

# GÉP

## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA

| Hónap      | kWh    |
|------------|--------|
| Január     | 23,83  |
| Február    | 34,27  |
| Március    | 55,43  |
| Április    | 75,34  |
| Május      | 100,67 |
| Június     | 105,04 |
| Július     | 116,15 |
| Augusztus  | 110,34 |
| Szeptember | 81,24  |
| Október    | 56,55  |
| November   | 25,9   |
| December   | 16,78  |

Definition

Manufacturing

Simulation

Results

#### 8:30-09:00 REGISZTRÁCIÓ

#### Plenáris ülés: MESTERSÉGES INTELLIGENCIA, FENNTARTHATÓSÁG

##### 9:00 – Dr. Orbulov Imre

*BME Gépészmérnöki Kar dékánja*  
A konferencia megnyitása

##### 9:10 – Dr. Takács János

*GTE elnöke*  
A konferencia nyitó gondolatai

##### 9:20 – Szilágyi László / Knorr-Bremse VJRH Kft. – A konferencia üdvözlése

##### 9:30 – Dr. Jónás Szabolcs / Knorr-Bremse VJRH Kft. – 123 éve született Bíró László József – az írás forradalma

##### 9:50 – Dr. Vancsai György, Dr. Katona Géza / Knorr-Bremse VJRH Kft. – Hogyan gyűjtünk adatot CAD rajzokról?

##### 10:10 – Sári Zoltán / Neumann János Egyetem – Járművek energiamenedzsmentjének támogatása napelemmel

##### 10:30 – Godó Mónika / Knorr-Bremse VJRH Kft. – Innotrans szakvásárra elkészített termékeink ökológiai lábnyomának bemutatása

#### 10:50 – KÁVÉSZÜNET

#### 1.A SZEKCIÓ – KONSTRUKCIÓ

##### 11:10 – Dr. Jónás Szabolcs, Dr. Kovács Péter Zoltán / Knorr-Bremse VJRH Kft. – Csövek kötése képlékeny alakítással

##### 11:30 – Dr. Lovas László, Ayham Aljabrah / BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék – Study of the dog clutch shiftability

##### 11:50 – Fülöp Attila, Hauer Balázs, Koós Zoltán / Knorr-Bremse VJRH Kft. – Elektromos kopásjelző

#### 2.A szekció – TECHNOLÓGIA

##### 11:10 – Dr. Haidegger Géza / SZTAKI – Az Automatizálás és Robotika szerepének folyamatos növekedése Európában, szinkronban a ManuFure Európai Technológiai Platformban megfogalmazott vízióval és az IPAR 5.0 irányelvekkel

##### 11:30 – Takács Imre, Tóth Péter / CAD-CAM Solutions Kft. – Tudás alapú automatizált gyártástervezés

##### 11:50 – Vámi Soma, Stocker István / Gentherr Hungary Kft. – Személyautó ülések klimatizálásának technikai megoldásai

#### 12:10 – EBÉDSZÜNET

#### 1.A SZEKCIÓ

##### 12:50 – Dr. Vancsai György, Dr. Katona Géza / Knorr-Bremse VJRH Kft. – A prérésszámítás titkai

##### 13:10 – Dr. Lovas László, Talal Alsardia / BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék – Nut factor variation of a bolted joint under cyclic tightening

##### 13:30 – Császár László, Dr. Vancsai György / Knorr-Bremse VJRH Kft. – A megvalósíthatósági tanulmányok statisztikai értékelése és továbbfejlesztési lehetőségei

#### 2.A SZEKCIÓ

##### 12:50 – Dr. Hegedűs Gergely / Kentech Kft. – Automata gyártósor fejlesztése polimer kompozit termékek rövid ciklusidejű sorozatgyártására

##### 13:10 – Dr. Kállai-Szabó Barnabás, Pencz Kriszta Mariann, Szarvák Marina / Vitecer Kft. – Homogén összetételű szemcséket tartalmazó étrendkiegészítő gyártási technológiájának kidolgozása

##### 13:30 – Kertay Nándor / Tribologic Kft. – Ipari olajok és technológiai folyadékok élettartam- növelő kezelése

#### 3.A SZEKCIÓ ÉRTÉKELEMZÉS-ERGONÓMIA

##### 12:50 – Dr. Nádasi Ferenc, Dr. Keszi- Szeremlei Andrea / Dunaújvárosi Egyetem – Technológia fejlesztése az értékelemzés alkalmazásával

##### 13:10 – Tarjáni István, Tarjáni Ariella Janka / Fókusz-2 Kft. – Az értékelemzés, mint hozzáadott hajtóerő - nemzetközi példákkal

##### 13:30 – Boros Dávid Pál, Dr. Hercegfői Károly / BME Ergonómia és Pszichológia Tanszék – A magyar ipari ergonómiai gyakorlat sokszínűsége

#### 13:50 – KÁVÉSZÜNET

#### 1.B szekció – ADDITÍV GYÁRTÁS

##### 14:10 – Nagy Ábel / Knorr-Bremse VJRH Kft. – Újratervezve: additív gyártástechnológiára tervezett hidraulikus panel tervezési folyamata

##### 14:30 – Márton Zoltán / Knorr-Bremse VJRH Kft. – Additív gyártástechnológiával előállított AlSi10Mg kifáradási vizsgálatai

##### 14:50 – Hussein Alzyod, Ficzer Péter, Dr. Borbás Lajos / EDUTUS Egyetem – Numerical study to investigate the correlation between printing parameters and the warping of 3D models using fff

##### 15:10 – Kónya Gábor, Ficzer Péter / Neumann János Egyetem – A rétegvastagság és az orientáció hatása 3D nyomtatott alkatrészek mikro- és makrogeometriai jellemzőire

##### 15:30 – Szigetvári Máté / Knorr-Bremse VJRH Kft. – 3D nyomtatás és hőtani szimuláció fontossága új termék tervezésnél

#### 2.B szekció SZIMULÁCIÓ-MODELLEZÉS

##### 14:10 – Widner Attila, Dr. Tettamanti Tamás / BME Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék – Modellvalidációs módszertan járműdinamikai szimulációkhoz

##### 14:30 – Dr. Németh Huba, Dr. Gyurkó Zoltán / Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft. – Automatizált járműirányító rendszerek modell alapú fejlesztése és tesztelése

##### 14:50 – Pálfi Tamás, Dr. Ficzer Péter / BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék – IT vs. Valóság. Avagy mennyire hatékony a számítógépes szimuláció

##### 15:10 – Rikli Ákos / Knorr-Bremse VJRH Kft. – EFG3 energiaelnyelő egység végeelemes vizsgálata

##### 15:30 – Oláh Zoltán, Gaják Gellért / Ecséri Kft. – Nyomásos alumínium öntőszerszám tervezés módszereinek korszerűsítése szimulációs szoftverekkel

#### 3.B szekció MÉRÉS-TESTELÉS

##### 14:10 – Székely Loránd, Tari János, Kovács Zoltán / Knorr-Bremse Fékrendszerek Kft. – Speciális EV szimulációs rendszer kutatás-fejlesztés laborban

##### 14:30 – Turcsán Tamás / eCon Engineering Kft. – Mérésekkel támogatott hegesztési varrat élettartamvizsgálat az eCon Engineering Kft.-nél

##### 14:50 – Demus Tamás / Knorr-Bremse VJRH Kft. – Vasúti jármű menetprofil rögzítésére alkalmas kézi eszköz fejlesztése

##### 15:10 – Pásthay László, Dr. Farkas Zsolt, Dr. Tamás Kornél / BME Gép- és Terméktervezés Tanszék – Laboratóriumi talajvályús mérőberendezés fejlesztése

##### 15:30 – Holló Mihály, Christophe Barbe / Szelence Kft. – VOC pontforrás-emissziók csökkentése tömítésvizsgáló berendezésekkel

#### 16:00 – KONFERENCIA ZÁRÁSA

#### 16:15-17:00 – GYÁRLÁTOGATÁS

# GÉP

## A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

### SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám

**elnök**

Vesza József

**főszerkesztő**

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**főszerkesztő-helyettesek**

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

### KEDVES OLVASÓ!

Nagy örömmel számolhatok be, 2022 szeptemberében első alkalommal céges környezetben rendeztük meg a GTE Konstruktív Szakosztály kiemelt eseményét, a VII. Gépészeti Szakmakultúra konferenciát, amelynek a Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Kft adott otthont.

Kiemelkedő sikernek könyvelhető el, hogy minden eddigi konferenciánknál több előadó és résztvevő regisztrált, összesen 34 előadást tudott figyelemmel kísérni a hallgatóság.

A plenáris ülésen a köszöntők után több érdekesítő előadás hangzott el újdonságnak számító témakörökben, úgymint járművek napelemes energiazöldalkodása, vagy a mesterséges intelligencia alkalmazása a gépészetben. Kiemelendőként említhetjük még Jónás Szabolcs kultúrtörténeti előadását Bíró Lászlóról és a találmányáról a golyóstollról.

Az ezt követő párhuzamosan futó üléseken a következő témakörökben hallhattunk előadásokat:

- 1A szekció: Konstruktív
- 1B szekció: Additív gyártás
- 2A szekció: Technológia
- 2B szekció: Szimuláció és modellezés
- 3A szekció: Értékelemzés & Ergonómia
- 3B szekció: Mérés és tesztelés

A GÉP folyóirat ezen kiadása hat előadás írásos anyagát tartalmazza.

A rendezvénysorozat eddigi sikerére alapozva tervezzük, hogy 2023 szeptemberében a VIII. Gépészeti Szakmakultúra Konferenciát ismét megszervezzük.

Köszönetet szeretnék mondani konferenciánk támogatóinak:

- MTA Műszaki Tudományok Osztálya, Gépszerkezettani Tudományos Bizottság
- BME Gépészmérnöki Kar Gép- és Terméktervezés Tanszék
- Knorr-Bremse Vasúti Jármű Rendszerek Kft.
- SZTAKI Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

*Üdvözlettel a Szervezőbizottság nevében:*

*Metál Attila*

*GTE Konstruktív Szakosztály titkára*

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépípari 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

1. *Talal Alsardia, Dr. László Lovas:*  
SÚRLÓDÁS VÁLTOZÁSA  
CSAVARKÖTÉSBEN TÖBBSZÖRI  
MEGHÚZÁS ESETÉN ..... 5
2. *Ayham Aljawabrah, Dr. László Lovas:*  
KÖRMÖS TENGELYKAPCSOLÓ  
KAPCSOLÁS KINEMATIKAI  
MODELLJE ..... 9
3. *Hussein Alzyod, Dr. Peter Ficzere,*  
*Prof. Lajos Borbas:*  
A GYÁRTÁSI PARAMÉTEREKNEK A  
WARPING JELENSÉGRE GYAKOROLT  
HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA  
NUMERIKUS MÓDSZEREKKEL FFF  
NYOMTATÁSI ELJÁRÁS  
ESETÉN ..... 13
4. *Dr. Nádasdi Ferenc, Dr. Keszi-*  
*Szeremlei Andrea:*  
TECHNOLÓGIA FEJLESZTÉSE AZ  
ÉRTÉKELEMZÉS  
ALKALMAZÁSÁVAL ..... 17
5. *Sári Zoltán:*  
HIBRID- ÉS ELEKTROMOS  
JÁRMŰVEK  
ENERGIAMENEDZSMENTJÉNEK  
LEHETSÉGES TÁMOGATÁSA  
NAPELEMMEL ..... 22
6. *Widner Attila, Dr. Tettamanti Tamás:*  
MODELLVALIDÁCIÓS  
MÓDSZERTAN  
JÁRMŰDINAMIKAI  
SZIMULÁCIÓKHOZ ..... 32

# SÚRLÓDÁS VÁLTOZÁSA CSAVARKÖTÉSSEN TÖBBSZÖRI MEGHÚZÁS ESETÉN

## FRICITION VARIATION IN A BOLTED JOINT DURING CYCLIC TIGHTENING

*Talal Alsardia, PhD student, alsardia@edu.bme.hu*

*Dr. László Lovas, associate professor, lovas.laszlo@kjk.bme.hu  
BME Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis*

**ABSTRACT** This paper deals with the influence of cyclic tightening/loosening on the generated preload in a bolted joint. Black surface finished bolts and nuts of grades 10.9 and 8 are used in three diameter sizes. Four lubrication cases were considered. The torque-tension experimental data are presented and discussed.

### 1. INTRODUCTION

Threaded fasteners are widely used in various mechanical and industrial applications, with the primary function of clamping two or more components together with easy assembly/disassembly functionality. Generating the bolt clamping force is usually made by torquing the bolts to a specified torque value, which is a broad and commonly used way due to its simplicity of operation. For a typical bolted joint, when the surfaces in the joint are aligned, and the prevailing torque is absent (e.g., nut that has rotation resistance in tightening and unscrewing, ex.: the presence of a plastic insert) [1], Motosh equation [2] shows that three main reaction torque resist the input torque to the turning head in the bolted joint as follow:

$$T_{input} = T_{pitch} + T_{Underhead} + T_{Thread} \quad (1)$$

Only the pitch torque ( $T_{pitch}$ ) causes the bolt to stretch and produce the clamping force. At the same time, the  $T_{Underhead}$  and  $T_{Threads}$  are the torque consumed to overcome the frictional resistance at the underhead and threads contact area, respectively. Another representation for the torque-tension relationship, according to the DIN EN ISO 16047[3] standard, can be given in equations (2) and (3). Equation (2) is a theoretical expression based on the bolted joint geometrical and frictional parameters at the level of the threads and under the turning head. On the other hand, Equation (3) is an empirical expression

based on the bolt nominal diameter  $D$  and the experimentally measured *torque coefficient*  $K$ , also called the “*nut factor*”. Here,  $K$  is a dimensionless constant that combines the influence of all the variables that affect the preload ( $F$ ), even those not defined or complicated to quantify.

$$T = F \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{P+1,154 \cdot \pi \cdot \mu_{th} \cdot d_2}{\pi-1,154 \cdot \mu_{th} \cdot \frac{P}{d_2}} + \mu_b \cdot \frac{D_o+d_h}{4} \right) \quad (2)$$

$$T = K \cdot F \cdot D \quad (3)$$

Equation (3) has a straightforward format and is simple to apply since it uses standardized measurable data. That is why several studies in the literature used this approach [4][5] [6]. In industrial applications is advised to replace a fastener once dismantled for safety reasons [7]. However, in engineering practice, the fasteners are widely reused in some applications due to their particular design (ex.: wheel bolts) or the lack of fasteners with certain material specifications. A previous study [8] reported the effect of retightening of M22x1.5 black finish wheel bolt resulting in up to 70% preload reduction after the third tightening when the nut is degreased. Another research [9] made on electro-zinc plated M12x1.75 fasteners reported doubling the friction coefficient after the ten retightening cycles. This paper focuses on how the bolt-generated preload behaves under the cyclic tightening/ un-tightening process on the same bolt, tested with different bolt diameter sizes, under different lubrication conditions.

### 2. EXPERIMENTAL SETUP AND PRELOAD MEASUREMENT

The torquing experiments were performed on black surface finish bolts. Three sizes were utilized: M6, M8, and M10 of grade 10.9, with a mating nut of grade 8. For each size, 80 new bolts/nuts are divided into groups of twenty assigned for four lubrication cases.

The lubrication conditions are the following: as is, dry, solid molybdenum disulphide powder ( $\text{MoS}_2$ ), and engine motor oil. The as is represents the out-of-the-box state: usually, the bolts are coated with a rust preventative lubricant. For the remaining three conditions, the bolts and nuts are cleaned using Loctite SF 7061 to have a surface free of lubricant or contamination, and this represents the second case dry condition. A thin layer of the solid  $\text{MoS}_2$  powder was applied for the third one. For the last one, a few drops of 15W-40 oil were applied. For the third and fourth cases, lubrication was added to the bolt threads and the underhead surface of the turning head (the nut) only before the first tightening. Figure 1 illustrates the preparation of the lubrication cases and the experimental procedure.

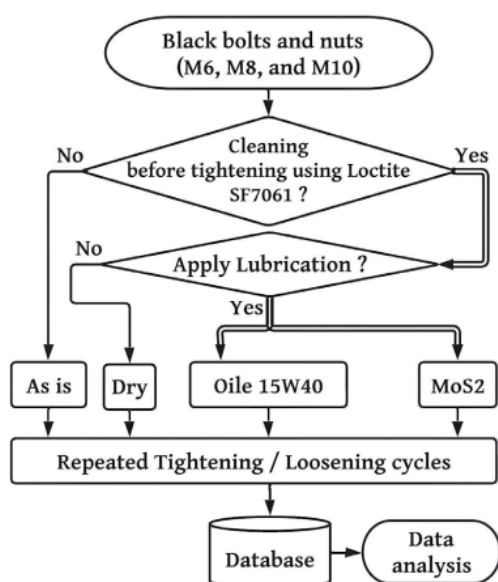


Figure 1. Experimental procedure diagram

The measurements and the data collection were realized the same as in previous work [10]. Two torque control methods were used. A torque wrench was used for tightening the nut to a specific torque based on the bolt size. After tightening, a strain gauge with a data acquisition system was used to measure and record the peak force generated in the bolt; then, the nut was released. This process forms one cycle, which was repeated 20 times for each bolt under the same torque value. A total of 240 bolts were used in the experiments. Table 1 summarizes the geometrical and technical information and the calculated parameters for the tested bolts.

Table 1. Tested bolt specifications

| Size                                     | M6    | M8    | M10   |
|--|-------|-------|-------|
| Torque (N.m)                             | 10    | 20    | 40    |
| $d_1$ (mm)                               | 5.188 | 7.188 | 9.188 |
| $d_2$ (mm)                               | 9.75  | 10.75 | 11.75 |
| Metric thread profile angle, $\beta$ (°) | 60    | 60    | 60    |
| computed angle $\rho'$ (°)               | 6.587 |       |       |
| Thread lead angle $\alpha$ (°)           | 4.386 | 3.168 | 3.168 |
| Thread pitch (mm)                        | 1.25  | 1.25  | 1.25  |
| grade                                    | Bolt  | 10.9  |       |
|  | Nut   | 8     |       |

### 3. RESULTS

#### 3.1. Generated preload

For the first tightening cycle, the influence of the lubrication presence on the generated preload is plotted in Figure 2, where each point on the graph represents a mean of twenty measurements. As can be seen, even though the tightening torque is the same for each diameter, the initially achieved preload is different. There is a similarity in the lubrication performance in the case of M10 and M6, such that the achieved preload order based on the lubrication type from the lowest to the highest value was: dry, as is, oiled, then  $\text{MoS}_2$ . Note that for the M8 size, the as is performance was better than when the oiled film was applied. This can be related to the amount and the type of rust preventative lubricant applied in the bolt factory.

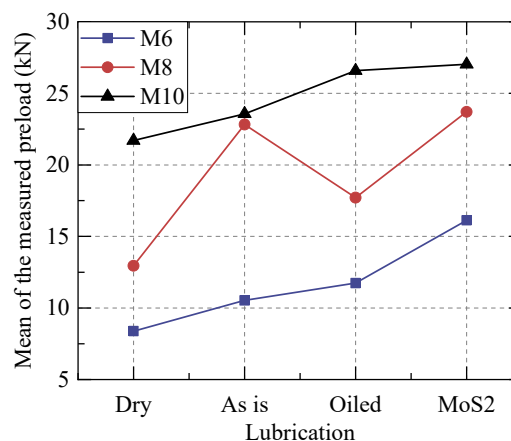


Figure 2. First tightening measured preload mean vs. lubrication types

Figure 3 shows the behaviour of the generated preload during the twenty tightening replications for the three bolt diameters under four lubrication states. The following remarks can be made:

1. The dry lubrication state gives the lowest achieved preload, with the least scattering in the measured data. So it is not good practice to clean the fastener before tightening.

- The performance of the as is lubrication is similar to the oiled one, and this can be linked to that at the bolt factory the black bolt is coated with rust preventing oil for storage purposes.
- MoS<sub>2</sub> gives the highest initial preload, but also the highest scatter (wider box and longer whisker line) in the measured data.
- Applying oil film gives the best preload performance in the function of the number of tightenings. Two slopes can be identified in the curve: the preload increases up to the fifth cycle, then it is stabilized.

