Szent István Egyetem

Járvaszecskázók belső munkafolyamatainak analízise

Doktori (Ph.D,) értekezés

Kajtár Péter

Gödöllő
2010.

A doktori iskola

megnevezése:	**Műszaki tudományi doktori iskola**
tudományága:	**Agrárműszaki tudomány**
vezetője:	Dr. Farkas István egyetemi tanár, az MTA doktora Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Környezetipari Rendszerek Intézet
Témavezetők:	Dr. Szendrő Péter egyetemi tanár, az MTA doktora Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechanikai és Géptani Intézet Dr. Ingo Bönig tervezőmérnök CLAAS KGaA mbH, Harsewinkel

…… …….

Az iskolavezető jóváhagyása A témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

Jelölések, rövidítések jegyzéke 4
1. Bevezetés 5
2. Szakirodalom áttekintése 9
2.1. A tömegtakarmány silózásos tartósítása 9
2.2. A járvaszecskázó gép felépítése 10
2.3. A súrlódás 15
2.4. A kopás 24
2.5. A szecskázóegység 28
2.6. Szimulációs eljárások (CFD és DEM) 41
2.7. A szakirodalom kritikai értékelése 47
3. Anyag és módszer 49
3.1. A súrlódási veszteség számítása 49
3.1.1 Súrlódás a szecskázógépen belül 49
3.1.2 A súrlódási összveszteség 50
3.1.3 Súrlódás a kés hátlapján 56
3.1.4 A kifúvótorony geometriai módosítása 60
3.2. Laboratóriumi vizsgálatok 65
3.2.1 A mérőberendezés 65
3.2.2 Vizsgálati paraméterek, súrlódási tényező meghatározása 69
3.3. Szántóföldi mérések 71
3.3.1 Az energia szükséglet mérése 71
3.3.2 A kopás mérése 73
3.4. A szecska pneumatikus szállításának modellezése 74
4. Eredmények és értékelés 81
4.1. Mérési eredmények szecskázott fűnél 81
4.2. Mérési eredmények szecskázott kukoricánál 86
4.3. Szántóföldi mérések eredményei 90
4.4. Szántóföldi kopásvizsgálatok 92
4.5. A CFD-DEM számítás eredményei 94
4.6. Az eredmények értékelése és összefoglalása 96
4.7. Új tudományos eredmények 100
5. Következtetések és javaslatok 103
6. Összefoglalás 105
7. Summary 107
8. Mellékletek 109
M1 melléklet: Irodalomjegyzék 109
M2 melléklet: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk 113
M3 melléklet: A méréseknél alkalmazott műanyagok műszaki adatai 114
9. Köszönetnyilvánítás 117

Jelölések, rövidítések jegyzéke

Jelölés	Mértékegység	Megnevezés
a	m/s^2	Gyorsulás
$E_{hátfal}$	kWt/h	Energiaveszteség a szűkítő hátfalán
$E_{kifúvó}$	kWt/h	Energiaveszteség a kifúvótoronyban
$E_{oldalfal}$	kWt/h	Energiaveszteség a szűkítő oldalfalán
E_{opte}	kWt/h	Energiaveszteség optimalizálás előtt
E_{optu}	kWt/h	Energiaveszteség optimalizálás után
E_{sz}	kWt/h	Energiaveszteség a szűkítőben
F_s	N	Súrlódási erő
F_n	N	Normál erő
g	m/s^2	Nehézségi gyorsulás
m	kg	Tömegpont
P_{dvesz}	kWh/t	Teljesítményveszteség a doblemezen
P_{tvesz}	kWh/t	Teljesítményveszteség a terelőlemezen
r	m	Szecskázódob sugara
r_1	m	Kifúvó első részének görbületi sugara
r_2	m	Kifúvó második részének görbületi sugara
r_d	m	Doblemez sugara
r_{gy}	m	Gyorsítódob sugara
t	s	Idő
v	m/s	Szecska sebessége adott pontban
v_0	m/s	Szecska sebessége a kiinduló pontban
v_1	m/s	Szecska sebessége a végpontban
w	m/s	Szecska sugárirányú sebessége
α	°	Aprítókés állás szöge
α_k	°	Kifúvó első részének nyitási szöge
β	°	Szecskázódob elfordulásának a szöge
β_k	°	Kifúvó második részének nyitási szöge
φ_d	°	Doblemez nyitási szöge
φ_{gy}	°	Gyorsító doblemez nyitási szöge
φ_k	°	Kifúvó torony állásszöge
ω_d	1/s	Szecskázódob szögsebessége
ω_{gy}	1/s	Gyorsítódob szögsebessége
CFD		Computational Fluid Dynamics
DEM		Discrete Element Method
Metamid 703XXL		PA6 műanyag+vaksz
Metalen p		UHMW polietilén int. üveggömbökkel
Metalen 2000		UHMW polietilén
Metalen 1000		UHMW polietilén

1. Bevezetés

A szecskázás a zöldtakarmány betakarítás egyik legelterjedtebb módja, ennek során a teljes növényt - kukoricát vagy füvet - adott hosszúságra felaprítják, majd összegyűjtve a felhasználás helyére szállítják, legtöbbször besilózzák. A technológia hosszú múltra nyúlik vissza, mely feltehetően egyidős a gabona betakarítással (SZENDRŐ, 1995). Kezdetben ezt a folyamatot késsel és egyéb vágóeszközökkel végezték, majd a 19. században megjelentek az első stabil kézi, majd később a gépi meghajtású szecskázók. A technika fejlődésével a 20. század elején napvilágot láttak a gépi meghajtású vontatott szecskázógépek, amelyek területteljesítménye és áteresztőképessége kezdetben alacsony volt. A múlt század 70-es éveiben jelentek meg az első önjáró járvaszecskázók (GRABERS és FRERICHS, 2001). Ezek első példányai kis motorteljesítményűek (60-80 LE) voltak és csak egy vagy két sort tudtak egyszerre betakarítani. Ahogy fejlődött a technika fokozódott a gépek áteresztőképessége, motorteljesítménye és ezzel összefüggően az egyszerre betakarított sorok száma is. E fejlődésnek köszönhetően ma már nem ritka a 400 t/h vagy azt meghaladó áteresztőképességgel rendelkező szecskázógép. A szecskázógépekre napjainkban egyre nagyobb feladat hárul, hiszen már nem csak az állati takarmánykészítésben van kiemelkedő szerepük. A fokozódó környezetvédelem hatására a megújuló energiák alkalmazásánál különösen a biogáz egyes alapanyagainak előkészítésében is fontos szerepet kapnak, mivel jelentős mennyiségű energiaerdőt, energiafüvet, kukoricát és más egyéb mezőgazdasági melléktermékет kell felaprítani.

E növekvő igények kielégítésére a gépeknek hatalmas mennyiségű alapanyagot kell felaprítani időegység alatt, mely jelentősen igénybe veszi gép egyes egységeit. A konstruktőrök igyekeznek minél egyszerűbb megoldásokat kifejleszteni annak érdekében, hogy a lehető legkevesebb energia befektetés mellett maximumot tudják kihozni a gépekből. Ugyanakkor vannak fizikai határok, melyeket nem lehet áthágni. Létezik néhány kiváló konstrukciós megoldás, mely segítségével a gép áteresztőképessége fokozható anélkül, hogy a befektetett energiát növeljük. Ugyanakkor - és sajnos ez a meghatározóbb- az aprításra fordított energiát kell növelni. Ennek eredményeként láttak napvilágot néhány évvel ezelőtt a 700-800 LE motorteljesítménnyel rendelkező gépek. Majd nem sokkal azután megjelent a Krone cég által gyártott első két motoros szecskázógép, amelynek össz-motorteljesítménye eléri az 1000 LE-t. Duplamotorral rendelkező szecskázógépnek jóval kedvezőbbek a fajlagos mutatói az egymotoros társához képest, ugyanakkor felmerül a kérdés, hogy ilyen teljesítményű gépnél, melynek áteresztőképessége 400 t/h-t meghaladja, mekkorák az anyagáramban fellépő veszteségek. Veszteség mindig is adódik, hiszen anyagaprításról és annak tovább szállításáról van szó. Így meg kell vizsgálni az itt fellépő veszteségek nagyságát és átgondolni ezek csökkentésének lehetőségeit. A felaprított anyag vágása és szállítása energiába kerül. A vágási energia csök-

kentésére több ötletes megoldás is született. Ezzel párhuzamosan sajnos az anyag elszállításakor keletkező veszteségek, anyag mozgások feltárása mindig a háttérbe szorult. Ám nagy áteresztőképesség mellett már nem lehet figyelmen kívül hagyni a szállítására fordított energiát és az ebből keletkező veszteségeket, hiszen ez felesleges többletenergiát, azaz többlet üzemanyag felhasználást jelent. Amikor egy modern szecskázógép óránkénti üzemanyag fogyasztás eléri a 160 litert (!), csak a veszteségek 5-10%-os csökkentése jelentős energia, és ezzel együtt üzemanyag megtakarítást eredményez.

Munkám célja a szecskázógépen belüli aprítás energetikai és anyagáramlási veszteségeinek csökkentése annak érdekében, hogy a jövő szecskázógépei a lehető legkevesebb üzemanyag felhasználása mellett a lehető legnagyobb tömegáram teljesítménnyel rendelkezzenek. Ezért elemeztem a járvaszecskázó gépen belüli veszteség forrásokat különös figyelemmel a súrlódás által befolyásolt anyagáramlási folyamatokra.

A kutatómunka célja

A kutatásaim során arra kerestem a választ, hogy a szecskázógépen belüli anyagáramlásban milyen veszteségek keletkeznek.

Munkám célja volt, feltárni a szecskázógép belsejében keletkező veszteségforrásokat és azok nagyságát, majd olyan módosítások kezdeményezése, melylyel a gép hasznos teljesítménye tovább fokozható. Veszteség keletkezik a szállítás során a gyorsításból, hiszen a felszecskázandó anyagot közel 50 m/s-os átlagsebességre kell felgyorsítani. További veszteségek lépnek fel az ütközésekből, a nem megfelelő áramlási viszonyokból, és ami a legjelentősebb, a súrlódásból. A felaprított anyag egy csatornán halad végig, ahol folyamatosan érintkezik a csúszófelületekkel és így jelentős a falsúrlódás. Ennek következtében veszít kinetikus energiájából. A kutatásom során különös hangsúlyt fektettem a súrlódás okozta veszteségek meghatározására és mérséklésére. Így a gépek a veszteségeit mérsékelni az effektív teljesítményüket pedig növelni tudjuk.

A cél megvalósítása érdekében a következő feladatokat végeztem el:

1. Az elméleti súrlódási veszteség nagyságának meghatározása minden egyes részegységnél. Az elméleti összefüggések alapján olyan konstrukciós módosításokat kezdeményeztem, melyek segítségével a súrlódási veszteség mérsékelhető.

2. Szecskázott anyagok súrlódási tényezőjének mérésére alkalmas mérőberendezés készítése a laboratóriumi vizsgálatok elvégzéséhez. Méréseket tervezek különböző beállításokkal. A mérési eredmények alapján meghatározom azokat az összefüggéseket, hogy a mozgás sebessége, a terhelés nagysága, a csúszófelület anyag, a szecskahossz, a felületi érdesség, valamint az aprított

anyag nedvességtartalma, hogyan befolyásolja a súrlódási tényezőt. A méréseket szecskázott fű és silókukorica esetében is lefolytatom.

3. Gépen belüli konstrukciós átalakítások elvégzése majd a szántóföldi mérések lefolytatása.

4. A gépben lejátszódó szállítási folyamatok modellezése. Így betekintés nyerhető a sebesség és a nyomás viszonyokra a gépen belül ott is, ahol a mérésekkel ez nehezen kivitelezhető.

2. Szakirodalom áttekintése

2.1. A tömegtakarmány silózásos tartósítása

Mielőtt a kutatómunkám részleteit elkezdeném tárgyalni egy rövid összefoglaló erejéig kitérek arra, hogy miként tartósítják a szarvasmarha számára szükséges tömegtakarmányt és ebben a folyamatban milyen szerepet kapnak a járvaszecskázó gépek.

Az állati tömegtakarmányok jelentős részét erjesztéses folyamat segítségével tartósítják. A legnagyobb mennyiségben silókukoricát tartósítunk, de ez kiegészül még a fű és lucernából készített szenázzsal. A siló készítésének első lépése az, hogy a növényt a szántóföldről be kell takarítani. Ebben a folyamatban van a szecskázógépeknek kiemelkedő szerepük, hiszen ezek a gépek aprítják fel a növény a technológia által megkövetelt hosszúságúra. A betakarítás egy vagy két menetben történik. Kukorica silózásakor egymenetes betakarításról beszélünk, hiszen maga a szecskázógép vágja le a növényt majd fel is aprítja azt. Kétmenetes betakarításkor- melyet fű és lucerna szecskázásakor alkalmazunk- az aprítást megelőzi egy fonnyasztási technológia. Ez azt jelenti, hogy kaszálógéppel levágják a földre a növényt és egy-két napig fonnyasztják azt, majd egy rendkezelőgép segítségével adott szélességű renddé gyűjtik össze az állományt. A szecskázógép a renden lévő növényt rendfelszedő segítségével szedi fel, és leszecskázza azt a technológia által megkövetelt hosszúságúra. A szecskahossz egy fontos paraméter a betakarítás során. Mivel fűfélékben a nedvesség nem csak szálirányba, hanem arra merőlegesen is terjedni tud ezért azokat mindig hosszabbra tudjuk aprítani. Ez általában 18-25 mm (elméleti). Kukorica esetében csak szálirányba tud a nedvesség áramolni ezért mindig rövidebbre kell azt felaprítani. Takarmány készítésére 7,5-9 mm szecskahosszúságot alkalmaznak, de biogáz előállításakor rövidebbet, mivel így gyorsabban lejátszódik a bakteriális erjesztés. Szecskázás során törekedni kell a nagyobb szecskahosszra, mert így csökkenthető a járvaszecskázógép fajlagos üzemanyag felhasználása. A szecskázógép a felaprított anyagot a mellette haladó szállítójárműre juttatja, mely azt a tartósítás helyére szállítja és silókba töltik.

A silók lehetnek:

Horizontális silók:

- halom silók,
- kazalsilók,
- falközi silók,
- egyedi bálacsomagolás,
- zsáksilózás,

Toronysilók:

- alsó kitárolású,
- felső kitárolású.

A betárolás során folyamatosan tömörítik az aprított anyagot annak érdekében, hogy minél több levegőt kipréseljenek a szecska közül. A tartósítás egyik legfontosabb fázisa a betárolás. Ezen belül is a tömörítés, mely a takarmány minőségére is kihat.

Betárolás követően megindul az erjesztési folyamat. Az erjedési folyamat lényege, hogy az összeaprított (szecskázott) növényből a levegő minél tökéletesebb kiszorítása következtében kialakuló anaerob körülmények között a tejsavas erjesztő mikroorganizmusok gyorsan, nagymértékben elszaporodjanak, működésük következtében pedig minél hamarabb tejsavat hozzanak létre. Az erjedési folyamat 5 fő szakaszra bontható:

- önmelegedési szakasz,
- ecetsav-képződési szakasz,
- tejsav-képződési szakasz,
- erjedés csillapodásának szakasza,
- utóerjedési szakasz (vajsavas erjedés).

2.2. A járvaszecskázó gép felépítése

A járvaszecskázó gép megtalálható napjainkban szinte minden nagyobb gazdaságban, vagy bérvállalkozásokban. A szecskázógépeket két fő tulajdonság alapján csoportosítjuk.

Felépítés alapján lehetnek:
- önjáró,
- vontatott,
- függesztett.

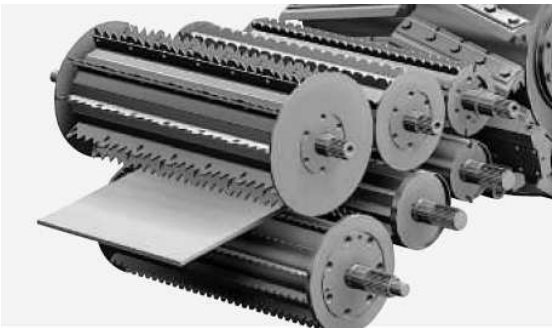
A szecskázó egység kialakítása alapján:
- dobos,
- tárcsás szecskázódob.

A tárcsás szecskázódob kialakítást vontatott és függesztett szecskázógépeknél alkalmazták. E kialakítás hátránya, hogy nagy a helyszükséglete, emiatt önjáró szecskázógépekbe nem építik be, ugyanakkor az áteresztőképessége is kisebb a dobos rendszerűhöz képest. Napjainkban a szecskázógépek piacának ~95 %-át az önjáró dobos szecskázódobbal rendelkező aprítógépek fedik le, ezért kutatásom során e típusokkal fogok mélyrehatóbban foglalkozni. Először tekintsük át röviden e gépek felépítését, működését.

Szecskázó gépeknél egy adapter segítségével - amely fű aprítása esetén rendfelszedő adapter vagy vágóasztal, ill. néhány évvel ezelőtt megjelent direkt vágó, kukoricánál soros vagy sor független adapter- a felaprítandó növényt a földről összegyűjtjük, majd az etetőhengerekhez jutatjuk.

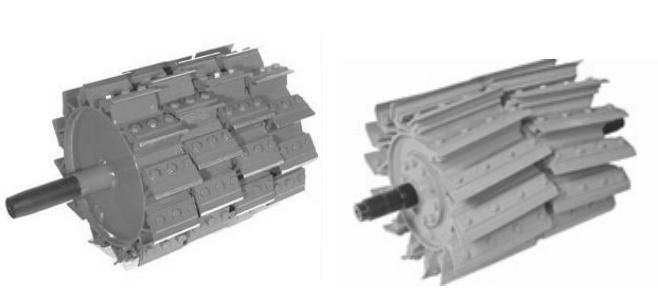
1. ábra: Különböző betakarító adapterek járvaszecskázó gépekhez (CLAAS) (balról-jobbra: sorfüggetlen kukorica adapter, soros kukorica adapter, direkt vágóasztal, kaszáló egység, rendfelszedő adapter)

Az etető és tömörítő hengerek a szecskázandó növényt egyenletes sebességgel és tömörséggel az aprító dobhoz juttatják (2. ábra). A szecska hosszúsága az etetőhengerek kerületi sebességével fokozatban, illetve újabb konstrukcióknál fokozatmentesen állítható. A fokozatmentes hajtás egy további előnye, hogy a táblán belüli növényérettség szerint kényelmesen állítható a szecskahossz. Az etetőcsatornában egy fémdetektor is található, mely megvédi az etetőhengerek blokkolásával a szecskázódobot a károsodástól, ha esetlegesen fém (mágnesezhető) kerülne a felszecskázandó növény közé. Emellett megtalálható az ún. kőérzékelő is, mely nagyobb méretű kövekkel szemben védi a szecskázó egységet, és szintén blokkolja az etetőhengereket.



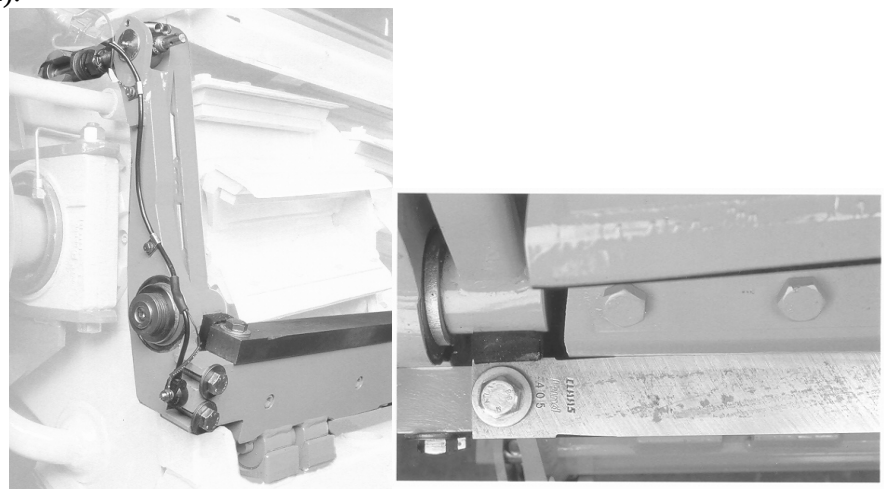
2. ábra: A behúzó tömörítő hengerek (KRONE)

A szecskázó egység két fő részből áll: egyik az állókés mely vágás során a megtámasztást biztosítja, a másik maga a szecskázódob melyre az aprítókések vannak felszerelve.



3. ábra: A rövid alkotóirányú és V-alakú aprítókésekkel szerelt szecskázódob

Fű és kukorica aprításához más-más kést alkalmaznak. Ennek magyarázata a kopással van összefüggésben. Van gyártó, aki alkotóirányba helyezi el a késeket a szecskázódobon, de a ferde késbeépítés a meghatározóbb. Így a vágáshoz szükséges energia némiképpen kevesebb, mivel ez esetben megjelenik egy él irányú sebességkomponens is, azaz metszés jön létre (HAFFERT, 2004). A késeket megadott időközönként élesítik, majd ennek megfelelően az állókést is utána állítják. Így az álló- és mozgókés közötti hézag mindig azonos marad, mely rendszerint 0,1-0,4 mm. Az állókés megtámasztási feladatot lát el (4. ábra).

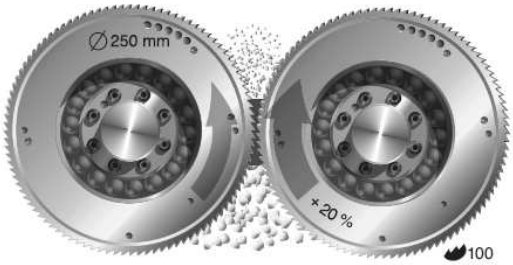


4. ábra: Az állókés beállítása és késhézag

A szecskázókések vágást követően szállítási feladatot látnak el és a felaprított takarmányt a szemroppantó hengerekhez vagy közvetlenül a kifúvócsőbe továbbítják.

Szemroppantó hengerek alkalmazását az indokolja, hogy a kukoricaszemek külső héját meg kell sérteni, ezzel a benne lévő értékes tápanyagot a haszonállat meg tudja emészteni. Mivel a szarvasmarha egy kérődző állat, ezért nem képes a kukoricaszemek összezúzására. Annak érdekében, hogy a kukoricaszemekben lévő gazdag tápérték maximálisan hasznosulni tudjon a hengerek palástja foga-

zott kialakítású. Megsérti a kukoricaszemeket és ennek köszönhetően a benne lévő gazdag tápanyag már maximálisan hasznosulni tud a takarmányozás során (5. ábra).



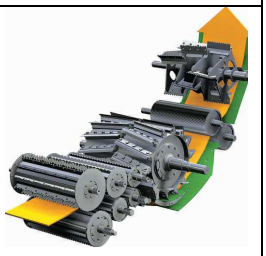
5. ábra: A szemroppantó hengerpár meghatározó kiviteli formája

A hengerek eltérő fordulatszámmal forognak így további szecskaminőség javulás érhető el. Az aktív szemroppantó hengereket csak silókukorica szecskázásakor használják, más anyag aprításakor kiszerelik őket, így nem fékezi feleslegesen az anyagáramot. Egyes típusoknál - elsősorban kis teljesítményű tárcsás szecskázódobbal felszerelt gépeknél- a szemroppantó hengerek helyett ún. zúzókosarat alkalmaznak. Ezzel hasonló hatást lehet elérni, de nagyobb az energiaigénye és az anyagáramot is jelentősen lefékezi. A szemroppantó hengerektől érkező aprított takarmányt a kidobóventillátor felgyorsítja és a kifúvótornyon keresztül a szecskázógép mellett haladó szállítójárműre juttatja azt (6. ábra). A kifúvótorony általában 210 ^{o}-ban körbefordítható a gép függőleges tengelye körül, valamint a torony végén lévő terelőlemez is billenthető, így optimálisan meg tudja tölteni a szállítójárművet.

6. ábra: A kifúvótorony tetszőleges magasságba és pozícióba állítható

Az 1. táblázatban összefoglaltam négy különböző gyártó önjáró szecskázógépeit, valamint azok főbb műszaki paramétereit. Megfigyelhető, hogy az anyagáram kialakításának tekintetében ma már alig van eltérés a gyártók között.

1. táblázat: Az ezredforduló csúcstechnikáját megtestesítő, piacvezető járvaszecskázók

Géptípus	Főbb paraméterek	Anyagáram
CLAAS Jaguar 980	Motorteljesítmény: 830 LE Etetőhengerek száma: 4 Szecskahossz: 3-37mm Dobátmérő: 630 mm Dobszélesség: 750 mm Gyorsítódob típusa: radiál	
John Deere 7850	Motorteljesítmény: 690 LE Etetőhengerek száma: 4 Szecskahossz: 4-19 mm Dobátmérő: 610 mm Dobszélesség: 805 mm Gyorsítódob típusa: radiál	
Krone Big X 1000	Motorteljesítmény: 1020 LE Etetőhengerek száma: 6 Szecskahossz: 4,5-24 mm Dobátmérő: 660 mm Dobszélesség: 800 mm Gyorsítódob típusa: radiál	
New Holland FR9090	Motorteljesítmény: 824 LE Etetőhengerek száma: 4 Szecskahossz: 3-16 mm Dobátmérő: 710 mm Dobszélesség: 900 mm Gyorsítódob típusa: radiál	

2.3. A súrlódás

A terhelés alatt egymáson elmozduló vagy elmozdulási kényszernek kitett szilárd testek érintkezési felületén súrlódás keletkezik. Mozgás esetén a súrlódásból származó igénybevételek kopást is eredményeznek. Bár a kopások túlnyomó többsége a súrlódás miatt következik be nincs általános összefüggés a kopás és súrlódás között (ZSIDAI, 2005).
A súrlódás különböző szempontok szerint csoportosítható:

- megjelenés helye szerint: külső vagy belső,
- mozgásforma szerint: csúszó és gördülő,
- mozgásállapot szerint: nyugvó és mozgó,
- felületek kenésállapota szerint: száraz-, határ-, vegyes és folyadéksúrlódás.

A külső súrlódás a szilárd testek és annak közvetlen környezetében jelentkező hatás a belső pedig az anyag belsejében lévő atomok, molekulák elmozdulásakor keletkezik. A belső és külső súrlódás egymástól nehezen lehet szétválasztani, mivel rendszerint a gépészetben egyszerre jelentkeznek, de általában mindig csak az egyik a domináns.
Csúszó súrlódás ismert egyszerűsített törvényszerűségei (ZSIDAI, 2005):

- a súrlódási erő nagysága arányos a két felületet összeszorító erővel,
- független az érintkező felületek nagyságától,
- és független a csúszási sebesség nagyságától.

A valóságban azonban más tényezők is befolyásolják, úgymint a súrlódó felületek anyaga, minősége, kenésállapota, érintkezési viszonyok, terhelés nagysága, mozgás sebessége, valamint növényi anyagok esetén a nedvességtartalma is.
Szilárd testek érintkezésekor három érintkezési felületet különböztetünk meg (VALASEK, 2002):

- névleges,
- kontúr,
- tényleges.

Ezeket a különbségeket a felületek alakeltérése okozza, melyek a következőképpen csoportosíthatók nagyságrendjük szerint:

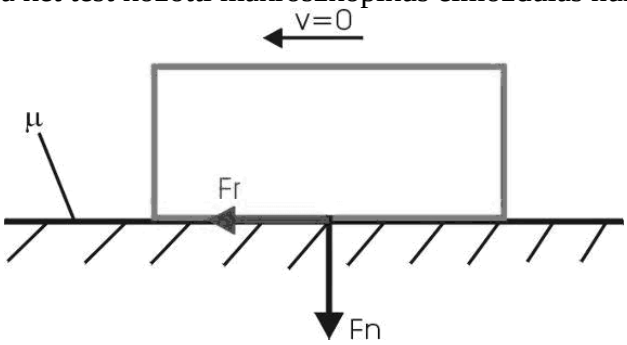
- makrogeometriai eltérések, alakhibák,
- hullámosság,
- érdesség,
- szubmikron érdesség.

Új súrlódási elméletek szerint a súrlódási ellenállást két hatás idézi elő: egyik a tényleges érintkezési felületen létrejövő adhéziós kölcsönhatás, másik a felületbe benyomódó érdességcsúcsok által a mozgás során okozott alakváltozás.

Súrlódás tényező nagysága megváltoztatható, bizonyos egyszerűsítések figyelembevételével pl.: a felület keménységének növelésével vagy bevonatok illetve kenőanyagok alkalmazásával (KALÁCSKA, 1997).

A nyugvásbeli és a mozgásbeli súrlódás

Az egymáshoz szorított testek közt kölcsönhatás van, a rájuk ható elmozdulási kényszerrel szemben ellenállást fejtenek ki. Amíg e kényszer nagysága nem haladja meg a két test közötti kölcsönhatásból adódó kényszer szilárdságát, addig nyugalmi súrlódásról beszélünk. Ha ez a feltétel nem áll fenn, a két test elmozdul egymáson és akkor már mozgó súrlódási állapotról beszélünk. Mindezekből az is következik, hogy a nyugvásbeli és mozgásbeli súrlódási együttható nagysága nem azonos. A 7. ábra a nyugvásbeli súrlódás klasszikus ábrázolása látható, ahol a két test közötti makroszkopikus elmozdulás nulla.



7. ábra: A nyugvásbeli súrlódás (v=0) klasszikus Coulomb féle értelmezése

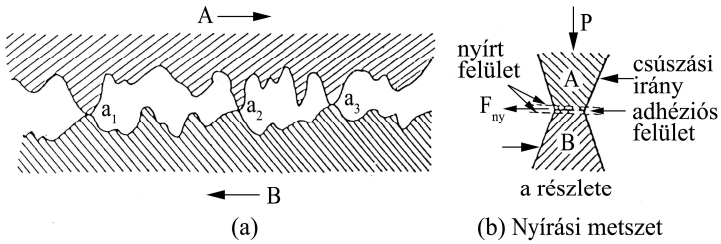
A súrlódási erő nagysága nyugalmi súrlódás esetén az alábbi egyenlet segítségével számolható:

$$F_S = F_N \cdot \mu \text{ (N)},$$

ahol: F_S - súrlódási erő nagysága (N),
F_N - normál erő nagysága (N),
μ - nyugvásbeli vagy mozgásbeli súrlódási tényező (-).

Mozgásbeli súrlódásról akkor beszélünk, ha egy test egy másik testen elmozdul, azaz a két test közötti relatív elmozdulás nagyobb, mint nulla. A mozgásbeli súrlódási tényező általában kisebb, mint a nyugvásbeli súrlódási tényező ($\mu<$

μ_0). A jelenség magyarázatára több irodalmi megközelítés is létezik, a leginkább elfogadott elméletek a következők.



8. ábra: Csúszó érintkező felületek makroszkopikus metszete (YAMAGUCHI, 1990)

Az „adhéziós nyírás elmélet” BOWDEN és TABOR, (1964) magyarázata a csúszó súrlódási folyamat leírására. Az adhéziós nyírási elméletnél a súrlódási ellenállás abból adódik, hogy a nyíróerő elszakítja az érintkező felületek közti kapcsolatot. A valóságos érintkezési felület $A=\sum a_i$ lényegesen kisebb, mint a látszólagos érintkezési felület A_0. Az apró felületek ($a_1, a_2 \ldots a_i$) p normál terhelés hatására alakulnak ki, és ezek összege lesz a valóságos érintkezési felület. Az A és B testek egymáson történő elmozdulása csak akkor történhet meg, ha az érintkezési felületeken kialakult kapcsolatok elnyíródnak. Szilárd testek csúszásakor a súrlódási erőt két hatás hozza létre: az adhéziós kapcsolatok által kifejtett ellenállás, és a deformációs hatás. Ebből adódóan a súrlódási ellenállás F_S (mozgási ellenállás az érintkezési felületen) az adhéziós nyírási ellenállások (F_{ny}) és a deformációs ellenállások (F_d) összege (YAMAGUCHI, 1990):

$$F_s = F_{ny} + F_d$$

Fémeknél a nagyon kis terhelések esetén, a $F_s \approx F_{ny}$, mivel az F_d nagyságrendekkel kisebb mint F_{ny}, így a következő összefüggés írható:

$$F_s = A \cdot \tau$$

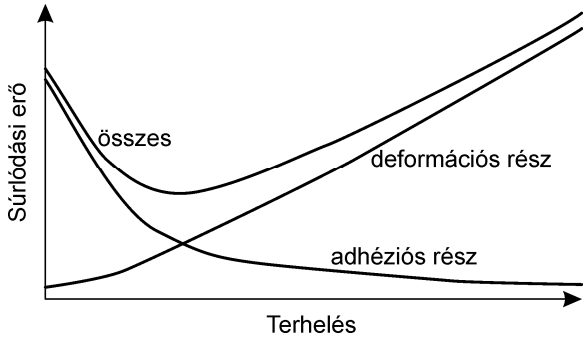
ahol: A - a valóságos érintkezési felület (mm^2)
τ - az érintkező anyagok nyírási ellenállása (N/mm^2).

A valóságos érintkezési felület (A) általában a következőképpen számítható:

$$A = k \cdot p^m$$

ahol: p - a felületi nyomás (N/mm^2)
k, m- állandók, értéke az anyagoktól függ.

Kis terhelési tartományban az érdesség csúcsok alakváltozása rugalmas, benyomódásuk az ellenfelületbe jelentéktelen, ezért a súrlódást főleg az adhézió okozza. A terhelés növelésével a tényleges érintkezési felület és a barázda keresztmetszet növekszik, ezért a deformációs összetevő részaránya erősen növekszik. A két összetevő arányát a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra A súrlódási erő összetevőinek változása a terhelés függvényében (KOZMA, 2001)

Kis sebességű mozgások esetén gyakori probléma, hogy a csúszás nem egyenletes, hanem akadozó. Ezt a mozgást stick-slip-nek szokták nevezni. Elsősorban olyan helyeken lép fel ahol az elemek bizonyos mértékű rugalmassággal rendelkeznek.

A szálas zöldtakarmányok súrlódási tényezője

A súrlódási erő nagyságát két dolog befolyásolja. Az egyik a normálerő nagysága mely a felaprított anyagot a felülethez nyomja, a másik a súrlódási tényező. Zöldtakarmányok súrlódási tényezőjének meghatározására végzett kísérleteket RICHTER, WIENEKE, LOBOTKA, ADORJÁNNÉ, SZENDRŐ…. Ezekből kiolvasható, hogy a terhelés nagysága súrlódás sebessége és a nedvességtartalom is jelentős befolyással van a súrlódási tényezőre.

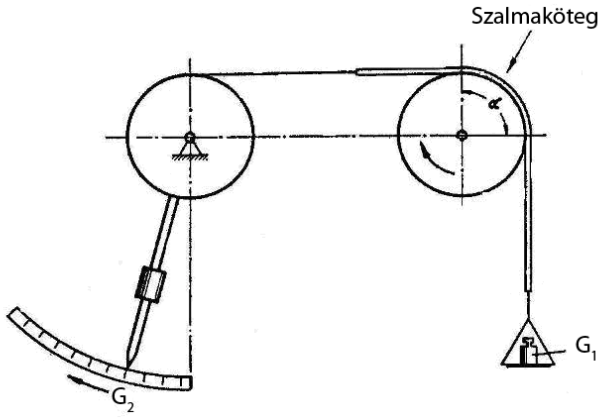
KUTZBACH, (1977) összefoglalása alapján az 2. táblázat néhány korabeli szerző eltérő felfogását szemlélteti a súrlódási tényező alakulását illetően, különböző befolyásoló paraméterek mellett.

2. táblázat: szálas anyagok súrlódási tényezőjének alakulása néhány szerző eltérő értelmezése alapján (KUTZBACH, 1977)

Szerzők	Anyag	Súrlódó felület	Nedvesség	Terhelés	Sebesség	Szecskahossz
Richter	Lucerna-Szalma-szecska	Acél				
Chrape	Búza-Rozs-szalma	Acéllemez Plexiüveg				
Ozerov	Luzerna	Acéllemez Fa Gumi				
Wienecke	Fű	Acél tengely				
Rabino-witsch	Búzaszalma	Acéllemez Öntöttvas Fa				
Lobotka	Lucerna szecska	Fa Gumi Alumínium				
Fiala	Széna	Alumínium Acél Beton				
Busse	Rétifű Lucerna	Acél				
Sacht	Rétifű Lucerna Szalma	Acél				
Kutzbach	Rétifű Lucerna Rozs-Búza-Árpaszalma	Teflon Acél Alumínium Műanyag				

Növények fémmel való érintkezéskor a súrlódási tényező jelentős eltérést mutat. Szecskázott anyag esetében ez különösen igaz, hisz azt jelentősen befolyásolja a nedvességtartalom és a normálerő nagysága, legalábbis erre utalnak korábbi kísérletek 38.

WIENEKE, (1956) maximálisan 10 m/s-os sebesség mellett végzett kísérleteket. Vizsgálatainál egy hengert fékezett, mely megoldást a 10. ábra szemlélteti.

