

# Dunaújváros

A Dunaújvárosi Egyetem online folyóirata 2022. X. évfolyam I. szám

Műszaki-, Informatikai és Társadalomtudományok



**SZABÓ ATTILA**  
Az elektromotorok  
hatásfoknöve-  
lése a új típusú  
lágymágneses szerkezetű  
anyagok alkalmazásával



**PERGEL DÓRA**  
Keménységmérés módszerének  
és történetének áttekintése



**NAGY ANDRÁS**  
Siklóernyők repülésmechanikai  
vizsgálata



**MARIO MAURO SALVATORE ET AL.**  
Design of PEIS: A Low-Cost  
Pipe Inspector Robot



# Dunakavics

A Dunaújvárosi Egyetem online folyóirata 2022. X. évfolyam I. szám

Műszaki-, Informatikai és Társadalomtudományok

MEGJELENIK ÉVENTE 12 ALKALOMMAL

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

András István, Bacsa-Bán Anetta, Balázs László,  
Nagy Bálint, Németh István, Pázmán Judit, Rajcsányi-Molnár Mónika.

Felelős szerkesztő Németh István  
Tördelés Duma Attila

Szerkesztőség és a kiadó címe 2400 Dunaújváros, Táncsics M. u. 1/a.

Kiadja DUE Press, a Dunaújvárosi Egyetem kiadója  
Felelős kiadó Dr. habil András István, rektor

<http://dunakavics.due.hu>

ISSN 2064-5007

# Tartalom

SZABÓ ATTILA

*Az elektromotorok hatásfoknövelése a új típusú lágymágneses szerkezeti anyagok alkalmazásával*

5

PERGEL DÓRA

*Keménységmérés módszerének és történetének áttekintése*

17

NAGY ANDRÁS

*Siklóernyők repülésmechanikai vizsgálata*

31

MARIO MAURO SALVATORE–ALESSIO GALLORO–LEONARDO MUZZI

–GIOVANNI PULLANO–PÉTER ODRY–GIUSEPPE CARBONE

*Design of PEIS: A Low-Cost Pipe Inspector Robot*

39

*Galéria*

(Duma Bálint fotói)

59



# *Az elektromotorok hatásfoknövelése a új típusú lágymágneses szerkezeti anyagok alkalmazásával*

**Összefoglalás:** A kutatás célja elektromos hajtásokban alkalmazott elektromotorok elektromos hatásfokának növelése az elektromotorok szerkezeti anyagának helyes megválasztásával. Kutatásunkban kísérletet teszünk az Fe-Si alapú kristályos mikroszerkezetű mágneses anyagok Fe alapú amorf ötvözetekkel történő kiváltására, amelynek következtében várakozásaink szerint az elektromotorok nagyobb fordulatszámon is gazdaságosan üzemeltethetők lesznek. Az amorf szerkezetű anyagok kedvező mágneses tulajdonságainak köszönhetően a munka eredményeként hatásfoknövekedést érhetünk el. Kihívást jelent azonban az amorf lágymágneses lemezek alakítása, így kutatómunkánk elsődleges célja az alakítástechnológia kidolgozása, amellyel a lágymágneses lemezek előállíthatók.

**Kulcsszavak:** Lágymágneses anyag, amorf, elektromotor.

**Abstract:** The aim of the research is to increase the electrical efficiency of electric motors used in electric drives by choosing the right materials for the electric motors. In our research, we are attempting to replace Fe-Si-based crystalline microstructure magnetic materials with Fe-based amorphous alloys, as a result of which we expect that electric motors can be operated economically even at higher speeds. Thanks to the favorable magnetic properties of materials with an amorphous structure, we can achieve an increase in efficiency as a result of the work. However, it is a challenge to form amorphous soft magnetic plates, so the primary goal of our research work is to develop the forming technology that can be used to produce soft magnetic plate packages.

**Keywords:** Soft magnetic material, metallic glass, electric motor.

\* *Dunaújvárosi Egyetem,  
Gépészeti és Anyagtudományi  
Tanszék  
E-mail:*

[1] Európai Környezetvédelmi Ügynkség: *Energia – a felhasználás jellemző mutatói* <https://www.eea.europa.eu/hu/themes/energy/intro> (Letöltve: 2022. 10. 20).

[2] Moriarty, Patrick–Damon, Honnery (2016): „Global transport energy consumption.” *Alternative energy and shale gas encyclopedia*. Pp. 651–656.

[3] Payam, Nejat–Fateme, Jomehzadeh–Mohammad, Mahdi–Taheri, Mohammad, Gohar–Muhd, Zaimi–Abd., Majid (2014): A global review of energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions and policy in the residential sector (with an overview of the top ten CO<sub>2</sub> emitting countries), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43., (2015.), Pp. 843–862. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.066>.

[4] Nagy, András (2019): „Electric aircraft-present and future.” *Production Engineering Archives*, 23.,

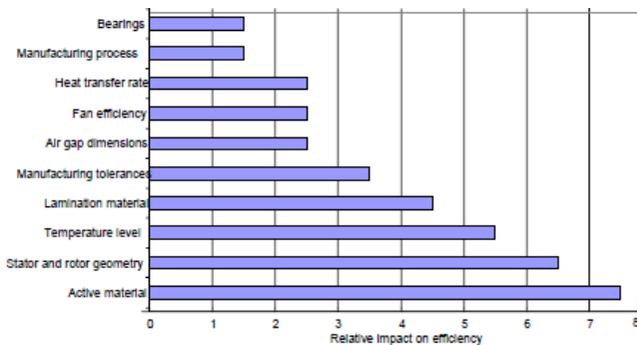
## Bevezetés

Az energia nélkülözhetetlen szerepet játszik a modern társadalomban. Bár a megújuló energiák alkalmazása elterjedőben van, de jelentős részét még fosszilis energiahordozókból nyerik. Európában jelenleg a felhasznált energia 77%-a fosszilis tüzelőanyagokból áll elő [1]. A közlekedés energiaigénye a világ globális energiaigényének mintegy 33%-a [2], melynek 78,6%-át [3] a közúti közlekedés használja fel. A gépjárművek energiagazdálkodásának javítására tehát kiemelten fontos, globális, energetikai és környezetvédelmi problémákat egyaránt érintő kutatási terület. A fosszilis tüzelőanyagokat kiváltó gazdaságosabban előállítható és környezetet kevésbé terhelő alternatív energiaforrások, mint például a villamos energia közúti közlekedésben való elterjedése elsősorban az energiatárolási nehézségek miatt még nem problémamentes. Szélesebb körű elterjedésének feltétele az egy töltéssel megtehető távolság növelése, és a jelenleg használt gépjárművek hatótávolságával összemérhető hatótávolság elérése. Ennek lehetséges módja az energiatárolás hatékonyságának növelése mellett a járművek energiagazdálkodásának javítása.

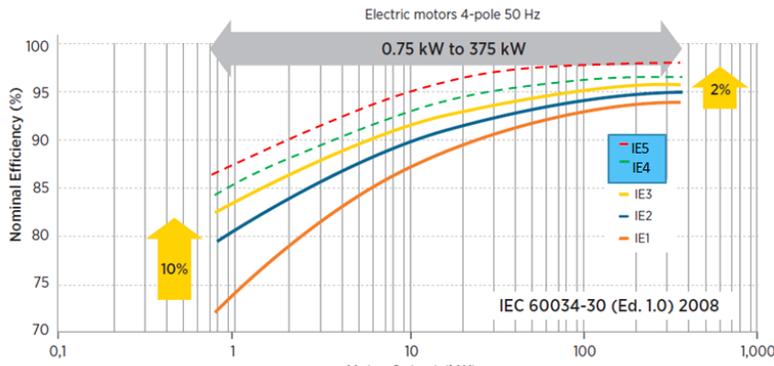
**Az elektromotorok hatékonyságának növelése az utóbbi években kiemelt szerepet kapott, ugyanis az elektromos hajtások térhódítása közúti közlekedésben egyre jelentősebb, illetve a légit közlekedésben is a figyelem középpontjába került.** [4] A járművek hatásfokjavításának egy lehetséges lehetősége a járművek meghajtására szolgáló elektromotorok hatásfokának növelése.



2. ábra Az indukciós motor teljesítményének lehetséges fejlesztési területeinek hatása [5]



3. ábra IE1 – IE5osztályú motorok hatékonysága (4 pólusú) [5]



A korszerű anyagok és gyártási technológiák alkalmazásával a működés során keletkező veszteségek tovább csökkenthetők. Fontos megjegyezni, – alapul véve az OECD kimutatását – hogy kis, mindössze néhány tized %-os hatásfokjavulás is jelentős energiamegtakarítást jelent; a világon használatban levő villanymotorok jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható legnagyobb hatásfokúakra cserélésével 2030-ig az összes energia-megtakarítás elérné a 322 TWh-t, amely energia konverziója során mintegy 206 Mt CO<sub>2</sub> szabadul fel. [5]

[5] Paul, Waide–Conrad, U. Brunner (2011): Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. *International Energy Agency*,

[6] A. Hiura,–Y. Oda,–K. Tomita–Y. Tanaka, (1998): *Magnetic properties of high-permeability thin gauge non-oriented electrical steel sheets* J. Phys. IV France, 08 PR2 (1998) Pr2-499-Pr2-502 DOI: <https://doi.org/10.1051/jp4:19982115>

[7] *Non oriented, fully processed electrical sheet – Cogent* – adatlap letöltve: <https://cogent-power.com/> [Downloads 2018. 02. 15.]

[8] Herzer, G. (1997): *Handbook of Magnetic Materials* ed. Buschow K. H. J. 10., (3.), P.415 Amsterdam: Elsevier Science.

[9] *METGLAS adatlap:* <https://metglas.com/wp-content/uploads/2016/12/Amorphous-Alloys-for-Transformer-Cores-.pdf> (Letöltve: 2017. 11. 13.)

Motorok hatásfokjavításának lehetséges módszere a motor fordulatszámának növelése. A növelt motorfordulatszám azonban új anyagok alkalmazását teszi szükségessé. a motor forgórésze (5. ábra) a megemelt fordulatszám során fellépő centrifugális erő hatására fokozott mechanikai terhelést kap, amelyet a jelenleg alkalmazott kalickaanyagok, mint alumínium és nagy tisztaságú réz (Cu-ETP), alakváltozás nélkül már nem viselnek el. A forgórészben alkalmazott vezetőkeret (kalicka) szilárdságának elektromos vezetőképesség megtartása melletti növelése illetve a gyártástechnológia fejlesztése a motorfejlesztés fontos kutatási területe.

A növelt fordulatszám megnövelt mágneses térfrekvenciával érhető el, mely frekvenciát a jelenleg mind a forgórészben, mind pedig az állórészben alkalmazott kristályos szerkezetű vasmagok nem képesek követni, a permeabilitásuk lecsökken, továbbá koercitív erejük megnő, mely a motor működése során teljesítményvesztést és hatásfokcsökkenést eredményez [6] [7].

Új típusú, amorf szerkezetű vasalapú magok alkalmazása, - mely magokat a transzformátorgyártásban már nagy sikerrel alkalmaznak - a jelenleg alkalmazott Fe-Si lemezek hátrányos tulajdonságait kiküszöböli, és nagyobb statikus szilárdsága a mechanikailag is hozzájárul a fordulatszám-növelés lehetőségéhez.

Az elektromotorgyártásban elterjedt lágymágneses anyagok

Irodalmi eredmények szerint amorf lágymágneses anyagok felhasználásával a villamos motorok hatásfoka növelhető, a villamos teljesítménysűrűség fokozható [8] [9].

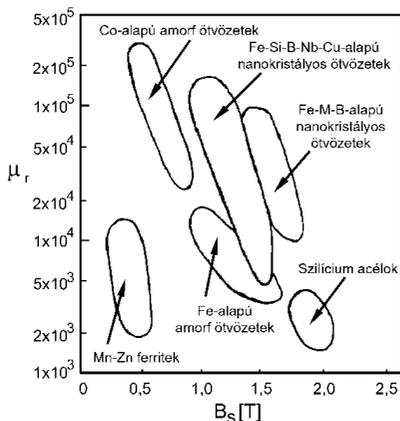
A kutatás során tehát kísérletet teszünk a jelenleg széles körben alkalmazott Fe-Si-acélok FeSiB alapú amorf ötvözzel történő helyettesítésére. Ennek egy eredménye lehet a rotor nagyobb frekvenciákon történő alkalmazhatósága is.

Az alkalmazni kívánt anyagcsalád legfontosabb tulajdonságai a következők: kis koercitív erő, legalább közepes telítési indukció, ezekből eredően jó hatásfok. A jelenleg alkalmazott Fe(Si) alapú transzformátor-lemezekkel történő összehasonlítását az 4. ábrán láthatjuk.

A 4. ábra a relatív permeabilitást ábrázolja a telítési indukció függvényében különböző klasszikus és amorf, ill. nanokristályos anyagokban. Az 1 kHz en végzett mérések alapján nyilvánvalóak a Fe-alapú amorf és nanokristályos lágymágneses ötvözetek előnyei.

A projekt célkitűzésében tehát FeSiB amorf ötvözet bevezetését tervezzük a hagyományosan elterjedt FeSi-acélok helyett. Ezen anyagok alkalmazását tervezzük növelt fordulatszámú villanymotorok forgórész és állórész prototípusainak építésével

4. ábra A telítési indukció és a relatív permeabilitás kapcsolata különböző lágymágneses anyagokban ( $F=1\text{ kHz}$ ) [10]



Elgondolásunkat elősegíti az a tény, hogy az ilyen anyagok mágnesezési görbéinek alakja nagymértékben alakítható különféle hőkezelési eljárásokkal, így a különböző frekvenciájú gerjesztésekre adott válasz tervezhetővé válik. Ennek egy eredménye lehet a rotor nagyobb frekvenciákon történő alkalmazhatósága is.

A jelenleg elektromotor-gyártásban elterjedt lágymágneses anyagok mágneses jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze.

[10] A. Makino, A.-Inoue, T. Masumoto (1995): Nanocrystalline soft magnetic Fe-M-B (M=Zr, Hf, Nb) alloys produced by crystallization of amorphous phase (overview). *Materials Transactions, JIM*, 36., (7.), Pp. 924-938.

[8] Herzer, G. (1997):  
*Handbook of Magnetic  
 Materials ed. Buschow K. H.  
 J. 10., (3.), P.415* Amsterdam:  
 Elsevier Science.

[11] *Non oriented, fully  
 processed electrical sheet –  
 Cogent* – adatlap letöltve:  
<https://cogent-power.com/>  
 [Downloads 2018. 02. 15.]