Table 2 summarizes the maximum and the minimum of the generated preload mean. The smallest preload mean range for the M6 and M10 was when the lubrication condition was MoS<sub>2</sub>, while for the M8, this case was the dry one.

### 3.2. Nut factor

The overall interaction between the input tightening torque and the generated preload in the bolt can be investigated by computing the nut factor using equation (4) for every individual tightening process for all bolts during the repeated tightening cycles. After that, the nut factor's mean for the tightening cycles is given by equation (5). The nut factor is inversely related to the generated preload: a higher nut factor indicates poor bolting performance and vice versa.

$$K = \frac{T_{input D}}{D * F_{Measured}} \quad (4)$$

$$K_{Mean R} = \frac{\sum_{B=1}^N T_{input D}}{D * F_{Measured B}} \quad (5)$$

In the equations,  $K$  is the nut factor.  $K_{Mean R}$  represents the mean of the nut factor for repetition  $R=1, 2, 3 \dots 20$ .  $B$  is the bolt number,  $N=20$  is the total number of tested bolts for each case, and  $D$  is the bolt nominal diameter.  $T_{input, D}$  indicates the input tightening torque for the nominal diameter, and  $F_{Measured B}$  is the experimentally measured preload. Figure 4 represents the summary of the nut factor mean grouped by different lubrication conditions. It can be seen that:

- For dry case, the nut factor range is high and more dispersed. This can be related to the increased wear and tear of the contact surfaces (poor contact surface quality), which consumes more torque and lowers the preload value.

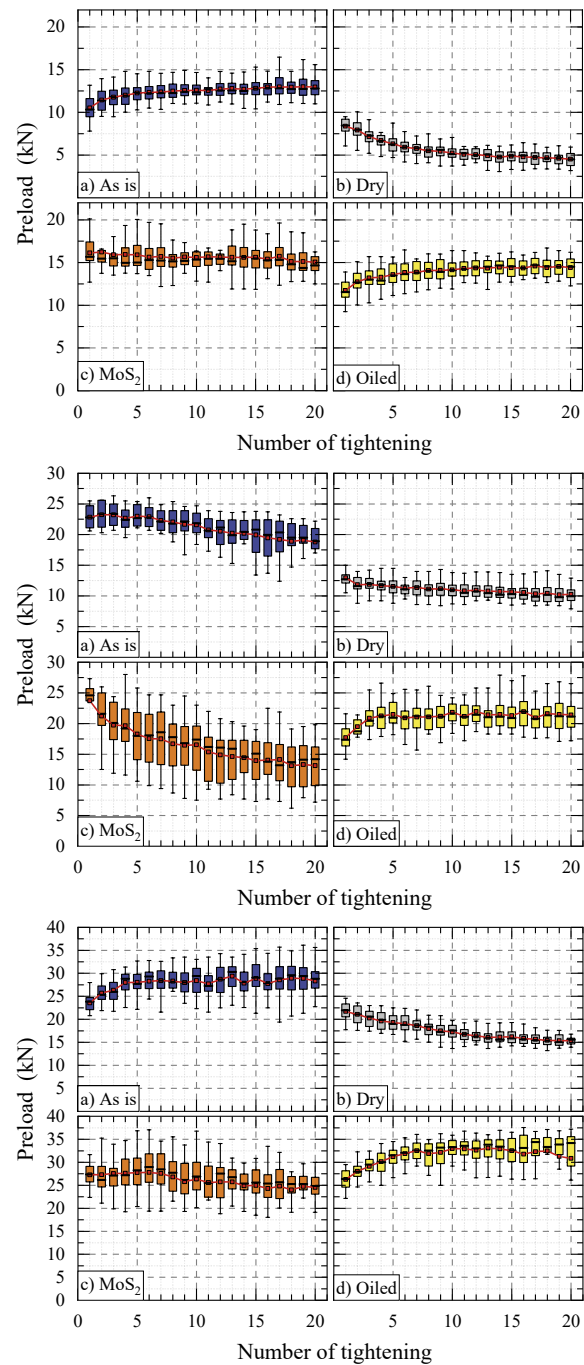


Figure 3. Box plot of the generated preload for the bolt diameter: I) M6, II) M8, and III) M10

Table 2. Range of preload

|     | Lubrication | As is | Dry        | MoS <sub>2</sub> | Oiled |
|-----|-------------|-------|------------|------------------|-------|
| M6  | Max         | 13    | 9.38       | 16.24            | 14.60 |
|     | Min         | 10.53 | 4.52       | 15.06            | 11.74 |
|     | Range       | 2.47  | 3.86       | <b>1.18</b>      | 2.86  |
| M8  | Max         | 23.2  | 13.0       | 23.7             | 22.0  |
|     | Min         | 18.8  | 10.2       | 13.1             | 17.7  |
|     | Range       | 4.5   | <b>2.8</b> | 10.6             | 4.3   |
| M10 | Max         | 29.38 | 21.71      | 28.76            | 34.13 |
|     | Min         | 23.58 | 15.36      | 24.73            | 26.58 |
|     | Range       | 5.80  | 6.35       | <b>4.03</b>      | 7.55  |

The lubrication conditions are the following: as is, dry, solid molybdenum disulphide powder ( $\text{MoS}_2$ ), and engine motor oil. The as is represents the out-of-the-box state: usually, the bolts are coated with a rust preventative lubricant. For the remaining three conditions, the bolts and nuts are cleaned using Loctite SF 7061 to have a surface free of lubricant or contamination, and this represents the second case dry condition. A thin layer of the solid  $\text{MoS}_2$  powder was applied for the third one. For the last one, a few drops of 15W-40 oil were applied. For the third and fourth cases, lubrication was added to the bolt threads and the underhead surface of the turning head (the nut) only before the first tightening. Figure 1 illustrates the preparation of the lubrication cases and the experimental procedure.

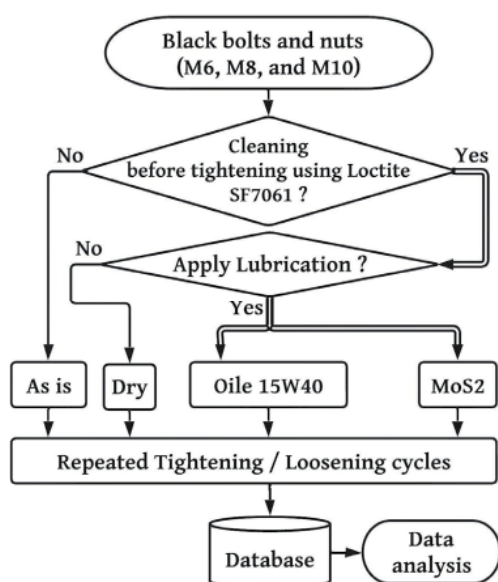


Figure 1. Experimental procedure diagram

The measurements and the data collection were realized the same as in previous work [10]. Two torque control methods were used. A torque wrench was used for tightening the nut to a specific torque based on the bolt size. After tightening, a strain gauge with a data acquisition system was used to measure and record the peak force generated in the bolt; then, the nut was released. This process forms one cycle, which was repeated 20 times for each bolt under the same torque value. A total of 240 bolts were used in the experiments. Table 1 summarizes the geometrical and technical information and the calculated parameters for the tested bolts.

Table 1. Tested bolt specifications

| Size                                     | M6    | M8    | M10   |
|--|-------|-------|-------|
| Torque (N.m)                             | 10    | 20    | 40    |
| $d_1$ (mm)                               | 5.188 | 7.188 | 9.188 |
| $d_2$ (mm)                               | 9.75  | 10.75 | 11.75 |
| Metric thread profile angle, $\beta$ (°) | 60    | 60    | 60    |
| computed angle $\rho'$ (°)               | 6.587 |       |       |
| Thread lead angle $\alpha$ (°)           | 4.386 | 3.168 | 3.168 |
| Thread pitch (mm)                        | 1.25  | 1.25  | 1.25  |
| grade                                    | Bolt  | 10.9  |       |
|  | Nut   | 8     |       |

### 3. RESULTS

#### 3.1. Generated preload

For the first tightening cycle, the influence of the lubrication presence on the generated preload is plotted in Figure 2, where each point on the graph represents a mean of twenty measurements. As can be seen, even though the tightening torque is the same for each diameter, the initially achieved preload is different. There is a similarity in the lubrication performance in the case of M10 and M6, such that the achieved preload order based on the lubrication type from the lowest to the highest value was: dry, as is, oiled, then  $\text{MoS}_2$ . Note that for the M8 size, the as is performance was better than when the oiled film was applied. This can be related to the amount and the type of rust preventative lubricant applied in the bolt factory.

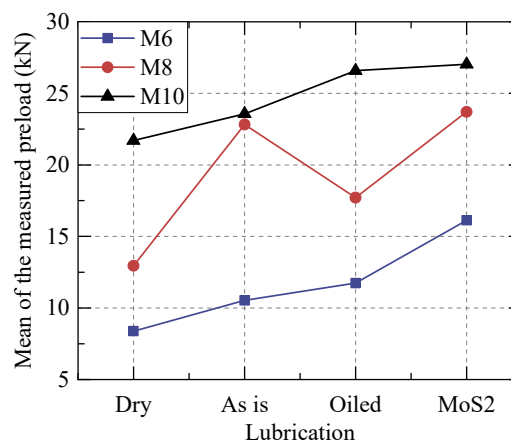


Figure 2. First tightening measured preload mean vs. lubrication types

Figure 3 shows the behaviour of the generated preload during the twenty tightening replications for the three bolt diameters under four lubrication states. The following remarks can be made:

1. The dry lubrication state gives the lowest achieved preload, with the least scattering in the measured data. So it is not good practice to clean the fastener before tightening.

# KÖRMÖS TENGELYKAPCSOLÓ KAPCSOLÁS KINEMATIKAI MODELLJE

## KINEMATICAL MODEL OF THE DOG CLUTCH SHIFTING

*Ayham Aljawabrah, PhD Student, aaljawabrah@edu.bme.hu*  
*Dr. László Lovas, associate professor, lovas.laszlo@kjk.bme.hu*  
*BME Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis*

### ABSTRACT

This paper studies the shiftability of the face dog clutch. A kinematic model describing the engagement of the dog clutch is developed and the shiftability condition is determined. Parameters affecting the shiftability are shown. Shiftability regions are determined by an analytical method.

### 1. INTRODUCTION

The use of internal combustion engines in motor vehicles arises the need to transmit the engine input torque at different output gear ratios to meet all operating conditions. Thus, a mechanism was needed to direct and switch the engine input among the different gear ratios.

Firstly, the synchronizer was developed to accomplish the task, as studied in the literature [1]. The recent development in vehicles focuses on lightweight and simple mechanical structures. Compared to the synchromesh, the dog teeth clutch provides quicker shifting time, simpler structure, larger power transmitting capacity, and has lower cost. As it is only a clutch and not a synchronizer, the problems of synchronization and shiftability have to be resolved.

Many researchers studied the gear shift process. Bóka studied the dog clutch application in automatized mechanical transmission (AMT) for heavy-duty commercial vehicles [2-4]. He used the notion of engagement probability to find a certain successful region depending on the initial mismatch speed [4], but his results were applied to the zone of low mismatch speed. The zone of high mismatch speeds (ex: motorbikes, electric motors) remained unexplained. Later on, Farkas [5] investigated the engagement process from a kinematical point of view. He developed a geometric condition for the successful engagement under constant axial speed condition and developed a two-dimensional

shiftability map. His results showed a periodicity in the successful shifting region. Besides the theoretical study, experimental test rigs, similar to [6], should be developed for theory testing.

This paper intends to follow the path drawn by Bóka and Farkas. The kinematics of a dog teeth clutch shifting will be discussed. Based on that, a generalized equation on engagement probability at any mismatch speed will be built and verified upon literature data.

### 2. DOG CLUTCH GEOMETRIC MODEL

#### 2.1. Structure of a dog clutch

A dog clutch is a coupling used to transmit power. It consists of two parts having complementary geometry. These complementary shapes are referred to as dog teeth. Teeth can be present either on the circumference of a cylinder (radial clutch or spline clutch) or on the circular surface of the cylinder (axial clutch or face clutch). Radial dog teeth clutches are traditionally used for power transmission in automotive gearboxes (cars, trucks, buses) as a part of the synchronizer. Axial dog teeth clutches are traditionally used for power transmission in motorbike gearboxes, where the torque is much less than in a truck case. In this study, axial dog teeth clutches are considered. However, the described method can be applied independently of the place of the geometry.

Let us consider a dog teeth clutch composed of an axially moving part called sliding sleeve ( $s$ ) and an axially fixed, but rotating part called the shifted gear. ( $g$ ) The coupling is realized by the axial motion of the sliding sleeve (Figure 1).

The main geometry parameters are presented in Table 1. The dog geometry is shown in Figure 2 At the beginning of the shifting, the sliding sleeve and the shifted gear have an axial

gap  $x_0$  and initial relative angular position  $\zeta_0$  between the marked teeth. Figure 3a shows further parameters. Here the sliding dog can slide axially with a speed  $v_0$ , while it has relative angular rotation regarding the target gear. The relative angular rotation is called the initial mismatch speed  $\Delta\omega_0$ . The engagement of the complementary geometries is eased with an angular backlash  $\Phi_b$ .

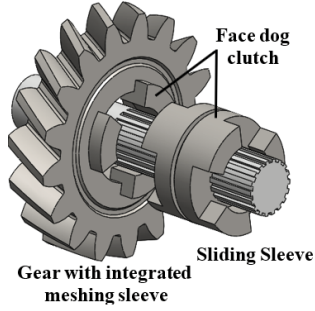


Figure 1. Face dog clutch

Table 1: Dog clutch shiftability parameters

| Parameter                           | Unit            | Parameter                  | Unit |
|-------------------------------------|-----------------|----------------------------|------|
| Initial relative position $\zeta_0$ | [°]             | Angular backlash $\Phi_b$  | [°]  |
| Mismatch speed $\Delta\omega_0$     | [rad/s] ([RPM]) | Overlap distance $x_{fed}$ | [mm] |
| Axial Speed $v_0$                   | [mm/s]          | Axial gap $x_0$            | [mm] |
|                                     |                 | Teeth Number $Z$           | [-]  |

The axial dog clutch has an angular pitch  $\phi$  given by Eq.(1) and an angular backlash  $\Phi_b$  given according to Eq.(2), where  $\phi_t$  is the tooth thickness angle.

$$\phi = \frac{2\pi}{Z} \quad (1)$$

$$\Phi_b = \phi - 2\phi_t \quad (2)$$

## 2.2. Modeling of the dog clutch

The shifting process is analyzed from a kinematical point of view. The following assumptions are used:

- The axial speed for the sliding sleeve is constant
- The angular mismatch speed is constant.
- The effect of the teeth' impact and friction is neglected.

For easier understanding, the dog teeth geometries are rolled out and visualized as having linear motion.

Between the sliding sleeve and the meshing gear, it exists a mismatch speed  $\Delta\omega_0$  and an axial gap  $x_0$  Figure 3a). The engagement

of the dog clutch is realized by the axial motion of the sliding sleeve. At the beginning of the shifting, the sliding dog moves axially with speed, or mean linear velocity, of  $v_0$  until the axial gap is removed (Figure 3b). The time required is given by Eq.(3):

$$t' = \frac{x_0}{v_0} \quad (3)$$

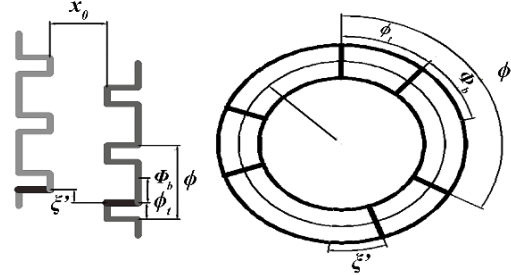


Figure 2. Dog clutch geometry

During this time, the dog clutch parts rotate relative to each other, and the relative angular position changes from  $\zeta_0$  to  $\zeta'$  according to Eq.(4), and as shown in Figure 3b.

$$\zeta' = \zeta_0 + \Delta\omega_0 t' = \zeta_0 + \Delta\omega_0 \frac{x_0}{v_0} \quad (4)$$

We suppose that a successful engagement happens when an overlap  $x_{fed}$  is reached in the axial direction (Figure 3c). The time required for the overlap is given by Eq.(5):

$$t'' = \frac{x_{fed}}{v_0} \quad (5)$$

While reaching the overlap, a relative rotation between the dog clutch and the target gear occurs as shown in Figure 3c, and is given by Eq.(6):

$$\Delta\varphi = \Delta\omega_0 t'' \quad (6)$$

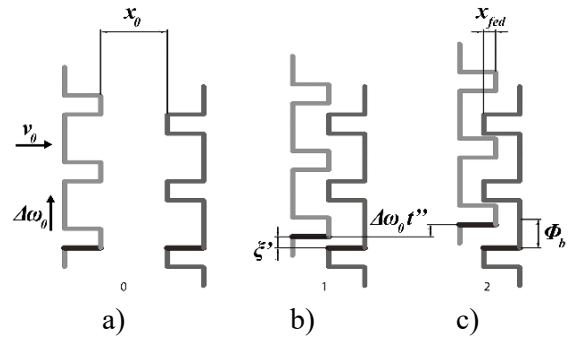


Figure 3. Dog clutch engagement stages

The dog clutch engagement can occur under different conditions. These conditions are characterized by initial relative position  $\zeta_0$  and mismatch speed  $\Delta\omega_0$  values.

Firstly, the initial relative position and the mismatch speed are both equal to zero. The steps of the engagement are shown in Figure 4. The index 0 represents the initial state, 1 the end of the axial gap removal, 2 the reaching of the overlap, and 3 complete engagement when the

sliding sleeve covers the full tooth height in the axial direction, not shown in the figure.

