



DR. SZAKÁCS TAMÁS (EGYETEMI DOCENS)

Pneumatikus hajtású járművek vezérlése és a munkahengerek pozíciószabályozása számítógépes szimuláció módszerével



TARTALOMJEGYZÉK

I. A kutatás előzményei	2
II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	5
1. Tézis.....	5
2. Tézis.....	13
3. Tézis.....	19
4. Tézis.....	29
5. Tézis.....	35
III. A Kutatás és a bemutatott eredmények hatása, visszhangja	40
IV. Irodalmi Hivatkozások listája.....	45
V. A tézisponthoz kapcsolódó tudományos közlemények	47



I. A KUTATÁS ELŐZMÉNYEI

A PhD-fokozat elnyerését követően kutatásaim több, részben egymáshoz kapcsolódó műszaki területet érintettek, melyek az alábbi főbb irányvonalak mentén bontakoztak ki:

1. Járműdinamika

Doktori kutatásaim folytatásaként továbbfejlesztettem a korábbi szimulációs modelleket, melyek eredményeit **konferenciaközleményekben publikáltam**. A témához kapcsolódóan **szakdolgozatok és TDK-munkák** konzulenseként is közreműködtem.

2. Űrdinamika

Kifejlesztettem egy **két-test modellre épülő űrdinamikai szimulációs rendszert** oktatási célra, melynek animációs moduljai az **Űrdinamika tantárgy** tematikájába is beépültek. A modellhez kapcsolódóan Repüléstudományi Közleményekben cikket publikáltam (Lásd: Orbital Mechanics Two-Body Model for Educational Purposes), és szakdolgozatokat is konzultáltam.

3. Pneumatikus hajtású járművek



2007 óta foglalkozom **pneumatikus hajtású járművek** fejlesztésével, különös tekintettel a rendszerek modellezésére és optimalizálására. A kutatás történeti és technológiai aspektusokat is felölel (1. tézis), valamint új működési elvet – a **kiexpandáltatásos módszert** – dolgoztam ki a hatótáv növelése érdekében (2. tézis). Az eredmények a II. rész 1–3. számú publikációiban kerültek bemutatásra.

4. Ipari pneumatikus rendszerek

2020 óta ipari célú **pneumatikus hengerek pozícióalapú vezérlésével** foglalkozom (3. és 4. tézisek), valamint módszert dolgoztam ki a hengerek **mechanikai súrlódásának csökkentésére**, a tömítettség megtartása mellett (5. tézis).

5. Oktatási és versenytapasztalat

A 2008 májusában rendezett első Pneumobil versenyen – a Rexroth magyarországi vállalat szervezésében – a Budapesti Műszaki Főiskola (ma Óbudai Egyetem) szakmai vezetésemmel versenycsapatot nevezett.



Az Óbudai Egyetem Bánki Kara évről évre 2–3 csapattal vesz részt a ma már **nemzetközivé vált Emerson Nemzetközi AVENTICS Pneumobil Versenyen**. A COVID-járvány csökkentette ugyan a versenyek számát, de **bemutatók, szakdolgozatok és előadások** továbbra is rendszeresen zajlanak.

2017 óta az egyetem társszervezésében **konferenciasorozat** is működik, ahol minden évben adok elő, köztük **négy plenáris előadással** is hozzájárultam a konferenciához. A második évtől kezdve **szervezőként** is szerepet vállalok. Tudományos munkám és téziseim szorosan kapcsolódnak a **pneumatikus hajtások és alternatív járműtechnológiák** fejlesztéséhez.



II. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. TÉZIS

A sűrített levegővel hajtott járművek a jelenleg ismert villamos és hibrid-elektromos rendszerekkel azonos felhasználási területeken is versenyképesek lehetnek, amennyiben a hajtáslánc optimalizálása (tömegcsökkentés, energiatárolás, vezérlés) és a regeneratív fékezés integrálása megfelelő módon történik meg. Szimulációs modelljeim és versenykörülmények között validált járműfejlesztéseim alapján e hajtásforma hatótávolsága rövid-középtávon alkalmassá tehető valós közlekedési feladatok ellátására.

Meglepő, de 170 évvel ezelőtt a légmotorok nagyon nagy szerepet töltöttek be a járművek hajtásában. (Tóth, 2017) Tiszta, csendes, üzembiztos, és biztonságos hajtási módnak bizonyultak a városi személyszállítástól kezdve a robbanásveszélyes bányákban való szállítási feladatokig. Kevesen tudják, hogy az első önerőből felszállni képes repülőgép, vagy az első mechanikus hajtású



tengeralattjáró is sűrített levegős motorral üzemelt. Az ilyen motorok hatásfoka magas, tűz-, és robbanásveszélyt nem jelentenek! A környezetszennyezése csak annyi, amennyi a sűrített levegő előállításakor keletkezik. A belsőégésű motorral hajtott járművekkel ellentétben, ezek a járművek regeneratív fékezésre is alkalmasak.

Kutatásom fő állítása, hogy a sűrített levegővel hajtott járművek – megfelelő fejlesztési irányok mentén – gazdaságosan és környezetkímélően alkalmazhatók rövid és középtávú közlekedésben. E területen kiemelkedő szakmai műhely az Emerson által szervezett versenysorozat, valamint az Óbudai Egyetem Agria, nemzetközi konferenciasorozata (korábban ACIPV, jelenleg InnoVeTAS néven).

A tézis igazolása az alábbi, több szinten megalapozott kutatási és fejlesztési tevékenységeken nyugszik:

Energetikai és járműdinamikai elemzések: Részletes számításokat végeztem a pneumatikus hajtás energetikai hatásfokára és dinamikai viselkedésére vonatkozóan.[15], [16], [17], [19], [20], [21]



Szimulációs modell: Kidolgoztam a pneumatikus hajtású jármű Matlab/Simulink modelljét, és szisztematikus szimulációkat hajtottam végre a rendszer működésének elemzésére. [10],[12]

Gyakorlati fejlesztés és tapasztalat: Az elmúlt másfél évtized során hallgatóimmal közösen több, sűrített levegővel hajtott járművet építettünk, amelyekkel rendszeresen részt vettünk nemzetközi versenyeken. [13], [18], [19]

Tudományos disszemináció: Módszereimet és kutatási eredményeimet hazai és nemzetközi konferenciasorozatokon mutattam be.

Energetikai számítások

Számításokat végeztem a sűrített levegő energiatartalmára és egy légmotoros jármű várható hatótávolságára vonatkozóan. A részletek az 1. számú publikációban [15] („Pneumatikus járműhajtás múltja, jövője”) található.

Az palackban tárolt gáz, $m=3,6$ kg tömegre számítva 10 literes palack 200, ill. 300 bar nyomáson 1,07, illetve 1,73 MJ energiát tárol.



1. táblázat: Energiatárolók fajlagos energiasűrűségének összehasonlítása

Energiatároló	Fajlagos energiasűrűség (MJ/kg)
Lithium-ion	0,36–0,875
Alkáli	0,5
Nickel-metal hydride	0,288
Ólom-savas akku.	0,17
Ultrakapacitás (EDLC)	0,01-0,036
Ultrakapacitás (Pseudo)	0,031

Látható, hogy a tároló tartály tömege nélkül számított fajlagos energiatartalmak az alkáli elemek, és a lítium akkumulátorok tartományába esnek.

Ha a 10 literes, 17 kg-os acélpalackot is figyelembe vesszük, a fajlagos energiatartalom 200 bar nyomáson 0,055 MJ/kg, 300 bar-on 0,08 MJ/kg.

Könnyített, 4,5 kg-os kompozit palackkal ezek az értékek 0,155, illetve 0,213 MJ/kg, ami már versenyképessé teszi a rendszert a villamos energiatárolókkal.

A fajlagos értékek tovább javulnak, mivel a tartály tömege a gáz fogyasztásával csökken. 300 bar nyomás esetén a kompozit palack energiasűrűsége megközelíti a NiMH akkumulátorokét, nagyobb térfogattal pedig még kedvezőbb lehet az arány.



Közelítő számításokat végeztem egy pneumatikus versenyjármű hatótávolságának becslésére, a 10 literes, 200 bar nyomású palack energiatartalmát alapul véve. A számításhoz felvett adatok: 75 kg-os pilótával, 17 kg palacktömeggel a mért gördülési ellenállás: 30 N. A jármű homlokfelülete megközelítőleg 1 m^2 , az alaktényező $c_w=0,47$. A haladási sebesség: $v_h=15 \text{ km/h} = 4,17 \text{ m/s}$. A levegő sűrűsége 20°C -on $1,2041 \text{ kg/m}^3$. A pneumatikus motor hatásfokát $\eta_m=0,7$, az erőátvitelét $\eta_{eá}=0,8$ -ra becsülve az összhatófok $\eta=0,56$.