**1. táblázat. Nagyfrekvenciás alkalmazásokra szánt lágymágneses anyagok jellemző mágneses veszteségei. [11]**

Grade	Gauge	Max P 10/400 (W/kg)	Max P 10/2500 (W/kg)	Typ P 10/400 (W/kg)	Typ P 10/2500 (W/kg)	Typ RP0.2
N010	0,10	13,0	135	12,1	119	400
N012	0,12	13,5	152	11,8	132	400
N015	0,15	14,0	-	12,1	-	400
N018	0,18	14,3	179	12,3	161	400
N020	0,20	15,0	215	12,2	205	400
N027	0,27	15,0	-	13,0	-	-
N030	0,30	17,0	-	15,9	-	400

#### AZ AMORF ÖTVÖZETEK

Noha az amorf ötvözetek kutatása már 50 éves múltra tekint vissza, még mindig sok, nem tisztázott kérdés foglalkoztatja a kutatókat ebben a témakörben. A kristályos rend hiánya a mágneses tulajdonságok megszokott értelmezését nem teszi lehetővé. [8]

A kutatások elején az amorf anyagok nagyon ígéretesnek mutatkoztak, széles körű alkalmazásukat tervezték néhány kiugróan jó mágneses tulajdonságuk miatt. Az érdeklődés irántuk a rendkívül kicsi koercitív erő miatt indult meg. A  $H_c$  egy nagyságrenddel kisebb, míg a permeabilitásuk egy nagyságrenddel nagyobb a szilíciumacélokéhoz viszonyítva. Az amorf anyagok fajlagos ellenállása általában nagyobb a kristályos anyagokhoz képest (a nagy metalloid tartalom miatt, valamint a rendezetlen kristályszerkezet akadályozza a vezetési elektronokat), amely hozzájárul az amorf anyagok jelentősen kisebb vasvesztéséhez is. Az utóbbiak miatt nagyobb frekvenciás alkalmazások ideális alapanyaga. A gyorsított állapot („as cast”) kiváló tulajdonságai még jobban javíthatók hőkezeléssel egy olyan közbülső hőmérsékleten, ahol a minták kristályosodása még nem indul el. Az „as cast” állapot ugyanis belső feszültséggel terhelt, amely nagy  $H_c$ -vel és kisebb permeabilitással jár együtt. [8]

Az általános elterjedésüknek néhány rossz tulajdonságuk emelt gátat. Az egyik a kis szalagvastagság, amely megnehezíti a gyártást követő alakíthatóságot, ez által a megnehezíti a felhasználhatóságot. A másik ok az általánosan érvényes kis telítési indukció, amely a nagy teljesítményű alkalmazásoknak szabott határt. Kisebb hátrány, hogy az amorf anyagok Curie-hőmérséklete általában kisebb, mint az azonos összetételű kristályos anyagoké.

## Alkalmazott technológiák

A kutatómunkánk megoldandó feladatköre a lemezvágás technológiájának kidolgozása. Ez komoly kihívást jelent, ugyanis a lemezvastagság (25 mikrométer) határ szab a mechanikus technológiák alkalmazhatóságának. Célkitűzésünkben éppen ezért nagy hangsúlyt fektetünk olyan vágástechnológiák alkalmazására, amelyekkel lehetőség nyílik a lemezek kívánt geometriára történő alakítására tekintetbe véve a felhasznált alapanyag termikus igénybevétellel szemben tanúsított érzékenységét is.

A hagyományos mechanikus technológiák biztosította termelékenység egyedi megmunkálásokkal csak úgy érhető el, ha a lemezeket nem egyesével munkáljuk ki a szükséges geometriára, hanem minél nagyobb lemezipakettet egyben kezelve több lemezt alakítunk.

Ebben az esetben több vágástechnológia alkalmazhatósága – úgy mint vízsugaras vagy lézersugaras technológiák - annak technológiai korlátai miatt nem bizonyulnak gazdaságosnak. [12] [13]

Kutatómunkánk jelen fázisában tehát kísérletet teszünk a csévetest szikraforgácsolással történő előállítására.

Elgondolásunkat segíti az a tény, hogy szikraforgácsolással nagy keresztmetszetű elektromosan vezető anyagokat tudunk kívánt geometriára alakítani úgy, hogy a munkadarab a teljes vágott keresztmetszetben egyenletes minőségű és pontosságú, illetve a munkadarabot számottevő termikus igénybevétel nem éri.

A szikraforgácsolás olyan fémforgácsolási technológia, ahol az elektróda és a munkadarab között szabályozott elektromos ívkisülések folyamata választja le a munkadarabról az anyagi részecskéket. Először nem folyik áram az elemek között, mert a dielektrikum szigetelőként működik. Ha a két felület közötti távolságot lecsökkentjük, egy bizonyos (nagyon kicsi) távolságban egy szikra létrejötté-

[12] Attila Szabó,–  
Dániel Koti,–Orsolya  
Santa,–Gábor Kozsely  
(2019): Development  
of the shaping method  
of amorphous ribbons  
used in electric drives  
Perner's Contacts May  
2019, spec. issue 2.,  
(19.), Pp. 282–291.

[13] Attila Szabó,–  
András Nagy,–Gábor  
Kozsely (2019): Laser  
Cutting Technology  
Development for  
Fe-based Metallic  
Glass, SISY 2019,  
IEEE 17th Interna-  
tional Symposium on  
Intelligent Systems  
and Informatics,  
September 12–14.  
2019 Subotica. Közle-  
mény: 30939260

[14] Gergő Ferenc (1986): *Szikraforgácsolás*. Ipari szakkönyvtár. Budapest: Műszaki.

vel megtörténik a kisülés. A kisülés során csökken a feszültség, és az áram jelentős hőmérséklet-emelkedést okoz a szikra becsapódási helyén. A hőfejlődés hatására a kis fémrészecskék megolvadnak és elpárolognak. Ha megszakítjuk az áramkört, a megolvadt anyag robbanásszerűen kihordódik a kráterből, a kisülési csatorna deionizálódik és egy kis kráter marad vissza. [14]

## Felhasznált eszközök és anyagok

Kutatómunkánk során az alábbi, Molibdén szálás huzalszikra-forgácsoló berendezést alkalmaztuk.

### *5. ábra Az alkalmazott szikraforgácsoló berendezés*



A szikraforgácsoló gép jellemző adatait az alábbi táblázatban láthatjuk.

2. táblázat A szikraforgácsoló gép műszaki adatai

Műszaki paraméter	Műszaki adat
Munkatér mérete (SZ x M):	1180 x 710 mm
Asztal méret (X x Y):	720 x 520 mm
Asztal lökete (X x Y):	500x400 mm
Max. munkadarab magasság:	300 mm
Max. vágási szög / hossz:	12°/ 80 mm degree/min
Felületi érdesség:	Ra≤0.8 um
Huzal mérete:	0.12-2.0 mm
Vágási sebesség:	2,2 m/min
Asztalterhelhetőség:	600 kg
Hűtőfolyadék:	Szappanos víz

[15] Yaodong Yang,– Junqi Gao,– Zhiguang Wang,–Menghui Li,– Jie-Fang Li,–Jaydip Das,–D. Viehland, (2011): Effect of heat treatment on the properties of Metglas foils, and laminated magnetolectric composites made thereof. *Materials Research Bulletin*, 46., (2.), Pp. 266–270.

#### METGLAS ANYAG ISMERTETÉSE

Nanokristályos lágymágneses amorf ötvözetek között találjuk a Hitachi-metals által fejlesztett Metglas fantázianevű Fe-Si-B összetételű amorf fázisú anyagot, ami mind a mai napig az érdeklődés középpontjában áll [15]. Ennek oka a kedvező telítési mágnesezettség és nagy üvegtérfogati hajlam mellett az alkotó komponensek kedvező árfejkése is.

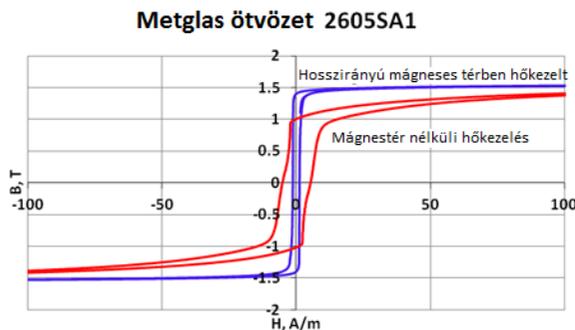
Több altípusból álló ötvözetcsalád számunkra legkedvezőbb tulajdonságait a METGLAS 2605SA1 típusú ötvözet hordozza. Telítési indukciója 1,56 T, amihez igen nagy, 600000-es mágneses permeabilitás tartozik. Vasvesztése a kristályos anyagokhoz hasonlítva kicsi, sőt a veszteségek nagyobb frekvenciákon kisebbek a nagy ellenállás miatt (1,3  $\mu\Omega$ ). A kristályosodás körülbelül 510°C-on indul el, ami természetesen függ az ötvözők mennyiségétől, hőkezelés típusától is. Az 50 g terheléssel mért Vickers keménységértéke 900 HV0,05 körüli.

A 3.1.13. ábrán Metglas 2605SA1 típusú ötvözet két különböző hőkezelési állapotához tartozó mágneses hiszterézisgörbéit láthatjuk. Észrevehető, hogy az ötvözet mágneses tulajdonságait jelentősen befolyásolja a hőkezelés típusa. A hosszirányú mágneses térben hőkezelt ötvözet (kék színű B-H görbe) nagyobb permeabilitással

[16] METGLAS  
 adatlap letölte:  
<https://metglas.com/wp-content/uploads/2016/12/Amorphous-Alloys-for-Transformer-Cores-.pdf> (2017. 11. 13.)

bír, amihez kicsi koercitív erő párosul. Mágnesvér nélküli hőkezelés (piros színű B-H görbe) során romlanak a mágneses tulajdonságok, hiszen kisebb permeabilitás, nagyobb koercitív erő olvasható le. [16]

**3.1.13. ábra Metglas 2605SA1 típusú ötvözet hőkezelése, hosszirányú mágneses térben és mágnesvér nélkül. [16]**

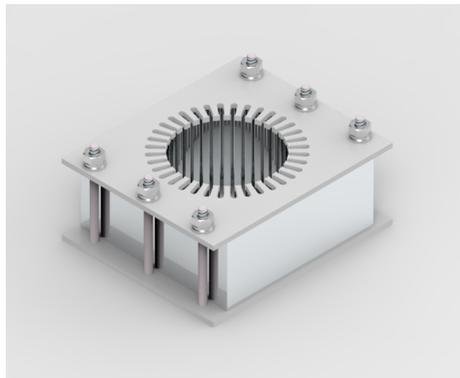


Ideális teljesítményük miatt az egy- és háromfázisú kereskedelmi, ipari és az elosztó transzformátorokban, valamint nagyfrekvenciás induktorok alkalmazásánál használják őket. [16]

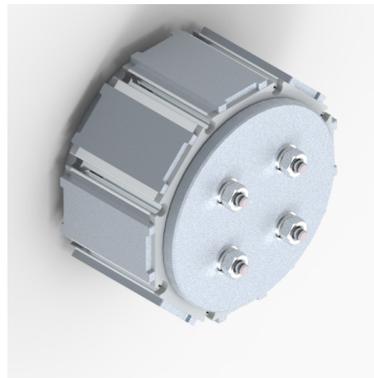
## Eredmények és értékelésük

A szikraforgácsoláshoz a csévetest és a forgórész lemezpakettet elő kellett készíteni, hogy az a technológiai folyamat során kezelhető legyen. Ehhez az alábbi ábrán látható elrendezést választottuk.

**6. ábra** A szikraforgácsoláshoz előkészített csévetest (a) és fogórész (b) rajza



(a)



(b)

A 6. ábrán ismertetett megfogás biztosította, hogy a szikraforgácsolás során, illetve az azt követően a lemezek egyes lemezei ne mozduljanak el.

**7. ábra** A szikraforgácsolással előállított csévetest (a) és fogórész (b) lemezek



(a)



(b)

## Összefoglalás

Kutatómunkánk során elvégeztük az elektromotor állórész prototípus gyártástechnológiájának kidolgozását. Kutatási eredményeinkre alapozva meghatároztuk az optimális gyártási technológiát, majd elvégeztük kísérletet tettünk a lemezttest gyártására.

Munkánk során a lemezttest szikraforgácsoklással történő alakítása sikeresen megtörtént. További feladatunk a tekercselés elvégzése és az elektromotor összeállítása, amelyen a hatásfokmérést elvégezhetjük.

### *Köszönetnyilvánítás*

A közlemény a 2020-4.1.1-TKP2020 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Tématerületi Kiválósági Program 2020 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

## *Keménységmérés módszerének és történetének áttekintése*

**Összefoglalás:** Ebben a cikkben a keménységmérésről adok egy átfogó képet. A Brinell és a Vickers eljárásokat fejtem ki bővebben, kitérve a keménységmérés hibáira, a mérések pontosságának kérdéseire. Bemutatom, hogy a mérések során számos helyen fordulhat elő olyan hiba, amely jelentősen képes befolyásolni a kapott keménységértékeket. A cikkben betekintést nyújtok a Brinell és Vickers keménységméréseknél nem csak a szabvány által rögzített eljárásokról, hanem a gyakorlati megfontolásokról és módszerekről is.

**Kulcsszavak:** Brinell, Vickers, keménységmérés, mérési hiba.

**Abstract:** In this article, I give a comprehensive picture of hardness measurement. I explain the Brinell and Vickers methods in more detail, focusing on the errors of hardness measurement and the accuracy of it. I will show that errors can occur in many places during the measurements, which can have significant effect on the obtained hardness values. In the article, I also provide insight into Brinell and Vickers hardness measurements, not only about the standard procedures, but also about practical considerations and methods.

**Keywords:** Brinell, Vickers, hardness measurement, measurement errors.

### Bevezetés

A mérnöki gyakorlat szerves része az anyagvizsgálat. Jelentőségét az adja, hogy a vizsgálatokból kapott eredmények, mint anyag tulajdonságok jellemzői, egyrészt tervezésnél meghatározza az anyagválasztás egy adott alkalmazáshoz, másrészt a már üzemelő berendezésnél, szerkezetnél stb. információval szolgál a hátralévő élettartamról.

\* *Dunaújvárosi Egyetem*

[1] Chandler, H. (Szerk.): *Hardness Testing*, 2nd Edition, *ASM International*.

[2] Herrmann, K. (Szerk.): *Hardness Testing—Principles and Applications*, *ASM International*.

[3] Gillemot L. (1964): *Metallográfia és anyagvizsgálat*. Budapest: Tankönyvkiadó. P.154.

A keménységmérés a múlt század eleje óta -amióta az első vizsgálatok kezdtek elterjedni az iparban- fokozatosan napi rutinná vált az anyagvizsgálók körében. Ehhez nagyban hozzájárult, hogy a mérések -számítástechnika fejlődésével- automatizálhatóvá váltak, az eredmények digitalizálhatóak lettek és ezáltal könnyen feldolgozhatóvá váltak. Ezért például nagy szerepe van a gyártásközi ellenőrzésben, ahol statisztikai folyamatszabályozás (SPC) részét is képezheti. [1, 2] Továbbá a szűrő keménységmérések (Brinell, Rockwell, Vickers, Knoop) az egyszerűségük és könnyű kezelhetőségük miatt nagyon vonzóvá váltak. Ezekkel a módszerekkel meghatározhatók a különféle anyagok, például vékony fóliák, bevonatok és hegesztett kötések megfelelése.

