

# RELATIVE EFFECTIVENESS OF THE TRUST-REGION ALGORITHM WITH PRECISE SECOND ORDER DERIVATIVES

Ambrus Kóházi-Kis\*

Department of Natural Sciences and Engineering Basics, GAMF Faculty of Engineering and Computer Science, John von Neumann University, Hungary

---

## Keywords:

Levenberg-Marquardt-method  
Trust-region method  
Hessian matrix  
Eigen-value problem  
Numerical stability

## Article history:

Received 7 September 2018  
Revised 2 April 2019  
Accepted 19 March 2019

---

## Abstract

*Trust-region methods with precise Hessian matrix have some drawbacks: time consuming calculation of the elements of the second order derivative matrix, and the generally non-definite Hessian matrix causes numerical and methodical troubles. Their applicability depends on how well their substitute, for example the Levenberg-Marquardt-method performs. The Levenberg-Marquardt-method often performs well in least-squares problems. This procedure dynamically mixes the steepest-descent and the Gauss-Newton-methods. Generally one hopes that the more analytical properties of the problem's cost function utilized in an optimization procedure, the faster, the more effective search method can be constructed. It is definitely the case when we use first derivatives together with function values (instead of just function values). In the case of second derivative of the cost function the situation is not so clear. In lot of cases even if second order model is used within the search procedure the Hessian matrix is just approximated, and it is not calculated precisely even if it would be possible to calculate analytically, because of its temporal cost and a big amount of memory needed. In this paper I investigate whether the precise Hessian matrix is worth to be determined, whether one gains more on the increased effectiveness of the search method than loses on the increased temporal cost of dealing with the precise Hessian matrix. In this paper it is done by the comparison of the Levenberg-Marquardt-method and a trust-region method using precise Hessian matrix.*

---

## 1 Introduction

Least-squares problems are quite frequent in numerical data processing [1, 3].

Let us take a function  $f : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^m$  (with  $m > n$ ), called as *residual vector*, and consider the problem of finding the least-squares solution  $x^\dagger$

$$x^\dagger = \text{ArgMin} \{F(x)\}, \quad (1)$$

where function  $F : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$  is called the *cost function* (or *function of merit*) of the problem:

$$F(x) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i=0}^m (f_i(x))^2. \quad (2)$$

---

\*Corresponding author. Tel.: +3676516436; fax: +3676516299  
E-mail address: kohazi-kis.ambrus@uni-neumann.hu

When the components  $f_i(x)$  of  $f(x)$  are non-linear functions, we have to use iteration: from a starting point  $x_0$  we compute  $x_1, x_2, x_3, \dots$  and we shall assume that the descending condition

$$F(x_{k+1}) < F(x_k) \quad (3)$$

is satisfied.

The solution gets much faster, if the derivatives of the cost function can be determined. In this paper only this kind of least-squares problems are considered.

The derivative function of an  $m$  variable,  $n$  dimensional vector-function  $f: \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}^m$  is also called Jacobian-matrix (see Ref. [4]):

$$f'(x_i) \equiv \frac{d f}{d x} \Big|_{x=x_i} = J_f(x_i) \equiv \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x=x_i} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x=x_i} \\ \vdots & . & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \Big|_{x=x_i} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \Big|_{x=x_i} \end{pmatrix} . \quad (4)$$

The first derivative of the function  $F(x) \equiv \frac{1}{2} \|f(x)\|^2$  can be obtained as (see ref. [1])

$$F'(x_i) = J_f(x_i)^T f(x_i) \quad (5)$$

$$F'(x_i) \equiv \begin{pmatrix} \frac{\partial F}{\partial x_1} \Big|_{x=x_i} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial x_n} \Big|_{x=x_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \Big|_{x=x_i} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \Big|_{x=x_i} \\ \vdots & . & \vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \Big|_{x=x_i} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \Big|_{x=x_i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1(x_i) \\ \vdots \\ f_m(x_i) \end{pmatrix} . \quad (6)$$

The second derivative of function  $F$ , the Hessian-matrix can be calculated as (see ref. [1])

$$F''(x_i) = J_f(x_i)^T J_f(x_i) + f''(x_i) f(x_i) . \quad (7)$$

There are strategies that use the derivatives of the cost function to solve optimization problems [1]. A short survey is given among the fundamental methods to give some insight to the connection between the Levenberg-Marquardt-algorithm and trust-region methods.

In the following I investigate the possibility to gain effectiveness when we use trust-region algorithm in which the precise Hessian matrix of the cost function is determined instead of the Levenberg-Marquardt-algorithm in which the Hessian matrix is just approximated.

## 2 Fundamental methods

### 2.1 Steepest descent direction method

A  $h$  descent direction satisfies

$$h^T F' < 0 ., \quad (8)$$

In the steepest descent direction method linear search is proceed though a direction

$$h_{sd} = -F' . \quad (9)$$

The method is robust even if  $x$  is far from  $x^\dagger$ , but it has poor convergence. Especially the low speed of final convergence is problematic.

## 2.2 Newton's method

Second order expansion of the residual vector is used to calculate the second derivative of the cost function

$$F(x + \xi) \simeq F(x) + \xi^T F'(x) + \frac{1}{2} \xi^T F''(x) \xi + \mathcal{O}(\|\xi\|^3), \quad (10)$$

$$F'(x + \xi) \simeq F'(x) + F''(x) \xi. \quad (11)$$

The optimization step  $h$  is the solution of the equation,

$$F''(x) h_N = -F'(x). \quad (12)$$

Newton method performs well in the final stage of the iteration, where  $x \simeq x^*$  and the Hessian matrix is positive definite, we get quadratic convergence. In the opposite situation, i.e. when the Hessian matrix is negative definite or indefinite, generally one cannot get even a descent step when one uses equation 12. If the eigenvalues and eigenvectors of the Hessian are determined the Newton's-method can be made an effective tool even if the Hessian is not positive definite [2].

## 2.3 Gauss-Newton method

This method is also called quasi-newton method because the Hessian matrix is approximated, the second term of the Hessian is omitted in (7):

$$F''(x_i) \simeq J_f(x_i)^T J_f(x_i). \quad (13)$$

The optimization step is the solution to

$$J_f(x_i)^T J_f(x_i) h_{NG} = -F'(x_i) \quad (14)$$

The obtained direction  $h_{NG}$  is always descent [1] if the Jacobi-matrix  $J_f(x)$  has full rank.

The approximation is good, the convergence is quadratic if  $f(x_i)$  is small enough, or  $f''(x_i)$  is negligible (quasi-linear least square problem).

The value of  $F(x^\dagger)$  controls the final convergence speed.

The method with line search can be shown to have guaranteed convergence, provided that  $\{x \mid F(x) \leq F(x_0)\}$  is bounded, and the Jacobian-matrix  $J_f(x)$  has full rank in all steps [1].

If the applied approximation for the second derivative of the cost function is not good, the convergence is generally slow.

## 3 Levenberg-Marquardt method

Levenberg (1944) and Marquardt (1963) suggested a method where the step  $h$  is computed by the following equation:

$$\left[ J_f(x_i)^T J_f(x_i) + \mu I \right] h = -F'(x_i), \quad F'(x_i) = J_f(x_i)^T f \quad (15)$$

where  $I$  is the unity matrix, and  $\mu > 0$  is the so called damping parameter. This parameter controls the size and also the type of the step. For all  $\mu > 0$  the coefficient matrix is positive definite, and this ensures that  $h$  is a descent direction.

This method is a combination of the Gauss-Newton method and the steepest-descent method [1, 4, 5]. For large values of  $\mu$  we get

$$h \simeq -\frac{1}{\mu} F'(x_i), \quad (16)$$

i.e. a short step in the steepest-descent direction.

If  $\mu$ , however, is very small, then  $h = h_{NG}$ , which is a very good step in the final stages of the iteration (when  $x_i$  is close to  $x^\dagger$ , the solution) if the residual value  $f(x^\dagger)$  is small enough.

The method is self-controlled by the gain factor

$$\rho = \frac{F(\mathbf{x}) - F(\mathbf{x} + \mathbf{h})}{L(\mathbf{0}) - L(\mathbf{h})}, \quad (17)$$

where the denominator is the gain, predicted by the linear model:

$$L(\mathbf{h}) = F(\mathbf{x}_i) + \mathbf{h}^T \mathbf{F}'(\mathbf{x}_i) + \frac{1}{2} \mathbf{h}^T \mathbf{J}_f(\mathbf{x}_i)^T \mathbf{J}_f(\mathbf{x}_i) \mathbf{h} \quad (18)$$

$$L(\mathbf{0}) - L(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \mathbf{h}^T [\mu \mathbf{h} - \mathbf{F}'(\mathbf{x}_i)] > 0 \quad (19)$$

If  $\rho$  is large then  $L(\mathbf{h})$  is a good approximation to  $F(\mathbf{x} + \mathbf{h})$ , we can decrease  $\mu$  that the next step should be closer to the Gauss-Newton step. If  $\rho$  is small but positive then  $\mathbf{h}$  is a descent step but  $\mu$  must be increased, that the next step should be closer to the steepest-direction step because the second order approximation of  $F(\mathbf{x} + \mathbf{h})$  is not good enough. If  $\rho$  is negative then  $\mathbf{h}$  is not even a descent step, the step must be canceled,  $\mu$  must be increased, that the next step should be closer to the steepest-direction step because the second order approximation of  $F(\mathbf{x} + \mathbf{h})$  is not good enough.

## 4 Trust-region methods

A trust-region optimization method defines a region (with its radius) around a test point. Within this region a simplified (usually not more than second order) model is built. The optimization step is determined by the optimal point of the model function within this region where the model function is trusted to be a good model of the cost function. [1]. If the improvement is well modelled by the model function than the step is executed and the radius of the trust region may be increased, otherwise the step is cancelled and the radius is decreased.

The earliest use of the term seems to be by Sorensen in 1982 [6].

There exist also trust-region methods without derivatives [7] that form a linear or quadratic models by interpolation to values of the cost function.

There are trust-region methods that uses only the first derivative of the residual vector  $\mathbf{f}$ . A classic method of this kind is the Powell's dog-leg method [10]: it combines the steepest-descent ( $\mathbf{h}_{sd}$ ) and the Gauss-Newton ( $\mathbf{h}_{GN}$ ) steps to get a step ( $\mathbf{h}_{dl}$ ) not longer than the sugar ( $R$ ) of the trust-region.

In some sense Levenberg-Marquardt method is also a trust region method: by controlling the damping parameter  $\mu$  the step length is controlled.

In the case of the true second order derivative Hessian matrix, the trust-region step can be calculated only if the eigenvalues and eigenvectors of the Hessian is determined [2]. Without solving the eigen-problem of the Hessian the trust region step can be calculated only iteratively [8, 9].

In the following I will concentrate on second order trust-region methods that build a true second order model of the cost function.

### 4.1 Second-order trust-region methods

These kind of trust-region methods are based on the second order model of the merit function obtained from the Taylor-expansion of  $\mathbf{f}$ ,

$$F(\mathbf{x}_i + \boldsymbol{\xi}) \simeq L(\boldsymbol{\xi}) = F(\mathbf{x}_i) - \boldsymbol{\xi}^T \mathbf{b} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\xi}^T \mathbf{H} \boldsymbol{\xi}, \quad (20)$$

where the derivatives of the cost function  $F(\mathbf{x}_i)$  are exactly calculated

$$\mathbf{b} = -\mathbf{J}_f(\mathbf{x}_i)^T \mathbf{f}, \quad \mathbf{H} = \mathbf{J}_f(\mathbf{x}_i)^T \mathbf{J}_f(\mathbf{x}_i) + \mathbf{f}''(\mathbf{x}_i) \mathbf{f}(\mathbf{x}_i). \quad (21)$$

A constrained optimization is made in the trust-region to find the minimizer of the model function.

The subspace optimization can be done inexactly but in this way the benefit of using the exact Hessian matrix is (partly) wasted.



Exact subspace optimization even of the model function can be very time-consuming because of the need for solving of the eigen-problem of the Hessian-matrix. However, when the calculation of the cost function is quite time consuming then the extra time of the evaluation of the eigen-problem of the Hessian can be negligible.

## 4.2 Path-finder trust-region algorithm

I proposed a trust-region method that is easy to implement: instead of searching for an optimal value, the optimal way to the minimizer of the original problem is followed within the trust region [11].

It can be supposed that the way along the local gradient to the local minimizer can be parametrized with some scalar (time-like) parameter  $t$ . The path towards the minimizer of the model function can be determined, as long as the eigen-system of the symmetric Hessian matrix  $\mathbf{H}$  is found. The eigen-vectors and eigen-values can be effectively determined with the *tred2* and *tqli* functions of the Numerical Recipes [12]. The *tred2* and *tqli* functions work well up to 100 dimensions when one uses *long double* real variable in C.

The way toward the minimizer leads anti-parallel to the local gradient:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{b} - \mathbf{H}\mathbf{x} . \quad (22)$$

This equation is separated in the eigen-system of  $\mathbf{H}$

$$\frac{dx_j}{dt} = b_j - \lambda_j x_j , \quad (23)$$

where  $x_j$  and  $g_j$  are the  $j$ -th component of the vectors  $\mathbf{x}$  and  $\mathbf{g}$ , respectively; and  $\lambda_j$  is the  $j$ -th diagonal element of  $\mathbf{H}$  in its eigen-system of coordinate. This equation can be integrated. If  $\lambda_j \neq 0$  (or more precisely  $|\lambda_j| > \varepsilon$ , where  $\varepsilon$  is a small number) then

$$x_j(t) - x_{ij} = \frac{b_j}{\lambda_j} [1 - \exp(-\lambda_j t)] , \quad (24)$$

where  $x_{ij}$  is the starting point. Otherwise (if  $\lambda_j \approx 0$ ) (or more precisely  $|\lambda_j| \leq \varepsilon$ )

$$x_j(t) - x_{ij} = b_j t . \quad (25)$$

The region can be trusted only within an environment of radius  $R$ , that is the length of our step

$$r(t) = \sum_{i=1}^m \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_i\|^2 \quad (26)$$

could not be longer than  $R$ . Even if the Hessian matrix  $\mathbf{H}$  is positive definite (all of its eigenvalues are positive) it cannot be longer than  $R$ . The restriction of  $r(t)$  can be done by a one-dimensional successive approximation in  $t$ .

Finally one has to check that how good the second order approximation was. Depending on the value of the gain factor  $\rho$  in Eq. (17) one has to increase ( $\rho > \rho_0 > 0$ ) or decrease ( $\rho \leq \rho_0$ ) the radius of our trust region, and one even has to cancel the step if  $\rho \leq 0$ .

## 5 Comparison the efficiencies of LM and my trust-region method

The Path-finder trust-region algorithm described above is just a true second order method. In the following the Levenberg-Marquardt-method is tested: when it performs worse than a true second-order method.

I compared the performances of the Levenberg-Marquardt (LM) and Trust-Region (TR) methods on problems from the Ref. [4].

| Test problem                       | LM  | TR  |
|------------------------------------|-----|-----|
| Rosenbrock function (4)            | 23  | 22  |
| Freunstein-Roth function (7)       | 36  | 7   |
| Bard function (8)                  | 5   | 11  |
| Kowalik and Osborn function (9)    | 15  | 11  |
| Meyer function (10)                | 176 | 207 |
| Brown and Dennis function (14)     | 42  | 9   |
| Exponential fit, 4 parameters (18) | 65  | 44  |
| Modified Meyer function (20)       | 83  | 415 |

*Table 1. Levenberg-Marquardt (LM) and Trust-Region (TR) methods step numbers to achieve the minimizers of different optimization problems to the same accuracy*

It can be seen in table 1. that in some problems the true second order trust-region method performs better. It seems that in these problems the approximations applied in the Levenberg-Marquardt-method are not good enough. In other problems the Levenberg-Marquardt-method performs even better than my trust-region method. The most significant case is the Modified Meyer function's problem where I believe that the numerical instability of my method emerged in this case is the origin its partial failure. In my trust region much more problematic eigen-problems must be solved than in the case of Levenberg-Marquardt-method where only matrix inversion is made.

It needs additional investigations on different problems why the one or the other method performs better on.

## Acknowledgement

This research is supported by EFOP-3.6.1-16-2016-00006 "The development and enhancement of the research potential at John von Neumann University" project. The Project is supported by the Hungarian Government and co-financed by the European Social Fund.

## References

- [1] J. Nocedal, S.J. Wright, "Numerical Optimization", Springer-Verlag (1999).
- [2] W. Shiquan, W. Fang, "Computation of a trust region step", Acta Math. Appl. Sinica, 7, 354-362 (1991).
- [3] K. Madsen, H.B. Nielsen, O. Tingleff, "Methods for non-linear least square problems", IMM Department of Mathematical Modeling, Technical Paper, booklet 1999. (Available: [http://www.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc\\_download.php/3215/pdf/imm3215.pdf](http://www.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc_download.php/3215/pdf/imm3215.pdf) Accessed: 2018.11.05.)
- [4] H.B. Nielsen, "Damping parameter in Marquardt's method", IMM Department of Mathematical Modeling, Technical Paper, booklet 1999. (Available: [http://www2.imm.dtu.dk/documents/ftp/tr99/tr05\\_99.pdf](http://www2.imm.dtu.dk/documents/ftp/tr99/tr05_99.pdf) Accessed: 2018.11.05.)
- [5] D. Ramadasan, M. Chevalloné, T. Chateau, "LMA: A generic and efficient implementation of the Levenberg-Marquardt Algorithm", Software: Praxtise and Experience, doi: 10.1002/spe.2497 (2017).
- [6] D.C. Sorensen: Newton's Method with a Model Trust Region Modification, SIAM J. Numer. Anal., 19(2), 409426 (1982).
- [7] B. Karasözen, "Survey of trust-region derivative free optimization methods", J. of Industr. and Managm. Optim., 3, 321-334 (2007).

- [8] J.B Erway, P.E. Gill, J.D. Griffin, "Iterative methods for finding a trust region step", SIAM J. Optim., 20, 1110-1131 (2009).
- [9] J.B Erway, P.E. Gill, "A subspace minimization method for the trust-region step", SIAM J. Optim., 20, 1439-1461 (2009).
- [10] M.J.D. Powell, "A hybrid method for non-linear Equations", In P. Rabinowitz (ed): Numerical methods for non-linear algebraic equations, Gordon&Breach, pp. 87-114 (1970).
- [11] A. Kőházi-Kis, "Dielektrikumtűkrök automatizált tervezése", GAMF Közleményei, XXIII. évfolyam, 87-95 (2009).
- [12] W.H. Press, S.A. Teukolsky, A.W.T. Vetterling, A.B. Flannery, Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, New York, 1992.

# MODERN KÁBELEZÉS GIGABITES HOZZÁFÉRÉSI HÁLÓZATOK ÉPÍTÉSÉHEZ

## NOVEL CABLING OF GIGABIT ACCESS AREA NETWORKS

Kőházi-Kis Ambrus\*

Természet- és Műszaki Alaptudományi Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar,  
Neumann János Egyetem, Magyarország

### Kulcsszavak:

Hozzáférési hálózat  
Passzív optikai hálózat  
DOCSIS 3.1  
Ortogonalis frekvencia multiplexe-  
lés  
Koaxiális kábelek

### Keywords:

Access network  
Passive optical network  
DOCSIS 3.1  
Orthogonal frequency multiplexing  
Coaxial cables

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 7.  
Átdolgozott 2019. február 6.  
Elfogadott 2019. március 6.

### Összefoglalás

*A megnövekedett adatátviteli sebességek mellett komoly kihívást jelent a gerinchálózatok mellett a megfelelő hozzáférési hálózatok kiépítése is. Míg a távközlési gerinchálózatok esetében gyakorlatilag az optikai kábelezés az egyeduralkodó, addig a hozzáférési hálózatok kialakításában a passzív optikai hálózatok mellett versenyképesnek mutatkoznak a koaxiális kábelben történő adattovábbítás módszerei is. Utóbbi használja az igen összetett, DOCSIS 3.1 modulációs sémát. Dolgozatomban a passzív optikai és a koaxiális kábelekkel kialakított elosztó hálózatok főbb jellemzőit mutatom be.*

### Abstract

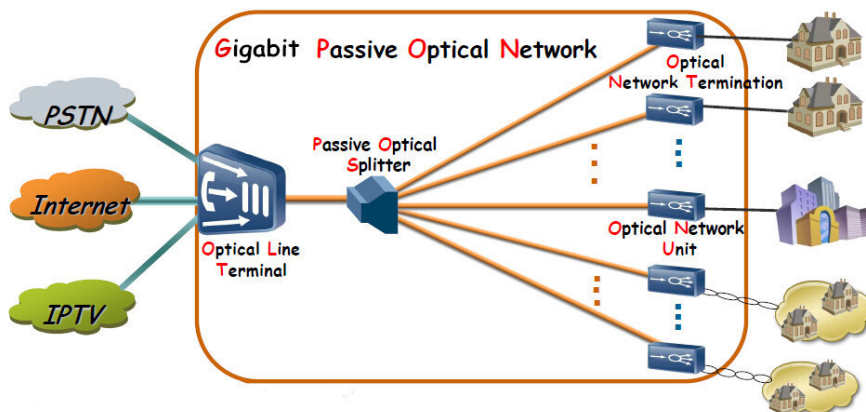
*Building access networks is a serious challenge nowadays when there is a need for multi-gigabit per second communication rate values. While in the case of backbone networks optical cables are dominant, in the case of access networks passive optical networks and coaxial cable based systems are also similarly competitive. The paper introduces the technologies applied in the passive optical networks and in the coaxial-based networks.*

## 1. Bevezetés – Igény a multi-Gbps adatátviteli sebességre

A távközlésben napjainkban rohamosan növekvő sávszélességre van szükség [1]. Ennek három oka is azonosítható: egyrészt az új kommunikációs technológiák (pl. super HDTV) egyre nagyobb átviteli sebességeket igényelnek, másrészt rohamosan növekvő számú okos eszköz internetre kapcsolódása várható (IOT – Internet Of Things), harmadrészt a felhő alapú alkalmazások piacának rohamos bővülése.

A hálózat sávszélességének növelésében az elérési hálózathoz tartozó utolsó kilométer jelenti a szűk keresztmetszetet: ennek a sávszélessége korlátozza a felhasználó felé irányuló adatátviteli sebességet. Ennek oka, hogy az elérési hálózatok gyakran fa-topológiájú, amelyben rendszerint csak néhány drága, nagy kapacitású szakaszra kell a számos olcsóbb kisebb kapacitású végelágazás igényeit kiszolgálni. Ebben a hálózati szakaszban a legnagyobb a hálózat komplexitása a végpontok nagy száma, az eltérő kapacitás és megbízhatósági igények miatt. Az internetre kapcsolódó eszközök által generált forgalom nem fogja várhatóan a nagytávolságú hálózatok (WAN - World Area Network) forgalmát terhelni, sokkal inkább marad az a területi, országos hálózatokon (LAN – Local Area Network) belül. Talán nem túlzás azt várni, hogy az IOT által generált forgalom fokozottan fogja terhelni az elérési hálózatokat (Access Area Network).

\*Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 20 4640787; fax: +36 76 516 299  
E-mail cím: kohazi-kis.ambrus@gamf.uni-neumann.hu



1. ábra. Gigabites passzív optikai hálózat elvi felépítése [3]

Az elérési hálózatok fejlesztését is a technológiai és pénzügyi lehetőségek szabályozzák. A szolgáltató cégek a felhasználói igények, a fejlesztési költségek és az állami, pályázati támogatások által diktált feltételek között keresik a fejlesztések optimális módját. A jövőben általánosnak sejtendő gigabites (Gbps – Gigabit per szekundum) átviteli sebesség igények kielégítésére kétféle lehetőség is kínálkozik. Egyrészt megoldást jelenthetnek a jelenleg is széleskörűen használt, hagyományos átviteli csatornák, mint a vezeték nélküli (WLL – Wireless Local Loop) és a koaxiális rendszerek, azok adatátviteli, spektrális hatékonyságának növelésével. Másrészt hosszabb távon kielégítő megoldást ígér az egymódusú optikai szálak nagy, praktikusan végtelen sávszélességének kihasználásával a végfelhasználókig történő optikai szálcsatlakozás (FTTH – Fiber To The Home) kiépítése. Továbbá az előbb említett technológiák ötvöztetésével (HFC – Hybrid Fibre-Coaxial) is lehet a megvalósítandó hálózat kiépítési és működtetési költségeit a hálózat igényelt teljesítőképessége mellett minimalizálni. Ennek keretében a koaxiális kábelek néhány száz MHz-es sávszélességének egy újfajta modulációs technológiáját (OFDM – Ortogonal Frequency Division Modulation) és az optikai kábelek kis csillapítási veszteségű előnyét ötvöztetik.

Szolgáltatói hálózat tulajdonosa vagy üzemeltetője dönti el, hogy mikor, hol és melyik megoldást válassza a lehető legjobb beruházás megtérülése mellett, gondolva a jövőre is, hogy az adott technológia fejleszthető legyen hosszú távon. A passzív hálózat optikán egyre olcsóbb a rézhálózattal összehasonlításban, de az aktív berendezés és az ügyfélnél elhelyezett terminál vagy modem jelenleg még lényegesen drágább. Többféle konfiguráció lehetséges: vagy eljutnak a háztartásokig az optikai szálal (FTTH), vagy csak az előfizetőt elérő utolsó néhány száz méteren utazhatnak az adatok a rézkábelek segítségével (HFC). Az optikai szálak nagy sávszélességére és kicsiny veszteségére egyre nagyobb szüksége van a kommunikációs hálózatoknak. Ebben a dolgozatban az elérhetőségi hálózatok fejlesztésének manapság szokásos technológiáinak alapjait tekintem át.

## 2. Passzív optikai hálózatok

A gigabites adatátviteli sebességek biztosítására hosszabb távon is leginkább továbbfejleszthető módját az optikai kábelekkel kiépített hálózatok nyújtják (lásd az 1. ábrát). A gigabites távközlés kiépítésében egyre versenyképesebb lehetőségként jelentkezik az optikai szálcsatlakozás [2]. A távközlési rendszerek működtetési költségeit jelentősen növelik a vezetékekhez kihelyezett jelismétlők, -erősítők tápellátása, szervize. A távközlési hálózatok kiépítésében előnyök a passzív hálózatok, amelyeket optikai szálcsatlakozásokkal (PON – Passive Optical Network) is ki lehet alakítani. Az optikai szálak kis jelcsillapítási vesztesége miatt nincs szükség jelismétlőkre, jelerősítőkre. Léteznek jelosztók, úgynevezett csatlakozók, amelyek a rézalapú távközlési hálózatokból jól ismert passzív HUB-ok szerepét tölthetik be.

PON hozzáférési hálózatok kialakítása során a passzív hálózat az aktív hálózatokhoz képest kisebb áthidalt távolságon a hálózati elosztóközponttól a felhasználói végpontokig csupán passzív

optikai elemekkel működik. A központi egység (OLT – Optical Line Termination) és a végpontok (ONU – Optical Network Unit) között csak passzív alkatrészek vannak.

Léteznek speciális optikai FTTH kábelek, amelyek nagyszámú optikai szál tartalmaznak, amelyeket viszonylag egyszerűen lehet szerelni [5]. Az elérési hálózatra viszonylag kis áthidalandó távolság és nagy számú bekötési pont jellemző. Az optikai kábelekben az optikai szálak alkötegekbe, úgynevezett pászmákba kötegeltek, az egyes pászmákban 2-4-6-8-12 optikai szál kap helyet. A kábelekben igen nagy számú, 12-144 darab optikai szál található a 6-24 darab pászmában. A pászmákban a szálak laza kötegelésűek (vazelinben úsznak), bár meglehetősen szorosan foglalnak helyet. Mind a külső burkolat, mind a pászmák könnyen bonthatóak.

## 2.1. PON-változatok

A passzív optikai hálózatok kiépítésének is különféle komplexitása lehetséges attól függően, hogy mekkora felhasználói igényeket kell kiszolgálnia. Kisebb kiépítési költséggel olyan PON építhető ki, amelyben egy-egy optikai szálban egy-egy nagyobb sáv szélességű vivőjellel (XGPON – 10GPON) több felhasználót szolgál ki a hálózat időosztásos multiplexelés (TDMA – Time Division Multiple Access) segítségével. Hosszabb távon a felhasználóknak több Gbps-os adatátviteli sebesség-igényének kiszolgálására szükséges lesz olyan passzív optikai hálózat kiépítésére, amelyben az optikai szálakban több optikai vivő alkalmazásával (WDMA – Wavelength Division Multiple Access) egy-egy szállal több felhasználó több gigabites adatátviteli sebessége is kiszolgálható.

XGPON – TDMA: A felhasználók időosztásos multiplexelés útján tudnak - egymással összehangolt ütemben - egymástól függetlenül kommunikálni. A TDM-nek a különböző felhasználóknak kiosztott időablakai biztosítják a felhasználók egymástól zavarmentesen független kommunikációját.

WDM-PON – WDMA: Léteznek a különböző hullámhosszakot különböző szálakba csatoló passzív splitterek is. A különböző előfizetők sáv szélesség-igénye egymástól gyakorlatilag függetlenül teljesíthető [2]. Az úgynevezett durva WDM (CWDM – Course Wavelength Division Multiplexing) kevesebb vivőhullámhosszat alkalmaz, mint a nagy hatótávolságú hálózatokban alkalmazott sűrű WDM (DWDM – Dense Wavelength Division Multiple) rendszerek. Az elosztási hálózatokban a közeljövőben is csak a CWDM rendszerek kiépítése várható, annak lényegesen kisebb beruházási költsége következtében.

## 3. DOCSIS 3.1 HFC hálózaton

A koaxiális hálózaton GHz nagyságrend felett a jelek továbbítása a frekvencia növelésével rohamosan növekvő csillapítási veszteséggel valósítható meg. A rendelkezésre álló sáv szélesség hatékony kihasználása érdekében a vezeték nélküli internetszolgáltatásban (mobil-internet, WIFI, blueto-oth) az utóbbi időben bevezetett OFDM (Orthogonal Frequency Multiplexing) modulációs technikát alkalmazzák. A multi gigabites jelek koaxiális kábelben így sem továbbíthatóak az elosztó hálózatok kiszolgálásához szükséges több kilométeres távolságokra ismétlők alkalmazása nélkül. Az optikai szálakba a komplex OFDM modulációval előállított rádiófrekvenciás jelet analóg módon, a lézerdióda analóg modulációjával az optikai szálakba csatolják (RFOG – RadioFrequency Over Glass). Az optikai szál kis jelcsillapítási vesztesége következtében a jel elérhet az elosztási hálózat utolsó néhány száz méteres határáig, ahol az optikai jelet egyszerű analóg fotodiódás vételével visszaalakítják a koaxiális kábelekben terjeszthető rádiófrekvenciás jelekké [4]. Ezzel tovább alkalmazhatják a felhasználók felé már korábban kiépített koaxiális hálózatot a gigabites hálózati szolgáltatás során is. Ez a megoldás kisebb befektetési költséggel jár, mint az FTTH rendszer kiépítése. A nagy sáv szélességű kommunikációra éhes fizetőképes kereslet mérsékelt megjelenése mellett ennek az ötvözött megoldásnak jelentős szerepe maradhat a továbbiakban is.

### 3.1. Optikai szálon rádiófrekvenciás jelek továbbítása (RFOG)

Olyan optikai szál technológia, amelyben a HFC (Hybrid Fiber Coax) technológiában használatos koaxiális kábel szakaszt optikai szál helyettesít. Az analóg rádiófrekvenciás jelet az optikai szálba



2. ábra. Egy fény-rádiófrekvenciás jel átalakító egység [6]

a lézergyődióda modulálásával juttatják. A vevő oldalon a rádiófrekvenciás jel a fotodetektor analóg jeleként áll elő (lásd a 2. ábrát). Az optikai szálaknak a koaxiális kábelekhöz képest lényegesen kisebb csillapítása révén nagyobb távolságú kommunikáció valósítható meg.

### 3.2. Ortogonális frekvenciaosztásos multiplexelés (OFDM)

A rendelkezésre álló nagy sávszélesség kihasználható nem csupán egyetlen nagy sávszélességű, azaz rövid jelidővel működő egyetlen csatornával, de több, kisebb sávszélességű, hosszabb jelidővel működő csatornák alkalmazásával is (FDM – Frequency Division Multiplexing). Az utóbbi több előnnyel is járhat: kisebb sávszélességű adók és vevők alkalmazhatóak, több egymástól független kommunikációs csatorna is küldhető a különböző vivőfrekvenciákhoz tartozó csatornákon, több utas terjedés esetén a hosszabb jelidő mellett adott késleltetési időkülönbségek mellett gyengébb szimbólumok közötti interferencia jelentkezik, a széles spektrális tartományban a nemlineáris torzulások kompenzálása, hatásuk kiküszöbölése is lényegesen egyszerűbb [8].

A hagyományos FDM esetén az egyes csatornák között megfelelő spektrális távolságot kell hagyni, hogy az egyes csatornák jele ne zavarja egymást (interchannel interference). A csatornák közötti paragon hagyott spektrális sávok jelentősen csökkenthetik a kommunikáció spektrális hatékonyságát.

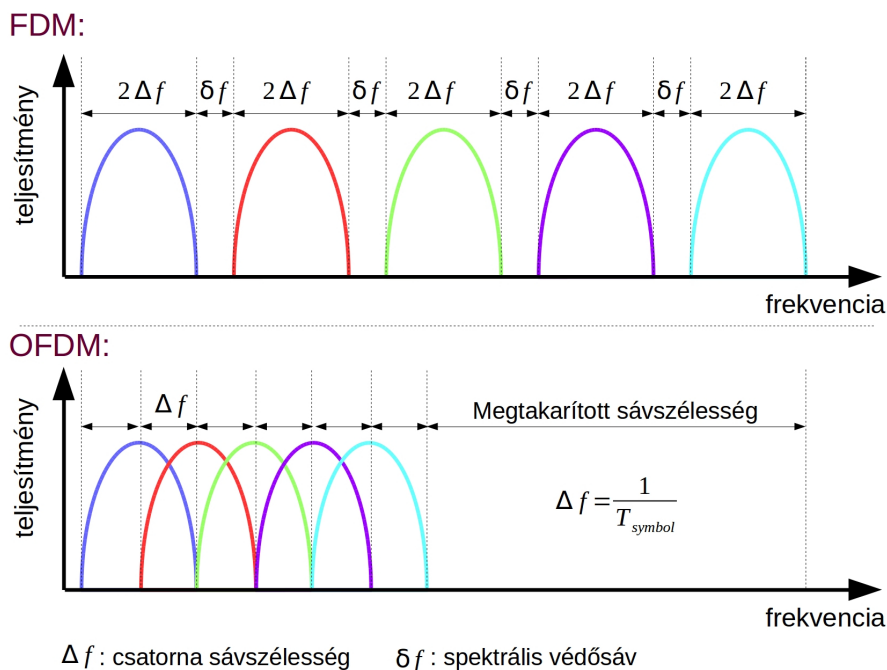
1986-ban először a digitális rádiózás területén alkalmazva megalkották az ortogonális frekvencia multiplexelést (OFDM) [7]. Ennek legfontosabb jellemzője a különböző csatornák olyan speciális modulációja, amelyben a csatornák között nincs szükség spektrális távolságra (lásd a 3. ábrát). Az OFDM optimálisan használja ki a rendelkezésre álló spektrális tartományt [8]. Ennek az az ára, hogy különböző frekvenciakomponenseken továbbított információmennyiségek aránya a kommunikáció iniciálása után állandó.

Az OFDM alkalmazása során viszonylag nagy jelidőt,  $T$  alkalmaznak. A jelidő reciproka adja azt az alapprofekvenciát,  $f_0 = 1/T$ , amelynek egész számú többszörösei adják a csatornák vivőfrekvenciáit,  $f_k = k f_0$  ( $k = M, M + 1, M + 2, \dots, N$ ). Az egyes vivőfrekvenciájú vivők amplitúdóban vagy fázisban modulálhatók és ezek a modulált vivők összege adja a szimbólumot, amely egy  $T$  időtartamig tartó folytonos függvény:

$$x(t) = \sum_{k=M}^N [A_k \cos(2\pi f_k t) + B_k \sin(2\pi f_k t)] , \quad (1)$$

ahol  $A_k$  és  $B_k$  valós együtthatók, amelyek meghatározzák az  $f_k$  frekvenciájú jelösszetevő amplitúdó-





3. ábra. Az ortogonális frekvencia-modulációban nincs szükség a csatornák közötti spektrális sávokra, így spektrálisan lényegesen hatékonyabb kommunikációt valósíthatunk meg vele

ját,  $X_k$ -t és fázisát,  $\varphi$ -t:

$$X_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad , \quad \varphi = \arcsin\left(\frac{B_k}{X_k}\right) . \quad (2)$$

Minden egyes vivőfrekvencia,  $f_k$  amplitúdójának és módusának digitális modulációjával kódoljuk az  $f_k$  vivőfrekvenciával átvinni kívánt információt (lásd a 4. ábrát). Az egyes spektrálkomponensek vivőinek modulációja egymástól függetlenül megválasztható: a legegyszerűbb bináris amplitúdó modulációtól, illetve a bináris fázismodulációtól (BPSK – Binary Phase Shift Keying), a quadratúra fázismoduláción (QPSK – Quadrature Phase Shift Keying) keresztül a kvadratúra amplitúdó modulációig (QAM – Quadrature Amplitude Modulation). De akár modulálatlanul is hagyható, sőt akár ki is kapcsolhatók egyes spektrális összetevők, ha annak frekvenciáján túlságosan nagy zaj, vagy nagy nemlineáris torzulás veszélye áll fenn.

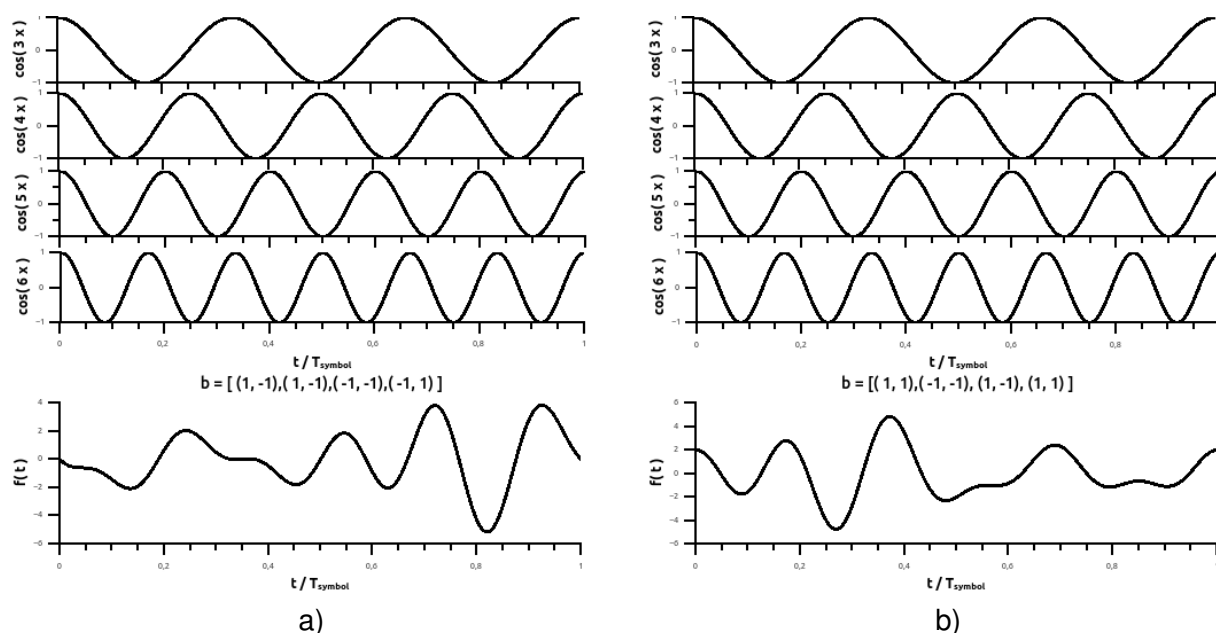
A csatornán átküldött  $x(t)$  analóg jelet a vevő Fourier transzformálja, aminek eredményeként a diszkrétnek szánt spektrális amplitúdó és fázisértékeket kapja, amelyek megadják az amplitúdókba, illetve a fázisokba kódolt jeleket [8].