A 200 bar nyomású palack energiáját a menetellenállások

$$s = \frac{1070 \text{ kJ} \cdot 0,56}{34,91 \text{ N}} = 17,16 \text{ km alatt emészti fel.}$$

A pneumobil versenyen mért távolsági rekord közel 13 km, amit a gyakori megállások, kanyarok és rossz útviszonyok is befolyásolnak, így a számított értékek reálisnak tekinthetők. A modell hatásfoka becsült.

300 bar nyomás esetén a jármű elméleti hatótávolsága sík úton 27,71 km, amely versenykörülmények között várhatóan 20–22 km-re csökken. Egy 50 literes, 300 bar



nyomású tartály esetén a hatótáv elérheti a 100 km-t, ami már külvárosi közlekedésre is alkalmassá teszi a járművet.

A pneumatikus jármű modellje

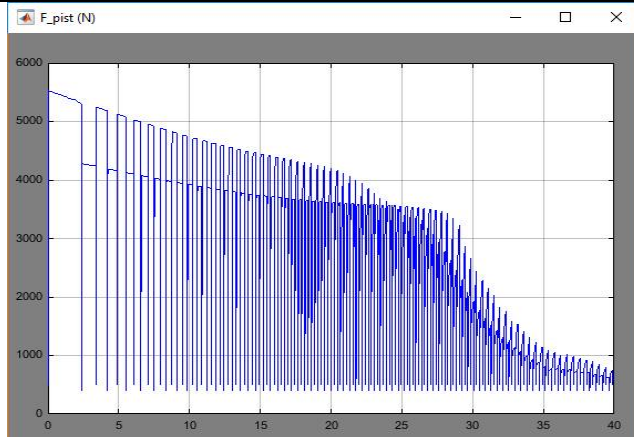
A jármű modelljét a publikációs gyűjtemény 2-4 publikációk írják le [5], [6], [7], [11], [13], [14]. A modellalkotás során szempont volt, hogy a modell könnyen kezelhető, és áttekinthető maradjon.

Eredmények

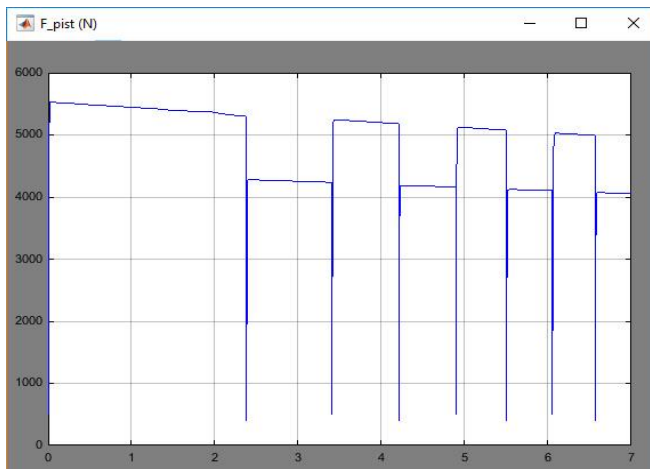
A modellfuttatás során egy rövid, gyors szimulációval vizsgáltam a jármű viselkedését teljes töltés mellett, egy fokozatban, a palack kiürüléséig. [14]

Az 1., és 2. ábránkon a kettőslöketű henger dugattyúerejét mutatja: a dugattyúszár oldalán a kisebb keresztmetszet miatt kisebb erő keletkezik. Ennek ellenére a dugattyúmozgás nem gyorsabb, amit a 3. ábra is igazol.

A 3. ábrán az első löket hengererejének felépülése látható.

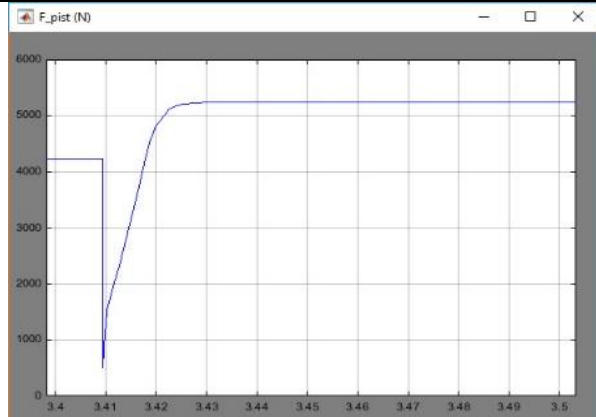


1. ábra: A hengererő a teljes futam során.



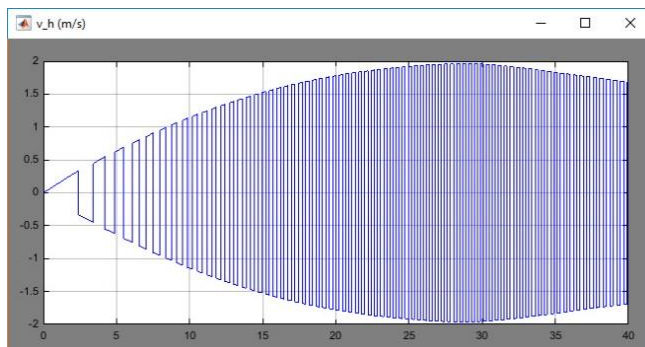
2. ábra: A hengererő négy irányváltás alatt.

A 4. ábra a dugattyú sebességprofilját mutatja. Megfigyelhető, hogy a kettőslöketű henger ki- és befelé mozgása során nem alakul ki sebességkülönbség.



3. ábra: A hengererő felépülése az első löketben.

A szimulációk futtatásából megállapítható, hogy a palacknyomás csökkenése, a hengernyomások, hengererők felépítése megfelel a tapasztalásnak, a szimulált hatótáv közelít a versenyeken mért valódi távolságokhoz. A modell validálása a következő tézispontban hivatkozott cikkekben található.



4. ábra: A dugattyú sebessége.



2. TÉZIS

A pneumatikus hajtású járművek (pneumobilok) hatótávja jelentősen kiterjeszthető, melynek leghatékonyabb módszere a kiexpandáltatás.

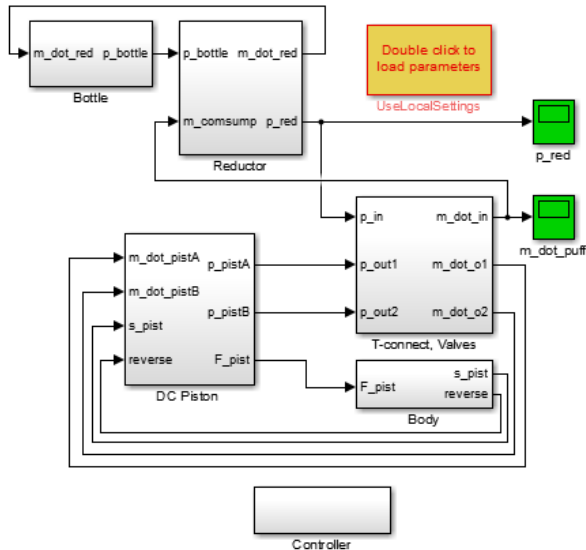
A léghajtású járművek fejlesztése kezdetben a gőzmozdonyoknál alkalmazott technológiák, különösen a **kompaund-módszer** tapasztalataira épült. A kompaund rendszer a gőz fokozatos tágulásával több hengerben fokozta a hatásfokot, csökkentve az energiaveszteséget.

A pneumatikus hajtású járművek gazdaságosságát korszerű vezérléstechnikával és **kiexpandálásos működéssel** jelentősen javítani lehet. E megközelítés célja a sűrített levegőben tárolt energia **hatékonyabb kiakná-zása**, amely fontos az ipari alkalmazhatóság szempont-jából, tekintettel a levegő korlátozott energiasűrűségére.

A **kiexpandálás** lehetővé teszi a hajtáshoz szükséges levegőfogyasztás mérséklését, ami egyúttal kisebb kompresszorteljesítményt, alacsonyabb zajterhelést és csökkentett üzemeltetési költségeket eredményez. Ezzel

párhuzamosan nő a jármű **hatótávja és üzemideje**, valamint javul az **energiahatékonyság**. (Szántó 2020),

Fenntarthatósági szempontból a technológia hozzájárul a sűrített levegő előállításához szükséges energiaigény csökkentéséhez, így mérsékli az ipari rendszerek karbonlábnyomát is. (Péter 2016)



1. ábra: A 2019-es modell.

