

# GÉPÉP

## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA

**Stress Analysis:** A 3D model of a frame structure with a color-coded stress distribution. The legend indicates stress values from 0.00000000 to 0.00023900 Max.

**Circular Economy Diagram:** A circular diagram showing the cycle: Nyersanyagok (Raw materials) → Termelés (Production) → Cserélt, felújított (Used, repaired) → Forgalmak (Transactions) → Újrahasznált (Recycled) → Visszamaradó hulladékok (Residual waste) → Újrahasznált (Recycled). The center is labeled "Körkörös gazdaság" (Circular economy).

**Material Cross-section:** A diagram showing heat and light inputs: Bejövő fény (Incoming light), Sugárzási hővesztés (Radiation heat loss), and Konduktív hővesztés (Conductive heat loss). The layers are: Üveg réteg (Glass layer), Felső EVA réteg (Top EVA layer), Szilícium réteg (Silicon layer), Alsó EVA réteg (Bottom EVA layer), and Alumínium hátlap (Aluminum backplate). Below, it shows "Elekt. teljesítmény" (Electrical power) and "Sugárzási hővesztés" (Radiation heat loss) and "Konduktív hővesztés" (Conductive heat loss).

**Material Layers:** Zoltek Panex® 35 carbon fibre with unidirectional weave (two perpendicular layers, 0/90°) and Aramid fibre reinforced Honeycomb Nomex® OX-core (HRH-10/OX-3/16 - 3.0).

**Machining:** A photograph of a machine tool, a CAD model of a tool, and a photograph of a milling process. The workpiece is being milled by a milling tool. Force vectors  $F_z$ ,  $F_x$ , and  $F_y$  are shown. A Kistler three component dynamometer is used for force measurement.



### **54. Autóbusz Szakértői Tanácskozás**

2024. október 09., Zsámbék

A Gépipari Tudományos Egyesület (GTE) és a társrendező Magyar Autóbuszgyártók Szövetsége (MABUSZ) által szervezett **54. Autóbusz Szakértői Tanácskozásra** az előző évhez hasonló helyszínen, **Zsámbékon**, a **DrivingCamp**-on kerül sor, ahol mód van a tanácskozás színvonalas megrendezése és beltéri kiállítás mellett autóbuszok kültéri bemutatására, megtekintésére és próbaújtjára is.



A Tanácskozás témája hagyományosan az autóbuszok fejlesztése, gyártása, üzemeltetése és karbantartása. A részletes program még kidolgozás és egyeztetés alatt áll. Főbb elemei:

- A délelőtti plenáris ülés áttekintést nyújt az aktuális ipar- és közlekedéspolitikai kérdésekről.
- A meghosszabbított ebédszünetben mód van a kiállított autóbuszok megtekintésére, kipróbálására és a kapcsolatfelvételre a beltéri kiállítókkal.
- A délutáni szekcióüléseken a műszaki előadások kapnak fórumot, melyek kiemelt témái:
  - a hazai autóbusz gyártás és fejlesztés,
  - a külföldi gyártók hazai piacon elérhető autóbuszai
  - a környezetvédelmi lépésváltás, benne az elektromos hajtású autóbuszok üzembe állítása és az eddigi üzemi tapasztalatok,
  - új kutatási eredmények ismertetése, megvitatása.

További részletek a [www.events.gteportal.eu](http://www.events.gteportal.eu) oldalon.



### **Advanced Study in Energy Security and Climate Neutrality**

2024. október 09-16., Budapest

**Advanced Study Institute G7654** – “Capacity Building for a New Generation of Scientists in Energy Security and Climate Neutrality” in collaboration with the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Részletek a [https://events.gteportal.eu/energy\\_climate](https://events.gteportal.eu/energy_climate) oldalon.

### **Géptervezők és Termékfejlesztők XL. Országos Szeminárium**

2024. november 7-8., Miskolc

Az esemény idén is a Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézete, a Gépipari Tudományos Egyesület Borsod-Abaúj-Zemplén megyei Géptervező Szakosztálya és az MTA Miskolci Akadémiai Bizottsága rendezésében valósul meg.



Részletek a <https://geik.uni-miskolc.hu/intezetek/GET/gepterszem> oldalon.

# GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET műszaki, vállalkozási, befektetési,  
értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

## Elnök:

Vadászné

Dr. Bognár Gabriella

## Főszerkesztő:

Dr. Dömötör Csaba

## Szerkesztőbizottság:

Dr. Ábrahám György

Dr. Barkóczy István

Dr. Borbás Lajos

Dr. Czifra Árpád

Dr. Danyi József

Dr. Fekete Gusztáv

Dr. Horák Péter

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Jánosi Endre

Dr. Jármái Károly

Dr. Kakuk József

Dr. Kalácska Gábor

Dr. Lelkes Márk

Dr. Kanóczy János

Dr. Könözy László

Dr. Mankovits Tamás

Dr. Máté Márton

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Patkó Gyula

Dr. Piros Attila

Dr. Soltész László

Dr. Szabó István

Dr. Szávai Szabolcs

Dr. Száva János

Dr. Szigeti Ferenc

Dr. Tímár Imre

Dr. Weltsch Zoltán

## TISZTELT OLVASÓ!

Az Emerson egy globális technológiai és szoftvercég, amely innovatív megoldásokat kínál a világ alapvető iparágai számára. Az Emerson egri gyára egyik erős pillére mind a magyar pneumatika gyártásnak, mind az Emerson Discrete Automation üzletágának. Mindig nagy hangsúlyt fordított a magas színvonalon képzett, tehetséges kollégák alkalmazására, hiszen ez az egyik fő biztosítéka a világszínvonalú működésnek. Az egyetemi hallgatókkal, oktatókkal való együttműködés fennállása óta fő tevékenység volt a vállalat életében.

A 2024 májusában nyolcadik alkalommal megtartott Agria Konferencia Sorozat, Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions – InnoVeTAS2024 Heves vármegye legnagyobb műszaki tudományos konferenciája egyik szép példája annak a kollaborációs folyamatnak, amelynek során az Emerson Automation FCP Kft. lehetőséget biztosít az egyetemi hallgatóknak, kutatóknak a legfrissebb kutatási eredményeinek bemutatására. A 2024-ben az InnoVeTAS2024 konferencia mellett a 2. Emerson Műszaki Játsszóter hallgatói verseny, annak zsűrizése és díjátadója zajlott. A műszaki tudományos előadások mellett a diákok által tervezett és készített eszközök tették színessé az eseményt.

Az InnoVeTAS2024 konferencia plenáris ülésén az érdeklődők meghallgathatták Hegymegi István magyarországi kereskedelmi vezető az Emerson jövőbe mutató termék portfólióját ismertető előadását. Ezt követően Wojciech Zakrzewski az Emerson kelet- és közép-európai személyügyi igazgatója az Emerson csoport elköteleződését mutatta be egy „smarter”, innovatívabb, biztonságosabb és zöldebb jövő iránt. Rámutatott a mérnöki tudás mellett a „soft skillek”, az együttműködés, elfogadás és elköteleződés fontosságára.

A konferencia folyamatosan növekvő előadó- és érdeklődő létszáma méltóan megmutatja az Agria Konferencia sorozat létjogosultságát és fontosságát a Magyarországon rendezett nemzetközi konferenciák között, valamint az oktatás és ipar együttműködésére jelentkező igény növekedését.

**Dr. Soltész László**  
szervezőbizottság  
elnöke

**Dr. Nagy Szilárd**  
szervezőbizottsági tag  
Szoftver fejlesztő  
Emerson Automation  
FCP Kft.

**Prof. Dr. Pokorádi  
László**  
alapító elnök  
Óbudai Egyetem  
Mechatronikai és  
Járműtechnikai Intézet

A szerkesztésért felelős: Dr. Dömötör Csaba • A szerkesztőség címe: 3515 Miskolc, Egyetemváros

Telefon: +36-20/824-5197 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: +36-1/202-0656, fax: +36-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu> • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Bárdos Krisztina ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Zrt. • Postacím: 1900 Budapest

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, [www.posta.hu](http://www.posta.hu) WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), e-mailen a [hirlapelofizetes@posta.hu](mailto:hirlapelofizetes@posta.hu) címen, telefonon +36-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldön terjeszti a Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: [batthyany@kultur-press.hu](mailto:batthyany@kultur-press.hu)

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

# TARTALOM

<i>1. Bencs Péter, Nagy Nóra:</i> HIDROGÉNÜZEMŰ GÉPJÁRMŰVEK KOCKÁZATELEMZÉSÉNEK ÁTTEKINTÉSE .....	5	<i>7. Laufer Edit, Horváth Richárd:</i> EREDŐ ERŐ ELŐREJELZÉSE KEVERT-RENDŰ SUGENO MODELL ALKALMAZÁSÁVAL MÉHSEJT SZENDVICS KOMPOZIT MARÁSAKOR .....	35
<i>2. Bencs Péter:</i> A JÖVŐ KÖZLEKEDÉSI ÜZEMANYAGAINAK ÁTTEKINTÉSE .....	9	<i>8. Albert Judit, Takács Ágnes:</i> A TERMOELEKTROMOS MODULOK KÖRFORGÁSOS GYÁRTÁSÁNAK DQN ALAPÚ DÖNTÉSTÁMOGATÁSOS OPTIMALIZÁCIÓJA .....	42
<i>3. Bodnár Dávid, Jármái Károly:</i> GÉPÉSZETI SZERKEZET TÖBBVÁLTOZÓS OPTIMÁLÁSA GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIA ÉS KÖLTSÉGELEMZÉS ALAPJÁN .....	14	<i>9. Kovács Róbert, Korzenszky Péter, Keresztes Róbert:</i> MŰSZAKI MŰANYAGOK FORGÁCSOLÁSÁNAK VIZSGÁLATA .....	48
<i>4. Jármái Károly, Maryam Hasanali, Kaveh Andisheh:</i> SZERKEZETOPTIMÁLÁSI PÉLDA EGY ÚJRAFELHASZNÁLHATÓ SZEIZMIKUS KERETVÁZ AKTÍV NYÍRÁSI ELEMÉNEK TERVEZÉSÉRE .....	18	<i>10. Leskó Gergő, Simon Gábor, Rónai László:</i> SZÁMÍTÓGÉPPSEL SEGÍTETT CÉLGÉPTERVEZÉS .....	57
<i>5. Kiss Márton Péter, Molnár Ildikó:</i> FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓ CSÖVÁZÁNAK OPTIMALIZÁLÁSA .....	24	<i>11. Nagy Ádám, Bodnár István, Kovács Endre:</i> NAPELEM HŐTERJEDÉS VIZSGÁLATA ELEKTROMOS PARAMÉTEREINEK A MEGHATÁROZÁSÁHOZ .....	61
<i>6. Kovács Attila, Somogyiné Molnár Judit, Jármái Károly:</i> ELEKTROMOS TRANZIENSEK IPARI LÉTESÍTMÉNYEKBEK .....	28	<i>12. Simon Gábor, Rónai László:</i> CÉLGÉPTERVEZÉS MÓDSZERTANA .....	68

# HIDROGÉNÜZEMŰ GÉPJÁRMŰVEK KOCKÁZATELEMZÉSÉNEK ÁTTEKINTÉSE

## REVIEW OF RISK ANALYSIS OF HYDROGEN POWERED CARS

*Péter Bencs\**, *Nóra Nagy\*\**

### ABSTRACT

*This research presents the methods used for risk assessment of hydrogen vehicles. The design of hydrogen-powered vehicles should be prioritized to ensure a safe powertrain (lowest risk). Vehicles should be usable under normal conditions in everyday life, and the risk to the user should be minimized. A literature review has shown that the greatest risk in the use of hydrogen powered vehicles is hydrogen leakage. Hydrogen leakage can occur in fuel systems (tanks, pipings), and risk assessment methods should be applied to address this issue. In the future, green hydrogen vehicles will play an important role in reducing greenhouse gas emissions, but safe operation will also be an important requirement. The risk assessment procedures under consideration will support the future application of this new technology.*

### 1. INTRODUCTION

Four primary sources—natural gas, oil, coal and electrolysis—account for 48%, 30%, 18% and 4%, respectively, of the world's commercial hydrogen production. The main source of industrial hydrogen is fossil fuels. In general, hydrogen is produced by steam conversion of natural gas.

The following primary energy sources can be used: natural gas, solar, wind and biogas or biomethane. Biogas is a natural gas or biomethane that undergoes a thermochemical process called steam methane reforming, which results in a steaming reaction that produces a synthetic gas consisting primarily of hydrogen. To separate water into hydrogen and oxygen, a technique called electrolysis is used, which can use natural gas, solar energy or wind as the main energy source. Both methods result in the production of hydrogen [1].

- Primary energy source: The following primary energy sources can be used: natural gas, solar, wind, biogas or biomethane.
- Thermochemical conversion: Biogas natural gas, also known as biomethane, undergoes a thermochemical process involving the reforming of steam methane, which reacts with steam to produce a synthetic gas consisting mainly of hydrogen.

- Electrolysis: To separate water into hydrogen and oxygen, a technique called electrolysis is used, the main energy source of which can be natural gas, solar energy or wind.
- Final energy carrier: Both methods result in the production of hydrocarbons.

One way to incorporate hydrogen into energy fields is to use hydrogen as a fuel additive for hydrocarbons. Urban gases produced from coal and hydrocarbons always contain significant amounts of hydrogen. Today, the majority of waste gases are methane or natural gas. The addition of hydrogen to natural gas foreshadows a gradual shift to hydrogen as an energy source. Hydrogen can also be used as an additive for internal combustion engine fuels.

The incorporation of hydrogen into natural gas engines can improve their combustion performance and reduce pollutant emissions, especially during lean-burn operation. When this mixture is used as fuel, cars should emit significantly less nitrogen oxides, carbon monoxide and hydrocarbons. A hydrogen natural gas transport system could be a successful way to reduce environmental problems in metropolitan areas and to supplement energy infrastructure with hydrogen.

The concept of the hydrogen scale is illustrated in Figure 1, along with the many methods of producing and using hydrogen. In addition to the traditional uses of natural gas, such as electricity, heat, chemicals and industrial processes, including the production of metals and fertilizers, hydrogen can also be used to produce synthetic fuels or directly fuel hydrogen-powered cars [2].

The fuel system of a hydrogen car consists of several components. One possible concept for using hydrogen as a fuel for propulsion mechanisms is the use of hydrogen fuel cells. These materials are supplied with hydrogen from high-pressure tanks, the design of which has changed over the last several decades. The output of the hydrogen fuel cell is electrical energy stored in small batteries to power the engine control system (which ensures that it starts when the reaction in the fuel cell is not yet active), with the remaining energy used to power the car itself. Today's hydrogen cars can, to a good approximation, be considered electric cars; only the electricity

*\* associate professor \*\* assistant lecturer, University of Miskolc, Department of Fluid and Heat Engineering, Department of Structural Integrity  
email: \*peter.bencs@uni-miskolc.hu, \*\*nora.nagy@uni-miskolc.hu*

comes from a different source—it is generated directly onboard the car. The advantage of such vehicles is that hydrogen can be quickly pumped into tanks (pumping hydrogen from the normal material takes the same time as pumping diesel or petrol—usually minutes). The negative consequence of this solution is that the hydrogen must be kept on board the vehicle, which increases the minimum risk requirement. It is also necessary to take into account that even classic fossil-fueled cars are flammable and have their own specific risk values.

The same applies to electric cars—batteries stored on the floor of the car are a safety case. Each car has different cubic values because of their different characteristics. The disadvantage of hydrogen is that it has a wide range of explosive properties in the event of a leak from a pressure vessel or distribution system. It is therefore

necessary to determine the effects of a possible explosion on the environment and to define a safety zone around the container.

Several authors have worked in these areas. Shen et al. [3] carried out a real explosion of a pressurized tank. A hydrogen tank was blown up at 35 MPa pressure, after which the intensity of the pressure wave, thermal radiation and flying fragments were analysed to determine the safe zone. Zhang et al. [4] analysed the effects of temperature, pressure and velocity during a confined space hydrogen explosion using numerical simulation. Lidor et al. [5] analysed the explosion limits of the H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> system. Li et al. [6] analysed the explosion mechanism of a mixture of methane and air in a closed vessel. Similarly, Wang et al. [7] investigated the numerical simulation of a methane explosion in a building and its effects on the structure.

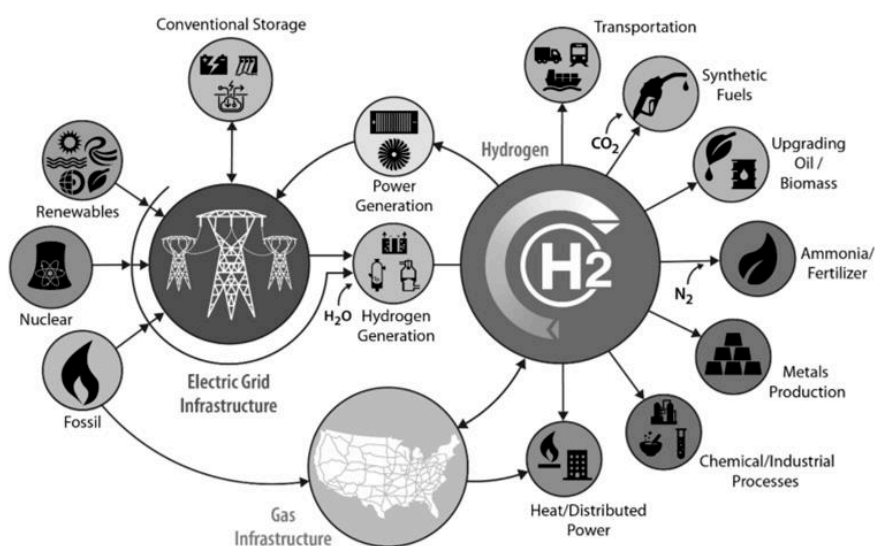


Figure 1. Hydrogen production and utilization pathway [2].

## 2. SAFETY ASSESSMENT [11]

The characteristics specific to the use of hydrogen as a fuel or energy carrier require that technical and operational measures be taken to reduce the risk of failure or accident to an acceptable level.

The basic risks for the operation of hydrogen propulsion systems are as follows:

1. Risk of combustion, ignition and explosion;
2. risk of over pressurization;
3. the risk associated with low operating temperatures;
4. the risk associated with hydrogen brittleness;
5. of risk from exposure to hydrogen in the human body [5].

### 2.1. Risk of burns, ignition and explosion

The risk of burns, ignition and explosion are the dominant risks of hydrogen systems. Hydrogen is highly likely to leak due to its physical and chemical properties.

Leakage is directly related to the formation of a flammable mixture and can lead to ignition and explosion. This is also implied by the fact that hydrogen burns with a colourless flame that is practically invisible to the naked eye and emits UV radiation. The fact that the flame propagation speed is an order of magnitude greater than that of fossil fuels should not be ignored [8].

### 2.2. The risk of over pressurization

The risk of overpressure is based on the principle of operation of hydrogen technology. Due to the storage of large quantities of hydrogen at high pressure, the increased stress on all components of the high-pressure part of hydrogen technology must be considered. The existence of this type of risk and its increase are determined by the characteristic phenomenon of hydrogen brittleness [8].

### 2.3. Risk associated with low operating temperatures

The coefficient of variation associated with low operating temperatures is due to changes in the properties of

the materials in the hydrogen system. A hazard arises when hydrogen is cooled to the temperature of liquid hydrogen (- 253 °C). As a consequence, during the cooling of the materials, changes occur in the strength properties of the structural nodes of the hydrogen system.

#### 2.4. Risk from the brittleness of hydrogen

The risk from hydrogen brittleness is due to the specific interaction between hydrogen and the material used. The materials of tanks, pressure vessels and other equipment may lose their strength and properties during long-term exposure to hydrogen. Factors that influence this include, for example, the type of material, hydrogen concentration, operating pressure, temperature, type of material, type of hydrogen, hydrogen concentration, hydrogen content, operating pressure, temperature, type of stress on fuel system subassemblies, particle diameter as part of the microstructure and its thermal history, and moisture in the hydrogen [8].

#### 2.5. Concerns about human exposure arising from exposure to hydrogen

The risk of human exposure to hydrogen is not life-threatening, but this risk must be taken into account. Direct contact with gaseous or liquid hydrogen can lead to local insensitivity and frostbite burns on parts of the human body. Hydrogen combustion, which produces high temperatures and a specific flame, also poses a health risk. Hydrogen has no direct toxic effects. However, it can cause asphyxiation, especially in confined spaces (e.g., in the passenger compartment of a car) [9,10].

### 3. RISK ANALYSIS

Hydrogen must be distributed and transported by pipelines to be used as an energy carrier. Using an existing pipeline and reservoir, hydrogen is transported cleanly through specific parts of the network. These parts have unique diameters, pressures and material characteristics and are focused on pure hydrogen. Two methods of producing hydrogen are water electrolysis (in combination with wind or photovoltaic energy) and steam methane reforming by gasification.

#### 3.1. Compatibility, life-cycle emissions, and technoeconomic analysis [12]

1. Compatibility of pipelines with hydrogen: SNL and PNNL conduct assessments to estimate the service life of materials in metal and polymer pipelines and piping (e.g., steel and polyethylene). These information sources are incorporated into a publicly available model that can be used to estimate the service life of pipelines under key engineering assumptions.
2. Life cycle analysis: ANL will analyse the life cycle emissions of technologies using hydrogen as well as alternative routes such as synthetic natural gas.

3. Technoeconomic analysis: The NREL will quantify the costs and options for hydrogen production and alternative pathways such as synthetic natural gas.
4. A research effort to broaden the potential of hydrogen is the HFTO-led Hydrogen Materials Compatibility Consortium (H-Mat), led by SNL and PNNL, an internationally recognized framework for studying the compatibility of hydrogen materials.

### 4. MEASUREMENT TASK

As shown in section 3.1, it is necessary to test the precursors. At the university research centre, various tests are carried out on the tank materials used. The type of material tested is hypoeutectoid structural steel, of which the tank is made.

In the case of tests with pure hydrogen, it is necessary to specify how long the system (hydrogen-filled tank) must be left to rest to study the effects of hydrogen on the material properties. Several studies address the refinement of test parameters [13-16]. From the literature review, 2 samples were concluded to be needed. For the first test, the specimens were allowed to rest for 41 days at 128-130 bar. A longer period of time will also be needed, so a period of 3 months was chosen based on the literature (with a test duration similar to that of the previous samples).

At the university research centre, it is possible to study the tanks by flight. For safe testing, it is possible to crack test cranes at a maximum pressure of ~300 bar in an underground test facility. As shown in Figure 2, the crack test was successful, and a satisfactory end state was achieved.

The following two test methods were applied to the tanks:

1. cracked (without H<sub>2</sub>, reference piece).
2. fatigue, cracking, and +2 $\sigma$  bending load (H<sub>2</sub>, 100%, 41 days, 128-130 bar).



Figure 2. Sample cracked.

After the crack tests, test specimens were cut out of the container at appropriate locations (both in the base material and seam section only).

The following tests will be carried out on the elaborated specimens: bending test, hardness test, tensile test, fabric structure test.

The results of these tests will provide the data for the risk assessment tests presented in the previous chapters.

Figure 3 shows the standard bending test equipment and the specimens tested in the university research laboratory.

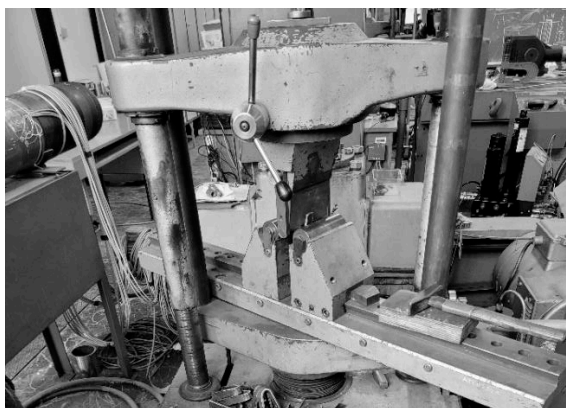


Figure 3 Bending tests on samples.

The studies described above are currently in progress, and their results will be presented later.

## 5. SUMMARY

Hydrogen leaks from the car tank, and an explosion occurs. Storing hydrogen in a tank at high pressure poses a significant risk. The relevant information obtained by simulation will provide designers of hydrogen-powered cars with the necessary prerequisites for the following applications: the choice of the location of the hydrogen tank in the body compartment and the choice of the technologies to be used. the choice of the type of material to be used, the choice of the parameters of the body-in-engine component, the sizing of the connected components, the choice of the material of the valves and pipes used for hydrogen transport, and the choice of the material of the valves and pipes and the choice of the material of the tanks.

Obviously, different types of propulsion systems have different characteristics and risk values. The design of hydrogen propulsion systems must be based on a multi-faceted decision-making process. It is assumed that the decisive parameter will be the minimization of all types of risk.

## 6. ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to the AVL Company for the technical (software academic license) support of this research.

## 7. REFERENCES

[1] TOPOLSKI, K., et al. *Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: review of the state of technology*. 2022.

[2] RUTH, M. F., et al. *The technical and economic potential of the H2@ Scale hydrogen concept within the United States*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2020.

[3] SHEN, C., et al. *Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 55: 223-231.

[4] ZHANG, S.; ZHANG, Q. *Effect of vent size on vented hydrogen-air explosion*. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43.37: 17788-17799.

[5] LIDOR, A.; WEIHS, D.; SHER, E. *Theoretical analysis of the explosion limits of hydrogen-oxygen mixtures and their stability*. Chemical Engineering Science, 2018, 192: 591-602.

[6] LI, M., et al. *Thermal and kinetics mechanism of explosion mitigation of methane-air mixture by N2/CO2 in a closed compartment*. Fuel, 2019, 255: 115747.

[7] WANG, D., et al. *Numerical simulation analysis of explosion process and destructive effect by gas explosion accident in buildings*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 215-227.

[8] Branislav, K. *Riziká pri Využívaní Vodíkových Technológií—Aplikácia pre Mobilnú Techniku*. Ph.D. Thesis, Technical university of Kosice, Košice, Slovakia, 2017.

[9] HUDÁK, R., et al. *Material and thermal analysis of laser sintered products*. acta mechanica et automatica, 2013, 7.1: 15-19.

[10] KURIC, I. *New Methods and Trends in Product Development and Process Planning*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2011, 9.1.

[11] Allison, T. C., & SIMONS E., S. *Impacts of Hydrogen Transport in Pipelines*, 2022.

[12] DE VRIES, H.; FLORISSON, O.; TIEKSTRA, G. C. *Safe Operation of Natural Gas Appliances Fuelled with Hydrogen & Natural Gas Mixtures (Progress Obtained in the Naturality-Project)*. 2007.

[13] NACE TM0284-2016. *Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking*. 2016.

[14] MENTZ, J., et al. *Manufacturers' view on specifying linepipe requirements for hydrogen applications*, 2022.

[15] KITTEL, J., et al. *Hydrogen induced cracking (HIC) testing of low alloy steel in sour environment: Impact of time of exposure on the extent of damage*. Corrosion Science, 2010, 52.4: 1386-1392.

[16] MARTIN, M. L.; SOFRONIS, P. *Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: A review*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 101: 104547.



## REVIEW OF FUTURE FUELS IN TRANSPORTATION

*Péter Bencs*\*

### ABSTRACT

*The primary objective of this research is to investigate the impact of fossil fuel vehicles on greenhouse gas emissions. Given the potential for technological progress, the phase-out of fossil fuel vehicles is accelerating. The priority is to achieve greenhouse gas neutrality in transport as soon as possible. This study will present the impact of different powertrains on achieving greenhouse gas neutrality (with a particular focus on the impact of combined technologies) and the impact of battery electric vehicles on achieving greenhouse gas neutrality. The study will show, under different scenarios, that combining different technologies is more effective at reducing greenhouse gases than is using a completely clean technology.*

### 1. INTRODUCTION

At 403 ppm, atmospheric carbon dioxide levels reached alarming levels. CO<sub>2</sub> generated from the oxidation of carbon during fuel combustion accounts for the majority of global anthropogenic greenhouse gas emissions [1]. As a result, the global mean surface temperature has risen by approximately 1 °C compared to preindustrial levels [2]. To slow or halt global warming, carbon emissions must be reduced by reducing our dependence on conventional fossil fuels and thereby encouraging the development of clean and sustainable fuels, especially from renewable sources. Biofuels are among the liquid fuels that are of growing importance for economic and environmental reasons.

Currently, all commercially viable methods of biofuel production involve photosynthetic capture of solar radiation and conversion of solar energy into chemical energy through chemical reduction of carbon [3]. Photosynthesis converts solar energy into chemical energy stored in plants, such as cucumbers or biowaste, which are later converted into biofuels. However, current biomass processing methods for biofuel production require large areas of land and sunlight.

Thus, when competing with food production for resources such as water and land, these methods are generally inefficient [4]. In 2009, the US Department of Energy (DOE) established the Electrofuels Program to study and develop new methods to advance transportation fuels and develop fuels using nonphotosynthetic methods [3].

Electrofuels can be considered an energy storage technique in which solar energy is converted into chemical

energy by photovoltaic cells, and the energy is stored in the chemical bonds of the gas or energy carrier or in liquid fuels. Moreover, as a public transport fuel, electrofuels can take advantage of existing infrastructure, making transportation much easier and cheaper [6,7]. Recently, as a result of these factors, electrofuels have attracted the attention of several car manufacturers, such as Porsche and Mazda [8].

Hydrogen can also be used as an energy carrier but with a low volumetric energy density, which is much lower than that of petrol [9]; high pressure or low temperature are required to increase the volumetric energy density for transport, and hydrogen can be transported easily and safely [10].

A fuel can be defined as a reduced substance that can release chemical energy by oxidation, oxidation by combustion with pure oxygen or oxygen from the air, or oxidation reactions that result in the production of useful energy [11]. Unfortunately, in the literature, the terms electrofuels and synthetic fuels are sometimes used interchangeably, so that they refer to the same fuel. According to Ridjan et al., electrofuel refers to a fuel that uses CO<sub>2</sub> as the main source of fuel; however, this fuel can be produced by different methods. While the term synthetic fuel is used to denote fuels produced from coal, gas and biomass by thermochemical conversion to gaseous or liquid fuels [12], for example, synthetic paraffin kerosene (SPK), a type of aviation fuel, is produced from gas to liquid (GTL) by a process [13]. Electrofuels can be produced by two main methods: the first is the biological conversion of CO<sub>2</sub> into energy-dense fuel [14], and the second is a fuel produced by combining recycled CO<sub>2</sub> gas with hydrogen from the electrolysis of water [15].

Figure 1a shows the different energy conversion pathways from solar energy to biofuels and electrofuels [3], while Figure 1b shows the pathways from solar energy to biofuels and electrofuels, different sources and nutrients that can be fed into the bioreactor to produce biofuels, gas or liquid fuels [3].

In the literature, metal fuels are sometimes referred to as electrofuels, and metal is produced by electrochemical reduction reactions of metals to produce fuel oxides; if the energy source of the reaction is electricity, this type of fuel can be called electrofuels [16]. In the metal fuel cycle, the produced metal fuel is transported to the final point of use where it is indirectly burned (oxidized) in an atmospheric air combustor [17]. In a recent review paper [18], the predelivery costs of e-fuels were evaluated in

*\*associate professor, University of Miskolc, Department of Fluid and Heat Engineering  
email: \*peter.bencs@uni-miskolc.hu*

different ways: first, through a literature review; second, through a more detailed literature review including pre-delivery and efficiency costs and efficiencies to separate e-fuels; and, finally, through a series of calculations to estimate and compare the costs with those found in the research literature. Masri [19] reviewed the literature on the challenges and difficulties facing the turbulent combustion of e-fuels.

He concluded that continued research in the field of turbulent combustion is needed to improve the prediction capabilities to a level that will enable them to become a reliable standard tool for the design and control of future

combustion products. The purpose of this review is to address recent advances in the field of electrofuels, covering the chemistry of electrofuels and the reactants required for their production, and to summarize the various studies on the life cycle assessment and economic and technical evaluation of electrofuels. In addition, this review covers the combustion behaviour of electrofuels and discusses how this behaviour affects their performance and fuels for their integration into future energy systems.

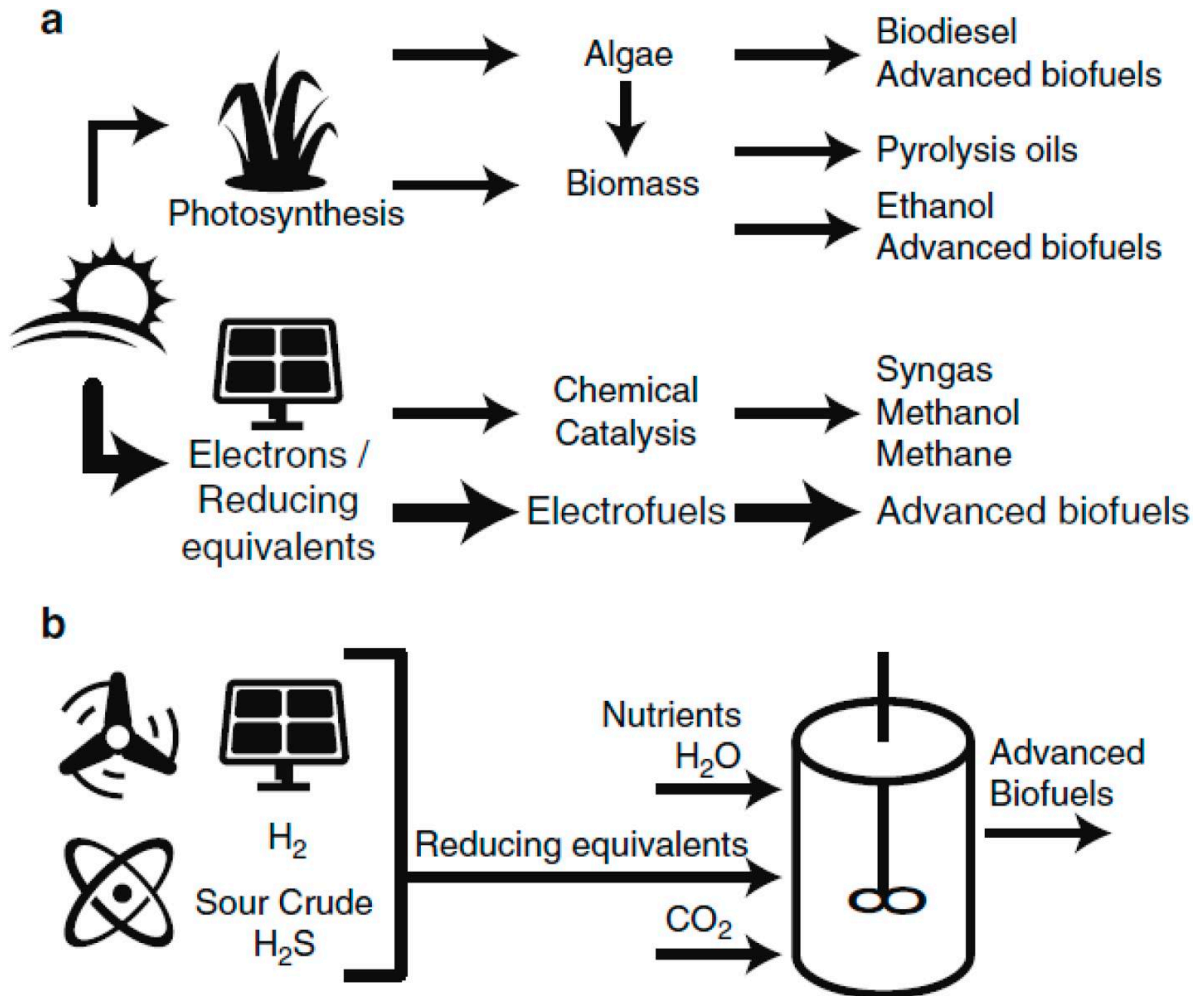


Figure 1 (a) Different energy conversion pathways from solar energy to biofuels and (b) different sources and nutrients that can be fed into a bioreactor for the production of gaseous or liquid fuels [3].

## 2. DECARBONIZING TRANSPORT

Germany, which is one of the largest emitters of greenhouse gases (GHGs), ratified the Paris Agreement in 2015 and committed to significantly reducing GHG emissions in October 2016 [20]. Efforts to reduce emissions in Germany have already led to reductions in GHG emissions in most sectors of its economy. Only the transport sector showed a slight increase in greenhouse gas emissions, not a reduction in its carbon footprint,

from 163 Mt CO<sub>2</sub> equivalent in 1990 to 164 Mt CO<sub>2</sub> equivalent in 2014. The overall approaches to reducing GHG emissions during transport are fourfold: reducing the carbon intensity of fuels, increasing the energy efficiency of vehicles, shifting modes, and reducing overall demand [23].

The latter two are referred to as the mobility transition, and the first two refer to the energy transition of transport [24]. While the decarbonization effort is clear and a number of different technological solutions for the energy

transition of road transport, such as electric vehicles, are available, there is still disagreement on the best option(s). Although uncertainty undoubtedly plays a major role in

this disagreement, it is not clear how the different technological options relate to each other in terms of uncertainty.

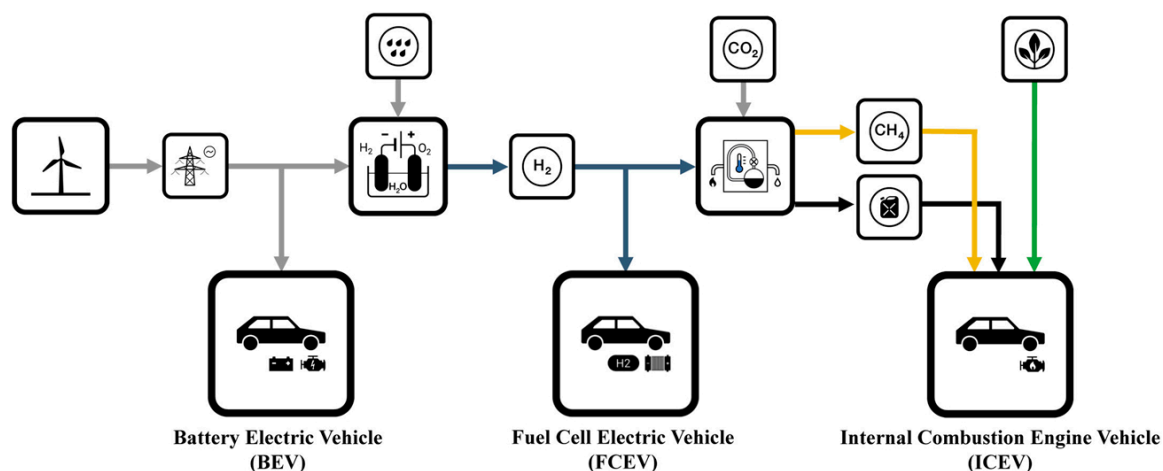


Figure 2 Key technological options for low-carbon road transport [25].

### 2.1. Comparison of technologies

In transport, three different technological options for achieving energy transition are commonly discussed: battery electric vehicles (BEVs), hydrogen fuel cell electric vehicles (FCEVs) and internal combustion engine vehicles (ICEVs), which run on either biofuels or synthetic fuels. Figure 2 illustrates these decarbonization options for road transport based on electricity from renewable energy sources.

BEVs are vehicles that run on electric energy provided by an on-board battery pack that powers an electric motor. Owing to the high efficiency of electric motors (up to 95%) and the possibility of partial recovery of mechanical energy, BEVs exhibit the highest (approximately 70%) well-to-wheel efficiency of all the technologies studied [26, 27].

FCEVs differ from BEVs in terms of electricity supply. An FCEV generates the necessary energy on board from hydrogen via a fuel cell unit. This electricity is subsequently used to power an electric motor. Compared with BEVs, the system has an additional step, as electricity is first used to produce an energy carrier (hydrogen) through electrolysis, which then allows it to be converted on-board into electricity. Accordingly, the overall well-to-wheel efficiency is relatively low (between 25 and 30%) [27, 28].

The third technology, the ICEV, is essentially a heat engine that produces mechanic energy from the combustion of fuel. From an energy conversion point of view, this fuel can be either synthetic fuel or biofuel, and both potentially enable carbon-neutral operation. The main sources of synthetic fuels are hydrogen and carbon dioxide. Due to the complexity of the conversion steps, the well-to-wheel efficiency is the lowest of all options (13-20%) [27, 28]. In contrast, biofuels produced from organic matter, such as crops or organic waste products,

can theoretically be considered carbon neutral, as they only emit locally as much carbon as crops have previously absorbed (excluding the energy required for plowing and conversion processes) [29].

## 3. MEASUREMENT TASK

Fuel test investigations were carried out on a GUNT-built machine for training purposes (Fig. 3). The machine consists of a single-cylinder Hatz 1B20-6 diesel engine and a brake unit connected to it. To obtain a more comprehensive picture of the processes in the engine, it was also necessary to investigate the composition of the exhaust gas, for which a Testo 330-2 measuring device was used. This approach allowed us to document the effect of different fuels on the emission values.

### 3.1. The tested fuels

The effects of two different fuels on an experimental diesel engine are shown. The first is a commercially available standard diesel fuel (composition according to MSZ EN 590:2009), which contains 4.8% by volume of bio component fatty acid methyl ester as a standard. In contrast, the alternative fuel blend we tested was made with unesterified vegetable oil blended with the commercially available regular diesel fuel mentioned above. According to the international literature, in the production of alternative fuels, virgin oil is pretreated by a transesterification process [30].

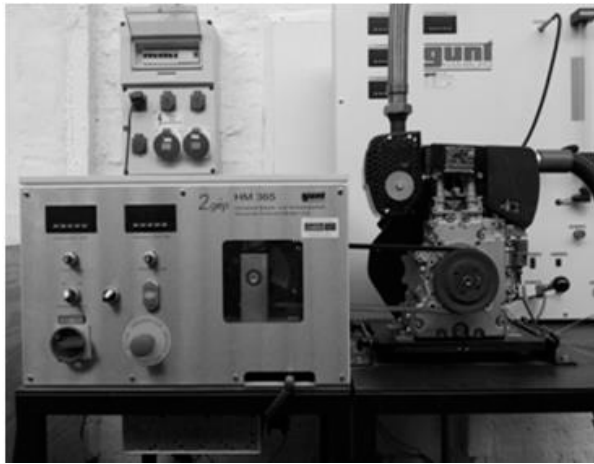


Figure 3. The experimental diesel engine and its brake unit.