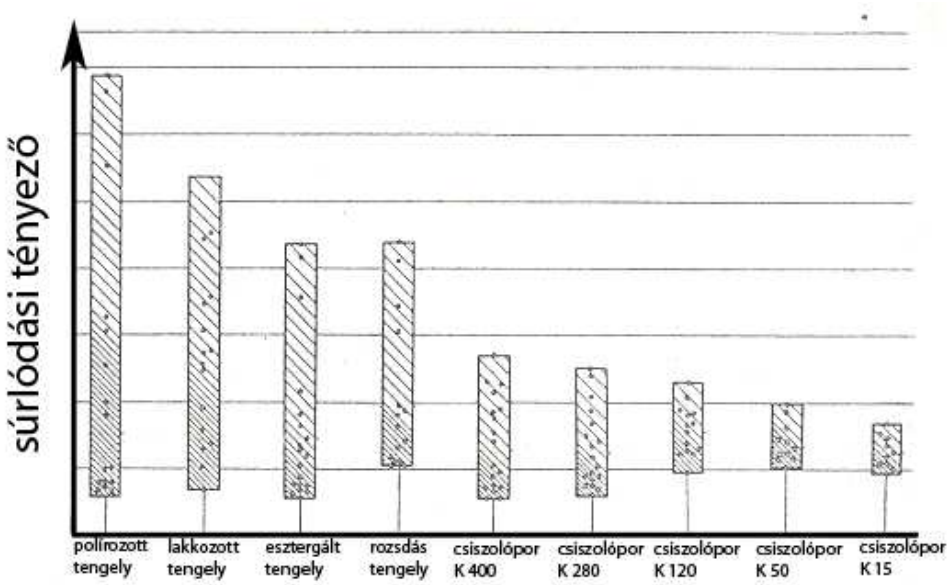


10. ábra: Mérőberendezés mozgásbeli súrlódási együttható meghatározásához (WIENEKE, 1956)

A terhelés nagyságát a G1 súly nagyságával változtatta. Méréseiből a súrlódási együttható nagyságát az alábbi egyenlet szerint határozta meg:

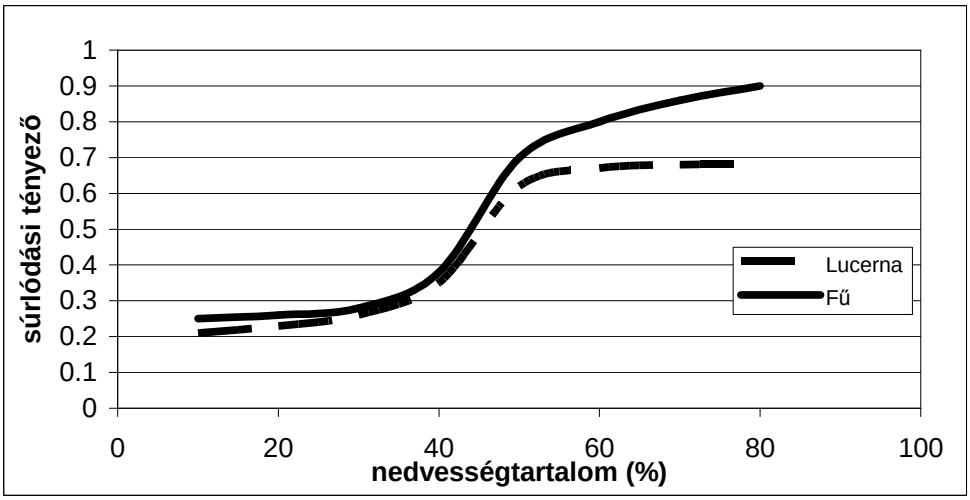
$$\mu = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln \frac{G_2}{G_1}.$$

WIENEKE, (1956) mérései alapján a súrlódási tényező széles tartományban változott, mérései között 0,2-1,4 közötti értéket is mért (11. ábra). Ez a nagyfokú eltérés a különböző felületi kialakításoknak volt köszönhető, de méréseiből arra lehet következtetni, hogy jelentős deformációk is felléptek a súrlódás során.



11. ábra: Súrlódási tényező nagysága különböző felületi érdesség mellett

Mérései alapján a legnagyobb értéket polírozott felület esetén kapta, míg durván csiszolt felületen ez az érték a legkisebb volt. Ebből ő arra következtetett, hogy polírozott felület esetén jelentős adhézió lép fel. A 12. ábrán a fű és lucerna súrlódási tényezőjének alakulása látható a nedvességtartalom függvényében, mely „S”görbe jelleget mutat (WIENEKE, 1956).



12. ábra: A fű és lucerna súrlódási tényezőjének alakulása a nedvességtartalom függvényében

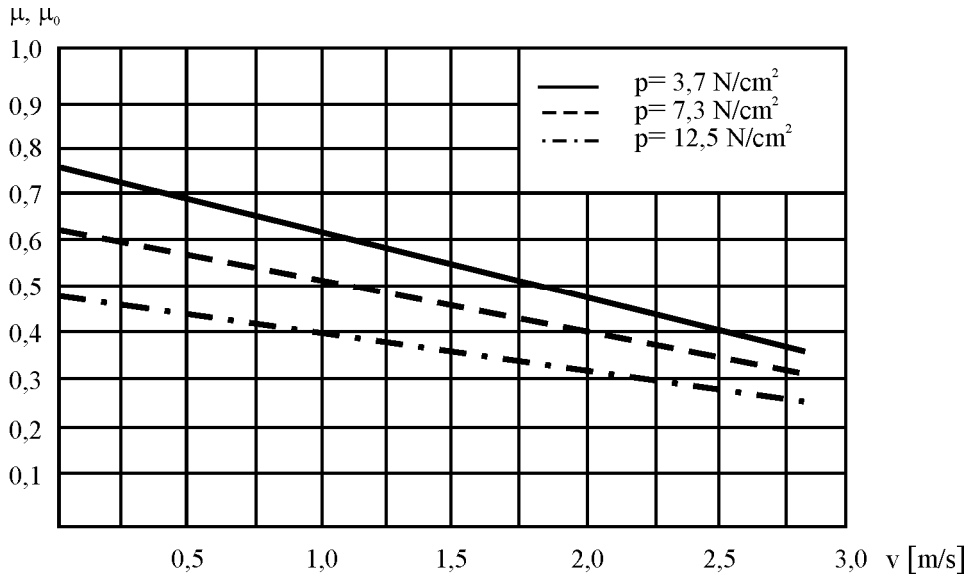
KAMPF, (1958) kutatásaiban rámutat, hogy a fű súrlódási tényezője 90 %-os nedvességtartalom mellett 0,4, 80 %-os nedvességtartalomnál 0,3, majd elkezd ismét fokozódni és 20%-os nedvességtartalomnál ez az érték 0,6 körüli.

RICHTER, (1954) azt vizsgálta, hogy hogyan befolyásolja a súrlódási tényező nagyságát a mozgás sebessége. Vizsgálatainál 1,6 m/s-os sebességig átlagosan 0,68 volt a súrlódási tényező, míg 30,5 m/s-os sebességnél ez az érték átlagosan 0,49 volt.

LOBOTKA, (1967) szecskázott kukoricával végzett kísérleteket. Vizsgálatait 0,5-5m/s sebesség tartományban végezte, a felületi terhelés 0-59 N/mm^2 között változtatta. Lobotka fa, alumínium és acéllal folytatta le kísérleteit, mely anyagoknál 0,5-0,62 közötti értékeket mért. Kísérletei során nem mutatott ki jelentős eltérés az anyagok között.

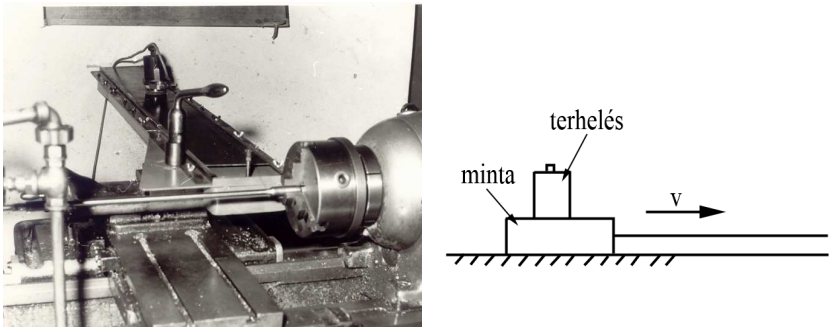
HART, (1979) méréseinél a súrlódási tényező nagysága fű esetén 65 kN/m^2 terhelés mellett 0,5, míg 20 kN/m^2 terhelésnél 20 %-kal magasabb volt ez az érték.

SZENDRŐ, (1975), mérései alapján a súrlódási együttható lineáris csökkenést mutat a csúszási-sebesség növelésének következtében (13. ábra), valamint a mérései alapján megállapította, hogy nagyobb felületi nyomás mellett a súrlódási tényező kisebb. A nyugalmi súrlódási tényező 0,5-0,8 érték között mozog, ugyanakkor a mozgásbeli súrlódási tényező jelentős mértékben csökkent.



13. ábra: Súrlódási együttható nagysága sebesség és felületi nyomás függvényében

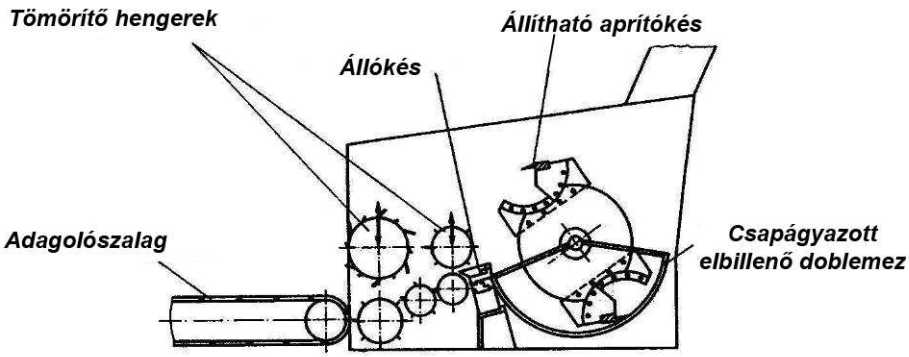
ADORJÁNNÉ, (1976) közönséges esztergagéppel - melynek keresztszánja lett a mérések elvégzésére megfelelően átalakítva végzett méréseket (14. ábra).



14. ábra: A súrlódási tényező mérése esztergagép segítségével

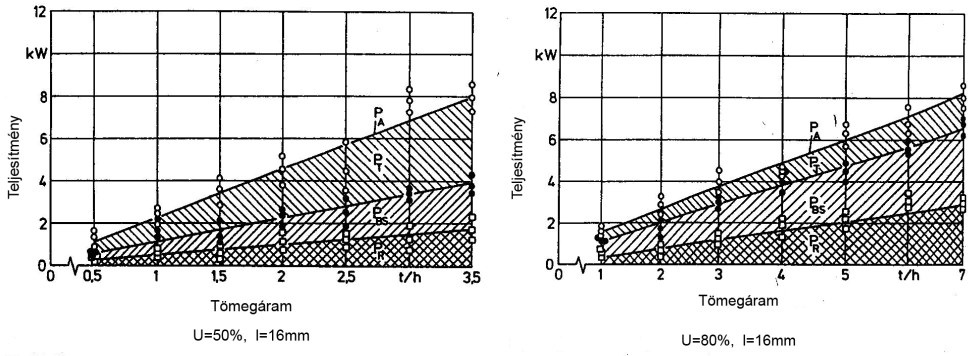
Kísérletei során öt különböző sebesség és három különböző terhelés mellett végzett méréseket szecskázott kukoricával. Megállapította, hogy a csúszási sebesség növekedése következtében a súrlódási tényező csökken és ugyanezt állapította meg növekvő terhelés mellett is.

RÖHRS, (1988) szintén a súrlódás problémájával foglalkozott, de ő nem a súrlódási együttható meghatározását tűzte ki célul, hanem a doblemeznél keletkező súrlódási veszteség meghatározását.



15. ábra: Mérőberendezés súrlódási veszteség meghatározásához (RÖHRS 1988)

RÖHRS egy olyan mérőberendezést épített, amelynél a doblemez nem volt rögzítve, hanem csapágyazva volt és a súrlódás következtében el tudott fordulni (15. ábra). Az elfordulási szög nagyságából meghatározta a veszteséget. Méréseit fű és kukorica aprításánál is elvégezte. Mérései alapján arra a következtetésre jutott, hogy a súrlódási teljesítményveszteség közel 20 %-a volt az összhajtás teljesítménynek (14. ábra).



16. ábra: A szecskázás teljesítményigénye eltérő nedvességtartalmú növény aprításakor (P_A: össz-teljesítmény igény, P_T: szecskázódob teljesítményigénye, P_{BS}: gyorsítás teljesítmény igénye, P_R: súrlódás teljesítmény igénye)

A gödöllői gépminősítő intézet által (FVMMGI, 1975) lefolytatott szántóföldi vizsgálatok során a szecskázógép fajlagos energiaszükséglete 4-2 kWh/t volt 2,5-10 kg/s áteresztőképesség mellett. A vizsgálatokat DUNA, HESSTON és E-280-as szecskázó géppel végezték a Lajtahansági Állami Gazdaságban. Vizsgálat során mérték az egyes részegységek teljesítményigényét, és ezekből az adatokból számították ki a fajlagos mutatókat.

Egy másik vizsgálat szerint (FVMMGI, 1989), melyet JAGUAR-ral végeztek, az eredmények azt mutatták, hogy a szecskázógép áteresztőképességét a motorteljesítmény egyoldalú növelésével csak a fajlagos hajtóanyag felhaszná-

lás romlása mellett lehet növelni. 73-77 %-kal nagyobb áteresztőképességhez 56 %-kal több motorteljesítmény és 17-26 %-kal több üzemanyag szükséges.

A szakirodalomban fellelhető eredmények alapján látható, hogy szecskázott fű és más aprított növény esetében sem lehet egyértelműen kijelenteni, hogy az anyagnak kis intervallumban változó súrlódási együtthatója van, hanem az jelentősen függ a mérés körülményeitől.

2.4. A kopás

Súrlódás során, az egymáson elmozduló felületekről anyag válik le így a felület alakja és mérete is megváltozik. A változás sebességétől függően az érintkező felületek különböző mértékű, a működés szempontjából megengedhető vagy meg nem engedhető károsodásokat szenvednek. A kopás lassú, fokozatos anyagleválás, a szerkezet működésével együtt járó, gazdaságosan ki nem küszöbölhető, és ezért megengedhető károsodási folyamat, amely csak hosszabb, esetleg előre tervezhető idő alatt hoz létre a súrlódó felületeken akkora alak és méretváltozást, amekkora már működési zavarokat okoz. A gyorsan kialakuló felületi károsodások: karcolódások, bemaródások, berágódások, összehegedések nem tekinthetők normális kopási folyamatnak, mert olyan mértékű felületi változásokat vagy méret eltéréseket idéznek elő, amelyek a szerkezetet rövid idő alatt működésképtelenné teszik. Ugyancsak nem tekinthető kopási folyamatnak a felszíni kifáradás, mert bár csak bizonyos idő eltelte után alakul ki, de akkor gyorsan tovaterjedő felületi kitöredezéseket, krátereket hoz létre, amelyek rövid idő alatt működési zavarokhoz vezetnek. A kopás anyagveszteség, amelyet rendszerint a leváló anyag tömegével vagy térfogatával jellemeznek. A kopás nagyságát gyakran a súrlódó rendszer valamely jellemzőjére: terhelésre, súrlódási útjára, futás idejére, anyag kibocsátására vonatkoztatják. A kopásformák elkülönítésére több osztályozást is kidolgoztak. Ezek közül a gyakorlatban azokat fogadták el általánosan, amelyek az egyes kopásformákat a kopási részecske leválását okozó folyamatok alapján különítik el.

Kopási mechanizmusok:

- adhéziós kopás,
- abráziós,
- eróziós,
- fáradásos,
- oxidációs kopás,
- súrlódási korrózió,

Az adhéziós kopás

Tiszta felületek esetén mely minden más kenő és szennyezőanyagtól mentes a felületek érintkezésekor az atomok kölcsönhatásba lépnek egymással és adhéziós kötés jön létre. A két felület elmozdulásakor az adhéziós kötés elnyíródik, de nem a két felület határán, hanem a kisebb szilárdsági tulajdonságokkal rendelkező anyagban. Így anyagrészecskék jutnak át a másik felületre. A hasonló kristályszerkezetű anyagok hajlamosak e kopásra valamint bemaródásra és berágódásra. Ezért az ilyen típusú anyagpárosítás kerülni kell és inkább eltérő kristály- és molekulaszerkezetű anyagokat célszerű egymással párosítva használni.
Archard szerint az adhéziós kopás számítható abban az esetben, ha a kopási tényező kísérlet vagy gyakorlati tapasztalat alapján megállapítható:

$$V_A = k \cdot \frac{F_N}{H} \cdot L_S \quad [\mathrm{mm}^3],$$

ahol: L_S - kopási úthossz (mm),
F_N - normál terhelő erő (N),
H - kopásnak kitett lágyabb anyag keménysége (N/mm^2),
k - kopástényező (-).

Kenéssel megakadályozható illetve csökkenthető az adhéziós folyamat. Nagyobb igénybevételek esetén kémiai reakcióval szulfid klorid stb. réteget alakítanak ki az adhézió és az intenzív kopás illetve berágódás elkerülésére.

Az abráziós kopás

Abráziós kopást a felületbe benyomódó kemény részecskék okozzák, melyek barázdákat húznak az anyag felületébe és mindemellett anyagot választanak le. E kopásból származó anyagveszteség függ a koptató anyag keménységétől és a súrlódási úthossztól. A tapasztalatok és kísérletek alapján az abráziós kopás a kopásnak kitett anyag szívósságától, alakváltozás képességétől és a keménységétől függ. Gumi és nagy rugalmassági modulussal rendelkező polimerek kopásakor a felszín alakváltozása gyakran szinte teljesen rugalmas marad és a forgácsoló igénybevétel mellett előtérbe kerül a morzsoló, tépő hatás valamint az ismétlődő igénybevételből származó kifáradási folyamat is jelentős lesz.

Abráziós kopás a leggyakoribb kopásforma mind a műszaki mind a mezőgazdasági gyakorlatban ott ahol poros környezetben dolgozik az adott berendezés. Ezért ennek megszüntetésére mindenképpen törekedni kell elsősorban nagy szilárdságú, de egyben szívós anyagok vagy bevonatok alkalmazásával.

A fáradásos kopás

E kopásnál a felszíni anyagréteget ismétlődő igénybevétel terheli, mely következtében a felszíni anyagréteg eltolódik, rétegesen rendeződik, felkeményedik és elridegedik ennek következtében repedések keletkeznek, melyek tovaterjedve a részecskék leválását eredményezi.

Oxidációs-korróziós kopás

Ez a leggyakrabban előforduló kopásforma, mely a levegővel érintkező, súrlódó szerkezetek elhasználódásában uralkodó. Korróziós kopási folyamat rendszerint a következő négy formában játszódik le (KALÁCSKA, 1997):

- tartós kopásálló vékony kenőfilm képződik a súrlódó felületen a korrózió és a súrlódási igénybevétel hatására, amely lassan fokozatosan kopik, miközben újra képződik,
- gyenge korróziós réteg alakul ki, amely gyorsan lekopik, de újra is képződik. Nagy a kopás sebessége, és rendszerint kicsi a súrlódás,
- a korrózió ellen kialakított felületi védőréteg a súrlódás során megsérül a közeg a sérült helyekre behatol, és súlyos károsodásokat okoz az alapanyagban,
- gyors korrózió, de a felületi réteg gyenge, nem véd az adhéziós kötések kialakulásával szemben, ezért a korrózió mellett jelentős adhéziós kopás, berágódás alakul ki.

Tribológiai szempontból az első folyamat a legkedvezőbb. A korróziós kopás leggyakoribb változata az oxidációs kopás, amely levegő közegben kenés nélkül működő súrlódó felületek jellegzetes kopásformája.

A súrlódási korrózió koptató hatása

Nyugvó kapcsolatok érintkezési felületén rezgések, vagy ismétlődések hatására változó irányú és kis amplitúdójú elmozdulások jönnek létre. Ha kellően nagyok ezek az elmozdulások, akkor ledörzsölik a felületet borító adszorpciós és kemiszorpciós védőréteget így tiszta felületeket tesznek szabaddá, mely a környező levegő hatására oxidálódik. A mechanikai dörzsölés, oxidáció valamint az abrázió és adhézió következtében létrejövő felületi károsodás a súrlódási korrózió vagy más néven fretting.

Az eróziós kopás

E kopásforma nem a súrlódás miatt jön létre, hanem a szilárd testhez ütköző részecskék által okozott fárasztó és abráziós igénybevétel hatására. Eróziós kopás sebességét nagyban befolyásolja a koptató részecskék mérete és keménysége. Nagy rugalmasságú elasztomerek rugalmas alakváltozással felveszik a részecskék ütközését, de állandó ismétlődő igénybevétel szintén fárasztja az elasztomerek felületét és lassú eróziós kopást eredményez (KALÁCSKA, 1997).

A szecskázott anyagok koptató hatása

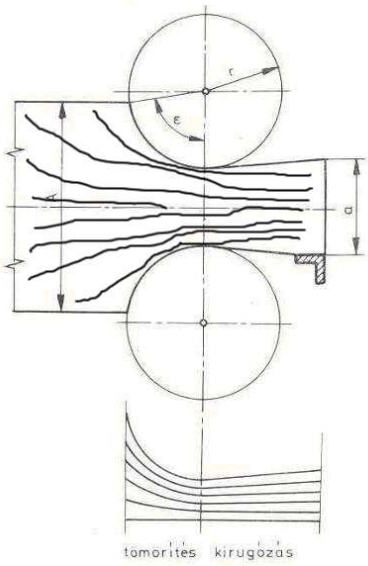
Szecskázott anyagok szállításakor jelentős koptatóhatásnak vannak kitéve a csúszó felületek. A 400t/h áteresztőképesség mellett jelentős anyagmennyiség csúszik végig az alkatrészek felületein. A problémát az okozza, hogy pl.: fű szecskázásakor elengedhetetlenül kerül föld és por a felaprítandó anyag közé és ezek a részecskék már agresszíven koptatják az acélt. Amerika egyes helyein, de más helyeken is a világban, ahol jelentősek a belvizek, a kukorica szárára jókora mennyiségű sár és por rakódik le. A folyamatos növekedés miatt ez a sárlerakódás az egész növényen megjeleni. Így betakarításakor a szerkezeti elemek erős koptatóhatásnak vannak kitéve. A kopás mérséklésére jelenleg speciális ún. HARDOX acélt alkalmaznak. Ezt az anyag magánötvözésű acél és erős koptatóhatásnak kitett területeken előszeretettel alkalmazzák, úgymint pl.: bányagépeknél, földmunkagépeknél, stb.

2.5. A szecskázóegység

Etető hengerek

Az etető szerkezet a felszecskázandó anyagot egyenletes sebességgel és tömörséggel juttatja a vágószerkezethez. Az etetőszerkezet állhat hengerpárból, vagy etetőasztalból (MIKECZ, 1985). Az utóbbiak inkább a stabil gépekre voltak a jellemzők. A mai önjáró szecskázógépeken kizárólag etető-hengerpárokat alkalmaznak. A hengerek a súrlódó erő segítségével továbbítják a felaprítandó anyagot. Minél nagyobb a hengerpár átmérője annál könnyebben tudja az anyagot továbbítani, viszont a növény visszarugózása nagy, ami a vágás szempontjából kedvezőtlen. Kisebb átmérőjű hengerekkel lényegesen jobb tömörítés érhető el és a visszarugózás mértéke is csekélyebb. Azonban kis átmérőjű hengerek között könnyebben meg tud csúszni az anyag, így az egyenletes anyagáramot nem tudja biztosítani. Ezért célszerűen, az első két hengerpár átmérője nagyobb, így biztosítva van az egyenletes anyagáram. Az utána következő hengerpárok viszont kisebb átmérőjűek, mely a megfelelő tömörítést garantálja.

MIKECZ, (1985) szerint az etető-hengerpár átmérőjét az anyagáram kezdeti és a tömörítés utáni vastagsága, tehát a tömörítés mértéke határozza meg (17. ábra).



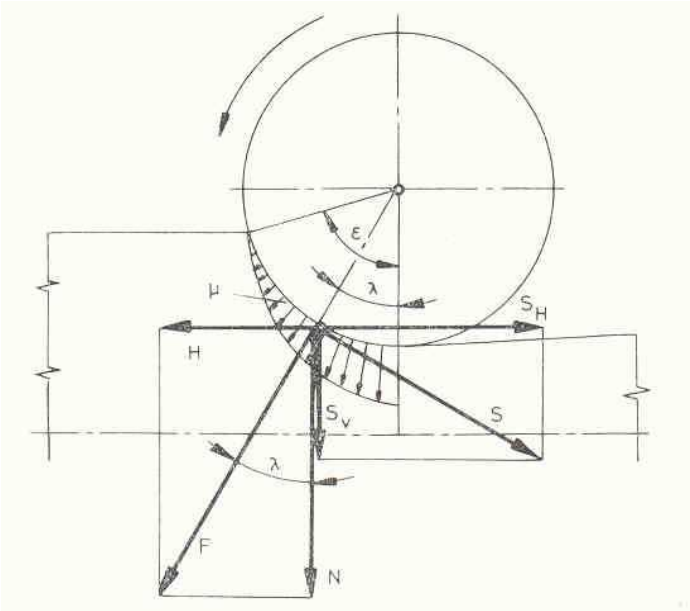
17. ábra: Tömörítő hengerek működése (MIKECZ, 1985)

$$d = \frac{A - a}{1 - \cos\varepsilon} \qquad \text{(mm).}$$

ahol: d - a tömörítő henger átmérője (mm)
A - a tömörítetlen anyag vastagsága (mm)
a - a tömörített anyag vastagsága (mm)
ε - a tömörítés szöge (rad)

A tömörítő-hengerekre fogakat és bordákat szoktak szerelni, így csökkenthető a hengerek átmérője, ami következtében a tömörítés mértéke nő. Kerülni kell azonban a túlzott tömörítést, mert az a szerkezeti elemek fokozott igénybevételét eredményezi. MIKECZ, (1985) szerint a helyesen beállított tömörítő erőt az szabja meg, hogy a vágókés akkor se tudja a szálakat kihúzni a hengerek közül, amikor éle már kissé tompa.

Fontos szempont az etetőhengerek vizsgálatánál a behúzás feltételének vizsgálata (18. ábra).



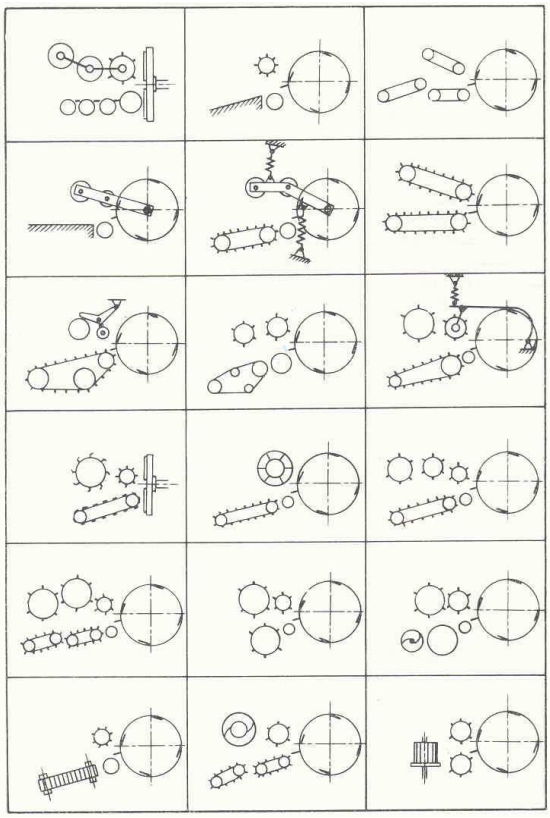
18. ábra: A behúzás feltétele (MIKECZ 1985)

Tehát a behúzás feltétele:

$$\rho \geq \lambda .$$

A ρ értéke kísérleti adatok szerint 17-30°.

A 19. ábra különböző etető-tömörítő megoldások szerkezeti kialakítása látható.



19. ábra: Etető-tömörítő szerkezetek különböző változatai (MIKECZ 1985)

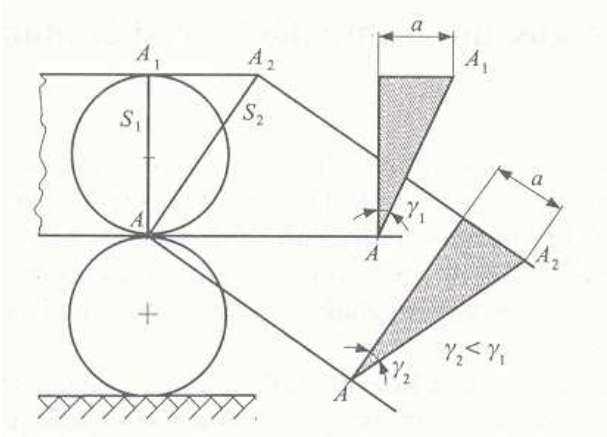
Ma használatos járvaszecskázóknál általában 4 húzó hengert építenek be, de van gyártó, mely 6-ot alkalmaz így még nagyobb tömörítést tud elérni (KRONE). A felső hengerek rugóterhelésűek így igazodni tudnak a termény vastagságához. A 4 henger közül 3 mindig valamilyen bordázattal vagy fogazattal van felszerelve. Az állókés előtt lévő viszont sima henger, azért hogy a felaprítandó anyagot könnyedén az állókésre tudja vezetni.

Az etetőszerkezet meghajtása hajtómű és lánchajtás segítségével történik. Stabil aprítógépeken a szecskahossz beállítása fokozatonként történt, de napjainkban már a fokozatmentes szecskahossz állítást is előszeretettel alkalmazzák. Utóbbi előnye a szecska tetszőleges hosszúságra történő beállításán túl az hogy a dob terhelése is egyenletesebb, hiszen hirtelen terhelésnövekedés esetén az előtolás sebességét csökkenti. A fokozatmentes meghajtást továbbá az is indokolja, hogy a zöld állományt hosszabbra, a száraz állományt rövidebbre kell felaprítani, és egy táblán belüli eltéréseket a fokozatmentes meghajtással meg tudják valósítani.

A szecskázódob

Szecskázódob az egész gép egyik legfontosabb egysége. A dob palástján elhelyezett kések aprítják fel a takarmány a beállított szecskahossznak megfelelően majd a vágást követően tovább szállítják azt.

A vágás körüli problémák már jelentősen letisztultak, hiszen kiemelkedő kutatók sora (SZENDRŐ, NAGY, RICHTER, REZNYIK, HAFFERT stb.) foglalkozott ezzel a témával. Így ma már köztudott, hogy az állókéssel szöget bezáró késelrendezés (ferdekés) csökkenti a vágáshoz szükséges energiát, hiszen metszés jön létre. Tárcsás szecskázó-doboknál szintén alkalmazták ezt a megoldást, de ott a konstrukció jellege miatt ez a szög mindig változott. E probléma kiküszöbölésére a kés alakja logaritmikus spirál, de ennek elkészítése bonyolult és költséges volt. Ugyanakkor a ferde késbeépítéskor a vágókés szöge is csökken, amely tovább könnyíti a növény átvágását (20. ábra).



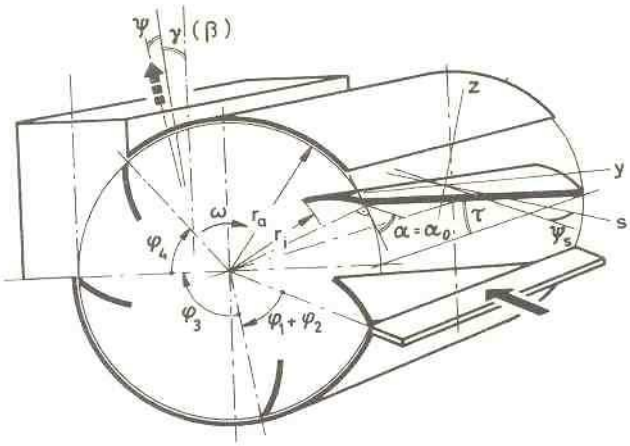
20. ábra: Az élszög vágáskor és metszéskor (SZENDRŐ, 2000)

E gondolatok mentén haladva Szendrő és társai kifejlesztették a Vibrocut szecskázódobot, mely biztosítja a kés él-irányba történő mozgatását így csökkentve a vágás energiaszükségletét. A vágáskor fellépő veszteségek egy részét a kés homlok és hátlapján fellépő súrlódás teszi ki. Emellett jelentős veszteség adódik a vágást megelőző deformáció miatt is. Azonban minél nagyobb a vágás sebessége annál kisebb e deformáció mértéke ugyanakkor nő a vágáshoz szükséges fajlagos energiafelhasználás. Aprítókés kialakítása során törekednek arra, hogy a kés ékszöge minél kisebb legyen, így könnyítve a növény aprítását. HAFFERT, (2004) mérései alapján kukorica aprításakor ez lineáris jelleget mutat. A növény felaprítása után a kések szállítási feladatot látnak el. Itt már jelentősek a gyorsításból, ütközésekből és a súrlódásból adódó veszteségek.

A vágást követő folyamatokat KROMER, (1967) három fő részre osztotta fel (21. ábra):

- ütközési és gyorsítási fázis ($\varphi_1 + \varphi_2$),

- szállítási fázis (φ_3),
- elhagyási vagy kifúvási fázis (φ_4).



21. ábra: Vágást követő három szakasz KROMER (1967) értelmezése szerint

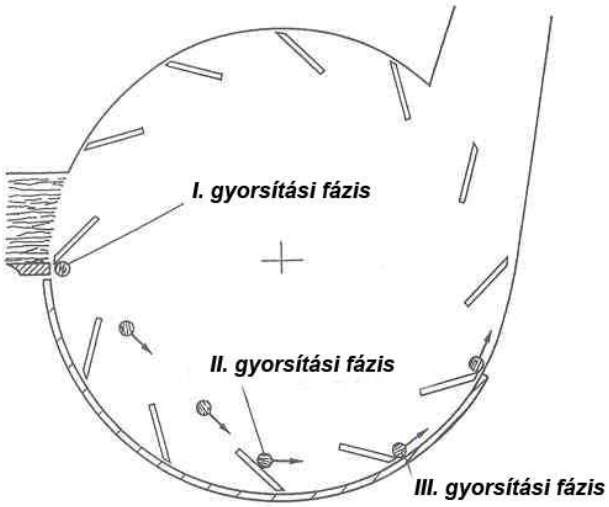
A szecskázódob feladata vágást követően a felaprított anyag elszállítása. Emiatt a szecskát fel kell gyorsítani és ez veszteséget okoz, mely elméletileg a következő összefüggés alapján határozható meg:

$$P_{gyorsítási} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot \left(v_1^{\,2} - v_0^{\,2}\right) \quad \text{(kWt/h)},$$

ahol: Q - tömegáram (t/h),
v_0 - anyag vágás előtti sebessége (m/s),
v_1 - szecskázódob kerületi sebessége (m/s).

Mint arra RÖHRS, (1988) is rámutatott, a fenti összefüggés nem írja le teljeséggel a gyorsításhoz szükséges energia nagyságát. Elméleti kutatásai során nyitott szecskázódobot vizsgálva, a gyorsítási fázist ő három részre bontotta (22. ábra):

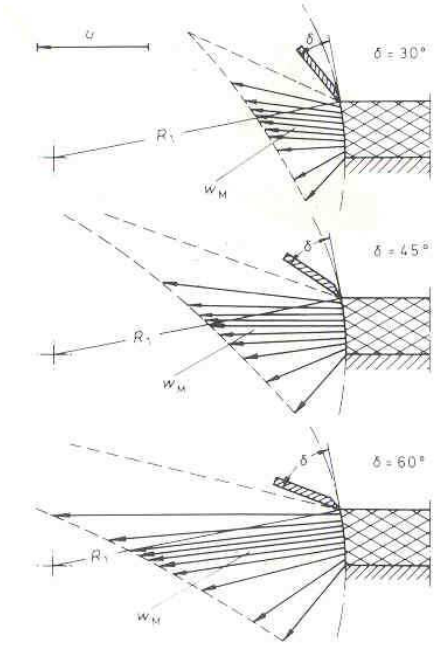
- I. gyorsítási fázis: vágás pillanatát követő gyorsítás,
- II. gyorsítási fázis: kés és szecska ismételt találkozása,
- III. gyorsítási fázis: kifúvás.



22. ábra: Gyorsítási fázisok ábrázolása (RÖHRS 1988)

A gyorsítás első fázisában a szecska sebességének nagyságára és irányára befolyással van az anyag mechanikai tulajdonsága, amely mint az az eddigi kutatásokból is kiderül, tág határok között változhat. RÖHRS (1988) kutatása is rámutat arra, hogy a gyorsítási veszteséget analitikusan számolni nehéz, hiszen az esetek többségében az egyenletek nemlineárisak.

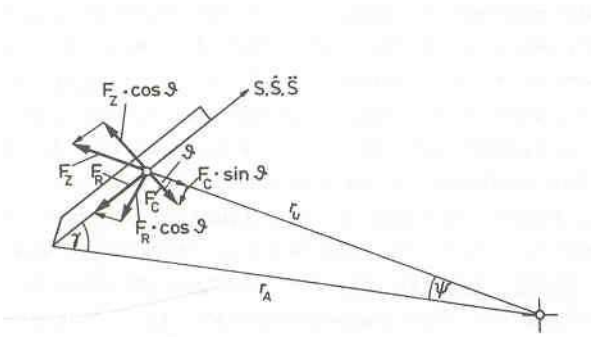
Gyorsítási folyamat során a szecskázott anyag a késsel ütközik és homloklapján súrlódik. Az ütközés folyamatát a két ütköző test tömege, sebessége és az ún. ütközési szám befolyásolja. KROMER, (1967) úgy közelítette meg a dolgot, hogy ütközéskor a szecska sebessége a dob kerületi sebességéhez viszonyítva nagyságrendekkel kisebb, ezért elméleti megközelítés során, a szecska ütközés előtti sebessége nullának vehető. Valamint arra is rámutatott, hogy a szecska tömege is jelentősen kisebb a dob tömegéhez képest. WILHELM, (1975) kutatásaiban felhívta a figyelmet arra is, hogy a kés állásszöge szintén befolyásolja az ütközés kimenetelét. A 23. ábra mutatja különböző késszögek esetén a szecska sebességének alakulását.