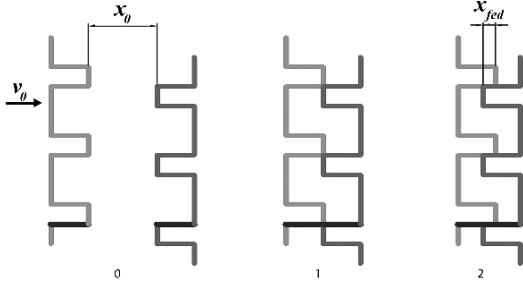


Figure 4. Dog clutch engagement with  $\xi=0$ , and  $\Delta\omega_0=0$

For a successful shifting, the traveled distance should be larger than the sum of the axial gap and the overlap distance, see Eq.(7):

$$x \geq x_0 + x_{fed} \quad (7)$$

This condition is valid till  $\xi_0$  is less than the angular backlash  $\Phi_b$ . When the initial relative position is not zero (Figure 5), an additional condition is required, as illustrated in Eq.(8):

$$\xi_0 \leq \Phi_b \quad (8)$$

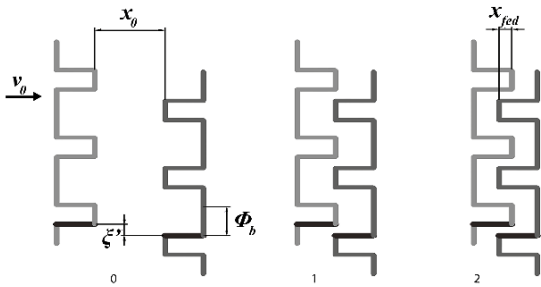


Figure 5. Dog clutch engagement with  $\xi>0$ , and  $\Delta\omega_0=0$

In the second case, the initial relative position  $\xi_0$  is zero, but the mismatch speed is not zero. For a successful engagement, angular backlash must be present. By the end of the engagement, the relative position should be less than the angular backlash (Figure 3).

$$\xi' + \Delta\omega_0 t'' \leq \Phi_b \quad (9)$$

Using Eq.(4), this condition is formed in Eq.(10):

$$\Delta\omega_0 t' + \Delta\omega_0 t'' \leq \Phi_b \quad (10)$$

In the third case, the initial position is zero, but the mismatch speed is much larger than zero. Here a tooth on the sliding sleeve can catch not only the next but the second tooth gap on the shifted gear, as shown in Figure 6. To describe this, the shifting condition described in Eq.(9) is not sufficient, and a further condition is required, as shown in Eq.(11):

$$\xi' \geq \phi \quad (11)$$

Eq.(9) can be rearranged to Eq.(12):

$$\Delta\omega_0 t' \leq \phi + \Phi_b - \Delta\omega_0 t'' \quad (12)$$

Substituting Eq.(4) into Eq.(11) and combining it with Eq.(12) gives the condition in Eq.(13):

$$\phi \leq \Delta\omega_0 t' \leq \phi + \Phi_b - \Delta\omega_0 t'' \quad (13)$$

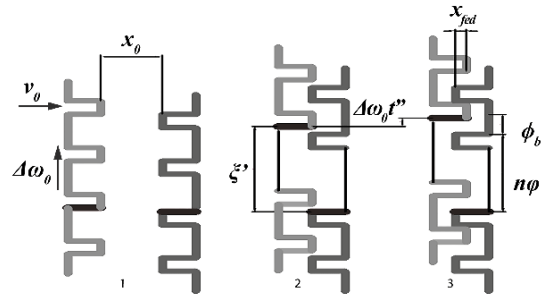


Figure 6. Dog clutch engagement with  $\xi=0$  and  $\Delta\omega_0>>0$

Generally, when the mismatch speed is very high, a tooth on the sliding sleeve can pass  $n$  teeth on the target gear, as Figure 7 shows. A generalized condition from Eq.(13) is introduced in Eq.(14). The value of the integer  $n$  is calculated according to Eq.(15), where the bracket  $[ ]$  refers to the integer part.

$$n\phi \leq \Delta\omega_0 t' \leq n\phi + \Phi_b - \Delta\omega_0 t'' \quad (14)$$

$$n = \left[ \frac{\xi'}{\phi} \right] \quad (15)$$

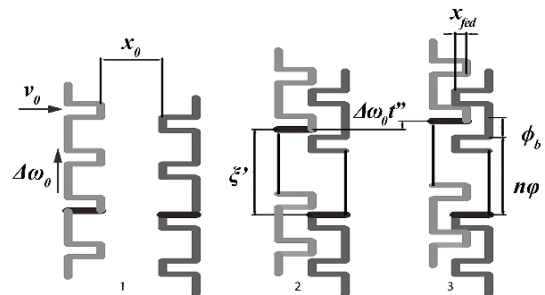


Figure 7. Dog clutch engagement with  $\xi=0$  and  $\Delta\omega_0>>0$  with  $n$  teeth passing

Finally, when the initial relative position is larger than zero, the generalized shiftability condition can be introduced according to Eq.(16):

$$n\phi \leq \xi_0 + \Delta\omega_0 t' \leq n\phi + \Phi_b - \Delta\omega_0 t'' \quad (16)$$

Substituting the values for  $\phi$ ,  $t'$ ,  $t''$ , and  $n$  from Eqs. (1), (3), (5), and (15), respectively, Eq.(16) can be implemented with the geometric and kinematic parameters, forming Eq.(17). Eq.(17) can also be written with *mod* function as shown in Eq.(18):

$$0 \leq \xi_0 + \Delta\omega_0 \frac{x_0}{v_0} - \left[ \frac{\xi_0 + \Delta\omega_0 \frac{x_0}{v_0}}{\frac{2\pi}{z}} \right] \frac{2\pi}{z} \leq \Phi_b - \Delta\omega_0 \frac{x_{fed}}{v_0} \quad (17)$$

$$0 \leq \text{mod} \left( \xi_0 + \Delta\omega_0 \frac{x_0}{v_0}, \frac{2\pi}{z} \right) \leq \Phi_b - \Delta\omega_0 \frac{x_{fed}}{v_0} \quad (18)$$

The condition in Eq.(18) is developed for the case when the initial relative position  $\xi_0$  and the initial mismatch speed  $\Delta\omega_0$  are both positive. To account for the case when the initial relative position is negative, the middle part of Eq.(18) has to be in the first positive cycle  $(0, \phi)$ . If the middle part is in the negative first cycle  $(-\phi, 0)$ , it can be returned to the first positive cycle, as shown in Eq.(19). this will return it to the first positive cycle if it is negative but has no effect if it is positive.

$$\xi'^+ = \text{mod} \left( \xi_0 + \Delta\omega_0 \frac{x_0}{v_0}, \frac{2\pi}{z} \right) + \frac{1 - \text{sign} \left( \text{mod} \left( \xi_0 + \Delta\omega_0 \frac{x_0}{v_0}, \frac{2\pi}{z} \right) \right)}{2} \phi \quad (19)$$

Eq.(19) can be substituted in Eq.(18) to have the general condition in Eq.(20):

$$0 \leq \xi'^+ \leq \Phi_b - \Delta\omega_0 \frac{x_{fed}}{v_0} \quad (20)$$

Eq.(20) can be modified to account for the case when the initial mismatch speed is negative by following the same procedure described above to derive Eq.(18). The resulted shiftability condition when the mismatch speed is negative is given in Eq.(21):

$$0 \leq \Phi_b + \Delta\omega_0 \frac{x_{fed}}{v_0} \leq \xi'^+ \leq \Phi_b \quad (21)$$

Based on that, the shiftability's dependency on certain parameters can be represented in a so-called shiftability map. The map is a 2D representation of the shifting probability, depending on two parameters, while all the others are kept constant. The first representation of a shiftability map, based on a simpler version of the shiftability condition can be found in the literature [5].

A comparison between the present model and a model from the literature [6], is shown in Figure 8. Here, the horizontal axis variable is the mismatch speed, and the vertical axis is the axial speed. The third parameter of the group of maps is the initial relative position  $\xi_0$ . Both models gave an identical shiftability map. The turquoise color means that there is no difference between the two models: Eq.(17) and Eq.(18) are generalized shiftability conditions that apply to a particular case.

### 3. CONCLUSION

The correct operation of a dog teeth clutch requires a fine operating algorithm. The base of the operation is the shiftability equation that

ensures successful shifting. However, it contains many independent parameters that are often missing in the control algorithm design. Accurate dog teeth shifting helps avoiding wear and rattle noise problems.

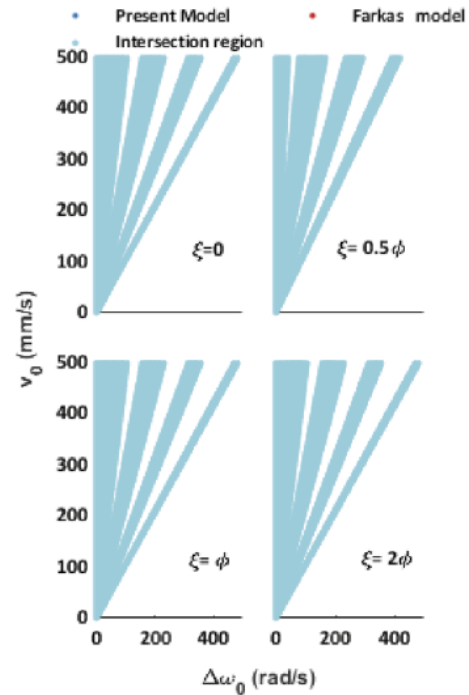


Figure 8. Shiftability condition validation

### 4. REFERENCES

- [1] L. Lovas, D. Play, J. Márialigeti, J.-F. Rigal, Modelling of gear changing behaviour, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering* 34(1-2) (2006) 35-58.
- [2] A. Szabo, T. Becsi, S. Aradi, Linear parameter-varying control of a floating piston electro-pneumatic actuator, 2020 IEEE 24th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), IEEE, 2020, pp. 115-120.
- [3] J. Li, P. Sheng, K. Shao, Optimization of Clutchless AMT Shift Control Strategy for Electric Vehicles, *Jordan Journal of Mechanical & Industrial Engineering* 14(1) (2020).
- [4] G. Bóka, L. Lovas, J. Márialigeti, B. Trencsényi, Engagement capability of face-dog clutches on heavy duty automated mechanical transmissions with transmission brake, *Proc. Inst. Mech. Eng., Part D: J. Automob. Eng.* 224(9) (2010) 1125-1139.
- [5] G. Farkas, L. Lovas, Körmös tengelykapcsoló kapcsolhatóságának vizsgálata, *GÉP LXXV* (4p, 2014).
- [6] A. Aljawabrah, L. Lovas, Test rig for automated transmission with dog clutches, *GÉP LXXII* (3-4) (2021) 5-8.

# A GYÁRTÁSI PARAMÉTEREKNEK A WARPING JELENSÉGRE GYAKOROLT HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA NUMERIKUS MÓDSZEREKKEL FFF NYOMTATÁSI ELJÁRÁS ESETÉN

## INVESTIGATION THE INFLUENCE OF THE PRINTING PARAMETERS ON WARPING IN FFF 3D PRINTED ABS USING NUMERICAL SOLUTION

Hussein Alzyod<sup>1</sup>, Dr. Peter Ficzer<sup>1</sup> Prof. Lajos Borbas<sup>1,2</sup>

### ABSTRACT

*Rapid prototyping (RP) technology uses the consecutive deposition of material layers to construct prototypes. When temperature gradients are present during the deposition process, thermal stresses will be generated. This work investigates the warpage deformation during fused filament fabrication (FFF) processes. Each of the factors, including printing speed, layer thickness, and printing temperature, had a quantitative impact on the warpage deformation of the prototype. The correlation between the printing parameters and the warpage deformation was identified based on the analysis's findings.*

### 1. INTRODUCTION

Engineers can use the capabilities of Additive Manufacturing (AM) to create a one-of-a-kind design. On the one side, the machining shape and movement circumstances do not impose any limitations. On the other side, each AM technology has its own set of constraints that must be considered [1], [2]. 3D printing components are currently widely employed in a range of industries, including food [3], aerospace [4], and automobile manufacturing [5]. The different techniques associated with the AM are used in the standard: Additive Manufacturing - General Principles – Terminology, ISO/ASTM 52900:2021. One of the best-known is Fused Filament Fabrication (FFF), also known as Fused Deposition Modeling (FDM). FFF is the most commonly utilized technique because it is significantly easier and less costly to employ than other methods, and it may use a wide range of raw materials such as polylactic acid (PLA), acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS), polyamide (PA) 6 and 12, and polyetherimide (PEI) [6]. The raw material, in filament state, is forced through the print head's heated extruder while it moves relative to the build plate, and the molten material is deposited on the plate. This deposition process occurs solely in 2D; after completing a layer, the print head begins to produce a

new layer on top of the previous one. This process has the significant advantage of being able to make hollowed components, which can result in significant weight reduction and cost - savings. However, it must be kept in mind that the printing process might significantly impact the part's qualities. Numerous studies have investigated the qualities of the fabricated parts. Ficzer P, Borbás L [7] studied the effect of the printing direction on the damping properties of PLA material. Shanmugam et al. [8] analyzed the affecting parameters for FDM technology, with a specific focus on fatigue behavior. J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula [9] examined the impact of raster angle, layer thickness, and infill pattern on the tensile strength. R. A. Mensah et al. [10] compared the mechanical strength of different parts with different infill densities. Other studies investigated the environmental and economic of AM [11], [12]. P. Ficzer, L. Borbas, and G. Szebenyi [13] investigated the relationship between stress capacity and printing orientation. M. S. Alsoufi and A. El-Sayed [14] investigated the effect of printing speed and printing temperature on the warping deformation.

### 2. NUMERICAL SIMULATION

#### 2.1. Material and model description

For numerical simulation, bridge geometry with dimensions of 46 mm x 60 mm x 33 mm and 3.75 mm thickness, as shown in **Figure 1**, was implemented because the warping can easily influence the pillars. The used material is ABS with an ultimate strength of 30.46 MPa [15], Poisson's ratio of 0.36, and thermal conductivity of 0.18 mW/(mm.°C). Poisson's ratio and thermal conductivity data were obtained from Digimat-MX, one of Digimat's platforms used for the material database.

<sup>1</sup>Department of Railway Vehicles and Vehicle System Analysis, Budapest University of Technology and Economics.

<sup>2</sup>Technical Institution, Stúdió tér, EDUTUS University.

## 2.2. Printing parameters

This work studied the correlation between printing parameters and the warpage. Three

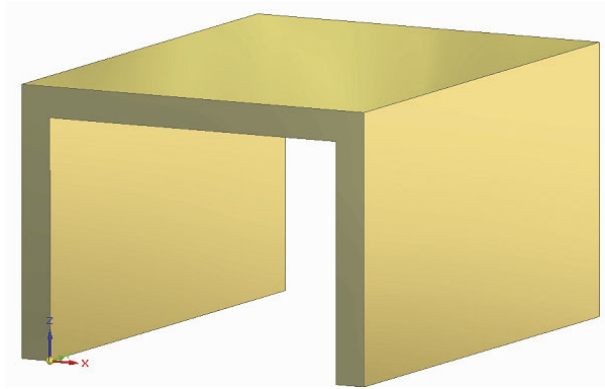


Figure 1. Bridge geometry dimensions

printing factors with four levels of each factor, as illustrated in **Table 1**. The default printing parameters were 60 mm/s for the printing speed, 0.19 mm for the layer thickness, and 250 °C for the printing temperature. The rest of the printing parameters were 70 °C for plate temperature, 100% for infill density, and Zig Zag infill pattern.

Table 1. factors and levels of simulation

| Factor                | levels |      |      |      |
|-----------------------|--------|------|------|------|
|                       | 1      | 2    | 3    | 4    |
| Printing speed (mm/s) | 20     | 40   | 60   | 100  |
| Layer thickness (mm)  | 0.19   | 0.29 | 0.39 | 0.49 |

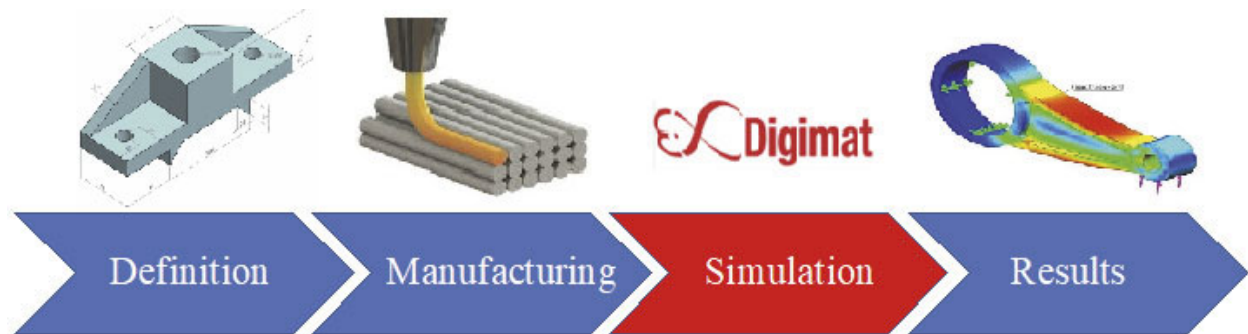


Figure 2. Digimat-AM workflow

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

A total of twelve runs were executed, and the results were obtained. For the printing speed factor, the results showed that by increasing the printing speed, the warping slightly decreases, and **Figure 3** illustrates the trend. At 20 mm/s speed, the warping was 3.9 mm, whereas, at a speed of 100 mm/s, the warping was 3.2 mm. The reason

| Printing (Extrusion) temperature (°C) | 230 | 240 | 250 | 260 |
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|

## 2.3. Finite Element Analysis (FEA) of FFF

The Computer-Aided Engineering (CAE) presented in this investigation was executed in Digimat-AM. It is a platform that offers an FEA analysis of AM processes. Digimat-AM is software used to collect data of samples built by one of the manufacturing processes and their mechanical characteristics. Digimat-AM simulates AM of composites and polymers, and predicts warpage and residual stresses of a printed part. This program provides a workflow that includes the stages depicted in

**Figure 2**. In the definition stage, the FFF process is selected along with the build plate dimension of a generic printer. The selected printer is a moving build plate with 200 x 200 x 180 mm dimensions. Digimat-AM uses a thermos-mechanical or inherent strain approach, selecting the former one for analysis. Then, the geometry is defined using a stereolithography (STL) file. The final step is to select the material, which is ABS, unfilled, and amorphous. In the manufacturing stage, the toolpath is provided in a G-Code file which is exported from a slicing program such as Slic3r, Cura, or PrusaSlicer. The printing speed and the extrusion temperature are set based on the levels in **Table 1**. The rest of the manufacturing parameters were 30 °C for chamber temperature, 23 °C for room temperature, 23 °C for final temperature, and the convection coefficient is equal to 0.015 mW/mm<sup>2</sup> °C. The printing steps are ordered as printing, then cooling, and lastly, support removal. In the simulation stage, the mesh is created by defining the voxel size. Finally, the results given by the simulation consist of residual stress and warpage.

behind this trend is that by increasing the printing speed, the temperature difference between the new and previous layers will be less. For the layer thickness effect, the results, as demonstrated in **Figure 4**, showed that the layer thickness significantly influences the warping deformation. By increasing the layer thickness, the warping deformation decreases. At 0.19 mm layer thickness, the warping was 3.59 mm, while at 0.49 mm

layer thickness, the warping deformation was 1.78 mm. This decrease in the warping happened because by increasing the layer thickness, the number of layers will decrease, and then the thermal loss will decrease.

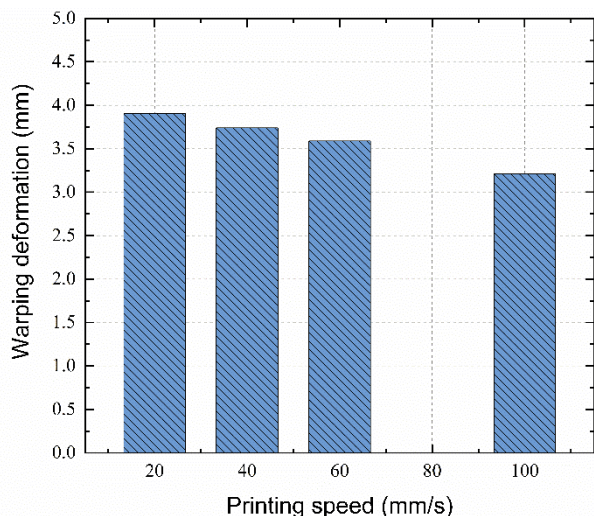


Figure 3. The influence of printing speed on the warping deformation

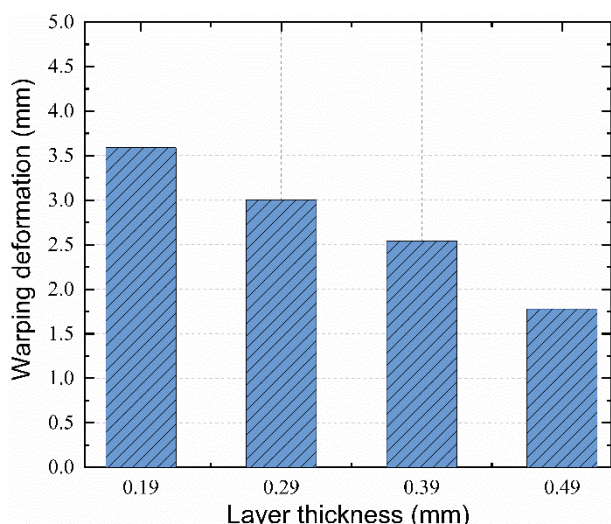


Figure 4. The effect of layer thickness on the warping deformation

The printing temperature had the opposite influence on the warping deformation. As depicted in **Figure 5**, the printing temperature was proportional to the warping deformation. The warping deformation lightly increases by increasing the printing temperature. The warping deformation was 3.3 mm at 230 °C, then increased to 3.73 mm at 260 °C. **Figure 6** demonstrates the warping deformation results provided by Digimat-AM with the default printing parameters.