In our research, we wanted to gather information on the effects of an alternative fuel blend on a diesel engine and its exhaust gas composition with the addition of a no esterified vegetable oil, which is also used in households. The alternative fuel thus formulated contained 2/3 by volume of normal diesel and 1/3 of sunflower vegetable oil.

#### 4. RESULTS

In our tests, measurements were carried out using both fuels with the same operating parameters, i.e., running the engine at constant speed and increasing the load torque. The measurement started from the lowest achievable braking torque, which was 0.5 Nm. Subsequently, the subsequent measuring points were set up by increasing the load torque every 0.5 Nm to 5 Nm, taking care to ensure that the parameters to be measured were set to a constant value after the load was changed. A similar measurement method can be found in the publication by Wang et al. [31].

The fuel consumption data were evaluated and are shown in Figure 4. The graph clearly shows that, on average, 3.2% more fuel per unit mass per hour was consumed over the operating range when using the alternative fuel under the same operating conditions. There are several reasons for this additional consumption.

One reason is that the energy content of the alternative fuel blend is lower than that of normal diesel fuel; the other reason may be a change in combustion quality. The fuel that we produce contains vegetable oil used without transesterification, which increases the viscosity. As a result, the atomization and thus the combustion quality have deteriorated. The additional consumption measured is, however, dwarfed by the fact that a third of the fuel tested is not from fossil sources.

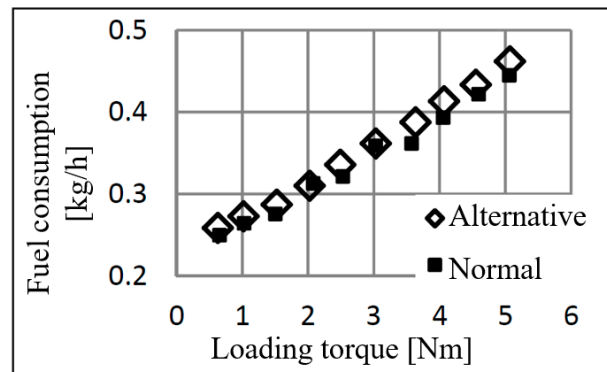


Figure 4. Fuel consumption [kg/h].

#### 5. SUMMARY

It seems strategically useful, therefore, to keep all technological options open to adapt to unforeseen developments. In practice, this should not be a wait-and-see strategy but rather a parallel development of all options. This may entail higher initial costs, but it will increase the long-term resilience of the energy transition and help avoid snap decisions. Ultimately, the socioeconomic cost of building both BEV and FCEV infrastructure seems relatively low compared to that of other infrastructure budgets.

Our research experiments also show the potential of these materials for IBEV systems. Sub alternatives include the production of different no fossil fuels and blending them with existing fuels (or the production of fully synthetic fuels). We intend to continue our research under normal conditions on a brake test bench (high-performance diesel engine). Our results will be used to establish a new research collaboration with a large automotive company (testing new fuel types).

#### 6. ACKNOWLEDGMENTS

The author is grateful to the AVL Company for the technical (software academic license) support of this research.

#### 7. REFERENCES

- [1] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion 2017*. OECD Publishing, 2017.
- [2] IPCC, *Global warming of 1.5 °C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*, 2018.
- [3] CONRADO, R. J., et al. *Electrofuels: a new paradigm for renewable fuels*. In: *Advanced biofuels and bioproducts*. New York, NY: Springer New York, 2012. p. 1037-1064.

- [4] AGARWAL, A. S., et al. *Conversion of CO<sub>2</sub> to value added chemicals: Opportunities and challenges*. Handbook of climate change mitigation and adaptation, 2022, 1585-1623.
- [5] TARASCON, J.-M.; ARMAND, M. *Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*. Nature, 2001, 414.6861: 359-367.
- [6] LEVINE, R. B.; PINNARAT, T.; SAVAGE, P. E. *Biodiesel production from wet algal biomass through in situ lipid hydrolysis and supercritical transesterification*. Energy & Fuels, 2010, 24.9: 5235-5243.
- [7] GUAN, J., et al. *Development of reactor configurations for an electrofuels platform utilizing genetically modified iron oxidizing bacteria for the reduction of CO<sub>2</sub> to biochemicals*. Journal of biotechnology, 2017, 245: 21-27.
- [8] ABABNEH, H.; HAMEED, B. H. *Electrofuels as emerging new green alternative fuel: A review of recent literature*. Energy conversion and management, 2022, 254: 115213.
- [9] MØLLER, K. T., et al. *Hydrogen-A sustainable energy carrier*. Progress in natural science: Materials International, 2017, 27.1: 34-40.
- [10] NIAZ, S.; MANZOOR, T.; PANDITH, A. H. *Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 457-469.
- [11] GUST, D.; MOORE, T. A.; MOORE, A. L. *Solar fuels via artificial photosynthesis*. Accounts of chemical research, 2009, 42.12: 1890-1898.
- [12] RIDJAN, I.; MATHIESEN, B. V.; CONNOLLY, D. *Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review*. Journal of cleaner production, 2016, 112: 3709-3720.
- [13] ABABNEH, H., et al. *Enhancing the lubricity of gas-to-liquid (GTL) paraffinic kerosene: impact of the additives on the physicochemical properties*. BMC Chemical Engineering, 2020, 2: 1-16.
- [14] HAWKINS, A. S., et al. *Biological conversion of carbon dioxide and hydrogen into liquid fuels and industrial chemicals*. Current opinion in biotechnology, 2013, 24.3: 376-384.
- [15] PEARSON, R. J.; TURNER, J. W. G. *Renewable fuels-an automotive perspective*. In: Comprehensive Renewable Energy: Vol. 5-Biomass and Bio-fuel Production. Elsevier, 2012.
- [16] BERGTHORSON, J. M. *Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power*. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 68: 169-196.
- [17] BERGTHORSON, J. M., et al. *Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power*. Applied Energy, 2015, 160: 368-382.
- [18] BRYNOLF, S., et al. *Electrofuels for the transport sector: A review of production costs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1887-1905.
- [19] MASRI, A. R. *Challenges for turbulent combustion*. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38.1: 121-155.
- [20] AGREEMENT, Paris. *United nations paris agreement*. The Paris Agreement| United Nations [accessed on 15 August 2022], 2015.
- [21] FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION, *Building and Nuclear Safety, Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Im-pulse deutscher Klimapolitik* (2015). [https://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_in\\_zahlen\\_bf.pdf](https://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_bf.pdf)
- [22] FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION, *Building and Nuclear Safety, Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Im-pulse deutscher Klimapolitik* (2018). [https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz\\_in\\_zahlen\\_2018\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_2018_bf.pdf)
- [23] BONGARDT, D., et al. *Low-carbon land transport: policy handbook*. Routledge, 2013.
- [24] HOCHFELD, C., et al. *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern*. 12 Thesen zur Verkehrswende. 2017.
- [25] WANITSCHKE, A.; HOFFMANN, S. *Are battery electric vehicles the future? An uncertainty comparison with hydrogen and combustion engines*. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2020, 35: 509-523.
- [26] HACKER, F., et al. *eMobil 2050-Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz*. Öko-Institut eV, 2014.
- [27] WOLFRAM, P.; LUTSEY, N. *Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions*, 2016.
- [28] VERKEHRSWENDE, A. *Agora Energiewende, Frontier Economics, Die zukünftigen kosten strombasierter synthetischer kraftstoffe* (2018)[cited March 25, 2018]. URL <https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost>, 2017, 2050.
- [29] MALINS, C. *Thought for food: A review of the interaction between biofuel consumption and food markets* [cited March 20, 2018]. URL <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Cerulogy Thought-for-food September2017.pdf>.
- [30] MÁTRAI, Zs.; BODNÁR, I. *Dízelmotor környezeti terhelésének vizsgálata fosszilis és alternatív üzemanyagok használata mellett*. Műszaki Tudományos Közlemények, 2015, 3: 219-222.
- [31] WANG, Y. D., et al. *An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil*. Applied thermal engineering, 2006, 26.14-15: 1684-1691.

# GÉPÉSZETI SZERKEZET TÖBBVÁLTOZÓS OPTIMÁLÁSA GYÁRTÁSI TECHNOLOGIA ÉS KÖLTSÉGELEMZÉS ALAPJÁN

## MULTIVARIABLE OPTIMISATION OF MECHANICAL STRUCTURE BASED ON MANUFACTURING METHOD AND COST ANALYSIS

*Bodnár Dávid\**, *Jármai Károly\*\**

### ABSTRACT

*Solving the problems of designing a structure while keeping costs reasonable are part of the routine for a mechanical engineer. By using intuition and expertise, an engineer can quickly come up with a solution, but these solutions are often rooted in assumptions and previous solutions of other designers. By utilizing a multivariable optimization approach, there is the possibility to find the optimal solution for the problem based on framework conditions instead of assumptions. Framework conditions are the objective functions, which can be the load case, expected lifetime, available materials, manufacturing method and allocated budget.*

### ABSZTRAKT

*A gépészmérnökök mindennapi rutinjához tartozik, hogy egy szerkezet tervezésével kapcsolatos problémákat úgy oldjanak meg, hogy közben a gyártási költségek alacsonyok maradjanak. Az intuíció és a szakértelem felhasználásával egy mérnök gyorsan találhat megoldást, de ezek a megoldások gyakran feltételezésekben és más tervezők korábbi megoldásaiban gyökereznek. A többváltozós optimalizációs megközelítés alkalmazásával lehetőség nyílik arra, hogy feltételezések helyett keretfeltételek alapján találjuk meg a probléma megoldását. A keretfeltételek, melyek a célfüggvények is lehetnek: terhelések, az elvárt élettartam, a rendelkezésre álló alapanyagok, gyártási módszer és a rendelkezésre álló költségvetés.*

### 1. BEVEZETÉS

A tervezési és gyártási folyamatok során rendkívül fontos a költségek szem előtt tartása. Ezek a költségek a választott alapanyag fajlagos költségétől és a gyártási folyamatok költségvonzatától függenek. A gyártási költségek részei azok az elemek amik közvetlenül hatnak a szerkezet méretére, kialakítására vagy alakjára. Ezeket

a költségeket függvénybe foglalva lehetőség adódik a keretfeltételek alapján optimális megoldást keresni az adott feladatra.

Az optimális méretezés célfüggvény és feltételrendszer kidolgozását igényli, így a szerkezetanalízis átgondoltabb véghezvitelét, ezzel arra ösztönözve a tervezőt, hogy ne a rutin vezérelje [1].

A költség szem előtt tartása mellett fontos még, hogy a szerkezet hatékony legyen. Ez akkor mondható el, ha a szerkezet a keretfeltételeknek maradéktalanul megfelel.

### 2. KERETFELTÉTELEK

A keretfeltételek a szerkezetet leíró mennyiségek, két csoportot különböztetünk meg: előre megadott paraméterek és tervezési változók. Az előre megadott paraméterek nem változnak az optimalizálás során, míg a tervezési változók igen. A tervezőn múlik milyen értékeket rögzít és miket hagy meg tervezési változónak. Rögzítve lehet: a szerkezeti elemek maximális hossza, az anyag fizikai és mechanikai jellemzői, a szerkezet alakja, keresztmetszet-területek.

Az élettartam alatt várhatóan jelen lévő terhelések előre becsülhetők, és a tervezési feladatoknál rendkívül fontosak is. A terhek és erők a szerkezet tömegéből, a szerkezet ember általi használatából és a természeti hatásokból eredhetnek. A szerkezetnek képesnek kell lennie elviselni és biztonságosan továbbítani azokat az alapra. Terhelések lehetnek statikusak vagy dinamikusak, és különböző irányokból és forrásokból származhatnak.

A tervezés során a terhelések számos szempontból befolyásolják a szerkezet méretét és az anyagok kiválasztását.

Biztonság: A tervezett szerkezetnek elegendő szilárdsággal kell rendelkeznie ahhoz, hogy megfeleljen a terheléseinek anélkül, hogy deformálódna vagy

\* mérnök, Emerson Automation FCP Kft. Eger, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

\*\* egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

meghibásodás lépne fel. A biztonsági tényezők bevezetése fontos a váratlan terhelések és változások kezelése érdekében. A biztonsági tényező általában a szakítószilárdság számított értékét módosítja.

Élettartam: A tervezés során figyelembe kell venni a szerkezet élettartamát. Ezt az Eurocode EC3[2] alapján érdemes elvégezni. Az erőtani követelmények teljesülésének ellenőrzéséhez az előírt tervezési élettartam mellett a szabvány teherbírási és használhatósági határállapotokat definiál. A határállapotok megfelelését igazolni kell[3]. A tervezési állapotok lehetnek tartós, ideiglenes és rendkívüli állapotok. Az időtől függő, halmozódó jellegű hatások esetén a határállapotok (pl. a fáradás) igazolásakor a használati élettartamot is figyelembe kell venni.

Általánosságban elmondható, hogy az élettartamot különböző típusú szerkezeteknél különböző tervezési élettartamok határozzák meg. Például:

Közúti híd: Elvárt élettartam 75-100 év.

Építőipari szerkezetek: 50-100 év.

Repülőgép szárnyai: 20-30 év.

Autó: Átlagosan 10-15 év.

Ezen számok természetesen általánosítások és a konkrét tervezési élettartam függ a tervezői szándékoktól, a használati körülményektől és az alkalmazott anyagoktól.

Anyagválasztás: A terhelések befolyásolják az anyagok kiválasztását is. Nem jelenhet ki biztosan, hogy egy nagyobb szakító szilárdságú anyag előnyösebb minden esetben, ezért a tervező számos alapanyag közül választhat[4]. Tömör anyagból csak nagyon kis méretű alkatrészeket gazdaságos gyártani, nagyobb méreteknél az acélszerkezetet úgy alakítják ki, hogy egydimenziós elemekből épüljenek fel.

### 3. KÖLTSÉGELEMEK

#### 3.1 ANYAGKÖLTSÉG

Az anyagköltség a szerkezethez szükséges alapanyag súlyától függ. A fajlagos anyagköltség acél esetében 0,7-1 EUR/kg, alumíniumnál 1,95 – 3,1 EUR/kg, rozsdamentes acélnál 2,9 – 5,1 EUR/kg[5].

$$K_M = k_m \rho V \quad (1)$$

Ahol  $K_M$ [kg] az anyagköltség,  $V$  [mm<sup>3</sup>] a térfogat és  $\rho$  az anyag sűrűsége. Acél esetében  $7,85 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>, alumínium  $2,7 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>, rozsdamentes acél  $7,78 \times 10^{-6}$  kg/mm<sup>3</sup>[6].

#### 3.2 GYÁRTÁSI KÖLTSÉG

A gyártási költség időalapú. A költség tehát arányos a gyártáshoz szükséges idővel és a munkaerő költséggel. Utóbbi költség országoként változik.

$$K_F = k_F \sum_i T_i \quad (2)$$

Ahol,  $K_F$  [EUR] a gyártási költség,  $k_f$  [EUR/min] a fajlagos gyártási költség és  $T_i$  [min] a gyártási idő.

#### 3.3 FELÜLETELŐKÉSZÍTÉSI IDŐ

A felület előkészítés része a felület tisztítása, homokszórása stb. jelenti. A tisztítási idő a felület nagyságától függ, és a következőképpen határozhatjuk meg:

$$T_{SP} = \theta_{ds} a_{sp} A_s \quad (3)$$

Ahol  $A_s$  [mm<sup>2</sup>] a felület nagysága,  $a_{sp} = 2 \times 10^{-6}$  min/mm<sup>2</sup>, és  $\theta_{ds}$  a nehézségi tényező.

#### 3.4 HEGESZTÉSI MUNKÁK IDEJE

A hegesztési feladat több részfeladatból áll össze. Ezek a részfeladatok a következők: előkészítés, összefűzés, tényleges hegesztési idő, elektróda csere, salakolás és köszörülés.

Az előkészítés és összeszerelés ideje az alábbi közelítő képlet segítségével számítható ki:

$$T_{w1} = C_1 \theta_{dw} \sqrt{\kappa \rho V} \quad (4)$$

A hegesztési idő közelítő számítása:

$$T_{w2} = \sum_i C_{2i} a_{wi}^2 L_{wi} \quad (5)$$

Ahol  $C_1$  a hegesztési technológiától függ, értéke általában 1, a  $C_2$  a technológián felül a pozíció (fej felett, függőleges) és a normál hegesztés (downhand) közötti időkülönbséget is figyelembe veszi.  $\theta_{dw}$  a nehézségi tényező,  $\kappa$  az elemek száma. A nehézségi tényező a szerkezet összetettségétől, hogy az térbeli vagy síkbeli, illetve a felhasznált elemek típusától. A javasolt értéktartomány 1 – 4 között van.  $a_{wi}$  a varrat mérete,  $L_{wi}$  a hegesztés hossza[7–9].

1. táblázat Hegesztési idők  $T_{w2}(\text{min/m})$  a varratméret  $a_w(\text{mm})$  függvényében sarokvarratokra. Downhand pozícióban.

Hegesztési technológia	$a_w[\text{mm}]$	$10^3 T_{w2}$
SMAW	1-6	$0.7889a_w^2$
GMAW-CO2	1-6	$0.3394a_w^2$
FCAW	1-6	$0.2302a_w^2$
FCAW-MC	1-6	$0.4520a_w^2$
GTAW/TIG	1-6	$1/(-0,012+1,079/a_w^{1.5})$

Ahol:

SMAW – Bevonat elektródás kézi ívhegesztés

GMAW-CO2 – Védőgáz ívhegesztés CO<sub>2</sub>-vel

FCAW – Porbeles ívhegesztés

FCAW-MC – Fémhuzalos ívhegesztés

GTAW/TIG – Wolfram elektródás védőgáz ívhegesztés

### 3.5 FESTÉSI IDŐ

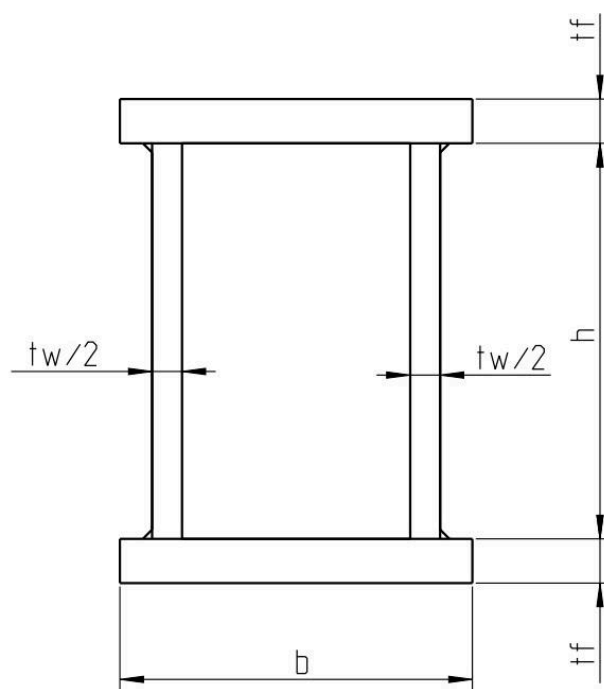
A festésnél alapozó és fedőfestéket feltételezve, a költséget meghatározhatjuk:

$$T_p = \theta_{dp}(a_{gc} + a_{tc})A_s \quad (4)$$

Ahol  $\theta_{dp}$  a nehézségi tényező,  $\theta_{dp}=1, 2$  vagy  $3$  vízszintes, függőleges vagy fejfeletti festés esetén. Alapozó festék paramétere  $a_{gc} = 2 \times 10^{-6} \text{ min/mm}^2$ , fedőfesték paramétere  $a_{tc} = 2,85 \times 10^{-6} \text{ min/mm}^2$ .

### 4. KÖLTSÉGSZÁMÍTÁS

A számítást két különböző esetre vizsgáljuk meg, az első esetben az övlemez és a gerinclemez vastagsága tervezési változó és egymástól független, a második esetben pedig a vastagságuk egyenlő. Ezzel azt bemutatva, hogy a tervezési megkötések milyen mértékben képesek befolyásolni a gyártási költségeket. Az iparban megfigyelhető egy racionálási folyamat, amelynek során a raktáron tárolt alapanyagok mennyiségét és a variációk számát is csökkentik, ezzel csökkentve a  $k_f$  fajlagos gyártási költséget.



1. ábra Szekrényszelvényű tartó ábrája

Az optimális méretezéshez használt képletek:  
Keresztmetszet terület:

$$A = 2h \frac{t_w}{2} + 2bt_f \quad (5)$$

Másodrendű nyomaték:

$$I_x = \frac{2h^3 \frac{t_w}{2}}{12} + 2bt_f \left( \frac{h}{2} + \frac{t_f}{2} \right) \quad (6)$$

A keresztmetszeti tényező:

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{h}{2}} \quad (7)$$

Nyomaték:

$$M_b = \frac{FL}{4} \quad (8)$$

Szakítószilárdság méretezési feltétel:

$$\delta_{max} = \frac{M_b}{W_x} \leq \frac{f_g}{\gamma_m} \quad (9)$$

A terhelés mértéke  $F=10$  [kN], a fesztáv  $L = 15$  [m]. A szelvény keresztmetszete a teljes hosszon állandó.

A számítást 2 esetre vizsgáljuk meg, az első esetben az övlemez és a gerinclemez vastagsága tervezési változó és egymástól független, a második esetben pedig a vastagságuk egyenlő. Ezzel azt bemutatva, hogy a tervezési megkötések milyen mértékben képesek befolyásolni a gyártási költségeket. Az iparban megfigyelhető egy racionálási folyamat, amelynek során a raktáron tárolt alapanyagok mennyiségét és a variációk



számát is csökkentik, ezzel csökkentve a  $k_f$  fajlagos gyártási költséget.

Az optimaláláshoz nemlineáris ARG módszert használtam, ami a lokális optimumot keresi meg a bemenő feltételeknek megfelelően. A kapott eredmények általános esetre vizsgálva:  $A_{opt} = 2075,86 \text{ mm}^2$  és  $I_{x1} = 23006830,48 \text{ mm}^4$ . Az eredmények ha  $t_w = t_f$  paramétert használjuk  $A_2 = 3677,93 \text{ mm}^2$  és  $I_{x2} = 23901316,12 \text{ mm}^4$ . A különbség 78 %. Annak a vizsgálata, hogy ez a gyártási költség béli különbség megtérül-e a fajlagos gyártási költségben gyártónként és termelési helyszínenként is eltérhet, ezért minden esetben egyedi mérlegelést kíván. Ezt a mérlegelést megkönnyítheti, ha a különböző lehetséges megoldások folyamatosan követve vannak, és a tervezés során például ADT-t (Autogenetic Design Theory) alkalmazva a végleges megoldás az optimális megoldás lehet[10].

## 5. ÖSSZEGZÉS

A hatékony innováció a modern ipari vállalatoknál kulcsfontosságú[11]. A tervezési megkötések azonban nagy mértékben befolyásolhatják a végső költségeket. A bemutatott példában tervezési paraméternek véve, hogy állandó vastagságú alapanyagra legyen szükség a gyártáshoz a szükséges nyersanyag költségek nagy mértékben megugrottak. Ennek az oka, hogy a nyomott övlemeznél más vastagságú alapanyag lenne optimális. A festési költségek nem változnak számottevően, mert ott a szelvény teljes hossza dominál, ami tervezési állandó. Kijelenthető tehát, hogy érdemes az optimalálás során kapott értékeket követni, de egyéni mérlegelés alapján eltérhetünk azoktól. A bemutatott példánál a vastagság állandóvá tétele egyszerűbbé tenné a raktározási feladatokat, a gyártási és előállítási költségeket a méretgazdaságosság miatt csökkentené, míg a festési, felületvédelmi feladatokra minimális hatással van.

## 6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A C2307874 számú projekt a kulturális és innovációs minisztérium nemzeti kutatási fejlesztési és innovációs alapról nyújtott támogatásával, a kdp-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg.



## 7. IRODALOM

- [1] FARKAS, József és Károly JÁRMAI. *Optimum Design of Steel Structures* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-36867-7. Elérhető: doi:10.1007/978-3-642-36868-4

- [2] EN 1993-1-1: EUROCODE 3: *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. évszám nélkül.
- [3] AL NAGEIM, H., T. J. MACGINLEY és T. J. MACGINLEY. *Steel structures : practical design studies*. B.m.: Taylor & Francis, 2005. ISBN 9781482263558.
- [4] ADÁM DOBOSY. TERVEZÉSI HATÁRGÖRBÉK NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKBÓL KÉSZÜLT, ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTELŰ SZERKEZETI ELEMKEHEZ. 2018.
- [5] *Steel Prices & Indices* [online]. [elérés. 2024-02-10]. Elérhető: <https://mepsinternational.com/gb/en/prices-and-indices>
- [6] DR. JÁRMAI KÁROLY. *VÉKONYFALÚ HEGESZTETT SZERKEZETEK KÖLTSÉGSZÁMÍTÁSA KÜLÖNBÖZŐ GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁKKAL* [online]. évszám nélkül [elérés. 2024-03-01]. Elérhető: <https://real.mtak.hu/79867/>
- [7] MELA, Kristo és Markku HEINISUO. Weight and cost optimization of welded high strength steel beams. *Engineering Structures* [online]. 2014, **79**, 354–364. ISSN 01410296. Elérhető: doi:10.1016/j.engstruct.2014.08.028
- [8] CHAYOUKHI, S ; ; Z ; BOUAZIZ és A ZGHAL. COSTWELD: A COST ESTIMATION SYSTEM OF WELDING BASED ON THE FEATURE MODEL. *Advances in Production Engineering & Management*. 2009, **4**, 263–274. ISSN 1854-6250.
- [9] JÁRMAI, K és J FARKAS. *Cost calculation and optimisation of welded steel structures*. 1999.
- [10] SOLTÉSZ, László és Szilárd NAGY. The connection between ADT and evolutionary methods in product development. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. B.m.: IOP Publishing Ltd, 2021. ISSN 17426596. Elérhető: doi:10.1088/1742-6596/1935/1/012001
- [11] SOLTÉSZ, László, László KAMONDI és László BERÉNYI. Project management success factors: in search of product development project specialities. *Design of Machines and Structures* [online]. 2020, **10**(2), 114–122. ISSN 17856892. Elérhető: doi:10.32972/dms.2020.022

# SZERKEZETOPTIMÁLÁSI PÉLDA EGY ÚJRAFELHASZNÁLHATÓ SZEIZMIKUS KERETVÁZ AKTÍV NYÍRÁSI ELEMÉNEK TERVEZÉSÉRE

## STRUCTURAL OPTIMISATION EXAMPLE FOR THE DESIGN OF AN ACTIVE SHEAR LINK OF A REUSABLE SEISMIC FRAME

Károly Jármái \*, Maryam Hasanali \*\*, Kaveh Andisheh \*\*

### ABSTRACT

*Circular architecture employs innovative building techniques that are easily disassembled, repurposed, or reused once their useful life has gone. This paper focuses on a reusable design case study method to seismic frame structure design, which is widely utilized in New Zealand for steel frame structures. The research provided a reusable, optimized design for the complete seismic frame. This study describes shear strength optimization. When the welded construction parameters are optimized for weight or cost, the weight of the steel utilized is lowered. This weight decrease is instantly connected with a reduction in environmental impact, as the environmental impact is directly proportionate to the structure's weight.*

### ABSZTRAKT

*A körkörös tervezés olyan kreatív építési technikákat alkalmaz, amelyek könnyen szétszerelhetők, újrahasznosíthatók vagy újrahasznosíthatók, ha hasznos élettartamuk lejárt. Ez a munka a szeizmikus vázszerkezetek tervezésénél alkalmazott újrafelhasználható tervezési esettanulmányi megközelítésre összpontosít, amelyet az új-zélandi acélváz szerkezeteknél gyakran alkalmaznak. A kutatás egy újrafelhasználható, optimált tervezést kínált a teljes szeizmikus vázra. Ez a tanulmány a nyírószilárdság-optimalizálást mutatja be és valósítja meg. Ha a hegesztett szerkezeti méreteket optimalják, akár a tömeg, akár a költségek szempontjából, a felhasznált acél súlya csökken. Ez a súlycsökkenés azonnal korrelál a környezeti hatás csökkenésével, mivel a környezeti hatás pontosan arányos a szerkezet tömegével.*

### 1. BEVEZETÉS

Míg a gyártásban egyre népszerűbb az Ipar 4.0, az építőiparban még nem fedték fel teljes mértékben. Ez a kutatás az Ipar 4.0 megvalósításához vezet az építőipari

értéklánc egészében, ami teljesen újszerű képességet jelent. Új gondolkodásmódokat, technológiákat, folyamatokat és üzleti modelleket fog nyújtani, hogy megkönnyítse az ágazatnak az Építőipar 4.0-ra való átállását, valamint a technológia átvételének, a döntéstámogatásnak és az adatfelhasználásnak a kvantumugrását. Bár ennek a lépésnek a gazdasági hatásának meghatározása kihívást jelent, már sok adattal rendelkezünk. Ez a kutatási projekt az Ipar 4.0 koncepciókat használja fel annak érdekében, hogy segítse az építőipart a technológiailag fejlettebb ágazatra való átállásban. Jelenleg a fő cél egy keretrendszer biztosítása az újrafelhasználható szeizmikus keretek tervezéséhez a körkörös tervezési megközelítés alkalmazásával.

### 2. A KAPCSOLATOK RANGSOROLÁSA AZ ESETTANULMÁNYHOZ

A Circular Design Project az újrafelhasználhatóság koncepciójának felhasználását javasolja olyan acélváz épületek kifejlesztésére, amelyek könnyebben szétszerelhetők és újrafelhasználhatók. Az 1. ábra a projektben az újrafelhasználhatósági koncepciót egy termékéletciklus-diagram segítségével mutatja be. A HERA Endeavour kutatási program körkörös tervezési alprojektjének célja a termék 4.0 életciklus különböző összetevői közötti adatkapcsolatok és -elosztások javítása, ami költséghatékonyabb és fenntarthatóbb termékeket eredményez az Épület 4.0 számára.

Míg a legtöbb egyszerű kötés csavarozott, a legtöbb új-zélandi épületváz több hegesztett szeizmikus kötéssel rendelkezik. Ezek átalakíthatók csavarozott kötésekre, ami lehetővé teszi a könnyű szétszerelést és újrafelhasználást [1]. A 2. ábrán látható, teljesen hegesztett kapcsolatokkal rendelkező EBF-kereteket (Eccentrically Braced Frame) teljesen csavarozott kapcsolatokra lehetne átalakítani (lásd a 3. ábrát), figyelembe véve az újrafelhasználhatóság koncepcióját az épület/anyag teljes élettartama alatt.

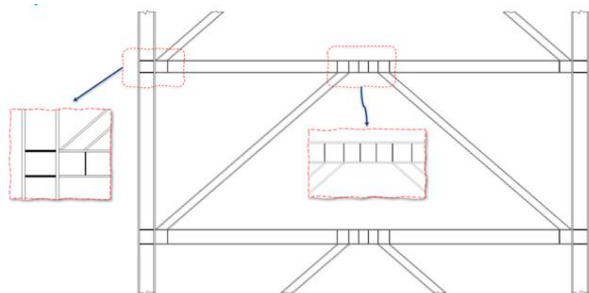
\* Professor, Miskolci Egyetem, H-3515 Miskolc Egyetemváros, Hungary

\*\* HERA, Heavy Engineering Research Association, 17 - 19 Gladding Place, Manukau City, Auckland 2104, New Zealand

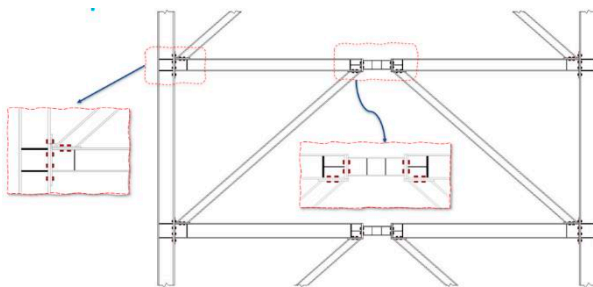


1. ábra. Termék 4.0 életciklus [2]

Továbbá az optimalás szempontjából a körkörös tervezési projekt olyan tervezési/újratervezési döntéseket támogat, amelyek csökkentik a termelési költségeket. Mivel Új-Zélandon a munkaerőköltségek magasak, a gyártási idő (darabonkénti munkaidő) jelentős hatással lehet a gyártási költségekre. Ennek eredményeképpen úgy döntöttünk, hogy ezt a vizsgálatot a legjobb fejlesztési kapcsolatok rangsorolásával és keresésével kezdjük.



2. ábra. EBF keret teljesen hegesztett kapcsolatokkal



3. ábra. EBF keret teljesen csavarozott kapcsolatokkal

Az optimaláshoz a legjobb kapcsolat azonosítása érdekében kérdőívet dolgoztak ki, amelyet szétosztottak a gyártó és tervező tanácsadó cégek között. A felmérés célja az volt, hogy négy kritérium alapján értékeljék a szerkezeti acélkapcsolatokat: a felhasználás gyakorisága,

a tervezési/részletezési ráfordítás, a gyártási költségek és az összeszerelés alapján. A felméréshez egy 1-5-ig terjedő rangsorolási rendszert dolgoztunk ki, ahol az 1 a rossz választást, az 5 pedig a kiváló választást jelentette. A felmérés tartalmazott egy listát a szavazásra bocsátott minta kapcsolatokról, valamint egy felhívást a válaszadók számára, hogy javasoljanak további olyan kapcsolatokat, amelyeket szerintük fel kellene venni a kérdőívbe. A végső értékeléseket a Körkörös Tervezési Projekt részeként a szerkezoptimaláshoz szükséges kapcsolatok rangsorolásához használtuk fel.

Az adatok azt mutatják, hogy a legmagasabb pontszámot a nyomatekvég-lemez kapcsolatok, a gerinclemez-lemez kapcsolatok és az excentrikusan merevített, eltávolítható aktív kapcsolatokkal ellátott keretek kapták. A gyártó javaslata miatt úgy döntöttünk, hogy ezt a kutatást a cserélhető aktív kapcsolatokkal ellátott excentrikusan merevített keretek optimalálásával kezdjük. Bár a cserélhető aktív elemekkel ellátott excentrikusan merevített kereteket ritkán használják, optimalásuk jelentős hatással van az acélvázak költségmegtakarítására.

### 3. EBF-KERETEK ELŐZETES TERVEZÉSE

Az előzetes tervezéshez az elemméreteket nem kell minden egyes emeleti szintre kiszámítani. Javasoljuk, hogy a 4-12 emeletes EBF-keretknél minden harmadik szinten méretezzék az elemeket.

A tervezőnek minden esetben az alap feletti első szinttel (a szeizmikus talajszinttel) kell kezdeni. A legfelső szinten lévő tagokat az előzetes tervezési fázisban mindig kifejezetten méretezni kell, a kiválasztott alsó szintek mellett.

#### 1. lépés. Az aktív kapcsolat mérete

Az EBF-konfigurációk többségénél az ( $i$ -dik szinten lévő)  $V_{link,i}$  szeizmikus nyíróerő az aktív összeköttetésben (az  $i$ -dik szinten) a következő egyenlet szerint kapcsolható össze az emelet szeizmikus nyíróerejével az összeköttetés szintjén [3]:

$$V_{link,i} = V_i \frac{h_s}{L} \quad (1)$$

ahol:

$V_{link,i}$  = nyíróerő az  $i$ -dik szinten lévő aktív láncszemben (az E. szeizmikus terhelési eset miatt),

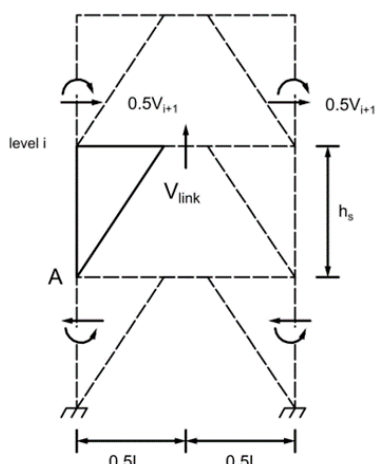
$V_i$  = szeizmikus nyíróerő az  $i$ -edik szinten,

$h_s$  = az  $i$ -dik szint emeletek közötti magassága,

$L$  = az EBF szélessége (oszlopközéppontok közötti távolság).

A 4. ábra a fordított V-keretes EBF-ek közötti kapcsolatot mutatja be. Az (1) egyenlet meghatározható az  $i$ -dik szint oszlopának alján lévő  $A$  pont nyomateki

egyensúlya vizsgálatával, miközben figyelmen kívül hagyjuk az oszlop hajlítónyomatékának hatását.



4. ábra. A  $V$ -merevítővel ellátott EBF kialakítása, az aktív kapcsolat nyíróerejének meghatározására

$$V_i = F_t + 0,92V_b \frac{W_i h_i}{\sum_{i=1}^n W_i h_i} \quad (2)$$

$$F_t = 0,08 V_b \quad (3)$$

$W_i$  a keretre az  $i$ -dik szinten alkalmazott szeizmikus teher, amelyet a  $G+0,3Q$  terhelési kombinációból kapunk, és amelyet az alkalmazott állandó és kényszerterhek (azaz az önsúly és hasznos terhek) alapján számítunk.

$G$  az épület állandó terhe, amelyet a gerenda önsúlyának, a padló, a burkolatok és a szolgáltatások önsúlyának összege határoz meg.

$Q$  a hasznos terhelés, amelyet az épület kihasználtsága alapján határoznak meg. Az NZS 1170.01 tervezési szabvány [4] 3.1. táblázata szerint az általános használatú irodák élőterhelése  $3,5 \frac{kN}{m^2}$ .

$h_i$  az adott emelet magassága,

$V_b$  a keret nyíróterhelése,

$$V_b = C_d(T_1) \sum W_i \quad (4)$$

$$C_d(T_1) = \frac{c(T_1)S_p}{k_\mu} \quad (5)$$

$S_p$  a szerkezeti teljesítménytényező. A töréshatárállapotra  $S_p$ -t 0,7-nek kell venni, kivéve, ha  $1,0 < \mu < 2,0$  ekkor  $S_p$  a következőképpen kell meghatározni  $S_p = 1,3-0,3\mu$ .  $\mu$  a szerkezeti alakíthatóság. Ebben a tervezési példában a duktilitás  $k_\mu = 3$ , tehát a szerkezeti teljesítménytényező  $S_p = 0,7$ .

$$C(T_1) = C(T) = C_h(T) * Z * R * N(D, T) \quad (6)$$

$C_h(T) = 2,45$  (az NZS 1170.01 szabvány [4] 3.1. táblázatában szereplő spektrális alakváltozási tényező értékekre utal).

$$V_b = 1000 kN$$

Az NZS 1170.5 [3] 4.1.2.1. pontja szerint a szerkezeti rendszer alaprezgési periódusa a Rayleigh-féle megközelítéssel (a fent említett egyenlet,  $T_1$ ) határozható meg. Ennek a módszernek a használata azonban kihívást jelent az ipari mérnökök számára, különösen bizonyos paraméterek, például a  $d_i$  kézi számítása során. Ezért ilyen esetekben a rendelkezésre álló szakirodalomból származó empirikus módszerekre való hivatkozást ajánlott. Ebben a keretben a telephely altalaj D osztályú. Ebben a szakaszban a következő egyenlet alkalmazható:

$$T_1 = 0,096n = 0,096 * 8 = 0,768 s \quad (7)$$

ahol  $n$  az épület szintjének száma, ami ebben a példában 8.

Érdeemes megjegyezni, hogy aktívan dolgozunk egy pontos módszertan kidolgozásán, amely összhangban van a Rayleigh-féle megközelítéssel a  $T_1$  meghatározására. Ezt a továbbfejlesztett megközelítést a projekt következő fázisaiban fogjuk bevezetni.

Az új-zélandi tervezési szabványban (NZS 3404 [3]) az 1. kategóriájú szerkezetek minimális alakíthatósági tényezője 3, az EBF-ek maximális tényezője pedig 6 ajánlott. Annak érdekében, hogy a tervezett épület földrengés esetén megfeleljen az alacsony károsodási kritériumoknak, itt az ajánlott duktilitási tényező legalacsonyabb értékét (azaz 3) választották ki, hogy az épületben a legnagyobb szeizmikus nyírást lehessen elérni.

$h_s = 4,5$  m az 1. szint esetében, az összes többi szint esetében  $h_s = 3,5$  m.  $L = 9$  m minden szint esetében.

A  $Z$  tényező (veszélyességi tényező) nagysága a vizsgált épület elhelyezkedésétől függ, és az NZS 1170.05 szabvány [1] 3.3. táblázatában szereplő előírt értékek alapján lett meghatározva. Ebben a példában feltételezzük, hogy az épület Christchurchben található, ezért a  $Z$  értéke 0,3.

Az  $R$  tényezőt, amelyet visszatérési időtényezőként határoznak meg, az NZS 1170.05 szabvány [4] 3.1.5. szakasza alapján kapjuk meg. Ez a paraméter a földrengés túllépésének éves valószínűségétől függ. Ezért az optimalizációs folyamat során állandó,  $R=1,0$  [5].

Az  $N(D, T)$  paramétert a földrengés közeli hiba tényezőjeként határozzuk meg, és ez is a földrengés túllépésének éves valószínűségétől függ. Ezt a tényezőt sem befolyásolja az optimalizációs eredménye, és egyenlő:  $N(D, T) = 1$ .

A fent említett értékek felhasználásával  $C(T_1) = 0,735$ .

Számítsuk ki a  $C_d(T_1)$  értéket az (5) egyenlet segítségével. Az  $S_p=0,7$  és  $k_\mu=3$  paramétereket a 3. oldalon adtuk meg. Ezért  $C_d(T_1)=0,1715$ .

A 4. egyenlet és a  $\sum W_i$  értékének felhasználásával kiszámítottuk a  $V_b$  értékét.

$V_{link,i}^*$  = Ez a tényező a nyírási link igénybevitelét jelöli minden szinten, és az 1. egyenlet segítségével határozzuk meg.

$\Delta_i$  = Ennek a paraméternek a kézi számítása kihívást jelent. Ezeket az értékeket számítógépes szoftver segítségével határoztuk meg.