23. ábra: Szecska sebességének alakulása különböző késbeállítás esetén (WILHELM 1975)

A kés homloklapján keletkező súrlódási teljesítmény veszteséget RÖHRS, (1988) elméleti úton vizsgálta. Ő a szecska mozgásánál figyelembe vette azt is, hogy az aprított anyag forgó rendszerben mozog és a koriolis erővel is számolt. Számítása során egy bonyolult egyenletet kapott mely nehezen értelmezhető.

$$P_{RmI} = \sum_{x=1}^{n} \frac{r_A \cdot \sin\gamma \cdot m_x \cdot \omega^2}{\varphi} \cdot \int_0^{\varphi_{RF}} [\mu \cdot \cos\vartheta \cdot (r_A \cdot \sin\gamma \cdot \omega \cdot \cos\vartheta - 2\dot{s}) + 2\dot{s} \cdot \sin\vartheta] d\varphi$$



24. ábra: Tömegpontra ható erők forgó rendszerben (RÖHRS, 1988)

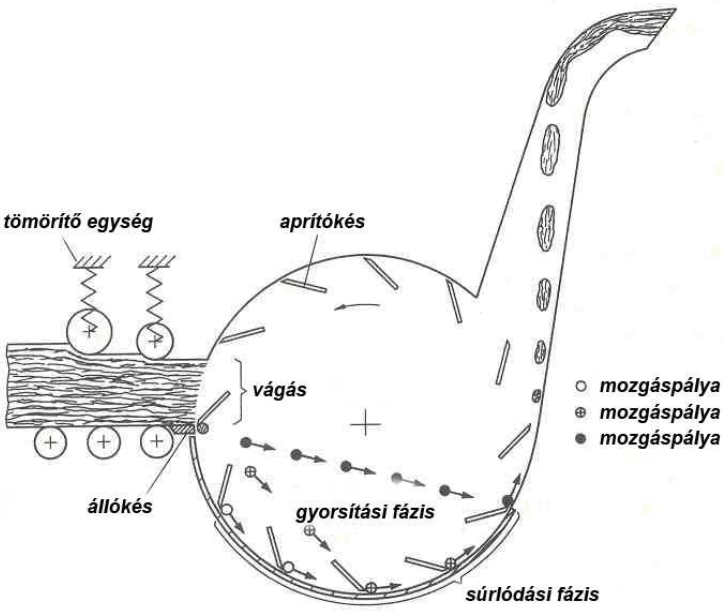
A $\dot{s}$ - tömegpont relatív sebesség a forgó koordináta rendszerben- meghatározására KAMPF, (1958) a következő egyenletet állította fel:

$$\dot{s} = \omega \cdot \left[\left(\sqrt{1+\mu^2} - \mu\right) \frac{(v_1/\omega) - r_1(\cos\vartheta + \mu \sin\vartheta)\left(\sqrt{1+\mu^2} + \mu\right)}{2\sqrt{1+\mu^2}} e\left(\sqrt{1+\mu^2} - \mu\right)\omega + \right.$$

$$\left. + \left(\sqrt{1+\mu^2} + \mu\right) \frac{(v_1/\omega) + r_1(\cos\vartheta + \mu \sin\vartheta)\left(\sqrt{1+\mu^2} - \mu\right)}{2\sqrt{1+\mu^2}} e\left(\sqrt{1+\mu^2} + \mu\right)\omega \right],$$

ahol: ω - a szecskázódob szögsebessége [1/s],
μ - a súrlódási tényező nagysága.

A centrifugális erő miatt a felaprított anyag egy része a szállítási folyamat alatt a doblemezen csúszik és ennek következtében itt jelentős a súrlódási veszteség. Korábban már KROMER és RÖHRS is leírta, hogy e veszteség jelentősen függ attól, hogy a szecska milyen mozgáspályát ír le a vágást követően. Nyitott szecskázódob alkalmazásakor a szecska lényegesen kevesebbet súrlódik a doblemezen, mint azt a 25. ábra is mutatja.



25. ábra: A szecska lehetséges mozgáspályája vágást követően (RÖHRS, 1988)

Zárt dobok alkalmazásakor a fenti mozgáspálya lényegesen módosul és ennek következtében a súrlódási veszteség is nő, mivel a felaprított anyag hosszabb idei kénytelen a doblemezen csúszni. E veszteség RÖHRS számítása alapján:

$$P_{Veszteség} = F_R \cdot v = Q \cdot r^2 \cdot \omega^3 \cdot \mu \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \quad \text{(kWt/h)},$$

ahol: r - doblemez hajlítási sugara (m),
ω - szecskázódob szögsebessége (1/s),
μ - súrlódási együttható (-),
φ - doblemez szöge (fok),
Q - tömegáram (t/h).

Az egyenletből látható, hogy konstrukciós szempontból a súrlódási veszteséget a dob szögsebessége, a doblemez sugara, a nyitásszöge és anyaga határozza meg.

Nem a teljes tömegáram súrlódik a doblemezen, hiszen egy része a kések homloklapján nyugszik. Azonban, hogy mekkora hányad fekszik a késen és mekkora súrlódik a doblemezen csak kísérletekkel határozható meg, mivel ennek számítása nehézségekbe ütközik. Erre utaló kísérleteket szakirodalomban nem találtam, ezért e veszteséget pillanatnyilag csak becsülni tudjuk.

Korábbi kutatásokból kiderül az is, hogy a visszakevert szecska aránya elérheti a 10%-ot (BEHRA, 2005). Annak mennyiségét legjobban a kés állásszöge befolyásolja. A centrifugális erő hatására a szecska próbálja elhagyni a kést, de ha túl kicsi az ékszög, akkor nem képes rá, mivel a kés homloklapján való mozgás sebességét a súrlódás jelentősen befolyásolja. A visszakevert szecska a dobot körülvevő burkolólemezen súrlódik, mely veszteség hasonlóan közelíthető meg, mint a doblemeznél fellépő súrlódási veszteség.

A terelőlemez

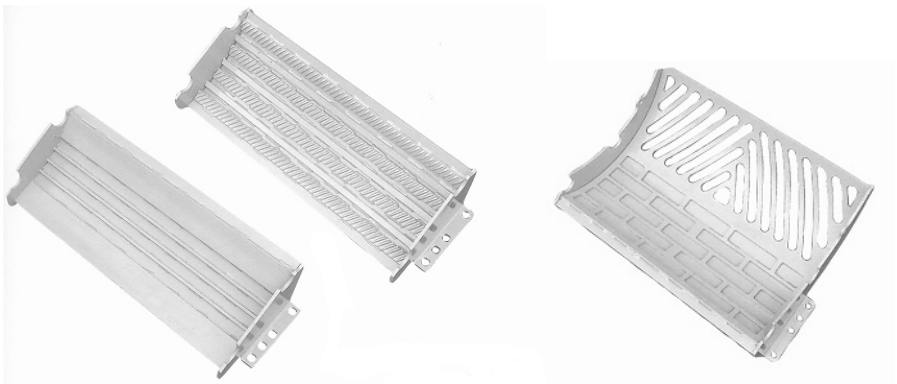
Egyes szecskázógép típusoknál a szecskázódob és a szemroppantó hengerek között található az ún. terelőlemez. Van olyan gép, ahol ezt elhagyják és a szecskázódob egyenesen a szemroppantó hengerekhez dobja a felaprított terményt (JOHN DEERE).

E lemez elsődleges feladata, hogy a szecskázódobot elhagyó aprított termény egyenletes vékony keresztmetszetben a szemroppantó hengerekhez vezesse, így jobb munkaminőség érhető el. A terelőlemezen az anyag csak súrlódik, az ütközési veszteség minimális, mivel a kezdő és a végződő rész pontosan illesztve van, valamint anyagszűkítés sincs, vagy minimális.

A szemroppantó egység

Tömegtakarmány előállítására főleg kétfajta növény típust használnak: a fűfélék, és a silókukorica. A kukoricaszemek rendkívül energia dúsak, ezért mindenképpen szükséges a benne lévő anyagok feltárása. Ahhoz, hogy ez az energia maximálisan felhasználható legyen a kukoricaszemeket zúzni kell, ha erre nincs mód akkor is legalább megsérteni és így már a benne lévő tápanyag hasznosulni tud. Silókukoricát általában 7 mm-es hosszúságúra aprítják fel két okból kifolyólag. Az egyik az, hogy tejtermelés szempontjából a 7-15mm szecska a legmegfelelőbb. Ezen tartományon belül nincs jelentős kihatása a tejtermelés nagyságára. A másik ok energetikai megfontolásokon alapszik. Ha egy kukoricaszárat rövid darabokra kell felaprítani, akkor az jelentős mértékben növeli a felhasznált üzemanyag mennyiségét, hiszen többször kell a szárat átvágni. Tekintettel arra, hogy a beállított 7 mm-es szecskahossznál biztos marad ép szem mindenképpen indokolttá vált egy olyan egység beépítése, amely garantálja a szemek megsértését.

Kezdetben zúzókosarat alkalmaztak erre a célra (26. ábra). Ennél a megoldásnál a doblemezben volt egy betét beleépítve valamint az aprítókésekre is fel voltak szerelve zúzóelemek. Így a kettő együttes hatásának köszönhetően jelentős mértékben csökkent a sértetlen szemek aránya.



26. ábra: Különböző kialakítású zúzókosarak

Korszerű szecskázógépeken főleg szemroppantó-hengereket alkalmaznak (27. ábra). Az egység két egymással szembeforgó hengerpárból áll. A hengerek palástján fogazat van kialakítva így könnyebben meg tudja sérteni a szemeket. A hengerek eltérő fogszámmal is készülhetnek.

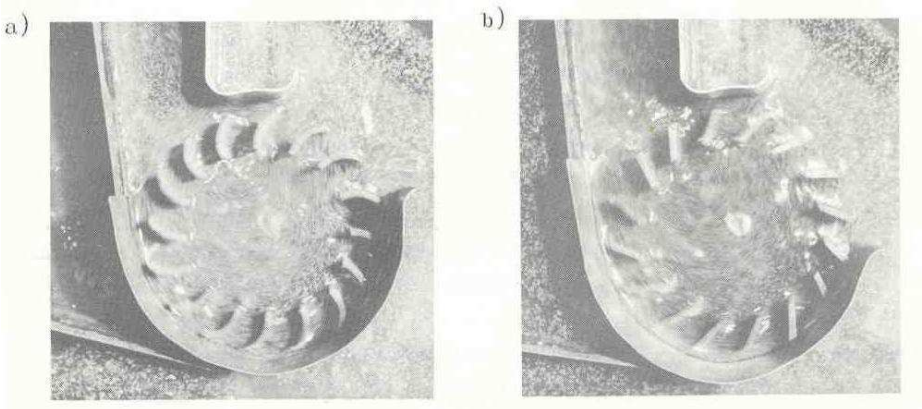
27. ábra: Különböző fogszámú és átmérőjű szemroppantó hengerek

A hengerek általában 20%-os fordulatszám különbséggel forognak, javítva a zúzási hatékonyságot.

A gyorsítódob

A szemroppantó hengerektől érkező szecskázott anyagot a gyorsítódob konstrukciótól függően közel 70 m/s-os sebességre gyorsítja. A dobóventillátor ugyanakkor levegőt is kever a szecskázott anyag közé, így már pneumatikus szállításról is beszélünk. Ennél az egységnél, mint ahogy a szecskázódobnál is, fellép ütközési gyorsítási és súrlódási veszteség. A gyorsítási és ütközési veszteségek hasonlóan értelmezhetőek, mint az aprítódobnál.

WILHELM, (1975) kísérleteket végzett arra vonatkozóan, hogy a lapát szöge és alakja miként befolyásolja a szecska szállítását valamint a levegősebesség alakulását. Kísérleteiben egyenes és ívelt lapátozású ventillátorokkal végzett kísérleteket (28. ábra).

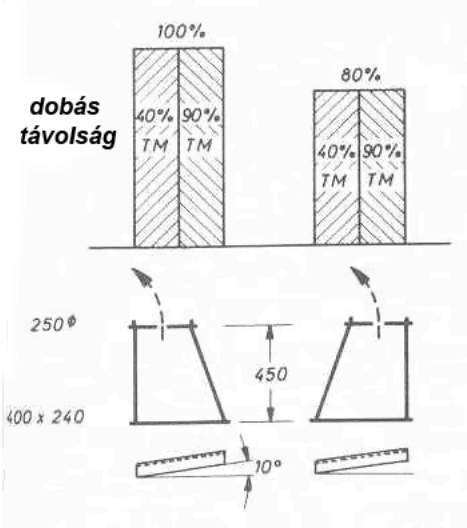


28. ábra: Granulátum mozgása különböző formájú lapátkialakításoknál (Wilhelm 1975)

Vizsgálataiból arra a következtetésre jutott, hogy görbített lapátozású dobóventillátorral nagyobb légsebesség érhető el, így növekszik a szecska dobástávolsága is. Ennek az a magyarázata, hogy radiális ventillátoroknál a légáramlat egy ún. Archimedesi-spirált ír le. Ha a lapát geometriája követi ezt a görbületet, akkor kevésbé zavarja az áramlási viszonyokat, így jobb a hatásfoka. Egyenes lapátozás alkalmazásakor a lapátok 50-75°-os beállításakor lehet a legjobb szállítást elérni.

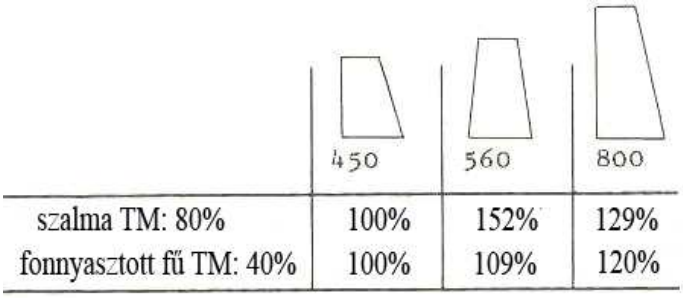
A szűkítő

A gyorsítódob és a kifúvótorony között van az ún. szűkítő. Feladata, hogy a gyorsítódobtól széles keresztmetszetben érkező anyagáramot a kifúvótorony szélességére szűkítse le. Ennél az egységnél jelentős súrlódási veszteség adódik a szűkítésből kifolyólag. KROMER, (1967) vizsgálatai alapján, mint az a 29. ábra látszik, a dobóventillátor lapátjainak állásszögéhez a szűkítéshez képest, jelentős befolyással van a keletkező súrlódási veszteséget (a „TM” jelentése szárazanyag tartalom). Mint azt az ábra is mutatja a második megoldásnál a lapátozás nekidobja a szecskát a szűkítő falának. Itt már az ütközési veszteség is jelentős, valamint jóval nagyobb a súrlódási veszteség is.



29. ábra: Dobás távolsága a szűkítés kialakítása és a dobóventillátor lapátjainak elhelyezkedéséhez képest

KROMER, (1967) arra vonatkozóan is végzett kísérleteket, hogy adott keresztmetszetre való szűkítés esetén a szűkítő magassága hogyan befolyásolja a kifúvás távolságát (30. ábra). Vizsgálataiból arra lehet következtetni, hogy a szűkítés szögének mérséklésével a súrlódási veszteség némiképpen csökkenthető.



	450	560	800
szalma TM: 80%	100%	152%	129%
fonnyasztott fű TM: 40%	100%	109%	120%

30. ábra: Szűkítés hatása a dobás távolságára

Kifúvótorony

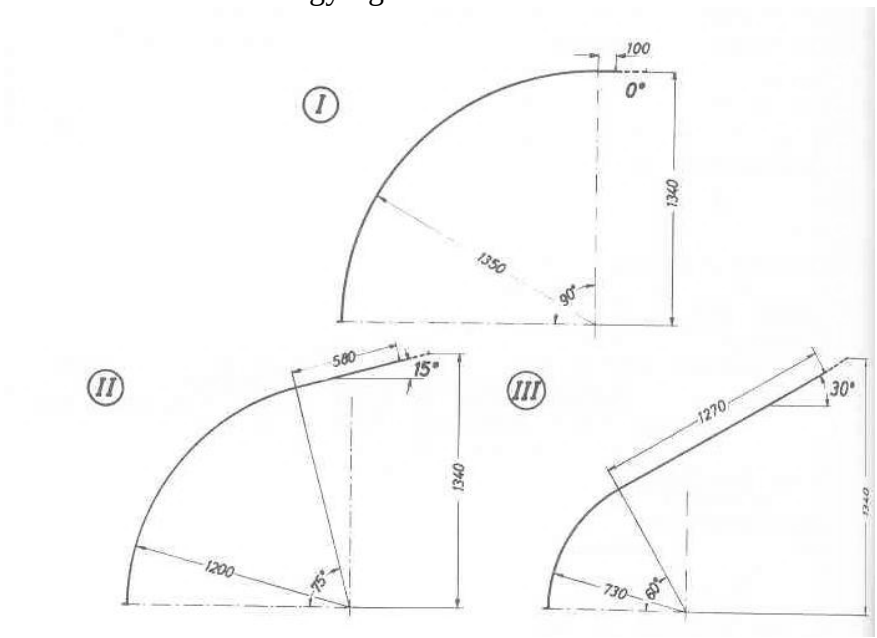
A szűkítőt követően a felaprított anyag a szecskázóegység utolsó egységéhez kerül, a kifúvótoronyhoz. A torony tetszőleges helyzetbe állítható, így igazodni tud a szállítójárművekhez. A torony végén lévő terelőlemez tovább segíti az anyag irányítását, így a szecskázógép közelre és távolra is egyaránt el tudja juttatni az anyagot.

A kifúvótoronyban a súrlódási veszteség a meghatározó. A szecskázott anyag mind a hátfalon, mind az oldalfalon súrlódik, így jelentősen koptatóha-

tásnak van kitéve ezen egység. A kopás mérséklésére itt is speciális kopásálló lemezeket alkalmaznak.

Az eddigi kutatások publikált eredményei közt elenyésző utalást lehet találni azzal kapcsolatban, hogy hogyan mozog az anyagáram a kifúvótoronyban, és ennek következtében mekkora a súrlódási veszteség.

KROMER, (1967) kutatásai során arra kereste a választ, hogy a kifúvótorony alakja és görbülete mennyiben befolyásolja a szecskázott anyag kifúvási távolságát. Kísérleteibe három különböző alakú tornyot vont be, melyek a 31. ábra: láthatóak. A görbületek hossza közel azonos volt, ennek következtében a súrlódási úthossz is azonos nagyságú volt.



31. ábra: Különböző alakú kifúvótornyok

Kísérletei alapján megállapította, hogy a III. kialakítású kifúvótoronnyal tudja az anyagot a legmesszebbre eljuttatni. Megállapította, hogy a szecskázott anyag sebessége a torony elhagyás pillanatában azonos volt mind a három kialakításnál. Ez arra enged következtetni, hogy a görbület alakja nem befolyásolja a súrlódási veszteséget.

2.6. Szimulációs eljárások (CFD és DEM)

A CFD szimulációk áttekintése

A CFD betűkombináció egy mozaikszót takar, mely a Computational Fluid Dynamics angol terminológia rövidítése, magyar megfelelője "áramlástani numerikus szimuláció". Az áramlástani problémákat többnyire csak bonyolult matematikai formában lehet leírni, melyeket leginkább numerikus módszerek

segítségével lehet a leghatékonyabban megoldani számítógépek használatával. A CFD számítások alapelve, hogy numerikus módszerrel megoldjuk az áramlást leíró bonyolult differenciálegyenleteket (Navier-Stokes, kontinuitás, energiaegyenlet, stb.), illetve bizonyos esetekben, azoknak egyszerűsített változatait. Ennek megfelelően meg kell adni a CFD rendszernek a vizsgált modellre jellemző perem- és kezdeti feltételeket. Az áramlástani szimulációk diszkretizációjára három fő módszer terjedt el:

- véges differenciák módszer,
- végeselem módszer,
- véges térfogatok módszer.

Ezek közül leggyakrabban a véges térfogatok módszerét alkalmazzák (SCHLICHTING, 2006). A véges térfogat módszer (hasonlóan a végeselem módszerhez) a számítási tartomány kisebb térfogati elemekre bontja, amelyeken belül a keresett áramlástani mezőváltozók egyszerűbb (pl. lineáris) függvényekkel közelíthetők. A számítások során egyik meghatározó tényező a turbulencia modell helyes kiválasztása. Az áramlástani szimulációk pontossága nagyban függ a turbulencia modell helyes megválasztásától. A ma alkalmazott turbulencia modellek között vannak olyanok, melyek algebrai egyenleteket oldanak meg, de vannak olyanok, melyek másodrendű differenciálegyenlet rendszereket. A számítás idejét a háló finomsága mellett az alkalmazott turbulencia modell is nagyban befolyásolja. Néhány szó a gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott turbulencia modellekről.

A lamináris modell tisztán lamináris áramlások szimulációjakor alkalmazzuk. Nem szükséges a turbulencia modell. Egyetlen kritérium, hogy a Reynold-szám (Re<2300) kicsi hogy legyen.

A Baldwin-Lomax modellt szárnyprofilok körüli számításokra fejlesztették ki. Ez a modell algebrai egyenleteket old meg és nem használ transzportegyenleteket. A modell hátránya, hogy leválásos áramlás esetében pontatlan a számítás, és a futtatás strukturált hálót igényel.

A k-ε modell két transzport egyenletet kezel. A kinetikus energiákra „k” és a turbulencia disszipációra „ε” oldja meg azokat. Ez a modell régóta alkalmazott, nem igényel nagy számítási időt és numerikusan stabil. Hátránya, hogy a fal melletti áramlásokat és a leválásokat pontatlanul kezeli.

A k-ω modell szintén két transzport egyenletet old meg, kinetikus energiára „k” és az örvényfrekvenciára „ω”. Fal közelében kedvezőbben viselkedik, mint az előző modell, viszont kedvezőtlenebbül szabad áramlások számításakor.

Az előző két modell hátrányainak kiküszöbölésére lett az un SST-modell (Shear-Stress-Transport) kifejlesztve. A fal mellett k- ω modellt alkalmaz, míg a szabad áramlásban a k-ε-t. Ezen előnyök miatt a leválásokat is pontosabban kezeli, miáltal a számítás pontossága nő.

A Reynolds-Stress modellt ott alkalmazzuk, ahol a turbulencia anizotrop. Ez a modell a legpontosabb olyan számítások során, ahol erős szekunder áramlások is fellépnek. Hátránya a több számítási időszükséglet.

Ezek a leggyakrabban alkalmazott turbulencia modellek, de természetesen vannak más modellek is. Viszonylag új modellnek számít a DNS modell, mely minden egyes elemre az egész Navier-Stokes egyenletet oldja meg:

$$\frac{d\underline{v}}{dt} = \frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + grad\,\frac{v^2}{2} - \underline{v} \times rot\underline{v} = \underline{g} - \frac{1}{\rho}\,grad\,p + \nu \Delta \underline{v}\,.$$

Ez a modell nagy pontosságú viszont hátránya, hogy jelentősen több számítási időt vesz igénybe. Alapvetően érvényes az a szabály, hogy nincs olyan modell, amely bármely probléma megoldására jó lenne. A számítás jóságát alapvetően a megfelelő turbulencia modell kiválasztása határozza meg.

A DEM szimulációk áttekintése

A diszkrét elemek módszert (DEM) az 1970-es években fejlesztették ki azzal a céllal, hogy szemcsés anyagok mozgását a szemcsék közötti kölcsönhatásokat nagy szemcseszám esetén numerikusan modellezni tudjuk (BAGI, 2007). Maga az eljárás csak 1990-es évektől kezdett elterjedni amikor a számítástechnika kezelni tudta ezen problémák megoldását. A mai korszerű szoftverek egymillió szemcseszám kezelésére is alkalmasak. A diszkrét elemes modellezés során a modell egymástól egyértelműen elkülöníthető elemekből áll, melyek önálló szabadságfokkal rendelkeznek. Emellett az elemek között új kapcsolatok jöhetnek létre és szűnhetnek meg. A számítás során mozgásegyenleteket oldunk meg minden egyes részecskére. A mozgásegyenletek numerikus megoldására több módszert is alkalmaznak:

- Newton-Raphson-módszer,
- relaxáció,
- elsőrendű Euler-módszer,
- centrális differenciák módszer,
- Newmark-féle ß-módszer.

A számítás során az alábbi mozgásegyenleteket (elmozdulás, sebesség, gyorsulás) kell megoldani:

$$\bar{u}(t)=\begin{bmatrix} u_x(t) \\ u_y(t) \\ u_z(t) \\ \varphi_x(t) \\ \varphi_y(t) \\ \varphi_z(t) \end{bmatrix}; \quad \bar{v}(t)=\begin{bmatrix} v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_z(t) \\ \omega_x(t) \\ \omega_y(t) \\ \omega_z(t) \end{bmatrix}; \quad \bar{a}(t)=\begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \\ a_z(t) \\ \beta_x(t) \\ \beta_y(t) \\ \beta_z(t) \end{bmatrix}.$$

Egy általános alakú térbeli végtelen merev elem mozgásegyenlete tehát hat skalár egyenletből áll (három erő és három nyomatéki egyenletből). Az eljárással síkbeli és térbeli problémák is modellezhetők. Az alkalmazott szoftvereknél a választott elemek alakja különböző. Vannak, melyek poliéderekkel modellezik le az adott szemcse alakját, és vannak, melyek gömbbel vagy gömbökből összeállított alakként közelítik azt. Diszkrét elemes modellezés során legtöbbször a részecskéket merev testnek tekintjük, de megjelentek már olyan szoftverek is melyek egy primitív végeselem-hálót tesznek a részecskére így lehetővé téve a részecske alakváltozásának kezelését. Természetesen ez utóbbi megoldás jelentősen több számítási időt igényel, mivel a fenti mozgásegyenlet további minimum 6 szilárdsági egyenlettel egészül ki. A diszkrét elemes modellezés során anyagjellemzőként meg kell adni a halmazra jellemző csúsztató rugalmassági modulust, a súrlódási viszonyok kezeléséhez szükséges súrlódási tényező nagyságát, illetve az ütközési számot is. Ezekre mindenképpen szükség van, de szoftver függően egyéb rendszerjellemző kiegészítő paramétereket adhatunk még meg.

A szimuláció során statikus és időben változó problémákat is megoldhatunk. Tranziens analízis során fontos a helyes időlépték megválasztása. Abba az esetben, ha túl nagy ez a lépték a részecskék egymáson keresztül mennek holott ez fizikailag nem lehetséges (32. ábra).

32. ábra: Időlépték értelmezése

Túl kicsi időlépték esetén a számítási idő növekszik meg drasztikusan. Az időlépték megválasztásakor ugyanakkor figyelembe kell venni a halmazban terjedő esetleges lökéshullámokat is.

A pneumatikus szállítás modellezése

A felaprított anyag a szecskázógépen belül a kinetikus energia és a pneumatikus szállítás következtében nagy sebességgel (~40-50 m/s) mozog. Ennek a szállításnak a modellezése több fázisú áramlások problémakörébe tartozik. Ennél a modellezésnél a levegő a primer fázis és a szecska az ún. szekunder fázis. Szemcsés anyagok pneumatikus szállítása szintén tovább bontható Lagrangian és Eulerian féle közelítésre. Lagrangian közelítést akkor alkalmazunk, ha a szemcsés anyag térfogatszázaléka nem éri el a levegő térfogatának 10 %-át. Ennél a modellezésnél figyelembe vesszük a primer közeg hatását a szekunder közeg mozgására, de fordítva nem, azaz nem számítjuk, hogy a szemcse lokálisan miként változtatja meg az áramlási viszonyokat a primer közegben. Az Eulerian féle közelítést akkor célszerű alkalmazni mikor a szekunder fázis térfogatszázaléka több mint 10 %. Ilyen számítás során figyelembe vesszük azt is, hogy a szemcse miként hat vissza a primer közeg áramlására. A fentiek alapján előre látható, hogy az Eulerian módszer jóval több számítási időt és gépkapacitást igényel. Modern CFD szoftverek, mint a CFX, Fluent, stb. képesek ilyen típusú - két vagy többfázisú- probléma megoldására. Ezen szoftverek hibája viszont abban mutatkozik meg, hogy szemcse-szemcse között létrejövő kontaktokat és mozgásviszonyokat nem képesek kezelni vagy csak durva közelítéssel. A szecska szemcsés anyag és a szemcsék a gépen belüli mozgás során egymásra hatnak. Szemcsés anyagok mozgásának modellezésére egy viszonylag új módszer a Diszkrét elemek módszere (Discrete Element Methode=DEM) nyújt segítséget. Bár maga az elmélet hosszú múltra nyúlik vissza, tényleges programok, melyek ezen elv alapján számolnak csak néhány évvel ezelőtt kezdtek el teret hódítani a szemcsés anyagok mozgásának modellezésére.

A diszkrét elemek módszerével dolgozó szoftver és az áramlástani szimulációk számámítására alkalmas szoftver összekapcsolása optimális közelítésnek bizonyul. Ilyen összekapcsolásra ad lehetőséget az EDEM diszkrét elemes szoftver, mely a FLUENT CFD szoftverrel van összekapcsolva. A kapcsolás un. TWO-WAY szerint történik, mely annyit jelent, hogy egy lépésközt kiszámít az áramlástani rész, majd az adatokat átadja a DEM szoftvernek, mely szintén számol egy lépésközt és visszaküldi a CFD szoftvernek a részecskék helyzetét. A két szoftver gyakorlatilag párhuzamosan számolja egymás mellett az időben változó (tranziens) pneumatikus szállítást. A számítás során figyelembe vehető a légellenállás és a levegő emelő hatása a részecskére. Ez különösen akkor fontos, ha a részecske mérete és tömege nem elhanyagolható a légáramlathoz képest. A nagy tömegű és átmérőjű részecske lemarad a levegőhöz képest, ezáltal a légellenállás jelentős. Míg a kis tömegű részecskék együtt tudnak haladni a légáramlattal, a légellenállás szinte elhanyagolható.

A légellenállás figyelembevételére négy modell használható (EDEM 2009):

- Freestream Equation,
- Ergun and Wen And Yu,

- Di Felice,
- User Defined.

Freestream Equation modell a részecskét gömbként kezeli és a légellenállást a

$$F_d = 0{,}5 \cdot c_d \cdot \rho \cdot A \cdot |v| \cdot v$$

összefüggés alapján számolja.
Az *Ergun and Wen And Yu* modell Az előző egyenletet módosítja úgy hogy már a részecske térfogatával számol.

$$F_d = \frac{\beta V \cdot |v| \cdot v}{1-\alpha}.$$

A *Di Felice* model a Freestream modellhez figyelembe veszi a porozitást is illetve a részecskék egymáshoz való közelségét is:

$$F_{Freestream} = 0{,}5 \cdot c_d \cdot \rho_f \cdot A_p \cdot |v_f - v_p| \cdot (v_f - v_p),$$

$$F_d = F_{Freestream} \varepsilon^{-(\chi+1)}.$$

Az emelőerő vagy felhajtóerő számítására három modell áll rendelkezésre:

- Saffman Lift,
- Magnus Lift,
- Fluid-induced torque.

A *Saffman Lift* model a részecske két széle között lévő sebességkülönbség okozta nyomás segítségével számolja ki a felhajtóerő nagyságát. Ez különösen fal melletti áramlásnál fontos, ahol a határrétegben lévő sebességeltérés nagy. A felható erő az alábbiak szerint számítható ki.

$$F_{Saff} = 1{,}61 d_p^2 (\mu_f \cdot \rho_f)^{0,5} |\omega_c|^{-0,5} [(u-v) \times \omega_c].$$

A *Magnus Lift* model a részecske forgásából keletkező nyomáskülönbséget veszi figyelembe. Ebből keletkező erő pedig kiszámítható a következő egyenlet segítségével:

$$F_{Mag} = 0{,}125 \pi d_p^3 \cdot \rho_f \frac{\mathrm{Re}_s}{\mathrm{Re}_\Omega} C_L [(0{,}5\omega_c - \omega_p) \times (u-v)].$$

Szecska szállítása esetén a légellenállásból adódó erő számítására a *Di Felice* modell jó közelítést ad. A felhajtó erő számítására a *Saffman* modell a megfelelő, mivel a szecska forgása nem jelentős ugyanakkor a fal mentén való haladását a szecskának az eltérő sebesség miatt célszerű figyelembe venni.

2.7. A szakirodalom kritikai értékelése

A szakirodalmi áttekintésből látszik, hogy sok kutató foglalkozott már a szecskázógépekkel és a bennük lezajló folyamatokkal. Eleinte a kutatások középpontjában a munkaminőség javítása és az áteresztőképesség fokozása állt. Mára már az energiafelhasználás mérséklése és a hatásfok javítása áll a kutatások középpontjában. Ma már elengedhetetlen a veszteségek figyelembevétele, hiszen a gépek áteresztőképessége a többszörösére nőtt az elmúlt évtizedben.

RÖHRS méréseivel igazolta, hogy a doblemezen keletkező veszteség önmagában jelentős nagyságú. Az akkori gépeknél ez a veszteség elérte az össz szecskázás igény 10 %-át. Vizsgálatai ellenére mégis a súrlódási probléma háttérbe szorult, és az akkori kutatások a gyorsítási és ütközési veszteségek mérséklését tűzték ki célul. Ennek köszönhetően megfelelően kialakított dobóventilátorral jelentősen javult a gépen belüli anyagáram. Wilhelm kísérletei alapján az ívelt lapátozásnak köszönhetően jobb szállítást ért el azonban a speciális lapátozás hátránya, hogy egyben költségesebb is. KROMER a vizsgálatai alapján arra a következtetésre jutott, hogy a kifúvótorony alakja nem befolyásolja a dobástávolságot. Ezzel a kijelentéssel azonban nem teljesen értek egyet, hiszen a sugár jelentősen befolyásolja a normálerőt, és ezáltal a súrlódási erő nagyságát, valamint a súrlódási úthossz is megváltozik.

A súrlódás okozta veszteségek és ennek következtében jelentkező problémák mindig háttérbe szorultak. A súrlódási veszteség meghatározására több paramétert is ismerni kell, hiszen a súrlódási tényező is rendszerfüggő. A súrlódási tényező nagyságára a szakirodalomban csak néhány utalást találtam. Emellett nem vagy csak hiányosan voltak feltüntetve, hogy az az érték milyen feltételek mellett igaz. Mivel a szecska egy biológiai anyag fontos ismerni ezeket a paramétereket is, hiszen más beállítás mellett jelentős mértékű eltérés adódhat. Ezért kutatásom során megvizsgálom, hogy a súrlódási tényező nagyságát a csúszás sebessége, felületi terhelés, nedvességtartalom, stb. miként befolyásolják ezek a paraméterek. A vizsgálatokat üzemi működési tartományokon belül végeztem el annak érdekében, hogy a legpontosabb leírást kapjuk a befolyásoló hatások mértékéről. Továbbá találni kell egy olyan új anyagot csúszófelületnek, melynél a súrlódási tényező (szecska-fal között) alacsonyabb, mint a szecska-acél között. Emellett az gazdasági és kopás szempontjából is megfelel az elvárásoknak.

Az irodalomban kevés utalást találtam arra, hogy a szecska hogyan mozog a szecskázógépen belül. Ez pedig egy kulcsfontosságú kérdés. Az anyagszállítás jellegéből adódóan a felaprított szecska szőnyegszerűen csúszik végig a terelőfelületeken. A biztos érintkezést a felületek enyhe görbültsége biztosítja, mivel a centrifugális erő a szecskát a felületnek szorítja. A cél az, hogy ez a szorító erő a lehető legkisebb legyen, de biztosítani kell azt, hogy a szecska ne váljon el a felülettől. Ez ugyanis turbulenciát okoz, amely lerontja a szállítást. Egy másik

probléma, hogy az anyag legtöbb esetben nem érintőlegesen érkezik a felületekkel. Erre KROMER és RÖHRS is rámutatott különösen a szecskázódob és a szűkítő esetében. Ennek hátránya, hogy jelentős az ütközési veszteség. A súrlódási folyamatok pontosabb megismerése céljából meg kell határozni, hogy mely részegységnél hogyan mozog a szecska és ott mekkora a súrlódási veszteség. A szakirodalomban fellelhetőek utalások az elméleti veszteség számítására, de ezek csak durva közelítések. Ez tehát tisztázatlan és e probléma részletes kifejtését fontosnak tartom. A gépen belüli anyagáramlás áttekintésére egy kapcsolt DEM-CFD szimulációt készítek. Ennek segítségével a sebesség, nyomás és mozgásviszonyok olyan helyeken is feltérképezhetőek, ahol mérésekkel ez nem lehetséges.

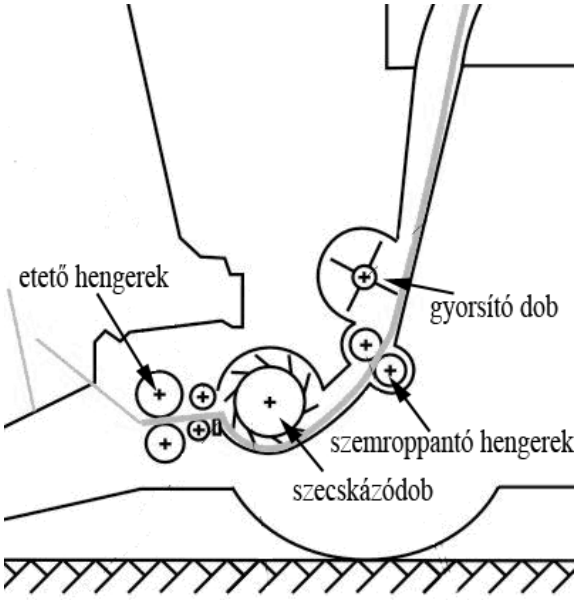
Az eddigi szakirodalommal ellentétben megmértem silókukorica és rétifű súrlódási tényezőjét eltérő felületi terhelés, csúszási sebesség, nedvességtartalom stb. mellett. Így egy jóval részletesebb képet kaptunk a súrlódási tényező alakulásáról. Ezen túl korszerű műanyagokkal, mint csúszófelület, folytattam le kísérleteket azért, mert kedvezőbbek a tribológiai tulajdonságaik. Ezeknek az anyagoknak a felhasználása lehetőséget biztosít arra, hogy csökkentsem a súrlódás okozta veszteséget a szecskázógépekben. Ennek igazolására szántóföldi méréseket is elvégeztem. Az anyagtranszport számítógépes szimulációja további lehetőséget biztosít arra, hogy a veszteségeket tovább mérsékeljük.

3. Anyag és módszer

3.1. A súrlódási veszteség számítása

3.1.1 Súrlódás a szecskázógépen belül

A felaprítandó és már felaprított anyag mozgatásához jelentős súrlódási ellenállást kell legyőzni hiszen óránként több mint 300 t növényt mozgatnak meg a gépek. A súrlódási veszteség két részre osztható. Egyik a szecska-fal közötti ún. külső súrlódás, másik a szecska-szecska közötti belső súrlódás. A külső súrlódás pontosan leírható, a belső súrlódás leírása azonban már jóval bonyolultabb feladat.



