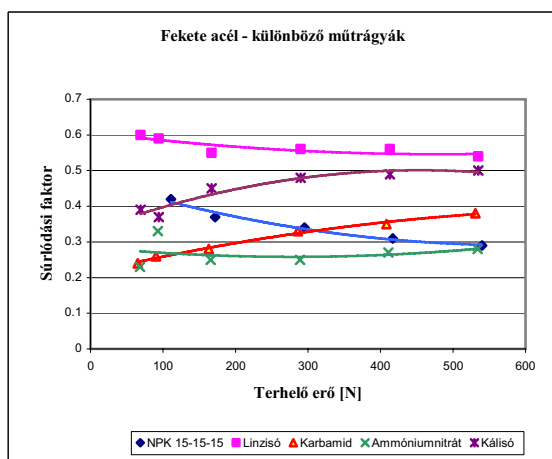
mért súrlódási együttható értékét. Kisebb terheléseknél - felülettől és műtrágyától függően – a mért súrlódási együttható növekedhet, csökkenhet vagy éppen közel állandó. Ezért az „a” típusú értékelésnél a súrlódási faktor értékének a három legnagyobb terhelésnél kapott érték átlagát tekintetem. A hibákat a három értékből származó standard deviáció adja. Az egyes terheléseknél mért súrlódási faktorok hibája az adott terhelésnél mért pontok standard deviációjából adódik. Ugyanezen mérésekből egy alternatív, „b” módszerrel (lásd: 39. old.) is meghatároztam a súrlódási faktorokat.



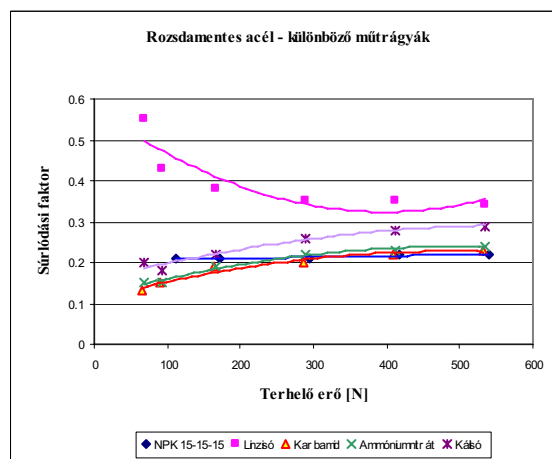
4.2. ábra NPK 15-15-15 műtrágya és fekete acél között fellépő súrlódóerő.



4.3. ábra NPK 15-15-15 és fekete acél közötti súrlódási faktor.



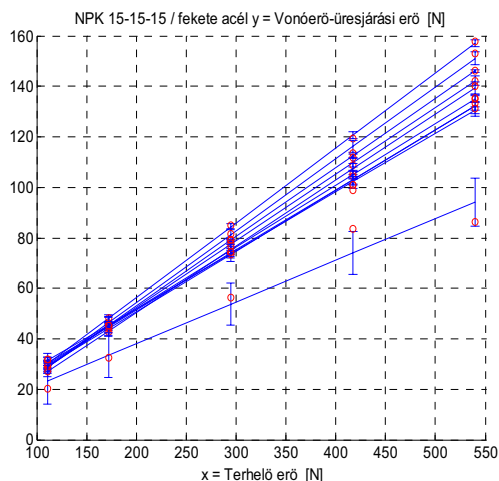
4.4. ábra Fekete acél és a műtrágyák közötti súrlódási faktor változó terhelés mellett



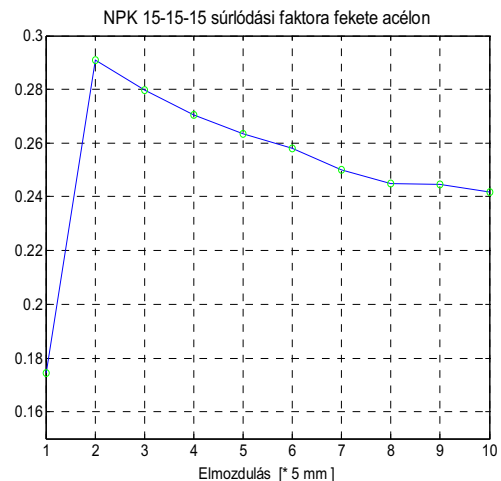
4.5. ábra Rozsdamentes acél és a műtrágyák közötti súrlódási faktor változó terhelés mellett

Az **M3.1. – M3.6. mellékletek** táblázataiban foglalom össze az „a” és „b” módszer szerint az ötféle műtrágya tíz különböző felületen mért adatait. A **4.4. táblázatban** pedig a terheléstől független súrlódási faktorok láthatók. A **4.2. - 4.5. ábrán** a vonóerőt illetve a súrlódási faktort ábrázolom a terhelés és az elmozdulás függvényében.

A „b” típusú értékelés során a súrlódási faktorokat az elmozdulás függvényében is meghatároztam 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, ám az elmozdulás függvényében történt értékelésnél (**b** módszer) a hibák általában nagyobbak. Az **4.6. és 4.7. ábrán** a súrlódóerőt illetve a súrlódási faktort ábrázolom a terhelés és az elmozdulás függvényében (**b** módszer).



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



4.7. ábra NPK 15-15-15 és fekete acél
közötti súrlódási faktorok változása az
elmozdulás során

4.4. táblázat. A műtrágyák felületi súrlódási értékei („a” és „b” módszerek)

Felületek	NPK 15-15-15	Linzisó	Karbamid	Ammónium nitrát	Kálisó
Rozsdamentes acél (a)	0.22 ± 0.01	0.36 ± 0.02	0.21 ± 0.02	0.22 ± 0.02	0.26 ± 0.03
Rozsdamentes acél (b)	0.22 ± 0.005	0.33 ± 0.05	0.22 ± 0.03	0.23 ± 0.02	0.27 ± 0.03
Fekete acél (a)	0.33 ± 0.04	0.55 ± 0.01	0.34 ± 0.04	0.26 ± 0.02	0.48 ± 0.02
Fekete acél (b)	0.30 ± 0.02	0.53 ± 0.02	0.34 ± 0.05	0.26 ± 0.03	0.46 ± 0.08
Horganyzott acél (a)	0.23 ± 0.01	0.31 ± 0.02	0.25 ± 0.03	0.24 ± 0.01	0.24 ± 0.01
Horganyzott acél (b)	0.24 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.26 ± 0.03	0.24 ± 0.02	0.24 ± 0.01
Alumínium (a)	0.26 ± 0.01	0.43 ± 0.02	0.30 ± 0.04	0.25 ± 0.02	0.29 ± 0.01
Alumínium (b)	0.26 ± 0.01	0.42 ± 0.03	0.31 ± 0.05	0.25 ± 0.03	0.28 ± 0.03
Teflon (a)	0.14 ± 0.02	0.16 ± 0.04	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.01	0.10 ± 0.01
Teflon (b)	0.13 ± 0.01	0.12 ± 0.005	0.09 ± 0.02	0.10 ± 0.01	0.10 ± 0.01
Bakelit (a)	0.15 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.28 ± 0.03	0.34 ± 0.01
Bakelit (b)	0.16 ± 0.01	0.27 ± 0.02	0.24 ± 0.04	0.28 ± 0.03	0.31 ± 0.02
Plexi (a)	0.18 ± 0.02	0.29 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.18 ± 0.01
Plexi (b)	0.17 ± 0.01	0.28 ± 0.02	0.22 ± 0.03	0.22 ± 0.02	0.17 ± 0.02
PVC (a)	0.25 ± 0.01	0.36 ± 0.01	0.23 ± 0.02	0.25 ± 0.01	0.23 ± 0.03
PVC (b)	0.24 ± 0.003	0.34 ± 0.02	0.23 ± 0.02	0.24 ± 0.02	0.23 ± 0.03
Üveg (a)	0.17 ± 0.01	0.31 ± 0.02	0.14 ± 0.01	0.18 ± 0.02	0.22 ± 0.01
Üveg (b)	0.18 ± 0.003	0.30 ± 0.02	0.12 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.21 ± 0.03
Rétegelt fa (a)	0.26 ± 0.01	0.25 ± 0.03	0.27 ± 0.02	0.30 ± 0.01	0.26 ± 0.02
Rétegelt fa (b)	0.26 ± 0.02	0.25 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.29 ± 0.02	0.24 ± 0.004

4.4.2. A súrlódási faktorok összehasonlító elemzése

A szerkezeti anyagként alapvető fontosságú rozsdamentes acél esetében – méréseim szerint - a dinamikus felületi súrlódási faktorok műtrágya típustól függően a 0.2-0.36 tartományba esnek. A teflon felületen a legkisebb, míg a fekete acélon a legnagyobb a súrlódás. A „legszélsőségesebb” felület-műtrágya kombinációnál 0.55 érték is előfordul. Az általam mért felületi súrlódási értékek az irodalomban közölt adatok (0.2-0.7) alsó sávjába esnek. Hofstee dinamikus súrlódási faktorai a 0.33-0.44 sávban voltak, míg Aphale alumínium felületen tizenhat féle műtrágyára 0.4-0.6 közötti statikus értékeket mért, és némi meglepetésre ezekkel az értékekkel kapta a legjobb egyezést kísérletei és elméleti számításai közt. Érdekes, hogy a mi esetünkben az alumíniumon mért értékek a 0.25-0.43 sávban voltak. Talán nem véletlen egybeesés, hogy az általunk mért 0.4-0.62 tartományú dinamikus belső súrlódási tényezők éppen az Aphale által preferált sávba esnek. Ez azt a feltételezést támasztaná alá, hogy a tárcsán kialakuló többrétegű szemcsemozgás miatt a belső súrlódás szerepe is fontos. Ezt a feltevést vizsgálhatnánk kis súrlódású – teflonbevonatú - lapátokkal kis és nagy tömegáramnál mért szórásképek összehasonlításával.

4.5. táblázat A műtrágyák belső súrlódási értékei

Műtrágya típus	NPK 15-15-15	Linzisó	Karbamid	Amm.nitrát	Kálisó
Dinamikus rézsűszög [°]	33	32	31	29	36
Belső súrlódási együttható					
Rézsűszögből számítva	0.64	0.62	0.61	0.55	0.73
Forgó csúszta- tó készülékkel	0.45± 0.02	0.52± 0.03	0.41± 0.02	0.40 ± 0.02	0.62 ± 0.02

4.4.3. Belső súrlódás

A vizsgált műtrágyák természetes dinamikus rézsűszögére három mérés átlagaként nyert α szög értékek átlagából számoltam (lásd: 51. old.) a μ belső súrlódási együtthatót. A belső súrlódást ugyanazzal a készülékkel mértem mint a felületi súrlódásokat, de a körforgó típusú mérésekhez szükséges tartozékokkal kiegészítve. Az értékelés módszere

megegyezett a felületi súrlódások mérésénél részletezettel. A **4.5 táblázatban** látható, hogy a dinamikus rézsűszögből nyert μ_i értékek mindig 0.1-0.2 értékkel nagyobbak mint a csúsztatókészülékkel mért adatok. Sitkei is kiemeli, hogy a két érték nem független egymástól de megemlíti, hogy értékük csak extrém esetben azonos. Erre vonatkozó magyarázatot azonban az irodalomban nem talál. Véleményem szerint az eltérés oka többek között az lehet, hogy a „dinamikus” rézsűszög kialakulásánál egyetlen (terheletlen) réteg csúszik (gördül) illetve tapad meg az alatta levő halmazon. Tehát ez a „dinamikus” módszer inkább hasonlít egy kis terhelésű, „fordított” tapadási súrlódás méréshez, és ezért nagyobb értéket ad mint a valóban dinamikus, körforgó csúsztatókészülékes módszer. 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.

4.5. Szemcsénként mért fizikai jellemzők

A szemcsénként mért fizikai jellemzők értékeit a **4.6. táblázat** tartalmazza. A mért illetve számított paraméterek fogalmát az alábbiak szerint adom meg:

<d>: a szemcsék három merőleges méretének számtani középértéke [mm]

$$d = (d_1 + d_2 + d_3) / 3$$

<r>: gömb alakot feltételezve a szemcsék átlagos sugara [mm]

az átlagos szemcsetömegből és a műtrágya valódi sűrűségéből nyert átlagtérfogatból számítva

$$\langle V \rangle = \langle m \rangle / \rho_s; \quad \langle r \rangle = (3 \langle V \rangle / (4\pi))^{(1/3)}$$

$\rho_{sz\ i}$: a szemcsénkénti sűrűségek becslése

$$\rho_{vi} = m_i / (d_1 d_2 d_3)_i; \quad \langle \rho_v \rangle = \sum m_i / \sum (d_1 d_2 d_3)_i; \quad \rho_{sz\ i} = \rho_{vi} \rho_s / \langle \rho_v \rangle$$

k_i : szemcsénkénti légellenállási tényezők [10^{-6} kg/m]

értékeit a v_t lebegési sebesség értékéből és a szemcsetömegből határozzuk meg a levegő felhajtóerejét figyelembe véve: $k_i = mg / (v_t)^2 (\rho_s - \rho_l) / \rho_s$

< C_D >: átlagos alaki tényező, és hibája (átlagos légellenállási tényezőből $\langle k_i \rangle$ és átlagos szemcse sugárból számítva)

$$\langle C_D \rangle = 2 \langle k_i \rangle / (\langle r \rangle^2 \pi \rho_l)$$

C_D : szemcsénkénti d méretekből számolt alaki tényezők

$$C_D = 8 k_l / (d^2 \pi \rho_l)$$

g_a: gömbalakúság, Sitkei szerint (ahol a három merőleges méret rendre d₁, d₂, d₃):

$$g_a = (d_1 d_2 d_3)^{1/3} / \max \{d_1, d_2, d_3\}$$

a., Lilliefors teszt és **b.**, Jarque-Bera teszt alapján eloszlás hipotézisvizsgálat eredménye

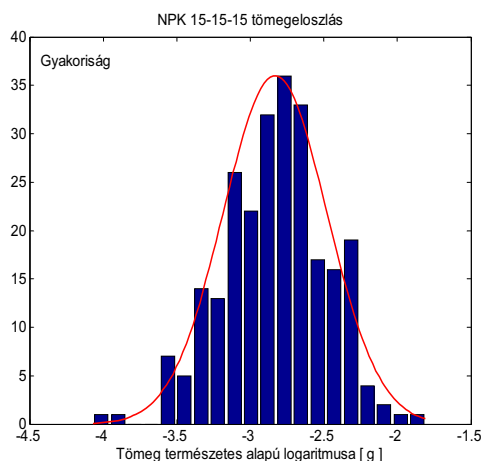
4.6. táblázat A műtrágyák szemcsénként mért fizikai jellemzői

Műtrágya típus	NPK 15-15-15	Linzisó	Karbamid	Ammóni- um nitrát	Kálisó
Szemcseméret átlaga: d [mm]	3.97 ± 0.47	4.25 ± 0.63	2.39 ± 0.29	3.08 ± 0.67	3.83 ± 0.56
Szemcseméret eloszlása <i>normál</i>	a. , igen	igen	igen	nem	nem
	b. , igen	igen	igen	nem	igen
Szemcsék átlagos sugara < r > [mm]	2.04	2.13	1.22	1.61	1.81
Gömb- Alakúság < g_a >	0.91 ± 0.06	0.90 ± 0.06	0.96 ± 0.02	0.92 ± 0.04	0.78 ± 0.07
Tömeg átlaga < m > [mg]	62.6 ± 22.1	67.7 ± 28.6	9.55 ± 3.31	28.2 ± 16.2	45.7 ± 17.3
Tömeg- eloszlás <i>lognormál</i>	a. , igen	igen	nem	nem	nem
	b. , igen	nem	igen	nem	nem
Sűrűség szórás becslése szemcsénként < ρ_{sz} > [kg/m ³]	1758 ± 146	1676 ± 132	1244 ± 73	1611 ± 103	1840 ± 231
A sűrűség eloszlása <i>lognormál</i>	a. , igen	igen	nem	nem	igen
	b. , nem	nem	nem	nem	igen
légellenállási tényezők átlaga k_l [10 ⁻⁶ kg/m]	5.40 ± 1.51	5.79 ± 2.03	1.68 ± 0.39	3.16 ± 1.53	5.97 ± 2.08
légellenállási tényezők eloszlása <i>normál</i>	a. , nem	nem	nem	nem	igen
	b. , nem	nem	nem	nem	igen
átlag sugárból számolt < C_D > alaki tényező	0.66 ± 0.18	0.65 ± 0.23	0.57 ± 0.13	0.62 ± 0.30	0.93 ± 0.32
szemcsemére- tekből számolt C_D alaki tényezők átlaga	0.69 ± 0.08	0.63 ± 0.06	0.59 ± 0.04	0.63 ± 0.06	0.80 ± 0.12

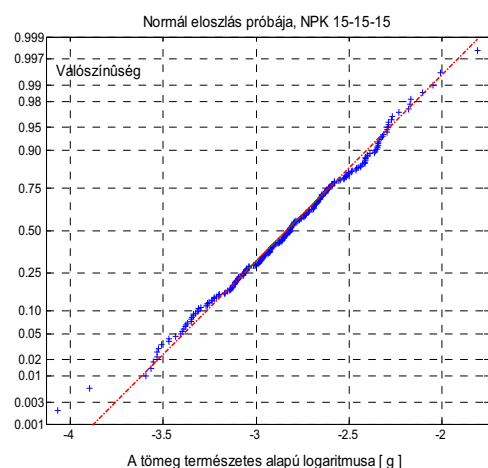
4.5.1. A szemcsénként mért paraméterek elemzése

Néhány mért paramétert valószínűségi változóként kezelve megvizsgáltam azt, hogy normál vagy lognormál eloszlást követnek-e. A *hipotézis vizsgálatokat* a Matlab beépített rutinjaival végeztem, kétféle módszerrel: **a.**, *Lilliefors teszt* és **b.**, *Jarque-Bera teszt* segítségével. Azonos, 5% szignifikancia szinten végeztem a teszteket, azaz amikor annak a valószínűsége, hogy a valójában helyes normál eloszlást elvetjük („fals negatív”), csak 5%. A három mérőleges méret átlagát vizsgálva az kaptam, hogy csak az ammónium-nitrát esetében vethető el biztosan a normál eloszlás. A legkisebb a karbamid „d” szemcsemérete, a legnagyobb pedig a linzisóé. A sűrűségmérést és a 250 elemű minta tömegét felhasználva kiszámolható az átlagos szemcse „gömb” $2 \langle r \rangle$ átmérője. Az átlagos sugarak sorrendje ugyanaz mint a szemcseméreteké, és a $d \approx 2r$ összefüggés közelítőleg teljesül, különösen ha jó a gömbalakúság. Ennek értéke a kálisó esetén a legrosszabb, míg a karbamidnál a legjobb; a többi műtrágyánál pedig 0.9 fölötti érték. A szemcsetömeg a kis méret miatt a karbamid esetén a legkisebb, de az ammóniumnitráté is jóval kisebb, mint a további három műtrágyáé. A tömegeloszlás csak az NPK 15-15-15 esetében lognormál eloszlású, az ammóniumnitrát és kálisó biztosan nem lognormál, 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%). (Meg kell jegyezni, hogy a szemcsesűrűség homogenitása a méret-meghatározás pontosságától is függhet.) Ugyancsak a kálisó légellenállási tényezői mutatnak egyértelműen normál eloszlást, az összes többié biztosan nem az. A kálisó légellenállása a legnagyobb, és a C_D dimenzió nélküli alaktényezője is kiugróan magas. Ezek a sajátságok feltehetően a nagyon szabálytalan kristály alakokkal magyarázhatók. A kétféle módon számolt átlagos C_D alaktényezők igen jól egyeznek, ismét a kálisó kivételével. A magyarázat ez esetben is a négy másik műtrágya jó gömbszerűségében rejlik. Összességében a szemcsénként mért fizikai tulajdonságok elemzése hasznos és többnyire magyarázható is. A statisztikai eredményeknek akkor lehet különösen jó hasznát venni, ha csak kisszámú szemcséről vannak mérési adataink. Jelen munkában a ballisztikai számításokat is szemcsénként végzem, és az ott kapott eredmények azt mutatják (ld. később), hogy a kiszórás során a statisztikai eloszlásokban rejlő szabálytalanságok öröklődhetnek a szórási képből, de a

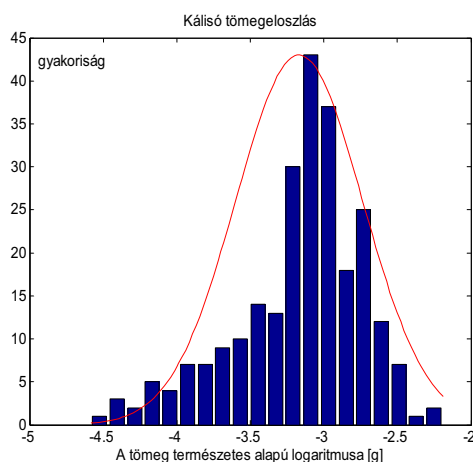
szórás folyamata össze is moshatja a nagyobb eltéréseket. Néhány jellemző, szemcsénként mért eloszlás ábrát (4.8.-4.11. ábrák) mutatok be párba állítva, ami jól mutatja az NPK 15-15-15 és a kálisó tulajdonságai közti lényeges különbségeket. További ábrák az M.4.1 – M.4.7. mellékletben találhatók.