$\emptyset V_v$  = a nyírókötés nyírási teherbírása, és a következő egyenlet segítségével határozzuk meg (az NZS 3404 [3] szabvány 5.11.2. vagy 5.11.3. pontja):

$$V_v = V_w = 0,6 f_{yw} A_w \quad (8)$$

$$A_w = d t_w \quad (9)$$

$f_{yw}$  = a gerinclemez folyáshatára,

$d$  = a szelvény mélysége,

$t_w$  = a gerinclemez vastagsága,

$\emptyset = 0,9$  (NZS 3404 3.3. táblázat)

$M_{sx}$  = a keresztmetszet hajlítási teherbírása, amelyet a következő egyenlet alapján kell kiszámítani (az NZS 3404 szabvány 5.1. pontja)

$$M_{sx} = f_y Z_e \quad (10)$$

$f_y$  = a keresztmetszet folyáshatára, amely az  $f_{yw}$  és  $f_{yf}$  kisebb értékét jelenti,

$Z_e$  = Hatékony keresztmetszeti modulus, amely az  $S_x$  és az  $1,5 Z_x$  kisebbik értéke, ahol  $S_x$  és  $Z_x$  a képlékeny és a rugalmas keresztmetszeti modulus.

$\emptyset = 0,9$  (NZS 3404 3.3. táblázat)

$V_{link}^o$  = Aktív kapcsolat túlterheléses nyírási teherbírása, és a következő egyenlet alapján számítható:

$$V_{link}^o = \emptyset_{oms} V_w \quad (11)$$

$\emptyset_{oms}$  = túlfeszültségi tényező (NZS 3404 12.2.8.2. táblázat). Ebben a példában ez 1,3.

$V_w$  = az aktív kapcsolat névleges nyírási folyáshatára (NZS 3404 5.11.4. szakasza), itt megegyezik a  $V_b$  értékkel.

$\emptyset^o$  = túlterhelési tényező minden egyes aktív kapcsolathoz

$$\emptyset^o = \frac{V_{link}^o}{V_{link}^*} \leq k_\mu / k_{\mu=1,25} \quad (12)$$

Ezt a paramétert pedig  $\emptyset^o \leq k_\mu / k_{\mu=1,25} = \frac{3}{1,25} = 2,4$ -re kell korlátozni.

$k_{\mu=1,25}$  = ezt a tényezőt a rendszerkategória alapján határozzák meg, és a szükséges előírásokat az NZS 3404 szabvány 12.3.3.4. pontja írja elő. Ebben a példában ez  $\mu=1,25$ .

$V_{link}^*$  = aktív kapcsolat tervezési szeizmikus nyíróereje, az 1.1. lépésben (1. egyenlet) leírtak szerint.

$M_e^*$  = az aktív kapcsolat tervezési hajlítónyomatéka, amelyet a következők szerint kell meghatározni:

$$M_e^* = V_{link}^* e_{link} / 2 \quad (13)$$

$e_{link}$  = az aktív elem szabad hossza.

Ez a mérnök (tervező) döntése, de meg kell felelnie a következő határértéknek:

$$d < e_{link} \leq 1,6 \frac{M_{sx}}{V_w} \quad (14)$$

Ennél a keretnél  $e_{link} = 600$  mm minden szinten.

$d$  = a kiválasztott keresztmetszet magassága.

Először a 13. egyenlet segítségével meghatározott aktív kapcsolat tervezési hajlítónyomatékát ( $M_e^*$ ) kell kiszámítani. Ezután a "0.75 $\emptyset M_{sx}$ " tényező alkalmazásával kiszámítjuk a tényleges keresztmetszeti modulus ( $Z_e$ ) nagyságát. Az  $M_{sx}$  kiszámításához lásd a 10. egyenletet. A tervezési folyamat egyszerűsége érdekében ésszerűen feltételezhető, hogy a  $Z_e$  értéke megegyezik az  $S_x$  értékével. Ezért:

$$M_e^* \leq 0,75 \emptyset M_{sx} = 0,75 \emptyset Z_e f_y = 0,75 \emptyset S_x f_y$$

$$\rightarrow S_x \geq \frac{M_e^*}{0,75 \emptyset f_y} \quad (15)$$

Az  $S_x$  kiszámítását követően válasszon olyan keresztmetszetet, amelynek képlékeny keresztmetszeti modulusa ( $S_x$ ) a számított értékkel egyenlő vagy annál nagyobb.

#### 4. AZ AKTÍV ELEM OPTIMÁLÁSA AZ EGYES SZINTEKEN

Az általánosított redukált gradiens (GRG) módszert alkalmaztuk az optimum megtalálására. A GRG módszer a redukált gradiens módszer kiterjesztése a nemlineáris egyenlőtlenségi korlátok kezelésére. Ebben a módszerben olyan keresési irányt találunk, hogy bármilyen kis elmozdulás esetén az aktuálisan aktív kényszerek pontosan aktívak maradnak [6].

Optimális méretezést az elmúlt évtizedek során számos hegesztett szerkezetre elvégeztünk [7, 8].

*Célfüggvény* az aktív elemek összesített tömege. Mivel a hosszúságuk adott, ezért a keresztmetszet minimum egyben a tömegminimumot is jelenti.

*Változó* az egyes szinteken az UC (universal column) szelvény magassága  $d_i$ .

*Méretezési feltételek*: hajlítás, nyírási, az aktív elem hossza. Ezek az alábbi egyenletekben találhatóak: (15), (11) és (14).

Az optimálás eredményeit az 1. táblázat és a feltételek teljesülését az 2-4. táblázatok tartalmazzák.

1. táblázat. Az optimalás eredménye, szelvényméretek

Eredeti szelvényméret	Eredeti UC szelvény magasság $d_s$	Optimális szelvény magasság $d_s$	Optimális elérhető szelvény magasság $d_s$	Optimális szelvényméret
200UC52,5	206	192,3723279	203	200UC46,2
200UC52,5	206	192,3723279	203	200UC46,2
200UC52,5	206	192,3723279	203	200UC46,2
250UC89,5	260	210,2456699	210	200UC59,5
250UC89,5	260	220,838433	254	250UC72,9
250UC89,5	260	231,5639434	254	250UC72,9
310UC118	315	246,5787358	254	250UC72,9
310UC118	315	282,9000267	308	310UC96,8
Az aktív kapcsolati elemek összkeresztmetszet területe $A_x$	635,73509	452,63701	529,47346	

2. táblázat. A nyirási feltételek teljesülése az egyes szinteken

Emeletszám	$V_{ilink}^* [N]$	$\emptyset V_w [N]$
L08	108561,04	207986,5966
L07	176658,41	207986,5966
L06	235409,09	238824,5776
L05	284813,07	287348,1455
L04	324870,35	324870,351
L03	355580,93	355580,9328
L02	376944,82	376944,8158
L01	500094,00	500094

3. táblázat. A hajlítási feltételek teljesülése az egyes szinteken

Emeletszám	$M_c^* [Nmm]$	$0,75 \emptyset M_{sx} [Nmm]$
L08	32568310,75	58496230,3
L07	52997523,85	58496230,3
L06	70622727,31	70622727,31
L05	85443921,13	85443921,13
L04	97461105,31	105224550,1
L03	106674279,9	130239416,1
L02	113083444,7	233696673,4
L01	150028200	337689431,8

4. táblázat. Az aktív elem hosszára vonatkozó feltételek teljesülése az egyes szinteken

Emeletszám	$e_{link}$ [mm]	$1,6 M_{sx}/V_w$ [mm]
L08	600	600
L07	600	600
L06	600	630,8472092
L05	600	634,3537202
L04	600	690,9803849
L03	600	781,3807264
L02	600	1322,615095
L01	600	1440,537421

Tömegcsökkenés az aktív elemeknél a teljes keretre nézve 17%.

#### **További elemek méretezése és optimalása**

Az aktív elemhez kapcsolódó gerendák (collector beam) és az oszlopok méretezése hasonlóan valósítható meg. Ezekkel a kutatás további részében foglalkozunk részletesen.

### **5. ÖSSZEFOGLALÁS**

Ez a kutatási projekt az Ipar 4.0 koncepciókat használja fel, hogy segítse az építőipart a technológiailag fejlettebb ágazat felé történő elmozdulásban. Az elsődleges cél jelenleg a körkörös tervezési koncepciót alkalmazó, újrafelhasználható szeizmikus vázak tervezésének módszertana. Amikor a szerkezeti elemeket súly- vagy költségoptimalják, a felhasznált acél mennyisége kisebb. Mivel a tömeg egyenesen arányos a globális környezeti hatással, a tömeg csökkentése kisebb környezeti hatást eredményez. A hegesztési módszer vagy az elektródák környezeti hatását a hegesztési méret is befolyásolja, amelyet közvetve a tömeg határoz meg. A projekt célja egy versenyképes szerkezet megépítése az újrafelhasználás és az optimalás kombinálásával. Az aktív nyírt elem optimalása azt mutatja, hogy az adott szerkezeti elem tömege 17%-al csökkenthető volt az optimalás eredménye által, úgy hogy mind a nyírási, mind a hajlítási feltételeknek megfeleljenek az egyes szinteken az UC szelvények és az aktív elem hosszára vonatkozó feltételek is teljesülnek.

### **6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS**

A kutatást az Endeavour Funding program támogatta az Új-Zélandi Nehézipari Kutatási Egyesület (HERA) által koordinált, Aotearoa Új-Zéland építőiparának Építőipar 4.0 átalakítása című projekt a hozzá kapcsolódó kutatási szolgáltatások elvégzésével.

### **7. IRODALOM**

- [1] Steel Construction New Zealand (SCNZ) (2007). Steel Connections Guide - Part 1 & 2- Steel Connect (SCNZ 14.1:2007; SCNZ 14.2:2007), Manukau City, New Zealand.
- [2] <https://kornyezetvedelem.weebly.com/blog/a-korkoros-gazdasag-6-uzleti-modellje-a-fenntarthatosagert> (2024.03.28)
- [3] Standards New Zealand (1997/2001/2007). Steel structures standard (NZS 3404: Part 1 and 2:1997), Approved by the Steel Structures Committee (P 3404) for the Standards Council. 690 p.
- [4] Standards New Zealand AS/NZS 1170.1:2002, Structural design actions, Part 1: Permanent, imposed and other actions,
- [5] Seismic Design of Eccentric Braced Frames (2013), HERA P4001: 2013, Manukau City, New Zealand. <https://www.hera.org.nz/product/hera-report-p4001/>
- [6] Lasdon L.S., Fox R.L., and Ratner M.W. Nonlinear optimization using the generalized reduced gradient method. Tech. Memo. No. 325, Department of Operations Research, Case Western Reserve University, 1973.
- [7] Farkas,J.,Jármai,K.: Design and optimization of metal structures, Horwood Publishers, Chichester, UK, 2008. 328 p. ISBN: 978-1-904275-29-9, <https://www.sciencedirect.com/book/9781904275299/design-and-optimization-of-metal-structures>
- [8] Farkas,J.,Jármai,K.: Optimum design of steel structures, Springer Verlag, Heidelberg, 2013. 288 p. ISBN 978-3-642-36867-7.

# FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓ CSŐVÁZÁNAK OPTIMALIZÁLÁSA

## OPTIMISATION OF THE PIPE CHASSIS FOR A FORMULA

*Kiss Márton Péter\*, Molnár Ildikó\*\**

### ABSTRACT

*The aim of this research is to design the pipe frame structure of a Formula Student race car. The design considers the aspects defined in the regulations and is adapted to the chassis geometry. The pipe frame structure is designed in a CAD design program (SolidWorks) considering the dynamic properties of the chassis geometry. The engine to be installed in the race car is a single-cylinder internal combustion engine, the positioning of which in the pipe frame and the definition of the appropriate connection points must be ensured. Based on experience from previous design processes, the optimisation of driving stability and torsional stiffness will be provided as a result of the study.*

### 1. BEVEZETÉS

Az Óbudai Egyetem O.U.R. TEAM csapatának sikeres részvétele a 2024-es Formula Student versenysorozatban a futómű geometria kiserkesztését követően az új autó vázszerkezetének a megtervezését igényli. Az első generációs jármű hibáiból és pontatlanságaiból tanulva a tervezés egy új koncepció kidolgozásával kezdődött. A korábbi esetben nehézséget okozott a pilótafülke ergonómiájának nem megfelelő kialakítása. Sok esetben szembesültünk helyhiánnyal. Problémát jelentett a gyártás szempontjából az elemek nem megfelelő illeszkedése, ami a nem megfelelő hajlításból adódott. A kevésbé megfelelő anyagminőség választása miatt pedig a csőváz átalakítása volt szükséges. Ezen hibák szem előtt tartásával kezdődött el az új, 2024-es év versenyautó vázának megtervezése. A karosszéria egy fő egységből és egy segédváz egységből épül fel. Néhány csapat esetében Formula1-ből ismert monocoque-hoz hasonló karbon kompozitból épül fel a vázszerkezet. Mi továbbra is a csőváz mellett maradtunk, mivel gyártás szempontjából a lehetőségek adottak és korábbi tapasztalatok hasznosíthatóak.

### 2. TERVEZÉS ÉS GYÁRTÁS

A csővázal szemben támasztott legfontosabb követelmény a pilóta védelmének biztosítása. A Formula Student szabályzat nagyon sok konstrukciós előírást határoz meg, amelyek alapján a váz fő elemei megtervezhetőek. Ilyen például a front zóna kialakítása, az orr részben lévő csövek elhelyezése, a pilóta fülkénél lévő elemek kialakítása. A váz fő elemeire vonatkozó anyagminőség szintén a szabályzat szerint meghatározott. Esetünkben a E220 CR2 S3 és E235 CR2 S2 szabványos csöveket használjuk. E kettő közötti különbség a falvastagságban és anyagminőségben adódik. Célul tűztük, hogy a korábbihoz képest egy könnyebb vázszerkezetet tervezzünk. Törekedtünk továbbá a könnyebb gyárthatóságra és nem utolsósorban a költségek minimalizálására.

A versenyszabályzat előír a csőre vonatkozóan egy minimum falvastagságot, amihez tartozik egy minimum keresztmetszeti tényező és egy minimum másodrendű nyomaték. Részben lehetőségünk van az anyag kiválasztásra, de az előírt követelményeknek mindenképpen meg kell felelni. Mindezek ismeretében az általunk választott szerkezeti acélcsövek S3 és S2 hőkezeléssel rendelkeznek, amelyek közül az S2 ideális a hajlított elemek pontos megmunkálásához.

#### 2.1. Tervezés lépései

Az első generációs csőváz teljesen más tervezési filozófiával készült el. Fő szempont volt a jármű homloklapfelületének minimalizálása. Több cső került felhasználásra, hogy a kis keresztmetszetű szerkezet megfelelő torziós merevséggel rendelkezzen és a versenyszabályzatnak megfeleljen (1. ábra).

Az akkori tervezés során nem volt végleges az erőforrás, így a motor beszereléséhez át kellett alakítani és ki kellett merevíteni. A végleges szerkezet 55 kg tömegű lett, ami messze nem ideális és az alkatrészek elhelyezése, szerelése is problémákat okozott.

\* hallgató, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

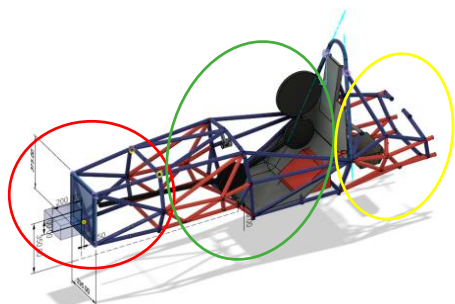
\*\* egyetemi docens, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar - MEI





1. ábra Az első generációs Formula Student autó

A jármű vázszerkezetét három fő egységre lehet osztani, az első az autó orra (piros kör), második a pilótafülke (zöld kör), harmadik a motortér (sárga kör) (2. ábra). A 2. ábrán a pirossal jelölt csőszakaszok azok, amelyekre a korábban említett fő versenyszabályok vonatkoznak.



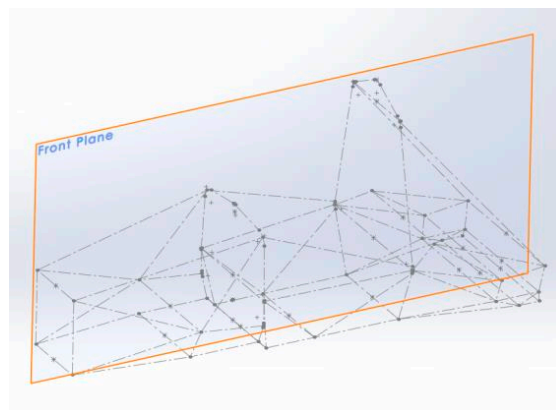
2. ábra Az első generációs térhálós csőszerkezet

A korábbi tapasztalatok azt mutatták, hogy a mostani futómű esetében a változás a felni méretéből és a kormánymű helyének változásából adódik. Korábban 10 colos felni terveztük a kormány és futómű geometriát, most viszont a könnyebb kormányzás érdekében, a 13 colos felni váltás miatt, egy másféle csapterpesztési szöget és kormánylegördülési sugárhosszt határoztunk meg. A csapterpesztés 8,9 fok, a kormánylegördülési sugárhosszt 41,29 mm- ről 19 mm- re változtattuk. Egy nyomórudas-himbás futómű tervezésére esett a választás, ahol a rugóstag a himba és az összekötő rúd egy síkban helyezkedik el a nem kívánt terhelések elkerülése miatt. Továbbá ez a koncepció lehetővé teszi számunkra, hogy Anti-Roll Bar-t helyezünk el az első és hátsó futóműnél egyaránt, amely a jármű karosszériájának dőlését hivatott csökkenteni. A lengőkarok szögeit növelve törekedtünk arra, hogy a váz bekötésnél a nagyobb távolságok miatt merevbb vázat tudjunk kialakítani. A legnagyobb terhelés a kerekeknél ébredő axiális irányú terhelés, amely 2G oldalgyorsulás esetén 16 kN. Ez a terhelés a futómű komponensein keresztül a váz csomópontjaiba irányul, ahol a csomópontoktól ágazó csövek csökkentik a

feszültséget. Maximális terhelés során a váz szerkezet maximum 0,1 mm-t mozdul ki. A hasmagasság és kerék mozgás útjának kiszámolásánál már konkrét rugóállandóval, himba áttétellel dolgoztunk.

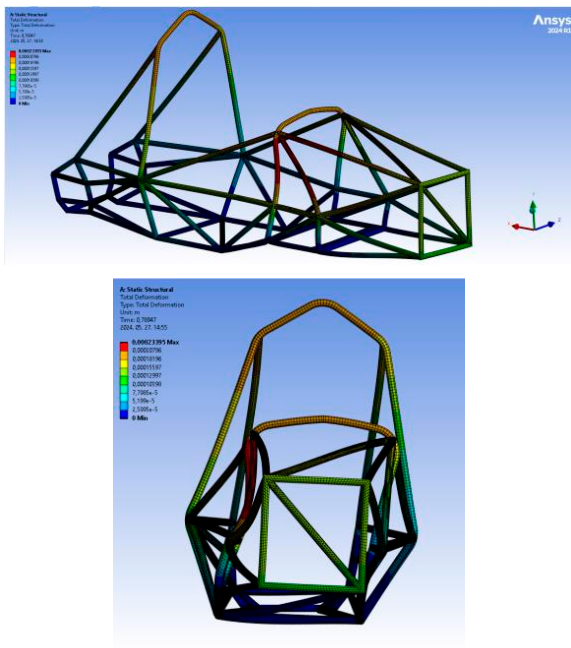
A tervezést SolidWorks CAD tervező programban végeztük. A 2D alaprajz elkészítésével, a fő csomópontok meghatározásával és a térbeli kihúzás ismeretében megkaptuk a csőváz geometriájának alapját (3. ábra).

Ma már egyre inkább a dinamikus geometriai modellezés kerül előtérbe, mivel a végső alak eléréséhez többszöri módosításokra van szükség. A CAD programok támogatják és könnyen igazodnak a változtatásokhoz. Ennek egyik lehetősége a parametrikus modellezés, amely lehetővé teszi a dimenziók módosítását. A tervezés során geometriai méretek mellett kényszereket is használunk.



3. ábra Térhálós csőváz (Skeleton modell)

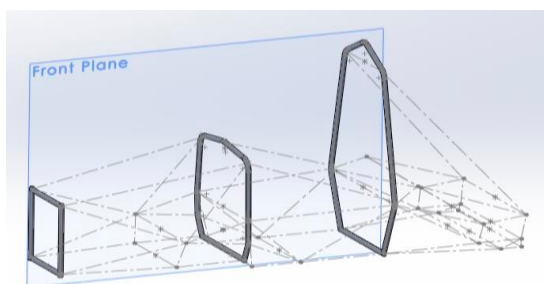
Az elkészült vázszerkezet modelljét ANSYS szimulációs program Mechanical moduljának használatával megvizsgáltuk. Kíváncsiak voltunk a váz torziós merevségére és a benne ébredő feszültségeloszlásra. A torziós merevség mérőszáma a vázszerkezet merevségének, amely hozzájárul a biztonsághoz, az úttartáshoz és a zajkomforthoz. A szimulációk lefuttatását megelőzően kényszereztük a geometriát. A 4. ábrán eredményként kanyarodásra vonatkozó feszültségeloszlás látható. A kapott eredményekből következtetésként megállapítható, hogy a vázszerkezet megfelelő és 4237 N/mm a torziós merevsége.



4. ábra Feszültségeloszlás a vázszerkezeten

## 2.2 Gyártás lépései

A geometriai határok figyelembevételével és betartásával a térbeli pontok helyzetét meghatároztuk, majd háromszögelési szabálynak megfelelően összekötöttük és az áthatások tervezésével folytattuk. A hajlított csőelemek a szabályok betartása miatt (a Front Hoop és a Main Hoop) 25x2,5 mm csőből készültek és 90 mm rádiuszú hajlító szerszámmal kerültek megmunkálásra (5. ábra). A szerszámválasztás a szabályok betartása érdekében, a csőváz merevségének növelése miatt és a hajlítás pontossága miatt került kiválasztásra. Az EU szabványnak megfelelő anyag típus esetében a szénttartalom mennyisége egy szűk tűréstartományon belül van, ezért a hajlító gép beállítása pontosabban megadható, kevesebb tesztalkatrész gyártására van szükség.

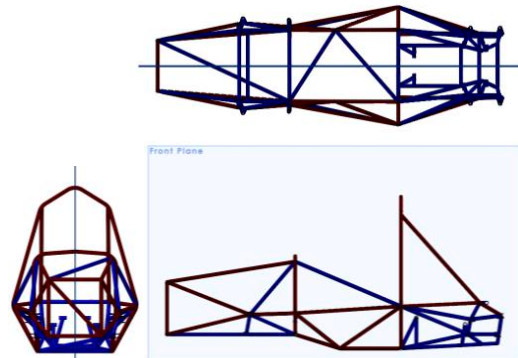


5. ábra A csőváz fő komponensei

A megtervezett csőváz szerkezet megépítéséhez 60 fm cső kerül felhasználásra a korábbi 75 fm-hez képest. A váz készítése során különböző falvastagságú csöveket használtunk fel (25x1,5; 25x2; 25x2,5). Az új váz tömegét hozzávetőlegesen 12 kg-mal sikerült csökkenteni. A vázszerkezet

méretváltozásának köszönhetően a torziós merevség viszont nő, mivel a csövek nagyobb keresztmetszetben helyezkednek el. Elmondható, hogy a futóműből ébredő axiális terhelések viszont kisebb kizozdulást eredményeznek az adott csőszakaszon.

Az új váz hossza 2430 mm, a korábbi vázszerkezeté 2300 mm, amely növekedés a nagyobb motortér és pilótfülke miatt volt szükséges. Az első generációs csővázhoz képest 22%-os tömegcsökkentést értünk el, amely előnyhöz juttatja csapatunkat a versenyszámok teljesítésében.



6. ábra A megtervezett csőváz

Az új járműbe a győri egyetem SZEngine motorja kerül beépítésre, ami egy turbó feltöltős motor, ezért a motorteret ehhez alakítottuk ki. A motortér kialakítása egészen más, mint a korábbi esetben. Ehhez szükséges volt a súlypont megfelelő meghatározása és a perifériák megfelelő elhelyezése (6. ábra). A turbófeltöltő nyomóágának kialakítása a motor hengerfeje mellett közvetlenül helyezkedik el, ahol kihívást jelentett a lefújószelep és intercooler elhelyezése.

A tervek szerint a motor a keréken 100 lóerő leadására lesz képes és 40 kg tömegű. Így a vázat érintő változások a következők:

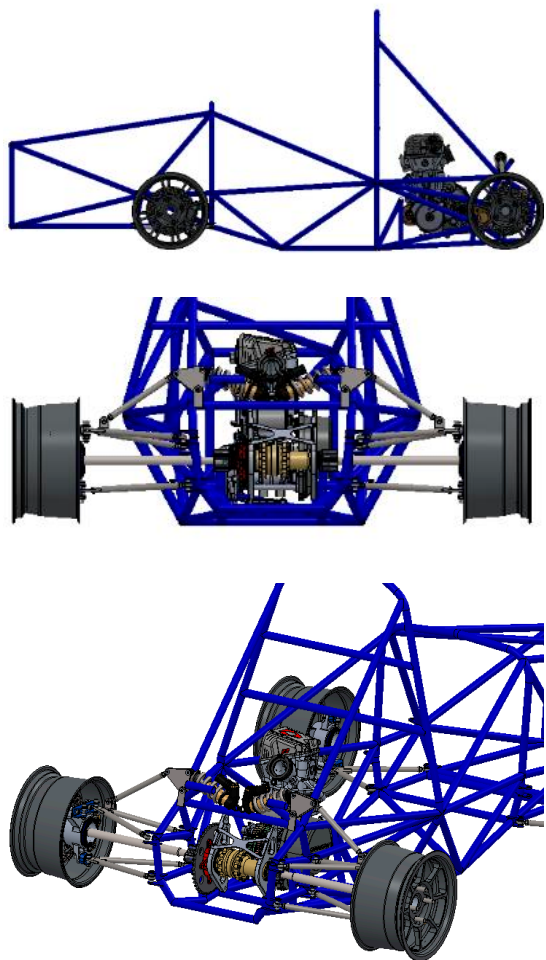
- Sokkal kisebb helyen is elfér, így kisebb motorteret kell kialakítani.
- A motort el kell látni (a vázon belül vagy külön a motoron) egy „védő kerettel”, ami a futómű terheléseitől védi az egységet.
- A motor bekötéseinél poliuretán szilentek elhelyezése szükséges, mivel az egyhengeres konstrukció nagy mértékben vibrál.
- A turbó és külső olajhűtő helyeit a SZEngine tervezőivel egyeztetve kell elhelyezni, hogy a vázban elférjenek és könnyen szerelhetőek legyenek. Továbbá a komponensek melegezését is szeretnénk csökkenteni a megfelelő elhelyezéssel. (7. ábra)

### 3. ÖSSZEFOGLALÁS

A második generációs csőváz tervezésénél célul tűztük ki a megfelelő hely biztosítását a jármű fő komponenseinek és a vázszerkezet tömegének csökkentését. Az új vázszerkezettel 22%-os tömegcsökkenést értünk el a korábbihoz képest és beépítésre került a SZEngine motorja. Az új erőforrás elhelyezése befolyásolja a motortér kialakítását. Ezt a következő években tovább fogjuk optimalizálni tömegcsökkentés szempontjából. Lehetőség van más anyagok, mint 25CrMo4 vagy E370 CR2 S2 használatára, amellyel a tömeg további csökkentése érhető el és növelni tudjuk a váz merevségét. További tervek között szerepel a vázszerkezetben ébredő feszültségek és elmozdulások végelemmel történő további vizsgálata és topológiai optimalizáció elkészítése.

### 4. IRODALOM

- [1] Ethan Daniel Rosenow: FSAE-EV Chassis Desing and Optimization, University of Alabama in Hunstville, 2022
- [2] Kádár L., Varga F., Kőfalusi P.,: Közúti járműrendszerek szerkezetana, BME, 2014
- [3] SAE International, 2011 Formula SAE Rules USA 2011
- [4] Anthony O'neil, Chassis design for SAE racer, University of Southern Queensland, 2005
- [5] Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.H.: Engineering Design – A Systematic Approach, London: Springer-Verlag, ISBN 978-1-84628-318-5



7. ábra Motor elhelyezés

A csőváz elemeit 90 mm rádiuszban CNC csőhajlítóval hajlítottuk a kívánt geometriára. Kettő prototípus legyártását követően a harmadik meghajlított csőelem került beszerelésre. A többi rácsos szerkezet két bázis meghatározásával került megépítésre. A bázisnak köszönhetően biztosítható a pontos összehegesztés. A gyártás során 141 volframelektrodás, semleges védőgázos ívhegesztési technológiát alkalmaztunk, amely salakmentes magas minőségű hegesztést biztosít. Az elkészült csőváz szerkezet a 8. ábrán látható.



8. ábra Legyártott csőváz

# ELEKTROMOS TRANZIENSEK IPARI LÉTESÍTMÉNYEKBE

## ELECTRICAL TRANSIENTS IN INDUSTRIAL FACILITIES

*Kovács Attila<sup>\*</sup>, Somogyiné Molnár Judit<sup>\*\*</sup>, Jármái Károly<sup>\*\*\*</sup>*

### ABSTRACT

*One of the greatest challenges of the 21st century is to protect our control, regulation and data storage units used in automated, robotic manufacturing from the consequences of electrical power disturbances. However, for prevention, it is essential to accurately identify the causes of these often-stochastic failures. It is often difficult to detect the fault phenomenon itself since it frequently can't be explained by the classical approach. Most often, the cause of momentary, short-term outages is identified as a voltage failure in the internal electrical network of the power utility or industrial installation, which can be a wrong conclusion. One of the possible causes of intangible voltage sags may be the presence of harmful electrical grid harmonics. Potential sources of harmonic disturbances are electronic power controls, LED light sources, various speed controls for electric motors, and charging equipment for the increasingly popular electric vehicles. Problems caused by harmonics are generally: distortion of power supply waveforms, resonance risks in systems at high frequencies, failure of sensitive electronics, PLC and CNC devices, malfunctions in protection and control systems, overheating in electric motors and transformers.*

### 1. BEVEZETÉS

A korszerű és hagyományos ipari termelő egységek belső villamos hálózatai tekintetében a megszakításmentes ellátás biztosításán kívül a villamosenergia minősége is kiemelt jelentőségű a gépek, berendezések folyamatos üzemképességéhez egyaránt. Azokban a gyárakban, ahol a legújabb gyártósorokat üzemeltetik, ott elsősorban elektronikus hajtás szabályozásokat, LED csarnok világításokat, programozható logikai vezérlőket (Programmable Logic Controller - PLC) és mikrokontrolleres vezérlőket, robot és kobot cellákat, számítástechnikai eszközöket alkalmaznak. Ezért az esetlegesen még használatban lévő hagyományos villamos gépek, melyeknek a meddőenergia felvételük tisztán induktív, a csekély

számú alkalmazásuk miatt már nem képesek kompenzálni a kapacitív meddő fogyasztást, így kapacitív jellegű lesz a létesítmény fogyasztása. Kapacitív meddőenergia fogyasztók közé tartoznak a kondenzátor telepek is. A megnövekedett kapacitív meddőnek van egy másik veszélye, megnöveli a transzformátorok szekunder, így a belső hálózat feszültségét is. Ezek a túlfeszültségek pedig veszélyt jelentenek, emellett a teljesítményelektronikai alapú eszközök nem lineáris jellegű fogyasztói terhelésként való megnövekedett használata miatt a belső villamos hálózatokban a kapacitív (fordított) meddőteljesítmény-áramlás és a harmonikus áramok injektációjának problémájával is szembesülünk. Közismert, hogy a felsorolt, úgynevezett nem lineáris működésű elektronikus berendezéseknek szinuszhullám módosító hatása van, az áramfelvételük nem szinuszos. Az eltorzult jelalakok hibákat eredményezhetnek, felharmonikusok jelennek meg, például a tápfeszültség hullámalak torzulása és magas frekvenciákon rezonancia kialakulása a rendszerekben. Továbbá az érzékeny elektronikai eszközök, PLC és CNC (Computer Numerical Control) vezérlések is tönkre mehetnek, informatikai eszközök esetében pedig adatvesztések, a védelmi és vezérlőrendszerek hibás megszólalása, a villanymotorok túlmelegedése, energia fogyasztásuk megnövekedése. A transzformátorokban normál körülmények között tiszta szinuszhullám van, mind áram, mind feszültség tekintetében, melyek a harmonikusokat tartalmazó rendszerekben torzulást szenvednek [1]. A hálózatanalízis egyértelműen megmutatja a villamos hálózatokban előforduló felharmonikus tartalmat, mind feszültség, mind áram esetében. A harmonikusok megjelenésével az induktív meddő kompenzálását végző kondenzátor telepeknek új veszélyforrásai jelentek meg, a kondenzátorok árammal való túlterhelése, valamint a kapacitások és a (villamos) környezetükben lévő induktivitások párhuzamos rezonanciája [2]. A fentiek miatt a gépek és berendezések védelme érdekében szükségessé vált az energia ellátásukat biztosító villamos hálózat harmonikus tartalmának, illetve az adott berendezések áram felharmonikus kibocsájtásának analízise [3]. A CE

<sup>\*</sup> PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

<sup>\*\*</sup> PhD Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

<sup>\*\*\*</sup> DSc Egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

minősítés megszerzéséhez szükséges a felharmonikus kibocsátás mérése. A cikkben bemutatott mérési eredmények hozzájárulnak a káros harmonikusok kiszűrése érdekében a szükséges intézkedések meghozatalához.

## 2. VILLAMOS ENERGIA ANALÍZISE

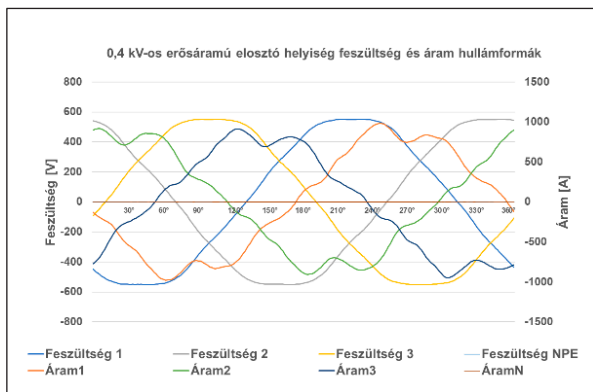
Az analízis képes kimutatni a villamosenergia-ellátás minőségét, zavarait (teljes harmonikus torzítás, feszültségletörések, flicker, aszimmetriák stb.), a villamos gép és a kapcsolt elektromechanikai részek tranzienst jellegű terheléseit, harmonikus injektálását és bármilyen típusú, kivételű, teljesítményű és üzemmódú gép, berendezés és eszköz esetén könnyen elvégezhető. Az elvégzendő hálózatanalízis nem zavarja a termelési folyamatokat, amely fontos egy ipari termelőegység esetében. A villamos elosztó helyiségekben, vagy a gépen lévő villamos vezérlő szekrényekben, illetve a berendezés villamos betáplálási pontján egyszerűen elvégezhető, nincs szükség fizikai hozzáférésre sem a villamos géphez, sem a kapcsolt géprendszerhez. Fontos, hogy az áramváltók és feszültségmérő csipeszek felhelyezésénél be kell tartani a munkabiztonsági előírásokat. Adott villamos elosztó helyiség analízise esetén ugyan nem tudjuk mely csatlakoztatott gép termelheti a harmonikus zavarokat, de lehetőségünk van az elosztó helyiség közül kiválasztani a leginkább szennyezett és azon belül mérni a berendezéseket. Ebben a konkrét esetben több gyártócsarnok van és csarnokonként több villamos elosztó helyiség is található. A mérést HT PQA824 típusú hálózat analízátorral végeztük el [4]. Az analízátor főbb jellemzői: regisztrálás MIN/MAX/AVG, feszültség anomáliák észlelése, felharmonikus analízis, patch elemzés, villogás analízis, nagysebességű feszültség tranziensek rögzítése 5,5  $\mu$ s-tól, bekapcsolási áramok rögzítése. A műszer paraméterezése a magyarországi forgalmazó által készített használati útmutató [5] alapján, míg a rögzített adatok kiolvasása a HT Italia Topview 2.2.2.3 verziójú szoftverével történt [6]. A mérés mintavételezéssel történt, mintát vettünk a berendezések adott pillanatban mérhető feszültség és áram értékeiből, ezek az értékek MDB (Microsoft Access Database) fájlként kerülnek lementésre. Az analízátor mérésadatgyűjtő szoftverének grafikus megjelenítése ezeket az adatokat dolgozza fel. Sajnos igen gyenge felbontású és minőségűek a grafikonok, ezért csak tájékoztató jelleggel használhatóak fel a mérési eredmények, mert az adatok pontos elemzése lehetetlen ezzel a módszerrel. A mérési eredmények jobb átláthatósága érdekében a mért értékeket tartalmazó MDB fájlokat Microsoft Access adatbázis kezelő segítségével Excel táblázatba ki lehetett exportálni. A feszültség és áram hullámformák egyszerű grafikus megjelenítéssel lettek ábrázolva. Viszont az áram-

hullámformák esetén a harmonikus áram-amplitúdó összetevők, vagyis a jelek spektrumának meghatározása már FFT transzformációval valósult meg. Így az értékek tetszőszerinti harmonikus rendig megjeleníthetők. A transzformáció segítségével előállított alapharmonikusra vonatkoztatott értékek a táblázatból nyolc tizedesjegy-pontossáig olvashatóak le. Az exportált adatokból ki lett számolva a fázisonkénti maximum és négyzetes középérték (Root Mean Square - RMS) áram értéke, illetve az adott fázis áramára vonatkoztatott teljes harmonikus torzítás (Total Harmonic Distortion - THD). A mérés során más-más időpillanatban több mintavételezés is történt, a mérések pontosan katalogizálásra kerültek a hely, a mérés pontos időpontja és a mérési körülmények megadásával. Elmondható, hogy szinte sosem kaptuk ugyanazt az eredményt, ami azzal magyarázható, hogy egy villamos hálózaton a hálózatra kapcsolt fogyasztók hatással vannak egymásra, villamos jelformáló hatásuk van, ezért a lezáró impedanciák értéke folyamatosan változik. Sajnos ez reprodukálhatóság szempontjából hátrányos, hiszen olyan sok változó szerepel a rendszerben, hogy azokat lehetetlen többször ugyanúgy beállítani. Ráadásul a fogyasztók villamos paraméterei a mechanikai állapottól is függenek, amely az elhasználódás mértékétől függően megváltozik. A mérések során szétválasztottuk a terhelési állapotokat, azaz a berendezések terhelés nélküli és terheléses állapotai szerint csoportosítottuk a méréseket.

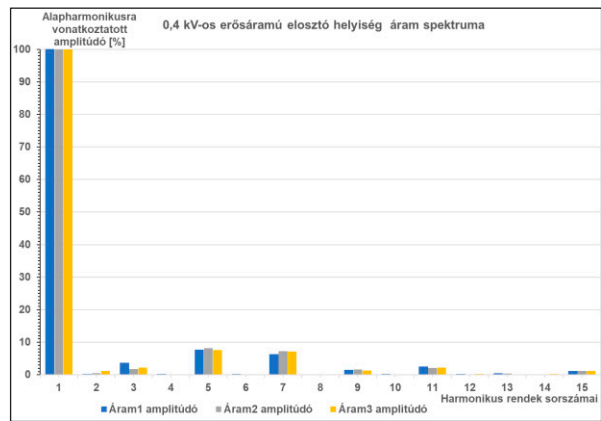
### 2.1. A belső villamos elosztóhálózat vizsgálata

A belső villamos hálózatanalízisére a szabványban rögzített értéket meghaladó harmonikus torzítást okozó termelő berendezések és világító testek kiszűrése miatt van szükség. A belső hálózatot több csatlakozási ponton is meg kell mérni, hogy beazonosíthassuk azokat a gépcsoportokat, melyek szennyezhetik a hálózatunkat. Ezeket a méréseket a fő- és alosztó-hálózat terheléses állapotában is el kell végezni, mert így kaphatunk pontos képet az adott berendezés csoportoknak a villamos energia minőségére gyakorolt konkrét hatásáról. A mérési eredmények összehasonlítása érdekében a méréseket egy modern és egy hagyományos gyárban is elvégeztük. Elsőként egy hagyományos gyár erősáramú villamos elosztó helyiségét vizsgáltuk, törekedtünk a méréseket egy maximális terhelés közeli állapotban elvégezni. A mérési eredményeket az 1. ábrán láthatjuk. Megállapíthatjuk, hogy az áram és feszültség szinuszhullámainak torzulása nem tekinthető jelentősnek, de az áram jelalakja jelzi a harmonikusoknak a jelenlétét. Ha megvizsgáljuk a 2. ábrán lévő áramok spektrumát, akkor észrevehető, hogy az ötödik és hetedik felharmonikusok értéke közel 10%, ami jelentősnek mondható. A teljes harmonikus torzítás (Total Harmonics Distortion - THD) érték közel 13,78 %,

ami magas az IEEE 519-2022 [7] szabvány szerinti javasolt 5%-hoz képest. Az MSZ EN 61000-3-12, vagy IEC 61000-3-12 szabványt itt nem használhatjuk, mert azt egy termék laboratóriumi körülmények közötti vizsgálatára kell alkalmazni, míg az IEEE 519 szabvány a berendezések telepítésekor ajánl maximális megengedett feszültség és áramtorzítási értékeket. A méréseket azon a közös csatlósi ponton (Point of Common Coupling – PCC) kell elvégezni, amire a berendezést csatlakoztattuk. Az IEEE 519-2022 szabvány az áram teljes harmonikus torzításának megengedett maximális értékét a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás (Total Current Demand Distortion - TDD) értékével adja meg, amely a közös villamos hálózati csatlakozási pont (Point of Common Coupling – PCC) zárlati áramának ( $I_{sc}$ ) és az adott eszköz terhelő áramának ( $I_L$ ) arányától függ. Ez az arány most  $2200 \text{ A}/571 \text{ A}=3,85$ , ami  $<20$ , ezért a megengedett torzítás csupán 5%. A páratlan harmonikusok szabvány által megengedett torzítása a 11. rendig, frekvencia értékénként 4%, de esetünkben az 5. és 7. felharmonikusnál 7,63% illetve 6,29% adódott. Ahogy korábban már említettük, ez a torzítás komoly meghibásodásokat okozhat a berendezések elektronikai egységeiben. A mérések alapján az is megállapításra került, hogy a közös elosztó pontra csatlakoztatott villamos fogyasztók között jelentős áram-hullámforma torzítást okozó gépek berendezések lehetnek, melyeket azok célzott analízisével lehet kiszűrni. A következőkben terjedelmi okokból, ezeknek a célzott vizsgálatoknak csak egy szignifikáns része kerül bemutatásra.



