



ZETOR 10245-TÍPUSÚ MEZŐGAZDASÁGI VONTATÓ KIEGYENSÚLYOZÓTENGELYE FORGÁCSOLÁSTECHNOLÓ- GIÁJÁNAK TERVEZÉSE ÉS VÉGESELEM-SZIMULÁCIÓJA

DESIGN AND FINITE ELEMENT SIMULATION OF ZETOR 10245 TYPE AGRICULTURAL TRACTOR BALANCER AXLE TURNING TECHNOLOGY

Varga Csaba,¹ Szántó Attila,² Asztalos Tamás Gergő,³ Diós Szabolcs Sándor,⁴ Husi Géza⁵

¹ Debreceni Egyetem, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, csabavarga.t@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, Magyarország, szanto.attila@eng.unideb.hu

³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Debrecen, Magyarország, gergoasztalos.28@gmail.com

⁴ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Informatikai Kar, Debrecen, Magyarország, dios.szabolcs@eng.unideb.hu

⁵ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Járműmérnöki Tanszék, Debrecen, Magyarország, husigeza@eng.unideb.hu

Abstract

The project is investigating the production of a balancer shaft for the Zetor 10245 tractor, focusing on vibration reduction for in-line four-cylinder engines. Using 100Cr6 high-carbon bearing steel, advanced meg-machining techniques and finite element simulations were applied to optimize performance and life. Stress analysis, toolpath optimization and precision machining on a DMG MORI NT 4250 DCG machine ensured structural integrity and high-quality output. Surface roughness and performance measurements validated the design, demonstrating the effective integration of material selection, machining, and simulation to increase engine reliability.

Keywords: balance shaft, 100Cr6 steel, finite element simulation, machining optimization.

Összefoglalás

A projekt a Zetor 10245 traktor kiegyensúlyozó tengelyének gyártását vizsgálja, a soros négyhengeres motorok rezgéscsökkentésére összpontosítva. A 100Cr6 magas széntartalmú csapágyacél felhasználásával korszerű megmunkálási eljárásokat és végeselemes szimulációkat alkalmaztak a teljesítmény és az élettartam optimalizálása érdekében. A feszültségelemzés, a szerszámpálya optimalizálása és a DMG MORI NT 4250 DCG gépen végzett precíziós megmunkálás biztosította a szerkezeti integritást és a kiváló minőségű kimenetet. A felületi érdesség és a keménység mérései igazolták a tervezést, bizonyítva az anyagválasztás, a megmunkálás és a szimuláció hatékony integrációját a motor megbízhatóságának növelése érdekében.

Kulcsszavak: kiegyensúlyozótengely, 100Cr6 acél, végeselemes szimuláció, megmunkálásoptimalizálás.

1. Bevezetés

A debreceni régió nemcsak járműipari tekintetben fontos, hanem mezőgazdaságilag is. Éppen ezért a személygépjárművek mellett, a traktorokkal kapcsolatos fejlesztések és karbantartások is fontosak.

A kiegyensúlyozótengely kritikus szerepet játszik a soros négyhengeres motorok rezgéseinek csökkentésében az első- és másodrendű erők ellensúlyozásával. A 100Cr6 magas széntartalmú acél felhasználásával korszerű megmunkálási eljárásokat, például esztergálást, marást és hor-

nyolást alkalmaztam a következőkhöz pontosság és tartósság elérése érdekében. Végeselemes szimulációkat végeztünk a feszültségeloszlás, a deformáció és a valós körülmények közötti teljesítmény értékelésére. Ez az integrált megközelítés biztosítja egy megbízható alkatrész előállítását, mely növeli a motor hatékonyságát és élettartamát. A Zetor 10245 traktor az **1. ábrán** látható.

1.1. Kiegyensúlyozótengely elemzése

A csapágy helyén többféle kopási forma volt szembevetű, átmérő csökkenése, illetve ovalítás is a tengely geometriájából adódóan, a csapágy-felfekvő felületein kívüli bemaródások valószínűleg a fogaskerék lecsúszását követően keletkezett, ugyanis a tengely tovább forgott a tömegéből adódó lendület megmaradása végett. A tengely maga **2. ábrán** tekinthető meg.