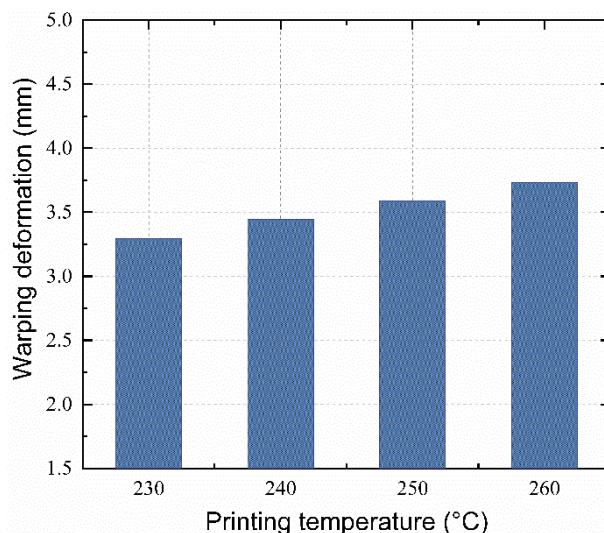


Figure 5. The correlation between the printing temperature and the warping deformation

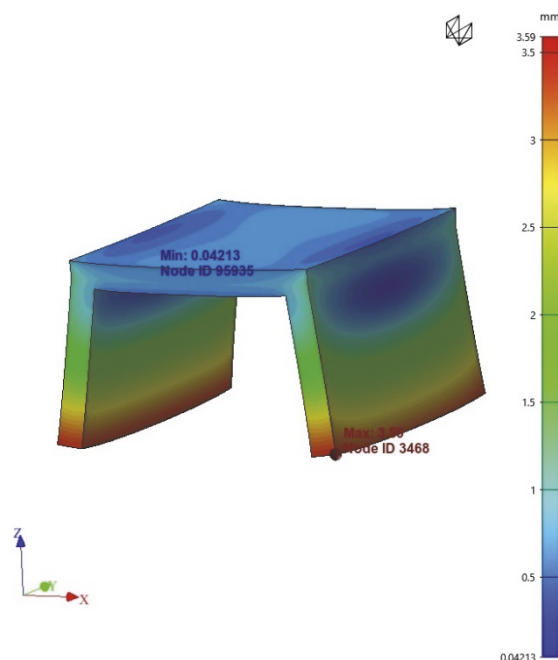


Figure 6. Results provided by Digimat-AM with the default printing parameters

#### 4. CONCLUSION

For assessing the quality of a Fused Filament Fabrication (FFF) prototype, warp deformation is a key success factor. The FFF prototype's warping is influenced by some factors. Material characteristics, printing parameter settings, the CAD model's geometrical structure, and deposition path design are some of these factors to take into account. The printing speed, layer thickness, and printing temperature were the three printing parameters that underwent a numerical analysis. Each printing parameter had four levels. Based on the findings, it can be concluded that the warping deformation is positively

connected with the printing temperature but negatively correlated with both printing speed and layer thickness. A scientific approach for minimizing and controlling the deformation can be provided by the numerical solution.

## 5. REFERENCES

- [1] G. A. O. Adam and D. Zimmer, "On design for additive manufacturing: evaluating geometrical limitations," *Rapid Prototyp J*, vol. 21, no. 6, pp. 662–670, Oct. 2015, doi: 10.1108/RPJ-06-2013-0060.
- [2] B. Ahuja, M. Karg, and M. Schmidt, "Additive manufacturing in production: challenges and opportunities," Mar. 2015, p. 935304. doi: 10.1117/12.2082521.
- [3] J. I. Lipton, M. Cutler, F. Nigl, D. Cohen, and H. Lipson, "Additive manufacturing for the food industry," *Trends Food Sci Technol*, vol. 43, no. 1, pp. 114–123, May 2015, doi: 10.1016/j.tifs.2015.02.004.
- [4] L. Jyothishand Kumar and C. G. Krishnadas Nair, "Current Trends of Additive Manufacturing in the Aerospace Industry," in *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, P. M. and K. L. J. Wimpenny David Ian and Pandey, Ed. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 39–54. doi: 10.1007/978-981-10-0812-2\_4.
- [5] H. Alzyod and P. Ficzer, "POTENTIAL APPLICATIONS OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES IN THE VEHICLE INDUSTRY," *Design of Machines and Structures*, vol. 11, no. 2, pp. 5–13, 2021.
- [6] H. Alzyod and P. Ficzer, "The Influence of the Layer Orientation on Ultimate Tensile Strength of 3D Printed Poly-lactic Acid," *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 16, no. 3, pp. 361–367, 2022.
- [7] P. Ficzer and L. Borbás, "Experimental dynamical analysis of specimens' material properties manufactured by additive technologies," *Mater Today Proc*, vol. 12, no. 2, pp. 352–357, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.03.135.
- [8] V. Shanmugam *et al.*, "Fatigue behaviour of FDM-3D printed polymers, polymeric composites and architected cellular materials," *Int J Fatigue*, vol. 143, p. 106007, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2020.106007.
- [9] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers," *Addit Manuf*, vol. 20, pp. 44–67, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.
- [10] R. A. Mensah *et al.*, "The effect of infill density on the fire properties of polylactic acid 3D printed parts: A short communication," *Polym Test*, vol. 111, p. 107594, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107594.
- [11] P. Ficzer, L. Borbás, and Á. Török, "ECONOMICAL INVESTIGATION OF RAPID PROTOTYPING," *INTERNATIONAL JOURNAL FOR TRAFFIC AND TRANSPORT ENGINEERING*, vol. 3, no. 3, pp. 344–350, Sep. 2013, doi: 10.7708/ijtte.2013.3(3).09.
- [12] V. Tagliaferri, F. Trovalusci, S. Guarino, and S. Venettacci, "Environmental and Economic Analysis of FDM, SLS and MJF Additive Manufacturing Technologies," *Materials*, vol. 12, no. 24, p. 4161, Dec. 2019, doi: 10.3390/ma12244161.
- [13] P. Ficzer, L. Borbas, and G. Szebenyi, "Reduction possibility of residual stresses from additive manufacturing by photostress method," *Mater Today Proc*, vol. 4, no. 5, pp. 5797–5802, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.06.048.
- [14] M. S. Alsoufi and A. El-Sayed, "Warping Deformation of Desktop 3D Printed Parts Manufactured by Open Source Fused Deposition Modeling (FDM) System," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, vol. 17, no. 4, pp. 7–16, 2017.
- [15] "Technical data sheet ABS," 2014. Accessed: Jul. 15, 2022. [Online]. Available: [https://cf.zortrax.com/wp-content/uploads/2018/06/Z-ABS\\_Technical\\_Data\\_Sheet\\_eng-1.pdf](https://cf.zortrax.com/wp-content/uploads/2018/06/Z-ABS_Technical_Data_Sheet_eng-1.pdf)

# TECHNOLÓGIA FEJLESZTÉSE AZ ÉRTÉKELEMZÉS ALKALMAZÁSÁVAL

## TECHNOLOGY DEVELOPMENT USING VALUE ANALYSIS

*Dr. Nadasdi Ferenc/ Dunaiújvárosi Egyetem, Emeritus Professzor/nadasdi.ferenc@gmail.com*  
*Dr. Keszi- Szeremlei Andrea /Dunaiújvárosi Egyetem, Ph. D./ keszia@uniduna.hu*

### ABSTRACT

The past few years have seen an increase in the demand for sheet steel coated for purposes of environmental protection and also to protect the steel against corrosion. The reasons for this increase of demand are as follows: With the changes of the environment, there are more sources of corrosion attack, and the intensity of corrosion has also increased.

### 1. BEVEZETÉS

Több száz értékelemzési projekt utólagos elemzése során megállapítottuk, hogy egyes szakmai területeken a termék minőségét – megfelelő minőségű nyers- és/vagy alapanyag esetén – alapvetően a technológia határozza meg. Ennek ellenére minden esetben a végtermék funkcióelemzését is elvégeztük, mert így pontosabban meg tudtuk határozni a technológia funkcióit. A technológia funkcióinak meghatározása lehetővé tette azon funkcióhordozók kiválasztását, amelyek elősegítették a készterméktől elvárt minőség létrehozását, valamint a versenyképes ár elérését. Esetünkben a tűzihorganyzás technológiáját elemeztük. Olyan új elemzési megoldásokat mutatunk be, amelyek általánosan használhatóak – elsősorban az ipar területén.

A környezet és korrózió elleni védelem céljából felület bevonásra került acéllemezek iránti kereslet az utóbbi évtizedekben megnőtt, mely a következő 2 okra vezethető vissza: A környezeti feltételek változásával nőtt a korróziós források száma és a korróziós jelenségek intenzitása. A tűzihorganyzást ezért széles körben alkalmazzák az acéltermékek korrózió elleni védelmére. Szinte minden iparág használ horganyzott acélterméket, két iparág azonban különösen sok ilyen terméket fogyaszt. Az egyik az építőipar, amely az épületszerkezetektől kezdve, eresz- és lefolyócsatornákon át a kötőelemekig, szerelvényekig, bennmaradó zsaluzatokig, horganyzott termékek

sokaságát használja fel. A formázott acéllemezek építőipari alkalmazása teherviselő elemként és burkolatként, a modern könnyűszerkezetes megoldások egyike. Előnyei miatt ma már széles körben elterjedt építési mód. Jelentős súlymegtakarításon kívül, könnyű szállíthatóság, gyors szerelhetőség, nagy korrózióval szembeni ellenállás jellemzi.

A másik nagy felhasználási terület, a közlekedés. A korszerű autógyártás világviszonylatban nagy mennyiségű horganyzott acélt használ. A vasúti kocsikat, a hidakat, a villamosvezetékek tartóoszlopait is horganyzott acélból készítik. A hajógyártásban és a tengerparti építkezéseknél, a tengeri klíma intenzív korrodáló hatása miatt jelentős szerepe van a horganyzott acél használatának. [1], [2], [3], [4], [5], [6], [8].

### 2. TŰZIHORGANYZÁS ÉRTÉKELEMZÉSE

#### 2.1. A projekt célja

A termékkel szembeni szigorodó elvárások, valamint az egyre inkább gyorsuló technológiaváltások következtében, fontos szerepet kap a technológiai folyamatok műszaki és gazdasági paramétereinek folyamatos elemzése.

A tűzihorganyzó eljárás értékelemzéséhez kapcsolódó célok a következők:

- a felhasználói és gyártói igényeknek való megfelelés,
- a gyártásból eredő minőségi problémák megszüntetése,
- a műveleti költségek csökkentése,
- a technológia anyag- és energiafelhasználásának csökkentése,
- a gyártási főfolyamat vagy berendezés kapacitás kihasználásának javítása,
- a termelékenység fokozása,
- a nehéz fizikai munka kiváltása,
- egészség-, baleset- és környezetvédelem javítása.

## 2.2. A projekt tárgya

Értékelemzésünk tárgya, a tűzihorganyzás folyamata. A hidegen hengerelt széles szalag tűzihorganyzása Sendzimir eljárással, automatizált, korszerű berendezésen történik, melynek eredményeképpen nagy értékű, diffúziós fémbevonat alakul ki az acélfelületen. A tűzihorganyzás során a megfelelően megtisztított acéllemezt folyékony horganyba mártják. A horganyfürdőben töltött idő alatt a magas hőmérséklet hatására a horgany az alapfém felületébe diffundál, azzal összeötvozódik, és a felületére rakódik.

A technológia 3 fő szakaszra tagolható:

- bevezető szakasz,
- technológiai kezelő szakasz,
- kifutó szakasz.

A fejlesztési folyamat első szakaszában a terméket kell elemezni, mert a termék kerül közvetlen kapcsolatba a felhasználóval. A termék igényforrása a vevő, a technológia igényforrása a termék.

## 2.3. A termékkel kapcsolatos igényelemzés

A technológiai folyamat értékelemzésénél fontos, hogy a gyártósor által előállított termékkel szembeni igényeket is feltárjuk és csak ennek ismeretében vizsgáljuk magát a folyamatot.

A tűzihorganyzott lemezzel szembeni felhasználói igények a következők:

- I1 Építőiparban felhasználható legyen.
- I2 Tovább feldolgozható legyen.
- I3 Alakítható legyen.
- I4 A felületen lévő horganybevonat egyenletes legyen.
- I5 A bevonatréteg megfelelő vastagságú legyen.
- I6 A lemez felületén anyagfolytonossági hiba, repedés ne legyen.
- I7 Korrózióálló legyen.
- I8 Időjárásálló legyen.
- I9 Tűzálló legyen.
- I10 Korrózió esetén katódos védelmet nyújtson.
- I11 A bevonat jól tapadjon a lemez felületére.
- I12 Esztétikus legyen.

## 2.4. A termékkel kapcsolatos funkcióelemzés

A fogyasztói/felhasználói igényekből kiindulva meghatározzuk először a termék funkcióit.

A termék (tűzihorganyzott lemez) funkciói:

- F<sub>0</sub> Tovább feldolgozást lehetővé tesz.
- F<sub>1</sub> Alakíthatóságot biztosít.
  - F<sub>11</sub> Méretpontosságot biztosít.
  - F<sub>12</sub> Rugalmassági követelményeknek eleget tesz.
- F<sub>2</sub> Mechanikai megmunkálást lehetővé tesz.
  - F<sub>21</sub> Méretpontosságot biztosít.
  - F<sub>22</sub> Szilárdsági követelményeknek eleget tesz.
- F<sub>3</sub> Utólagos bevonhatóságot biztosít.
  - F<sub>31</sub> Egyenletes felületet ad.
  - F<sub>32</sub> Tapadást biztosít.

- F<sub>4</sub> Szerelhetőséget biztosít.
- F<sub>5</sub> Tartóssági követelményt kielégít.
  - F<sub>51</sub> Mechanikai hatásoknak ellenáll.
  - F<sub>52</sub> Korróziós hatásoknak ellenáll.
    - F<sub>521</sub> Atmoszférikus igénybevételnek ellenáll.
    - F<sub>522</sub> Egyéb korróziós igénybevételnek ellenáll.
- F<sub>6</sub> Egészségügyi előírásoknak megfelel.
  - F<sub>61</sub> Mikroorganizmusoknak ellenáll.
  - F<sub>62</sub> Tisztítást lehetővé tesz.
- F<sub>7</sub> Esztétikai követelményeknek megfelel.

Az elemzés második lépése a technológiával szembeni elvárások elemzése. Mit és hogyan kell a technológiának tennie ahhoz, hogy a termékkel szemben megfogalmazott igényeknek maradéktalanul megfeleljen.

## 2.5. A technológiával szembeni igények a következők:

- I<sub>1</sub> Védőbevonatot hozzon létre.
- I<sub>2</sub> Távolítsa el a szennyeződést a hidegen hengerelt lemez felületéről.
- I<sub>3</sub> Tegye lehetővé a bevonó anyag tapadását.
- I<sub>4</sub> Biztosítsa a szalag folyamatos horganyzását.
- I<sub>5</sub> Szabályozható legyen a folyamat.
- I<sub>6</sub> A karbantartás tervszerű legyen.
- I<sub>7</sub> A minőség ellenőrizhető legyen.
- I<sub>8</sub> Ne legyen káros hatása a környezetre.
- I<sub>9</sub> Szüntesse meg a hőkezelés utáni káros fémtani jelenségeket.
- I<sub>10</sub> Akadályozza meg a fehérrozsda képződést.
- I<sub>11</sub> Biztosítsa a bevonáshoz szükséges fürdőösszetételt és hőmérsékletet.
- I<sub>12</sub> Tegye forgalomba hozatalra alkalmassá.
- I<sub>13</sub> Könnyen szerelhető legyen.

## 2.6. A technológia funkciói:

- F<sub>0</sub> Védőréteget kialakít
- F<sub>1</sub> Anyagot előkészít
  - F<sub>11</sub> Anyagot géphez szállít.
  - F<sub>12</sub> Anyagot gépre felad.
  - F<sub>13</sub> Anyagot végtelenít.
- F<sub>2</sub> Felületet előkezel
  - F<sub>21</sub> Szennyeződést eltávolít.
  - F<sub>22</sub> Tapadást biztosít.
- F<sub>3</sub> Bevonó anyagot felvisz
  - F<sub>31</sub> Bevonó anyagot biztosít.
  - F<sub>32</sub> Hőn tart.
  - F<sub>33</sub> Rétegfelvitelt biztosít.
- F<sub>4</sub> Felületet utókezel.
  - F<sub>41</sub> Mechanikai tulajdonságot javít.
  - F<sub>42</sub> Fehérrozsda képződést megakadályoz.
  - F<sub>43</sub> Hűtést végez.
- F<sub>5</sub> Forgalomba hozatalra alkalmassá tesz.
  - F<sub>51</sub> Mennyiséget biztosít.
  - F<sub>52</sub> Sérüléstől óv.
  - F<sub>53</sub> Azonosítást lehetővé tesz.

- F<sub>54</sub> Kiszállítást lehetővé tesz.  
 F<sub>6</sub> Folyamatot szabályoz.  
 F<sub>61</sub> Hibát jelez.  
 F<sub>62</sub> Hibát megszüntet.  
 F<sub>7</sub> Javítást lehetővé tesz.  
 F<sub>71</sub> Minőséget ellenőriz.  
 F<sub>72</sub> Folyamatosságot biztosít.  
 F<sub>8</sub> Irányítást végez.  
 F<sub>81</sub> Anyagot mozgat.  
 F<sub>82</sub> Környezetet véd.

- F<sub>83</sub> Átállást biztosít.  
 F<sub>9</sub> Karbantartást biztosít. [7], [9], [10], [11], [12], [16].

A funkciók áttekinthetőségét segíti továbbá a funkció – paraméter – berendezés mátrix, ahol a funkciókhoz paramétereket és berendezéseket rendelünk. A funkcióparaméterek meghatározása egyben elősegíti egy jól működő géppark kialakítását is. Az információkat az 1. sz. ábra tartalmazza.

1. ábra. Funkció – paraméter – berendezés mátrix [11]

is, hogy az így kialakított felület színe és fénye tetszetős.

Az értékelemzési projekt egyik legnehezebb feladata, hogy az interdiszciplináris team (munkacsoport) tagjai úgy mutassák be saját szakterületük helyzetét, lehetőségeiket, hogy a team más szakterületről érkező tagjai is megértsék az információkat. Az előforduló hibás értelmezések kiküszöbölését teszi lehetővé az 1. sz. ábra „funkciók-paraméterek- értékek-berendezések” c. rendszer, amely lényegében tömöríti a technológiával kapcsolatos információkat. Ez a rendszer a gyakorlatban bevált, a projekt munkában jelenleg is sikeresen alkalmazzuk. Ha egy cég hatékonyabb funkcióhordozót kíván alkalmazni, akkor a versenytárgyalásnál is célszerű ezt a rendszert alkalmazni.

### 3. GYENGE PONTOK MEGHATÁROZÁSA

**Költségkritikus pontok** a mátrix alapján, az „F<sub>2</sub> Felületet előkezel” funkció, a felmerülő fajlagos energiafelhasználás miatt, valamint az „F<sub>3</sub> Bevonóanyagot felvisz” funkció, a felhasznált szekunder alapanyagok következtében.

A másik költséges művelet, a hőkezelés (a mechanikai tulajdonságok javítása), amely fontos szerepet játszik a termék minőségének kialakításában.

**Funkciókritikus pont** az „F<sub>81</sub> Anyagot mozgat” funkció, mert a sor működési sebessége 6-34 m/perc, ami a korszerű gépeknél eléri akár a 150 m/perc is. Az „F<sub>2</sub> Felületet előkezel” funkció, a kemence hűtőkapacitása miatt nem javítható. A hűtőkapacitás növelése elősegíti az F<sub>2</sub> funkció javítását is. A folyamatos tűzhorganyzás legköltségesebb művelete maga a horganyzás, ami a késztermék minőségét is nagymértékben befolyásolja. Költségességét a horganyzás során felhasznált szekunder alapanyagok okozzák. A műveletnél minőség szempontjából meghatározó a fürdő összetétele, a fürdőhőmérséklet, a fürdő szintje és a szekunder alapanyagok mennyisége.

A termék minőségének szempontjából fontos művelet még a nyújtva egyengetés, valamint a kromatózás. Az előbbi a hőkezelés utáni káros fémtani jelenségeket szünteti meg, míg az utóbbi egyrészt a horganybevonat korrózióval szembeni ellenállóképességét, másrészt a festékbevonatok tapadó képességét javítja. Alkalmazását indokolja az

### 4. JAVASLATOK A TECHNOLÓGIAI FOLYAMAT FEJLESZTÉSÉRE

4.1. A hőkezelő kemence hűtőkapacitásának növelése, ami az „F<sub>2</sub> Felületet előkezel” funkció befolyásolja. Erre azért lenne szükség, mert különben a lemez, túlzott hőbevitelével túlfűthetik a horganyfürdőt és így nem tudják tartani a kb. 450 C<sup>0</sup> kilépő hőmérsékletet, valamint az alacsony hűtésintenzitás korlátozza a gépsor kapacitását.

