



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Mezőgazdasági ékszíjhajtások energiamérlegének
sajátosságai

Doktori (PhD) értekezés tézisei
Gárdonyi Péter

Gödöllő
2018

A doktori iskola

megnevezése:

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudományok

vezetője:

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

Témavezető:

Dr. Szabó István
egyetemi tanár, PhD
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Mechanikai és Géptani Intézet

Társ-témavezető:

Dr. Kátai László
egyetemi docens, PhD
SZIE, Gépészmérnöki Kar,
Mechanikai és Géptani Intézet

.....
a témavezető jóváhagyása

.....
az iskolavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	5
1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége.....	5
1.2. Célkitűzések.....	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	7
2.1. Ékszív hőmérséklet-emelkedés vizsgálatok.....	7
2.2. Az ékszív relatív mozgásának vizsgálata.....	7
3. EREDMÉNYEK.....	9
3.1. A teljesítményvesztés befolyásoló hajtásjellemzők.....	9
3.1.1. A hőmérséklet-emelkedés vizsgálat eredménye.....	9
3.1.2. Ékszívhajtás energiamérlege.....	10
3.2. Ékszív relatív mozgások.....	11
3.2.1. Az ékszív tárcsahoronyban történő sugárirányú mozgása.....	11
3.2.2. Az ékszív relatív mozgások tartományai.....	12
3.2.3. Az ékszív tárcsahoronyban történő érintőirányú mozgása.....	13
3.3. Geometriai gépbeállítási hiba.....	15
3.3.1. Megengedhető geometriai gépbeállítási hiba meghatározása	16
3.3.2. Ékszív relatív mozgások a beállítás hiba hatására.....	16
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	18
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	21
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	22
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK.....	23

JELÖLÉSJEGYZÉK

$F_1; F_2$	szíjägerő a feszes; laza ágban	[N]
F_H	előfeszítő erő	[N]
F_{HN}	adott beállításra meghatározott előfeszítés	[N]
$M_1; M_2$	hajtó és hajtott oldalon megjelenő forgatónyomaték	[Nm]
M_N	adott beállításra meghatározott forgatónyomaték	[Nm]
s_E	effektív csúszás	[%]
b	ékszíjprofil felső oldalának szélessége	[mm]
d	szíjtárcsa névleges mérete	[mm]
f	szíjhajtogatási frekvencia	[s ⁻¹]
i	geometriai áttétel	[-]
s	egész hajtásra nézett szíjcsúszás	[%]

Görög betűk:

β_G	geometriai átfogási szög	[°]
β_V	valós átfogási szög	[°]
$\omega_1; \omega_2$	hajtó és hajtott szíjtárcsa szögsebessége	[rad/s]
δ	átfogási viszonyszám	[-]
ξ	kapcsolódási szög	[°]
ψ	relatív szögeltérés	[°]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az első fejezetben a téma jelentőségét fogalmazom meg, illetve a munkám célkitűzéseit mutatom be.

1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége

A mezőgazdasági gépek az elmúlt évtizedekben jelentős változáson mentek keresztül. A mai korszerű mezőgazdaság feltételeinek megfelelően a gépek fejlesztésénél fő szempont a teljesítmény fokozás és a megbízhatóság mellett a gazdaságos üzemeltetés. A hatékonyság növelése érdekében nagy hangsúlyt fektetnek a gyártók a motorok fejlesztése mellett a munkavégző részegységek és a teljesítmény-átvitel elemeire is, amelyek a gépek összhatásfokának javítására irányulnak. A mezőgazdasági gyakorlatban a gépegységek energiaellátására elterjedten használnak rugalmas vonóelemes hajtásokat, ez ösztönözi a szíjhajtások területén történő kutatásaimat.

A hajtószíjak az elmúlt évtizedekben főként anyag- és gyártástechnológiai fejlődésen mentek keresztül, amely a szíj felépítésében egyfajta konstrukciós fejlődést is vont maga után. Az eltérő igényekhez különböző profilokat alakítottak ki a szíjgyártók. A mezőgazdasági gépeken a rugalmas hajtások közül az ékszíjhajtások terjedtek el leginkább. A szíjhajtás tervezése során gyártmánykatalógusokból választják ki a mérnökök az adott teljesítményhez és fordulatszámhoz szükséges szíjprofil és szíjtárcsa méreteket, figyelembe véve a beépítési helyigényt, áttételt, hajtás dinamikáját stb. A méretezéskor a gyártók által szolgáltatott tapasztalati, illetve meghatározott feltételek mellett elvégzett kísérletekből származó adatok állnak rendelkezésre, amelyek nem veszik figyelembe a környezeti hatásokat. Katalógus alapján megtervezett, mezőgazdasági gépekre jellemző szélsőséges körülmények között üzemelő szíjhajtások hatásfoka, illetve élettartama nem lesz megfelelő. Ilyen esetekben biztonságosan sok, az adott körülmények között lefolytatott saját vizsgálatok eredményeire támaszkodhatunk.

1.2. Célkitűzések

Kutatásom célja, hogy a szíjhajtások veszteségvizsgálatával olyan tényezőket, összefüggéseket határozzak meg, amelyek segíthetik a mezőgazdasági gépeken használt ékszíjhajtások tervezését és vélelmezhető hatásfokának optimalizálását. Kutatómunkám ennek érdekében két fő területre terjed ki: működési, valamint szerelési és gépbeállítási jellemzők vizsgálatára.

Ékszíjhajtás működési jellemzőivel kapcsolatos kutatáscélok:

- Az ékszíz hőfejlődése alapján meghatározni a nyomatékvesztéséget befolyásoló hajtásparmétereket, valamint felállítani az ékszíz melegedés matematikai modelljét.
- Az ékszíjhajtás veszteség összetevőinek feltérképezésével megalkotni a hajtás kvalitatív energiamérlegét.
- Új kísérleti módszer kidolgozása, ahol az ékszíz relatív mozgásának vizsgálata a hajtás üzemi fordulatszám mellett végezhető.
- A szakirodalomban található, relatív mozgásokkal kapcsolatos ellentmondások tisztázása az általam kifejlesztett kísérleti módszer segítségével.

Ékszíjhajtás szerelési és gépbeállítás jellemzőivel kapcsolatos kutatáscélok:

A mezőgazdasági gépek esetén gyakran nem teljesülnek a gyártók által előírt, szíjhajtásra vonatkozó geometriai beállításértékek. Ennek oka a mezőgépek felépítésében, illetve sajátos környezetben való üzemeltetésükben kereshető. Az elméletitől eltérő valós szíjfutás okozta hatások vizsgálata a mezőgazdasági gépek hajtástervezésében nyújthat segítséget. Kutatásom céljai között szerepel:

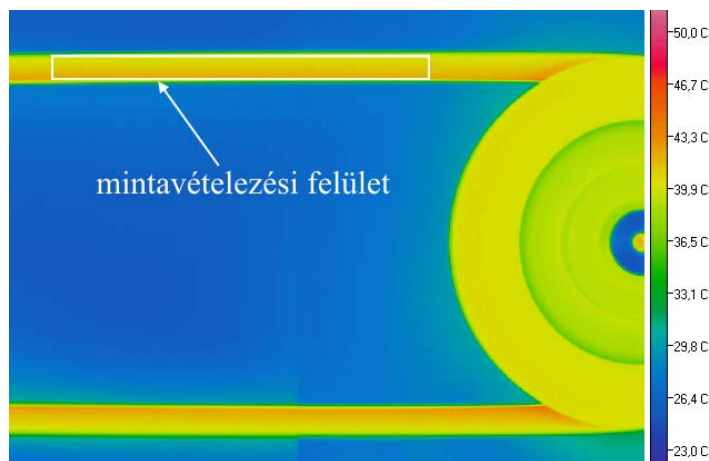
- A mezőgépeken alkalmazott ékszíjhajtások geometriai beállítás hiba határértékének empirikus meghatározása, ahol még teljesül a hajtás üzemszerű működése, hatásfok és élettartam csökkenése nélkül.
- Geometriai beállítás hiba hatásának vizsgálata az ékszíz relatív mozgásaira.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben bemutatom a kutatási céljaim megvalósításához használt kísérleti módszereket és eszközeit.