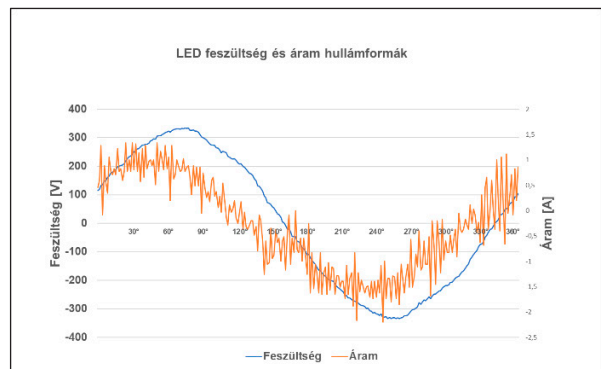
1. ábra Elosztó helyiség torzított feszültség és áramhullámformái saját mérés alapján



2. ábra Elosztó helyiség áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján

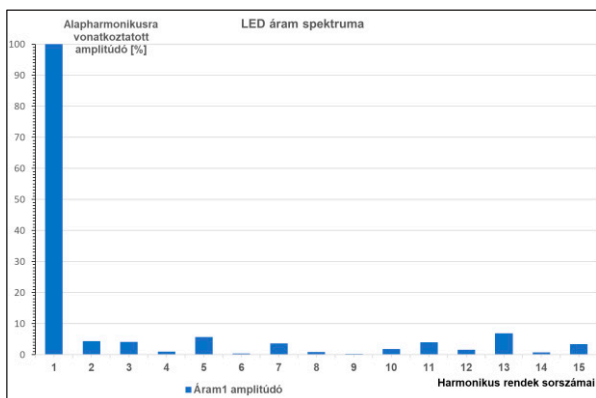
## 2.2. Csarnokvilágítás vizsgálata

Manapság szinte minden ipari létesítményben, csarnokokban és irodákban egyaránt, de már a munkatér megvilágítások esetén is LED-es megvilágítást alkalmazunk. Prognosztizálható, hogy ezek a villamos fogyasztók is komoly hatással lehetnek a villamos hálózatunk villamos energia minőségére [8] [9]. Hogy milyen mértékben, azt ebben az esetben is hálózatanalízissel vizsgáltuk meg, egyetlen LED lámpatest és egy teljes csarnok világítás betáplálási ponton való mérésével. Elsőként 1 darab 230 V 140 W villamos teljesítményű LED lámpatestet vizsgáltunk meg. A 3. ábra alapján elmondható, hogy a feszültség jelalakja szinte tiszta szinuszos, de az áram torzulása jelentős mértékű.



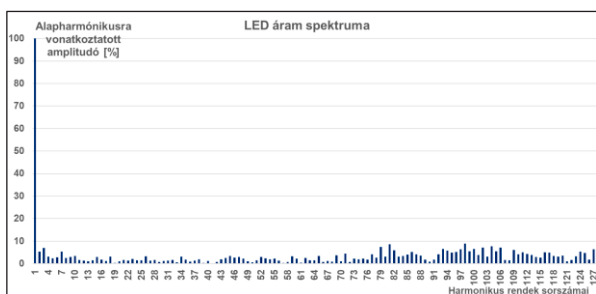
3. ábra LED lámpatest torzított feszültség és áramhullámformái saját mérés alapján

A 4. ábra mutatja az áram spektrumát. A teljes harmonikus torzítás (Total Harmonics Distortion - THD) érték 16,14 % a megengedett 5 % helyett. Az 5. és 13. felharmonikusok értéke a szabványban megengedett 4% helyett 5,61 % és 6,79 %.



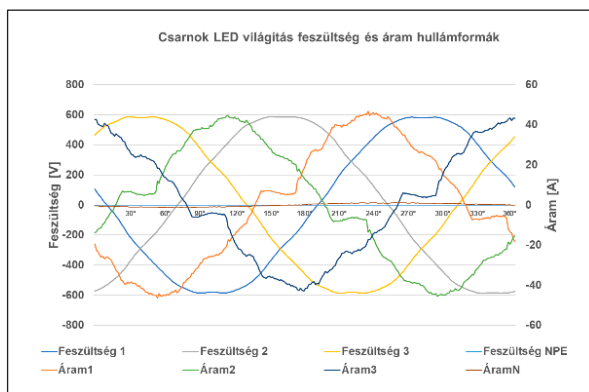
4. ábra LED lámpatest áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján

Mivel az áram jelalakja ebben az esetben is jelzi, hogy magasabb frekvenciákon is vannak kibocsátások, ezért megvizsgáltuk a szuprharmonikus tartományban (2 kHz - 150 kHz) is az áram spektrumát, mely az 5. ábrán látható. A 79. rendtől (3,95 kHz) a 127. (6,35 kHz) megközelíti, sőt sok esetben meg is haladja a 7 %-os alapharmonikusra vonatkoztatott amplitúdónak a nagyságát. Ez a 7 % a 3 - 15 rendek amplitúdóitól is magasabb, ez azért lényeges mert a gyakorlatban 15. felharmonikus rend felett már nem vizsgálják a berendezések harmonikus szennyezését. A mérési eredményekből a grafikonok alapján valószínűsíthetjük, hogy vagy nincs benne, vagy nem hatékony a harmonikus szűrő. A mérést egy és két LED lámpatest esetén is elvégeztük, a jelalakokban különbségek nem voltak.

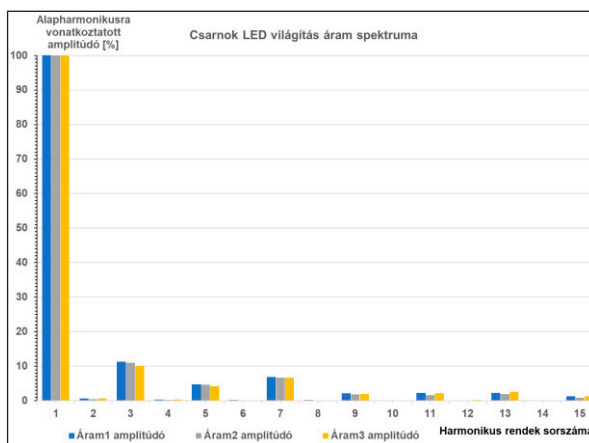


5. ábra LED lámpatest áram-hullámformájának szuprharmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján.

Teljes gyártóterület megvilágítása esetén a 6. ábrán egy olyan csarnok mérési eredményét láthatjuk, ahol 400 darab 140 Wattos villamos teljesítményű lámpatest lett felszerelve, összesen 56 kW maximális hatásos villamosteljesítmény felvétellel. Az ábra alapján elmondható, hogy a feszültség jelalak szinte tiszta szinuszos és az áram torzulása sem jelentős viszont, ha megvizsgáljuk a 7. ábrán látható áram spektrumot, a 3. és 7. felharmonikusok értéke a 11. harmonikusig a szabványban megengedett 4% helyett 11,24% és 6,86%.



6. ábra Csarnok LED világítás torzított feszültség és áramhullámformái saját mérés alapján



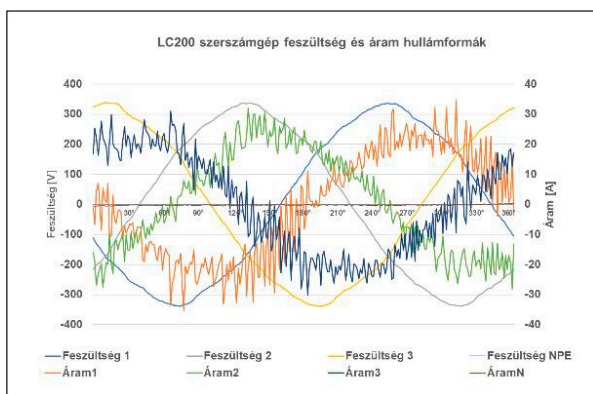
7. ábra Csarnok LED világítás áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján

Ha összehasonlítjuk az egyedi és a csoportos LED csarnokvilágításokat, akkor láthatjuk a szembeötlő különbségeket, 400 darab LED lámpatest esetén nem jelentkeznek azok a harmonikus torzítások, amik egy darab esetén. Erre az lehet a magyarázat, hogy az 1,6 MVA teljesítményű,  $I_{sc}$  2300 A zárlati áramú közös csatlósi ponton (PCC) mértünk és mivel még nem voltak berendezések telepítve abba a gyártó csarnokba, így erre a pontra az 56 kW, 80 A LED világítás villamos terhelésnek csekély szinuszhullám torzító hatása volt. Többek között ezért is rendelkezik úgy az IEEE 519-2022 szabvány ajánlás, hogy az áram teljes harmonikus torzításának megengedett maximális értékét a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás (TDD) értékével adja meg, amely a közös villamos hálózati csatlakozási pont (PCC) zárlati áramának ( $I_{sc}$ ) és az adott eszköz terhelő áramának ( $I_L$ ) arányától függ, ebben az esetben ez az arány csupán 3,47 % volt.

### 2.3. Szerszámgépek vizsgálata

Ugyan a szerszámgépek operációs, vezérlő és szabályozó rendszereinek a reakció és programfutási

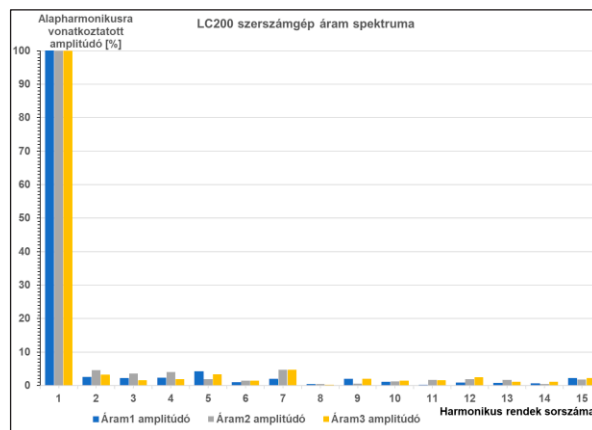
ideje lecsökkent és megnövekedett a számítási kapacitásuk, de a fizika törvényeit, melyek a mechanikai komponensekre is vonatkoznak nem lehet felülmúlni. Így a mechanikai válaszidők ugyanazon konstrukciók esetében változatlanok. Például egy biztonsági, rugóerő tárolós tokmány visszahúzó, áramszünet esetén ugyanolyan tehetetlen bármilyen gyors is a processzor, a tokmány széttobban mert a munkadarab áramszünet után még nem áll le azonnal és a tokmány által megfogott kés a munkadarabban marad. Minél modernebb a számítástechnikai komponens a szerszámgépben, annál érzékenyebb lesz a legkisebb feszültség csökkenésekre is és egyszerűen lefagy, vagy a programfutása megszakításba megy át egy művelet végrehajtása közben, ami a gyakorlatban legtöbb esetben szerszámtöréssel jár, a fejezet elején említett okok miatt. Ezért nagyon fontos a mechanikai tervezés során az ilyen típusú lehetséges problémákat is figyelembe venni, illetve törekednünk kell a villamos hálózati zavarok feltérképezésén kívül az adott berendezések által létrehozott hálózati zavarok pontos beazonosítására és megszüntetésére. Megfelelő szűrők alkalmazásával megszüntethetőek a felharmonikusok. Ebben a fejezetben egy ilyen analízist mutatunk be. A vizsgálat során egy Liebherr LC200 szerszámgép [10] villamos hálózat csatlakozási pontja lett analizálva harmonikus hálózati injektálás szempontjából. A 8. ábrán láthatjuk, hogy a feszültség szinuszhullám torzulások nem tekinthetőek jelentősnek, de az áramok jelformái szinte a felismerhetetlenségig megváltoztak, az áram jelalakja azt jelzi, hogy magasabb frekvenciákon is vannak zavarkibocsátások. Ezek a torzítások a közös betáplálási ponton összeadódnak a többi gép áram-szinuszhullámaival és a harmonikus torzítás szempontjából még megfelelő villamos elosztó hálózat áramszinuszeit is eltorzíthatják. Az is megfigyelhető a 8. ábrán, hogy az áramszinusznak többszörös nullátmenetei vannak, ezek nullpont vezérelt kapcsolóüzemű tápegységek használata esetén az elektronikus egységek üzembiztonsága tekintetében kritikusnak tekinthetőek.



8. ábra Szerszámgép torzított feszültség és áramhullámformái saját mérés alapján

A 9. ábrán lévő áramok spektrumán megfigyelhető, hogy kissé kiemelkedik az ötödik 250 Hz felharmonikus. Az

ötödik felharmonikusok értéke a legmagasabb, 4,2 %, ami a szabványban előírt 4% maximálisan megengedett THD érték közelében van.



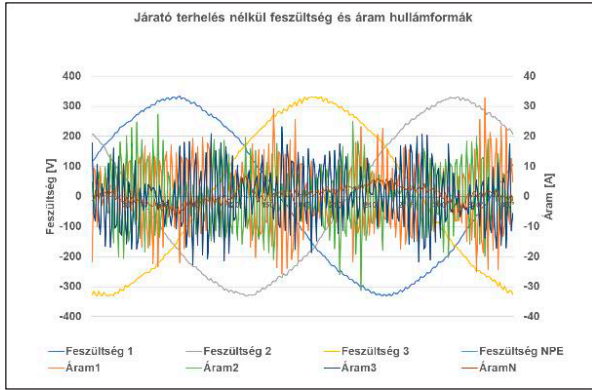
9. ábra Szerszámgép áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján

## 2.4. Inverteres hajtások vizsgálata

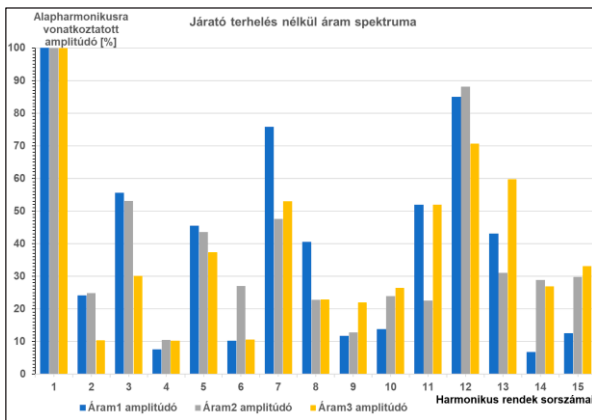
A következőkben egy modern gyárban történt mérések eredményei kerülnek bemutatásra. Előzetesen elmondható, hogy szinte alig van különbség a régi és az új üzemek mérési eredményei között, hiszen az energiatakarékosság és az energetikai törvényi előírások miatt a termelő cégek szinte már mindenhol ugyanazt a technológiát kötelesek alkalmazni. Sőt a modern automatizált gyárakban inkább rosszabb a helyzet, ugyanis ott már nem találhatóak tisztán induktív fogyasztók, melyeknek a modern gyárakra jellemző kapacitív jellegű meddő fogyasztások kompenzálásában volna szerepük. Egy nagy teljesítményű frekvenciaváltóval ellátott tesztpadot vizsgáltunk meg. A hajtás vezérlés aktív harmonikus szűrővel van ellátva, mely teljes terhelés alatt a szabványban meghatározott határon belül tartja a THD-t. Ezért nem is ez az állapot került elemzésre, hanem a használata közben inkább jellemzőbb kis terheléses, vagy üresjáratú állapot. A 10. ábrán egy terhelés nélküli állapot feszültség és áram hullámformái láthatóak. A feszültség szinuszt itt is szinte torzítás mentes, de az áram szinuszt nem lehet felismerni. Így az áram THD(I) értékének 139,21% értéke sem meglepő. Ahogyan már korábban is írtuk, a szabvány az áram teljes harmonikus torzításának a javasolt megengedett maximális értékét a teljes áramigény szerinti harmonikus torzítás (TDD) értékével adja meg, amely a közös villamos hálózati csatlakozási pont zárlati áramának és az adott eszköz terhelő áramának az arányától függ. Ez az arány most  $630 \text{ A}/11,7 \text{ A}=53,84$ , ami  $50 < 100$ , ezért a megengedett torzítás csupán 12% lehetne. Ha megnézzük a 11. ábrán látható áram spektrumot, akkor láthatjuk, hogy nincs olyan harmonikus rend, melynek alapharmonikusra vonatkoztatott értéke nem haladja meg a szabványban rögzített 11. harmonikusig maximálisan lehetséges 4%



értéket, az áram-amplitúdó értékek 10% és 85% között változnak. A fentiek alapján kijelenthetjük, hogy a beépített gyári Siemens aktív szűrő kis, vagy terheletlen állapotban nem hatásos és komoly jeleket torzításokat okoz a hálózaton. A szűrés hatékonyságát célszerű minél előbb megnövelni, ugyanis komoly problémákat okozhat a különféle adatrögzítő és vezérlő egységekben.



10. ábra Járatópad torzított feszültség és áramhullámformái saját mérés alapján

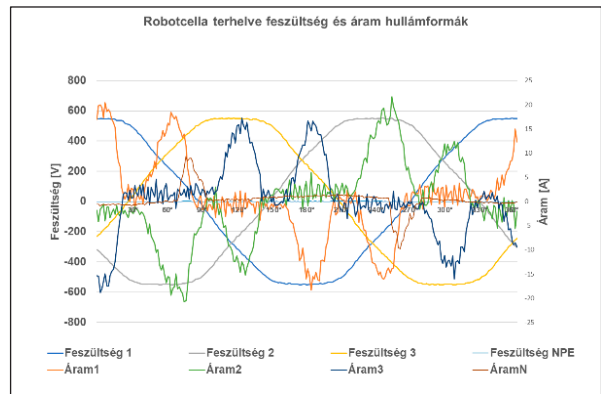


11. ábra Járatópad áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján

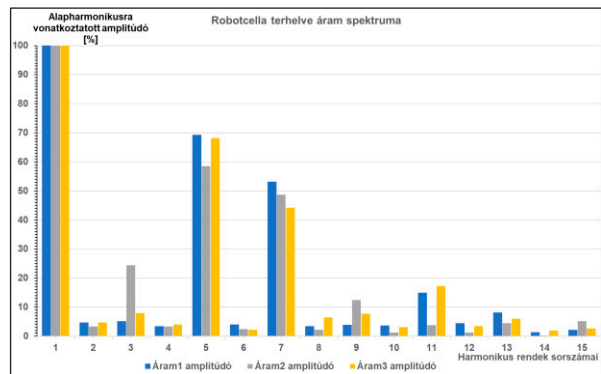
## 2.4. Robotok vizsgálata

Napjainkban szinte nincs olyan ipari létesítmény, ahol ne használnának a különféle technológiákhoz robotokat, robot cellákat és kobotokat. Ezek igen jelentős villamos energia fogyasztóknak számítanak különösen, ha figyelembe vesszük a hozzájuk közvetlenül csatlakoztatott automatizált berendezéseket is, mint például a robot cella, vagy egy megmunkáló központ. Mivel elmondható, hogy ezek a berendezések igen magas szinten automatizáltak, ezért a vezérlő és szabályozó elektronikáik is fokozottan érzékenyek lehetnek a villamos hálózati zavarokra, esetleges feszültség letörésekre. Ebben a fejezetben egy ilyen ipari robot vizsgálata kerül bemutatásra. A mérés elvégzése során törekedtünk arra, hogy a lehető legjobban kiterhelt állapotban végezzük az analízist, hiszen minél több robot

tengely működik egy időben, annál nagyobb az azokat működtető hajtáskártyák egyidejű villamos teljesítmény felvétele. Így ekkor lesz a legnagyobb az esélye annak is, hogy a legnagyobb villamos jeleket módosítást és egyúttal a hálózat felé a harmonikusok injektálását, valamint a hálózati szinuszos jeleket legnagyobb megváltozását mérhetjük. A mért feszültség és áramhullámformákat a 12. ábra szemlélteti. Itt is elmondható, hogy a feszültség szinuszos csekély, de az áram szinuszos már jelentős mértékben torzult, illetve az áram szinuszhullámjainak alakjából jól látszik a nem lineáris áramfelvétel a hálózatról, hiszen egy periódus időn belül egy helyett négyszer változik az áram iránya. Ha megnézzük a jelentős számú nullátmeneteket egy periódusidőn belül, akkor egyértelmű, hogy ezt figyelembe kell venni nem csak a robot, hanem a robot cella berendezéseinek is a kapcsolóüzemű tápegységek tervezésekor. A 13. ábra az áram spektrumát szemlélteti, itt is jellemzően az 5. és a 7. harmonikusok amplitúdója a legnagyobb, de még a 11. és a 13. is jelentős. A THD(I) 90%, ami az IEEE 519-2022 szabvány által javasolt megengedett teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás (TDD) 8%-os értékének több, mint tizenegyszerese. Egyértelmű, hogy a felharmonikusok szűrését ebben az esetben is meg kell oldani.



12. ábra Robotcella torzított feszültség és áramhullámformái saját mérés alapján



13. ábra Robotcella áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján

### 3. EREDMÉNYEK

A mérések alapján kijelenthetjük, hogy a villamos elosztóhelyiségben mért harmonikus torzítás szignifikáns okozóit megtaláltuk. A vizsgált villamos fogyasztók és berendezések mindegyike, kisebb, vagy nagyobb mértékben harmonikusokat injektál a hálózatba és sajnos ezeknek a szűrését a legmodernebb berendezések esetében sem tekinthetjük megoldottnak. Mindenhol jelen vannak a felharmonikusok és hozzá kell tennünk, hogy mindenhol a IEEE 519-2022 szabvány által javasolt megengedett teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás (TDD) értéknél magasabb az alapharmonikusra (50 Hz) vonatkoztatott amplitúdójuk nagysága. Ezért kiemelkedő fontosságú, hogy a lehetőségekhez mérten törekedjünk azok csökkentésére. Például célszerű olyan frekvenciaváltókat, villamos motorhajtásokat beszerezni, melyek már gyárilag tartalmaznak hatásos harmonikus szűrőket. Természetesen előzetesen egy mintadarab analízisével meg kell győződnünk arról, hogy a berendezések valóban hatásos harmonikus szűrőket tartalmaznak-e, mert a gyakorlat azt mutatja, hogy nem minden esetben bizonyulnak annak.

### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatott mérések célja az volt, hogy különböző berendezések és eszközök villamos hálózatra csatlakoztatása esetén is megvizsgáljuk a csatlakozási pontokon a villamos energia minőségét és meghatározzuk a harmonikus zavarok nagyságát, valamint minőség szempontjából a kritikus berendezéseket. A bemutatott mérési eredmények bekerültek egy adatbázisba és a későbbiek során felhasználásra kerülnek új szűrési metódusok kidolgozásához [11], illetve azok validálásához. A további kutatási célok között szerepel az ipari létesítményben minden kritikus erősáramú villamos hálózati szekcióban hálózatanalízist végezni és dokumentálni a mérési eredményeket. Jelenleg ezek a mérések már folyamatban vannak, a mért adatok kiértékelésével együtt. Az eredmények alapján keressük majd a megoldást a kibocsájtott, nagy áram-színusz hullám torzítást okozó felharmonikusok utólagos szűrési lehetőségeire, a szűrési metódus meghatározására. Vagyis, hogy az adott gépnél történjen a szűrés lokálisan, vagy globálisan a villamos hálózati betáplálási és elosztó pontokon. Természetesen ez nem csak műszaki, hanem költségelemzést is igényel majd.

### 6. IRODALOM

- [1] AKTIF: *Problems Caused By Harmonics In Electrical Plants*, 2021 <https://aktif.net/en/problems-caused-by-harmonics-in-electrical-plants/> (2024.02.09.)
- [2] CHAPMAN D.: *Villamosenergia-minőség - Harmonikusok források és hatások*, 2001 Alkalmazási segédlet, European Copper Institute <https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/harmonikusok.pdf> (2024.02.09.)
- [3] TARNIK I.: *Villamos hálózati zavarok*, Jegyzet, 2008 <https://www.muszeroldal.hu/measurenotes/tarmikcik.pdf> (2024.02.09.)
- [4] RAPAS Kft.: *Hálózat analizátorok PQA400-PQA823-824*, 2023 <https://rapas.hu/analizator/analizator-pdfs/pqa823-824.pdf> (2024.02.09.)
- [5] RAPAS Kft.: *Használati útmutató PQA400-PQA823-824*, 2007
- [6] HT ITALIA: *Management software Topview*, 2012 <https://www.htinstruments.com/en/accessories/topview/> (2024.02.09.)
- [7] <https://comsys.se/our-adf-technology/power-quality-ieee-519-2022/> (2024.02.09.)
- [8] VLED.hu: *Mit jelent a THD a LED tápegységeken?* 2019 <https://www.vled.hu/blog/mit-jelent-a-thd-a-led-tapegysegeken> (2024.02.09.)
- [9] UDDIN, S., SHAREEF H., MOHAMAED A.: *Power quality performance of energy-efficient low-wattage LED lamps*, 2013, *Measurement*, 46(10), 3783–3795. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.022> (2024.02.09.)
- [10] <https://en.industryarena.com/liebherr-verzahntechnik/products/cylindrical-gear-hobbing-machines--215/lc-200--16317> (2024.02.09.)
- [11] KISS, J.: *Aktív felharmonikus szűrők alkalmazásának lehetőségei*, 2020 <https://www.muszaki-magazin.hu/2020/01/29/aktiv-felharmonikus-szurok-alkalmazasanak-lehetosegei/> (2024.02.09.)

# EREDŐ ERŐ ELŐREJELZÉSE KEVERT-RENDŰ SUGENO MODELL ALKALMAZÁSÁVAL MÉHSEJT SZENDVICS KOMPOZIT MARÁSAKOR

## RESULTANT FORCE PREDICTION FOR HONEYCOMB SANDWICH COMPOSITE IN THE MILLING PROCESS USING MIXED-ORDER SUGENO MODEL

Laufer Edit\*, Horváth Richárd\*\*

### ABSTRACT

*Nowadays, composites and fiber-reinforced composites are increasingly used due to their extremely favorable properties. These kinds of materials have excellent mechanical properties at low weight, but new problems arise during their production and cutting compared to traditional materials. Knowledge of cutting forces is vital, as they are known to affect the problems that arise during machining. A common issue with this type of task is that insufficient data are available to create a statistical model due to cost- and time-consuming or impractical measurements. For this reason, authors propose a predictive model that takes advantage of the fuzzy approach. The main goal is to predict resultant force for honeycomb sandwich composite in the milling process. In order to achieve a more realistic result, a mixed-order Sugeno model was developed.*

### 1. BEVEZETÉS

Az éghajlatváltozás és a globális felmelegedés a 21. század egyik legnagyobb kihívása, amely jelentősen érinti a repülőgéptervezést is. 2050-ig a légiközlekedésben elérendő célnak tekinthető az utaskilométerenkénti CO<sub>2</sub> kibocsátás 75%-os, az NO<sub>x</sub>-kibocsátás 90%-os, a zaj pedig 65%-os csökkentése, ami csak a technológia, illetve az alkalmazott anyagok megújításával érhető el. A modern repülőgép-tervezés kulcsa, a fenti célok tükrében az üzemanyag-fogyasztás, amelyre szintén nagy hatást gyakorolnak az alkalmazott anyagok jellemzői. Ennek köszönhetően az elmúlt évtizedekben számos kutatás foglalkozik a könnyű anyagok, például a fémötvözetek és a kompozitok mechanikai tulajdonságaival, alkalmazhatóságával. A legmodernebb kereskedelmi repülőgépek, mint például az Airbus A350 XWB és a Boeing B787, az anyag összetételének valamivel több, mint 50%-át a kompozitok teszik ki [1]. A szálerősített műanyag (FRP),

azonban a klasszikus, például acél megmunkálása esetén felmerülő kérdésekkel (romló felületi érdesség, maradék feszültség, magas hőmérséklet) ellentétben, új megmunkálási problémákat vet fel. Az FRP megmunkálásának új kihívásai közé tartozik a száلكihúzás, a szál törése, a mátrixkenés, valamint a delamináció [2].

A javasolt módszer alapját képező fuzzy megközelítés hatalmas előnye, hogy képes kezelni a mérnöki feladatokban is gyakran felmerülő bizonytalanságot, pontatlanságot, szubjektivitást, ami az adatok és a kiértékelési folyamat szintjén egyaránt felmerülhet. Szintén gyakori probléma, hogy nem áll rendelkezésre elegendő adat egy statisztikai modell létrehozásához a költség- és időigényes, vagy nem kivitelezhető mérések okán. A fuzzy modellek ilyen problémák esetén is megfelelő eredményt képesek szolgáltatni a prediktív modellek létrehozása által. Ezeknek a kedvező tulajdonságoknak köszönhetően egyre szélesebb körben alkalmazzák a lágy számítási módszerek körébe tartozó fuzzy megközelítést mérnöki problémák megoldására, mint például a forgácsolás folyamat modellezésére [3], [4].

A prediktív modellek hatalmas jelentőséggel bírnak, hiszen alkalmazásukkal kiválthatók a rendkívül idő- és költségigényes mérések, illetve abban az esetben is képesek eredményt adni, amikor a mérés egyáltalán nem kivitelezhető [3]. Az ilyen típusú modellek képesek arra, hogy az összes lehetséges marási beállítás kombinációjára meghatározzák a várható kimenetet, anélkül, hogy ténylegesen végre kellene hajtani a műveletet. A reális eredmények biztosítása érdekében azonban elengedhetetlen a szakértői tudás szabálybázison keresztül történő beépítése a rendszerbe.

A szerzők javaslatot tesznek egy a fenti tulajdonságokkal rendelkező kevert-rendű Sugeno modellre, ami az aktuális marási beállítások alapján, mint a forgácsoló sebesség ( $v_c$ , m/min) és az előtolási sebesség ( $v_f$ , mm/min) képes előre jelezni az egyik legfontosabb maráshoz kapcsolódó mérőszámot, az eredő erőt ( $F_e$ ).

\* egyetemi docens, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, laufer.edit@bgk.uni-obuda.hu

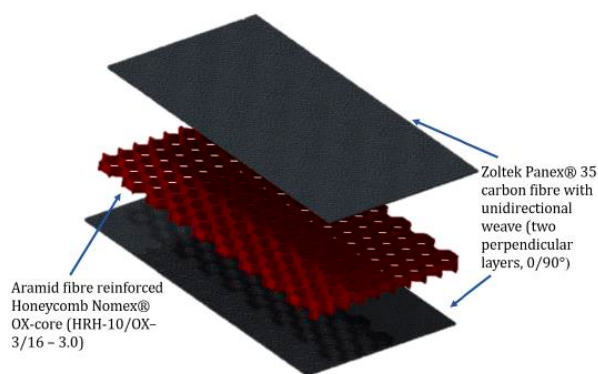
\*\* egyetemi docens, Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, horvath.richard@bgk.uni-obuda.hu

A cikk felépítése a következő: A 2. fejezet a marási folyamat elméleti háttérét, alapvető paramétereit részletezi. A 3. fejezet a javasolt módszer alapját képező Sugeno modell felépítését és működési elvét mutatja be, majd a javasolt prediktív modell ismertetése következik. A 4. fejezet az eredmények értékelését, validálását tartalmazza, az 5. fejezetet pedig a következtetések levonásának szenteltük.

## 2. ANYAGOK ÉS SZERSZÁMOK

### 2.1. Az alkalmazott anyagok

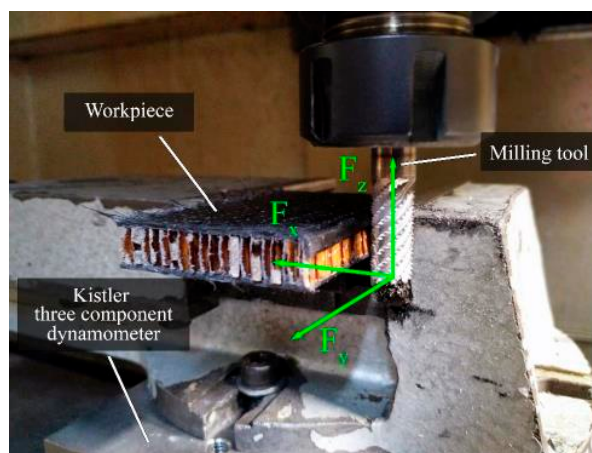
A tervezett szénszállal erősített méhsejt szendvicsszerkezet modelljét az 1. ábra szemlélteti. Az ilyen anyagokat vagy szerkezeteket számos helyen használják a kis sűrűségük és a relatív jó mechanikai tulajdonságaik miatt.



1. ábra A szendvics struktúra CAD modellje

### 2.2. A használt szerszámgépek és eszközök

A gyártott minták marása egy MAZAK VCN 410A-II függőleges megmunkáló központban történt. A minták megmunkálásához egy méhsejt anyagokhoz tervezett speciális marót használtunk, melynek megnevezése HCC. 10,0 10°. R.HA. Ti28 (cikkszám: 50936010), WNT Ceratizit Group. A mérési elrendezést és az alkalmazott erőket a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A szerszám és a mintadarab elrendezése (az eredő erő -  $F_e$  a három mért erőkomponens vektoriális összegeként értelmezhető -  $F_x, F_y, F_z$ )

## 3. A KEVERT-RENDŰ SUGENO MODELL

### 3.1. A Sugeno modell felépítése és működési elve

A fuzzy következtetési rendszerek két legelterjedtebb változata a Mamdani és a Sugeno-típusú modell, melyek a közelítő következtetés elvén működnek. A fő különbség a két megközelítés között, hogy míg a Mamdani következtetés esetén a kimenet általában egy normális, nem-konvex tagsági függvény, amit defuzzifikálni kell, addig a Takagi-Sugeno rendszer kimenete konstansként, vagy a bemenetek függvényeként adott. Ebből következően a Sugeno-típusú modellek számításigénye jóval kisebb, ami valós idejű, adaptivitást igénylő rendszerekben rendkívül fontos tényező, ezért ilyen típusú feladatok esetén elterjedtebb ez a változat. Mind a Mamdani, mind a Sugeno-típusú modellben „HA feltétel AKKOR következmény” felépítésű természetes nyelvi szabályokat alkalmazunk, a fentiekben ismertetett különbség ezen szabályok konzekvens részében jelenik meg, attól függően, hogy a szabálykimenet crisp érték, lineáris függvény, vagy fuzzy halmaz.

A Sugeno-típusú következtetési rendszer kimenete lehet konstans érték (nulladrendű Sugeno), vagy a bemenetek lineáris függvénye (elsőrendű Sugeno, Takagi-Sugeno). Legyenek a bemenetek  $x_1, x_2, \dots, x_n$  az  $X_1, X_2, \dots, X_n$  univerzumból, a kimenet pedig  $y \in Y$ , a kimenetet előállító függvény pedig  $g_{i_1, \dots, i_n}(x_1, \dots, x_n)$ . Ekkor a Takagi-Sugeno rendszer a következő felépítésű szabályokkal reprezentálható:

$$HA \ x_1 = A_{1, i_1} \text{ és } \dots \text{ és } x_n = A_{n, i_n} \text{ AKKOR } y = g_{i_1, \dots, i_n}(x_1, \dots, x_n)$$

ahol,  $A_{k, i_k}$  a  $k$ -edik bemenethez tartozó  $i_k$ -edik antecedens,  $g_{i_1, \dots, i_n}(x_1, \dots, x_n)$  a szabályok következmény része,  $i_j = 1, \dots, n_j$ ,  $n_j$  a  $j$ -edik bemenethez tartozó antecedens halmazok száma.

A Sugeno típusú modellnek több változata is ismert, attól függően, hogy a kimenetet milyen módon adjuk meg:

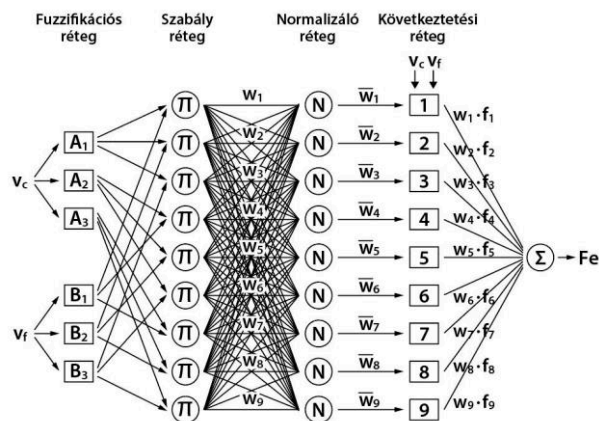
- Nulladrendű (Sugeno):  $c_i$
- Elsőrendű (Takagi Sugeno):  $p_i x_1 + q_i x_2 + r_i$
- Magasabbrendű (Takagi-Sugeno-Kang): a bemenetek magasabb rendű függvénye

Ebben a tanulmányban kizárólag a nullad- és elsőrendű modellt vizsgáljuk, alacsonyabb számítási bonyolultsága okán.

### 3.2. A prediktív modell létrehozása

A modell létrehozása a fuzzy irányítási rendszerrel ekvivalens adaptív neurális hálózat segítségével történt a rendelkezésre álló mérési adatok alapján betanítva a hálózatot. Az ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) egyfajta mesterséges neurális hálózat, amely felhasználható egy Sugeno típusú (Sugeno, Takagi-Sugeno) modell létrehozására az adott feladathoz rendelkezésre álló bemenet-kimenet párok alapján. A tanítás alapvető módszere a gradiens módszer és a láncszabály. Mivel a gradiens módszer tipikusan lassú konvergenciát biztosít, és gyakran csak a lokális minimumot találja meg, ezért abban az esetben, ha a kimenet a paraméterhalmaz egy részhalmazától lineárisan függ, ezen értékek optimalizálására a legkisebb négyzetek módszere is használható [8]. Ilyenkor hibrid tanítási algoritmust alkalmazunk, vagyis a fenti két módszer előnyös tulajdonságait ötvözve a lineáris paramétereket a legkisebb négyzetek módszere, míg a nemlineáris paramétereket a gradiens módszer segítségével optimalizáljuk. Az ANFIS egy olyan neurális hálózatot hoz létre, amely a fuzzy következtetés lépéseivel ekvivalens rétegekből áll [6].

A prediktív modell nullad- és elsőrendű változatát is létrehoztuk, majd az így létrehozott modellek kimeneteinek rendjét variáltuk egy jobb közelítő képességgel rendelkező modell létrehozása érdekében. Az ANFIS modellekben hibrid tanulási algoritmust alkalmaztunk, 20 lépésben hangolva a modell paramétereit. A kapott elsőrendű Sugeno modellt a 3. ábrán mutatjuk be, a nullad- és a kevert-rendű modell felépítése is ehhez hasonló, azzal a különbséggel, hogy a Következtetési rétegben nem, vagy nem mindig lineáris függvény szerepel, hanem konstans érték.



3. ábra A prediktív modell struktúrája

A Fuzzifikációs rétegben minden csomópont paraméterezett, az aktivációs függvény az adott szabály adott bemenetéhez tartozó tagsági függvény, amely a paraméterek segítségével hangolható:

$$\mu_{A_i}(x) = e^{-\frac{(x-c_i)^2}{2\sigma_i^2}} \quad (1)$$

ahol,  $c_i$  az  $i$ -edik tagsági függvény középértéke,  $\sigma_i$  pedig a szórása.

A Szabály réteg, az aktuális szabály antecedens részének tüzelési szint ( $w_i$ ) számítását végzi, valamilyen konjunkciós, vagy diszjunkciós operátort alkalmazva. A modellben a szorzat operátort alkalmaztuk.

$$w_i = \prod_{k=1}^m \mu_{A_{kj}}(x) \quad (2)$$

ahol,  $m$  a bemenetek száma,  $\mu_{A_{kj}}(x)$  a  $j$ -edik bemenet  $k$ -adik antecedenshez tartozó tagsági értéke.

A Normalizáló réteg a tüzelési szintek normalizálására szolgál, vagyis azt adja meg, hogy az adott szabály milyen mértékben játszik szerepet a rendszerben a többi szabályhoz képest.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

ahol,  $n$  a szabályok száma,  $w_i$  az  $i$ -edik szabály tüzelési szintje.

A normalizálást követi a Következtetési réteg, ami a szabály következmény részét képviseli, és egy aktivációs függvény segítségével számítható ki az adott szabály kimenete. Bemenetei a korábban normalizált tüzelési szintek és a szabálykonzekvensek paraméterei ( $p_i, q_i, r_i$ ).

$$\bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \quad (4)$$

ahol,  $p_i$ ,  $q_i$ ,  $r_i$  az  $i$ -edik csomópontához tartozó kimeneti paraméter halmaz.

Az utolsó, ötödik réteg feladata a szabályonkénti konzekvensek összesítése, az előző réteg eredményeiből számolt súlyozott átlag segítségével, ahol a tüzelési szint szerepel súlyként.