Szokás azt mondani, hogy az OFDM egymást átfedő spektrumú olyan jeleket alkalmaz, amelyek egymásra ortogonálisak, az ortogonalitás miatt az egymástól függetlenül modulált vivőfrekvenciák modulációja kinyerhető. A vivőhullámok ortogonalizációja, azaz a különböző frekvenciájú szinusz, illetve koszinusz hullámoknak a szimbólumidőn,  $T$  intervallumon megvalósuló  $L_2$  függvényterbeli ortogonalitása által valósul meg.

### 3.3. DOCSIS 3.1

Az internetszolgáltatók számára a DOCSIS (DOCSIS – Data Over Cable Service Interface Specification) rendszerek állnak rendelkezésükre a hibrid optikai szál, koaxiális kábeles rendszereik (HFC) optiális kihasználására. Sok kábeltelevízió-szolgáltató alkalmazza, hogy internetet és telefonkapcsolatot is szolgáltatasson a már meglévő koaxiális hálózaton [9]. A DOCSIS szabványt egy non-profit szervezet, a Cable-Labs fejlesztette és először 1997-ben jegyeztette be. A DOCSIS előírásait azóta is fejlesztették, a legfrissebb változata a DOCSIS 3.1, amelyet 2013-ban jegyeztek be. A DOCSIS előírásai magába foglalják az IP kapcsolatok teljes kommunikációs infrastruktúrája leírását,



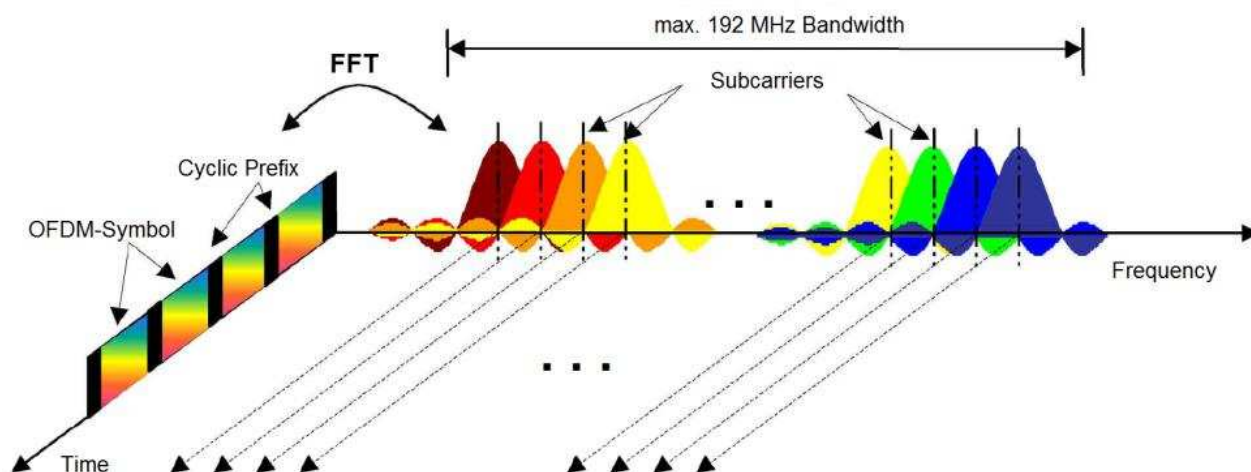


4. ábra. Négy vivőfrekvencia egy relatíve egyszerű, kvadratúra fázisbillentyűzés (QPSK) esetén  $4 \times 2 = 8$  bit információt hordoz egy-egy OFDM szimbólum. A két esetben más más bináris információt,  $b$ -t hordoz az OFDM szimbólum

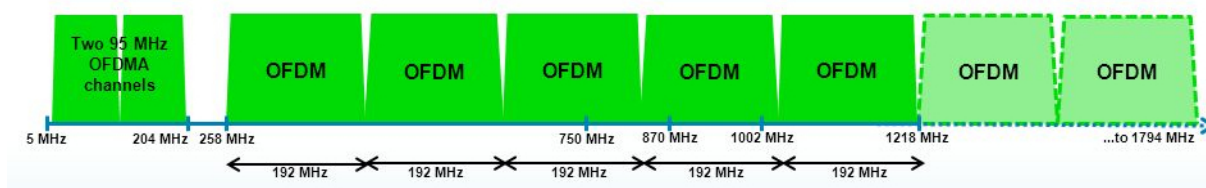
annak különböző rétegeit és a duplex átvitelt a kábeltelevíziós hálózaton [10]. A DOCSIS szabványok visszafelé kompatibilisek, így a neki megfelelő rendszerek vegyesen tartalmazhatnak a korábbi verzióknak megfelelő alrendszereket is.

A DOCSIS 3.1 rendszer OFDM kommunikációs jelrendszert használ, gyakran azonban COFDM-nek nevezik: a „C” betű a „coded” rövidítése, ami arra utal, hogy a jeleket hibajavító kóddal indítják útjára [10]. Az OFDM csatornák legfeljebb 192 MHz sávszélességűek, amelyek legfeljebb 8k vivőt (subcarrier) tartalmaznak, amelyek frekvencia-távolsága  $f_0 = 25 \text{ kHz}$ , ami  $T = 1/f_0 = 40 \mu\text{s}$  jelidőnek felel meg (lásd az 5. ábrát).

A DOCSIS 3.1 szabványban feltöltésre maximum 204 MHz sávszélesség használt, amelyben 85 MHz-es, 117 MHz-es vagy 204 MHz-es OFDM csatorna foglalhat helyet. Letöltésre garantáltan 204-1200 MHz-es tartomány áll rendelkezésre, illetve 204-1794 MHz-es tartományt is lehet alkalmazni (lásd a 6. ábrát). Ezekben a tartományokban a DOCSIS 3.1-ben bevezetett 204 MHz-es vagy 117 MHz-es OFDM csatornákat, vagy az előző DOCSIS szabványokból örökölt csatornákat kaphatnak



5. ábra. Az OFDM működésének időbeli és frekvenciabeli sémája [10]



6. ábra. DOCSIS 3.1 egy lehetséges frekvencia sémája [11]

helyet.

Jelenleg elérhető legkomplexebb rendszerben az OFDM csatornák alvivői 16k QAM-mel moduláltak, ez 14 bit/szimbólumnak felel meg. Az adatátviteli sebességet azonban csökkenti, hogy jelentős mennyiségű hibajavító kód (FEC – Forward Error Coding) alkalmaznak, továbbá mert az adatátvitel technikai biztosítása érdekében nem minden rendelkezésre álló vivőhullámot modulálnak a kommunikáció adatjeleivel. Mindenesetre a DOCSIS 3.1 szabvány letöltésre 10 Gbps, míg feltöltésre 1 Gbps adatátviteli sebességet biztosít.

A DOCSIS 3.1 szabvány igen összetett, jelen dolgozatnak nem lehet tárgya annak teljes körű bemutatása. A további részletekre kíváncsi olvasóknak a [9] – [11] referenciákat ajánlom szíves figyelmébe. A hazai távközlési hálózatok aktuális problémáinak, eredményeinek felmérésére kiváló alkalmat kínál az évenként megrendezett Kábel Konvergencia Konferencia, amelyre az érdeklődő forráshiányos felsőoktatási munkatársak is biztosan ellátogathatnak, mivel az azon való részvétel csupán regisztráció-köteles.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## Hivatkozások

- [1] „Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2016–2021”, Cisco public, White paper, June 6, 2017.  
Available: <https://www.reinvention.be/.../complete-white-paper-c11-481360.pdf>  
Accessed: 2018.10.25.
- [2] G.P. Agrawal, „Fiber-optic communications systems”, John Wiley & Sons, 2010.
- [3] Rapid Growth of GPON Technology Market, Available: <https://www.openpr.com/news/1148688/Rapid-Growth-of-GPON-Technology-Market-Top-Key-Companies-Huawei-ZTE-Nokia-Fiberhome-Calix-ADTRAN-DASAN-Zhone-Global-Business-Outlook-Till-2025.html>, Accessed: 2018.10.25.
- [4] „FTTx mindenhol - optikán, rezes közegen vagy vezeték nélkül?”, Computerworld | 2014 április 29,  
Available: <https://computerworld.hu/tech/fttx-mindenhol-optikan-rezes-kozegegy-vezetek-nelkul-148165.html>,  
Accessed: 2018.10.25.
- [5] Fiber Optic Cables (FOC), Fibrain Catalog, 2017.  
Available: <http://cables.fibrain.com/aktualnosci/our-new-fibrain-fiber-optic-cables-2017-catalogue-in-now-available,a485.html>  
Accessed: 2018.10.25.

- [6] PL10-3A RFoG ONU 1218MHz, Available : <http://www.premalink.net/product/rfog-onu-sdu/>, Accessed : 2018.10.25.
- [7] „Orthogonal frequency-division multiplexing,,  
Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal\\_frequency-division\\_multiplexing](https://en.wikipedia.org/wiki/Orthogonal_frequency-division_multiplexing),  
Accessed : 2018.10.25.
- [8] „Az ortogonális frekvencia-osztású nyalábolás”,  
Available : <http://www.hit.bme.hu/~dallos/hirkelm/OFDM.pdf>,  
Accessed : 2018.10.25.
- [9] „Introduction to DOCSIS 3.1”,  
Available : [www.gcscte.org/presentations/2017/DOCSIS%203.1.pdf](http://www.gcscte.org/presentations/2017/DOCSIS%203.1.pdf),  
Accessed : 2018.10.25.
- [10] DOCIS 3.1 Application Note - Rohde & Schwarz,  
Available : [www.rohde-schwarz-usa.com/rs/.../images/7mh89\\_oe-docsis3.1.pdf](http://www.rohde-schwarz-usa.com/rs/.../images/7mh89_oe-docsis3.1.pdf),  
Accessed : 2018.10.25.
- [11] R. Hranac, B. Currivan, „DOCSIS 3.1 – An overview”, Cisco presentation, Available :  
<https://slideplayer.com/slide/8019994/>, Accessed : 2018.10.25.
- [12] Kábel Konvergencia Konferencia, Lajosmizse, 2018. május 10-11. Program available :  
<http://www.kkk.forum.hu/program/>, Accessed : 2018.10.25.

# EVENT DETECTION AND CLASSIFICATION IN NATURAL TEXTS

Zoltán Subecz<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Information Technology, GAMF Faculty of Engineering and Computer Science, John von Neumann University, Hungary

---

## Keywords:

Artificial Intelligence  
Machine Learning  
Data Mining  
Text Mining  
Information extraction

## Article history:

Received 08 September 2018  
Revised 18 October 2018  
Accepted 04 March 2019

---

---

## Abstract

*The detection and analysis of events in natural language texts plays an important role in several NLP applications such as summarization and question answering. In this study we introduce a machine learning-based approach that can detect and classify verbal and infinitival events in Hungarian texts. First we identify the multiword noun + verb and noun + infinitive expressions. Then the events are detected and the identified events are classified. For each problem, we applied binary classifiers based on rich feature sets. The models were expanded with rule-based methods too.*

---

## 1. Introduction

Humans developed **natural language** to communicate; over past millennia, it has been the most efficient form of transferring the majority of information between individuals. With the advent of computing, large amounts of natural language text are stored in digital format. Computational linguistics helps link the significant power of the computer with the efficiency of communicating in natural language [5].

Natural language is an important communication tool and is widely used to disseminate knowledge and data. Natural languages are the languages that real people speak. Although language is patterned and organized, its processing is often complex and difficult. **Natural language processing (NLP)** is the computer processing of human language. It may span from speech to language understanding - from sounds to semantics.

As an essential part of **artificial intelligence (AI)**, natural language processing (NLP) investigates computationally effective algorithms capable of analyzing, understanding, and generating spoken, signed or written natural language [12, 1]. This field of computational linguistics concerned with developing methods for enabling computers to work with natural language, i.e. written texts or spoken language, the natural forms of human communication.

**Information** could be either **structured** or **unstructured**. High voluminous amount of information is available in this world in the form of unstructured data which mostly exists in textual format. Unstructured data could exist in any form such as emails, literature papers, research papers, news articles, and blog posts. It can also exist in any human readable and spoken language.

**Information extraction (IE)** is an important task in the field of Natural Language Processing (NLP) that tries to extract information from semi-structured or un-structured machine readable documents and store it in a structured way that can be queried directly. The IE is usually considered as a subfield of Text Mining. IE has been applied to various applications such as question answering, information retrieval, conversational language understanding, machine translation and many more. Over the years, Information Extraction (IE) has become increasingly popular as a tool for a vast array of applications [4]. Some typical IE sub-tasks: named entity recognition, event extraction, coreference resolution, relation extraction.

---

\* Corresponding author. Tel.: +36 76 516 411  
E-mail address: subecz.zoltan@gamf.uni-neumann.hu

IE techniques have advanced from rule-based to statistical and machine learning based approaches. Rule-based methods use hand-coded patterns to extract information. While it is easy to implement and debug, they heavily rely on developers' heuristic and require lot of manual labor [3]. It usually has good precision but comparably low recall. Machine learning based approaches, on the other hand, are trainable, adaptable and extensible. With the development of human annotated corpora, machine learning based approaches have achieved significant progress.

Human languages refer not only to entities, but critically, also to situations. Therefore, various aspects of situations are worth analyzing in modeling linguistic meaning. The eventive dimension of information is fundamental for reasoning about how the world changes. The world is dynamic in its nature, and **events** are important aspects of everything that happens in this world. Things that happen and involve change (events), or situations that stay the same for a certain period of time (states) are related by their temporal reference.

Example for **events** and time in natural text:

*He **arrived** to the party at 8 p.m.*

*However, she had already **left**.*

*He **went** back home, after **talking** with some friends.*

**Event extraction** is an important task in Information Extraction (IE), which is a sub-field in Natural Language Processing (NLP) [2, 6, 14]. It has been applied to different genres (e.g., news articles, web blogs, tweets, etc.) and various applications (e.g., question answering, information retrieval, etc.). The goal of event extraction is to extract structure information for the events that are of interest from unstructured documents. It will be extremely valuable if we could automatically detect and extract such events effectively. In order to exploit this unstructured data, machine learning and text mining techniques can be used to recognize events.

## 2. Events

Time in language can be broken down into three primitives: times, **events** and temporal relations [11]. Viewing the temporal structure of a discourse as a graph, the times and events are the nodes and the relations the arcs.

According to the Cambridge English Dictionary, an event is "anything that happens, especially something important or unusual". In philosophy, events are objects in time or instantiations of properties in objects. However, a definite definition has not been reached, as multiple theories exist concerning events. The Oxford English Dictionary defines an event as "a thing that happens or takes place, especially one of importance".

Fiscus and Doddington [8] in the scope of the Topic Detection and Tracking project gave the following definitions event: event is "something that happens at some specific time and place along with all necessary preconditions and unavoidable consequences". Becker et al. [2] adopt an event definition used in an earlier study on broadcast news: "An event is something that occurs in a certain place at a certain time".

In this research, the description of events from TimeML (a temporal markup language) [13] is adopted, as follows: We consider "events" a cover term for situations that happen or occur. Events can be punctual or last for a period of time. We also consider as events those predicates describing states or circumstances in which something obtains or holds true.

There are often mentions of **negated events**, **conditional events** or **modal events**, which cannot be said to certainly "happen or take place" [13]. Further, events can be composed of many sub-events: for example, the Arab Spring lasted months and included multiple revolutions, each of which had a long history, a complex set of story threads all happening in parallel, a culmination and an aftermath. Events may be represented by a variety of lengths of expressions, ranging from document collections [15] to single tokens.

## 3. Event detection and classification

The detection and analysis of events in natural language texts plays an important role in several NLP applications such as summarization and question answering. In this paper we deal with the detection and classification of events that occur in natural language texts.

Though other parts of speech (e.g. noun, participle) can also denote events, the most events belong to verbs in texts; therefore we deal with verbal and infinitival events in this study. e.g. *A tanár **bement** a terembe.* (*The teacher **went** into the room.*) However not all verbs and infinitives can be considered as event-indicator (e.g. auxiliaries), thus special attention is needed to filter out them. e.g. *Haza **akarok** menni.* (*I **want** to go home.*)

The input of our system is a token-level labeled training corpus. The task was divided into three parts. First the single- and multiword verbal and infinitival expressions were picked out. Then from them the events were detected. Finally, the identified events were classified.

Our approach detects and classifies the events with machine learning techniques, which were expanded with rule-based methods. In our system we applied the Hungarian WordNet [10] for the semantic characterization of the examined words, and we disambiguated the polysemic inspected words with the Lesk algorithm [9]

## 4. The Corpus, the WordNet and Applied Software Packages

In our application we used one part of the Szeged Corpus [5], which contains 5,000 sentences from the following domains: business and financial news, fictions, legal texts, newspaper articles, compositions of pupils. From each of the five domains we selected the first 1,000 sentences.

Examples:

|                                         |             |                                         |
|-----------------------------------------|-------------|-----------------------------------------|
| <i>A tanár <b>bement</b> a terembe.</i> | (event)     | (The teacher <b>went</b> into the room) |
| <i>Haza <b>akarok</b> menni.</i>        | (non event) | (I <b>want</b> to go home.)             |

The sentences were annotated by two annotators with the help of a linguist expert for the detection and classification. The inter-annotator agreement for detection was 87% and for classification it was 81% (simple percentage).

Wordnets are lexical databases in which words are organized into clusters based on their meanings, and they are linked to each other through different semantic and lexical relations, yielding a conceptual hierarchy (i.e. lexical ontology) of words. The Hungarian WordNet [10] comprises of over 40.000 synsets, out of which 2.000 synsets form part of a business domain specific ontology. The proportion of the different parts-of-speech in the general ontology follows that observed in the Hungarian National Corpus and includes approximately 19.400 noun, 3.400 verb, 4.100 adjective and 1.100 adverb synsets.

The J48 decision tree algorithm of the Weka\* data mining suite was employed for machine learning. Weka is a collection of machine learning algorithms for data mining tasks. It contains tools for data preparation, classification, regression, clustering, association rules mining, and visualization.

For the linguistic processing of Hungarian texts the Magyarlanc [16] toolkit was used. The toolkit called magyarlanc aims at the basic linguistic processing of Hungarian texts. The modules of magyarlanc are: sentence splitter, tokenizer, POS tagger and lemmatizer, stopword filtering, dependency parser, constituency parser.

## 5. The Detection of Verbal and Infinitival Events

In this module we detected the verbal and infinitival events. Binary classification was performed for this task, which we expanded with rule based methods. For this module a separate classifier was created, where the event candidates were the verbs and infinitives.

The 5,000 sentences contain 10,628 verbs and infinitives, which were used as event candidates. The annotators labeled 6,479 of them as event.

### 5.1. Feature Set

The following features were defined for each event candidate

- **Surface features:** bigrams and trigrams: The character bigrams and trigrams of the beginning and end of the examined words. Besides them: word length, lemma length and the word position within the sentence.

---

\* <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

- **Lexical features:** binary feature: Is the examined word a copula or an auxiliary verb? Two lists were created with copulas and auxiliary verbs. These features indicate the presence of the lemma in these lists. Since the eventive nature of a word could be determined by the presence of a copula or an auxiliary verb before or after the word, these four binary features were used.
- **Morphological features:** Since the Hungarian language has rich morphology, therefore several morphology-based features were defined. We defined the MSD codes (morphological coding system) of the event candidates, using the next morphological features: type, mood(Mood), case(Cas), tense(Tense), person of possessor (PerP), number(Num), definiteness (Def). The following features were also defined: the verbal prefix, the examined word, the POS code and the POS codes of the previous and the subsequent words.
- **Syntactic features:** We defined the syntactic labels of the children of the examined event candidate (e.g. Subject, Object. . . )
- **Semantic features:** The Hungarian WordNet was used here, which contains 3,611 verbal synsets out of the all 42,292 synsets. The semantic relations of the WordNet hypernym hierarchy were used. *We applied the following method, which is new compared to the previous studies.* A separate model was created that without human interaction picked out synsets that are typically in the hypernym chains of events, or have an important role in the decision of the eventive nature. One of the advantages of our method is the automatic collection of the suitable synsets. Otherwise, finding all the required synsets with a simple method would be a complicated task because the events do not belong to some specific synsets in the diverse hypernym relation system of the WordNet. The second advantage of our method is that it can be applied generally, without modification, also to similar problems where it is necessary to find common hypernym intersections, relations for the group of given words in the WordNet hierarchy. It was applied also for the event classification. First we created a model, to which we collected the hypernyms of each event candidate as features during the training phase. On the basis of the features of the decision tree, the model picked out those synsets that are typically in the hypernym chains of events, or have an important role in the decision of the eventive nature. It picked out 95 synsets out of the 3,611 verbal synsets into a list. Then for the main model, these 95 binary features were added to the feature set. At the evaluation phrase we checked whether the event candidate belongs to the hyponyms of any of the collected synsets. Since several meanings can belong to a word form in the WordNet, therefore we performed word sense disambiguation (WSD) between the particular senses with the Lesk algorithm. [9]: Definition and illustrative sentences belong to the synsets in the WordNet. In the case of polysemic event candidates, we counted how many words from the syntactic environment of the event candidate can be found in the definition and illustrative sentences of the particular WordNet synset (neglecting stopwords). That sense was chosen which contained the highest number of common words.
- **Frequency features:** This feature group was applied as a new method as compared to previously published papers. As one of the features, we counted for each event candidate the rate of the cases when the particular word's lemma is an event in the training set. As the second feature a similar rate was counted for the verbal prefix + lemma pair of each event candidate.

The number of features in each group: Surface: 7, Lexical: 6, Morphological: 10, Syntactic: 4, Semantic: 1–10, Frequency: 2

We completed our machine learning technique also with a **rule based method**. There were several expressions in the legal texts where the verb usually indicates event in other contexts, but not in the legal context. For example: *A törvény kimondja, hogy. . . (The law **states** that. . . )* We defined rules for such cases. An example for such a rule: If Subject = "law" And Candidate = "state" Then Candidate  $\neq$  Event. We applied 68 such rules in the legal texts.

In the course of evaluation of event detection and classification, the precision, recall and F-measure metrics were used. We examined the significance of the particular feature groups too, then the model's performance on the five subcorpora separately.

Two baseline solutions were applied. At the first one, every verb and infinitive was treated as event. At the second one, only those verbs and infinitives were treated as event that is not copulas or auxiliary verbs.

## 6. The Classification of Verbal and Infinitival Events

After the detection of verbal and infinitival events we classified them. The classification was performed considering multiple aspects. First, we investigated the main verb types: actions, occurrences, existence and states. Out of them the action and occurrence categories are mostly related to events, therefore these two categories were focused on. **Examples** Action: *A postás hoz egy csomagot.* (*The postman **brings** a package.*) Occurrence: *A levél leesett a fáról.* (*The leaf has **fallen** from the tree.*) Within the 5,000 sentences, among the 6479 events there were 4,158 actions and 1,752 occurrences.

The actions and occurrences together constitute the main part of the events. We wanted to test our model, independently from the former classification, on smaller, but frequent categories. Hence for the second experiment two smaller categories were chosen: movement and communication. **Examples** Movement: *A gyerek **elment** az iskolába.* (*The child **went** to the school.*) Communication: *Tegnap telefonon **beszélgettünk**.* (*We **talked** on the phone yesterday.*) In the corpus there were 586 movement and 1,120 communication events.

The same feature set and feature selection methods were used as for the event detection.

Our machine learning technique was extended in the case of movements with a rule based method. Several expressions can be found that denote movement in most contexts, but in some cases they do not. For example: *Az árak szűk sávban **mozogtak**.* (*The prices **moved** in a narrow range.*) We defined rules for such cases. An example for such a rule: If Subject = "price" And Candidate = "move" Then Candidate  $\neq$  Movement. We created baseline models for classifications too. We applied 11 such rules for movements.

## 7. Discussion, Conclusions

In this paper, we introduced our machine learning approach based upon a rich feature set, which can detect verbal and infinitival events in Hungarian texts and classify the identified events. We solved the problem in 3 steps. First, we identified the multiword noun + verb or noun + infinitive expressions. Then we detected the events, and classified the identified events. We tested our methods on 5 domains of the Szeged Corpus.

We applied for each problem binary classifiers based on rich feature sets. We expanded the models with rule based methods too. In this study we introduced new methods for this application area.

**The detailed results will be published in a subsequent paper.**

## Acknowledgment

*This publication is supported by EFOP-3.6.1-16-2016-00006 "The development and enhancement of the research potential at John von Neumann University" project. The Project is supported by the Hungarian Government and co-financed by the European Social Fund.*

## References

- [1] Allen, J. F. (1995). Natural language understanding (2nd ed.). Redwood City, CA, USA.: Benjamin-Cummings Publishing Co., Inc.,
- [2] H. Becker, M. Naaman, and L. Gravano. Learning similarity metrics for event identification in social media. In WSDM'10.
- [3] L. Chiticariu, Y. Li, and F. R. Reiss, "Rule-based information extraction is dead! long live rule-based information extraction systems!" in Proc. Conf. on Empirical Methods in Natural Language Process., Seattle, WA, 2013, pp. 827-832.
- [4] Cowie, J., & Lehnert, W. (1996). Information Extraction. Communications of the ACM



- [5] Csendes, D., Csirik, J.A., Gyimóthy, T.: The Szeged Corpus: A POS Tagged and Syntactically Annotated Hungarian Natural Language Corpus. In: Sojka, P., Kopecek, I., Pala, K. (eds.) TSD 2004. LNCS (LNAI), vol. 3206, pp. 41–47. Springer, Heidelberg (2004)
- [6] F.P. Hogenboom, F. Frasincar, U. Kaymak, F.M.G. Jong: An overview of event extraction from text. Proceedings of Detection, Representation, and Exploitation of Events in the Semantic Web (DeRiVE 2011), pp. 48–57. Aachen 2011
- [7] Leon R.A. Derczynski: Determining the Types of Temporal Relations in Discourse, University of Sheffield, 2013
- [8] Fiscus, J.G., Doddington, G.R.: Topic detection and tracking evaluation overview. Topic detection and tracking pp. 17–31 (2002)
- [9] Jurafsky, D., Martin, J.H.: Speech and Language Processing: An Introduction to Natural Language Processing. In: Computational Linguistics, and Speech Recognition. PrenticeHall, Upper Saddle River (2000)
- [10] Miháltz, M., Hatvani, C., Kuti, J., Szarvas, G., Csirik, J., Prószéky, G., Váradi, T.: Methods and Results of the Hungarian WordNet Project. In: Tanács, A., Csendes, D., Vincze, V., Fellbaum, C., Vossen, P. (eds.) Proceedings of the Fourth Global WordNet Conference, GWC 2008, pp. 311–320. University of Szeged, Szeged (2008)
- [11] Moens, M. and M. Steedman (1988), “Temporal ontology and temporal reference.” Computational linguistics, 14, 15–28.
- [12] Moreno, L., Palomar, M., Molina, A., & Ferrandez, A. (1999). Introduccion al Procesamiento del Lenguaje Natural. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Alicante.
- [13] Pustejovsky, J.: The syntax of event structure. Cognition 41(1-3), 47 (1991)
- [14] Pustejovsky, J., B. Ingria, R. Sauri, J. Castano, J. Littman, and R. Gaizauskas (2004), “The Specification Language TimeML.” In The Language of Time: A Reader, 545–557, Oxford University Press.
- [15] Ritter, A., Etzioni, O., Clark, S., et al.: Open domain event extraction from Twitter. In: Proceedings of the 18th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, pp. 1104–1112. ACM (2012)
- [16] Zsibrita, János; Vincze, Veronika; Farkas, Richárd 2013: magyarlanc: A Toolkit for Morphological and Dependency Parsing

# A TENISZBEN HASZNÁLT MOZDULATOK MOZGÁSELEMZÉSE MEMS SENZOROK SEGÍTSÉGÉVEL NEURO-MOTORIKUS BETEGSÉGBEN SZENVEDŐ PÁCIENSEKNÉL

## MOTION ANALYSIS FOR MOVEMENTS USED IN TENNIS WITH MEMS SENSORS AT NEURO-MOTOR DISEASE PATIENTS

Tóth László <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Természet - és Műszaki Alaptudományi Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János  
Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

szenzor  
hálózat  
egészségügy

### Shimmer Keywords:

sensor  
network  
health  
Shimmer

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. október 26.  
Átdolgozva 2019. február 26.  
Elfogadva 2019. március 19.

---

### Összefoglalás

A szenzorhálózatok gyors fejlődésével és az egyes élettani folyamatok adatainak gyűjtésének szüksége miatt a vezeték nélküli szenzorhálózat az egészségügyben is elterjedtek. Az alábbi tanulmányban a Shimmer szenzorhálózatok egészségügyi felhasználását mutatja be neuro-motorikus betegségben szenvedő pácienseknél, amelyek feladata, hogy egy személyre szabott edzésterv legyen kialakítható vele, ezáltal gyorsabb felépülést tegyen lehetővé.

### Abstract

With the rapid development of sensor networks and the need to collect data on the physiological processes in the senses, wireless sensory networks have been imposed for use in different health care systems. This article describes the use of Shimmer sensors to be used in neuro-motor disease, which is to make easier and better personalized training plan for the patients faster recovery.

---

## 1. Bevezetés

Minden vezeték nélküli hálózat alapvető jellemzője, hogy az adatok átvitele valamilyen fizikailag látható, tapintható kommunikációs csatorna nélkül megy végbe. Ilyen az utóbbi időben széles körben használt rádióhullámok, hiszen az ilyen csatornát használó eszközök nem igényelnek egymásközi láthatóságot.

Mivel a vezeték nélküli érzékelő hálózat (WSN, vagy Wireless Sensor Network) területe egy viszonylag fiatal és attraktív, igen széles körben alkalmazható, tehát tökéletesen alkalmas a különböző objektumok felügyeletének, követésének és ellenőrzésének lehetőségét. Az érzékelő hálózatok specifikus, konkrét alkalmazási területei:

- A környezet megfigyelése (pl. a tüzek megakadályozása céljával),
- Mozgó objektumok követése,
- Atomreaktorok ellenőrzése és a közlekedés felügyelete,
- Egészségügyi rehabilitációk során történő alkalmazása.

---

\* Tóth László. Tel.: +36 76 516 334  
E-mail cím: toth.laszlo@gamf.uni-neumann.hu

Ezeknél az akkumulátorral működő eszközöknél az alkalmazási terület karakterisztikus problémái a topológia felfedezése, a routing, valamint a különböző módon történő energia megtakarítás és az akkumulátor egy feltöltési működési ideje.

A vezeték nélküli szenzorhálózat egy olyan rendszer, amelyet kommunikációs hálózatba összekapcsolt különböző típusú érzékelő mezők alkotnak. A szenzorok által vett értékeket, analóg kimeneti jeleket először át kell alakítanunk digitális jelekké, majd el kell juttatni a WSN hálózatba. Itt az egyik fő feladat, hogy a szenzorok által kibocsátott adatok alapján kiválassza azokat az adatokat, amelyeket a szenzorok figyelnek. A WSN-t egyenkénti multifunkcionális szenzor csomópontok formálják (Sensor Node - Snod), amelyek vezeték nélkül kapcsolódnak kommunikációs hálózatba.

Az adatok továbbítása mellett az adatvédelem a számítógépes hálózatokban mindig aktuális téma. A gyors fejlődés következtében a vezeték nélküli érzékelő hálózatok egyre nagyobb mértékben vannak kitéve támadásoknak. A WSN-ben található csomópontok specifikus technikai megoldásai miatt a hagyományos számítógépes hálózatokra és az ad-hoc hálózatokra kifejlesztett biztonsági megoldások nem minden esetben elfogadhatók és kielégítőek.

Az itt említett szenzorok használatát alkalmazni lehet az egészségügyben is, hiszen méreteit és súlyát tekintve igen kis és könnyű készülékeket lehet elkészíteni a segítségükkel, amelyek akár távfelügyelet, akár hosszabb idejű folyamatos felügyelettel megvalósítható a páciensek hatékonyabb kezelése, rehabilitációja.

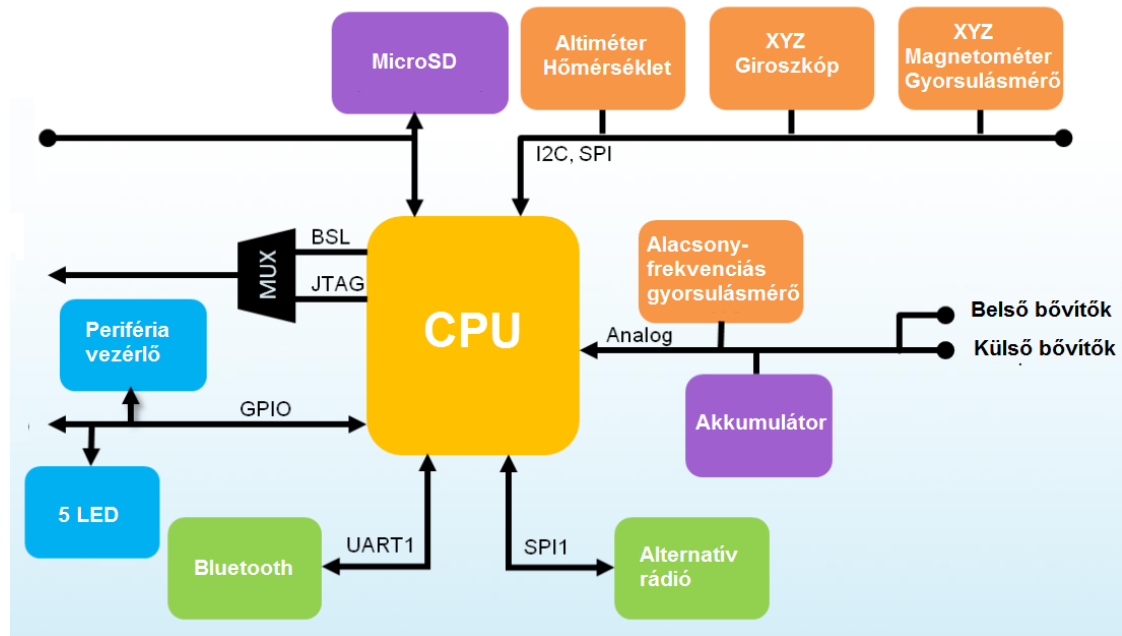
## **1. Szenzorok az egészségügyben**

A szenzorhálózatok technológiai fejlődésével – különösen az alacsony fogyasztás, valamint az emberi szervezetben zajló fiziológiai folyamatok követésére alkalmas érzékelők fejlődésével – sor kerül ezek alkalmazására az egészségvédelmi rendszerekben. Egyértelműen észlelhető hatékonyságot növelő szerepük az egészségügyi szolgálatban. Az ilyen célra kifejlesztett alkalmazások első lehetséges alkalmazása a páciensek klinikai állapotának romlásának korai észlelésére irányulnak, (O. Chipara 2009 és J. Ko 2010), hogy a szakszerű beavatkozásokat gyorsabbá tegyék, ezáltal a hatékonyságát növelni tudják. A következő alkalmazása az ilyen hálózatoknak az elsősegélynyújtásban játszik nagy szerepet, ugyanis nagy elemi katasztrófák esetén a sérültek automatikus besorolása szintén nagyban növelheti az ellátás hatékonyságát, (D. Malan 2004 és T. Gao 2008). Ezeken felül az emberek élettartama meghosszabbítható vitális funkcióinak mobil követésével (G. Virone 2006), valamint az emberek viselkedése, továbbá krónikus betegségeinek terepen történő tanulmányozásával és követésével egyaránt (K. Patrick 2007 és S. Kumar 2007).

### **1.1. Hardver**

Az egészségügyben használatos szenzorok méreteit és súlyát minimalizálni kell, elkerülve így a páciens mozgásának terhelését, nehezítését. Annak érdekében, hogy ennek az igénynek eleget tegyünk, a SHIMMER eszközeit választottam alapul bemutatásra, hiszen méreteit tekintve kicsik, súlyuk alacsony, kezelhetőségük igen egyszerű és az árát tekintve is igen kedvező. A berendezés kis mérete mellett ennél a platformnál elfogadható az elem élettartama, továbbá egyéb, a fent említett előnyökkel is rendelkezik.

A Shimmer készülékek (1.ábra) központi feldolgozó egysége (CPU) tulajdonképp egy TI MSP430F5437A típusú, alacsony fogyasztású mikrokontroller, amely vezérli az eszköz működését. A mikrokontroller beépített 16 csatornás 12 bites analóg-digitális átalakítóval rendelkezik (AD konverter), amelynek az a szerepe, hogy fogadja az inerciális mérőegységektől (Inertial Measurement Units – IMU) érkező jeleket, majd pedig átkonvertálja digitális jellé. Így például a gyorsulásmérőtől, az akkumulátortól, vagy a szenzorbővítő egységtől stb. A processzor 24 MHz-en dolgozik, 16kB RAM belső memóriával rendelkezik, flash memóriája pedig 256 kB. Az alaplapon egy foglalattal van a mikroSD kártya számára, amely az adatátvitel célját szolgálja, az átvitel pedig vezeték nélkül is megvalósítható Bluetooth kapcsolat révén. Lehetőség van a WiFi kapcsolat beépítésére, viszont ilyen esetben szem előtt kell tartani a modul fogyasztását. A készülék teljes fogyasztása aktív állapotban 60mW, míg inaktív helyzetben a fogyasztás néhány mikrowattra csökken, mégpedig az applikáció munkaciklusától függően.



1. ábra: A készülék felépítése

A készülék dobozán található a be- és kikapcsolást szolgáló kapcsoló és egy gomb, amelynek funkcióját a programban definiálhatjuk. Ugyancsak itt található 5 LED dióda, amelyek fényei jelzik a berendezés működését, illetve üzemmódját.

## 1.2. Szenzorok

Ezeknél a készülékeknél többféle érzékelőt használunk, amely a test mozgásának különféle paramétereit, eseményeit méri. Számunkra a legfontosabbak például:

- A gyorsulásmérő egy olyan eszköz, amely a készülékre ható összes erő gyorsulását méri. Ezek a készüléken ható erők magukba foglalják, mind a gravitációs erőt, mind az eszköz használata közben jelentkező inerciális erőket egyaránt. A Shimmer eszközök háromtengelyű axiális (triaxiális) gyorsulásmérővel vannak felszerelve, így tehát ezek az eszközök által mért gyorsulásnak három összetevője van az X, Y és a Z tengelyek mindegyikében.
- Sebességmérő giroszkópokkal akár az emberi test szögsebességét is mérni tudjuk. A Shimmer készülékek triaxiális (háromtengelyű) giroszkóppal vannak ellátva, amelyek ezen három tengely irányú szöggyorsulást tudnak mérni.
- Hőmérő szenzor, amely az emberi test egyik szegmensének hőmérsékletét méri, majd pedig elemezni lehet az idő függvényében történő változását.

## 2. A rendszer kiépítése

A hardverelemek beszerzése után a következő lépés a szenzorcsomópontok összekötése és meghatározott feladatokkal történő ellátása, hogy a szenzorhálózat el tudja látni funkcióit az egészségvédelmi rendszerben. A szenzorcsomópontok rendszerbe történő implementálását követően elemezhető az egészségügyi rendszerben a vezeték nélküli szenzorhálózat működésének hatékonysága.