2.1. Ékszíz hőmérséklet-emelkedés vizsgálatok

A kísérleteim során a vizsgálati paraméter az ékszíz hőmérséklet-emelkedése, amely a két egyensúlyi állapot között – műhely- és üzemi hőmérséklet állandósult állapota között – a kerületi erőn megjelenő teljesítményvesztéset jelenti. Az ékszíz hőmérsékletvizsgálatokhoz NEC H2640 típusú infrakamerát használtam. A hőkamerás felvételeket az ékszíz aktív oldaláról, 0,25 Hz frekvenciával készítettem, ezáltal megfigyelhettem a melegedés folyamatát. Az ékszíz aktív felületéről készült hőkamerás felvételből Image Processor Pro II kiértékelő szoftver segítségével nyertem hőmérsékleti adatokat (1. ábra).



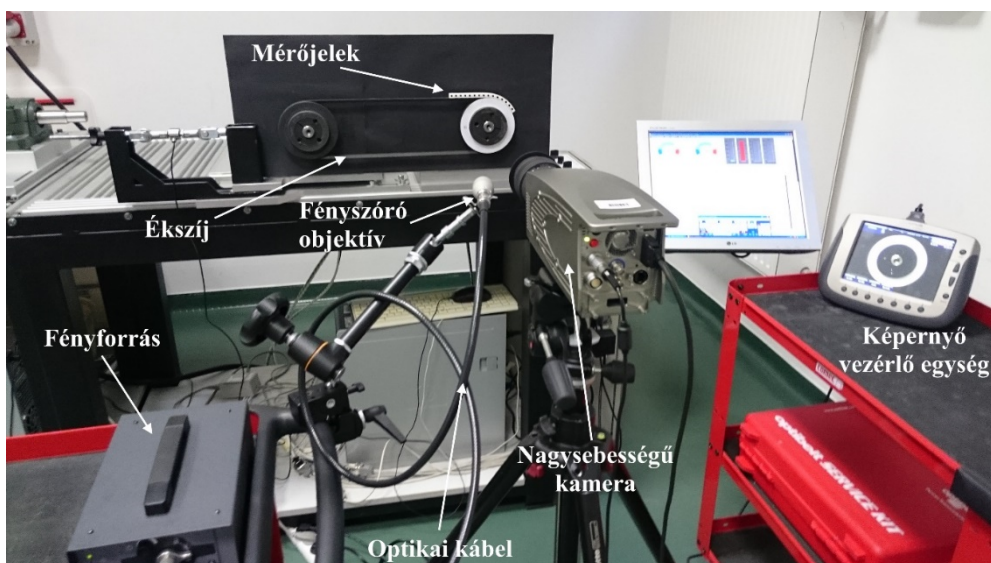
1. ábra Az infrakamerás felvétel a mintavételezési felülettel

2.2. Az ékszíz relatív mozgásának vizsgálata

Az ékszíjhajtás teljesítmény-átvitele során jelentkező mozgásvesztések eredménye a hajtott tengely elméletinél kisebb szögsebessége. Az egész rendszerre nézett csúszás értéke a hajtás be- és kimenő fordulatszámából közvetlenül megállapítható, viszont a veszteség kialakulására nem kapunk magyarázatot. A relatív mozgások megfigyelését üzemi fordulatszámon nagymértékben megnehezíti a folyamat gyors lezajlása. 1000 min^{-1} fordulatonál és 180° átfogási szög esetén az ékszíz egy pontja 30 ms ideig tartózkodik a szíjtárcsán. A gyors folyamatok lassított megfigyelésére alkalmas ún. nagysebességű kamera segítségével elemezhetők ezek a rövid idő alatt lejátszódó folyamatok. A nagy sebesség a képkockák egymás utáni nagy sebességű rögzítését, azaz a másodpercenkénti felvételszám magas értékét jelenti. A hagyományos képrögzítés során a felvett képek száma

2. Anyag és módszer

másodpercenként 25 - 30 db. A vizsgálati módszer kidolgozása során saját tervezésű és kivitelezésű tesztberendezést és Olympus i-SPEED TR típusú kamerát használtam (2. ábra).



2. ábra Relatív mozgás vizsgálatok kísérleti elrendezése

A relatív mozgások megfigyelésére a hajtás elemeit (ékszíjtárcsát, ékszíjat) jellel láttam el, amelyek mozgáspályája leírja a gépelemek mozgását. A megfelelő mérőjel létrehozását számos kísérlet után optimáltam. A mérőpontok által leírt mozgáspályát a kamerához tartozó, i-SPEED Control Pro képfeldolgozó szoftver segítségével határoztam meg. Az ékszízíjtárcsához viszonyított mozgását két komponensre – sugár- és érintőirányú összetevőre – bontva vizsgáltam a szíjtárcsa átfogása mentén. A kísérletek során meghatározott relatív mozgások az ékszízíj felső oldalának mozgását írják le a szíjtárcsa hornyában a hajtás üzemi fordulatszámán.

3. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetében bemutatom a kutatómunkám során elért új tudományos eredményeket, amelyek a mezőgazdasági gyakorlatban használt ékszíjhajtások működésének megértésében és hatásfok optimalálásában nyújtanak segítséget.

3.1. A teljesítményvesztéséget befolyásoló hajtásjellemzők

Az ékszíjhajtások tervezésénél a hajtott gépegység teljesítményigényét, geometriai és kinematikai paramétereit veszik alapul a mérnökök, amelyet a hajtással megváltoztatva az erőforrás hajtásjellemzőihez igazítanak. A teljesítmény-átvitel több szíjhajtás konstrukcióval is megoldható, így a tervezőre hárul az a feladat, hogy különböző szempontokat figyelembe véve határozza meg az optimálisnak tekinthető hajtáskialakítást. Teoretikus hajtáselrendezés esetén az ékszíjhajtások teljesítményvesztését befolyásoló hajtásjellemzők vizsgálata segítséget ad az optimális ékszíjhajtás tervezésében.

3.1.1. A hőmérséklet-emelkedés vizsgálat eredménye

Az ékszíz hőmérsékletének emelkedése, azaz a kiindulási és a telítődési hőmérséklet különbség segítségével meghatároztam a nyomatékvesztéséget befolyásoló faktorokat a hajtásparaméterek körében. Az ékszíz hőmérséklet-emelkedés leírásához a hajtásjellemzők ismert függvényeivel létrehoztam a regressziós modellt:

$$\Delta T = a_0 + \frac{a_1}{d} + a_2 \cdot f + a_3 \cdot M + a_4 \cdot F_H, \quad (1)$$

ahol a a_0 [°C]; a_1 [°C · mm]; a_2 [°C/Hz]; a_3 [°C/Nm]; a_4 [°C/N] a függvény konstansok.