## Keménységmérésről

Az idők során keménységnek sokféle jelentése, megközelítése alakult ki. A tribológiában inkább kopásállósággal azonosítják ezt a fogalmat. A tervező mérnök számára olyan a méretezéshez használt mutatószámot jelent, amellyel az adott anyag, adott célra való felhasználásra való alkalmasságát dönti el. A fémek gyártásával és feldolgozásával foglalkozó iparágakban a tartós deformációval, illetve behatolással szembeni ellenállást jelenti. A gépészeti gyártástechnológiai gyakorlatban a megmunkálással szembeni ellenállást kapcsolják hozzá, azaz minél keményebb az anyag annál nehezebb, ebből következően költségesebb megmunkálni. Ha úgy tekintjük, akkor a keménységet átlagos felületi nyomásnak is értelmezhetjük. [1, 2]

Az első vizsgálati módszereknek a lényege az volt, hogy a mintát megkarcolva következtettek az anyag keménységére. Erre a vizsgálati módszerre először 1722-ben René Antoine Ferchault de Réaumur francia természettudós dolgozott ki egy hétfokozatú keménységi skálát. Erre a módszerre épül, az ásványtanban a mai napig használatos skála, amelyet 1822-ben fejlesztette ki Carl Friedrich Christian Mohs osztrák természettudós és mineralógus. A Mohs-skála lényege, hogy minden nagyobb sorszámú ásvány karcolja az előtte álló, nála kisebb sorszámúakat. Két fokozat közé eső keménységet törtszámmal jelölik, amely tíz ásványi anyag relatív keménységét méri. [3]

A fémek keménységmérésének legrégebbi és mai napig legelterjedtebb módszerét Johan August Brinell svéd kohász, a svédországi Fagerrra Vas- és Acélművek akkori

főmérnöke az 1900-as Párizsi világkiállításon mutatta be. Ez a mára már a nevét viselő, és jól ismert keménységmérési eljárás (bár ő még golyós keménységmérésnek nevezte). A vizsgálat során a szűrőszerszámot egy anyagtól függő erővel a vizsgálandó anyagba nyomjuk és előírt ideig a terhelést fenntartjuk. Az idő lejáta után a terhelést megszüntetjük és az így keletkező lenyomat felszínét meghatározzuk. Ilyenkor nem a benyomódás mélységét szoktuk mérni, mert egyrészt ez nehezen megvalósítható, másrészt nagyon lágy anyagok esetén ez nagyon nagy mérési pontatlanságot okozna. Ehelyett a keletkezett lenyomat síkmetszetének átmérőjét mérjük le és ebből számítjuk ki a lenyomat felszínét, illetve a keménység értékét.

Az évtizedek alatt számtalan olyan berendezést fejlesztettek ki, amely gyorsabbá és pontosabbá teszi ezeket a vizsgálatokat, de az elv lényegében változatlan maradt. A Brinell-módszer által előírt korlátozások és a megnövekedett mérnöki követelmények miatt újabb eljárások jelentek meg a múlt század 20-as éveinek közepére. Mindkét eljárás elsősorban gyémánt szűrőszerszámot használ, amellyel teljesen martenzites szerkezetű edzett acélok vizsgálata is lehetővé vált.

Hugh M. and Stanley P. Rockwell (csak névrokonok voltak) 1919-ben fejlesztettek ki egy új mérési elven működő keménységmérési eljárást. Először acélcsapágy gyűrű hőkezelésének folyamatszabályozásra használták. Napjainkban messze a legnépszerűbb keménységi teszt lett, elsősorban azért, mert teljesen kiküszöböli a Brinell-teszt korlátait.

Rockwell keménységmérési eljárásoknál a keménység értéket a szűrőszerszám benyomódásának mélységéből határozzuk meg. A Rockwell eljárásoknak számtalan típusa létezik, (HRA, HRB...HRY) amelyek azonos elven, de különböző paraméterek segítségével széleskörű alkalmazhatóságot tesz lehetővé. A mérés pontosságát alapvetően a benyomódás mélységének mérése befolyásolja. A vizsgált darab felületi egyenetlensége ronthatja a mérés pontosságát, ezért minden Rockwell eljárás során első lépésben egy úgynevezett előterhelést alkalmazunk, amely hatására kismértékű benyomódás alakul ki. Az előterhelés segítségével kapunk egy bázissíkot. Ezt követően egy főterhelést alkalmazunk, amely által okozott maradó benyomódás mélységét mérjük a bázissíkhhoz képest. [4] Egy tipikus keménységmérő berendezés az 1-es ábrán látható.

[4] Marteau, J. et al. (2013): Quantification of first contact detection errors on hardness and indentation size effect measurements *Tribology International*, 59., (2013.), Pp. 154–162.

[3] Gillemot L. (1964): *Metallográfia és anyagvizsgálat*. Budapest: Tankönyvkiadó. P.154.

[5] Robert L. Smith, R. L.–George E. Sandland, (1922): *An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to those of a High Degree of Hardness, Prime Proc.*

[7] ELTE Anyagfizikai Tanszék honlapja, [Letöltve: 2021. 12. 03.] [http://metal.elte.hu/aft.elte.hu/Kutatas/Anyagtudomany/Laborok/Mechanika\\_kemenyseg/Mechanika\\_kemenyseg.html](http://metal.elte.hu/aft.elte.hu/Kutatas/Anyagtudomany/Laborok/Mechanika_kemenyseg/Mechanika_kemenyseg.html)

1. ábra. Keménységmérő berendezés [7]



Az anyagok keménységének mérésére a Vickers-keménységi tesztet a Brinell-módszer alternatívájaként fejlesztette ki 1921-ben Robert L. Smith és George E. Sandland a Vickers Ltd.-nél (innen kapta a nevét a módszer). A Vickers-tesztet a legtöbb esetben könnyebb volt használni, mint más keménységi teszteket, mivel a szükséges számítások függetlenek a behatolás mértékétől, és a keménységtől függetlenül minden anyaghoz használható. [5]

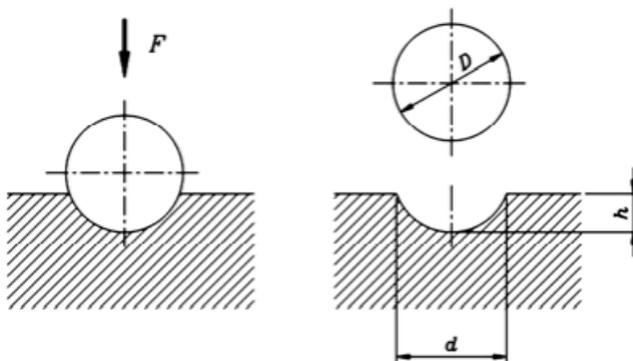
A keménységmérő eljárások az alakváltozás létrehozásának módja szerint lehetnek [3]:

- Szűrő (statikus) keménységmérés: a vizsgálandó anyagnál jóval keményebb, ún. szűrőszerszámot nyomnak alkalmasan megválasztott terhelőerővel az anyagba, és a létrejövő lenyomat területéből, vagy a benyomódás mélységéből származtatják a keménységi értéket.
- Ejtő (dinamikus) keménységmérés: a vizsgálandó anyagra ejtett mérőtest visszapattanási magasságából határozható meg a rugalmas ütközés elnyelt energiájával összefüggő keménységi mérőszám.
- Rezgő keménységmérés: a vizsgálandó anyagra szorított rezgőfej rezgésben tartásához szükséges energia méréséből fejezhető ki az anyag rezgéscsillapító-képességével (rugalmatlanságának mértékével) összefüggő keménységadat.

BRINELL -KEMÉNYSÉGMÉRÉS

A Brinell-módszer esetén egy  $D$  átmérőjű, edzett vagy keményfém, polírozott acél-golyót nyomnak a vizsgálandó munkadarab felületébe, a felületre merőlegesen, meghatározott terheléssel és ideig. [11]

2. ábra. Brinell keménységmérés elve [11]



A terhelés hatására egy  $d$  átmérőjű,  $h$  mélységű, gömbsüveg alakú lenyomat képződik. A 2-es ábra jelöléseivel a gömbsüveg felülete  $D \cdot \pi \cdot h$ , ahol  $D$  a golyó átmérője,  $h$  a gömbsüveg magassága. Brinell keménységen az  $F$  terhelő erő és a lenyomat felületének hányadosát értjük [11]:

$$HB = F / (D \cdot \pi \cdot h)$$

A mértékegységek nemzetközi rendszerének (SI) hatályba lépése óta a benyomást létesítő erőt  $N$ -ban kell mérni, ennek következtében a benyomódás felületének egységére vonatkoztatott keménységértékek, a  $HB$  és  $HV$  keménységi számok kereken egy nagyságrenddel nagyobbak lennének a megszokottnál. Azért, hogy ezek ne változzanak meg, a terhelőerőt  $N$ -ban mérik, megszorozzák  $1/9,80655 = 0,102$ -vel. Az így kiszámított  $HB$  és  $HV$  értékek megegyeznek a megszokottakkal, amelyeknek  $kp/mm^2$  volt a dimenziójuk. Ezt a dimenziót az új rendszerben nem használják, hanem a keménységet mértékegység nélküli számnak tekintik és az alábbi összefüggéssel határozható meg:

[11] Pogonyi Isván (2008): *Roncsolásos anyagvizsgálatok 2. Keménységmérések, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet.*

[2] Herrmann, K. (Szerk.): *Hardness Testing—Principles and Applications*, ASM International.

[4] Marteau, J. et al. (2013): Quantification of first contact detection errors on hardness and indentation size effect measurements *Tribology International*, 59., (2013.), Pp. 154–162.

[11] Pogonyi Isván (2008): *Roncsolásos anyagvizsgálatok 2.* Keménységmérések, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet.

$$HB=(0.102\cdot F)/(D\cdot\pi\cdot h)=(2\cdot 0.102\cdot F)/(D\cdot\pi\cdot(D-\sqrt{(D^2-d^2)}))$$

Mivel a terhelés és a létrejövő gömbsüveg-geometriájú lenyomat felülete egymással nem arányos, a szűrőszerszámot és a terhelést szabványosítani kellett. A vizsgálat-hoz használt szabványos golyók 10; 5; 2,5; 2; és 1 mm átmérőjűek. A golyó keménységét szabvány írja elő (850 HV).

A golyó átmérőjét a tárgy vastagsága szabja meg, tekintettel arra, hogy ha vékony lemezeknél nagy átmérőjű golyót használunk, vagy a lenyomat átmérője lesz túlságosan kicsi és így nem mérhető pontosan, vagy pedig ha a golyó túlságosan mélyen hatol be a tárgyba, akkor a keménységmérés eredménye nem lehet pontos, mert a tárgytartó keménysége a mérés eredményét befolyásolja. Éppen ezért a tárgy (próbatst) olyan vastagnak kell lennie, hogy a vizsgálat után a hátoldalon a benyomódás semmilyen alakváltozást ne okozzon. Ennek érdekében a próbatst legkisebb vastagsága a benyomódás mélységének legalább tízszeresének kell lennie.

A golyóátmérőt és a hozzá tartozó terhelő erőt úgy kell megválasztani, hogy a lenyomat átmérője a golyó átmérőjének 0.25 és 0.6 szerese közé essen. A Brinell keménység nem független az alkalmazott terhelőerőtől. Ha egy meghatározott átmérőjű golyót különböző nagyságú erővel benyomva az anyagba, nem mindig ugyanazt a HB értéket kapjuk, ezért kell a vizsgálat adatait pontosan előírni. A Brinell-vizsgálat eredményét a kísérlet időtartama is befolyásolja. Ennek oka az, hogy minden maradó alakváltozásnál az alakváltozás csak egy bizonyos idő után jut nyugalmi állapotba. Ez az idő annál rövidebb, minél lassabban folyt le a terhelés. A Brinell vizsgálatnál a terhelőerőt 0-ról 15 sec alatt növeljük fel a vizsgálatnak megfelelő értékekre, majd a terhelést még egy ideig rajta tartjuk a vizsgálati darabon. Ez az idő az anyag keménységének függvénye, minél keményebb az anyag, az idő annál kisebb [11]. A szokásos érték acélnál például 15 mp, alumínium- és rézötvözeteknél 30 mp.

#### VICKERS-KEMÉNYSÉGMÉRÉS

A Brinell-keménységmérés alkalmazásának számos korlátja van. Az egyik, hogy a nagyobb keménység értékeknél (HB 400 felett) maga a golyó is deformálódik, ennek következtében a lenyomat nagyobb átmérőjű lesz, azaz a mérés az anyagot lágyabbnak mutatja, mint amilyen valójában. A másik hátránya a Brinell-keménységmérésnek az, hogy helyi keménységváltozásokat nem lehet vele meghatározni például a felületi edzés eredményét. [2, 4]

A Vickers-keménységmérés tehát részben kiküszöböli a Brinell-vizsgálat hibáit:

- A szúrószerszáma gyémántból készül és így a legkeményebb anyagok vizsgálatára is alkalmas.
- A szerszám és az alkalmazott terhelés olyan kicsi, hogy alig észrevehető nyomot, hagy, ezért legtöbbször kész tárgyak is károsodás nélkül vizsgálhatók.
- A kis terhelés miatt nem töri át a vékony réteget (kérget), tehát cementált felületek keménysége is mérhető vele.
- A lenyomat felülete arányos az erővel és így az alkalmazott terhelés – bizonyos határok között – nem befolyásolhatja a mért keménységi értéket. A 100 – 300 N között különböző terheléssel mért Vickers keménységek (HV) egymás között összehasonlíthatók.

A szúrószerszám négyzet alapú piramis, amelynek ellentétes oldalai  $\alpha$  szöget zárnak be egymással. A szög ezen értékének eredete a Brinell-féle keménységvizsgálati gyakorlatára vezethető vissza. A Brinell-féle keménységvizsgálatban szokás a terheléseket úgy megválasztani, hogy a lenyomat átmérője 0,25 és 0,5-szöröse között legyen, a golyó átmérőjének. Bizonyítható, hogy a leggyakoribb érték ezeknek a középértéke, azaz a golyó átmérőjének 0,375-szöröse. Az 3. ábra az  $\alpha$  szög kiszámításának elemi geometria összefüggéseit mutatja. Az ábrából jól látható, hogy az  $\alpha$  oldalszög, az  $EQF\alpha$ , amelynek félszöge a szimmetria miatt az  $EQO\alpha$ . Továbbá az E jelű érintkezési pontba behúzva a EO sugarat, – ami egyben a Brinell-golyó átmérőjének a felét is jelenti –, ezért a EQ és EO szakaszok egymásra merőlegesek. Ebből meghatározható az  $EOQ\alpha$  nagysága is. Ennek a szögnek a szinuszt felírva EMO háromszögben megkapjuk a keresett  $\alpha$  lapszöget, amely kerekítve  $136^\circ$ -nak adódik. A számítás menete a 3. ábrán található.

A Vickers-keménység értékét – a szúró keménységmérési eljárások keménység fogalmából adódóan – a terhelőerő és a lenyomat felületének hányadosából számítják.