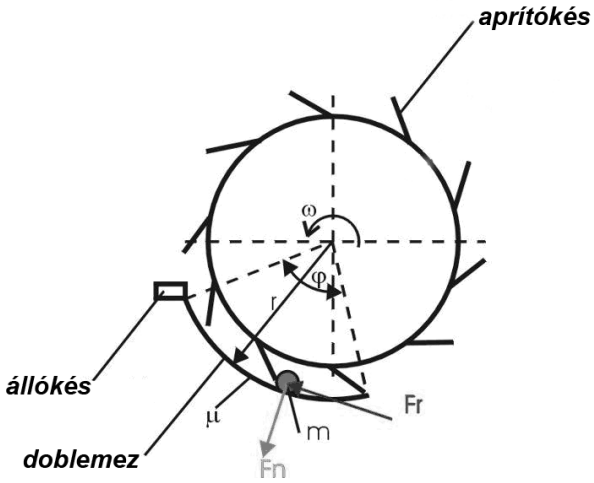
33. ábra: Anyagáram a szecskázógépen belül

Miután a felaprított növény elhagyja a szecskázódobot arra kell törekedni, hogy a halmaz szőnyegszerűen mozogjon a gépen belül. Ezt a követelményt figyelembe kell venni a gép tervezésekor is. Ha ezt a feltételt teljesítjük, akkor a szecska belső súrlódása kicsi lesz, mivel ekkor nem rendeződik át a szecskázott anyag. A belső súrlódás összetett problémája elméletileg kezelhetetlen. Egyrészt, mert a két szecska részecske közötti súrlódási tényező mérése bonyolult feladat. Másrészt a szecska alakja szabálytalan sokszög, így azok egymásba beleakadnak és nemcsak tiszta súrlódás lép fel köztük, hanem már a geometriából adódó alakzárást is figyelembe kell venni. Ezen indokok miatt disszertációm során a belső súrlódással nem, csak a szecska fal közötti külső súrlódással foglalkozom.

3.1.2 A súrlódási összveszteség

A súrlódási összveszteség meghatározásánál az egyes részeknél fellépő súrlódási veszteségeket kell megvizsgálni. Ezek összege adja a tényleges elméleti veszteség nagyságát.

A szecskázó egységnél, egyszerűsítésként először tekintsünk el attól, hogy a szecska és aprítókés között is fellép súrlódás. Ez a veszteség nagyságrendekkel kisebb, mint ami a szecska és doblemez között lép fel, hiszen a centrifugális erő a szecskát a doblemeznek szorítja, ennek következtében ott a súrlódás jelentős mértékű.



34. ábra: Az aprított anyag súrlódása a doblemezen

A doblemeznél keletkező elméleti súrlódási veszteség az alábbi egyenlettel határozható meg:

$$P_{dvesz} = F_R \cdot v = Q \cdot r_d^{\,2} \cdot \omega_d^{\,3} \cdot \mu \cdot \frac{\varphi_d}{2\pi} \quad \text{(kWt/h)}, \qquad (1)$$

ahol:
- r_d - doblemez hajlítási sugara (m),
- ω_d - szecskázódob szögsebessége (1/s),
- μ - súrlódási együttható(-),
- φ_d - doblemez szöge (fok),
- Q - tömegáram (t/h),
- F_R - súrlódási erő (N).

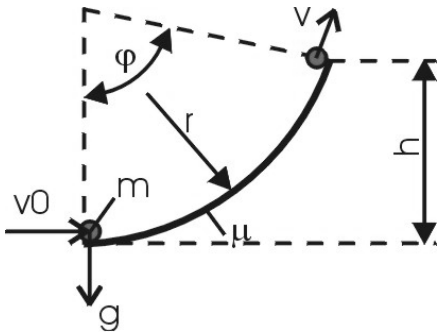
A fenti összefüggésben a tényleges tömegáram egy része vehető figyelembe a súrlódás számításánál, hiszen a kés homlokfelületén lévő szecska nem súrlódik a doblemezen.

Egyes szecskázógép típusnál a szecskázódob és a szemroppantó hengerek között található az ún. terelőlemez. Van olyan gép, ahol ezt elhagyják és a

szecskázódob egyenesen a szemroppantó hengerekhez dobja a felaprított terményt. E lemez elsődleges feladata, hogy a szecskázódobot elhagyó aprított termény egyenletes vékony keresztmetszetben a szemroppantó hengerekhez vezesse, így jobb munkaminőség érhető el. A súrlódási veszteség nagysága a 35. ábra szerinti jelölések alapján, elméletileg a következőképpen közelíthető meg:

$$P_{tvesz} = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot v_0^{\,2} - \frac{1}{2} \cdot Q \cdot v^2 \qquad \left(\frac{kWt}{h}\right), \qquad (2)$$

ahol: v_0 - a szecska sebessége a terelőlemez belépésénél (m/s),
v - a szecska sebessége a terelőlemez kilépésénél (m/s),
Q - tömegáram (t/h).

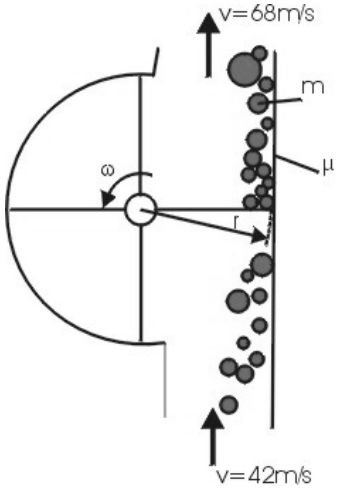


35. ábra: A szecska mozgása a terelőlemezen

A szemroppantó hengerektől érkező szecskázott anyagot a gyorsítódob - konstrukciótól függően- közel 70 m/s-os sebességre gyorsítja. A súrlódási veszteség meghatározása összetett dolog. Súrlódásból adódó veszteség fellép egyszer az aprított anyag és a dobólapátok között, valamint a dobóventillátor burkolatánál is. Utóbbinál két esetben is fellép. Egyszer a centrifugális erő következtében, valamint a lapát és a burkolat között van egy hézag ahová a szecskázott anyag bekerül, és súrlódik.

A dobóventillátor lapátjain keletkező súrlódási veszteség meghatározásához ismerni kell a normálerő nagyságát. A szecskázott anyag itt hasonlóan mozog, mint a szecskázódobnál, ezért a koriolis erővel mindenképpen számolni kell. E súrlódási veszteség gátolja az anyag mozgását a lapáton. Az később tudja elhagyni a dobólapátot, melynek következtében módosul a szecska mozgáspályája, ill. szélsőséges esetben itt is felléphet visszakeverés, mint az a szecskázódobnál meg is történik. Ennek a veszteségnek a kiszámítására a későbbiekben visszatérek.

Az aprított termény jelentős része súrlódik a doblemez hátfalán (36. ábra).



36. ábra: Anyagáram a gyorsítódobnál

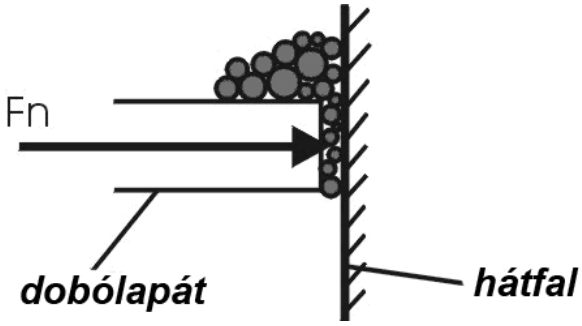
A gyorsítódob hátfalán keletkező veszteség nagysága hasonlóan, mint a doblemeznél, az alábbi egyenlet alapján határozható meg:

$$P_{gyvesz} = F_R \cdot v = Q \cdot r_{gy}^{\ 2} \cdot \omega_{gy}^{\ 3} \cdot \mu \cdot \frac{\varphi_{gy}}{2\pi} \text{ (kWt/h)}, \qquad (3)$$

ahol:
- r_{gy} - gyorsítódob sugara (m),
- ω_{gy} - gyorsítódob szögsebessége (1/s),
- μ - súrlódási együttható(-),
- φ_{gy} - doblemez szöge (fok),
- Q - tömegáram (t/h),
- F_R - súrlódó erő (N).

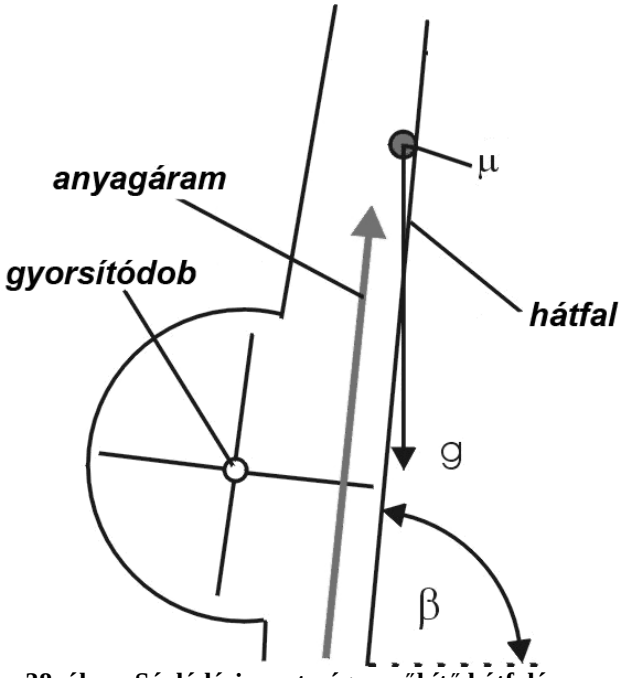
A φ_{gy} gyakorlati szempontok alapján 25-30°-ra tehető.

A dobóventilátor lapátja és a hátfal között konstrukciótól függően 1-5mm-es hézag van. Fű, valamint rövid kukoricaszecska esetén, ebbe a hézagba bekerül a szecskázott anyag és ott súrlódik (37. ábra). Nehézségekbe ütközik az a normálerő nagyságának a meghatározása, ezért ez számítani nem lehet, csak becsülni.



37. ábra: Súrlódás a lapát és hátfal között

A gyorsítódobtól érkező anyagáram szélességét a szűkítő redukálja le annak érdekében, hogy a szecska akadálymentesen továbbhaladjon a kifúvótorony felé. A szűkítő konstrukciós okok miatt enyhén hátra van döntve, így a szecska nem csak a két oldalfalon, hanem a hátfalon is súrlódik.

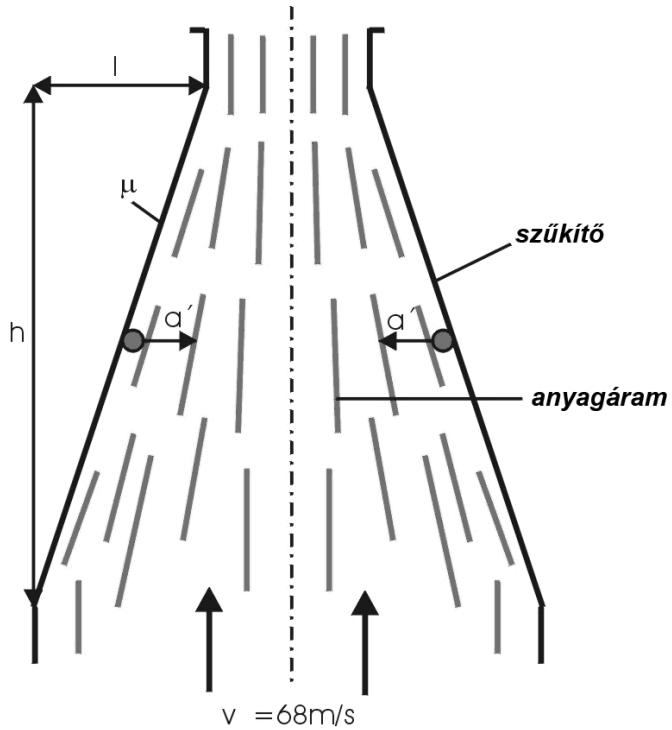


38. ábra: Súrlódási veszteség a szűkítő hátfalán

Az energiaveszteség a hátfalon az alábbi összefüggéssel közelíthető:

$$E_{hátfal} = F_s \cdot s = m \cdot g \cdot \cos\beta \cdot \mu \cdot s \quad \text{(kWh/t).} \qquad (4)$$

A szűkítőben keletkező súrlódási veszteség jelentős hányada az oldalfalakon keletkezik, hiszen a felaprított szecskát 680 mm-ről kell 300 mm-re összevezetni.



39. ábra: A szűkítő oldalfalán fellépő súrlódási veszteség

A súrlódási erő kiszámításához azt a gyorsulást kell meghatározni, amely a szecskát folyamatosan középre tereli. Ezt a következő összefüggés segítségével közelíthetjük:

$$F_s = F_N \cdot \mu = m \cdot a' \cdot \mu \,, \tag{5}$$

$$a' = \frac{2l}{t^2} \quad , \tag{6}$$

$$h = v_0 \cdot t - \frac{a}{2} \cdot t^2 \rightarrow t \,. \tag{7}$$

A fentiek segítségével az oldalfalon keletkező súrlódási veszteség kiszámítható a következő összefüggéssel:

$$E_{oldalfal} = F_S \cdot s = m \cdot a' \cdot \mu \cdot \sqrt{h^2 + l^2} \qquad \text{(kWh/t).} \tag{8}$$

Az össz-súrlódási veszteség a részveszteségek összegéből kiszámítható:

$$E_{sz} = E_{hátfal} + E_{oldalfal} \qquad \text{(kWh/t).} \tag{9}$$

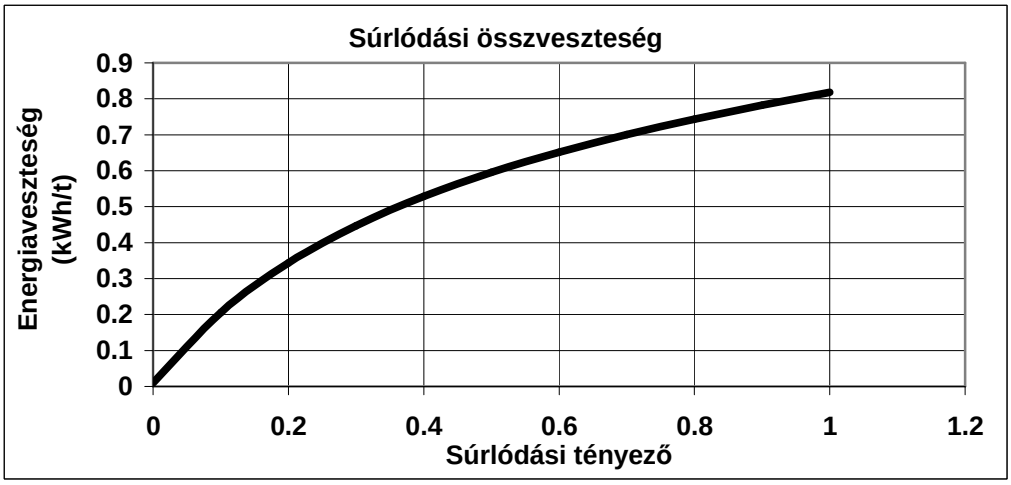
A szecska a kifúvótoronyban annak oldalfalán, és nagyobb hányadban annak hátfalán súrlódik. A súrlódási veszteség kiszámításához ismerni kell a normálerő nagyságát és a súrlódási úthosszat. Az itt keletkező veszteség meghatározása a későbbiekben részletes levezetés mellet tanulmányozható a kifúvótorony optimalizálásánál, ezért ennek részletezésétől itt most eltekintek. A súrlódási veszteség a v_0 belépési és a v_1 kilépési pontban lévő sebesség alapján számítható:

$$E_{kifúvó} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_0^{\,2} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^{\,2} \quad \text{(kWh/t).} \tag{10}$$

A szerkezeti egységeknél keletkező súrlódási veszteségeket összeadva megkapjuk a fajlagos energiaveszteséget:

$$E_{össz} = E_{dvesz} + E_{tvesz} + E_{gyvesz} + E_{sz} + E_{kifúvó} \quad \text{(kWh/t).} \tag{11}$$

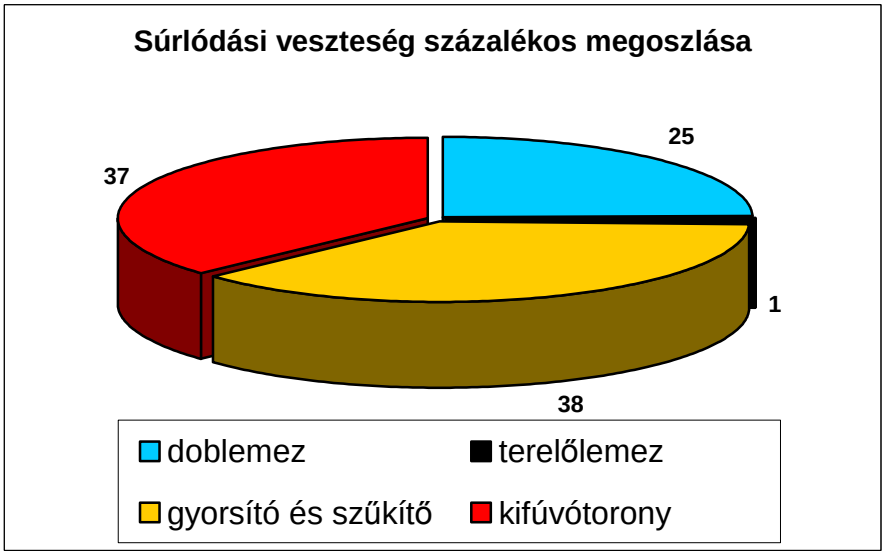
Az elméleti számításaim alapján a 40. ábra mutatja, hogy a súrlódási tényező növekedésének következtében a szállításakor keletkező fajlagos energia veszteséget. Ez egy elméleti számítás eredménye, mely nem veszi figyelembe a légszállítást, valamint az ütközésekből adódó energiaveszteséget. Azonban ha figyelembe vesszük azt, hogy az aprítás fajlagos energiaigénye növénytől függően ~2 kWh/t akkor láthatjuk, hogy magasabb súrlódási tényező mellett a súrlódási veszteség nagysága már összemérhető az aprításra fordított energia nagyságával.



40. ábra: A fajlagos energiaveszteség ($E_{össz}$) a súrlódási tényező függvényében

A 41. ábra a súrlódásból keletkező veszteségek százalékos megoszlását mutatja. Látható, hogy a legnagyobb veszteség közel azonos mértékben a

gyorsítódob és szűkítő egység, valamint a kifúvótoronynál keletkezik. A szűkítőnél az anyag összeterelése miatt jelentős falsúrlódás keletkezik, míg a kifúvótoronynál a közel 5 m-es súrlódási úthossz eredményezi a magas veszteséget. A doblemez valamivel kisebb hányadot képez, bár figyelembe véve, hogy ott a szecska csak közel 400 mm-es utat tesz meg ez elég jelentős. Ilyen mértékű veszteséget a kiemelkedően magas normál erő okozza, mely a közel 5000 m/s^2 - 500g- centrifugális gyorsulás miatt lép fel. A szecskázódob és gyorsítódob közötti terelőlemeznél a veszteség nem jelentős. Ez két dologgal magyarázható. Elsősorban hogy nincs szűkítés, valamint a görbületi sugár is nagy.



41. ábra: Az elméleti súrlódási veszteség részegységenkénti megoszlása

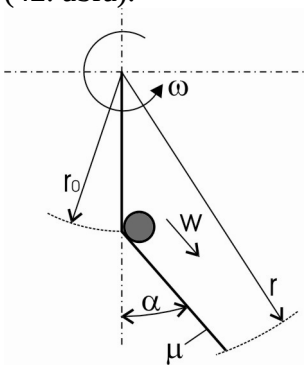
3.1.3 Súrlódás a kés hátlapján

Ebben a fejezetben azt vizsgálom, hogy a szecska milyen sebességgel tudja elhagyni az aprító-dobot és ezt miként befolyásolja a súrlódás.

Vágás után a szecska először a dob középpontja felé mozog, majd a dob forgásának következtében a centrifugális erő kifelé szorítja. Ennek következtében, amíg a szecskázódob 100° elfordul, a szecska egy része a doblemezen súrlódik. Ezután megkezdődik az elhagyási fázis. Azok a szecskák, melyek a doblemezen súrlódtak, probléma nélkül elhagyják a szecskázó szerkezetet. Azonban a késen fekszik az apríték egy része. Ezek az elhagyás fázisában a kés hátán végigcsúszva elindulnak sugárirányban kifelé. Az, hogy a szecska milyen sebességgel tudja a dobot elhagyni illetve, hogy ehhez mennyi időre van neki szüksége a dob fordulatszáma, a sugara, a kés állásszöge és a súrlódási tényező befolyásolja. Ha a kedvezőtlen mozgási viszonyok miatt nem tudja a dobot az

ürítési fázis végéig elhagyni, akkor a dob visszakeveri azt. Ennek következtében tovább fokozódik a súrlódási veszteséget.

Meghatároztam, hogy az adott mozgásviszonyok mellett mennyi idő szükséges a szecskának ahhoz, hogy a dobot biztonságosan el tudja hagyni. A megoldás során figyelembe vettem a súrlódást, azt hogy a kés a sugárral alfa szöget zár be továbbá azt, hogy a szecska forgó rendszerben mozog és ennek következtében hat rá a koriolis erő is (42. ábra).



42. ábra: Anyagi pont mozgása az aprítókésen

Anyagi pontra ható erők egyensúlya:

$$ma = mr\omega^2 \cos\alpha - \mu mr\omega^2 \sin\alpha - 2\mu mw\omega, \tag{12}$$

$$a = r\omega^2 \cos\alpha - \mu r\omega^2 \sin\alpha - 2\mu w\omega, \tag{13}$$

$$a = \frac{dw}{dr} w\cos\alpha. \tag{14}$$

A súrlódás miatt a $w' = Cw$, így az egyenlet az alábbi formában írható fel:

$$\frac{dw'}{dr} w'\cos\alpha = r\omega^2 \cos\alpha - \mu r\omega^2 \sin\alpha - 2\mu w'\omega, \tag{15}$$

$$w' = Cr\omega, \tag{16}$$

$$\frac{dw'}{dr} = C\omega. \tag{17}$$

Ezen összefüggéseket felhasználva és az összevonásokat elvégezve:

$$C^2 r\omega^2 \cos\alpha = r\omega^2 \cos\alpha - \mu r\omega^2 \sin\alpha - 2\mu Cr\omega^2, \tag{18}$$

$$C^2 \cos\alpha = \cos\alpha - \mu \sin\alpha - 2\mu C, \tag{19}$$

$$C^2 + \frac{2\mu}{\cos\alpha} C - (1 - \mu tg\alpha) = 0, \tag{20}$$

$$C = -\frac{\mu}{\cos\alpha} + \sqrt{\frac{\mu^2}{\cos^2\alpha} + (1 - \mu tg\alpha)}\,. \tag{21}$$

Felhasználva a $w' = Cw$ összefüggést:

$$\frac{dw}{dr} w\cos\alpha = r\omega^2\cos\alpha - \mu r\omega^2\sin\alpha - 2\mu Cr\omega^2\,, \tag{22}$$

$$\frac{dw}{dr} w = r\omega^2 - \mu r\omega^2 tg\alpha - 2\mu\frac{C}{\cos\alpha} r\omega^2\ , \tag{23}$$

$$wdw = \left(r\omega^2 - \mu r\omega^2 tg\alpha - 2\mu\frac{C}{\cos\alpha} r\omega^2 \right) dr\,, \tag{24}$$

$$wdw = r\omega^2\left(1 - \mu tg\alpha - 2\mu\frac{C}{\cos\alpha}\right) dr\,, \quad \text{legyen} \tag{25}$$

$$M = \left(1 - \mu tg\alpha - 2\mu\frac{C}{\cos\alpha}\right), \tag{26}$$

$$w^2 = \left(r^2 - r_0^{\,2}\right)\omega^2 M\ , \tag{27}$$

$$w = \omega\sqrt{M}\cdot\sqrt{\left(r^2 - r_0^{\,2}\right)}\,. \tag{28}$$

Elfordulás alatt eltelt idő meghatározása:

$$\frac{dr}{dt} = \omega\sqrt{M}\cdot\sqrt{\left(r^2 - r_0^{\,2}\right)}\,, \tag{29}$$

$$\frac{dr}{\sqrt{\left(r^2 - r_0^{\,2}\right)}} = \omega\sqrt{M}\cdot dt\,, \tag{30}$$

$$t = \frac{arch\frac{r}{r_0}}{\omega\sqrt{M}}\,, \tag{31}$$

$$t = \frac{arch\frac{r}{r_0}}{\omega\sqrt{\left(1 - \mu tg\alpha - 2\mu\frac{C}{\cos\alpha}\right)}}\ . \tag{32}$$

Felhasználva a korábbi összefüggéseket adódik, hogy:

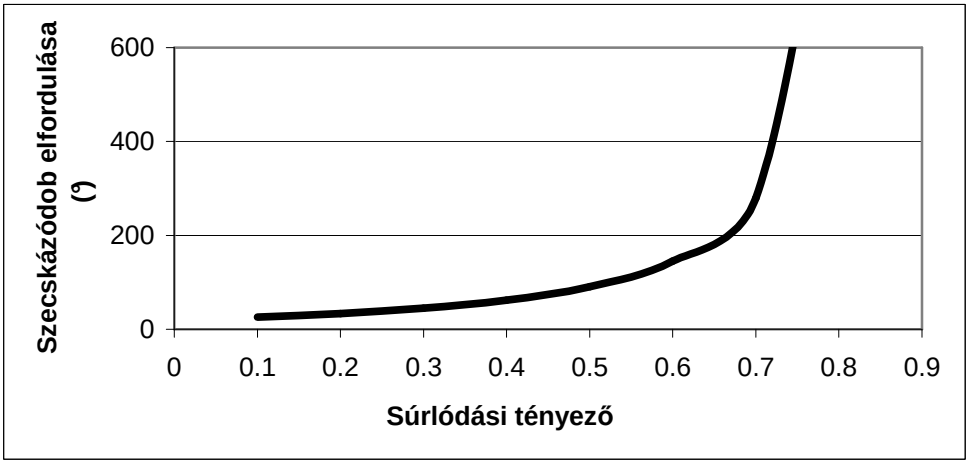
$$t = \frac{arch\frac{r}{r_0}}{\omega\sqrt{\left(1-\mu tg\alpha - 2\mu\frac{-\frac{\mu}{\cos\alpha}+\sqrt{\frac{\mu^2}{\cos^2\alpha}+\left(1-\mu tg\alpha\right)}}{\cos\alpha}\right)}}. \qquad (33)$$

ahol:
- α a kés állásszöge,
- μ a súrlódási tényező nagysága,
- r a dob külső sugara,
- r_0 a dob belső sugara,
- ω a dob szögsebessége.

A szögelfordulás nagysága a szögsebesség ismeretében:

$$\beta = t\omega. \qquad (34)$$

A fenti összefüggésből a 43. ábra látható, hogy a súrlódási tényező növekedése következtében jelentősen megnő az elhagyáshoz szükséges idő, amely a szecskázódob elfordulásával van szoros összefüggésben.



43. ábra: Az aprítódob szükséges elfordulásának nagysága a súrlódási tényező függvényében

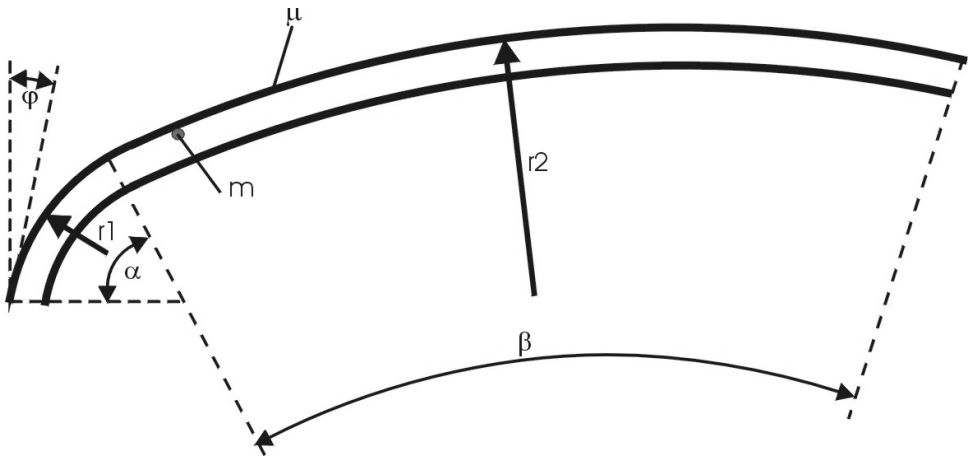
Abban az esetben, ha a szecska és kés közötti súrlódási tényező meghaladja a 0,5 értéket az aprítéknak nincs lehetősége arra, hogy a dobot a nyitási szögön belül elhagyja. Ilyenkor a szecskát visszakeveri a szecskázódob, mely dobházon

súrlódva tovább növeli a súrlódási veszteséget. A fenti összefüggés gyorsítodobra is kiterjeszthető, mégpedig úgy, hogy az α szöget nullának veszszük. Ebben az esetben az összefüggésünk is egyszerűsödni fog.

3.1.4 A kifúvótorony geometriai módosítása

Kifúvótorony feladata, hogy a felszecskázott anyagot a szecskázógép mellett haladó szállítójárműre juttassa. A szecska közelítőleg 50 m/s-os sebességgel érkezik a kifúvótoronyhoz, majd annak hát és oldalfalán csúszva folyamatosan veszít ebből a sebességből, egyrészt a külső súrlódás miatt, másrészt a szecska-szecska között keletkező belső súrlódásból.
Az itt fellépő súrlódási veszteség nagysága két dologtól függ. Egyik a súrlódási tényező, mely rendszer függő, a másik befolyásoló tényező a normálerő nagysága. Ez utóbbit a görbület kialakítása határozza meg. Minél kisebb a görbületek sugara, annál nagyobb lesz a normálerő és ezzel együtt a veszteség is. Ugyanakkor a görbület végtelenül nagy sem lehet, mivel a geometriai határok adottak. Fentieket figyelembe véve elvégeztem a kifúvótorony görbületének optimalizálását azért, hogy az itt keletkező súrlódási veszteségeket minimalizáljam. Optimalizálás során kerestem egy adott A és B pont - melyek a geometriai határok kezdő és végpontja- közötti görbület paramétereit, melynél az energiaveszteség a lehető legkisebb.

A súrlódási veszteség meghatározásához a kifúvótornyot két részre bontottam ott, ahol a görbület sugara állandó értékű (44. ábra). E két részen a munkatétel segítségével meghatároztam az energiaveszteség nagyságát:



44. ábra: Kifúvótorony főbb geometriai paraméterei

ahol: r_1 - első rész sugara (m),
r_2 - második rész sugara (m),
μ - súrlódási tényező(-),

α_k - első rész görbületi szöge (fok),
β_k - második rész görbületi szöge (°),
φ_k - kifúvótorony helyzete (°),
m - tömegpont (kg).

E két részen a munkatétel segítségével meghatároztam az energiaveszteség nagyságát:

$$E - E_0 = \int_{r_0}^{r} \mathbf{F} d\mathbf{r} \,. \tag{35}$$

A veszteség meghatározásához, kerestem azt a függvényt, amely az anyagi pont sebességét írja le a görbület tetszőleges pontjában. Ezt a munka és a perdület-tétel segítségével tudom meghatározni:

$$E - E_0 = \int_{r_0}^{r} m\mathbf{a} d\mathbf{r} = \int_{r_0}^{r} (m\mathbf{g} + \mathbf{F_k}) d\mathbf{r} = m \cdot a_e \cdot s \,, \tag{36}$$

$$\dot{\mathbf{I}} = \mathbf{F} \,, \tag{37}$$

$$m \cdot \mathbf{a} = m \cdot \mathbf{g} + \mathbf{F_k} \,. \tag{38}$$

Az erők egyensúlya a görbületre merőlegesen (normálirány):

$$m \cdot a_n = m \cdot g \cdot \sin\alpha - F_n \,, \tag{39}$$

Az erők egyensúlya a görbületre érintőlegesen:

$$m \cdot a_e = -m \cdot g \cdot \cos\alpha - F_s \,. \tag{40}$$

A normálirányú gyorsulás nagysága:

$$a_n = \frac{v^2}{r} \,. \tag{41}$$

Az előzőekből a normálerő nagysága az alábbiak szerint írható fel:

$$F_n = m \cdot \frac{v^2}{r} - m \cdot g \cdot \sin\alpha \,. \tag{42}$$

A 40-es egyenletbe behelyettesítve kapjuk az alábbi összefüggést:

$$m \cdot a_e = -m \cdot g \cdot \cos\alpha - \mu \cdot m \cdot \frac{v^2}{r} + \mu \cdot m \cdot g \cdot \sin\alpha \,. \tag{43}$$

Tehát az energiaveszteség az alábbiak szerint határozható meg:

$$\frac{1}{2}m\cdot v^2-\frac{1}{2}m\cdot v_0{}^2=\left(-m\cdot g\cdot\cos\alpha-\mu\cdot m\cdot\frac{v^2}{r}+\mu\cdot m\cdot g\cdot\sin\alpha\right)\cdot s\,. \qquad (44)$$

Az egyenletmegoldás részletezése nélkül az első részen az alábbi szerint tudjuk meghatározni az anyagi pont sebességét a görbület tetszőleges pontjában:

$$v=\sqrt{\frac{v_0{}^2-2\cdot\cos(\alpha+\varphi)\cdot\frac{2\cdot r_1\cdot\pi}{360}\cdot\alpha+\frac{4\cdot r_1\cdot\pi}{360}\cdot\alpha\cdot\mu\cdot g\cdot\sin(\alpha+\varphi)}{1+\frac{4\cdot\pi\cdot\mu}{360}\cdot\alpha}}\,. \qquad (45)$$

A torony második részén az előzőek analógiájára a megoldás részletezése nélkül a sebesség a görbület tetszőleges pontjában:

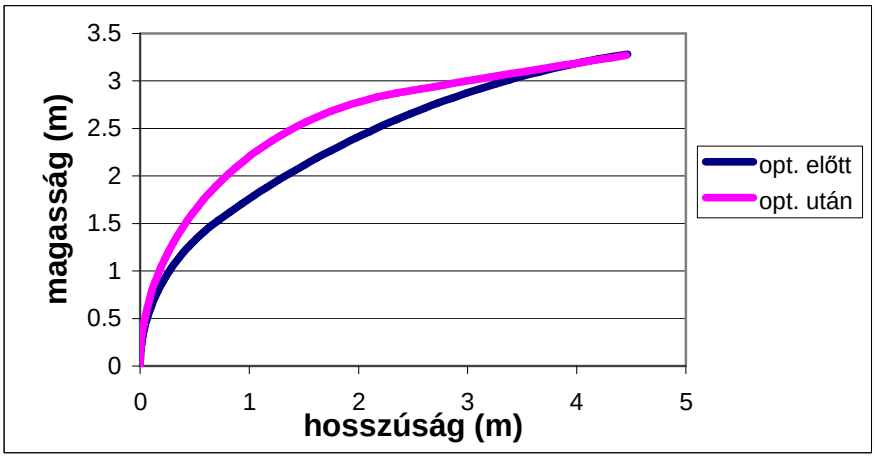
$$v_1=\sqrt{\frac{v^2-2\cdot\cos(\alpha+\varphi+\beta)\cdot\frac{2\cdot r_2\cdot\pi}{360}\cdot\beta+\frac{4\cdot r_2\cdot\pi}{360}\cdot\beta\cdot\mu\cdot g\cdot\sin(\alpha+\varphi+\beta)}{1+\frac{4\cdot\pi\cdot\mu}{360}\cdot\beta}}\,. \qquad (46)$$

Az össz energiaveszteség a v_0 kezdeti és a v_1 végpontban lévő sebesség alapján már egyszerűen számítható:

$$E_{kifúvó}=\frac{1}{2}\cdot m\cdot v_0{}^2-\frac{1}{2}\cdot m\cdot v_1{}^2\quad\left(\frac{kWh}{t}\right)\,. \qquad (47)$$

Az egyenlet segítségével meghatározható tetszőleges görbület mellett a torony végpontjában a szecska sebességének nagysága, és a veszteség nagysága is.

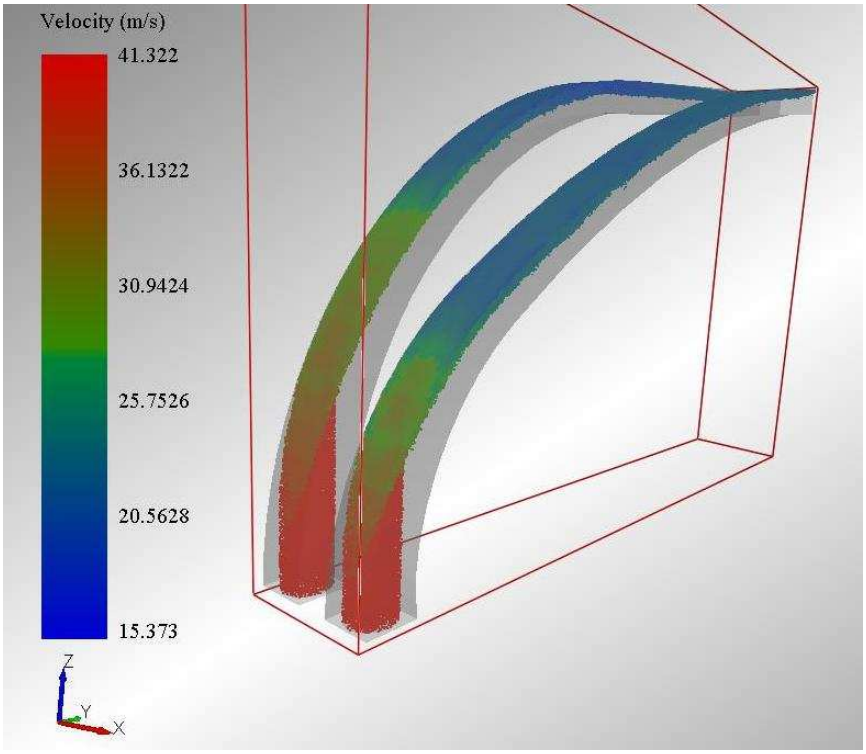
A kifúvótorony görbületének optimalizálását egy minimalizáló célfüggvénnyel végeztem el. E célfüggvény feladata megkeresni az α, β, r_1 és r_2 értékeit adott A és B pont között úgy, hogy az energia veszteség minimális legyen.
A 45. ábra mutatja a kifúvótorony optimalizálás előtti és utáni alakját. Optimalizálás előtt az energia veszteség nagysága E_{opte}=500,2 J/kg, optimalizálás után E_{optu}=445,4 J/kg.