A hűtőkapacitás növelésének lehetőségei:

- A hűtőpatronok számának növelése, ehhez azonban a kemence átépítése szükséges, ami költséges feladat.
- A hűtőventillátor kapacitásának növelése oly módon, hogy az ne csak nagyobb fordulató és nagyobb nyomással rendelkező legyen, hanem főleg nagyobb mennyiségű hűtőlevegő álljon rendelkezésre.
- A legolcsóbb megoldás azonban a hűtőfelület megnövelése. Ennek lehetséges módja, ha a jelenleg üzemelő hűtőpatronokra hűtőbordákat hegesztenek hosszirányban.

4.2. Az „F<sub>2</sub> Felületet előkezel” funkció költségének csökkentési lehetősége:

A hőkezelő kemencében felhasznált védőgáz mennyisége egy órára vetítve 155 Nm<sup>3</sup>. Ennek 15%-a H<sub>2</sub> és 85%-a N<sub>2</sub>, vagyis 25 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/óra és 130 Nm<sup>3</sup> N<sub>2</sub>/óra. Az összes védőgáz mennyiséget le lehet csökkenteni 20 Nm<sup>3</sup>/órával úgy, hogy közben megfelelő túlnyomás legyen.

4.3. A horganyfürdő befedése, valamint a Sendzimir horgany alkalmazásának bevezetése

Az „F<sub>3</sub> bevonóanyagot felvisz” és az „F<sub>82</sub> környezetet véd” funkciók” - at érinti a horganyfürdő befedése. A horganyzókád lefedése csökkentené a környezet felmelegedését, ezáltal pedig a dolgozók hőterhelését. Minimálisra csökkenne a fürdő felületi oxidációjának lehetősége.

A Sendzimir horgany felhasználásával a következő technológiai változások lehetségesek:

A jelenleg használt Zn, Zn-Al, Pb tömbök a fürdő aljára érve felhozhatják a salakot, ami a lemez felületére kerülve inkurrens terméket eredményez, továbbá e technológia alkalmazása mellett nehezebb az egyenletes fürdőösszetételt tartani. A Zn, Zn-Al, Pb tömbök helyett az előtöztött 1-2 tonnás Sendzimir tömbök alkalmazásával stabilizálhatóvá válik a fürdőszint és fürdőösszetétel. A javasolt megoldás egyenletes horganyfelvitelt, eloszlást és felületi minőség javulást eredményezne.

## 5. EREDMÉNYEK

A funkcióelemzés és funkcióköltségek meghatározása lehetővé tette, hogy a team feltárja azokat a beavatkozási pontokat, amelyekre változtatási javaslatok kidolgozása is megtörtént. Bár esetünkben egy meglévő termék továbbfejlesztésénél alkalmaztuk az értékelemzést, az elért eredmények feltétlenül innovációs megoldásoknak tekinthetők. Szakértők véleménye szerint ezek a lehetőségek az értékelemzés alkalmazása nélkül szóba sem kerültek volna. Megállapítható, hogy a funkció- és költségelemzés, a teammunka alkalmazása szinte „kikényszeríti” az innovációs folyamat beindítását.

Az értékelemzés alkalmazása elősegítette a késztermék és a technológia elemzésének összekapcsolását, amely megkönnyítette a versenyképesebb késztermék előállítását. [13]

## ÖSSZEFOGLALÁS

Az értékelemzés a korábbi évtizedekben elsősorban a költségcsökkentésre irányult. A hazai és a külföldi szakértők azonban felhívták a figyelmet arra, hogy az értékelemzés az innovációs folyamat egyik leghatékonyabb eszközévé vált. [14], [15]

A marketingkutatások rámutattak arra, hogy a jelenlegi gyors technikai változások „kiütik a piacról” a technikailag még jó állapotban lévő, korábban modern termékeknek számító gépeket, berendezéseket stb. Az értékelemzést széles körben alkalmazó országok (pl. USA, Japán, Dél-Korea stb.) az eljárást már az innovációs folyamatokban is alkalmazzák, ami lehetővé teszi a piacra kerülés meggyorsítását, és a felesleges költségek elkerülését.

## SUMMARY

In previous decades, value analysis was primarily aimed at cost reduction. However, domestic and foreign experts drew attention to the fact that value analysis has become one of the most effective tools in the innovation process. [14], [15]

Marketing research has pointed out that the current rapid technical changes "knock out of the market" machines, equipment, etc. that are still technically in good condition and were previously considered modern products. Countries that widely use value analysis (e.g. USA, Japan, South Korea, etc.) already use the procedure in innovation processes, which makes it possible to speed up market access and avoid unnecessary costs.

## IRODALOMJEGYZÉK

[1] Bytheway, Charles W.: FAST Creativity & Innovation. (2007) J. ROSS PUBLISHING, USA. 372. pp.

[2] Clancy, D. F. – Dennis L. M.: The Innovation and Application of the Value – Based Design Charette – Start Your Project Right to Ensure a Successful Completion. SAVE International Conference, (2004) USA. 1-8. pp. CD.

[3] Kaufman, J. J. – Woodhead, R.: Stimulating Innovation in Products and Services with Function Analysis and Mapping. WILEY INTERSCIENCE, (2006) USA. 252. pp.

[4] Keszi – Szeremlei A. – Nadasdi F.: Az értékelemzés oktatásának támogatása ON-LINE tananyaggal. Dunaújvárosi Főiskola, Tudomány Hete, 2014. december 12. 70-75. pp.

[5] Miles, L.D.: Techniques of Value Analysis and Engineering. Mc.Graw-Hill Book Company, (1972) New York, USA. 523. pp.

[6] Nadasdi F.: Value Management a XXI. Században. Monográfia. Főiskolai Kiadó 2000. Dunaújváros. 212. pp.

[7] Nadasdi F. Szerk.: Az értékelemzés alapjai. Dunaújvárosi Főiskola Kiadó Hivatala, Dunaújváros. 2012. 142. pp.

[8] Nadasdi F. – Zarádné Vámosi K.: Innovációs projektek kockázatának csökkentése a Value Methodology alkalmazásával. 25 – 34. pp. IV. IRI Társadalomtudományi Konferencia, 2016. április 24-25. Štúrovo, Szlovákia. INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE s.r.o., Komárno, Szlovákia. Konferencia Kiadvány: Társadalom, kulturális háttér, gazdaság. Szerk.: Karlovitz János Tibor. 2016. International Research Institute, s.r.o., 1 – 488. pp. ISBN 978 – 80 – 89691 – 33 – 3.

[9] Nadasdi F. – Zarádné Vámosi K.: Innováció fejlesztése a Value Methodology (értékelemzés) módszercsalád alkalmazásával. Budapesti Kereskedelmi és Iparkamara, TANÁCSADÓK A KKV-K SZOLGÁLATÁBAN Konferencia, 2018. október 30. 13. pp.

[10] Nadasdi F. – Keszi – Szeremlei A.: Értékmódszertan oktatásának támogatása online tananyag felhasználásával. Dunaújvárosi Egyetem, Tudományos Hét, 2020. „Fenntarthatósági terek”. Szerk.: Németh István Péter – András István – Rajcsányi Molnár Mónika. 2021. ISBN 978-615-6142-10-8; ISBN 978-606-9673-17-1. 150-161. pp.

[11] Nádasdi F.: Tűzihorganyzás értékelemzése. Esettanulmány. Dunaújvárosi Egyetem. Dunaújváros. 2018. 46.pp.

[12] Nádasdi F. – Keszi – Szeremlei A.: Értékelemzés – innováció – gazdasági növekedés. Globalizáció a 21. században. Dunaújvárosi Egyetem. Szerk.: Keszi – Szeremlei Andrea – Rajcsányi – Molnár Mónika. 2022. ISBN 978-615-6142-26-9. 9-22. pp.

[13] Sato, Y. - Kaufman, J. J.: Value Analysis Tear – Down: A New Process for Product Development and Innovation. Industrial Press Inc. and Society of Manufacturing Engineers, New York, USA.2005. 206. pp.

[14] SAVE: VM Guide. A Guide to the Value Methodology Body of Knowledge. A production of SAVE International. 2020. 188. pp.

[15] Stewart, R. B.: Fundamentals of Value Methodology. Xlibris Corporation. USA. 2005, 440. pp. ISBN 1-4134-9194-4.

[16] Vámosi K. (Szerk.): Értékelemzési projektek. Medic-Tour 2002. Kft. Budapest. 2006, 209.pp.

| Funkció                                    | Paraméter  | Érték  | Berendezés                                     |
|--|--|--|--|
| F11<br>Anyagot géphez szállít              | Tekercstömeg<br>Tekercs külső átmérő<br>Tekercs belső átmérő<br>Sebesség | max 15 t<br>800 - 1650 mm<br>500 vagy 610 mm<br>max 8 m/perc               | Tekercsszállító kocsi                          |
| F12<br>Anyagot gépre felad                 | Tekercstömeg<br>Tekercs külső átmérő<br>Tekercs belső átmérő             | max 15 t<br>800 - 1650 mm<br>500 vagy 610 mm                               | Tekercsszállító kocsi<br>Lecsévélő             |
| F13<br>Anyagot végtelenít                  | Periódusszám<br>Áramerősség<br>Gyújtásszög                               | Lemezparaméterek<br>függvényében   | Végvágó olló<br>Ponthegesztő                   |
| F21<br>Szennyeződést eltávolít             | Sebesség<br>Kezelési hőmérséklet<br>Kilépő szalag hőmérséklete           | 30 m/perc<br>névl. 750 C <sup>0</sup><br>430 - 480 C <sup>0</sup>          | Hőkezelő kemence (hűtő<br>szakasz)             |
| F22<br>Tapadást biztosít                   | Sebesség<br>Védőgáz összetétel<br>Védőgáz nyomás                         | 30 m/perc<br>85% N <sub>2</sub> 15% H <sub>2</sub><br>200 - 300 mbar       | Hőkezelő kemence                               |
| F31<br>Bevonóanyagot biztosít              | Horganyfürdő összetétel  | Zn 99,6 - 99,8%<br>Pb 0,08 - 0,12%<br>Al 0,16 - 0,24%                      | Horganyzó kád                                  |
| F33<br>Rétegfelvitelt biztosít             | Rétegvastagság<br>Levegő hőmérséklet<br>Felhasznált anyagmennyiség       | szabvány szerinti<br>40 - 70 C <sup>0</sup><br>szabvány szerinti           | Horganyvastagság<br>szabályozó                 |
| F41<br>Mechanikai tulajdonságot<br>javít   | Nyújtóerő<br>Maradó alakváltozás mértéke                                 | max 6820 N<br>0,8 - 1,5 %  | Nyújtvaegyengető                               |
| F42<br>Fehérrozsaképződést<br>megakadályoz | Hőmérséklet<br>Kádkoncentráció<br>Oldatkoncentráció                      | 50 C <sup>0</sup><br>35%<br>0,5 - 1,0 %                                    | Termosztát<br>Kromatózó kád                    |
| F43<br>Hűtést végez                        | Szárító teljesítmény<br>Hőmérséklet                                      | 8400 m <sup>3</sup> / óra<br>100 - 120 C <sup>0</sup><br>60 C <sup>0</sup> | Szalaghűtő<br>Vizes kád                        |
| F51<br>Mennyiséget biztosít                | Tekercstömeg   | max 10 t   | Felcsévélő                                     |
| F71<br>Minőséget ellenőriz                 | Bevonatvastagság<br>Méréstartomány<br>Tapadás                            | 100 - 350 g/m <sup>2</sup><br>0 - 400 g/m <sup>2</sup>                     | Izotópos rétegvastagság-<br>mérő               |
| F72<br>Folyamatosságot biztosít            | Tárolókapacitás  | max 160 m<br>max 72 m  | bevezető szalagtároló<br>kivezető szalagtároló |
| F81<br>Anyagot mozgat                      | Sebesség   | 6 - 34 m/perc  | Görgők   |

# HIBRID- ÉS ELEKTROMOS JÁRMŰVEK ENERGIAMENEDZSMENTJÉNEK LEHETSÉGES TÁMOGATÁSA NAPELEMMEL

## THE POSSIBILITY OF SOLAR CELL SUPPORTED ENERGY MANAGEMENT IN HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES

Sári Zoltán [sari.zoltan@gamf.uni-neumann.hu](mailto:sari.zoltan@gamf.uni-neumann.hu)

### ÖSSZEFOGLALÁS

A következő tanulmányban bemutatok egy olyan napelemmel támogatott rendszert, ami képes lehet hibrid- és elektromos járművek energiamedzsmenésére olyan zöld villamos energiával történő támogatására, ami egy válasz lehet a jövő környezetvédelmi előírásaira a járműiparban. Az átlagos járműhasználatban felmerülő energia szükségletet részben fedezheti, illetve a jármű egyéb rendszereinek energiafelhasználására adhat alternatív megoldást.

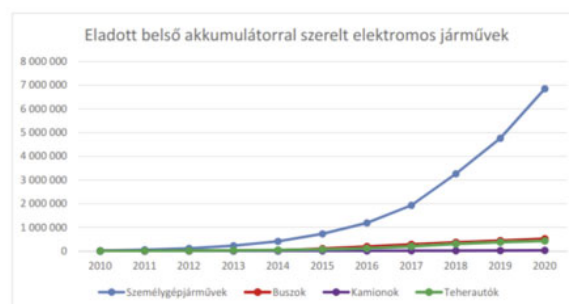
### ABSTRACT

In the following I am going to present a solar cell supported system that could be an answer to future environmental regulations of the vehicle industry by supporting hybrid and electric cars with green electricity. This solution could partially cover the energy needs resulting from average vehicle use as well as provide an alternative solution for the energy consumption of the other systems of the vehicle.

### 1. BEVEZETÉS

A személyautó használatról nagyon nehezen mondunk le, ez egy roppant értékes és fontos közlekedési eszköz számunkra, ezért nehéz megfelelő alternatívát találni arra, hogy ne az autóinkkal közlekedjünk nap, mint nap. Természetesen mindenki törekszik arra, hogy minél kisebb károsanyag kibocsátással járjon a közlekedés, így egyre több olyan jármű jelenik meg az utakon, ami helyi károsanyag kibocsátás szempontjából kevésbé szennyező. Erre egy

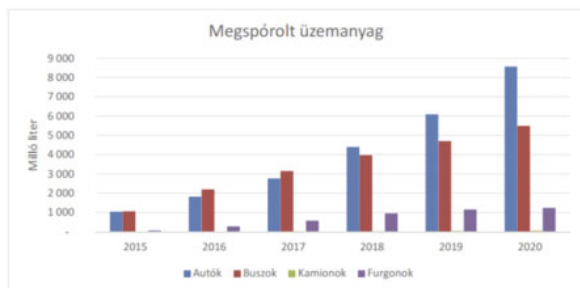
megfelelő megoldás lehet a különböző hibrid- és elektromos autók. Ezt igazolja az a grafikon is, ami az elmúlt 10 évben eladott tisztán elektromos járművek mennyiségét mutatja világszerte.



1. ábra. Elmúlt 10 évben eladott tisztán elektromos járművek [1]

Az elektromos járművek terjedése várhatóan a közeljövőben sem fog lassulni, sőt, inkább egyre nagyobb mértékben fog nőni az eladott járművek száma, ugyanis több gyártó is bejelentette, hogy az elkövetkezendő 20-30 évben [2] befejezik a belső égésű motoros járművek fejlesztését, és gyártását (pl. Volkswagen, Mercedes stb.). Mindemellert a kezdetben rendkívül kevés elektromos töltőt tartalmazó töltőhálózat fejlődése és lefedettsége szintén egyre növekvő tendenciát mutat.

A globális felmelegedés, illetve a városok tisztább levegőjének szempontjából igen jelentős értéknek számít az eladott elektromos járművek mennyisége. Mivel így nagy mennyiségű üzemanyag elégetésétől kíméljük meg a közvetlen környezetünket. Az elektromos járművek alkalmazásával az elmúlt öt évben közel 65 milliárd liter üzemanyag (2. ábra) elégetését lehetett megspórolni, amely így nem terhelte a környezetet sem.



2. ábra. Elmúlt 5 évben megspórolt üzemanyag mennyisége [1]

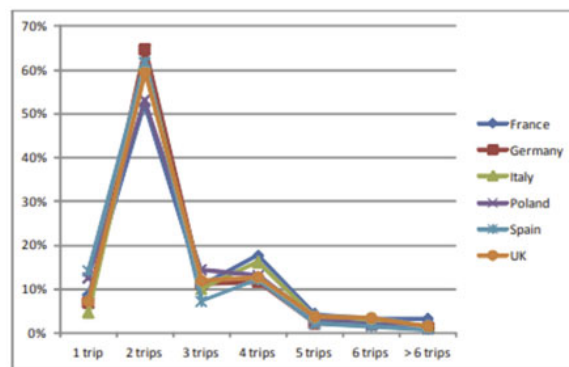
Az elektromos járművek töltéséhez szükséges áramot elsősorban a villamos hálózat szolgáltatja, amely leterheltsége az elmúlt időszakban szintén megnövekedett, amelyhez az elektromos járművek is hozzájárulnak. Csak az elmúlt 5 évben az elektromos gépjárművek töltésre használt energia átlagosan a 19-szeresére növekedett [1].

A világ villamos energiájának fogyasztása az elmúlt 5 évben tovább emelkedett közel 9,5 %-al ez 2197 TWh növekedés jelent. Az elektromos járművek töltésére felhasznált energia összesen 5,6 %-át (122,8 TWh) teszi ki. Ennek ellenére ez a mennyiség a világ teljes energia felhasználásában, ami 23177 TWh 2020-ban, szinte elenyésző, csupán 0,0016 %-át jelenti. [3]

Ezt az értéket viszont szükséges csökkenteni, mert a meglévő infrastruktúra és az energiatermelés sem képes ilyen mértékben lekövetni. Ebben lehet megoldásként gondolni a napelem rendszerek nagyobb kihasználására.

## 2. ÁLTALÁNOS AUTÓHASZNÁLAT

Egy 2012-ben készült tanulmányban, ami Európai Unió államok részvételével készült, a kutatók megvizsgálták az autó használati és parkolási szokásainkat. Arra az érdekes megállapításra jutottak, hogy jellemzően 2 utat teszünk meg az autónkkal naponta, ezt láthatjuk a 3. ábrán. [4]



3. ábra. Naponta megtett utak száma [4]

A válaszadók arra a kérdésre, hogy ezeknek az utazásoknak mi a célja, a nagy százalékban (több mint 35%) azt választották, hogy legtöbbször munkába mentek. Tehát reggel elindultak otthonról, megérkeztek a munkahelyükre, majd este onnan hazamentek. Az utazási idő 25 perc volt, a megtett út hosszának pedig 20 kilométeres átlagot vehetünk.

Tehát a hétköznapi autóhasználatára kijelenthetjük, hogy az átlagos utazási idő naponta 25 perc utanként, ami alatt kb. 20 kilométert teszünk meg, a többi időt parkolással töltjük. [4] Ez a táv kedvező a hibrid- és elektromos járműveknek, mert az akkumulátorban tárolt energia mennyisége elegendő, egy teljesen feltöltött esetet vizsgálva. Így a hibrid rendszerekkel bíró autóknál a belsőégésű motor nem fog bekapcsolni, ami azt jelenti, hogy szinte minden esetben zéró emisszió mellett autózhatunk.

## 3. HIBRID- ÉS ELEKTROMOS JÁRMŰVEK ÉS FOTOVOLTAIKUS RENDSZEREK

Alapvetően kétféle rendszerről beszélhetünk, amiben elektromos hajtásrendszer jelenik meg, a teljesen elektromos hajtásláncról (EV) és a hibrid hajtásláncról (HEV). Jelen tanulmányban nem teszünk különbséget a plug-in hibrid rendszer és a hagyományos hibrid rendszer között. Amivel ezek még kiegészülhetnek, az a napelem rendszer, de ez sajnos csak nagyon alacsony számban található meg a kínálati palettán, csakis a Toyota Priusnál volt elérhető.