A különféle kopások mind egy irányba mutatnak, mégpedig anyagoldali, tervezett élettartam elérése csapágy- és tengelyvonatkozásban is, így az alábbi eset elkerülhetetlen volt **[1, 2]**.

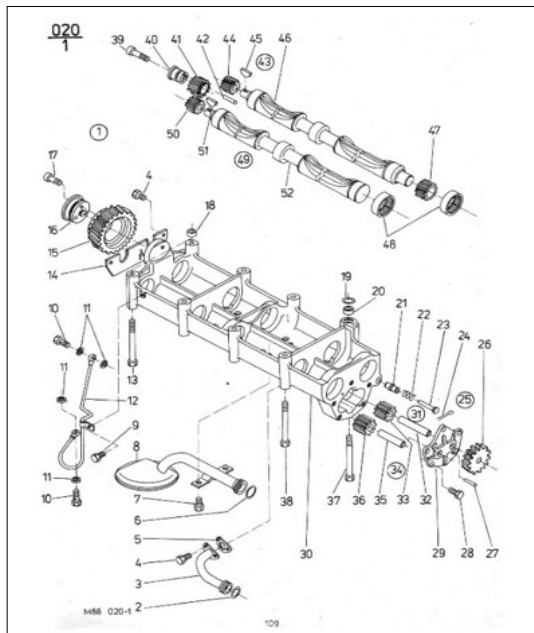
1.2. Anyagválasztás

A Sauter HO ultrahangos keménységmérő rendkívül értékes eszköz volt ebben a projektben a kiegyensúlyozótengely anyagkeménységének és felületi érdességének értékeléséhez. Az alkalmazott mérőműszer a **3. ábrán** látható.

A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy mindkét oldalán közel egyenletes keménységi paraméterekkel rendelkezik, leszámítva az alkatrészcsapágy felületeit, amelyek kiemelkedően magas szilárdságot és kopásállóságot mutatnak a hosszabb tengely élettartam érdekében. A keménységmérés eredményei a **1. táblázatban** kerültek összefoglalásra.

1.3. Választott anyag

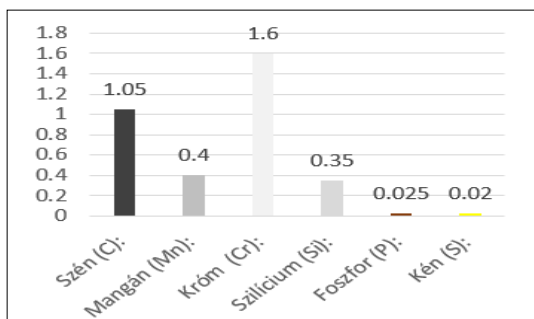
A kiegyenlítőtengelyhez a 100Cr6 anyagot választottam, ez az acél kiváló szilárdsággal, szívóssággal és kopásállósággal rendelkezik, így optimá-



2. ábra. A kiegyensúlyozóegység robbantott ábrája **[3]**



3. ábra. A Sauter HO keménységmérő



4. ábra. 100Cr6 kémiai összetételét ábrázoló diagram **[4]**



1. ábra. Zetor 10245 a tavaszi munkában

1. táblázat. A keménységmérés eredményei

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
21,6 HRC	56,7 HRC	31,1 HRC	58,9 HRC	30,8 HRC	56,9 HRC	22,1 HRC
22,2 HRC	48,1 HRC	27,9 HRC	55,9 HRC	29,2 HRC	57,7 HRC	28,3 HRC

lis választás olyan alkatrészekhez, amelyek a működés során dinamikus terhelésnek és stressznek vannak kitéve (4. ábra).

2. 3D-modell tervezése

A tervezés során az alábbi mérőeszközök kerültek felhasználásra:

- Digitális tolómérő: A tengely külső átmérőjének, hosszának és a kritikus felületek közötti távolságnak a méréséhez.
- Kengyeles mikrométer: A tengely átmérőnek mérésére használtam, biztosítva a mechanikai határokon belüli finomtűrést.
- Rádiuszsablon-készlet: A szerszám segítségével megmértem a kiegyensúlyozótengelyen lévő görbéket és sugarát.