A szenzorhálózat legösszetettebb konfigurációja a mozgás és tevékenységek kombinációjának követésének alkalmazásával hozható létre. A páciens testén levő szenzorok mérhetik a végtagok mozgását és az izomtevékenységet az atlétikai teljesítményeket vagy a neuromotorikus betegségek rehabilitációs eredményeinek megismerése céljából. A leggyakoribb esetekben a páciens akár nyolc szenzort is magán viselhet, egyet-egyet a végtagok minden

szegmensén (alkar, felkar, lábszár, comb), amelyek MEMS gyorsulásmérőkkel és giroszkópokkal vannak felszerelve. Két féle kivitelben készíthető el a rendszer. Egyik esetben a bázisállomás, a személyi számítógép akár a páciens lakásában is elhelyezhető, amely begyűjti a mobil szenzorokról érkező adatokat, majd elemezi azokat, de fejlesztőgyakorlatok során akár kint a szabadba is kivihető. A másik esetben a mobil érzékelőket memóriabővítő modulokkal látjuk el, így több adat tárolására is alkalmasak lesznek a készülékek. Az adatok elemzésének célja a páciens motorikus képességeinek javítása, a kezelés hatásának felmérése értelmében.

Ilyen alkalmazások esetén a szenzorok méreteit és súlyát minimalizálni kell, elkerülve így a páciens mozgásának terhelését és nehezítését. A Shimmer platform szenzorai, amelyeket az elemzésre kiválasztottunk, és amelyeket a 2. ábrán bemutatunk, 51 x 34 x 14 milliméteresek, súlyuk pedig mindössze 23,6 gramm.

A mozgás elemzése több, a páciens testén elhelyezett érzékelő alkalmazását követeli meg, amelyek mindegyike magas rezolúcióval méri a mozgást, a szenzorok általában hat csatornásak, a mintavétel pedig 100Hz-en történik, azaz másodpercenként 100 alkalommal. Ilyen mennyiségű adat átvitele a reális időben lehetetlen, éppen ezért tartalmaz a Shimmer platform szenzorcsomópontjait egy mikroSD memóriakártya számára megfelelő foglalattal látták el, amelyen 2GB mennyiségű adat rögzíthető és tárolható, ami viszont egy teljes hónapon át elegendő az adatok megszakítás nélküli tárolására.



2. ábra: A készülék kinézete ([www.shimmersensing.com](http://www.shimmersensing.com))

### 3. Kutatás

A kutatásban és a hozzátartozó terápiában 40 személy vett részt, ahol a nemek szerinti eloszlás megközelítőleg azonos volt, ugyanis 18 nő és 22 férfi vett részt. A terápiában résztvevő személyek közül mindenkinek értékelhetők voltak az eredményei és beszámíthatók az eredménybe. A kutatás teljes mértékben anonim, minden egyes személy egy sorszámot kapott, és a továbbiakban ez a sorszám alapján azonosítottam a kutatásban résztvevő személyeket.

A kutatásban résztvevő személyek életkorát tekintve inkább a 41-50 év közötti korosztály volt a domináns 17 résztvevővel, ők voltak legnagyobb mértékben hajlandók részt venni önkéntes alapon. Érdekes, hogy a 18-30 év közötti korosztály igen alacsony számban volt hajlandó részt venni a kutatásban (5 fő), holott azt gondolhatnánk, hogy ez az a korosztály, aki informatikai szempontból a legképzettebb és legfogékonyabb az ilyen jellegű újításokra. Gátló tényező lehet az a szempont, hogy ebből a korosztályból kevesebben tudnak olyan jellegű sportot művelni, mint a tenisz. A 31-40 életév közötti korosztályból 9 résztvevő volt, az 51-60 életév közötti korosztályból 6 fő volt, valamint a 60 életév feletti korosztályból pedig 3 fő vett részt a kutatásban.

Ahhoz, hogy a kutatás reális képet tudjon biztosítani, szükség volt egy kontrollcsoportra is, akik nem ezzel a mozgásformával végezték a terápiájukat, hanem a klasszikus, fizioterapeuta segítségével történő fejlesztő mozgásformát. A kontrollcsoportban 30 résztvevő személy vett részt, szintén a nemek arányát tekintve megközelítőleg azonos volt, ugyanis 16 nő és 14 férfi alkotta. Ebben a csoportban is minden résztvevő személy eredményei értékelhetők voltak. A kontrollcsoport életkorát vizsgálva különbséget tapasztalunk a terápiás csoporthoz képest, ugyanis azt tapasztaljuk, hogy a kisebb arányban vettek részt a 41-50 életévű személyek (10 fő), és magasabb arányban a 31-40 év közötti (7 fő), valamint az 51-60 életév közötti személyek (8 fő). Ezt a különbséget figyelmen

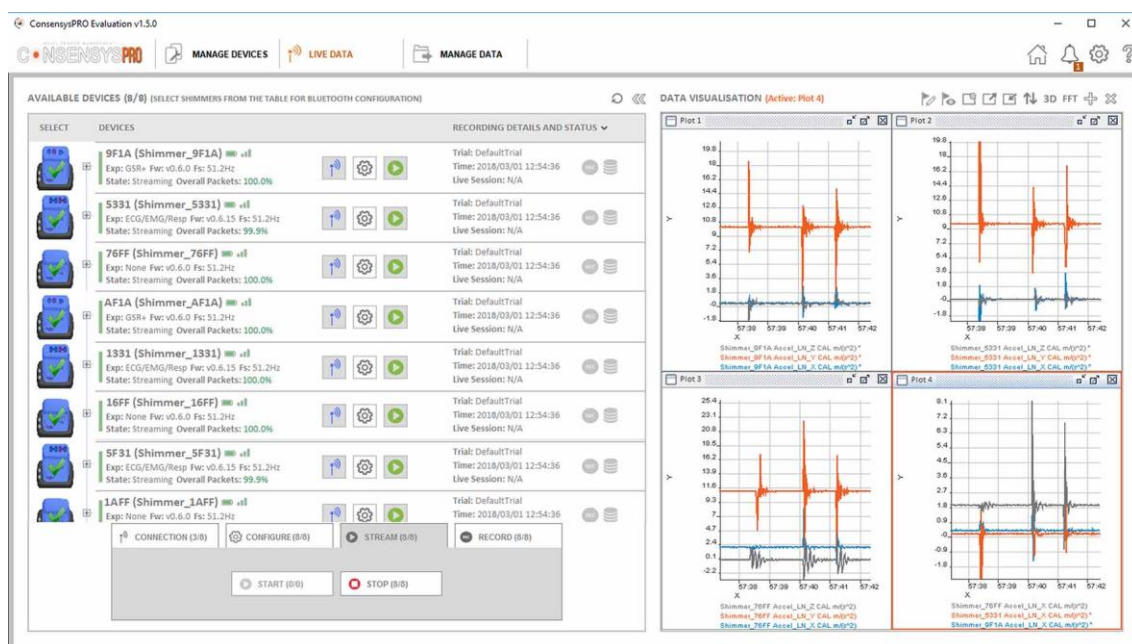
kívül hagyhatjuk, ugyanis nem a korosztályonkénti fejlődési szintet vizsgáljuk, hanem összességében mindkét csoport fejlődési szintjének százalékát hasonlítjuk össze egymással. A 18-30 éves korosztályból 2 fő vett részt, valamint a 60 év feletti korosztályból 3 fő vett részt a kontrollcsoportban.

A kutatásban részt vevő személyek terápiájának ideje eltérő volt, a sérülésük fajtájától és mértékétől függően, amit természetesen orvos határozott meg. A terápiás időszak hossza nem hat ki a kutatás eredményességére ugyanis a fejlődés mértékét vizsgáljuk a terápia kezdetétől, a végéig és nem a terápia hosszát.

A kutatás eredményességének ismertetése céljából a kutatásban részvevő 35. sorszámú páciens eredményeit hasonlítom össze a kontrollcsoport 17. sorszámú tagjának eredményeivel. Az összehasonlítható páciensek megközelítőleg azonos korúak, közel azonos testfelépítésük, súlyuk, sérülésük mértéke és a terápia megkezdése előtt az ütéserejük a legközelebb áll egymáshoz a kutatásban résztvevő személyek közül. Tehát összességében elmondható, hogy megközelítőleg két azonos személyről van szó.

A terápia megkezdésekor a páciensek jobb vagy bal csuklójára helyeztünk egy készüléket, attól függően, hogy jobb vagy bal kezesek, illetve melyik kézben tartják az ütőt. A terápiát felíró orvos segítségével felmértük a páciensek jelenlegi erőnlétét, mégpedig úgy, hogy három teniszmozdulatot végeztünk velük, ezek az ütő forgatása, a suhintás és a szerva. Az ütések erejét a készülékeken található gyorsulásmérővel mértük meg, ezeket az adatokat begyűjtöttem, eltároltam. Terápiájuk végén megismételték ugyanazt a három mozdulatot, ahol megmértük az ütéserejüket és ezeket összehasonlítjuk a terápia előtti állapottal.

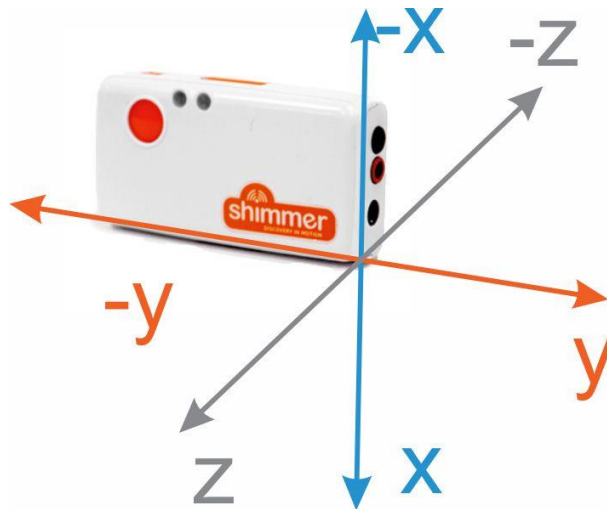
Ahhoz, hogy Shimmer készülékek által begyűjtött adatokat elemezni tudjuk a készülék gyártója által elkészített Consensys nevű programot használtuk, amely működése és kezelése igen egyszerű (3.ábra).



3.ábra: Adatok begyűjtése a Consensys programból

A program bal oldali részében található az érzékelők, amelyekről több adatot is le tudunk olvasni, mint például a jel erőssége, akkumulátor töltöttségi szintje, aktiválni/deaktiválni tudjuk az érzékelőket, stb. A program jobb oldali részében az aktív készülékektől érkező jeleket láthatjuk az idő függvényében, egy diagramban grafikusán ábrázolva. Ezek a diagramok közül a gyorsulásmérő diagramját használjuk fel az adatok elemzésére, amelyben a függőleges tengelyen található a gyorsulás mértéke ( $\frac{m}{s^2}$ ), a vízszintes tengelyen pedig a vizsgálat alatt eltelt idő (s). Minden Shimmer eszközök háromtengelyű axiális (triaxiális) gyorsulásmérővel vannak felszerelve (4.ábra), így tehát

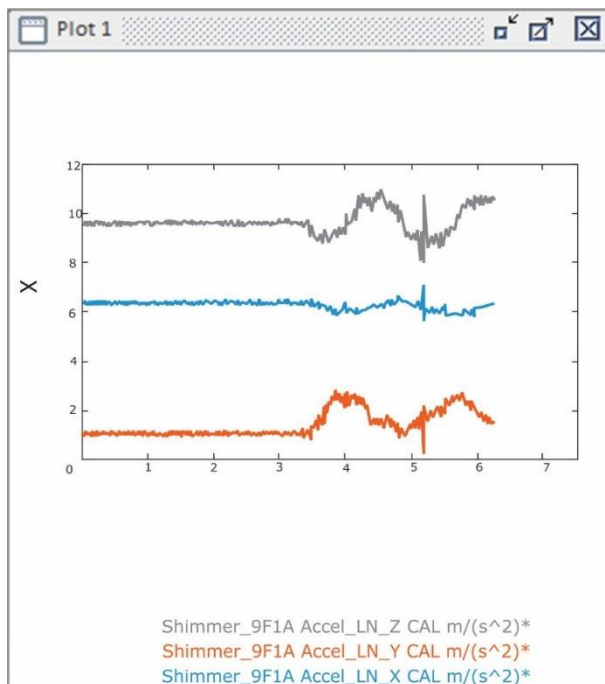
ezek az eszközök által mért gyorsulásnak három összetevője van az X, Y és a Z tengelyek mindegyikében. Tehát a diagramban megtalálható a három tengelyirány és mindhárom tengelyirányban történő mozgásra való gyorsulás olvasható le. Ezek a tengelyirányok már a készülékben definiálva vannak.



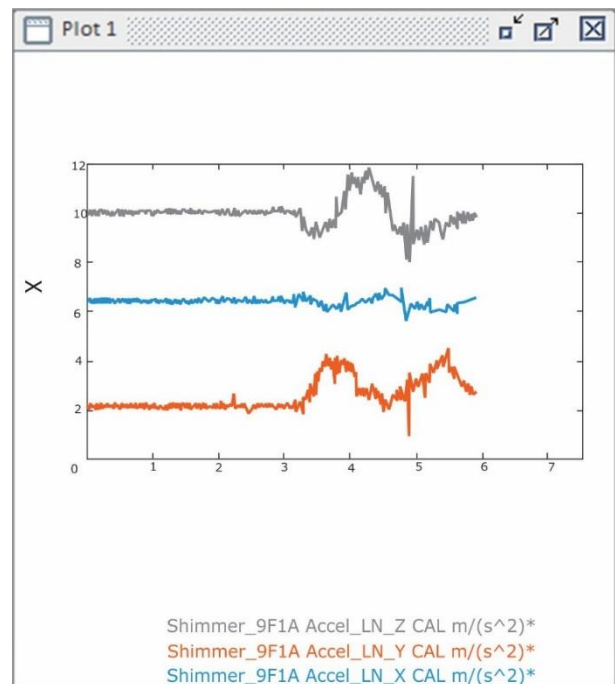
4. ábra: A Shimmer készülék tengelyirányai

Először vizsgáljuk meg a teljes terápiában résztvevő 35. sorszámú páciens eredményeit, összehasonlítva a terápia végén való eredményeivel. A páciens egy 52 éves férfi, átlagos testalkattal, kéztöréses sérüléssel. Az első mérés az ütő X tengely körüli forgatása volt, ugyanis azt vettem észre, hogy a páciensek amíg koncentrálnak gyakran forgatják az ütőt a kezükben.

A mérés elemzése során láthatóvá vált, hogy a gyorsulásmérő diagramján, míg az adott tengely körüli forgatás értéke (X tengely) megközelítőleg nulla, a másik két tengely irányában az elmozdulás pedig közel szinuszos és közel koszinuszgörbét rajzol ki (5. ábra).



5. ábra: Az ütő X tengely körüli forgatása

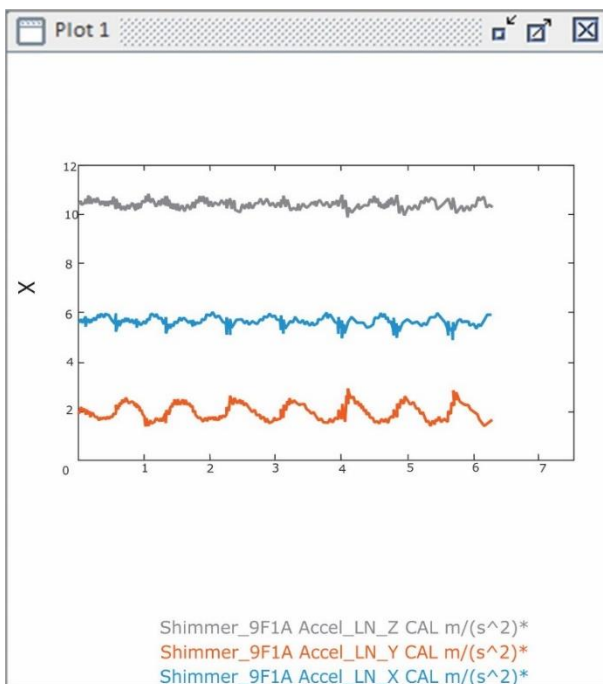


6. ábra: Az ütő X tengely körüli forgatása a rehabilitáció végén

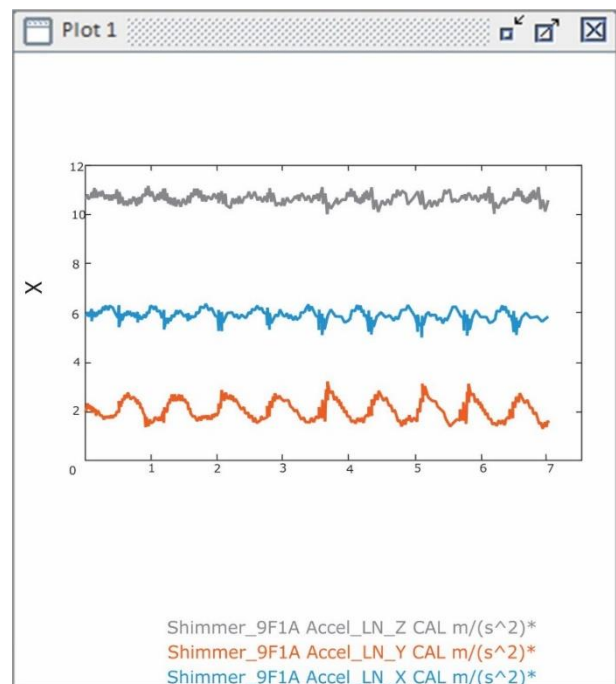


Általánosságban a rehabilitáció végén azt tapasztaltam, hogy az ütő forgatásának mértéke az adott X tengelyre nagyon kevés mértékben változik, szinte változatlan, vagyis mondhatjuk, hogy megközelítőleg nulla maradt, de a másik két tengely irányában elég nagy mértékben változott a sebesség, vagyis azt a következtetést vontam le, hogy a páciensek gyorsabban forgatták a kezükben az ütőt, mint a rehabilitáció elején. Ez a 35. sorszámú páciens esetében is pontosan így van (6. ábra). Ezzel beigazolódtott az a feltevés, miszerint a rehabilitációk eredményesek. Az Y és Z tengelyirányú görbe alakja nem változott, most is megközelítőleg szinuszos és koszinuszos görbét rajzoltak ki.

A következő vizsgált mozdulat a suhintás, amelyet többször ismételtünk meg a páciensekkel. A suhintás mozdulata során kivehető, hogy a rehabilitáció elején elég kis mértékű a három tengelyirányú kimozdulása a gyorsulásmérőnek (7. ábra) a vizsgált páciens esetében. Ennek a mozdulatnak a során több ugyanolyan, ismételt mozdulat látható, amelyek megközelítőleg egyformák is, tehát megközelítőleg ugyanolyan hosszúak is és ugyanolyan gyorsaságúak is voltak egymáshoz viszonyítva.



7. ábra: Suhintás

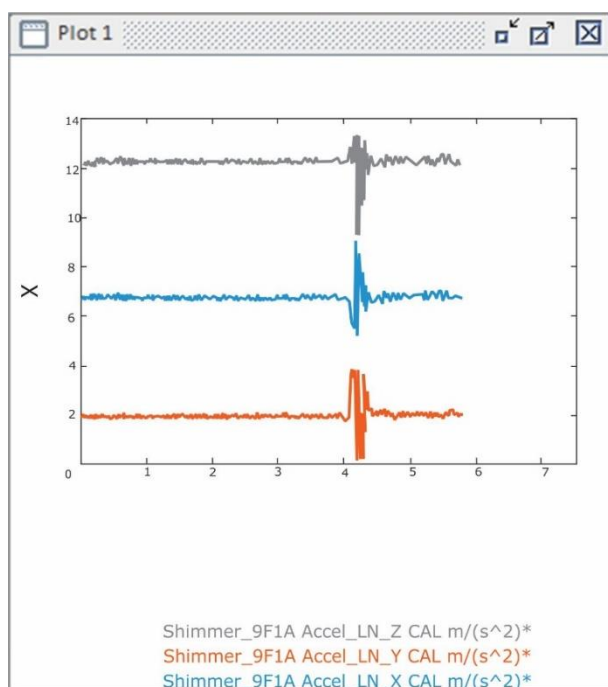


8. ábra: Suhintás a rehabilitáció végén

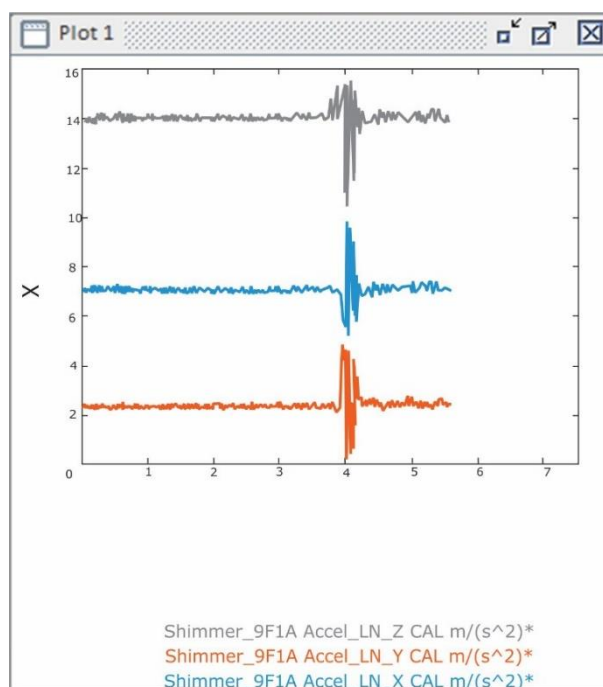
A rehabilitáció végén megismételtük a suhintás mozdulatsorát a pácienssel. A 8. ábrából kitűnik, hogy a suhintás mozdulata erősebb, ez abból látszik, hogy a három tengelyirányba történő gyorsulásmérő adatai sokkal nagyobbak, mint a rehabilitáció elején, ami arra utal, hogy a páciens ütése is erősebb, tehát fejlődött. További érdekesség, hogy az ismételt mozdulatsor során azonos idő alatt a több ütést tudott a páciens megismételni, ami szintén azt bizonyítja, hogy ütései gyorsabbak, mint a rehabilitáció elején.

A következő mozdulat, ami elemzésre került, az a szerva volt, ugyanis ez az egyik kulcsfontosságú mozdulat, ami erre a sportra jellemző és könnyen kivitelezhető még olyan esetben is, amikor a rehabilitációs páciensek nincs is partnere, akivel a rehabilitációt végezheti.





9.ábra: Szerva



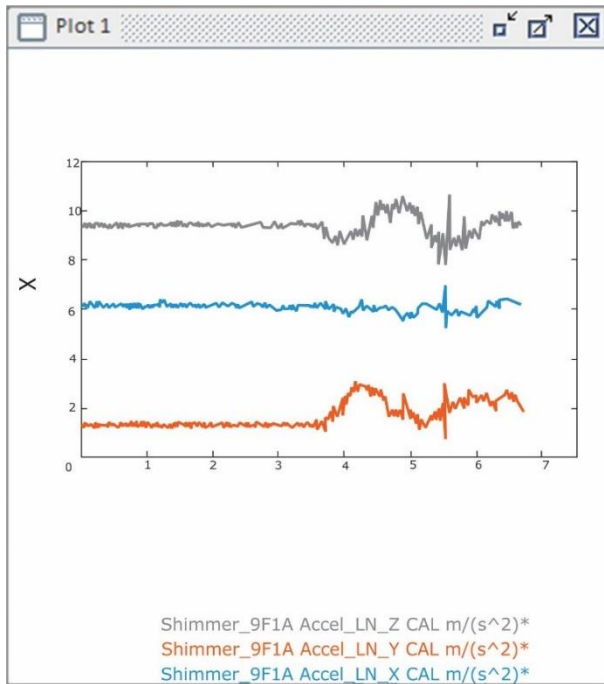
10.ábra: Szerva a rehabilitáció végén

A szerva mozdulatának kivitelezése úgy zajlott, hogy egy labdát függőlegesen elejtettünk, amikor az visszapattant a földről, a páciens elütötte, pont mintha feldobná a labdát szervára. Mint ahogyan az a 9.ábrából kitűnik egy olyan helyzetet valósítottunk meg, ahol az elütés előtti pillanatokban a páciens alig végez mozgást, szinte mozdulatlan. Ez megközelítőleg 4,2 másodpercig tart, majd elüti a labdát. Ennyi idő kellett, hogy az elengedett labda leérjen a földre, majd visszapattanva az ütő magasságába felérjen és a páciens el tudja ütni. Mivel ilyen esetben, amikor a labda kisebb sebességgel találkozott az ütővel, kisebb mértékű volt a becsapódása is. Egyértelmű, tehát, hogy a labda sebessége befolyásolja a különböző ütések.

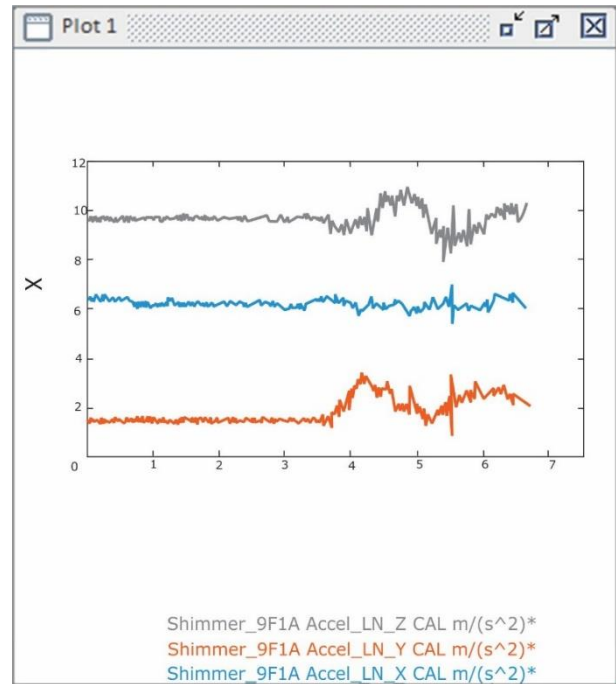
A rehabilitáció végén elvégeztük ugyanezt a mérést és azt látjuk a kapott diagramból, hogy a labda a föltől való visszapattanásának ideje megközelítőleg azonos a rehabilitáció elején történő visszapattanásának idejével. Ez most megközelítőleg 4 másodperc. A kapott diagramból (10.ábra) kivehető, hogy mindhárom tengelyirányban magasabbak a gyorsulás értékek, vagyis a páciens fejlődött. A gyorsulási diagram nagyon nagy mértékben hasonlít a rehabilitáció elején mért diagram alakjára.

Ahogy azt már előzőleg írtam azért, hogy a kutatást eredményesnek legyen mondható, összehasonlítom az eddigi eredményeket, a kontrollcsoport egy tagjának diagramjaival és fejlődésével.

A kontrollcsoportban levő páciens 54 éves férfi, átlagos testalkattal és szintén ő is kéztöréses sérülés miatt kényszerült terápiára. A terápia megkezdése előtti mérésekből kiderül, hogy ütüereje megközelítőleg azonos az előző páciensével. A készülék felhelyezése után az első mérés szintén az ütő X tengely körüli forgatása volt (11.ábra). A kutatásban résztvevő személy ugyanúgy forgatta az ütőt a kezében, hiszen ahogy a diagramból is látszik, az X tengely körüli forgás értéke most is megközelítőleg nulla, a másik két tengely irányában viszont megint megközelítőleg szinusz és koszinusz görbét rajzol ki.



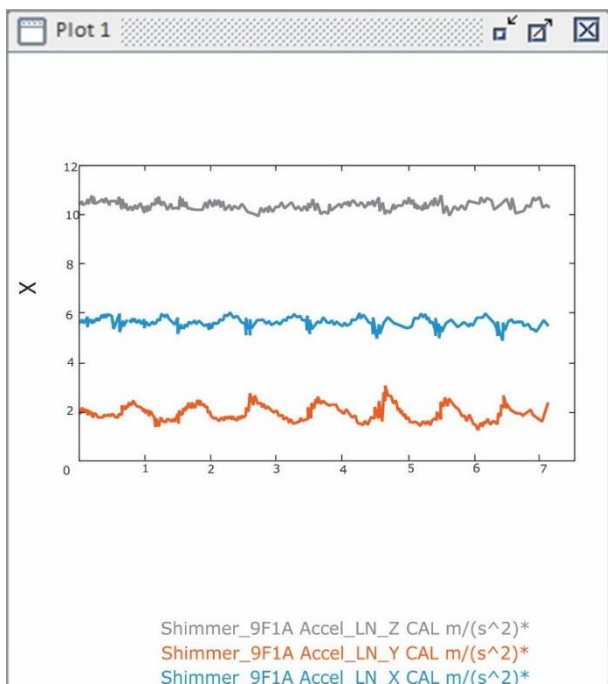
11.ábra: Az ütő X tengely körüli forgatása a rehabilitáció előtt



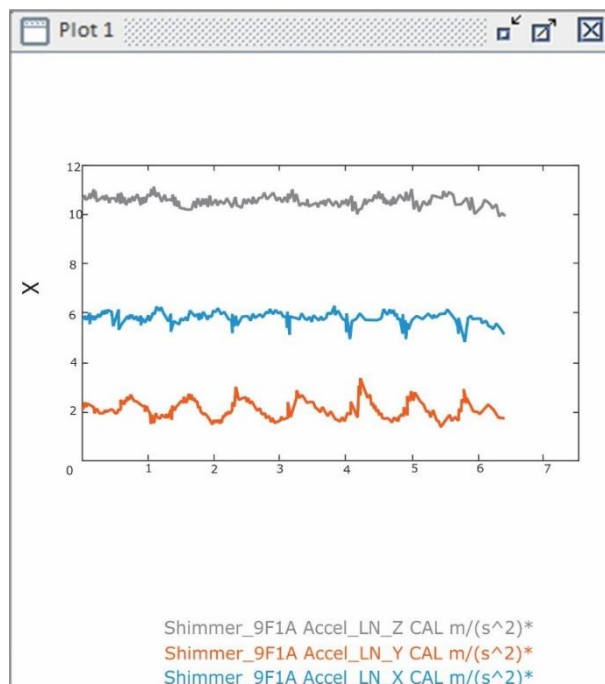
12.ábra: Az ütő X tengely körüli forgatása a rehabilitáció végén

A klasszikus rehabilitáció végén megismételtettük a mozdulatsort a pácienssel (12.ábra) és azt vesszük észre, hogy fejlődött is a kezdeti állapotához képest. Fejlődésének mértéke kisebbnek tűnik, de ezt a feltevéssem a későbbiek során elemezni is fogom. Ha tovább vizsgáljuk a diagramot észrevesszük, hogy a három tengelyirányban végbement mozgás most is megközelítőleg azonos alakú, az X tengelyirányban megközelítőleg nulla, vagyis nem történik mozgás ebben az irányban, míg a másik két tengely irányában szintén közel szinusz és közel koszinusz görbét rajzol ki.

A kontrollcsoport tagjának következő vizsgált mozdulata szintén a suhintás volt, ami több, azonos mozdulat ismétléséből állt. A kapott diagramból (13.ábra) kivehető, hogy a mozdulatok ereje, technikája hasonló, mint az előzőleg vizsgált személy mozdulatai.



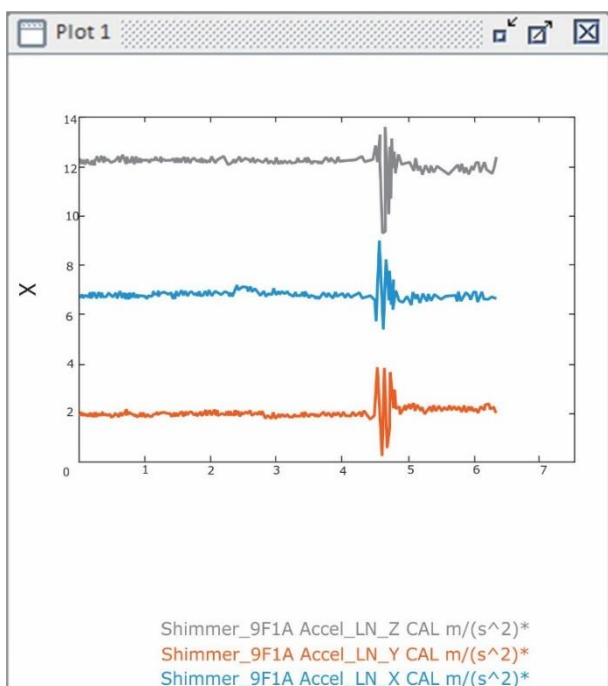
13. ábra: Suhintás a rehabilitáció előtt



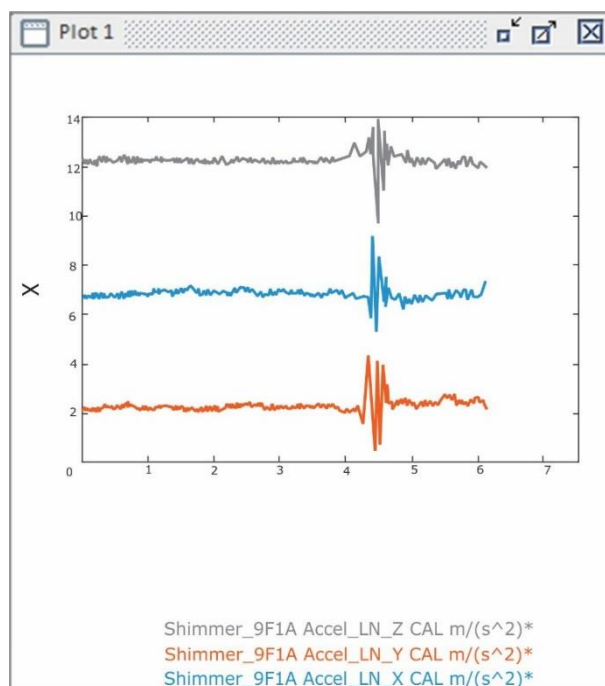
14. ábra: Suhintás a rehabilitáció végén

A 14.ábrából kivehető, hogy a rehabilitációs folyamat végére a kontrollcsoport tagja is fejlődött, ami megmutatkozik abban is, hogy az adott mozdulatsorozatot rövidebb idő alatt volt képes elvégezni, mint a terápia előtt.

A kutatásunk elemzésének utolsó mozdulata a kontrollcsoportban szintén a szerva volt, amit ugyanúgy oldottunk meg, mint az előzőekben. A kapott eredményekből (15.ábra) láthatjuk, hogy a páciens megközelítőleg 4,5 másodpercig nem végez semmilyen mozgást, ugyanis eddig tart, hogy az általunk elejtett labda lepattanjon a földre, majd vissza az ütő magasságáig. Ekkor tudja elütni a páciens a labdát. Ütésének ereje megközelítőleg azonos a terápiás csoportunk tagjának ütéserejével.



15. ábra: Szerva a rehabilitáció előtt



16. ábra: Szerva a rehabilitáció végén

A rehabilitáció végén megismételtetett mozdulat során azt láthatjuk a 16.ábrán, hogy a labda mozgásának ideje szinte azonos a terápia előtti ütésnél vizsgált esethez képest. Továbbá megállapítható az ütés erejének növekedése is, ami fejlődést mutat.

## 4. Összegzés

Mivel a felgyorsult világunk hatékonyabb, gyorsabb fejlődést kíván az orvostudományban is, így szükségessé vált a különböző mozgásszervi megbetegedések utáni rehabilitációs eljárások hatékonyabbá tétele, illetve a betegségből való gyorsabb felépülés is. A rehabilitációs eljárások során alkalmazandó mozgásforma a tenisz lett, ahol a kapott eredményeket összevetve a rehabilitáció elején kapott eredményekkel azt tapasztalhatjuk, hogy a feltevésünk, miszerint a tenisz, mint mozgásforma igenis hasznos és segít a neuro-motorikus mozgásszervi betegségben szenvedő páciensek felépülésében.

Feltevésünk alátámasztása érdekében összehasonlításra került két megközelítőleg azonos testfelépítésű, súlyú és ütőerejű személy, vagyis a terápiában résztvevő 35. sorszámú páciens három ütésének fajtája, a klasszikus fizioterápiát végző, a kontrollcsoport 17. sorszámú tagjának azonos ütéseivel. Összességében azt láthatjuk, hogy mindkét páciens ütésének erejében látható változás, tulajdonképp mindkét páciens fejlődött, de eltérő mértékben.

Ha a gyorsulások mértékét összehasonlítjuk, akkor azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a tenisz mozgásformájával való fejlődés nagyobb volt, vagyis a páciens jobban fejlődött megközelítőleg 10%-al. Ebből azt a további következtetést vonhatjuk le, hogy ez a mozgásforma, vagy a tenisz segítségével végzett fizioterápia eredményesebben alkalmazható, mint a klasszikus fizioterápia.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] O. Chipara, C. Lu, T. C. Bailey, and G.-C. Roman, BReliable patient monitoring: A clinical study in a step-down hospital unit, [Dept. Comput. Sci. Eng., Washington Univ. St. Louis, St. Louis, O, Tech. Rep. WUCSE-2009-82, Dec. 2009.
- [2] J. Ko, J. Lim, Y. Chen, R. Musaloiu-E., A. Terzis, G. Masson, T. Gao, W. Destler, L. Selavo, and R. Dutton, BMEDISN: Medical emergency detection in sensor networks, [ACM Trans. Embedded Comput. Syst., vol. 10, no. 1, pp. 11:1–11:29, 2010, article 11.
- [3] D. Malan, T. Fulford-Jones, M. Welsh, and S. Moulton, BCodeBlue: An ad hoc sensor network infrastructure for emergency medical care, [in Proc. MobiSys/ Workshop Appl. Mobile Embedded Syst., Jun. 2004, pp. 12–14.
- [4] T. Gao, C. Pesto, L. Selavo, Y. Chen, J. Ko, J. Lim, A. Terzis, A. Watt, J. Jeng, B. Chen, K. Lorincz, and M. Welsh, BWireless medical sensor networks in emergency response: Implementation and pilot results, [in IEEE Int. Conf. Technol. Homeland Security, 2008, pp. 187–192.
- [5] Virone, A. Wood, L. Selavo, Q. Cao, L. Fang, T. Doan, Z. He, and J. A. Stankovic, Ban advanced wireless sensor network for health monitoring, [in Proc. Transdisciplinary Conf. Distrib. Diagnosis Home Healthcare, Apr. 2006, pp. 95–100.
- [6] K. Patrick, “A tool for geospatial analysis of physical activity: Physical activity location measurement system (PALMS),” NIH GEI project at the University of California at San Diego, 2007.
- [7] S. Kumar, “Autosense,” NIH GEI project at The University of Memphis, 2007.
- [8] <https://www.shimmersensing.com/products/shimmer3> [Megtekintés: 07-Június-2017].
- [9] <https://es.scribd.com/document/55750053/49CA4d01> [Megtekintés: 06-Június-2017].
- [10] <https://www.shimmersensing.com> [Megtekintés: 25-Július-2017].
- [11] Alargić P, Kaurin T, “Digitalna forenzika mobilnih uređaja korišćenjem JTAG interfejsa”, Infoteh-Jahorina Vol. 12, March 2013.

# ADOTT NÉZŐPONTBÓL HELYES TARTALOM VETÍTÉSE TETSZŐLEGES FELÜLETRE

## VIEWPOINT CORRECT CONTENT PROJECTION ON ARBITRARY SURFACE

Bajusz László <sup>2</sup>, Kátai-Urbán Gábor <sup>1</sup>, Pintér István <sup>1</sup>, Megyesi Zoltán <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Informatika Tanszék, Gamf Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Számítógépes Optikai Érzékelés és Feldolgozás Kutatólaboratórium, MTA-SzTAKI, Magyarország

### Kulcsszavak:

3D Rekonstrukció  
Aktív fény szkennelés  
Gray-Kód  
Vetítés  
3d tartalom

### Keywords:

3D Reconstruction  
Active Light Scanning  
Gray Code  
Projection  
3D content

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember  
21.  
Átdolgozva 2018. október 29.  
Elfogadva 2019. március 01.