### 3.1. Tisztán elektromos járművek előnyei

A karbantartás összege lényegesen kisebb a hagyományos járművekhez képest, mivel sokkal kevesebb meghibásodásra alkalmas alkatrészrel rendelkeznek, ezáltal egyszerűbb és költséghatékonyabb lehet a villanyautó karbantartása. A költségek csökkentéséhez és a hatékonyság növeléséhez hozzátartozik az is, hogy a tisztán elektromos autóknál sokkal kevesebb helyzetben szükséges a mechanikus súrlódó féket igénybe venni, mivel ezek a járművek képesek a regeneratív fékezésre is, amely nagy fékerőt képes kifejteni, ugyanakkor fékezéskor az akkumulátorba tölti vissza az így visszanyert energiát. Ennek a folyamatnak a lényege, hogy a meghajtást biztosító elektromotor fékezéskor generátor üzemmódba kapcsol át, így válik lehetségessé az energia visszatáplálása, amely során akár 15 %-os hatótáv növekedés is elérhető. A regeneratív fékezés továbbá a levegő tisztább tartásához is hozzájárul, hiszen a járművek a közlekedés során nem csak a kipufogón keresztül bocsátanak ki károsanyagokat, hanem minden fékezés során fékpor is kerül a levegőbe a fékbetétek és a tárcsák súrlódása révén. Ennek a szennyezésnek a mértékét ezáltal csökkenteni lehet, továbbá a minél hatékonyabb energia visszanyeréssel kisebb akkumulátorra van szükség, így a jármű súlya is csökkenthető, ezáltal nemcsak a gumikopásból eredő károsanyag kibocsátás is csökken, de a zajterhelés is.

### 3.2 Tisztán elektromos járművek hátrányai

Az tisztán elektromos járművek legnagyobb hátránya a hagyományos belsőégésű motorral szerelt autókkal szemben a lassú töltési sebességük. Míg egy benzinkúton az üres tankot körülbelül 5 percbe telik teljesen feltölteni, a villanyautók akkumulátorának töltése sokkal több időt vesz igénybe. Továbbá a töltési sebesség az autó, illetve a töltőállomás töltési képességétől is függ (1. táblázat). Ezen felül az akkumulátor kapacitása is lényeges szempont.

| Jármű                            | Akkumulátor kapacitás | Megtehető hatótávolság | 0%-ról 100%-ra való töltési idő |            |             |                |                     |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|------------|-------------|----------------|---------------------|
|                                  |                       |                        | 3,7 kW lassú                    | 7 kW lassú | 22 kW gyors | 43-50 kW gyors | 150 kW szuper gyors |
| Nissan Leaf (2018)               | 40 kWh                | 143 mérföld            | 11 óra                          | 6 óra      | 6 óra       | 1 óra          | -                   |
| Tesla Model S (2019)             | 75 kWh                | 238 mérföld            | 21 óra                          | 11 óra     | 5 óra       | 2 óra          | <1 óra              |
| Mitsubishi Outlander PHEV (2018) | 13,8 kWh              | 24 mérföld             | 4 óra                           | 4 óra      | 4 óra       | 40 perc        | -                   |

#### 1. táblázat Töltési sebességek különböző kapacitású elektromos járművek esetén [5]

A töltési sebesség mellett a másik nagy hátrányuk a tisztán elektromos járműveknek, hogy egy teljesen feltöltött akkumulátorral megtehető távolság lényegesen elmarad (maximálisan 500-600 km) a hagyományos autók képességeihez mérten (700-1000 km). Ebből kifolyólag a használatuk javarészt a városra és annak vonzáskörzetére korlátozódik. [5]

A megtehető távolság és a töltési sebesség lassúsága mellett az elektromos töltőhálózat kiépítettsége is nagy gondot jelent, bár az elmúlt 10 évben az elektromos autók számával együtt a töltőhálózatok mennyisége is nagymértékű javulást mutat. Az eladási ár is magasabb a hasonló kategóriájú, pusztán belsőégésű motorral szerelt változatokhoz képest.

### 4. NAPELEM

Az elektromos áram létfontosságú szerepet tölt be a mai társadalomban. Ezen energia előállítására számos lehetőség jött létre az elmúlt évszázadok során (pl. szénerőművek, atomerőművek stb.) Azonban a fenntartható fejlődés érdekében nélkülözhetlenné vált a megújuló energiák alkalmazása áramtermelés céljából, hiszen a környezet számára rendkívül megterhelő a nem megújuló pl. szénerőművek, alkalmazása. Habár a fenntartható elektromos áram termelés még nem teljesen megoldott, de már számos fajtája létezik (pl. szélerőművek, vízerőművek, napelem farmok, árapályerőművek stb.). Ezek közül az egyik legkisebb környezeti terhelést a napelemek jelentik, hiszen ezek felhelyezhetők épületek, járművek tetejére is, amelyek ezáltal nem zavarják az élővilágot, mint például a szél- vagy vízerőművek. [6]

A napelemek fő alkotórészét adó PV-cellákat alapvetően négy fő csoportra lehet felosztani, a kristályoknak 2 fajtája létezik, a monokristályos és polikristályos. Emellett vannak vékonyréteg- és hibridcellák is. [7]

#### 4.1. Vékonyfilm napelemek

A vékonyfilm napelemek már második generációs napelemeknek számítanak (az első generációt a mono-, illetve polikristályos napelemek alkotják). Gyártásuk során egy vagy több egymást követő fázisban vékony filmréteget gözölnek fel valamilyen hordozóra (például: fém, üveg műanyag stb.). [7]

Az egyik legnagyobb előnyük is ennek a gyártásnak köszönhető, mivel így ezek a vékonyréteg-cellák rugalmasak, a tömegük rendkívül alacsony, emellett nagyon olcsó őket előállítani. Továbbá jó teljesítményt tudnak nyújtani közvetett napfény, illetve magas hőmérséklet mellett is. A jellemző hatékonyságuk 6-12 % közé tehető, amely eltöri a kristályos napelemekhez képest (20 %). Azonban a széleskörű elterjedésüket az hátráltatja, hogy bizonyos vékonyréteg-anyagok az idő előrehaladtával akár 15-35%-os hatásfok romlást is elszenvedhetnek a kezdeti értékhez képest. [7]

#### 4.2 Monokristályos napelem

A monokristályos szilícium létrehozásához a Czochralski-módszert alkalmazzák, amely során egy úgynevezett magkristályt helyeznek egy olvadt tiszta szilíciumot tartalmazó kádba magas hőmérséklet mellett. A mag ezt követően felszívódik, és a helyén kialakul a kristály az olvadékból. [8]

Így egy nagyobb henger alakú kristály fog kialakulni, amelyet álnégyszetes oszlopformára vágnak. Ezzel a módszerrel lehet a legjobban minimalizálni a feldolgozott egykristályos szilícium hulladékot. Később felszeletelik ezt a kristályt vékony szeletekre, amelyek a cellák alapját fogják képezni. [7]

Az egyik legnagyobb előnye a monokristályos napelemeknek, hogy jelenleg is az egyik legjobb hatásfokkal bírnak a napelemek közül, amellett, hogy rendkívül sokáig tudnak megfelelő hatékonysággal működni (akár 30 év is). Az átlagos hatásfokuk a 18-20 %-os tartományba esik, azonban laboratóriumi körülmények között akár 25-30%-os hatásfokkal is képesek üzemelni. [7]

#### 4.3 Polikristályos napelem

A monokristályos cellákkal ellentétben a polikristályos, más néven többkristályos cellák kristályszerkezetének eloszlása nem homogén, mivel a napelem cellák szemcsehatárokkal rendelkeznek. A polikristályos napelem gyártása során grafit tégelybe öntenek olvadt halmazállapotban lévő szilíciumot, amelyet ezután a hőmérséklet szabályozásával kikristályosítják. A hűtési folyamat miatt nem csak egy pontból indul ki a kristályosodás, ezáltal alakul ki az úgynevezett polikristály. A monokristályos napelem cellákkal ellentétben a polikristály osztyákat egy négyzetes oszlop alakú rúdból vágják ki, melyek körülbelül 180-350 mikrométer vastagságúak. Ezekből az osztyákból készítik el a komplett cellákat. [7]

A gyártás egyszerűsége miatt olcsóbbak a polikristályos napelemek, mint az egykristályos társaik, azonban a modern napelem gyártás során már nincs olyan lényegesen nagy különbség közöttük, mint 10 évvel ezelőtt. Ezzel szemben a hatékonyságuk viszont lényegesen rosszabb (14-18%) a bennük jelenlevő szemcsehatárok miatt, laboratóriumi körülmények között azonban akár a 20%-os hatásfokra is képesek. Az egyes kristályok nagyon ritkán illeszkednek egymáshoz tökéletesen, így közöttük rések maradnak, amelyek veszteségekhez vezetnek. Ennek ellenére ez az eltérés adja az egyik előnyt a monokristályos napelemmel szemben, mivel így a cellák a szórt fényt jobban tudják hasznosítani, ezáltal képesek felhasználni a nem megfelelő szögben beérkező napsugarakat is. [7]

#### 4.4 Hibrid napelem cellák

A hibrid cellák a napelemek 4. generációjába tartoznak (5. ábra), amelyek lényege, hogy két különböző technológiát ötvöznék egymással. Ha két réteg amorf szilícium közé egy kristályos szilíciumot helyezünk, akkor az hibrid napelem cellának fog minősülni. Az így elérhető hatásfok akár 19% is lehet. A hibrid panelek célja tehát tulajdonképpen a hatásfok növelése, azonban az elterjedésüket nagyban hátráltatja, hogy a technológia rendkívül drágának számít a hagyományos kristályos vagy vékonyfilmes technológiákhoz képest. [7]



4. ábra Negyedik generációs hibrid napelem [9]

## 5. ELEKTROMOS JÁRMŰ NAPELEMES TÁMOGATÁSA

Az elektromos autók hatékonyságának növelésének egyik lehetséges módja lehet, ha napelemekkel látjuk el a járműveket. Létezik már a villanyautók között olyan, amelynél választható extrafelszerelésként napelemet is lehetett tetetni a jármű tetejére, ilyen például a legújabb 2022-es Toyota Prius Plug-in Hybrid, ez az autó tisztán elektromosan 50 km-es hatótávval rendelkezik. Ezt további 5 kilométerrel képes megnövelni a napelemmel ellátott tető, tehát ebben az esetben képes közvetlenül az autó akkumulátorát is tölteni. [10] Más cégek, például a Lightyear egy tisztán elektromos autót fog készíteni Lightyear One név alatt, amelynél napelemek fogják borítani a teljes tetőt, továbbá a hátulját és a motorháztetőt is. Számításuk szerint a jármű így naponta akár 70 km-es hatótára is képes lehet a napelemek segítségével, így lehetővé téve, hogy városi használat mellett csak közvetlen a naptól származó energiára legyen szüksége a villanyautónak. Független tesztelésből eredő adatok azonban még nem érhetőek el, mivel a Lightyear One még nem került gyártásba. [11]

### 5.1 Napelem kiválasztása és elhelyezése a járművön

Napelem járműbe történő építése esetén a leghatékonyabb módszer, ha annak tetején helyezük el az energiatermelő rendszert,

hasonlóan a külön erre a célra létrehozott elektromos járművekhez.



5. ábra Neumann János Egyetem Megalux napelemes járműve

A nagy összefüggő területeken elhelyezett napelemek csökkentik a költségeket és növelik a hatékonyságot. Az egyik leggyakoribb elektromos járműfajta a kisbuszok kategóriája, amely jelentős tetőfelülettel rendelkezik a többi gépkocsinhoz képest. Példaként vegyünk egy Mercedes EQV 300 Long típusú autót, aminek a tetőfelülete 3,6 m<sup>2</sup>-t tesz ki. A korábban ismertetett poli-, monokristályos, vékonyréteg és hibrid napelemek közül szükséges meghatározni, hogy az adott feltételekhez viszonyítva melyik variáns a leginkább alkalmas arra, hogy villanyautókban a napenergiát hasznosítsa. Ehhez egy döntési mátrix (2. táblázat) segítségével értékeltem és súlyoztam az egyes napelemeket az általam legfontosabbnak vélt szempontok és, a már korábban elvégzett irodalomkutatás alapján.

|                        | Hatékonyság |              | Elérhetőség |              | Költség     |              | Élettartam  |              | Össz.: |
|------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------|
|                        | Érték [1-5] | Súlyos érték | Érték [1-5] | Súlyos érték | Érték [1-5] | Súlyos érték | Érték [1-5] | Súlyos érték |        |
| Polikristályos napelem | 3           | 15           | 5           | 15           | 4           | 16           | 4           | 16           | 57     |
| Monokristályos napelem | 4           | 20           | 5           | 15           | 3           | 12           | 5           | 20           | 67     |
| Vékonyréteg napelem    | 2           | 10           | 5           | 15           | 5           | 20           | 1           | 4            | 49     |
| Hibrid napelem         | 5           | 25           | 1           | 3            | 1           | 4            | 5           | 20           | 52     |
| Súly [1-5]             | 5           |              | 3           |              | 4           |              | 4           |              | -      |

2. táblázat Döntési mátrix

A monokristályos napelem 2022-ben az egyik legjobb hatásfokkal rendelkező, széles körben elterjedt és gyártott napelem típus. Ebből kifolyólag számos gyártó van a világon (pl.

Longi Solar, Risen, Sharp stb.), amelyeknek kínálata bizonyos mértékben eltérő. A legmegfelelőbb energiatermelő egység kiválasztása érdekében elsőként szükséges összehasonlítani az egyes termékeket (3. táblázat). A legfontosabb szempontok közé tartozik a hatásfok és az 1 m<sup>2</sup>-re leosztott teljesítmény, mivel a járműbe történő építés megköveteli, hogy a lehető legjobban teljesítő napelem kerüljön bele, a lehető legjobb kihasználás érdekében. Emellett az ár is jelentős, mivel a modulok legyártása és járműbe integrálása rendkívüli mértékben befolyásolja a gyártási költségeket.

| MODUL TÍPUSOK                                    | Terület [m <sup>2</sup> ] | Cella szám [db] | Hatásfok [%] | STC [W] | NMOT [W] | Ár [Ft] | STC [W/m <sup>2</sup> ] | NMOT [W/m <sup>2</sup> ] |
|--|---------------------------|-----------------|--------------|---------|----------|---------|-------------------------|--------------------------|
| 1. Risen RSM40-8-400M mono                       | 1,92                      | 120             | 21,3         | 410     | 310,7    | 73950   | 213,54                  | 161,82                   |
| 2. Jinko Solar N-type                            | 1,91                      | 132             | 21,22        | 405     | 302      | 83000   | 212,04                  | 158,12                   |
| 3. Trina Vertex Mono TSM-DE18M 500W Solar Black  | 2,41                      | 150             | 21,2         | 510     | 385      | 76500   | 211,62                  | 159,75                   |
| 4. Trina Solar 120 cellás monokristályos napelem | 1,92                      | 120             | 21,1         | 405     | 306      | 78895   | 210,94                  | 159,38                   |
| 5. Jinko Tiger 385W All Black mono napelem       | 1,91                      | 132             | 20,96        | 400     | 298      | 58100   | 209,42                  | 156,02                   |
| 6. Longi Solar 120 cellás monokristályos napelem | 1,82                      | 120             | 20,9         | 380     | 283,8    | 70650   | 208,79                  | 155,93                   |
| 7. Phono Solar 120 cellás monokristályos napelem | 1,83                      | 120             | 20,71        | 380     | 281      | 68890   | 207,65                  | 153,55                   |
| 8. Risen RSM144-7-450M mono                      | 2,21                      | 144             | 20,6         | 455     | 342,5    | 86990   | 205,88                  | 154,98                   |
| 9. Sharp NU-ID445 mono                           | 2,21                      | 144             | 20,1         | 445     | 333,96   | 91480   | 201,36                  | 151,11                   |

3. táblázat Monokristályos napelemek piackutatása

A monokristályos napelemek közül a Risen RSM40-8-400-as típusnak a legjobb a hatásfoka és az 1 m<sup>2</sup>-re jutó teljesítmény aránya. Ennek ellenére a listában a középen helyet foglaló Jinko Tiger 385W All Black mono napelem ár-érték aránya a legjobb, de a hatásfoka 0,34 %-al gyengébb, míg az 1 m<sup>2</sup>-re jutó teljesítménye 4-5 Watt-al kevesebb. A tisztán elektromos Mercedes EQV 300 Long napelemes támogatására, ebből kifolyólag a Jinko Tiger 385W All Black mono napelemet tartom a legjobb választásnak, mert sem hatásfokban, sem teljesítményben nem olyan nagy az eltérés a többihez képest, viszont árban magasan a legjobb választás, egy ilyen koncepció megvizsgálásához.

## 6. A BEÉPÍTETT NAPELEM ENERGIA TERMELÉSE

Az elektromos autónk szabadon felhasználható tető felülete 3,6 m<sup>2</sup>, a számításhoz feltételezem, hogy ezt a helyet maximálisan kihasználjuk, tehát teljes mértékben lefedjük a kiválasztott monokristályos napelemmel. Az egy év alatt az elektromos járműnkbe integrált napelem által megtermelhető energia-mennyiség azonban sok tényezőtől függ. Az első, hogy a napelem erőművekhez, vagy a háztetőkön lévő napelemekhez képest a cella a kisbuszon kizárólag 0°-os szögben helyezkedik el, tehát nincs megfelelő szögben megdőntve, illetve nem néz ideálisan déli irányba. A napelemek számára a legtökéletesebb beállítás a teljesen déli tájolás, és emellett 34°-os szögben meg is kell dönteni azokat, ekkor tudják csak 100%-ban kihasználni a kapacitásukat, ettől eltérve a hatásfok romlik. Jelen esetben 0°-os tetőszög beállítással a napelem 83,5%-os hatást tud elérni az ideálishoz képest (4. táblázat), ezáltal a hatásfok is kevesebb lesz. Így a napelemmel ellátott jármű hatásfoka 17,5% (1).

| Tetőszög | Tájolás             |               |                  |           |                   |                |                     |
|----------|---------------------|---------------|------------------|-----------|-------------------|----------------|---------------------|
|          | Északnyugat<br>135° | Nyugat<br>90° | Délnyugat<br>45° | Dél<br>0° | Délkelet -<br>45° | Kelet -<br>90° | Északkelet<br>-135° |
| 0°       | 83,5                | 83,5          | 83,5             | 83,5      | 83,5              | 83,5           | 83,5                |
| 15°      | 73,6                | 83,5          | 90,2             | 93,7      | 90,8              | 83             | 74,3                |
| 30°      | 64                  | 79,4          | 93,3             | 99,3      | 94,5              | 81,2           | 65,4                |
| 34°      | 61,7                | 78,4          | 93,5             | 100       | 94,8              | 80,4           | 63,1                |
| 45°      | 55,6                | 75,1          | 92,5             | 99,9      | 94,1              | 77,3           | 56,9                |
| 60°      | 47,4                | 68,7          | 87,5             | 95,7      | 89,4              | 70,7           | 48,3                |
| 90°      | 30,3                | 49,6          | 66,1             | 72,6      | 87,8              | 50,5           | 30,7                |

4. táblázat Napelemek hatásfokának változása a tetőszög és a tájolás függvényében [12]

$$\eta = \frac{\eta_{\text{napelem}} \cdot \eta_{0^\circ}}{100} = \frac{20,96\% \cdot 83,5\%}{100} = 17,5\% \quad (1)$$