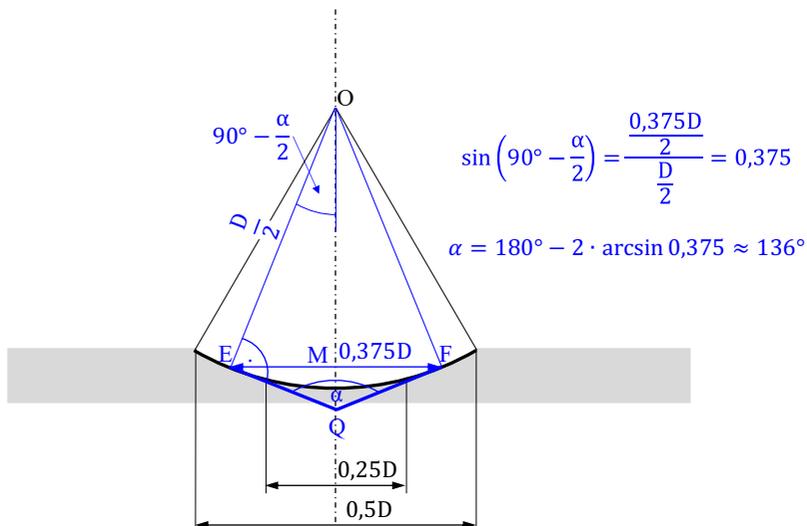
A szúrószerszám által létrehozott lenyomat felszínének meghatározásához a keletkezett lenyomat síkvetületének (négyzet) átlóját mérjük le. Ennek oka, hogy a lenyomat oldalai lágyanyagok esetében kifele nyomodnak (hordósodik), keményanyagoknál pedig befele nyomódnak (behorpad) és így nehézkesé teszi a mérését. A mérés során mindkét átló hosszát lemérjük és ezek számtani közepéből számoljuk ki a keménység értékét az alábbi egyenlet segítségével:

$$„HV”=0,102 \cdot (2 \cdot F) / d^2 \cdot \sin \alpha / 2 \approx 0,189 \cdot F / d^2$$

A tapasztalat azt mutatja, hogy a Brinell- és Vickers-keménységmérés egymással megegyező értéket szolgáltat egészen 400 Brinell-értékig. E felett az eltérést a golyó ellapulásából adódik. Az eltérés kisebbé válik akkor, ha a Brinell-keménységmérésnél keményfém golyót vagy gyémántgolyót használunk, de az eltérés az utóbbi alkalmazásánál 750 Vickers érték környékén jelentkezni fog.

[12] Pergel Dóra (2021): *A Vickers-keménységmérésnél a próbadarab geometriai pontatlanságából adódó mérési hiba elemzése*. Minőségirányítási szakmérnöki szakdolgozat, Dunaújvárosi Egyetem, 2021

3. ábra. A Vickers-keménységmérés géymánt szúrószerszám lapszögének kiszámítása [12]

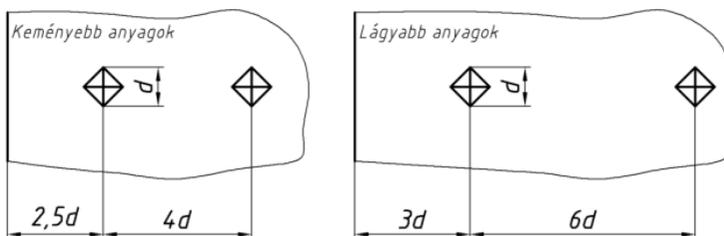


A lenyomat mélységének mérése ( $h$ ) nehezen kivitelezhető, ezért a lenyomat mélysége annak átlójából az alábbi egyenlettel számítható:

$$H_{min} = 10 \cdot h = (10 \cdot d) / (2 \cdot \sqrt{2} \cdot \operatorname{tg} 68^\circ) \cong 1,43 \cdot d \approx 1,5 \cdot d$$

A vizsgálat során jelentősége van a lenyomatok darab szélétől és egymás közötti távolságának is. A benyomódás hatására a lenyomat közvetlen környezetében lévő térfogat képlékenyen alakváltozás szenved el és felkeményedik. Az általános gyakorlat szerint keményebb anyagoknál a minta szélétől a lenyomat átlójának 2,5-szeresét hagyjuk szabadon, azaz ezen a területen nem végzünk mérést, amíg lágyabb anyagoknál ez az érték 3. Hasonló gyakorlat alakult ki két lenyomat távolságára is keményebb anyagoknál a lenyomat négyszeresét, lágyabb anyagoknál a hatszorosát kell megtartani (4-es ábra).

4. ábra. A lenyomatok távolsága egymástól és a darab szélétől [6]



A vizsgálat során jelentősége van a lenyomatok darab szélétől és egymás közötti távolságának is. A benyomódás hatására a lenyomat közvetlen környezetében lévő térfogat képlékenyen alakváltozás szenved el és felkeményedik. Az általános gyakorlat szerint keményebb anyagoknál a minta szélétől a lenyomat átlójának 2,5-szeresét hagyjuk szabadon, azaz ezen a területen nem végzünk mérést, amíg lágyabb anyagoknál ez az érték 3. Hasonló gyakorlat alakult ki két lenyomat távolságára is keményebb anyagoknál a lenyomat négyszeresét, lágyabb anyagoknál a hatszorosat kell megtartani (4. ábra).

A terhelési idő, mint a mérési eredményt befolyásoló paraméter függvénye a vizsgált anyagnak. A vizsgálat során a statikus szakaszban olyan hosszán kell fenn tartani a terhelést, hogy értékelhető lenyomatot kapjunk. Keményebb anyagoknál rövidebb idő alatt kialakul az értékelhető lenyomat, mint lágyabb anyagok esetén.

A Vickers keménységmérés elvégzésének menete:

- A vizsgálandó felületet fémtisztává alakítjuk (pl. köszörülés). A felületnek olyanak kell lennie, hogy a megmunkálási barázdák a leolvasás pontosságát ne rontsák. Kis terhelésű vizsgálatnál a pontos mérés érdekében a felületet tükrösíteni kell. Az előkészítés során – intenzív hűtéssel – akadályozzuk meg, hogy a darab felmelegedjen, és ezáltal keménysége megváltozzon.
- Állítsuk be a mérendő munkadarabot úgy, hogy a lenyomatok a darab szélétől és lenyomatok egymástól való távolsága a korábban leírt követelményeknek megfeleljen.
- Adjuk rá a terhelést. A terhelő erő 9,8–980 N között választható az anyagminőség és a vastagság függvényében. Mivel a terhelés változtatásával a lenyomat felülete közel arányosan változik, ezért a Vickers keménység bizonyos határon belül a terhelő erőtől független.

[6] Stuers honlap: <https://www.struers.com/en/Knowledge/Hardness-testing#hardness-testing-how-to>; [Letöltve: 2021. 05. 02.]

[5] Robert L. Smith, R. L.–George E. Sandland, (1922): *An Accurate Method of Determining the Hardness of Metals, with Particular Reference to those of a High Degree of Hardness, Prime Proc*

– A terhelés megszüntetése után a lenyomat két egymásra merőleges átlóját (d) mérjük a keménységmérő gépre szerelt mérőberendezés segítségével 0,001mm pontossággal. A két érték átlagának, és a terhelő erőnek a függvényében meghatározzuk a keménységet.

A Vickers-keménységmérés előnyeiről korábban volt szó, tulajdonképpen azok a jellemzői, amiért a Brinell-keménységmérés alternatívájaként ki lett fejlesztve. Ezen eljárás egyetlen hátránya a relatívan hosszú mérési idő (a vizsgálat előkészítése és maga a mérés időigényes), következésképpen tömeggyártásnál nem használható. A lenyomat méretének lemérése szubjektív hibákkal terhelt. Ezért általában laboratóriumi kutatásoknál használják, ott viszont a legpontosabb mérési eljárásnak tekintik.

A MSZ EN ISO 6507-1 szabvány szerint mérési eredményt a következőképpen kell megadni: például 640 HV 30/20. A Vickers-keménységet HV betűk jelölik és a keménység értékét a HV jelölés elé kell írni, jelen példában 640. A HV jel mögé a vizsgálat körülményeit megadó számértékek kerülnek perjellel elválasztva a HV jel. Kötelezően meg kell adni után a terhelő erőt kp-ban, jelen példában ez érték 30. A terhelési időt másodpercben perjellel elválasztva tüntetjük fel, ha ez a 10...15 másodperces időintervallumtól eltér. A hőmérséklet értékét normál körülmények között 10 és 35 °C hőmérséklet tartományban nem kell jelölni. Ellenőrzött körülmények esetén 23±5 °C hőmérsékleten kell a mérést végezni. [5]

Az úgynevezett mikro Vickers-keménység eljárásnál az anyagokból erre a célra készített csiszolatokon, az anyagszövetszerkezetének, illetve fázisainak keménységértékeit határozhatjuk meg. A mikrokeménységmérő-berendezés, tulajdonképpen egy mérőmikroszkóp. A lenyomatátlókat az okulárba beépített mérőskála segítségével határozták meg. A gyakorlatban a mikro-Vickers eljárásnál az alábbi terhelési értékek szokásosak: F = 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,65; 0,8; 1 N; esetleg 5 N.

Mikro-Vickers eljárás lefolytatásánál figyelembe veendő főbb szempontok:

- A vizsgálatához mikroszkópos vizsgálatra alkalmas polírozott és megfelelően marattott csiszolatokat kell készíteni.
- A terhelő erő megválasztása a vizsgálatnál kívánt szövetszerkezet, fázis méretétől és várható keménységétől – lenyomatmérettől – függ. Általános szabály nincs. A kis relatív hiba érdekében a lehető legnagyobb lenyomat elérésére kell törekedni. Tájékoztatóul: a fémeknek és szilárdoldataiknak keménysége pl: acélban a ferrit 100–200 HVM, a vegyületfázisoké, pl: a karbidoké, nitrideké 1000 HVM körüli érték.

– A mikrokeménység-méréssel mért értékek mintegy 10%-kal nagyobbak, a makro-Vickers terheléssel mért értékeknél (a kis terheléseknél fellépő viszonylag nagyobb rugalmas deformáció következtében, illetve szövetszerkezeti hatások miatt).

Főbb alkalmazási területe: vékony lemezen, fóliákon, termokémiai eljárással, felületi edzéssel, vagy egyéb módon előállított felületi rétegeken, illetve szövetelemeken végzett vizsgálatok. [13, 14, 15]

Egy korszerű mikrokeménységmérő berendezés a 5. ábrán látható.

5. ábra. Mikrokeménységmérő berendezés [8]



A legtöbb Vickers-keménységmérőgép nagyon precízen be lehet állítani a terhelőerőt, valamint nagyon pontosan lehet mérni az átlók hosszát (az okulár és objektív lencse nagyításának helyes megválasztásával). Amikor a legtöbb roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálatokkal foglalkozó szakembert a mikro-keménységmérésről kérdezzük, a válaszukban a leggyakrabban használt három kifejezés: bonyolult, szubjektív és időigényes. Ennek ellenére ezek a negatív fennhanggal is rendelkező kifejezések megállják a helyüket, de a számítástechnika fejlődésének köszönhetően, a mérés egyszerűsödött, felhasználóbarátabbá vált, ezáltal csökkentve, ha nem is teljesen megszüntetve az előbbieken említett, nem túl hízelgő jelzőket. A mikrokeménység mérőgép finom eszköz. Pontosan kell alkalmazni a rendkívül könnyű (általában

[13] Ramasamy, P.–Szabo, A.–Borzel, S. et al. (2016): High pressure die casting of Fe-based metallic glass. *Sci Rep*, 6., 35258. <https://doi.org/10.1038/srep35258>

[14] A. Szabo–A. Nagy–G. Kozsely (2019): Laser cutting technology development for Fe based metallic glass, 2019 IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), 10.1109/SISY47553.2019.9111604

[15] Antal Lovas, et.al. (2020): Cluster-Related Phenomena in the Properties and Transformations of Transition Metal-Based Glassy Alloys, 2020, <https://doi.org/10.3390/met10081025>

[9] Doug McGhee: Common problems in microhardness testing, Newage Testing Instruments, Southampton, PA.

[10] <https://www.deakin.edu.au/students/faculties/sebe/eng-students/techassist/materials/materials-preparation>; [Letöltve: 2021. 05. 02.]

10–1000 g közötti) erőket, és a kapott benyomódásokat (némelyik akár 10 mikron is) nagy nagyítás mellett pontosan meg kell mérni. Számos probléma rejlik ezekben a szigorú követelményekben.

A mikrokeménység mérési problémák általában három kategóriába sorolhatók - pontosság, megismételhetőség és korreláció -, és öt fő okra vezethetők vissza: gép, kezelő, környezet, minta előkészítés és kalibrálás. Az okok megvitatása előtt fontos meghatározni a problémákat:

- Pontosság, a mérés eredménye és a valódi (vagy helyes) érték közötti egyezés mértéke. A pontosság kvalitatív fogalom.
- Megismételhetőség, annak mérése, hogy a műszer mennyire képes lemásolni eredményeit az elismert keménységi szabványok alapján.
- Korreláció, a készülék azon képessége, hogy hasonló eredményeket produkáljon, mint egy másik „megfelelően kalibrált” eszköz; vagy két kezelő azon képessége, hogy ugyanazt a benyomódást ugyanazon gép segítségével mérje és hasonló eredményeket érjenek el. [9, 10]

A legtöbb tesztelő rendszer automatizált tesztet használ a terhelés ciklusára, a terhelés a kívánt ideig történő alkalmazására és tehermentesítés a vizsgálat reprodukálhatóságának biztosítása érdekében.

A szűrőszerszámnak merőlegesnek kell lennie a próbadarabra. A merőlegetől mindössze 2°-os eltérés hibához vezet, mivel torzítja a benyomódás/lenyomat alakját és mérési hibákat okoz. Nagyobb dőlésszög miatt a minta elmozdulhat az alkalmazott erő hatására.

A tárgyasztalnak, amelyre a mintát helyezük mozgathatónak kell lennie, és a mozgást általában x és y irányban mikrométerek irányítják. Miután a mintadarabot ráhelyezzük a tárgyasztalra az operátornak mozgatnia kell azt a mikrométer segítségével, hogy kiválassza a benyomódás kívánt helyét.

A laboratóriumi mérések során jó részt kemény anyagok (HV350-nél nagyobb) fordulnak elő, akkor ez jobban megterheli (felerősödnek a dinamikus hatások) a szűrőszerszámot, annak kopását, mechanikus károsodását idézi elő. Emiatt a mérés pontossága csökken, ezért a szűrőszerszámot 8–10x-es nagyításban ellenőrizni kell. Ha a gyémántgúla csúcán repedés, kopás vagy gömb alakú deformálódás jelenik meg, akkor a szűrőszerszámot le kell cserélni. [9, 10]

## Összefoglalás

Ebben a cikkben a keménységmérésről adtam egy átfogó képet. A Brinell és a Vickers eljárásokat fejtettem ki bővebben, kitérve a keménységmérés hibáira, a mérések pontosságának kérdéseire. A cikkből látható, hogy a mérések során számos helyen fordulhat elő olyan hiba, amely jelentősen képes befolyásolni a kapott keménységértékeket. A cikk betekintést nyújt továbbá a Brinell és Vickers keménységméréseknél nem csak a szabvány által rögzített eljárásokról, hanem a gyakorlati megfontolásokról és módszerekről is.

### *Köszönetnyilvánítás:*

Jelen cikkben megjelenített eredményekhez az EFOP-3.6.1-16-2016-00003 K+F+I folyamatok hosszú távú megerősítése a Dunaújvárosi Egyetemen c. projekt által finanszírozott kutatások járultak hozzá. A projektet az Európai Unió és az Európai Szociális Alap társfinanszírozza.