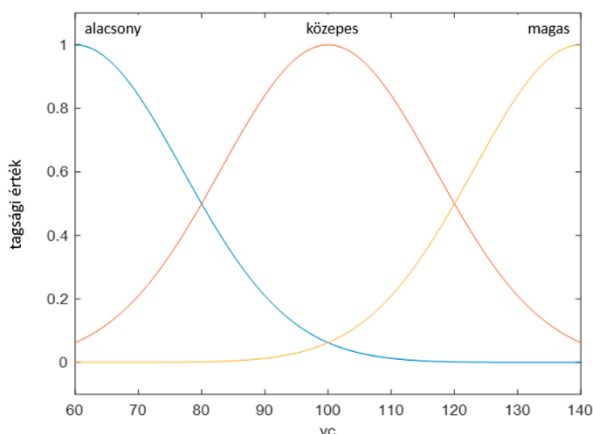
$$\sum_{i=1}^n \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (5)$$

### 3.3. A kevert-rendű prediktív Sugeno modell

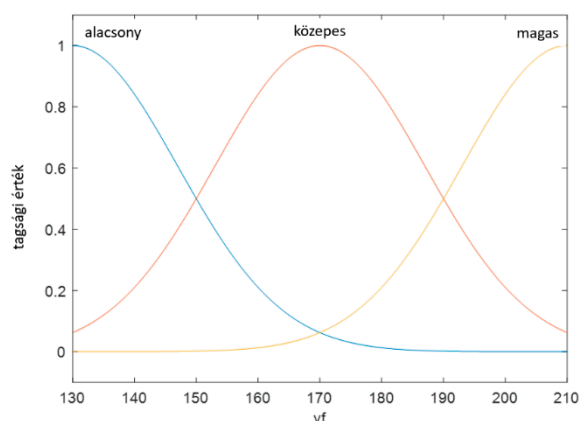
A szerzők az előző fejezetben bemutatott prediktív modellnek egy speciális, kevert-rendű változatát hozták létre, melynek sajátossága, hogy a kimenetek alapján nem beszélhetünk tisztán nullad- vagy elsőrendű Sugeno modellről, hanem a konstans és a lineáris függvény kimeneteket vegyesen alkalmazva érvük el a kimenet pontosságának növelését. A modell célja, az egyik legalapvetőbb marási paraméter, az eredő erő ( $Fe$ ) becslése az aktuális beállítások (forgácsoló sebesség,  $v_c$ ; előtolási sebesség  $v_f$ ) alapján. A forgácsoló sebesség esetén a bemeneti értékek kiválasztása a [60, 140] tartományból történt, m/min-ben megadva, míg az előtolási sebesség tartománya [130, 210], mm/min-ben meghatározott. A bemeneteket fuzziifikálása Gauss-görbe alakú tagsági függvények,  $\mu(x, \sigma, m)$ , segítségével történt az (1) egyenlet szerint, az 1. táblázatban definiált paraméterek alkalmazásával, melyeket a 4. és 5. ábra illusztrál a hozzárendelt nyelvi jellemzőket is feltüntetve.

1. táblázat Bemeneti tagsági függvények

	Forgácsoló sebesség		Előtolási sebesség	
	$v_c, m/min$		$v_f, mm/min$	
Alacsony	$e^{-\frac{(x-60)^2}{2 \cdot 16,99^2}}$		$e^{-\frac{(x-130)^2}{2 \cdot 16,99^2}}$	
Közepes	$e^{-\frac{(x-100)^2}{2 \cdot 16,99^2}}$		$e^{-\frac{(x-169,9)^2}{2 \cdot 16,99^2}}$	
Magas	$e^{-\frac{(x-140)^2}{2 \cdot 16,99^2}}$		$e^{-\frac{(x-210)^2}{2 \cdot 16,99^2}}$	



4. ábra A forgácsolósebesség tagsági függvényei ( $v_c$ )



5. ábra Az előtolási sebesség tagsági függvényei ( $v_f$ )

A kimenetek a kevert-rendű modellben konstans értékek és lineáris függvények egyaránt lehetnek. A modell megalkotása során a 2. táblázatban látható kimenet típusokat alkalmazva értük el a legjobb közelítést, az ehhez kapcsolódóan létrehozott szabálybázist a 3. táblázat illusztrálja. A táblázatban a forgácsolósebesség nyelvi jellemzői függőlegesen, az előtolási sebességhez tartozó jellemzők pedig vízszintesen olvashatók. A szabályok antecedens részének kiértékelésekor a szorzat operátort alkalmaztuk (2) a fuzzy metszet előállítás érdekében.

2. táblázat Bemeneti tagsági függvények

Szabály	Kimenet típusa	Szabálykonzekvens
1	Konstans	16
2	Lineáris	$0,06945 \cdot v_c + 0,1047 \cdot v_f + 0,002275$
3	Lineáris	$0,1654 \cdot v_c + 0,05741 \cdot v_f - 0,002194$
4	Konstans	12
5	Lineáris	$0,3394 \cdot v_c - 0,1 \cdot v_f + 0,01327$
6	Lineáris	$0,1828 \cdot v_c + 0,001798 \cdot v_f + 0,0009915$
7	Konstans	12,5
8	Lineáris	$0,2831 \cdot v_c - 0,1639 \cdot v_f - 0,009143$
9	Konstans	15,7

3. táblázat Az alkalmazott szabályrendszer

II	Alacsony	Közepes	Magas
Alacsony	16	$0,06945 \cdot v_c + 0,1047 \cdot v_f + 0,002275$	$0,1654 \cdot v_c + 0,05741 \cdot v_f - 0,002194$
Közepes	12	$0,3394 \cdot v_c - 0,1 \cdot v_f + 0,01327$	$0,1828 \cdot v_c + 0,001798 \cdot v_f + 0,0009915$
Magas	12,5	$0,2831 \cdot v_c - 0,1639 \cdot v_f - 0,009143$	15,7

## 4. A MODELL VALIDÁLÁSA

### 4.1. Tesztkörnyezet

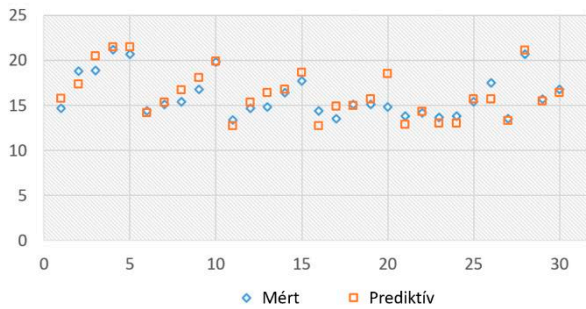
A fuzzy modellt Matlab környezetben hoztuk létre. A megfelelő pontosságú modell megalkotása érdekében az ANFIS tanításakor a mérésekből rendelkezésre álló bemenet – kimenet párokat véletlenszerűen 2 részre osztottuk úgy, hogy azok 60%-a képezte a tanító adatokat, 40%-a pedig a teszt adatokat. A felosztást összesen 10 alkalommal végeztük el, így mindig más adatokkal dolgoztunk. Kiindulásként egy nullad- és egy elsőrendű Sugeno modellt állítottunk elő, majd a kimenetek rendjét keverve alkottuk meg a végső modellt, úgy hogy az eredmények egyre jobb közelítést adjanak.

### 4.2. A modell validálása

A javasolt kevert-rendű Sugeno modell célja az eredő erő megfelelő pontosságú becslése méhsejt szendvics kompozit marásakor. A validáláshoz 30 különböző mérési pontban mért értékek álltak rendelkezésre, a 4. táblázatban részletezett beállításokkal. A prediktív modell által becsült értékeket, ezekkel a mérési eredményekkel hasonlítottuk össze. Ennek eredményét a 6. ábrán szemléltettük, ahol egyértelműen látható, hogy a kevert-rendű modell jó közelítést ad, hiszen a mért és a becsült értékek különbsége minden esetben 1 N alatt marad.

4. táblázat A mérési pontok és a mért eredő erő

Mérési pont	$v_c$ , m/min	$v_f$ , mm/min	$F_e$ , N
1	60	130	14,7
2	60	150	18,8
3	60	170	18,9
4	60	190	21,2
5	60	210	20,7
6	80	130	14,4
7	80	150	15,1
8	80	170	15,4
9	80	190	16,8
10	80	210	19,8
11	100	130	13,4
12	100	150	14,7
13	100	170	14,8
14	100	190	16,4
15	100	210	17,7
16	120	130	14,4
17	120	150	13,5
18	120	170	15,1
19	120	190	15,1
20	120	210	14,8
21	140	130	13,8
22	140	150	14,2
23	140	170	13,7
24	140	190	13,8
25	140	210	15,4
26	70	140	17,5
27	130	140	13,5
28	70	200	20,7
29	130	200	15,7
30	100	170	16,8



6. ábra A becsült és a mért eredő erő értékek összehasonlítása

A nullad- (Sugeno) és az elsőrendű (Takagi-Sugeno) modelleket azonos körülmények között implementáltuk és ezek eredményét is összehasonlítottuk a kevert-rendű modell eredményével. Az átlagos eltérés ( $d_{\text{át}}$ ), a szórás ( $\sigma$ ), és a maximális eltérés ( $max$ ) értékeket vetettük össze mindhárom modell tekintetében, melynek eredményeit az 5. táblázatban foglaltuk össze. Az összehasonlításakor az eltérés abszolútértékét vettük figyelembe.

5. táblázat A különböző rendű Sugeno modellek összehasonlítása

Mérőszám	Sugeno	Takagi-Sugeno	Kevert
$d_{\text{át}}$	0,96	0,94	0,93
$\sigma$	0,685	1,157	0,585
$max$	2,4	3,8	1,7

Az eredmények alapján nyilvánvaló, hogy a kevert-rendű Sugeno-modell szolgáltatja a legjobb közelítést, mivel az átlagos és a maximális eltérés, valamint a szórás értéke egyaránt ennél a modellenél a legalacsonyabb. A hagyományos modelleket tekintve látható, hogy az átlagos eltérés ugyan valamivel jobb az elsőrendű modell esetén a nulladrendűhöz képest, a másik két mérőszám, a szórás és a maximális eltérés esetén azonban lényegesen rosszabb értékeket kapunk. Ez nyilvánvalóan azt jelenti, hogy bár több olyan érték van, ami jobban közelíti a mért értékeket, mint a nulladrendű esetben, azonban számos helyen sokkal nagyobb eltérések figyelhetők meg ( $max$ ), ami nem megengedhető. Következésképpen kijelenthető, hogy a kevert-rendű Sugeno modell nagy megbízhatósággal képes becsülni az eredő erőt, ezáltal alkalmas az idő- és költségigényes mérések helyettesítésére. A nullad- és elsőrendű modellek tekintetében pedig megállapítható, hogy nincsen közöttük jelentős különbség, azonban a nulladrendű valamelyest jobb eredményt ad.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A technológiai folyamattervezésben rendkívül fontos az elkészült munkadarab megfelelő minőségi jellemzőinek biztosítása. Sok esetben azonban az ehhez

szükséges mérések elvégzése idő- és költségigényes, esetleg egyáltalán nem elvégezhető. Erre a problémára nyújtanak megoldást a mérnöki feladatokban is nagy népszerűségnek örvendő lágy számítási módszerek. Az ilyen típusú módszerek hatalmas előnye, hogy abban az esetben is képesek egy prediktív megoldás előállítására, ha nem áll rendelkezésre elegendő adat egy statisztikai modell megalkotásához, mivel képesek a bizonytalanságok kezelésére.

A szerzők egy korszerű anyag, méhsejt szendvics kompozit marásakor alkalmazható fuzzy alapú prediktív modellt alkottak, ami az aktuális beállítások (forgácsoló sebesség és előtolási sebesség) alapján képes előre jelezni az eredő erőt. A kiértékelést egy kevert-rendű Sugeno modell végzi, melyben a kimenetek típusa (konstans, lineáris függvény) különbözhet annak érdekében, hogy a lehető legjobb közelítést adja. A modell eredményeit a rendelkezésre álló mérési eredmények alapján validáltuk, melynek eredményeként kijelenthető, hogy a javasolt modell képes nagy pontossággal becsülni az eredő erő értékét, vagyis kiváltható vele a szükségtelenül nagyszámú idő- és költségigényes méréssorozat.

## SUMMARY

In technological process design, it is extremely important to ensure the appropriate quality parameters of the finished workpiece. However, in several cases the required measurements are cost- and time-consuming, or may not be possible to carry out them at all. The widely used soft computing methods provide an efficient solution to this problem. Great advantage of these kinds of methods is that they are able to create a predictive solution even if there is not enough data to create a statistical model, as they are able to handle uncertainties.

The authors have developed a fuzzy-based predictive model for honeycomb sandwich composite milling that can predict the resultant force based on current settings (cutting speed and feed rate). The evaluation is performed by a mixed-order Sugeno model in which the type of the rule consequences (constant, linear function) may differ in order to ensure the best possible approximation. The results of the model were validated on the basis of the available measurement results. It can be concluded that the proposed model is able to estimate the value of the resultant force with high accuracy, i.e. it can be used to replace unnecessarily time-consuming and costly measurements.

## 5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán működő Fuzzy Rendszerek Tudományos Műhely támogatásával készült.



## 6. IRODALOM

- [1] R. M'SAOUBI, D. AXINTE, S. LEUNG SOO, C. NOBEL, H. ATTIA, G. KAPPMAYER, S. ENGIN, WEI-MING SIM: High performance cutting of advanced aerospace alloys and composite materials, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol 64, pp 557-580, 2015
- [2] J. MILLER, E. D. ENEYEW, & M. RAMULU: Machining and Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites. SAMPE Journal, Vol 49, Issue 2, pp 36-47, 2013
- [3] T. OBEIDI, C. LARBES, A. ILINCA, G. F.T. KEBIR, Fuzzy Logic-based Maximum Power Point Tracking for a Solar Electric Vehicle, Acta Polytechnica Hungarica, vol. 15, no. 7, pp. 133-156, 2018
- [4] E. TÓTH-LAUFER, R. HORVÁTH: A MIMO Fuzzy Model to Predict Turning Metrics, Proc. of the IEEE 17th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics Proceedings, SISY 2019, pp. 109-113, 2019
- [5] E. TÓTH-LAUFER, R. HORVÁTH: Fuzzy model based surface roughness prediction of fine turning, FME Transactions, vol. 45, pp. 180-188, 2017
- [6] T. TAKAGI, M. SUGENO: Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, vol. 15, pp. 116-132, 1985
- [7] J-S. R. JANG. ANFIS: adaptive-network based fuzzy inference system. IEEE Trans. on SMC, 23(3):665–685, 1993
- [8] L. T. KÓCZY, D. TIKK: Fuzzy rendszerek, Kempelen Farkas Tankönyvtár, 2001 [Online]. Available: <http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tkt/fuzzy-rendszerek-fuzzy/adatok.html>

# A TERMoeLEKTROMOS MODULOK KÖRFORGÁSOS GYÁRTÁSÁNAK DQN ALAPÚ DÖNTÉSTÁMOGATÁSOS OPTIMALIZÁCIÓJA

## CIRCULAR MANUFACTURING OF THERMOELECTRIC MODULES SUPPORTED BY DQN DECISION-MAKING OPTIMIZATION

Albert Judit\*, Dr. Takács Ágnes\*\*

### ABSTRACT

*The optimization of thermoelectric modules brings significant benefits in terms of performance, weight, and cost. Optimization methods such as genetic algorithms, Deep Q-Learning, and the VIKOR method help finding the best compromise solutions. These optimized modules not only provide more efficient energy conversion but are also more economical and sustainable, contributing to long-term energy and environmental goals. Furthermore, the application of circular manufacturing principles minimizes waste and maximizes material recyclability, further enhancing sustainability.*

### 1. BEVEZETÉS

A termoelektromos modulok optimalizációja jelentős előnyökkel jár a teljesítmény, tömeg és költség szempontjából. [3] [7] [9] [12] Az optimalizációs eljárások, mint a genetikus algoritmus, a Deep Q-Learning és a VIKOR [1] [2] [6] [10] módszer alkalmazása segít megtalálni a legjobb kompromisszumos megoldásokat. Ezek az optimalizált modulok nemcsak hatékonyabb energiaátalakítást biztosítanak, hanem gazdaságosabbak és fenntarthatóbbak is, ami hozzájárul a hosszú távú energetikai és környezeti célok eléréséhez, továbbá, a körkörös gyártási elvek alkalmazása révén minimalizálható a hulladék és maximalizálható az anyagok újrahasznosíthatósága, ami tovább növeli a fenntarthatóságot. A termoelektromos modulok fejlesztése ebben a keretben különösen fontos a következő okok miatt.

#### **Anyaghatékonyság**

Az optimalizáció révén kevesebb anyag felhasználásával lehet elérni ugyanazt a teljesítményt, ami csökkenti az alapanyagok iránti keresletet és

hozzájárul az erőforrások megőrzéséhez. A kisebb anyagigényű modulok előállításuk gazdaságosabb és környezetkímélőbb.

#### **Hulladék Minimalizálása**

Az optimalizált gyártási folyamatok kevesebb hulladékot eredményeznek, és a maradék anyagok könnyebben újrahasznosíthatók. Az anyagok újrafelhasználásával csökkenthető a hulladéklerakók terhelése és a nyersanyag-kitermelés szükségessége.

#### **Energiahatékonyság**

A hatékonyabb modulok kevesebb energiát igényelnek a gyártás és az üzemeltetés során. Ez nemcsak az energiafogyasztást csökkenti, hanem a kapcsolódó üvegházhatású gázok kibocsátását is. Az energiahatékonyság növelése kulcsfontosságú a fenntarthatóság szempontjából.

#### **Élettartam és Újrahasznosítás**

A modulok hosszabb élettartamának biztosítása és az életciklus végén történő újrahasznosíthatóságuk fokozása révén csökkenthető a környezeti lábnyom. Az újrahasznosított anyagok felhasználása a gyártás során minimalizálja az új anyagok szükségességét és elősegíti a fenntartható gazdaságot. A cél az, hogy a termoelektromos technológiát egyre inkább integráljuk a fenntartható energiaforrások közé, kihasználva a körforgásos gazdaság nyújtotta előnyöket. Ez nemcsak a jelenlegi energetikai rendszerek hatékonyságát növeli, hanem hozzájárul a jövő fenntarthatóbb, környezetbarát energiaforrásainak fejlesztéséhez is. Az AI számos módon járulhat hozzá ezeknek a céloknak az eléréséhez, a döntéshozatalban való alkalmazásával, az alábbiak szerint:

#### **Adatfeldolgozás és elemzés**

A Mesterséges Intelligencia (MI) képes nagy mennyiségű adatot feldolgozni és elemezni, ami segíti a mérnököket abban, hogy tájékozott döntéseket hozzanak. Az adatelemzés révén a MI

\*PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

\*\* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet

azonosít mintákat, trendeket és összefüggéseket az adatokban, amelyek segítségével a mérnökök hatékonyabbá tehetik tervezési és gyártási folyamataikat.

### **Prediktív analitika**

A MI alkalmazása lehetővé teszi a prediktív modellek létrehozását, amelyek előrejelzik a lehetséges jövőbeli eseményeket vagy eredményeket. Ezek a modellek segíthetnek a kockázatok azonosításában és csökkentésében, valamint a hatékonyabb erőforrás-allokációban.

### **Optimalizáció és automatizáció**

A MI segítségével lehetőség nyílik az automatizált optimalizációs folyamatokra. Ez lehetővé teszi a gyorsabb és hatékonyabb döntéseket az erőforrások jobb felhasználása érdekében. Például gépi tanulási algoritmusok használhatók a gyártási folyamatok vagy az alkatrészek tervezésének optimalizálására.

### **Döntéshozatal támogatása**

A MI rendszerek képesek releváns információkat és javaslatokat biztosítani a mérnökök számára a döntésekhez. Ezáltal lehetőség nyílik az egyes helyzetekre történő gyorsabb és hatékonyabb reakcióra, és a folyamatok zavartalan működésére. Ezen előnyök összességében segítik a mérnököket abban, hogy jobb döntéseket hozzanak, optimalizálják a folyamatokat és növeljék a termelékenységet a MI támogatásával. A döntéstámogatás MI-ba történő integrációja a mérnöki területeken, ahol gyors és hatékony döntésekre van szükség a komplex kihívások kezeléséhez, kulcsfontossággal bír.

## **2. AI-HOZ KAPCSOLÓDÓ OPTIMALIZÁLÁSI MÓDSZEREK**

A mesterséges ideghálózatok ma egyre inkább előtérbe kerülnek, mivel alkalmasak tanulásra képes rendszerek felépítésére, például a terméktervezésben is. Számos optimalizálási módszer szorosan kapcsolódik a mesterséges intelligencia területéhez.

### **Genetikus Algoritmus (GA)**

A MI területén a genetikus algoritmusokat gyakran használják olyan problémák megoldására, ahol a keresési tér nagyon nagy vagy bonyolult. Például a gépi tanulás modelljének hiperparaméter-optimalizálása, neurális hálózatok súlyainak beállítása, és optimalizálási problémák megoldása. A genetikai keresésen alapuló megközelítés előnye a matematikai programozási vagy optimalitási kritériumokon alapuló módszerekkel szemben az, hogy képes általános tervezési korlátokat bevonni a problémába és globális optimumot találni. [5] [11]

### **Többkritériumos Optimalizálás**

A genetikus algoritmusokat több fitness függvénnyel is bővíthetjük, hogy több kritériumot vegyünk figyelembe, mint például költség, tömeg és teljesítmény. A Pareto-front használatával egyensúlyt találhatunk a különböző kritériumok között, biztosítva, hogy a legjobb megoldások egyediek legyenek.

### **Részecske Raj Intelligencia (PSO)**

A PSO módszert szintén alkalmazzák MI feladatokban, mint például a neurális hálózatok tréningjében, képfeldolgozásban és adatosztályozásban. A részecske raj intelligencia módszer gyors és hatékony keresési technikákat kínál, különösen nemlineáris és többdimenziós problémák esetén.

### **Evolúciós Algoritmusok**

Az evolúciós algoritmusok, mint például az NSGA-II, a multi-objective optimalizációban használatosak, és gyakran alkalmazzák MI rendszerek fejlesztésében, ahol több cél egyidejű optimalizálása szükséges. Például robotikus rendszerek tervezésekor. [4] [14] [15] [16] [17]

### **Deep Learning**

A mély tanulási algoritmusok gyakran használnak optimalizációs módszereket, mint a gradient descent (gradiens süllyedés) és annak különböző változatai (pl. Adam, RMSprop). **Bayes-optimalizáció**

Ez egy sztochasztikus módszer, amelyet gyakran alkalmaznak gépi tanulási modellek hiperparamétereinek optimalizálására. A Bayes-optimalizáció valószínűségi modelleket használ az ismeretlen célfüggvények feltérképezésére és optimalizálására.

### **Megerősítéssel tanulás (RL)**

A megerősítéssel tanulás (RL) egy olyan gépi tanulási paradigma, amelyben az algoritmus egy ágens segítségével interakcióba lép a környezetével, és az interakciók során szerzett visszajelzések alapján tanul. Az RL célja egy olyan stratégia kidolgozása, amely maximalizálja az ágens által időben összegyűjtött jutalmat.

### **Q-learning**

A Q-learning egy olyan optimalizálási algoritmus, amely az állapot-akció párok értékét iteratív módon közelíti. Ez segít a legjobb cselekvési irányelv megtalálásában különböző környezetekben.

### **Deep Q-Network (DQN)**

A Deep Q-Network (DQN) egy olyan algoritmus, amely a megerősítéssel tanulást (RL) és a mély tanulást (deep learning) kombinálja, hogy az algoritmus segítségével az ágens képes legyen komplex környezetekben tanulni és hatékonyan

optimalizálni a döntéshozatali stratégiáját, különösen olyan feladatokban, amelyek nagy állapot- és akciótereket foglalnak magukban.

### Döntéstámogató Algoritmusok

Az Analytic Hierarchy Process (AHP), valamint a VIKOR algoritmusok segítenek a többkritériumos döntéshozatalban, súlyozva és rangsorolva az alternatívákat. Az AHP módszer segít a döntési problémát hierarchikusan strukturálni, míg a VIKOR módszer kompromisszumos rangsorolást használ a különböző kritériumok közötti kompromisszumok figyelembevételével.

Ezek a módszerek együttműködve biztosítják a hatékony optimalizációt és döntéshozatalt a termoelektromos modulok anyaggyártásával kapcsolatos problémákban.

## 3. ALTERNATÍVA GENERÁLÁS SZÁMÍTÁSAINAK RÉSZLETEZÉSE

A DQN alkalmazása a konstrukciós geometriai optimalizációban hatékony eszköz lehet a komplex paraméterterek kezelésére és optimalizálására. Az AHP és GA kombinációjával a DQN tovább finomíthatja az eredményeket, biztosítva a legjobb teljesítmény/tömeg arány elérését.

Az optimalizáció célja, hogy megtaláljuk a legjobb méretű és tulajdonságú pelletet, amelyek maximális teljesítményt, minimális tömeget és alacsony költséget biztosítanak.

### 3.1. Optimalizációs Eljárás

A termoelektromos modulok pelletjeinek geometriai és szerkezeti optimalizálása során figyelembe vett négy fő paraméter a következő.

**Hővezetőképesség:** A hatékony hőátadás biztosítása, miközben minimalizálják a hővesztést.

**Elektromos vezetőképesség:** Az elektromos áram áramlásának optimalizálása a maximális teljesítmény kimenet érdekében.

**Seebeck-együttható:** A feszültség növelése, amely a hőmérséklet-gradiensből származik.

**Mechanikai stabilitás:** A termoelektromos eszköz szerkezeti integritásának biztosítása különböző hő- és mechanikai terhelések alatt.

Ezek a paraméterek kulcsfontosságúak az olyan termoelektromos modulok tervezésében, amelyek hatékonyan képesek átalakítani a hőt elektromos energiává, különösen változó hőmérsékleti gradiensekkel és hőforrásokkal rendelkező alkalmazásokban.

Az általunk alkalmazott optimalizációs eljárás három fő részből áll, az alábbiak szerint.

### Genetikus Algoritmus (GA) és Deep Q-Learning (DQN) alkalmazása:

#### Genetikus Algoritmus

A genetikus algoritmus a természetes szelekció elvét követi, hogy generációk során optimalizálja a pelletek méreteit. A legjobb teljesítmény/tömeg/költség arányú pelletek tovább szaporodnak, míg a kevésbé hatékony egyedek kiesnek.

#### Deep Q-Learning

A Deep Q-Learning egy gépi tanulási algoritmus, amely a döntéshozatalt tanulja a környezeti visszajelzések alapján. A DQN segítségével finom hangolhatjuk a pelletek méreteit, hogy még jobb teljesítményt érjünk el.

A megerősítési tanulás (RL) matematikai modellje Markov elméleti kerete alapján készült (MDPs). Az MDP-k formális matematikai reprezentációt kínálnak az érintett problémák modellezésére szekvenciális döntéshozatal esetén [8] [18]. Egy MDP-t formálisan egy  $(S, A, P, R, \gamma)$  értéksor reprezentál, ahol:

- Az  $S$  szimbólum az állapotok halmazát jelöli.
- Az  $A$  szimbólum az RL (Reinforcement Learning) ügynök számára elérhető akciók halmazát jelöli.
- A  $P(s_t, s_{t+1}, a_t)$  az állapotátmeneti valószínűségi függvényt reprezentálja.
- Az  $R(s_t, s_{t+1}, a_t)$  jutalomfüggvény az ügynöknek egy azonnali  $r_t$  jutalmat rendel hozzá, amikor az  $s_t$  állapotból  $s_{t+1}$  állapotba lép  $a \in A$  akció végrehajtásával.
- A  $\gamma$  diszkont faktor (ahol  $0 \leq \gamma \leq 1$ ) meghatározza a jövőbeli jutalmak relatív jelentőségét az azonnali jutalmakhoz képest.

A megerősítési tanulás (RL) elsődleges célja az optimális  $\pi^*$  irányelv meghatározása, amely maximalizálja a várható kumulatív jutalmat egy adott időhorizonton. A kumulatív jutalom, amelyet  $R_{cum}$  jelöl, a diszkontált jutalmak összegzésével kerül kiszámításra, amelyeket az alábbiak szerint definiálnak:

$$R_{cum} = \sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t, s_{t+1}) \quad (1)$$

Itt az  $s_t$  változó a jelenlegi állapotot jelenti, az  $a_t$  az állapotban  $s_t$  végrehajtott akciót jelöli, míg az  $s_{t+1}$  az akció  $a_t$  végrehajtása után bekövetkező eredményállapotot jelenti. A diszkont faktor  $\gamma$  bevezetése arra szolgál, hogy a jövőbeli jutalmaknak viszonylag kisebb jelentőséget adjon az azonnali jutalmakhoz képest.

Az optimális  $\pi^*$  irányelv meghatározása az RL probléma megoldásával érhető el, amely iteratív

interakciók során történik az RL ügynök és a környezet között. A folyamat magában foglalja az állapot-akció párok értékeinek vagy Q-értékeinek iteratív becslését, az irányelv ezen becslések alapján történő frissítését, valamint az értékbecslések további finomítását a feltárás és a kiaknázás kombinációjával. Az ügynök azonban gyakran nem ismeri a környezet dinamikáját, beleértve az állapotátmeneti valószínűségeket, amelyeket  $P(s_t, s_{t+1}, a_t)$  jelöl, valamint a jutalomfüggvényt, amelyet  $R(s_t, s_{t+1}, a_t)$ . Következésképpen az ügynök a legkedvezőbb cselekvési módot kizárólag a környezettel való interakció során, valamint meghatározott tanulási algoritmusok alkalmazásával sajátítja el.

A várható kumulatív jutalmat maximalizáló  $\pi^*$  irányelv a  $V_{\pi^*}(s)$  állapot-érték függvénynek felel meg, amely nagyobb vagy egyenlő, mint az összes állapotra vonatkozó összes alternatív irányelvhez társított értékfüggvény.

Azonban az optimális  $\pi^*$  irányelv közvetlen megszerzése a  $V_s$  értékfüggvényből kihívást jelent az explicit cselekvési információ hiánya miatt. Ennek a problémának a megoldására a  $q_{\pi}(s_t, a_t)$  cselekvési érték függvényt, amelyet általában állapot-akcióérték függvénynek neveznek, bevezették az erősítő tanulás (RL) területén [13].

A cselekvési érték függvény a várható teljes jövőbeli jutalom matematikai reprezentációja, amely egy adott  $s$  állapotból kiindulva, egy adott cselekvés kiválasztásával  $a$ , majd egy meghatározott  $\pi$  irányelv betartásával érhető el. A  $q_{\pi}(s_t, a_t)$  optimális cselekvési érték függvény felhasználásával az optimális  $\pi^*$  irányelv meghatározása az értéket maximalizáló művelet kiválasztásával érhető el, amelyet a következőképpen definiálunk:

$$a_t = \operatorname{argmax}_{a \in A} (q_{\pi}(s_t, a_t)) \quad (2)$$

A Bellman-egyenlettől függő iteratív frissítések alkalmazásával az értékalapú módszerek, mint például a Q-learning, megszerezhetik az optimális cselekvési érték függvényt, amelyet  $q^*$ -ként jelölünk. A Bellman-egyenlet matematikai összefüggést hoz létre az aktuális állapot akcióértéke, valamint az azonnali jutalom és a következő állapot diszkontált akcióértékének összege között. A cselekvési értékek iteratív becslésének és frissítésének folyamata révén az értékalapú technikák konvergálhatnak az optimális cselekvési érték függvény felé, amelyet  $q^*$ -ként jelölünk, majd ezt követően az optimális irányelv felé. A folyamat röviden a következőképpen foglалható össze:

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \eta Q[r_t + \gamma \max_a Q_t(s_t, a_t) - Q_t(s_t, a_t)] \quad (3)$$

A  $Q_{t+1}(s_t, a_t)$  kifejezés az  $s$  állapothoz és az  $a$  művelethez társított cselekvési érték frissített becslését jelöli a  $t$  iteráció során. A  $Q_t(s_t, a_t)$  függvény az előző becslést, míg az  $r_t$  az  $a$  művelet végrehajtása után megszerzett azonnali jutalmat jelöli  $s$  állapotban. Az  $s_{t+1}$  szimbólum a sorozat következő állapotát jelöli. A  $\gamma$  diszkont tényező egy olyan paraméter, amely meghatározza a jövőbeni jutalmak relatív fontosságát. A  $\max_a Q_t(s_t, a_t)$  kifejezés a következő  $s_{t+1}$  állapot maximális műveleti értékét jelöli, figyelembe véve az összes lehetséges  $a$  műveletet az aktuális  $t$  iterációban.

### 3.2. Döntési folyamatok

#### VIKOR módszer alkalmazása a kompromisszumos megoldások rangsorolására:

A VIKOR módszer több kritérium figyelembevételével rangsorolja az alternatívákat, és segít megtalálni a legjobb kompromisszumos megoldásokat. Ez különösen hasznos, ha a különböző tulajdonságok (például teljesítmény, tömeg, költség) között nehéz egyensúlyt találni.

#### 3.2.1. A számítások lépései

A fejlesztett kód egy Deep Q-Learning (DQN) algoritmust használ a különböző méretekkel rendelkező egyedek optimalizálására. A cél az volt, hogy megtaláljuk a legjobb méretkombinációkat, amelyek a legmagasabb jutalom értékeket eredményezik.

#### 3.2.2. Az Optimalizáció Előnyei

Az optimalizáció során az 10 legjobb egyed eredményeit az 1. táblázat foglalja össze.

- A jutalom érték az egyed minimális hajtító feszültségének és az egyed költségének aránya.
- Az ár (\$) az egyed költsége a megadott paraméterek alapján.

Ez a táblázat segít megérteni az egyedek közötti különbségeket és az optimalizáció hatékonyságát. A DQN algoritmus sikeresen optimalizálta a méreteket, hogy a legjobb eredményeket érje el. Az elemzés alapján helyezett egyed a legjobb kompromisszumos megoldásokat nyújtja a vizsgált kritériumok alapján. Az első helyezett egyed a legjobban teljesít, köszönhetően a magas  $P_{\max}$  értéknek és a viszonylag alacsony költségnek. A VIKOR módszer hatékonyan rangsorolta az

egyedeket a többkritériumos döntéshozatal szempontjából, figyelembe véve a különböző jellemzők közötti kompromisszumokat.

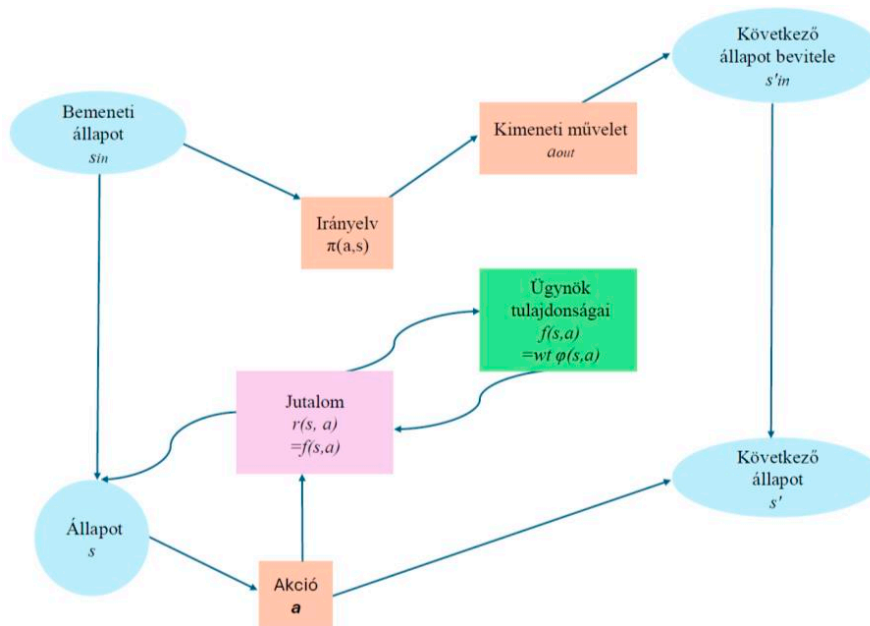
### Hatékonyabb és Fenntarthatóság

Az optimalizált pelleték hatékonyabb energiaátalakítást biztosítanak, ami hozzájárul az energiamegtakarításhoz és a fenntarthatósághoz. A jobb hatékonyság kevesebb energiafelhasználást és alacsonyabb környezeti terhelést jelent.

## 4. KÖVETKEZTETÉSEK

A termoelektromos pelleték optimalizációja jelentős előnyökkel jár a teljesítmény, tömeg és

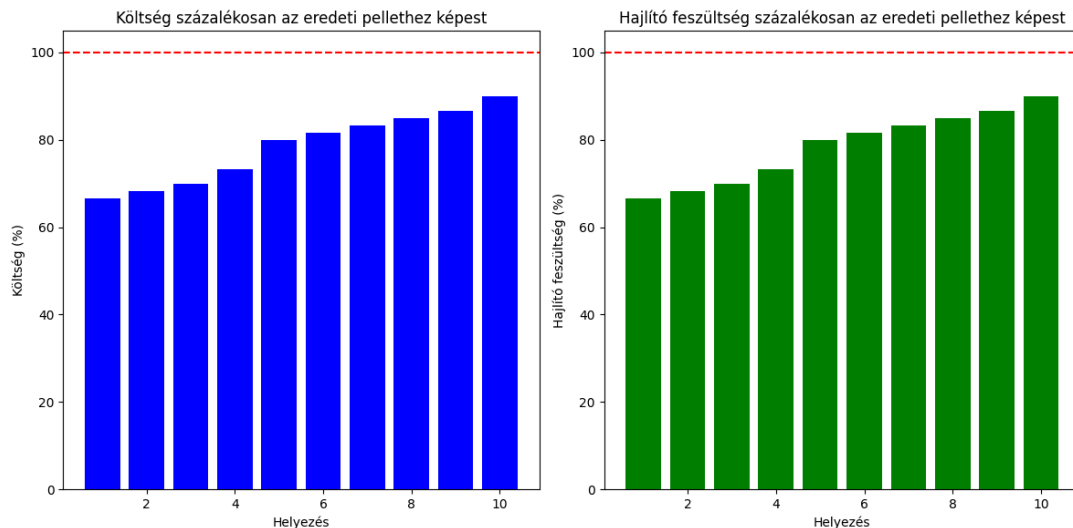
költség szempontjából. Az optimalizációs eljárások, mint a genetikus algoritmus, a Deep Q-Learning és a VIKOR módszer alkalmazása segít megtalálni a legjobb kompromisszumos megoldásokat. Ezek az optimalizált pelleték nemcsak hatékonyabb energiaátalakítást biztosítanak, hanem gazdaságosabbak és fenntarthatóbbak is, ami hozzájárul a hosszú távú energetikai és környezeti célok eléréséhez. Ezen eredmények alapján további kutatások javasoltak a különböző anyagok és geometriai kialakítások hatékonyságának és teljesítményének további javítása érdekében. A cél az, hogy a termoelektromos technológiát egyre inkább integrálják a fenntartható gyártási folyamatokba.



1. ábra: Az RL keretrendszer sematikus ábrázolása [19]

1. táblázat: A 10 legjobb egyed eredményei

Helyezés	Magasság (mm)	Jutalom	Ár (\$)	Hajlító feszültség (MPa)
1	0,40	-69,00	0,34	68,6589
2	0,41	-70,72	0,35	70,3754
3	0,42	-72,45	0,36	72,0918
4	0,44	-75,90	0,37	75,5248
5	0,48	-82,80	0,41	82,3907
6	0,49	-84,52	0,42	84,1071
7	0,50	-86,25	0,43	85,8236
8	0,51	-87,97	0,43	87,5401
9	0,52	-89,70	0,44	89,2566
10	0,54	-93,15	0,46	92,6895



2. ábra: A 10 legjobb egyed eredményei az eredeti geometriájú pellethez képest

## 5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Albert, J. & Takács, Á., 2020. Application aspects of the VIKOR algorithm in material selection decisions. *GÉP*, 71(7-8), pp. 65-68.
- [2] Albert, J. & Takács, Á., 2022. The VIKOR Algorithm in Material Decision Support. *Design of Machines and Structures*, 12(2), pp. 5-13.
- [3] Albert, J. & Takács, Á., 2024. Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling. *Acta Polytechnica Hungarica*, 21(2), pp. 217-229.
- [4] Alzghoul, M., Sarka, F. & Szabó, F. J., 2023. Improving Chatter Performance of a Lathe Spindle through Grapho-Optimization. *Design of Machines and Structures*, 13(2), pp. 5-12.
- [5] Horváth, G., 1998. *Neurális hálózatok és műszaki alkalmazásuk*. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
- [6] Jahan, A. & Edwards, K. L., 2013. *Multicriteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design*. hely nélkül.:Elsevier.
- [7] LeBlanc, S. és mtsai., 2014. Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 32. kötet, pp. 313-327.
- [8] Li, S. & Wu, T., 2022. Deep reinforcement learning-based decision support system for transportation infrastructure management under hurricane events. *Structural Safety*, 11, 99. kötet, p. 102254.
- [9] Lowhorn, N. D. és mtsai., 2009. Development of a Seebeck coefficient Standard Reference Material. *Applied Physics A*, 8, 96(2), pp. 511-514.
- [10] Opricovic, S., 1998. Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems..
- [11] Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L., 1986. *Parallel Distributed Processing*. hely nélkül.:The MIT Press.
- [12] Sootsman, J., Chung, D. & Kanatzidis, M., 2009. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 11, 48(46), pp. 8616-8639.
- [13] Sutton Richard S. & Barto Andrew G., 2014. *Reinforcement Learning: An Introduction*. hely nélkül.:MIT Press.
- [14] Szabó, F. J., 2016. Evolúciós alapú eredményértékelés. *GÉP*, 67(7-8), pp. 89-96.
- [15] Szabó, F. J., 2016. Multidisciplinary Optimization of Journal Bearings, using a RVA Evolutionary Type Optimization Algorithm. *Acta Polytechnica Hungarica*, 12.13(7).
- [16] Szabó, F. J., 2022. Sigmoid görbék a terméktervezésben. *GÉP*, 73(3-4), pp. 52-55.
- [17] Szabó, F. J., 2023. Investigation and Comparison of Iteration Curves of Optimization Algorithms. *Design of Machines and Structures*, 13(2), pp. 93-112.
- [18] van Otterlo, M. & Wiering, M., 2012. Reinforcement Learning and Markov Decision Processes. *Reinforcement Learning*, pp. 3-42.
- [19] Wahid, A., Faiud, I. & Mason, K., 2023. Integrating Renewable Energy in Agriculture: A Deep Reinforcement Learning-based Approach. 8.

# MŰSZAKI MŰANYAGOK FORGÁCSOLÁSÁNAK VIZSGÁLATA

## INVESTIGATION OF THE CUTTING OF ENGINEERING PLASTIC MATERIALS

*Kovács Róbert<sup>\*</sup>, Korzenszky Péter<sup>\*\*</sup>, Keresztes Róbert<sup>\*\*\*</sup>*

**ABSTRACT** During the turning process, we have investigated the problems that can arise, such as avoiding the formation of flow chips, which are eliminated by sawing the workpiece longitudinally. Furthermore, we measured the main cutting forces acting on the blade and the cutting forces in the feed direction at different feed rates, depths of grip and cutting speeds, and investigated possible correlations between these.