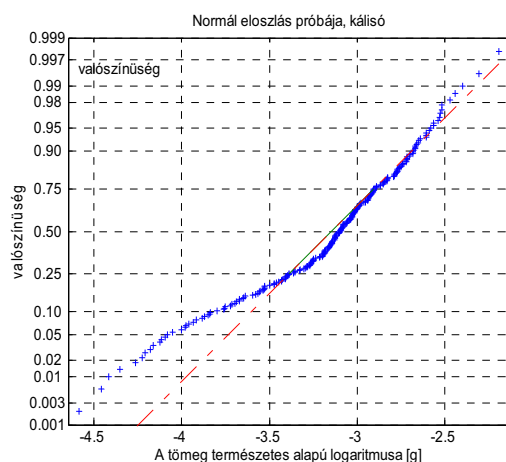
4.8 ábra NPK 15-15-15 tömegeloszlás



4.9. ábra NPK 15-15-15 eloszlás teszt



4.10 ábra Kálisó tömegeloszlás



4.11. ábra Kálisó eloszlás teszt

4.6. A szemcsék pályájának számítása

A szemcsék levegőben történő mozgásának leírására a Kármán-féle hodográf módszert alkalmaztam. A számításokba beépítettem a közeg és a részecskék sűrűségét is. A felhajtóerő figyelembe vétele a korábbi módszerek kiterjesztése, ami lehetővé teszi a könnyű részecskék mozgásának leírását is: ez a lehetőség magvak vetésének

számításához hasznos lehet. A pályák kiszámításához a kísérletileg meghatározott dimenzió nélküli C_D alaktényezőt vagy a k_l légellenállási tényezőt használom. A ferde hajítást tetszőleges kezdeti feltételekkel szimulálom. Így a szórási kép előrejelzésénél a kísérleti adatokban a kezdeti feltételek szórása is figyelembe vehető, amikor a 250 kísérletileg vizsgált szemcse mozgását számoljuk. A programozás a Matlab nyelven (MathWorks Inc. Natwick, USA, 1999) egyszerű és flexibilis.

4.6.1. A ballisztikai számítás módszere

A ballisztikus problémát részletesen elemezte Kármán Tódor (Kármán & Biot, 1967), akiről ismert, hogy az amerikai repülési és rakétatechnika fejlesztésében szerzett jelentős érdemeket. A hazai mezőgazdasági alkalmazások kimunkálásában Soós Pál és munkatársai (Soós et al., 1996) vettek részt. Mivel a ballisztikus probléma szakirodalma magyar nyelven elérhető, csak a számításokhoz alkalmazott összefüggéseket adom meg. Ellenálló közeg esetén a fékező erőt a sebesség négyzetével arányosnak vehetjük.

$$F = k_l v^2 \quad (4.1)$$

ahol „ k_l ” a légellenállási tényező

Ez az alapja a k_l légellenállási tényező légcsatornás mérésének, ahol a végsebesség elérése esetén ($v = v_t = \text{const.}$), és így

$$F = mg = k_l v_t^2 \quad (4.2)$$

ahol „ m ” a részecske tömege és „ g ” a gravitációs állandó, és így

$$k_l = m g / v_t^2 \quad (4.3)$$

k_l [kg/m] kifejezhető a „ C_D ” dimenzió nélküli alaktényezővel is

$$k_l = C_D A \rho_l / 2 \quad (4.4)$$

ahol „ 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.

$$m_c = m(\rho - \rho_l) / \rho \quad (4.5)$$

A részecskék sűrűsége (ρ) halmazban mérhető és egyenként is becsülhető a korábban ismertetett módszerekkel. A vizsgált műtrágyákra a levegő felhajtóereje miatt bevezetett

„Archimedes” korrekció csak 0.9992-0.9994 szorzófaktort jelent, ami a szemcsénkénti és az átlagos sűrűség esetén is elhanyagolható. A tényleges számításokban az átlagos sűrűséget használtam. Mindenesetre a könnyű részecskék nagyon eltérő mozgása jól demonstrálható az általánosabb formulával.

Az ismert tömegű és légellenállású repített szemcsék pályáját Kármán módszere szerint jósolhatjuk meg. Ha a szemcsét pályájának egy adott pontján a v sebesség vektorral és annak a vízszintes x tengellyel bezárt β szögével jellemzünk, akkor a mozgásegyenlet az alábbi:

$$m \, dv/dt = mg \sin \beta - k_1 v^2 \quad \text{érintő irányban} \quad (4.6)$$

$$m v \, d\beta/dt = mg \cos \beta \quad \text{a pálya görbületi sugara irányában} \quad (4.7)$$

így

$$dv/d\beta = v \, \tan \beta - k_1 v^3 / (mg \cos \beta) \quad (4.8)$$

Ez v -re nézve elsőrendű differenciálegyenlet β függvényeként, amit a Matlab 'ode23' differenciál egyenlet kezelő rutinjával numerikusan oldottam meg. Így a sebesség nagyságát kapom a β szög függvényében, amit sebesség *velográf*nak nevezek. (A szokásosabb *hodográf* a v_x és a v_y merőleges sebességkomponenseket rendeli egymáshoz és a velográfból származtatható.)

Abban az esetben, ha a kezdeti sebesség iránya vízszintes:

$$v_x = v_0, \quad \beta = 0, \quad t = 0 \quad \text{időpontban}$$

a pálya paraméteres egyenletrendszer

$$x = v_0^2 / g \int f(\beta)^2 / \cos^2 \beta \, d\beta \quad (4.9)$$

$$y = v_0^2 / g \int f(\beta)^2 / \cos^3 \beta \sin \beta \, d\beta \quad (4.10)$$

ahol

$$f(\beta) = \{1 + k_a v_0^2 / (mg) [\ln((1 + \sin \beta) / \cos \beta) + \sin \beta / \cos^2 \beta]\}^{-1/2} \quad (4.11)$$

A fenti integrálokat numerikusan értékeltem a Matlab 'quad' függvényével. Ha a kezdeti sebesség iránya nem vízszintes, („ α ” a repítési szög, fölfelé negatív) az x és y kifejezések nem változnak, azonban az $f(\beta)$ kifejezést ekkor az alábbi szerint kell érteni:

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

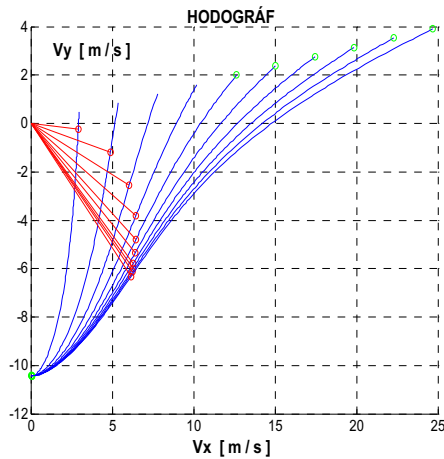
(4.12)

4.6.2. Műtrágyaszemcsék pályaszámítása

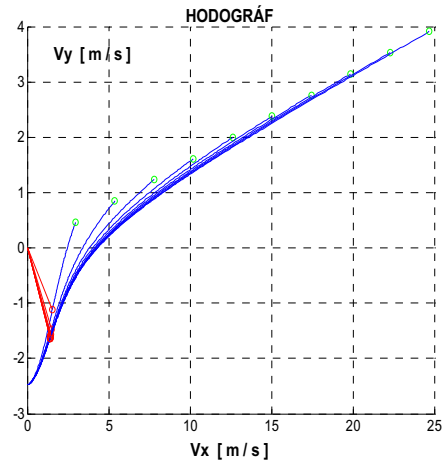
A 4.5 fejezetben ismertettem a vizsgált műtrágyák 250 elemű mintáinak fizikai jellemzőit és statisztikailag értékeltem azokat. Az adatokat felhasználva két műtrágya (linziszó és NPK 15-15-15) összehasonlításával mutatom be a pályaszámításokat. A statisztikai értékelés szerint a részecskék sűrűsége viszonylag állandó és alakjuk első közelítésben gömbszerű. Azonban az C_D alaktényezők és azok statisztikus szórása kisebb a linziszó ($C_D = 0.63 \pm 0.06$), mint az NPK 15-15-15 ($C_D = 0.69 \pm 0.08$) esetén. Várható tehát, hogy a linziszó - egyébként azonos feltételek mellett - egyenletesebben juttatható ki a talajra mint az összetett NPK műtrágya. Ezt a feltevést a valós részecskék pályaszimulációjával igazolom.

A tömeg, méret és lebegtetési sebesség adatokat az 'agidata' file 'agi' mátrixában tároltam. A mért adatokból a k_1 légellenállási tényezőt és a dimenzió nélküli C_D alaktényezőt származtattam. A 'fertil.m' program bemenő adata az 'agi' matrix, melynek segítségével megkapjuk és kirajzolhatjuk a tömeg, térfogat, sűrűség (ρ), gömbalakúság, légellenállási tényező (k_1) és az alak faktor (C_D) statisztikus eloszlását. A további számításokhoz a számított k_1 értékeket és az m tömegeket az 'agiKind' file-ban tárolom. Az elméleti sebesség hodográfok egy átlagos alaktényező feltételezésével tetszőleges kezdeti feltételekkel számíthatók a 'vetes2.m' programmal. A sebesség-hodográfok azért is hasznosak, mert végpontjuk mutatja az elérhető végsebességet, aminek összhangban kell lennie a mért lebegtetési sebesség értékekkel.

A hodográf sorozat jól mutatja (4.12. ábra), hogy az NPK-15-15-15 műtrágya átlagos paramétereit használva, $\alpha = -9^\circ$ (a ferde hajítás α szöge fölfelé negatív), $v_0 = 3 - 25$ m/s kezdeti sebesség tartomány, $C_D = 0.69$, $r = 2$ 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. (A hodográfokon piros vektorok jelzik a pályán elért minimális, míg zöld pontok a maximális sebességet.)

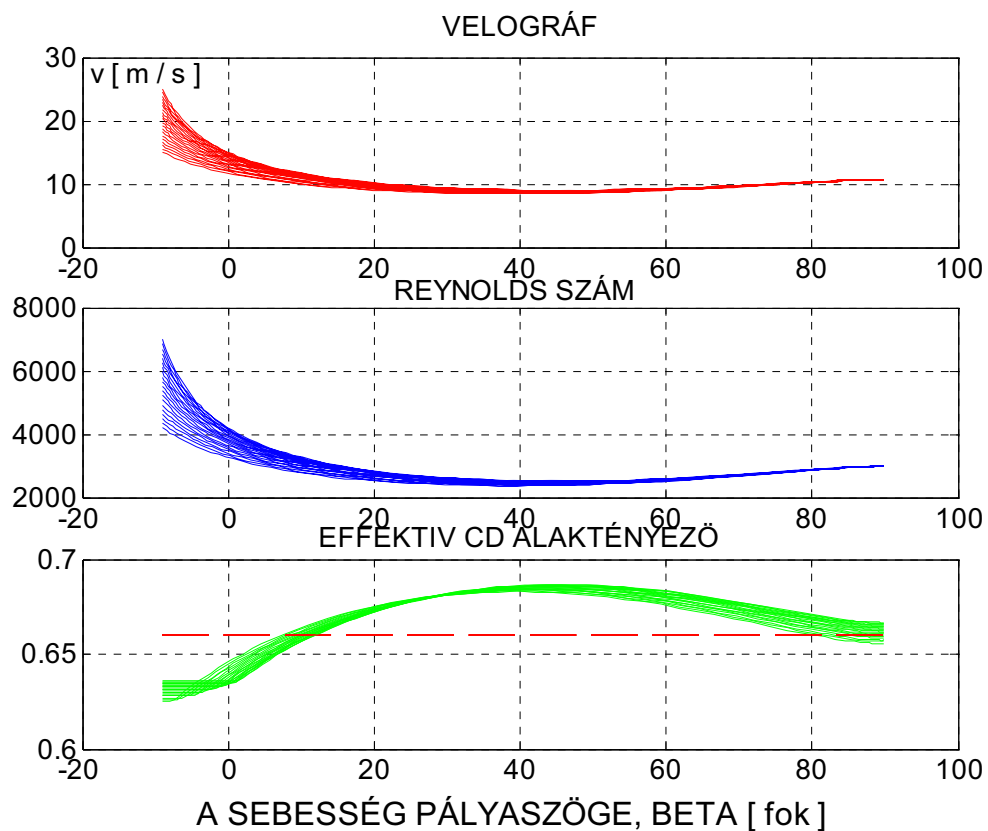


4.12. ábra NPK 15-15-15 műtrágyaszemcsék hodográfjai



4.13. ábra Könnýű szemcse hodográfjai

Az eredmények hasonlóak a linzisóval is; ilyen ábrát nem mutatok be. Igen érdekesek egy könnyű szemcse hodográfjai (**4.13. ábra**). Ezt a 4.12. ábra paramétereivel megegyező adatokkal számoltam ki, kivéve a szemcse sűrűséget, ami ez esetben 100 kg/m^3 . Látható, hogy könnyű részecskék esetén a hodográf alig függ a kezdeti sebességtől, és a süllyedési végsebesség csak $\sim 2.4 \text{ m/s}$.



4.14. ábra Az effektív alaktényező becslése a velográfából (NPK 15-15-15)

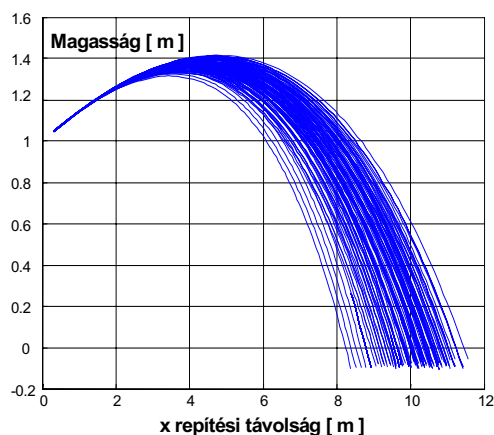
A velográf modellel elméletileg megbecsülhető a pálya mentén a változó C_D hatásából eredő hiba nagysága és bevezethető egy „effektív” C_D , ami követi a levegőben, a gömbökre „működő” C_D menetét, de egy konstans szorzófaktorral eltér attól. A szorzófaktor a mért légellenállási tényezőből közvetlenül származtatott „kvázi” C_D (3.15 egyenlet, gömb alakú test „A” felületével számolva) és a pálya mentén átlagolt C_D hányadosából kapjuk. A **4.14. ábrán** az NPK 15-15-15 műtrágyára a velográf alapján számolt C_D alaktényező látható. (Az ábrán a sebesség β pályaszöge a fölfelé hajítás miatt eleinte negatív, majd az x-tengely alá hajlás után pozitív.)

Látszik, hogy esetünkben az „effektív” $C_D \pm 3\%$ -on belül állandó a pálya mentén, noha a kezdősebességet a 15-25 m/s tartományban változtattam. Ebben a kezdeti sebesség-tartományban a korrigálatlan, egyedi pályákra átlagolt C_D értékei a 0.367-0.373 tartományban vannak a kezdeti sebesség függvényében. Bár a C_D sebességfüggése nem jelentős, elképzelhető egy olyan numerikus eljárás, amelyik a sebesség függvényében első lépésben így megadott $C_D - t$ használja a következő iterációban, és sok elemi (konstans, de más és más C_D értékű) ferde hajításból rakja össze a pályát, majd újraszámolja a C_D sebességfüggését és így tovább. Ha az eljárás konvergál, akkor ez lehetne az „egzakt” pályaszámítás.

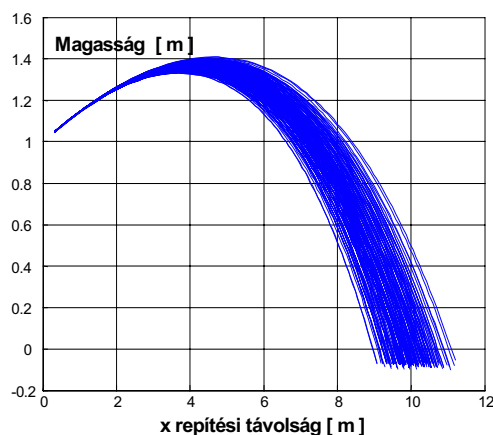
4.6.3 A műtrágyaszemcsék talajra érkezése

A röpitőtárcsás műtrágyaszóró tárcsája gyűrű alakban teríti a műtrágyát (Csizmazia, 1968). E szórási gyűrű sugárirányú metszetében mért eloszlás számolására az x,y paraméteres egyenletek β szerinti integrálása révén nyert pályagörbékből van lehetőség. A metszet szórási képére jellemző hisztogramokat közvetlenül a pályagörbékből kapjuk. Erre az ad egyszerű lehetőséget, hogy szimulációinkban észrevehetjük, a becsapódó részeskék pályájának közel párhuzamosságát (a szögek eltérését is figyelembe lehetne venni). Így a talaj felszínén a szemcsék gyakoriságát a felszín ± 5 cm-es környezetébe eső görbepontok számával közelíthetjük. A szemcse becsapódási helyének becsléséhez jó közelítés, ha a felszínhez közeli görbepontok x koordinátáinak átlagát vesszük. A 'vetesfind.m' program a szemcsénként mért „ k_l ” és „ m ” értékeket használja, ezért a számított hisztogramok tükrözik a légellenállási tényezők és a szemcsetömegek szóródását. A kezdeti sebesség szóródását úgy vettem figyelembe, hogy értékét öt lépésben változtattam a 19-21 m/s tartományban. A műtrágyaszóró gépek valóságos paramétereirehöz hasonlókat választottam a számításokban. A tárcsa függőleges helyzetét

1 méterre tettem, és $\alpha = -9^\circ$ felfelé irányuló hajítást szimuláltam 1000 pontos felbontással. (A gravitációs állandó $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, a levegő sűrűsége $\rho_{\text{lev}} = 1.25 \text{ kg/m}^3$.) A **4.15.a** és **b**, valamint a **4.16.a** és **b ábrákon** hasonlítom össze az összetett és a nitrogén műtrágya szemcsék pályáit és az ebből származtatott x-irányú szemcsesűrűség eloszlást. A legszembetűnőbb különbség az NPK-15-15-15 műtrágya szórási gyűrűje sugárirányú metszetének egyenetlensége és aszimmetriája, amely csaknem 3 méteres sávot ad szemben a linzisó 2 m-nél valamelyest szélesebb sávjával (a **4.16.a** és **b ábrák** x-skálái eltérő léptékűek). Ennek valószínű magyarázata a linzisó szemcsék eltérő fizikai tulajdonságában rejlik. Az összetett műtrágya komplexebb technológiája nagyobb szórási bizonytalanságot eredményez.