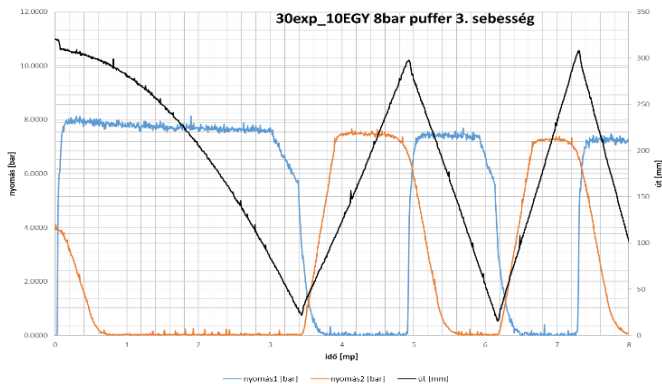
A palack, a járműtest és reduktor modellek leírása az előző tézispontban, illetve az ACIPV 2018 Konferencia cikkben szerepelnek (Válogatott cikkek: 3) [14].

Validáció

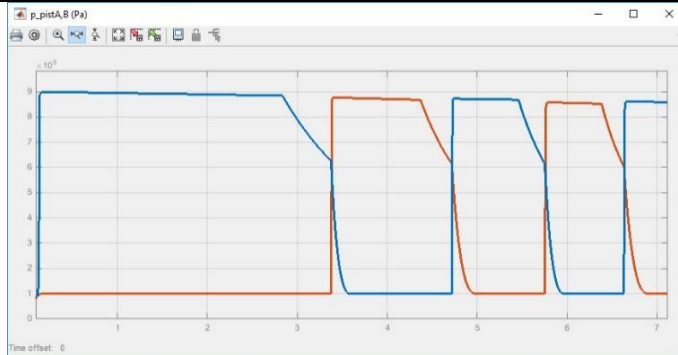


Validáció céljából méréseket végeztem a dugattyúkamrák nyomásviszonyairól és a dugattyú sebességéről egyenes vonalú mozgás során, 8 bar rendszernyomás és 30%-os expandálási arány mellett. A pozíció- és nyomásadatokat Texas Instruments mikrokontroller és mérőkártya segítségével rögzítettük. A mérési elrendezés és az adatkiértékelés részletesen megtalálható Heisz Patrik szakdolgozatában (Heisz, 2017).

A mérési eredmények grafikus megjelenítése a 7. ábrán látható. A mérési körülményeknek megfelelő paraméterezéssel szimulációs futásokat végeztem a modell alapján. A dugattyúkamrák nyomásának szimulált görbéi a 8. ábrán kerültek ábrázolásra.

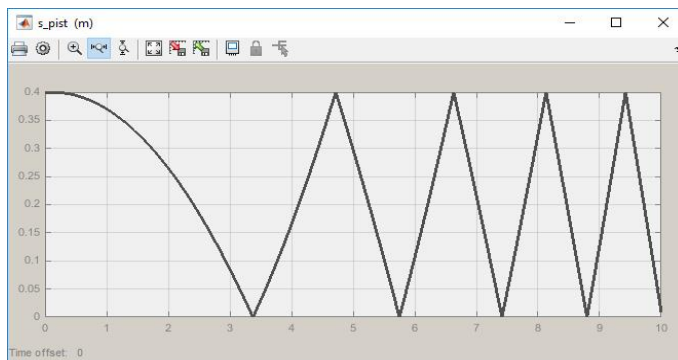


2. ábra: Méréseredmények (Heisz, 2017)

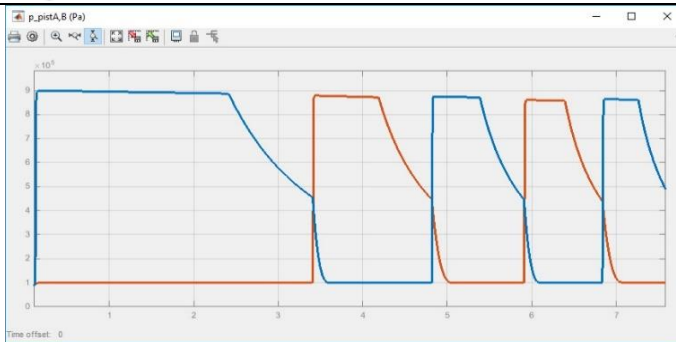


8. ábra: Szimulált dugattyúkamra nyomások

A szimulációs eredmények **jó egyezést mutatnak a mért adatokkal**. A **8. és 10. ábra** összehasonlítása alapján megfigyelhető, hogy a henger mozgása közbeni nyomásesés, a zárt gáz **közel adiabatikus tágulása ECO üzemmódban**, valamint a lefűvott gáz nyomásának **tranziens lefutása** jól követi a mérésekben tapasztalt tendenciákat.



9. ábra: A dugattyú lökete a szimuláció során



10. ábra: Szimulált dugattyúkamra nyomások 50%-os expanziónál

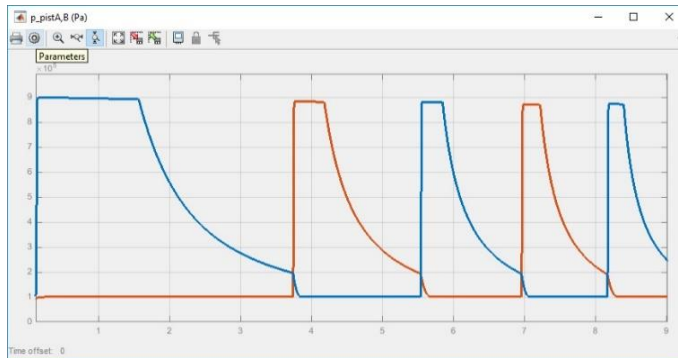
A szimuláció és a mérési eredmények közötti **fő eltérés** az **A kamra** (narancssárga vonal a 7., 8. és 10. ábrákon) és a **B kamra** (kék vonal) jelleggörbéinek **időbeli eltolódása**. A megfigyelt késleltetés valószínűleg a szelep nyitási idejéből adódik, és a rendszer dinamikus viselkedését befolyásolja. Ezt a jelenséget a dolgozat **következő tézispontjai** részletesen vizsgálják.

További szimulációk:

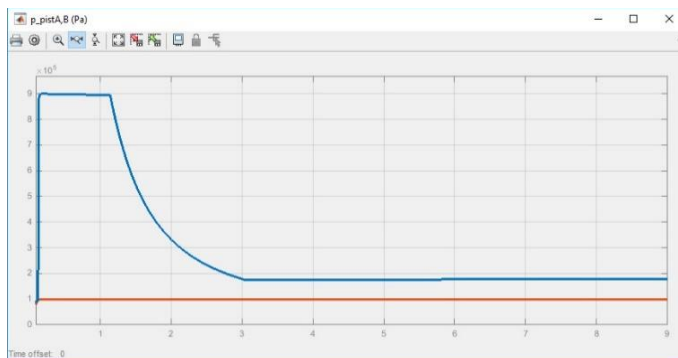
A validációt követően további szimulációkat végeztem **különböző expandálási százalékok** beállításával. A 11. ábra alapján a **80%-os tágulási mód** kb. **1 bar relatív nyomásig** terjed, ami a rendszer maximális hatásos tágulásának tekinthető.



Ezzel szemben a **90%-os tágulás** a dugattyúmozgás **leállításához** vezetett (**12. ábra**), azaz a dugattyú elakad. Ilyen esetben a löket végét **vezérléssel kell befejezni**, vagy a dugattyút a megállási pontjáról **vissza kell fordítani** a rendszer újraindítása érdekében.



11 ábra: Szimulált dugattyúkamra nyomások 80%-os expánzióánál.



12. ábra: Szimulált dugattyúkamra nyomások 80%-os expánzióánál.



3. TÉZIS

Az ipari pneumatikus munkahengerek pozícióra vezérlése lehetséges arányos útváltószelepek nélkül is PWM módszerrel, továbbá a pneumatikus munkahengerek külső terhelésekre érzékenysége is csökkenthető az ellenkamra előtöltésével.

A korábban bemutatott pneumatikus járműmodell nemcsak hajtásoptimalizálásra, hanem **pozícióvezérlési feladatokra** is alkalmas. Ez különösen fontos, mivel a **precíz szabályozás** új ipari alkalmazásokat tesz lehetővé.

A pneumatikus rendszerek hátránya a **külső terhelésre való érzékenység**, amely **ellenkamra előfeszítéssel** mérsékelhető. A hidraulikus rendszerek – az összenyomhatatlan folyadéknak köszönhetően – **pontosabb szabályozást és reteszjelhetőséget** kínálnak, míg a pneumatikus rendszerek **egyszerűbbek, olcsóbbak**, de jellemzően **véghelyzetek közötti mozgásokra** használják őket.