Chips produced at different cutting parameters and with different materials were investigated. All turning operations are carried out without emulsion and all other coolants for environmental and other reasons.

The specific cutting resistances have been determined, which are important for determining good tool utilisation and also for planning the economics of machining

The aim of this research is to define machining parameters that can be used in practice for the engineering plastics under investigation, so that the machining of these materials by turning can be made more economical.

### 1 A TÉMA AKTUALITÁSA, JELENTŐSÉGE

Napjainkban a műanyagok szerepe rendkívül megnőtt mind a mindennapi életünk során, mind az iparban. Gyakorlatilag, bárhova tekintünk műanyagokat látunk. Sok esetben elegendő, ha fröccsöntéssel, vagy extrudálással készítik a műanyag alkatrészeket, illetve egyéb termékeket. Mára azonban műanyagok felhasználási területe rendkívül szerteágazóvá vált. Nem csak másodlagos helyeken használják (burkolatok, díszelemek), hanem teherviselő elemként is, illetve megesis, hogy nagy pontosságú illesztésre is szükség lehet műanyagok esetén. Ilyenkor már szükség lehet a sok esetben a forgácsolással való megmunkálásra, itt kiemelkedő helyen a marás és az esztergálás áll. Forgástestek esetében nagy valószínűséggel az esztergálás a megfelelő forgácsolási mód. Már az acélok esztergálásánál is nagy szerepe van a folyó forgács elkerülésére, ez a műanyagoknál azonban nehezebb feladata az anyag jellegénél fogva. Erre az iparban jelen vannak már a kifejezetten műanyagok forgácsolására kifejlesztett esztergákések, lapkák, és egyéb szerszámok.

Természetesen itt is mint minden gyártási folyamatnál nagy szerepe van a termelékenységnek, illetve a

gazdaságosságnak, ezért elengedhetetlen a forgácsolási paraméterek megfelelő meghatározása, illetve annak beállítása szerszámgépeken. Ezzel kapcsolatban merül fel a szerszámozás kérdése is, mivel a speciális műanyag megmunkáló szerszámok ára igencsak magas. Alacsony darabszámnál nem biztos, hogy kifizetődő a megvásárlásuk, ilyenkor jönnek szóba a más anyagokhoz ajánlott megmunkáló szerszámok, például lágyabb fémekhez valóak, mint például az alumíniumhoz. A kutatásom során alumínium forgácsolásához való esztergákés lapkát használtam.

### 2 BEVEZETÉS

Az esztergálási eljárás során vizsgáltuk a felmerülő problémákat, mint például a folyóforgács kialakulásának elkerülése, mely a munkadarab hosszanti irányban történő befűrészelésével kerül kiküszöbölésre. Továbbá mértük a késre ható fő-, illetve az előtolás irányú forgácsoló erőt, különböző előtolásoknál, fogásmélységeknél és különböző forgácsoló sebességeknél, melyek között megvizsgáltuk a lehetséges összefüggéseket.

Vizsgálatra kerültek a különböző forgácsolási paraméterekkel és különböző anyagoknál keletkezett forgácsok. Az összes esztergálás a környezetvédelem és egyéb szempontok miatt emulziós és minden más hűtőkenő folyadék nélkül került lefolytatásra.

Meghatároztuk a fajlagos forgácsolási ellenállásokat, melyek fontosak a szerszám jó kihasználtságának meghatározásához és a megmunkálás gazdaságának tervezéséhez is alkalmazható

A kutatás célja, a gyakorlatban is jól használható forgácsolási paraméterek behatárolása a vizsgált műszaki műanyagokra, mellyel az esztergálással való megmunkálása az adott anyagoknak gazdaságosabbá válhat.

### 3 A MŰSZAKI MŰANYAGOK

A műszaki műanyagok olyan polimerek, amelyek széles hőmérséklettartományban kitűnő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezért sok konstrukcióban szerkezeti anyagként használhatók, gyakran előnyösebbek a fémeknél. Kiváló mechanikai jellemzőik mellett jó a kémiai ellenálló képességük, főleg elektromos szigetelők.

<sup>\*</sup> doktorandusz, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

<sup>\*\*</sup> habilitált egyetemi docens, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

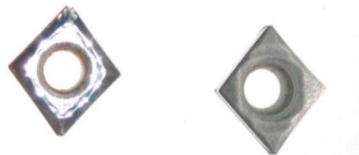
<sup>\*\*\*</sup> egyetemi docens, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem





Az adatok gyűjtése Catman szoftver segítségével történik, mely gyűjti az adatokat illetve grafikusán is ábrázolja a fellépő erőket az idő függvényében. Mentés után pedig táblázatkezelő programmal megnyithatóak a mérési eredmények.

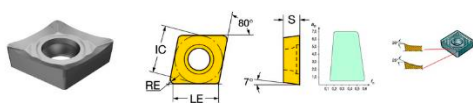
### 3.4 Alkalmazott esztergakés lapkák



5. ábra - Alkalmazott lapkák

A képeken látható bal oldali lapka egy polírozott felületű lapka mely típusa:

CCGX 09 T3 04 AL H10



6. ábra - A lapkák geometriája [6]

A jobb oldali lapka pedig egy normál préselt felületű lapka: CCGT 09 T3 04 AS IC20 [6]

### 3.5 A vizsgált anyagok

A méréseimhez a műszaki gyakorlatban leginkább használt polimeretek választottam. A három különböző polimer a Poliamid 6, az Ultra Nagy Molekulatömegű Polietilén és a Polioximetilén. A polimerek főbb tulajdonságait és gyakori felhasználási területeit a következőekben röviden összefoglalom.

#### Poliamid 6 (PA6)

Alkalmazási területe általában: csapágyerselyek, fogaskerekek, fogaslécok, szállító szalag görgők, szigetelőelemek, tömítőgyűrűk, vágólapok, lánckerekek és még sok szerteágazó alkalmazási terület az iparban.

Átlagos szakítószilárdsága 70-110MPa. Alkalmazási hőmérséklete a -40-tól a +140°C-ig is terjedhet. Jó siklási tulajdonságok és jó kopásállóság jellemzi. Hátránya viszont, hogy nedves környezetben képes a vizet megkötni és ezáltal megváltoznak a mechanika tulajdonságai és a méretei is a vízfelvételből adódó duzzadása miatt.

Megmunkálása lehetséges különböző forgácsolási eljárásokkal, mint a fúrás, marás, esztergálás, fűrészelés, dörzsárazás, stb. Alkalmazható szénacél, gyorsacél, keményfém, gyémánt. Hűtés alkalmazása megengedett és nagy sebességeknél ajánlott is. [7]

#### Ultra nagy molekulatömegű polietilén (PE HD1000)

Alkalmazási területe általában siklócsapágyak, csúszóvezetékek, vágóasztalok, élelmiszeripari alkalmazás, csúszda- és tároló bélések szemcsés

anyagmozgatásnál szigetelők, görgők, kis terhelésű fogaskerekek, árnyékolók a nukleáris iparban.

Viszonylag alacsony folyáshatár 20-24MPa, nagy szívósság, jól megmunkálható, időjárásálló, csillapítóképesség, jó vegyszerállóság, jól ellenáll az abráziós kopásnak. Nedvesség hatására nem duzzad.

Megmunkálása fém-, illetve famegmunkáló szerszámokkal. Alkalmazható szénacél, gyorsacél, keményfém, gyémánt, éles kivitelben. Nagy forgácsoló sebesség érdekében hűtés javasolt. [7]

#### Polioximetilén kopolimer POM C

Alkalmazási területe kis modulú fogaskerekek, precíziós mérettartó gépalkatrészek, rugók, szeleppülékek, villamos szigetelő elemek, vízzel érintkező gépalkatrészek, görgők, stb.

Viszonylag nagy folyáshatár 70-80MPa, jó siklási tulajdonságok. alkalmazása a -50-től a +120°C hőmérsékletig terjedhet, jó kifáradási és csillapítási képesség, nagy keménység, rendkívül jól forgácsolható automata gépeken is. Víz hatására nem duzzad. Ez a változat egy kopolimer változat mely a homopolimer társához képest jobb siklási illetve kopási tulajdonságokkal rendelkezik és 80°C-ig víz alatt is alkalmazható.

Megmunkálása lehetséges különféle forgácsoló eljárásokkal, szénacéllal, gyorsacéllal, keményfémmel, illetve gyémánttal is, éles kivitelben. A legjobban forgácsolható műanyagok közé tartozik. Nagy forgácsoló sebességekhez hűtés javasolt. [7]

#### 3.6 A mérések során alkalmazott paraméterek

A vizsgálatok során a forgácsolósebesség 500, 300, illetve 100m/min volt, mindegyik sebesség esetén a fordulatonkénti előtolás értéke 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,5 mm/fordulat volt. A fogásmélység értékek pedig minden beállított forgácsolósebesség és előtolás esetén 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2 illetve 5mm volt.

A táblázaton belül az egy-egy bekeretezett rész az egy programba foglalt paramétereket jelöli.

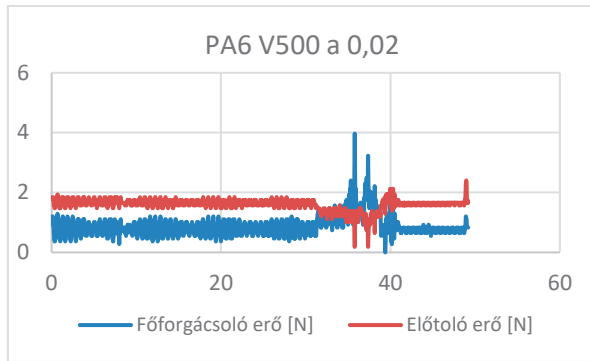
Ebből látható, hogy egy forgácsoló programban az forgácsolási sebesség és a fogásmélység állandó és az előtolás volt változtatva. Az előtolás a kés 10mm hosszirányú elmozdulása után volt változtatva és így jött ki az 50mm hosszú megmunkált felület minden programban.

## 4 A VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

A diagramok címében mindig meg van jelölve az anyag rövidített neve a forgácsoló sebesség és a lapka típusa. A „p” jelölés jelenti a polírozott lapkát, az „s” jelenti a normál felületű lapkát.

Próbaméréseket végeztem a tényleges mérések előtt, mely során megállapításra került, hogy az eredetileg tervezett 0,02mm-es fogásmélység során olyan alacsony

forgácsoló erők keletkeznek, melyek mérése nem hoz jól értékelhető eredményeket, ezért a további méréseket az előzőekben bemutatott táblázatnak megfelelően 0,1mm fogásmélységtől kezdtem.



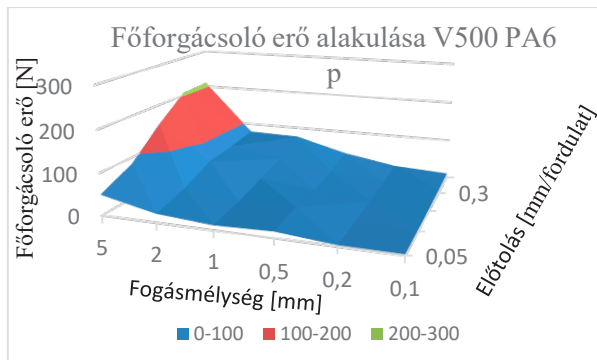
72. ábra - PA6 próbamérése 0,02 mm fogásmélységgel

A diagramból jól látható, hogy a ténylegesen mért erők, olyan minimális értékűek, hogy nehezen lehet elkülöníteni a gép rezgéséből adódó a késre ható erőktől.

PA 6 , forgácsoló sebesség: 500m/min

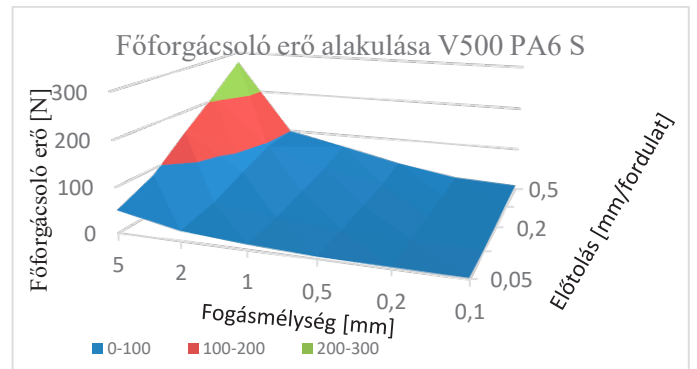
A méréseket próbamérések elvégzése után a PA 6-al kezdtem, 500 m/min forgácsoló sebességgel.

A főforgácsoló erő:



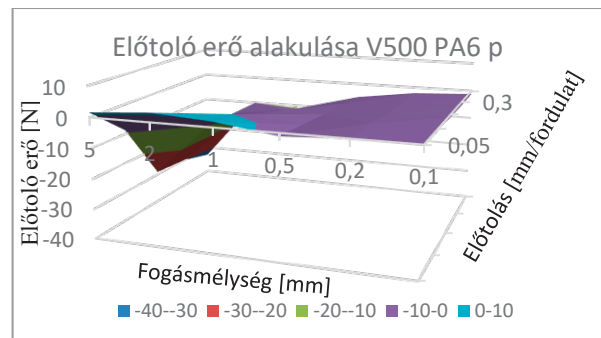
3. ábra - A főforgácsoló erő alakulása PA6

A diagram jól mutatja a főforgácsoló erő értékeit az előtolás, illetve a fogásmélység függvényében. A mérés során megjegyezhető, hogy a diagramban jelölt legnagyobb forgácsolási paramétereknél már erőteljes hanghatás is kísérte az esztergálást, amely valószínűleg a rezgésekből adódóan jöhetett létre.



8. ábra - A főforgácsoló erő alakulása PA6

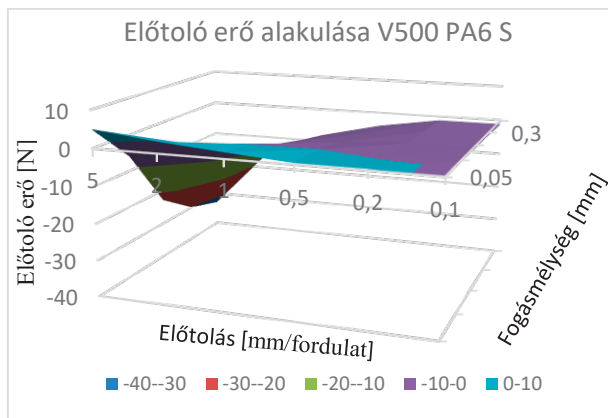
A polírozott lapkával végzett esztergálás során a forgácsoló erőben csak a felső előtolási és fogásmélységi tartományokban tapasztalható változás, konkrétan az 5 és 2 mm-es fogásmélységgel és 0,5mm/fordulat értékekkel végzett esztergálásoknál. A többi paraméternél nem tapasztalható jelentős eltérés. A 300, illetve 100 m/min forgácsolósebességgel végzett mérések során a főforgácsoló erő mértéke hasonló eredményeket mutatott, illetve a polírozott lapka minhárom esetben alacsonyabb főforgácsolóerő értékeket mutatott.



9. ábra - Előtoló erő alakulása PA6

Jól látszik, hogy az előtoló erő nagyrészt negatív értékeket vesz fel amely azt mutatja, hogy a esztergákést nem tolni kell hanem húzni, tehát visszatartani, mert a munkadarab úgymond magára rántja a kést.

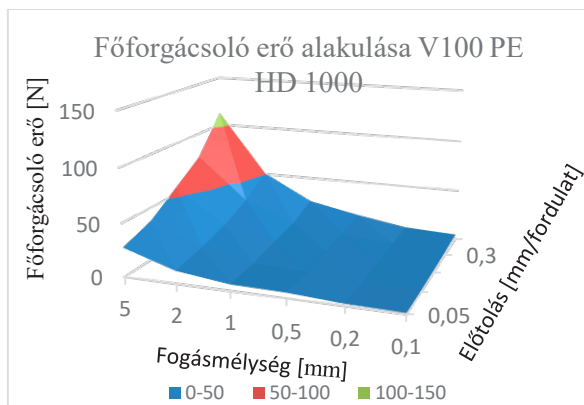
Az előtoló erő csak egy bizonyos előtolási érték felett vált negatívra, amelyet példaként az alábbi diagram 500 m/min forgácsoló sebesség és 5mm-es fogásmélység mellett szemléltet.



4. ábra - Előtoló erő alakulása PA6

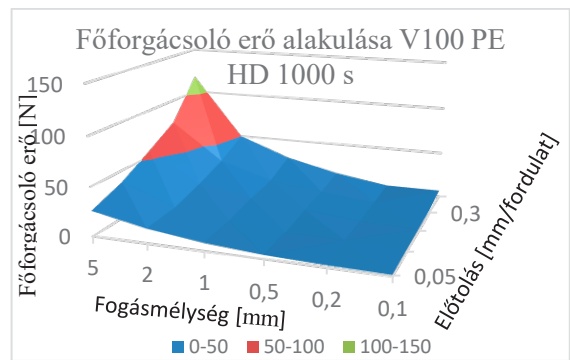
Az előtoló erő már más eltéréseket mutatott. A polírozott lapkával végzett forgácsolás esetén nagyrészt kevésbé húzta a munkadarab magára kést, tehát kisebb negatív erők keletkeztek, illetve pozitív tartományban nem mutatott ennek ellenére jelentősen nagyobb erőket, mint a normál lapkával, az összes beállított paraméter esetén. Alsó tartományokban ez az eltérés minimális értékeket képvisel, azonban a felső tartományokban elérte akár az 50% százalékos eltérést, tehát ennyivel kisebb negatív erő keletkezett a normál felületű lapkával.

A 300, illetve 100 m/min forgácsolósebességgel végzett mérések során az előtoló erő jellege hasonló eredményeket mutatott. A forgácsolósebesség csökkentésével csökkenő tendenciát mutatott az előtoló erő is.



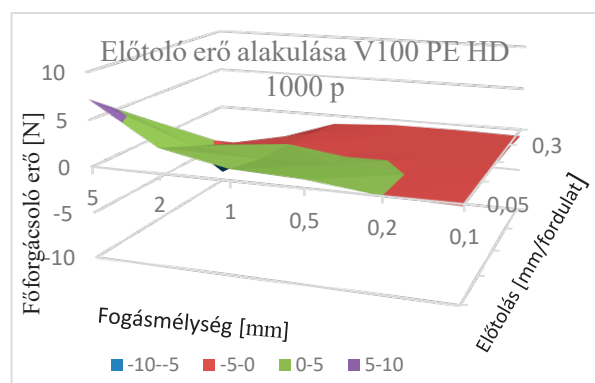
11. ábra - Főforgácsoló erő alakulása PE HD 1000

Ennél a forgácsoló sebességnél is elmondható a főforgácsoló erőről, hogy viszonylag egyenletesen változik, nem figyelhetők meg kiugrások sehol.



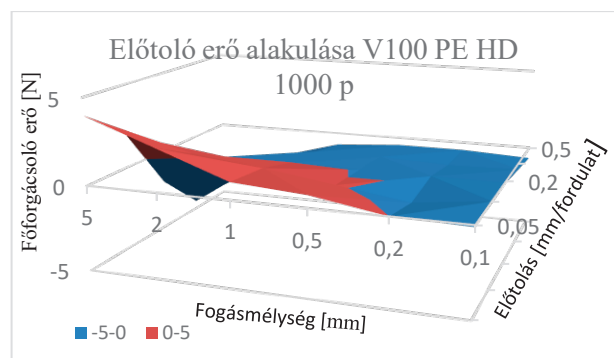
12. ábra - Főforgácsoló erő alakulása PE HD 1000

A mérési eredmények azt mutatták, hogy ennél a forgácsoló sebességnél számottevő eltérés nem figyelhető meg a főforgácsoló erőben, a két vizsgálatba bevont lapkával történő forgácsolás esetén.



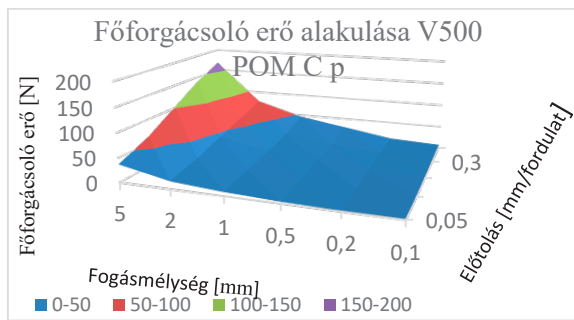
13. ábra - Előtoló erő alakulása PE HD 1000

Az előtoló erő hasonlóan viselkedett ennél a forgácsoló sebességnél is mint az előzőeknél, annyi eltéréssel, hogy kis előtolás esetén nagyobb pozitív erőket vett fel az előtoló erő.



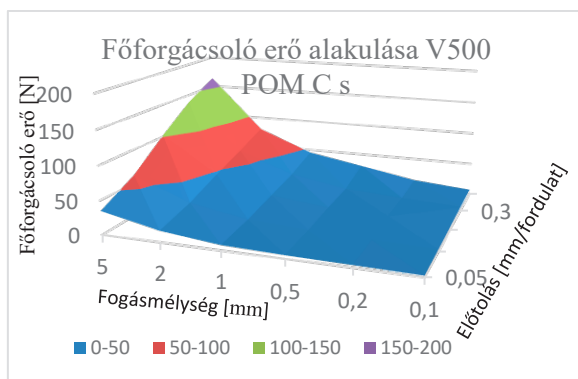
14. ábra - Előtoló erő alakulása PE HD 1000

Hasonlóan az előzőekhez, ennél a forgácsoló sebességgel végzett méréseknél sem tapasztalható számottevő eltérés az előtoló erőben a két különböző lapkával történő esztergálásnál. Annyi megfigyelhető hogy a polírozott lapkánál nagyobb pozitív értékű előtoló erők keletkeztek.



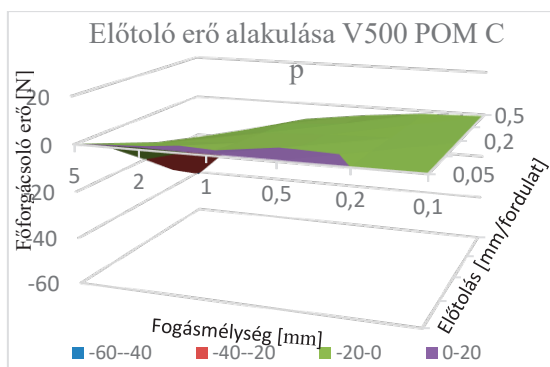
15. ábra - Főforgácsoló erő alakulása POM C

Megfigyelhető, hogy a főforgácsoló erő egyenletesen változik az előtolás és a fogásmélység függvényében. Nem mutat sehol nagyobb kiugrásokat.



16. ábra - Főforgácsoló erő alakulása POM C

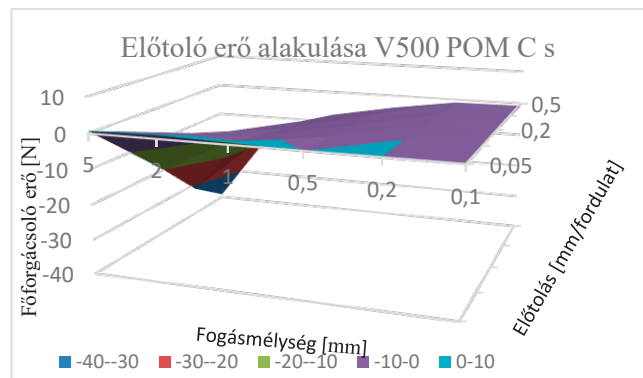
Ennél a forgácsoló sebességnél lényegében semmilyen jelentős eltérést nem mutatott a polírozott lapka a normál felületűhöz képest. A 300 és a 100m/min forgácsolósebesség mellett hasonló jellegű értékeket mutatott a főforgácsolóerő



17. ábra Előtoló erő alakulása POM C

Az előtoló erőben kisebb pozitív erők jelentek meg, mint általában az előzőekben vizsgált polimerek esetén.

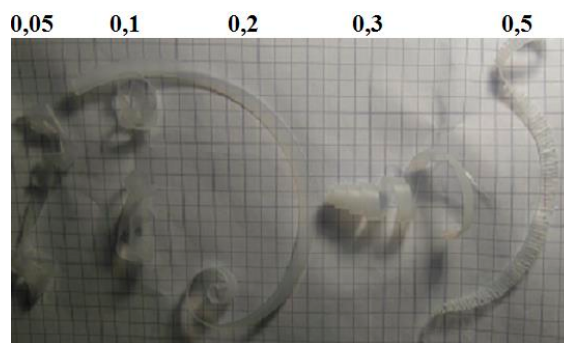
Hasonlóan, mint a forgácsoló sebességnél az előtoló erőben sem volt észlelhető, számottevő eltérés a két különböző felületű lapkával történő forgácsolás között.



185. ábra - Előtoló erő alakulása POM C

#### 4.1 Forgácsolóképek alakulása:

A korábban már említett okokból a gyakorlatban fontos szempont a folyóforgács elkerülése ezért érdemes a mérések során ezen szempontokat is figyelembe venni. A forgácsok szilárdsági tulajdonságaira jelen kutatásban nem térek ki, de vizuálisan meg vizsgálom és értékelem.

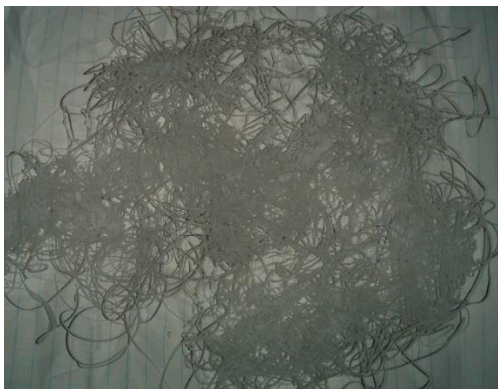


19. ábra Forgácsolóképek alakulása PA6

A PA6 esetén megfigyelhető, hogy az előtolás növelésével a fólia vastagságú forgácsoló kezdve eljutunk az egész vastag, sőt töredezett forgácsig. Az ábrán látható forgácsolóképek alakultak ki az 5 és a 2 mm fogásmélységeknél, azonban ez a fogásmélység értékek alatt már végig folyó forgács keletkezett.

Tehát megfelelően nagy forgácsoló sebesség, előtolás és fogásmélység esetén elkerülhető a folyó forgács kialakulása, és ha nem is apró elemi forgács, de kisebb darabos forgács keletkezhet.

A PE HD 1000 esetén már a munkadarabok hagyományos esztergagépen történő előkészítése során várható volt, hogy az általunk használt forgácsolási paraméterek során minden esetben folyó forgács fog keletkezni. Ez a mérések során így is történt, minden esetben folyóforgács keletkezett, melyet csak a kialakított forgácsoló horony szakított meg. Megállapítható, hogy az iparban történő megmunkálása esetén fokozott figyelmet kell fordítani a folyó forgács kialakulásából eredő problémák kiküszöbölésére.



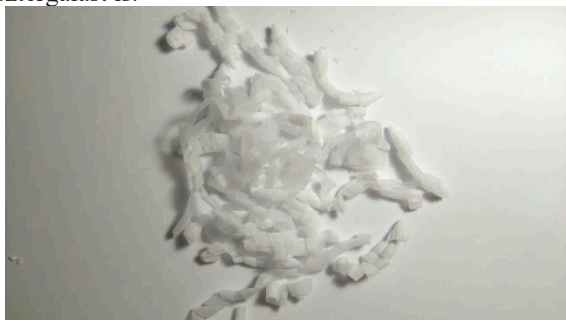
206. ábra - Forgácsok PE HD 1000

A POM C esetében megfigyelhető volt, hogy a 5mm fogásmélység mellett 0,5 illetve 0,3 mm/fordulat előtolással végzett esztergálás esetén apró darabos forgács keletkezett, ami igen kedvezőnek mondható, mivel nem okoz gondot a forgács. Azonban ezek az értékek alatt már átmeneti, illetve folyó forgács keletkezett, ami viszont az esetek döntő többségében könnyen szakadó volt.



7. ábra Forgácsok POM C

A POM C esetében a legmagasabb előtolás és fogásmélység értékeknél még apró forgács keletkezett, de a továbbiakban már csak folyó forgács keletkezett beleértve a következő forgácsolási sebességgel végzett esztergálást is.



22. ábra Átmeneti forgács POM C

#### 4.2 A fajlagos forgácsolási ellenállások alakulása

A fajlagos forgácsolási ellenállás azt mutatja meg, hogy mekkora erő szükséges 1mm<sup>2</sup> anyag leválasztásához. Jól látható, hogy kis előtolás és kis fogásmélység esetén magasabb értékeket mutat, mint ugyanezen paraméterek

magasabb értékeinél. Azért lényeges vizsgálni, mivel így könnyebben meghatározható a szerszám kihasználtsága és a forgácsolás gazdaságossága is optimalizálható.

$$\text{Számítása: } k_s = \frac{F_f}{f \cdot a} \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} \right]$$

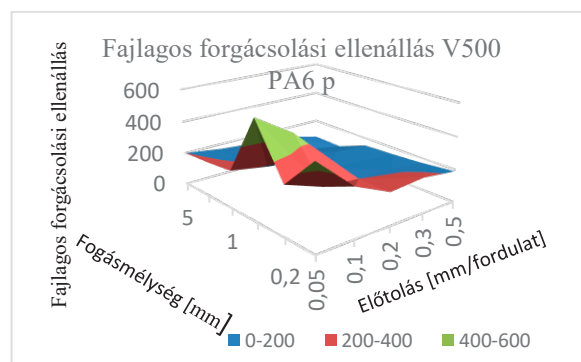
Ahol:

F<sub>f</sub> – főforgácsoló erő [N]

f – előtolás [mm/fordulat]

a – fogásmélység [mm]

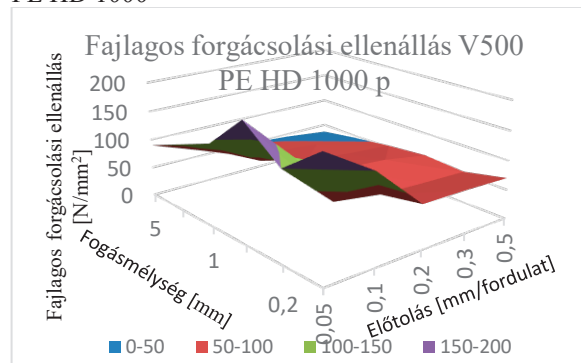
Minden anyaghoz kidolgoztam az összes vizsgált forgácsoló sebességhez, illetve mindkét kés esetén a diagramokat, ezeket kiértékeltem és ezeket összefoglalva bemutatom anyagonként egy-egy diagram segítségével a fajlagos forgácsolási ellenállás változását.



23. ábra - Fajlagos forgácsolási ellenállás PA6

A PA esetén nem teljesen egyenletes a változás, de ennek ellenére jól látszik, hogy a fajlagos forgácsolási ellenállás értéke a fogásmélység és az előtolás növelésével együtt csökken és egy bizonyos érték után szinte nem is változik.

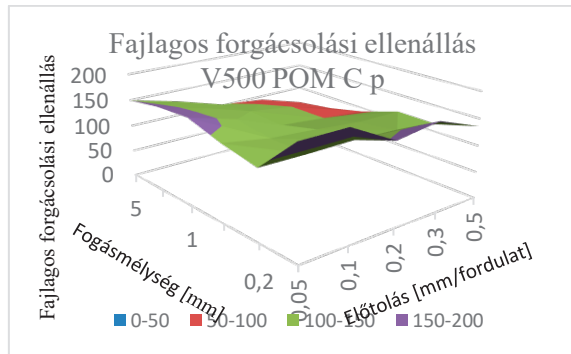
PE HD 1000



248. ábra - Fajlagos forgácsolási ellenállás PE HD1000

A PE HD 1000 esetén már kisebb az fajlagos forgácsolási ellenállások értéke, azonban arányaiban sokkal eltérőbb értékeket mutat a diagram az eltérő fogásmélység és előtolás beállításoknál. Itt is megfigyelhető, hogy egy bizonyos területen szinte állandó az értéke az fajlagos forgácsolási ellenállásnak.

## POM C



25. ábra - Fajlagos forgácsolási ellenállás POM C

A POM C esetén a fajlagos forgácsolási ellenállások értékei az előzőekben vizsgált PA6-nál és PE HD 1000-nél megállapított értékek között helyezkednek el. Az előzőekben megfigyelhető szinte állandó értékű terület itt elmarad, de itt szűkebb határok között mozognak az értékek a teljes vizsgált tartományban.

### 4.3 A fajlagos forgácsolási ellenállás és a szakítószilárdság aránya

Az vizsgálataim során igyekeztem, valamilyen összefüggést keresni a szilárdság és a forgácsolásnál fellépő erők között, mely alapján előre meg lehet becsülni a fellépő főforgácsoló erő nagyságát.

Az alkalmazott összefüggés:

$$\frac{k_s}{\sigma_B} [-]$$

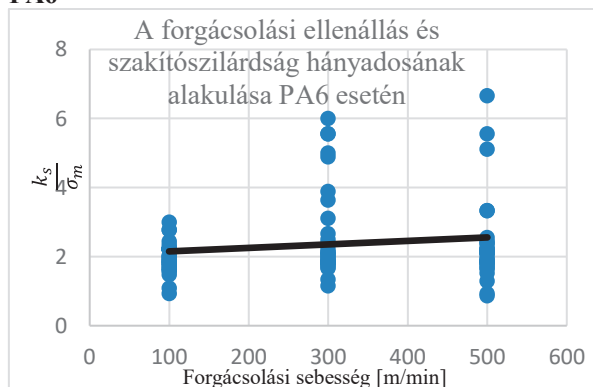
Ahol:

$k_s$  – fajlagos forgácsolási ellenállás [ $\frac{N}{mm^2}$ ]

$\sigma_B$  – a polimer szakítószilárdsága [ $\frac{N}{mm^2}$ ]

Az eredmény egy dimenzió nélküli arányszám, melynek változását az alábbiakban bemutatok.

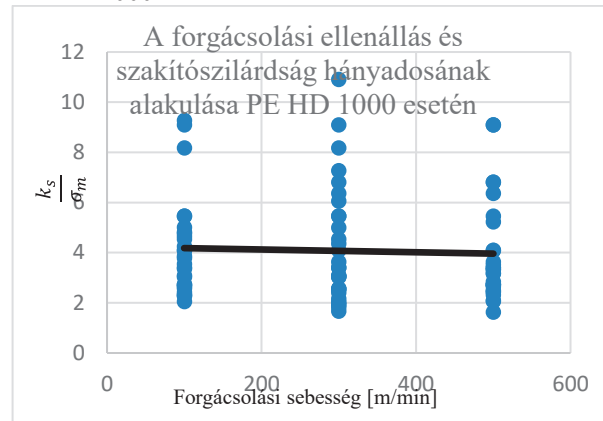
## PA6



26. ábra - A forgácsolási ellenállás és szakítószilárdság hányadosának alakulása PA6 esetén

A diagram jól mutatja, hogy az arányok a 2 érték körül helyezkednek el főként. Az egyenes az átlaguk változását mutatja a forgácsolási sebesség változtatásával.

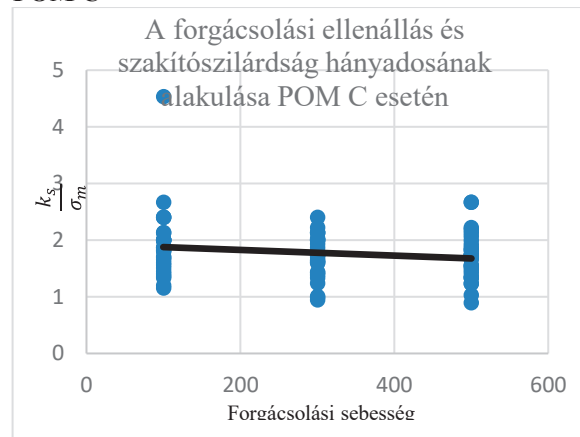
## PE HD 1000



27. ábra - A forgácsolási ellenállás és szakítószilárdság hányadosának alakulása PE HD 1000 esetén

A PE HD 1000-nél ellentétes jelenség figyelhető meg, mint a PA6-nál. Az általam felállított arány átlagosan a forgácsoló erő növekedésével csökken. Itt az arány 4 körül helyezkedik el.

## POM C



28. ábra - A forgácsolási ellenállás és szakítószilárdság hányadosának alakulása POM C esetén

POMC esetén is hasonlóan változik az arány, mint a PE HD 1000-nél. Az is jól látszik, hogy az értékek, hasonló eloszlást is mutatnak. Az arány az 1,5 és a 2 között veszi fel átlagosan az értéket.

## 5 ÖSSZEFOGLALÁS

Jól látható, hogy a különböző polimerek eltérően viselkednek az esztergálás során, illetve más-más erők lépnek fel azonos forgácsolási paraméterek esetén, különböző anyagoknál.

A PA6 esetében mindkét lapkával és megfigyelhető volt a forgács típusok keletkezése is, mely az általam vizsgált forgácsolási paraméterek felső tartományában kedvező képet mutatott, mivel ha elemi forgácsot nem is

sikerült elérni, de átmeneti forgács keletkezett ezen tartományokban. A főforgácsoló és előtoló erőket, illetve a fajlagos forgácsolási ellenállások alakulását diagramokon ábrázoltam. Mindkét felületű lapkával megvizsgáltam és látható volt az eredményekből, hogy csak a felső forgácsolási paramétereknél volt megfigyelhető számottevő változás a főforgácsoló és az előtoló erőben, míg a főforgácsoló erőben a polírozott felületű lapkánál kisebb értékek mutatkoztak, addig az előtoló erőben nagyobbak, azonban ezek sokkal kisebb eltérések, mint a főforgácsoló erőnél.

A PE HD 1000 esetén jelentősen kisebb erők léptek fel a főforgácsoló erőnél, és az előtoló erőnél is. Gyakorlatilag a vizsgálat során is minden esetben folyó forgács keletkezett. Itt is ugyancsak a polírozott lapkánál a felső forgácsolási beállítások esetén alakultak kisebb főforgácsoló erők, illetve nagyobb előtoló erők. Azonban itt már jóval kisebb eltérés mutatkozott, mint a PA6-nál.

POM C a legjobban forgácsolható anyagnak a vizsgált polimerek közül. A felső forgácsolási paraméterekkel való vizsgálat során már elemi forgács keletkezett és lefelé haladva a beállítási értékekkel átmeneti, majd könnyen szakadó folyó forgács keletkezett. A két különböző lapkával történő vizsgálatok során, itt már gyakorlatilag nem volt számottevő eltérés sem a főforgácsoló, sem az előtoló erőben.

A diagramokon ábrázolt fajlagos forgácsolási ellenállásokról elmondható összességében, hogy a kis fogásmélységek és kis előtolások esetén magas értékeket mutatott, míg nagy előtolás és nagy fogásmélység értékek esetén ennek az ellenkezője volt megfigyelhető, tehát alacsony forgácsolási ellenállások mutatkoztak. Ezek közül az utóbbi a kedvezőbb, gazdaságossági szempontból.

Először a POM C esetét tekintem, mivel ennél a meghatározott fajlagos forgácsolási ellenállás és szakítószilárdság arányok a gyakorlatban jól használható a fellépő fajlagos forgácsolási ellenállás becslésére a szakítószilárdság alapján és ebből meghatározható akár a várható fellépő főforgácsoló erő nagysága adott fogásmélység és előtoláshoz. Ez gyakorlati szempontból rendkívül előnyös lehet gyors kalkulációk, szerszám kiválasztás és még számos szempontból.

A PA 6 esetén az arány már nagyobb szórást mutatott, illetve itt a forgácsoló sebesség növelésével nőtt az érték. A nagyobb szórás ellenére ez is alkalmazható a fellépő fajlagos forgácsolási ellenállás megbecslésére, azonban figyelembe kell venni, hogy bizonytalanabb eredményt kapunk.

A PE HD 1000 esetén az arány hasonló szórást mutatott, mint a PA 6 esetén. Azonban itt a forgácsoló erő növekedésével csökken ez az arányszám értéke. Az említett nagyobb szórás ellenére ez is alkalmazható a forgácsolási adatok megbecslésére, igaz hasonlóan a PA 6 esetéhez, pontatlanabb mértékben. Ami ennél az

anyagnál kevésbé lényeges mivel kisebb erők lépnek fel a forgácsolásakor.

A vizsgálatok eredményei akár azonnal a gyakorlatban előnyösen alkalmazható, melyek figyelembevételével növelhető a megmunkálás gazdaságossága és mivel emulziós, illetve bármely más hűtés nélkül végeztem a méréseket, nem utolsó sorban környezetkímélőbbé is tehető a termelés, mely mellett ugyancsak gazdaságosabb is lehet a megmunkálás, mivel, ha nem szükséges hűtő kenő folyadék, akkor annak sem a kezeléséről, sem az elszállításáról sem kell gondoskodni. A meghatározott fajlagos forgácsolási erő és az anyag szakítószilárdság hányadosai pedig előnyösen használható és gyors, jó közelítésű eredményeket hoz, mely a gyakorlatban fontos szempont.

## 6 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] - Dr. Kalácska Gábor szerk., Dr. Keresztes Róbert, Dr. Kozma Mihály, Dr. Zsidai László - Műszaki Polimerek és Kompozitok a gépészmérnöki gyakorlatban, 3C-Grafika Kft., Gödöllő, 2007
- [2] - Fenyvessy Tibor, Fuchs Rudolf, Plósz Antal – Műszaki Táblázatok, NSZFI, Budapest, 2010
- [3] - Dr. Kári-Horváth Attila, Dr. Fledrich Gellért, Dr. Kakuk Gyula, Dr. Zsidai László - Gépgyártástechnológia, Szent István Egyetemi Kiadó Nonprofit Kft., Gödöllő, 2016.
- [4] - [www.dieterle-tools.de](http://www.dieterle-tools.de)
- [5] - [www.nct.hu](http://www.nct.hu)
- [6] - [www.sandvik.coromant.hu](http://www.sandvik.coromant.hu)
- [7] - [www.quattroplast.hu](http://www.quattroplast.hu)



# SZÁMÍTÓGÉPPSEL SEGÍTETT CÉLGÉPTERVEZÉS

## COMPUTER AIDED DESIGN OF SINGLE-PURPOSE MACHINES

Leskó Gergő\*, Simon Gábor\*\*, Rónai László\*\*\*

### ABSTRACT

Due to the high development of information technology, the automation of processes is becoming more and more feasible. The article deals with the computer-aided design of some phases of single purpose machine design. These machines can be used to perform a specific task. With the help of a self-developed program in C# programming language, some design operations of the target machine to be prepared for drilling-type operations can be speeded up.