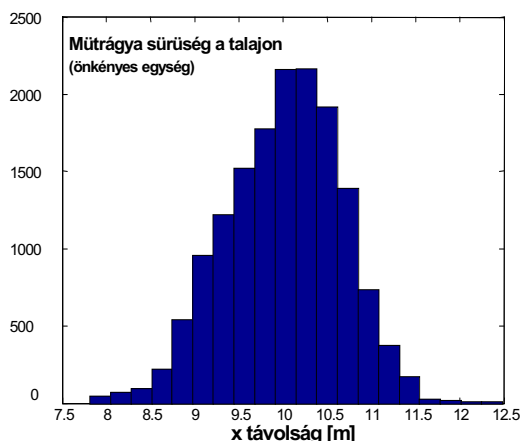


4.15.a ábra NPK 15-15-15 szemcsék számított repítési pályái

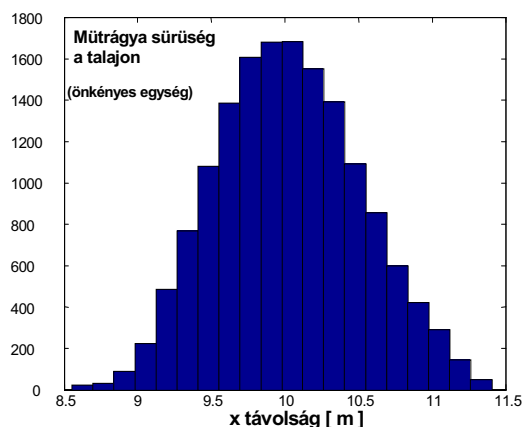


4.15.b ábra Linzisó szemcsék számított repítési pályái

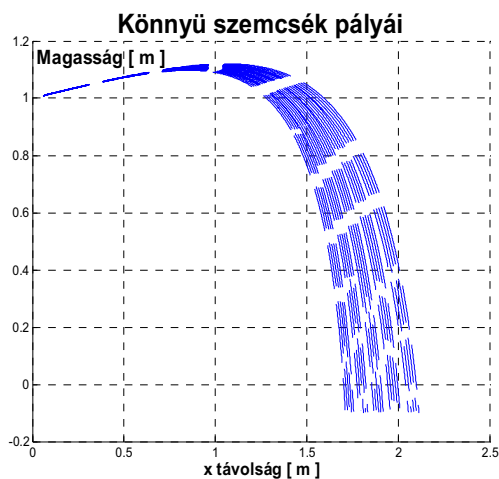
Ugyanakkor a legvalószínűbb sugárirányú kiszórási távolság mindkét műtrágyánál kb. 10 m-re tehető. Ha könnyű anyagot (100 kg/m^3) szórunk ki, és minden egyéb paraméter egyezik a **4.15.a** ábrán használtakkal, akkor az átlagos szórási távolság mindössze kb. 1.9 m, ahogy a **4.17. ábra** mutatja. (Itt a sebességet ill. az alaktényezőt 5-5 lépésben változtattam a 19-21 m/s ill. a 0.59-0.79 tartományban.) A repítési távolság növelésével kapcsolatos számításaim (**4.18. ábra**) szerint az NPK 15-15-15 esetén a leválási



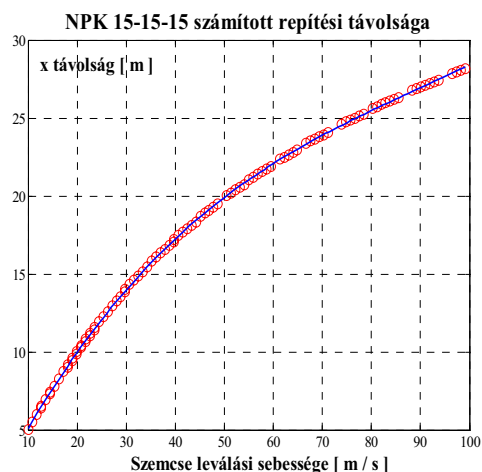
4.16.a ábra NPK 15-15-15 szemcsék szórási gyűrűjének sugárirányú metszete



4.16.b ábra Linzisó szemcsék szórási gyűrűjének sugárirányú metszete



4.17. ábra Könnyű szemcsék számított repítési pályái

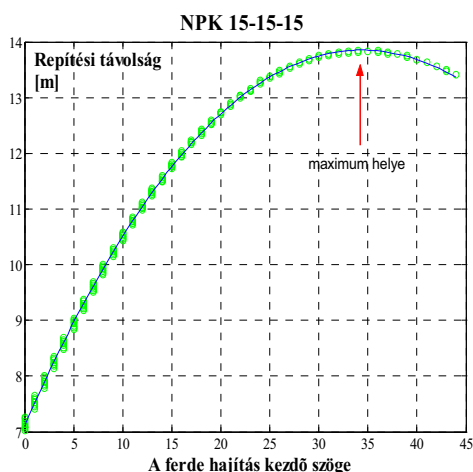


4.18. ábra Az átlagos NPK 15-15-15 szemcse számított repítési távolsága a leválási sebesség függvényében

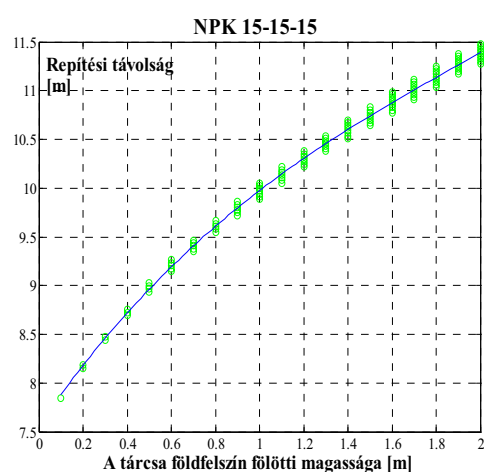
sebesség növelése 10-ről 20 m/s értékre még 5 m-el növeli a repítési távolságot, míg a 60-ról 70 m/s-ra növelés már csak 1.9 m-el. A tapasztalattal összhangban azt kaptam, hogy a leválási sebesség további növelése nem növelné arányosan a repítési távolságot.

A ferde hajítás szöge (tárcsa kúpszögéből adódik) és a várható hajítási távolság között a ballisztikai számítások birtokában könnyen található összefüggés. Az NPK 15-15-15 esetén, a szokásos 20 m/s leválási sebesség mellett $\alpha = 34^\circ$ -os hajítási szög esetén (**4.19. ábra**) várható az elméletileg maximális 13.8 m hajítási távolság (vákuumban a jól ismert 45° lenne optimális). A számított összefüggés harmadfokú polinommal jól

illeszthető ($X = 7.11 + 0.402 \alpha - 6.28 \cdot 10^{-3} \alpha^2 + 8.42 \cdot 10^{-6} \alpha^3$). A kicsi és könnyű szemcsékből álló karbamidnál ugyancsak 20 m/s-os kezdősebesség esetén kisebb, 29°-os ferde hajításnál számíthatunk a legnagyobb távolságra, mintegy 8.8 m értékkel. A gyakorlatban mégsem szokás 10°-nál meredekebb pályán kezdeni a repítést. Ennek valószínű oka, hogy a túlságosan meredek röppálya esetén elég idő lenne arra, hogy a széljárás befolyásolja a röppályát.



4.19. ábra hatása a repítési távolságra

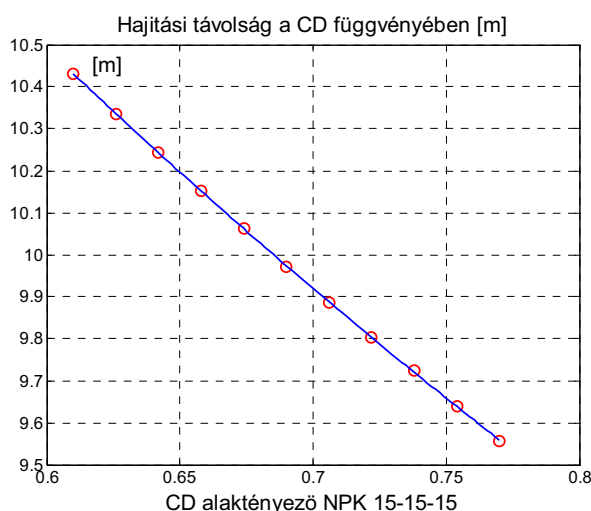


4.20. ábra A tárcsa helyzetének hatása a repítési távolságra

A röpítőtárcsa elhelyezési magasságának hatása: A ballisztikai számítások szerint ha a karbamid esetén 1 m-ről 2 m-re emelnénk a tárcsa pozícióját a talaj szintjéhez képest, akkor ez mindössze 0.9 m-el növelné a hajítási távolságot az egyébként szokásos körülmények mellett. A nagyobb sűrűségű és tömegű NPK-15-15-15 szemcsék esetén (**4.20. ábra**) hasonló esetben a növekmény nagyobb, mintegy 1.4 m lenne. Általában véve nagyobb magasságok esetén egyre kevésbé érvényesül a pozíció emelésének szórástávolság növelő hatása. A túl nagy magasság konstrukciós okok és a hangsúlyosabb időjárási befolyás miatt nem kedvelt. Összegzésül azt állapíthatom meg, hogy a tárcsa helyzetének, kúpszögének, fordulatszámának a változtatása a manapság szokásos konstrukciókhoz képest már nem hozna ésszerű javulást a szórás szélességének javítására.

További szimulációk alapján azt kaptam, hogy az NPK 15-15-15 átlagos szemcse C_D alaktényezőjének ± 1 standard deviációnak megfelelő változása ($C_D = 0.61 - 0.77$) a szórási sávot mintegy 0.9 m-el szélesíti (lásd: **4.21. ábra**). A többi műtrágyánál is

hasznos nagyságrendű jelenség várható. A további szélesedést többek között a szemcsék méretének, tömegének és kezdeti sebességének bizonytalansága okozza: utóbbit általában 5% értékűnek tekintettem.



4.21. ábra Hajítási távolság az alaktényező (C_D) függvényében
NPK 15-15-15 műtrágyánál

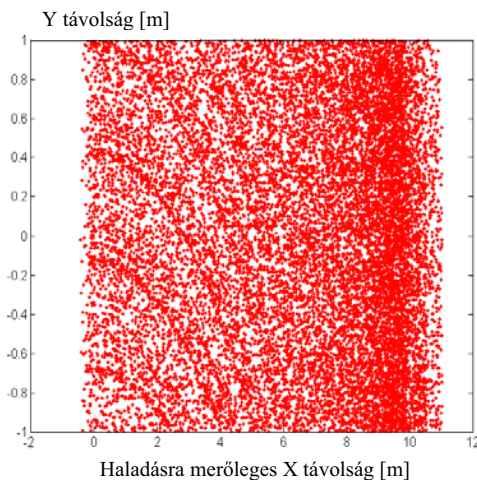
A pályaszámításokat egy 900 MHz-es AMD Athlon Thunderbird processzorral és 256 MByte memóriával rendelkező, illetve duál, 2x2.4 MHz/1Gbyte Athlon CPU-us PC segítségével végeztem. A pályaszámítások gépideje a pontok számától és a kívánt pontosságtól függően néhány perctől 1-2 óra időtartamig terjedt.

A ballisztikai vizsgálatok során a sugárirányú szórás kép meghatározásához kidolgoztam illetve javítottam a sebesség hodográf és a pálya elméleti számítását. Egy összetett és egy nitrogén műtrágyán mért kísérleti adatok alapján bemutattam a sugárirányú szórás hisztogramokat. Szimulációkkal vizsgáltam a műtrágyaszóró néhány paraméterének hatását. További eredmények részben a következő fejezetben illetve a függelékben találhatók.

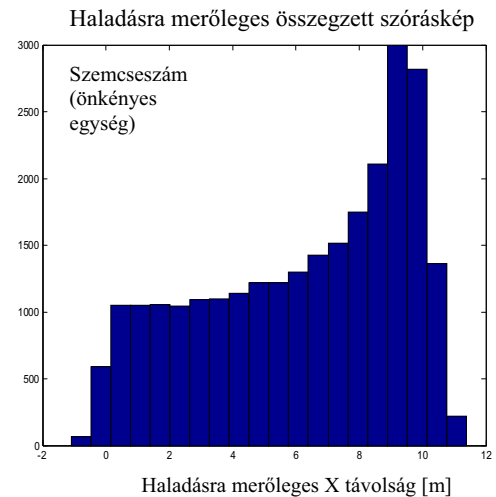
4.7. A teljes szórás kép számítása

A linzisó esetén bemutatom a teljes szórás kép számítását. Az előzőekben kiszámolt sugárirányú hisztogramot (4.16.b ábra) bemenő adatként használva (a 'szoraskép' file-ban tárolom az 'szx' hisztogramot) a 'veteskep3' programmal kiszámítom a szántóföldön várható teljes szórás képet. Ehhez két egymást követő geometriai transzformációt kell végrehajtani. Először a röpitőtárcsa elfordulását veszem figyelembe

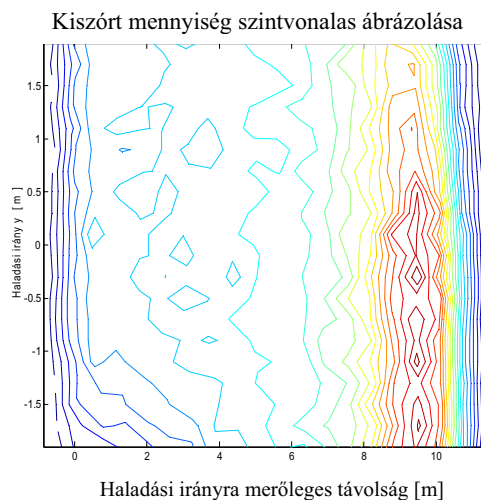
oly módon, hogy a kiindulási hisztogramot 0-tól 90°-ig növekvő szöggel elforgatom. Így egy teljes gyűrű negyedéhez jutok. Ezután a kapott negyed gyűrű pontjait sokszorozom kis, y-irányú eltolásokkal, ami a traktor haladását helyettesíti. Végül a forgatással és eltolással megsokszorozott pontok új koordinátái adják a termőföld felszínére érkező műtrágyaszemcsék koordinátáit. Az elfordulási szög léptetésének randomizálásával „utánozható” a valós röpitőtárcsa működése. A szimmetria miatt elegendő csak a jobboldali szórás kép kiszámítása. A traktor sebességét most elhanyagoljuk a lerepülő szemcsék sebességéhez képest ($2 \text{ m/s} \ll 20 \text{ m/s}$). A következő **4.22. ábra** az x,y síkban érzékelteti a kiszórt szemcsék eloszlását. A **4.23. ábra** mutatja az y haladási irányra merőleges szórás képet. Ez hasonlít a korai elméleti



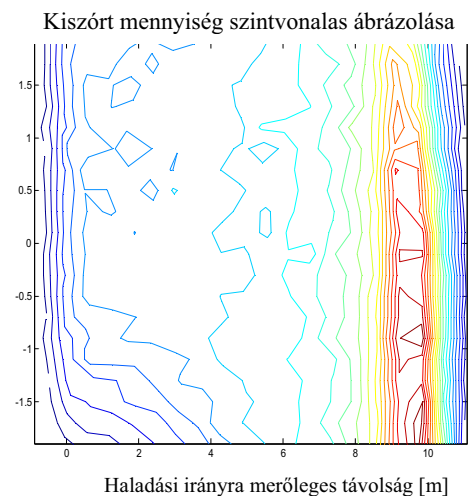
4.22. ábra Linzisó szemcsék a felületen



4.23. ábra Linzisó merőleges szórás képe

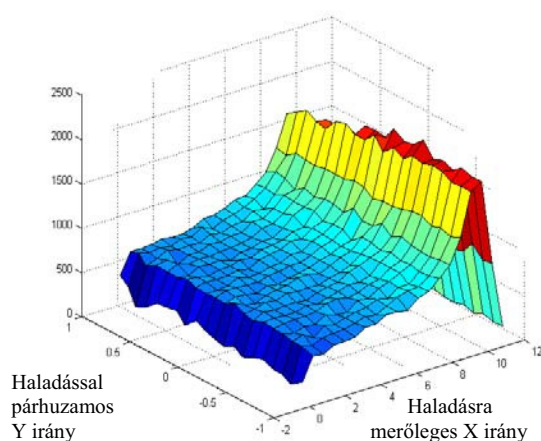


4.24. ábra NPK15-15-15 szemcsék eloszlása a talajon



4.25. ábra Linzisó szemcsék eloszlása a talajon

eredményekhez és a gyakorlati tapasztalatokhoz: jól mutatja a röpítőtárcsás gép ismert szórás egyenletlenségét. Azonban két műtrágya szórás képe jobban összehasonlítható a kontúrvonalas ábrák segítségével (4.24. és 4.25. ábrák). Amint látjuk, nem várható jelentős eltérés a két műtrágya szórás egyenletlenségében. Mégis, az összetett NPK 15-15-15 műtrágya kiszórása valamelyest egyenetlenebb. A háromdimenziós felülettel történő látványosabb ábrázolás látható a 4.26 ábrán.

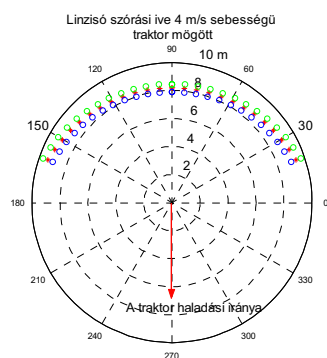


4.26. ábra Linziszó szórás kép 3D megjelenítése

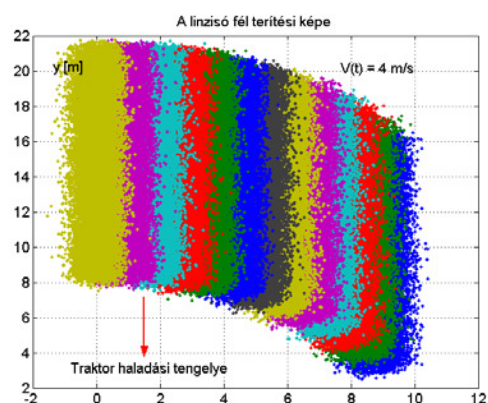
A traktor v_t sebességű haladásának figyelembe vételét a szántóföldi vonatkoztatási rendszerre való áttéréssel oldottam meg, a következő transzformációkkal: $v_y = v_o \cos \alpha \sin \beta - v_t$, $v_x = v_o \cos \alpha \cos \beta$ és a hajítás új iránya $\tan \gamma = v_y / v_x$. A numerikus módszernél a β szöget a 30 - 90°-os tartományban (0° a haladásra merőleges, 90° a haladásával párhuzamos irány) 10-20 lépésben változtattam, értékét a normál eloszlás szerint szemcsénként randomizáltam olyan mértékben, hogy a sávok összeérjenek. Az így képződött 250 elemű szemcsehalmozokat toltam el a traktor haladásával párhuzamosan, ezzel érzékeltetve a szántóföldön várható szemcse eloszlást.