# *Siklóernyők repülésmechanikai vizsgálata*

**Összefoglalás:** A siklóernyő meglehetősen szokatlan repülőgép. Teljesen flexibilis szárnyával, lassú repülési sebességével és mélyen elhelyezett súlypontjával rendelkezik, amely tulajdonságok egyedi repülési mechanikát adnak a légijármű számára. A siklóernyőket nemcsak szabadidős és sportrepülésben használják, hanem speciális UAV-k építésében is, amelyek siklóernyőszerű szárnyat használnak. Ebben a tanulmányban egy matematikai modellt ismertettünk, amely alkalmas a siklóernyősök erőegyensúlyi feltételeinek vizsgálatára állandó, kiegyenlített fordulóban. A szimuláció számos paramétert használ, amelyeket meg kell becsülni ahhoz, hogy a modell helyes eredményeket adjon. A matematikai modell Matlab környezetben valósítottam meg, alapvetően Newton törvényeit alkalmazza. Az eredményekből felismerhető a siklóernyők fordulási mechanizmusának néhány egyedi jellemzője. Például az úgynevezett spirális instabilitás oka az eredményből látható, ami elég komoly probléma, és sok balesetet okozott.

**Kulcsszavak:** Siklóernyő, repülésmechanika, Matlab.

**Abstract:** A paraglider is an unusual aircraft. It has a fully flexible wing, slow flight speed and low center of gravity, which give the aircraft unique flight characteristics. Paragliders are used not only in recreational and sport flying, but also in the construction of special UAVs that use a paraglider-like wing. In this study, we presented a mathematical model suitable for examining the force balance conditions of paragliders in balanced turn. The simulation uses a number of parameters that are estimated for the model to produce correct results. The mathematical model was implemented in Matlab environment and basically it uses Newton's laws. Some unique characteristics of the turning of paragliders can be recognized from the results. For example, the cause of the so-called spiral instability can be seen from the result, which is quite a serious problem and has caused many accidents.

**Keywords:** Paraglider, flight mechanics, Matlab.

\* *Dunaújvárosi Egyetem*

E-mail: nagy.andras@uniduna.hu

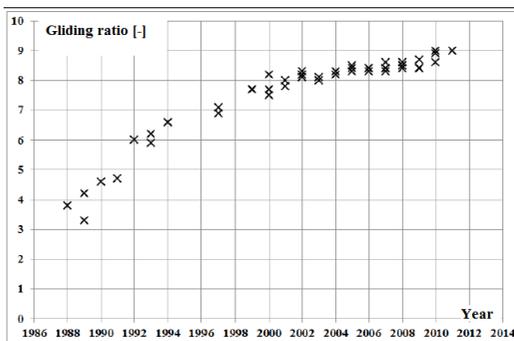
[11] Nagy András (2014): Kisméretű légieszközök mozgás-folyamatát meghatározó mérési és szimulációs környezet fejlesztése: siklóernyők fordulási tulajdonságainak elemzése, *Ph.D. Thesis*, <http://hdl.handle.net/10890/1391>

## Bevezetés

A siklóernyők egyedülálló repülésmechanikával rendelkeznek, amelyet a teljesen flexibilis szárny, a lassú repülési sebesség és a mélyen elhelyezett súlypont okoz. A siklóernyőket nemcsak szabadidős és sportrepülésben használják, hanem speciális UAV-k építésében is, amelyek siklóernyőszerű szárnyat használnak. A siklóernyők katonai felhasználása magában foglalja a precíziós légi szállító rendszereket és a katonai UAV-kat, amelyek nagyon kompaktnak és könnyen szállíthatóknak, miközben jelentős hasznos terhet hordozhatnak.

Annak ellenére, hogy a siklóernyők evolúciója az ejtőernyőkből indult ki, manapság különbséget kell tenni közöttük. Az ejtőernyő fő funkciója a szabadon eső tárgy vagy személy földetérési sebességének megfelelő értékre történő csökkentése, míg a siklóernyő fő funkciója a hatékony siklórepülés. Ezért különböző célokra, más módon tervezték őket, és különböző anyagokból készülnek.

**1. ábra. Siklószámok alakulása a siklóernyők különböző generációinál**



Az 1. ábrán a középkategóriás siklóernyők siklószámai látható a gyártási év függvényében. Látható, hogy a 90-es években történt jelentős fejlődés után az elmúlt 10 év nem mutat nagy javulást a siklószámban. Ez a paraméter az egyik legfontosabb, ami a vitorlázó hatékonyságát mutatja. Az eddig használt fejlesztési modellek elsősorban kísérleti (repülés közbeni) eljárásokon alapulnak, amelyek kezdik elérni a határaikat, ezért a siklóernyők fejlesztése lassul. A repülési teljesítmény további javítása érdekében új fejlesztési modelleket kell létrehozni a fejlett tudományos módszerek alapján. [11]

Jelen cikk célja, hogy bemutasson egy olyan szimulációs környezetet, amely alkalmas a siklóernyők egyes repülési jellemzőinek (főként a fordulási jellemzőknek) tudományos megközelítésen alapuló vizsgálatára. Emellett arra is törekszik, hogy mélyebben megértse a siklóernyők egyedi fordulási jellemzőit. A szimuláció paramétereit mérésekkel határozták meg.

## SZIMULÁCIÓS MODELL

Sajnos manapság a vizsgálatoknak csak korlátozott része foglalkozik a siklóernyőkkel. Ezek elsősorban a dinamikus modellezésre összpontosítanak 6 vagy magasabb szabadságfokú (DOF) modell fejlesztésével és megoldásával [1], [2], [3], míg mások mérőrendszereket terveznek és használnak a repülés közbeni mozgás vizsgálatára.

Egyes tanulmányok a siklóernyő mozgását és stabilitását vizsgálják. A jól ismert és széles körben használt [10] 6 DOF modelleket elsősorban a hosszanti stabilitás vizsgálatára használják [4, 5, 6], amelyek a siklóernyőt merev testként modellezik.

Egy másik tanulmányban [7] a kupola-pilóta rendszer nem merev kapcsolatot egy 9 DOF matematikai modell kifejlesztésével és használatával vették figyelembe. A további szabadságfokok egy gömbcsuklóból származnak, amelyet a pilóta és a kupola közé helyeztek a súlypontba (CG). Ezeket a modelleket összetettsége és a szükséges paraméterek nagy száma miatt nem használják széles körben.

A közelmúltban végzett tanulmány céljainak megfelelőbb modellt fejlesztettek ki, amely mérsékelten összetett. Mint korábban említettük, a fő cél a siklóernyők statikus, kiegyensúlyozott fordulójának vizsgálata, amely mentes a dinamikai hatásoktól. Ezért a mozgásegyenletek helyett statikus erőegyenleteket használtunk a matematikai modell felépítéséhez.

A siklóernyők fordulási mechanizmusa meglehetősen különbözik a hagyományos repülőgépektől. A hagyományos repülőgép fordulóját a csűrők kitérítése indítja el, ami a repülőgép bedőlését okozza. A kívánt bedöntési szög elérése után a csűrőket visszaállítják semleges helyzetbe, és a szárny állásszögét megnövelik, amely a fordulóhoz szükséges nagyobb felhajtóerő eléréséhez szükséges.

[1] Gi-Bong Hur (2005): Identification of powered parafoil-vehicle dynamics from modeling and flight test data, PhD dissertation, Texas A&M University.

[2] Chambers, J. R. (2007): Longitudinal dynamic modeling and control of powered parachute aircraft, PhD dissertation, Rochester Institute of Technology.

[3] Kurashova, M.–Vishnyak, A. (1995): Identification of a paraglider longitudinal aerodynamic characteristics, 13<sup>th</sup> Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference.

[4] Ward, M.: Adaptive Glide Slope Control For Parafoil and Payload Aircraft, PhD dissertation. Georgia Institute of Technology.

[5] Zaitsev, P. V.–Formalskii, A. M. (2008): Autonomous Longitudinal Motion of a Paraglider. Mathematical Simulation, Synthesis of Control. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 47., (5.)

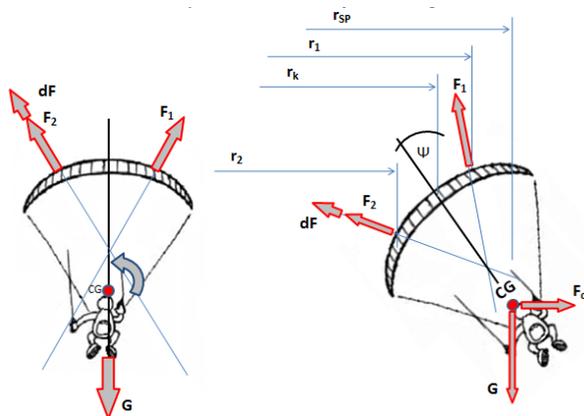
[6] Formalskii, A. M.–Zaitsev, P. V. (2013): Mathematical modeling of controlled longitudinal motion of paraglider. *Computational Mathematics and Modeling*, Vol. 24, No. 3,

[7] Toglia, C.–Vendittelli, M. (2010): Modeling and motion analysis of autonomous paragliders, *Technical Report n. 5.*

A siklóernyőkön egyáltalán nincs farokrész, és a vezérlőfelületeket csak lefelé lehet kitéríteni, így a növekvő felhajtóerő nem érhető el a támadási szög emelésével. Ehelyett a siklóernyő azzal növeli a felhajtóerőt, hogy növeli a siklási sebességet, ami nagyobb siklászöveget is jelent egyben. A siklóernyő viszont spirális úton mozog, amelyben a siklási szög a dőlésszög függvényében változik.

A kifejlesztett modellben a siklóernyő merev, a figyelembe vett erők a 2. ábrán láthatók. Ez alkalmas a siklóernyő statikus fordulójának vizsgálatára.

2. ábra. A siklóernyőn statikus fordulóban fellépő erők



Amint azt a 2. ábrán megfigyelhetjük, a bal és a jobb szárny felhajtóerejét külön-külön vizsgáljuk. Alapvetően a szimulációs modell ezen erők különbségeinek leírásán alapul, amelyek (i) a szárnyak különböző sebességéből és (ii) a spirális merülés különböző állásszögéből származnak.

Az 1. egyenlet a kupola fő erőegyensúlyát mutatja, amelyben  $\tau$  a függőleges tengely és a bal (vagy jobb) szárnyerő közötti szög. Feltételezve, hogy ez a szög nem nulla, az 1-es egyenlet egyszerűsíthető.

$$F_1 \cdot \sin(\tau) = \Delta F \cdot \sin(\tau) + F_2 \cdot \sin(\tau) \quad (1)$$

$$F_1 = \Delta F + F_2 \quad (2)$$

A szimuláció célja az  $\Delta F$  erő változásának vizsgálata, amely korrelál a pilóta által alkalmazott fék kitérési szögek különbségével. Ezért az egyetlen dolog, amit meg kell tenni, az  $F_1$  és  $F_2$  erők kiszámítása, amelyek a bal és a jobb szárny erői. Ezt a jól ismert 3-as és 4-es egyenletek használatával lehet megtenni.

$$F_1 = \rho/2 \cdot S/2 \cdot v_1^2 \cdot c_{F1} \quad (3)$$

$$F_2 = \rho/2 \cdot S/2 \cdot v_2^2 \cdot c_{F2} \quad (4)$$

A bal és a jobb oldali erő közötti különbségek a sebesség ( $v$ ) és az erőtényező ( $c_F$ ). A sebesség az 5-ös egyenletekkel számítható ki.

$$v_1 = r_1 / r_k \cdot v_k$$

$$v_2 = r_2 / r_k \cdot v_k \quad (5)$$

$$v_{CG} = r_{CG} / r_k \cdot v_k$$

Ezekhez az egyenletekhez meg kell határozni a fordulási sugarat, amelyet a 6-os egyenlet végez, amelyben a bedöntési szöget  $\Psi$  jelöli.

$$r_{sp} = v_{sp}^2 / (g \cdot \text{tg}(\Psi)) \quad (6)$$

Mint már említettük, a siklóernyők csak a siklási sebesség növelésével tudják biztosítani a szükséges nagyobb emelőerőt. Ezt a szükséges sebességet ( $v_k$ ) a 7. képlettel lehet kiszámítani, amely az aerodinamikai és gravitációs erők egyensúlyából került levezetésre.

$$v_k = \sqrt{(2 \cdot m \cdot g \cdot \sqrt{(\cos^2(\Theta_k) + \text{tg}^2(\Psi))}) / (\rho \cdot c_{Fk} \cdot S))} \quad (7)$$

Így kiszámítható a sebességkülönbség. Ezen a ponton csak az erőtényezőt kell meghatározni ahhoz, hogy a szimulációs modell működjön. A 8. egyenleten látható, hogy az átlagos erő-együttható ( $c_{Fk}$ ) a bal és a jobb szárny siklási szögekülönbségeivel van beállítva.

$$\begin{aligned} c_{F1} &= c_{Fk} - (\Theta_k - \Theta_1) \cdot c_F^\alpha \\ c_{F2} &= c_{Fk} + (\Theta_2 - \Theta_k) \cdot c_F^\alpha \end{aligned} \quad (8)$$

A 9-es egyenlet azt mutatja, hogy a különböző pontok vízszintes és függőleges sebességéből hogyan számítható ki a siklási szög.

[8] Rohács J.–Nagy A.–Rohács D. (2014): *Measurement platform development for the investigation of paraglider turning characteristics*, 1., (4.), IJMEA-E20140630-6,

$$\begin{aligned}\Theta_1 &= \arctg(w_{SP}/v_1) \\ \Theta_k &= \arctg(w_{SP}/v_k) \\ \Theta_2 &= \arctg(w_{SP}/v_2)\end{aligned}\quad (9)$$

A szimulációs modell Matlab környezetben valósult meg. Számos paraméterrel rendelkezik, amelyeket meg kell határozni annak érdekében, hogy lehetővé váljon a valódi siklóernyők szimulálása. A paramétereket egyéni mérési rendszer és repülés közbeni mérések segítségével határozzák meg, amelyeket korábban [8] tettek közzé.

## Eredmények

A szimulációs paraméterek mérésekkel történő meghatározása után a szimuláció eredményei összehasonlíthatók a valódi siklóernyők viselkedésével. Ezt úgy tették, hogy videófelvételeken figyelték meg a siklóernyők valódi repülés közbeni fordulását.

A Nova Rookie S típusú siklóernyő szimulációs paraméterei a következők:

Geometriai paraméter  $y_1 = 2,7$  m

$z_1$  geometriai paraméter = 0,39 m

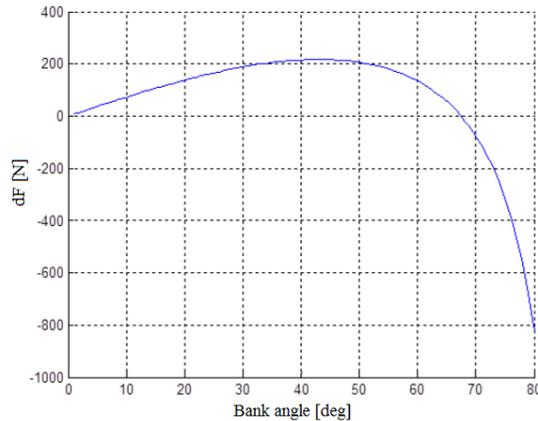
átlagos erő-együttható:  $C_F = 0,9$

erő-együttható derivált:  $C_{La} = 5,6$

Átlagos siklási arány:  $k = 7,1$

A 3. ábrán látható a leginkább érdekes eredmény: a bal és a jobb szárny erőkülönbsége (dF) a dőlésszög függvényében.