3D-modellezési folyamat kezdeti szakaszában a SolidEdge programban 2D-s alapvázlatokat készítettünk a tengelyről [5]. A mérések során nyert adatok felhasználásával kétdimenziós profilokat hoztunk létre a legfontosabb keresztmetszetekhez, nevezetesen a tengely átmérőjéhez, a fogaskerek helyéhez és a hornyokhoz, íves retesz fészékének kialakításához.

Fusion 360 segítségével a 3D-modell finomításán túl a megmunkálási folyamatot is megterveztük és szimuláltuk. A folyamat első lépése a készlet beállítása, ez magában foglalja a hengeres alapanyag méreteinek meghatározását. Az alkatrész alapjául szolgáló 55 mm átmérőjű, 700 mm hosszúságú tömör rudat, illetve a készlet megfelelő pozicionálását hajtottuk végre a megmunkálási műveletekhez.

3. Esztergálási folyamatok

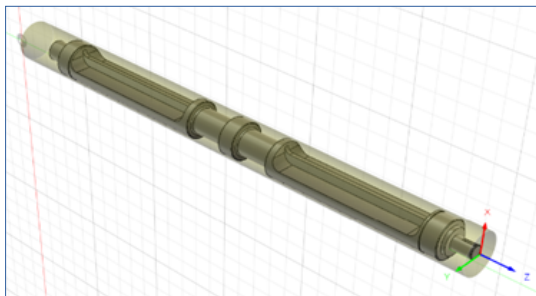
Az esztergálás során minden egyes művelet egyedi célt szolgál a munkadarab alakításában és megmunkálásában, hogy az megfeleljen a kívánt megmunkálási tulajdonságoknak. Ebben a fejezetben az egyes műveletek jellemzőit és paramétereit tárgyaljuk, beleértve a homlokesztergálást, a hosszesztergálás-nagyolást, a hosszesztergálás-simítást, a külső beszúrások nagyolását, a külső beszúrások simítását, a leszúrást és a profil utómunkát [6]. Az importált modellt az 5. ábrán tekinthető meg.

A folyamatok során felhasznált szerszámokat, azaz a Sandvik Magyarország Kft. által ajánlott szerszámokat nagy gondossággal választottuk ki a szükséges pontosság, az optimális felületminőség és a hatékony anyageltávolítás elérése érdekében (6. ábra) [7].

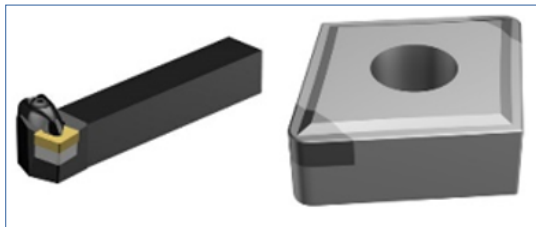
Azért, hogy a tengely végpontjai tökéletesen laposak és pontosan méretezettek legyenek, homlok-megmunkálásokat alkalmaztunk. Ezen esztergálási folyamat közben a szerszámot a munkadarab végződésénél sugárirányban a középvonal felé mozgattuk.

A homlokesztergálás során alkalmazott értékeket a 2. táblázat foglalja össze.

A hosszirányú esztergálás, avagy egyenes esztergálás olyan megmunkálási művelet, amely során a forgácsolószerszám a forgó munkadarab tengelyével párhuzamos irányban mozog, ezáltal csökkentve az átmérőt a hosszában. A külső hornyolás olyan esztergálási művelet, amelynek során a forgácsolószerszám hornyot vagy mélyedést hoz létre a hengeres munkadarab külső átmérője mentén. A külső hornyolásnál a szerszámot közvetlenül a munkadarabba helyezi a kívánt helyre, és a kívánt mélység elérése érdekében sugárirányban mozog az anyagban.