### Összefoglalás

*Egy ismeretlen, nem egyenletes felületre vetített képi tartalom torzulása jelentősen korlátozza, adott esetben lehetetlenné teszi a színtér használatát vetítési felületként. Ha azonban a torzulás kompenzálható, tetszőleges felület válhat vetíthetővé és lehetővé téve számos alkalmazás megvalósítását (pl.: asztalra vetített billentyűzet, épületre vetített minta, de akár 3D kiterjesztett valóság is megvalósítható).*

*A cikkben megmutatjuk, hogy egy Lambert-féle felület geometriai torzítása kompenzálható aktív fény (azon belül is Gray-kód) alapú fénysugár rekonstrukció használatával, és példákat hozunk az alkalmazásra.*

### Abstract

*The geometrical distortion of an unknown and uneven surface may limit or even render the use of that surface as a projection surface impossible. Compensating the geometrical distortion, an arbitrary surface can be used as a projection surface, giving way to numerous applications (including keyboard projected on tables, artistic pattern projection on buildings, or even 3D augmented reality applications)*

*In this article we show that the geometrical distortion of a Lambertian surface can be compensated using Gray Code based active light reconstruction and show example usage.*

## 1. Bevezetés

A megjelenítési technológiák közös problémája, hogy meghatározható legyen a néző által látott kép. Általános esetben ez azt jelenti, hogy a szemlélő irányába induló fénysugarakat meghatározott színnel kell ellátni, ezáltal a megjelenített tartalom láthatóvá válik. Mivel a szemünk vetítési modellje jól közelíthető egy középpontos vetítéssel, szükséges egy felület (továbbiakban vetítési felület) ahonnan kiindulva a fénysugarak megfelelően magas felbontással a szemünk felé indulnak akár fény kibocsátás útján (például sík, illetve hajlított képernyős LCD megjelenítők), vagy visszaverődéssel (pl. sík vászon LED vagy hagyományos fényű projektorok). A 3D megjelenítés esetében különleges nehézség, hogy a két szem irányába más színű fénysugarak kibocsátása szükséges, ami elérhető speciális vetítési felület vagy a megjelenítővel összehangolt szemüvegek alkalmazásával. Bár a hagyományos 2D megjelenítők esetén a vetítési felület minden pontja minden irányban azonos színt bocsát ki, továbbra is fennáll az a feladat, hogy felületi pontoknak a tartalom szerint megfelelő színt kell kibocsátaniuk.

\* Kátai-Urbán Gábor. Tel.: +36-76-516-425

E-mail cím: katali-urban.gabor@gamf.uni-neumann.hu



Ez kihívást jelenthet a projektorokon alapuló megjelenítők esetében (ahol a vetített tartalom egy matt felületről verődik a néző felé). Ilyen esetekben kompenzálás nélkül a vetített kép csak akkor látszik helyesen, ha a vetített felület egy sík, és a vetítési tengely a síkra merőleges. Egyéb esetben a vetített tartalom a vetítési felülettől függően torzul. A torzulás kompenzálása segítségével azonban bármely matt felület válhat vetítési felületté, ezzel utat adva számos alkalmazásnak. Ezek közé tartozik az épületek falára vetített tartalom (ahol a fal egyenetlenségei és színbeli eltéréseinek kompenzálása szükséges), az asztalra vetített billentyűzet (amikor a billentyűknek egy meghatározott metrikus, és a detektor által jól ismert pozícióban kell elhelyezkedniük) avagy a vetítésen alapuló 3D kiterjesztett valóság, ahol a vetített tartalom kapcsolatban áll a színtérrel és kiegészítő információt szolgáltat. Ez utóbbira jó példa egy műtéti tervezést elősegítő rendszer, amellyel a beteg saját szerveiről mért információt lehet a műtétet végző orvos elé tárni (lásd 1. ábra).



1. ábra. Vetítő alapú kiterjesztett valóság műtéti tervezéshez.

A torzulás kompenzálása azonban nem minden esetben kézenfekvő. Egy ismert sík felület esetében, a torzulás jól modellezhető egy perspektív transzformációval, más esetben a torzulás csak egy általános képpont megfeleltetés segítségével írható le. Ha ismertek a vetítő és a megfigyelő vetítési modelljei (pozíció, forgatás, látószög), valamint ismert a vetítési felület 3D modellje a felületi normálisokkal és visszaverődési függvényekkel együtt, úgy a néző szemébe érkező fénysugarak visszakövethetők a vetítő által vetített képpontokhoz. Ez azonban összetett modellezés, és szükséges hozzá a *projektor kalibrációja*, a vetítési felület *3D rekonstrukciója*, valamint a *néző szemeinek a követése*, amelyek összetett számítógépes látási problémák. Ezek a feladatok elkerülhetők, illetve egyszerűsíthetők, ha a nézőpont ismert és a színtér statikus.

Ebben a cikkben egy módszert mutatunk egy általános felület vetítési felületként való használatára. A módszer alkalmazásához a tartalom vetítése előtt az ismert nézőpontban elhelyezett kamerára van szükség, és a színtér előzetes mérésére, amelynek célja a nézőponti kamera és a vetítő **fénysugár megfeleltetése**. A cikk felépítése a következő: a 2. fejezetben a kapcsolódó munkákat mutatjuk be, majd a problémát formalizáljuk. Ezt követi a javasolt módszer bemutatása és a kísérleti eredmények ismertetése.

## 2. Kapcsolódó munkák

Több megvalósítás is született előzőleg különböző felületekre történő vetítés torzulásának kompenzálására. Sík vetítési felület esetén a projektor vetítési síkja és a felület közötti torzulás egy sík-sík transzformációval (homográfiával) kompenzálható. A transzformáció automatikus

megtalálásához általában valamilyen speciális mintát vetítenek a felületre, amit egy (vagy több) kamera segítségével detektálnak[1][2].

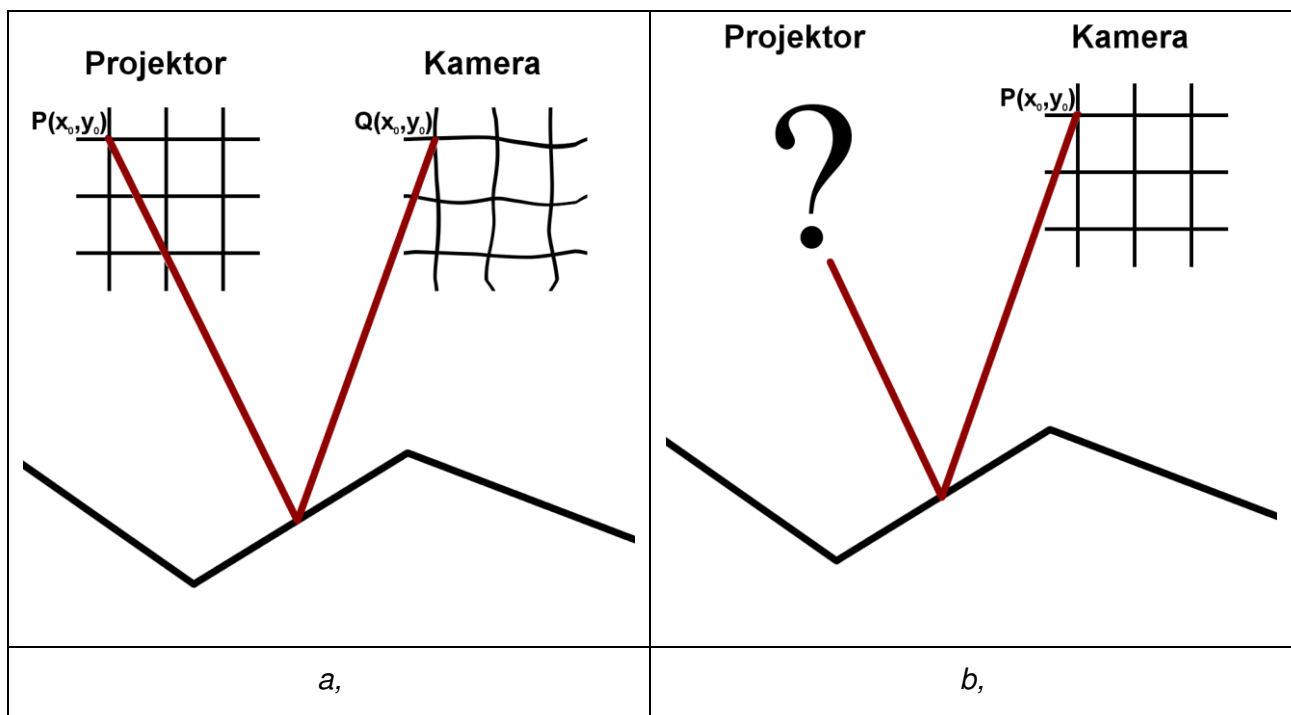
Általános felületre való vetítés esetén a kompenzálásban a legnagyobb nehézséget a felület pontos modellezése adja. Szabályos geometriai alakzatok esetén, mint például gömb, vagy íves felületek a modell közvetlenül megadható egy négyzetes függvény segítségével, amivel egyszerűbben boldogulhatunk. Azonban összetett felületek esetén ez a módszer nem alkalmazható.

Raskar és társai a modelt sztereo kamerarendszer alkalmazásával, 3D rekonstrukcióval határozták meg [3]. Ennek a módszernek a hátránya, hogy teljesen kalibrált kamera-projektor rendszert feltételez és a rekonstrukció hosszú időt vesz igénybe. Ashdown és társai egy gyorsabb, kalibrációt nem igénylő módszert dolgoztak ki [4]. Itt viszont a vetítési felület csak síkokból állhat.

Zhu és társai egy projektorból, kamerából és dőlésszög szenzorból álló rendszert készítettek [5]. A tetszőleges felületet binárisan kódolt strukturált fény segítségével detektálták. A projektor orientációjának változását a dőlésszög szenzor segítségével érzékelték. A kamera-projektor kalibráció elkerüléséhez a kamerát közvetlenül a projektorra szerelték fel. A rendszer gyorsan képes a vetítési felület megváltozására reagálni, de csak a projektor nézőpontjából helyes vetítést képes előállítani.

### 3. Probléma bemutatása

A cél, hogy olyan rendszert készítsünk, amely képes tetszőleges színtérre olyan torzított képet vetíteni, amely egy adott nézőpontból helyesen látszik. Ehhez a kivetített fénysugár mezőt kell rekonstruálni úgy, hogy minden kamera fénysugarához hozzárendelünk egy projektor fénysugarat. Az 2.a. ábra és 2.b. ábra szemlélteti, hogy egy adott projektor fénysugár hogyan van hozzárendelve a megfelelő kamera fénysugarához.



2. ábra. Projektor kamera megfeleltetés, amely esetén a kamera szemszögéből torzulás érzékelhető (a), és amely esetén helyes geometria látható (b).

A fénysugár megfeleltetés célja, hogy a kamera minden egyes fénysugarát meg tudjuk színezzni a megfelelő színnel, vagyis tudjunk olyan mintát vetíteni a színtérre, hogy a kamera azt a fénysugarat adott színűnek lássa. A mi megoldásunkban van egy projektor, ami megfelelően megvilágítja ezt a színteret. A megfeleltetést úgy valósítjuk meg, a kamera helyzete tetszőleges lehet a projektor helyzetéhez képest.

Egy gyakori geometria megoldás a színtér rekonstrukcióra az aktív fény szkennelés. A mi speciális problémánknál nincs szükség kalibrációra, vagyis nem kell ismernünk sem a projektor, sem a kamera vetítési tulajdonságait, ugyanis eleve ilyen problémára keressük a megoldást. Szükséges az a feltételezés, hogy a színtér Lambert-féle felület legyen, vagyis minden irányban diffúzan szórjon.

#### 4. Strukturált fény

A strukturált fény előállítás a térbeli felület alakjának mérésére szolgáló egyik érintésmentes eljárás alapja. Ebben az esetben megváltozik a felületre vetített fény mintázata a referencia-síkhöz képest, és ebből becsülhetők meg a felület pontjainak koordinátái. Az alapelrendezésben egy kamera és egy LCD projektor szerepel. A projektor vetíti a fénymintázatot a mérendő tárgy felületére - a fénymintázat lehet például egyetlen vagy több fénycsík, a bináris Gray-kódot követő mintázat vagy szinuszos fénymintázat. A referencia-síktól mért távolság becsüléséhez ismerni kell a kamera, a projektor és a világkoordináta-rendszer geometriai viszonyait. Erre szolgál a kalibrációs eljárás. A kamera kalibrálás során meg kell határozni a kamera saját jellemzőit (pl. fókusz-távolság, a fényérzékelő szélessége és magassága) és a világkoordináta-rendszerben elfoglalt helyzetét (például pozíció és orientáció). A kalibrált rendszerrel végezhető el a 3D felület-rekonstrukció.

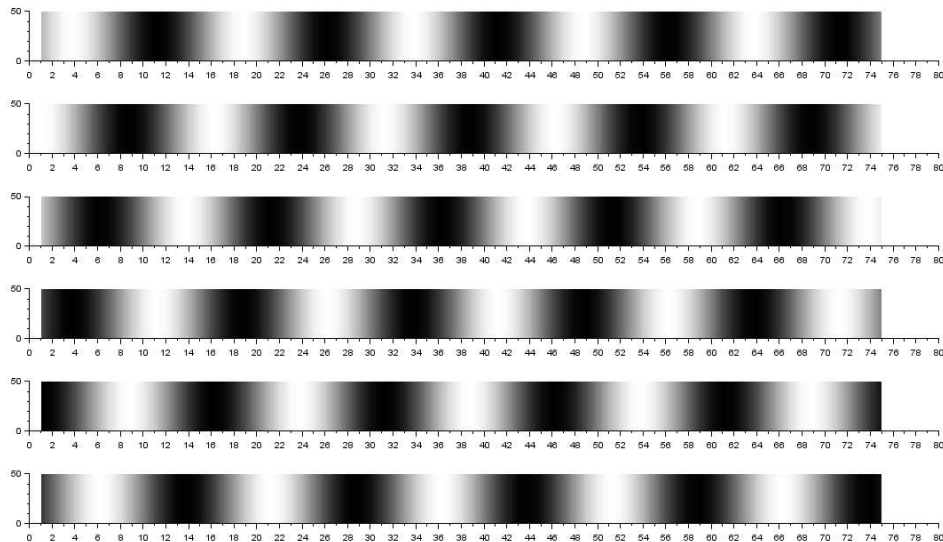
A térbeli felület pontjai koordinátáinak meghatározására a gyakorlatban elterjedt módszer az, amikor *mozgó* lézerefény-csíkokat vetítenek a tárgyfelületre, és a vett kamerakép alapján végzik el a felületelemek referencia-síktól mért távolságának számítását. Másik megközelítésben - a *mozgatást elkerülendő* - strukturált fénymintázatot vetítenek a tárgyfelületre. A leggyakoribb fénymintázatok a következők:

- diszkrét (a fénymintázatban az intenzitás-értékek nemnegatív egész számok)
  - egyetlen, összetett mintázatú kép vetítése
    - például a De Bruijn sorozat alapján előállított kép
  - több, időben egymást követő, egyszerű szerkezetű kép vetítése
    - például bináris vagy  $n$ -áris Gray-kód alapján előállított kép
- folytonos (a fénymintázatban az intenzitás-értékek nemnegatív valós számok)
  - a szinusz-függvény paramétereinek változtatása
    - egyetlen, a síkfrekvencia-tartományban előállított kép vetítése
    - több, rögzített síkfrekvenciájú, de változó fázisú képből álló képsorozat vetítése
    - rögzített fázisú, de eltérő síkfrekvenciájú képsorozat vetítése
  - a wavelet-transzformáció alkalmazása.

A diszkrét esetre az egyik példa a bináris Gray-kód alkalmazása, melyben a szomszédos kódszavak Hamming-távolsága 1. Másik példa a De Bruijn sorozat. Ez olyan ciklikus sorozat, amely egy  $k$  elemű ABC szimbólumaiból áll úgy, hogy minden  $n$ -hosszúságú részsorozat pontosan egyszer fordul elő benne. Például  $k = 2$  esetén legyen az  $ABC := \{0, 1\}$ , a részsorozatok hossza legyen  $n = 3$ , ekkor a De Bruijn sorozat 00010111 (00)010111 ..., ugyanis 3-hosszú részsorozatokra bontva 000 001 010 101 011 111 110 100 adódik, ami a 8 lehetséges 3-hosszú részsorozat.

Megjegyzendő, hogy az egyetlen kép vetítésére alapozott módszer mozgó tárgyak esetében is alkalmazható, míg a képsorozat vetítése nem mozgó helyzetben lévő tárgyak esetén jellemző. A képsorozat esetében azonban a zaj hatása kevésbé jelentkezik, mint egyetlen kép vetítésekor. A fent említett módszereket kombinálják is, például síkhullám vivő modulációjával és más színrendszerre való áttéréssel [6]. A fáziseltolás módszerével előállított képsorozat látható a 3. ábrán.

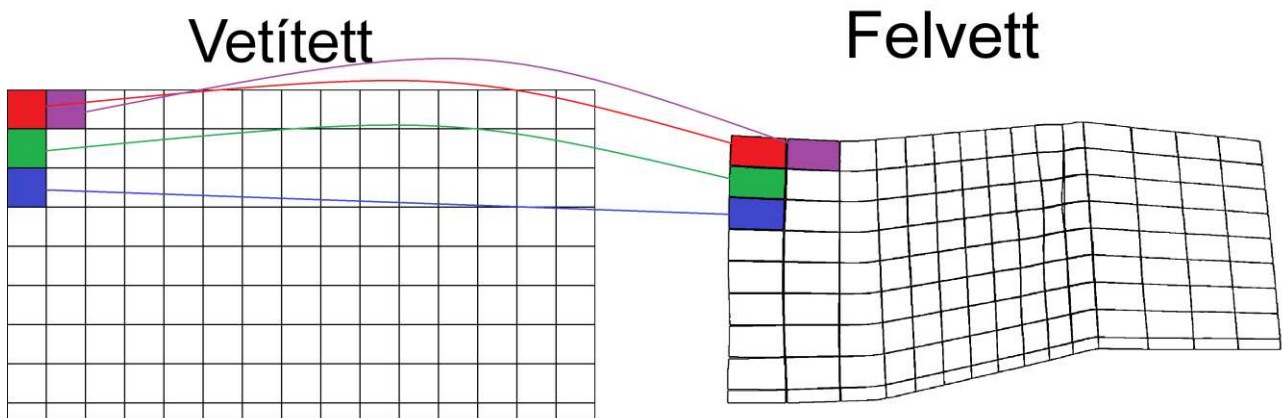




3. ábra. A fáziseltolás módszerével előállított képsorozat.

## 5. Javasolt módszer

A kalibráció nélküli fénysugár megfeleltetéshez egy Gray-kód alapú eljárást mutatunk be. A módszer alapja, hogy alkalmazunk egy 2D-2D megfeleltetést, amely a kamera és projektor pixelek közötti kapcsolatot adja meg. A kalibráció hiánya miatt függőleges és vízszintes Gray-kódot is kell vetíteni, amely segítségével egy rácsot hozunk létre, amely a 4. ábrán látható.

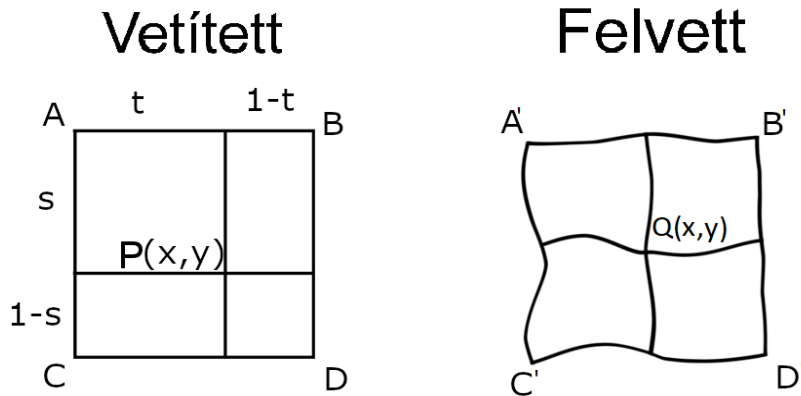


4. ábra. Vízszintes és függőleges rács kialakítása logikai és művelettel.

Megvalósítását az aktív fény rekonstrukcióval készítjük, vagyis egy strukturált fényt vetítünk, majd a felületen torzult képet rögzítjük és ezen detektáljuk a Gray-kóddal meghatározott területeket. Az általunk használt technika, hogy a 4. ábrán található minden *vetített* téglalapnak megkeressük a közepét, és hozzárendeljük a *felvett* rács megfelelő eleméhez.

A Gray-kód kivetítés után a visszaállított kép előállításához két módszert alkalmaztunk. Az egyik módszer az interpoláció nélküli visszaállítás, amelynél ha folytonos képet szeretnénk kapni, akkor olyan mélységig kell vetíteni a Gray-kódot, hogy a vetítendő területen minden fénysugarat hozzá tudjunk rendelni a vetített képhez. A másik az interpoláción alapul, amelynél a kivetített Gray-kód mélysége a felület egyenetlenségétől függ.

Az interpolációs módszer esetében bilineáris interpolációt alkalmazunk, amely első lépése, hogy kiválasztunk egy  $P$  pontot, és a hozzá tartozó legközelebbi négy középpontot. Ez könnyen elképzelhető úgy, hogy a 4. ábrán látható *vetített* felirat alatti piros négyzet területéről kiválasztunk egy  $P(x,y)$  pontot, amely esetén a hozzá tartozó legközelebbi középpontok a piros, lila, zöld, illetve a zöldtől közvetlen jobbra lévő terület középpontja adja meg. Minden  $P(x,y)$  pontnak van egy  $(t,s)$  értékpárja, amely azt adja meg, hogy a kiválasztott pixelhez tartozó középpontok mekkora súlyt érnek. Az 5. ábra mutatja, hogy az általunk kiválasztott  $P(x,y)$  ponthoz az  $A,B,C,D$  középpont tartozik, mely téglalap esetén a  $t$  és az  $s$  változó jelöli az arányokat. Szintén ugyanezen az ábrán, a *felvett* felirat alatti képen a  $Q(x,y)$  pontot kiválasztva megkapjuk, hogy a vetített kép melyik fénysugara, vagyis melyik  $P(x,y)$  pontja tartozik hozzá.



5. ábra. A vetített  $P(x,y)$  képponthoz tartozó  $Q(x,y)$  pont, és a hozzájuk tartozó legközelebbi középpontok.

Mivel a 2D-2D megfeleltetés megmondja, hogy a vetített képen lévő középpontokhoz mely középpontok tartoznak a felvett képen, ezért az alábbi képlettel ki tudjuk számolni az összes pixelre, hogy a vetítendő kép bármely  $P$  pixelre mely  $Q$  pixelhez tartozik a kivetített képen. A vesszővel jelzett változók a vetített kép legközelebbi középpontjainak koordinátáját jelentik.

$$Q(x,y) \rightarrow A'(1-t)(1-s) + B'(t)(1-s) + C'(s)(1-t) + D'(s)(t)$$

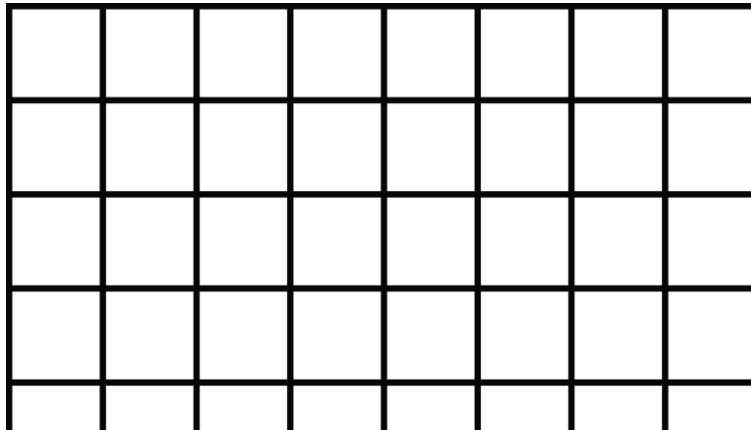
## 6. Eredmények és értékelés

A 6. ábrán a rendszer kísérleti megvalósulása látható, amely egy projektort, két nézőponti kamerát és egy vetítési felületet tartalmaz.



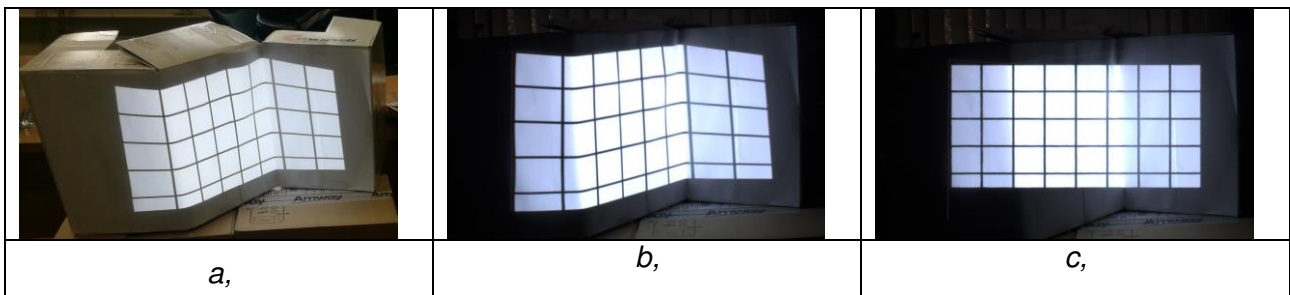
6. ábra. A rendszerben lévő projektor, kamera és szintér elhelyezkedése.

A visszaállítás illusztrálásához az alábbi képet használtuk: (lásd 7. ábra)



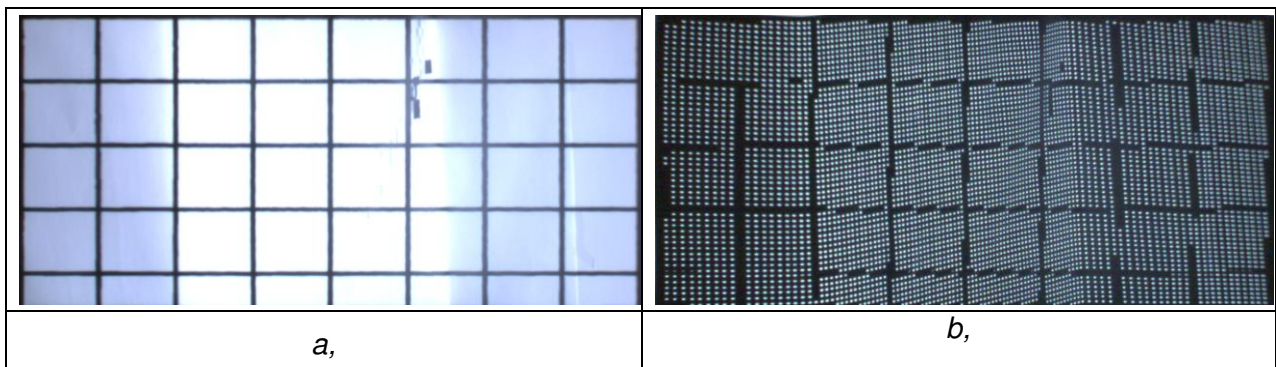
7. ábra. A kivetítéshez használt mintakép.

Az 8.a. ábrán látható egy külső kamerából felvett kép, amit azért mutatunk, hogy jobban látszódjon a torzulás az olvasó számára. A 8.b. ábrán ugyanaz a kivetített kép látható, de ez már a kamerán keresztül van felvéve, végül pedig 8.c. ábrán a visszaállított kép látható, amelynek a geometriája a kamera szemszögéből helyes.



8. ábra. A mintakép véletlen pozícióból lefotózva (a), a kamera pozíciójából felvéve a visszaállítás előtt (b) és után (c).

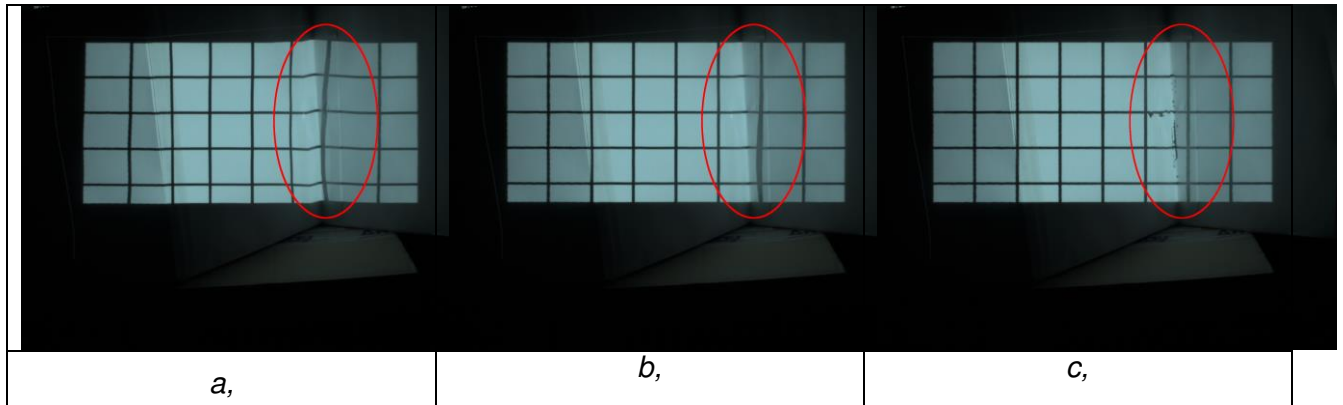
A 9.a. ábrán látható a visszaállítás, amely esetén interpolációt használtuk, a kép pedig a kamera szemszögéből van felvéve. A 9.b. ábrán az interpoláció nélküli eredményt látjuk, szintén a kamera szemszögéből.



9. ábra. Visszaállítás interpoláció használatával (a), és interpoláció nélkül (b).

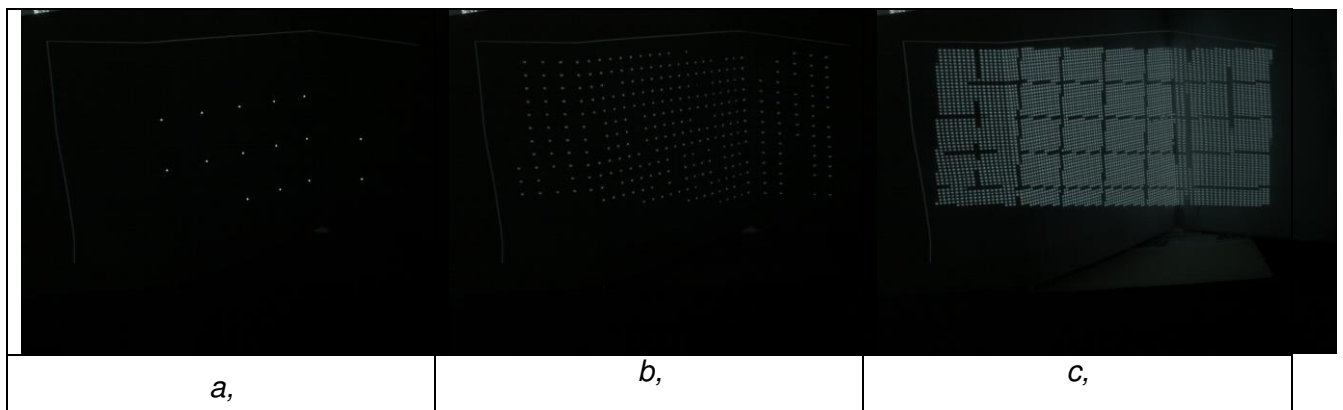
Minél magasabb szintű Gray-kódot vetítünk ki, vagyis minél több sort és oszlopot tudunk a logikai és művelet segítségével összekapcsolni, annál helyesebb lesz a visszaállított kép geometriája.

A 10. ábrán a kamerából felvett, visszaállított képek láthatóak. A piros ellipszissel jelölt terület a vetítendő felszín nagymértékű torzulását jelzi (a felszínen körülbelül  $60^\circ$ -os változás látható), amely esetén a Gray-kód szint növelésével a tartalom geometriai javulását érzük el.



10. ábra. 3-as (a), 5-ös (b) és 7-es (c) Gray-kód szinttel történő visszaállítás interpolációval.

Az interpolációs módszerrel szemben az interpoláció nélküli visszaállítás kisebb szinten sokkal pontatlanabb tartalmi megjelenítést eredményez, ugyanis itt a középpontok közötti képpontokat nem számoljuk ki (lásd 11. ábra). Ez a módszer akkor ad tartalmilag is pontos eredményt, hogyha a Gray-kód olyan magas szintű, hogy a felvett képen a középpontok közvetlenül egymás mellett és alatt helyezkednek el, vagyis nincs szükség azon képpontok meghatározására, amelyet az interpolációval végzünk.

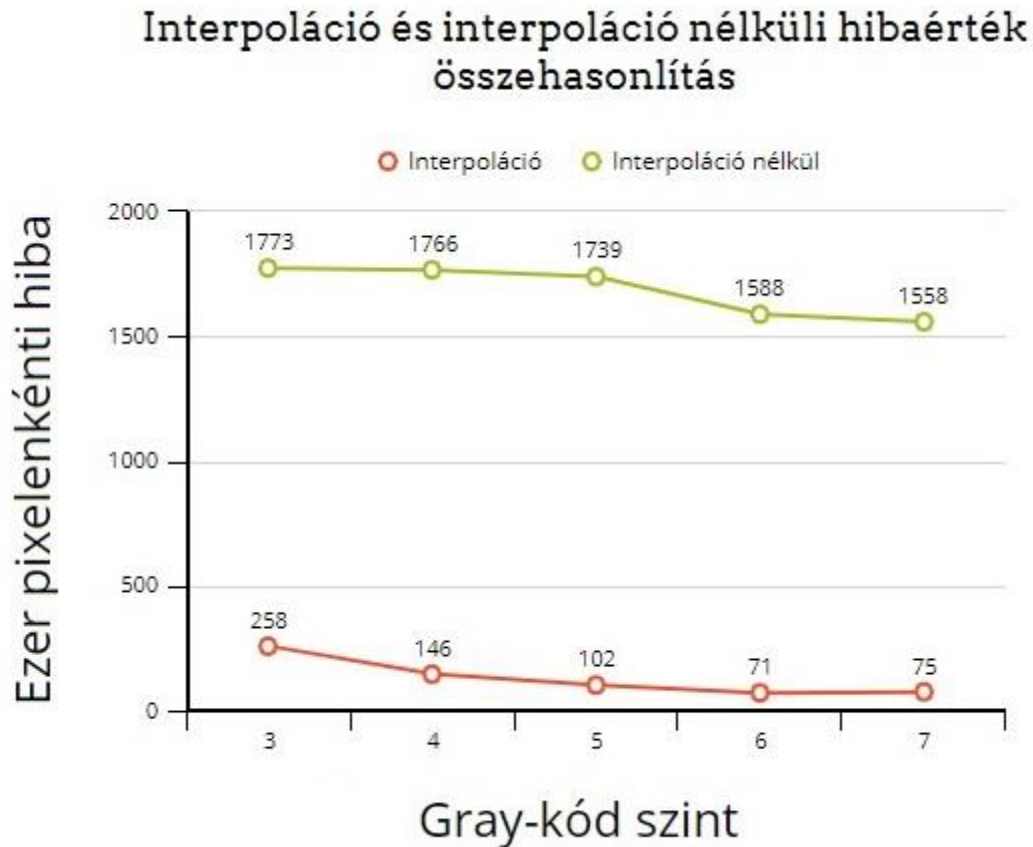


11.a. ábra. 3-as (a), 5-ös (b) és 7-es (c) Gray-kód szinttel való visszaállítás interpoláció nélkül.

A kamerából felvett, visszaállított kép tartalmi pontosságának méréséhez szükség van a kamerából felvett kép azon részére, amelyre a visszaállított tartalmat vetítettük, illetve a 7. ábrán látható mintaképre. Az eltéréshez ezek különbségét vettük. Mind a két képet átalakítottuk binárisá, vagyis az egyes képekhez tartozó képpontok értékei 0-át (feketét) vagy 255-öt (fehéret) tartalmaznak. A különbségkép esetén azok a pixelek, amelyek nem egyeznek meg, fehér színnel vannak megjelenítve, a megegyező pixelek pedig feketével. A fehér pixelek száma megadja, hogy mekkora a különbség a visszaállított, illetve a kivetítéshez használt kép esetén.

A 12. ábra megmutatja a 3. szinttől egészen a 7. szintig terjedő Gray-kód esetében interpolációval és interpoláció nélkül a hibaarányt az eredeti kép és a visszaállított kép között.





12. ábra. Hibaszám változása a kivetített Gray-kód növelésével.

Az grafikon azt mutatja, hogy az interpolációs esetben a 6. szintű Gray-kód kivetítés reprodukálta a legjobb eredményt, míg az interpoláció nélküli esetben a 7. szintű Gray-kód kivetítéssel értük el a legjobban hasonlító visszaállított képet.

Ahhoz, hogy egy adott nézőpontból helyes geometriai tartalmat lássunk, miközben tetszőleges felületre vetítünk, az általunk használt módszer esetén szükséges a bilineáris interpoláció használata. Ezen módszer a megtalált középpontok meghatározása után elkészíti a teljes 2D-2D megfeleltetést. A megfeleltetés segítségével pedig helyesen tudjuk megszínezni a fénysugarakat úgy, hogy a kamera szemszögéből a kivetített tartalmat torzulás nélkül lássuk.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, mely a GINOP-2.2.1-15-2017-00083 „Kiterjesztett valóság alapú, 3D orvosi képek és a valóság egyesített vizualizációját megvalósító, innovatív egészségügyi segédeszköz (zMed) fejlesztése az orvos-beteg kapcsolat és az oktatás támogatására” pályázat keretében a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet együttműködésével valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Surati, Rajeev, Scalable Self-Calibrating Display Technology for Seamless Large-Scale Displays, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [2] Ruigang Yang, David Gotz, Justin Hensley, Herman Towles, PixelFlex: A Reconfigurable Multi-Projector Display System, Proceedings of IEEE Visualization, 2001.

- [3] Ramesh Raskar, Jeroen van Baar, Paul Beardsley, Thomas Willwacher, Srinivas Rao, Clifton Forlines, iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors, *ACM Transactions on Graphics*, 22(3), 2003.
- [4] Mark Ashdown, Matthew Flagg, Rahul Sukthankar, James M. Rehg, A Flexible Projector-Camera System for Multi-Planar Displays, *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2004.
- [5] B. Zhu, L. Xie, Q. Wang, T. Yang and Y. Zheng, An Intelligent Projection System Adapted to Arbitrary Surfaces, 2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Beijing, 2011, pp. 293-298.
- [6] T. Petkovic, T. Pribanic, and M. Donlic: Single-Shot Dense 3D Reconstruction Using Self-Equalizing De Bruijn Sequence. *IEEE Transactions on Image Processing*, Volume: 25, Issue: 11, Nov. 2016. pp. 5131 – 5144

# MŰSZAKI MENEDZSER KÉPZÉS JÁSZ-NAGYKUN-SZOLNOK MEGYÉBEN

## TECHNICAL MANAGEMENT TRAINING IN JÁSZ-NAGYKUN-SZOLNOK COUNTY

Oláh Béla \*

Szervezéstudományi és Logisztikai Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

műszaki  
képzés  
Mezőtúr  
Szolnok

### Keywords:

technical  
training  
Mezőtúr  
Szolnok

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. október. 27.  
Átdolgozva 2019. február. 26.  
Elfogadva 2019. március 18

---

### Összefoglalás

Kapcsolódva a konferencia fókuszához, a 100 éves kecskeméti pedagógusképzéshez, a szerző a műszaki menedzser képzés történetét kívánja bemutatni Jász-Nagykun-Szolnok megyében. A cikk a mezőtúri Tessedik Sámuel Főiskola Mezőgazdasági Főiskolai Kartól, a Szolnoki Főiskolán át, a Neumann János Egyetem szolnoki telephelyéig tekinti át a képzést.