Az ábrán megfigyelhető, hogy egy pontig a dF egyre nagyobb lesz, ahogy a dőlésszög növekszik. A függvény maximális pontján (itt kb. 42°) a pilótának maximális különbséget kell alkalmaznia a bal és a jobb fék kitérítés között, hogy fenntartsa az adott bedöntési szögű, statikus fordulót. A funkció maximális pontja és nulla pontja között (itt kb. 68 fok) a pilótának egyre kevesebb fékkülönbséget kell kifejtenie, míg a nulla ponttól 90 fokig a pilótának negatív erőkülönbséget kell alkalmaznia. A negatív ebben az esetben azt jelenti, hogy a (a fordulóhoz képesti) külső féket kell lehúznia, nem pedig a belsőt.

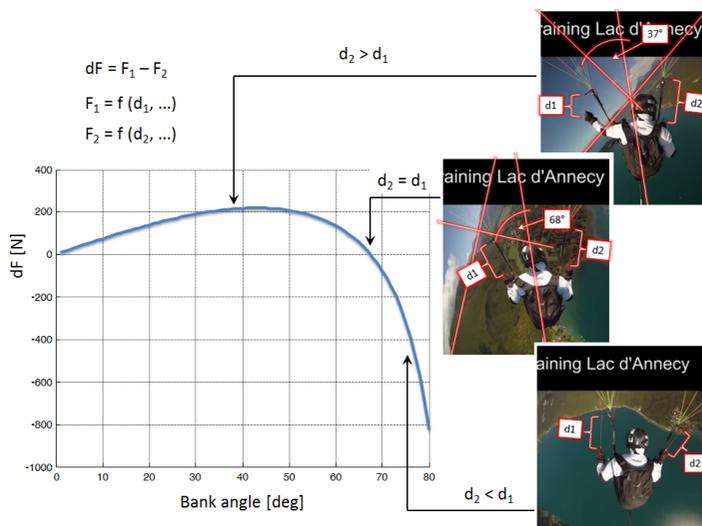
3. ábra. Erőkülönbség ( $dF$ ) különböző bedöntési szögű statikus fordulóban

A siklóernyő ilyen viselkedése akkor valósítható meg, ha ezt a nagy bedöntésű, mély spirált egy gyakorlott pilóta hajtja végre. Mély spirálban a siklóernyő jelentős függőleges sebességgel rendelkezik (akár 20–25 m/s), míg a vízszintes sebesség is meglehetősen magas. A nagyon szűk forduló miatt a pilótát nagyobb centrifugális erő éri, ami több balesetet kiváltó oka volt. Néhány esetben a pilóta azért nem tudja irányítani és befejezni a manővert, mert eszméletét veszítette.

A 4. ábrán ismertetjük a validálási módszert, amelyet a szimulációs eredmények és a siklóernyők valós viselkedésének összehasonlítására használtunk. A felhasznált videó a [9]-ből származik, amelyben egy profi pilóta különböző bedöntésű fordulókat hajtott végre. A belső szárnyat a 2-es index, míg a külső szárnyat az 1-es index jelöli. Amint az az előző bekezdésben leírt egyenleteken látható, a  $dF$  erő jelzi a fékerő-különbségek irányát és nagyságát, amely szükséges a statikus forduló fenntartásához, és amelyet a pilótának tartania kell.

A 4. ábra első esetében a dőlésszög alacsony,  $d_2 > d_1$  reláció igaz, ami azt jelenti, hogy a belső szárny fékén nagyobb az kitérítés. Ez a siklóernyők normális fordulója, amelyben stabil viselkedést mutat. A funkció maximális pontjának áthaladásával a forduló instabillá válik, mivel kevesebb fékre van szükség a nagyobb dőlésszög fenntartásához. A nulla ponton (itt  $\sim 68^\circ$ ) mindkét oldalon egyenlő fékkitérítésre van szükség, amint az a jobb középső képen megfigyelhető. Ezt követően még nagyobb dőlésszögben a külső szárny fékjét jobban ki kell téríteni. Ebben a tartományban a függőleges sebesség meglehetősen magas, a merülési spirál nagyon szűk, ami jelentős centrifugális erőt jelent a pilótának.

4. ábra Eredmények validálása a [9] videófelvételeinek felhasználásával



## Összefoglalás

Ebben a cikkben a siklóernyők viselkedésének vizsgálatát statikus, kiegyensúlyozott fordulóban mutattam be. A vizsgálathoz használt szimulációs modell részletesen ismertetésre került. Az eredményeket az interneten elérhető videofelvételek feldolgozásával validáltuk.

Az eredmények azt mutatják, hogy a siklóernyőknek 3 féle fordulóját különböztethetünk meg: (a) alacsony dőlésszögű, amelyben a siklóernyős stabil viselkedést mutat, (b) mérsékelt dőlésszögű, amelyben a siklóernyős instabil, de mégis a belső féket kell alkalmazni, és (c) nagy dőlésszögű, amelyben a siklóernyő rendkívül instabil, és a külső féket kell alkalmazni a kiegyenlített forduló fenntartása érdekében.

# *Design of PEIS: A Low-Cost Pipe Inspector Robot*

**Abstract:** This paper outlines the design of a novel mechatronic system for semi-automatic in-spection and white-water in-pipe obstruction removals without the need for destructive methods or specialized manpower. The device is characterized by a lightweight structure and high trans-portability. It is composed by a front, a rear and a central module that realize the worm-like lo-comotion of the robot with a specifically designed driving mechanism for the straight motion of the robot along the pipeline. The proposed mechatronic system is easily adaptable to pipes of various sizes. Each module is equipped with a motor that actuates three slider-crank-based mechanisms. The central module incorporates a length-varying mechanism that allows forward and backward locomotion. The device is equipped with specific low-cost sensors that allow an operator to monitor the device and locate an obstruction in real time. The movement of the device can be automatic or controlled manually by using a specific user-friendly control board and a laptop. Preliminary laboratory tests are reported to demonstrate the engineering feasibility and effectiveness of the proposed design, which is currently under patenting.

**Keywords:** Pipe inspection; robot; detection.

## Introduction

In the last decade, we have been experiencing a growing demand for robotic systems aimed at assisting and collaborating with humans toward unsafe or difficult tasks, widening a great market potential for service robotics applications as reported, for example, in [1]. In-pipe robots are one of the emerging areas of practical service applications where a robot can explore a pipe from the inside to perform various inspections and maintenance tasks.

\* *University of Calabria, Department of Mechanical, Energy, and Management Engineering*  
E-mail: giuseppe.carbone@unical.it

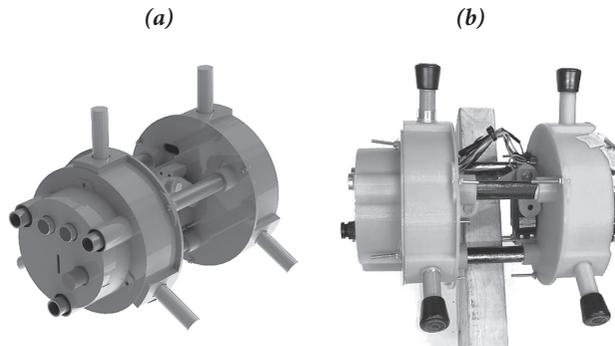
\*\* *University of Dunaijváros, Department of Control Engineering and Information Technology*  
E-mail: podry@uniduna.hu

Pipeline grids of various sizes and materials are pervasive in today’s modern society and they require frequent inspection and maintenance, setting very challenging engineering tasks. Obstructions in pipes are sometimes spotted by the insertion of probes equipped with cameras or even manually in poor areas but is most often avoided because of the costs needed for the operation; long sections of pipes are replaced straight away. Buried white-water pipe infrastructures are regularly in need of maintenance, the cost of which may be significantly reduced by more precisely locating faults by means of in-pipe robots as reported, for example, in [2]. Several approaches and prototypes have been proposed, such as those based on wheeled locomotion [3], crawler locomotion [4], caterpillar locomotion [5], wall-press locomotion [6], walking locomotion [7], inchworm locomotion [8], screw locomotion [9], and spiral locomotion [10]. Each design solution has some merits and drawbacks that make each preferable for specific applications. Among the existing solutions, particularly interesting is the worm-like locomotion as reported, for example, by [11–13]; other locomotion strategies can be based on hybrid solutions and combinations of locomotion principles, such as that in [14,15,16].

This work presents the mechanical, electrical and control design of PEIS (PipE Inspector System). This is a low-cost pipe inspector robot, which introduces a novel, low-cost locomotion mechanism that has been designed and built by the authors at University of Calabria as shown in *Figure 1*. The proposed locomotion mechanisms allow to easily adapt the device to pipelines of various sizes with horizontal-, inclined-, or even vertical-motion directions.

The paper is organized as follows: Section 2 outlines the mechanical design of the proposed PEIS device with focus on the modeling and synthesis of the locomotion mechanism. Section 3 focuses on a dynamic analysis and simulation of PEIS to size the main components, including the mechanical parts, joints, and actuators, with proper performance to fulfil the desired task requirements. Section 4 focuses on the robot controller to achieve a suitable and stable operation of PEIS. Section 5 outlines the selection of proper, low-cost sensory components and details the electronics and control hardware set-up. Section 6 reports some preliminary experimental results to demonstrate the engineering feasibility and effectiveness of the proposed design that is currently under patenting.

*Figure 1. The proposed PEIS design: (a) 3D CAD model; (b) built prototype of PEIS at DIMEG, University of Calabria.*



## Mechanical Design

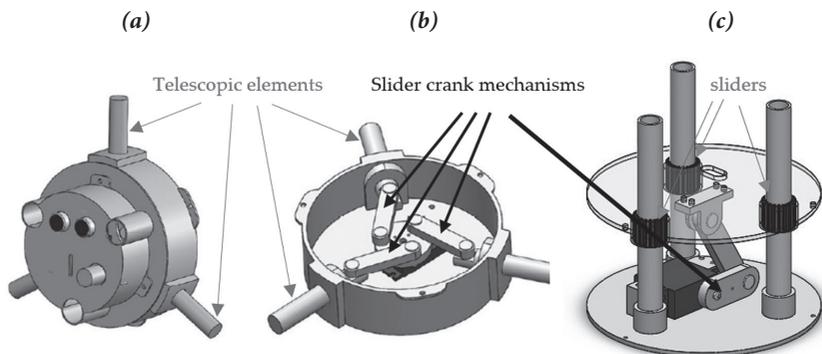
White-water pipelines are particularly subjected to occlusions caused by debris from various sources. They are usually designed using straight pipes of 200 mm to 600 mm in diameter, spaced out by  $500 \times 500$  mm square inspector manholes. This kind of pipe-system design simplifies the proposed solution from a mechanical point of view, and it leads to a cost reduction that is a key factor for the proposed mechatronic device. The target groups of the device are, indeed, small businesses and local administrations. The mechatronic system should be easy to use to avoid the employment of highly specialized manpower. Another important feature needed is the capability to explore sloped pipes and to adapt to different pipe diameters. After a careful analysis of the literature and the specifically addressed application task, we have identified the following main design requirements:

- Suitable for pipelines with a diameter ranging from 200 to 600 mm.
- Device length lower than 400 mm (for easy fitting into the  $500 \times 500$  mm manholes).
- Power supply lower than 60 W (for autonomous driving and power autonomy).
- Weight lower than 3 kg (for transportability and for avoiding damages to the pipeline).
- Holding force ranging from 20 to 30 N (to avoid slippage and for avoiding damages to the pipeline).
- Move along a straight pipeline (since white-water pipelines are equipped with inspection manholes at any direction change).
- Speed not lower than 5 cm/s (for timely execution of tasks).

As additional requirements, the device should be user friendly and not require specific professional skills for a semi-automatic operation.

The design process is based on multiple, creative-tactic strategies, including morphological charts to help the topology synthesis, which led to a topology with three modules. Namely, the front module and the back module are the “grasping modules”, being able to hold the robot body relative to the pipe walls. A schematic view of the front module is reported in Figure 2a. This module hosts most of the sensors and electronic components. The front and back module are equipped with telescopic elements that are driven by a specifically designed mechanism. This is schematically outlined in Figure 2b. Each grasping module is based on a crank-shaft mechanism with three interchangeable pistons of various lengths and a single circular crank actuated by a servomotor. The rotation of the slider-crank mechanisms produces the extension of the telescopic elements, which hold firmly a module attached to the pipeline surface. The front or back module are actuated alternatively so that one of them is attached to the pipeline surface and the other one is free to move. The central body module embeds a crank-shaft mechanism actuated by a servomotor that makes the length of the robot vary, thus allowing it to move in a worm-like manner. The locomotion module is based, again, on a slider-crank mechanism that displaces the front module relative to the back module as shown in Figure 2c. Accordingly, the locomotion strategy consists of locking one of the front or back modules and allowing the locomotion module to displace forward or backward the other module. The following sections outline the main aspects of the proposed mechanism design as based on the outlined conceptual design.

**Figure 2. Details of the proposed PEIS design: (a) the front module; (b) the pipeline grasping module based on three slider-crank mechanisms, actuating the telescopic elements by using one motor; (c) the central body driving module based on one slider-crank mechanism and three sliders.**



## GRASPING MODULES

Two different configurations were studied. Namely, horizontal locomotion and vertical locomotion. One module at a time is considered, clamped to the wall of the pipe, and a Coulomb static friction coefficient of 0.4 (rubber and wet concrete) is supposed. The worst-case scenario is considered when the friction force is holding the robot as provided by a single piston. This case is outlined in the scheme in *Figure 3*. A 7 N force by a single piston is sufficient to prevent the robot from sliding, based on its own weight (over-estimated as equal to 1 kg), using a safety factor of two. Given the free body diagrams in *Figure 4*, it is possible to write the relationship between the force exerted by the piston  $F_x$  and the input servomotor torque  $\tau$  from the equilibrium equation that can be written as

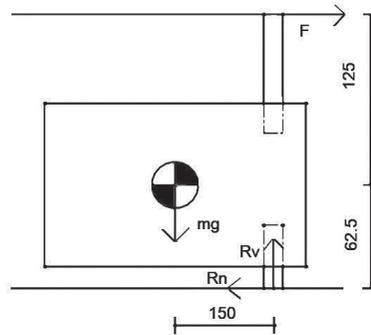
$$F_x = \frac{\tau \cos \alpha}{3 l_m \cos \theta} = \frac{\tau}{3 l_m} \sqrt{\frac{1 - \frac{c^2}{l_m^2} \left[ 1 - \left( \frac{c^2 - l_m^2 - l_b^2}{2 l_m l_b} \right)^2 \right]}{1 - \left( \frac{c^2 - l_m^2 - l_b^2}{2 l_m l_b} \right)^2}} \quad (1)$$

The friction force can be assumed as equal to  $F_s = \mu F_x$  (2) where  $l_m$  is the crank length,  $l_b$  the conrod length,  $c$  the length between the piston and the crank base and  $\theta$  the angle between  $F_{ba}$  and perpendicular to the crank. The dimensional synthesis of the mechanism consists of identifying the values of  $l_m$ ,  $l_b$ , so that the mechanism can exert the desired force  $F_x$  while minimizing the ratio expressed in

$$S = \frac{c}{l_m + l_b} \quad (3)$$

where  $S$  expresses how close a configuration is relative to the kinematic singularity of the slider-crank mechanism. A value too close to the singularity can generate stability problems while a value too far from the singularity will result in a less compact design. It is also worth noting that an additional grasping tool could be added at the front module as proposed, for example, in [17–19].