5. ábra. Fusion 360-ban megtervezett modell



6. ábra. DCKNR 2020K 12 esztergalapka-tartó és CNGM12041 2F-HGR 7125 lapka [8, 9]

2. táblázat. Fogásvételek és azok jellemzői a homlok-esztergálás során

	Nagyolás	Simítás
Fogásvételek száma	8	1
Forgácsolási sebesség v_c	145 m/min	145 m/min
Fordulatonkénti előtolás f_n	0.177 mm	0.19 mm
Fogásmélység a_p	0.567 mm	0.465 mm

A leszúrás, mely szintén fontos, olyan esztergálási művelet, amelyet a kész alkatrésznek a maradék munkadarabtól vagy rúdkészletről való elválasztására alkalmaznak (7. ábra).

Az elválasztó művelet során a vágószerszámot közvetlenül a forgó munkadarabba vezetik be, amíg el nem éri a közepét, így gyakorlatilag átvágja az átmérőt, és egy különálló alkatrészt hoz létre.

A fogásvételek értékeit a 3. táblázat foglalja össze.

4. Esztergálási folyamatok

Mindegyik eljárásnak vannak sajátos jellemzői, alkalmazásai és működési paraméterei, amelyek befolyásolják a hatékonyságot, pontosságot és a felületi minőséget [10]. Marási műveletek olyan típusa, amely során egy lapos végű marót alkalmaznak a pontos, lapos aljú zsebek és más összetett profilok létrehozására a munkadarabon. Egy kiegyensúlyozótengely esetében például a zsebek megmunkálása a kívánt tömegeloszlás elérése érdekében történik, ami elengedhetetlen a rezgések csökkentéséhez és a megfelelő működéshez [11]. A szerszámtartó és a szármáró a 8. ábrán tekinthető meg.

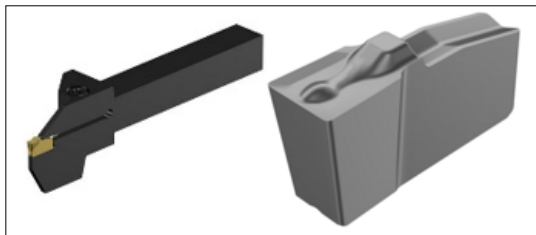
A lapos végű marás során az értékeket a 4. táblázat foglalja össze.

3. táblázat. Fogásvételek és azok jellemzői a külső leszúrások során

Fogásvételek száma	1
Forgácsolási sebesség v_c	124 m/min
Fordulatonkénti előtolás f_n	0.2 mm
Forgási sebesség maximuma	4000 fordulat/perc

4. táblázat. Fogásvételek és azok jellemzői a lapos végű marás során

Forgácsolási sebesség v_c	236 m/min
Fogankénti előtolás f_z	0.0901mm
Legnagyobb fogásmélység	25 mm



7. ábra. RF151.23-08-25 esztergalapka-tartó és 25-4G 525 esztergalapka [12]

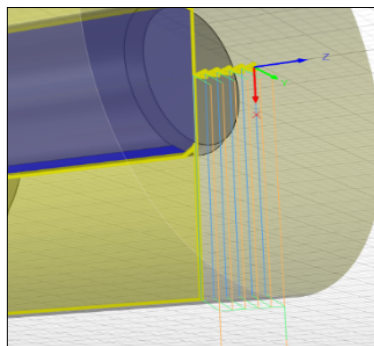
5. A szerszámpálya generálása

A megmunkálási folyamat szerszámpályáit a Fusion 360 [13] által biztosított integrált CAM-eszközzel terveztük meg, felhasználva a különféle szerszámokat, amelyeket kutatásunk során megfelelőnek ítéltünk meg: fogásmélység, forgácsolási sebesség, radiális fogásmélység, fogankénti előtolás (9. ábra).

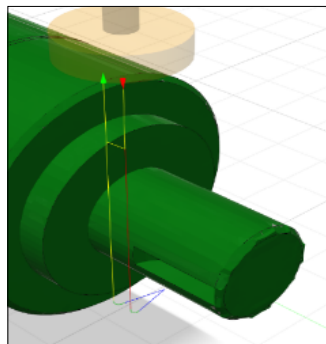
A tengely minden egyes szakaszához kiválasztásra kerültek a konkrét műveletek, illetve beállításra kerültek a hozzájuk tartozó paraméterek is, például főorsó-fordulatszám, fordulatonkénti előtolás (10. ábra).