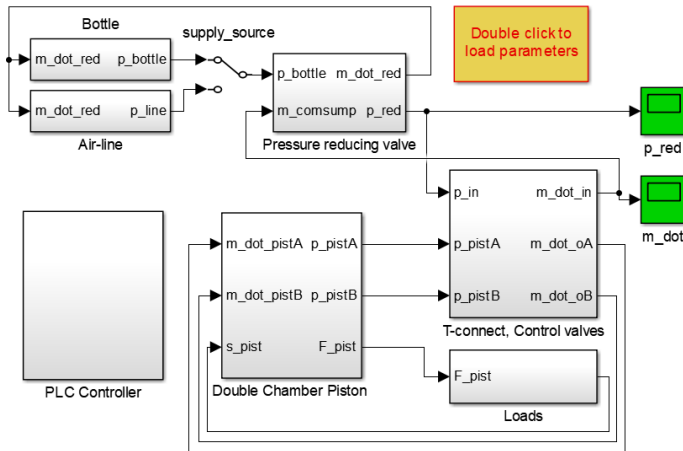
A kutatás egy olyan vezérlési módszert mutat be, amely a **pontosság növelésével** szélesebb körű ipari alkalmazást tesz lehetővé.

A módszer leírása

A közelmúltban egyre nagyobb érdeklődés övezi a pneumatikát, mivel számos érintett terület, például a robotika, pneumobilok, valamint a hagyományos járművek fejlődésének köszönhetően új lehetőségek nyílnak. A robotikában pontos vezérlésre és érzékelésre van szükség, ugyanúgy, mint a pneumobilok esetében, ahol a hengerek erejét és mozgását szabályozzák. Haiato és munkatársai (Haiato et al, 2019) egy diszkrét értékű modellalapú prediktív vezérlés (DVMPC) algoritmust mutatnak be, ígéretes eredményekkel. A Power & Motion Tech (Vincent, Bridges 2015) leír egy Elektropneumatikus Pozicionáló Rendszert (EPPS), amely Rexroth (Aventics) komponenseket használ. Az írás összegzi az EPPS előnyeit az Elektromos Mechatronikus Pozicionálással (EMPS) szemben.



A **2023-as modell** (1. ábra) a korábbi rendszer továbbfejlesztett változata (5. válogatott cikk) [2], több lényeges újítással:



1. ábra: A jelenlegi ipari pneumatikus modell.

A **kétkamrás hengermmodell** pontosabb szimulációt tesz lehetővé kipufogónyomás-esés és szimmetrikus előtöltés esetén. Új **vezérlőblokk** került beépítésre, amely támogatja **PLC alapú szabályozások** integrációját; a kódrészletek közvetlenül fejlesztői környezetbe illeszthetők. Az **irányváltó szelepek modelljeit** a valós dinamikai viselkedéshez igazítottam. A **mechanikai terhelés blokk** ipari alkalmazási követelményekhez igazodott. A modell **oktatási célra is alkalmas**, egyszerű



felépítése révén jól értelmezhető és kutatási célokra is hatékonyan használható.

A részletes műszaki háttér az 5. számú publikációban olvasható (*Pneumatic Piston Control Modelling and Optimization*, Szakács, 2018 [6]).

Az irányváltó szelep vezérlése idő- vagy eseményalapú logika szerint történhet. Eseményalapú szabályozás esetén a döntések az alábbi jellemzők alapján történhetnek: dugattyú pozíciója, A és B kamra nyomása, kifejtett erő, mozgásirány, célpozíció. Ezek az értékek globális változóként vagy az S-funkció bemeneti portjain keresztül kerülhetnek át a vezérlőmodulba vagy PLC-programba.

Eredmények

A kezdeti szimulációk célja az ellenkamra (B kamra) töltöttségi állapotának hatását vizsgálta. Elemeztem, hogyan módosul a dugattyú mozgása, ha az ellenkamra teljesen kiürített, illetve ha előfeszített nyomás van jelen.

Szimulációk

Ebben a szimulációs sorozatban egy **egyszerű dugattyúlöketet** modelleztem két különböző



konfigurációban: Először **egykamrás hajtással** (a B kamra kiürített), majd **kétkamrás feltöltéssel**, ahol a B kamrában is túlnyomás uralkodik, és ellennyomást fejt ki a mozgás során.

Beállítások:

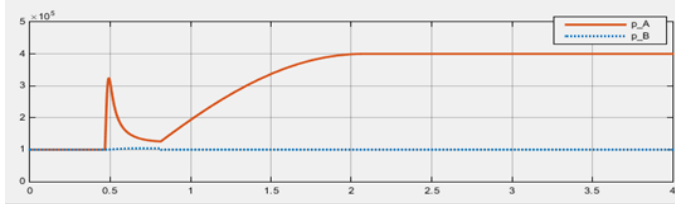
$p_{\text{set}}=4\text{bar}$, $d_{\text{in}}=3\text{mm}$, $d_{\text{out}}=10\text{mm}$, $m_{\text{load}}=500\text{kg}$, $h_p=400\text{mm}$,
 $D_p=80\text{mm}$, $d_p=36\text{mm}$

Set 1.1: Ellenkamra szabad lefűvással

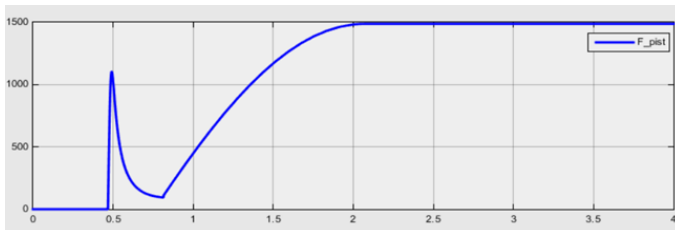
```
if and (t>=0.5,t<1)
    Fill_A=1;
    Fill_B=-1;
    Close_A=0;
    Close_B=0;
end
```



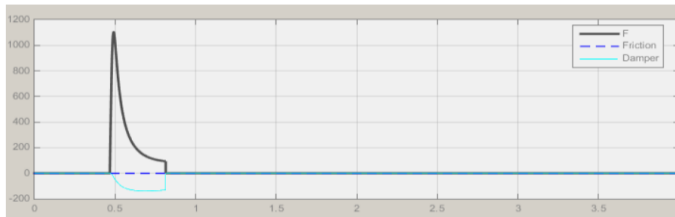
2.ábra: A dugattyúrúd helyzete (Scope s_pist (m) a Loads modellben) 1.1 szett



3. ábra: Az A és B kamrák nyomásai (p_{pistA} , p_{pistB} (Pa) scope a Double Chamber Piston modellben) 1.1 szett



4. ábra: Dugattyúerő 1.1 szett



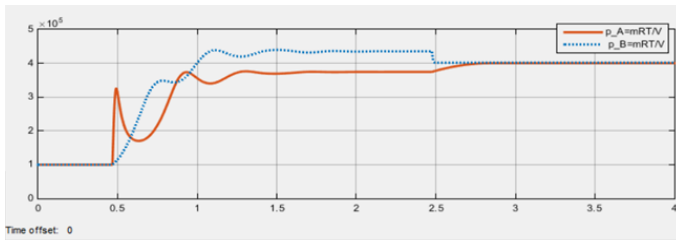
5. ábra: Hatóerő és ellenállások 1.1 szett

Set 1.2: Zárt ellenkamra.

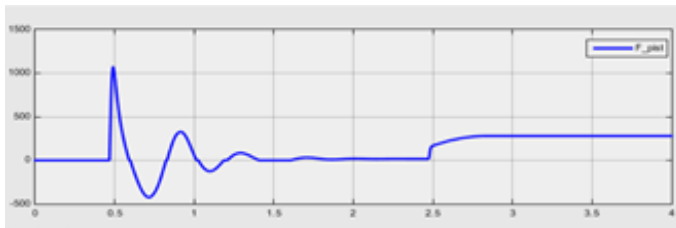
```
if and (t>=0.5,t<1)
    Fill_A=1;
    Fill_B=1;
    Close_A=0;
    Close_B=0;
end
```



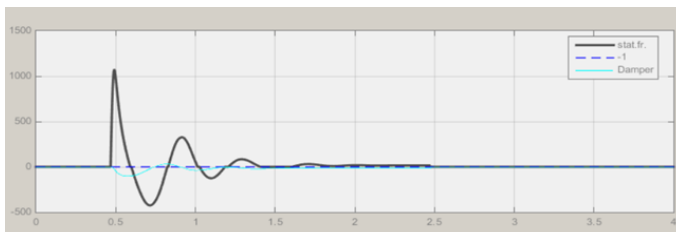
6. ábra: A dugattyúrúd helyzete 1.2 szett



7. ábra: Az A és B kamranyomások, 1.2 szett



8. ábra: Dugattyúerő 1.2 szett



9. ábra: Hatóerő és ellenállások 1.2 szett



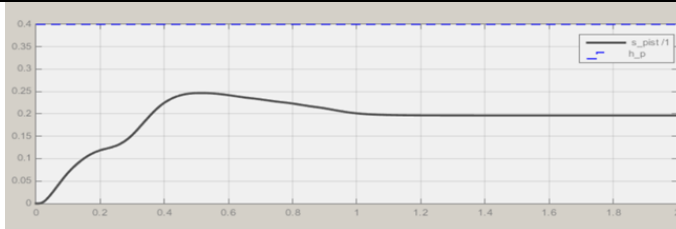
Az 1. szimuláció, 1.1 és 1.2 szettek értékelése:

Az 1.1 (kiürített ellenkamra) és 1.2 (előfeszített ellenkamra) konfigurációk közötti fő eltérések a kamranyomások (16. és 20. ábra) és a dugattyúpozíciók (15. és 19. ábra) alakulásában jelentkeznek.