### Abstract

Connecting to the focus of the conference, to the 100th anniversary of teacher training in Kecskemét, the author describes the history of technical management training in Jász-Nagykun-Szolnok county. The paper reviews the training from the Agricultural College Faculty of Tessedik Sámuel College in Mezőtúr, through the College of Szolnok, to the Szolnok campus of the John von Neumann University.

---

## 1. Bevezetés

Jász-Nagykun-Szolnok megyében a műszaki menedzser képzés hosszabb előkészület után, a 2003-as sikeres MAB-akkreditáció eredményeképpen 2004-ben az akkori Tessedik Sámuel Főiskola Mezőgazdasági Főiskolai Karán (TSF MFK) egy-egy nappali és levelező csoporttal indult Mezőtúron. A TSF akkori négy kara és intézete közül a mezőtúri székhelyű MFK volt az egyedüli, amely műszaki jellegű képzést is folytatott, ilymódon a MAB által deklaráltan az agrártudományok mellett a műszaki tudomány-területen is akkreditációval rendelkezett [4].

Az első két évben a hagyományos főiskolai szak indult, majd 2006-tól – a szolnoki integráció következtében már a Szolnoki Főiskola Műszaki és Mezőgazdasági Fakultásán – BSc alapszakon vette kezdetét az oktatás, így egy ideig egymással párhuzamosan folyt a két képzés. A következő mérföldkő 2010 nyara volt: a Szolnoki Főiskola költségmegtakarítási és működésracionalizálási célból a mezőtúri képzést a szolnoki telephelyre költöztette [3] és ezután már csak itt zajlott az oktatás (igaz már a 2009/2010-es tanévben is a szak első évfolyamos hallgatóinak elméleti képzése a megyeszékhelyen történt, ekkor tért át a főiskola a két telephelyen működő fakultási rendszerről az intézeteken alapuló szervezeti modellre is [29]). 2016-ban az alacsony jelentkezési létszámok miatt nem indult az ekkor már – a Kecskeméti Főiskola és a Szolnoki Főiskola július 1-jei egyesülésével létrejött – Pallasz Athéné Egyetem (mely 2017. augusztus 1. napjától Neumann János Egyetem megnevezéssel működik) szolnoki telephelyén a műszaki menedzser szak se nappali, se levelező tagozaton, sőt ezt követően Szolnokra nem is hirdették meg többé. Jelenleg

---

\* Tel.: +36 20 495 4951  
E-mail cím: olah.bela@gamf.uni-neumann.hu



már csak a végzős (2015-ben kezdett, 4. évfolyamos) hallgatók egyéni tanrendben történő oktatása zajlik a megyében.

### **1.1. A szakért felelős tanszékek és szakfelelősök**

Kezdetben a szakért felelős tanszék a Karbantartás Tanszék volt, melynek vezetését 2006-ig Dr. Vermes Pál főiskolai tanár látta el, aki 2004-től 2007-ig a műszaki menedzser szakfelelőse is volt. 2006. november 1-jével a Karbantartás Tanszék összevonásra került a Matematika és Informatika Tanszékkel, ezután Alapozó és Műszaki Tanszék név alatt folytatta tovább tevékenységét, vezetője 2007. február 14-ig Dr. Bíró István főiskolai tantár [32]. 2007. február 15-től a tanszék vezetését Dr. Szűcs Sándor főiskolai tanár vette át, aki egy rövid megszakítástól eltekintve 2010. szeptember 30-ig irányította a tanszéket, melynek neve 2010. január 1-től Műszaki Tanszékre változott. Mivel Dr. Vermes Pál részmunkaidős foglalkoztatott lett, ezért 2008-tól új szakfelelőst kellett megbízni Dr. Szűcs Sándor személyében, aki nyugdíjba vonulásáig, 2013 nyaráig végezte munkáját. 2010. október 1-jén a Műszaki Tanszék, valamint a Gépészeti Tanszék egyesítésével jött létre a Műszaki és Gépészeti Tanszék, melynek vezetője Dr. Farkas Ferenc főiskolai tanár lett egészen 2011. január 31-ig [2]. 2011. február 1-jétől újra Dr. Szűcs Sándor főiskolai tanár kapott bizalmat a tanszék vezetésére, aki 2013. március 1-ig töltötte be ezt a tisztelet. Őt Dr. Czifra György főiskolai docens követte a tanszékvezetői (2013 nyártól pedig a szakfelelősi) feladatok ellátásában. A kancellária rendszer bevezetése érdekében meghozott szervezet-(intézeti és ezen belül a tanszéki struktúra) átalakítás miatt [5] 2014 nyarán a Műszaki és Gépészeti Tanszék, az Agrár- és Vidékfejlesztési Tanszék, illetve a Gazdaságelemzési és Módszertani Tanszék összevonásával alakult meg a Műszaki, Agrár és Gazdaságelemzési Tanszék, melynek vezetését továbbra is Dr. Czifra György látta el. 2014 szeptemberétől Dr. Szabó Peter főiskolai docens vette át a szakfelelősi teendőket egészen 2016. június 30-ig. Dr. Czifra György távozásával 2016. február 1-től öt hónapra Dr. Fekete István főiskolai docenst kérték fel a tanszék vezetésére. 2016. július 1-től a Műszaki, Agrár és Gazdaságelemzési Tanszék megszűnésével a kecskeméti székhelyű GAMF Műszaki és Informatikai Kar Gazdálkodás- és Szervezéstudományi Tanszéke (2017. augusztus 1-től Szervezéstudományi és Logisztikai Tanszék) lett a szolnoki műszaki menedzser alapszakért is felelős, élén Dr. Ferenczy Tibor tanszékvezetővel és szakfelelőssel.

## **2. Módszer**

A témaválasztásnak több aktualitása is van, épp 15 éve akkreditálták a szakot Mezőtúron, ahová a képzés elindulásakor kerültem oktatóként, továbbá 10 éve végzett az első évfolyam és jelenleg már csak egy kifutó évfolyam van Szolnokon, végül Kecskeméten sem túl rózsás a szak helyzete (az elmúlt két évben ott sem indult a képzés nappali tagozaton), melynek gondozó tanszékéhez tartozom magam is.

A célkitűzés megvalósítása érdekében a tanulmány témájához szorosan kapcsolódó, még fellelhető nyomtatott és elektronikus szakanyagok áttekintésével feldolgoztam a műszaki menedzser képzés történetét Jász-Nagykún-Szolnok megyében a kezdetektől egészen napjainkig, beleértve a hallgatói létszámok alakulását, a képzési hely, az infrastruktúra, a hallgatói szolgáltatások, az oktatói gárda és a tanterv változását. Összevettem a mezőtúri és a szolnoki telephelyekre vonatkozó adatokat, információkat egymással, rávilágítottam néhány különbségre és összefüggéseket kerestem, amelyek (együttesen) eredményezhették, hogy a felsőfokú műszaki oktatás hamarosan megszűnik a megyében.

## **3. Eredmények**

### **3.1. Hallgatói létszámok**

#### **3.1.1. Jelentkezők és felvettek száma**

A főiskolai szakra az első évben felvételt nyertek száma (1. ábra) mind nappali tagozaton (10 fő államilag finanszírozott), mind levelezőn (8 államis és 22 költségtérítéssel hallgató) messze elmaradt a tervezettől (nappali tagozaton 40+40, levelezőn 40+60 hely állt rendelkezésre [26]).

| Év   | Összes jelentkező |        |     |       |          |        |     |       | Első helyen jelentkezők |        |     |       |          |        |     |       | Felvettek összesen |        |     |       |          |        |     |       |
|------|-------------------|--------|-----|-------|----------|--------|-----|-------|-------------------------|--------|-----|-------|----------|--------|-----|-------|--------------------|--------|-----|-------|----------|--------|-----|-------|
|      | Nappali           |        |     |       | Levelező |        |     |       | Nappali                 |        |     |       | Levelező |        |     |       | Nappali            |        |     |       | Levelező |        |     |       |
|      | Áll.              | Költs. | Pót | Össz. | Áll.     | Költs. | Pót | Össz. | Áll.                    | Költs. | Pót | Össz. | Áll.     | Költs. | Pót | Össz. | Áll.               | Költs. | Pót | Össz. | Áll.     | Költs. | Pót | Össz. |
| 2004 | 43                | 7      | -   | 50    | 25       | 34     | -   | 59    | 10                      | 0      | -   | 10    | 20       | 15     | -   | 35    | 10                 | 0      | -   | 10    | 8        | 22     | -   | 30    |
| 2005 | 118               | 15     | -   | 133   | 72       | 39     | -   | 111   | 40                      | 0      | -   | 40    | 43       | 5      | -   | 48    | 74                 | 0      | -   | 74    | 53       | 5      | -   | 58    |
| 2006 | 50                | 4      | -   | 54    | 34       | 12     | -   | 46    | 11                      | 0      | -   | 11    | 18       | 3      | -   | 21    | 18                 | 0      | -   | 18    | 18       | 2      | -   | 20    |
| 2007 | 32                | 5      | -   | 37    | 46       | 29     | -   | 75    | 5                       | 0      | -   | 5     | 9        | 1      | -   | 10    | 4                  | 0      | -   | 4     | 8        | 3      | -   | 11    |
| 2008 | 38                | 1*+15  | 1   | 55    | 29+5"    | 28+8"  | 4   | 74    | 10                      | 1*+1   | 1   | 13    | 10+2"    | 1+3"   | 4   | 20    | 7                  | 0*+0   | 1   | 8     | 10+2"    | 1+3"   | 2   | 18    |
| 2009 | 46                | 3      | -   | 49    | 64       | 25     | 5   | 94    | 12                      | 0      | -   | 12    | 20       | 0      | 5   | 25    | 10                 | 1      | -   | 11    | 22       | 7      | 4   | 33    |
| 2010 | 66                | 4      | 1   | 71    | 46       | 26     | 6   | 78    | 20                      | 0      | 1   | 21    | 17       | 2      | 6   | 25    | 5                  | 3      | 1   | 9     | 15       | 7      | 5   | 27    |
| 2011 | 48                | 8      | 3   | 59    | 66       | 32     | 6   | 104   | 14                      | 1      | 3   | 18    | 23       | 6      | 6   | 35    | 7                  | 3      | 2   | 12    | 20       | 10     | 4   | 34    |
| 2012 | 69                | 20     | 5   | 94    | 45       | 9*+16  | 3   | 73    | 30                      | 1      | 5   | 36    | 15       | 4*+1   | 3   | 23    | 28                 | 1      | 2   | 31    | 14       | 0*+1   | 3   | 18    |
| 2013 | 53                | 7      | 1   | 61    | 32       | 9*+9   | 4   | 54    | 18                      | 0      | 1   | 19    | 5        | 4*+2   | 4   | 15    | 17                 | 0      | 0   | 17    | 6        | 0*+1   | 0   | 7     |
| 2014 | 55                | 8      | -   | 63    | 47       | 17     | 3   | 67    | 16                      | 0      | -   | 16    | 14       | 2      | 3   | 19    | 13                 | 0      | -   | 13    | 8        | 1      | 3   | 12    |
| 2015 | 34                | 3      | -   | 37    | 30       | 11     | 1   | 42    | 13                      | 0      | -   | 13    | 9        | 1      | 1   | 11    | 7                  | 0      | -   | 7     | 6        | 1      | 0   | 7     |
| 2016 | 44                | 7      | -   | 51    | 36       | 17     | -   | 53    | 7                       | 0      | -   | 7     | 13       | 3      | -   | 16    | 0                  | 0      | -   | 0     | 0        | 0      | -   | 0     |

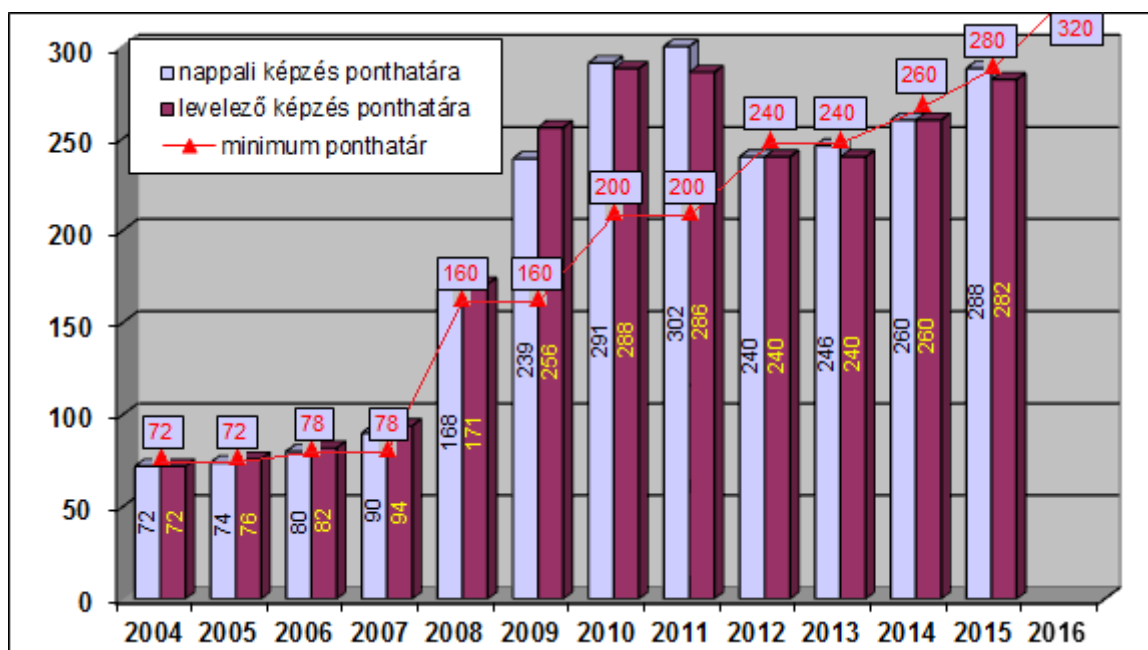
\* - keresztfeléven, " - (Szolnok)

## 1. ábra. A műszaki menedzser szakra jelentkezők és felvettek száma az elmúlt években [23]

2005-ben már lényegesen nagyobb (közel háromszoros) igény mutatkozott a szak iránt (74 fő nappalis és 58 fő levelezős jutott be). A második évben más karok magas felvételi pontszámai miatt viszonylag sok második és további helyes hallgató is bejutott a szakra. Ebben az évben sikerült egyedül az államilag finanszírozott keretszámokat (nappalin 38, levelezőn 40) feltölteni, sőt azt meghaladni, élve azzal a lehetőséggel, hogy egyes szakok között létszám-átcsoportosításra volt mód. A következő évben indított új BSc alapszakon az érdeklődés további fokozódását várták [6].

2006-ban azonban a jelentkezők száma drasztikus (több mint 60%-os) visszaesést mutatott, így újra csak 22%-ra sikerült betölteni az elérhető helyek (53+40, illetve 40+40 [20]) számát. Sőt 2007-ben még tovább (újabb 50%-kal) csökkent az érdeklődés (a jelentkezések csupán 13,4%-ban jelölték meg első helyen a szakot és mindössze 4 nappalis, valamint 11 levelezős került felvételre (1. ábra), pedig a felvehető létszám 112 fő volt, azaz a rendelkezésre álló helyeket 13,4%-ban sikerült feltölteni). A nappali tagozatra jelentkezők száma két év alatt a negyedére csökkent, míg a szakot első helyen megjelölők száma hetedére esett vissza, ami aligha magyarázható Mezőtúr sok szempontból hátrányos földrajzi elhelyezkedésével, a vidék számára előnytelen felsőoktatási (a Bologna folyamat eredményeképp a képzést indító intézmények száma megnövekedett) és felvételi rendszer előírásaival, vagy a demográfiai helyzettel. Ennek oka elsősorban az volt, hogy a Tessedik Sámuel Főiskola – az intézmény kiválása után is – rendelkezett ezen (meg a többi) szak indítási jogával, és ezzel élve is a Békés megyei piacot, lényegében Mezőtúr korábbi fő beiskolázási területét elvitte (A szolnoki integráció első hat évében a békéscsabai kar 63%-kal több műszaki menedzser hallgatót vett fel, gyakorlatilag majdnem a Mezőtúrról „hiányzó” létszámot). 2008-ban levelező tagozaton a szolnoki helyszínen is meghirdették az alapszakot, ennek és a pótfelvételi lehetőségnek is köszönhetően – bár mintegy 70 ezerrel kevesebben jelentkeztek a felsőoktatási intézményekbe, mint 2004-ben – kismértékben emelkedett a szakra jelentkezők, illetve felvételt nyerők (8 és 18 fő) száma. Jóllehet a csak ekkor hirdetett keresztfeléves nappali képzés nem indult el (kizárólag 1 fő jelölte meg). Ez évben a bejutási arány az első helyen jelentkezők körében az államilag támogatott helyekre kiemelkedően magas, 86,4% (nappalin 70%, levelezőn 100%) volt. 2009-ben – a több mint 40%-kal megnövekedett (239 és 256) felvételi pontszámok ellenére – folytatódott a kedvező tendencia, ami annak is betudható, hogy az intézmény nagy hangsúlyt fektetett a tudatos beiskolázási feladatokra, azonban a nappali tagozatra felvettek száma még így is csak a hetede volt a négy évvel korábbi értéknek. A levelező képzésre jelentkezők aránya valamelyest kedvezőbben alakult, ami valószínűleg azzal magyarázható, hogy a többségében munkahellyel rendelkező potenciális hallgatók felismerték a képzés szükségességét, hasznosságát, illetve annak helye számukra nem volt döntő tényező. Összességében megállapítható, hogy a szakra felvételt nyertek száma, ahogy minden évben úgy ekkor is elmaradt a rendelkezésre álló (20 nappalis és 50 levelezős [30]) helyek számától (pedig a keretszámok is évről-évre csökkentek), ami előre jelezte a képzés(ek) Szolnokra történő áthelyezését. Nem véletlen, hogy 2009 szeptemberében a szak első évfolyamos hallgatói már a Tisza-parti városban kezdték meg tanulmányaikat.

2010-ben, a beköltözés következtében csak a megyeszékhelyre hirdetett szakra a felvettek létszámában ismét (igaz csekély mértékű) visszaesés volt tapasztalható (9 fő nappalis és 27 fő levelezős), ami talán a minimális pontszám alapképzésben 160 pontról, a kormány döntése alapján, 200 pontra történő emelésével (2. ábra) és a rendkívül magas ponthatárokkal (291, 288) indokolható (a nappali, állami ösztöndíjas első helyes jelentkezők csak 15%-a jutott be [31]).



2. ábra. Állami ösztöndíjas felvételi pontszámok tagozatonként és minimum ponthatárok alakulása

Pedig ettől az évtől a BSc szakra felvételt nyert hallgatók képzésük zárását követően kiállításra kerülő oklevelében szereplő szakképzettség az addigi gazdálkodási mérnökkel ellentétben (a korábbi főiskolai szintű szakképzettségre) műszaki menedzserre módosult. 2011-ben, amikor már a közvéleményben is tudatosult, hogy a képzés – a mezőúri helyszínhez viszonyítva kedvezőbb földrajzi fekvésű – Szolnokon folytatódott, a szak iránt 30%-kal nőtt az igény, de még így is csak 40%-ra, illetve 68%-ra sikerült feltölteni a rendelkezésre álló hallgatói létszámkeretet (30 és 50 [27]). Az érdeklődés a következő évben is megmaradt (a BSc szak nappali tagozatára ekkor nyert felvételt a legtöbb hallgató, 31 fő), pedig 2012-től már 240 pont alatt nem lehetett bejutni a szakra, igaz viszont, hogy a műszaki képzésekre felvehető államilag finanszírozott hallgatói keretszámot megnövelték (62 nappali, 49 levelező). 2013-ban azonban ismét visszaesett, az előző évhez képest mintegy felére a szak iránti kereslet, ami az adott korcsoport létszámcsökkenésének is betudható. A csak ebben a két évben meghirdetett levelezős keresztféléves képzés sem indult be, összesen 9-9 fő jelentkezett, közülük 4-4 volt első helyes. 2014-ben sem változott a szakra jelentkezők és felvételt nyerők (13 és 12 fő) alacsony száma, amire a felvételi minimum ponthatár további 20 ponttal történő emelése adhat magyarázatot. 2015-ben (amikor már minimum 280 pont volt szükséges a bekerüléshez) még kisebb (mintegy fele) igény mutatkozott a szak iránt (a képzés duális formában is történő meghirdetése, a "B" épületben kialakított, február 9-én átadott műszaki oktatóbázis [15] és felsőfokú oklevél alapján is számítható felvételi pontszám ellenére), ami így újra elérte a 2007-es mélypontot. A BSc szak nappali tagozatára évente felvételt nyert hallgatók száma (ami a Szolnoki Főiskolához történő csatlakozás óta átlagosan 13 fő) megkérdőjelezte a képzés fenntarthatóságát.

2016-ban a szaknál központilag meghatározott, állami ösztöndíjas finanszírozási formánál minimálisan elérendő 320 pontnak is köszönhető – az egy évvel korábbihoz hasonló – alacsony jelentkezési létszámok miatt se nappali, se levelező tagozaton nem indult első évfolyam. Az egyetem, mivel Kecskeméten szintén rendelkezett műszaki menedzser szakkal (ami ugyancsak hallgatói létszámcsökkenéssel és forráshiánnyal küzdött), nem volt érdekelt tovább finanszírozni a gazdaságtalan képzést, így 2017-től már nem is hirdették a szakot Szolnokra, pedig a 2015-ös nyári integrációs tárgyalások határozatában még az állt, hogy a műszaki menedzser alapszak csak

Szolnokon kerül meghirdetésre. Konstatálható, hogy 12 év átlagában a normál felvételi eljárásban felvettek és az első helyen jelentkezők aránya 1,03 (mindkét munkarend esetében). Ez a mutató Mezőtúron (az első hat évben) még 1,21 volt, addig a szolnoki képzési helyen már csak 0,83. Nappali tagozaton az összes jelentkező 13,2%-a, levelezőn pedig 33,7%-a az önköltséges finanszírozási formát jelölte meg, az első helyes jelentkezőknél ezen arányok 1,43% és 16,6%. A költségtérítéssel képzésre felvételt nyert hallgatók aránya nappalin 3,74%, levelező munkarendnél 23,27%. A felvettek öt és fél százaléka (2,8% és 7,6%) pótfelvételi eljárás keretében jutott be a szakra.

### 3.1.2. Beiratkozottak és végzettek száma

A főiskolai képzés egy-egy kis létszámú (14 és 19 fős) nappali és levelező csoporttal indulhatott el 2004 szeptemberétől. Levelező tagozatra a felvételt nyertek csak 63,3%-a iratkozott be, ami a költségtérítéssel képzésre felvett hallgatók nagy számával indokolható. Érzékelhető, hogy 2005-ben megindult az érdeklődés a szak iránt, a hallgatói létszám az első évihez képest közel négy és félszeresére nőtt. A legnagyobb összlétszám (146 fő) is erre az évre esett, ami azért is érdekes, mert ekkor még csak két évfolyam tette ki ezt a viszonylag magasnak mondható hallgatói állományt, míg később három, majd négy évfolyam együtt sem tudta ezt a létszámot nemhogy elérni, de még megközelíteni sem (3. ábra).

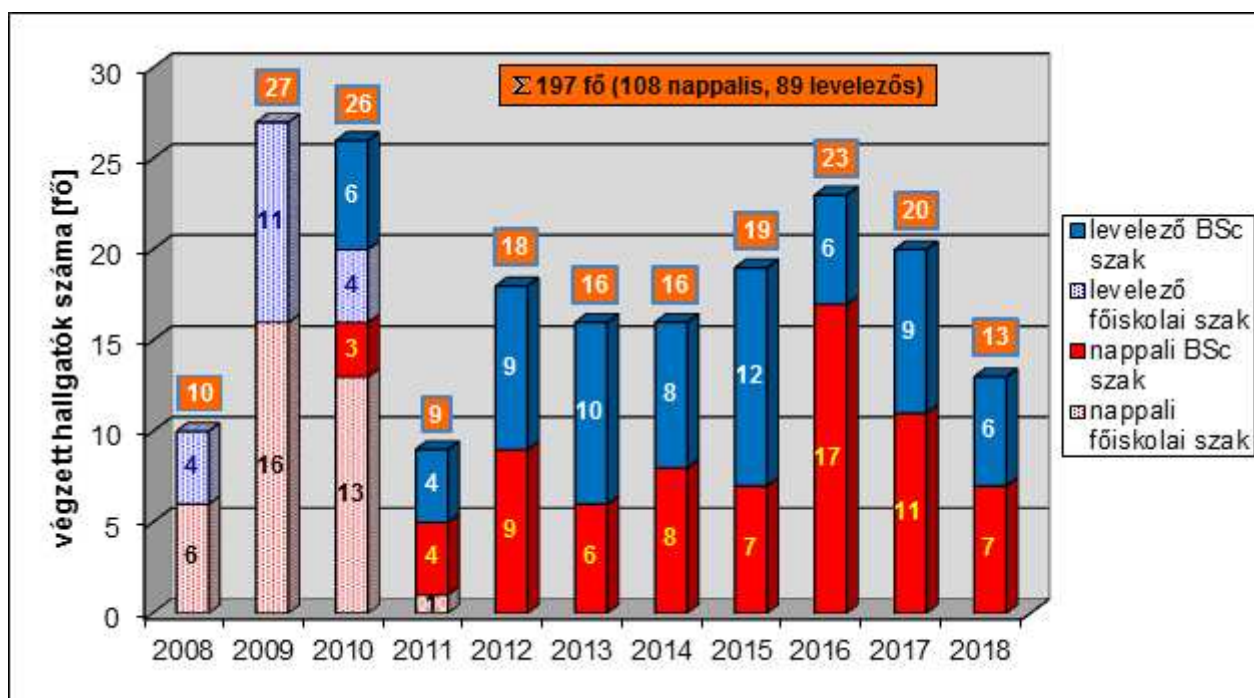
| Év   | 1. évf.                            |      | 2. évf. |      | 3. évf. |      | 4. évf. |      | (főiskolai + BSc szak) |       |       |
|------|------------------------------------|------|---------|------|---------|------|---------|------|------------------------|-------|-------|
|      | Beiratkozottak (okt. 15-i állapot) |      |         |      |         |      |         |      | Össz. létszám          |       |       |
|      | Napp.                              | Lev. | Napp.   | Lev. | Napp.   | Lev. | Napp.   | Lev. | Napp.                  | Lev.  | Össz. |
| 2004 | 14                                 | 19   | -       | -    | -       | -    | -       | -    | 14                     | 19    | 33    |
| 2005 | 71                                 | 56   | 13      | 6    | -       | -    | -       | -    | 84                     | 62    | 146   |
| 2006 | 29                                 | 35   | 30      | 17   | 12      | 5    | -       | -    | 42+29                  | 22+35 | 128   |
| 2007 | 7                                  | 9    | 20      | 10   | 29      | 15   | 12      | 5    | 41+27                  | 20+19 | 107   |
| 2008 | 8                                  | 11   | 4       | 8    | 14      | 8    | 33      | 16   | 33+26                  | 16+27 | 102   |
| 2009 | 8                                  | 23   | 7       | 11   | 4       | 7    | 14+14   | 7+7  | 14+33                  | 7+48  | 102   |
| 2010 | 10                                 | 18   | 4       | 10   | 8       | 5    | 10      | 10   | 32                     | 43    | 75    |
| 2011 | 10                                 | 32   | 10      | 9    | 3       | 10   | 14      | 1+11 | 37                     | 1+62  | 100   |
| 2012 | 28                                 | 18   | 8       | 21   | 10      | 9    | 8       | 11   | 54                     | 59    | 113   |
| 2013 | 15                                 | 9    | 25      | 13   | 8       | 19   | 11      | 10   | 59                     | 51    | 110   |
| 2014 | 12                                 | 13   | 10      | 9    | 24      | 10   | 10      | 17   | 56                     | 49    | 105   |
| 2015 | 7                                  | 7    | 10      | 4    | 7       | 7    | 26      | 16   | 50                     | 34    | 84    |
| 2016 | -                                  | 1    | 4       | 5    | 9       | 5    | 11      | 15   | 24                     | 26    | 50    |
| 2017 | -                                  | -    | -       | -    | 4       | 2    | 9       | 9    | 13                     | 11    | 24    |
| 2018 | -                                  | -    | -       | -    | -       | -    | 5       | 3    | 5                      | 3     | 8     |

3. ábra. A műszaki menedzser szakra beiratkozott hallgatók évenkénti létszámadata

2006-ban már BSc-szakon indult a képzés, ahová 68,4%-kal többen iratkoztak be, mint ahányan felvételt nyertek. Ez a képzést váltó (a főiskolai szintű alapképzésről a BSc szakra átlépő) hallgatóknak tudható be. A 2005-ben indult évfolyamból a második tanévre a nappali tagozatosoknak csak 42,3%-a, a levelezőknek pedig alig harmada (30,4%) iratkozott be. Ez az előbb említett ok mellett az intézményt váltó (a TSF által 2006-ban a Gazdasági Főiskolai Karra meghirdetett és Békéscsabán elindult műszaki menedzser szakra átjelentkezett) hallgatóknak is köszönhető. Mindez összességében 12,3%-os létszámcsökkenést eredményezett (128 fő). 2007-ben a lemorzsolódások és a szak iránti érdeklődés drasztikus csökkenése következtében a hallgatói létszám még tovább (újabb 16,4%-kal, 107 főre) apadt, pedig ekkor már mind a négy évfolyamon volt tanuló.

2008-ban végzett az első (főiskolai) évfolyam, hét félév alatt a beiratkozott hallgatók 30,3%-a (10 fő) jutott el a záróvizsgáig. Ebben az évben 4,7%-ra mérséklődött a létszámcsökkenés a szakon. 2009-ben végzett a legtöbb (16 nappalis és 11 levelezős) hallgató (4. ábra).





4. ábra. A végzett hallgatók létszámadata évenként és munkarendenként

2010-ben a BSc szakon is sor került az első záróvizsgá(k)ra, a főiskolai szintű hallgatókkal együtt összesen 26 fő fejezte be tanulmányait. A szak és vele együtt a mezőúri fakultás hallgatói létszámának alakulása előre vetítette a képzés(ek)nek a szolnoki „új bázison” történő koncentrálását. Megállapítható, hogy 2005-től a 2010-es évvel bezárólag a hallgatói létszám ugyan évenként eltérően, de folyamatában csökkent. A mélypont az utóbbi év volt (26,5%-os létszámcsökkenés, mindössze 75 fő), ami főleg a megyeszékhelyre történő beköltözéssel magyarázható, ugyanis a hallgatók egy része inkább nem, vagy más felsőoktatási intézménybe iratkozott be. Egyébként is elmondható, hogy 2008 és 2010 között a felvételt nyert levelezős hallgatók csak kétharmada regisztrált be, ami a magasabb számú önköltséges hallgatóval indokolható. 2010 őszén a műszaki menedzser szakon tanulók száma (az alapképzéseken az aktív hallgatói összlétszám 2,6%-a) olyan kevés volt, hogy nem fedezte a képzés költségeit sem. Érezhető volt, hogy ilyen alacsony hallgatói létszámokkal a szak hosszabb távon nem tartható fenn, ezért az intézmény külön hangsúlyt fektetett a tudatos beiskolázási feladatokra, minek eredményeképpen 2011-ben harmadával több első kezdhette meg tanulmányait és szintén harmadával (100 főre) növekedett az összlétszám is (ekkor végzett a legkevesebb hallgató, mindössze 9 fő). 2012-ben – az előző évet is túlszárnyalva – 9,5%-kal több első és 13%-kal több hallgató (113 fő) tanult a szakon. Jól látható, hogy a műszaki menedzser szak hallgatói létszáma (a főiskolán amúgy egyedülként) a vizsgált időszakban emelkedett [17], azonban az intézmény összes (8) alapszakjához viszonyítva még így is alacsony részarányú volt (egy év alatt 4,1%-ról 5,8%-ra nőtt), annak dacára, hogy a főiskola aktív hallgatóinak létszáma szintén évről-évre jelentősen csökkent (a közgazdász területek rendkívül magas állami ösztöndíjas pontszámának köszönhetően). 2013-ban szintén a műszaki képzési terület volt az egyetlen, ahol csupán minimális (2,7%-os) visszaesés volt [18] tapasztalható (110 fő) a feleannyi első tanuló ellenére is. 2014-re megint csak némi (4,5%-os) csökkenés következett be az összlétszámban (105 fő, ami már 9,4%-a volt az alapképzések összes hallgatói létszámának). Elmondható, hogy 2007 és 2014 között (a 2010-es évet kivéve) 100 és 113 fő között volt a szak hallgatói létszáma. 2015-ben, amikor a legkevesebb első évfolyamos (7 nappali és 7 levelezős) hallgató iratkozott be a szakra, ráadásul az egyébként is átlagnál több (levelezőn rekordszámú) végzett hallgató (7+12 fő) száma meghaladta azt (az első ilyen év volt), 20%-kal (84 főre) csökkent a létszám. Mindennek ellenére, még így is 10,1%-ot tett ki az alapképzés összlétszámából. A következő évtől már nem indult a szak, se nappali, se levelező tagozaton (a 3. ábra 2016 évi sorában szereplő 1 fő első levelezős is nappali munkarendről jelentkezett át). Ennek és a harmadik legnagyobb (nappalin rekord) létszámú (17+6 fő) végzett menedzsernek köszönhetően 40,1%-kal apadt az aktív állomány (50

fő) a szakon, mely 2017-re további 50%-ot meghaladó esést produkálva 24 főre, 2018 őszére pedig annak harmadára, összesen 8 főre csökkent (valamint 3 passzív státuszú hallgató is nyilván volt még tartva a rendszerben).

A 3. és 4. ábrából kiolvasható, hogy a főiskolai szintű műszaki menedzser képzésre beiratkozott hallgatók csak jó harmada (nappalin ennél nagyobb (42,4%), levelezőn pedig kisebb (25,3%) arányban), míg a BSc alapszakon közel fele (nappalin 56,7%-uk, levelezőn 41,7%-uk) fejezte be tanulmányait (árnyalja a képet, hogy a bachelor képzést elvégző tanulók közül heten is a főiskolai képzésről jelentkeztek át), még ha nem is mindenki hét félév alatt. A főiskolai szakon végzetek például több mint 36%-a (nappalin 44,4%, levelezőn 21,1%) több mint hét félév alatt járt sikerrel. Összességében megállapítható, hogy a hallgatók 56,7%-a nem záróvizsgázott. Tapasztalatok szerint a képzésre jelentkezők nem számítottak arra, hogy jelentős természettudományos alapismereti és műszaki törzstárgyakat kell tanulniuk [7]. Megfigyelhető a levelező tagozatos hallgatók viszonylag nagy lemorzsolódási aránya. Közülük (a hallgatók jobb hozzáállása és eredménye ellenére is) sokan (51%-uk) az első és második félévben „feladták” a családi, munkahelyi vagy más irányú elfoglaltság melletti többletmunkát igénylő tanulást, nappalin ez az érték 33,8% volt. A 197 végzett hallgató 25,4%-a nő volt, 28 nappalis és 22 levelezős. Érdekes, hogy a szakot elvégzők több mint negyedének (26,8%-ának, azaz 53 főnek) szakdolgozati konzulense jómagam voltam. A végzetek 45,18 százaléka (89 fő) levelező munkarendben zárta le tanulmányait, de ebben már a tagozatváltók (nappali képzésről átlépők) is benne vannak.

### 3.2. Oktatói állomány

Mivel az intézményben a vizsgált időszakban több tudományterületen (és több szakon) folyt képzés, így a szakhoz kapcsolódó oktatói állomány nehezen meghatározható. Azonban nagy általánosságban elmondható, hogy a minőségi működéshez, alapvetően az oktatáshoz szükséges humán erőforrás – a Magyar Akkreditációs Bizottság megítélése szerint [8] is – a mezőtúri időszak alatt rendelkezésre állt, a fakultás megfelelő oktatói és szakmai tapasztalatokkal bíró oktatógárdával rendelkezett a műszaki képzésen belül is. Ugyanakkor a hallgatólétszám fogyatkozása miatt szükségessé vált az oktatói létszámcsökkenés is. Ennek megfelelően az adatok a személyi állomány egyértelmű zsugorodását mutatják [7]. Kisebb mértékben az oktatókat (főként a nyugdíjasokat, illetve nyugdíj-közelieket), nagyobb mértékben az egyéb alkalmazottakat érintette a változás. Bár az nem haladta meg a hallgatói létszám évenkénti csökkenését [1]. Mindazonáltal a főiskolai légkört – a hallgatók véleménye szerint is – hagyományosan jó oktatói-hallgatói viszony jellemezte (egy 2006-os rangsorban a 2. helyre került a mezőtúri intézmény ebből a szempontból [9]). Ez időszakban több, a képzésen (is) oktató kolléga szerzett országos szakmai elismerést, úgymint Magyar Felsőoktatásért Emlékérem, JNSZ Megyei Prima Primissima Díj (tudomány), Életfa (FVM), Pro Régió Díj, Jász-Nagykun-Szolnok Megyéért Díj, JNSZ Megyei Gazdasági Díj, Jász-Nagykun-Szolnok Megyei Testnevelési és Sport Díj, Kádár Béla Díj, Pedagógus Szolgálati Emlékérem [3]. Tudományos minősítéssel rendelkező oktatók aránya 2007-ben (28 teljes munkaidős oktatóból 11 fő, azaz) 39,3% volt, ami átlagos értéknek felelt meg a műszaki szakcsoporton képző felsőoktatási intézményekben, sőt jelentősen meghaladta a GAMF Kar 20%-át [10].

A szolnoki időszak alatt a telephely-váltás és az oktatói fluktuáció miatt a műszaki jellegű tárgyakat oktatók száma tovább csökkent. A szak oktatóinak létszáma, figyelembe véve a jelentős oktatási tárgykínálatot és az országos átlagot (néhány a gazdasági szakokhoz tartozó oktató bekapcsolódása ellenére is), viszonylag alacsony volt. Bár a képzett humán erőforrás ekkor is biztosított volt, túl sok tantárgy jutott egy-egy főállású oktatóra, nem minden oktató kutatta az általa oktatott diszciplíná(ka)t. A fokozattal rendelkező, ún. minősített oktatók aránya is folyamatosan csökkent. Ez a tudományos elismerések számában is megmutatkozott: egyedül csak Dr. Gulyás László részesült kitüntetésben (Magyar Felsőoktatásért Emlékplakett, 2011) ezen időszakban. Idővel a szakon oktató kollégák létszáma elérte azt a kritikus szintet, amikor az oktatási kötelezettségek teljesítése is nehézségekbe ütközött, különösen a műszaki területen volt erősen érezhető a megfelelő humán erőforrás hiánya (2016 őszére mindössze 4 fő-re csappant az ilyen végzettséggel rendelkezők létszáma).

### 3.3. Tanterv

Terjedelmi kötöttségek miatt a tantervek részletes bemutatására, a változások ismertetésére jelen tanulmány nem tér ki, de általánosságban néhány megállapítás azért tehető. A hagyományos főiskolai műszaki menedzser szaknál a tantervben szereplő tanórák száma (a nyelv- és a testnevelési órák nélkül) a 7 félév alatt a nappali tagozaton 2280 óra, a levelező tagozaton pedig 578 óra volt, megemlítendő azok – a Látogató Bizottság megítélése [8] szerint is – feltételezhetően túlhangsúlyos műszaki tartalma. A vonatkozó kormányrendelet alapján három szigorlatot írtak elő: Matematika szigorlat a 2. félév végén, Közgazdaságtan szigorlat a 3. félév végén, Anyagismeret és gyártástechnika szigorlat a 4. félév végén [4].