8. ábra. 930-B30-S-20-088 szerszámtartó és 1P330-2000-XA 1620 tömör keménymaró közepes nagyolást hoz [14, 15]



9. ábra. Homlokmegmunkálási folyamat szerszámpályája



10. ábra. Íves retesz horonymaró, marási folyamat szerszámpályája

Szimulációk sorozata került elvégzésre, hogy betekintést nyerjünk abba, hogy az egyes vágószerszámok milyen módon lépnek kölcsönhatásba az anyaggal. Többek között az Ansys is alkalmazásra került a szimulációk végrehajtásakor [16].

A szimulációk valós időben mutatták be, a gyártási folyamatot az anyageltávolítástól a kész balansztengely végső formájáig (11. ábra).

6. Alkatrészkezelési módszer

A kiegyensúlyozótengely megmunkálása során a hatékony alkatrészkezelés kritikus fontosságú volt a pontosság és a hatékonyság biztosítása érdekében. Az elsődleges és másodlagos orsókat alkalmazva biztosítottuk a munkadarab biztonságos megtartását és átmenetét a különböző megmunkálási fázisok során. A főorsó tartotta kezdetben a nyersanyagot, ezáltal biztosítva a stabilitást az olyan műveletek során, mint a hosszsztergálás, a homlokesztergálás és a horonymarás (12. ábra).

Az elsődleges műveletek befejeztével a mellékorsó bekapcsolódott, hogy megtartsa a tengely ellentétes végét, megkönnyítve ezzel az alkatrész zökkenőmentes átvitelét anélkül, hogy kézi átpozicionálásra lett volna szükség.

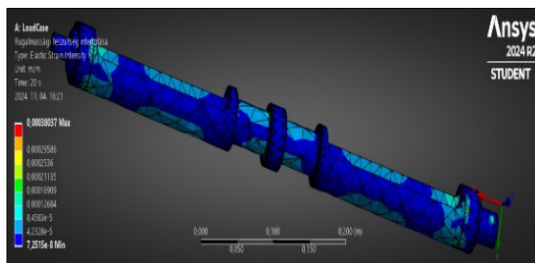
7. Végeselem-szimuláció

Átfogó végeselemes szimulációt végeztünk a kiegyensúlyozótengely teljesítményének elemzésére különböző üzemi körülmények között. A szimuláció célja egy olyan reális modell létrehozása volt, amely pontosan ábrázolja a kiegyensúlyozótengely fizikai viselkedését, amikor különböző erők és körülmények hatásának van kitéve.

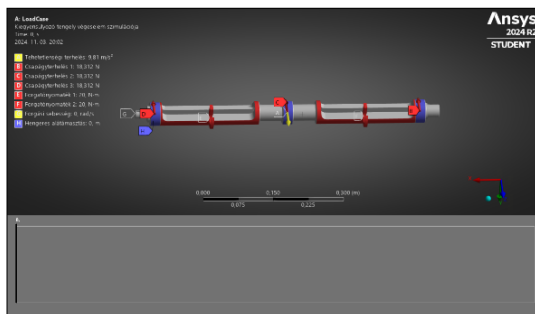
A szimuláció kiemelte a tengely hosszában a tengelyterhelés és a csapágyerők miatt fellépő axiális deformációt. Az axiális deformáció hatására a tengely nagy terhelés hatására kissé megnyúlhat, ami a kritikus felületek esetleges elmozdulását okozhatja. Az ilyen elhajlások a csapágyak és a csatlakozó alkatrészek egyenetlen terheléeloszlásához vezethetnek, ami fokozott kopást vagy akár mechanikai meghibásodást is eredményezhet [4].

A radiális elhajlást, vagyis az elhajlást is sikerült értékelni, amikor a tengelyt hajlító igénybevételnek tették ki, különösen a geometriaváltozással érintett területeken, mint például a hornyoknál vagy a csökkentett keresztmetszeteknél.