45. ábra: A kifúvótorony alakja optimalizálás előtt és után

A két veszteséget összevetve látható, hogy az optimalizálást követően elméletileg közel 10%-kal kevesebb a súrlódásból adódó veszteség, ha a μ állandó. Elméleti számításom ellenőrzésére készítettem egy diszkrét elemes szimulációt, mely segítségével azt akartam igazolni, hogy valóban kisebb energiaveszteséggel jár-e az új geometriai kialakítás. A szimuláció során ugyanazt az anyagtulajdonságú halmazt definiáltam mind a két torony esetében. A belépési peremfeltételek az alábbiak voltak. Mind a két toronyba 50 m/s-os sebességgel lép be a szecska, és ugyanakkora tömegáram halad végig rajtuk. A szimuláció eredménye a 46. ábrán látható.

Az analízis igazolta feltevésemet, hiszen a geometriailag optimalizált kifúvótoronyból ~3 m/s-mal nagyobb sebességgel lép ki a szecska. Ez azt jelenti, hogy a súrlódási veszteség 50,3 J/kg-mal kisebb, mint a széria kialakítású kifúvótoronynál. Összefoglalásként elmondható, hogy pusztán geometriai megfontolások alapján a súrlódási veszteség jelentősen csökkenthető a szecskázógépen belül. Ehhez olyan optimalizált görbületeket kell kialakítani, melynél a szecskát a felülethez szorító erő a lehető legkisebb.



46. ábra: A szecska sebessége két különböző kialakítású kifúvótoronyban

3.2. Laboratóriumi vizsgálatok

3.2.1 A mérőberendezés

Súrlódási tényező megmérésére többféle lehetőség van. A megfelelő készülék kiválasztásánál figyelembe kell venni, hogy mely anyagpárosításnál, milyen terhelés mellett és milyen elmozdulási sebességnél szeretnénk megmérni a súrlódási tényező nagyságát. Súrlódási tényező mérésére vannak DIN szabványú mérő berendezések melyek alkalmazhatósági feltételei adottak.

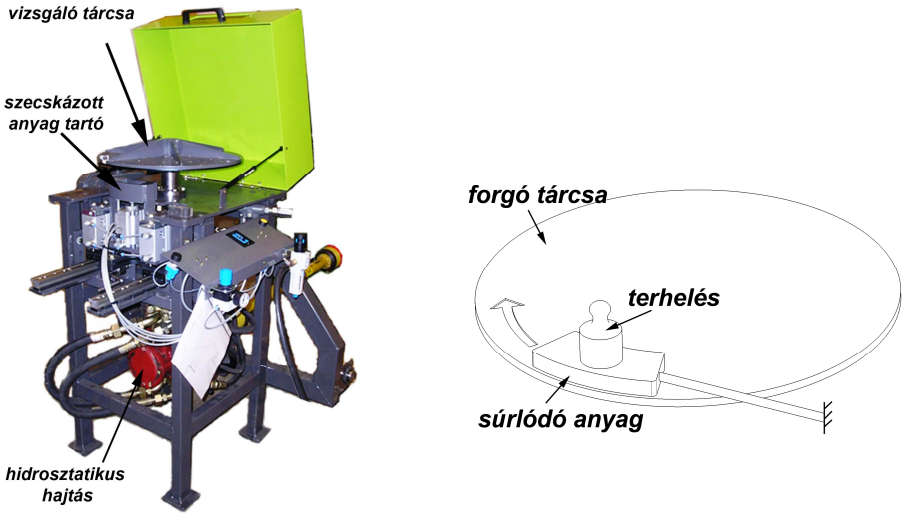
Súrlódási tényező meghatározására többféle mérési módszert alkalmaznak. A 3. táblázatban összefoglalva láthatók a különböző mérési elvek előnyei és hátrányai.

3. táblázat: súrlódási ellenállás különböző mérési elveinek előnyei és hátrányai

	Előny	Hátrány
sík	egyenletes sebességeloszlás;	behatárolt sebességtartomány;
	egyenletes nyomáseloszlás;	behatárolt súrlódási úthossz;
	egyszerű felületkialakítás;	
szalag	folytonos egyenletes sebességeloszlás;	nem minden súrlódó felület esetén alkalmazható;
	egyenletes nyomáseloszlás;	felület esetleges hullámzása;
henger	folytonos egyenletes sebességeloszlás;	nem minden súrlódó felület esetén alkalmazható;
		egyenetlen nyomáseloszlás;
tárcsa	jól kialakítható folytonos súrlódó felület	egyenetlen sebességeloszlás;
	egyenletes nyomáseloszlás;	

Szecskázott zöldtakarmányok súrlódási tényezőjének mérése nem egyszerű feladat, hiszen itt egy halmaz szerepel a súrlódásban részvevő egyik anyagként, míg a másik egy sík felület. Tovább bonyolítja a mérést, hogy tág sebességtartományt kell figyelembe venni és a maximális érték megközelíti a 40 m/s-ot. Ilyen nagy sebességű elmozdulást a tárcsás konstrukcióval lehet legegyszerűbben előállítani. Bár a tárcsa jellegéből adódóan van némi sebességeltérés a vizsgált sáv külső és belső sugara között, a vizsgált tartományhoz képes ez nem jelentős és kutatás szempontjából az egyenletes nyomáseloszlás fontosabb szempont a mérések során.

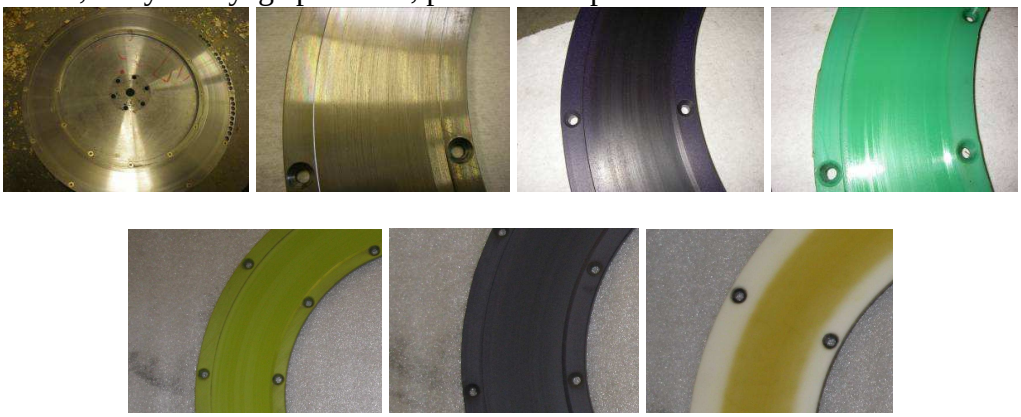
Ezen szempontokat figyelembe véve, a tárcsás kialakítású mérőberendezés mellett döntöttem. Működési elve megegyezik a tárcsafékkel, jelen esetben a „fékbetét” maga a szecskázott anyag. Az általam tervezett mérőberendezés a 47. ábraán látható.



47. ábra: Szecskázott anyagok súrlódási tényezőjének mérésére alkalmas mérőberendezés és elvi rajza

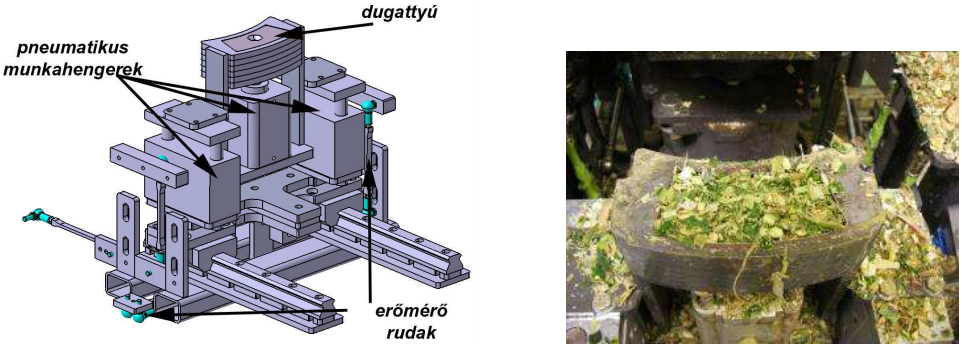
Az alaptárcsára különböző kialakítású, és anyagú tárcsákat rögzítettem, melyekkel a méréseimet lefolytattam.

A tárcsákon egy 50 mm széles felület van megmunkálva, ez a súrlódó rendszer alapfelülete. A tárcsák 24 db süllyesztett fejű csavarral vannak az alaptárcsához rögzítve, így az egyenletes felfekvés is biztosítva van. Vizsgálataim során 6 különböző anyagú tárcsával végeztem méréseket. Az alap ún. null tárcsa S355-ös szerkezeti acélból készült. Ehhez a tárcsához hasonlítottam a többi tárcsát, melyek anyaga poliamid, polietilén és poliuretán.



48. ábra: Különböző anyagú tárcsák melyekkel a méréseket végeztem (sorrendben: acél, poliamid, 3 különböző polietilén, poliuretán)

A szecskázott anyag az ún. anyagtartóban van elhelyezve, melyet egy pneumatikus henger nyomja neki a forgó tárcsának.

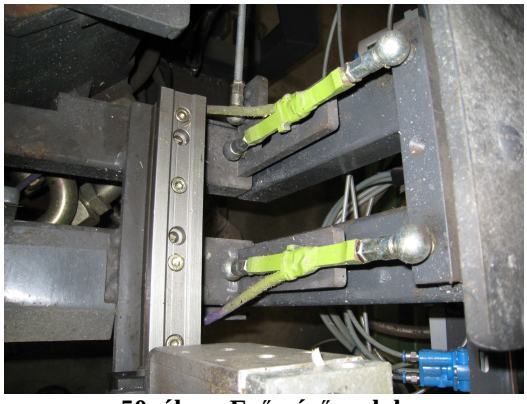


49. ábra: Anyagtartó

A súrlódási tényező vagy ellenállás rendszerfüggő, közvetlenül mérni nem lehet csak közvetve számítani. Ez az ellenállás kiszámítható a súrlódási erő és a normál erő hányadosaként.

$$\mu = \frac{F_{súrlódási}}{F_{normál}} \quad . \tag{48}$$

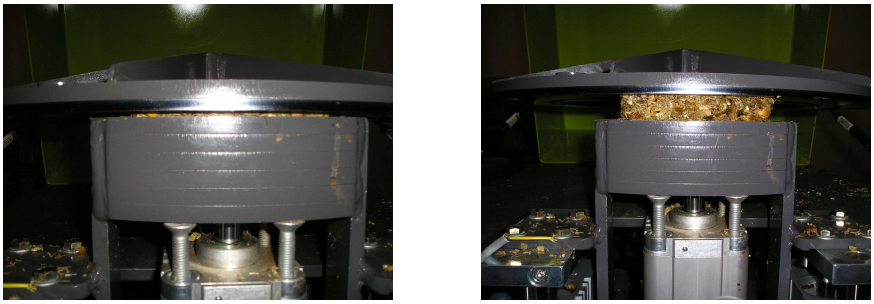
A súrlódási ellenállás kiszámításához a súrlódási- és normál erőket kell mérni. Az ún. anyagtartó erőmérő rudakon van felfüggesztve. Három erőmérő méri a tárcsa felületére merőleges irányba a normálerő nagyságát. Egy rúd méri a súrlódási erő nagyságát a tárcsa tangenciális irányába. Az erőmérő rudak végein gömbcsuklók vannak, így azokban csak tiszta húzás ébred hajlító nyomaték nem.



50. ábra: Erőmérő rudak

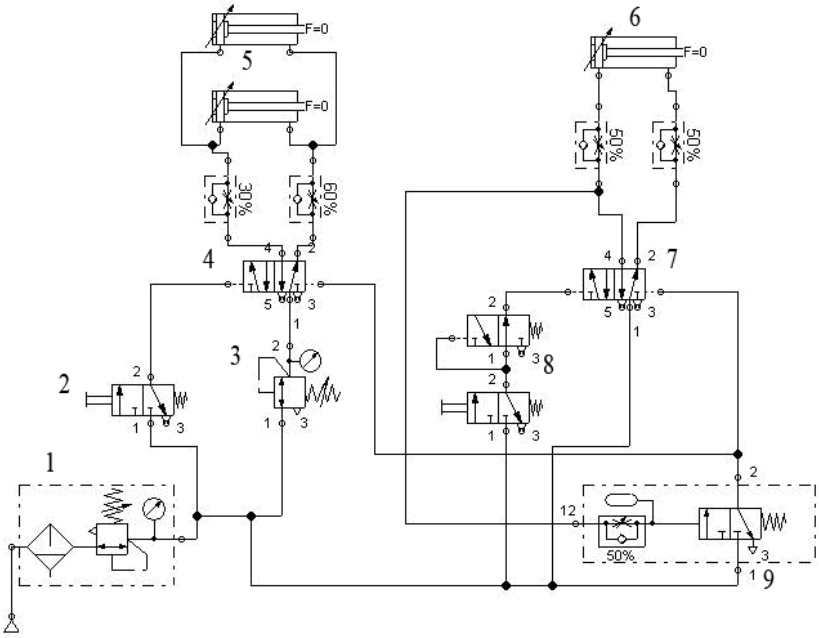
Az anyagtartót két lineáris vezetékkel felszerelt pneumatikus henger emeli a forgó tárcsa közelébe. A mérés megkezdése után a középső munkahenger a forgó tárcsának nyomta a vizsgálandó anyagot. A két szélső munkahenger egy

nyomásszabályozó szelepen keresztül tápláljuk, amely biztosítja, hogy a terhelés mindig a beállított érték legyen, függetlenül attól, hogy az anyagtartó hol helyezkedik el a tárcsához képest (51. ábra).



51. ábra: Anyagtartó alap és leszabályozott pozícióban

A pneumatikus kör kapcsolási vázlatát az 52. ábra szemlélteti. Két darab nyomásszabályozó van beépítve a körbe. Az első az a tápvezetéken bejövő nyomást csökkenti (1), míg a második (3) a már fent említett két szélső munkahengernél (5) végzi el a nyomásszabályozást. A mérés megkezdésekor -manuális kapcsolásra (2)- a két szélső munkahenger felemeli az anyagtartót. Szintén manuális kapcsolásra (8) indul el a középső munkahenger, amely a szecskát a tárcsának nyomja. A kezdeti állapotba történő visszatérést egy időzítő (9) végzi. Ennek a szerepe az, hogy az általam meghatározott ideig a munkahengerek biztosítsák a terhelést, majd a mérési idő leteltével minden visszaáll alapállapotra.



52. ábra: Pneumatikus kör kapcsolási rajza

A tárcsa meghajtása hidrosztatikus úton történik így, a fordulatszáma fokozatmentesen változtatható. A hidraulikus kör áll egy ferde tárcsás axiál dugatytyús szivattyúból, mely elektromos motorról kapja a hajtást. Egy ferde tárcsás axiál dugattyús hidromotor a tárcsát forgatja. További egységek: a tartály, mely az esetleges olajutánpótlást és melegedés során a tágulási teret biztosítja, a csővezetékek és a fojtószelep. Ez utóbbi segítségével beállítható a tárcsa fordulatszáma úgy, hogy a szivattyú szállítását szabályozza a ferde tárcsa döntésével. A súrlódási sebesség nagyságát a tárcsa fordulatszámából határoztam meg, melyet a mérés során egy jeladó folyamatosan mért.

Mérőberendezés főbb jellemzői:

- Tárcsa átmérője: 500 mm,
- Vizsgált felület szélessége: 50 mm,
- Elmozdulás sebessége: 5-40 m/s,
- Terhelés nagysága: 0,05-1 bar,
- Mérési idő: 0,2-3 s.

3.2.2 Vizsgálati paraméterek, súrlódási tényező meghatározása

A laborvizsgálatokat 2007-2008 tavaszán és őszén végeztem el Németországban, a CLAAS mezőgazdasági gépgyárban. A méréseim során szecskázott réti füvet és szecskázott kukoricát használtam. A fűvel végzett méréseknél egyszerre nagyobb mennyiségű füvet szecskáztam le, és azt több napon keresztül használtam fel. Így csak a nedvességtartalom befolyásoló hatását a súrlódási tényezőre úgy tudtam vizsgálni, hogy az alapanyag azonos volt. Ez azért fontos, mert ha különböző területről nyert fűvel végeznénk méréseket nem tudnám megállapítani, hogy a méréseknél jelentkező eltérésnek mi az oka. Az eltérés adódhat az eltérő nedvességtartalomból, de adódhat a növény struktúrájából is. Az általam választott módszernél csak a nedvességtartalomban volt eltérés az egymást követő napon végzett mérések között. A mérések megkezdése előtt a füvet egy betonkeverőben néhány percig kevertem, így a vizsgált anyag homogénebb lett. Silókukoricánál nincs lehetőség arra, hogy egy azon anyaggal több napon keresztül mérjünk. Ennek az oka, hogy a felszecskázott anyag rövid időn belül erjedésnek indul és két nap után már alkalmatlan a mérésre. A silókukoricánál végzett mérések során mindig frissen szecskázott alapanyagot használtam. Az eltérő nedvességtartalommal végzett mérések így elhúzódtak, mivel meg kellett várni, míg a kukorica lábon folyamatosan szárad. Mérések előtt a kukorica szecskát is betonkeverőben kevertem rövid ideig, hogy homogén anyagot kapjak. A szecskázott anyag nedvességtartalmának meghatározását a hagyományos kemencés módszerrel végeztem. Mértem adott szecskamennyiség tömegét szárítás előtt és 48 órás 105°C-on történő szárítás után. A kettő közötti tömegkülönbözet pedig az elpárolgott víz mely a nedvességtartalmat adja (w).

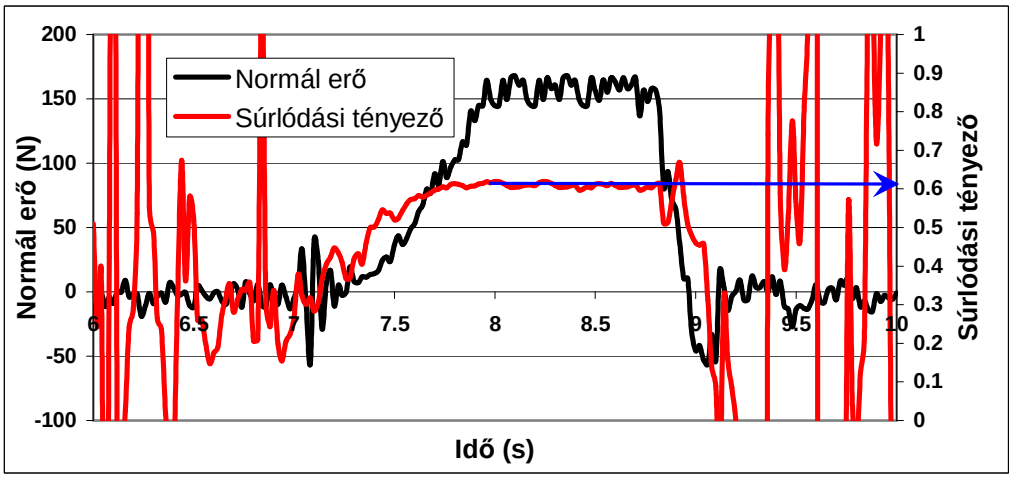
$$w = \frac{m_{nedves} - m_{száraz}}{m_{nedves}} \cdot 100 \quad [\%]. \qquad (49)$$

A súrlódási tényező nagyságának mérését több változó paraméter mellett végeztem el. A már említett nedvességtartalmon túl mértem a felületi terhelés, a csúszási sebesség, a szecskahossz, a felületi érdesség és más anyagú csúszófelületek befolyásoló hatását. A felületi terhelést négy lépcsőben változtattam (0,05-0,03-0,01-0,005 MPa). A csúszási sebességet szintén négy lépcsőben változtattam (40-30-20-5 m/s). Így egy adott nedvességtartalom és szecskahossz mellett egy vizsgálati tárcsával 16 mérést végeztem el.

Terhelés nagysága [MPa]	0.05				0.03				0.01				0.005			
Csúszási sebesség [m/s]	40	30	20	5	40	30	20	5	40	30	20	5	40	30	20	5

A terhelés nagyságát a pneumatikus körben elhelyezett nyomásszabályozó szelep segítségével állítottam be, a sebességet pedig a hidraulikus körben elhelyezett fojtószelep segítségével.
A méréseket fű esetén 4-9-14-17 mm-es szecskahosszal, kukorica esetén 4-9-17 mm-es szecskával is elvégeztem.
A mérést az alábbiak szerint végeztem el. A mérőberendezésre felszereltem egy adott anyagú és felületi érdességű tárcsát. Ezután belehelyeztem a szecskázott anyagot az anyagtartóba. Mindig annyi anyagot helyeztem bele az anyagtartóba, hogy a szecska a felső szintjéig töltse meg azt. Beállítottam a felületi terhelés és a csúszási sebesség nagyságát. Ezt követően elindítottam a mérést és a pneumatikus munkahenger a forgó tárcsának nyomta a szecskázott anyagot. A mérő rudak a reakcióerőket a SPIDER 8 mérő adatgyűjtőn keresztül a DIADEM mérőszoftvernek továbbították. A méréseket különböző anyagú tárcsákkal a fent említett paraméterek változtatásával többszörös ismétlés mellett folytattam le.
A mérések végeztével az adatok kiértékelés végeztem el. Kiértékelés során először elvégeztem a mért adatok simítását, majd kiszámítottam a súrlódási erő és normálerő hányadosát, azaz a súrlódási tényezőt.
A súrlódási tényező értékét a mérési eredményekből olvastam le. A következő ábra egy adott mérési eredmény kiértékelését szemlélteti. A vízszintes tengelyen az idő, a függőleges tengelyeken a normál erő és a súrlódási tényező van feltüntetve. Látható, hogy a terhelés ráadásakor a normálerő felfut majd közel állandó értéket vesz fel. A súrlódási tényező is kis mérési hibával konstans értékre áll be. A súrlódási tényező értékét abban a pontban olvastam le ahol a

normál erő már nem változott (~konstans). Jelen esetben ez az érték ~0,61. Minden egyes mérésnél így határoztam meg a súrlódási tényező nagyságát.

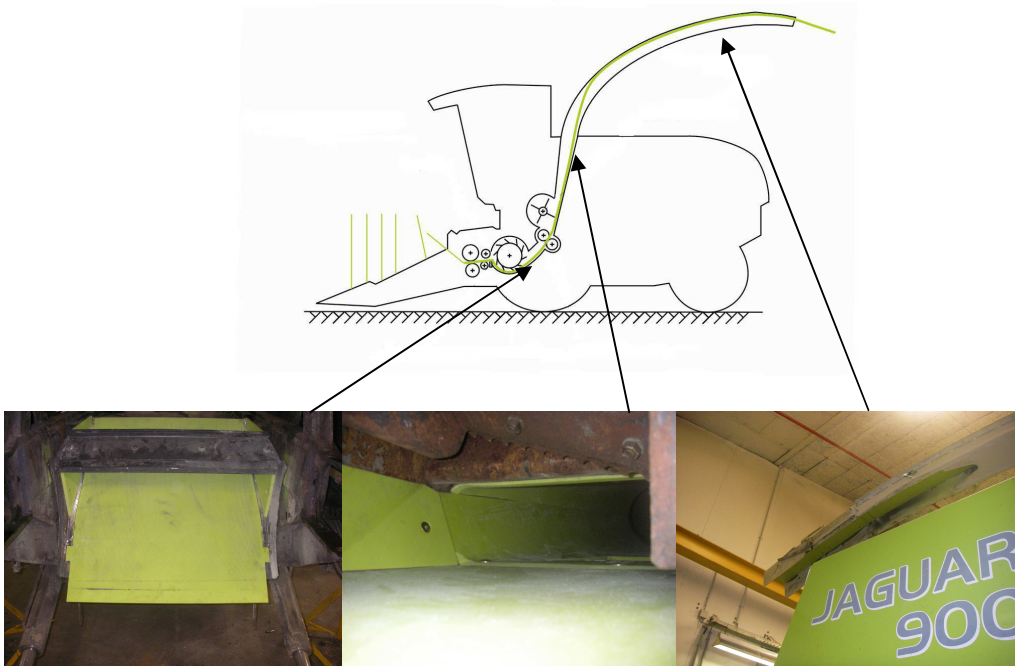


53. ábra: A mérési adatok kiértékelése

3.3. Szántóföldi mérések

3.3.1 Az energia szükséglet mérése

A laboratóriumi kísérleteknél elvégzett mérések alapján úgy döntöttem, hogy szántóföldi méréseket is végezek. A laboratóriumi mérések során a műanyag csúszófelületek alkalmazásakor szecskázott fű esetében a súrlódási tényező közel 10%-kal volt alacsonyabb az acél súrlódó felülethez képest (az eredmények fejezetben ezt részletezem). Ez lehetőséget nyújt arra, hogy a gép energiaszükségletét mérsékeljük. Ezért a vizsgálatok elvégzésére egy szecskázógép acél csúszó felületeit kicseréltem műanyagra. A műanyag lemezeket csavar és vezetősínek segítségével rögzítettem a gépben (54. ábra). A műanyag lemezeket hengerléssel alakítottam az adott görbületűre. A szűkítő egységnél lévő műanyag lemezeket 180°C-ra melegítettem fel és negatív formák segítségével alakítottam ki a végleges geometriát.



54. ábra: Műanyag csúszófelületek

A szántóföldi vizsgálatoknál két szecskázógéppel végeztük el a méréseket. A mérések fű esetében 3 különböző szecskahosszúság és 4 különböző áteresztőképesség mellett végeztük el.

A mérés során mértem a gép áteresztőképességét, és az egyes szerkezeti egységek teljesítmény felvételét, továbbá a szecskázott anyag nedvességtartalmát és a szecska sebességét a kifúvótorony végén. Az áteresztő képesség mérése úgy történt, hogy a szecskázógép egyenletes sebességgel haladt adott mérőszakaszon (~100 m), és a szakasz végén lemértem a gép mellett haladó szállítójárműre kerül aprított anyag tömegét (kg) és a mérőszakasz megtételéhez szükséges időt (s), ezek segítségével a tömegáramot (kg/s) meghatároztam. A teljesítményigény mérésekor nyomatékmérőket és fordulatszámmérőket alkalmaztam. Külön mértem az etetőszerkezet, a szecskázódob, a szemroppantó hengerek és a gyorsítódob nyomatékigényét. Majd kiszámítottam a fajlagos energiaszükségletet.

Az össz-teljesítmény igény:

$$P_{össz} = P_{szecskázódob} + P_{etetőtetőszerkezet} + P_{szemroppantó} + P_{gyorsítódob}\,. \tag{50}$$

A fajlagos energiaigény:

$$E_{fajlagos} = \frac{P_{össz}}{Q}\left(\frac{kWh}{t}\right), \tag{51}$$

ahol: $P_{össz}$ - a szecskázás össz-teljesítmény igénye (kW),
Q - a mért áteresztőképesség (t/h).

Az általam módosított szecskázógép eredményeit viszonyítottam egy meglévő széria géphez. A szecskázógépek főbb műszaki paraméterei a 4. táblázatban láthatóak.

4. Táblázat: CLAAS Jaguar 900 szecskázógép főbb műszaki paraméterei

Főbb műszaki paraméterek		JAGUAR 900
Motor	típus	DaimlerChrysler OM 502 LA
Hengerek száma		V 8
Motor teljesítmény ECE R 24 szerint	kW (LE)	458 (623)
Lökettérfogat	l	16
Motorfordulatszám betakarításnál	ford/perc	2000
Üzemanyagtank	liter	850
Járószerkezet		2 fokozatú hidrosztatikus meghajtású
Behúzóhengerek szélessége	mm	730
Behúzóhengerek száma		4
Behúzó hengerek meghajtása		többfokozatú hajtómű
Szecskahossz	mm	4/5,5/7/9/14/17
Szecskázódob szélessége	mm	750
Szecskázódob átmérője	mm	630
Szecskázódob fordulatszáma	ford/perc	1200
Kések száma (elrendezése)		24 (V alakú)
Késhézag állítás		automatikus
Szemroppantó hengerek		széria (100 fogú, 20%-os fordulatszám különbség)
Gyorsítódob szélessége	mm	680
Hosszúság	mm	5921
Magasság	mm	3728
Szélesség	mm	2990
Önsúly	kg	11560

3.3.2 A kopás mérése

A műanyagok kedvező siklási tulajdonsága általában kedvezőtlen kopásállósággal párosul. A PE-UHMW jó ellenállással bír az abrazív koptatóhatással szemben. A szántóföldi mérések elvégzése után a műanyag csúszófelületeket tartós terhelésnek tettem ki. Ez azt jelenti, hogy a műanyag lemezzel bélelt szecskázógép több napon keresztül szecskázott. A kopás mértékének megállapítására a gyakorlatban kétféle módszer használatos. Egyik a tömegcsökkenésen alapuló kopásmérés, másik a kopott felület feltérképezése.

A legnagyobb kopásnak kitett rész a doblemez. Első évben a Metamid 703 XXL polimer és a Metalen 1000 műanyagot építetem be a doblemez helyére, második évben Metalen 2 és Metalen 1 polimert. Utóbbi kettő fokozottan jó abrazív kopásállósággal rendelkezik. A kopás nagyságát szemrevételezéssel és tömegcsökkenés méréssel végeztem el. Bár a tömeg megváltozásán alapuló kopásmérés csak globális képet ad a kopásról, mégis jól reprezentálta számomra, hogy adott terület leszecskázása után hol és milyen mértékben kopott meg a műanyag. Megmértem a műanyag lemezek tömegét a beépítés előtt, majd

szecskázás befejeztével is. A kettő közötti tömegkülönbség megadta számomra a kopás mértékét.

$$m_{kopás} = m_{előtte} - m_{utána} \quad \text{(g)}, \tag{52}$$

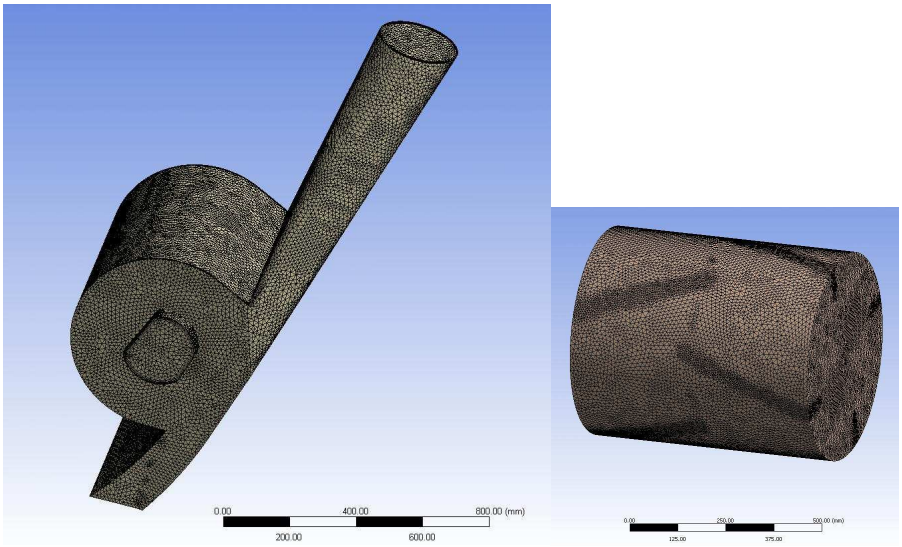
ahol: $m_{előtte}$ - a lemez beépítés előtti tömege (g),
$m_{utána}$ - a lemez kiszerelés utáni tömege (g).

3.4. A szecska pneumatikus szállításának modellezése

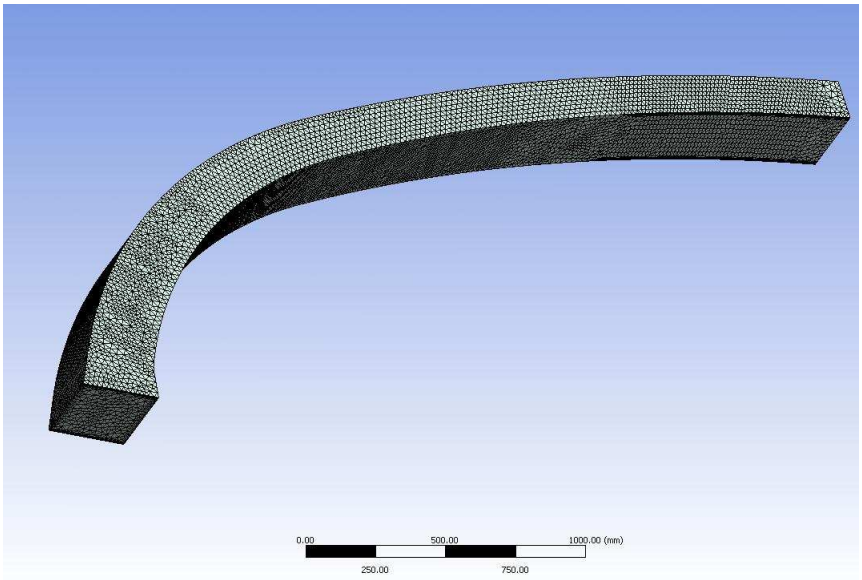
A CFD modell felépítése

Áramlástani szimuláció során a szecskázó dobban történő folyamatokat nem modelleztem, hanem csak az utána lévő szállítási folyamatot. A szecskázódobnál lévő folyamat modellezésébe maga a vágás modellezést is bele kellene venni, és ez jelentősen megbonyolítja a számítást. A szimulációban csak a gyorsítódobot és a kifúvótornyot modelleztem. Az áramlástani modellt a FLUENT CFD szoftverben készítettem el. A modell három fő részből áll: egyik a gyorsítódob ház, második maga a gyorsító ventilátor, a harmadik egység pedig a kifúvótorony.

A FLUENT szoftverbe nincs lehetőség háló készítésére, így azt az ANSYS hálózó moduljában készítettem el és a kész hálót exportáltam a FLUENT által támogatott formátumba. A hálózást külön-külön részegységenként végeztem el. A hálóelem típusa tetraéder, a fal mentén lévő határrétegnél pedig háromszög alapú hasáb. Az elemméret a gyorsítódob háznál 15 mm-es a határréteg vastagsága 40 mm. A gyorsító ventilátor esetén az elem méret szintén 15 mm, a határréteg 10mm vastag. A kifúvó toronynál az elemméret 20 mm a határréteg vastagsága szintén 20 mm. A hálózásnál figyelembe vettem az egymáshoz közel lévő falakat és ennek megfelelően ott elemméret finomítást alkalmaztam. A háló jóságát a szimuláció végén tudjuk csak megítélni, méghozzá úgy, hogy az Y+-nak egy adott tartományon belül kell esnie.

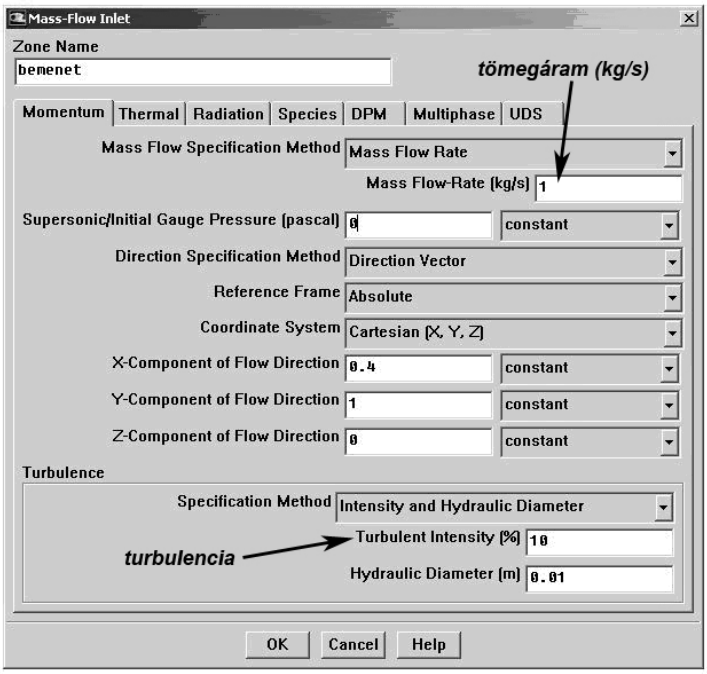


55. ábra: Gyorsító ház és dob végeselem hálója



56. ábra: Kifúvótorony végeselem hálója

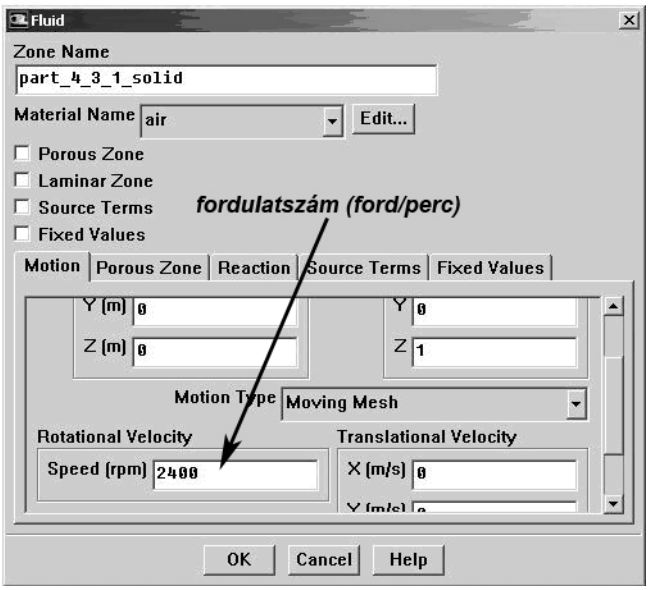
A háló elkészítése után definiáltam a peremfeltételeket a modellen. Ennek megfelelően a bemenetre tömegáramot adtam meg, mely 1 kg/s nagyságú. Ez a szecskázódob felöl érkező levegőmennyiség hányad. Emellett definiáltam azt is, hogy a belépő felülethez képest milyen irányú ez az áramlás, mely itt enyhén hátrahajló hogy kövesse a fal vonalát. A turbulencia nagyságát a bemeneten 10%-ra vettem fel (áramlástani számítások során ezt az értéket szokták venni alapértéknek).