A 2006-ban indult (BSc) alapszak tanterve a felsőoktatási reformok alapján a bolognai előírásoknak megfelelően készült el. A főiskolai szakkal ellentétben már nem voltak szigorlatok, a képzés heti óraszámát mindazonáltal viszonylag magas volt, nappali tagozaton összesen 2820 kontakt óra volt, ami heti átlagban 30 órát jelentett. A tanterv a későbbiekben rendszeres fejlesztésen esett át (a tanórák száma is csökkent). 2008-ban például az FSZ és az alapképzés lett szinkronizálva, 2009 nyarán a különböző BSc szakok harmonizálása (a közös tantárgyak miatt az oktatás racionalizálása) történt meg, ami az oktatásszervezés és az oktatók leterheltsége szempontjából hatékonynak bizonyult, viszont szalmailag megkérdőjelezhető. 2010-ben pedig egy nagyszabású tananyagfejlesztésre, tartalmi átalakításra került sor az alapszakon, a képzést gazdaságosabbá, illetve még jobban gyakorlatorientálttá téve [2]. A tanterv a szolnoki évek alatt szintén folyamatos módosításokon ment keresztül (csökkent a műszaki tárgyak száma, kreditértéke, azonban a vezető oktatókat így is általános túlterheltség jellemezte, a tantárgyfelelősség ellátása romlott). A szakon oktatott tárgyak kreditjeinek meghatározása ugyanakkor nem volt következetes, egyes tantárgyak esetében nem volt összhangban az óraszámával.

#### 3.3.1. Szakirányok

A tanterven belül érdemes megvizsgálni a szakirányok (számának) változását is. A főiskolai képzés szakindítási kérelmében mindkét (nappali és levelező) tagozaton két szakirány szerepelt: az üzemeltető-karbantartó szakirány és a gépgyártó szakirány [4]. Az eszközök üzemeltetésével és fenntartásával foglalkozó szakirány a műszaki menedzser képzést folytató hazai felsőoktatási intézmények akkori szakirányai között nem volt elérhető. 2005-re a szakirányok tovább bővültek (logisztika, minőségbiztosítás, marketing-pénzügy), melyek közül szintén választhattak és választották is a legelső évfolyam hallgatói a szakirány-választáskor. A BSc szakon az utóbbi már nem szerepelt a választható szakirányok között, de 2007-től bekerült az autógépész, illetve a környezettechnika szakirány [33]. Később bevezetésre került a marketing-menedzsment specializáció is, igaz 2008-tól a gépüzemfenntartó (karbantartó) szakirány meghirdetését – mivel az alacsony jelentkezési létszámok miatt egyszer sem sikerült beindítani – szüneteltették [11]. Amíg a mezőtúri időszak alatt növekedett a választható szakirányok száma, addig Szolnokon a csökkenő tendencia volt megfigyelhető.

A 2010-es tanévtől kezdve a szak tanterveiben már csak két szakirány (2014-től specializáció) volt megtalálható, a gépgyártó és a gépüzemfenntartó [24], pedig a 2010-es felvételi tájékoztatóban az autógépész, gépgyártó, környezettechnika, logisztika, minőségbiztosítás szakirány és a marketing-menedzsment specializáció szerepelt [25]. A szakirányok közül a legkeresettebb a logisztika volt, mégis már a 2010/11-es tanév szakirány-választásakor sem engedték meg meghirdetni sem, pedig a rájuk érvényes (2009-es) tantervben még szerepelt (a nemzetközi gazdálkodás szak – nemzetközi logisztika szakirány – érdekeivel ütközött). Egy évre rá, 2012 tavaszán is csak (műszaki logisztika) specializációként (második szakirányként, levelezőn, költségtérítéssel formában) indulhatott. Hiába lett kidolgozva 2013-ban a műszaki logisztika szakirány, azt nem terjesztették a hallgatók felé. A minőségbiztosítás szakirány is nagy népszerűségnek örvendett, mert a hallgató a záraskor TUV vizsgát is tehetett, amit később jól tudott hasznosítani [8]. A 2012-es évvel bezárólag a végzett műszaki menedzser hallgatók 60%-a (a nappalisok 63,5%-a, míg a levelezősök 55,3%-a) végezte el a logisztika szakirányt, míg a minőségbiztosítási szakirányt 34,4%-uk. Ezután, értelemszerűen a gépgyártó és a gépüzemfenntartó szakirányok kerültek előtérbe, hat év alatt a végzetek 94,39%-a „választotta” e



két szakirány valamelyikét, esetleg mindkettőt. De összességében még így is a logisztika szakirány követelményeit teljesítették a 2008-tól műszaki menedzser szakképzettséget szerzők közül a legtöbben (számszerint 68-an, azaz 34,52%-uk).

### **3.4. Mezőtúri hallgatói szolgáltatások**

A hallgatói szolgáltatások (kollégium, könyvtár, sportolási lehetőségek, nyelvi képzés) jó színvonalúak voltak. A Felvi rangsor 2006 című kiadványban [9] az agrárfőiskolai karok mezőnyében a hallgatói értékelés alapján összességében a 4. helyre került a fakultás a szolgáltatásokkal való elégedettségük megítélésében.

#### **3.4.1. Kollégium**

A kollégiumi feltételek nem voltak korszerűek, de a férőhelyek száma kedvező volt, alacsony áron, jól szolgálta a hallgatók elhelyezését. 2004 óta minden nappali tagozatos, nem mezőtúri lakóhelyű hallgató kollégiumi férőhelyet kapott a három, különálló kollégiumi épület valamelyikében, a levelezős hallgatók részére pedig, a konzultációk és vizsgák idejére olcsó szálláslehetőséget biztosítottak. A kollégium a felsőoktatásra jellemző átlagos szinten kielégítette az elvárásokat: nyugodt és kulturált lakhatási feltételeket nyújtott; lehetőséget adott a szabadidő tartalmas és hasznos eltöltéséhez. A hallgatók intézményen belüli étkezési lehetősége biztosított volt (melegkonyha, büfé, italautomata rendelkezésre állt), ami a hallgatók véleménye szerint 3. helyezést jelentett a már említett Felvi rangsorban [9].

#### **3.4.2. Könyvtár**

A hallgatók rendelkezésére állt egy csaknem 25 ezer kötetet forgalmazó könyvtár, ami a központi telephelyen, egy kétszintes, galériás rendszerű, 760 m<sup>2</sup> alapterületű épületrészben foglalt helyet és gépészeti ismeretek gyűjtőköréből jól ellátott volt. A könyvtár teljesítményét, színvonalát a Felvi rangsor 2006 című kiadványban [9] is elismerték, az agrárfőiskolai karok mezőnyében első helyezést ért el. A jegyzet, a tankönyv és a szakkönyv ellátottság is megfelelt a kívánalmaknak. A tantárgyak jelentős részéhez saját jegyzettel rendelkezett az intézmény, amelyeket az államilag támogatott hallgatók térítésmentesen kaptak meg a félévek elején tankönyvcsomag formájában [19].

#### **3.4.3. Sportolási lehetőségek**

A sportolási és rekreációs lehetőségek igen széleskörűek voltak: 17 művelhető sportág (pl. aerobik, asztalitenisz, atlétika, falmászás, lovaglás, röplabda, sízés, tollaslabda, túrakajakozás-kenuzás, úszás), szabadtéri sportlétesítmények (kézilabda, kosárlabda, labdarúgás, tenisz), egy 1000 m<sup>2</sup>-es küzdőterű, saját, jól felszerelt sportcsarnok, kétállásos automata tekepálya, kondicionálóterem, csónakház, stb. állt a hallgatók rendelkezésére. A sportlétesítmények felszereltsége és működtetése más intézményekhez viszonyítva impozáns volt. A sportolás alapvető eszközei minden művelt sportágban biztosítottak voltak a hallgatók számára tanulmányi munkájuk melletti szabadidejük tartalmas eltöltéséhez. A kulturális igények kielégítésére heti rendszerességgel mozi működött, illetve öntevékeny zenei klub munkájába kapcsolódhattak be az érdeklődők. Jelentős volt a hagyományok ápolása, a hallgatói igényeket minden évben különféle rendezvények is szolgálták: a Gólyabál és az ún. felező buli, valamint a végzősöket búcsúztató Valéta napok eseménye. A kétnapos valétálást sport- és egyéb vetélkedők, gépkarnevál, szakestély, gyűrűavatás tette igazán felejthetetlenné [1].

#### **3.4.4. Infrastruktúra**

Az 1950-es évek elején épült 4303 m<sup>2</sup>-es tanulmányi épület a 2000-es évek elején is jól szolgálta az elméleti oktatást. A fakultás épületeiben hagyományosan rend és tisztaság uralkodott. Az intézmény külleme, továbbá az intézmény épületeinek állapota a 2006-os Felvi rangsorban a 7 főiskolai kar közül második-második helyezést ért el, de a 11 agráregyetemi karok közül is csak egy-egy előzte volna meg [9]. Az intézmény informatikai eszközökkel való ellátottsága átlagos szintű volt, azonban oktatástechnikai felszereltsége hiányos volt, ugyanis csak korlátozottan rendelkezett korszerű Power-Point-os oktatástechnikával. A szak hallgatóinak gyakorlati képzését és a tantárgyi gyakorlatok helyszíneit a központi telephely csaknem 2000 m<sup>2</sup>-es létesítményében,

az ún. U épületben található laboratóriumok (anyagvizsgáló labor, elektrotechnikai labor, kémiai labor, járműszerkezetek, motorok labor, gépjárművizsgáló labor, épületgépészeti labor), és a fakultás kezelésében lévő a központi telephelytől (5. ábra) mintegy 200 m-re fekvő Tanüzemben fellelhető műhelyek (forgácsoló műhely, hegesztő-lakatos műhely, diagnosztikai műhely) szolgálták.



5. ábra. A mezőtúri tanulmányi épület

Tantárgyi (pl. Üzemfenntartás) gyakorlatok keretében még a Tangazdaságot is igénybe vették, aminek feltételrendszere a műszaki menedzser hallgatók gyakorlati ismereteinek elsajátítását is jól szolgálta.

Összegezve elmondható, hogy a szak profiljához illeszkedő oktatási, kutatási feladatokhoz a rendelkezésre álló infrastruktúra-ellátottság átlagos szinten biztosított volt. A tudományos kutatást is szolgáló műszer- és eszközállomány az oktatás igényeihez mérten mennyiségben szintén megfelelő volt, minőségben és állagát tekintve azonban erkölcsileg amortizálódott, amelyre az eszközpark és létesítmények életkora adott elsősorban magyarázatot. Bár az oktatás infrastruktúrájának folyamatos fejlesztésére törekedtek (pl. a felsőoktatási intézményekben a gyakorlati képzés tárgyi feltételeinek fejlesztését szolgáló beruházás támogatása pályázatok, valamint a szakképzés fejlesztését szolgáló eszközbeszerzés támogatása pályázat [3]), a 2007. év végén e célból benyújtott TIOP pályázat elhúzódása miatt mégsem sikerült érdemben a műszaki gyakorlati képzés feltételeit javítani, azok továbbra is szélsőségeket mutattak: a laborok többsége korszerűnek mondható volt, de – mint mindenhol – a felsőoktatás szűkös anyagi helyzete miatt voltak szegényes, elavult kutatási eszközök is [8].

### 3.4.5. Nyelvi képzés

A mezőtúri intézmény a hallgatók nyelvi képzéséhez a szükséges feltételekkel rendelkezett, Idegennyelvi Lektorátust működtetett, ahol német, angol és igény szerint orosz nyelv tanulására volt lehetőség. A főiskola 2000 novembere óta az ELTE ITK ORIGÓ Vizsgaközpont bejelentett akkreditált vizsgahelyeként, 2004 februárjától pedig a SZIE Zöld út Szaknyelvi Vizsgaközpont akkreditált vizsgahelyeként is működött [8], így a hallgatóknak lehetőségük volt a diploma megszerzéséhez előírt, államilag elismert nyelvvizsgájukat helyben letenni.

### 3.4.6. TDK tevékenység

A hagyományoszerűen minden év december hó elején megrendezett házi Tudományos Diákköri Konferenciára 2007-ben már a műszaki menedzser szakról is volt egy nevezett dolgozat. 2008-tól pedig még nagyobb érdeklődés volt tapasztalható a TDK munka iránt, olyannyira hogy a 2009-es gödöllői XXIX. OTDK Agrártudományi szekciójának Agrárműszaki tagozatában II. helyezést ért el egy hallgató [2].

## 3.5. Szolnoki hallgatói szolgáltatások

### 3.5.1. Kollégium

A Szolnoki Főiskola kollégiumai a Tisza folyó partján nyújtottak szállást és gyönyörű környezetüknek köszönhetően otthont a hallgatóknak [12]. A 2011 januárjában átadott gyaloghíd

jóvoltából az oktatási épületek „karnyújtásnyira” kerültek a kollégiumoktól: egy 15 perces sétával, kerékpáron pedig jóval rövidebb idő alatt is elérhető volt a Campus. A férőhelyek száma az országos átlaghoz viszonyítva kiemelkedően magas volt. A kollégiumi épületekben az igénylők jelentős részének tudtak szállást biztosítani, míg a konzultációs napokon a levelezős hallgatók egy részét is el tudták helyezni. A Kollégiumok – alapfunkciójukon túl – kiváló lehetőséget nyújtottak a kulturális és sport tevékenységekre, a szabadidő hasznos eltöltésére is. Az éttermi szolgáltatás biztosítása sem jelentett gondot, mivel a hallgatók rendelkezésére állt a kiválóan felszerelt, a legmagasabb igényeket is kielégítő Campus étterem [14].

### **3.5.2. Könyvtár**

A kollégium épületében volt megtalálható a főiskola könyvtára, ami minden igényt kielégítő könyvtári szolgáltatásainak köszönhetően a tanulásban nyújtott nagy segítséget [16]. A szabadpolcos elrendezésű, 1.043 m<sup>2</sup> alapterületű, 108 férőhellyel, 25 számítógéppel, internet-hozzáféréssel rendelkező könyvtár a főiskola önálló szervezeti egységként működött. A mezőtúri könyvtár 2010 júniusában a szolnoki telephelyre történő beköltöztetése után a fellelhető (százezret meghaladó állományi) dokumentumok több mint 80%-a az alkalmazott tudományok köréhez tartozott. Gyűjteményét a képzéseknek megfelelően alakította, a szakhoz kötődően a műszaki tudományok hazai és külföldi irodalmát is mélységben gyűjtötte. A tananyagok elérése azonban már csak elektronikusan volt lehetséges, a mezőtúri kiadású nyomtatott jegyzetek egy részét a könyvtárban lehetett megtekinteni.

### **3.5.3. Sportolási lehetőségek**

A tantervi és szabadidős sportolási lehetőségek szervezett formában biztosítottak voltak. A bérelt fedett sportcsarnok, fallabda pálya és konditerem kiváló lehetőségeket kínált (aerobic, foci, kosárlabda, röplabda, úszás, evezés, kajakozás-kenuzás, tollaslabda, ezeken kívül az ún. menedzsersportok: tenisz, kondi, íjászat, fallabdázás, falmászás, bowling) mind a tömegsport mind a szabadidő hasznos eltöltésére. Emellett minden évben megrendezésre kerültek a főiskolai sporttáborok (sítábor, rafting) [14]. Minden év során a főiskola tradícióinak megfelelően a HÖK megrendezte a Gólyatábort, a Gólyabált, a Szüreti Bált, a Mikulás Party-t, Szilveszteri Mulatságot, Farsangi Bált, valamint a SzoFi-Napokat, amely az évek során igen nagyszabású rendezvénné nőtte ki magát [13].

### **3.5.4. Infrastruktúra**

A szak elméleti oktatása (magas színvonalon, a kor követelményeinek megfelelő környezetben, korszerű technikai háttérrel) a szolnoki campus 2008 decemberében átadott új oktatási épületében (6. ábra) és az 1977-ben épült (alacsony színvonalú infrastruktúrájú) B épület (sőt olykor a vendégház) szemináriumi termeiben történt.



6. ábra. A szolnoki campus új oktatási épülete

A számítástechnikai infrastruktúra megfelelő volt, valamennyi oktatóteremben biztosított számítógép és projektor. A szak gyakorlati képzésének infrastruktúrája azonban szinte teljes

egészében a mezőtúri telephelyen maradt, melyet egy év elteltével (2011 év végén) a Szolnoki Főiskola térítésmentesen a Mezőtúri Önkormányzatnak adott át (ahogy 2015. április 1-jén a tangazdaság vagyongazdálkodási jogát is visszaadta [15]). A műszaki jellegű tantárgyak gyakorlatai szolnoki szakközépiskolák telephelyein (a Szolnoki Műszaki Szakközép- és Szakiskola Jendrassik György Gépipari, illetve Baross Gábor Gépipari, Közlekedési Tagintézményeiben) található korszerű tanműhelyekben és jól felszerelt műszaki laborokban zajlott [28].

Az oktatás infrastruktúrája ugyan elfogadható volt, de mivel a Szolnoki Főiskolán a korábbi években megvalósított igen jelentős beruházások a szakot csak az elméleti képzés vonatkozásában érintették előnyösen, így a kutatások infrastrukturális háttérét képező laborok, műhelyek biztosítása, a szükséges eszközök, gépek elhelyezése és működtetése nem volt megoldott, ezért jelentős fejlesztésekre volt szükség. A régóta húzódó TIOP pályázat sikeres megvalósítása érdekében 2013-ban konzorciumi tagként bevonásra került a Kecskeméti Főiskola [18] is és 2015. november 15-én sikeresen lezárult a műszaki gyakorlati képzés fejlesztését elősegíteni hivatott 95%-os támogatottságú pályázat, aminek keretében új, korszerűen műszerezett a műszaki menedzser szakon folyó oktatást szolgáló műszaki oktatóbázist alakítottak ki [15]. Másfél évvel később, 2017 nyarán azonban a laboratóriumok szinte teljes egészében Kecskemétre kerültek át.

### **3.5.5. Nyelvi képzés**

A mezőtúrinál nagyobb létszámú nyelvtanárral működő és több nyelv (angol, német, orosz, olasz, francia, spanyol) tanulását biztosító Idegen Nyelvi Tanszék volt felelős a szolnoki telephely nyelvoktatásáért. Emellett az intézményben három nyelvvizsgaközpont (BGF, LCCIEB és SZIE Zöld út) akkreditált vizsgahelye is tevékenykedett, amelyek a nyelvvizsga intézményben történő megszerzésének lehetőségét biztosították, így szolgáltatásai a hallgatók számára könnyebbséget jelentettek [34].

### **3.5.6. Tehetséggondozás**

Szolnokon (ahol a tehetséggondozási rendszer részeként a félévente megrendezett Tudományos Diákköri Konferencia mellett demonstrátori feladatok ellátása is segítette a kiemelkedő képességű hallgatók szakmai fejlődését) a TDK tevékenység iránt a szakról már csekélyebb volt az érdeklődés, amit egyetlen egy, országos fórumra (a 2015. évi szegedi XXXII. OTDK Informatika Tudományi Szekciójának Alkalmazott Informatika tagozatába) benevezett pályamunka is bizonyít.

Egyéb hallgatói szolgáltatások közül megemlítené még a különböző – karrier-, pszichológiai, életviteli és életmód – területeken végzett tanácsadási tevékenységek, amelyeket intézményi szintű rendezvények tettek színesebbé [16].

## **4. Következtetések**

Az agrárszakok elismertsége, pozíciója, az agrárium képzésre is kiható negatív megítélése folytán a mezőtúri kar fennmaradása érdekében műszaki jellegű képzés bevezetése látszott szükségesnek. A műszaki menedzser szak megindításával pedig épp efelé nyitott az intézmény. Én ebben nem látok semmi kivetnivalót. Egy főiskola vezetésének gondoskodnia kell az alma mater sorsáról, és ezt tette az akkori vezetés is. Ezt tették abban az időben máshol, mások is.

Viszont magam részéről osztom Dr. Patkós István véleményét, hogy a mezőtúri vezetésnek és a kar tanácsának nem lett volna szabad a kiválást kezdeményező döntést ilyen áron támogatni. Hiszen az önkéntes integrációváltás – azzal, hogy az intézmény feladta (gazdálkodási) önállóságát, kari státuszát és ezzel együtt a helyi döntések meghozatalára hivatott testületét, a kari tanácsot [21], továbbá hogy akkreditált szakjai a TSF-en is indításra kerültek (a térségi intézményi rivalizáció, valamint az egyre romló demográfiai helyzet következtében bekövetkezett látványos hallgatói létszámcsökkenéssel és az ezzel összefüggő dotáció jelentős visszaesésével együtt), illetve a fakultást hátrányosan érintő főiskolán belüli erőforrás elosztási elvek – Mezőtúrt kiszolgáltatott helyzetbe hozta (az azonos földrajzi régióba tartozás sem teremtett kedvezőbb körülményt), és már a kezdetekben előrevetítette az intézmény megszűnését, a képzések Szolnokra történő áthelyezését.

Azonban a Szolnoki Főiskola által a finanszírozhatóság érdekében meghozott kényszerű intézkedések – véleményem szerint – nem a mezőtúri szak(ok) felszámolása, hanem éppen ellenkezőleg, a megmentése céljából történtek, hiszen ahogy a kecskeméti, úgy a szolnoki vezetés is megtehetette volna, hogy nem indítja a szakot, de ők támogatták, életben tartották a műszaki (és agrár) képzést. Meghirdették, függetlenül attól, hogy alacsony létszámú csoportok indulhattak (amit persze a felsőoktatási törvény-koncepció elvei – pl. főiskola legalább két képzési területtel rendelkezzen – is indokoltak).

A hajdani (1952-től 1957-ig a Közlekedési Műszaki Egyetem Szolnokon működött) közlekedésmérnöki képzés után tehát „visszatért” Szolnokra a műszaki felsőoktatás. Mindazonáltal a szakon oktatók jelenléte az intézmény vezető testületeiben, ezáltal a képzés szakmai és érdekképviselője a főiskolán belül még gyengébb lett. Következésképpen továbbra sem sikerül(hetett) helyesen reagálni a hazai felsőoktatás változásainak (a Bologna rendszerre való áttérésből adódó képzési túlkínálat, intézmények közötti versenyhelyzet, stb.) kihívásaira, megfelelő lépéseket tenni a negatív hatások kivédésére (pl. a képzési profil alapos átgondolásával, a kínálat – egyetemeken által nem végzett felsőfokú oktatásokkal történő – bővítésével, az aktivitás növelésével a kisugárzásban, az imázsépítésben és a beiskolázásban) és így helyt állni a hallgatókért folyó versenyben. Ennek folytán a képzés hosszútávon fenntarthatatlannak bizonyult és a kecskeméti összevonás után a szolnoki telephelyen megkezdődött, sőt hamarosan be is fejeződik a szak kifuttatása, fájdalmas úrt hagyva maga után.

Talán épp ezt elkerülendő írt alá stratégiai partnerségi megállapodást Szolnok város és a Debreceni Egyetem. Az együttműködés célja egyrészt a szolnoki műszaki felsőoktatás fejlesztése. Másrészt pedig, hogy a Debreceni Egyetem a felsőoktatás és a kutatás terén szerzett tapasztalataival támogassa a szolnoki önkormányzatot a város vasútgépészeti tradícióján keresztül a közlekedési felsőoktatás fejlesztésében [22].

## Irodalomjegyzék

- [1] Vermes Pál (szerk.): A mezőtúri felsőoktatás fél évszázada (1960-2010). Mezőtúr, 2010. p. 251
- [2] Oláh Béla: A 40 éves mezőtúri mérnökképzés jelene. Szolnoki Tudományos Közlemények XVI. Tudomány ünnepe alkalmából rendezett tudományos konferencia kiadványa, Kiadó: MTESZ Jász-Nagykun-Szolnok Megyei Szervezete, Szolnok, 2012. pp. 122-149. Available: [http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2012/cikkek/2012-12-Olah\\_Bela.pdf](http://www.szolnok.mtesz.hu/sztk/kulonszamok/2012/cikkek/2012-12-Olah_Bela.pdf). [Megtekintés: 23-Apr-2013]
- [3] Oláh Béla (összeáll.): A 40 éves mezőtúri mérnökképzés jelene – Az utolsó 10 év 2002-2012. Áttekintő kiadvány, Mezőtúr, 2013. Kiadó: Mezőtúri Lokálpatrióta Egyesület, p. 40 Available: <https://docs.google.com/file/d/0BzbTf3L2FeXFYUlxNHViS1NaVFU/edit?usp=sharing&pli=1>. [Megtekintés: 19-Jan-2014]
- [4] Kérelem a Műszaki menedzser főiskolai alapképzési szak indításához, Tessedik Sámuel Főiskola, Mezőgazdasági Főiskolai Kar, Mezőtúr, 2003. január, p. 94 + mell.
- [5] A Szolnoki Főiskola 2014. évi oktatási és gazdálkodási beszámolójának szöveges értékelése. Szolnok, 2015. p. 69 Available: [http://www.szolportal.hu/images/gmi\\_dokumentumok/szolnoki\\_foiskola\\_2014\\_evi\\_oktatasi\\_es\\_gazdalkodasi\\_beszamolo\\_szoveges\\_ertekelese.pdf](http://www.szolportal.hu/images/gmi_dokumentumok/szolnoki_foiskola_2014_evi_oktatasi_es_gazdalkodasi_beszamolo_szoveges_ertekelese.pdf). [Megtekintés: 29-Jun-2018]
- [6] Tessedik Sámuel Főiskola, Mezőgazdasági Főiskolai Kar, Akkreditációs jelentés, Mezőtúr, 2005. p. 235 + 66 mell.
- [7] A Szolnoki Főiskola akkreditációs önértékelése III. kötet, A Műszaki és Mezőgazdasági Fakultás akkreditációs önértékelési jelentése, Mezőtúr, 2008. p. 160 + mell.
- [8] MAB Intézményi Akkreditációs Jelentés (Tessedik Sámuel Főiskola Mezőgazdasági Főiskolai Kar, Mezőtúr) 2006. p. 12 Available: [http://www.mab.hu/joomla/doc/hatarozatok/int2k/TSF-MFK\\_plhat.doc](http://www.mab.hu/joomla/doc/hatarozatok/int2k/TSF-MFK_plhat.doc). [Megtekintés: 30-Maj-2014]
- [9] felvi Rangsor, Egyetemek, főiskolák mérlegen, 2006. pp. 24-43. Available: [https://www.felvi.hu/pub\\_bin/dload/rangsor2006/24\\_43.pdf](https://www.felvi.hu/pub_bin/dload/rangsor2006/24_43.pdf). [Megtekintés: 27-Aug-2018]
- [10] Fodor Szabolcs, Kiss László: A műszaki és a természettudományi képzési terület a felsőoktatási rangsorok tükrében. In: Felsőoktatási Műhely, 2008/4. – Reál(is) továbbtanulás, pp. 75-96. Available: [https://www.felvi.hu/pub\\_bin/dload/felsooktatasi\\_muhely/FeMu/2008\\_04/oldal75\\_96\\_fodor\\_kiss.pdf](https://www.felvi.hu/pub_bin/dload/felsooktatasi_muhely/FeMu/2008_04/oldal75_96_fodor_kiss.pdf). [Megtekintés: 23-Nov-2018]
- [11] Jelentés a műszaki menedzser alapképzési (BSc) szak akkreditációs helyzetéről, Szolnoki Főiskola, Műszaki és Mezőgazdasági Fakultás, Mezőtúr, 2009. október, p. 77
- [12] Intézményi Tájékoztató 2011/2012. tanév, Szolnoki Főiskola, 2011. p. 152

- [13] Intézményi Tájékoztató 2012/2013. tanév, Szolnoki Főiskola, 2012. p. 170
- [14] Intézményi Tájékoztató 2013/2014. tanév, Szolnoki Főiskola, 2013. p. 60
- [15] A Szolnoki Főiskola 2015. évi oktatási és gazdálkodási beszámolójának szöveges értékelése. Szolnok, 2016. p. 91  
Available: [http://www.szolportal.hu/images/gmi\\_dokumentumok/SZF\\_2015\\_evi\\_szoveges\\_beszamolo.pdf](http://www.szolportal.hu/images/gmi_dokumentumok/SZF_2015_evi_szoveges_beszamolo.pdf).  
[Megtekintés: 29-Jun-2018]
- [16] Intézményi Tájékoztató 2014/2015. tanév, Szolnoki Főiskola, 2014. p. 35
- [17] A Szolnoki Főiskola 2012. évi oktatási és gazdálkodási beszámolójának szöveges értékelése. Szolnok, 2013. p. 68  
Available: [http://szervezet.szolportal.hu/images/gmi\\_dokumentumok/a\\_szolnoki\\_foiskola\\_2012\\_evigazdalkodasi\\_beszamolojanak\\_ertekelese.pdf](http://szervezet.szolportal.hu/images/gmi_dokumentumok/a_szolnoki_foiskola_2012_evigazdalkodasi_beszamolojanak_ertekelese.pdf). [Megtekintés: 29-Jun-2018]
- [18] A Szolnoki Főiskola 2013. évi oktatási és gazdálkodási beszámolójának szöveges értékelése. Szolnok, 2014. p. 58  
Available: [http://www.szolportal.hu/images/gmi/2013\\_evi\\_oktatasi\\_es\\_gazdalkodasi\\_beszamolo\\_szoveges\\_ertekelese.pdf](http://www.szolportal.hu/images/gmi/2013_evi_oktatasi_es_gazdalkodasi_beszamolo_szoveges_ertekelese.pdf). [Megtekintés: 29-Jun-2018]
- [19] Intézményi Tájékoztató 2009/2010. tanév, Szolnoki Főiskola, 2009. p. 104
- [20] Bakos Károly, Cseh Boglárka (szerk.): Felsőoktatási felvételi tájékoztató 2006, Kiadó: Oktatási és Kulturális Minisztérium, Budapest, 2005. p. 1006
- [21] Patkós István: Visszaemlékezéseim mezőtúri éveimre. In: Volt egyszer egy főiskola Mezőtúron, visszaemlékezések, megörökített érdemlő történetek, avagy ami a korábbi jubileumi és emlékkönyvekből kimaradt, Béley Ferenc et al. (szerk.), Kiadja MMBKE, Mezőtúr, 2014. p. 224, pp. 9-35.
- [22] Hartai Gergely: Megállapodnak az egyetemmel. Új Néplap, Jász-Nagykun-Szolnok megyei napilap, XXIX. évf. 290. szám, 2018. december 14. 3. oldal
- [23] Elmúlt évek statisztikái - Felvi.hu. [Online]. Available: [https://www.felvi.hu/felveteli/ponthatarok\\_statistikak/elmult\\_evek/!ElmultEvek/index.php/elmult\\_evek\\_statistikai/ponthatarok?filters%5Bsta\\_int\\_id%5D=&filters%5Bsta\\_kar\\_id%5D=&filters%5Bsta\\_ev%5D](https://www.felvi.hu/felveteli/ponthatarok_statistikak/elmult_evek/!ElmultEvek/index.php/elmult_evek_statistikai/ponthatarok?filters%5Bsta_int_id%5D=&filters%5Bsta_kar_id%5D=&filters%5Bsta_ev%5D). [Megtekintés: 21-Jun-2018]
- [24] Tanulmányi Tájékoztató 2010/2011. tanév, Szolnoki Főiskola, 2010. p. 300
- [25] Bakos Károly, Szabó Katalin Zsuzsanna (szerk.): Felsőoktatási felvételi tájékoztató 2010, Kiadó: Oktatási és Kulturális Minisztérium, Budapest, 2009. p. 879
- [26] Alma Mater, Tessedik Sámuel Főiskola, Mezőgazdasági Főiskolai Kar – Mezőtúr. Békés Megyei Hírlap, közéleti napilap, LVIII. évf. 295. szám, 2003. december 19. 6. oldal Available: [https://library.hungaricana.hu/hu/view/BekesMegyeiNepujasg\\_2003\\_12/?pg=265&layout=s](https://library.hungaricana.hu/hu/view/BekesMegyeiNepujasg_2003_12/?pg=265&layout=s). [Megtekintés: 14-Mar-2017]
- [27] Felvételi tájékoztató 2011/12, Szolnoki Főiskola, 2011. p. 40
- [28] A Szolnoki Főiskola Intézményfejlesztési terve. Szolnok, 2012. p. 146
- [29] A Szolnoki Főiskola 2009. évi oktatási és gazdálkodási beszámolójának szöveges értékelése. Szolnok, 2010. p. 39  
Available: [http://szervezet.szolportal.hu/images/stories/gazdasagi/2009\\_evi\\_szoveges\\_beszamolo.pdf](http://szervezet.szolportal.hu/images/stories/gazdasagi/2009_evi_szoveges_beszamolo.pdf).  
[Megtekintés: 10-Sep-2012]
- [30] Bakos Károly, Borsa Melinda, Szabó Katalin Zsuzsanna (szerk.): Felsőoktatási felvételi tájékoztató 2009, Kiadó: Oktatási és Kulturális Minisztérium, Budapest, 2008. p. 670
- [31] Kiss László, Gönye László, Garai Orsolya: Felvételi tájoló 2011, Kiadó: Educatio Társadalmi Szolgáltató Nonprofit Kft., Budapest, 2010. p. 262
- [32] A tanszékről bővebben - Műszaki és Gépészeti Tanszék. [Online]. Available: [http://muszakigepesz.szolportal.hu/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2690&Itemid=311](http://muszakigepesz.szolportal.hu/index.php?option=com_content&task=view&id=2690&Itemid=311).  
[Megtekintés: 20-Jul-2012]
- [33] Bakonyi László et al. (szerk.): Felsőoktatási felvételi tájékoztató 2007, Kiadó: Oktatási és Kulturális Minisztérium, Budapest, 2006. p. 927
- [34] Idegen Nyelvi Tanszék. [Online]. Available: <http://nyelvoktatas.szolportal.hu/>. [Megtekintés: 28-Jul-2012]



# A DUÁLIS KÉPZÉSŰ HALLGATÓK SZAKMAI FEJLŐDÉSÉNEK KÖVETÉSE ÉS ÉRTÉKELÉSE<sup>[1]</sup>

## ASSESSMENT OF STUDENTS IN DUAL EDUCATION

Nagy Dorottya <sup>1\*</sup>, Török Erika <sup>2</sup>, Angeli Eliza <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Szervezéstudományi és Logisztikai Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

duális képzés  
értékelő módszer  
gyakorlatorientált képzés

### Keywords:

dual education  
practice oriented training  
assessment method

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. augusztus 30.  
Átdolgozva 2018. augusztus 31.  
Elfogadva 2019. március 18.

---

### Összefoglalás

A duális képzés olyan oktatási forma, amely során a hallgató az elméletet és a gyakorlatot összehangolva sajátítja el. A Neumann János Egyetem (NJE) több szakján is lehetősége van a hallgatóknak duális formában tanulni. Egyetemünk számos különböző méretű és eltérő gazdasági ágazathoz tartozó vállalattal, intézménnyel - duális partnerrel - rendelkezik, ezért a duális hallgatók partner intézménynél nyújtott teljesítményének nyomon követése nem egyszerű feladat. A duális képzéshez kapcsolódó mérések, értékelések különösen fontosak, hiszen Magyarországon a felsőoktatásnak ez a módszere nagyon rövid múlttal rendelkezik. A kialakított mérési rendszer, a használt mutatók alkalmasak lehetnek arra, hogy mérni, akár számszerűsíteni tudjuk a duális képzés által nyújtott előnyöket, össze tudjuk hasonlítani, hogy mennyiben különbözik a nem duális képzésben tanuló hallgatók tudása a duális hallgatókétól, javítani tudjuk az esetleges hibákat, és a nem odaillő elemeket ki tudjuk szűrni. A tanulmány célja áttekinteni a már működő hallgató-értékelő technikákat, hogy abból további kutatás által kiválasszuk, melyek egyetemünk számára a legmegfelelőbbek.

### Abstract

Students in dual education study coordinated by both in theoretical and practical way. They can choose from many departments in dual education at John von Neumann University. Dual partners- companies and institutes- are in different size from different industrial sectors. For this reason, following the performance of students at the dual partners is a complex project. Assessment of students' performance is particularly important, because there is no ingrained method for this in Hungary. With a well-established method the advantages of dual system can be measured and quantified, and even the results with those of non-dual students can be compared, and possible to filter out the contingent faults. The aim of this study to review the already existing assessment methods from all over the world and suggest one or more appropriate ones to apply at our university.

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 30 966 6276  
E-mail cím: [nagy.dorottya@gamf.uni-neumann.hu](mailto:nagy.dorottya@gamf.uni-neumann.hu)



## 1. Bevezetés

A duális típusú képzés számos egyetemen alkalmazott oktatási forma. Német nyelvterületen „Dual” [1], míg angol nyelvterületen „Dual-” vagy „Cooperative Education” [2] néven ismert. A „Cooperative Education” kifejezés viszont egyaránt használatos a duális képzésre és a csapatmunkára is, mely nem témája a tanulmánynak. További szinonimák a duális típusú képzésre a „co-op practice” [3] „experiential learning” [2, 4], „co-op internship”, „work integrated learning” [5], „work based learning” vagy „university-industry partnership” [2]. A fent említett képzési formák mind valamilyen duális képzést takarnak, bár működésükben jelentős különbségek vannak.

A duális képzés olyan oktatási formát jelent, amely során a hallgató az elméletet és a gyakorlatot összehangolva tanulja. A Neumann János Egyetem több szakán is lehetősége van a hallgatóknak duális formában tanulni. Egyetemünk számos duális partnerrel - különböző méretű és gazdasági ágazathoz tartozó vállalattal, intézménnyel - rendelkezik, ezért a duális hallgatók partner intézménynél nyújtott teljesítményének nyomon követése nem egyszerű feladat.

A duális képzéshez kapcsolódó mérések, értékelések különösen fontosak, hiszen Magyarországon a felsőoktatásnak ez a módszere nagyon rövid múlttal rendelkezik. A kialakított mérési rendszer, a használt mutatók alkalmasak lehetnek arra, hogy mérni, akár számszerűsíteni tudjuk a duális képzés által nyújtott előnyöket, össze tudjuk hasonlítani, hogy mennyiben különbözik a nem duális képzésben tanuló hallgatók tudása a duális hallgatókéétól, javítani tudjuk az esetleges hibákat, és a nem odaillő elemeket ki tudjuk szűrni. A tanulmány célja áttekinteni a már működő hallgató-értékelő technikákat, hogy abból további kutatás által kiválasszuk, melyek egyetemünk számára a legmegfelelőbbek. Ehhez azonban fontos tisztában lenni az egyes duális típusú képzésekkel, azok múltjával és sajátosságaikkal.

## 2. A duális képzés kialakulása

A duális képzés őse, a még mindig alkalmazott „sandwich program”, amelyet először 1903-ban indítottak az Egyesült Királyságban. A program lényege, hogy (általában) a második egyetemi év után 1 év gyakornoki időszak következik, amelyet egy vagy akár több kiválasztott vállalatnál tölthet a hallgató. Az első ilyen képzés mérnöki szakon indult, de ma már elérhető üzleti, pénzügyi, pszichológia és sporttudomány szakon is. A duális képzés ezen formájában a hallgató eldöntheti, hogy 4 vagy 5 évig tanul az egyetemen. Az 5 éves képzésben 1 évvel több gyakorlati idő szerepel. Amerikában az első duális típusú képzési programot a Cincinnati Egyetemen vezették be 1906-ban Herman Schneider vezetésével, akitől az ötlet származott [2]. Schneider, aki mérnök, építésmérnök és tanár is volt, még egyetemi tanulmányai alatt figyelte meg, hogy a gyakorlati tantárgyakat nem igazán lehet eredményesen tanítani tantermi körülmények között. Megfigyelte, hogy az éltanulók közül sokan vállalnak munkát az egyetem mellett, hogy pénzt keressenek a tanulmányaik finanszírozására. Amikor oktatóként kezdett el dolgozni, olyan újításokat próbált meg bevezetni, hogy az órák minél gyakorlatiasabbak legyenek. Kidolgozott egy programot, amiben a hallgatók munkahelyi körülmények között tanulhatnak, és közben még pénzt is kereshetnek. Schneider szerint a program arra is alkalmas volt, hogy a hallgatók könnyebben kapjanak munkát a végzés után azáltal, hogy szembesülnek a munkaerőpiac igényeivel és vállalati kapcsolatokra tesznek szert.