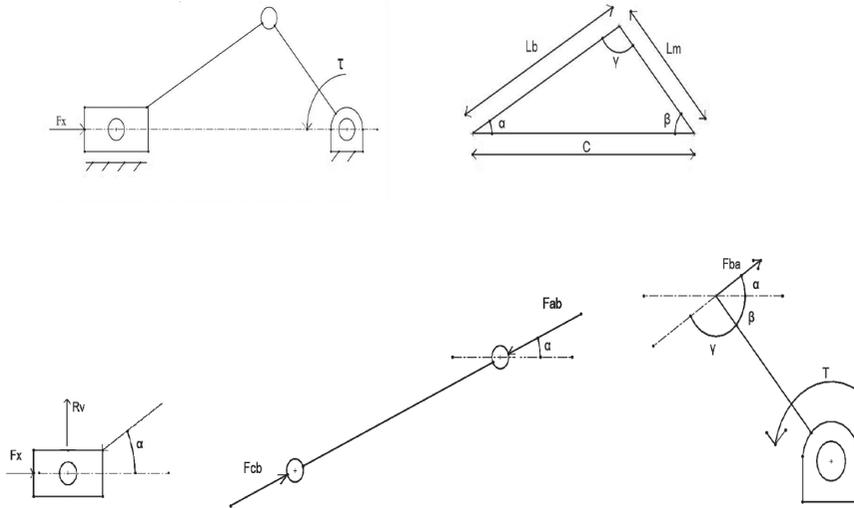
*Figure 3. A free body diagram for static analysis in the horizontal plane.*



#### LOCOMOTION MODULE

The proposed device moves along the pipeline by holding the pipeline wall with its front or rear module through their telescopic elements (*Figure 2*). The worm-like locomotion is achieved by activation of the front and rear module, alternately. Then, the central module displaces the free module relative to the one holding the pipeline wall. Reversing the order of activation of the front and rear modules allows to reverse the motion direction. These locomotion steps are repeated cyclically until an obstruction is found or until the operator decides to stop the device. The selected driving mechanism is based on a slider-crank, whose size synthesis is performed based on the desired motion speed and the expected loading conditions defined in the design specifications.

Figure 4. Geometry and free body diagrams of a single slider-crank mechanism in the grasping module.



## Dynamic Analysis

A simplified model was developed for estimating the dynamic effects. The masses and moments of inertia of the main components have obtained from the 3D CAD model of the device. These terms are used to implement a Euler–Lagrange set of equations of motion that are solved in a Matlab environment. We assume the slider-crank mechanisms as planar mechanisms; also, we assume homogeneous materials, rigid parts, perfect constraints, and a safety factor equal to two to take into account the neglected aspects.

### HORIZONTAL MOTION

The Euler–Lagrange equation (Equation (4)) is written by considering the 1 DOF slider-crank mechanism, whose scheme is shown in *Figure 5*, in the following form:

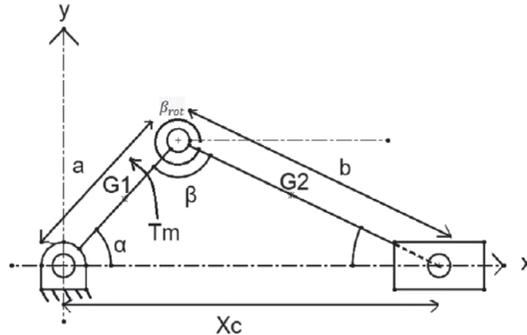
$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = \tau_m \quad (4)$$

where  $\dot{\alpha}$  is the time derivative of  $\alpha$  depicted in Figure 4,  $\tau_m$  is the servo couple and  $L$  is the “Lagrangian” defined as the difference between the sum of the kinetic energy and the sum of the potential energy of the member in Equation (5).

$$\begin{aligned} L &= \sum E_c - \sum E_p = \quad (5) \\ &= \frac{1}{2} \left[ m_1 V_{G_1}^2 + I_1 \dot{\alpha}^2 + m_2 V_{G_2}^2 + I_2 \dot{\beta}_{rot}^2 + m_p V_c^2 \right] - m_1 g G_{1y} - m_2 g G_{2y} \end{aligned}$$

where  $m_i$ ,  $V_{G_i}$ ,  $I_i$  are the  $i^{\text{th}}$  member mass, center of gravity velocity and moment of inertia, respectively.  $G_{1y}$  and  $G_{2y}$  are the  $y$  coordinates of the crank and the rod, respectively;  $V_c$  and  $m_p$  are the front module velocity and mass;  $\dot{\alpha}$  and  $\dot{\beta}_{rot}$  are angles time derivative; and  $g$  is the gravitational acceleration, referring to the scheme in Figure 5.

Figure 5. A scheme of the slider-crank mechanism for driving the central module.

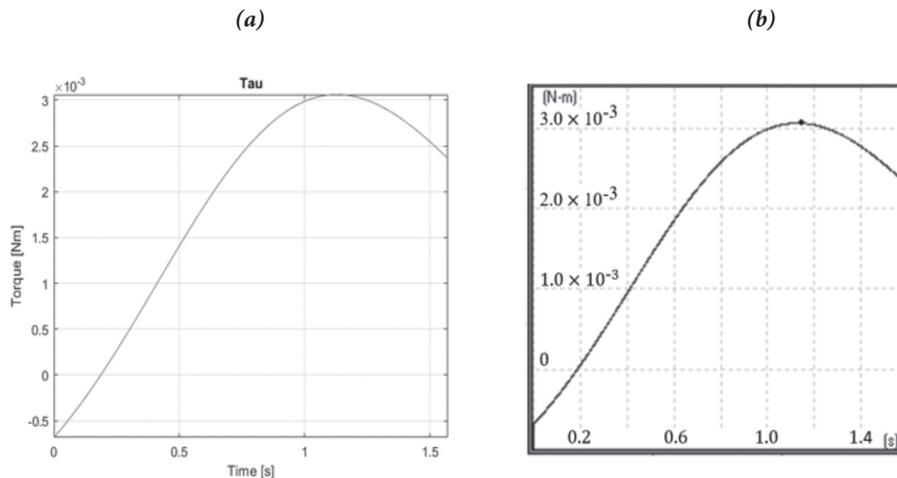


Geometrical considerations and the substitution of previous terms lead to the motion equation in the following form:

$$f [\ddot{\alpha}(t), \dot{\alpha}(t), \alpha(t), t] = \tau_m(t) \quad (6)$$

A constant rotational speed is imposed in order to check the capability of the servomotors to make the device advance and to make an estimate of the maximum motor torque needed during the operation after the transient phase. This leads to the results shown in *Figure 6*, which are compared with similar results that were obtained by a simulation in the Working Model multibody simulation software with the same input data. The maximum required absolute torque can be estimated from *Figure 6* as about 0.003 Nm.

**Figure 6. Simulation results for motor sizing during a horizontal motion: (a) Simulated torque in a Matlab environment; (b) simulated torque in the Working Model environment from 0 to 1.5 s.**



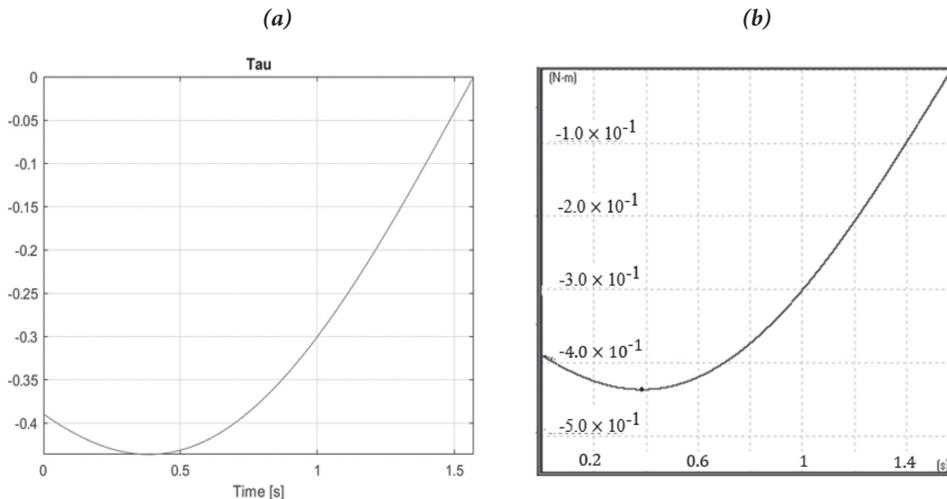
## VERTICAL MOTION

This case is addressed again by developing a proper formulation as based on the Euler–Lagrange approach. The main difference is given by the presence of the potential energy of the piston that can be computed as follows:

$$\begin{aligned}
 L &= \sum E_c - \sum E_p = \\
 &= \frac{1}{2} \left[ m_1 V_{G_1}^2 + I_1 \dot{\alpha}^2 + m_2 V_{G_2}^2 + I_2 \dot{\beta}_{\text{rot}}^2 + m_p V_c^2 \right] \quad (7) \\
 &\quad - m_1 g G_{1x} - m_2 g G_{2x} - m_p g x_c
 \end{aligned}$$

where  $G_{1x}$  and  $G_{2x}$  are the x coordinates of the crank and of the rod, while the other terms have the same formulation as reported in Equation (5). The required can be obtained by referring to the plot in Figure 7 as having a maximum absolute value of about 0.45 Nm.

Figure 7. Simulation results for motor sizing during a vertical motion: (a) simulated torque in a Matlab environment; (b) simulated torque in the Working Model environment from 0 to 1.5 s.



## Control Synthesis

The motion of the system can be described with the state space representation as follows. The linearization of Equation (6)  $\ddot{\alpha}(t) = f'(t, \alpha(t), \dot{\alpha}(t), \tau_m(t))$  with  $x = (\alpha, \dot{\alpha})^T$  state vector and  $u = \tau_m$  input of the physical system around the equilibrium  $(\pi/2, 0, 0)$  results in the following:

$$\dot{x} = \frac{\partial f'}{\partial x} x(t) + \frac{\partial f'}{\partial u} u(t), \quad (8)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

where  $y=Cx$  and, moreover,  $A$  and  $B$  are the state and input matrices, respectively. It is assumed, that the output of the system is fully measurable, therefore  $y=[1 \ 0]x=\alpha$ . Based on Equation (6), the matrices  $A$  and  $B$  are given as follows.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1.9871 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 840.3253 \end{bmatrix} \quad (9)$$

The evaluation of the controllability matrix results is  $M_c=[B \ AB]$ , where  $\text{rank } M_c=2$ . Based on the Kalman rank condition for controllability, the system described with Equation (8) is controllable since  $\dim x=2$ . As a result, a linear quadratic regulator (LQR) is proposed for the stabilization of the system, using the controllable system  $(A,B)$ . The LQR algorithm establishes a cost function  $J(x,u)$  for the obtainment of optimal state-feedback gain  $K$ . This feedback gain minimizes the following cost function, thereby providing both good system response and feasible control action:

$$J(x, u) = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^T Q x_k + u_k^T R u_k) + \frac{1}{2} x_N^T Q x_N, \quad (10)$$

where  $Q = Q^T \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ ,  $Q \geq 0$  and  $R \in \mathbb{R}$ ,  $R > 0$  are the weights in Equation (10), which determine the dynamics of asymptotic stability related to the control signal  $u_k = -Kx_k$  in the  $k$ th epoch. The feedback matrix is calculated as  $K=(R+B^T PB)^{-1} B^T PA$ , where  $P=P^T \geq 0$  denotes the solution of the Control

Algebraic Riccati equation. To ensure the reference tracking as well, the  $N_x$  and  $N_u$  matrices are employed as follows:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_u \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0_2 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

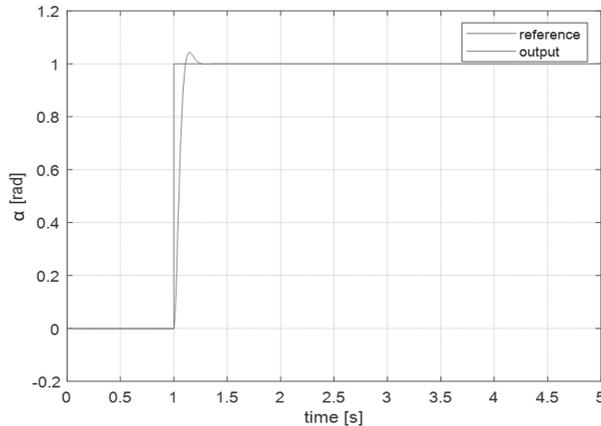
As a result, the control signal is obtained  $u = -Kx + (N_u + KN_x)r$ , where  $r$  is the reference signal, while the matrices are given as follows:

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = 50 \quad (12)$$

$$K = [1.1110 \quad 0.0514], \quad N_x = [1 \ 0], \quad N_u = -0.0024$$

Based on *Equations (9) and (12)*, the corresponding step response of the closed loop system is plotted in the following *Figures 8 and 9*. The simulation results show that the implemented LQR strategy stabilizes the system around the reference signal.

**Figure 8. Reference tracking performance in terms of  $\alpha$  versus time.**



A similar analysis can be conducted for the vertical motion. Based on *Equation (7)*, the linearization of the equations of motion is obtained, then the state and input matrices are derived as follows:

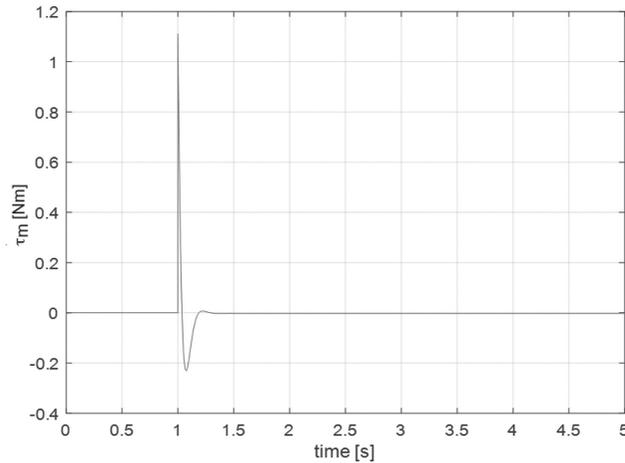
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 187.6978 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 840.3253 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Then, the state feedback and reference tracking matrices are calculated based on *Equations (10) and (11)*, which are given as follows.

$$\mathbf{K} = [1.3238 \quad 0.0552], \quad \mathbf{N}_x = [1 \quad 0], \quad N_u = -0.2234 \quad (14)$$

The aforementioned results enable the definition of the control signal  $u = -\mathbf{K}\mathbf{x} + (\mathbf{N}_u + \mathbf{K}\mathbf{N}_x) r$ , which ensures asymptotic stability.