A traktor haladási sebességének növelése a kezdeti szórási ív alakját „összenyomja”, (4.27.- 4.28. ábra) hiszen „mögé szórásnál” a haladási irányban lesz a legkisebb a hajítás távolsága. Azonban, ha a traktor sebessége állandó (vagy ha az össztömegáramot a haladási sebességgel arányosan növelik) a szórás kép nem változik lényegesen a statikus szórás képhez képest, ha a szokásos vontatási sebességekkel számolunk (max. 4

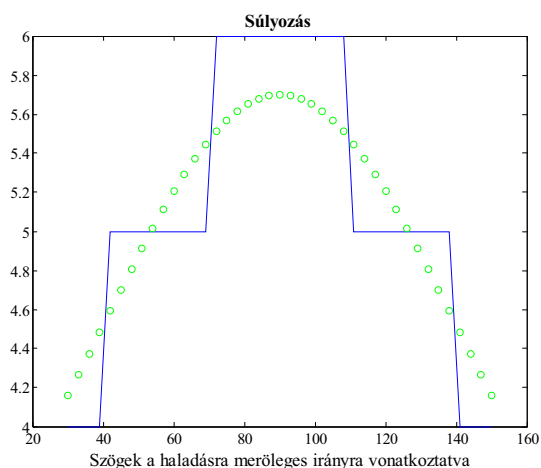
m/s). A linzisó esetében végzett számításaim szerint - a $\Phi = 30^\circ - 150^\circ$ közötti vízszintes irányú szög határokat feltételezve - a haladásra merőleges szórás egyenlőtlenség (C_v) 4 és 8 m/s vontatási sebességeknél is mindössze 1.3 illetve 1.4 %-al rosszabb, mint a statikus esetre számított 17%. A gyakorlatban a korszerű műtrágyaszóróknál 30-40 m/s leválási sebesség is gyakran előfordul, amihez képest a vontatási sebesség csekély és így hatása sem számottevő. A karbamid esetén számított, haladásra merőleges szóráskép a **4.31. ábrán** látható. Mivel a traktor mögé szórást ezúttal nem terjesztettem ki a haladásra merőleges $\Phi = 0^\circ$ és 180° irányig, a kisebb, a $\Phi = 30-150^\circ$ határok között a haladásra merőleges irányban számolt szóráskép egyenletesebb, mint a **4.23. ábrán**. A Φ szögtartomány csökkentésével nyilván tovább javítható a szórás egyenletessége - a szórási szélesség rovására. A minden megengedett irányban egyenletesen szóró egytárcsás műtrágyaszórónál elméletileg a haladási irányban a legkisebb a szemcsesűrűség. Ezt a gyakorlatban olyan tárcsakonstrukcióval kerülük el, amelyik a haladási irányban nagyobb tömegáramot biztosít (Grift & Hofstee, 1997b).



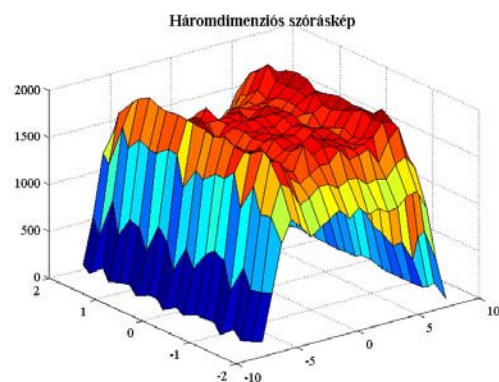
4.27. ábra Linzisó szórási ívének végpontjai a 4 m/s -al haladó traktor mögött ($\Phi = 30-150^\circ$)



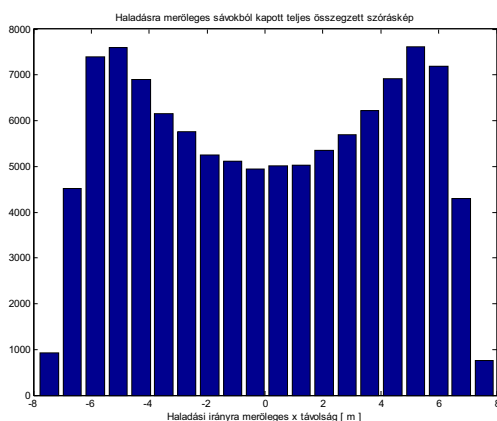
4.28. ábra Linzisó felületi „fél” szórásképe a 4 m/s-al haladó traktor mögött ($\Phi = 30-90^\circ$)



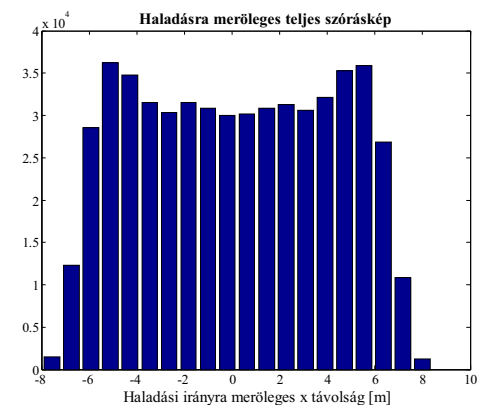
4.29. ábra Karbamid elméletileg súlyozott részecskeárama ($\Phi = 30-150^\circ$)



4.30. ábra Karbamid 3D szórásképe súlyozott részecskeáram esetén



4.31. ábra Karbamid haladásra merőleges szórásképe homogén részecskeáram esetén

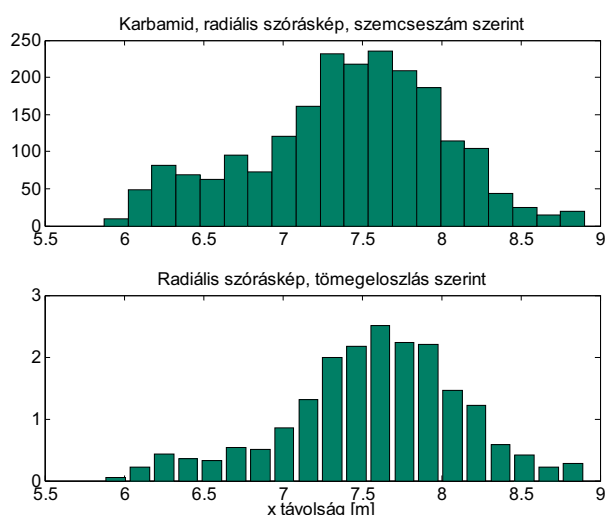


4.32. ábra Karbamid haladásra merőleges szórásképe egyenletesebb a súlyozott részecskeáram hatására

A szórás egyenlőtlenség mértéke elméletileg is csökkenthető azzal, ha a tárcsáról távozó szemcseáram eloszlása nem izotróp (szögfüggetlen eloszlású), hanem a haladási irányban maximális. Ilyen „kísérlet” eredménye látható a **4.29-4.32. ábrákon** amelyek egyértelműen mutatják a haladási irányban súlyozott részecskeáram jótékony hatását. A számítás során normál eloszlású, haladási irányban maximált részecskeáramot szuperponáltam az egyenletes eloszlásra. Megfelelően parametrizált súlyfüggvény esetén így a merőleges irányú szórás egyenletessége lényegesen javítható (a karbamid

esetén pl. a sávon belüli maximum és a minimum közti különbség 60%-ról 15%-ra csökkenthető még kis felbontású számítások esetén is).

Az eddig tárgyalt szemcseszám eloszlás és a kiszórt műtrágya tömegeloszlása közt azonban lehet eltérés. Az ammóniumnitrát esetében kiszámoltam, hogy a szemcsék átlagos repítési távolsága 8.9 ± 0.7 m, addig ugyanazon szemcsehalmaz tömegének a tömegközéppontja távolabb van, mintegy 9.2 méternél. A kismértékű eltolódás a nagyobb távolság irányába nem meglepő, hiszen ismert, hogy a nagyobb sugarú és tömegű szemcsék messzebb repülnek. A karbamid esetén (4.33. ábra) az összehasonlítás 7.4 ± 0.6 m, és a súlypont 7.6 m-nél van. A linzisónál 10.1 ± 0.6 m sáv „súlypontja” tolódik el 10.2 m-re. Tehát a valós szemcse adatok ballisztikai elemzése arra enged következtetni, hogy a tömegeloszlás a nagyobb távolságok irányába kissé elhúz a szemcseeloszláshoz képest, ám a különbségek jóval a sávok bizonytalansági tartományán belül maradnak.



4.33. ábra Karbamid sugárirányú szórás histogramjai a szemcseszám és a szemcsetömeg szerint

4.8. A műtrágya szemcse jellemzők és a kiszórás összefüggéseinek elemzése

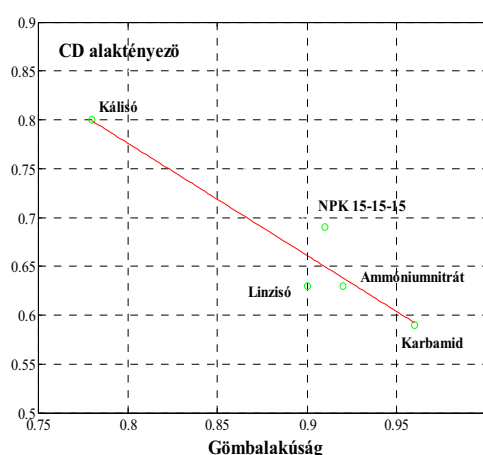
Bebizonyosodott, hogy a műtrágyaszórás végeredményét illetően - az egyéb fizikai tulajdonságok mellett - igen lényegesek a szemcse repítést befolyásoló aerodinamikai sajátságok. Vizsgálataimban a különböző műtrágyák eltérő viselkedését elemeztem oly módon, hogy a tárcsáról nagyszámú, ismert tulajdonságú részecskét indítottam a valós körülményekhez hasonló kezdeti feltételek mellett és a becsapódási helyek kiszámításából kaptam a szórás képet. A mért és számított paraméterek közötti

összefüggések feltárásával azokat a paramétereket kerestem, amelyek szántóföldi „on-line” mérése lehetőséget adhat a műtrágya szabályzott kijuttatására. Öt különböző műtrágyának szemcsénként mértem meg a szóráskép becsléséhez szükséges paramétereit, amelyek átlagait a **4.8. táblázatban** foglaltam össze.

4.8. táblázat Műtrágyák mért és származtatott átlagos jellemzői

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	1663 ± 132	1245 ± 74	1613 ± 101	1843 ± 232
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

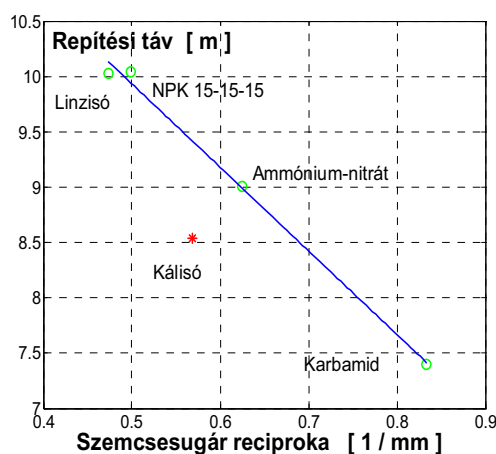
A szóráskép számításához azt a legegyszerűbb modellt választottam, amelyben a szórótárcsáról lerepülő szemcsék tömegárama minden megengedett irányban egyenletes. Bár a gyakorlatban ez nem teljesül, az eredmények összhangban vannak bizonyos tapasztalati tényekkel, és a paraméterek változtatása jelzi, hogy a szórás minőségi jellemzői milyen paraméterekre érzékenyek. Például érthető, hogy a karbamid



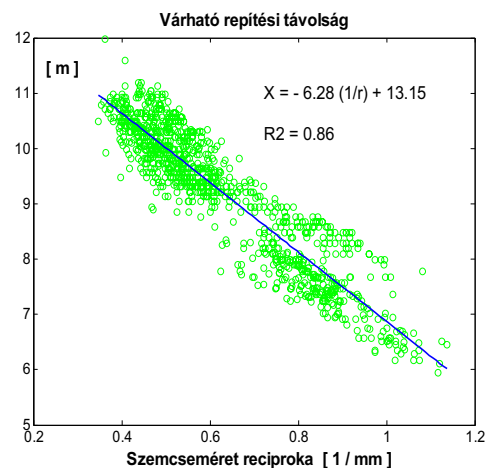
4.34. ábra Az átlagos gömbalakúság és az alaktényező kapcsolata a különböző műtrágyák esetében ($R^2 = 0.90$)

kis mérete és kis sűrűsége miatt nem repül messzire, míg a kálisó rövidebb röppályáját a rossz aerodinamikai tulajdonsága okozza. Az NPK 15-15-15 és a linzisó nagyon hasonlóan viselkedik, ám az összetett NPK15-15-15 kevésbé egyenletesen szórható. A **4.34. ábrán** jól látszik, hogy a C_D alaktényező a gömbalakúság lineáris függvénye, ($R^2=0.90$), a táblázat szerint pedig a repítési távolság a szemcse tömegével növekszik.

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, **4.35. ábra**).

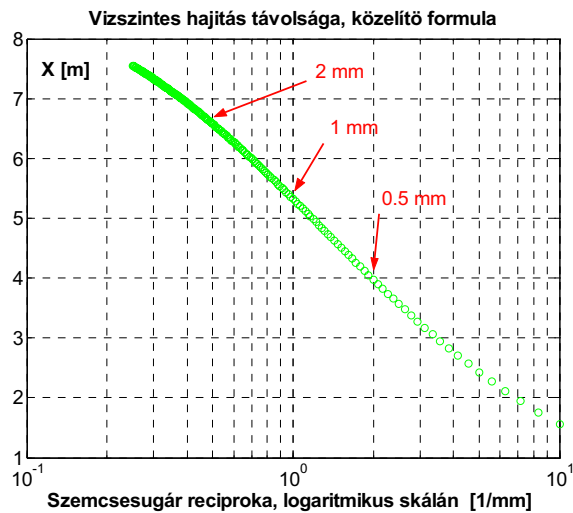


4.35. ábra A szemcsék várható repítési távolságainak *átlaga*



4.36. ábra Négyféle műtrágya 1000 szemcséjének várható repítési távolságai

A négyféle műtrágya 1000 szemcséjére illesztett $1/r$ típusú függvény esetén $R^2 = 0.86$ (**4.36. 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 ($\sim 1/r$) hányadosával 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 **4.13** összefüggés (Soleymangoli, 1998) szintén alátámasztja az $1/r$ szabály érvényességét, amit a **4.37. ábra** mutat.



4.37. ábra A vízszintes hajítás távolsága a szemcsesugár függvényében

$$X = \frac{\ln \left(K_l v \sqrt{\frac{2H}{g}} + 1 \right)}{K_l} \quad (4.13)$$

$$K_l = \frac{C_D \rho_l}{2} \frac{A}{m}$$

$$\frac{A}{m} = \frac{r^2 \pi}{\rho \frac{4}{3} r^3 \pi} = \frac{3}{4} \frac{1}{\rho r}$$

ahol: X: a repítési távolság

K_l : a vitorlahatási tényező a levegőben

v: a szemcse kezdősebessége

H: a röpítőtárcsa távolsága a talajtól

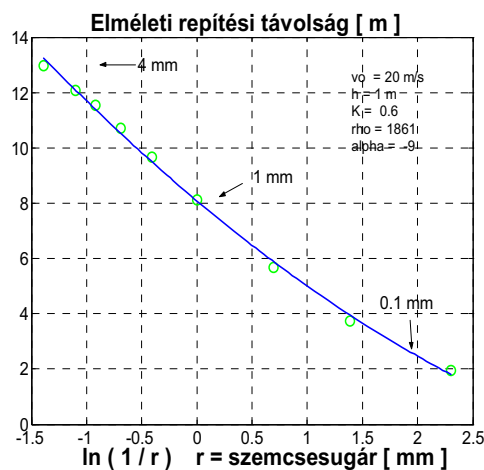
A: a műtrágyaszemcsék keresztmetszete a sebesség irányára merőlegesen

m: a szemcse tömege

r: a szemcse sugara

C_D : dimenzió nélküli alaktényező

Az NPK műtrágya esetében a ferde hajítás paramétereivel is 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 szóráskép 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.



4.38. ábra: Elméleti repítési távolság

A „becsapódási mátrixot” – ami a **4.38. ábrán** látható görbék különböző kezdeti sebességek esetén meghatározott sokaságából áll – tehát műtrágya típusonként célszerű kiszámítani, és digitálisan tárolni. A fentiek alapján jobban érthető, hogy a műtrágyák minőségét illetően miért kritikus a szemcsék méreteloszlása.

5. KÖVETKEZTETÉSEK, ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK, JAVASLATOK

5.1. Következtetések

Jelen dolgozatban – többek között - a röpítőtárcsás műtrágyaszórók elméleti szórásképének meghatározására dolgoztam ki módszert. A módszer alkalmazásához statisztikailag jelentős számú szemcse aerodinamikai, geometriai, tömeg és sűrűség adatait kell meghatározni különböző típusú műtrágyákra. A fizikai jellemzők teljességéhez megmértem a szemcsék súrlódását egymáson és különböző felületeken, mert ezek lényegesen befolyásolhatják a tárcsáról történő leválás sebességét. A mért nedvességtartalom, a térkitöltés és a porozitás a tárolási és szállítási tulajdonságokat befolyásolja. Az eredmények statisztikai elemzése támpontot ad az elérhető kijuttatási pontosságra, esetleg a gyártási technológiák javítására. A porozitás és a légellenállási tényező vizsgálatához egyszerű készülékeket fejlesztettem.

A műtrágyarészecskék szórásában fontos szerepet játszó fizikai tulajdonságokat megmértem és a repítést leíró ballisztikai probléma megoldására közelítő eljárást dolgoztam ki. Azonban a röpítőtárcsáról távozó részecskék tömegáramának és irányfüggésének elméleti számítása általában pontatlan, vagy a gépi konstrukciótól eltérő paraméter optimalást igényel. Ezért a műtrágya szórás kép megbízható előrejelzéséhez szükség lenne a gyakorlatban használt röpítőtárcsák laboratóriumi, vagy üzem közbeni folyamatos „bemérésére”, a részecskék méretének és sebességének monitorozására. Így a műtrágya illetve a szórótárcsa típusától és a beállításától függően előre becsülhető lesz a szórási kép, külön szántóföldi vagy vizsgálópályás kísérletek nélkül. Ha a szántóföldi üzemeltetés során történő mérésekhez megfelelő pontosságú módszereket lehet kidolgozni, akkor a GPS rendszerrel kombinálva, automatizálható, a precíziós termeléshez alkalmazható műtrágya kijuttató rendszerhez juthatunk.

5.2. 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 szemcsehalmozok 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. 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 légcsatornás 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 hodográfós ábrázolás $v_y = f(v_x)$ kiegészítésére bevezettem a „velográfós” megjelenítést ($v = f(\beta)$), a sebesség nagysága a sebesség irányának függvényében), amely közvetlenül mutatja a szemcse által bejárt sebességtartományt. A velográfós elemzéssel elméletileg igazoltam, hogy a szokásos kezdeti feltételekkel, gömbökkel végzett szórás 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.
 - 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.

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 középponthoz képest. Ezért az eloszlások leírására a szemcseszámok használata is megfelelő.

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.

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.

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.