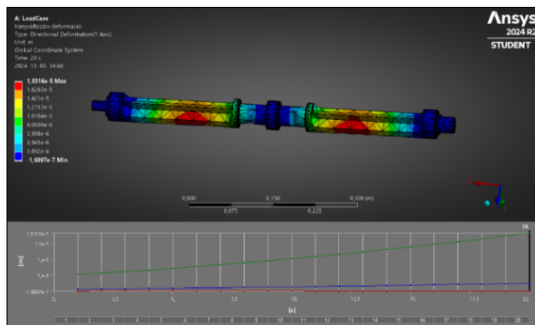
A rugalmas alakváltozásiintenzitás-elemzés alkalmazása lehetővé tette a 100Cr6 biztonságos működési paramétereinek meghatározását, így



11. ábra. Rugalmassági feszültség intenzitása: a vizsgálat eredménye



12. ábra. Ansys 2024 R2 hallgatói lincencelésű szoftverben elkészített modell



13. ábra. A deformációkat jelölő vizsgálat eredménye

biztosítva, hogy az anyag rugalmas tulajdonságai képesek legyenek a tengely várható terhelési körülményeinek befogadására. A deformációra vonatkozó értékek a 13. ábrán tekinthető meg.

A kiegyensúlyozótengely tervezése és gyártása során alkalmazott módszerek és technológiák igazolták, hogy a megfelelő anyagválasztás, a precíziós megmunkálás és a szimulációk kombinációja kulcsfontosságú a megbízható és tartós alkatrészek előállításában. Az 100Cr6 anyag, a korszerű DMG MORI NT 4250 DCG gép, valamint az optimalizált megmunkálási paraméterek hozzájárultak a magas minőségű végtermék elkészí-

téséhez. Az elvégzett vizsgálatok, mint például a felületi érdesség és a keménység mérése, megerősítették, hogy a tengely teljesíti a mezőgazdasági gépek által támasztott szigorú követelményeket. Ez a projekt hatékony megoldást nyújtott a Zetor 10245 traktor megbízhatóságának és élettartamának növelésére.

9. Kutatási infrastruktúra

A Debreceni Egyetem, Műszaki Kar számos fejlesztést hajtott végre a laborokban, ami meghatározó lesz a következő időszakban. A kialakított járműgyártás laborlehetőséget szolgáltat új fejlesztések elindítására a robotika területén [17]. A mesterséges intelligencia térhódítása jelentős az iparban, ezért a járműgyártáslaborban a robotok alapfunkcióit is elkezdjük kiegészíteni saját dataset alapján [18]. Az előzetes tanításhoz Digital-Twin-technikákat alkalmaztunk a labor kapcsán [19]. A járműgyártáslabor azért is jelentős a Műszaki Kar esetében, hiszen a régiót elsősorban most már a járműipar határozza meg, így az egyes gyártással kapcsolatos optimalizációk [20] és a machine learning-megoldások új, innovatív utakat nyithatnak meg [21]. A járműdinamikával kapcsolatos szimulációk is elvégzésre kerültek a laborban, villamosmotor-témakörben [22], korábbi telemetriai adatok alapján [23]. Ezekhez DAQ adatgyűjtő rendszerek kerültek felhasználásra [24], amelyeket légjárműveinkkel kapcsolatos fejlesztéseink során is alkalmaztunk [25].

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk kifejezni őszinte hálánkat Erdei Timoteinek, a Járműmérnöki Tanszék oktatójának, egyben a Járműgyártás Labor vezetőjének, valamint Balogh Gábornak, gépészmérnök mesteroktatónak. Továbbá a Debreceni Egyetem Műszaki Karának.

Szakirodalmi hivatkozások

[1] *Bearing Damage Evaluation Guide*. SKF Group, Gothenburg, Sweden, 2017.

[2] *Bearing Damage and Failure Analysis*. SKF Group, Gothenburg, Sweden, 2014.

[3] *Zetor Spare Parts Catalog 8211-16245*. Zetor Tractors a.s., Brno, Czech Republic, Jan. 1990.

[4] 100Cr6. Magas széntartalmú csapágyacél technikai adatlap, inoxservice.hu [Online]
<https://www.inoxservice.hu/upload/inline/adatlapok/kovacsoltombok/1.3505%20-%20ADAT-LAP.pdf>

[5] Goanta A., Haraga G.: *Aspects of Modelling Classical or Synchronous Modelling with Solid Edge ST. 9*. MATEC Web Conferences, 112. (2017) 06024.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201711206024>

[6] *Handbook of Cutting Data & Parameters – Milling and Drilling*. Ingersoll Werkzeuge GmbH, Haiger, Germany, 2023.