1. táblázat A ΔT varianciatáblázata

	Négyzetösszeg	Szabadságfok	közepes négyzet	F/T-érték	p
Modell	3574,22	37	1158,16	394,75	<0,001
$1/d$	3152,84	4	788,21	29,824	<0,001
f	211,43	1	211,43	8,489	<0,001
M	129,39	2	64,67	6,228	<0,001
F_H	2,43	2	1,22	-0,423	0,675
maradék	99,75	34	3,99		

3. Eredmények

A 1. táblázat alapján látható, hogy a modell F értéke szignifikáns, tehát modellünk érvényes. Az előfeszítő erőn kívül mindegyik független változó együttthatója szignifikánsan különbözik 0-tól. A vizsgált faktorokkal a modell illeszkedésének jósága, azaz hogy a modell az összes variancia hányadrészét magyarázza meg, $R^2 = 0,970$ értékre adódott. A magas korreláció miatt nem számolok a faktorok keresztthatásaival. A 2. táblázatban az egyes paraméterek kapcsolatát vizsgálom a regressziós modellben, ahol a standardizált regressziós koefficiens lehetővé teszi a faktorok korrekt összehasonlíthatóságát. A Beta érték megmutatja, hogy a független változó mekkora hatást gyakorol a függő változóra.

2. táblázat A paraméterek korrelációja a regressziós modellben

Modell	együttható	Standardizált regressziós koefficiens Beta	t	p
konstans	-17,100		-14,973	<0,001
$1/d$	2317,476	0,888	29,824	<0,001
f	0,472	0,243	8,489	<0,001
M	4,430	0,185	6,228	<0,001

A 2. táblázat alapján az együttthatók konkrét értékeit beírva, a modell Z/10 szíjprofil esetén:

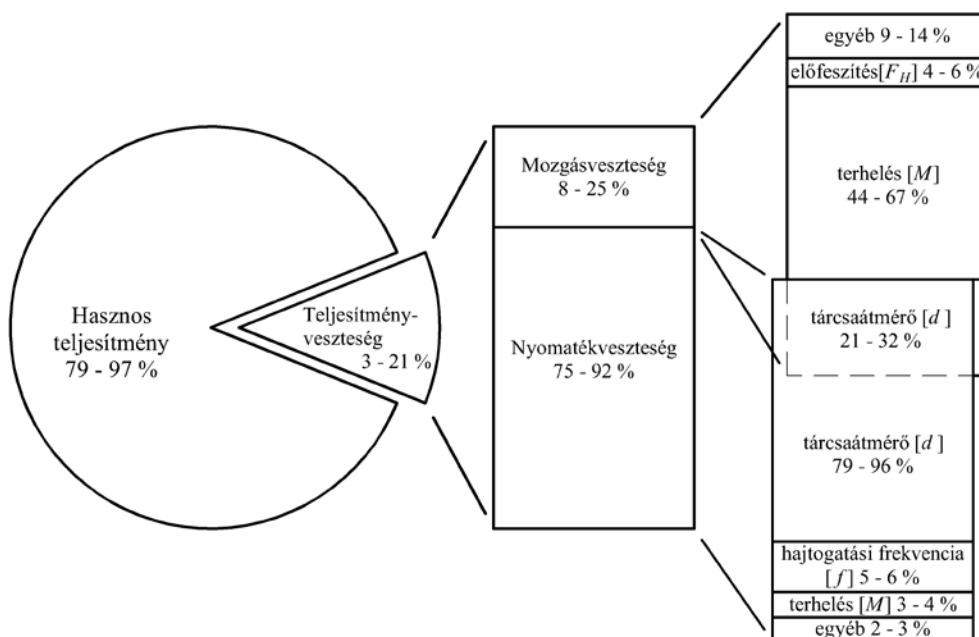
$$\Delta T = -17,1 + \frac{2317,476}{d} + 0,472 \cdot f + 4,430 \cdot M. \quad (2)$$

3.1.2. Ékszíjhajtás energiamérlege

A mérések során a kísérleti beállítások teljesítmény-átvitele 450 és 1660 W között változott, ahol a teljesítményveszteség (20-153 W) is beállítástól függő érték. A vizsgált két veszteség összetevő felbontását varianciaanalízis segítségével, a független változók varianciája alapján becsülöm meg (3. ábra).

A vizsgált ékszíjhajtások bevezetett teljesítményének 3-21%-a veszteség. A teljesítményveszteség nagyobb részét, 75-92%-át a nyomatékveszteség, a megmaradt részt a mozgásveszteség teszi ki. A nyomatékveszteség meghatározóan az ékszíz hajtogatásából (belső súrlódásból) származik, amelyet a szíz hajtogatásának sugara, illetve annak gyakorisága határoz meg. Az erőzáró hajtás érintkező felületeinek súrlódási vesztesége összetett módon jelentkezik. Egyrészt az ékszíz felületi rétegének ismétlődő deformációjából, amely nyomatékveszteségként realizálódik, illetve a szíjelem relatív elmozdulásából tevődik össze. A mozgásveszteséget a kapcsolódó felületek súrlódási viszonya befolyásolja, amelyet az átadott kerületi erő nagysága, illetve változása (átfogási ívhossz menti alakváltozás lefolyása) és az ékszíz előfeszítése határoz meg.

3. Eredmények



3. ábra Ékszíjhajtás kvalitatív energiamérlege
 ($Z/10$ profil; $d = 60 - 180$ mm; $i = 1$; $f = 10 - 20$ s⁻¹;
 $M_1 = 3 - 18,3$ Nm; $F_H = 50 - 300$ N; $a = 345 \pm 10$ mm)

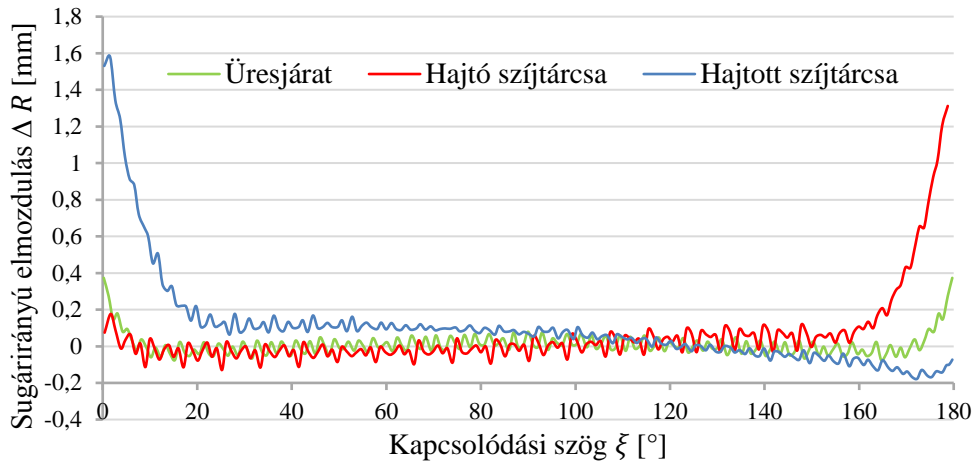
3.2. Ékszíz relatív mozgások

Az ékszíz és szíjtárcsa erőzáró kapcsolata következtében kialakuló mozgásvesztés a hajtott tengely elméleti fordulatszámát csökkenti, amelyet számos tényező befolyásol. A jelenségre az ékszíz relatív mozgásainak mikro szintű vizsgálata ad magyarázatot. A mérési adatok kiértékelése során meghatároztam az ékszíz tárcsahoronyba történő beékelődését és az érintőirányú csúszását, valamint ezeket a mozgásokat az átfogás mentén tartományokra osztottam.