5.3. Javaslatok

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 röpítőtárcsás 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.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatásban a mérőcsarnokban végzett műtrágyaszóró vizsgálatokat részben kiváltották a tárcsa közelében elhelyezett felfogó cellák alkalmazásával. A fejlett elméleti modellekkel kúpos röpitőtárcsák, ferdén elhelyezett lapátokkal is leírhatók. Ennek ellenére, csak a kényes paraméterekre kísérletileg optimált modell ad valóságghű szórásképet. A szórásképet elvileg a kijuttató gép mechanikai sajátságai és a szemcsék fizikai jellemzői határozzák meg. A számítógépes modellezéssel a jövőben csökkenthető a költséges vizsgálócsarnokok kísérleti alkalmazása. Sok kísérleti eredmény felhasználásával a tanuló algoritmusok is megfelelően becsülhetik a várható szórásképet. Különböző fizikai elven működő érzékelőkkel lehet jellemezni a tárcsát elhagyó részecskeáramot. Az utóbbi módszereket gyors ballisztikai elemzéssel kombinálva „on line” szabályzott módon, helyspecifikusan lehet kijuttatni a kívánt tápanyagot.

Kidolgoztam a röpitőtárcsás műtrágyaszórók elméleti szórásképeinek meghatározására alkalmas módszert, amelynek bemenő adatai a szemcsék fizikai és kezdeti kinematikai jellemzői. Az egyes szemcsék levegőben történő repülésének elemzéséhez a Kármán-féle hodográfós módszert elhanyagolások nélkül valósítottam meg. A pályaszámítások alkalmasak nagyszámú részecske mozgásának követésére és ezekből kiindulva a sugárirányú szórási hisztogram, a kereszt- és haladási irányú szórási kép előrejelzésére a mozgó szóróberendezés mögött.

A módszer kipróbálásához - a hazánkban is használatos műtrágyákon végzendő számításokhoz - statisztikailag jelentős számú szemcse aerodinamikai, geometriai, tömeg és sűrűség jellemzőjét mértem meg. A vizsgálatokhoz a Géptani Tanszéken rendelkezésre álló illetve az általam fejlesztett mérőeszközöket használtam. Műtrágyaszemcsék légellenállási tényezőjének méréséhez új, folyadékös ejtőcsöves módszert dolgoztam ki, amely egyszerűbb, olcsóbb és pontosabb mint a korábbi módszerek. Ömlesztett anyagok térfogat-és sűrűség méréséhez kiterjesztettem a Mester-Sitkei féle légpiknométer alkalmazását.

A hazai gyakorlatban gyakran használt ötféle műtrágya fontos halmaz tulajdonságait (nedvességtartalom, szítás mérettartományok, sűrűség, térfogattömeg, porozitás, felületi súrlódás, rézsűszög, belső súrlódás) meghatároztam és elemeztem. A röpitőtárcsán

kialakuló szemcsemozgás körülményeinek megfelelő terhelés mellett az elmozdulás illetve a terhelés függvényében határoztam meg a súrlódási paramétereket.

Az általam vizsgált műtrágyák egyes fizikai tulajdonságait (méret, tömeg, elutriátoros lebegtetési sebesség) 250 elemű mintákon szemcsénként mértem meg. Az adatokból többek között szemcsénként határoztam meg a sűrűséget és a légellenállási tényezőt. A mért paraméterek közül a C_D alaktényező jól korrelál a gömbalakúsággal. Bizonyítottam, hogy a repítési távolság jó gömbalakúságú műtrágyák esetén típustól függetlenül a szemcseátmérő reciprokával arányosan csökken. Pályaszimulációkkal igazoltam, hogy hasonló alaktényezőjű szemcsék esetén a szemcse méret reciprokának a logaritmus - igen széles mérettartományban - másodfokú függvény szerint adja a repítési távolságot. Az eredmények biztatóak abból a szempontból, hogy a precíziós szántóföldi alkalmazásoknál a repülő szemcsék méretéből és sebességéből - ballisztikai számítás nélkül - azonnal jósolható lesz a becsapódási hely. A számítások szerint a műtrágyák fizikai tulajdonságaitól függ a várható szórás kép egyenletessége. Értelmeztem a különböző műtrágyák eltérő szórás képére vonatkozó becsléseket, így az összetett műtrágya nagyobb szórás egyenlőtlenségét. Igazoltam, hogy a szokásos konstrukciókhoz képest a leválási sebesség, a tárcsa helyzet vagy a kúpszög további növelésével a repítési távolság nem növelhető ésszerű mértékben.

A vizsgálatok során nyert nagyszámú adat és a szórás képek elemzése támpontokat ad az elérhető kijuttatási pontosságra, esetleg a műtrágya előállításának és a röpitőtárcsás műtrágyaszóró gyártási technológiájának javítására.

Köszönetnyilvánítás

Hálás köszönetemet fejezem ki Dr. Csizmazia Zoltán professzor úrnak gondos és figyelmes témavezetéséért, tanácsaiért és segítségéért.

Köszönöm Dr. Grasselli Gábor tanszékvezető egyetemi docens úr támogatását és sürgető szavait, amellyel a dolgozat elkészülését elősegítette.

Külön köszönöm kedves kollégáim, Nagyné Dr. Polyák Ilona, Dr. Hagymási Zoltán, Ancza Erzsébet és Nyilas Erzsébet valamint a műszaki személyzet önzetlen segítségét és támogatását.

Hálásan köszönöm Dr. Balássy Zoltán professzor úrnak a dolgozat jobbításához adott igen értékes útmutatásait és tanácsait.

Végül, de nem utolsósorban köszönöm családom megértését, türelmét és szeretetét.

7. HIVATKOZÁSOK

1. ALLAIRE, S. E. & PARENT, L. E. (2003). Size guide number and Rosin-Rammler approaches to describe particle size distribution of granular organic-based fertilisers. *Biosystems Engineering* **86**, 503-509.
2. ALLAIRE, S. E. & PARENT, L. E. (2004a). Physical properties of granular organic-based fertilisers, part 1: Static properties. *Biosystems Engineering* **87**, 79-87.
3. ALLAIRE, S. E. & PARENT, L. E. (2004b). Physical properties of granular organic-based fertilisers, part 2: Dynamic properties related to water. *Biosystems Engineering* **87**, 225-236.
4. ANCZA, B. E. & CSIZMAZIA, Z. (2002). SULKY DPX expert műtrágyaszóró gép. *Agrofórum* **13. évf. 10. sz.**, 64-66.
5. ANTHONIS, J. & RAMON, H. (2003). Linear mechanical systems and dyadic transfer function matrices. *Automatica* **39**, 1353-1363.
6. ANTHONIS, J., STRUBBE, G., MAERTENS, K., DE BAERDEMAEKER, J. & RAMON, H. (2003). Design of a friction independent mass flow sensor by force measurement on a circular chute. *Biosystems Engineering* **84**, 127-135.
7. AOAC. (1995). Official methods of analysis of AOAC International. In *AOAC, Methods 965.08 and 950.01*, Gaithersburg, MD, USA.
8. APHALE, A., BOLANDER, N., PARK, J., SHAW, L., SVEC, J. & WASSGREN, C. (2003). Granular fertiliser particle dynamics on and off a spinner spreader. *Biosystems Engineering* **85**, 319-329.
9. ASAE STANDARDS. (2000). Cubes, pellets, and crumbles. Definitions and methods for determining density, durability, and moisture content. In *ASAE Method S319.3*, St Joseph, MI, USA.
10. BALÁSSY, Z. (1988a). Triaxiális törési és nyíródobozos nyírási mérések búzamaghalmon I. *Járművek, Mezőgazdasági Gépek* **35.**, 218-221.
11. BALÁSSY, Z. (1988b). Triaxiális törési és nyíródobozos nyírási mérések búzamaghalmon II. *Járművek, Mezőgazdasági Gépek* **35.**, 261-264.
12. BALÁSSY, Z. (1989). Mérés a búzamag és síkűveg közötti súrlódási tényezőnek és a súrlódási faktornak a meghatározására. *Járművek, Mezőgazdasági Gépek* **36**, 371-374.
13. BALÁSSY, Z. (1991). Repcemag- és napraforgómagtömeg csúsztatása a súrlódási faktor meghatározására. *Járművek, Mezőgazdasági Gépek* **38**, 29-31.
14. BANSAL, R. K., WALKER, J. T., GARDISSER, D. R. & GRIFT, T. E. (1998). Validating fluent for the flow of granular materials in aerial spreaders. *Transactions of the Asae* **41**, 29-35.
15. BLAKE, G. R. & HARTGE, K. H. (1986). Particle density. In *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods Agronomy*, no. 9 (ed. A. Klute), pp. 377-382. American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
16. BRÜBACH, M. & GÖHLICH, H. (1973). Effect of physical properties of fertilizer on the distribution. *Landtechnik* **9/10**, 282-292.
17. BRUBAKER, J. E. & POS, J. (1965). Determining static coefficients of friction of grains on structural surfaces. *Transactions of the ASAE* **8**, 53-55.
18. CANADIAN FERTILIZER INSTITUTE. (2001). *Bulk Blend. Quality Control Manual.*, Ontario, Canada.
19. CHANG, C. (1988). Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer. *Cereal Chemistry* **Vol. 65. No (1)**, 13-15.

20. CSIZMADIA, B. & BALLÓ, B. (1988). Új mérőberendezés szemcsés halmazok súrlódási tulajdonságainak meghatározására. *MTA ABM Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő* **3**, 274-280.
21. CSIZMAZIA, Z. (1968). *Röpítőtarcsás műtrágyaszórógépek szórás egyenletességét befolyásoló tényezők vizsgálata*", Doktori értekezés, GATE, Gödöllő.
22. CSIZMAZIA, Z. (1993). Technical conditions of equalized fertilizer application. *Hungarian Agricultural Research* **No. 4.**, 16-22.
23. 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.
24. CSIZMAZIA, Z. & DEMES, G. (1990). TORNADO 1300 Új hazai műtrágyaszóró. *Mezőgazdasági Technika*, 6-7.
25. CSIZMAZIA, Z., KASZA, F. & POLYÁK, N. I. (1994). The determination of physical characteristics of seeds for the construction of seeding. *Hungarian Agricultural Engineering* **7**, 63-66.
26. CSIZMAZIA, Z. & KÖKUTI, A. (2001). KUHN-RAUCH MDS 921 műtrágyaszóró. *Gyakorlati Agroforum* **12. évf. 8. sz.**, 70-73.
27. CSIZMAZIA, Z., LAJOS, T., MARSHALL, J. & POLYÁK, N. I. (2000). Új rendszerű légszóró fejlesztése. *Mezőgazdasági Technika*, 2-5.
28. CUNNINGHAM, F. M. (1963). Performance characteristics of bulk spreaders for granular fertilizer. *Transactions of the ASAE* **6(2)**, 108-114.
29. CUNNINGHAM, F. M. & CHAO, E. Y. S. (1967). Design relationships for centrifugal fertilizer distributors. *Transactions of the ASAE* **10**, 91-95.
30. DE BAERDEMAEKER, J., MUNACK, A., RAMON, H. & SPECKMANN, H. (2001). Mechatronic systems, communication, and control in precision agriculture. *Ieee Control Systems Magazine* **21**, 48-+.
31. DINTWA, E., TIJSKENS, E., OLIESLAGERS, R., DE BAERDEMAEKER, J. & RAMON, H. (2004a). Calibration of a spinning disc spreader simulation model for accurate site-specific fertiliser application. *Biosystems Engineering* **88**, 49-62.
32. DINTWA, E., VAN LIEDEKERKE, P., OLIESLAGERS, R., TIJSKENS, E. & RAMON, H. (2004b). Model for simulation of particle flow on a centrifugal fertiliser spreader. *Biosystems Engineering* **87 (4)**, 407-415.
33. DOBLER, K. & FLATOW, J. (1968). Calculation of particle trajectories, forced by a centrifugal spreader. *Grundlagen der Landtechnik* **18**, 129-164.
34. EUROPEAN BLENDERS ASSOCIATION. (1997). *Handbook of Solid Fertiliser Blending. Code of Good Practices for Quality*, Le Pontoury, 50530 Montvion, France.
35. FANG, C. & CAMPBELL, G. (2000). Effect of measurement method and moisture content on wheat kernel density measurement. *Food and Bioproducts Processing* **Vol. 78., No (C4)**, 179-186.
36. GOENSE, D., HOFSTEE, J. W. & VANBERGEIJK, J. (1996). An information model to describe systems for spatially variable field operations. *Computers and Electronics in Agriculture* **14**, 197-214.
37. GORIAL, B. Y. & OCALLAGHAN, J. R. (1990). Aerodynamic Properties of Grain Straw Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* **46**, 275-290.
38. GRIFFIS, C. L., RITTER, D. W. & MATTHEWS, E. J. (1983). Simulation of Rotary Spreader Distribution Patterns. *Transactions of the Asae* **26**, 33-37.
39. GRIFT, T. (2003). Fundamental mass flow measurement of solid particles. *Particulate Science and Technology* **21**, 177-193.

40. GRIFT, T. E. (2000). Spread pattern analysis tool (SPAT): I. Development and theoretical examples. *Transactions of the Asae* **43**, 1341-1350.
41. GRIFT, T. E. (2001). Mass flow measurement of granular materials in aerial application - Part 1: Simulation and modeling. *Transactions of the Asae* **44**, 19-26.
42. GRIFT, T. E. & HOFSTEE, J. W. (1997a). Development of a fertilizer particle accelerator. *Journal of Agricultural Engineering Research* **66**, 229-233.
43. GRIFT, T. E. & HOFSTEE, J. W. (1997b). Measurement of velocity and diameter of individual fertilizer particles by an optical method. *Journal of Agricultural Engineering Research* **66**, 235-238.
44. GRIFT, T. E. & HOFSTEE, J. W. (2002). Testing an online spread pattern determination sensor on a broadcast fertilizer spreader. *Transactions of the Asae* **45**, 561-567.
45. GRIFT, T. E., WALKER, J. T. & GARDISSER, D. R. (2000). Spread pattern analysis tool (SPAT): II. Examples of aircraft pattern analysis. *Transactions of the Asae* **43**, 1351-1363.
46. GRIFT, T. E., WALKER, J. T. & HOFSTEE, J. W. (1997). Aerodynamic properties of individual fertilizer particles. *Transactions of the Asae* **40**, 13-20.
47. GRIFT, T. E., WALKER, J. T. & HOFSTEE, J. W. (2001). Mass flow measurement of granular materials in aerial application - Part 2: Experimental model validation. *Transactions of the Asae* **44**, 27-34.
48. GUNDLACH, B. L., NIJKRAKE, H. G. M. & HAUTVAST, J. G. A. J. (1980). A rapid and simplified plethysmometric method for measuring body volume. *Human Biology* **52**, 23-33.
49. GUPTA, R. K. & PRAKASH, S. (1992). The effect of seed moisture content on the physical properties of JSF-1 sanflower. *Journal of Oilseed Research* **9**, 209-216.
50. GYIMES, E. (2003). *Összefüggésvizsgálatok búzafajták agrofizikai tulajdonságai között. Doktori (Ph. D.) értekezés*, Mosonmagyaróvár.
51. HENDERSON, S. M. & PERRY, R. L. (1976). Aerodynamics of small particles, pp. 174-179. Westport: AVI Publishing Company.
52. HENNENS, D., BAERT, J., BROOS, B., RAMON, H. & DE BAERDEMAEKER, J. (2003). Development of a flow model for the design of a momentum type beet mass flow sensor. *Biosystems Engineering* **85**, 425-436.
53. HIGNETT, T. P. (1985). Fertilizer Manual. In *Developments in Plant and Soil Sciences*, vol. 15 (ed. M. Nijhoff and W. Junk), pp. 284-316. Publishers for the International Fertilizer Development Center, Dordrecht.
54. HOFFMEISTER, G. (1979). Physical properties of fertilizers and methods for measuring them. *Bulletin Y-147*.
55. HOFFMEISTER, G., WATKINS, S. C. & SILVERBERG, J. (1964). Bulk blending of fertilizer material: effect of size, shape and density on segregation. *Agricultural and food chemistry* **12**, 64-69.
56. HOFSTEE, J. W. (1992). Handling and Spreading of Fertilizers .2. Physical-Properties of Fertilizer, Measuring Methods and Data. *Journal of Agricultural Engineering Research* **53**, 141-162.
57. HOFSTEE, J. W. (1994). Handling and Spreading of Fertilizers .3. Measurement of Particle Velocities and Directions with Ultrasonic Transducers, Theory, Measurement System, and Experimental Arrangements. *Journal of Agricultural Engineering Research* **58**, 1-16.

58. HOFSTEE, J. W. (1995a). Handling and Spreading of Fertilizers .4. The Reciprocating Spout Type Fertilizer Spreader. *Journal of Agricultural Engineering Research* **62**, 9-24.
59. HOFSTEE, J. W. (1995b). Handling and Spreading of Fertilizers .5. The Spinning Disc Type Fertilizer Spreader. *Journal of Agricultural Engineering Research* **62**, 143-162.
60. HOFSTEE, J. W. & GOENSE, D. (1997). Simulation of a CAN-based tractor-implement field bus according to DIN 9684. *Journal of Agricultural Engineering Research* **68**, 89-100.
61. HOFSTEE, J. W. & GOENSE, D. (1999). Simulation of a controller area network-based tractor - Implement data bus according to ISO 11783. *Journal of Agricultural Engineering Research* **73**, 383-394.
62. HOFSTEE, J. W. & HUISMAN, W. (1990). Handling and Spreading of Fertilizers .1. Physical-Properties of Fertilizer in Relation to Particle Motion. *Journal of Agricultural Engineering Research* **47**, 213-234.
63. HOLLMANN, W. (1962). Research on the distribution of fertilizer by a spinning disc fertilizer distributor. Dissertation thesis, TU.
64. HUISMAN, W. (1978). Moisture content, coefficient of friction and modulus of elasticity of straw in relation to walker losses in a combine harvester. *American Society of Agricultural Engineers publication*, 25-29.
65. INNS, F. M. & REECE, A. R. (1962). The theory of the centrifugal distributor II: Motion on the disc, off-centre feed. *Journal of Agricultural Engineering Research* **7** (4), 345-353.
66. ISO. (1984). Fertilisers and soil conditioners. International Organization for standardization. In *Central Secretariat, Geneva* 20, Switzerland.
67. KÁRMÁN, T. & BIOT, M. A. (1967). *Matematikai módszerek műszaki feladatok megoldására*. Műszaki Könyvkiadó, 2. kiadás, 172-177. old, Budapest.
68. KECK, H. & GOSS, J. R. (1965). Determining aerodynamic drag and terminal velocities of agronomic seeds in free fall. *Transactions of the ASAE* **8**, 553-557.
69. LAPPLE, C. F. (1951). *Fluid and Particle Mechanics*. University of Delaware Press, USA.
70. LAW, S. E. & COLLIER, J. A. (1973). Aerodynamic resistance coefficients of agricultural particulates determined by elutriation. *Transactions of the ASAE* **16**, 918-922.
71. MÁTÉ, A. & JOLÁNKAI, M. (2001). Tápanyagellátás, tápanyag-vizsopótlás a növénytermesztésben. *Gyakorlati Agrofórum* **12**, 3-5.
72. MENNEL, R. M. & REECE, A. R. (1963). The theory of the centrifugal distributor III: particle trajectories. *Journal of Agricultural Engineering Research* **8**, 78-84.
73. MOHSENIN, N. N. (1968). *Physical properties of plant and animal materials*. Gordon and Breach Science Publishers, New York.
74. MOSHOU, D., DEPREZ, K. & RAMON, H. (2004). Prediction of spreading processes using a supervised Self-Organizing Map. *Mathematics and Computers in Simulation* **65**, 77-85.
75. MOSHOU, D., WAHLEN, S., STRASSER, R., SCHENK, A. & RAMON, H. (2003). Apple mealiness detection using fluorescence and self-organising maps. *Computers and Electronics in Agriculture* **40**, 103-114.
76. NEMÉNYI, M. (1993). *Energetikai és biológiai szempontok a kukorica hibridek mesterséges szárításánál*. Akadémiai doktori értekezés, Mosonmagyaróvár.