57. ábra: Tömegáram definiálása a bemeneten

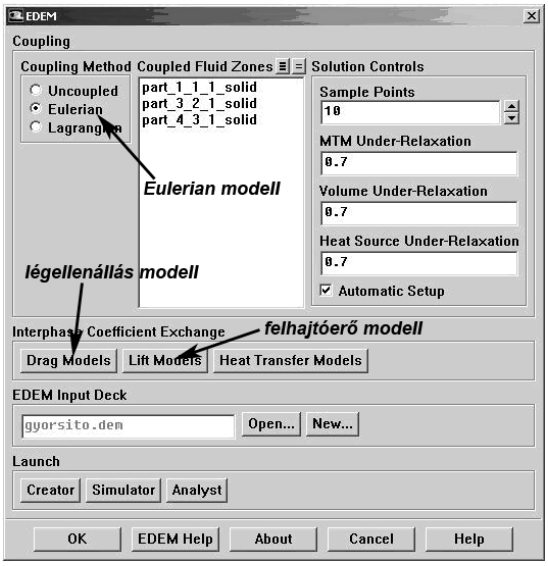
Az oldal bemenetekre 20 m/s-os átlag sebességet adtam. Korábban készítettem olyan modellt, melynél az oldalbemeneten a 0 Pa nyomás (a referencia nyomástól való eltérés), azaz környezeti nyomás volt megadva és a számítás elvégeztével kiadódott, hogy az adott körülmények mellett ~20 m/s-os az átlagsebesség. Az eredmény szempontjából nincs eltérés a két számítás között, azonban ha sebességet definiálok az oldal bemeneteken, a számítás gyorsabban konvergál, így a számítási idő jelentősen csökken. A kifúvótorony végén a kimeneten 10^5 Pa, azaz környezeti nyomást adtam meg.

Mivel a modell három külön részből ún. domainekből áll, ezért ezeket össze kell kapcsolni. A domain-eket ún. interface-kel lehet összekapcsolni melyek az egyes részekben lévő áramlási viszonyokat interpolálják saját csomópontjaikra. Így a gyorsítódob házat összekapcsoltam a kifúvótoronnyal, valamint a gyorsítódobot a gyorsítódob házzal úgy, hogy további peremfeltételként megadtam, hogy a dob mely tengely körül és mekkora fordulatszámmal forog. Ennek nagysága 2400 ford/perc, mint a szériagépnél.



58. ábra: Forgó rész forgás tengelyének és fordulatszámának beállítása

Az Eulerian kétfázisú áramlás számítása során a k-ε turbulencia modellt alkalmaztam. A két szoftver összekapcsolását a 59. ábra látható panel segíti. A kapcsolás során be kell állítani a kétfázisú áramlás típusát, mely az én esetembe Eulerian. Majd ezt követően a légellenállás (Drag model) számításához a *Di Felice* modellt és a felhajtóerő (Lift model) számításához *Saffman* modellt állítottam be.



59. ábra: EDEM-FLUENT kapcsolópanel

Utolsó előkészületi lépésként beállítottam a konvergencia kritériumokat, mely teljesülése esetén a számítás tovább lép a következő iterációra.

A DEM modell felépítése

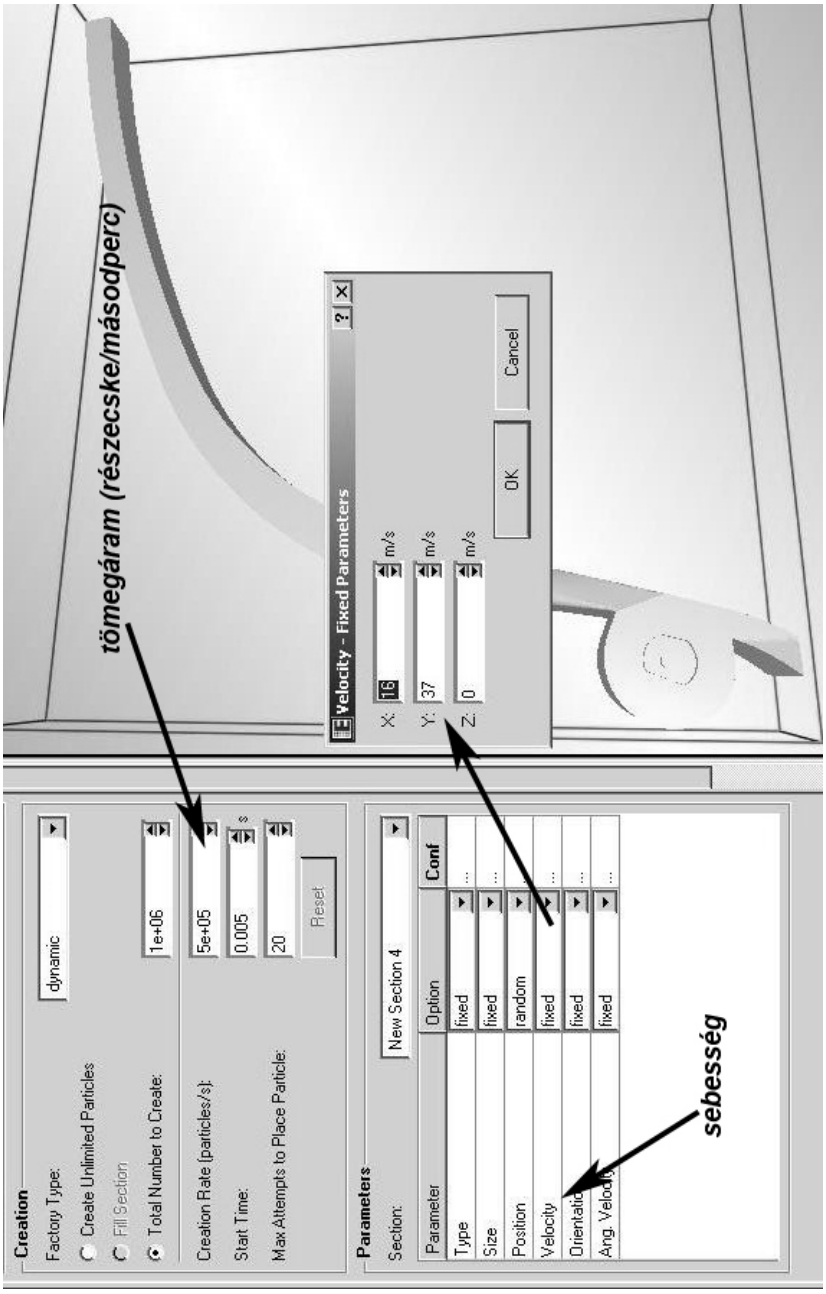
A diszkrét elemes modell szimulációja során első lépésként definiálni kell a halmaz tulajdonságait. Ehhez szükség van a halmaz csúsztató rugalmassági modulusára, a fal és szemcse között lévő súrlódási tényező nagyságára, valamint ezen anyagok között keletkező gördülési ellenállásra és az ütközési számra. Szintén meg kell adni a szemcse-szemcse között lévő súrlódási tényező nagyságát, a gördülési ellenállást és az ütközési számot is. Az értékek egy része saját mérési eredmény, a másik része pedig korábbi irodalmakból vett adat.

60. ábra: Anyagjellemzők definiálása

Következő lépésként definiálni kell a szemcse alakját. A szemcse mérete és alakja tetszőleges lehet. A számítás megkönnyítése érdekében először gömb alakú szemcsét definiáltam melynek átmérője a kukoricára jellemző átlagos szecskahossznak megfelelően 10 mm. Azért választottam ezt a közelítést, mert a számítási idő így jelentős mértékben lecsökken, mivel nem kell számolni a szemcse forgásából adódó problémákkal. Ugyanakkor a gördülési ellenállás megfelelően nagyra választásával akadályozható a szabad gurulás.

A falak felépítése a FLUENT végeselem modell importálásával történt. Amit a CFD modellben falnak definiáltam csak az került át a DEM modellbe.

Legutolsó lépésként a modell előkészítése során megadtam, hogy a részecskék hol mennek be a modellbe, és mekkora sebességgel. A modellnél ez 40 m/s volt, mivel átlagosan ekkora sebességgel érkezik a szecska az aprító dobtól. Továbbá definiáltam a tömegáramot is. Ez 500000 részecske/másodpercet (~55 kg/s=200 t/h) jelentett a számítás során.



61. ábra: DEM peremfeltételek beállítása (tömegáram és sebesség)

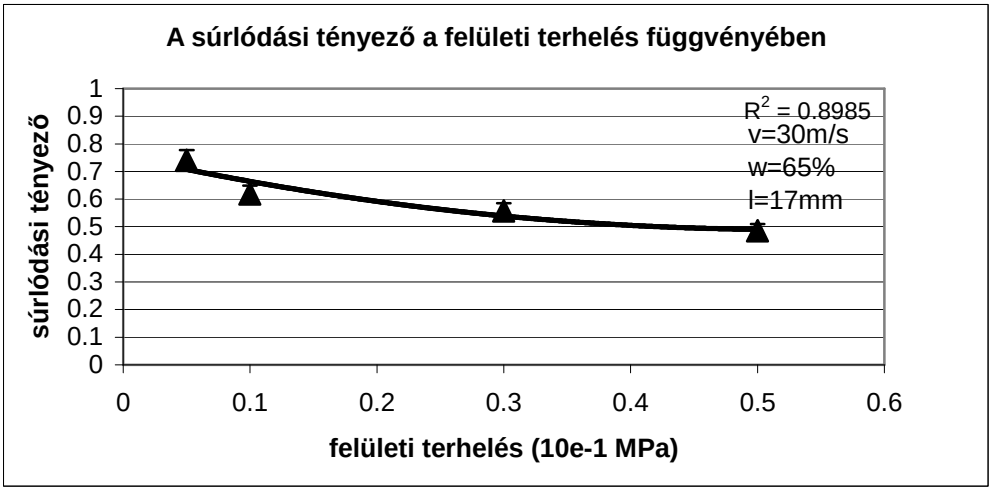
4. Eredmények és értékelés

4.1. Mérési eredmények szecskázott fűnél

A mérések során alkalmazott fű réti fű volt. A beállított elméleti szecskahosszúság 17mm volt a szecska nedvességtartalma 68% volt, amely fokozatos száradás következtében 12,6%-os nedvességtartalomra csökkent.

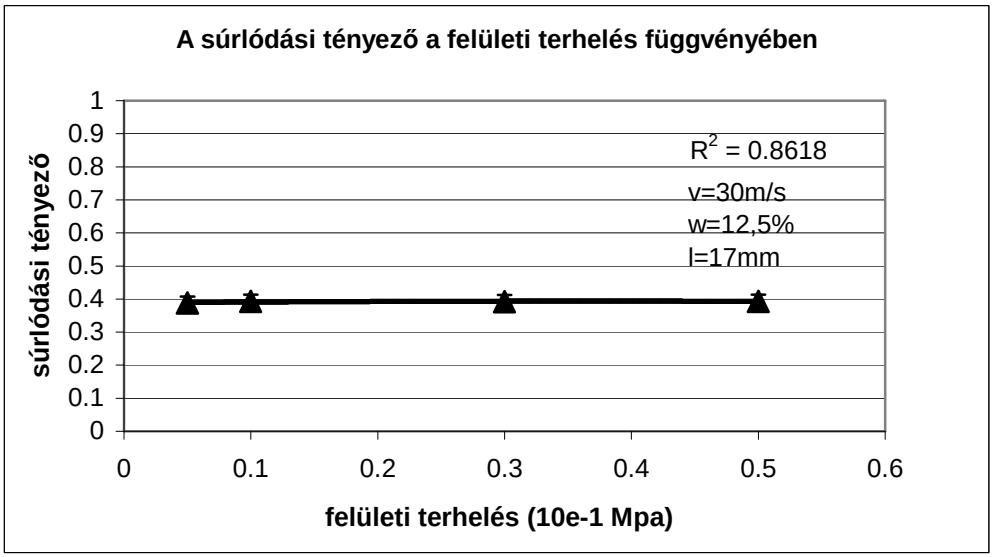
Súrlódási tényező a terhelés függvényében

Szilázs készítés céljából a rétifüvet 50-60 % körüli nedvességtartalom mellett szokták szecskázni. Nagyobb nedvességtartalom esetében tömörítéskor kipréselődik a víz, és ezzel értékes tápanyagok vesznének el. Az 62. ábra szemlélteti a szecskázott fű súrlódási tényezőjét (p=0,005 MPa, v=30 m/s, l=17 mm, w=65% mellett), ami valamivel több mint 0,7. Ez a nagy súrlódási tényező jelentősen fékezi a szecskázott anyagot. Az ábrán az is megfigyelhető, hogy a terhelés növelése következtében 0,05 MPa terhelésnél a súrlódási tényező 0,5-re csökken, ami közel 25%-os mérséklődés. A terhelés változásával (minden más egyéb paraméter változatlan) jelentős mértékben változik a súrlódási tényező értéke. A változást több ok előidézheti. Egyik az irodalomban is említett adhézió és deformációs komponens mértékének megváltozása. Másik a növényben jelenlévő víz.



62. ábra: A súrlódási tényező a felületi terhelés függvényében fűnél (w=65%)

A 63. ábra a 12,5%-os nedvességtartalmú fűvel végzett mérés eredményeit szemlélteti. Itt a terhelés változásának hatására elhanyagolható mértékben változik a súrlódási tényező értéke.

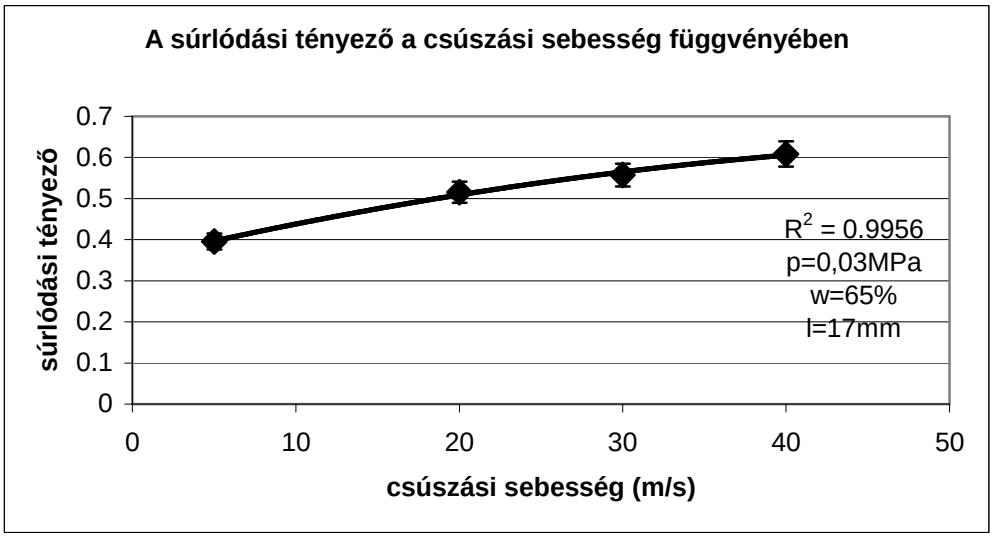


63. ábra: A súrlódási tényező a felületi terhelés függvényében fűnél (w=12,5%)

A két mérési eredmény alátámasztja azt a feltételezést, hogy a magasabb nedvességtartalmú anyagnál kipréselődik a nedvesség az érintkezési felületen és ez lecsökkenti a súrlódási ellenállást. Ugyanakkor az is igaz, hogy nedves anyag puhább így a deformáció is jelentősebb, mint a száraz anyagnál, ami merevebb, keményebb. A nagy felületi terhelésnek kitett helyeken (pl: doblemez) a nagy normálerő mellett a súrlódási erőt némiképpen kompenzálja a súrlódási tényező csökkenése. Így a súrlódási veszteség mérséklődik.

Súrlódási tényező a sebesség függvényében

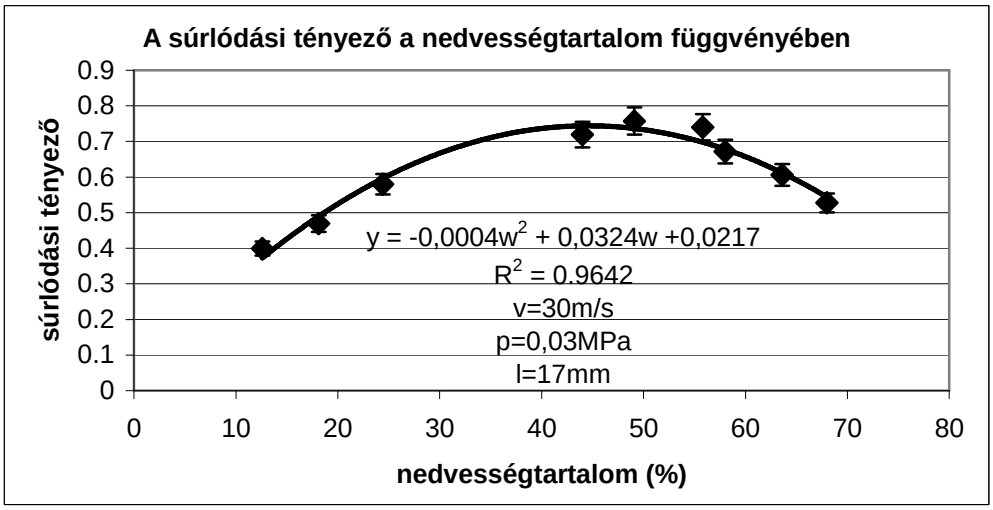
A súrlódási tényezőt a csúszás sebessége is módosítja. Alacsony siklási sebességnél alacsonyabb súrlódási tényezőt mértem mely 0,03 MPa felületi terhelés mellett 0,4 míg a sebesség növekedésének következtében az érték kezd nőni. Itt is változás áll be a rendszer szerkezetében. Nagyobb csúszási sebességnél jelentősen megnő a súrlódás miatt keletkező hő. Az érintkező felületeknél keletkező hő hatására a nedvesség elpárologhat, ezzel leromlanak a súrlódási viszonyok és megnő a súrlódási ellenállás. Az eredmények alapján elmondható, hogy a súrlódási veszteség szempontjából kedvezőtlen a nagy sebességgel történő szecska szállítása. Ha az egyéb vizsgálati paramétereket (felületi terhelés, szecskahossz, felületi érdesség) állandónak tekintjük a csúszási sebesség szempontjából a kisebb értéknél lesz kedvezőbb a súrlódási veszteség.



64. ábra: A súrlódási tényező a csúszási sebesség függvényében fűnél

Súrlódási tényező a nedvességtartalom függvényében

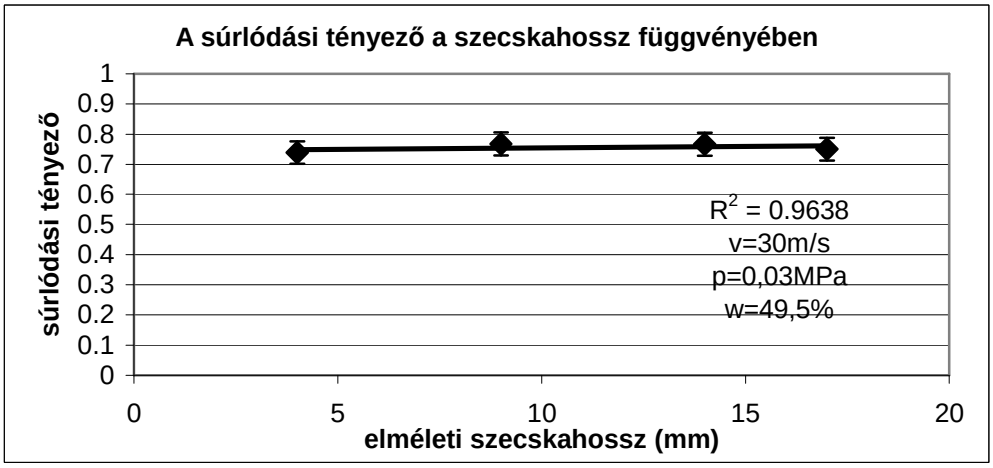
E fejezetben a nedvességtartalom befolyásoló hatását vizsgálom. Az 65. ábra a mérések eredményeit szemlélteti. Látható, hogy 68%-os nedvességtartalomnál 0,5 a súrlódási tényező nagysága, majd a nedvességtartalom csökkenése következtében elkezd nőni. A w=40-50%-os tartományban éri el a maximumot majd az érték elkezd csökkenni. Magas (w=55% felett) nedvességtartalomnál a víz kenőanyagkén szolgál, ezért csökken a súrlódási ellenállás. 10-20%-os nedvességtartalom mellet a fű száraz és keményebb, mint nedves formában. A víz a kenőhatása 45%- os nedvességtartalomnál nem érvényesül, azonban az adhéziót jelentősen befolyásolja. Ennek következtében a felaprított anyag tapad az ellenfelületre. Ezek az eredmények a gyakorlatban is igazolódtak, hiszen a 60% feletti nedvességtartalmú szecska egyenletesebben áramlik a szecskázógépen belül. Ugyanez elmondható a száraz fűre is. 45%-os nedvességtartalom körül jelentkezik a letapadás a csúszófelületekre. Ez a jelenség a fű cukortartalmával is összefüggésben áll, ami a gyakorlatban egy ismert probléma különösen a holland területeken. Ha a fű letapad a csúszófelületekre az gátolja a szecska áramlását és rövid időn belül eltömődik a csatorna amiben a szecska áramlik.



65. ábra: A súrlódási tényező a nedvességtartalom függvényében fűnél

Súrlódási tényező a szecskahossz függvényében

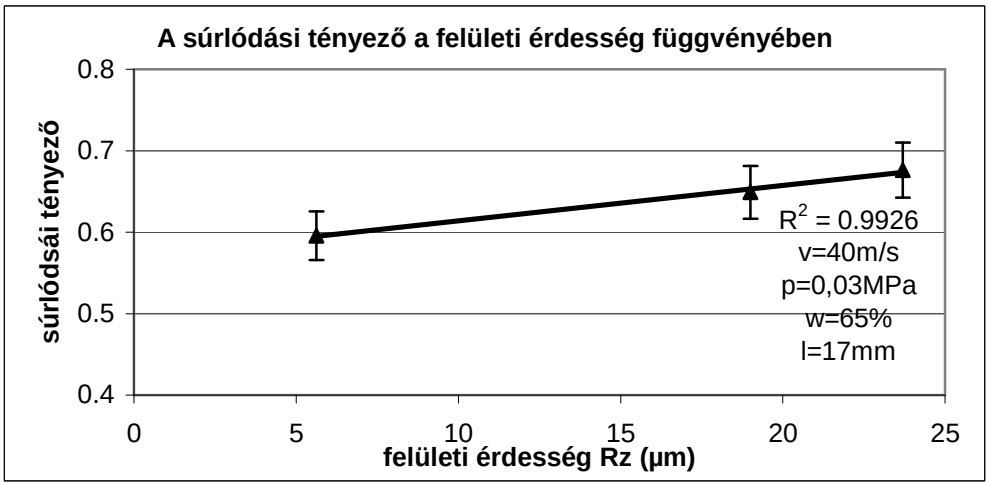
Méréseim során vizsgáltam a súrlódási tényező változását a szecskahossz függvényében. A mérések során a terhelés, a csúszási sebesség és nedvességtartalom állandó volt. Így egyetlen paraméter a szecskahossz változott. Az elméleti szecskahossz 4 mm, 9 mm, 14 mm és 17 mm volt. Az eltérő hossz nem eredményezett változást a struktúrában, ezért a szecskahossz megváltozása üzemszerű tartományon belül nincs hatással a súrlódási tényezőre.



66. ábra: A súrlódási tényező a szecskahossz függvényében fűnél

Súrlódási tényező nagysága a felületi érdesség függvényében

A mérések során 3 különböző felületi érdességű tárcsával végeztem méréseket. A tárcsák felületi érdessége Rz=5,62 µm, Rz=19,13 µm és Rz=23,97 µm voltak. Az eltérő felületi érdességet esztergagépen alakítottuk ki. A 67. ábrán láthatóm hogy a felületi érdesség növelésére fokozódik a súrlódási tényező. Ez azért van, mert a súrlódási ellenállás deformációs komponense megnő, mivel nagyobb felületi érdességnél a szecska jobban deformálódik és jobban beleakad a felületi kiemelkedésekbe. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy kisebb felületi érdességnél kisebb a súrlódási ellenállás, ezért a szecska kevésbé fékeződik le. Ugyanakkor és ez már gyakorlati tapasztalat, a nagy tömegáram mellett a csúszófelületek simára kopnak. Így amúgy is értelmét veszti a durvább felület kialakítása.

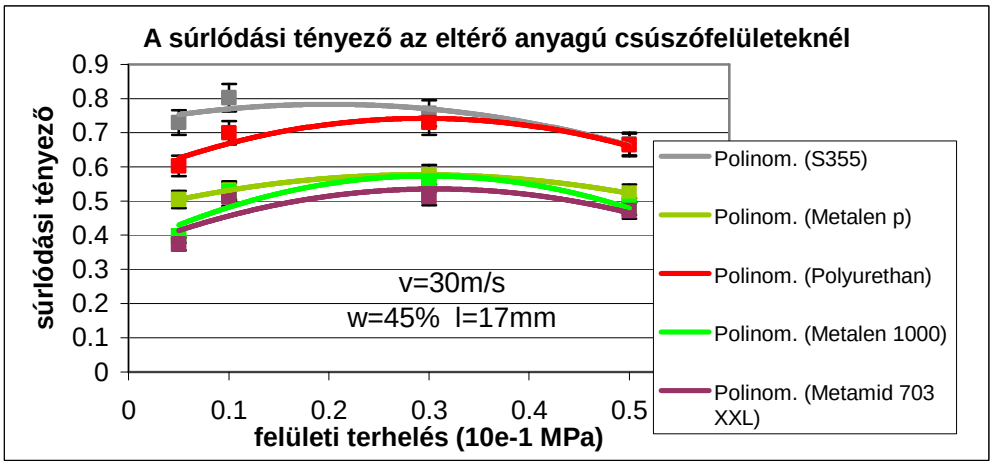


67. ábra: A súrlódási tényező a felületi érdesség függvényében fűnél

Súrlódási tényező különböző anyagú csúszófelületek esetében

A korábbiakban már volt szó arról, hogy méréseim során az acél, mint referencia anyag mellett műanyagokkal is végeztem méréseket. A vizsgált műanyagok között volt Metalen p és Metalen 1000, melyek az UHMW-PE-nek csoportjába tartoznak. A Metamid 703XXL műanyag egy poliamid, mely vakszot is tartalmaz. Továbbá végeztem méréseket poliuretán tárcsával is. Egy mérési beállításnál ismertetem a mérési eredményeket, de más mérési beállításoknál is megfigyelhető a műanyagok eltérő tribológiai tulajdonsága az acélhoz képest. Látható, hogy a poliuretán tárcsánál csak kis nyomástartományban volt a súrlódási tényező kisebb az acélhoz viszonyítva. Ugyanakkor a polietilén és poliamid tárcsákkal végzett méréseknél a súrlódási tényező átlagosan 40%-kal kisebb, mint ugyanazon pontban mért acéltárcsa esetében. A poliamid és polie-

tilén tárcsák között nincs jelentős különbség különösen akkor, ha az 5%-os mérési hibát is figyelembe vesszük. Mérések igazolták azt a feltevést, hogy a polietilén és poliamid jóval kedvezőbb siklási tulajdonsággal rendelkezik szecskázott fű esetében is. A polietilén további előnye még az acélhoz viszonyítva, hogy nem, vagy csak nehezen ragasztható. Ezért a szecskázott anyag is nehezen tapad a felületére. Ez egy kedvező tulajdonság számunkra a jó siklási tulajdonság mellett. A negatív tulajdonságok közé a kopás tartozik, de erről a későbbiekben még részletesebben beszélek.

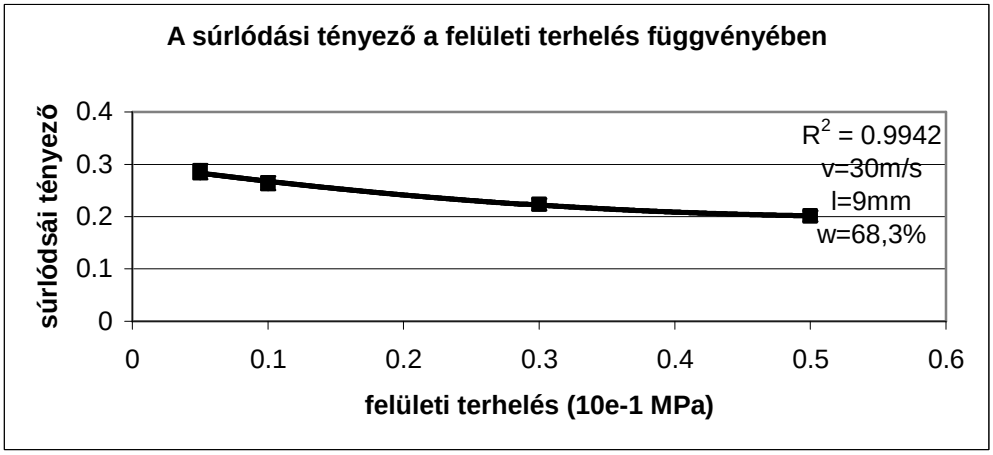


68. ábra: A súrlódási tényező alakulása eltérő anyagú csúszófelületeknél

4.2. Mérési eredmények szecskázott kukoricánál

Súrlódási tényező a terhelés függvényében

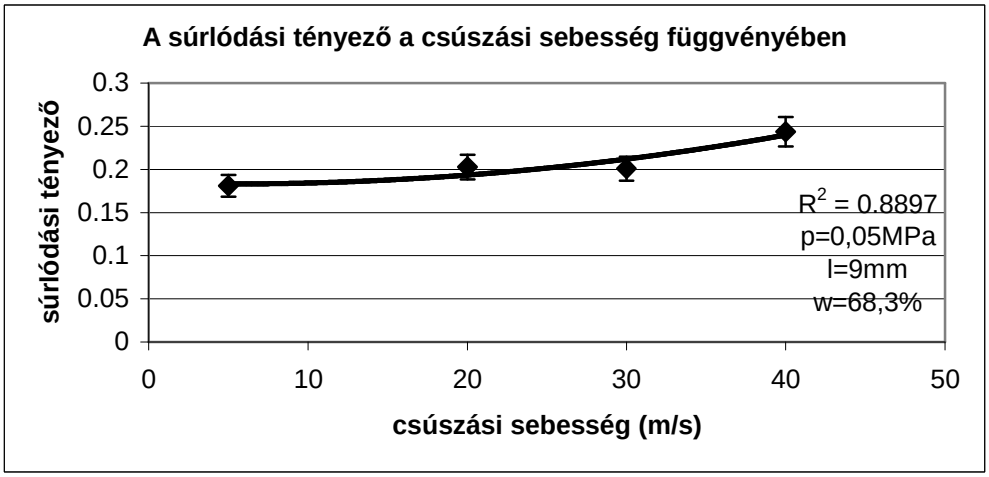
A siló készítése során a silókukoricát viaszérési állapotban takarítják be, ilyenkor a nedvességtartalom 65-70% között változik. Nagyobb nedvességtartalommal itt sem szerencsés a betakarítás, mert értékes tápanyagokat veszíthetünk el. A 70. ábrán látszik, hogy a szecskázott kukorica súrlódási tényezője 0,2-0,3 közötti érték, mely a beállítási paraméterek következtében kismértékben változik. Az kijelenthető, hogy az aprított kukorica súrlódási tényezője csak harmada a szecskázott fűhöz viszonyítva. Emiatt a kukorica kevésbé fékeződik a gépen belül és egyenletesebben áramlik, mint a fű. Ezt a gyakorlat is alátámasztja. A 69. ábrán a súrlódási tényező látható a felületi terhelés függvényében. Megfigyelhető itt is az a tendencia, hogy a felületi terhelés növelése következtében a súrlódási tényező csökken. Alacsony 0,005 MPa terhelés mellett az érték 0,3, 0,05 MPa-nál már csak 0,2 a súrlódási tényező értéke, ami közel 30%-os mérséklődés. A változás oka egyrészt az adhéziós és deformációs komponens arányának megváltozása. Másrészt a növényből kipréselődő víz. Azaz megváltozik a tribológiai rendszer, mely a szecska-acél kölcsönhatásakor keletkezik.



69. ábra: Súrlódási tényező a terhelés függvényében silókukoricánál

Súrlódási tényező a sebesség függvényében

A csúszási sebesség változásával megváltozik a tribológiai rendszer. Megfigyelhető itt is az a tendencia, hasonlóan mint a fűnél, hogy alacsony siklási sebességnél alacsonyabb a súrlódási tényező, míg a sebesség növekedésének következtében az érték elkezdett nőni. Megváltozik a tribológiai rendszer hő viszonyai, hiszen nagyobb csúszási sebességnél időegység alatt több hő keletkezik az érintkező felületek között. A hő hatására abban a zónában elpárolog a nedvesség, és ezzel leromolhatnak a súrlódási viszonyok.



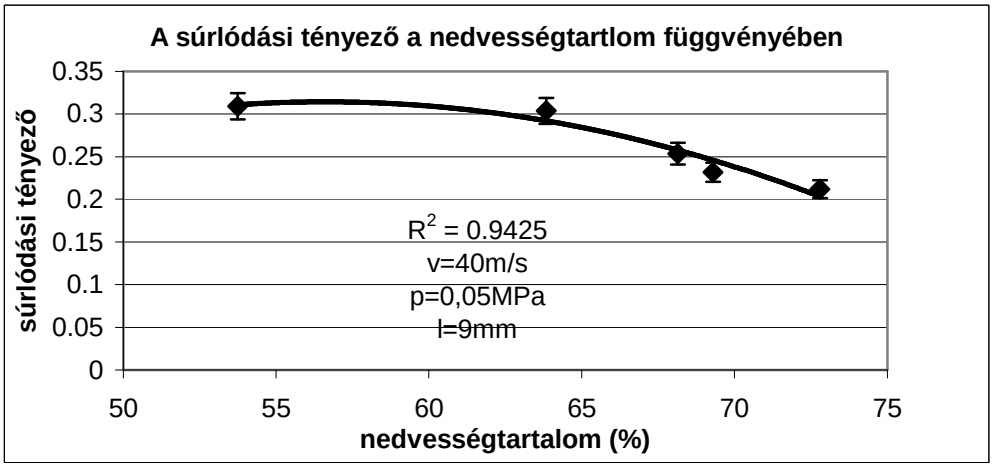
70. ábra: Súrlódási tényező alakulása a csúszási sebesség függvényében

A diagram arra enged következtetni, hogy a szecskát csak a szükséges mértékig gyorsítsuk fel. Ha túl nagy (~40 m/s) sebességgel halad a szecska megnő a súr-

lódási veszteség. Valamint a nagy sebességre történő gyorsítás is jelentős többlet energiát igényel.

Súrlódási tényező nagysága a nedvességtartalom függvényében

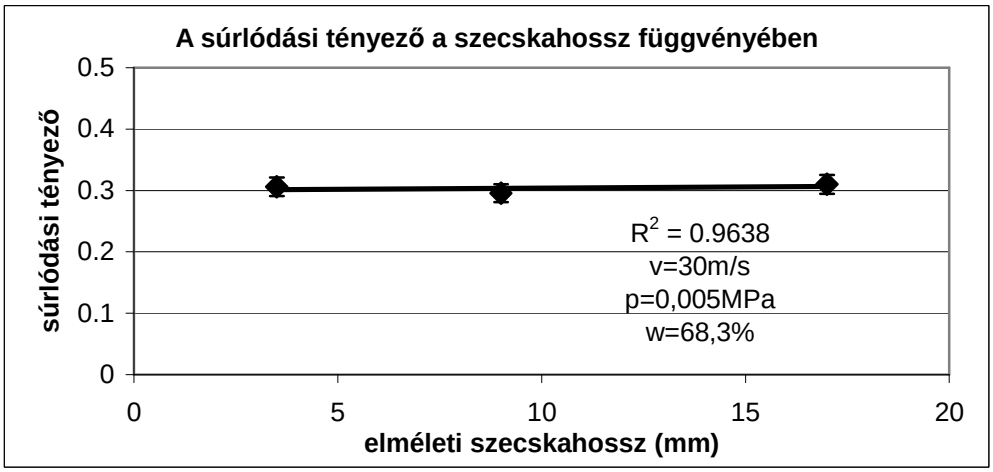
Az aprított kukorica biológiai anyag, ennek következtében a tribológiai tulajdonságát több más paraméter mellett annak nedvességtartalma jelentős mértékben befolyásolja. A kukoricát nem lehet szecskázott állapotban szárítani, mivel rövid időn belül a baktériumok miatt erjedni kezd és így mérésre teljesen alkalmatlan anyag lesz. A vizsgálatok elvégzésére a növény szárítását lábon végeztük. Így két-három naponta szecskáztuk a kukoricát. A szecska nedvességtartalma 73% és 54% között változott. Alacsony 54%-os nedvességtartalommal már nem készítenek silót, mert annyira száraz, hogy a tömörítésnél problémák adódnak. A nedvességtartalom csökkenése következtében hasonlóan, mint a fűnél, itt is elkezd a súrlódási tényező nőni. Magas nedvességtartalomnál a víz kenőanyagként szolgál. A nedvesség csökkenése következtében viszont az adhézió kezd dominálni, aminek következtében romlik a siklási tulajdonság.