Három évvel később a bostoni Northeastern Egyetem egyik dékánja tudomást szerzett a programról, és annyira megtetszett neki, hogy be is vezette a mérnökhallgatók körében. Nagyon sikeres lett a kezdeményezés, így pár éven belül a duális típusú iskola lett a legnagyobb intézmény Northeastern-ben. Lassan, de biztosan emelkedett a duális képzések és a duális hallgatók száma. A nagy fordulópont 1965-ben történt, amikor törvényben rögzítették, hogy a duális típusú képzést indító egyetemek állami támogatást kapnak. Emiatt két év leforgása alatt több, mint 100 egyetem jelentkezett a duális program elindítására. 1980-ra már közel 1000 amerikai egyetemen működött a duális program, és több mint 200 ezer hallgató tanult ilyen formában. A duális program elterjedt az egész világon, ma már több, mint 60 országban elérhető, és nem csak mérnöki szakokon, hanem gazdasági, bölcsész vagy tervezés (design) szakon is.

Kanadában is kedvelt a duális képzés. 1957-ben indult az első ilyen képzés, 1979-től pedig a Duális Képzés Kanadai Egyesülete szabályozza a működésüket, illetve rögzíti a további duális egyetemek alapításának alapjait [5]. Emellett tanácsokat és ötleteket ad az oktatás és az értékelés módjára, amely nagyon hasznos volt a tanulmány megírásánál.

Magyarországon a duális képzés bevezetését társadalmi, gazdasági és oktatási igények együttes megjelenése tette szükségessé [6]. A képzés mintájául szolgáló Baden-Württemberg-i duális egyetem 1974-ben alakult nagyobb vállalatok kezdeményezésére (Daimler-Benz, Bosch). Magyarországon 2012-ben indult az első duális évfolyam járműmérnök szakon, a Kecskeméti Főiskolán (Neumann János Egyetem jogelődje), [7] ahol azóta 8 további szakkal bővült a választható szakok listája. A képzési forma 2015-ben került bele hivatalosan a magyar felsőoktatási rendszerbe.

### 3. Duális típusú képzések jellemzői

A duális típusú képzések szereplői a hallgatók, az egyetem és a vállalatok. A képzés célja, hogy a hallgatónak lehetősége nyíljon az egyetemen tanultakat a gyakorlatban is alkalmazni, valamint a gyakorlat során szerzett tapasztalatokat összekapcsolni az egyetemen tanult elméleti ismeretekkel.

A duális típusú képzés több módon is megvalósulhat: a vállalatnál eltöltött gyakorlat történhet párhuzamosan az egyetemi képzéssel (részidőben), felváltva (teljes munkaidőben), és/vagy nyáron [4]. Az alternáló képzés a leggyakoribb mind külföldön, mind Magyarországon, Egyetemünkön is ezt a modellt alkalmazzuk. A duális képzés sok esetben nem kötelező az összes hallgató számára, hanem választható, ebből adódóan a duális és a nem duális hallgatók együtt tanulnak az egyetemen. A duális képzés számtalan előnyt jelent a hallgatók számára. A képzés eredeti célján felül a hallgató számos olyan készséget szerez, amelyet későbbi munkája során kamatoztatni tud. Például fejlődnek a szociális készségei, a csapatmunkában való produktivitása, a kommunikációs készségei, a gyakorlati készségei, javul a jövőképe és a munkaerőpiacon könnyebb lesz elhelyezkednie [5, 6, 7].

A vállalatok számára hasznosak a duális hallgatók, mert motivált, olcsó munkaerőt kapnak, és esély van arra, hogy a végzés után ott maradnak a cégnél dolgozni. Ez egy költséghatékony megoldás, mivel nem kell új dolgozókat betanítani, továbbképzésekre küldeni. A vállalat irányíthatja a hallgató tanulási útját, szakterületét, ezért a cégek már az adott speciális feladatra képeznek munkaerőt. A duális hallgatók lelkesedése átragad a többi dolgozóra is, a munkahelyi légkör javul. Általában több hallgató jelentkezik egy céghez, ezért ki tudják választani közülük a legtehetségesebbeket [6].

A duális képzés pozitív hatással van az egyetemre is, hiszen a vállalati kapcsolatok révén a képzés sokkal inkább igazodik a valós és aktuális trendekhez, fejlesztésekhez, tehát javul a képzés minősége. A duális hallgatók általában motiváltabbak, mivel azt csinálják, ami érdekli őket, és pénzt is keresnek. Az egyetem hírnevet szerezhethet a jól képzett hallgatók által. Emiatt több hallgató jelentkezik, bővíthet a tanulható tudományterület és az oktatói gárda. A munkáltatóktól visszajelzést kap a tantervre vonatkozóan és jobban tud igazodni a munkaerő-piaci igényekhez. Az egyetem tudomást szerezhethet a legújabb kutatási területekről és fejlesztésekről, részt vehet ipari projekteken, illetve az információk által naprakész ismeretanyagot képes nyújtani.

### 4. Az értékelés jelentősége és lehetséges formái

A hallgatók értékelésénél szem előtt kell tartani, hogy ne az értelmetlen, bemagolt tananyagot kérjük számon, hanem hogy a hallgató hogyan használja és rendszerezi az információt [8]. Az értékelésnek három fajtája lehet annak funkciója szerint: diagnosztikus, formatív és szummatív. Diagnosztikus mérés esetén a hallgatók olyan tudáselemeire, aktuális állapotára vagyunk kíváncsiak, amelyek szükségesek bizonyos ismeretek feldolgozásához. A formatív mérés során nyomon követjük az egyéni fejlődést a tanulási folyamat közben. Míg a diagnosztikus értékelés elsősorban az oktató számára szolgál visszajelzéssel, addig a formatív értékelés esetében a visszajelzés címzettje a hallgató. A szummatív mérés segítségével áttekintjük, mit értünk el. Ez a tanulási folyamat lezárásaként alkalmazható (például év végi vizsga) [9].

Mivel a tantervi követelményekben egy meghatározott ismeret, kompetencia, attitűd szerepel, ezért az értékelésben is ezeknek a területeinek kell tükröződnie. A Bloom-féle taxonómia szerint, mely hat kognitív követelményszintet – ismeret, megértés, alkalmazás, analízis, szintézis, értékelés – tartalmaz, a mérés során sem szabad az ismeret szintjén megragadni, hanem felsőbb szinteket is vizsgálni kell.

Az oktatóknak tudomásul kell venni, hogy olyan világra készítik fel a hallgatókat, ahol az ismeretanyag olyan mértékben bővül, amit nem lehet szimplán megtanulni. Ezért a számonkérést is

meg kell reformálni: a tárgyi tudás visszakeréséről az információ feldolgozó készségre, a személyes-, társas- és szakmai kompetenciákra tevődik a hangsúly. A hallgatóknak szűrni kell az információkat, fel kell azt dolgozniuk és ki kell értékelniük. Ezt közvetlenül tesztekkel nem igazán lehet mérni, inkább átfogóbb technikákkal, amelyek a megértést, alkalmazást, szintetizálást is figyelemmel kísérik.

Fontos az értékelő stratégiák között különbséget tenni. A számonkérésnek mindig tükrözni kell az oktató által használt tanítási módot. Az értékeléshez egy vagy több értékelő módszert is választhatunk. Figyelembe kell venni, hogy egy módszerrel csak kevés információ kapható a hallgató teljesítményéről. Az értékelő stratégiának illeszkedni kell a tanulási programhoz, a tantervhez és a modern tanulási technikákhoz. Egyre gyakoribbak az egyedi vagy csoportos számonkérések, a befejezetlen kérdések, kiállítások, előadások, projektfeladatok, számítógépes szimulációk, fogalmazások és hallgatói portfóliók alkalmazása az értékelés során. Ezen technikák célja, hogy figyelembe tudjuk venni az egyes hallgatók fejlődését és tanulási stílusát, hiszen a hallgatói teljesítmény a siker valós mutatója.

Az értékelés alkalmával konkrétan meg kell határozni, hogy mi az értékelés menete, célja, és végül hogyan használjuk fel az adatokat. Ha a hallgatók azt érzik, hogy felelősek a teljesítményükért, akkor egyértelmű számukra, mit kell tenniük a siker érdekében. Az értékelésben nem lehetnek ismeretlen részek, vakfoltok.

## 5. A duális hallgatók értékelése

### 5.1. Tapasztalatok

A duális hallgatók értékelésével kevés tanulmány foglalkozik. Az egyik áttekintés említi, hogy az értékelő tanulmányok fele foglalkozik a hallgatói fejlődés elemzésével, míg a többi magát a duális oktatási rendszert vizsgálja [4]. Ebben az áttekintésben a tanulmányok 75%-a kompetencialapú felméréssel (tesztírással) készült, míg csak 12,5% volt, ahol a hallgatókkal elbeszélgettek, vagy több módszert is használtak. Új Zélandon, ahol a többmódszeres kiértékelést használják, a diákok felmérésen és elbeszélgetésen vesznek részt, majd egy közös értekezleten („workshopon”), ahol egyetemi és céges szakemberek is jelen vannak [ET2] [4].

A baden-württembergi Mosbach-ban a duális hallgatókat az első, második és harmadik év végén értékelik. Az első év végén a hallgató megfelelt/nem felelt meg értékelést kap a vállalat részéről. Második év végén projekt munkát kell végeznie, melyről beszámolót kell írnia. A dokumentációt a vállalat szakemberei átnézik és javaslatot tesznek az érdemjegyre. Ezután a hallgatónak vizsgáznia kell egy egyetemi és vállalati szakemberekből álló bizottság előtt, ahol előre megadott témakörökből (tételsorból) húz a hallgató, és a vizsga után kap végleges érdemjegyet. A harmadik év végén történik a diplomamunka megvédése (prezentációja) [1].

Az egyik kanadai egyetem a következő kiértékelő technikákat javasolja [8]:

- Megfigyelés: ezzel a módszerrel viszonylag gyorsan gyűjthető információ, akár elméleti vagy gyakorlati óra ideje alatt. Az eredmények rögzíthetők ellenőrzőlistán (igen/nem), pontozólistán (1-5), vagy rövid jegyzetek/megjegyzések formájában. Fontos, hogy megtervezzük, milyen kritériumok alapján szeretnénk megfigyelni a hallgatókat és hogy a megfigyelés kezdetén a kérdőívek/értékelő lapok már készen és kéznél legyenek. Érdemes arra is figyelni, hogy minden hallgatót értékeljünk belátható időn belül.

- Fejlődéskövetés: a tantervben szerepelnek azok a szükséges készségek, amelyekkel a hallgatónak rendelkeznie kell. Annak érdekében, hogy a hallgatók komolyan vegyék és tudatosan fejlesszék ezeket a készségeket, visszajelzést kell kapniuk. Ki kell értékelni, hogy az egyes hallgatók hogyan fejlődtek/fejlődnek ezen a téren (a gyakorlati hely előtt és a gyakorlati helyen).

- Beszámoló (napló) írása: habár nem tartozik a hivatalos értékelési módok közé, mégis lehetőséget ad a hallgatóknak, hogy kifejezzék gondolataikat és ötleteiket, valamint fejlesszék információátadó készségüket. Az önértékelés folyamán a hallgató áttekintheti erősségeit, gyengeségeit, hozzáállását, érdeklődési körét és információátadó készségét.

- Elbeszélgetés/interjú: a hallgatóval való elbeszélgetés/szóbeli "vizsga" lehetőséget ad az oktatónak, hogy megbizonyosodjon arról, hogy a hallgatói tudás mögött megértés is rejlik. Beszélgetés közben a hallgató megmutathatja, hogyan képes felhasználni az információt és mennyire letisztult a tudása a témával kapcsolatban. A rövid elbeszélgetés történhet az oktató és a

hallgató között, de lehet kibővített is (hallgató, oktató, szülők és/vagy vállalati képviselő). Ezek az interjúk elősegítik a hallgatók proaktivitását az információközlés területén.

- Írásos számonkérés/dolgozat/beszámoló: ez a technika lehet formatív (folyamat közbeni) vagy szummatív (lezáró). Számos tantervben van meghatározó szerepe az írásos beszámolásnak, ami akár véleménynyilvánítás, akár konkrét számadás is lehet a megtanult anyagrészeiről.

- Prezentáció: a végzett hallgatóknak már képesnek kell lenni megszűrni, analizálni és értelmezni az információt, felismerni az összefüggéseket, csapatban dolgozni, reagálni az információra, valamint információval ellátni egymást. Ezek a tevékenységek a legjobban prezentációs előadás során értékelhetők ki.

- Portfólió: a portfóliónak tartalmaznia kell egy hosszútávú fejlődési útvonalat, amiben szerepel az elsajátított tudás és készségek. A fejlődés nyomon követése fontos az önreflexió és önértékelés szempontjából, de jelentősége van annak is, hogy ezt megossza másokkal. Sok hallgatónak izgalmas a portfólió-készítés, mert így látja azt a sok fejlődést, ami egyébként nehezen követhető nyomon.

- Személyre szabott munkahelyi tanulási terv: ez a technika felméri azokat a készségeket, amelyekkel a hallgató már rendelkezik, és megtervezi, mely készségeket kell fejlesztenie a gyakorlati ideje alatt, amíg a vállalatnál dolgozik.

## 5.2. Javaslatok

Ahhoz, hogy a duális képzés mindhárom szereplője elégedett legyen, a hallgatói teljesítményt, a vállalat megfelelőségét és a duális program tevékenységi körét is vizsgálni és ellenőrizni kell [5].

Jelen esetben a duális hallgatók vállalatnál végzett tevékenységének megismerése és értékelése a célunk. A vállalat megfelelőségének és a duális program egészének értékelése, ellenőrzése nem része vizsgálódásunknak. Ezek a területek külön kutatást és elemzést igényelnek.

A fenti példákat alapul véve logikusnak tartjuk több típusú értékelési mód ötvöztetését. A duális hallgatók fejlődésének nyomon követése jól megoldható lenne valamilyen tevékeny és/vagy szóbeli technikával, pl. prezentáció, portfólió, projektfeladat bemutatás. Fontos, hogy a hallgató is érezze, hogy szüksége van erre a beszámoltatásra, és ne csak nyűg legyen neki, amin minél hamarabb túl kell esnie. Ilyen szempontból előnyös a prezentáció, amely viszonylag hamar kész van, szemléletes, egymás előadásaiból pedig sokat lehet tanulni. Megvalósítására alkalmasak lehetnek olyan közösségi rendezvények, mint a hallgatói konferenciák és/vagy workshop-ok. A projektfeladatok jól nyomon követhetők portfólió segítségével, ami akár digitálisan is elkészíthető. A hallgatóknak célszerű lenne kitölteni egy kérdőívet tanulmányaik végén, amelyben leírhatják tapasztalataikat a vállalatnál elvégzett munkáról, és azt, hogy miben fejlődtek a képzés során. Az írásbeli kommunikáció előnye, hogy lehetőséget nyújt az anonimitásra, ezért nem lesz „meghamisítva”/szépitve az információ. Energiahatékonyság szempontjából az online kitöltés lenne kedvező.

A vállalatoknak célszerű kitölteni egy hallgatói teljesítmény kérdőívet a hallgató képzési idejének vége felé. Ezután a hallgatónak és vállalati koordinátornak közösen át kell beszélnie a leírtakat. A kérdőív átkerül az egyetemhez, ahol az egyetemi koordinátor átnézi, és ezután erről elbeszélget a hallgatóval. A kérdőív tartalmának illeszkedni kell a hallgató feladatköréhez.

## 5.3. Duális és nem duális hallgatók összehasonlítása

Lehetőség van arra is, hogy a kezdés előtt és a végzés után felmérőt íratnak a hallgatókkal, hogy visszacsatolást kapjanak a fejlődésükről [2]. Ezzel a módszerrel a duális és nem-duális hallgatók is összehasonlíthatók. A köznapi szóhasználatban használt IQ tesztek erre nem igazán alkalmasak. A műszaki területen tanulónak alkalmas lehet a kompetenciaalapú szakmai teszt, amelynek a Neumann János Egyetemen három specifikációja érhető el: mechanikai értelmezés, diagramok elemzése (logikus gondolkodás) és numerikus elemzés (gazdasági szemléletmód). Emellett használható lehet a nehezített Raven teszt is, mely általános kompetenciát mér. A nehezített jelző utal arra, hogy felsőoktatásban/érettségizetteknek javasolt. A specifikus kompetenciatesztekről ajánlott tájékoztatni a duális partnereket, együttműködésükkel a tesztek egyszerűbben megíráthatók, a hallgatók beleegyezése könnyebben elnyerhető. Ezeket a teszteket

sok vezető külföldi vállalat használja például állásinterjú részeként. A tesztek minősége bizonyított, titkos tartalma miatt megírása csak papír alapon történhet.

A duális és nem duális hallgatók összehasonlíthatók kérdőív kitöltésével is. Törekedni kell a minél tömörebb megfogalmazásra a motiváltság fenntartásához (minél többen töltsék ki) és a kiértékelés idejének optimalizálására.

## 6. Összegzés

A duális képzés- az egyetem és a vállalatok együttműködése az egyetemi hallgató oktatása során- már hazánkban is népszerű oktatási forma, viszont a hallgatók szakmai fejlődésének nyomon követése még nem megoldott, részben rövid múltja, részben a vállalatok sokszínűsége miatt. Munkánk során áttekintettük a külföldi példákat, a már működő kiértékelő technikákat és javaslatot tettünk, melyek lehetnek a megfelelőek a Neumann János Egyetem számára.

Javasolt, hogy mindig többféle módszert alkalmazzunk (legalább egy írásos és egy szóbeli kiértékelést). A duális hallgatók fejlődésének nyomon követése jól megoldható lenne valamilyen tevékeny és/vagy szóbeli technikával, pl. prezentáció, portfólió, projektfeladat bemutatás. Megvalósítására alkalmasak lehetnek olyan közösségi rendezvények, mint a hallgatói konferenciák és/vagy workshop-ok. A duális és nem duális hallgatóknak célszerű lenne kitölteni egy kérdőívet tanulmányaik végén, amelyben leírhatják miben fejlődtek a képzés során. Lehetőség van arra is, hogy a kezdés előtt és a végzés után felmérőt íratnak a hallgatókkal, hogy visszacsatolást kapjanak a fejlődésükről. Ezzel a két módszerrel a duális és nem-duális hallgatók összehasonlíthatók, ezáltal a duális hallgatók fejlődése számszerűsíthető.

A végleges számonkérés összeállításánál figyelembe kell venni a kitöltés idejét - minél rövidebb, annál szívesebben tölti ki a hallgató -, az értékelés idejét - online kitöltés a leggyorsabb -, illetve a kapott információ minőségét, anonim teszt esetén őszintébbek a válaszok.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Duale Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart [Online]. <http://www.dhbw-stuttgart.de>
- [2] Sone White: An Analysis of the Best Practices of Cooperative Education in the US with the Purpose of Addressing Various Armenian Engineering Education Problems <https://scholarsarchive.byu.edu/etd/3145/>
- [3] Toshiaki Kato and Yukihiro: Development and Evaluation of Cooperative Education Program in the Developmental Stage: Our New Evaluating Approach for a Challenging Higher Education. I Cooperative education at Ritsumeikan University (RU) [http://www.waceinc.org/papers/madrid/Toshiaki\\_Kato\\_and\\_Yukihiro\\_Hirose.pdf](http://www.waceinc.org/papers/madrid/Toshiaki_Kato_and_Yukihiro_Hirose.pdf)
- [4] Anthony Joseph, Pace University and Mabel Payne tanácsadó: A Review Of The Assessment Literature On Cooperative Education in Higher Education 2010. <https://peer.asee.org/a-review-of-the-assessment-literature-on-cooperative-education-in-higher-education.pdf>
- [5] CAFCE Co-operative Educational Manual <https://www.cewilcanada.ca/Library/documents/coopmanual.pdf>
- [6] Török Erika: A duális képzés felsőoktatásban betöltött innovációs szerepe. In: Fodorné Tóth Krisztina (szerk.) Felsőoktatás, életen át tartó tanulás és az ENSZ fenntartható fejlesztési célok megvalósítása: Higher Education, Lifelong Learning and Implementation of UN Sustainable Development Goals. Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2017.04.20-2017.04.21. Pécs: MELLearn Egyesület, pp. 187-197. ISBN:978-963-429-173-2
- [7] Török Erika, Pap-Szigeti Róbert, Ailer Pirooska, Palkovics László: A Kecskeméti Főiskola duális képzésének monitoring vizsgálata a hallgatók visszajelzései alapján. A jövő járműve: járműipari innováció 6:(1-2) pp. 32-36. (2014)
- [8] Cooperative Education Curriculum, Prince Edward Island (Kanada) 2007. <https://www.princeedwardisland.ca/en/information/education-early-learning-and-culture/cooperative-education-curriculum>
- [9] Radnóti Katalin: Milyen oktatási és értékelési módszereket alkalmaznak a pedagógusok a mai magyar iskolában? In: Kerber Zoltán (Szerk.) Hidak a tantárgyak között. Országos Közoktatási Intézet, Budapest. 131-167. o. 2006.

# A KECSKEMÉTI VEGYES FELHASZNÁLÁSÚ REPÜLŐTÉR SWOT-ANALÍZISE A SZEMÉLYSZÁLLÍTÁS SZEMSZÖGÉBŐL

## SWOT ANALYSIS OF THE MIXED USE OF KECSKEMÉT AIRPORT FROM THE PERSPECTIVE OF PASSENGER TRANSPORTATION

Boldizsár Adrienn<sup>1</sup>, Lelkes Zoltán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Szervezéstudományi és Logisztikai Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Informatika Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

### Kulcsszavak:

Kecskemét, vegyes felhasználású repülőtér, SWOT-analízis, régiófejlesztés

### Keywords:

Kecskemét, mixed-used airport, SWOT-analysis, region development

### Cikk történet:

Beérkezett 2018. október 19.  
Átdolgozva 2019. március 4.  
Elfogadva 2019. március 18.

### Összefoglalás

A kecskeméti MH59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis napjainkban kizárólag katonai céllal üzemel. A városban jelenleg több nagy multinacionális cég is működik, akik igényt tartanak egy közeli polgári repülőtér használatára. A katonai repülőbázisok polgári célú felhasználásának ötlete nem új keletű dolog. A világban számos helyen élnek ezzel a lehetőséggel annak érdekében, hogy csökkentsék a polgári repülőterek terhelését. SWOT-analízis segítségével megvizsgáltuk a kecskeméti repülőtér jelenlegi helyzetét. Napjainkban is komoly törekvések folynak annak érdekében, hogy a bázist vegyes felhasználásúvá alakítsák, vagyis elérhetővé váljon a civil felhasználók számára is.

### Abstract

The use of military air bases for civilian purposes is not a new idea, there are many places in the world where they make full use of this possibility to reduce the excessive reliance on the civilian airports. We have examined this kind of usability of military airports at Dezső Szentgyörgyi Air Base, in Kecskemét, Hungary. As a result of our research it seems that it may be the first mixed-service airport in the country. At the same time, an appropriate technical, infrastructural and personal background is indispensable to establish a mixed-use airport. The examination and result of this will be presented in detail subsequently. The implementation of the civilian part would be of course a challenge but everything is set to create a mixed-use air base with relatively little improvements.

## 1. Problémafelvetés és a SWOT–analízis módszertana

A katonai-civil repülőtér kialakításánál döntő kérdés lehet, hogy lesz-e akkora utazó

<sup>1</sup> Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76/516-344  
E-mail cím: boldizsar.adrienn@gamf.uni-neumann.hu



közönség, melyre érdemes alapozni, érdemes-e a repülőtér ilyen céllal üzemeltetni. Megfelelő marketinggel és stratégiával valós alternatívaként jelenhet meg a budapesti repülőtér mellett. A SWOT-elemzést az 1. Táblázat tartalmazza.

A SWOT egy angol mozaikszó, mely az elemzés lényegére világít rá: [1]

- **S** (Strengths=Erősségek): feltárjuk az elemzés tárgyának erősségeit. Fontos kihangsúlyozni azokat a szempontokat, amelyek egyedivé teszik.
- **W** (Weaknesses=Gyengeségek): a gyengeségek felismerése, és azok kijavításának módjai.
- **O** (Opportunities=Lehetőségek): lehetőségek feltárása.
- **T** (Threats=Veszélyek): veszélyek felfedése, esetlegesen azok kikerülésének lehetőségei.

**1. Táblázat. SWOT-analízis a kecskeméti repülőbázisra vonatkozóan**

| <b>ERŐSSÉGEK</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>GYENGESÉGEK</b>                                                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mercedes gyár jelenléte, és annak távolsága</li> <li>- a város földrajzi helyzete</li> <li>- megközelíthetőség</li> <li>- rendelkezésre áll egy kész repülőtér, futópálya</li> <li>- 24 órás üzem áll rendelkezésre</li> <li>- szakszerű munkaerő, irányítók</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Budapesttől való távolság</li> <li>- Kecskemét turisztikai helyzete</li> <li>- tömegközlekedés hiánya</li> <li>- lakott területhez közel fekszik</li> <li>- nem nyilvános repülőtér kategóriába kerül majd besorolásra</li> </ul> |
| <b>LEHETŐSÉGEK</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <b>VESZÉLYEK</b>                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>- versenyképes menetrend kialakítása, jobb indulási időpontok</li> <li>- kedvezmények</li> <li>- turizmus fellendítése</li> <li>- katalizátorként hatna a régióra, munkahelyteremtés</li> <li>- az újonnan beszerzett szállító repülőgépek is tudnak bérszállításokat végezni</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- katonai üzem, készenléti riasztás</li> <li>- a bázis célpontot is jelenthet</li> <li>- munkaerőhiány</li> </ul>                                                                                                                   |

## 2. Erősségek

A következőkben az 1. Táblázatban feltüntetett erősségeket fejtjük ki.

### 2.1 A Mercedes gyár jelenléte, és annak távolsága

A gyár jelenléte a városban nem csak az ott dolgozók számára nagy lehetőség, de a repülőtér számára is óriási előnyt jelent. A cég jelenleg stabilan ott van a város életében partnerként működve, így a repülőtér életében is egy biztos pontot jelenthet, ugyan úgy, mint a Győr-Pér Repülőtérnél az AUDI gyár. Nem elhanyagolandó szempont, hogy a bázis és a gyár között relatíve kis távolság van, kb. 7 km (a győri repülőtér kb. 13 km-re van a gyártól, és még így is megéri a használata). A repülőtér szemszögéből ez egy igen fontos tényező, ugyan is a gyárba érkező külföldi mérnökök, üzletemberek igénybe vehetik a repülőtér szolgáltatásait. [2]

### 2.2 A város földrajzi helyzete

A városnak jók a földrajzi adottságai, ugyan is megközelítőleg az ország közepén található, és viszonylag rövid utazási idővel az ország bármely pontja, vagy éppen bármely határszakasz (kilépő pont) elérhető onnan. [2]

### 2.3 Megközelíthetőség

Ez az erősség valamilyen szinten összefügg az előzővel, mivel viszonylag jó elhelyezkedésű a város, jó közlekedési hálózat is kapcsolódik hozzá. A város mellett megy el az M5-ös autópálya, mely a fővárost, Kecskemétet és Szegedet köti össze a röskei határátkelővel. Közvetlenül a



repülőtér mellett megy el a 44-es számú főút, mely Kecskemétet Gyulával köti össze, és jelentős tranzit útvonalat jelent a Románia felől érkezőknek. Az idei év folyamán komoly fejlesztések és munkálatok is indultak az M44 építésével kapcsolatban, melynek segítségével a keleti határszakasz még gyorsabban elérhetővé válik. Ezen kívül nemrég adták át a 445. sz. főút Kecskemét északi elkerülő szakaszt, amely szintén biztosítja a repülőtér gyors elhagyását, valamint közvetlen kapcsolatot az M5-ös autópályával. A bázis nem messze helyezkedik el a városközponttól, kb. 4 km-re, ahol egy helyen található meg a buszpályaudvar és a vasútállomás is. [2]

### **2.4 Már van egy kész repülőtér, futópálya**

Mindenképpen nagy előny, hogy egy meglévő repülőtérrel beszélünk, rendelkezésre áll egy kész futópálya, illetve egyéb alapvető infrastrukturális elemek, amelyek kis kihasználtsággal üzemelnek. A pályát nagyobb utasszállító gépek is tudják használni, például A320. Ennek a típusnak a legnagyobb felszállási úthossza 2090 m, míg például a WizzAir által újonnan alkalmazott A321-esnek 2180 m. [3] Ilyen szinten nincs szükség futópálya hosszabbításra, elég a 2499 m-es hosszúság, és a civil terminál rész kialakításán, illetve elkülönítésén kívül gyakorlatilag minden rendelkezésre áll a repülőtéren.

### **2.5 Eleve 24 órás üzem van**

Ahhoz, hogy a katonai bázis maradéktalanul teljesítse a feladatát, az ott dolgozó katonák 24 órás szolgálatot látnak el. Ez azt jelenti, hogy a repülőtér folyamatosan üzemben van, bármikor lehet azt használni.

### **2.6 Szakképzett munkaerő, irányítók**

Jelenleg a kecskeméti repülőtéren szakszolgálati engedéllyel rendelkező katonák látják el maradéktalanul az irányítással kapcsolatos feladatokat. A jelenlegi jogszabályok szerint még problémát jelent a közös irányítás lehetősége. A katonai légiforgalmi irányítói tevékenység nagyban hasonlít a polgári légiforgalmi irányítói tevékenységhez, sőt, alkalmanként még összetettebb feladatmegoldást igényel, ugyanakkor továbbra sincs lehetőség a katonai szakszolgálati engedélyek nemzetközi szintű elfogadására, illetve a polgári engedélyekkel való együttműködésre. Összességében elmondható, hogy ez a terület a vegyes felhasználás tekintetében még szabályozásra vár, de nem szabad megfeledkezni a repülőtéren dolgozó irányítókról, akik megfelelő jogszabályozási és bérezési keretek között tökéletesen ellátnák a polgári forgalomból adódó feladatokat is.

## **3. Gyengeségek**

### **3.1 Budapesttől való távolság**

A budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér és a kecskeméti repülőbázis között a távolság kb. 97 km, amely személygépjárművel az M5-ös autópályán keresztül hozzávetőlegesen 1 órás utat jelent. Ez a mai világban már nem igazán okozhat problémát a távolság leküzdésében, ugyanakkor ebből előnyre is lehet szert tenni. [2]

### **3.2 Kecskemét turisztikai helyzete**

A térség turisztikai helyzete jelenleg nincs igazán fellendítve. A város a Duna-Tisza közén, a Kiskunság szívében található. Turisztikai céllal inkább belföldi utazások vannak a városban, illetve környékén. A város viszonylag kicsi, kb. 112 ezren lakják. A táj teljesen sík, jellegzetessége a homokos, szikes talaj, amelynek ugyan meg van a maga szépsége, de nem feltétlenül turisztikai látványosság. [4]

### **3.3 Tömegközlekedés hiánya**

Mivel kis városról van szó, a tömegközlekedése nem túl kifejlett. Gyakorlatilag csak busz áll rendelkezésre az utazónak a városon belül helyváltoztatás céljára. A repülőtérhez a 4, 4A és 4C jelölésű buszjáratok tartoznak. Az utóbbi időben ugyan történt a járatok sűrítése és fejlesztése

irányába változás (például meghosszabbították a 4-es busz útvonalát), de egy civil forgalmat is kiszolgáló repülőtérnek ennél jóval nagyobb kapacitásra lesz szüksége. [4]

### **3.4 Lakott területhez közel fekszik, megnövekedett zajterhelés**

A katonai bázis életében jelenleg is komoly gondot okoz a zajterhelés okozta panaszok, gyakorlatilag napisintű telefonok és bejelentések vannak. A repülőtér üzeméből adódóan a vadászgépek igen komoly zajterhelést okoznak a városlakóknak. Továbbá probléma még, hogy a város gyakorlatilag rátelepült a bázisra, ugyanis az az 1940-es években történő kiépítéskor még jóval távolabb helyezkedett el a városközponttól. [5] A vegyes felhasználás okozta megnövekedett forgalom jóval nagyobb zajterhelést jelentene a kecskemétiak számára, amely további zajvédelmi intézkedéseket is szükségessé tenné.

### **3.5 Nem nyilvános repülőtér kategóriába kerül majd besorolásra**

A 2016. évi törvény légiközlekedésről szóló 1995. évi XCVII. törvény szerint a kecskeméti közös felhasználású repülőtér a nem nyilvános repülőtér kategóriába kerül majd besorolásra. A repülőtér létesítésének, fejlesztésének és megszüntetésének szabályairól szóló 159/2010. (V. 6.) Korm. rendelet hatályos szövege alapján, a nemzetközivé nyilvánított kereskedelmi repülőtereket és a kereskedelmi repülőtereket követő harmadik, vagy alacsonyabb osztályba tartoznak a polgári célú nem nyilvános repülőterek, amelyről legfeljebb vállalati célú légiközlekedési tevékenység végezhető. A nem nyilvános repülőtéren kizárólag a tulajdonos, illetve az üzemben tartó engedélye alapján vehető igénybe. [6]

## **4. Lehetőségek**

### **4.1 Versenyképes menetrend kialakítása, jobb indulási időpontok**

Egy jól megtervezett menetrend nagyon sokat lendíthet egy újonnan induló repülőtér életében. A kecskeméti vegyes felhasználású bázis a budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér mellett jelenhet meg versenytársként. A budapesti repülőtér menetrendjében a nagyobb forgalomból, illetve a fapados légitársaságok működéséből adódóan vannak igen kedvezőtlen indulási és érkezési időpontokkal rendelkező járatok, amelyek befolyásolhatják az utasok közlekedési viselkedését is. Ha például a kecskeméti repülőtér ezekre a kedvezőtlen időpontokra kínál egy jobb megoldást, mind az utas, mind pedig a légitársaságok számára, komoly konkurenciaként jelenhet meg a piacon.

Megvizsgálva a Budapesti Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtér honlapját, egy átlagos, hétköznapi napon összesen körülbelül 30 olyan járatot találtunk, aminél lehetne jobb indulási, vagy érkezési időponttal üzemeltetni. Ha ezeknek akár csak az 1/3-ad részét sikerülne átszabítani a kecskeméti bázisra, viszonylag jó forgalmat lehetne kialakítani már a kezdetekben, melyet a következő számpéldával támasztok alá. Vegyünk példának egy A320-as repülőgépet. Ebben a típusban összesen 150 utas tud helyet foglalni. Tegyük fel, hogy az év 365 napjában ennyi utas minden nap közlekedik a repülőtéren azzal a 10 járatral, amit sikerült áttelepíteni a bázisra. Egy nap összesen  $10 \cdot 150$ , azaz 1500 ember érkezik, vagy indul el a bázisról. Ez az év 365 napján  $365 \cdot 1500$ , vagyis 547500 fő, ami már egy igen jelentős létszámnak számítana egy ekkora repülőtér életében.

### **4.2 Kedvezmények**

Az utazó közönség számára különböző kedvezményekkel tehetjük vonzóvá a repülőteret. Ezeket a kedvezményeket két részre oszthatjuk. Egyrészt vonatkozhatnak magára a repülőtérré, illetve a repülésre. Ilyen lehet, ha például a kecskeméti repülőtér összedolgozva a különböző légitársaságokkal, olcsóbb jegyet tud biztosítani az utasoknak. Ha megvalósulnának a tervek, és valóban lenne utasforgalom is a bázison, az esetleges légitársaságok, akik jelen lehetnek a repülőtéren, kis repülőtéri illeték mellett valószínűleg tudnának ilyen kedvezményt biztosítani, és esetleg alálicitálni a budapesti áraknak.

Kezdetben maga a repülőtér is ajánlhatna különböző lehetőségeket azoknak a légitársaságoknak, akik használni kívánják a bázist, így odacsábítva azokat. Szóba jöhet például annak a helynek a kialakítása, ahol a fapados légitársaságok várakoztatják az utasaikat. A Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren több fapados légitársaság is úgy oldotta meg ezt a problémát, számukra a legköltséghatékonyabb módon, hogy egy pár darab „sör sátrat” állítottak fel az utasok fogadására. Ezek igen kényelmetlenek, nem lehet sehol sem leülni, sem mosdóba menni, pedig az esetleges késések miatt akár több órát is itt tölthet az ember. Télen hideg, nyáron pedig meleg a sátor. Igaz, ezt a megoldást valóban a diszkont társaságok használják annak érdekében, hogy csökkentsék a költségeiket, és még alacsonyabban tarthassák a jegyárakat. Ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy manapság egyre jobban elterjedtek ezek a társaságok, és egy olyan kis repülőtéren, mint amilyen a kecskeméti lehet, nagy valószínűséggel ezek a társaságok lehetnek jelen. A kialakításnál érdemes lehet erre odafigyelni, és ha nem is luxuskörülményeket biztosítva, de ezeknek a légitársaságoknak ki lehetne építeni egy ingyenesen használható várakozó és beszállító helyet ezzel számukra és az utasok számára is vonzóbbá téve a repülőtér.

A kedvezmények további lehetősége lehet a repüléshez kapcsolódó egyéb, kiegészítő szolgáltatások. A repülőtér környékén jelenleg semmilyen nagyobb kapacitású parkoló terület, vagy parkoló ház nincs kiépítve, pedig az elengedhetetlen. Egy hosszabb utazás során nem mindegy, hogy az utas hol és milyen áron hagyja ott személygépjárművét, ha azzal közelítette meg a repülőtér. Ennek a kiépítése után a budapesti repülőtér környékén lévő parkolóknál lehetne olcsóbb helyeket biztosítani úgy, hogy például egy hosszabb utazás során, amikor az autót sokáig kellene egy helyben hagyni, megérje ebből a szempontból Budapest helyett Kecskemétet választani.

Korábban gyengeségként említettük azt, hogy a Budapest és Kecskemét közötti távolság elég kicsi, gyakorlatilag egy óra alatt meg lehet tenni. Ugyan akkor ebből a közelségből előnyt is lehet kovácsolni, ha például Budapestről rendszeres buszjáratokat indítunk közvetlenül a repülőtérre, összegyűjtve az egyes járatok utasait. Budapest azért is lenne jó megoldás, mert az ország közlekedési hálózata alapvetően úgy van kialakítva, hogy gyakorlatilag bárholnan fővárosunkat tudjuk a legegyszerűbben elérni. A buszjáratok jegyeit ki lehet úgy alakítani, hogy megérje ezt a szolgáltatást választani például személygépjármű helyett, mégis kényelmes utazást biztosítva az utasoknak már a repülés előtt.

#### **4.3 Turizmus fellendítése**

A gyengeségeknél már szintén említettük, hogy a régió turizmusa nincs igazán előtérbe helyezve, és jelenleg inkább a közelben lévő belföldi utazók számára nyújt szórakozást a város és környéke. Ha nem is olyan céllal, hogy az utazóközönség csak azzal a céllal érkezzen a városba, hogy a hely turisztikai nevezetességeit nézze meg, azért mindenképpen van lehetőség, hogy azon javítva akár több napot is eltöltsenek a városban a Magyarországra érkező turisták, mintegy állomásként megjelenítve a várost. Utazási irodák akár magyarországi körutazásokat is szervezhetnének, összefogva a repülőtérrel, kezdőpontként Kecskemét és környékét bemutatva. Turisztikai szempontból is érdekes lehet a Mercedes gyár, ugyanis van lehetőség gyárlátogatásra azok számára, akiket érdekel az autógyártás, illetve egy ekkora cég működése. Egy körutazás során Kecskemét és környékén ezeket a nevezetességeket lehet a legérdekesebb megnézni, amely kb. 2-3 napot vehet igénybe. Innen meg lehet szervezni a Balaton felé irányuló utazást, ahol természetesen számos látnivaló van. Balaton után pedig érdemes lehet Budapestre ellátogatni. A Kecskemét-Balaton-Budapest körutazás érdekes és tartalmas élményt nyújthat a külföldről érkező turisták számára is.