### 1. BEVEZETÉS

Napjainkban az informatika igen gyors fejlődésének köszönhetően egyre több folyamat válik automatizálhatóvá, ezzel segítve a termelést az iparban. Az Ipar 4.0 filozófia lehetővé teszi az intelligens gyártást [1]. A [2] cikk hangsúlyozza az automatizált termelés, gyártás fontosságát. A tervezési feladatok komoly mérnöki odafigyelést, precizitást igényelnek, nincs ez másképp a célgéptervezésnél sem [3].

Az ilyen berendezések rendszerint egy meghatározott feladat elvégzésére alkalmasak nagy termelékenységgel. Feladat tekintetében ez rendszerint munkadarab manipulálási vagy megmunkálási folyamatokat jelent.

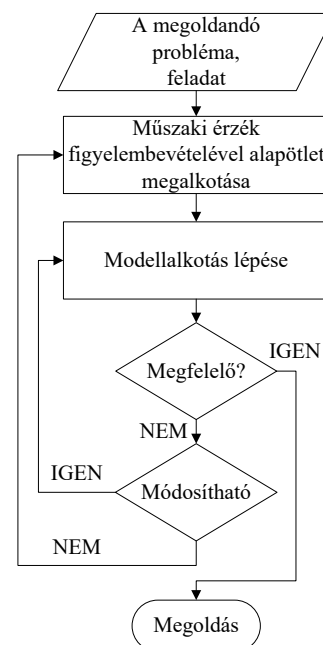
Jelen cikk célja egy olyan program fejlesztése, mely lehetővé teszi a célgéptervezés folyamatának meggyorsítását. Olyan előgyártmányok esetében használható a program, melynek készre munkálásához fúrás jellegű megmunkálások tartoznak, ezek lehetnek: magfurat elkészítése, süllyesztés, dörzsárazás, menetfúrás, élettörés vagy furatbővítés. A célgéptervezés automatizálási lehetőségeivel már egy korábbi cikk [4] foglalkozott, ott a furatfelismerő algoritmus működése részletes leírásra került.

A cikk a következőképpen strukturált: a 2. fejezet röviden, folyamatábrák segítségével bemutat két tervezési módszertani alapelvet, melyeket a gyakorlatban eredményesen lehet alkalmazni. A 3. fejezetben szó esik a célgéptervezés

folyamatáról, annak automatizálhatóságáról. Több olyan tervezési lépés/művelet is mutatkozik, melyek időszükségletét számítógépes program segítségével le lehet rövidíteni. A 4. fejezetben egy, a Visual Studio szoftverkörnyezetben fejlesztett, C# programozási nyelven megírt program bemutatása történik. A program jelenleg fúrás műveleteket tartalmazó megmunkálások esetére tudja elvégezni a funkcióösszevonásokat, ezzel segítve a tervező feladatát. Az utolsó fejezet az elvégzett munkát és a jövőbeni terveket tartalmazza.

### 2. TERVEZÉS MÓDSZERTANI ALAPELVEK

Az angolszász, avagy intuíción alapuló tervezési módszer a megérzésre épít elsősorban. A műszaki probléma ekkor nem logikai lépések egymásutánosságából kerül megoldásra, hanem a problémát intuitív módon próbálja kezelni, megoldani. A módszer egyes lépéseit az 1. ábrán látható folyamatábrára mutatja be.



1. ábra Intuíción alapuló megoldáskeresés folyamatábrája

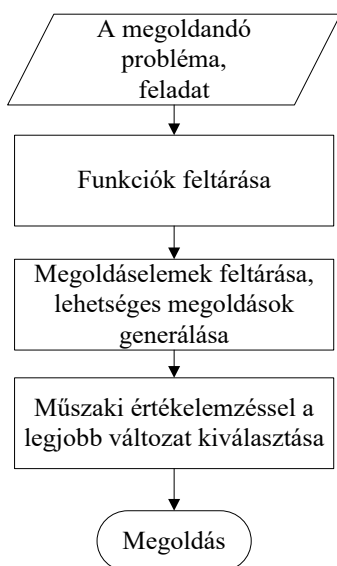
\*hallgató, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

\*\*mesteroktató, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

\*\*\*PhD, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

Hátránya, hogy a sok visszacsatolás következtében többször is vissza kell az alapötlethez térni. Továbbá a jó ötlet megszületését nem lehet időben megbecsülni, illetve megfelelő műszaki tapasztalat nélkülözhetetlen hozzá. Az ötletelésre több ismert technika is létezik, ezek a teljesség igénye nélkül pl. a brainstorming, 635-ös módszer, Delphi módszer.

A módszeres tervezés az előbb említett technikával szemben itt egy algoritmust kell alkalmazni, melyet végrehajtva el lehet jutni a megfelelő megoldáshoz, konstrukcióhoz. A módszernél a megoldandó problémát részfeladatokra kell tagolni, és a részfeladatok összes lehetséges megoldását szükséges feltárni. A feltárt megoldásváltozatok közül az egyes szempontok szerinti legjobb megoldást kell kiválasztani, és kialakítani. Egy konstrukció tervezésekor figyelembe kell venni a funkció-összevonás és szétválasztás elveit. Fő tervezési szempont az adott funkciót ellátó termék létrehozása megfelelő minőséggel párosulva, a költséghatékonyság mellett. Az angolszász módszerrel szemben a technika biztosítja a tervezési folyamatban történő folyamatos előrehaladást, továbbá a tervezés befejezési ideje jobban becsülhető. Ennek a technikának a folyamatábráját a 2. ábra szemlélteti. Itt nincsenek visszacsatolások, hanem sorrendiség figyelhető meg.



2. ábra A módszeres tervezéshez tartozó folyamatábra

### 3. CÉLGEPTERVEZÉS METODIKÁJA, AUTOMATIZÁLHATÓSÁGA

A célgépeket egy adott művelet, folyamat elvégzésére lehet használni, nagy termelékenység mellett. Építőszekrény elvet követve épülnek fel ezen berendezések, azaz nagyszámú

szabványosított alkatrészből, egységből tevődnek össze. A célgépeket nem, vagy csak limitáltan lehet átállítani más művelet elvégzésére.

Tervezéskor először meg kell vizsgálni a készre munkáláshoz szükséges műveleteket. A tervezés során szükséges több számítás elvégzése is, melyek érintik a megmunkálási műveletek időszükségleteit, és a megmunkálással kapcsolatos paramétereket, úgy, mint teljesítmény, főforgácsoló erő stb.

Ezután az egyes célgépi műveleteket össze kell vonni. Az összevonásnak 3 szintjét különböztetjük meg [3]. Az elsőfokú térbeli összevonás során az azonos támadási irányban lévő szerszámokat egy forgástengelyre kell összevonni. A másodfokú térbeli összevonásnál pedig, hogy a megegyező támadási irányokban lévő szerszámokat egy előtölő egységre lehessen összevonni. Az utolsó, azaz a harmadfokú térbeli összevonásnál a műveleti eszközöket szükséges a munkadarab köré csoportosítani, ez fogja szolgálni a célgépi pozíciókat.

A célgéptervezést 3 fázisra bontjuk. Az elsőben az egyes célgéptervezési folyamatokat megvizsgálva elmondható, hogy a munkadarab technológiai vizsgálata, megmunkálási módok kiválasztása, és készüléktervezés mind-mind olyan lépés, mely nem automatizálható, hiszen ezeket egy technológus hathatós közreműködésével lehet megtenni.

A célgéptervezés második fázisában lévő műveletek, úgy, mint a műveletek időbeli kiosztása, funkció összevonások, pozíció összekötések vizsgálata, időciklogram készítése, és a végleges technológiai tervezés automatizálható, számítógépes programmal gyorsítható.

A harmadik fázishoz tartozó aggregát egységek kiválasztása, szerszámok éltartam vizsgálata, diszpozíciós tervek készítése esetében több művelet is automatizálható lehetne, de jelen cikk a második fázishoz tartozó műveletek, lépések automatizálásával, számítógéppel segített tervezésével foglalkozik.

### 4. TERVEZÉST SEGÍTŐ PROGRAM

A program a Visual Studio szoftverkörnyezetben, C# objektum orientált programozási nyelv segítségével került kifejlesztésre.

A felhasználói felület kialakításánál cél volt a könnyű kezelhetőség és az átláthatóság. A program fúrási műveletek segítségét szolgálja.

3. ábra A fúrás műveletek beviteli mezője

Első lépésben meg kell adni az alkatrész adatait (lásd: 3. ábra). A kódokhoz tartozik jelmagyarázat is a programban. A megmunkálásokhoz tartozó kódjeleket az 1. táblázat tartalmazza.

A megmunkálások elvégzésénél természetesen a sorrend mérvadó lesz, azaz pl. nem lehet menetet fúrni, illetve dörzsárazni, míg nincs furat.

A mintakód valamely karakterére ráállítva a kurzort a jelmagyarázatban megjelenik egy rövid ismertető szöveg, ami leírja, mit kell az adott karakter helyére írni.

1. táblázat A megmunkálások kódjelei

Megmunkálás kódjele	Megmunkálás
D	Dörzsárazás
E	Élletörés
F	Fúrás
FB	Furatbővítés
H	Homloksüllyesztés
M	Menetfúrás
S	Süllyesztés

Mivel furatok, illetve furat jellegű megmunkálási módok vannak, így a térben szükséges hengerek definiálása. Ehhez egy egytetemes koordináta-rendszerre van szükség. A henger térbeli definiálása [5] alapján történik. A henger középpontja  $C$ -vel, a forgástengely egységvektora  $\vec{w}$  vektorral, a sugara  $r$ -rel, a magassága  $h$ -val van jelölve, így a henger pontjai az alábbi összefüggéssel megadhatók:

$$P = C + s \cos \varphi \vec{u} + s \sin \varphi \vec{v} + t \vec{w}, \quad (1)$$

ahol az  $0 \leq s \leq r$ , a  $\varphi \in [0, 2\pi]$ ,  $|t| \leq h/2$ ,  $\vec{w} = \vec{u} \times \vec{v}$ . A programban a középpont helyett elég a furat kezdőpontját megadni, és egy  $\frac{h}{2} \vec{w}$  szorzóval könnyedén átalakítja a középpontjává.

A tengely irányvektorának megadásakor a program bekéri a furat tengelyének XY síkra vett vetületének az X tengellyel bezárt  $\theta$  szögét, majd szükséges megadni a furat tengelye és az XY sík által bezárt  $\gamma$  szöget, így:

$$\vec{w} = (\cos \theta \vec{e}_x + \sin \theta \vec{e}_y) \cos \gamma + \sin \gamma \vec{e}_z. \quad (2)$$

Ezek ismeretében a kód, mely egy  $A$  jelű furat megadásához szükséges:

$$A(F; C(x, y, z); \theta; \gamma; r; h). \quad (3)$$

A program egynél több henger megadása után kiszámolja a hengerek középpontjának egymáshoz képesti különbségét, továbbá veszi a hengerek tengelyének egységvektorait, amelyeket összeszoroz vektoriálisan. Ez utóbbinak nagy jelentősége lesz, hiszen ennek segítségével fog a

program síkokat beszúrni és vizsgálni, hogy az adott sík metszi-e valamelyik hengert.

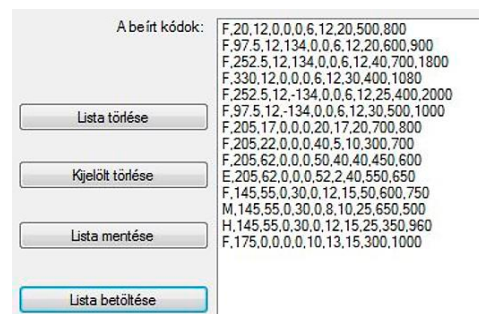
A (3) kódot a geometriai paramétereken túl még szükséges kiegészíteni a fúrési paraméterekkel, melyek a  $v_c$  forgácsolási sebesség, a  $v_f$  előtoló mozgáshoz tartozó sebesség, és az  $F_e$  előtoló erő. A két sebesség paramétert mm/s-ban kell megadni a program számára.

A támadási irányok definiálásához szükségesek a  $\theta$  és  $\gamma$  szögek. A támadási irányokat a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat A támadási irányok értelmezése

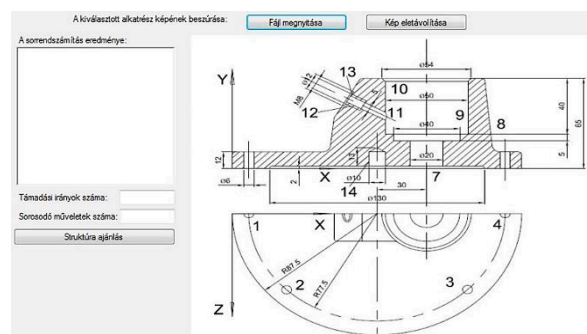
Támadási ir.	$\theta$ szög [°]	$\gamma$ szög [°]
X+	0	0
X-	180	0
Y+	90	0
Y-	-90	0
Z+	0	90
Z-	0	-90

Ha egy művelet beírása megtörtént, akkor a *Felvétel listába* gomb megnyomásával bekerül a kódsorozat. Értékbevitel nemcsak ilyen módon lehetséges, hanem importálni is lehet azt egy .txt kiterjesztésű fájlból (lásd: 4. ábra).



4. ábra Kódlista és az azzal végezhető műveletek

Mindezek után a *Sorrend készítés* gombot megnyomva a program megadja a sorosítás és párhuzamosítás eredményét az előzőleg ismertetett feltételek alapján. Az adott alkatrészhez tartozó műhelyrajz importálására is ad lehetőséget a program (lásd: 5. ábra).



5. ábra Eredmény mező és az alkatrész rajzának importálása

Az 5. ábrán látható példánál az egyes fűrasi műveletek számozva vannak. A 14 fűrasi művelethez a beírt kódokat a 6. ábra mutatja.

```
F,20,12,0,-90,0,6,12,330,3,5,300
F,97,5,12,134,-90,0,6,12,330,3,5,300
F,252,5,12,134,-90,0,6,12,330,3,5,300
F,330,12,0,-90,0,6,12,330,3,5,300
F,252,5,12,-134,-90,0,6,12,330,3,5,300
F,97,5,12,-134,-90,0,6,12,330,3,5,300
F,205,62,0,-90,0,10,17,416,6,1,450
F,205,62,0,-90,0,20,5,416,5,3,900
F,205,62,0,-90,0,25,40,416,4,7,1100
E,205,62,0,-90,0,27,2,416,4,41,1150
F,145,55,0,-30,0,2,5,15,416,7,4,250
M,145,55,0,-30,0,4,10,130,4,8,100
H,145,55,0,-30,0,6,15,416,6,2,300
F,175,0,0,90,0,5,13,416,6,1,300
```

6. ábra Konkrét megmunkálási példához tartozó kódok

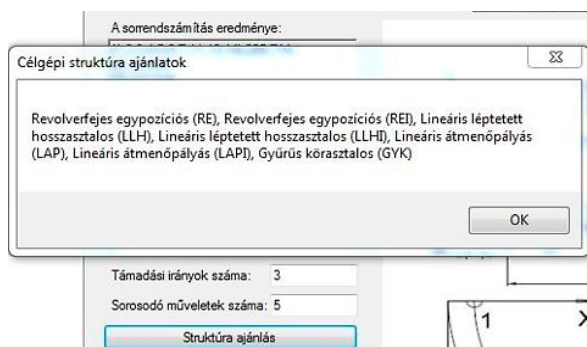
Ezután a *Sorrend készítés* gombra kattintva megkapható a sorrendszámítás eredménye, ezt mutatja a 7. ábra.

```
A sorrendszámítás eredménye:
(1,2,3,4,5,6,7,11,13,14),205,714
(8),56,604
(9),510,638
(10),27,211
(12),125
Támadási irányok: y-, x+, y+.
```

7. ábra A sorrendszámítás eredménye

A zárójelben lévő számok a furatszámokat jelölik. A külön sorban lévő számok nem vonhatók össze, míg az egy sorban található párhuzamosíthatók. A megmunkálási sorrend fentről, lefelé értendő. Először a fűrasi-, a süllyesztési-, majd végül a menetfűrasi műveletek vannak. A zárójeles részeket követően az adott állomás műveleti ideje látható másodpercben kifejezve. A legalsó sor a szükséges támadási irányokról ad tájékoztatást.

Célgépi struktúra ajánlásához szükséges megadni a sorosodó műveletek- és támadási irányok számát. A példában látható, hogy a kötelezően sorosodó műveletek száma öt, míg a támadási irányoké három. A 8. ábra a program által adott ajánlatokat szemlélteti.



8. ábra Célgépi struktúrára ajánlatok a program által

Az összes lehetséges struktúrát felajánlja a program, amely a tervezést segíti. Az *OK* gomb megnyomásával a program megkérdezi, hogy akar-e a felhasználó passzív pozíciót, ez módosíthatja a korábbi struktúra ajánlatokat.

Jelenleg a program a célgéptervezést csak fűrasi folyamatokra segíti. A jövőben a tervek között szerepel, hogy program képes legyen marás jellegű megmunkálásokhoz tartozó funkcióösszevonások kezelésére.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A célgéptervezés az iparban több helyen is egy fontos feladat. A cikk röviden bemutatta a géptervezési módszereket. Mivel a célgéptervezés lépései igen sok mérnökórát megkövetelnek, így a cikkben bemutatott program nagy segítséget jelenthet a tervezési feladat meggyorsítására. A program jelenleg fűrasi jellegű műveleteket tartalmazó megmunkálási típusokat tud megbízhatóan kezelni. A funkcióösszevonást, a műveleti sorrendterv elkészítését, a műveleti idők számítását és a jellemző célgépi struktúra ajánlását tudja megkönnyíteni a program a felhasználó számára.

A jövőben a tervek között szerepel a program funkcióinak kibővítése pl. marási műveletek elvégzésére való alkalmasság elérése.

## 6. IRODALOM

- [1] Brecher, C., Müller, A., Dassen, Y. et al.: *Automation technology as a key component of the Industry 4.0 production development path*, Int. J. Adv. Manuf. Technol. Vol. 117, pp. 2287–2295, (2021)
- [2] Papulová Z., Gažová A., Šufliarský L.: *Implementation of Automation Technologies of Industry 4.0 in Automotive Manufacturing Companies*, Procedia Computer Science, Vol. 200, pp. 1488-1497, (2022)
- [3] Takács Gy., Zsiga Z., Szabóné Makó I., Hegedűs Gy.: *Gyártósorok módszeres tervezése*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Miskolc (2009)
- [4] Leskó G., Takács Gy.: *Célgéptervezés automatizálási lehetőségei*, Multidiszciplináris tudományok, 6. kötet, pp. 77-85, (2016)
- [5] Eberly D. H.: *Game Physics*, second edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, (2010)

# NAPELEM HŐTERJEDÉS VIZSGÁLATA ELEKTROMOS PARAMÉTEREINEK A MEGHATÁROZÁSÁHOZ

## HEAT PROPAGATION INVESTIGATION OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR PANEL FOR DETERMINING ITS ELECTRICAL FEATURES

Nagy Ádám<sup>\*</sup>, Bodnár István<sup>\*\*</sup>, Kovács Endre<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

*Heat transfer processes in a photovoltaic (PV) silicon solar panel are simulated under standard circumstances. A model containing an intricate treatment of the incoming solar radiation, long-wave radiation, conduction, convection, and electrical power output is developed in mathematical form. To solve heat transfer problems, recent explicit numerical methods are utilized by our research group, which are efficient for different real-life problems, for example, simulating heat transfer in photovoltaic panels. Since very realistic results are obtained for the temperature of the silicon layer and the dependent electrical variables such as the power output, one can conclude that our model can adequately predict the electrical quantities.*

### 1. BEVEZETÉS

A környezetbarát energiatermelési- és tárolási módszerek iránt rendkívüli az érdeklődés. Mivel a fosszilis energiahordozókról történő leválás és a napelemes energiatermelés csak az elmúlt néhány évben kezdett meghatározóvá válni, ezért még rengeteg a nyitott kérdés velük kapcsolatban.

A napelemek működését leginkább a hőmérséklet befolyásolja. Amennyiben növekszik a napelemek hőmérséklete, a kapocsfeszültség meredeken csökken, míg az áramerősség enyhén emelkedik. Ebből következik, hogy állandó besugárzás mellett a teljesítmény a hőmérséklet növekedésével csökken [1]. Ugyan ez a hatás figyelhető meg a hatásfoknál is.

A felületen lerakódó szennyeződések árnyékhatás révén átmeneti ellenállás-növekedést eredményeznek. Ilyenkor az érintett cellarészek átmennek fogyasztóba és a többi cella által generált áramot Joule-hővé alakítják. Ezáltal a cellák tovább melegednek és a hatékonyságuk tovább csökken [2]. Hosszú távon a napelemek által termelt villamos

energia mennyisége is csökken, így hosszabb megtérülési idővel kell számolni.

A degradáció a napelemeknél a dióda jellegből adódóan egyrészt természetes alapon, másrészt a környezeti hatások révén indukált módon játszódik le. A napelem a degradációs folyamat során továbbra is elláthatja az elsődleges funkcióját, még akkor is, ha a használata már nem optimális. Azonban a modul problematikussá válhat, ha ez a degradáció elér egy kritikus szintet [3]. Ez a gyártók szerint akkor következik be, amikor a teljesítmény lecsökken a kezdeti teljesítmény 80%-ára.

A tartósan magas hőmérsékleten üzemelő cellák gyorsabban öregednek, így az ilyen napelemek élettartama lényegesen lerövidülhet. Például a 100°C feletti hőmérséklet elérése következtében a cellák kiéghetnek, azonnal tönkremennek. Normál esetben egy napelem élettartama 25-30 év, azonban a hősokk révén ez akár 10 év alá is csökkenhet [4].

A károsodott cellák miatt a napelemek karakterisztikái ( $V-I$  és  $P-I$  jelleggörbéi) eltorzulnak. Ez pedig hatással van a villamos hálózatra leadott villamos energia minőségi paramétereire [5].

Egy napelem teljesítménye (hatékonysága) különböző tényezők miatt romolhat, mint például: hőmérséklet, páratartalom, besugárzás mértéke vagy mechanikai behatás. Ezek különféle indukált öregedést, anyagszerkezeti átalakulást idézhetnek elő [6]. Tipikusan korrózió, elszíneződés vagy akár repedések, törések keletkezhetnek egyes cellákon, de nem elhanyagolható a napelemeket borító edzett üveg térfogati és/vagy felületi struktúrájának a megváltozása sem.

A hőmérsékletváltozás a repedések keletkezésének egyik leggyakoribb oka, ezért fontos a túlmelegedések elkerülése, illetve a hőmérsékleti tranziens-folyamatok időbeni lefutásának széthúzása [7].

Az állapotfelmérésre számos módszer terjedt el az „in-situ” és az „ex-situ” módszereket ideértve. A napelemek úgynevezett „in-situ”, azaz helyben

<sup>\*</sup> egyetemi tanársegéd, Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézet

<sup>\*\*</sup> egyetemi docens, Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézet

történő, megbontás és beavatkozás nélküli állapotfelmérésének egyik lehetséges módszere a hőkamerás felvételekkel történő hibaazonosítás. Az elv azon alapul, hogy a felületi sérülések, árnyékhatások és kiégések okozta tönkremeneteli pontokon, zónákban a napelem érintkezési, átmeneti, vagy állandósult ellenállása nagyobb, mint az ép cellaké, pontoké, felületeké. A nagyobb ellenálláson az átfolyó áramok hatására felszabaduló Joule hő tovább melegíti a hibás (sérül, vagy szennyezett) cellákat, így a napelem-panelen jól elkülöníthetők az egyes hibaforrások [8, 9].

A gyártási hibák rendszerint mikro-repedésekként jelentkeznek, amely a forrasztási helyeken alakulnak ki és csak a hőhatásövezetben, kis hatótávon okoznak átmeneti ellenállást, így a túlmelegedés is csak lokális, azaz egy cellán belül is változó a hőmérséklet-eloszlás. Az árnyékhatás rendszerint nagyobb kiterjedésű és egyenletes, így egy cellán belül csak kisebb mértékű hőmérsékletdifferenciát okoz. Az árnyékhatás származhat telepítési és üzemeltetési problémákból.

Egy napelem-panelen belül még teljesen ép (gyári) állapotban is előfordulhat  $15^{\circ}\text{C}$  hőmérsékletkülönbség. Ezt számos tényező befolyásolja, mint például a telepítés jellege, a jellemző széljárás, annak eloszlása. Ennél nagyobb hőmérsékletkülönbség csak akkor jöhet létre, ha a panelen belül gyártási, telepítési, vagy üzemeltetési hibák miatt károsodott cellák találhatók [4].

Hőkamerás vizsgálatokkal a hiba megléte ugyan detektálható, azonban annak típusa és közvetlen hatása a napelem villamos paramétereire és tulajdonságaira nem egyértelműen definiálhatók, ezért további mérések végzése szükséges. Ezen mérések az ún. „ex-situ” módszerek, amelyek elsődlegesen a Flash-teszteket (villamos tulajdonságok mérése) és az elektrolumineszcencia-vizsgálatokat (hibatípus feltárása) jelentik [9].

A napelemek által termelt energiával az egyik fő probléma, hogy nem egyenletesen oszlik el az időben, ill. nem a felhasználói igények, hanem a napsütés iránya és intenzitása határozza meg a mennyiséget. A már telepített napelemek döntő többsége hozzávetőlegesen déli tájolású, mert így termel a legtöbb energiát. Viszont mivel a hálózatba a napsütéses déli órákba rengeteg energia kerül, a piaci ár negatív is lehet. Ez utóbbi (rész-) problémára elméletileg megoldást jelentene, ha kikapcsolnák a napelemek egy részét, azonban ez a villamos teljesítmény elvonásának hiányában még nagyobb hőmérsékleteket és még gyorsabb degradációt

eredményezne. Célszerű tehát tárolókapacitásokat létrehozni a megtermelt energia számára.

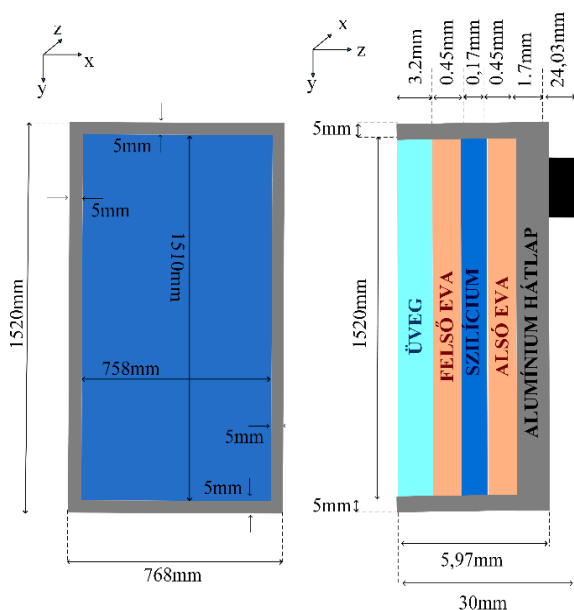
A hosszútávú célunk egy zéró-emissziós okosotthon energetikai szempontú megtervezése és mesterséges intelligencián alapú üzemeltetésének kidolgozása. Ehhez optimalizálni kell a napelemek teljesítményét, típusát és tájolását, valamint a termelés-fogyasztás-tárolás egyensúlyát. A megtermelt energiát részben akkumulátorokkal lehet tárolni, részben pedig fázisváltó anyagok (PCM = „phase changing material”) felmelegítésével. Ez utóbbi olvadási hőmérséklete és olvadáshője az anyagi minőségtől függ. Célszerű lehet több különböző PCM anyagot felhasználni, hogy az egyenletes hőmérsékletet minél olcsóbban biztosítani lehessen, emellett szükséges a geometriát is optimalizálni. Az akkumulátoros energiátárolás drágább és nagyobb az ökológiai lábnyoma, ugyanakkor a PCM-ből történő hő-visszanyerés nehezebben befolyásolható. Új építésű házaknál az épület tájolása, a szigetelés fajtája és vastagsága is optimalizálandó. Az optimális konfiguráció az éghajlattól és a felhasználás jellegétől is függ, a szükséges részletes időjárás-adatok nyilvános adatbázisokból letölthetőek, azonban a fogyasztási igényekre trendeket kell felvenni egy öntanuló algoritmus segítségével. Mivel a külső hőmérséklet, a szélsébség és a napsugárzás intenzitása folyamatosan változik, csakúgy, mint a PCM halmazállapota, a hőmérsékleti viszonyokat lényegükénél fogva nemstacionárius, tranzienst folyamatok alakítják. Ezek számítása rendkívül erőforrás-igényes, a szakirodalomban publikált munkák meglehetősen kezdetlegesek. A kutatócsoportunknak rendelkezésére áll egy saját programkód, ami egyszerűbb esetekre megoldja a hőmérséklet változását leíró nemlineáris parciális differenciálegyenletet. Ennek segítségével biztosíthatók a bemenő adatok a mesterséges intelligencia alapú optimalizáláshoz és az intelligens szabályozó rendszer kialakításához.

## 2. A SZIMULÁCIÓS MODELL BEMUTATÁSA

A napelemben történő hőterjedést számítógépes szimuláció segítségével vizsgáltuk meg, amelyhez a szükséges kódokat a MATLAB szoftver segítségével írtuk meg. A megvizsgált napelem modell geometriai adatai a következők: az  $x$  irányú szélessége 768 mm, a hossza az  $y$  irány mentén 1520 mm és a  $z$ -irányú vastagsága 30 mm (a csatlakozó dobozt is beleértve). A napelem prototípusunk széleit egy 0,5 cm széles alumínium szegély határolta és annak belső tartományait a  $z$ -irány mentén öt darab réteg építette

az alábbi elrendezés szerint: egy 3,2 mm vastag üveg réteg; 0,45 mm vastag EVA (etilén-vinil-acetát); egy 0,17 mm szilícium réteg; majd újból egy 0,45 mm vastagságú EVA réteg és végül egy 1,7 mm vastagságú alumínium hátlap. A megvizsgált napelem modell felépítését a következő oldalon látható 1. ábra mutatja be.

A szimulációs vizsgálatok során feltettük, hogy a napelem a standard teszt körülmények között működik, ami azt jelenti, hogy a 25°C-os környezeti hőmérsékletet;



1. ábra A napelem modell geometriájának sematikus ábrája.

1000 W/m<sup>2</sup> bejövő fényintenzitást; illetve 1 m/s sebességet vettünk figyelembe.

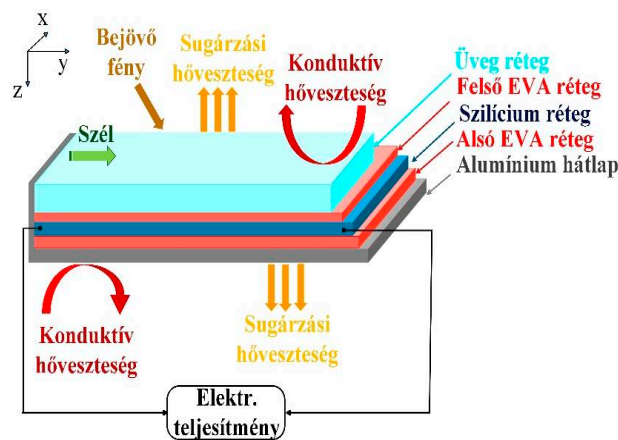
A napelemben történő hőterjedés modellezéséhez a következő hatásokat kell figyelembe venni. A napelem belső részeiben a hőcsere vezetékes hőátvitel segítségével valósul meg. A bejövő fény hatására időben állandó, de a helytől függő mennyiségű energia jut az egyes rétegekbe, amelyet egy  $q_L(\vec{r})$  hőforrástaggal vettünk figyelembe. Az egységnyi idő alatt elnyelt fény energia egy része a szilícium rétegen belül a napelemből kinyerhető elektromos teljesítménnyé alakul át, ezt a napelemből kinyert teljesítményt egy hely- és hőmérséklet függő  $q_P(\vec{r}, u)$  hőforrástaggal vesszük számításba. A működésben levő napelem hőmérséklete az idő előrehaladtával magasabb értéket vesz fel, mint a környezet hőmérséklete, így a napelem alsó és a felső  $x$ - $y$  síkban levő felületein a hőmérsékleti sugárzás következtében hőelvonás lép fel, amelyet egy ugyancsak a pozíciótól és a hőmérséklettől függő  $q_R(\vec{r}, u)$  hőforrástaggal vesszünk figyelembe. A napelemben felülete és a környezet közötti hőmérséklet különbség és az 1 m/s

sebességű szél miatt természetes-, illetve kényszerített konvekció általi hőelvonás játszódik le a napelem az alsó- és a felső felületein. Az egyes konvekciós mechanizmusok együttes hőelvonását egy hely- és hőmérséklet függő  $q_C(\vec{r}, u)$  hőforrástaggal vettük számításba. A hőterjedés számítása során figyelembe vett tényezőket a 2. ábra foglalja össze. Az egyes hőforrástaggok figyelembevételével a napelemben történő hővezetést az alábbi nemlineáris parciális differenciálegyenlet írja le [12]:

$$\frac{\partial}{\partial t} u(t, \vec{r}) = \frac{1}{c(\vec{r})\rho(\vec{r})} \nabla(k(\vec{r})\nabla u(t, \vec{r})) + q_L(\vec{r}) + q_P(\vec{r}, u) + q_R(\vec{r}, u) + q_C(\vec{r}, u). \quad (1)$$

ahol  $u(t, \vec{r})$  az ismeretlen hőmérséklet, amely a  $\vec{r} = (x, y, z)$  helynek és a  $t$  időnek a függvénye. A  $c(\vec{r})$  fajhő,  $k(\vec{r})$  hővezetési tényező,  $\rho(\vec{r})$  sűrűség helytől függő, ismertnek tekinthető függvények. Az (1) egyenlet numerikus módszerekkel oldható meg, amelynek a tér diszkrétizációja és az egyes hőforrástaggok közelítésének részletes ismertetése az [10] cikkben található meg. A szimulációs vizsgálatok során a következő egyszerűsítő feltevésekkel éltünk:

- A napelem egyes rétegeinek az anyagi tulajdonságait homogénnek, izotrópnak és a hőmérséklet-függetlennek tekintettük.
- A bejövő fénysugárzás a napelem felületét egyenletesen éri.
- Az elnyelt fény által a napelemben jutó energia egy része kinyerhető elektromos energiává alakul, más része pedig a napelem egyes rétegeiben alakul hővé.
- A napelem felületén lerakódó por vagy egyéb szennyező anyagok hatását figyelmen kívül hagytuk.



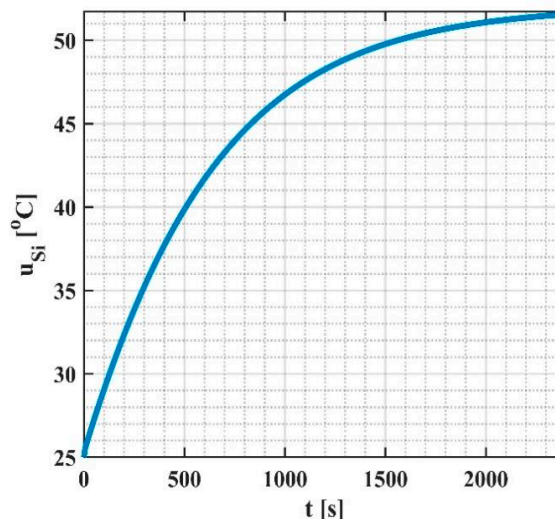
2. ábra A hőterjedést befolyásoló tényezők.

### 3. A BEKAPCSOLÁSI FOLYAMAT VIZSGÁLATA

A napelem modellünk működésének első 40 perces időtartományát vizsgáltuk meg, azaz a kezdeti időpont 0 másodpercnek és a végső időpont 2400 másodpercnek adódott. Az alkalmazott térháló az alábbi módon adható meg: az  $x$ - és  $y$ - irány mentén az alumínium szegélyt egységesen egy-egy megfelelő térfogatú CFD-cellával vettük figyelembe. A napelem  $x$ - $y$  síkokban elhelyezkedő belső tartományait a 18 és 28 egyforma CFD-cellára osztottuk fel. Továbbá CFD-cella szám a  $z$ -irány mentén az üveg, a felső EVA, a szilícium, az alsó EVA és az alumínium hátlap rétegek esetén 3, 2, 2, 2 és 2. Az alkalmazott felosztás következtében a térhálónk összesen 6600 CFD-cellát tartalmazott. Az (1) egyenlet térdiszkretizációjával megkonstruált numerikus matematikai problémát a „Stiffness Ratio” mennyiséggel [10, p. 169] jellemezhetjük, amelynek értéke esetünkben,  $2,357 \times 10^8$ -nak adódott, ami azt jelenti, hogy egy meglehetősen merev („stiff”) problémát [11] kell megoldanunk. Ugyancsak meghatároztuk a számítási probléma összetettségét jellemzésére CFL-küszöb limitet ( $\Delta t_{MAX}^{FTCS}$ ), amelynek értéke  $5,7 \times 10^{-5}$  másodperc, ami azt jelenti, hogy ettől kisebb időlépés esetén lesz stabil az explicit Euler sémát használó FTCS (Forward Time Central Space) módszer.

Kutatócsoportunk az elmúlt években hővezetési problémák megoldására több új olyan explicit, stabil numerikus módszert kifejlesztett, amelyek erősen merev problémák esetén is jól alkalmazhatóak. A napelemben lejátszódó hőterjedés modellezésére szolgáló (1) egyenletet egy ilyen saját fejlesztésű módszerrel, az úgynevezett CpC algoritmussal [12, 13] oldottuk meg,  $\Delta t = 10 \times \Delta t_{MAX}^{FTCS} \approx 5,7 \times 10^{-4}$  másodperc lépésközt alkalmazva, ami egy nagyságrenddel nagyobb, mint a fent említett CFL küszöb.

Meghatároztuk a szilícium réteg hőmérsékletének az időbeli változását, amelyet a 3. ábra mutat be. Az ábrán látható, hogy kezdeti nagyobb hőmérséklet növekedést követően a szilícium réteg hőmérséklete egy időben állandónak vehető értéket ér el, ami azt jelzi, hogy a napelem ekkor már időben állandósult állapotban működik.



3. ábra A szilícium réteg hőmérséklete az idő függvényében.

A kiszámított hőmérséklet értékek alapján az egyes CFD-cellák által előállított elektromos teljesítményt számítottuk ki [14]:

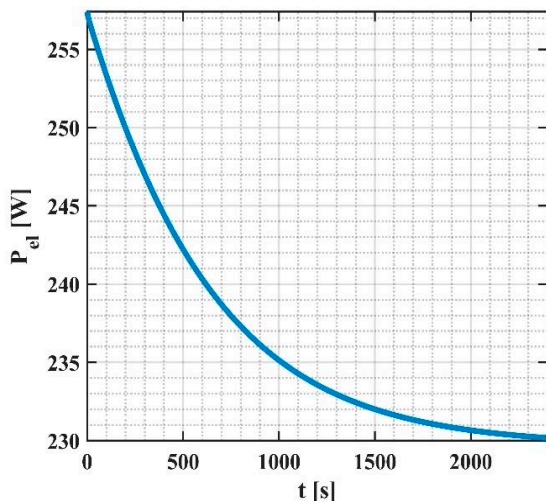
$$P_{el}(u_i) = \eta(u_i) \cdot A_i \cdot G, \quad (2)$$

ahol  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  a bejövő fény intenzitása,  $A_i$  és  $\eta(u_i)$  CFD-cella felülete és a hatásfoka, amely az alábbi lineáris kifejezéssel közelíthető [14]:

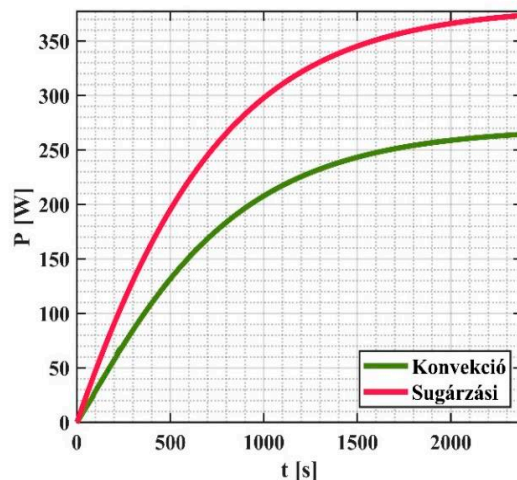
$$\eta(u_i) = \eta_{\text{Ref}} [1 - \beta_{\text{Ref}} (u_i - u_{\text{Ref}})], \quad (3)$$

ahol és  $\eta_{\text{Ref}}$  egy adott  $u_{\text{Ref}}$  referencia hőmérsékleten megmért hatásfoka a napelemnek,  $\beta_{\text{Ref}}$  a hőmérsékleti koefficiens. Ez utóbbi mennyiség a szilícium anyagi tulajdonságaitól függ és monokristályos napelemre értéke  $0,004 \text{ K}^{-1}$  [14]. Az egyes CFD-cellák által megtermelt elektromos teljesítmények összegzésével pedig megkapjuk a napelem  $P_{el}$  elektromos teljesítményét. A napelem teljesítményének időfejlődését a 4. ábra mutatja be. A napelem névleges teljesítménye az 1. táblázat szerint 230 W, de ez a futások esetén körülbelül 250 W-ra adódott a  $t=0$  időpontban. Az eltérést az magyarázhatja, hogy a napelemek kezdeti teljesítménye rendszerint 3%-kal nagyobb, mint ami az adatlapon szerepel az adott üzemi hőmérsékletre megadva. Sajnos az első évben a napelem el is veszíti teljesítményének 3%-át. A hatásfok időfejlődését a 4. ábra mutatja be.