71. ábra: A súrlódási tényező a silókukorica nedvességtartalmának függvényében

Súrlódási tényező a szecskahossz függvényében

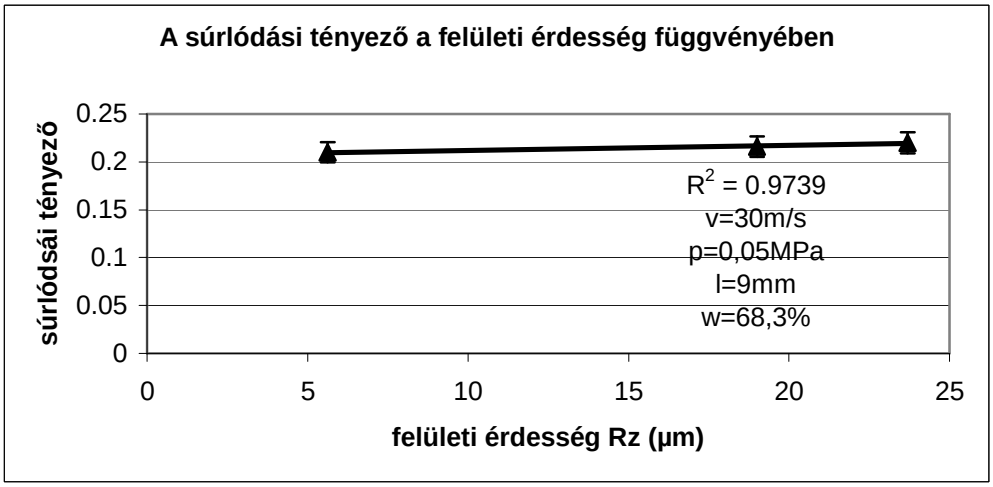
A mérések során a szecskahossz függvényében is vizsgáltam a súrlódási tényező változását. A méréseket hasonlóan, mint a fűnél állandó terhelés, csúszási sebesség és nedvességtartalom mellett végeztem el. Így csak egyetlen paraméter a szecskahossz változott. Az elméleti szecskahossz 4 mm 9 mm és 17 mm volt. A makro strukturális változás, sem az adhéziós sem a deformációs összetevőt nem változtatja meg lényegében a súrlódási rendszerben, ezért a súrlódási tényező sem változik.



72. ábra: A súrlódási tényező eltérő szecskahosszúság mellett silókukoricánál

Súrlódási tényező nagysága a felületi érdesség függvényében

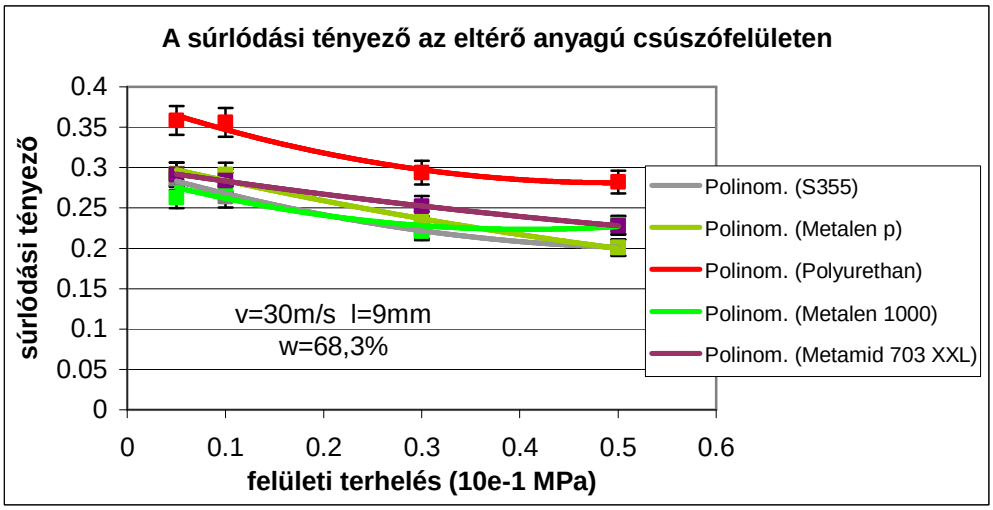
Mérések során 3 különböző felületi érdességű tárcsával végeztem méréseket. A vizsgált tárcsák ugyanazok voltak, mint amelyeket a fűvel végzett kísérleteknél alkalmaztam így a felületi érdességek rendre Rz=5,62 µm, Rz=19,13 µm és Rz=23,97 µm voltak. Szecskázott kukorica esetében a felületi érdesség nagysága a vizsgált tartományon belül nem módosítja a súrlódási tényező nagyságát. A mérések alapján a súrlódási tényező konstansnak tekinthető.



73. ábra: A súrlódási tényező a felületi érdesség függvényében silókukoricánál

Súrlódási tényező nagysága különböző anyag esetében

Kukoricával végzett méréseknél során itt is végeztem méréseket műanyag tárcsákkal. Az eddigi eredményekből egyértelműen kitűnik, hogy a kukorica szecska jóval kedvezőbb siklási tulajdonsággal bír, mint a fű. A 74. ábrán a mérésekből látszik, hogy kukorica szecskánál a nem mutatható ki különbség a polietilén és az acél tárcsa között. Ha a mérési hibát figyelembe vesszük, kijelenthető, hogy ugyan akkora a súrlódási tényező és ugyanazt a tendenciát követi. A poliuretán kivételt képez a polimerek közül, mivel annak 40%-kal nagyobb a súrlódási tényezője az acél tárcsához képest.

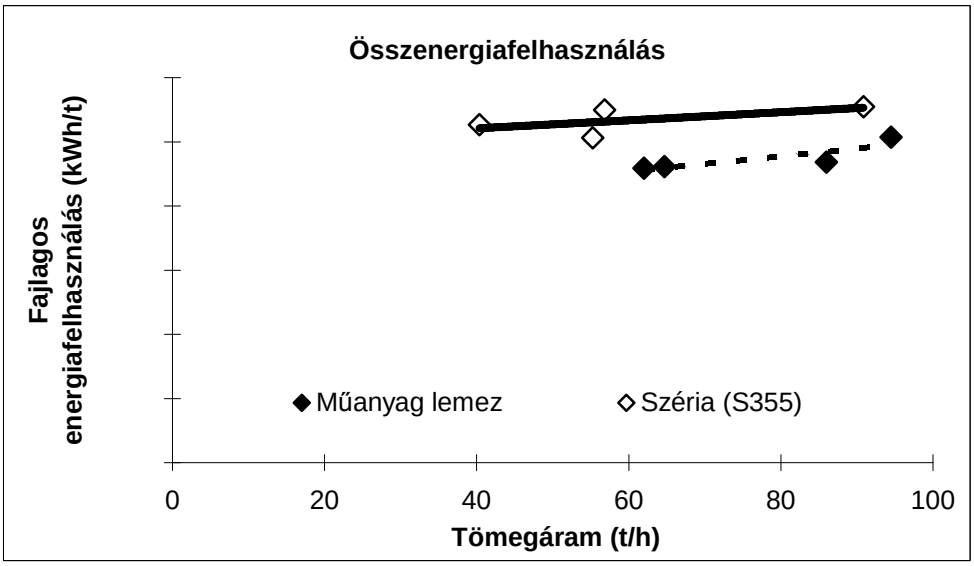


74. ábra: A súrlódási tényező az eltérő anyagú csúszófelületeken

A kukoricával végzett mérések során kijelenthető, hogy bár a polietilén alkalmazásával nem csökken a súrlódási tényező, de nem is nagyobb, mint az acél csúszófelület esetében.

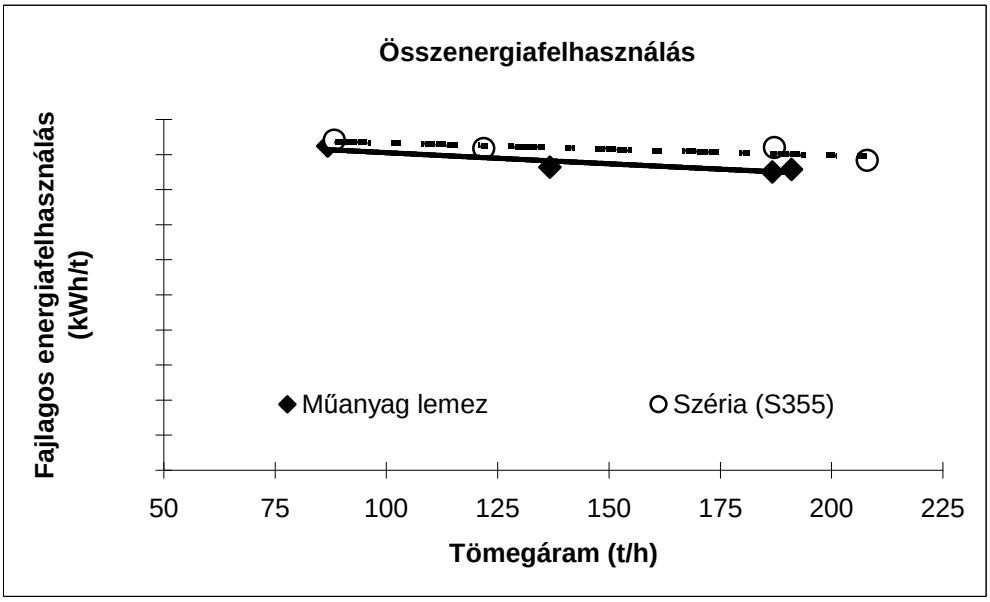
4.3. Szántóföldi mérések eredményei

A 75. ábrán a mérési eredményeket láthatjuk, melyek fű szecskázásakor mértem. A fekete pontok a műanyag csúszófelületekkel ellátott szecskázógép mérési eredményeit mutatja. A fehér pontok a széria géppel végzett mérések eredményeit szemlélteti. A Szántóföldi mérések során hasonló eredményeket kaptam, mint a laboratóriumi vizsgálatoknál, nevezetesen a műanyag csúszófelületnél a súrlódási ellenállás kisebb. Emiatt a szecskázás energia igénye is kisebb. A műanyag csúszófelülettel rendelkező gép fajlagos össz-energia felhasználása 10%-kal kevesebb volt a normál széria géphez. Ez a különbség a PE kedvező siklási tulajdonságának köszönhető.



75. ábra: Szántóföldi mérések eredményei fű szecskázásakor (l=17 mm, w=45,3%)

2008 őszén méréseket végeztem el silókukorica szecskázásakor is. A mérés hasonlóan történt, mint fű szecskázásakor. A műanyaggal bélelt gép és a széria gép egy azon táblán szecskázott. A mérési eredményeket a 76. ábra tartalmazza. Kukorica szecskázásakor hasonlóan, mint a laboratóriumi méréseknél már csak 1-2%-os különbséget mértem a műanyag javára. A mérési hibát figyelembe véve kijelenthető, hogy kukorica szecskázásakor a súrlódási veszteség acél és műanyag csúszófelület esetén azonos.



76. ábra: Szántóföldi mérések eredményei kukorica szecskázásakor (l=9 mm, w=64,6%)

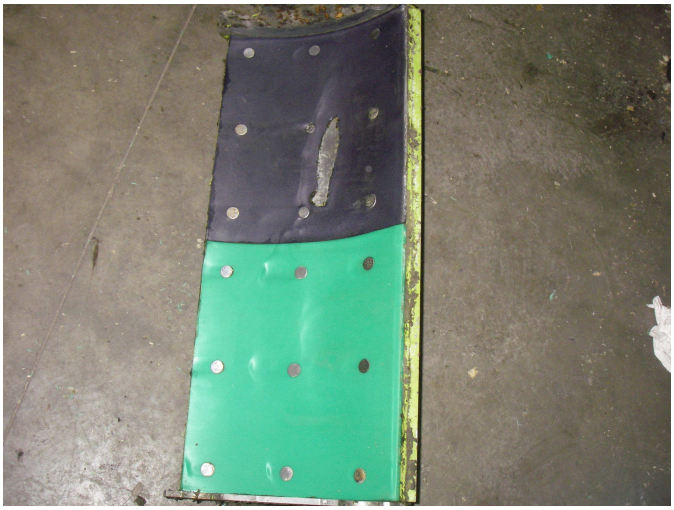
A műanyag csúszófelület további előnye fű szecskázásakor, hogy nem vagy csak kis mértékben tapad a fű annak felületére.

4.4. Szántóföldi kopásvizsgálatok

A polimerek kedvezőbb siklási tulajdonsága általában kedvezőtlenebb kopási tulajdonsággal párosul. A szántóföldi vizsgálatok másik ága a műanyagok kopásvizsgálata volt. A tesztnél a tömeg megváltozásán alapuló kopásmérést választottam. Ez a módszer csak globális képet ad a kopásról mégis jól reprezentálta számomra, hogy adott terület leszecskázásakor mekkora volt a kopás. Az első évben Metalen 1000 (zöld) és Metamid 703 XXL (lila) műanyaggal végeztem kopásvizsgálatokat. A 77. ábrán a műanyagok kopása látható 130 ha kukorica leszecskázása után. A lemezeken mért kopás nagyságát az 5. táblázatban foglaltam össze.

5. táblázat: a műanyaglemezek kopása a szántóföldi vizsgálat után (2007)

Anyag	előtte	utána	kopás nagysága (g)	kopás (mm)
Metalen 1000	1199.2	1004.5	194.7	1.623
Metamid 703 XXL	1415	1069.5	345.5	2.451



77. ábra: Műanyag lemezek állapota a betakarítás végeztével (2007 ősz)

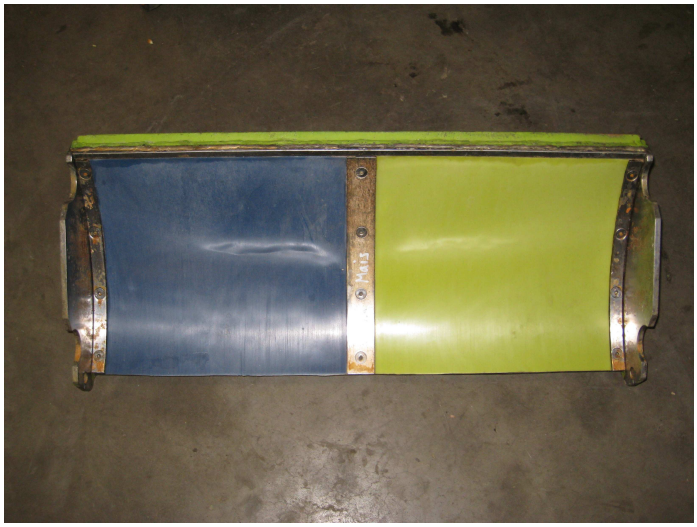
A 77. ábrán látszik, hogy a poliamid műanyag lemez (lila) olyannyira megkopott, hogy ki lyukadt. A polietilén lemez (zöld) jobban ellenállt az abrazív koptató hatásnak. Az első szántóföldi kopásteszt elvégzése után úgy döntöttem, hogy későbbiekben csak olyan polietilénekkel kísérletezek tovább, amelyek jobb kopásállósággal rendelkeznek, mint a Metalen 1000-es műanyag. Így esett

a választás a Metalen 2-re, amely már erősebb polietilén. Valamint a Metalen 1 elnevezésű műanyagra, amelynek abrazív ellenállóságát a benne lévő üveggömböcskék tovább fokozzák. Az 6. táblázat a 2008 szántóföldi mérések elvégzésekor kapott kopás mértékét mutatja. A leszecskázott terület nagysága ~245 ha volt. Ez közel kétszer annyi, mint a 2007-ben betakarított terület nagysága.

6. táblázat: a műanyaglemezek kopása a szántóföldi vizsgálatok után (2008)

Anyag	előtte	utána	kopás nagysága (g)	kopás (mm)
Metalen 2	1085.6	871.1	214.5	1.975
Metalen 1	1132.4	964	168.4	1.487

A 78. ábrán látható a műanyag lemezek állapota (kék Metalen 2, zöldes-sárga Metalen 1). Látható, hogy a 2000-es PE jobban megkopott, mint a Metalen 1. Ugyanakkor a kétszerannyi betakarított terület után jobb kopási tulajdonsággal bír mint az 1000-es változat. A legjobb kopási ellenállással bíró anyag a Metalen 1, mely a többi műanyaghoz viszonyítva kiváló eredményt mutat.



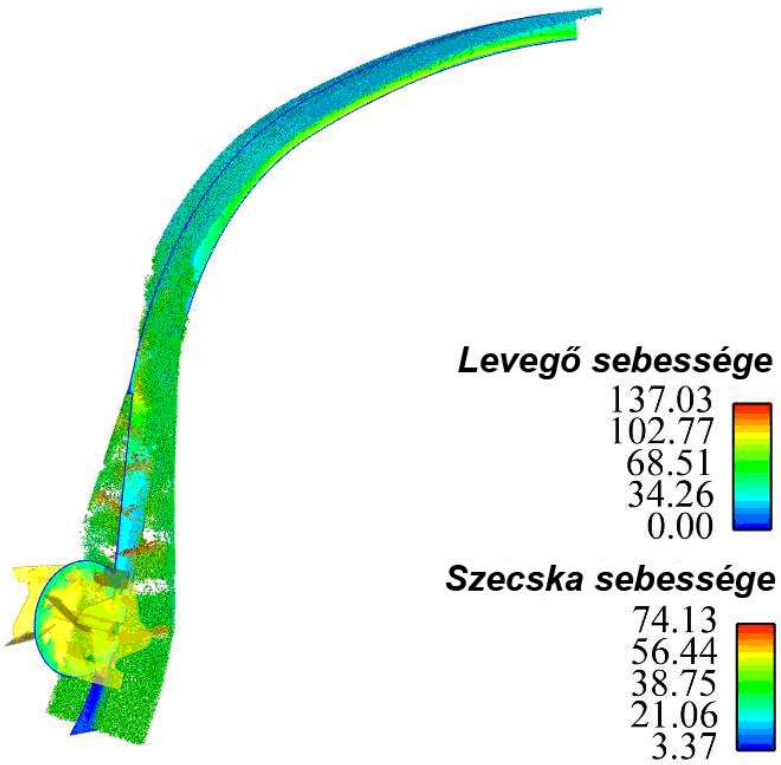
78. ábra: Műanyag lemezek állapota a betakarítás végeztével (2008 ősz)

Összességében elmondható, hogy a műanyagok - főleg a Metalen 1 - jó siklási tulajdonsága mellett viszonylag jó kopási tulajdonsággal is rendelkeznek. Bár ez nem közelíti meg a HARDOX kopásálló acél ellenállóságát mégis elvárásunknak megfelelően teljesített. Azt is figyelembe kell venni, hogy a legnagyobb terhelésnek kitett helyen adott szintet teljesített műanyag a gép más részein csak csekély kopást mutatott. A szecskázógép teljes egészében ki volt bélelve a Metalen p nevű polimerrel. Elmondható, hogy volt olyan rész a gépen

belül, ahol a lemezen lévő megmunkálási nyomok a betakarítás végén is láthatóak voltak. A Metalen 1 potenciális lehetőségként alkalmazható a járvaszecskázó gépekben, a súrlódási veszteség mindenképpen csökkenthető. A kopásállóság fokozására pedig a térhálósított műanyag kivitelezhető és fejleszthető.

4.5. A CFD-DEM számítás eredményei

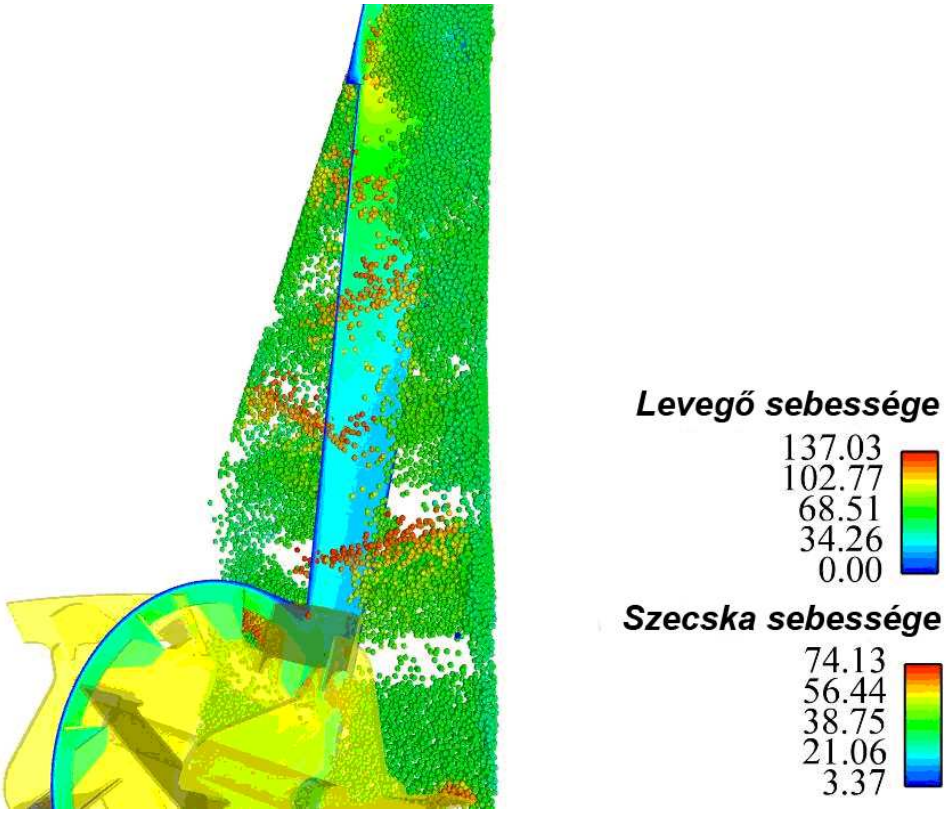
A CFD-DEM kapcsolt számítás elvégzése után elemeztem, hogy a gépen belül milyen a levegő sebesség és nyomáseloszlása, valamint milyen a szecska mozgáspályája. A CFD számítás eredménye alapján a levegő tömegárama 2,63 kg/s, melyből 1 kg/s érkezik a szecskázódob felől és 1,63 kg/s mennyiséget oldalról szív be a gyorsítódob. A 79. ábrán a levegő és szecska sebességeloszlását mutatja. A szecska ~20 m/s-os sebességgel lép ki a kifúvótoronyból, amelyet a mért átlagos 20,8 m/s-os sebességgel összevetve a számítás pontosnak mondható.



79. ábra: CFD-DEM számítás eredménye

A 80. ábrán a gyorsítódob utáni rész kinagyítása látható. A számításból látszik, hogy a szecska csak nagyon kis része gyorsul az elméleti 68 m/s-os sebes-

ség fölé. A szecska jelentős hányada 50 m/s-os sebességgel hagyja el a gyorsítódob utáni részt. Megfigyelhető az is, hogy a szecska csak kis mértékben lassul le a szűkítőben. Ez azzal magyarázható, hogy mivel a szűkítő kilépő keresztmetszete kisebb, mint a belépő, a kontinuitás miatt muszáj a sebességnek nőni, méghozzá a két fluid közül annak, melynek kisebb a tehetetlensége. Ez jelen esetben a levegő, és amennyiben az ábrát jól megfigyeljük, a kilépő részen a levegő sebessége meghaladja a 100 m/s-t. Ugyanakkor a légellenállás miatt a levegő magával próbálja gyorsítani a felaprított anyagot is, mely így ~40 m/s-os sebességgel lép be a kifúvótoronyba. A szecska nem csak a súrlódás miatt, hanem az ütközések miatt is veszít kinetikus energiájából. Mivel a gyorsítódobon a lapátok egymáshoz képes el vannak tolva így az anyagáram is eltolva jelentkezik. Az eltolás miatt a szűkítő első szakaszán az ütközési veszteség kisebb, mivel az üres helyeket könnyebben fel tudják tölteni a részecskék. A szűkítőben való előrehaladáskor a szűkülő rész miatt az ütközési veszteség erősödik.



80. ábra: Sebességviszonyok a szűkítőben (m/s)

4.6. Az eredmények értékelése és összefoglalása

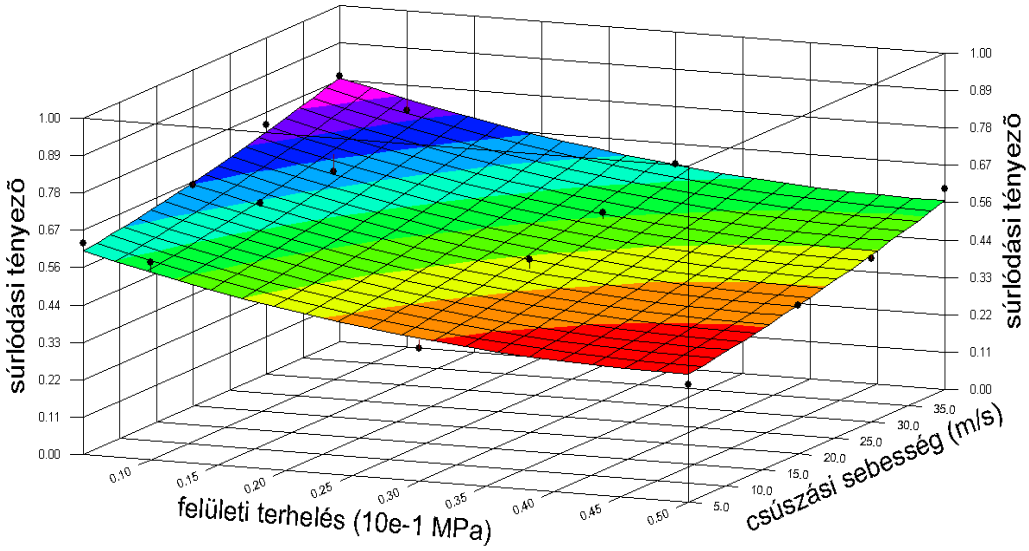
Az eredmények számos olyan lehetőségre világítanak rá, melyekkel mérsékelhető a súrlódási veszteség a járvaszecskázó gépekben, és ezzel javulhat a gép hatásfoka.

A laboratóriumi mérések szerint a fű súrlódási tényezője a betakarítási nedvességtartalomnál(~50%) 0,8 körüli érték, ami elég jelentős. Ezzel szemben silókukorica súrlódási tényezője csak 0,25 körüli érték. Látható, hogy a két növény között jelentős az eltérés. Ez a gyakorlatban is megmutatkozik, hiszen a kukorica szecska sokkal egyenletesebben és nagyobb sebességgel jön ki a gépből, mint a fű.

A csúszási sebesség növekedése kedvezőtlenül hat a súrlódási tényező alakulására. Növekedő sebesség mellett, nő a súrlódási tényező mind a fű mind a kukorica esetében. Ez a súrlódás okozta hővel magyarázható. A kontakt zónában a hő miatt megváltozik a nedvességtartalom és ezért az adhézió jelentősebb lesz. Az eredmények arra mutatnak rá, hogy célszerű a szállítási sebességet alacsonyan tartani, mivel így a súrlódási veszteség is kisebb. Ezzel összhangban, kevésbé kell a szecskát felgyorsítani így a gyorsítási veszteség is mérsékelhető. Mindez arra ösztönzi a konstruktőrt, hogy ne gyorsítsa fel az aprítékot a biztonságos belső anyagáramláson és kifúváson túli mértékben feleslegesen, mert az kihasználatlan többlet energiát igényel.

A felületi terhelés növekedésével a súrlódási tényező csökkenő tendenciát mutat. Ez elsősorban magas (50% feletti) nedvességtartalomnál igaz. A változás a súrlódás adhéziós és deformációs komponensének megváltozása miatt következik be. Az adhéziós komponens csökken, mivel a nedves anyagból az érintkezési zónában víz préselődik ki. Alacsony (20% alatti) nedvességtartalomnál ez a változás nem figyelhető meg. Ott a terhelés növekedés hasára nem változik a súrlódási tényező nagysága. Itt már nem tud víz kipréselődni a növényből ezért az adhéziós komponens sem változik. Bár a növekvő terhelés hatására csökken a súrlódási tényező értéke (nedves anyagnál) a nagy felületi terhelés miatt a súrlódási erő nagyobb mint kisebb felületi terhelésnél. Ezért célszerű arra törekedni, hogy a felületi terhelés, azaz a normál erő, a lehető legkisebb legyen.

A fenti eredmények alapján a fű súrlódási tényezőjét w=65%-os nedvességtartalom mellett a felületi terhelés és a csúszási sebesség függvényében a 81. ábrán ábrázoltam. Látható, hogy a mérési pontokra egy felület illeszthető. A legkisebb súrlódási tényező 0,05 MPa terhelésnél és 5 m/s sebességnél van, míg a legnagyobb 0,005 MPa terhelésnél és 40 m/s sebességnél.



81. ábra: A súrlódási tényező a csúszási sebesség és a felületi terhelés függvényében

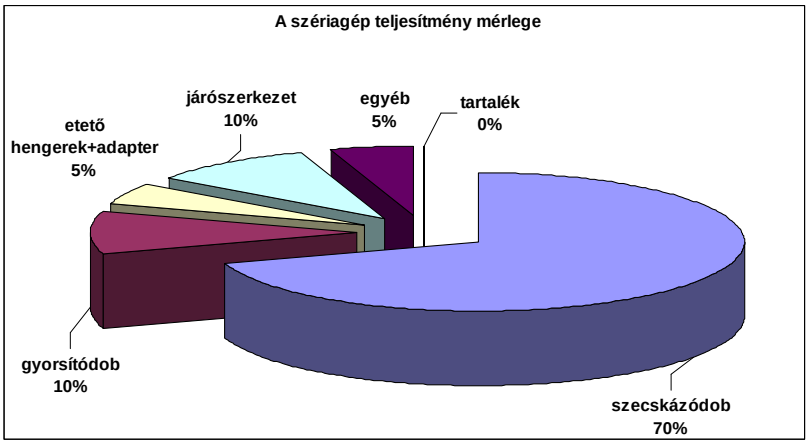
A nedvességtartalom jelentős mértékben módosítja a súrlódási tényezőt. A fű esetében a nedvességtartalom görbének ~45% nedvességnél van a maximum értéke. A magas nedvességtartalmú (>60%) fűnél a víz kenőanyagként csökkenti a súrlódási tényezőt. Ahogy csökken a nedvességtartalom az adhézió fokozódik, ezért nő a súrlódási ellenállás is. A nedvességtartalom további csökkenése következtében a víz adhéziós szerepe csökken és a súrlódási tényező is fokozatosan csökken. A silókukorica esetében is megfigyelhető az, hogy a nedvességtartalom csökkenése következtében nő a súrlódási tényező. A mérések alapján ~55% nedvességtartalomnál éri el a görbe a maximum értéket. Azután a súrlódási tényező kukorica esetén is csökken. Fű betakarításakor különöse ha szenázst készítünk a nedvességtartalomnak 50-55% között kell lennie. Ez kedvezőtlen a súrlódás szempontjából, mivel közel vagyunk a maximum ponthoz. Szilázs készítés esetén a nedvességtartalom 60% feletti. Itt a súrlódási tényező kisebb, ezáltal a súrlódási veszteség is alacsonyabb. Silókukoricát viaszérési állapotban szokták betakarítani, ilyenkor a nedvességtartalma 65-70% közötti. Ekkor a súrlódási tényező alacsony, ennek következtében a súrlódási veszteség is kisebb, mint alacsonyabb nedvességtartalomnál.

A szecskahossz változása az üzemszerű működési tartományon (3-20 mm) belül nem eredményezi a súrlódási tényező változását. A szecskahosszt mind fű mind kukorica esetén az szabja meg, hogy mire szeretnénk a szecskát felhasználni. A szecskahossz változása nem eredményez olyan változást, amely növelné a deformáció befolyásoló hatását, mivel ez makroszkopikus változás.

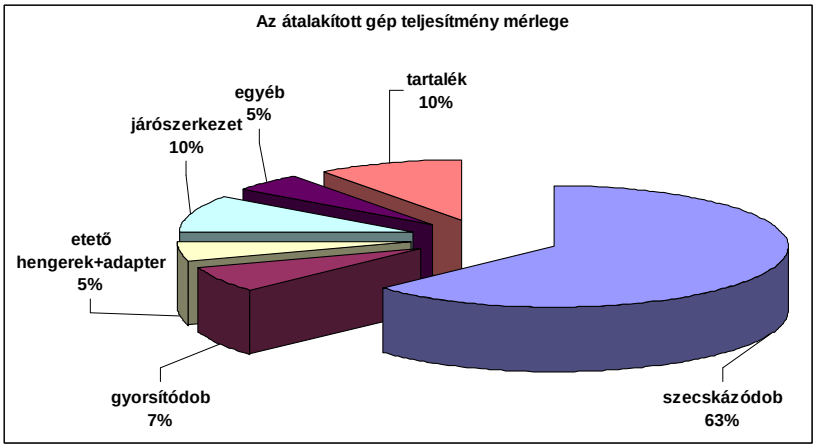
A felületi érdesség változása következtében módosul a súrlódási tényező. Kísérleteim során eltérő felületi érdességű tárcsákkal is végeztem méréseket. Az eredmények alapján egyértelműen látszik, hogy növekvő felületi érdesség-

nél a súrlódási tényező is nő. Ez abból adódik, hogy a súrlódás adhéziós és deformációs komponense közül az utóbbi változik. Hiszen nagyobb felületi érdességnél nagyobb a deformáció a növényben. A 400 t/h tömegáram mellett a szecska a csúszófelületeket folyamatosan koptatja. Emiatt sem és a mérési eredmények alapján sem indokolt a csúszófelület durvítása. A durva felület simára kopik, valamint jelentőse megnöveli a súrlódási ellenállást is.

Az eredmények alapján a műanyag csúszófelület alkalmazásával, különösen fű szecskázásakor, jelentős mértékben csökken a súrlódási tényező. A méréseim során UHMW polietilénnél közel 40%-kal kisebb volt a súrlódási tényező mint az acélnál. Ez a kedvező tribológiai tulajdonság a kisebb adhéziónak köszönhető. Ez a kedvező siklási tulajdonság sajnos kedvezőtlen kopási tulajdonsággal párosul. A szántóföldi kopásvizsgálatoknál megmutatkozott, hogy az üveggömbökkel adalékolt polietilén (Metalen 1) rendelkezik a legjobb kopásállósággal. De még ez is elmarad az acél kopásállóságához. A poliamid siklási tulajdonsága hasonló jó, mint a polietiléné, ugyanakkor jóval rosszabbak a kopással szembeni ellenállása. A labormérések során egyértelműen igazolódott, hogy UHMW polietilén alkalmazásával a súrlódási veszteség csökkenthető. Egy szecskázógép acél csúszófelületeit kicseréltük Metalen p műanyagra. A szántóföldi mérések során egyértelműen mutatkozott az a különbség, hogy műanyag csúszófelület esetén kisebb a súrlódási veszteség. Ezáltal a szecskázás teljesítményigénye is kevesebb. A fű szecskázásakor 10 %-kal volt kevesebb a fajlagos energiafelhasználás a műanyaggal felszerelt gépnek.



szériagép teljesítmény mérlege (tartalék 0%)



átalakított gép teljesítmény mérlege (tartalék 10%)

Üzemanyag megtakarításban ez akár 10 litert(!) is jelenthet. A kedvező siklási tulajdonság mellet további előny, hogy a felületére csak nehezen tapad a fű. Így az gép eltömődésének veszélye kisebb. Összességében a UHMW PE egy új lehetőséget nyújt arra, hogy a súrlódási veszteség mérsékeljük a szecskázás során. A pillanatnyi kedvezőtlen kopás tulajdonságai a jövőben adalék anyagok hozzáadásával és térhálósítással tovább fokozható.

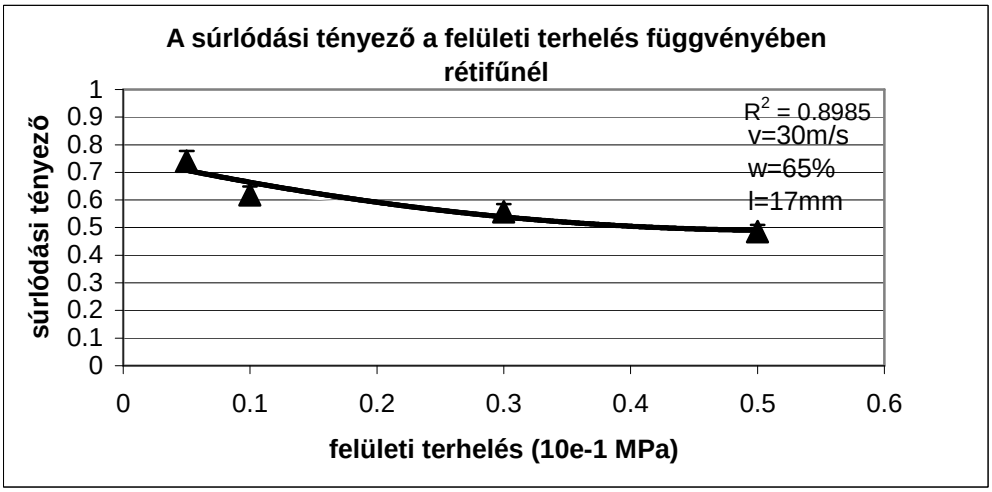
A CFD-DEM kapcsolt szimuláció elvégzésével láthatjuk, hogy a szecska miként mozog a gépen belül. Ugyanakkor azt is látjuk, hogy az áramló levegő, különösen a gyorsítódob után lévő szűkítőnél, némiképpen kompenzálja a súrlódás miatt keletkező sebességveszteséget. Ugyanis a gyorsuló levegő magával ragadja a szecskát és nem engedi, hogy a falsúrlódás miatt az jelentősen veszítsen a kinetikus energiájából.

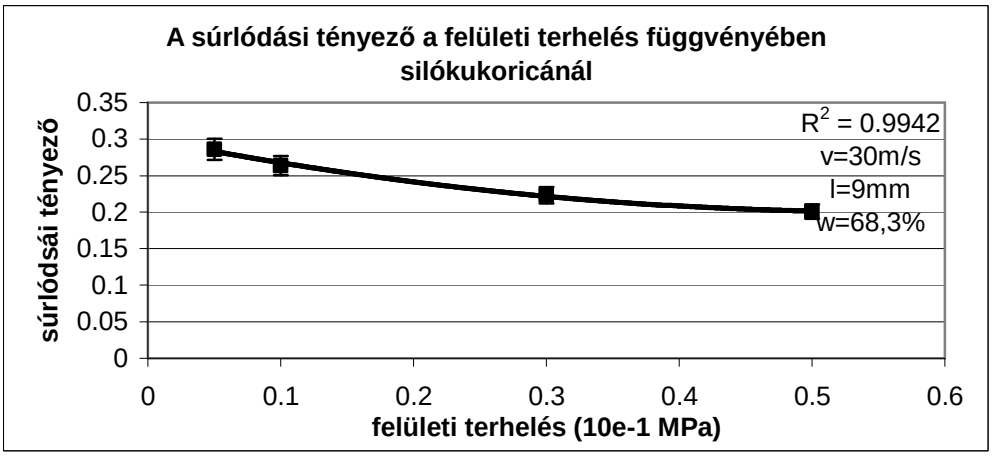
Hasonló számítások elvégzésével, valamint a görbületek geometriai optimalizálásával tovább mérsékelhető a súrlódási veszteség. A kifúvótorony geometriai optimalizálásával csökkent a súrlódás okozta veszteség ezáltal a szecska nagyobb sebességgel hagyja el a gépet. Ilyen optimalizálás minden egyes egységnél elvégezhető.