77. NEMÉNYI, M., MESTERHÁZI, P. & GYULAI, I. (2001a). Kemikáliák helyspecifikus kijuttatásának műszaki feltételrendszere az agrárgazdaságban, különös tekintettel a környezetvédelemre. In *II. Környezettudományi Tanácskozás Előadásai*, Győr.
78. NEMÉNYI, M., PECZE, Z., MESTERHÁZI, P. Á. & NÉMETH, T. (2001b). A precíziós helyspecifikus növénytermesztés műszaki és térinformatikai feltételrendszere. *Növénytermelés* Tom. 50. **No.4.**, 419-430.
79. OLAOYE, J. O. (2000). Some physical properties of castor nut relevant to the desing of processing equipment. *Journal of Agricultural Engineering Research* **77**, 113-118.
80. OLIESLAGERS, R., RAMON, H. & DEBAERDEMAEKER, J. (1996). Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model. *Journal of Agricultural Engineering Research* **63**, 137-152.
81. PATTERSON, D. E. & REECE, A. R. (1962). The theory of the centrifugal distributor I: Motion on the disc, near-centre feed. *Journal of Agricultural Engineering Research* **7**, 232-240.
82. PERFECT, E., XU, Q. & TERRY, D. L. (1998). Improved parameterization of fertiliser particle size distribution. *Journal of Association of Official Analytical Chemists* **81**, 935-942.
83. PERSSON, K. (1996). Interactions between fertilisers and spreaders. *The International Fertiliser Society, Proceedings* **389**.
84. PITT, R. E., FARMER, G. S. & WALKER, L. P. (1982). Approximating Equations for Rotary Distributor Spread Patterns. *Transactions of the Asae* **25**, 1544-1552.
85. POLYÁK, N. I. (2001). *Búza vetőmag fizikai jellemzői. Doktori (Ph. D.) értekezés*, Debrecen.
86. POLYÁK, N. I. & CSIZMAZIA, Z. (2003). The physical characteristics of fertiliser particles. XXX CIOSTA-CIGR V Congress, Turin, Management and technology applications to empower agro-food systems. ISBN 88-88854-09-6. 759-766. p.
87. PONOMARJOV, K. K. (1969). *Differenciálegyenletek felállítása és megoldása*. Tankönyvkiadó, Budapest.
88. REINTS, R. E. J. & YOERGER, R. R. (1967). Trajectories of seeds and granular fertilizers. *Transactions of the ASAE* **10**, 213 - 216.
89. REUMERS, J., TIJSKENS, E. & RAMON, H. (2003a). Experimental characterisation of the cylindrical distribution pattern of centrifugal fertiliser spreaders: towards an alternative for spreading hall measurements. *Biosystems Engineering* **86**, 431-439.
90. REUMERS, J., TIJSKENS, E. & RAMON, H. (2003b). Experimental characterisation of the tangential and cylindrical fertiliser distribution pattern from a spinning disc: A parameter study. *Biosystems Engineering* **86**, 327-337.
91. SEELAN, S. K., LAGUETTE, S., CASADY, G. M. & SEIELSTAD, G. A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment* **88**, 157-169.
92. SINGH, K. K. & GOSWAMI, T. K. (1996). Physical properties of cumin seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research* **64**, 93-98.
93. SITKEI, G. (1981). *Mezőgazdasági anyagok mechanikája*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
94. SOLEYMANGOLI, A. (1998). *"Applying computer simulation and experiments to figure out at optimal distribution pattern of spinning disc fertilizer spreader"*, Ph.D. dissertation, GATE, Gödöllő.

95. SOÓS, P. (1998). *Matematikai és mechanikai módszerek alkalmazása válogatott mezőgazdasági gépszerkezettani problémák megoldásához*. GATE, Gödöllő.
96. SOÓS, P., SZÜLE, Z. & PETRÓCZKI, K. (1996). Műtrágyaszemcse mozgása nehézségi erő és légellenállás hatása alatt (ballisztikus probléma). *Járművek, Építőipari és Mezőgazdasági Gépek* **43**, 144-147.
97. SZABÓ, Z., CSURY, I. & HIDEGKÚTI, G. (1987). *Élelmiszeripari műveletek és gépek*. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
98. TIJSKENS, E., RAMON, H. & DE BAERDEMAEKER, J. (2003). Discrete element modelling for process simulation in agriculture. *Journal of Sound and Vibration* **266**, 493-514.
99. TIJSKENS, E., ROOSE, D., RAMON, H. & DE BAERDEMAEKER, J. (2002). Automatic differentiation for solving nonlinear partial differential equations: An efficient operator overloading approach. *Numerical Algorithms* **30**, 259-301.
100. TIMOSHENKO, S. & YOUNG, D. H. (1948). *Advanced Dynamics*. McGraw-Hill Book, New York.
101. VAN LIEDEKERKE, P. (2003). Personal communication.
102. VAN STAeyEN, K., TIJSKENS, E. & RAMON, H. (2003). A multibody dynamic approach for colliding particles. *Journal of Sound and Vibration* **266**, 481-491.
103. VON ZABELTITZ, C. (1967). Equations for resistance values to compute flow resistance for spheres and bulk layers. *Grundlagen Landtechnik* **17**, 148-154.
104. WALKER, J. T., GRIFT, T. E. & HOFSTEE, J. W. (1997). Determining effects of fertilizer particle shape on aerodynamic properties. *Transactions of the Asae* **40**, 21-27.

8. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓI

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 sűrűlőási viszonyainak vizsgálata. Georgikon Napok. Keszthely. 1136-1139.p.
3. Ancza B.E. - Csizmazia Z. – **Gindert-Kele Á.** - Hagymássy Z. (2002) Műtrágyaszemcsék sűrűlődása különböző felületeken. Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 127-131.p.
4. Hagymássy Z. - Csizmazia Z. – **Gindert-Kele Á.** - Ancza B.E. (2002) Műtrágyaszemcsék belső sűrűlődása. 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 sűrűlőási jellemzői, Kutatási és Fejlesztési Tanácskozás. Gödöllő. 3. kötet 46-50. p.

15. **Gindert-Kele Á.** (2003) Valós szóráskép 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 szórásképének 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.

9. MELLÉKLETEK

M1. melléklet

A 11. oldalon található 2.3 egyenlet C együtthatói:

$$C_a = \frac{1}{\cos \alpha} \left[\frac{r^3 - 2rr_p^2}{\sqrt{(r^2 - r_p^2)^3}} \right] \quad (9.1)$$

$$C_b = \frac{1}{\cos \alpha} \frac{(3r^2 - 2r_p^2)(r^2 - r_p^2) - 3r(r^3 - 2rr_p^2)}{\sqrt{(r^2 - r_p^2)^5}} \quad (9.2)$$

$$C_c = 2\mu_v \omega \cos \alpha C_a \quad (9.3)$$

$$C_d = (\mu_d \sin \alpha - \cos \alpha \cos \beta - \mu_v \sin \beta) \omega^2 \quad (9.4)$$

$$C_e = (\sin \alpha \cos \beta + \mu_v \sin \alpha \sin \beta + \mu_d \cos \alpha) g \quad (9.5)$$

kúpos tárcsa esetén α és α_d szögek közötti összefüggés:

$$\alpha = \arctan \left[\frac{(R - \sqrt{x_v^2 + r_p^2}) \tan \alpha_d}{\sqrt{R^2 - r_p^2} - x_v} \right] \quad (9.6)$$

ahol: α : a *nem* sugárirányú lapát és a vízszintes által bezárt szög,

α_d : a tárcsa emelkedési szöge

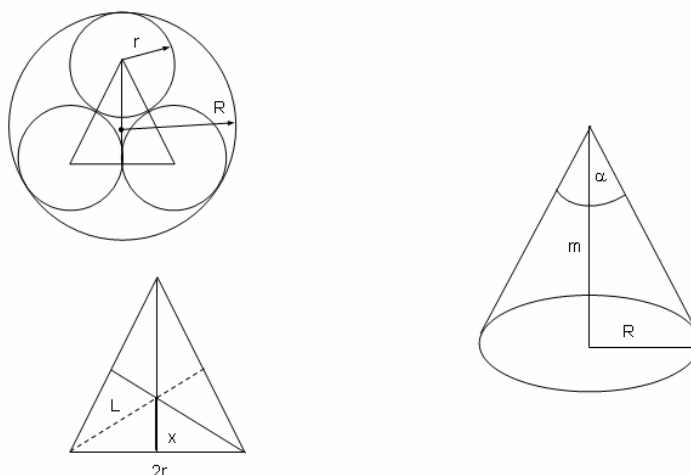
β : a lapát és a tárcsa sugara által bezárt szög,

r_p : a lapátelfordításnak megfelelő kör sugara,

R : a tárcsa sugara,

x_v : a lapát távolsága a tárcsa középpontján átfektetett síktól, a lapát síkjára merőlegesen mérve.

Az ömlesztett anyagok elméleti porozitásának számítása négygömbös modell alapján



M2.1. ábra Geometriai vázlat a porozitás számításához

Igazolható (Antonov, Matematikai Feladatok, 1965), hogy három érintkező gömbre helyezett negyedik gömb köré írt kúp kúpszöge $\alpha = \arccos(1/3) = 70.5^\circ$. Egy ilyen kúpszögű kúpban elhelyezett érintkező négy gömb geometriai számításaim alapján $\Phi \cong 0.52$ porozitás értéket ad a térfogati porozitás $\Phi = 1 - V_{\text{gömbök}} / V_{\text{kúp}}$ definíciója szerint.

Bizonyítás:

Legyen r : a gömbök sugara

α : a befoglaló kúp kúpszöge

R_v : a befoglaló kúp alapjának valódi sugara

R : a három alsó gömb által érintett kör sugara ($R < R_v$)

A három alsó gömb középpontja mind $2r$ távolságra van egymástól. Az így kifeszített egyenlő ($2r$) oldalú háromszög L magassága:

$$L = r \cdot \tan(60^\circ)$$

Ezen háromszög súlypontjának a távolsága az alaptól:

$$x = r \operatorname{tg}(30^\circ)$$

$$\text{és így } R = r + L - x = r + r \operatorname{tg}(60^\circ) - r \operatorname{tg}(30^\circ) = r (1 + \operatorname{tg}(60^\circ) - \operatorname{tg}(30^\circ))$$

$$\text{tehát } R = 2.1547 r$$

Az R sugarú kúp m magassága:

$$m = R \cot(\alpha/2) = 1.4142 R = 3.0472 r$$

A befoglaló kúp m_v magassága ennél nagyobb:

$$m_v = m + r = 4.0472 r$$

A befoglaló kúp magassága úgy aránylik az R sugarú kúp magasságához, mint

$$R_v / R = m_v / m \quad \text{tehát} \quad R_v = R m_v / m = 2.8618 r$$

Így a befoglaló kúp térfogata:

$$V_{\text{kúp}} = R_v^2 \pi m_v / 3 = 34.7106 r^3$$

Míg a négy gömb együttes térfogata:

$$V_{4g} = 16/3 r^3 \pi = 16.7552 r^3$$

Tehát **igazoltam** a négygömbös modellre a porozitás értékét, ami ömlesztett anyagok esetén elméleti felső korlátot jelent hasonlóan szabályos elrendeződésekre.

$$\Phi = 1 - V_{4g} / V_{\text{kúp}} = 0.5173$$

Felületen történő súrlódás vizsgálata csúsztatókészülékkel

M3.1. melléklet

NPK 15-15-15 típusú műtrágya súrlódási együtthatói a terhelés függvényében „a” módszer										
Terhelés [N]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
111	0.21	0.42	0.18	0.23	0.22	0.24	0.27	0.25	0.16	0.17
172	0.21	0.37	0.14	0.21	0.23	0.26	0.27	0.26	0.16	0.16
295	0.21	0.34	0.15	0.18	0.24	0.26	0.25	0.26	0.15	0.16
417	0.22	0.31	0.15	0.18	0.23	0.26	0.25	0.25	0.13	0.17
540	0.22	0.29	0.16	0.16	0.24	0.25	0.24	0.26	0.12	0.18

Linzisó súrlódási együtthatói a terhelés függvényében „a” módszer										
Terhelés [N]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
69	0.55	0.60	0.44	0.46	0.50	0.61	0.46	0.45	0.39	0.47
94	0.43	0.59	0.34	0.32	0.42	0.49	0.40	0.33	0.29	0.39
167	0.38	0.55	0.29	0.29	0.34	0.44	0.37	0.27	0.22	0.34
290	0.35	0.56	0.29	0.29	0.30	0.40	0.36	0.23	0.16	0.30
413	0.35	0.56	0.28	0.28	0.30	0.45	0.35	0.22	0.14	0.31
535	0.34	0.54	0.29	0.29	0.30	0.43	0.35	0.27	0.13	0.30

M3.2. melléklet

Karbamid súrlódási együtthatói a terhelés függvényében „a” módszer										
Terhelés [N]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
65	0.13	0.24	0.21	0.23	0.24	0.28	0.23	0.48	0.11	0.23
90	0.15	0.26	0.21	0.19	0.21	0.28	0.20	0.38	0.08	0.19
163	0.19	0.28	0.23	0.21	0.22	0.25	0.20	0.29	0.09	0.15
286	0.20	0.33	0.23	0.23	0.25	0.30	0.22	0.26	0.08	0.13
408	0.22	0.35	0.26	0.23	0.26	0.32	0.24	0.25	0.08	0.13
531	0.23	0.38	0.27	0.23	0.28	0.33	0.25	0.29	0.09	0.13

Ammóniumnitrát súrlódási együtthatói a terhelés függvényében „a” módszer										
Terhelés [N]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
68	0.15	0.23	0.21	0.21	0.18	0.19	0.27	0.46	0.14	0.11
93	0.15	0.33	0.21	0.22	0.19	0.21	0.24	0.39	0.14	0.12
166	0.19	0.25	0.24	0.23	0.23	0.22	0.25	0.31	0.13	0.15
289	0.22	0.25	0.27	0.23	0.23	0.24	0.24	0.29	0.12	0.17
411	0.23	0.27	0.29	0.22	0.24	0.26	0.25	0.30	0.10	0.19
534	0.24	0.28	0.31	0.22	0.25	0.27	0.26	0.31	0.10	0.20

M3.3. melléklet

Kálisó súrlódási együtthatói a terhelés függvényében „a” módszer										
Terhelés [N]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
69	0.20	0.39	0.53	0.21	0.24	0.29	0.19	0.47	0.12	0.21
94	0.18	0.37	0.42	0.20	0.24	0.29	0.19	0.37	0.10	0.23
167	0.22	0.45	0.35	0.20	0.22	0.28	0.19	0.28	0.11	0.22
290	0.26	0.48	0.33	0.17	0.24	0.30	0.23	0.25	0.09	0.22
413	0.28	0.49	0.34	0.18	0.25	0.30	0.25	0.24	0.10	0.23
535	0.29	0.50	0.32	0.18	0.25	0.29	0.25	0.25	0.11	0.21

M3.4. melléklet

NPK 15-15-15 típusú műtrágya súrlódási faktorai az elmozdulás függvényében „b” módszer										
Elmozdulás [mm]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
5	0.125	0.270	0.116	0.061	0.172	0.203	0.144	0.174	0.130	0.102
10	0.211	0.335	0.152	0.153	0.231	0.246	0.245	0.291	0.145	0.179
15	0.218	0.319	0.152	0.149	0.235	0.248	0.248	0.280	0.135	0.175
20	0.216	0.309	0.155	0.157	0.234	0.256	0.245	0.271	0.133	0.177
25	0.219	0.306	0.158	0.159	0.237	0.256	0.242	0.263	0.130	0.174
30	0.221	0.296	0.153	0.166	0.246	0.254	0.244	0.258	0.129	0.183
35	0.224	0.286	0.159	0.176	0.243	0.259	0.245	0.250	0.128	0.175
40	0.225	0.287	0.159	0.181	0.249	0.269	0.239	0.245	0.126	0.183
45	0.226	0.278	0.159	0.187	0.248	0.264	0.244	0.245	0.122	0.177
50	0.223	0.273	0.158	0.195	0.248	0.269	0.242	0.242	0.118	0.180

Linzisó súrlódási faktorai az elmozdulás függvényében „b” módszer										
Elmozdulás [mm]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
5	0.202	0.276	0.202	0.197	0.228	0.252	0.236	0.224	0.138	0.174
10	0.260	0.512	0.236	0.254	0.275	0.377	0.316	0.255	0.125	0.264
15	0.283	0.538	0.258	0.270	0.280	0.395	0.324	0.253	0.126	0.276
20	0.306	0.562	0.266	0.271	0.282	0.412	0.336	0.237	0.123	0.285
25	0.317	0.559	0.263	0.276	0.286	0.408	0.337	0.236	0.126	0.290
30	0.337	0.524	0.287	0.290	0.291	0.432	0.362	0.245	0.123	0.299
35	0.358	0.530	0.307	0.277	0.300	0.434	0.342	0.248	0.127	0.309
40	0.385	0.510	0.283	0.301	0.301	0.449	0.364	0.252	0.131	0.323
45	0.389	0.534	0.283	0.311	0.310	0.453	0.346	0.240	0.113	0.333
50	0.407	0.539	0.279	0.310	0.305	0.477	0.334	0.234	0.104	0.324

M3.5. melléklet

Karbamid súrlódási faktori az elmozdulás függvényében „b” módszer										
Elmozdulás [mm]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
5	0.029	0.030	0.028	0.033	0.028	0.029	0.025	0.188	0.027	0.029
10	0.170	0.223	0.158	0.160	0.187	0.195	0.175	0.255	0.124	0.099
15	0.198	0.327	0.216	0.201	0.259	0.277	0.213	0.250	0.105	0.103
20	0.212	0.345	0.236	0.221	0.266	0.306	0.236	0.256	0.094	0.097
25	0.217	0.367	0.250	0.220	0.260	0.308	0.237	0.263	0.087	0.125
30	0.227	0.361	0.257	0.228	0.255	0.328	0.242	0.266	0.082	0.118
35	0.226	0.358	0.262	0.223	0.278	0.336	0.242	0.271	0.080	0.132
40	0.243	0.344	0.265	0.241	0.280	0.341	0.237	0.269	0.079	0.126
45	0.247	0.355	0.275	0.256	0.269	0.351	0.234	0.266	0.058	0.146
50	0.237	0.329	0.280	0.257	0.279	0.367	0.221	0.257	0.048	0.119