3.2.1. Az ékszíz tárcsahoronyban történő sugárirányú mozgása

Az ékszíz sugárirányú relatív mozgása a 4. ábrán látható a hajtás üresjáratában, valamint teljesítmény-átvitel közben a hajtó és hajtott szíjtárcsán. Az ékszíz radiális mozgásának középső szakasza megegyezik a szakirodalom által közölt megállapításokkal, ellenben egyértelműen egyik tárcsán sem bontható további tartományra. A hajtás terhelése nélkül nincs számottevő sugárirányú relatív mozgás, azonban a hajtó és hajtott tárcsán a feszes szíjág felé haladva az ékszíz tényleges felfekvési sugara lecsökken. Az átfogás mentén a szíjerő növekedésével a rugalmas ékszíz keresztmetszet egyre nagyobb deformációt szenved, ezzel a szíjjelem mélyebbre hatol az ékhoronyba.

3. Eredmények



4. ábra A sugárirányú relatív mozgások a kapcsolódási szög függvényében
(Z/10 profil; $d = 118 \text{ mm}$; $i = 1$; $L_w = 1142 \text{ mm}$; $f = 10 \text{ s}^{-1}$;
 $F_H = 190 \text{ N}$; $a = 386 \text{ mm}$)

3.2.2. Az ékszűj relatív mozgások tartományai

A szakirodalom az ékszűj relatív mozgását négy tartományra bontja. Az átfogás mentén értelmez egy szűj fel-, illetve lefutás, valamint tapadási és rugalmas csúszási tartományt. Az utóbbi két tartományt a rugalmas csúszás elmélete alapján hozták létre. Az eddigi, valós üzemhez képest nagyságrenddel kisebb szűjsebességgel történő mérések a hajtó tárcsán nem, a hajtott szűjtárcsán viszont kimutatták a négy tartomány létezését. A kis szűjsebességgel végzett kísérleteknél nem csak a tömegeerők hatása, hanem az ékszűj reológia anyagtulajdonsága sem játszik szerepet. Ezenfelül még az érintkező felületek relatív sebessége sem befolyásolja a súrlódási kapcsolatot.

A sugárirányú komponensek segítségével az átfogási ívhosszt három szakaszra osztottam. A szakaszok határát a görbére illesztett egyenesek metszéspontjának vízszintes koordinátájával határoztam meg. A tényleges átfogási szög korrekciójához egy aránypárt hoztam létre, amelyet átfogási viszonzyszámnak δ neveztem el. A viszonzyszámot a valós és geometriai átfogás arányával határoztam meg:

$$\delta = \frac{\beta_V}{\beta_G}, \quad (3)$$

ahol:

β_V a relatív mozgásokból meghatározott, valós átfogási szög [°].

β_G a geometriából meghatározott átfogási szög [°],

3. Eredmények

A 3. táblázat az ékszíjhajtás valós átfogási szögét és az átfogási viszonyszámát mutatja üresjáratban, valamint a hajtó és hajtott tárcsán. A valós átfogás a geometriából kiszámolt szögtartomány 91%-a terheletlen hajtás esetén. A hajtó tárcsán ez az érték lecsökken 87%-ra, a hajtott tárcsa átfogása megegyezik az üresjárat állapottal.

3. táblázat Az ékszíz valós átfogási szöge és az átfogási viszonyszám

Üresjárat		Hajtó szíjtárcsa		Hajtott szíjtárcsa	
valós átfogási szög [°]	δ	valós átfogási szög [°]	δ	valós átfogási szög [°]	δ
163	0,91	157	0,87	163	0,91

3.2.3. Az ékszíz tárcsahoronyban történő érintőirányú mozgása

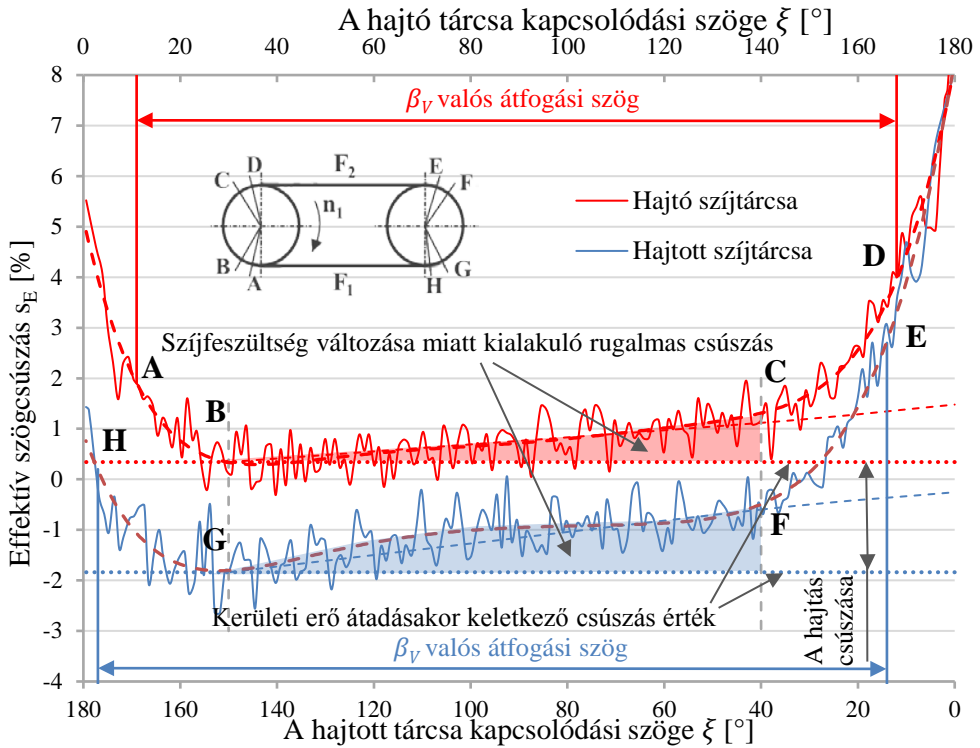
Az effektív csúszás (s_E) megadja a tárcsa és az ékszíz szögsebességének különbségét a tárcsa szögsebességére vonatkoztatva a forgómozgásuk során, azaz a pillanatnyi szíjcsúszásokat érintőirányban:

$$s_E = \frac{\omega_t - \omega_{sz}}{\omega_t} \cdot 100 [\%]. \quad (4)$$

A hajtás egész rendszerre nézett csúszása a hajtó és hajtott tárcsán létrejött szíjcsúszásokból tevődik össze. Az 5. ábrán látható, hogy a szögcsúszások eltérnek a hajtásban résztvevő tárcsákon. A két tárcsán mért csúszásokat úgy ábrázoltam egy diagramon, hogy a baloldalt a feszes szíjág, jobboldalt pedig a laza szíjág helyezkedik el. A hajtó oldalon a tárcsa szögsebessége nagyobb, mint a szíz szögsebessége ($\omega_t > \omega_{sz}$), ezáltal a csúszás pozitív értékeket vesz fel. A fel- és lefutás tartományokban a megnövekedett relatív mozgás számottevő effektív szíjcsúszás értékeket eredményez mind a hajtó, mind a hajtott szíjtárcsán.

Mind két szíjtárcsán a β_V valós átfogási szög tartományán alakul ki a súrlódó kapcsolat az ékszíz aktívfelülete és a horonyfal között, mivel ezen az ívszakazon érintkeznek a hajtáselemek. A szíjfelfutás hatása viszont még megfigyelhető a valós átfogás kezdetén ($A-B$, illetve $E-F$ ívhosszon). Hasonlóan a szíjlefutás közben kialakuló relatív mozgások már jelen vannak a valós átfogás végén ($C-D$, és $G-H$ szakaszon). Az ékszíz felső oldala, a hajlításából származó deformáció miatt lelassul, illetve felgyorsul, ezáltal befolyásolja az effektív szögcsúszást.