### 6.1 Átlagosan besugárzott napenergia mennyisége Magyarországon

A következő fontos tényezők közé tartozik a hely (domborzat, kontinens, éghajlat/időjárás) és az idő (évszak, hónap) is, ahol és amikor a jármű használatban van. Ezek még olyan kis országban is, mint Magyarország, jelentős eltéréseket produkálhatnak, mivel az egyes területek közötti éves besugárzott kWh/m<sup>2</sup> mértéke, több mint 100 kWh/m<sup>2</sup>-el is eltérhet, ilyen például

különbség Sopron (1220 kWh/m<sup>2</sup>) és Szeged (kWh/m<sup>2</sup>) között. A napsütéses órák száma évszaktól, időjárástól is függ. Magyarországon a meteorológiai szolgálat ezeket az adatokat mindig rögzíti, ezáltal ezek az adatok elérhetőek. Megközelítőleg évente a havi napsütéses órákat összeadva 2000 óra napsütés éri Magyarországot, és a havi napsütés intenzitásával kiszámítható a havi besugárzás nagysága. Az egyes hónapokban történő napsugárzásos órák és a napsütés erősségének szorzata megadja a havi besugárzás mértékét, azonban ez az érték meghaladhatja az éves szinten mért értéket (1325-1220 kWh/m<sup>2</sup>), ezért figyelembe kell venni az időjárást is, vagyis, hogy milyen mértékben felhős az égbolt, mert ez is jelentős mértékben befolyásolja a földre jutó besugárzás mértékét. Ennek az ismeretnek a birtokában meghatározható egy közelítő tényező, amellyel beszorozva a kiszámított értékeket, megkaphatjuk a valósághoz közeli adatokat. Az éves besugárzást a rendelkezésemre álló mérés alapján, és annak átlag értékével számoltam (2).

$$E_{\text{mért átlag}} = \frac{1220 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} + 1325 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{2} = 1275,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \quad (2)$$

A rendelkezésemre álló adatokból számolt besugárzás összege viszont  $E_{\text{számolt}} = 2423,43 \text{ kWh/m}^2$ . Az eltérésből kiszámítható a felhők által befolyásolt tényező (3), amellyel pontosan meghatározható lesz az elektromos kisbusz által termelt éves elektromos áram mennyisége.

$$\eta_{\text{felhő}} = \frac{E_{\text{mért átlag}}}{E_{\text{számolt}}} = \frac{1275,5 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{2423,43 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} = 0,525 \quad (3)$$

A buszon lévő napelemek éves teljesítménye tehát következőképpen alakul: (4)

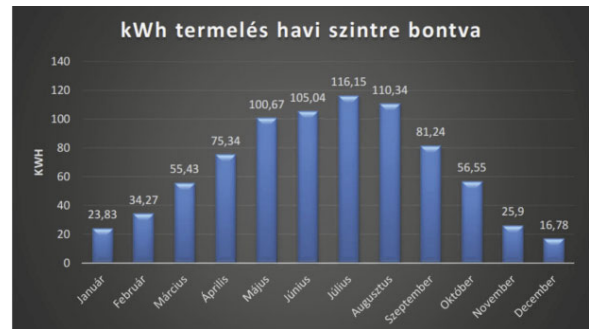
$$W_{\text{napelem}} = A \cdot E_{\text{számolt}} \cdot \eta \cdot \eta_{\text{felhő}} = 3,6 \text{m}^2 \cdot 2423,46 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 0,175 \cdot 0,525 = 801,55 \text{kWh} \quad (4)$$

Ezek szerint a járművünkbe integrált 3,6 m<sup>2</sup> felülettel rendelkező monokristályos Jinko Triger napelem éves szinten 801,55 kWh energia termelésére lehet képes Magyarország területén. A havi szinten megtermelhető energia viszont nagymértékben változik, ennek meghatározására az alábbi számítási metódust használtam (5), amelyben a napsugárzás intenzitása (IT) és a napsütéses órák száma ( $n_{\text{napsós_órák}}$ ), ezek

folyamatosan változó értékek, valamint a napelem felülete (A), a napelem hatásfoka ( $\eta$ ) és a számolt időjárási tényező ( $\eta_{\text{felhő}}$ ) szerepelnek.

$$W_{\text{havi}} = IT \cdot n_{\text{napsós_órák}} \cdot \eta_{\text{felhő}} \cdot \eta \cdot A \quad (5)$$

Grafikonon megjelenítve, havi bontásban a következőképpen néz ki a havi teljesítménye a fent említett napelem rendszernek.



6. ábra Napelem rendszer havi teljesítmény

## 7. A NAPELEMEK ÁLTAL TERMELT ENERGIA FELHASZNÁLÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI

A megtermelt elektromos energiát több féle módon is fel lehet használni, például az akkumulátorok töltésére, vagy jármű elektromos berendezéseinek működtetésére, valamint akár a hálózatba történő visszatáplálásra is.

### 7.1 Akkumulátorok töltése

Mercedes EQV 300 Long egy 100 kWh-ás akkumulátorral van felszerelve, amelynek a nettó kihasználható mennyisége 90 kWh. [13] Pusztán a beépített napelemmel való töltés nyáron naponta átlagosan 3,6 kWh-val tudja ellátni a járművet, amely a teljes mennyiség 4%-a. Ebből kifolyólag hetente az akkumulátor körülbelül 30%-át képes feltölteni a monokristályos napelem. A jármű tehát képes arra, hogyha egy hónapig nem használják, akkor is 100%-ra legyen feltöltve, habár ezek az értékek a legrosszabb besugárzással rendelkező évszakban drasztikusan lecsökkennek. Télen naponta átlagosan csak 0,48 kWh villamos energia termelésére képes a jármű, amely csupán 0,5%-os töltöttségi szintet jelent. Tehát évszaktól függően az akkumulátor töltésére fordított energia akár 12,5% is lehet az ideális

értékhez képest. Ebből következik, hogy bár a napelem a villamos energiát megtermeli, azonban nem feltétlenül járul hozzá jelentős mértékben a töltöttségi szint növekedéséhez. Nyáron és tavasszal azonban viszonylag magas hatásfokkal tud üzemelni, ezáltal számottevően növelheti a jármű „zöldebb” használatát. Éves szinten 8,9-szer (6) lenne képes feltölteni egy nettó 90 kWh-ás akkumulátort a járműbe integrált napelem.

$$n = \frac{W_{\text{napelem}}}{W_{\text{akkumulátor}}} = \frac{801,55 \text{ kWh}}{90 \text{ kWh}} = 8,9 \quad (6)$$

Hatótávot tekintve a jármű a WLTP gépjárművek üzemanyag fogyasztására és károsanyag kibocsátására hozott szabvány szerinti fogyasztása 248 Wh/km. [13]

Az előző bekezdésekben már bemutattam, hogy mekkora a napelem rendszer által termelt energia nagysága, így nagyon egyszerűen kiszámítható, hogy a jármű mekkora utat képes megtenni csakis napenergia segítségével (7).

$$S_{\text{megtehető}} [\text{km}] = \frac{W_{\text{napelem}}}{L_{\text{jármű fogy.}}} = \frac{801,55 \frac{\text{kWh}}{\text{év}}}{0,248 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}} = 3232 \frac{\text{km}}{\text{év}} \quad (7)$$

Havi szintre lebontva az alábbi megtehető plusz kilométerek lehetségesek (7. ábra). A kiértékelés alapján, havi szinten jelentős hatótáv növekedés érhető el a napelemes kisbusz tekintetében, főként a naposabb hónapokban.



7. ábra Havi szinten megtehető út hossza a napelem által termelt energiából

Ha visszatekintünk a bevezetőben taglalt átlagos járműhasználatra, akkor azt láthatjuk, hogy a járműhasználók átlagosan 20 km-et használják az autójukat hétköznaponként. Ez körülbelül 100 km-t jelent heti szinten, így a fenti táblázatból azt láthatjuk, hogy a legrosszabb téli hónapokban ugyan nem sikerül ezt a nagyságú energiát megtermelni, viszont a nyáron akár egész hónapban használhatjuk az autónkat napenergiából. Így a napsütéses hónapokban az autónkat zöld energiával használva nem

terheljük oly mértékben a környezetünket, és a villamos hálózatot.

## 7.2 A jármű elektromos berendezéseinek működtetése

Egy jármű elektromos berendezéseinek fogyasztása nagymértékben eltér egymástól. A legnagyobb fogyasztók a fűtés és a légkondicionáló berendezés, ezzel szemben a rádió vagy a világítás elenyésző mértékű fogyasztással bír. Az összes lényegesebb fogyasztót tekintve, ha mind be van éppen kapcsolva, akkor átlagosan 4 kWh többletfogyasztást jelentenek, mivel a fűtés és a légkondicionáló használata egyszerre indokolatlan és kivitelezhetetlen. [14]

Az alábbi táblázatban (5. táblázat) részletezem a fogyasztást és azt, hogy éves szinten megtermelt energiából mennyi időt használhatjuk a járműnkben az adott berendezéseket. Azt láthatjuk, hogy a fűtés és a klíma rendszer üzemeltetése sok energiába kerül, de azokat is viszonylag hosszú ideig tudjuk használni a járműnkben. [14]

| Fogyasztó                  | Fogyasztás [kWh] | Évente megtermelt energiából való üzemeltetés [óra] |
|----------------------------|------------------|---|
| Fűtés                      | 2                | 400,78  |
| Klíma                      | 2,43             | 329,86  |
| Első szélvédő fűtés        | 0,8              | 1001,94   |
| Szellőztetés középállásban | 0,17             | 4715  |
| Tompított fényszórók       | 0,125            | 6412,4  |
| Ködlámpa                   | 0,11             | 7286,82   |
| Ülésfűtés                  | 0,1              | 8015,5  |
| USB-töltő                  | 0,1              | 8015,5  |
| Kormányfűtés               | 0,05             | 16031   |
| Fűtött külső tükrök        | 0,04             | 20038,7   |
| Rádió                      | 0,02             | 40077,5   |

5. táblázat A járműben található fogyasztók használhatósága az éves energiatermelés függvényében

A két legnagyobb fogyasztót persze nem használjuk folyamatosan, de így is közel fél hónap az, amikor ezek működését napenergia tudja biztosítani. A többi fogyasztó tekintetében viszont nagyon hosszas működés érhető el, akár egész évben. Ha ezeket a fogyasztókat napelemeről működtetjük, akkor már sokat tudunk nyerni a hatótávon, mert nem kell a nagyfeszültségű akkumulátorok energiáját ezeknek a működésére használni.

### 7.3 A megtermelt napenergia villamos hálózatba történő táplálása

Az elektromos autók egyik nagy előnye, hogy akár az otthonunkban is lehet őket tölteni. Azonban ha az akkumulátor teljesen fel van töltve, akkor a beépített napelemeket le kell kapcsolni, vagy egyszerűen a megtermelt villamos energiát el kell disszipálni. Ennek egyik kiküszöbölési lehetősége lehetne, ha képes lenne a jármű a házak tetején lévő napelemekhez hasonlóan az elektromos hálózatba visszatáplálni az energiát. Egy átlagos családi ház villamosenergia fogyasztása egy hónapban 230 kWh. [15]

Ha csak arra használnánk a napelemes elektromos autót, hogy a háztartásba becsatlakozva energiát termeljen, abban az esetben havi szinten átlagosan 66,8 kWh-t állítana elő, amely a teljes fogyasztásnak közel 29 %-át váltaná ki. Emlékezzünk vissza, a napelemekkel foglalkozó fejezetben bemutattam a megfelelő beépítését, ami a járműben nem ideális szögben helyezkedik el, de a tetőn ez módosítható az optimális beesési szög elérése érdekében. Ezért lehetséges csak ekkora mértékű rásegítés a hálózatra.

## ÖSSZEGZÉS

A környezetvédelem és a hagyományos tüzelőanyagok krízise determinálja az alternatív hajtások térnyerését, és az elektromos energia is előállítható zöld energiaként, amire a járműiparban is törekedni kell. Emellett az akkumulátorok nehezebb előállítása is további fejlesztések felé ösztönzi a gyártókat. Ezen kívül a soron következő környezetvédelmi előírás kisebb súlyú járművek építésére fogja szorítani a gyártókat, mivel az üzemi fék- és gumikopásból eredő károsanyag kibocsátás mértéke is szabályozva lesz. Ez a kisebb és könnyebb akkumulátorok beépítését hozza magával, ami

azonban a hatótáv rovására mehet, és ezt a gyártók nem engedhetik meg maguknak. Át kell gondolni, milyen egyéb megoldások lehetnek, és erre egy lehetséges válasz a napelem. Természetesen a teljesítmény nagyban függ a napelem méretétől és a napsugárzástól. Ebben a tanulmányban bemutattam a napelem működését, egy lehetséges kialakítást, és annak elméleti eredményeit. Ez a tanulmány akár egy stratégiai döntés alapja lehet, hogy fizikálisan is megépítésre kerüljön egy ilyen rendszer, és megtörténhessen a validáció. Amivel nem számoltam, mert ezt elég nehéz a megépítés nélkül meghatározni, az a napelemek járműbe integrálása, és a fejlesztéshez szükséges költségek. Ennek ellenére mindenképp szükséges egy olyan alternatív móddal fejleszteni, amivel úgy támogatható az energiamenedzsment, hogy az a rendelkezésre álló energiát úgy optimalizálja, hogy a hatótáv ne csökkenjen. Ezt a járműnek oly módon kell megoldania, hogy közben a környezetet se terhelje. Ezt az elméletet tovább fogom fejleszteni szimulációval, és az így kapott eredményekre alapozva, források bevonásával tervezem megépíteni a prototípust. Azt gondolom ez az elmélet használható, és piacképes.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] IEA, „IEA: Global EV Data Explorer,” [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/global-ev-outlook-2022>. [Hozzáférés dátuma: 01 06 2022].
- [2] G. Hebermehl, „Volle Konzentration auf Elektroantrieb,” *Auto-motor und sport*, 19 09 2019.
- [3] Enerdata, „Electricity domestic consumption,” [Online]. Available: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumptiondata.html>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2022].
- [4] P. K. Guzey, F. Davide, M. Angelo, S. Gabriella, A. Andrea, Z. Alyona és T. Christian, „Driving and parking patterns of European car drivers – a mobility survey,” *JRC Publications Repository*, 2012.
- [5] p. point, „pod point,” [Online]. Available: <https://pod-point.com/guides/driver/how-long-to-charge-an-electric-car#>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2022].

- [6] V. K. Tóth Anett, „NAPELEM MÚLTJA, JELENE ÉS JÖVŐJE,” *Multidiszciplináris tudományok*, %1. kötet9, %1. szám4, pp. 221-228, 2019.
- [7] B. I. Lipták Róbert, „2020.4.49NAPELEMES VILLAMOSENERGIA-TERMELŐ RENDSZEREKLIpták,” *Multidiszciplináris tudományok*, %1. kötet10, %1. szám4, pp. 434-443, 2020.
- [8] A. Lavaa, „Linqip Technews,,” 19 01 2021. [Online]. Available: <https://www.linqip.com/blog/what-is-a-monocrystalline-solar-panel/>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2022].
- [9] „New 4G Solar Cells Combine Inorganic and Organic Materials to Boost Efficiency,” *The Green Optimistic*, 30 07 013. [Online]. Available: <https://www.greenoptimistic.com/new-4g-solar-cells-combine-inorganic-and-organic-materials-to-boost-efficiency-20130730/>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2022].
- [10] Toyota, „Toyota.hu,” Toyota Magyarország, [Online]. Available: <https://www.toyota.hu/modellek>. [Hozzáférés dátuma: 12 05 2022].
- [11] „Lightyear,” Lightyear, [Online]. Available: <https://lightyear.one/>. [Hozzáférés dátuma: 11 04 2022].
- [12] „Green Match,” Green Match, [Online]. Available: <https://www.greenmatch.co.uk/solar-energy/solar-panels>. [Hozzáférés dátuma: 11 05 2022].
- [13] „Electric Vehicle Database,” 2022. [Online]. Available: <https://ev-database.org/car/1240/Mercedes-EQV-300-Long>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2022].
- [14] „ADAC,” ADAC, [Online]. Available: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/ausstattung/sitzheizung-verbrauch/>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2022].
- [15] „Profitline,” Profitline, 22 11 2019. [Online]. Available: <https://profitline.hu/Mennyi-villamos-aramot-fogyaszt-egy-haztartas-egy-honapban-es-az-a-kWh-energia-mennyibe-kerul-400446>. [Hozzáférés dátuma: 15 03 2022].
- [16] „Electric Vehicle Database,” Electric Vehicle Database, [Online]. Available: <https://ev-database.org/cheatsheet/range-electric-car>. [Hozzáférés dátuma: 10 06 2022].

# MODELLVALIDÁCIÓS MÓDSZERTAN JÁRMŰDINAMIKAI SZIMULÁCIÓKHOZ

## MODEL VALIDATION METHODOLOGY FOR VEHICLE DYNAMICS SIMULATIONS

Widner Attila, Msc , [widner.attila@edu.bme.hu](mailto:widner.attila@edu.bme.hu), Dr. Tettamanti Tamás, PhD  
[tettamanti.tamas@kjk.bme.hu](mailto:tettamanti.tamas@kjk.bme.hu)

### ÖSSZEFOGLALÁS

Járműdinamikai modelleket széles körben használnak az autópár számos területén. Az egyes modellek használhatósága attól függ, hogy mennyire képesek utánozni a valós jármű viselkedését. Minden szimulációs modellnek át kell esnie egy alapos vizsgálati folyamaton, amelyet modell validálásnak neveznek. Bár a járműdinamikai szimulációs modellek és általánosságban a szimulációs modellek validálásának módszertana jól megalapozott terület, a szerzők legjobb tudása szerint még mindig hiányzik egy keretrendszer, mely a járműdinamikai modellek validálására átfogó módszertant adna. A kutatás célja egy módszertani keretrendszer kidolgozása a járműdinamikai modellek validálásához. Jelen cikk célja a keretrendszer magas szintű áttekintése, bemutatva a főbb komponenseket és a kapcsolódó feladatokat, valamint a validációs metrikával kapcsolatos fontosabb tényezők tárgyalása.

### ABSTRACT

There are various applications for vehicle dynamics models in the automotive sector. Each model's usability is based on how well it can mimic the phenomenons of the real vehicle. Every simulation model must pass through a testing procedure known as model validation. To the best of the authors' knowledge, a framework for vehicle dynamics model validation still does not exist, despite the fact that vehicle dynamics simulations and computational model validation in general are well-established fields. The research objective is to create a methodological framework for validating vehicle dynamics models. The goal of this paper is to give a high-level overview of the framework, outlining its main components and associated tasks while

also addressing some concerns about validation metrics.

### 1. BEVEZETÉS

A járműdinamikai szimulációk széles körben elterjedtek és egyre fontosabbá válnak a járműfejlesztés számos területén, mivel a szimulációk alkalmazása jellemzően költséghatékonyabb, biztonságosabb és gyorsabb, mint a valós járműteszt. Továbbá a szimuláció során a paraméterek széles köre könnyen módosítható és rövid időn belül, nagyon rugalmas módon tesztelhető.

A modell validáció az a vizsgálati folyamat, amelyet általában a modellfejlesztő és az adott valós rendszert ismerő mérnökök végeznek annak érdekében, hogy biztosítsák, hogy a modell kellő pontossággal reprezentálja a valós rendszert [1,2]. Az említett előnyök azonban csak akkor jelentkeznek, ha a modell és paraméterei kellően pontosak, és a szimulációs eredmények jól tükrözik a valós jelenséget. A kifinomult járműdinamikai modellek számos paraméterrel rendelkeznek, amelyek közül sok nehezen mérhető. A validációs folyamat ezért rengeteg tesztelést és mérést igényel, ami drága és időigényes.

Annak ellenére, hogy a járműdinamikai szimulációs modellek és a számítási modellek validációjának módszertana jól megalapozott témák, továbbra is szükség van egy átfogó keretrendszerre a járműdinamikai modellek validációjához [3].

A kutatás célja egy teljes módszertani keretrendszer létrehozása a járműdinamikai modellek validálásához. Jelen cikk célja, hogy leírja a javasolt módszertan magas szintű áttekintését, bemutatva a fő komponenseket és a hozzájuk kapcsolódó tevékenységeket, valamint a járműdinamikai modellek validálásával

kapcsolatos bizonyos kritikus szempontokat, mint például a validálási metrikákat.