4.7. Új tudományos eredmények

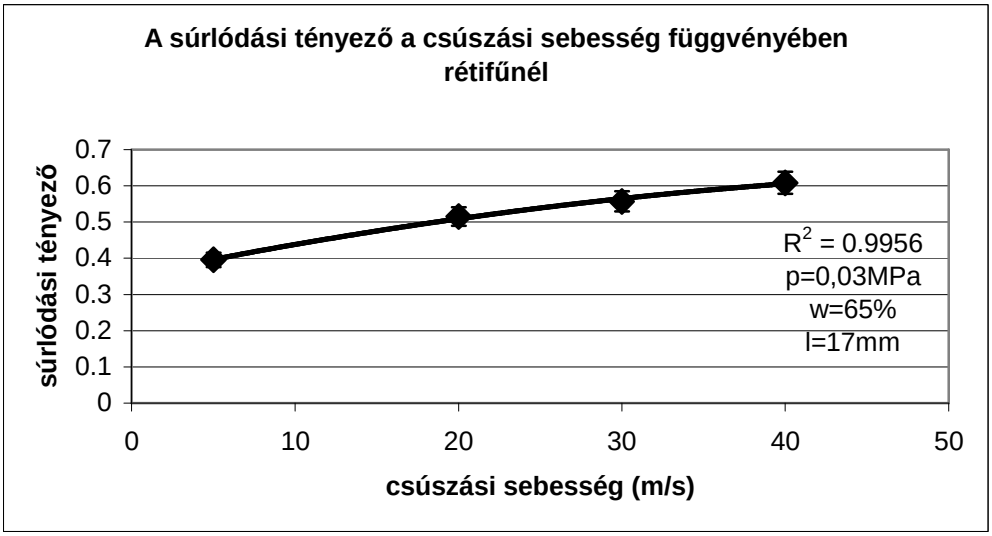
1. Megállapítottam, hogy a járvaszecskázókgép belső munkafolyamatainak energiaigényét az aprításon túl, jelentős részben a fémfelületek által irányított növényi anyagtranszport súrlódási veszteségei határozzák meg. Ezért a súrlódási tényező megállapítására vizsgálatokat végeztem az általam tervezett és kivitelezett mérőberendezéssel és szántóföldi mérésekkel (500 mm átmérőjű különböző anyagú tárcsákkal, szecskázott rétifűvel, valamint silókukoricával. A csúszási sebesség 5-40 m/s, a felületi terhelés 0,005-0,05 MPa között változott).

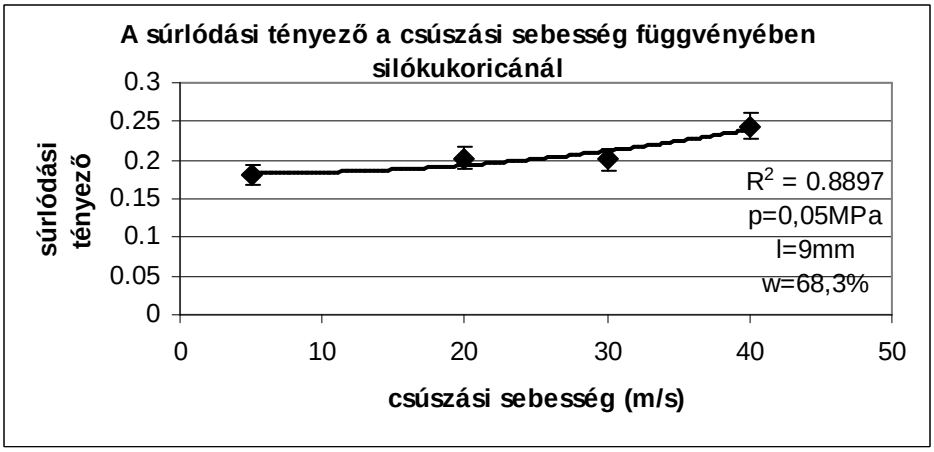
2. Igazoltam, hogy 50-70% közötti nedvességtartalom (w) tartományban 17 mm-es átlagos szecskahosszúságnál a rétifű súrlódási tényezője acél felületen a felületi terhelés növelésével (0,005-0,05 MPa) ~20%-kal, a 9 mm-es szecskahosszúságú silókukorica-szecska súrlódási tényezője pedig a felületi terhelés növelésével ~30%-kal csökkenthető. Nagyobb tömegáram esetén számottevő a fajlagos energiaigény csökkenés.





3. Bizonyítottam, hogy az 50-70% közötti nedvességtartalom (w) tartományban az átlagosan 17 mm szecskahosszúságú rétifű súrlódási tényezője acél felületen a csúszási sebességgel monoton növekszik. Ez 5 m/s-ról 40 m/s-ra történő sebességnövekedés esetén már ~50%. Ugyanez a jelenség megfigyelhető a 9 mm átlagos szecskahosszúságú silókukorica-szecska esetében is. Azonban a növekedés mértéke ugyanebben a tartományban kisebb, 30%. Mindezek alapján energia megtakarítás szempontból javasolható a gépen belüli zöldtakarmány áramlás sebességének csökkentése, pl. az átömlő keresztmetszetek növelésével.





4. A szecskázott rétifű súrlódási tényezőjének acél felületen nedves bázison mért változása a nedvességtartalom (w) függvényében közelíthető a

$$\mu(w)=-0{,}004w^2+0{,}0324w+0{,}0217$$

alakú másodfokú polinommal. A görbének 30 m/s, 0,03 MPa esetén 45%-os nedvességtartalomnál maximuma van. Áramlás energetikai szempontból csak a 45% feletti betakarítási nedvességtartalom tekinthető kedvezőnek.

5. Megállapítottam, hogy a járvaszecskázók üzemszerű működési tartományában 4-19 mm közötti átlagos szecskahosszúság változása nem eredményezi súrlódási tényező változását (0,005 MPa, 30 m/s, 70% esetén). Így a súrlódási méréseim és tapasztalataim ebben az értelemben is kiterjeszthetők.

6. Igazoltam, hogy fű és PE-UHMW műanyag anyagpárosításnál kisebb a súrlódási tényező, mint fű és acél anyagpárosításnál. A 45%-os nedvességtartalomnál (0,03 MPa, 30 m/s, 17 mm) ~40%-kal kisebb a súrlódási tényező PE-UHMW-nál, összehasonlítva az acéllal.
A szántóföldi méréseknél ez ~10%-kal kisebb fajlagos energiafelhasználást mutatott. A kisebb súrlódási tényező miatt a szecskázódob és gyorsítódob teljesítményfelvétele kevesebb, valamint a szecska is kevésbé fékeződött le.
Silókukorica és PE-UHMW, valamint silókukorica acél anyagpárosításnál nem volt mérhető a különbség.

7. Modelleztem a szecskázógépen belüli szecska és levegő kétfázisú áramlását CFD+DEM kapcsolt számítással. Az Eulerian kétfázisú áramlás szimulációval bizonyítottam, hogy a gyorsítódob utáni szűkítőben a szecska miközben azon keresztül halad csak ~5% veszít áramlási sebességéből. A falsúrlódás miatt fellépő jelentős fékező erőt a folyamatosan gyorsulva áramló levegő nagy mértékben kompenzálja.

5. Következtetések és javaslatok

A korszerű szecskázógépek áteresztőképességének növelése miatt az anyag szállításából keletkező veszteségek jelentősek. A felaprított anyagot először fel kell gyorsítani közel 60 m/s-os sebességre, ami önmagában is egy jelentős energia befektetés. Azonban e kinetikus energia jelentős része a súrlódás miatt elveszik, és átalakul hővé.

A kutatómunkám során végzett mérések alapján a szecskázott anyagok súrlódási tényezője a csúszási sebesség növekedése következtébe nő. Ezért is és az előbbiekben említett okok miatt, ha nem muszáj, ne gyorsítsuk fel az anyagot feleslegesen. Csak annyira gyorsítsuk fel a szecskát, ami még nem veszélyezteti a biztonságos anyagtovábbítást.

A súrlódás során a csúszófelület jelentős abrazív koptató hatásnak van kitéve. Mérések során láthattuk, hogy míg szilárd-szilárd test súrlódásakor általában a felületi érdesség növelése kedvez a súrlódási tényező alakulásának ez szecskázott zöldtakarmányok esetében nem így van. Ott a finomabb felületi érdességnél volt a súrlódási ellenállás a legkisebb. Ezért törekedni kell a minél simább csúszófelület kialakítására, amit a szecska és az azon lévő por, homok segít is kialakítani.

A szecskázás betakarításának idejét általában azt határozza meg, hogy mire szeretnénk a későbbiek az aprítékot felhasználni. Szecskázott anyagok súrlódási tényezőjét jelentősen befolyásolja a nedvességtartalom nagysága, ezért ha a betakarítási technológia megengedi célszerű a maximumpontot elkerülni.

Mérési eredményeim alapján egyértelműen kijelenhető, hogy UHMW polietilén csúszófelület alkalmazásával a súrlódási veszteség jelentősen csökkenthető fű betakarításakor. A műanyag további előnye, hogy a felületére nehezen tud megtapadni más szilárd anyag, így a fű aprítása esetén mindig tiszta sima felületen csúszik az apríték, és annak mozgását nem gátolják a letapadások.

Kutatómunkám során rávilágítottam arra, hogy ezeknél a gépeknél, különösen nagy áteresztőképesség mellett nem szabad figyelmen kívül hagyni a súrlódási veszteség nagyságát. A súrlódási veszteség a fentebb említett javaslatokat figyelembe véve mérsékelhető. A görbületek optimalizálásával, mint pl: a kifúvótorony esetében, a veszteségek tovább mérsékelhetők. Így a szecskázógép üzemanyag felhasználása csökkenthető, valamint a gép hatásfoka javítható.

6. Összefoglalás

Zöldtakarmányok aprításos betakarítása nagy energia befektetéssel jár. A gépek szecskázó egységre jutó motorteljesítményének egy jelentős része az anyag felaprítására, másik része az anyag szállítására fordítódik. Az anyagot szállítás során a súrlódás fékezi, és ez jelentős veszteség. Abban az esetben, ha a súrlódási veszteséget minimalizáljuk kevesebb energiafelhasználással végezhetjük a szecskázást, és a gépek üzemanyag felhasználása is jelentősen mérséklődne.

Doktori kutatásom során azt vizsgáltam, hogy hogyan lehet mérsékelni a súrlódási veszteséget. A súrlódási ellenállás két komponensből tevődik össze. Az egyik az az erő, amely az anyagot a csúszófelülethez szorítja. A másik a súrlódási tényező, a mely a szecska és a csúszófelület között alakul ki. A normálerő nagyságát az egyes geometriák görbületének optimalizálásával mérsékelni lehet. A disszertációmban elvégeztem a kifúvótorony geometriai optimalizálását. Ennek eredménye, hogy az új alaknál a súrlódási veszteség ~10%-kal csökkent. Ilyen optimalizálás a gép többi részénél is elvégezhető a geometriai korlátok figyelembevétele mellett. Ehhez a részhez kapcsolódik még a gépen belüli anyagáram szimulációja, mely segítségével betekintést kapunk a szecska és a levegő áramlási viszonyairól. Az általam készített kapcsolt DEM-CFD szimulációval nyomon követhető a szecska sebességének alakulása, illetve a levegő áramlása is.

A súrlódási tényező meghatározása bonyolultabb feladat, mivel több paramétertől is függ. Kifejlesztettem egy mérőberendezést, melynek segítségével aprított növények és adott anyagú csúszófelület között meg tudom mérni a súrlódási tényező nagyságát. A mérőberendezés alkalmas arra, hogy széles intervallumban változtatható csúszási sebesség, illetve változtatható terhelés mellett végezzük méréseket. Bármely anyagú csúszófelülettel tudunk méréseket végezni.

A méréseim során arra kerestem a választ, hogy a csúszási sebesség, a felületi terhelés, a nedvességtartalom, a felületi érdesség és a szecskahossz nagysága valamint az eltérő anyagú csúszófelület miként befolyásolják a súrlódási tényező nagyságát. A méréseket aprított fűvel és silókukoricával végeztem el. A mérések alapján egyértelműen kiadódott, hogy míg a fű viszonylag magas 0,7-0,8-as súrlódási tényezővel rendelkezik addig a silókukorica csak 0,2-0,3-as súrlódási tényezővel. Ez azt jelenti, hogy kukorica aprításakor kisebb a súrlódási veszteség és a szecska nagyobb sebességgel áramlik a gépen belül. A mérések, mint azt már említettem a beállítási paraméterek befolyásoló hatására is kiterjedtek. Ezek alapján megállapítottam, hogy a felületi terhelés növekedése következtében a súrlódási tényező csökken. A csúszási sebesség növekedése következtében a súrlódási tényező is növekszik. Ezek a tendenciák mind a fűnél

mint a silókukoricánál érvényesek. A nedvesség tartalomnak szintén jelentős a befolyásoló hatása. Fűvel végzett mérések során kiadódott, hogy a súrlódási tényező változása másodfokú jellegű és 40-50% közötti nedvességtartalomnál éri el a maximumot. Silókukoricával 53%-os nedvességtartalomig végeztem mérést és a tendencia az, hogy a nedvesség tartalom csökkenése következtébe a súrlódási tényező nagysága növekszik. A szecskahossz változási üzemi tartományon belül nem eredményezett mérhető súrlódási tényező változást. A csúszófelület felületi érdességének nagysága alapján az érdesebb felületnél magasabb súrlódási tényezőt mértem. Az eltérő anyagú csúszófelületekkel végzett mérések során egyértelműen látható, hogy poliamid és polietilén műanyagok esetén különösen a fűvel végzett mérések során a súrlódási tényező alacsonyabb, mint az acélnál. A labormérések által kapott eredmények alapján különös tekintettel az UHMW polietilén kedvezőbb siklási tulajdonságait igazolva szántóföldi méréseket is végeztünk. A szántóföldi mérésnél teljesen kibéleltem egy szecskázógépet a Metalen 1 nevű polimerrel. Fű szecskázása esetén 10-15%-os teljesítmény megtakarítást mértem, amit a labormérések is alátámasztanak. Silókukorica aprításakor, mint az várható volt nem tudtunk jelentős különbséget mérni acél és műanyag csúszófelület között. A szántóföldi vizsgálatok során a műanyag csúszófelület további előnye is megmutatkozott nevezetesen, hogy a fű nehezen vagy egyáltalán nem képes a felületre tapadni. Ez nagyon fontos, mert acél felületen hajlamos a letapadásra, mely rövid idő elteltével a gép eltömődéséhez vezet.

Kutatómunkám során feltérképeztem a szecskázott zöldtakarmányok súrlódási tényezőjének alakulását a gép üzemi tartományon belüli paraméter változások figyelembevétele mellett. Emellett elkezdtem a gépen belüli áramlások elemzését és optimalizálását is, mely fejezet lezárásához további kutatások szükségesek.

7. Summary

Harvesting and comminuting green forage needs great energy investments. A significant portion of the forage harvester's engine's power per unit is devoted to comminuting the material and the rest of the power is used for transporting it. The friction of the product while transporting is a significant loss of energy. If we minimize this friction loss, we can harvest using less energy and the fuel-consumption of the machines would also decrease.

In my PhD research I examined the possibilities of reducing the friction loss. The frictional resistance has two components. One is the force which presses the product to the surface. The other frictional factor is the one between the chopper and the surface. The volume of the normal force may be reduced by optimizing the curvature of the different geometries. In my dissertation I optimized the geometry of the outlet spout. As a result the frictional loss was reduced by 10%. Such optimization can be done on other parts of the machine while the geometrical limitations are taken into account. The simulation of the product stream within the machine relates to this section which gives us a better understanding of the chopper's air-flow conditions. I created a DEM-CFD simulation which follows the chopper's speed and the air-flow as well.

To determine the friction coefficient is a more difficult task as it depends on multiple parameters. I developed a meter which can measure the friction coefficient between the chopped plants and certain types of surfaces. The meter is adjustable for measurements with different slide speeds and different load volumes. We can take measurements with surfaces made out of any kind of material.

During my measurements I tried to figure out how the relative slide speed, the surface load, the moisture content, the roughness of the surface and the cut length influence the friction coefficient. I used maize and chopped grass during my measurements. After the data was collected I could clearly see that while the grass has a relatively high (0.7-0.8) friction coefficient, the maize's is only 0.2-0.3. This means that when we are chopping maize the frictional loss is less and the chaff flows inside the machine at a higher speed. As I have mentioned before, the setting parameters' influence were all take into account while measuring. Based on these I could determine that increasing the surface load will reduce the friction coefficient. When the slide speed is increasing, the friction coefficient is also increasing. These tendencies are both relevant for chopping grass and maize. The moisture content is also significantly influential. When testing with grass it was seen that the alteration of the friction coefficient draws a parabola which peaks at 40-50% moisture content. With maize I tested up to 53% moisture content and I saw that as the moisture content decreased the friction coefficient increased. Any change in the cut length within the operating

range did not bring any significant friction coefficient change. According to the surface roughness, the rougher surface brought higher friction coefficient. Using surfaces made out of different materials during the testing showed clearly that polyamide and polyethylene plastics – especially when testing with grass – had lower friction coefficients than when using steel. Based on the laboratory test results we carried out field tests also, proving the better sliding attribution of UHMW polyethylene in particular. During the field testing I lined the inside of the forage harvester with Metalen p polymer completely. I measured a 10-15% savings when cutting grass which was confirmed by laboratory tests as well. As expected, we could not measure a significant difference between using steel or plastic surfaces when we were cutting maize. During the field tests another advantage of using plastic surfaces was discovered, namely that grass can hardly stick to the surface or cannot stick to it at all. This is really important as it sticks very well to a steel surface what leads to the jamming of the machine.

In my research I charted the conformation of the friction coefficients of the cut green forage while I took the machine's parameter changes into account within operating range. Besides this, I have started to analyze and optimize the flows inside the machine, but further research and testing is required.

8. Mellékletek

M1 melléklet: Irodalomjegyzék

1 Adorján Jné (1976): Szecskázott zöldtakarmányok anyagmozgatási paramétereinek vizsgálata. Gödöllő Doktori értekezés p 124-135

2 Anonym (1980): Friction coeffitient of chopped forage. ASAE-Yearbook p 579

3 Bagi K. (2007): A diszkrét elemek módszere. Budapest: BME jegyzet p 12-28

4 Bickert, W.G. u. F.H. Buelow (1966): Kinetic friction of grains on surfaces. ASAE p 231-232

5 Bowden F.P. Tabor D. (1964): The Friction and Lubrication of Solid. Oxford University Press. p 23-30

6 Brubaker (1965): Determinning the static coefficient of friction of grains on structural surface. ASAE p 53-55

7 C.t Hart, A.h.Bosma, M.G.Telle (1979): Physical properties of ensiled grass and corn, silo capacities and silage pressures in cylindrical tower silo. IMAG S 6. p 121-125

8 Ducho, Lobotka (1967):Reibungskoeffizient der Luzerne und des Maises in der Wachs-Milchreife bei Bewegung. Acta technologia agriculturae p 91-105

9 FVMMGI (1975): Jelentés a DUNA I., HESSTON 4000 és E-280 magajáró szecskázógépek energetikai összehasonlító vizsgálatáról. Gödöllő p 10-16

10 FVMMGI (1989): Jelentés: a motorteljesítmény növelésének hatása a

szecskázógépek áteresztőképességére. Gödöllő p 43

11 Garbers H., Frerichs L. (2001): Leistung- und Technologieentwiklung von selbstfahrenden Feldhäckslern. Landtechnik 2001/6 p 151

12 Haffert A. (2004): Der Schnittvorgang in einem selbstfahrenden Feldhäcksler. Braunschweig, Shaker Verlag p 16-17

13 Kalácska G. (2003): Mezőgépek - Mezőgépészeti tribológia. Jegyzet, második átdolgozott kiadás, Gödöllő, p 40-50

14 Kalácska G. (1997): Műszaki polimerek gépészeti alapjai. Sopron: Minerva-Sop Bt. pp 20

15 Kalácska G. (2007): Műszaki Polimerek és kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban. Gödöllő, pp14

16 Kampf (1958): Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Wurfgebläsen. Düsseldorf VDI-Verlag p 45-67

17 Kromer K. (1967): Untersuchungen am Trommelfeldhäcksler unter besonderer Berücksichtigung der Materialförderung in und nach Schneid-Wurf- Trommeln. p 127-130

18 Kromer K. (1993): Zerkleinerung von Mais in Trommelschneidwerken. Düsseldorf VDI-Verlag p 71

19 Kozma M. (2001): Tribológia. Műegyetem Kiadó p 43-62

20 Kragelszkij-M. (1987): Gépszerkezetek súrlódás és kopás számítása. Budapest Műszaki Könyvkiadó p 11-48

21 Kutzbach H. D., R. Scherer (1977): Das Reibverhalten von Körnerfrüchten - eine Schrifttumsübersicht. Landtechnik. 1977/6 p 214

22 Lecheler S. (2008): Numerische Strömungsberechnung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner p 42-43

23 Lobotka J. (1967): Reibungswerte der gehäckselten Futterpflanzenmasse (Orig. Tschech.) Zemědělska technika Nr. 2 p 81-93

24 Lorenzen, R.T.: (1959): Moisture effect on friction coeffitients of small grain. ASAE p 213

25 Mikecz I. (1985): Az állattenyésztés gépei. Budapest: Mezőgazda kiadó pp 45

26 Nagy J. (2003): Energiatakarékos szecskázó rendszerek fejlesztése. Gödöllő: PhD értekezés p 54

27 Philipp Behra J. (2005):Entwicklung und Konstruktion eines Häckselaggregates für selbstfahrenden Feldhäcksler. Harsewinkel: Diplomarbeit pp 23

28 Pusch und Below (1934) Bestimmung des Reibungskoeffizienten von Dreschprodukten. Moskau: Landwirtschaftliche Maschine p 35

29 Richter, D.W. (1954): Friction coefficient of some agricultural materials. Agric. Engng. 36 p 411

30 Röhrs W. (1988): Untersuchungen zum Schneid- und Fördervorgang in Trommelfeldhäckslern. Düsseldorf: VDI-Verlag 1988 pp 26

31 Schlichting H., Gersten K. (2006): Grenzschicht-Theorie. Berlin: Springer-Verlag pp 52

32 Sitkei Gy.(1981): A mezőgazdasági anyagok mechanikája. Budapest: Akadémiai Kiadó p 338-344

33 Szendrő P. (1995): Szálas zöldtakarmányok szecskázása. Budapest: Akadémiai Kiadó pp 10

34 Szendrő P. (1975): A járvaszecskázó gépekben lejátszódó silókukorica aprítási folyamat elemzése. Budapest: Akadémiai Kiadó pp 5

35 Szendrő P. (2000): Mezőgazdasági géptan. Budapest: Mezőgazda kiadó p 379-383

36 Valasek I., Szota Gy. (2002): A tribológia alapjai. (Tribológia 1) Budapest: Tribotechnik Kft. p 24-32

37 Valasek I. (1996): Tribológiai kézikönyv. Budapest: Tribotechnik Kft. pp 20

38 Wieneke F. (1956): Reibungswerte von Pflanzen und Faserstoffen. München: Landtechnische Forschung, p 146-149

39 Wilhelm Orth H. (1975): Ein Beitrag zur Analyse der Halmgutbewegung in einem Trommelhäcksler. Braunschweig Landbauforschung Völkenrode p 51-89

40 Yukisaburo Y. (1990): Tribology of plastic materials. Amsterdam: Tribology series 16, Elservier p 56-32

41 Zsidai L. (2005): Műszaki polimerek tribológiai kutatása különböző rendszerekben. Gödöllő: PhD értekezés pp 23

42 Claas Jaguar Produktberater (2006) pp 2

43 John Deere Feldhäcksler Produktkatalog (2006) pp10

44 Krone BIG X Produktkatalog (2006) pp 5

45 New Holland FX60 Produktkatalog (2006) pp 25

46 ANSYS CFX Guide

47 ANSYS Fluent Guide

48 EDEM Guide

M2 melléklet: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Lektorált cikk világnyelven:

Kajtár, **P.,** Szendrő, P., Haffert, A.: Reduction of Friction and Cutting Losses in Forage Harvesters. Hungarian Agricultural Engineering Gödöllő 2007/20 p 46-47.

Kajtár, **P.,** Haffert, A., Szendrő, P.: Messung des Reibbeiwertes von gehäckselten Materialien. Landtechnik Darmstadt 2009/1 p 33-35

Kajtár, **P.,** Haffert, A., Szendrő, P.: Measuring the coefficient of friction of chopped materials. Mechanical Engineering Letters 2009/Volume 2 p 255-259

Lektorált cikk magyar nyelven:

Kajtár P., Szendrő P.: Új lehetőségek az energiatakarékos terményaprításban. GÉP folyóirat LVII. Évfolyam, 2007/4 Budapest p 23-30.

Kajtár P., Szendrő P.: A járvaszecskázók belső veszteségeinek mérséklése. Mezőgazdasági technika Gödöllő 2009/12 p 2-3

M3 melléklet: A méréseknél alkalmazott műanyagok műszaki adatai

Technisches Datenblatt
metalan 75a

meta-technik kunststoff KG

Polyurethan-Elastomer (PUR)

Werkstoffdaten

Eigenschaften	Einheit	Prüfung nach	Eigenschaftswert	
Härte	Shore A Shore D	DIN 53505 DIN 53506	75 (+-5) -	
Dichte	g/cm_	DIN 53479	1,24	
Zugfestigkeit	N/mm_	DIN 53504	> 45	
Reißdehnung	%	DIN 53504	> 550	
Rückprall-Elastizität	%	DIN 53512	50	
Weiterreißwiderstand	N/mm	DIN 53515	> 40	
Abrieb	mm_	DIN 53516	< 20	
Druckverformungsrest	%	DIN 53517		
20%, 20°C, 72 h 20%, 70°C, 24 h			20 30	

metalan-Elastomere zeichnen sich durch hervorragende Abriebeigenschaften aus, die gezielt gesteuert werden können. Hier liegt unter anderem ein Vorteil gegenüber dem Werkstoff Gummi. Ferner weisen Polyurethane ein ausgezeichnetes Rückverformungsprofil auf, d.h. sie sind innerhalb bestimmter Grenzen reversibel verformbar und nehmen nach Entlastung wieder weitgehend ihre Ausgangsform an.
Ein hohes Dehnungsvermögen und elastisches Verhalten innerhalb eines großen Härtebereichs sind weitere charakteristische Eigenschaften.
Zudem stellt PUR durch einen großen Temperatureinsatzbereich von -40°C bis +70/80 °C kurzfristig +110°C die Konzeptlösung für viele Problemstellungen dar.

Geprüft bei Raumtemperatur und normaler rel. Luftfeuchte. Die angegebenen Werte stellen Richtwerte dar.

Hinweise für die Anwender:
Die in den Datenblättern genannten Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Durch die in den Datenblättern enthaltenen Informationen werden bestimmte Eigenschaften weder vereinbart noch zugesichert. Die Entscheidung über die Eignung eines Werkstoffes für einen konkreten Einsatzzweck obliegt dem jeweiligen Anwender. Änderungen der angegebenen Daten sind vorbehalten. Die Angaben lassen sich nicht ohne weiteres auf Fertigteile übertragen.

Technisches Datenblatt
metalen 1000 v

meta-technik® kunststoff KG

Kurzzeichen PE-UHMW (Ultrahochmolekulares Polyethylen)

Mechanische Eigenschaften	Dichte	DIN EN ISO 1183	g/cm_	0,94
	Streckspannung	DIN EN ISO 527	N/mm_	> 20
	Reißdehnung	DIN EN ISO 527	%	>350
	Elastizitätsmodul aus Biegeversuch	DIN EN ISO 178	MPa	750 bis 800
	Elastizitätsmodul aus Zugversuch	DIN EN ISO 178	MPa	750 bis 800
	Biegefestigkeit	DIN EN ISO 178	MPa	27
	Schlagzähigkeit 1) (Charpy)	DIN EN ISO 179	KJ/m_	kein Bruch
	Kerbschlagzähigkeit (Charpy)	ISO 11542-2	KJ/m_	kein Bruch
	Kugeldruckhärte 2)	DIN EN ISO 2039-1	MPa	40
	Zeitdehnung bei 1% Dehnung 3)	DIN 53444	MPa	-
	Gleitreibungszahl gegen Stahl bei Trockenlauf 4)		µ	0,29
	Gleitverschleiß 4)		µm/Km	0,45
Elektrische Eigenschaften	Dielektrizität	(DIN 53483)	bei 100 Hz	2,3 bis 3
	Diel. Verlustfaktor	(DIN 53483)		$2,5 \times 10^{-4}$
	Durchschlagfestigkeit	DIN IEC 60167	KV/mm	< 40
	Spez. Durchgangswiderstand	(DIN 53482)	Ω cm	$> 10^{16}$
	Oberflächenwiderstand	(DIN 53482)	Ω	$> 10^{13}$
	Kriechstromfestigkeit	(DIN 53480)	W	KA3c
Thermische Eigenschaften	Schmelztemperatur	DIN EN ISO 3146	°C	131-136
	Wärmeleitfähigkeit	DIN 52612	W / (k x m)	0,38 bis 0,42
	Spez. Wärmeleitfähigkeit		J / (k x m)	1,84
	Längenausdehnungskoeffizient 5)	DIN 53752	K^{-1}	18×10^{-5}
	Anwendungstemperatur kurzzeitig 6)		°C	90
	Anwendungstemperatur dauernd 6)		°C	-200 bis 80
	Feuchtigkeitsaufnahme bei Normklima 23 / 50		%	< 0,1
	Feuchtigkeitsaufnahme bei Wasserlagerung 20°C		%	< 0,1
	Brandverhalten nach UL 94			HB
	Tiefziehfähigkeit			nein
Chemische Eigenschaften	Benzin 100%		bei 20 °C	x
	Trichlorethylen 100%		bei 20 °C	/
	Tetrachlorkohlenstoff 100%		bei 20 °C	0
	Säuren		bei 20 °C	/
	Laugen		bei 20 °C	x
	Mineralische Schmieröle und Fette		bei 20 °C	x
	Lebensmittelrechtliche Zulassung			F/B

1) gemessen mit Pendelschlagwerk 0,1 DIN 51222
2) nach 7 sec bei 250 N Belastung
3) Spannung, die nach 1000 h zu 1% Gesamtdehnung führt
4) gegen Stahl gehärtet + geschliffen P=0,05 N/mm_, V=0,6m/sec, t=40°C in Laufflächennähe
5) Gültigkeitsbereich ca. 20°C bis 100°C
6) Erfahrungswerte an Fertigteilen bei geringer Belastung, abhängig von Art und Form der Wärmeeinwirkung, kurzzeitig (bis 1 Std.), dauernd (Monate)
Wärmeeinwirkung, kurzzeitig (bis 1 Std.), dauernd (Monate)

Zeichenerklärung	
x: bestätigt	F/B: beides
/: bedingt bestätigt	IP: In Prüfung
0: unbestätigt	K: keine Zulassung
eg: eingeschränkt	
F: FDA	7) Diffusion beachten
B: BGA	

Spezielle Eigenschaften
Vicat Erweichungspkt. 79°C DIN 53460 Verfahren B
hohe Abriebfestigkeit, gute Gleiteigenschaften,
extrem hohe Kerbschlagzähigkeit

Anwendungen
Gleitelemente u. techn. Teile mit hoher Abriebfestigkeit
für den Maschinen- und Apparatebau

Physiologische Eigenschaften

Entspricht den Regularien gemäß	
EU-Kunststoffrichtlinie 2002/72/EG	ja
FDA-Richtlinie 21 CFR177.1520	ja
FDA-Richtlinie 21 CFR178.2010	N/A
FDA-Richtlinie 21 CFR178.3297	ja

Hinweise für die Anwender:
Die in den Datenblättern genannten Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Durch die in den Datenblättern enthaltenen Informationen werden bestimmte Eigenschaften weder vereinbart noch zugesichert. Die Entscheidung über die Eignung eines Werkstoffes für einen konkreten Einsatzzweck obliegt dem jeweiligen Anwender. Änderungen der angegebenen Daten sind vorbehalten. Die Angaben lassen sich nicht ohne weiteres auf Fertigteile übertragen.

Technisches Datenblatt
metamid pafin

meta-technik® kunststoff KG

Kurzzeichen PA 6 G + Festschmierstoffe (Polyamid, gegossen)

Mechanische Eigenschaften	Dichte	DIN EN ISO 1183	g/cm_	1,11
	Streckspannung	DIN EN ISO 527	N/mm_	60 a) 40 b)
	Reißdehnung	DIN EN ISO 527	%	6 a) 15 b)
	Elastizitätsmodul aus Biegeversuch	DIN EN ISO 178	MPa	
	Elastizitätsmodul aus Zugversuch	DIN EN ISO 527	MPa	2750 a) 1350 b)
	Biegefestigkeit	DIN EN ISO 178	MPa	
	Schlagzähigkeit 1)(Charpy)	DIN EN ISO 179/1eU	KJ/m_	> 25
	Kerbschlagzähigkeit 1)(Charpy)	DIN EN ISO 179/1eA	KJ/m_	3
	Kugeldruckhärte 2)	DIN EN ISO 2039-1	MPa	120
	Zeitdehnung bei 1% Dehnung 3)	DIN 53444	MPa	
	Gleitreibungszahl gegen Stahl bei Trockenlauf 4)		µ	0,15
	Gleitverschleiß 4)		µm/Km	
Elektrische Eigenschaften	Dielektrizität	IEC 250		
	Diel. Verlustfaktor	IEC 250		
	Durchschlagfestigkeit	DIN EN 60093	KV/mm	
	Spez. Durchgangswiderstand	DIN IEC 93	Ω cm	> 10^{14} a) > 10^{12} b)
	Oberflächenwiderstand	DIN IEC 93	Ω	> 10^{13} a) > 10^{12} b)
	Kriechstromfestigkeit	(DIN 53480)	W	
Thermische Eigenschaften	Schmelztemperatur	DIN EN ISO 3146	°C	220
	Wärmeleitfähigkeit	DIN 52612	W / (k x m)	0,3
	Spez. Wärmeleitfähigkeit		J / (k x m)	
	Längenausdehnungskoeffizient 5)	DIN 53752	K^{-1}	8,5 x 10^{-5}
	Anwendungstemperatur kurzzeitig 6)		°C	160
	Anwendungstemperatur dauernd 6)		°C	-20 bis 105
	Feuchtigkeitsaufnahme bei Normklima 23 / 50		%	2
	Feuchtigkeitsaufnahme bei Wasserlagerung 20°C		%	6,3
	Brandverhalten nach UL 94			HB
	Tiefziehfähigkeit			nein
Chemische Eigenschaften	Benzin 100%			
	Trichlorethylen 100%		bei 20 °C	
	Tetrachlorkohlenstoff 100%		bei 20 °C	
	Säuren		bei 20 °C	
	Laugen		bei 20 °C	
	Mineralische Schmieröle und Fette		bei 20 °C	
	Lebensmittelrechtliche Zulassung			F/B

1) gemessen mit Pendelschlagwerk 0,1 DIN 51222
2) nach 7 sec bei 250 N Belastung
3) Spannung, die nach 1000 h zu 1% Gesamtdehnung führt
4) gegen Stahl gehärtet und geschliffen P=0,05 N/mm_, V=0,6m/sec, t=40°C in Laufflächennähe
5) Gültigkeitsbereich ca. 20°C bis 100°C
6) Erfahrungswerte an Fertigteilen bei geringer Belastung, abhängig von Art und Form der Wärmeeinwirkung, kurzzeitig (bis 1 Std.), dauernd (Monate)

Zeichenerklärung
x: bestätigt
/: bedingt bestätigt
0: unbestätigt
eg: eingeschränkt
F: FDA
B: BGA
a) trocken b) luftfeucht
F/B: beides
IP: In Prüfung
K: keine Zulassung
7) Diffusion beachten

Spezielle Eigenschaften
niedrigster Reibungskoeffizient
kein Ruck-Gleiten (Stick-Slip-Effekt)
Höchste Verschleißfestigkeit
hervorragende mechanische Festigkeit für höchste Belastung
gute Wärmebeständigkeit, gute Formbeständigkeit

Anwendungen
Anwendungen bei Teleskopkranauslegern,
da bei der Bewegung des Auslegers
praktisch keine Vibrationen auftreten.

Hinweise für die Anwender:
Die in den Datenblättern genannten Angaben entsprechen dem heutigen Stand unserer Kenntnisse. Durch die in den Datenblättern enthaltenen Informationen werden bestimmte Eigenschaften weder vereinbart noch zugesichert. Die Entscheidung über die Eignung eines Werkstoffes für einen konkreten Einsatzzweck obliegt dem jeweiligen Anwender. Änderungen der angegebenen Daten sind vorbehalten. Die Angaben lassen sich nicht ohne weiteres auf Fertigteile übertragen.

9. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Dr. Szendrő Péter munkáját, hogy témavezetőként segítette munkámat, irányította kutatásaimat és a disszertációm elkészítését.
Külön köszönet Dr. Andreas Haffertnak és Dr Ingo Bönignek, akik lehetővé tették, hogy kijussak Németországba és bekapcsolódjak a CLAAS fejlesztési munkálataiba. Ők társtéma vezetőként segítettek. Köszönöm a CLAAS előfejlesztési osztály munkatársainak a támogatását. Nekik köszönhetem, hogy a laboratóriumi mérőberendezésem elkészült, valamint azt is, hogy a szántóföldi mérésekhez szükséges átalakításokat a szecskázógépeken elvégezték.
Köszönöm a Mechanikai és Géptani Intézetnek, hogy befogadott és támogatott.
Továbbá köszönet a Gépészmérnöki Kar többi dolgozójának is, akik hasznos tanácsokkal, észrevételekkel segítettek, hogy kutatómunkám eredményes legyen.
Végezetül, de nem utolsó sorban köszönöm szüleimnek és barátaimnak, hogy mindvégig mellettem álltak és támogattak.