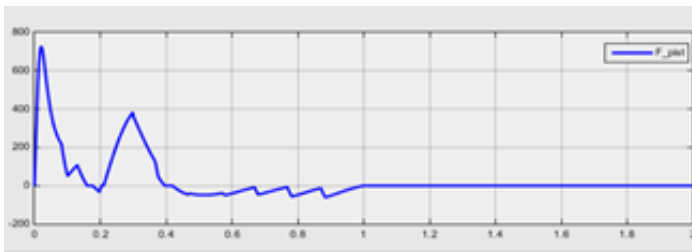
Előfeszített állapotban a dugattyú mozgása lassabb volt, ugyanakkor magasabb nyomások alakultak ki, ami nagyobb gázsűrűséget eredményezett. Ez mérsékelte a külső terhelésektől való függést, és a kétoldali nyomáskiegyenlítés stabilabb, előre jelezhetőbb működést tett lehetővé.

A 2. szimuláció célja a PWM-alapú pozícióvezérlés vizsgálata volt nyomásmentes ellenkamra mellett. A kiértékelés során a szabályozás pontosságát, a beállási időt és a lengések amplitúdóját elemeztem.

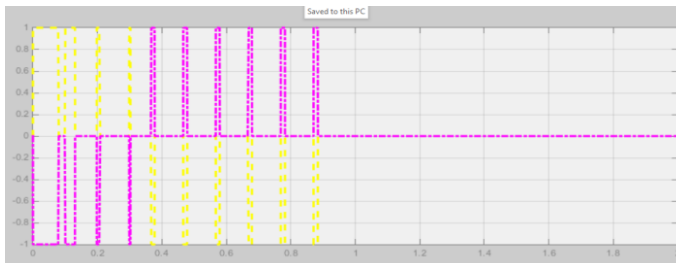
$p_{\text{set}}=6\text{bar}$, $d_{\text{in}}=2\text{mm}$, $d_{\text{out}}=10\text{mm}$, $m_{\text{load}}=20\text{kg}$, $h_p=400\text{mm}$,
 $D_p=80\text{mm}$, $d_p=36\text{mm}$



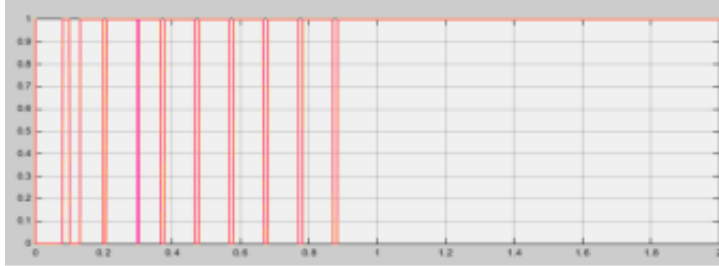
10. ábra: A dugattyúrúd helyzete (Scope s_pist (m) a Loads modellben) 2. szett



11. ábra: Dugattyúerő 2. szett



12. ábra: A és B kamra töltése (Scope Fill A, B a PLC Control modellben) 2. szett



13. ábra: A és B kamra zárása (Scope Close A, B a PLC Control modellben) 2. szett

Következtetések

A kutatás igazolta, hogy a **PWM-alapú pozícióvezérlés** pneumatikus hengereknél eredményesen alkalmazható. A **kétkamrás nyomásvezérlés** az egyoldalas módszerhez képest **öt-tízszeresére csökkentette** a külső terhelések hatását.

A modellfejlesztés során azonosított **vibrációs jelenségek** szabályozási problémát jeleztek, melyek **csillapítása a rendszer stabilitását** és vezérlési pontosságát jelentősen javíthatja.



4. TÉZIS

Az ipari pneumatikus munkahengerek vezérlése diszkrét irányítószelepekkel is megvalósítható, miközben csökkenthető a terhelésfüggőség, és egy megfelelő szabályozási módszerrel lehetővé válik a hengerek közbenső pozícióinak pontos beállítása.

Kutatásaim során új pozícióvezérlési eljárást dolgoztam ki pneumatikus dugattyúkhöz, amely **diszkrét szelepeket** alkalmaz arányos szelepek helyett, és a **szemben lévő kamrában is szabályozott nyomást** biztosít. A módszer csökkenti a dugattyú **külső terhelésekre való érzékenységet**, javítva a szabályozás pontosságát. Szimulációk és modellkísérletek igazolták, hogy **nagy pontosságú pozíciószabályozás arányos szelepek nélkül is lehetséges**, ha az ellenkamrában megfelelő nyomást alkalmazunk.

A pneumatikus hengerek képesek helyzet-, sebesség- és erőszabályozásra, azonban a **sűríthető munkaközeg** miatt érzékenyebbek a külső terhelésekre, mint a **hidraulikus rendszerek**.

Noha **egyszerűbbek és gazdaságosabbak**, a pneumatikus



hajtásokat jellemzően csak **lökévtvégi pozíciókra** alkalmazzák, mivel a **közbenső pozíciók pontos vezérlése** nehéz. Ennek megoldása azonban jelentősen növelné ipari alkalmazhatóságukat.

A módszer

A pneumatikus dugattyúk vezérlésére vonatkozó elméletek többsége a hengerkamrákban kialakuló nyomás szabályozásán alapul, amelyet jellemzően **arányos irányító szelepekkel és analóg vezérlőjelekkel** valósítanak meg. Jelen kutatás célja az volt, hogy a pozícióvezérlés **külső terhelésektől való függőségét csökkentsem**, miközben a rendszer **egyszerűbb és költséghatékonyabb diszkrét szelepeken** alapuljon.

A fejlesztéshez a **Matlab/Simulink®** környezetben készült modell és a hozzá tartozó **modellezett PLC-vezérlési logika** szolgált alapul, amelyet a *Pneumatic Piston Control Modelling and Optimization* című publikációban részletesen ismertettem [1]. Ez a tanulmány a habilitációs pályázat II. kötetének 5. számú cikke.



A szimulációs vizsgálatokat gyakorlati megvalósítás követte.

2x $\varnothing 100$ mm x 400 mm -es hengerek CD 12 szeleppel

A korábban bemutatott vezérlési logikát módosítottam: a PWM vezérlés helyett **fix időt (késleltetést)** alkalmaztam a szelepek zárásához, míg a **nyitáshoz változó időt** rendeltem. Ezt a megközelítést később **módosított PWM szabályozásként** neveztem el.

$\varnothing 80$ mm x 400 mm -es hengerek CD 12 szeleppel

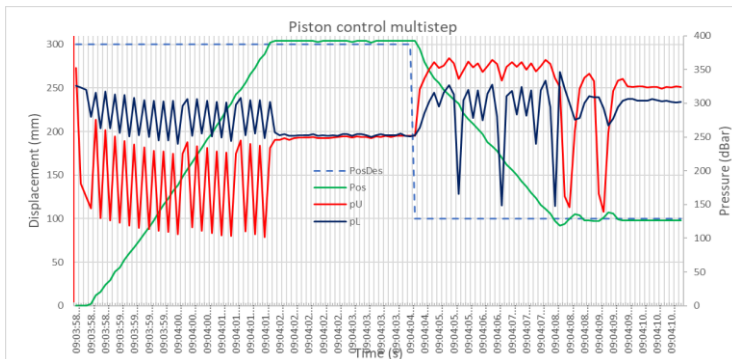
A helyszabszabályozás pontosabb vezérlése és vizsgálata érdekében módosításokat végeztem az Arduino vezérlőkódján. Első lépésként **soros nyomtatási (serial print) felületen keresztül elérhető felhasználói interfészt** alakítottam ki, amely lehetővé teszi a **dugattyú célpozíciójának közvetlen megadását** a programozói laptopról.

Az 1. ábra ugrásparancs-sorozatot mutat be, jól látható nyomáskülönbségekkel a befelé és kifelé irányuló mozgások során. A 2. ábra két konkrét pozícióváltás (0–300 mm, majd 300–100 mm) bemeneti parancsát és a

rendszer válaszát ábrázolja. Az eredmények alapján megfigyelhető a **jelentősen csökkent válaszidő**, valamint a **dugattyúsebesség érdemi növekedése**.