[7] Kalpakjian S., Schmid S. R.: *Manufacturing Engineering and Technology*, 8th ed., Pearson, 2019.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-6.00012-3>

[8] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 206.

[9] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 163.

[10] *Sokoldalúan felhasználható tömör keménységű szármárók*. CoroMill Dura [Online]
<https://www.sandvik.coromant.com/hu-hu/tools/milling-tools-old/solid-carbide-end-mills/coromill-dura/coromill-dura-multimaterial>

[11] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 409.

[12] *Sandvik Coromant Turning Tools*. Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 208.

[13] Hassan I., Al-Mashhadi H., Radi K., Jawad H.: *IoT Based Multitasking Games and Entertainment Arcade Station Using Raspberry-Pi*. Journal of Southwest Jiaotong University. 54.
<https://doi.org/10.35741/issn.0258-2724.54.3.4>

[14] *Sandvik Coromant Turning Tools*, Sandvik Coromant, Hungary, 2020. p. 407.

[15] CoroChuck 930 Nagy pontosságú hidraulikus tokmány, C-1040:266 hu-HU, AB Sandvik Coromant, 2019. p. 2

[16] B. Zheng, J. Zhang, Y. Yao: *Finite Element Analysis of the Piston Based on ANSYS*. IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, 1908–1911.
<https://doi.org/10.1109/ITNEC.2019.8729409>

[17] Kapusi T. P., Erdei T. I., Husi G., Hajdu A.: *Application of Deep Learning in the Deployment of an Industrial SCARA Machine for Real-Time Object Detection*. Robotics 11. (2022) 69.
<https://doi.org/10.3390/robotics11040069>

[18] Erdei T. I., Nusser D. P., Husi G.: *Cyber-Physical Recreation of Six DOF Industrial Robot Arm*. International Review of Applied Sciences and Engineering, 15/2. (2024) 147–160.
<https://doi.org/10.1556/1848.2023.00660>

[19] Erdei T. I., Krakó R., Husi G.: *Design of a Digital Twin Training Centre for an Industrial Robot Arm*. Applied Sciences, 12/17. (2022) 8862.
<https://doi.org/10.3390/app12178862>

[20] Ahmed M., Sulaiman M. H., Hassan M. M., Rahaman M. A., Abdullah M.: *Selective Opposition Based Constrained Barnacle Mating Optimization: Theory and Applications*. Results in Control and Optimization, 17. (2024) 100487.
<https://doi.org/10.1016/j.rico.2024.100487>

[21] Deshpande A. R., Kulkarni A. P., Wasatkar N., Gajalkar V., Abdullah M.: *Prediction of Wear Rate of Glass-Filled PTFE Composites Based on Machine*

- Learning Approaches*. Polymers, 16/18. (2024) 2666.
<https://doi.org/10.3390/polym16182666>
- [22] Szántó A., Ádámkó É., Juhász G., Sziki G. Á.: *Simultaneous Measurement of the Moment of Inertia and Braking Torque of Electric Motors Applying Additional Inertia*. Measurement, 204. (2022) 112135.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112135>
- [23] Sziki G. Á., Szántó A., Kiss J., Juhász G., Ádámkó É.: *Measurement System for the Experimental Study and Testing of Electric Motors at the Faculty of Engineering*. University of Debrecen. Applied Sciences, 12/19. (2022) 10095.
<https://doi.org/10.3390/app121910095>
- [24] Dave G. S., Pandhare A. P., Kulkarni A. P., Khanka, D. V., Abdullah M.: *Experimental Investigation of Centrifugal Pump Machine and Its Faults through Different Type of DAQ System and Selecting One Based on Statistical Approach*. Cogent Engineering, 11/1. (2024).
<https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2417683>
- [25] Abdullah M., Husi G.: *Aero Graphene in Modern Aircraft & UAV*. Recent Innovations in Mechatronics, 9/1. (2022).
<https://doi.org/10.17667/riim.2022.1/4>