3. Eredmények



5. ábra Az effektív szögcsúszás a kapcsolódási szög függvényében
 (Z/10 profil; $d = 118 \text{ mm}$; $i = 1$; $L_w = 1142 \text{ mm}$; $f = 10 \text{ s}^{-1}$;
 $M_1 = 10,7 \text{ Nm}$; $F_H = 190 \text{ N}$; $a = 386 \text{ mm}$; $s = 2,32 \%$)

A hajtó oldalon, az $A-B$ szakaszt követően kialakul a kerületi erő átszármaztatásához szükséges súrlódási viszony, amely meghatározza az effektív szögcsúszás értékét. $B-C$ szakaszon, az átfogás mentén csökkenő szíj feszültség hatására kimozdul a szíj a tárcsahoronyból. Ennek következtében csökken az ékszíj szögsebessége a körmozgása során, és megnövekszik az effektív szögcsúszás. A hajtó tárcsán a szíjcsúszás tehát a kerületi erő átvadásakor kialakuló relatív elmozdulásból, valamint a szíjhajtogatás deformációjából és szíj feszültség csökkenése miatt kialakuló úgynevezett rugalmas csúszásból tevődik össze.

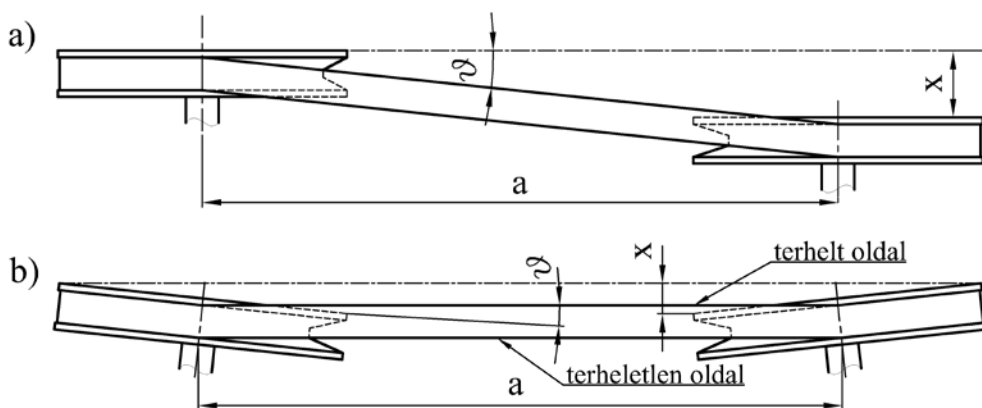
Az ékszíj be és kilépése a hajtott tárcsán ugyanúgy nagymértékű effektív szögcsúszással jár. A szíjtárcsán az ékszíj felső oldala lemarad a felfutás kezdetén (E), majd irányt vált $s_E = 0$ helyen. Hasonlóan a lefutást megelőzően is lejátszódik ez a folyamat. Az ékszíj szögsebessége nagyobb, mint a hajtott tárcsa szögsebessége ($\omega_t < \omega_{sz}$), az erőfolyam az ékszíjről a tárcsa irányába mutat. Ezáltal a csúszás negatív értékeket vesz fel és ugyanúgy a hajtás mozgásvesztését fokozza. A szögcsúszás görbe jellege hasonlít a hajtó tárcsán mért csúszás változásával, azonban az ékszíj felfutás iránya ellentétes. A feszes szíjág felőli tényleges átfogás végén (G), ahol a szíj erő

már közel megegyezik a feszes szíjágban ébredő erővel, a súrlódási viszonyok határozzák meg a szíjcsúszást. Ezt megelőzően (*G-F* szakaszon) a szíjban növekvő feszültség hatására bekövetkezik a hajtó szíjtárcsánál már említett rugalmas csúszás.

A szíjcsúszás a hajtásban résztvevő tárcsákon nem egyforma mértékben áll elő. Kísérletek során a mozgásvesztés 85 %-a a hajtott tárcsán keletkezik $i = 1$ áttétel esetén. A kerületi erő átadására jellemző csúszás a két szíjtárcsa feszes szíjágához közel eső, valós átfogás ívszakaszán a szögcsúszás görbe szélső értékével meghatározható, ahol a rugalmas csúszás a hajtó tárcsán még nem, illetve a hajtott tárcsán pedig már nem játszik szerepet. A meghatározott két csúszásérték különbsége megadja a hajtás egész rendszerre nézett csúszását.

3.3. Geometriai gépbeállítási hiba

A mezőgazdasági berendezéseken üzemelő ékszíjhajtások geometriai beállítás hibáinak feltérképezésére méréseket végeztem. Az eredmények azt mutatják, hogy az ékszíjtárcsák nem minden esetben a hajtás középsíkjában helyezkednek el. Az ékszíjhajtás beállítására vonatkozó, megengedhető legnagyobb eltéréseket a szíjtárcsa átmérő függvényében adják meg a gyártók, miközben az előállt hiba jellegét és a szíjprofil nem veszik figyelembe. A megengedett legnagyobb eltérés előállhat az ékszíjtárcsák párhuzamos eltolódásából (6/a. ábra), vagy a tengelyek szöghibájából (6/b. ábra). Mindkét esetben az ékszín egyenes szíjágai plusz hajlítást (ϑ) és az oldalak nagyobb mértékű súrlódást szenvednek a tárcsára történő fel-, illetve lefutás szakaszán. A párhuzamossági hiba létrejöttékor mindkét oldalon megnövekszik a súrlódás, a szöghiba esetén pedig csak az egyik oldal terhelődik jobban. Itt értelmeztem egy terhelt és egy terheletlen oldalt.



6. ábra A szíjtárcsák beállítási hibáinak értelmezése
a) párhuzamossági hiba; b) szöghiba

3.3.1. Megengedhető geometriai gépbeállítási hiba meghatározása

A gyártók az ékszíjhajtások geometriai beállítására olyan kis méretintervallumot írnak elő, amely a mezőgazdasági berendezéseknél nem tartható. A szíjtárcsák megengedhető tengelyirányú eltérését úgy állapítottam meg, hogy a tárcsák egy síkban történő beállításához viszonyítva vizsgáltam a veszteség összetevőket. A beállításhibából származó egyenes szíjág ϑ hajlásszögét az a tengelytávolság és az x szíjtárcsák tengelyirányú eltérése határozza meg. A geometriai beállítási hiba hatása szíjprofilonként eltérő, mivel az ékszíz szelvény szélessége, ezzel az oldalirányú hajlító merevsége változik. A kísérleteim során a párhuzamos hibaértékeket nem a szíjtárcsa átmérőjéhez, mint ahogy a szíjgyártók, hanem az ékszíz keresztmetszet méretéhez igazítottam.