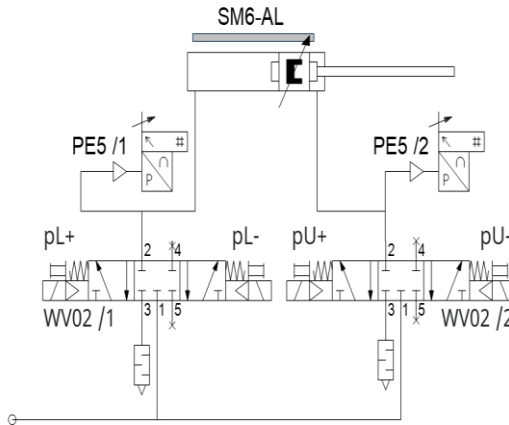
1. ábra: Ugrásbemenet-sorozat, és válaszok



2. ábra: Két ugrásbemenet, és válaszok 10kg teherrel

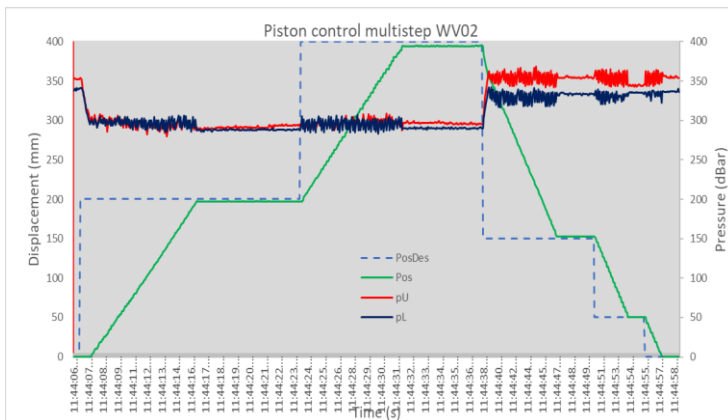
ø80mm x 400mm -es dugattyú, WV02 útírányítóval

Ebben a megközelítésben egy **ø80 mm × 400 mm-es dugattyút** használtam, amelyet **WV02 típusú irányító szelepekkel** vezéltem. Az utolsó mérési sorozatban a **CD12 (80 ms) szelep** helyett egy **10 ms kapcsolási idejű gyors szelepet** alkalmaztam (**WV02 0820039016**). A konfiguráció kapcsolási rajzát a 3. ábra mutatja.



3. ábra: A beállításhoz használt vezérlés kapcsolási rajza.

Az 5 léptetett bemenet mérési eredményeit a 4. ábra mutatja:



4. ábra: Ugrássorozat-válaszok WV02 út váltóval.

A **kék szaggatott** vonalak a parancsokat, a **zöld** a dugattyúpozíciót, a **piros és sötétkék** a kamranyomásokat



jelöli. Az időskála nem lineáris, a **sebesség és reakcióidő jól becsülhető**. Az eredmények alapján a **gyors és pontos pozíciószabályozás hagyományos szelepekkel is elérhető**, így **arányos vagy nyomásirányító szelepek nem szükségesek**. A megoldás egyszerű és költséghatékony.

Összefoglalás

Kutatásaim során egy új pozíciószabályozási módszert dolgoztam ki pneumatikus dugattyúkhöz, amelyben **arányos szelepek helyett diszkrét irányító szelepeket** alkalmaztam. A vezérelt kamrával szemben **ellenkező munkakamrában fenntartott nyomás** csökkenti a külső terhelés hatását.

Míg a korábbi kutatások igazolták a pneumatikus pozíciószabályozás lehetőségét, jelen munkám bizonyítja, hogy **pontos dugattyúvezérlés arányos szelepek nélkül is megvalósítható**, és a **külső terheléstől való függés az ellenkező nyomás alkalmazásával jelentősen mérsékelhető**.



5. TÉZIS

Az ipari pneumatikus munkahengerek súrlódásának csökkentése lehetséges a dugattyútömítés geometriájának módosításával a tömítőképesség megtartása mellett.

A kutatás előzménye

A pneumobilok építése során tapasztaltuk, hogy a gyári hengerek tömítései jelentős súrlódást okoznak, csökkentve a hatékonyságot. A probléma kezelésére a **Seal-Ring Kft.-vel** együttműködve a tömítések **méretének és anyagának módosításával** kerestünk súrlódáscsökkentő megoldást.

A módosított tömítés tervezése

Góralczyk et al. (2016) vibrációs alapú súrlódáscsökkentést vizsgált piezoaktív hengerek esetében. A vizsgálat szerint hajlító és hosszanti vibráció alkalmazásával jelentős mértékben csökkenthető a statikus és dinamikus súrlódási erő – akár 66,7%-kal is. Hasonló irányban vizsgáldott Zhang és munkatársai (2023), akik egy új típusú, hosszanti vibrációt használó pneumatikus hengert fejlesztettek ki. Az optimális tömítőbarázda-



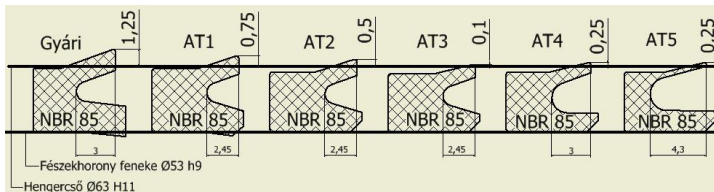
geometria kulcsszerepet játszott a súrlódás csökkentésében. A kenőanyagok fejlesztése szintén figyelemre méltó irány. Liu et al. (2011) kísérletei során titán-dioxid (TiO_2) nanorészecskékkel dúsított kenőanyagot alkalmaztak, amely bizonyítottan csökkentette a henger belső súrlódását. Vezérlés oldalról megközelítve, egy tanulmány a LuGre-modell alkalmazásával egy új, dinamikus súrlódási modellt használó vezérlő kifejlesztéséről számolt be, amely jelentős javulást eredményezett a pozíciókövetésben. Végül egy másik megközelítés a légcsapágy-technológia alkalmazása volt, amely ultra-alacsony súrlódású működést tett lehetővé, különösen nagy érzékenységgű felhasználások esetén.

A vizsgálat középpontjában a tömítés külső átmérője (D_1) állt, amely közvetlen kapcsolatban van a munkahenger belső falával. Három méretváltozatot terveztünk: maximum: a gyári tömítések közül a legnagyobb D_1 értékkel, minimum: a legkisebb D_1 érték alapján, alacsony súrlódású: a henger belső átmérőjét alig meghaladó D_1 érték.

A Rexroth Pneumatics Kft. gyári tömítéseit három beszállító (Trelleborg, Parker, Freudenberg) gyártotta.

Az anyagoptimalizálás során a Seal-Ring által kínált 12 tömítőanyagból kettőt választottunk: NBR 85 (elasztomer): ajakos tömítésekhez, és PTFE kompozit (fémes töltéssel): speciális O-gyűrűs tömítéshez.

Öt változat (AT1–AT5) készült különböző méretlánc szerint, az 1. ábra ezek túlfedését mutatja.



1. ábra Ajakos tömítések profiljai.

Súrlódásmérés

A tömítések mechanikai súrlódásának vizsgálatához speciális mérőberendezést alkalmaztunk, amelyet Török Péter tervezett (2014). A Bosch Rexroth Kft. egri csarnokában végzett mérés során a munkahenger egyre csökkenő terheléssel, fokozatosan növelt nyomáson működött. A statikus és dinamikus nyomásokat mértük, ezekből számoltuk a súrlódási erőt:



$$p \cdot A = F + F_s \quad (1)$$

Ahol: p = nyomás [bar]

A = nyomott felület [mm²]

F = nyomóerő [N]

F_s = súrlódóerő [N]

A nyomott felületet az alábbi képletből kaptam:

$$A = \frac{(D^2 - d^2)\pi}{4} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (2)$$

Ahol: D = dugattyúátmérő [mm]

d = dugattyúrúd átmérő [mm]