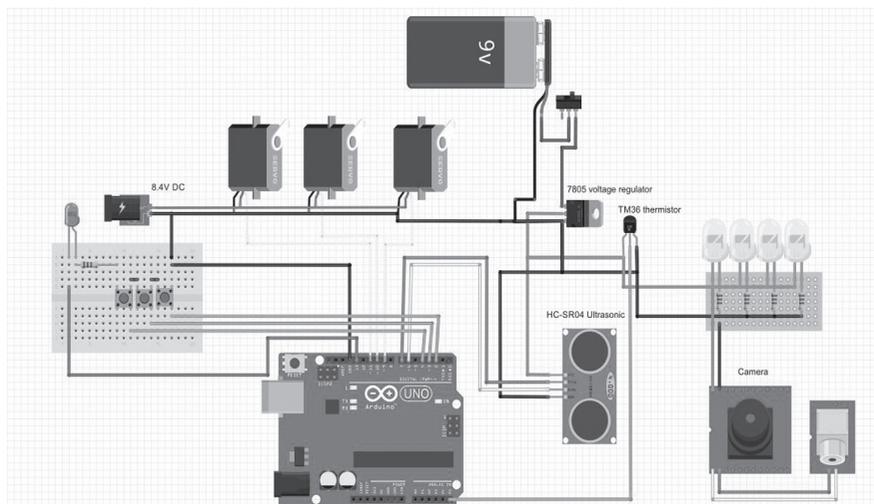
*Figure 9. Reference tracking performance in terms of motor torque versus time.*



## Sensors and Electronics

The robot is equipped with multiple sensors because it needs to obtain various information from the outside world. The sensors are powered by a battery located in the rear module and the motors are powered by an external, cabled power source. An alert LED and manual command buttons are located on a board that remains outside of the pipe during the operations. The electrical scheme is presented in Figure 10. This control architecture can allow user-friendly operation in which an operator places the device at the beginning of a pipeline. Then, a latch switch turns on the device, including the LED lighting and all sensory feedbacks, which are streamed on the screen of a laptop and stored for further analyses. A second latch switch selects the operation direction (forward or backward). The device automatically stops when it reaches an obstruction while streaming a camera view to inspect the characteristics of an obstruction. Furthermore, the sensory feedback allows to identify the position of the obstruction relative to the initial position of the robot at the pipeline entrance.

*Figure 10. A scheme of the electrical wiring.*



### PROXIMITY SENSOR

An essential feature of the device is being able to detect the occlusion. This is achieved using a proximity sensor located on the front module. The HC-SR04 sensor (Robot Italy, Rome) used is an ultrasonic one: the sensor is very well suited for the purpose since it is cheap, simple and works in a dark environment.

### TEMPERATURE SENSOR

The temperature sensor is a tmp36 (Robot Italy, Rome) and is used to obtain the in-pipe temperature. This information is used to correct the proximity sensor measurement because sound speed depends on the temperature of the medium. It is located at the front module.

### CAMERA

The camera and the lights mounted on the front module allow to see a live feed of the inside of the tube, thus allowing an operator to evaluate the nature of the obstruction present and check for potential damages of the pipe.

The logic implemented realizes the autonomous motion of the robot by controlling, in the right order, the positions of the servos. The control loop also checks for the presence of obstacle after each step and listens to possible user inputs. If an input is detected, the control is overridden and the user can move the robot forward or backward, while it continues to automatically grasp the pipe. If no input is received, the robot memorizes the number of steps to estimate the distance of the obstacle and allows an autonomous backward motion to bring itself to the entrance of the pipe. Details of the built prototype are reported in *Figure 11*.

### INERTIAL MEASUREMENT UNIT

The electronics can be extended with an inertial measurement unit (IMU) code MPU-9250 (Robot Italy, Rome) to capture vibrations and parasitic accelerations and localize disturbances. The IMU is an extension that provides additional information of the state of the system with the accelerometer, gyroscope, and magnetometer sensors. The magnetometer can be used to identify and localize magnetic disturbances during the motion of the system. Additionally, the accelerometer and gyroscope signals can be incorporated

in a state-of-the-art filter algorithm to monitor the instantaneous orientation of the system. This orientation filter is characterized by core parameters that determine the state estimation convergence; therefore, the filter parameters should be carefully chosen to ensure accurate state measurements. An efficient approach to evaluate the filter performance and to tune the filter parameters is proposed in [20].

## Preliminary Tests

The preliminary tests were carried out by using a 3D-printed proof-of-concept prototype as proposed in [21]. The experimental tests consisted of the following steps:

Place the device at the beginning of a pipeline.

Turn on the device with a latch switch. This activates the device including all sensory feedbacks that are streamed on the screen of a laptop and stored for further analyses.

Turn on the latch switch, selecting the semiautomatic forward motion. The device automatically stops when it reaches an obstruction while streaming a camera view to inspect the characteristics of the obstruction.

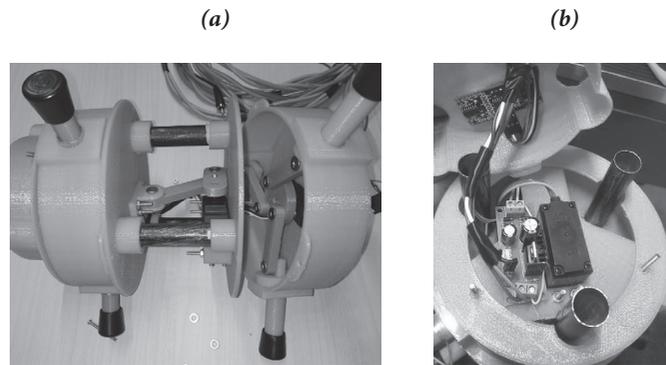
Upon reaching an obstruction, the operator can visually inspect the obstruction by using video streaming. Furthermore, the sensory feedback allows to identify the position of the obstruction relative to the initial position of the robot at the pipeline entrance.

Turn on the latch switch, selecting the semiautomatic backward motion. The device automatically stops when it is back at the initial position.

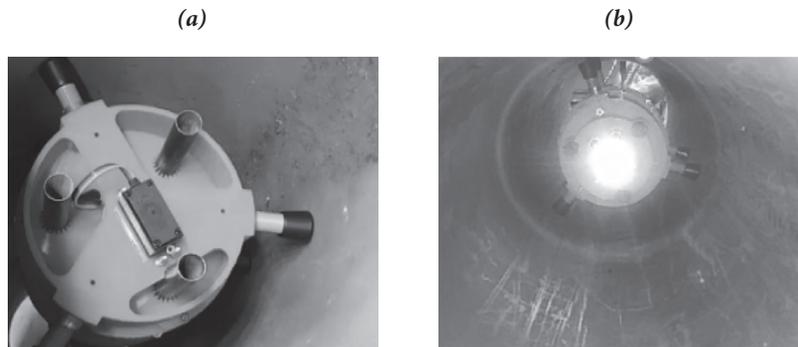
The same operation strategy was implemented for several tests. In particular, the PEIS prototype was able to advance in pipelines that were horizontal, but also in a sloped pipeline and even in a vertical pipeline as shown in Figures 11 and 12. The locomotion principle was very effective in all operation conditions with a simple operation and no grip loss. Various obstructions were successfully detected, and the LED light, placed on the front module, allowed for seeing clearly through the camera. The drive current and servomotor position/velocity feedback were monitored during operation. All the obtained readings were within maximum values in the range 0.6 to 0.8 amperes, and their values are compatible with the simulated values, even exceeding the performance expectations. The temperature and distance detection were obtained with readings in the expected error range. The manual control worked well with no appreciable delay. Several different types of obstructions were tested in terms of shape, size and position of obstacles in the pipeline. The used ultrasonic sensors were proven to be very effective in identifying the obstructions, regardless of their shape, size and position. The detection distance can be adjusted starting from a range of 1 m. Then, the operator can use video streaming to further inspect the characteristics of the obstruction.

The performed tests successfully demonstrated the engineering feasibility of the proposed design as well as the user-friendliness of the proposed design, which can be operated without professional skills in a semi-automatic operation. Note that the aim of this work consisted of proposing a conceptual design. In future, we do plan to design an improved prototype and carry out more experiments as based on the outcomes of this work. Additionally, we do plan to perform safety tests, such as those outlined in [22].

*Figure 11. Details of the assembling phases of PEIS at DIMEG, University of Calabria: (a) view of the back module assembly; (b) view of the front module with main electronics and sensors.*



*Figure 12. Details of the testing of PEIS at DIMEG, University of Calabria: (a) with natural light conditions; (b) with the onboard lighting in dark conditions.*



## Conclusions

This paper outlines the design of a PEIS novel robotic system for semi-automatic inspection and white-water in-pipe obstruction removal. The proposed device is characterized by a lightweight structure and high transportability. It is composed of a front, a rear and a central module that realize a worm-like locomotion of the robot with a specifically designed driving mechanism. Proper modeling and numerical simulations were carried out to complete the design of the prototype. The proposed prototype is integrated with control and sensory components and was preliminarily validated in laboratory tests under various operation conditions with horizontal and even vertical pipelines. All the tests were successful. The obtained preliminary results demonstrated the engineering feasibility and effectiveness of the proposed design with satisfactory in-pipe motion and inspection with proper visual and sensory detection of obstacles by means of the onboard camera, proximity sensor, temperature sensor, and IMU sensor. Further investigations will be carried out in the near future to integrate further sensory feedback as well as to test the device in real operation conditions.

## Patents

A specific Italian patent application has been made for the PEIS design as reported in [23].

*Author Contributions:* Conceptualization, M.M.S., A.G., L.M., G.P. and G.C.; methodology, M.M.S., A.G., L.M., G.P. and G.C.; investigation, M.M.S., A.G., L.M., G.P. and G.C.; writing—original draft preparation, M.M.S., P.O., G.C.; supervision, G.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

*Funding:* This work was partially supported by the EFOP-3.6.1-16-2016-00003 project, which is co-financed by the European Union. Peter Odry was also partially supported by the 2020-4.1.1-TKP2020 program.

*Institutional Review Board Statement:* Not applicable.

*Informed Consent Statement:* Not applicable.

*Data Availability Statement:* Not applicable.

*Conflicts of Interest:* The authors declare no conflict of interest.

## References

- [1] Aspragathos, N.–Moulianitis, V.–Koustoumpardis, P. (2020): Special Issue on Human–Robot Interaction (HRI). *Robotica* 2020, 38. Pp. 1715–1716.
- [2] Worley, R.–Anderson, S. (2020): Topological robot localization in a pipe network. In Proceedings of the UKRAS20 Conference: “*Robots into the Real World*” Proceedings, Online conference. EPSRC UK-RAS Network, Pp. 59–60.
- [3] Carbone, G.–Malchikov, A.–Ceccarelli, M.–Jatsun, S. (2009): *Design and Simulation of Kursk Robot for In-Pipe Inspection*. In: Proceedings of the 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines SYROM’09, Brasov, Springer: Dordrecht. Pp. 103–114.
- [4] Roman, H. T.–Pellegrino, B. A.–Sigrist, W. R. (1993): *Pipe crawling inspection robot: An overview*. IEEE Trans. Energy Convers. Pp. 576–583.
- [5] Nagano, S.–Oka, Y. (1988): *Application of In-Pipe Visual Inspection Robot to Piping Internal Surface Lining*. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Robotics in Construction, Tokyo, Pp. 897–906.
- [6] Pfeiffer, F.–Robmann, T.–Loffer, K. (2000): *Control of a Tube Crawling Machine*. In Proceedings of the International Conference on Control of Oscillations and Chaos, S. Petersburg, Russia. 5–7. July 2000. Volume 3; Pp. 586–591.
- [7] Bertetto, A. M.–Ruggiu, M. (2001): *In-pipe inch-Worm Pneumatic Flexible Robot*. In: Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Como. Pp. 1226–1231.
- [8] Anthierens, C.–Ciftci, A.–Betemps, M. (1999): *Design of an Electro Pneumatic Micro Robot for In-Pipe Inspection*. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Bled. Pp. 968–972.
- [9] Tourajizadeh, H.–Boomeri, V.–Rezaei, M.–Sedigh, A. (2020): Dynamic Optimization of a Steerable Screw In-pipe Inspection Robot Using HJB and Turbine Installation. *Robotica*, Pp. 2001–2022.
- [10] Liang, L.–Chen, B.–Tang, Y.–Xu, Y.–Liu, Y. (2019): Operational performance analysis of spiral capsule robot in multiphase fluid. *Robotica*, Pp. 213–232.
- [11] Tang, Z.–Lu, J.–Wang, Z.–Ma, G.–Chen, W.–Feng, H. (2020): Development of a New Multi-cavity Pneumatic-driven Earthworm-like Soft Robot. *Robotica*, Pp. 2290–2304.
- [12] Zhou, F.–Xu, X.–Xu, H.–Chang, Y.–Wang, Q.–Chen, J. (2020): Implementation of a Reconfigurable Robot to Achieve Multimodal Locomotion Based on Three Rules of Configuration. *Robotica*, Pp. 1478–1494.
- [13] Roy, R.–Ghoshal, D. (2020): Grey Wolf Optimization-Based Second Order Sliding Mode Control for Inchworm Robot. *Robotica*, Pp. 1539–1557.
- [14] Saab, W.–Racioppo, P.–Kumar, A.–Ben-Tzvi, P. (2019): Design of a miniature modular inchworm robot with an anisotropic friction skin. *Robotica*, Pp. 521–538.
- [15] Carbone, G.–Ceccarelli, M. (2008): A low-cost easy-operation hexapod walking machine. *Int. J. Adv. Robot. Syst.*, 5. Pp. 161–166.
- [16] Carbone, G.–Shrot, A.–Ceccarelli, M. (2007): Operation strategy for a low-cost easy-operation cassino hexapod. *Appl. Bionics Bio-mech.*, 4. Pp. 149–156.
- [17] Yao, S.–Cecarelli, M.–Carbone, G.–Dong, Z. (2018): Grasp Configuration Planning for a Low-Cost and Easy-Operation Underactuated Three-Fingered Robot Hand. *Mech. Mach. Theory*, 129. Pp. 51–69.
- [18] Hernández-Martínez, E. E.–Ceccarelli, M.–Carbone, G.–López-Cajún, C. S.–Jáuregui-Correa, J. C. (2010): Characterization of a cable-based parallel mechanism for measurement purposes. *Mech. Based Des. Struct. Mach.* 38. Pp. 25–49.

- [19] Carbone, G.–Ceccarelli, M. (2008) Experimental Tests on Feasible Operation of a Finger Mechanism in the LARM Hand. *Mech. Based Des. Struct. Mach.*, 36. Pp. 1–13.
- [20] Odry, Á. (2021): An Open-Source Test Environment for Effective Development of MARG-Based Algorithms. *Sensors*, 21. P. 1183.
- [21] Cafolla, D.–Ceccarelli, M.–Wang, M. F.–Carbone, G. (2016): 3D printing for feasibility check of mechanism design. *Int. J. Mech. Control*, 17. Pp. 3–12.
- [22] Cordero, C. A.–Carbone, G.–Ceccarelli, M.–Echávarri, J.–Muñoz, J. L. (2014): Experimental tests in human-robot collision evaluation and characterization of a new safety index for robot operation. *Mech. Mach. Theory*, 80. Pp. 184–199.
- [23] Salvatore, M. M.–Galloro, A.–Muzzi, L.–Pullano, G.–Carbone, G. (2021): *Device for Automatic Monitoring of Occlusions in White Water Pipelines (In Italian)*. Italian Patent Application n. 102021000002651. 05 February 2021.



# Galéria

Duma Bálint fotói