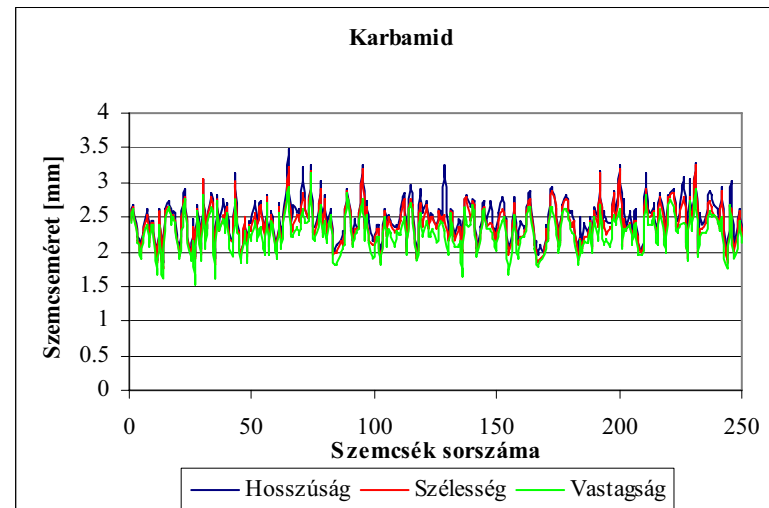
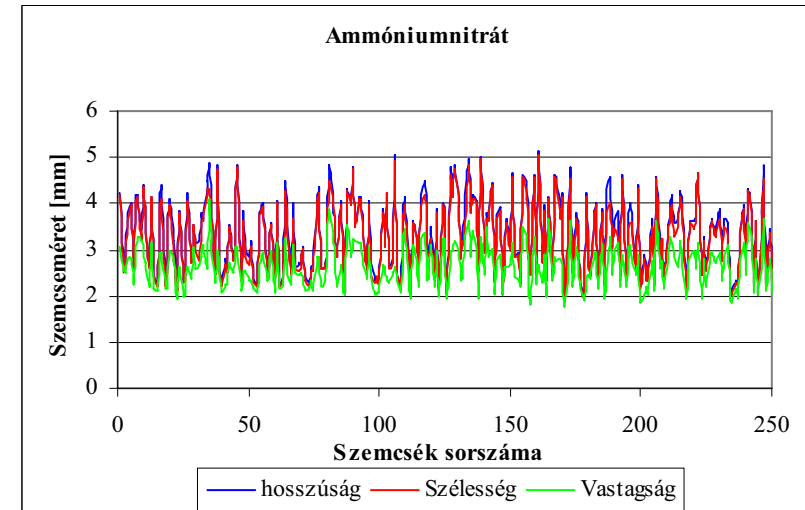
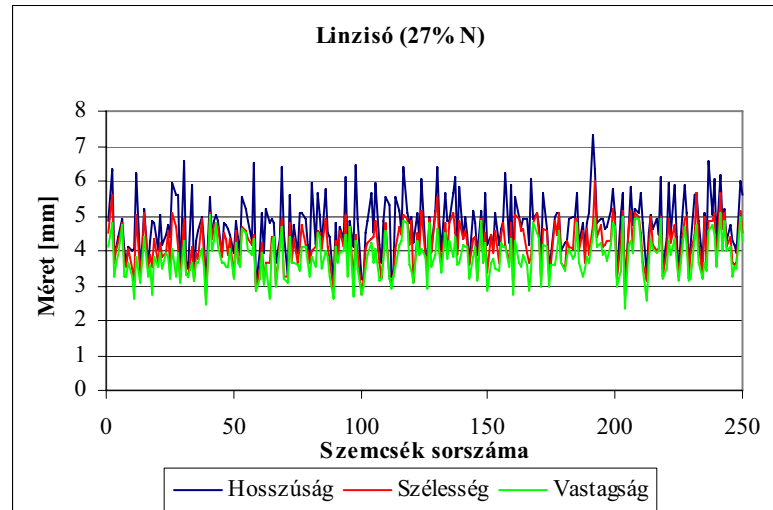
Ammóniumnitrát súrlódási faktori az elmozdulás függvényében „b” módszer										
Elmozdulás [mm]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
5	0.092	0.035	0.044	0.042	0.044	0.049	0.043	0.188	0.041	0.041
10	0.190	0.194	0.219	0.175	0.203	0.195	0.195	0.253	0.122	0.147
15	0.213	0.250	0.271	0.209	0.240	0.236	0.228	0.264	0.112	0.181
20	0.223	0.267	0.288	0.210	0.244	0.247	0.236	0.280	0.108	0.187
25	0.227	0.269	0.300	0.219	0.246	0.257	0.245	0.285	0.104	0.192
30	0.232	0.278	0.301	0.219	0.246	0.266	0.250	0.294	0.101	0.197
35	0.238	0.265	0.310	0.229	0.252	0.270	0.247	0.306	0.100	0.198
40	0.244	0.251	0.287	0.230	0.244	0.275	0.253	0.309	0.098	0.202
45	0.252	0.266	0.300	0.239	0.241	0.269	0.248	0.310	0.077	0.203
50	0.250	0.254	0.297	0.233	0.236	0.264	0.228	0.305	0.068	0.189

M3.6. melléklet

Kálisó súrlódási faktora az elmozdulás függvényében „b” módszer										
Elmozdulás [mm]	Felületek									
	Rozsdamen- tes acél	Fekete acél	Bakelit	Plexi	Horgany- zott acél	Alumíni- um	PVC	Rétegelt fa	Teflon	Üveg
5	0.029	0.030	0.190	0.033	0.029	0.029	0.025	0.200	0.027	0.026
10	0.209	0.272	0.268	0.131	0.212	0.202	0.175	0.242	0.122	0.148
15	0.251	0.464	0.277	0.155	0.253	0.262	0.220	0.239	0.111	0.193
20	0.270	0.496	0.303	0.160	0.248	0.270	0.233	0.235	0.108	0.215
25	0.277	0.498	0.309	0.168	0.247	0.279	0.241	0.234	0.104	0.199
30	0.281	0.500	0.317	0.177	0.247	0.295	0.247	0.231	0.102	0.221
35	0.286	0.495	0.319	0.183	0.249	0.296	0.255	0.238	0.103	0.222
40	0.295	0.467	0.320	0.192	0.246	0.305	0.249	0.241	0.101	0.219
45	0.301	0.460	0.345	0.202	0.244	0.310	0.242	0.232	0.082	0.239
50	0.301	0.454	0.348	0.203	0.238	0.337	0.234	0.221	0.071	0.210

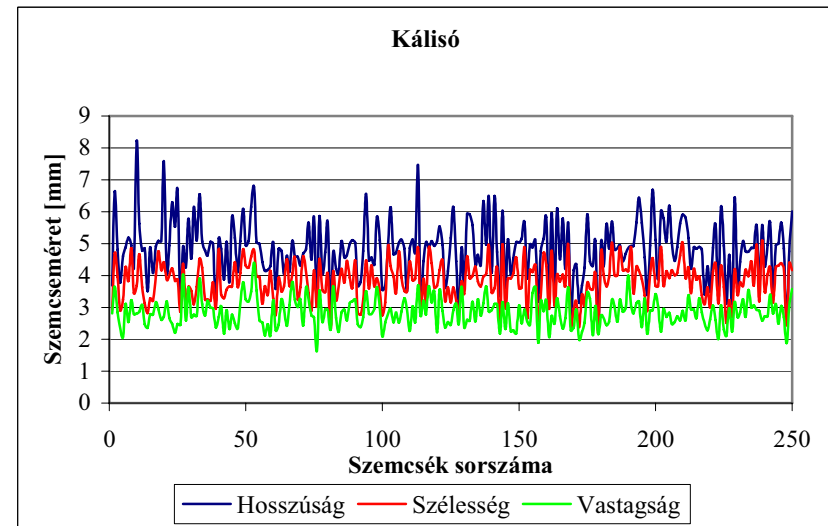
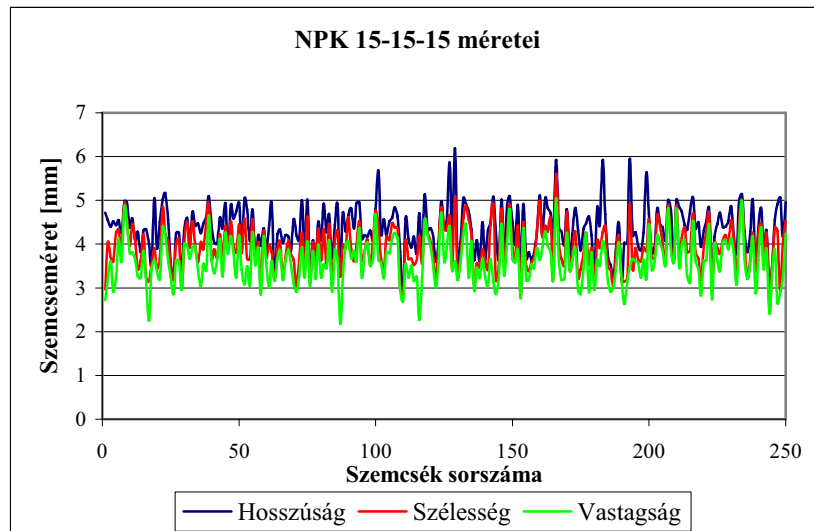
Szemcsénkénti méretek

M.4.1. melléklet



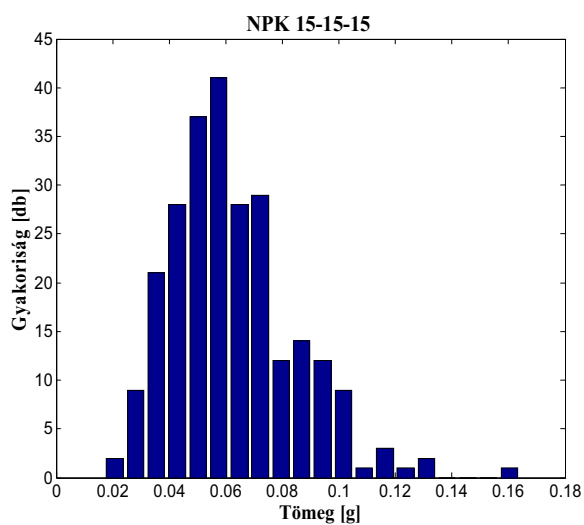
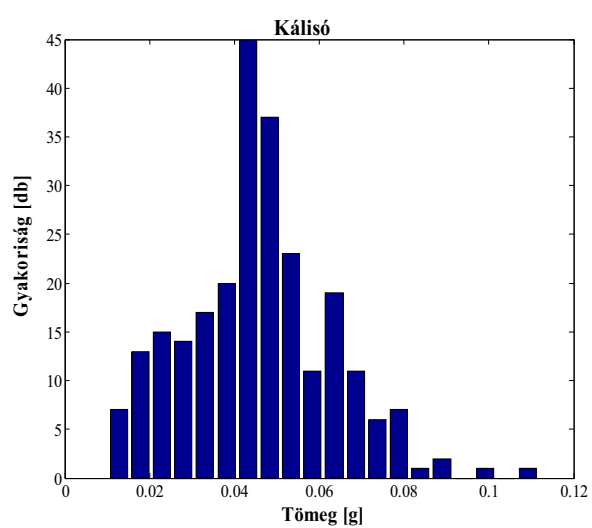
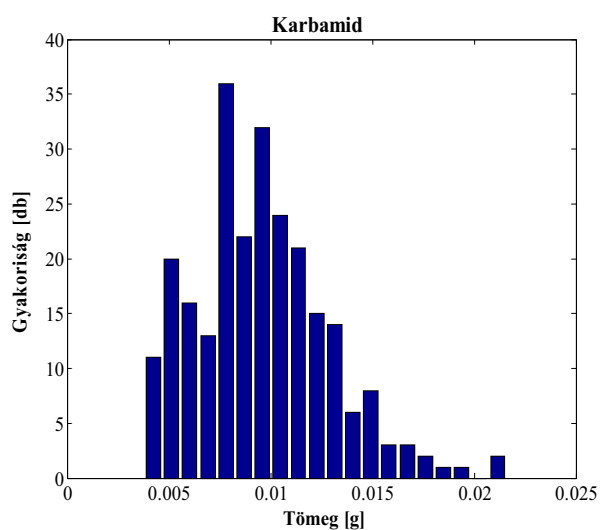
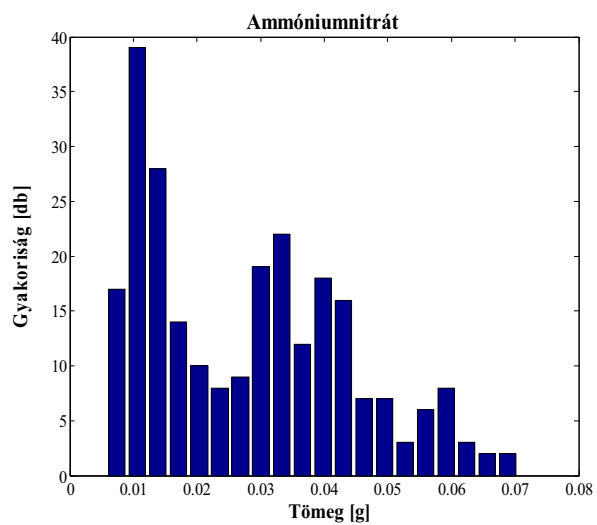
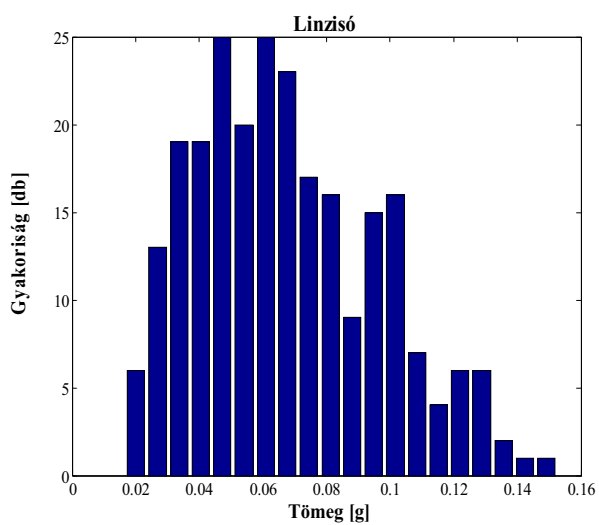
Szemcsénkénti méretek

M.4.2. melléklet

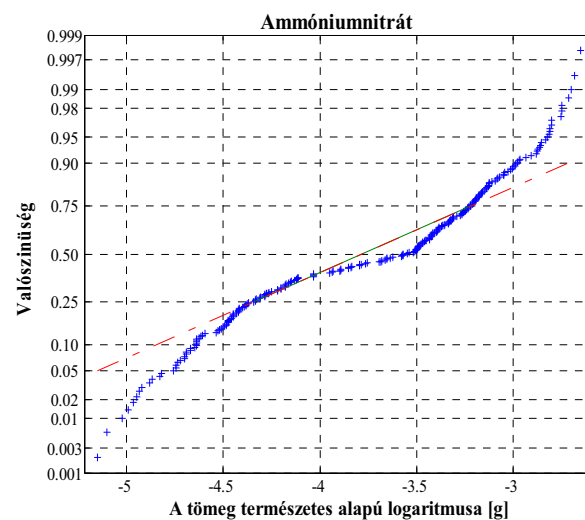
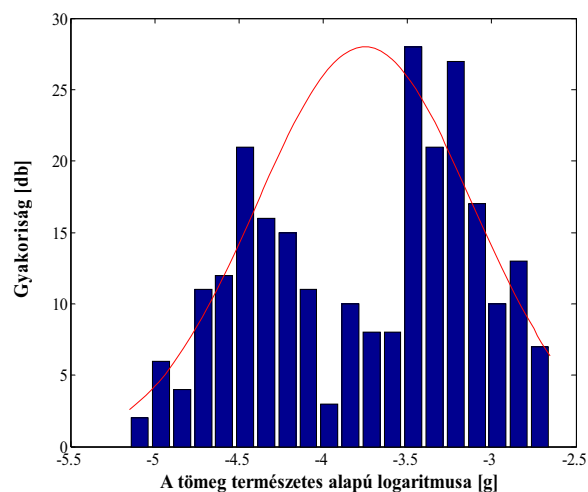
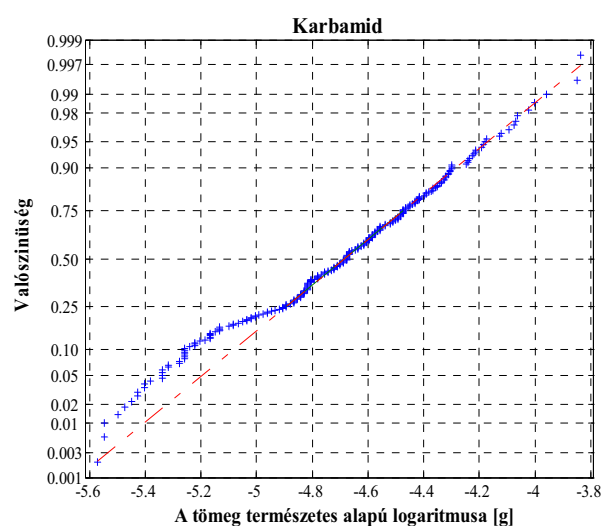
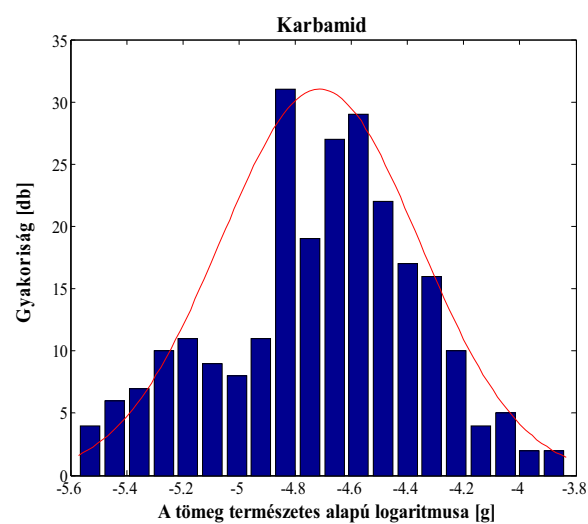
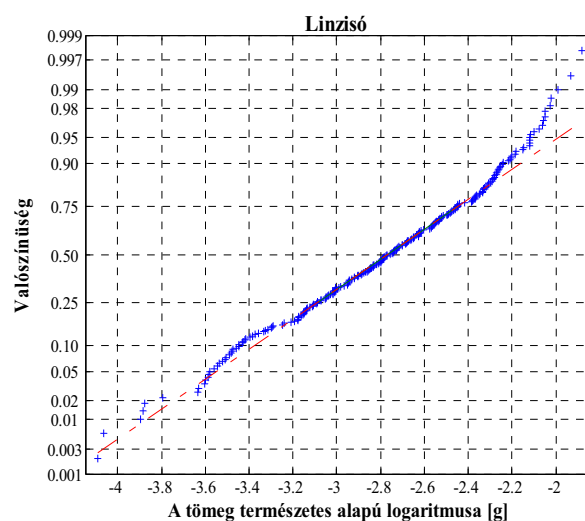
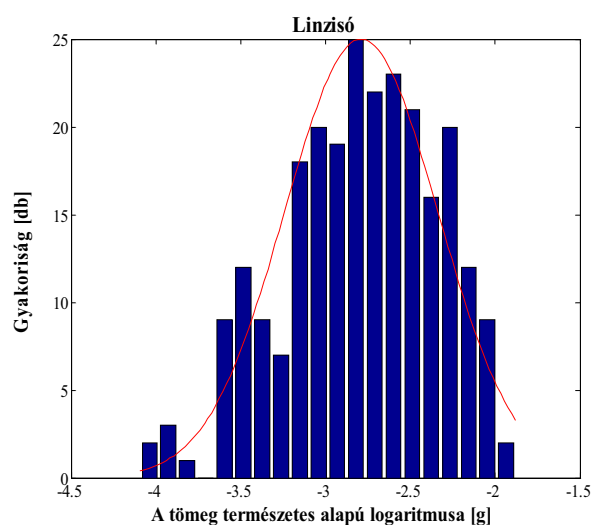