Abban az esetben, ha az egyenlet két oldala egyenlő, akkor nyugalmi állapotról beszélhetünk. A súrlódóerő mind statikus mind dinamikus esetben következőképpen írható fel:

$$F_s = p \cdot A - F \text{ [N]} \quad (3)$$

Ajakos tömítések összehasonlítása

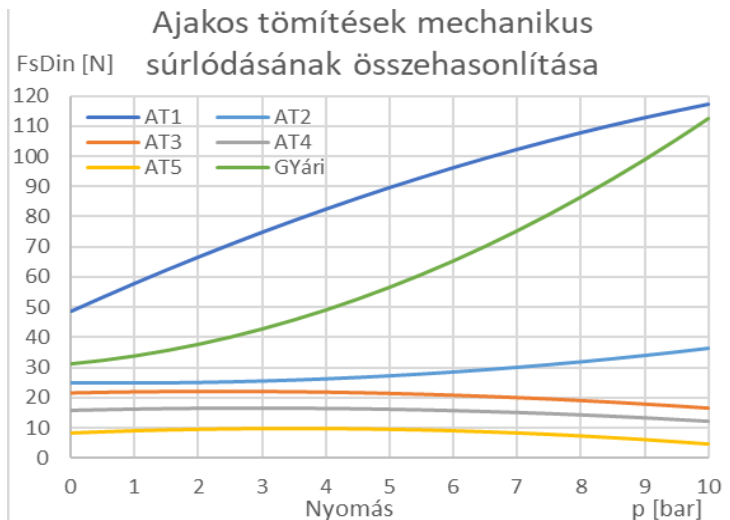
Az AT3–AT5 tömítések esetében a külső átmérő csökkentésével és a beszűrés módosításával a súrlódás jelentősen csökkent. Az AT5 tömítés a legjobb eredményt produkálta, kb. 95%-os súrlódáscsökkenéssel 8 bar nyomáson. Az AT4 tömítés is közel 90%-os javulást mutatott (2. ábra).



Kiértékelés

A VDMA-szabvány szerinti szivárgásvizsgálat során az öt ajakos tömítés közül **négy szivárgásmentesnek bizonyult**, kivételt az **AT3** jelentett.

A **40 mérés** alapján az **AT4 és AT5 tömítések** jelentős, akár **95%-os súrlódáscsökkenést** eredményeztek a gyári megoldásokhoz képest, a tömítőképesség megtartása mellett. A módosított tömítések így **energiahatékonyabb és versenyképes alternatívát** kínálnak a pneumobil alkalmazásokban.



2. ábra: Ajakos tömítések mechanikai súrlódásának összehasonlítása



III. A KUTATÁS ÉS A BEMUTATOTT EREDMÉNYEK HATÁSA, VISSZHANGJA

A pályázatomban bemutatott kutatásaim a pneumatikus járműhajtás, modellezés és irányítás területén, több hazai és nemzetközi kutatási irányt is inspiráltak. A publikációimban bemutatott eredményekre több tudományos munka is hivatkozott, amelyek jól mutatják a téma időszerűségét és gyakorlati alkalmazhatóságát.

Hazai viszonylatban többek között a Debreceni Egyetem Műszaki Karának kutatói (Szántó Attila, Hajdu Sándor, Sziki Gusztáv Áron) hasznosították a pneumobilok modellezésével kapcsolatos eredményeimet járműdinamika és alternatív hajtású prototípus járművek szimulációs vizsgálatában.

Dr. Lázár-Fülep Tímea (Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar) az autonóm járműrendszerek megbízhatóságának vizsgálata kapcsán hivatkozott az általam kidolgozott irányítási elvekre.

Ugyancsak a hazai tudományos közösség részéről idézte munkámat Bertalan Beszédes (Óbudai Egyetem, Alba



Regia Kar), az általam fejlesztett pneumatikus járműmodelleket és vezérlési sémákat mechatronikai rendszerek oktatásában és szimulációs laborfeladatok kidolgozásában használta fel, elsősorban Matlab/Simulink környezetben.

Nemzetközi szinten is érkezett visszajelzés kutatásaimra. A Bukaresti Műszaki Egyetem (University Politehnica of Bucharest) kutatói – M. Ghinea, M. Agud és M. Bodog – az Automation Studio™ platformon végzett pneumatikus szimulációikat a modellezési eredményeimmal vetették össze. Hasonló módon, a Wrocław Műszaki Egyetem gépészmérnökei (P. Márkó, W. Fiebig), valamint a Riga Műszaki Egyetem és a Lett Élettudományi Egyetem munkatársai (A. Rugajs és szerzőtársai) járműformák aerodinamikai vizsgálataiban, valamint alternatív hajtásláncú járművek vezérlési rendszerének fejlesztésében alkalmazták módszereimet.

Grzegorz Filo (Krakkói Műszaki Egyetem) fuzzy logikán alapuló irányítási vizsgálataiban, valamint a De Montfort University (Egyesült Királyság) Electronics and Mechatronics Group-jához tartozó kutatók (A. K. Al



Mhdawi és munkatársai) önvezető járművek szabályozási modelljeinek optimalizálásában hasznosította az általam kidolgozott vezérlési struktúrákat.

Kutatási eredményeimet rendszeresen ismertettem az IFFK, ACIPV, IEEE SISY és InnoVeTAS nemzetközi tudományos konferenciákon, amelyek kiváló fórumot biztosítottak a szakterületi visszajelzések fogadására, a nemzetközi tudományos együttműködések megalapozására, valamint az elért tudományos eredmények széles körű szakmai disszeminációjára.

A tézispontokhoz kapcsolódó cikkekre érkezett független nyilvános idézetek száma a pályázat benyújtásának pillanatában 22.

Az ipari visszajelzések szintjén a Seal-Ring Kft.-vel való együttműködés során kifejlesztett tömítésoptimalizálási koncepció (5. tézispont [1]) a cég gyakorlatába is beépült, és a kutatási együttműködés révén egy új, tömítéstechnikai megközelítést is teszteltek Ipari felhasználási, és pneumobil verseny célra is.



A kutatási témáim szorosan integrálódtak az oktatási tevékenységembe, amelynek során projektmunkák, hallgatói szakdolgozatok, diplomamunkák és TDK-dolgozatok konzulensi támogatását láttam el. A pneumobil járművekhez kötődő vezérléstechnikai, szerkezettervezési, irányítástechnikai és modellezési kérdéseket feldolgozó munkák során a hallgatók önálló mérnöki kutatásokat végeztek. A konzultációkon keresztül nyújtott egyéni szakmai támogatás érdemben támogatta a hallgatók gyakorlatorientált gondolkodásának kialakulását, miközben elősegítette elméleti tudásuk szakterületi elmélyítését. A benyújtott dolgozatok közül több elismerésben részesült, ami egyértelműen visszatükrözi kutatási tevékenységem eredményes integrálódását az oktatásba.

Szakdolgozatok:

Heisz Patrik **Vezérlés tervezése és optimalizálása a PowAir csapat pneumobiljához** Szakdolgozat OE-BGK-MEI 2017

Huszár Tamás **Légajtásos gépjármű, mint az alternatív (villamos) hajtású gépjármű alternatívája** 2019/2020/II

Jenővári Ádám: Mechatronikai mérnöki Bsc (levelező), ipari robotrendszerek specializáció: **Pneumobil pneumatikai rendszerének modellezése** 2020/2021/I



Hajdu Levente Gépészmérnök, járműtechnika **Pneumobil vázának terhelésvizsgálata** 2020/2021/I

Jenei Bence Járműtechnika **Pneumatikus hajtású jármű első felfüggesztésének vizsgálata** 2020/2021/I

Khalifa Omar Naim **Pneumatic piston control optimization** 2024/2025/I

Kapcsolódó TDK dolgozatok:

XXXVI TDK 2011, Autótechnika és diagnosztika Szekció:

Piukovics Zsolt, II. évfolyam **A Talicskakormányzás Egy Pneumobilon** Konzulens: Dr. Szakács Tamás adjunktus

Knitlhoffer Zoltán, II. évfolyam **Pneumatikus Működtetésű Forgó Tárcsás Hajtómű** Konzulens: Dr. Szakács Tamás

XXXVII TDK 2012 November

2012 Piukovics Zsolt **Változtatható hajtókarhosszú pneumatikus motor tervezése és kivitelezése** (közönségdíj)

XLV Tudományos Diákköri Konferencia 2017. április 19.