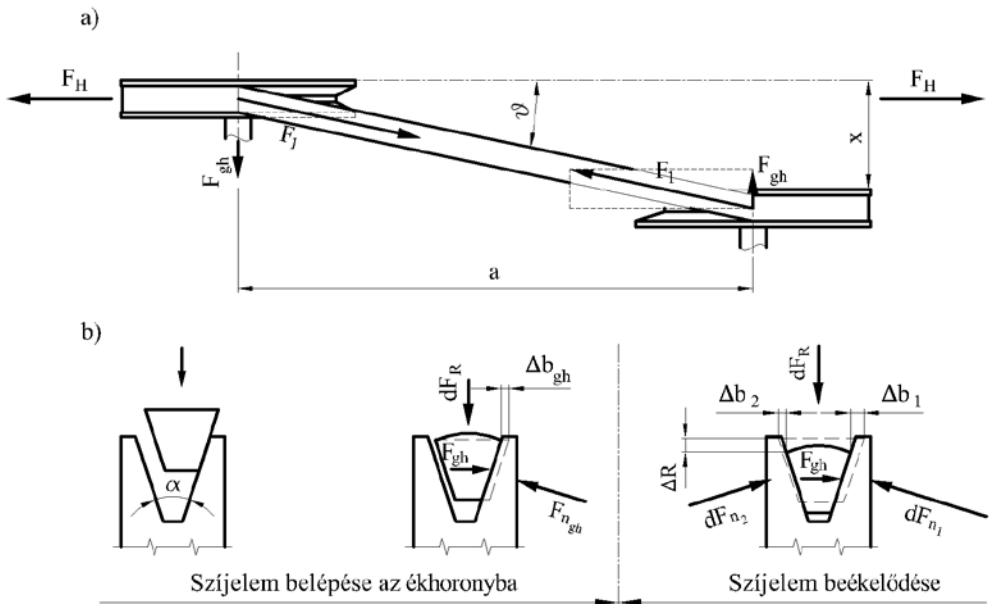
A párhuzamos beállítás hiba az egész rendszerre nézett csúszást kedvezően befolyásolja a profilszélesség értékéig. Kezdetben már kis eltérés jelentősen mérsékli a hajtott tengely fordulatszám-veszteségét. Az ékszíz profilszélesség értékét közelítve, illetve meghaladva a hiba hatására a szíjcsúszás megnövekszik. Az ékszíz hőmérséklet-emelkedése a beállított hibaérték függvényében kezdetben kis mértékben növekszik, viszont a profilszélességet meghaladva a nyomatékveszteség hirtelen megnő. Az említett tendenciák alapján a beállításhibák meghatározásánál nem a tárcsaátmérő a mérvadó, hanem a szíjprofil szélessége. Az ékszíjtárcsák geometriai beállításhibájának megengedhető értékét a profilszélesség egyharmadára ($x = b/3$) határozom meg, mivel a kísérleti beállításoknál ekkora eltérésig a szíjhajtás hatásfoka nem változik. Az élettartam szempontjából is megfelelő ez a beállítási hibaérték, a szíjhőmérséklet növekedés nem haladja meg a 10%-ot. A javasolt hibahatáron az ékszíjhajtás teljesítmény-átvitele 35 tengelytávolság és szíjprofil szélesség arányig még tartósan, üzemszerűen fenntartható.

3.3.2. Ékszíz relatív mozgások a beállítás hiba hatására

A szíjtárcsák geometriai beállításhibája nagymértékben befolyásolja a szíjhajtás egész rendszerre nézett csúszását. Relatív mozgás kísérletekkel további vizsgálatokat végeztem a párhuzamos beállítás hiba hatására létrejött csúszásváltozások magyarázatára. A hajtó tárcsán az ékszíz függetlenül a hiba nagyságától kisebb átmérőn határozottan elfoglalja helyét, és a kilépés kezdetéig megtartja a radiális helyzetét. Az ékszíz terhelt oldala a beékelődés előtt már deformációt szenved a beállítás hiba miatt kialakuló F_{gh_1} tengelyirányú erő hatására (7. ábra). A felfutás végén a feszes szíjágban kialakult F_1 szíjerő és a beállításhibából származó F_{gh_1} erőkomponens hatására a szíjkeresztmetszet eléri a legkisebb méretét és mélyebben foglal helyet a tárcsahoronyban. A fokozottan befeszült ékszíjjelem miatt megnövekszik az erőzáró kapcsolat terhelhetősége és a rugalmas csúszás

3. Eredmények

jelentősen mérséklődik. A beállítási hibát növelve viszont a terheletlen szíjoldalon oly mértékben lecsökken a normálerő, hogy az ékszíj már nem képes ugyanazt a nyomatékot azonos csúszás mellett átadni.



7. ábra Az ékszíjra ható erők a felfutás szakaszán, beállítás hiba esetén
 a) szíjhajtás felülnézete és b) a szíjkeresztmetszet adott pillanatban kiragadott pozíciója az ékhoronyban

A hajtott szíjtárcsán az ékszíj a laza szíjából fut fel, ezzel kisebb a tengelyirányú erőkomponens. A kisebb erők miatt a szíjelem – ellenben a hajtó tárcsához képest – fokozatosan foglalja el helyét a tárcsa hornyában. A hajtott oldalon a beállítás hiba nagyságától függően csökkenhet, vagy nőhet az érintőirányú relatív mozgás. Hasonlóan a hajtó tárcsához, az aktív szíjoldalak aszimmetrikus terhelése befolyásolja az ékszíj és a szíjtárcsa erőzáró kapcsolatát.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Ékszíj hőmérséklet-emelkedés matematikai modellje

Meghatároztam az ékszíj hőmérséklet-emelkedés matematikai modelljét a hajtásparaméterek ismert függvénykapcsolatai segítségével. Az ékszíj hőmérséklet-emelkedése a hajtásjellemzők függvényében:

$$\Delta T = -17,1 + \frac{2317,476}{d} + 0,472 \cdot f + 4,430 \cdot M,$$

ahol: d - az ékszíjtárcsa névleges átmérője [mm],
 f - a szíjhajtogatási frekvencia [s^{-1}],
 M - a hajtást terhelő nyomaték [Nm].

Az egyes változók által meghatározott varianciája alapján megállapítottam, hogy a szíjtárcsa átmérőjének nagysága befolyásolja a legnagyobb mértékben az ékszíj melegedését. A hajtogatás frekvenciája és a terhelés hatása közel azonos, ugyanakkor kisebb befolyással bír, mint a tárcsa átmérő. Az előfeszítő erő a szíjmelegedésre szignifikánsan nincs hatással. Az összefüggés $Z/10$ normál szelvényű ékszíjak és öntvény szíjtárcsák esetén, az alábbi tartományban 5 %-os hibahatárral alkalmazható. A modell érvényességi határai:

$$\begin{aligned}d_{min} &\leq d \leq 3 \cdot d_{min}, \\10 \text{ s}^{-1} &\leq f \leq 20 \text{ s}^{-1}, \\0 &\leq M \leq M_N, \\0,5 \cdot F_{HN} &\leq F_H \leq 1,5 \cdot F_{HN}, \\i &= 1,\end{aligned}$$

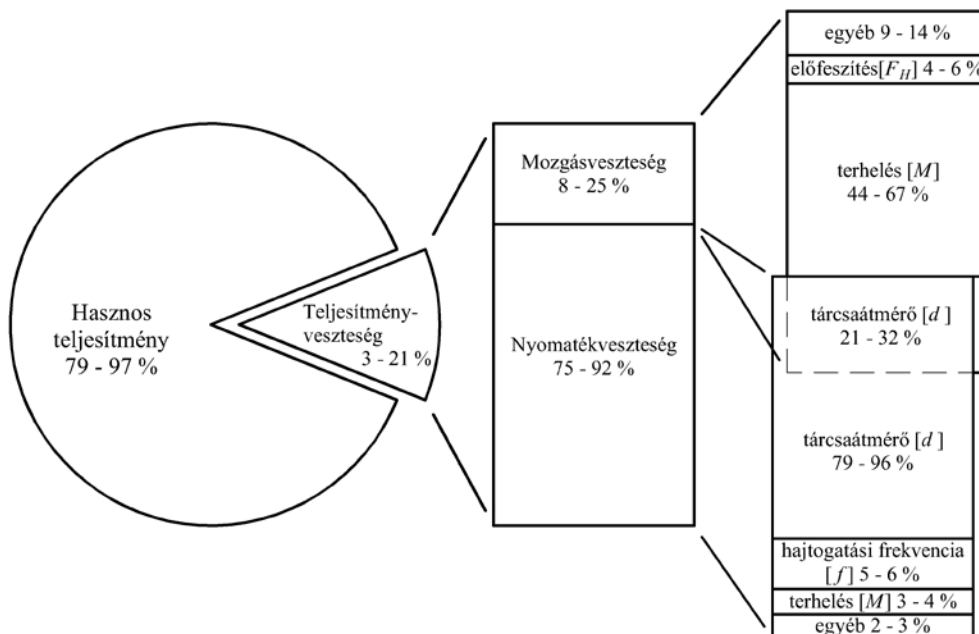
ahol: d_{min} - a szíjprofilra előírt legkisebb tárcsa névleges átmérője [mm],
 M_N - az adott beállításra meghatározott terhelő nyomaték [Nm],
 F_{HN} - az adott beállításra meghatározott előfeszítő erő [N].