A javasolt keretrendszer fontos eleme egy kifinomult járműre szerelhető menetdinamikai mérőrendszer, mellyel a dinamikus tesztek során számos mozgásjellemező és jármű állapotjellemző nagy pontossággal mérhető. Járműdinamikai rendszereknél ezek a mozgásjellemezők, állapotjellemzők általában az alábbiak lehetnek:

- x, y, z pozíció (GPS)
- jármű sebességnagyság és irány
- hossz-, oldal-, és függőleges gyorsulás
- dőlési, bólintási és legyezési szögpozíció
- gumibroncs oldal-, és hosszirányú kúszás
- dinamikus kerékdőlés
- gumibroncs erők és nyomatok
- stb.

A validációs mérőszámoknak – amelyek a modell hitelességét (validitását) számszerűsítik – figyelembe kell venniük a valós mérések bizonytalanságát. Ennek eredményeként a validálási folyamathoz az összes releváns rendszer kimeneti mennyiség pontos mérésére van szükség. Továbbá egy ilyen mérőrendszer használata lehetővé teszi számos járműparaméter becslését a dinamikus tesztek során, ami lehetőséget biztosít arra, hogy adott esetben a költséges mérések (motorfékpad mérések, K&C mérések, stb.), helyett ezen becselő algoritmusokra hagyatkozva határozzuk meg az egyes alrendszerek paramétereit.

A járműdinamikai szimulációs modellek meglehetősen bonyolulttá váltak, mivel a jármű alrendszerek is összetettek és a szimulációs modellek igyekeznek minden alrendszert részletesen kezelni. E tendencia szerint ezen modellek validálási folyamata is komplex feladat.

## 2. IRODALOMKUTATÁS

A járműdinamikai modell-validáció területe két fő összetevőből áll: a számítási modellvalidáció és járműdinamika (járműmodellek és járműparaméter mérések, becslés). Az általános modellvalidáció terület jól megalapozott. Carson szerint a validáció és verifikáció célja egy olyan modell, amely pontos, ha arra használjuk, hogy előre jelezze az általa képviselt valós rendszer teljesítményét, vagy megjósolja a teljesítmény különbségét két forgatókönyv vagy két modellkonfiguráció között. A validációs folyamat a modell hitelességének javításához is vezet a döntéshozók szemében [1], [3]. Sok szakértő szerint nincs abszolút valid modell [4],

[5], [6]. Ezért mindig lesznek eltérések a mért fizikai jelenség és a szimulációs eredmények között. A szimuláció célja, hogy választ adjon egy konkrét kérdésre, vagy információt adjon a mérnökök számára a döntéshozatali folyamat során, ezért a modellt csak az adott tartományban kell validálni. Bármilyen további validálási munka javíthatja a modellt, de ha erre nincs szükség, akkor az feleslegesen megnöveli a folyamat költségét és idejét.

A járműdinamikai modellek matematikai háttere jól megalapozott, az egyik legkorábbi munka ebben a témában 1946-ban született. Azóta számos munkát mutattak be a járműdinamika területén, köztük Milliken: Race Car Vehicle Dynamics [7], Zomotor: Gépjármű Menetdinamika [8], Pacejka: Tyre and Vehicle Dynamics [9].

A járműmodell validáció témában is sok írás található, de Kutluay szerint „Sok publikáció, amely azt állítja, hogy bemutat egy validálási módszert vagy technikát, általában csak egy módszertan alkalmazását tárgyalja egy egyedi esetre.” [3] A szerzők legjobb tudomása szerint még hiányzik a járműdinamikai szimulációs területhez kapcsolódó átfogó általános módszertani keretrendszer. A legtöbb alkalmazás csak vizuális összehasonlításra és szubjektív megítélésre támaszkodik.

Legtöbbször a modellt kidolgozó csapat dönti el, hogy a szimuláció valid-e. Ez az egész folyamatlánc csökkenti ezeknek a modelleknek a hitelességét.

A szimulációs eredmények csak az üzemi feltételek bizonyos tartományán belül érvényesek. Egy modell valószínűleg csak egy adott feladatra érvényes, például egy validált oldaldinamikai modell felfüggesztési szabadságfokkal nem feltétlenül alkalmas az utazás kényelmének vizsgálatára [3]. Számos bemutatott módszertan statisztikai elemzésen alapul, ezért minden egyes tesztesethez több kísérleti tesztet kell végezni, hogy elegendő adatot gyűjtsünk és csökkentjük a véletlenszerű hiba befolyását. Számos szakértő támogatja azt az elképzelést, hogy a járműdinamikai modell validálásának magában kell foglalnia az állandósult állapotú és a tranziens tesztek, valamint az idő- és frekvenciatartomány elemzését is.

A modell érvényesítésénél figyelembe kell venni a modell alkalmazási területét, mivel a validálás mértékének mindig van határa, és a modellnek egy adott kérdésben (egy adott tartományban) kell hasznosnak lennie.

### 3. VALIDITÁSI METRIKA

„A legtöbb publikációban nem használnak validációs mérőszámokat és nem végeznek statisztikai elemzést. Ehelyett szubjektív és kvalitatív ítéletet hoznak a valós teszt- és szimulációs eredmények vizuális összehasonlításán keresztül.” [3] Egy modell validációs keretrendszernek tartalmaznia kell egy módszert a kimenetek összehasonlítására, mely számszerűsíti az eltéréseket. Oberkampff és Barone munkájukban különböző jellemzőket tárgyalt, amelyeket a validációs metrikába be kell építeni vagy ki kell zárni [10]. Oberkampff [11] és Trucano [12] azzal érveltek, hogy a számítási és kísérleti eredmények összehasonlításakor a mérési bizonytalanságokat és a hibákat is számszerűsíteni kell. Rendszer kimenet bármilyen típusú fizikailag mérhető mennyiség lehet, vagy lehet olyan mennyiség, amely mérésekből következtetett. Például a rendszer kimenet magában foglalhatja a számított vagy mért mennyiségek származékjait, integráljait vagy összetettebb adatfeldolgozását.

A módszertanban alkalmazott validációs metrika Sarin és társai [13] által kidolgozott mérőszámokra épül. A mérőszámok három fizikailag értelmezhető jellemző alapján (fázis, nagyság és topológia) osztályozzák a hibakomponenseket. Normákat,

keresztkorrelációs méréseket és DTW (Dynamic Time Warping) algoritmusokat alkalmaznak az eltérések számszerűsítésére. Fázishiba esetén keresztkorrelációs módszert alkalmaznak. Az amplitúdó hiba elemzése az adatsorok közötti globális, lokális fáziskülönbség és a meredekségkülönbségek minimalizálása után történik - mivel a meredekségkülönbség topológiai hiba, nem pedig amplitúdó hiba. A DTW-t a helyi fázis- és meredekségkülönbségek csökkentésére használják. Ezt követően L1 vektornormát használnak a relatív nagyság különbségek mérésére. A topológia hibát – a meredekség eltéréseinek mértékét – a fázis hibával időben eltolva, DTW-vel módosított csatornák deriváltja alapján számítják ki. Ezután az L1 normát használják a topológia hiba számszerűsítésére.

A metrikának a [8]-ban leírtak alapján figyelembe kell vennie a valós mérőrendszer mérési bizonytalanságát. A mérési pontosságot súlyszámmal vesszük figyelembe, így a pontosabb szenzorok által mért adatok magasabb szorzót kapnak a pontatlanabbakkal szemben.

Továbbá a modell felhasználásától függően egyes kimenetek fontosabbak lehetnek, így ezek figyelembevételére további súlyszámokat vezetünk be.

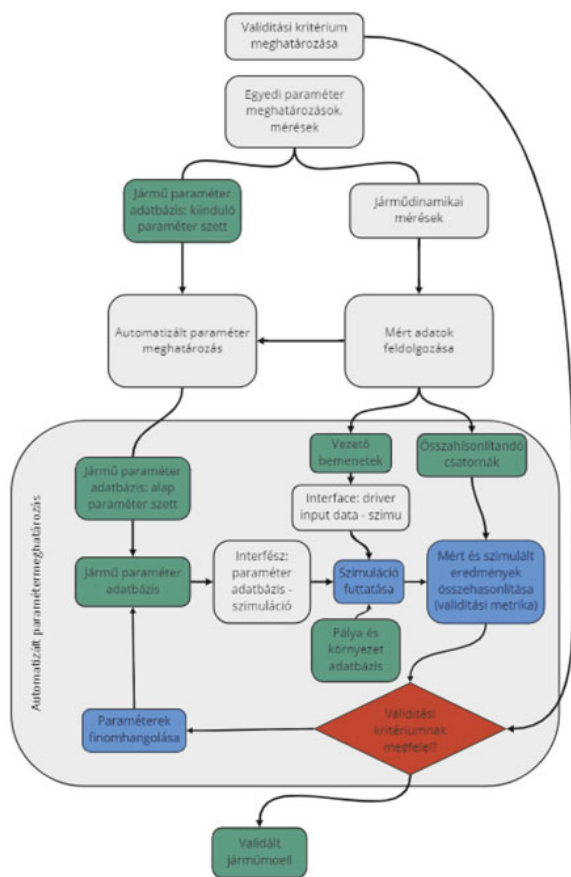
### 4. A KERETRENDSZER BEMUTATÁSA

A fejezetben bemutatásra kerül a járműdinamikai modellekhez javasolt validációs keretrendszer. Célunk egy olyan rendszer létrehozása, amely iránymutatást ad a legtöbb járműdinamikai modell validálásához. A keretrendszert az 1. ábra mutatja.

A validációs kritériumok meghatározását követően - melyek a validációs metrika azon értékei mely felett a modellt megfelelőnek tekintjük - minden fontos alrendszerre érzékenységvizsgálatot kell elvégezni, ez és a paraméter mérési, becslési módszerek pontossága, idő és költségvonzata alapján ki lehet választani a megfelelő mérési módszereket. A validációs metrikákhoz alapos, átfogó menetdinamikai mérések elvégzése szükséges. Előzetesen célszerű az egyedi paraméter méréseket elvégezni, ezek mellett a menetdinamikai mérőrendszerhez tartozó paraméterek mérése is elvégezhető – például a gyorsulásérzékelő helyzete a tömegközépponthoz képest. Ezek kritikusak a járműdinamikai mérések megfelelő utófeldolgozásához. A járműdinamikai méréseket egy kifinomult mérőrendszerrel célszerű végezni, amely minden fontos mozgást képes mérni, olyan jelenségeket is mint a jármű karosszériájának mozgása (legyezés, bólintás, dőlés), felfüggesztés mozgása, abroncsok erői és nyomatékai, oldalcsúszási szög, kerékdőlésszög stb.

Majd a mérések alapján - az következő két blokkban - a járműmodell paramétereinek becslését egy automatizált rendszer végzi, mely kimenetként megadja a szimulációs környezet alap paraméterkészletét a paraméterekhez tartozó mérési/becslési pontossággal. Továbbá az feldolgozást követően a járműmodell vezérlő bemenetei (kormányzó, gáz-, fék- és kuplungpedál erő/pozíció, sebességi fokozat) és a mért rendszerkimenetek (modellenként változó, de általában járműsebesség, hossz- és oldalgyorsulás, legyezési sebesség stb.) rendelkezésre állnak a szimulációs kimenetekkel való összehasonlításához. Végül a validálás rekurzív folyamatát egy arra alkalmas géptanulási algoritmussal végezzük el, az iteratív folyamat fő lépéseit az 1. ábrán a kék és piros alakzatokkal mutatjuk be.

- A szimuláció futtatása a járműtesztekből származó vezérlő bemenetek felhasználásával.
  - A két adathalmaz (szimuláció, mérési eredmények) összehasonlítása (validitási metrikák számításával), majd ezen metrikák összehasonlítása a kívánt értékkel.
  - Ha a kritériumok nem teljesülnek, akkor a fent említett bizonytalansági sávban módosítja az algoritmus a paramétereket.
- A folyamat akkor ér véget, ha az érvényességi feltételek teljesülnek.



1. ábra. Járműdinamikai modellvalidációs keretrendszer blokkvázlata

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A publikációban szereplő kutatást a BME az Európai Unió támogatásával valósította meg, az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium keretében. (RRF-2.3.1-21-2022-00002).

A modell validálása és a mérések a Neumann János Egyetem járműdinamikai mérőrendszerével történtek.

## 13. IRODALOM

- [1] J. Carson, „Model verification and validation,” Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2002.
- [2] Z. Szalay, “Next generation X-in-the-loop validation methodology for automated vehicle systems,” IEEE Access, vol. 9, pp. 35616–35632, 2021, doi: 10.1109
- [3] E. Kutluay, H. Winner, „Validation of vehicle dynamics simulation models – a review,” Vehicle System Dynamics, 2014.
- [4] R. Sargent, „Verification and validation of simulation models,” Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference, 2010
- [5] I. Babuska, J. T. Oden, “Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts,” Computer methods in applied mechanics and engineering, 2004
- [6] R. W. Logan, C. K. Nitta, “Verification & validation: process and levels leading to qualitative or quantitative validation statements,” SAE transactions, 2004
- [7] W. F. Milliken, D. L. Milliken, Race car vehicle dynamics. Society of Automotive Engineers 1995
- [8] Zomotor Á. “Gépjármű Menetdinamika, 2004
- [9] H. Pacejka, Tire and vehicle dynamics. Elsevier, 2005
- [10] W. Oberkampf, M. Barone, “Measures of agreement between computation and experiment: Validation metrics,” Journal of Computational Physics, vol. 217, 2006
- [11] W. Oberkampf, T. Trucano, “Validation methodology in computational fluid dynamics,” Fluids 2000 Conference and Exhibit,
- [12] W. Oberkampf, T. Trucano, “Verification and validation in computational fluid dynamics,” Progress in aerospace sciences, 2002
- [13] H. Sarin, M. Kokkolaras, G. Hulbert, P. Papalambros, S. Barbat, R.-J. Yang „A Comprehensive Metric for Comparing Time Histories in Validation of Simulation Models With Emphasis on Vehicle Safety Applications” 2009



# CONTENTS

|  |    |
|--|----|
| <i>1. Talal Alsardia, Dr. László Lovas:</i><br>FRICTION VARIATION<br>IN A BOLTED JOINT<br>DURING CYCLIC<br>TIGHTENING .....  | 5  |
| <i>2. Ayham Aljawabrah, Dr. László Lovas:</i><br>KINEMATICAL MODEL<br>OF THE DOG<br>CLUTCH SHIFTING .....  | 9  |
| <i>3. Hussein Alzyod, Dr. Peter Ficzere,<br/>Prof. Lajos Borbas:</i><br>INVESTIGATION THE INFLUENCE<br>OF THE PRINTING PARAMETERS<br>ON WARPING IN FFF 3D PRINTED<br>ABS USING NUMERICAL<br>SOLUTION ..... | 13 |
| <i>4. Dr. Nádasdi Ferenc, Dr. Keszi-<br/>Szeremlei Andrea:</i><br>TECHNOLOGY DEVELOPMENT<br>USING VALUE ANALYSIS .....   | 17 |
| <i>5. Sári Zoltán:</i><br>THE POSSIBILITY OF SOLAR CELL<br>SUPPORTED ENERGY<br>MANAGEMENT IN HYBRID AND<br>ELECTRIC VEHICLES .....   | 22 |
| <i>6. Widner Attila, Dr. Tettamanti Tamás:</i><br>MODELVALIDATION<br>METHODOLOGY FOR VEHICLE<br>DYNAMICS SIMULATIONS .....   | 32 |

# GÉP

## INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám

**President of Editorial Board**

Vesza József

**General Editor**

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

**Deputy**

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

**DEAR READER,**

I'm happy to announce that in September 2022 the GTE Construction Division could organise the 7<sup>th</sup> Conference on the Professional Culture of Mechanical Engineering in an industrial setting, the Knorr-Bremse Rail Systems Budapest hosted the event..

It is an outstanding success that more presenters and participants registered for each of our conferences than ever, and the audience was able to follow a total of 34 presentations.

The plenary session was started by more intriguing presentations with revolutionary topics, like solar cells supported energy management or the applications of artificial intelligence in mechanical engineering. Also worth mentioning is Jónás Szabolcs' cultural history lecture on László Bíró and his invention of the biro pen.

In the following parallel meetings we could listen to lectures on the following topics:

The section lectures were held in 3 sections and 6 topics:

- 1A Construction
- 1B Additive manufacturing
- 2A Technology
- 2B Simulation & modeling
- 3A Value Analysis & Ergonomy
- 3B Measurement & testing

This edition of GÉP magazine contains written formal of six lectures.

Based on the success of our conference, we plan to have the 8th Professional Culture of Mechanical Engineering Conference in 2023.

We thank the sponsors of our conference:

- MTA Department of Engineering Sciences, Scientific Committee on Mechanical Engineering,
- BME Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine and Product Design,
- Knorr-Bremse Rail Systems Budapest Ltd.,
- SZTAKI Computer and Automation Research Institute

*Yours sincerely, on behalf of the organizing committee:*

*Attila Metál*

*Secretary of GTE Construction Division*

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone: +36-30/9-450-270 • 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



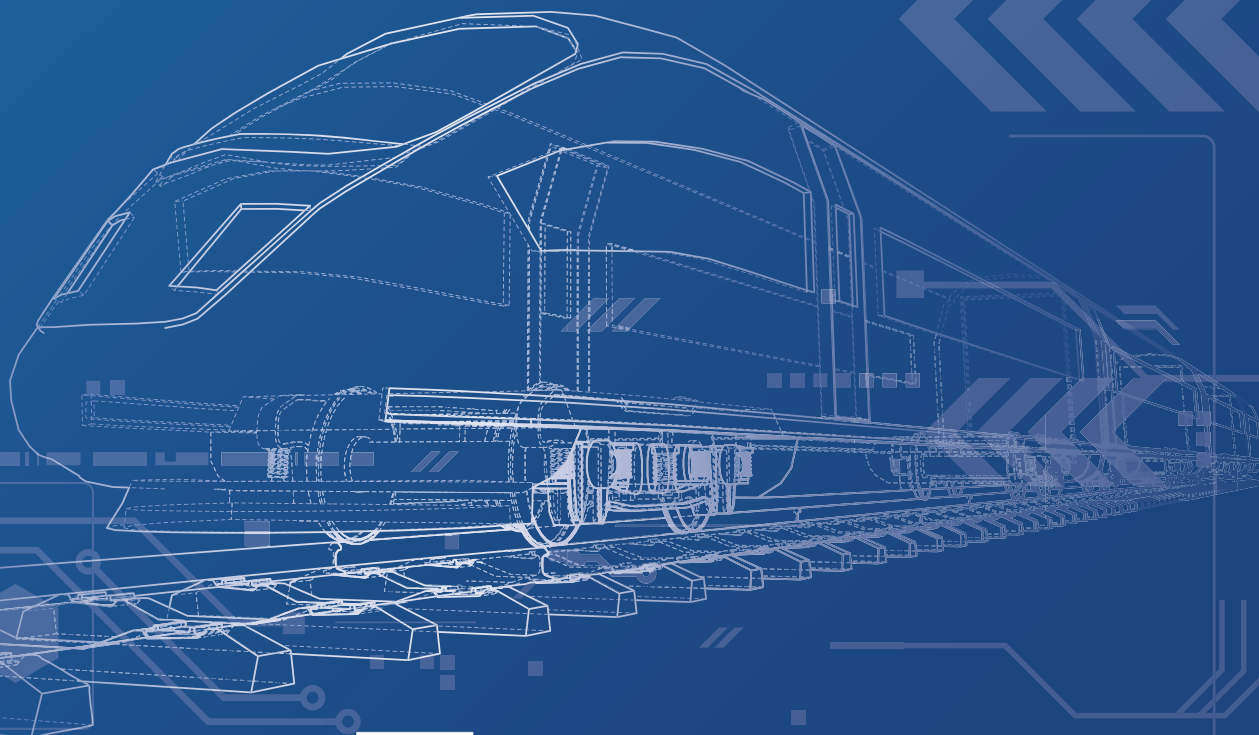
# MÉRNÖKI CSÚCSTELJESÍTMÉNY MINDEN MEGÉRKEZÉS MÖGÖTT

45 SZABADALOM

DÍJNYERTES FÉKVEZÉRLŐ- ÉS FEDÉLZETI RENDSZEREK

GYÁRTÁSKÖZELI FEJLESZTÉSEK

HIGH-TECH ESZKÖZÖK



**KNORR-BREMSE**