Prischetzky Dániel **Pneumobil Bukókeret Vizsgálata,**

58. TDK 22/23 II

Dunkelberg Mertin, Wittrock Max **Automatikus pneumatikus hengermagasság-szabályozás csökkentett érzékenységgel a külső erőkre.** (angol nyelven)

59. TDK 2024. ÁPRILIS 24. Jármű- és irányítástechnika szekció

Lovassy György **HERNYÓTALPAS PNEUMOBIL**



IV. IRODALMI HIVATKOZÁSOK LISTÁJA

TÓTH István Tibor, Compressed Air, as an Alternative Fuel 1st Agria Conference on Innovative Pneumatic Vehicles ACIPV 2017 May 05, 2017 Eger, Hungary ISBN 978-963-449-022-7

Attila Szántó, Sándor Hajdu, Gusztáv Áron Sziki: Dynamic Simulation of a Prototype Race Car Driven by Series Wound DC Motor in Matlab-Simulink. Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 17, No. 4, 2020

Péter, T.; Lakatos, I.; Szauter, F.; Pup, D.: Complex analysis of vehicle and environment dynamics MESA 2016 - 12th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications - Conference Proceedings 7 October 2016, Article number 758711212th

Heisz Patrik Vezérlés tervezése és optimalizálása a PowAir csapat pneumobiljához Szakdolgozat OE-BGK-MEI 2017

Haitao Qi, Gary M. Bone, and Yile Zhang: Position Control of Pneumatic Actuators Using Three-Mode Discrete-Valued Model Predictive Control. Actuators 2019, 8, 56; doi:10.3390/act8030056
www.mdpi.com/journal/actuators

Steve Vincent, John Bridges: Positioning with Air. Power & Motion Tech April 14, 2015,
<https://www.powermotiontech.com/pneumatics/pneumatic-valves/article/21884761/positioning-with-air>



Góralczyk, M. et al. (2016). "Piezoelectric Actuator-Based Friction Reduction in Pneumatic Cylinders". *Sensors and Actuators A: Physical*, 252, 112–120.

[Zhang, X. et al. (2023). "Novel Pneumatic Cylinder with Longitudinal Vibration to Reduce Friction". *Chinese Journal of Mechanical Engineering*.

Liu, Y. et al. (2011). "Application of TiO₂ Nanogrease in Pneumatic Cylinder Friction Reduction". *Advanced Materials Research*, 317–319, 503–507.

Xuan-Bo Tran Nonlinear Control of a Pneumatic Actuator Based on a Dynamic Friction Model. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*.

Cao J, Zhu X, Li F, Jin X. Ultra-Low Friction Pneumatic Cylinder Using Air Bearings. *Advances in Mechanical Engineering* (2019). DOI: 10.1177/1687814019839873.

Török Péter: Szakdolgozat 2014 OE-BGK Hallgató törzskönyvi száma: 002504/FI38878/B



V. A TÉZISPONTHOZ KAPCSOLÓDÓ TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

A publikációk aktuális listája részletezve megtalálható:

<https://m2.mtmt.hu/gui2/?type=authors&mode=browse&sel=10030684>

A tézisekhez kapcsolódó publikációk:

[1] Szakács, Tamás; Naim, Khalifa **Pneumatic Piston Control Optimization**. Journal of Physics: Conference Series, (2024), 2848 012002. DOI: [10.1088/1742-6596/2848/1/012002](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2848/1/012002)

[2] Szakács, Tamás **Pneumatic Piston Control Modelling and Optimization**. Acta Polytechnica Hungarica, (2023), 20(6), 249–265 Független nyilvános idéző összesen: 2 DOI: [10.12700/APH.20.6.2023.6.14](https://doi.org/10.12700/APH.20.6.2023.6.14)

[3] Szakács, Tamás; Frigyik, András **Vehicle Dynamic Development and System Analysis Project**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, (2022) DOI:[10.1088/1757-899X/1237/1/012015](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1237/1/012015)

[4] Márkó, Gilián; Szakács, Tamás **Pneumatic Piston Expansion Timing Using Fuzzy Logic**. In: IEEE 19th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2021), 77–82. Független nyilvános idéző összesen: 2 DOI: [10.1109/SISY52375.2021.9582467](https://doi.org/10.1109/SISY52375.2021.9582467)



- [5] Szakács, Tamás **A Dynamic Model of a Pneumobile Vehicle.** Journal of Physics: Conference Series, (2021), 1935 012016. DOI: [10.1088/1742-6596/1935/1/012016](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1935/1/012016)
- [6] Szakács, Tamás **Egy pneumobil jármű Matlab®/Simulink-ben készült (jármű)dinamikai modellje.** In: Péter, Tamás (szerk.) XIV. IFFK 2020: Innováció és fenntartható felszíni közlekedés konferencia, Budapest, Magyarország: Magyar Mérnökakadémia (MMA), 2020, pp. 1–5.
- [7] Szakács, Tamás: **Vehicle Modelling Related to Pneumobile Competitions: A Pneumobil versenyekhez kapcsolódó járműmodellezések.** GÉP, 71(3–4), 2020, pp. 5–10.
- [8] Szakács, Tamás: **Control of a pneumatic cylinder: Pneumatikus henger szabályozása.** GÉP, 71(3–4), 2020, pp. 95–101.
- [9] Szakács, Tamás: **A Matlab/Simulink® dynamic model of a pneumatic piston and system for industrial application.** In: IEEE 2020 4th International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT), Piscataway (NJ), USA: IEEE, 2020, pp. 1–8. Független nyilvános idéző összesen: 3. DOI: [10.1109/ISMSIT50672.2020.9255177](https://doi.org/10.1109/ISMSIT50672.2020.9255177)
- [10.] Pokorádi, László; Szakács, Tamás: **Graph Modelling of Pneumatic Vehicle Control System.** In: Pokorádi, László (szerk.) Proceedings of the 3rd Agria Conference on Innovative Pneumatic Vehicles – ACIPV 2019, Eger, Magyarország: Óbudai Egyetem Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet, 2019, pp. 43–51. Független nyilvános idéző összesen: 1



-
- [11] Szakács, Tamás: **Modelling and Validation of a Pneumobil**. In: Pokorádi, László (szerk.) Proceedings of the 3rd Agria Conference on Innovative Pneumatic Vehicles – ACIPV 2019, Eger, Magyarország: Óbudai Egyetem Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet, 2019, pp. 31–35. Független nyilvános idéző összesen: 6
- [12] Szakács, Tamás; Pokorádi, László: **Pneumobil vezérlési rendszerének gráfvizsgálata**. Repüléstudományi Közlemények, 2019(1), pp. 53–68 Független nyilvános idéző összesen: 1. DOI: [10.32560/rk.2019.1.5](https://doi.org/10.32560/rk.2019.1.5)
- [13] Szakács, Tamás: **Pneumatikus jármű pneumatikus rendszerének modellezése**. In: Péter, Tamás (szerk.) XII. IFFK 2018: Innováció és fenntartható felszíni közlekedés, Budapest, Magyarország: Magyar Mérnökakadémia (MMA), 2018, p. 34.
- [14] Szakács, Tamás: **Pneumatic modelling of a pneumobil**. In: Pokorádi, László (szerk.) Proceedings of the 2nd Agria Conference on Innovative Pneumatic Vehicles – ACIPV 2018, Eger, Magyarország: Óbudai Egyetem, 2018, pp. 25–30. Független nyilvános idéző összesen: 6
- [15] Szakács, Tamás: **Pneumatikus járműhajtás múltja, jövője**. In: Péter, Tamás (szerk.) XI. IFFK 2017: Innováció és fenntartható felszíni közlekedés, Budapest, Magyarország: Magyar Mérnökakadémia (MMA), 2017, pp. 176–180.
- [16] Szakács, Tamás; Pintér, Péter: **A pneumobilok nyomában....** Mezőgazdasági Technika, 2017(7), pp. 34–35.
- [17] Szakács, Tamás; Pintér, Péter: **Pneumatikus hajtású járművek**. Mezőgazdasági Technika, 2017(6), pp. 34–37.



-
- [18] Kiss, György; Pintér, Péter; Szakács, Tamás: **Vehicle Frame Optimization using Finite Element Method**. In: Pokorádi, László (szerk.) Proceedings of the 1st Agria Conference on Innovative Pneumatic Vehicles – ACIPV 2017, Eger, Magyarország: Óbudai Egyetem, 2017, pp. 59–63. Független nyilvános idéző összesen: 1 |
- [19] Heisz, Patrik; Takács, Beatrix; Prischetzky, Dániel; Szakács, Tamás: **Pneumatikus járművek műszaki megoldásai**. In: Péter, Tamás (szerk.) Innováció és fenntartható felszíni közlekedés, IFFK 2016, Budapest, Magyarország: Magyar Mérnökakadémia (MMA), 2016, pp. 47–53.
- [20] Szakács, Tamás: **Pneumatikus járműhajtás múltja, jövője**. In: Péter, Tamás (szerk.) IFFK 2015, Budapest, Magyarország: Magyar Mérnökakadémia (MMA), 2015, pp. 1–5.
- [21] Szakács, Tamás; Piukovics, Zsolt; Knittlhoffer, Zoltán; Bányácsky, Dániel: **Vehicle protrusion by compressed air**. In: MECH-CONF 2011, 1st Regional Conference – Mechatronics in Practice and Education, 2011, pp. 34–37.
- [22] Szakács, Tamás: **Az ipari pneumatikus munkahengerek mechanikus súrlódásának csökkentése** GRADUS 12: 2 Paper: 2025.2.ENG.001, 12 p. (2025) DOI: 10.47833/2025.2.ENG.001