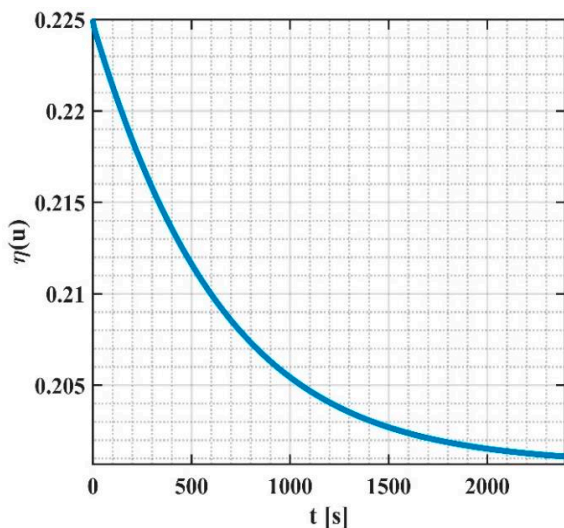




4. ábra A napelemből kinyerhető elektromos teljesítmény az idő függvényében.



6. ábra A konvekció, illetve a hőmérsékleti sugárzás által elvont teljesítmények az idő függvényében.



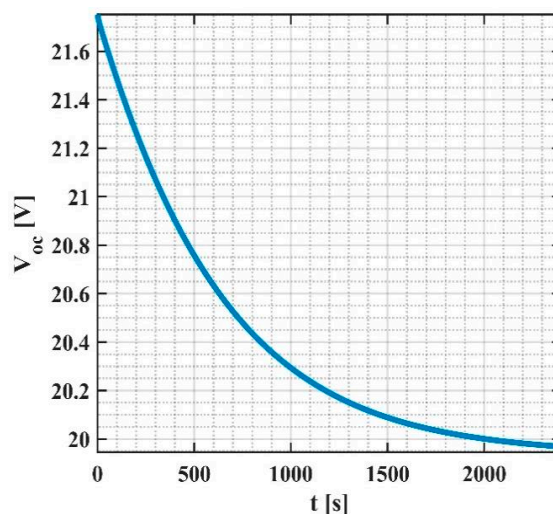
5. ábra A napelem hatásfoka az idő függvényében.

A szilícium  $\bar{u}_{SI}$  átlagos hőmérsékletének az ismeretében, valamint az 1. táblázatban közölt adatok segítségével kiszámítható a napelem néhány fontosabb működési jellemzője, mint például a  $V_{OC}$  üresjárás feszültség, az alábbi lineáris képlet segítségével [15]:

$$V_{OC}(\bar{u}_{SI}) = V_{OCN} \left[ 1 + \frac{\mu_{VOC}}{100\%} (\bar{u}_{SI} - u_{Ref}) \right], \quad (4)$$

ahol  $V_{OC}(\bar{u}_{SI})$  a hőmérséklet függő üresjárás feszültség,  $V_{OCN}$  egy adott  $u_{Ref}$  referencia hőmérsékleten megmért üresjárás feszültség,  $\mu_{VOC}$  a feszültség hőmérsékleti együtthatója. A napelem feszültségére vonatkozó eredményeinket a 7. ábra mutatja be.

A kinyert elektromos teljesítmény mellett meghatároztuk a konvekció, illetve a hősugárzás miatt bekövetkező hőátadási teljesítményt, mint az idő függvényét, amelyet az 6. ábra szemléltet. Az ábrán jól látható, hogy a sugárzás által leadott hőteljesítmény nagyobb, mint a konvekció által leadott, ami elsősorban az alacsony szélesség magyarázható.

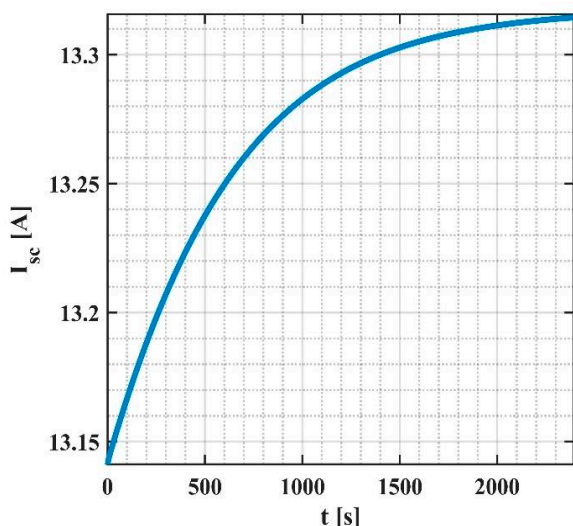


7. ábra A napelem üresjárás feszültségének a csökkenése az idő függvényében.

Hasonló lineáris közelítés segítségével a rövidzárási áram is meghatározható [15]:

$$I_{SC}(\bar{u}_{SI}) = I_{SCN} \left[ 1 + \frac{\mu_{ISC}}{100\%} (\bar{u}_{SI} - u_{Ref}) \right], \quad (5)$$

ahol  $I_{SC}(\bar{u}_{SI})$  a hőmérséklet függő rövidzárási áram,  $I_{SCN}$  egy adott  $u_{Ref}$  referencia hőmérsékleten megmért üresjárási feszültség,  $\mu_{ISC}$  az áram hőmérsékleti együtthatója. A napelem áramát a 8. ábra tünteti fel.



8. ábra A napelem rövidzárási áramának a növekedése az idő függvényében.

A napelem működésének hatékonyságát a formátényezővel ( $FF$ ) jellemezhetjük, amelyet az teljesítmény, üresjárási feszültség és a rövidzárási áram segítségével számíthatunk ki [15]:

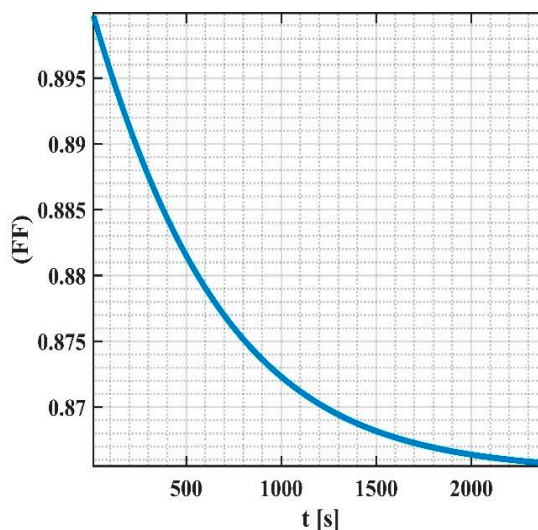
$$(FF) = \frac{P_{el}}{I_{SC}(\bar{u}_{SI})V_{OC}(\bar{u}_{SI})}. \quad (5)$$

Az ( $FF$ ) formátényezőre vonatkozó eredményeket a 9. ábra mutatja be. Az ábrán látható, hogy kezdetben nagyobb értéket vesz fel a formátényező, de az idő előrehaladtával, ahogy a bekapcsolási tranzienst véget ér az ( $FF$ ) formátényező értéke eléri az állandósult napelemek esetén elfogadott értékeket.

1. táblázat A napelem elektromos paraméterei

Paraméter	Érték
Elektromos teljesítmény	230 W
Hatásfok ( $\eta_{Ref}$ )	0,225
Üresjárási feszültség ( $V_{OCN}$ )	21,76V
Rövidzárási áram ( $I_{SCN}$ )	13,14A

Feszültség hőmérsékleti együtthatója ( $\mu_{VOC}$ )	-0,31 %/°C
Áram hőmérsékleti együtthatója ( $\mu_{ISC}$ )	0,005 %/°C



9. ábra A formátényező ( $FF$ ) csökkenése az időfüggvényében.

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

A környezetbarát energia előállítás és tárolás feladatának megoldása fontos kérdést és egyben nagy kihívást jelent a tudomány számára. Ebben jelentős szerepe van napelemes energiatermelésnek. A napelemek működési sajátosságait leginkább a hőmérséklet befolyásolja. A napelemekben lejátszódó hőterjedési folyamat modellezése által hatékonyan jelezhetjük előre a napelem elektromos működési jellemzőit, mint például a kinyert elektromos teljesítmény. A kapott görbék azt mutatják, hogy számítási modellünk realisztikusan jelzi előre ezeket az elektromos működési jellemzőket.

#### SUMMARY

Solving the problem of producing and storing energy in environmentally friendly way is an important question and at the same time a great challenge for science. Solar energy production has a significant role in this issue. The operating characteristics of solar panels are mostly influenced by temperature. By modelling the heat propagation process which happens inside the solar cells, we can effectively predict the electrical operating characteristics of the solar panel, such as the extracted electrical power. The presented results show that our computational model realistically predicts these electrical operating characteristics.

2. táblázat A napelem elektromos jellemzői a megvizsgált időintervallum végső időpontjában ( $t=2400$  s).

Paraméter	Érték
Szilíciumréteg hőmérséklete ( $\bar{u}_{ST}$ )	51,4057 °C
Elektromos teljesítmény ( $P_{el}$ )	230,1749 W
Hatásfok ( $\eta$ )	0,2011
Üresjárási feszültség ( $V_{OC}$ )	19,9687 V
Rövidzárási áram ( $I_{SC}$ )	13,3145 A
Formatényező ( $FF$ )	0,8657

## 5. IRODALOM

- [1] SINGH P., RAVINDRA, N. M.: *Temperature dependence of solar cell performance—an analysis*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 101, pp. 36–45, Jun. 2012, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2012.02.019.
- [2] NDIAYE A., KÉBÉ C. M. F., BILAL B. O., CHARKI A., SAMBOU V., NDIAYE P. A.: *Study of the correlation between the dust density accumulated on photovoltaic module's surface and their performance characteristics degradation*, Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Telecommun. Eng. LNICST, Vol. 204, pp. 31–42, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-72965-7\_3/COVER.
- [3] KHERICI Z., KAHOU L. N., CHEGHIB H., YOUNES M., CHEKAL AFFARI B.: *Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates*, Sol. Energy, Vol. 224, pp. 279–284, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2021.06.033.
- [4] BODNÁR I., MATUSZ-KALÁSZ D., BOROS R. R.: *Exploration of Solar Panel Damage and Service Life Reduction Using Condition Assessment, Dust Accumulation, and Material Testing*, Sustainability, Vol. 15, No. 12, p. 9615, Jun. 2023, doi: 10.3390/SU15129615.
- [5] WOOD S. et al.: *Transient photocurrent and photovoltage mapping for characterisation of defects in organic photovoltaics*, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, Vol. 161, pp. 89–95, Mar. 2017, doi: 10.1016/J.SOLMAT.2016.11.029.
- [6] SIDDIQUI R. et al.: *Comparison of different technologies for solar PV (Photovoltaic) outdoor performance using indoor accelerated aging tests for long term reliability*, Energy, Vol. 107, pp. 550–561, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.ENERGY.2016.04.054.
- [7] PARIKH H. R. et al.: *Solar Cell Cracks and Finger Failure Detection Using Statistical Parameters of Electroluminescence Images and Machine Learning*, Appl. Sci., Vol. 10, No. 24, p. 8834, Dec. 2020, doi: 10.3390/APP10248834.
- [8] IKEJIOFOR O. E., Y. E. ASUAMAH Y. E., NJOKU H. O., ENIBE S. O.: *Detection of Hotspots and Performance Deteriorations in PV Modules under Partial Shading Conditions Using Infrared Thermography*, Eng. Proc., vol. 2, no. 1, p. 71, Nov. 2020, doi: 10.3390/ECSCA-7-08201.
- [9] GALLARDO-SAAVEDRA S. et al.: *Nondestructive characterization of solar PV cells defects by means of electroluminescence, infrared thermography, I–V curves and visual tests: Experimental study and comparison*, Energy, Vol. 205, p. 117930, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117930.
- [10] LEVEQUE R. J.: *Finite Difference Methods for Ordinary and Partial Differential Equations (Steady-state and Time Dependent Problems)*, Society for Industrial and Applied Mathematics, ISBN 978-0-898716-29-0, (2007)
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Stiff\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Stiff_equation)  
Megtekintés időpontja: 2024. Június 21.
- [12] NAGY, Á, BODNÁR, I, KOVÁCS, E.: *Simulation of the Thermal Behavior of a Photovoltaic Solar Panel Using Recent Explicit Numerical Methods*; Advanced Theory and Simulations, 2024 Paper: 2400089 (2024)
- [13] KOVÁCS E., NAGY Á., SALEH M.: *A Set of New Stable, Explicit, Second Order Schemes for the Non-Stationary Heat Conduction Equation*, Mathematics, Vol. 9, No. 18, (2021)
- [14] KANT K., SHUKLA A., SHARMA A., BIWOLE P. H.: *Thermal response of polycrystalline silicon photovoltaic panels: Numerical simulation and experimental study*, Solar Energy, Vol. 134 (2016), p.147.
- [15] BODNÁR I.: *Electric Parameters Determination of Solar Panel by Numeric Simulations and Laboratory Measurements during Temperature Transient*, Acta Polytechnica Hungarica, Vol. 15, No 4. (2018)

# CÉLGÉP TERVEZÉS MÓDSZERTANA

## DESIGN METHODOLOGY OF SINGLE-PURPOSE MACHINES

*Simon Gábor\*, Rónai László\*\**

### ABSTRACT

Nowadays the increase of the productivity at industries are a main objective. This paper deals with the design methodology of single purpose machines. The steps of the design process are detailed through an exact problem, which is the machining of a pneumatic distributor block. After performing the necessary calculations, the elements of the single purpose machine are selected in the design phase. The 3D model of the machine is made in Autodesk Inventor Professional software.

### 1. BEVEZETÉS

Az iparban a termelékenység, automatizáltság fokozása mára már egy megszokott stratégiává vált. Abban az esetben, hogyha egy adott gyártósoron több éven keresztül tömegtermelés folyik, valamint az állási időt minimalizálni szükséges, akkor célszerű megvizsgálni egy célgép termelésbe történő integrálásának a lehetőségeit. Célgépek alatt olyan berendezést értünk, melyek egy adott termék rendkívül kis ciklusidővel történő gyártását teszik lehetővé. Fő előnyük a ciklusidőben rejlik. Egy CNC maró- vagy esztergagéppel szemben rugalmasságuk, azaz más termékre történő átállásuk igen korlátozott vagy nagyobb beavatkozás nélkül egyáltalán nem is kivitelezhető.

Az [1] forrás egy lyukasztó célgép tervezésével foglalkozik, mely hidro-pneumatikus munkahengereket használ a lyukasztáshoz szükséges erők előállításához. Marási folyamatokhoz is készíthető célgép, erre jó példa a [2], amelyben homlokmarást megvalósító egységet terveztek, ezzel csökkentve a ciklusidőt. A célgép vezérlését PLC-vel oldották meg.

Jelen cikk be kívánja mutatni a célgéptervezés módszertanát egy konkrét gyakorlati példán keresztül. A célgépek fejlesztésének céljai igen változatosak is lehetnek, nemcsak fűrési-, marási folyamatokra lehetnek alkalmasak, hanem akár tekercselésre is. Az utóbbira a [3] mutat jó példát, amely egy nagyméretű tekercsek előállítására alkalmas célgépet mutat be.

A cikk 2. fejezete röviden ismerteti a gyakorlatban alkalmazott műszaki értékelemző módszereket,

melyek segítségével a megfelelő célgépi struktúra kiválasztása tehető meg. A 3. fejezetben bemutatásra kerül egy olyan alkatrész, melynek gyártásához célgép tervezése szükséges. A 4. fejezet tárgyalja a szükséges számításokat a megmunkálások időszükségletének- és az egyes paraméterek meghatározásának érdekében. Az 5. fejezet foglalkozik a szerszámok térbeli elrendezésével. A célgép 3D-s modelljét a 6. fejezet ismerteti. Az összefoglalás tartalmazza az elért eredményeket és a jövőbeni terveket.

### 2. MŰSZAKI ÉRTÉKELEMZŐ MÓDSZEREK

Jelen fejezet röviden be kívánja mutatni azon értékelemző módszereket, melyek egy adott tervezési folyamatnál nagy segítséget nyújthatnak. A gyártóeszközök módszeres tervezéséhez felhasznált műszaki értékelemző módszer fő célja, hogy a megoldásváltozatok közül a tervező a legmegfelelőbb, kidolgozásra alkalmas megoldást megtalálja [4].

A leggyakrabban az ún. Többség- vagy a Rang- vagy a Dátum módszerekkel lehet találkozni.

A többség módszernél minden változatot, minden változattal páronként össze kell hasonlítani páronként. Az a megoldásváltozat lesz a legkedvezőbb, amely a legtöbbször került ki győztesen. A változatpárok meghatározására az alábbi összefüggés nyújt segítséget:

$$x = \frac{i(i-1)}{2}, \quad (1)$$

ahol  $i$  jelenti a változatok számát.

A Dátum módszer esetében is páronként történik az összehasonlítás, de itt egy kiválasztott megoldásváltozattal lesz a többi változat összemérve. Gyorsabb a kiértékelési idő, mivel kevesebb összehasonlítást kell elvégezni.

A Rang módszernél az összes megoldásváltozatnál egyenként meg kell határozni a szempontok szerinti pontokat pl. 6 változat van, adott szempontnál 1-6 közötti pont adható. A kisebb pont jobb helyezést fog jelenteni. Ezen pontokat minden változatnál

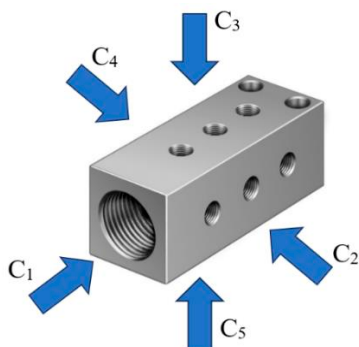
\* mesteroktató, Miskolci Egyetem, Szerszámgépezési és Mechatronikai Intézet

\*\* PhD, Miskolci Egyetem, Szerszámgépezési és Mechatronikai Intézet

külön-külön össze kell adni, és a legkisebb összeget elért változat lesz a legjobb. Természetesen még léteznek más módszerek is, a teljesség igénye nélkül pl. Copeland módszer, Lexikográfiai szabály, értékprofil stb.

### 3. ALKATRÉSZ BEMUTATÁSA

Egy pneumatikus, 9 darab csatlakozót tartalmazó elosztó tömbhöz [5] történik a célgép tervezése. Az egység előgyártmánya egy húzott AlSi hasáb, melynek méretei: 15x15x34 mm.



1. ábra Az elosztó egység a támadási irányok feltüntetésével

Az 1. ábrán látható módon az alkatrészt összesen 5 darab támadási irányból szükséges megmunkálni. A kész termék elérése érdekében telibefúrás, menetfúrás, élettörés, dörzsárazás szükséges. Megjegyezzük, hogy a C<sub>5</sub> jelű irányból csak két darab 0,2x45° élettörést kell elkészíteni. A C<sub>1</sub> irányból egy 26 mm mélységű Ø8,7 mm zsákfuratot kell létrehozni, amelybe G1/8” méretű menetet szükséges kialakítani a pneumatikus csatlakozónak (port 1). A C<sub>2</sub> és C<sub>4</sub> irányokból 3-3 M3 menetes furat készül Ø2,5 mm magátmérővel, valamint 0,2x45° élettörésekkel. A C<sub>3</sub> irányból pedig további 3 M3 elosztó furat kialakítása szükséges az élettörésekkel (port 2). Továbbá a C<sub>3</sub> támadási irányból szükséges még két rögzítőfurat elkészítése is, itt Ø2,9 mm átmenő furatok kialakítása történik meg, majd dörzsárazással és élettörésekkel záródik az ebből az irányból történő megmunkálások.

Az elvégzendő műveletek ismeretében felületkomplexumokat kell kialakítani, majd szükséges megvizsgálni az egyes komplexumokon belüli- és a komplexumok közötti párhuzamosítások lehetőségeit. Továbbá nem szabad figyelmen kívül hagyni a komplexumok közötti kötelező sorosodásokat, erre egy jó példa, hogy a magfurat kialakítása megelőzi a menetfúrást.

A többpozíciós célgép tervezésénél a következő időbeli kiosztás lesz alapul véve, amelynél a || szimbólum jelöli a párhuzamosan végzett

folyamatokat, míg → a tervezett célgépi pozíciókat választja el.

A műveletek: C<sub>1</sub> irányból a zsákfurat és élettörés kialakítása || C<sub>3</sub> irányból 2x Ø2,9 mm telibefúrás és élettörés → Egyszerre C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, és C<sub>4</sub> irányokból 3x telibefúrás és élettörés → C<sub>1</sub> irányból a G1/8” menet kialakítása || C<sub>5</sub> irányból 2x élettörés → Egyszerre C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, és C<sub>4</sub> irányokból 3x menetfúrás → C<sub>3</sub> irányból 2x dörzsárazás.

### 4. VONATKOZÓ SZÁMÍTÁSOK

Jelen fejezet foglalkozik azon szükséges számítások rövid bemutatásával, melyek a példában szereplő alkatrészhez szükséges célgép tervezésénél mindenképp elvégzendők.

#### 4.1. A megmunkálással kapcsolatos paraméterek

Minden megmunkáláshoz meg kell határozni számos mennyiséget, paramétert. A forgácsoló sebesség ismeretében a főorsó fordulatszáma meghatározható

$$n = \frac{v_c}{\pi d'} \quad (2)$$

ahol  $d$  a furatátmérő. A forgácsolási teljesítmény számítható a főforgácsoló erő és a forgácsolási sebesség ismeretében:

$$P_c = F_c v_c \quad (3)$$

A főforgácsoló erő a munkadarab és a szerszám alapján számítható az ún. Kienzle-Victor [6] féle összefüggéssel:

$$F_c = k_c A = k_{c1.1} h^{-z} A, \quad (4)$$

ahol  $A$  jelenti a forgácskeresztmetszetet, míg  $k_{c1.1}$  a fajlagos főforgácsoló erő főértékét,  $h$  a forgácsvastagságot, és  $z$  a fajlagos főforgácsoló erőváltozást mutató tényezőt. A fajlagos főforgácsoló erő  $k_c$ .

Szokásos a bővített, fajlagos főforgácsoló erő képletével számolni, mely mértékegység nélküli módosító tényezőket alkalmaz, amely pl. a homlokszög, forgácsolósebességre, szerszámkopásra.

Az 1. ábrán szemléltetett munkadarab vonatkozásában a C<sub>1</sub> támadási irányból történő zsákfurat megmunkálásához fog a legnagyobb forgácsolási teljesítmény tartozni.

A számítástechnika nagyfokú fejlődésének köszönhetően már rendelkezésre állnak interneten elérhető kalkulátorok. Egy ilyen a Walter Tools GPS [Walter] online felület, mellyel az egyes megmunkálásokhoz tartozó paraméterek, úgy,

mint a forgácsolási sebesség, főorsó fordulatszáma, előtolás mértéke, forgácsolási teljesítmény stb. meghatározhatók, számíthatók a választott szerszám függvényében.

#### 4.2. A megmunkálási műveletek időszükséglete

A megmunkálási műveletek függvényében az alábbi összefüggések alkalmazhatók:

$$t_{f/l} = \frac{s}{v_f} + \frac{s + 2s_r}{v_{gy}}, \quad (5)$$

$$t_m = \frac{2s}{v_f} + \frac{2s_r}{v_{gy}}, \quad (6)$$

ahol  $t_{f/l}$  jelenti a fúrás vagy élettörés-, míg  $t_m$  a menetfúrás időszükségletét. A  $v_f$  és  $v_{gy}$  rendre a percnkénti előtolásokat adják meg munkamenetben és gyorsmenetben. A munkamenetben megtett utat  $s$ , a ráfutási utat  $s_r$  jelöli.

Az (5) és (6) képletekkel az egyes felületek megmunkálási időszükségletei számíthatók, amelyekből becsülhető a tervezendő célgép termelékenysége. A példaként bemutatott darab esetében a készre munkáláshoz szükséges idő közel 90 másodpercre adódott, napi 8 órás műszakot alapul véve, továbbá 250 munkanappal számolva. Így 1 évre 80750 db pneumatikus elosztó gyártható. Ennél a számításnál a megmunkálások egymás után következtek párhuzamosítások nélkül. Mivel a 3. fejezetben a tervezett célgép esetében a műveleteknél lesznek párhuzamosítások, így nagyobb lesz a gép termelékenysége.

### 5. SZERSZÁMOK TÉRBELI ELRENDEZÉSE

A szerszámok összevonásának 3 szintjét lehet megkülönböztetni első-, másod- és harmadfokú térbeli összevonások [4].

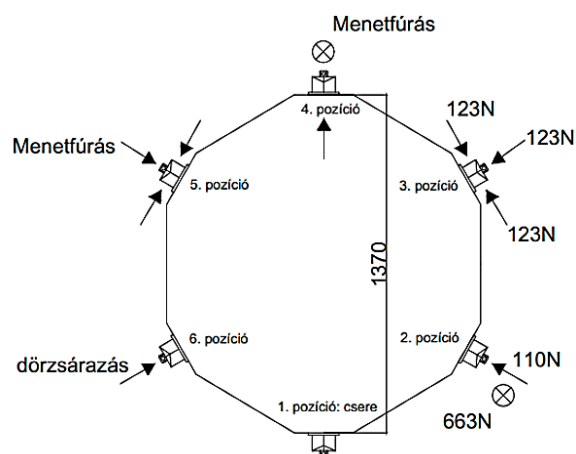
Az elsőfokú összevonás lényege, hogy az azonos támadási irányokból történő megmunkálásokra felhasznált szerszámok egy forgástengelyen legyenek, erre példa a fúró és egyben élettörő szerszám alkalmazása. A másodfokú térbeli összevonás során támadási irányonként egy-egy közös előtoló egység kialakítása a cél, ehhez többorsós előtétet szükséges alkalmazni. Vannak homogén- és vegyes technológiájú orsóelőtétetek a piacon. Az utolsó, azaz a harmadfokú térbeli összevonásnál a szerszámok, szerszámcsoportok munkadarab köré történő megfelelő elhelyezése a fő cél, amelyek majd az egyes célgépi pozíciókat fogják eredményezni.

A célgép készülékezése sztenderd, piacon elérhető termékek felhasználásával történik. A

SUHNER GmbH [7] cég kínálatában több olyan egység – köztük többsorsós előtét – is szerepel, mely a tervezéshez, kivitelezéshez felhasználható.

### 6. CÉLGÉP MODELLJE

Többpozíciós célgépeknél a pozíciók összekötésének többféle módja ismeretes, ezek lehetnek léptetett hosszasztalos-, lineáris sor-, körasztalos- vagy dobos megoldások. Mérlegelve a termelékenységet, illetve a támadási irányokat a példában szereplő munkadarab célgéppel történő gyártáshoz egy 6 pozícióval rendelkező dobos struktúra lesz felhasználva (lásd: 2. ábra). Az előtoló erők meghatározása a Walter Tools GPS 6.7.2 online program felhasználásával történt.



2. ábra A megmunkálások során ébredő előtoló erők

A cserepozícióban megmunkálás nem történik, ott a munkadarab rögzítése valósul meg egy pneumatikus satu segítségével, amely a  $C_1$  támadási irányból fog szorítóerőt kifejteni. A satu méretezésénél meg kell vizsgálni, melyik lesz az a legnagyobb erő, amely a munkadarabot ki akarja mozdtítani a pofákból, a példafeladatban ezen erők a 3. ábrán mutatott irányokból fognak hatni. A  $C_1$  irányból az előtoló erő 663 N-ra adódik. Míg a  $C_5$  támadási irányból a két élettörés során  $F=123$  N erő ébred, mely segítségével a megmunkáláskori minimális szorítóerő nagysága meghatározható:

$$F_{sz} = \frac{F}{\mu}, \quad (7)$$

ahol  $\mu=0,44$  a satu acél pofája és az alumínium munkadarab közötti súrlódási tényező. Ezen adatok ismeretében a szorítóerőnek nagyobbak kell lennie, mint az első támadási irányból adódó előtoló erő.

A dobos struktúrához kiválasztandó körasztalhoz ismerni szükséges a billenő- és tangenciális nyomatékok nagyságát, továbbá az asztalra merőleges erők nagyságát.

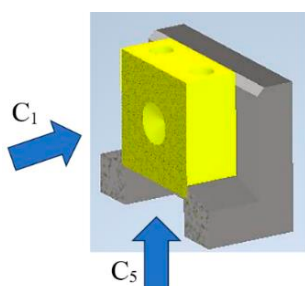
A dob, és az alkalmazott alkatrészek együttes súlyerői a tervezőprogram által számíthatók, ez összesen 4 kN értékű.

A billenő nyomaték az alábbi képlettel határozható meg összhangban a 2. ábrával:

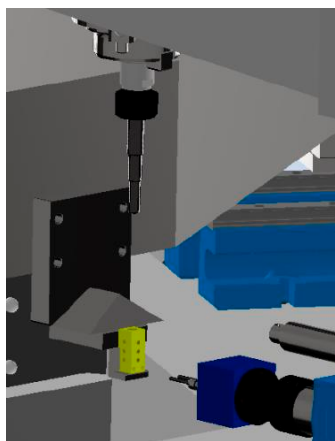
$$M_b = \frac{1,37}{2} 663 \cong 445Nm. \quad (8)$$

A tangenciális nyomaték elenyésző értékű lesz, így az a jelen példánál nem lesz mérvadó. A kapott eredmények alapján egy SUHNER RT 320 A6 körasztal alkalmas lesz a dobos struktúra működtetésére.

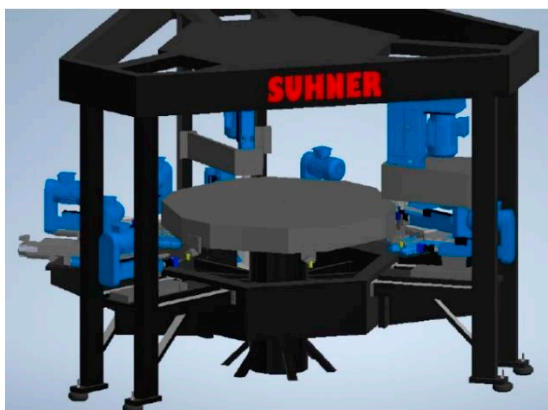
A célgép modellje az Autodesk Inventor Professional 2023 szoftverben készült, melyet a 4. és az 5. ábrák érzékeltetnek.



3. ábra A satu méretezésénél figyelembe veendő támadási irányok



4. ábra A port 1 G1/8" zsákfuratának és a két rögzítőfurat előfúrása



5. ábra Az elkészült célgép 3D-s modellje

Az időciklogram alapján a végleges termelékenységre – köszönhetően a pozíciók teljes feltöltöttsége miatt – több, mint évi 700000 darab adódott.

## 7. ÖSSZEFOGLALÁS

A termelékenység fokozása érdekében az iparban egyre több helyen alkalmaznak célgépeket. Ebben a cikkben tömören összefoglalásra került a célgéptervezés módszertana. A főbb lépések bemutatása érdekében egy pneumatikus elosztó tömb furatainak elkészítéséhez egy egyedi célgép tervezése történt meg.

A jövőben megvizsgálásra kerül, hogy a célgéptervezés folyamata miként gyorsítható számítógéppel segítve.

## 8. IRODALOM

- [1] Sathishkumar S., Swaminathan R., Mithun Sena S., Dinakaran P.T.: *Design and Development of Special Purpose Machine Using Hydropneumatic Cylinders to do 4 Holes and 2 Holes Piercing in a Square Tube*, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 8(3), pp. 209–218, (2017)
- [2] Salunkhe S. S., Ugale A. S.: *Design and Development of PLC Operated Special Purpose Machine for Face Milling Operation on Connecting Rod*, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 08, Issue 06, (June 2019)
- [3] Patel M., Pradhan S.: *Special Purpose Winding Machine for Fusion Relevant Magnets in India*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, no. 3, pp. 4202404-4202404, doi: 10.1109/TASC.2011.2180500., (June 2012)
- [4] Takács Gy., Zsiga Z., Szabóné Makó I., Hegedűs Gy.: *Gyártóeszközök módszeres tervezése*, Nemzeti tankönyvkiadó, (2009)
- [5] FESTO AG & Co: *Distributor block FR-9-M3-B*, adatlap, (2023)
- [6] Szemjkal A., Ozsváth P.: *Járműszerkezeti anyagok és technológiák II.*, Typotex Kiadó, (2011)
- [7] SUHNER GmbH weboldala: <https://www.suhner.com>





# CONTENTS

<i>1. Péter Bencs, Nóra Nagy:</i> REVIEW OF RISK ANALYSIS OF HYDROGEN POWERED CARS .....	5	<i>8. Judit Albert, Ágnes Takács:</i> CIRCULAR MANUFACTURING OF THERMOELECTRIC MODULES SUPPORTED BY DQN DECISION-MAKING OPTIMIZATION .....	42
<i>2. Péter Bencs:</i> REVIEW OF FUTURE FUELS IN TRANSPORTATION .....	9	<i>9. Róbert Kovács, Péter Korzenszky, Róbert Keresztes:</i> INVESTIGATION OF THE CUTTING OF ENGINEERING PLASTIC MATERIALS .....	48
<i>3. Dávid Bodnár, Károly Jármái:</i> MULTIVARIABLE OPTIMISATION OF MECHANICAL STRUCTURE BASED ON MANUFACTURING METHOD AND COST ANALYSIS .....	14	<i>10. Gergő Leskó, Gábor Simon, László Rónai:</i> COMPUTER AIDED DESIGN OF SINGLE-PURPOSE MACHINES .....	57
<i>4. Károly Jármái, Maryam Hasanali, Kaveh Andisheh:</i> STRUCTURAL OPTIMISATION EXAMPLE FOR THE DESIGN OF AN ACTIVE SHEAR LINK OF A REUSABLE SEISMIC FRAME .....	18	<i>11. Ádám Nagy, István Bodnár, Endre Kovács:</i> HEAT PROPAGATION INVESTIGATION OF A PHOTOVOLTAIC SOLAR PANEL FOR DETERMINING ITS ELECTRICAL FEATURES .....	61
<i>5. Péter Kiss Márton, Ildikó Molnár:</i> OPTIMISATION OF THE PIPE CHASSIS FOR A FORMULA .....	24	<i>12. Gábor Simon, László Rónai:</i> DESIGN METHODOLOGY OF SINGLE-PURPOSE MACHINES .....	68
<i>6. Attila Kovács, Judit Molnár Somogyi, Károly Jármái:</i> ELECTRICAL TRANSIENTS IN INDUSTRIAL FACILITIES .....	28		
<i>7. Edit Laufer, Richárd Horváth:</i> RESULTANT FORCE PREDICTION FOR HONEYCOMB SANDWICH COMPOSITE IN THE MILLING PROCESS USING MIXED-ORDER SUGENO MODEL .....	35		

# GÉP

The technical, business, investment, sales, research and development, market information journal of  
THE SCIENTIFIC ASSOCIATION FOR MECHANICAL ENGINEERING

## President of Editorial

### Board:

Dr. Gabriella Vadászné  
Bognár

### General Editor:

Dr. Csaba Dömötör

### Deputy:

Dr. György Ábrahám

Dr. István Barkóczy

Dr. Lajos Borbás

Dr. Árpád Czifra

Dr. József Danyi

Dr. Gusztáv Fekete

Dr. Péter Horák

Dr. Sándor Horváth

Dr. Béla Illés

Dr. Endre Jánosi

Dr. Károly Jármai

Dr. József Kakuk

Dr. Gábor Kalácska

Dr. Márk Lelkes

Dr. János Kanócz

Dr. László Könözsy

Dr. Tamás Mankovits

Dr. Márton Máté

Dr. Ferenc Orbán

Dr. Gyula Patkó

Dr. Attila Piros

Dr. László Soltész

Dr. István Szabó

Dr. Szabolcs Szávai

Dr. János Száva

Dr. Ferenc Szigeti

Dr. Imre Tímár

Dr. Zoltán Weltsch

## DEAR READER,

Emerson is a global technology- and software company that provides innovative solutions for the world's essential industries. Emerson's site in Eger is a strong pillar, of both Hungarian pneumatics production and Emerson's Discrete Automation business. It has always placed great emphasis on the employment of highly qualified and talented colleagues, as this is one of the main guarantees of world-class operations. Cooperation with university students and lecturers has been the main activity of the company since its inception.

The Agria Conference Series, InnoVETAS2024, the largest technical scientific conference in Heves county, held for the eighth time in May 2024, is a fine example of the collaborative process during which Emerson Automation FCP Kft. provides university students and researchers with the opportunity to present their latest research results. In 2024, in addition to the InnoVETAS2024 conference, the 2nd Emerson Technical Playground competition, its judging and award ceremony took place. In addition to the technical and scientific presentations, the equipment designed and made by the students made the event colorful.

At the plenary session of the InnoVETAS2024 conference, those interested could listen to the presentation of István Hegymegi, the Hungarian commercial manager, presenting Emerson's future-oriented product portfolio. Afterwards, Wojciech Zakrzewski, HR Director of Emerson for Eastern and Central Europe, presented the Emerson Group's commitment to a „smarter”, more innovative, safer and greener future. He pointed out the importance of „soft skills”, cooperation, acceptance and commitment in addition to engineering knowledge.

The constantly growing number of speakers and interested parties at the conference shows the raison d'être and importance of the Agria Conference series among the international conferences organized in Hungary, as well as the growing demand for cooperation between education and industry.

**Dr. László Soltész**  
*organizing  
committe chair*

**Dr. Szilárd Nagy**  
*organizing committe  
Software developer  
Emerson Automation  
FCP Ltd.*

**Prof. Dr. László  
Pokorádi**  
*founder chair Óbuda  
University Institute of  
Mechatronics and  
Vehicle Engineering*

Managing Editor: Dr. Csaba Dömötör • Editor's address: H-3515 Miskolc, Egyetemváros  
Phone: +36-20/824-5197 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433  
Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu  
Web: http://www.gepujsag.hu • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director  
Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP  
(https://eshop.posta.hu/storefront/), via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest  
Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.  
T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

The published articles have been reviewed. • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary



### 44. Balatoni Ankét

2024. november 14-16., Siófok

A GTE Százhalombattai Területi Szervezete és a Magyar Hegesztési Egyesület, mint társszervező 2024-ben is megrendezi, hagyományos formában, az őszi Balatoni (korábbi nevén Csepaki) Ankétját, **Nyomástartó rendszereket üzemeltető létesítmények élettartam hosszabbítása** címmel.

Az idei ankéton szintén egy aktuális témával szeretnénk foglalkozni: a nyomástartó rendszerek élettartamának meghosszabbításával. Az élettartamra méretezett lejárt üzemidejű, vagy jelentősen elhasználódott berendezések kiváltása igen költséges beruházást jelent, De vajon mennyire használódtak el ezek a berendezések valójában és a mai korszerűbb ismereteink alapján mennyi tartalék maradt még bennük? Mennyit fejlődött a tudásunk ezen a téren és milyen új eszközök segítenek nekünk a maradék élettartam meghatározásában. Ezt szeretnénk körbe járni valós példák bemutatásával és hasznos ismereteket nyújtani mindazoknak, akik hasonló problémák előtt állnak. Természetesen idén is foglalkozunk a jogi szabályozás és a szabványosítás kérdéseivel, melyek nélkül nem lehet meghozni műszaki döntéseket és a meghibásodások tapasztalatainak megosztásával segítünk elkerülni a hasonló esetek megismétlődését más területeken.

A témakörök:

1. Iparpolitikánk aktuális kérdései, szabványosítás, jogi szabályozás, szakképzés
2. A termelő létesítmények élettartamát befolyásoló tényezők (kopás, fáradás, kúszás stb.)
3. A közelmúltban történt nyomástartó rendszer meghibásodások és javítások tanulságos esetei az élettartam meghosszabbítása tükrében
4. A korszerű anyagvizsgálat hogyan segíti az élettartam meghosszabbítást?
5. Mesterkurzus az üzemelési ciklusidők meghatározásának módszereiről
6. Fórum: A vegyipari mérnökképzés és a hazai vegyi- és energia ipart megalapozó tervező intézetek jövője. Szakemberek kérdeznek az egyes szakterületek képviselőitől

További részletek a <https://events.gteportal.eu/44-balatoni-anket> oldalon.

### 9. Gépészeti Szakmakultúra Konferencia

2024. november 21., Budapest

A gépészeti szakmakultúra legfőbb törekvése az erőforrások hatékony alkalmazása és azok folyamatos fejlesztése. Ezek az erőforrások a feladat elvégzéséhez szükséges személyek, eljárások, módszerek, technológiák. Ezekről az eljárásokról, módszerekről, technológiákról szóló előadásokkal kívánjuk a konferencia résztvevőit támogatni munkájukban.



Az alábbi témakörökben várunk előadásokat, kutatási eredmény-beszámolókat, kutatóktól, gyakorlati szakemberektől, oktatóktól 20 perc terjedelemben:

- Géptervezés, gépgyártás, termékfejlesztés, innováció
- Egyedi berendezések, célgépek
- Élelmiszeripari és vegyipari géptervezés
- Ipar 4.0, Mesterséges Intelligencia, digitalizáció
- A tervezés eszközeinek, módszereinek korszerűsítése, informatikai fejlesztése
- Értékelemzés, költségcsökkentés, értéktervezés, minőségbiztosítás
- Áramlástan, mechanikai szimuláció
- Modern gyártási eljárások, additív gyártás
- Mérés, anyagvizsgálat, kísérlet és eszközei
- Ergonómia
- Gépészeti eljárások alkalmazása az orvostechikában
- Automatizálás, mechatronika
- Hallgatói versenyek (Techtogether, Formula Student), TDK dolgozatok

Számítunk az iparvállalatok szakembereinek részvételére és előadásaira, a hazai iparban befektető cégek K+F eredményeinek bemutatására. Várjuk a gépészettel és rokon szakmákkal (ipari formatervezés, mérés-technika, anyagvizsgálat) foglalkozó cégek, egyetemi tanszékek részvételét is konferenciánkon.

További részletek a <https://events.gteportal.eu/szaku2024> oldalon.