2. Az ékszíjhajtás kvalitatív energiamérlege

A hajtásparaméter vizsgálatok eredményeit felhasználva kidolgoztam az ékszíjhajtás kvalitatív energiamérlegét. Az ékszíjhajtás teljesítményvesztését két összetevőre, nyomaték- és mozgásvesztésre bontottam. A nyomatékvesztés meghatározóan az ékszíj hajtogatásából (belső súrlódásból) származik, amelyet a hajlítás sugara (d a szíjtárcsa átmérője), illetve gyakorisága (f a hajtogatás frekvenciája) határoz meg. Az erőzáró hajtásnál, a kerületi erő átadása összetett módon járul hozzá a veszteséghez. Egyrészt az ékszíj felületi rétegeinek ismétlődő deformációjából (belső súrlódásból), amely nyomatékvesztésként

4. Új tudományos eredmények

realizálódik, másrészt a szíjelem relatív elmozdulásából tevődik össze. A mozgásvesztés a felületek súrlódása befolyásolja, amelyet az átadott kerületi erő nagysága (M terhelő nyomaték), illetve az ékszíj átfogási ívhossz menti alakváltozásának lefolyása (d szíjtárcsa átmérő) és az előfeszítés (F_H) határoz meg. Az energiamérleg vizsgálati határát az „Ékszíj hőmérséklet-emelkedés matematikai modellje” c. tézisben rögzítettem.



Az ékszíjhajtás energiamérlege

3. Az ékszíj relatív mozgások vizsgálati módszere

A szakirodalomban nem létezik olyan módszer, amellyel az ékszíj mozgását a tárcsahoronyban üzemhasonló körülmények között lehetne vizsgálni. Kísérleti módszert dolgoztam ki és hajtásvizsgálati fékpadot hoztam létre az ékszíj relatív mozgásának meghatározására. Laboratóriumi körülmények között a hajtás valós terhelését ($M = 10,7 Nm$) üzemi fordulatszám ($n_1 = 924 min^{-1}$) állítottam elő. Nagy rögzítési sebességgel (2000 *kép/s*) felvételt készítettem az ékszíjhajtásról. A relatív mozgások megfigyelésére a hajtás elemeit jellel láttam el, amely meghatározza a szíjtárcsa és az ékszíj felső oldalának mozgását. Képfeldolgozás után 0,28% relatív hibával megkaptam a mérési pontok által leírt mozgáspályát, amelyből meghatároztam az ékszíj felső oldalának sugár- és érintőirányú relatív mozgását és a pillanatnyi szíjcsúsztást az átfogás mentén. A kísérlet során felhasznált, kereskedelmi forgalomban kapható hajtáselemek nem igényelnek átalakítást, így a valós szíjmozgás mérhető.

4. Az ékszíz relatív mozgások

Laboratóriumi vizsgálatokkal bizonyítottam, hogy az átfogás mentén, üzemi körülmények között az ékszíz relatív mozgása három tartományra bontható (szíjfelfutás, valós átfogás, szíjlefutás) a sugárirányú pályagörbe töréspontjainak definiálásával. A valós és az elméleti átfogási szög hányadosaként definiáltam egy új paramétert, az átfogási viszonzszámot, amellyel a kötél súrlódási modell pontosítható a szíjhajtás működésének leírásakor:

$$\delta = \frac{\beta_V}{\beta_G},$$

ahol: β_G - a geometriából meghatározott átfogási szög [°],

β_V - a relatív mozgásokból meghatározott, valós átfogási szög [°].

Az effektív csúszás (s_E) értelmezésével megállapítottam, hogy a szíjcsúszások eltérnek a hajtásban résztvevő tárcsákon. A szíjcsúszás a kerületi erő átadásakor kialakuló relatív elmozdulásból, az ékszíz hajtogatás deformációjából és szíj feszültség változása miatt kialakuló rugalmas csúszásból tevődik össze. A kerületi erő átadásakor kialakuló csúszást a két szíjtárcsa feszes szíjágához közel eső, valós átfogás ívszakaszán, a szögcsúszás-görbe szélső értékével határoztam meg. A két szélsőérték különbsége megadja a hajtás egészére vonatkozott csúszás értékét.

5. Szíjtárcsák geometriai beállítás hibája

A teoretikustól minden esetben eltér a valós szíj futás, kiváltképp a nagyméretű önjáró, lemez vázszerkezetű mezőgazdasági gépek esetén. Kísérletileg igazoltam, hogy a geometriai beállítás hiba következtében kialakuló veszteséget az aktív szíjoldalak megnövekedett súrlódása okozza. Az ékszíjtárcsák párhuzamos beállításhibáinak megengedhető értékét a profilszélesség egyharmadára ($x = b/3$) határoztam meg, ahol a mozgás- és kerületi erőn megjelenő veszteségeket egyaránt figyelembe vettem. Az általam meghatározott hibahatár alatt a mozgásvesztés (szíjcsúszás) jelentős mértékben csökkenthető. A hibát tovább növelve eléri és meghaladja az egy síkba beállított hajtáselrendezés csúszásértékét. A szíjoldalak kismértékű aszimmetrikus terhelése a szíjjelem fokozott beékelődésével növeli a horonyhatást, ugyanakkor a hibahatárnál nagyobb eltérés esetén viszont a járulékos terhelés miatt megnövekszik a szíjcsúszás.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutató munkám során az ékszíjhajtások veszteségtényezőinek vizsgálatával kapcsolatban olyan eredményekre jutottam, amelyek segítséget adnak a hajtás működésének jobb megértéséhez, és a mezőgazdasági gépeken alkalmazott ékszíjhajtások tervezési- és optimalási folyamataihoz.

Kísérleti úton létrehoztam az ékszij hőmérséklet-emelkedés és az egész rendszerre nézett csúszás matematikai modelljét a hajtásparaméterek függvényében. Az egyes független változók varianciája alapján meghatároztam a veszteséget befolyásoló hajtásjellemzőket, illetve az egyes faktorok súlyát. A hajtásparaméter vizsgálatok eredményeit felhasználva felállítottam az ékszíjhajtás kvalitatív energiamérlegét, ahol a teljesítményvesztéseket két összetevőre, nyomaték- és mozgásvesztésre bontottam. A vizsgálatok kiterjeszthetők más szíj típusokra, illetve további kutatási feladat szimulációs modellek létrehozása a hajtás működésének leírására.