M.4.3. melléklet

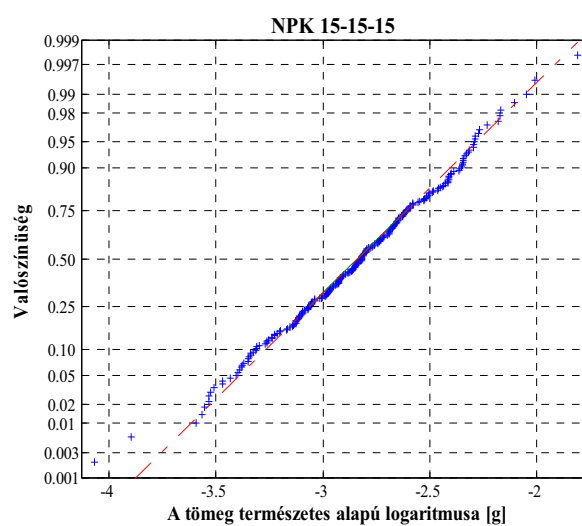
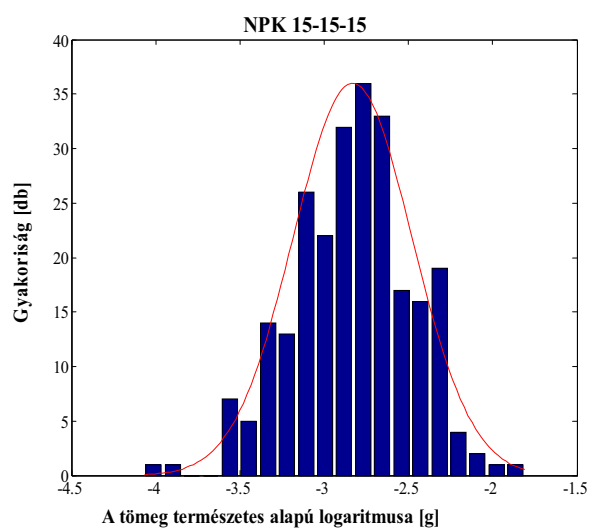
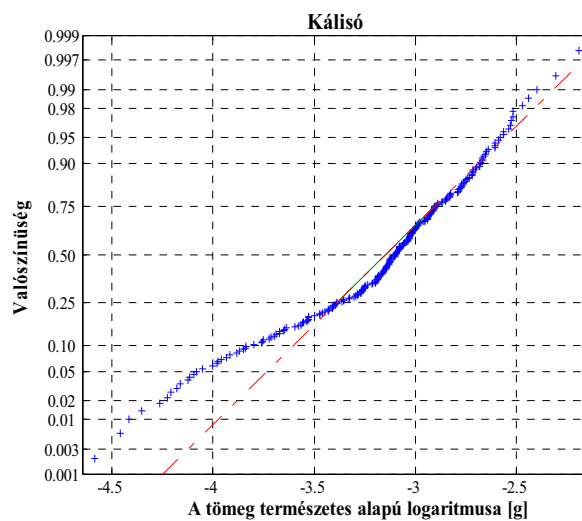
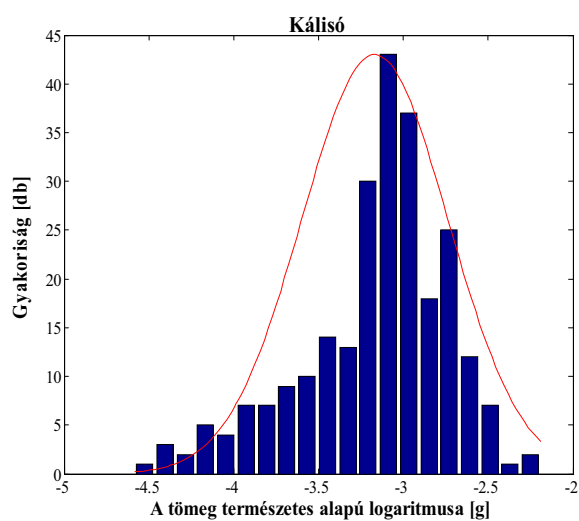
Szemcsénkénti tömegeloszlás



Tömegeloszlás és eloszlás teszt

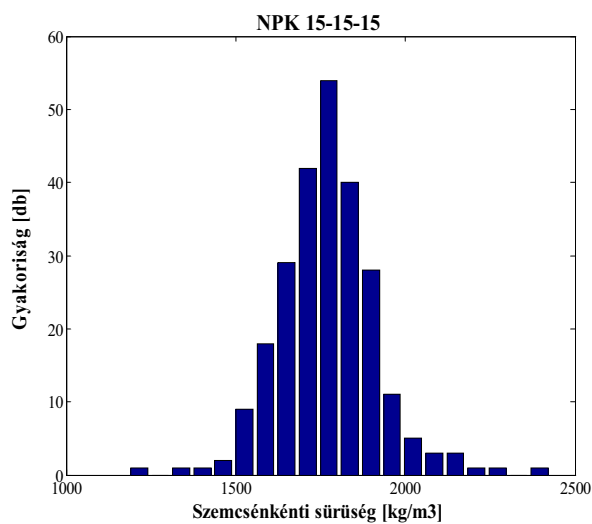
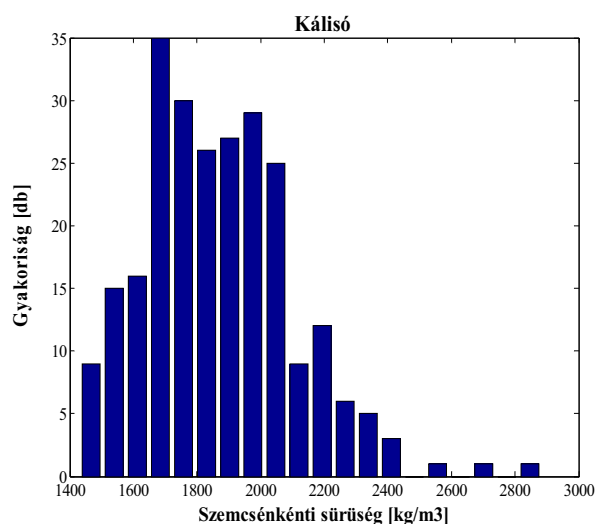
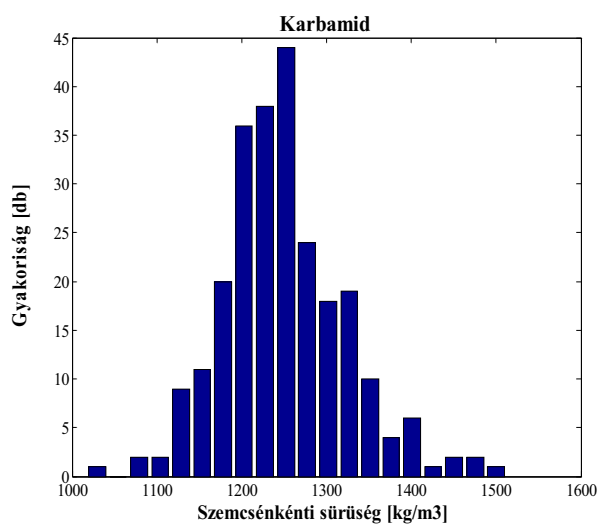
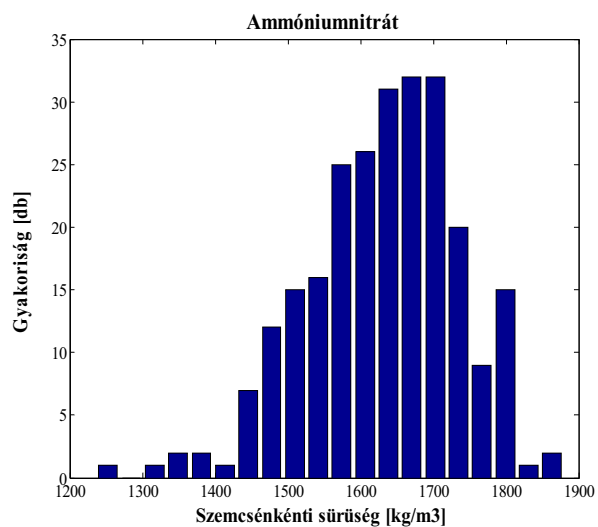
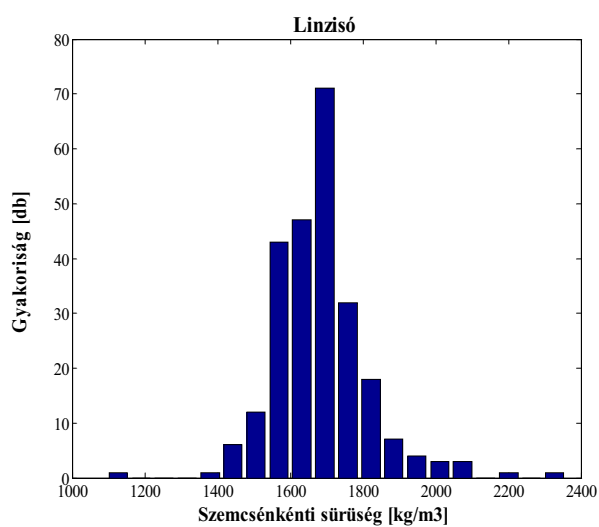


M4.4. melléklet/2

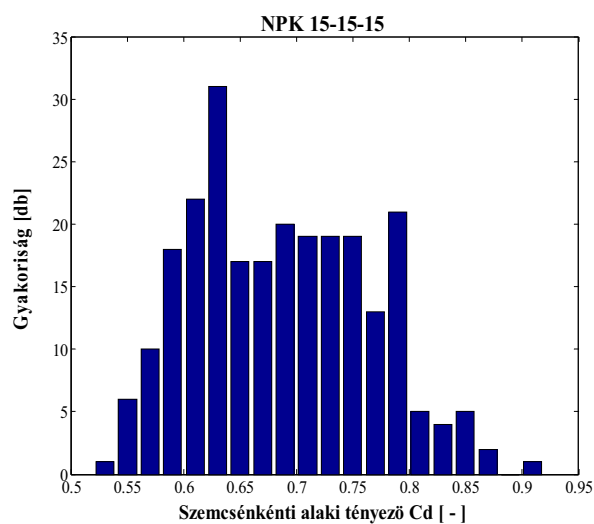
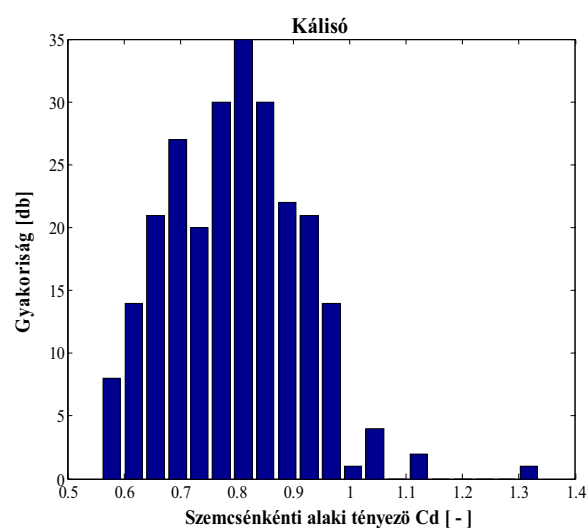
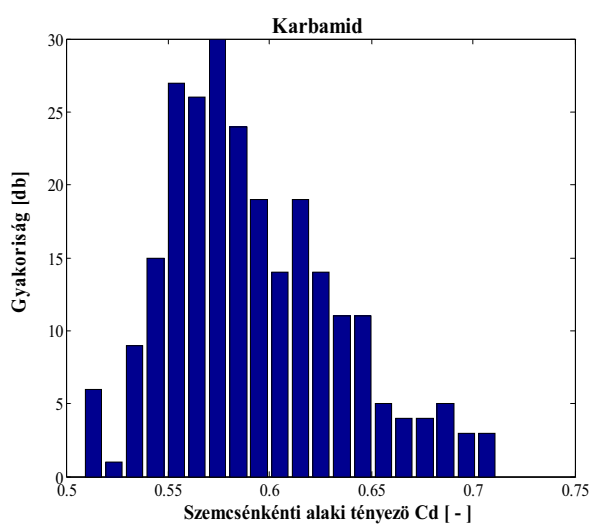
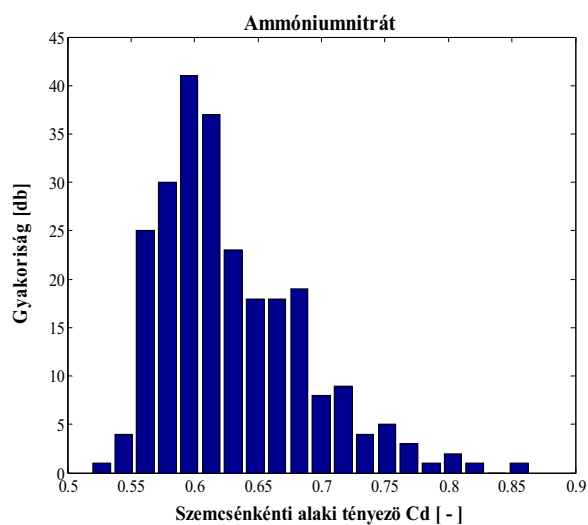
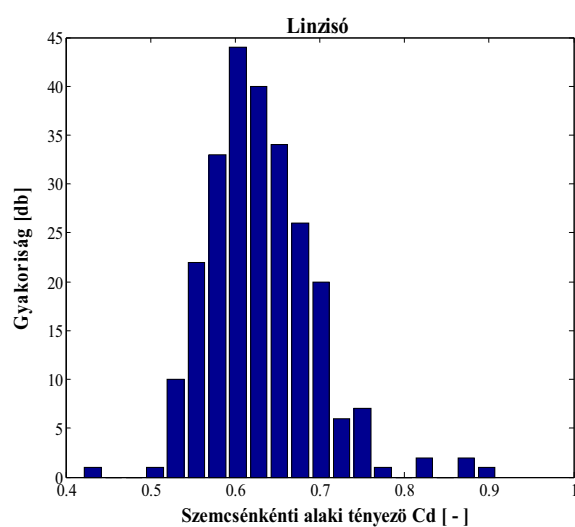


M4.5. melléklet

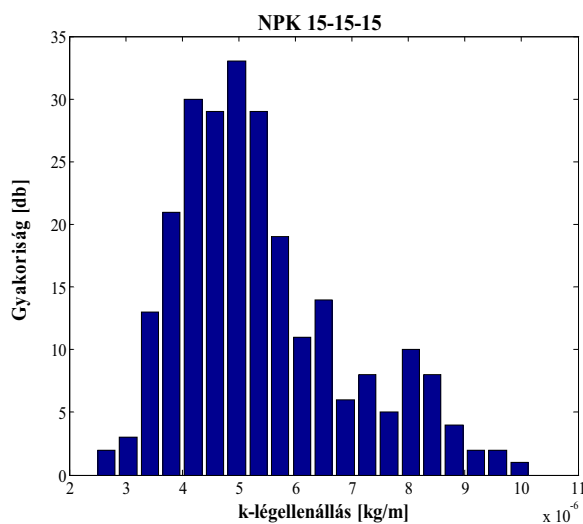
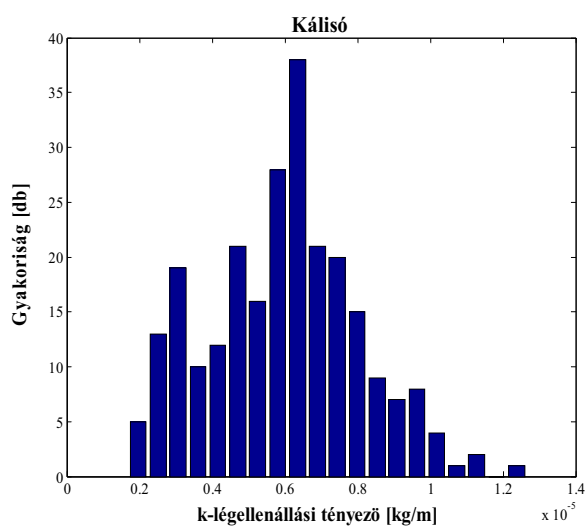
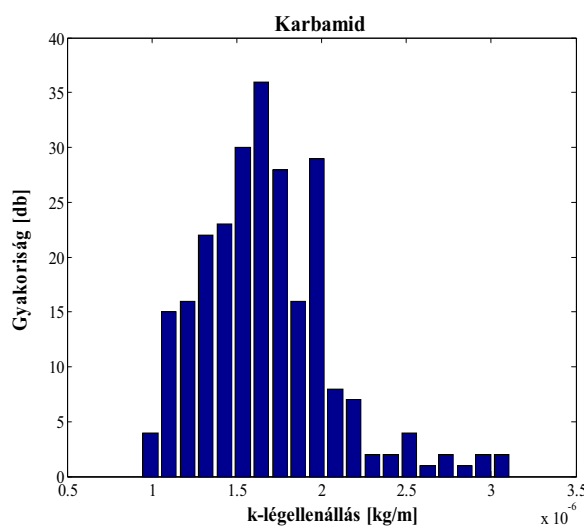
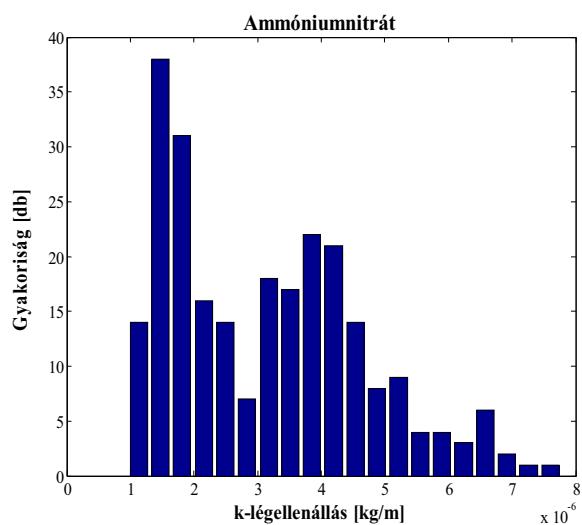
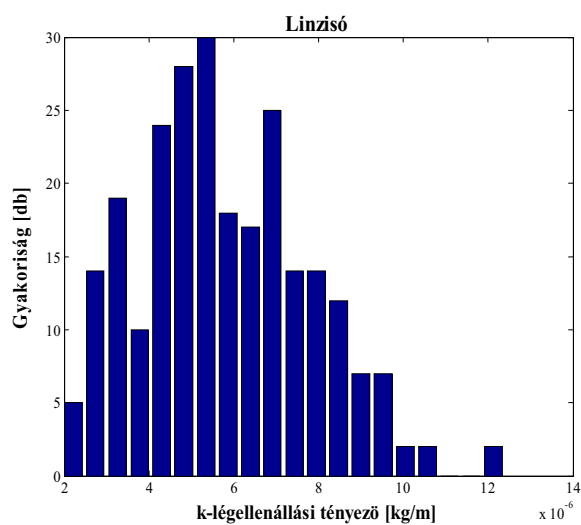
Szemcsénkénti sűrűség eloszlása



Szemcsénkénti alaki tényezők eloszlása



Szemcsénkénti légellenállási tényezők eloszlása



NYILATKOZATOK
(az értekezés utolsó lapján)

NYILATKOZAT

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Agrártudományi Centrum Mezőgazdaságtudományi Karán a Interdiszciplináris Agrár- és Természettudományok Doktori Iskola keretében készítettem el a Debreceni Egyetem ATC MTK doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Debrecen, 2005.október 28.

a jelölt aláírása

NYILATKOZAT

Tanúsítom, hogy Battáné Gindert-Kele Ágnes doktorjelölt 2000. - 2005. között a fent megnevezett Doktori Iskola keretében irányításommal – irányításunkkal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult, az értekezés a jelölt önálló munkája. Az értekezés elfogadását javaslom – javasoljuk.

Debrecen, 2005. október 28.

a témavezető(k) aláírása)