Kísérleti módszert dolgoztam ki az ékszij tárcsahoronyban történő mozgásának meghatározására. Az ékszíjon és szíjtárcsán elhelyezett mérőpontok koordinátáiból meghatároztam az ékszij felső oldalának tárcsához viszonyított mozgását. A kísérleti módszerrel lehetőség adódik más szíjtípusok, illetve egyéb hajtások kinematikai vizsgálatára üzemi fordulatszámokon.

A relatív mozgások elemzésével bizonyítottam, hogy az átfogás mentén, üzemi szíjsebességnél az ékszij relatív mozgása három tartományra bontható (szíjfelfutás, valós átfogás, szíjlefutás). Definiáltam egy átfogási viszonyszámot (δ), amelyet a valós és az elméleti átfogás hányadosaként értelmeztem. Az ékszíjhajtás méretezésénél használt kötélsúrlódási modell pontosítható ezzel a viszonyszámmal. Az effektív szögcsúszás (s_E) bevezetésével felbontottam a szíjtárcsákon létrejött elemi csúszásokat, amelyek összetett módon a kerületi erő átadásakor kialakuló relatív elmozdulásból, a szíjhajtás deformációjából és szíjfeszültség változása miatt keletkező ún. rugalmas csúszásból tevődik össze.

A mezőgazdasági gépeken előállt sajátos körülmények közül a geometriai beállítási hibák problémájával foglalkoztam. Meghatároztam a szíjtárcsák párhuzamos beállítási hibájának határértékét, ahol az ékszíjhajtás üzemszerűen, a teoretikus elrendezéshez képest hatásfok csökkenés nélkül használható. Relatív mozgás vizsgálatokkal megállapítottam, hogy a beállítás hiba következtében, a szíjoldalak aszimmetrikus terhelése növelheti az ékhatást a szíjjelem fokozott beékelődésével. A szíjprofil szélességét meghaladó hiba következtében viszont a lecsökken az erőzáró kapcsolat terhelhetősége a megnövekedett járulékos terhelések miatt.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A rugalmas vonóelemes hajtás a mezőgazdasági berendezéseken elterjedt teljesítmény-átviteli megoldás. A gépszerkezetek tervezéséhez, optimális üzemeltetéséhez elengedhetetlen az említett hajtás viselkedésének beható ismerete, kiváltképp a mezőgazdasági környezetben.

A kutatómunkám célja az ékszíjhajtások veszteségvizsgálatával, hogy a hajtás működésével kapcsolatban további ismereteket szerezzek, illetve megvizsgáljam a mezőgazdaságra jellemző viszonyok hatását a teljesítmény-átvitelre. A kutatási célok megvalósítása érdekében áttekintettem az ékszíjhajtások szakirodalmát, ahol arra a megállapításra jutottam, hogy az eddigi kísérletek nem alkalmasak a hajtás valós körülmények közötti vizsgálatára. Ezáltal az alap kutatásokban is ellentmondásokba ütköztem. Továbbá a mezőgazdasági környezetben üzemelő hajtásokkal kapcsolatban nem áll rendelkezésre irodalom.

Első lépésben kísérleti módszert dolgoztam ki az ékszíjhajtás nyomaték- és mozgásvesztésének vizsgálatára, ahol kereskedelmi forgalomban kapható ékszíjakat és szíjtárcsákat használtam, illetve üzemhasonló körülményeket hoztam létre az eredményeim gyakorlatban való jobb alkalmazhatósága érdekében. A nyomatékvesztést az ékszíz hőmérséklet-emelkedése által elemeztem. A mozgásvesztést makró szinten a hajtás tengelyeinek szögsebességével, illetve mikro szinten az ékszíz relatív mozgások segítségével határoztam meg.

Következő lépésben fontosnak tartottam tisztázni a teoretikus hajtásbeállításnál a teljesítményvesztés összetételét. Létrehoztam a szíjmelegedés matematikai modelljét a hajtásparaméterek függvényében, és a független változók súlyozásával meghatároztam az egyes paraméterek hatását. A kísérletsorozatból felállítottam a hajtás egész rendszerre nézett csúszásának matematikai modelljét is, és szintén meghatároztam a hajtásparaméterek hatását a vizsgált jelenségre. Az eredmények felhasználásával létrehoztam az ékszíjhajtás energiamérlegét, és elemeztem az egyes összetevők hatását. Új kísérleti módszer kidolgozásával pontosítottam az ékszíz relatív mozgásaival kapcsolatos ismereteket.

A mezőgazdasági gépekre jellemző környezeti körülmények elemzése után megvizsgáltam a szíjtárcsák geometriai beállításhibájának hatását az ékszíjhajtás működésére. A gépbeállítás hiba határértékének empirikus meghatározásával megállapítottam egy hibaértéket, ahol a hajtás teljesítmény-átszarmasztatása még hatásfok csökkenés nélkül jön létre. Relatív mozgásvizsgálatokkal megállapítottam, hogy a beállítás hiba következtében, a szíjoldalak aszimmetrikus terhelése növelheti az ékhatást a szíjjelem fokozott beékelődésével.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. **Gárdonyi, P.**, Kátai, L., Szabó, I. (2015): Examination of drive misalignment and v-belt temperature conditions, *International journal of science, technics and innovations for the industry*, Vol. 12. pp. 56-59, ISSN 1313-0226
2. **Gárdonyi, P.**, Kátai, L., Szabó, I. (2015): Relationship between the drive installation and v-belt temperature conditions, *Mechanical Engineering Letters*, Vol. 13, pp. 81-87, HU ISSN 2060-3789
3. Kátai, L., Szendrő, P., **Gárdonyi, P.** (2016): The Power Transmission Stability and Efficiency of V-belts, *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, Vol. 12, pp. 25-49.
4. **Gárdonyi, P.**, Nagy, D., Gergely, Z., Bércesi, G. (2017), Developing test equipment suitable for testing torque transfer systems used in agriculture, *Poljoprivredna tehnika*, Vol. 42 (4), pp. 27-36, ISSN 0554-5587

Lektorált cikk magyar nyelven

1. **Gárdonyi, P.**, Kátai, L., Szabó, I. (2014): A hajtás beállítási hiba és az ékszíjak melegedési viszonyainak kapcsolata, *GÉP*, LXV. évf. 6-7. szám, 26-29. o., ISSN 0016-8572
2. **Gárdonyi, P.**, Kátai, L., Szabó, I. (2015): Az ékszíjtárcsa átmérők és az ékszíjak melegedési viszonyainak kapcsolata, *Műszaki Tudományos Közlemények*, 2015 (3), 151-154. o., ISSN 2393-1280
3. **Gárdonyi, P.**, Szendrő, P., Kátai, L., Szabó, I. (2015): Mezőgazdasági gépeken alkalmazott ékszíjak élettartamának és hatásfokának kísérleti vizsgálata, *Mezőgazdasági Technika*, LVI. évfolyam, 2015. október, 2-5 o. HU ISSN 0026-1890
4. **Gárdonyi, P.**, Kátai, L., Szabó, I. (2015): Szíjhajlítgatás kísérleti módszerének fejlesztése a hajtás veszteségeinek meghatározására, *GÉP*, LXVI. évf. 5-6. szám, 47-50. o., ISSN 0016-8572
5. **Gárdonyi, P.** (2016): Ékszíjhajtás veszteségét befolyásoló hajtásjellemzők vizsgálatának módszere, *GÉP*, LXVII. évf. 5-6. szám, 82-85. o., ISSN 0016-8572
6. **Gárdonyi, P.**, Kátai, L., Szabó, I., Balassa, Zs. (2017): Ékszíz belső súrlódási veszteségének vizsgálata üzemhasonló körülmények között, *GÉP*, LXVIII. évf. 3. szám, 66-69. o., ISSN 0016-8572