#### **4.4 Katalizátorként hatna a régióra, munkahelyteremtés**

Egy civil forgalom számára is elérhető repülőtér mindig katalizátorként hat az adott régió életére. Ez valószínűleg Kecskemétre is igaz lenne, fellendítené a turizmust, a szolgáltatások értékét megnövelné. A nagyobb és kisebb cégek számára egyaránt vonzóbbá tenné egy olyan várost, amely saját repülőtérrel rendelkezik, a befektetők számára jó célpont lehetne. Jó példa erre a nemrégiben bejelentett BMW gyár építése Debrecenben, ahogy fontos szempont volt, hogy a

városban már működik egy nemzetközi forgalmat lebonyolító repülőtér. [7] Nem csak közvetve lehetne munkahely teremtő, a repülőtér civil részének működtetésére elengedhetetlen lenne új munkaerő felvétele, ugyan is főleg a földi kiszolgálást, illetve a terminál működtetését nagy valószínűséggel nem az ott dolgozó katonák végeznék, nekik nem ez a feladatuk.

#### **4.5 Az újonnan beszerezett szállítórepülőgépek is tudnak bérszállításokat végezni**

A Magyar Honvédség a Zrínyi 2026 Honvédelmi és Haderőfejlesztési Program keretén belül a fejlesztések egyik kiemelt és fontos területe a Magyar Honvédség merevszárnnyú képességének fejlesztése olyan formában, hogy a kiöregedett és sok esetben már üzemképtelen An-26-os repülőgépek helyett a különböző feladatokra specializált flotta álljon a honvédelem rendelkezésére.

Az idei évtől több szállítórepülőgéppel is bővült a flotta. Februárban 2 db A319-es személyszállító repülőgép érkezett a kecskeméti repülőtérre (terveben van egy harmadik is), augusztusban pedig egy Falcon 7X típusú gép. 2026-ig tervben van még további típusok beszerzése is. Mindez akár lehetővé teszi azt is, a Belga Haderő mintájára, akik jóval nagyobb szállítókapaacitással rendelkeznek, mint azt szükséges feladatok indokolnák, hogy nem csak a Honvédség feladatait lássák el, hanem azon túlmutatva bérszállításokat is vállaljanak. Ehhez kitűnő kiindulási helyszín lehet a vegyes felhasználású kecskeméti Repülő Bázis. [8]

## **5. Veszélyek**

### **5.1 Katonai üzem, készenléti riasztás**

Nem feledkezhetünk meg arról, hogy a repülőtér eredetileg katonai felhasználású, és feladata az ország légterének védelme. A polgári üzem semmiképpen sem akadályozhatja abban a bázist, hogy maradéktalanul elláthassa a feladatát.

### **5.2 A bázis célpontot is jelenthet**

Egy repülőtér, illetve maga a légiközlekedés alaptól ki van téve terrorfenyegetettségnek, nem véletlenül jöttek létre a szigorú biztonsági intézkedések. Egy vegyes felhasználású repülőtér életében ez még nagyobb jelentőséget kaphat, ugyan is, ha egy országot megtámadnak, kiemelt célpontot jelent egy katonai bázis, elsősk között lehet a megsemmisítésben, így az ott megforduló civilek is nagyobb veszélyben vannak.

### **5.3 Munkaerőhiány**

Hazánkban jelenleg is komoly gondot okoz a munkaerőhiány, illetve a potenciális munkavállalók kivándorlása az országból. Ami korábban lehetőségként volt megemlítve, hogy katalizátorként hatna a régióra, az ugyanakkor veszélyként is megjelenhet, ha a közös felhasználású repülőtér üzemeltetése akkora friss munkaerőt igényelne, amelyet a régió nem képes ellátni.

## **6. Stratégiai elemzés, összegzés**

Az elemzés eredményességének és felhasználhatóságának egyik kulcs kérdése, hogy a kapott tényezők tekintetében hogyan tudjuk a veszélyeket és gyengeségeket minimalizálni, valamint az erősségeket megszilárdítani, és a lehetőségeknek teret adni, maximalizálni.

A bázis jellegéből adódóan nem vonatkoztathatunk el attól, hogy egy elsődlegesen katonai felhasználású repülőtérrel van szó. Ugyanakkor egy ilyen kis ország esetében egy katonai támadás valószínűleg kihatna az egész országra, nem csak a repülőtér jelenlévőket érintené. A katonai üzemnek köszönhetően, illetve a nem kereskedelmi üzemből adódóan a feladatok nagy részét a bázison dolgozó katonák fogják ellátni. Következésképpen a munkaerőhiány nagy valószínűséggel nem jelentene azonnali gondokat, de a későbbiekben, ha betölti a katalizátor szerepet a régióban, komoly problémát is okozhat, így mindenképpen érdemes odafigyelni erre a tényezőre.

A gyengeségek nagy részéből kiderült, hogy előny, valamint számos lehetőség is kovácsolható, mint például a fővárosunkhoz való helyzete a városnak. A katonai felhasználásnak

köszönhetően a repülőtér üzemeltetése piaci szemszögből nézve jelenleg veszteséges, mivel semmilyen bevételforrása nincs, a funkcióját viszont el kell látnia. A lehetőségek között bemutatott kedvezmények jól szemléltetik, hogy ha nem is a legnagyobb profit megszerzése a cél, a gazdaságos üzemeltetés szinte mindenki számára előnyös lenne, kezdve az egyes légitársaságoktól fogva egészen az utasokig. A lassan zsúfoltá váló budapesti repülőtér mellett a kecskeméti vegyes felhasználású bázis komoly alternatívát jelent a fapados légitársaságok számára.

A város többek között a Mercedes-Benz Manufacturing Hungary Kft-nek köszönhetően jelentős fejlődésen ment keresztül az utóbbi évtizedben, amely indokolta teszi a katonai bázis megnyitását a civil forgalom előtt. Nem utolsó szempont, hogy akár komoly bevételi forrásként is tekinthető a vegyes felhasználás mind a Magyar Honvédség, mind pedig Kecskemét város életében. A bemutatott erősségek olyan tényezőket tartalmaznak, amelyek teljes mértékben alátámasztják azt, hogy miért logikus döntés megnyitni az MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis a polgári forgalom számára is. Összességében elmondható, hogy a kecskeméti repülőtér közös felhasználásának kialakítása nem véletlenül került a kiemelt beruházások közé.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az **EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg.** A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] SWOT elemzés. [Online]. Available: <http://www.nefmi.gov.hu/main.php> [Megtekintés: 16-July-2018]
- [2] Kecskemét földrajzi helyzete. [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/@46.9015846,19.6795728,14.08z> [Megtekintve: 01-Aug-2018]
- [3] Airbus repülőgépek adatai. [Online]. Available: <https://www.airbus.com/aircraft/passenger-aircraft/a320-family.html> [Megtekintve: 10-Aug-2018]
- [4] Kecskemét Megye Jogú Város Honlapja. [Online]. Available: <http://kecskemet.hu/> [Megtekintve: 06-Aug-2018]
- [5] MH 59. Szentgyörgyi Dezső Repülőbázis. [Online]. Available: <http://mh59.hu/> [Megtekintve: 11-Aug-2018]
- [6] 2016. évi törvény a légiközlekedésről szóló 1995. évi XCVII. törvény módosításáról
- [7] BMW Group Gyár Debrecen. [Online]. Available: <https://www.bmwgroup-plants.com/debrecen/hu.html> [Megtekintve: 15-Aug-2018]
- [8] Magyar Honvédség. [Online]. Available: <https://honvedelem.hu/hirek> [Megtekintés: 29-Aug-2018]

# SZÖGDISPERZIÓT SZENVEDETT ULTRARÖVID FÉNYIMPULZUS TERJEDÉSE

## PROPAGATION OF ANGLE-DISPERSED ULTRASHORT LIGHT PULSES

Kőházi-Kis Ambrus\*

Természet- és Műszaki Alaptudományi Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar,  
Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Ultrarövid fényimpulzus  
Terahertz generálás  
Impulzusfront dőlés  
Szögdisperzió  
Paraxiális közelítés

### Keywords:

Ultrashort light pulses  
THz generation  
Pulse front tilt  
Angular dispersion  
Paraxial approximation

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 7.  
Átdolgozva 2019. február 10.  
Elfogadva 2019. március 12.

---

---

### Összefoglalás

Optikai rácson, illetve diszperziós prizmán átjutva a fényimpulzus spektrális komponensei eltérő irányokban terjednek tovább. Az impulzus az elektromágneses térnek hullámfrontjaira merőlegesen terjed, de az impulzusfrontja (burkolójának alakja) ezen terjedési irányhoz képest megdől. Az impulzus dőlési szög és az impulzus időtartama a terjedés során erőteljesen változik. Ultrarövid fényimpulzusok ilyen jellegű viselkedése fontos szerepet játszik a terahertzes impulzusok keltésének napjainkban rohamosan fejlődő technikájában.

### Abstract

Spectral components of an ultrashort light pulse after a dispersive optical element (optical grating or a dispersive prism) propagate to different directions – the light pulse angularly dispersed, the pulse front is tilted relative to the propagation direction. This kind of behavior plays an important role in the generation of terahertz pulses.

---

## 1. Bevezetés

Ultrarövid fényimpulzusok impulzusfrontja megdől a terjedési irányhoz képest, ha az impulzus szögdisperziót szenved optikai rácson elhajolva, vagy prizmán áthaladva [1]. Modern optikai kutatások során gyakran alkalmazzák ezt, így tudják az impulzusokat időben kinyújtani, vagy esetleg összenyomni [2]. 2018-ban a fizikai Nobel-díjat Gérard Mourou és Donna Strickland az ultrarövid fényimpulzusok hatékony erősítésének kidolgozásáért kapták, amelyben nagy szerepet kap a fényimpulzusok kinyújtása, majd összenyomása (CPA – Chirped Pulse Amplification) [3].

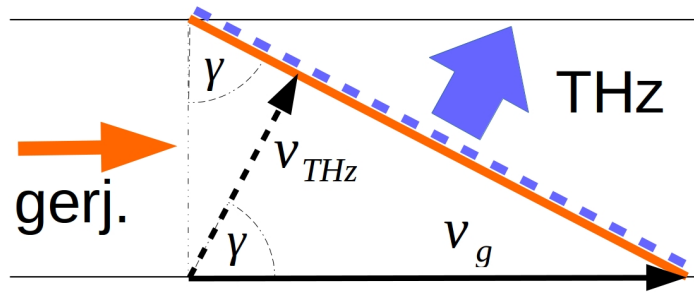
Nagyon fontos szerepet játszik az ultrarövid fényimpulzusok pulzusfrontjának megdöntése a rövid, intenzív terahertzes ( $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$ ) impulzusok keltésekor is. Ezeket a gyakorlatilag egyetlen hullámhosszúságú, pikoszekundumos ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ) impulzusokat ultrarövid optikai ( $f \simeq 10^{14} \text{ Hz}$  frekvenciájú) impulzusok nemlineáris optikai egyenirányítása révén lehet a leghatékonyabban keltetni [4, 5, 6]. Az optikai nemlinearitás hatékony kiváltásához nagy fényintenzitásra van szükség, amit femtoszekundumos időtartamú impulzusokkal lehet elérni. Illeszteni kellene a keltő jel csoportsebességét ( $v_g$ ) és a keltett jel terjedési fázissebességét ( $v_{THz}$ ) a nemlineáris közegben (fázisillesztés).

A terahertzes jel keltéséhez olyan anyagra van szükség, amely nem nyeli el a keltetni kívánt terahertzes sugárzást, másrészt megfelelően nagy nemlinearitása legyen az optikai egyenirányítás

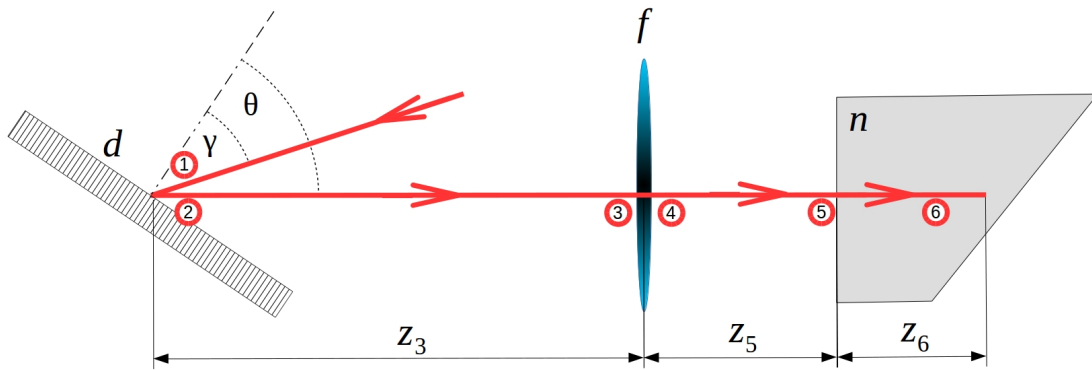
---

\*Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 20 4640787; fax: +36 76 516 299  
E-mail cím: kohazi-kis.ambrus@gamf.uni-neumann.hu





1. ábra. A gerjesztő és a keltett terahertzes jelek sebességének illesztése a gerjesztő jel impulzusfrontjának megdöntésével



2. ábra. Az optikai rácsról visszaverődött fényimpulzus impulzusfront dőlését megnövelik még egy lencse segítségével [7]

megvalósításához [6]. A  $\text{LiNbO}_3$  nemlineáris kristály bír a legnagyobb szükséges nemlinearitással, viszont ebben a kristályban a közeli infravörös jelek sebessége egy egyenes mentén nem, csak nem-kollinearisan illeszthető (lásd a 1. ábrát), mivel a terjedési sebességek mintegy kétszeres szorzóval térnek el egymástól ( $v_g \simeq 2 v_{THz}$ ).

A gerjesztő, pumpáló fény impulzusfrontját meg kell dönteni, ami diszperzív optikai elemek, mint prizma vagy optikai rács segítségével lehetséges [1]. Az impulzus dőlésszögének megnöveléséhez még egy lencsén vagy lencserendszeren is leképezik (lásd a 2. ábrát).

Az  $n > 1$  törésmutatójú közegbe érve a vákuumhoz képest kisebb sebességgel történő terjedési sebesség miatt az impulzus megdöntésének a szöge csökken, de az egyszerűség érdekében itt csak a vákuumban (illetve levegőben) terjedését vizsgáljuk.

Ebben a dolgozatban a [7] korábbi dolgozatom továbbfejlesztésével részletesen megvizsgálom a 1. ábra elrendezésében a lencse után terjedő fényimpulzus jellemzőit a paraxiális hullámoptika közelítésében.

## 2. A fényimpulzus terjedése a lencse után

Egy korábbi dolgozatomban [7] a fénynyaláb paraxiális közelítésében meghatároztam a 2. ábrán adott elrendezésben a lencse után a fényimpulzus spektrális ( $\omega$  szögsebességfüggő) összetevőinek helyfüggését ( $\mathbf{r}_5 = \{x_5, y_5, z_5\}$ ):



$$E_5(\mathbf{r}_5, \omega) = b_2 e^{-i \frac{\omega}{c} (z_3 + z_5)} F(\omega) \frac{q_{10}}{\sqrt{q_{3x} q_{3y}}} \sqrt{\frac{q_{4y} q_{4x}}{q_{5y} q_{5x}}} \exp \left[ -\frac{i \omega}{2c} \frac{y_5^2}{q_{5y}} \right] \times \\ \times \exp \left[ -\frac{i \omega}{2c} \left( \frac{(x_5 - x_{40})^2}{q_{5x}} \right) \right] \cdot \exp \left[ +\frac{i \omega}{2c} \frac{\Delta \omega^2 \beta^2 q_1 (f - z_3)}{(f - z_3) \alpha^2 - q_1} \right] , \quad (1)$$

A beeső fényimpulzus  $F(\omega)$  spektrális eloszlásfüggvényét

$$F(\omega) = E_{10} T_0 \sqrt{1 + 2ia} \exp \left[ -\frac{(\omega - \omega_0)^2 T_0^2}{2} (1 + 2ia) \right] , \quad (2)$$

alakjában megválasztva a beeső nyaláb tengely menti időbeli függése egy lineárisan fázismodulált impulzust ad: ( $T_k = T_0 \sqrt{1 + 4a^2}$ ):

$$f(t) = E_{10} \exp(i \omega_0 t) \exp \left( -\frac{t^2}{2 T_k^2} \right) \exp \left( \frac{ia t^2}{T_k^2} \right) . \quad (3)$$

A (2) spektrális eloszlást a (1) térbeli spektrális eloszlásba helyettesítve, majd azt Fourier-transzformálva (az úgynevezett Siegman–lemma [8] segítségével) az alábbi térbeli és időbeli függvényt kapjuk a lassan változó burkoló közelítésben [9]

$$e_5(\mathbf{r}_5, t) = b_5 e^{i \omega_0 t - i k_0 (z_3 + z_5)} \exp \left[ -\frac{i k_0}{2} \left( \frac{y_5^2}{q_{5y}} + \frac{x_5^2}{q_{5x}} \right) \right] \times \\ \times \exp \left( \frac{- \left( t + \frac{k_0 x_5 \beta i z_0 f}{\alpha^2 (f z_3 + z_5 f - z_5 z_3) - i z_0 (z_5 - f)} \right)^2}{2 T_0^2 (1 + 2ia) - i 2 k_0 \frac{\beta^2 i z_0 (f z_3 + z_5 f - z_5 z_3)}{\alpha^2 (f z_3 + z_5 f - z_5 z_3) - i z_0 (z_5 - f)}} \right) \quad (4)$$

Az exponenciális függvény argumentumában jellemzően komplex kifejezések találhatók, különválasztva ezek valós- és képzetes részeit:

$$e_5(\mathbf{r}_5, t) = b_5 e^{i \omega_0 t - i k_0 (z_3 + z_5)} \exp \left( \frac{-t^2 + t x_5 S z_1 + x_5^2 S z_2 + i t x_5 S z_3 + i x_5^2 S z_4}{N_1 + i N_2} \right) , \quad (5)$$

ahol  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $S z_1$ ,  $S z_2$ ,  $S z_3$  és  $S z_4$  valós algebrai kifejezéseket jelölnek, amelyeket az (4) és (5) egyenletek összevetéséből lehet megkapni.

$$S z_1 = \frac{2 k_0 \beta z_0 f S_2}{S_1^2 + S_2^2} , \quad S z_2 = \frac{k_0^2 \beta^2 z_0^2 f^2 (S_1^2 - S_2^2)}{(S_1^2 - S_2^2)^2 + 4 S_1^2 S_2^2} , \quad (6)$$

$$S z_3 = -\frac{2 k_0 \beta z_0 f S_1}{S_1^2 + S_2^2} , \quad S z_4 = \frac{k_0^2 \beta^2 z_0^2 f^2 2 S_1 S_2}{(S_1^2 - S_2^2)^2 + 4 S_1^2 S_2^2} , \quad (7)$$

$$N_1 = 2 T_0^2 + \frac{2 k_0 \beta^2 \frac{z_0}{\alpha^2} S_1^2}{S_1^2 + S_2^2} , \quad N_2 = T_0^2 4 a + \frac{2 k_0 \beta^2 \frac{z_0}{\alpha^2} S_1 S_2}{S_1^2 + S_2^2} , \quad (8)$$

ahol  $S_1$  és  $S_2$  további algebrai kifejezéseket jelölnek:

$$S_1 = \alpha^2 (f z_3 + z_5 f - z_5 z_3) , \quad S_2 = z_0 (z_5 - f) . \quad (9)$$

A transzverzális térbeli  $(x_5, y_5)$  és időbeli  $(t)$  változóktól legfeljebb négyzetesen függő leírás közelítésében a diszperzív elem után kialakuló fényimpulzus legáltalánosabb viselkedését az alábbi

térbeli és időbeli függés írja le [10]:

$$e_5(\mathbf{r}_5, t) = b_5 e^{i\omega_0 t - i k_0 (z_3 + z_5)} \exp \left[ -\frac{i k_0}{2} \left( \frac{y_5^2}{q_{5y}} \right) - \frac{x_5^2}{w_{5x}^2} (1 - \chi) - \frac{i k_0 x_5^2 (1 - \varrho)}{2 R_{5x}} \right] \times \\ \times \exp \left( \frac{-(t - t_0)^2}{2 \tau^2} + \frac{i a_5 (t - t_0)^2}{\tau^2} + i (t - t_0) \epsilon \right) , \quad (10)$$

ahol  $\tau$  a fényimpulzus időtartamáért,  $a_5$  a fényimpulzus időbeli fázismodulációjáért,  $t_0$  az impulzusfront megdőléseért ( $x_5$ -től függő késleltetés esetén),  $\epsilon$  a fényimpulzus transzverzális térbeli spektrális eloszlásáért,  $\chi$  és  $\varrho$  a rácson történt elhajlás okozta nyálábvastagság és hullámfront görbület módosulásáért felel. A (4)-(9) egyenletekkel adott felbontás segítségével a lencse után terjedő impulzus  $\tau$ ,  $a_5$ ,  $t_0$ ,  $\epsilon$ ,  $\chi$ ,  $\rho$  paramétereket kifejeztem az  $Sz_1$ ,  $Sz_2$ ,  $Sz_3$ ,  $Sz_4$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  együtthatókkal:

$$\tau^2 = \frac{N_1^2 + N_2^2}{2 N_1} , \quad a_5 = \frac{N_2}{2 N_1} , \quad \epsilon = x_5 \frac{Sz_3}{N_1} , \quad (11)$$

$$t_0 = x_5 \frac{Sz_1 N_1 + Sz_3 N_2}{2 N_1} , \quad \chi = w_{5x}^2 \frac{(Sz_1 N_1 + Sz_3 N_2)^2 + 4 N_1 (Sz_2 N_1 + Sz_4 N_2)}{4 N_1 (N_1^2 + N_2^2)} , \quad (12)$$

$$\varrho = \frac{2 R_{5x}}{k_0} \frac{Sz_3^2 N_2^3 + 2 Sz_1 Sz_3 N_1^3 + 2 Sz_3^2 N_2 N_1^2 - Sz_1^2 N_1^2 N_2 + 4 N_1^2 (Sz_4 N_1 - Sz_2 N_2)}{4 N_1^2 (N_1^2 + N_2^2)} , \quad (13)$$

$$w_{5x} = w_{50} \sqrt{1 + \frac{\alpha^4 z^2}{z_{50}^2}} , \quad R_{5x} = z \left( 1 + \frac{z_{50}^2}{\alpha^4 z^2} \right) , \quad (14)$$

$$z = \frac{[(f - z_5) z_3 + z_5 f] (f - z_3) \alpha^4 - z_0^2 (f - z_5)}{(f - z_3)^2 \alpha^4 + z_0^2} , \quad z_{50} = \frac{f^2 \alpha^2 z_0}{(f - z_3)^2 \alpha^4 + z_0^2} . \quad (15)$$

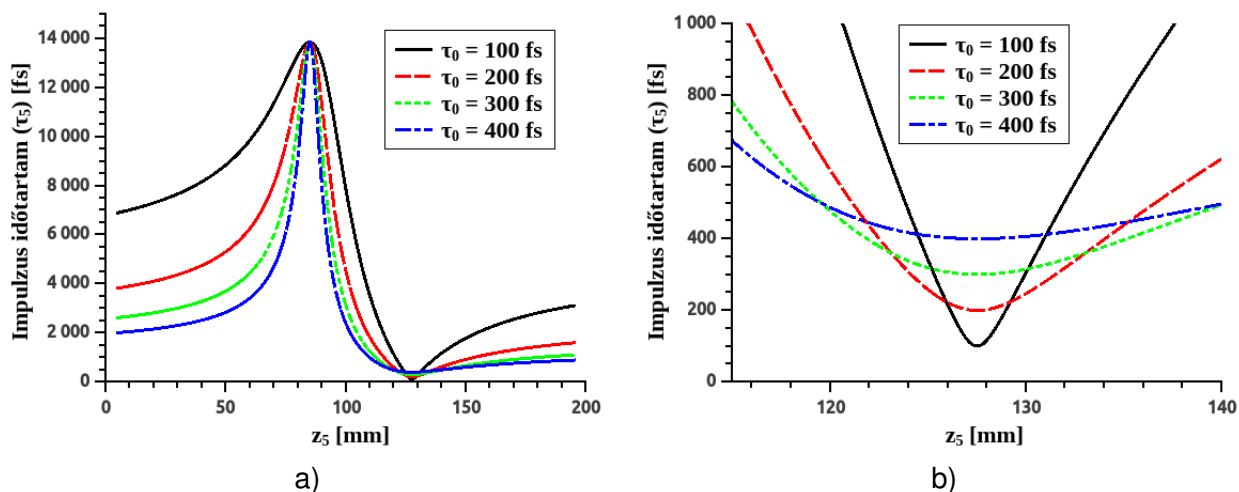
Ezekkel az egyenletekkel megkaptuk a fényimpulzus (10) egyenletbeli paramétereinek a beeső impulzus paramétereitől, a rácshoz és a lencse paramétereitől és a terjedés koordinátájától ( $z_5$ ) való függését. Általában ezen függvénykapcsolatok annyira összetettek, hogy gyakorlatilag csak numerikusan kiértékelhetők.

### 3. Impulzus paramétereinek numerikus vizsgálata

Az előző fejezetben előállított összefüggések, a függvénykapcsolatok jellemző menetét a numerikusan vizsgálom. Ahol külön nem jelölöm az alábbi paramétereket tételezem fel.

A grafikonok előállításához 400 fs sávhatárolt időtartamra elegendő spektrális sáv szélességű, 800 nm közép-hullámhosszúságú Gauss- impulzusokat vettem példának. A rácshoz párhuzamosított nyálábalakot tételeztem fel, nyálábvastagságát  $w_{10} = 4,0$  mm értékűnek vettem, amelyből  $z_0 = \pi w_{10}^2 / \lambda = 62,8$  m adódik [8]. A rácshoz 1480 1/mm-es vonalsűrűségűnek választottam ( $d = 1/1480$  mm =  $0,675 \mu\text{m}$ ), amit Littrow-konfigurációnak [5] megfelelő elrendezésben alkalmazva  $\gamma = \theta = 36,3^\circ$ ,  $\alpha = 1$  és  $\beta = 0,624$  fs értékeket kapjuk. A rácshoz visszaverődött nyálábnak impulzusfrontjának dőlésszögére a  $\tan \phi = 2 \pi c \beta / \lambda = 1,378$  összefüggésből [10] a  $\phi = 54^\circ$  érték adódik. A lencse fókusztávolságára  $f = 85$  mm-t választottam, a rácshoz és a lencse közé felvett  $z_3 = 255$  mm tárgy távolság a rácshoz képest és a lencse közötti képtávolságra  $z_5 = 127,5$  mm adódik.

A 3. ábrán a lencse után terjedő impulzus  $\tau$  időtartamának a lencse után mért  $z_5$  távolságtól való függése látható különböző spektrális szélességű (sávhatárolt impulzushosszak –  $\tau_0$ ) impulzusok esetén (lásd a (11) első képletét). A rövidebb sávhatárolt impulzushossz nagyobb sáv szélességet jelent. A nagyobb sáv szélesség esetén rövidebb távolságon marad rövid az impulzus, azaz hatékony terahertz keltéshez rövidebb távolságon marad megfelelően nagy a gerjesztő fény intenzitása.



3. ábra. A terjedő impulzus időtartamának ( $\tau$ ) függése a lencse után mért távolságtól ( $z_5$ ) különböző spektrális szélességű (sávhatárolt impulzushosszak –  $\tau_0$ ) impulzusok esetén. A b) grafikonon az a) grafikonnak a rács képe közelében kinagyított részlete látható

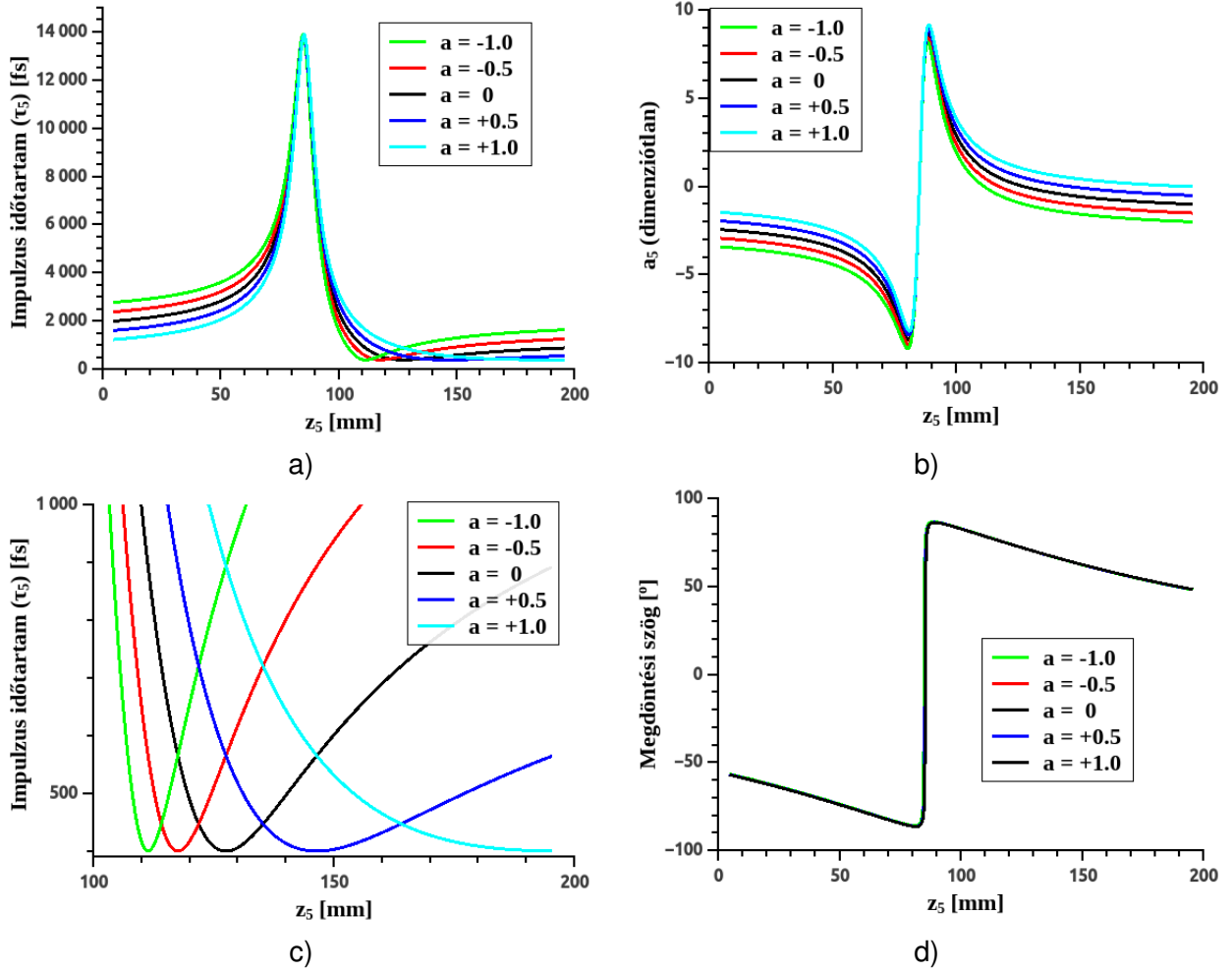
Az eddig végzett kísérletek esetén jellemzően az alkalmazott nagy intenzitású lézerrendszerek rövid impulzusra (30-50 fs) optimalizáltak [6], ezért a nagyon kis távolságon megjelenő rövid impulzushossz a maximálisnál kisebb THz-keltési hatásfokot eredményezett. Az erősebb terahertzes impulzusok keltéséhez vastagabb, azaz nagyobb laterális méretű gerjesztő fénynyalábokat alkalmaznak a nemlineáris közeg nemlinearitása telítődésének elkerülése érdekében [11]. Ekkor viszont kisebb sáv szélességű beeső impulzusra van szükség, hogy a szélesebb nyaláb teljes oldalirányú erősítését még ki időtartamú, azaz nagy intenzitású gerjesztő impulzussal ki lehessen használni, amint az Fülöp József is kifejtette disszertációjában [6].

A 4.a ábra mutatja, hogy a beeső impulzus  $a$  lineáris diszperziójának változása hogyan módosítja a lencse után terjedő fénynyaláb  $\tau$  időtartamának változását (lásd a (11) első képletét). A 4.c ábra az utóbbi kinagyított részletét mutatja a rács képe ( $z_5 = 127,5$  mm) közelében. Jól látható, hogy a beeső impulzus lineáris fázismodulációja a lencse mögött más-más pozícióba tolja a minimális impulzushosszúságú terjedési  $z_5$  távolságot. Látható az is, hogy a beeső impulzus pozitív diszperziója esetén ( $a > 0$ ) a minimális impulzushossz helye a diszperziómentes esethez képest nagyobb távolságban jelenik meg, továbbá ekkor a minimális impulzusidőtartam nagyobb távolság-intervallumon marad fenn. A 4.d ábrán viszont azt láthatjuk, hogy a lencsétől távolodva a fényimpulzus dőlésszöge csökken, amire pedig szükség van a hatékony terahertz keltéshez (lásd a 1. ábrát).

Az 5.a ábrán látható, hogy a rács és a lencse távolságának növekedése ( $z_3$ ) hatására a lencse után terjedő impulzus minimális időtartamú helye a lencse után csökkenő távolságra tolódik. Megfigyelhető továbbá az is, hogy  $z_3$  változtatása változtatja a minimális impulzushossz  $z_5$ -beli tartományának szélességét is. A 5.b ábrán azt figyelhetjük meg, hogy a rács és a lencse  $z_3$  távolságának változása nem befolyásolja a terjedő impulzus dőlésszögének értékét.

A 4.d és az 5.b ábrák mutatják, hogy a lencse mögött terjedő fényimpulzus dőlésszögét sem a beeső impulzus fázismodulációja ( $a$ ), sem a rács és a lencse  $z_3$  távolságának megváltoztatása érdemben nem módosítják.

Felmerülhet annak lehetősége, hogy a beeső nyaláb  $a$  fázismodulációja és a rács-lencse  $z_3$  távolság változásával ugyanúgy megvalósítható a hatékony terahertz keltéséhez szükséges mértékű impulzusfront dőlésszög a minimális impulzushossz  $z_5$ -beli tartomány kiszélesítése mellett. A következő szakaszban megmutatom, hogy ilyen lehetőség sajnos nem létezik.



4. ábra. A beeső beeső impulzus  $a$  lineáris fázismodulációjának hatása a terjedő impulzus időtartamának változására (a), a terjedő impulzus  $a_5$  lineáris fázismodulációjára (b), és az impulzus dőlés-szögének változására (d). A c) grafikon az a) grafikon kinagyított részletét mutatja

## 4. Hosszabb minimális impulzusidőtartamú terjedési tartomány kialakításának lehetősége

A csoportkésés diszperzió ( Group Delay Dispersion,  $GDD = 2 a_5 \tau_{50}^2$ ) határozza meg a lokális impulzus-időtartamot ( $\tau$ ):

$$\tau_5^2 = \tau_{50}^2 \sqrt{1 + 4a_5^2} \implies \tau_5^4 = \tau_{50}^4 + 4\tau_{50}^4 a_5^2 = \tau_{50}^4 + GDD^2. \quad (16)$$

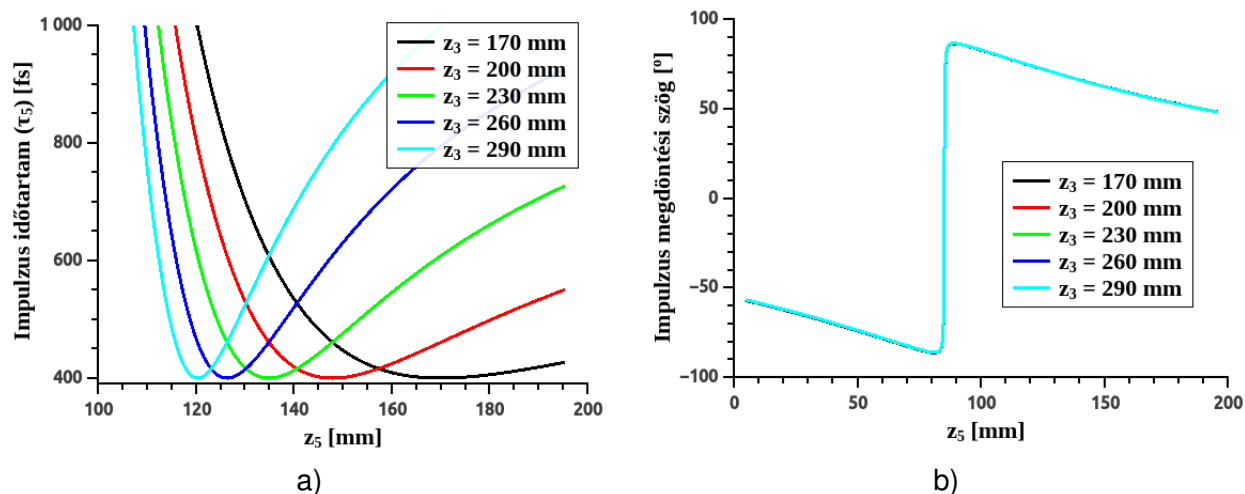
A csoportsebesség diszperzió (Group Velocity Dispersion,  $GVD$ ) terjedés során a  $GDD$  változási gyorsaságát, ezzel az impulzus időtartamának változási ütemét is meghatározza.

A 1-9 egyenletekből:

$$GVD = \left. \frac{\partial GDD}{\partial z_5} \right|_{z_5 = \frac{f z_3}{z_3 - f}} \cong -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\beta^2}{N^2}, \quad (17)$$

ahol  $\beta$  az optikai rács diszperziós együtthatója,  $N$  a leképezés laterális nagyítása,  $N = \frac{z_5}{z_3} = \frac{f}{z_3 - f}$ .

Sugároptikából is ismert, hogy fényimpulzus dőlésszöge arányos a  $\beta/N$  hányadossal. Az impulzus dőlésszögének előírásával, adott sáv szélesség esetén kikerülhetetlenül megadjuk a fényimpulzus szétfolyási sebességét is. Azaz  $a$  és  $z_3$  változtatásával nem lehet elérni, hogy a minimális időtartamú állapota a terjedő impulzusnak hosszabb terjedési szakaszon maradjon állandó.



5. ábra. A rács és a lencse közötti  $z_3$  távolság hatása a terjedő impulzus időtartamának (a) és dőlés-szögének (b) változására a lencse után történő terjedés során

Ha pedig a  $GDD$  a terjedés során adott ütemben változik, akkor ahhoz, hogy az impulzushossz hosszabb távon maradjon sávhatárolt közeli ( $\tau_5 \simeq \tau_{50}$ ) az kell, hogy az impulzushossz csupán nagyobb  $GDD$  esetén növekedjen csak meg érdemben. Ez pedig a (16) egyenletből kapott

$$\tau_5 = \tau_{50} \sqrt[4]{1 + \frac{GDD^2}{\tau_{50}^4}} \quad (18)$$

összefüggés alapján csak nagyobb sávhatárolt impulzushossz, azaz csupán a kisebb sáv szélesség alkalmazásával érhető el.

## 5. Összefoglalás

Terahertzes impulzusok döntött impulzusfrontú fényimpulzussal gerjesztése kísérleti elrendezésében a gerjesztő fényimpulzus terjedését vizsgáltam a fényterjedés paraxiális közelítésében, a térbeli és időbeli és az időbeli eloszlások Gauss-eloszlású modelljének alkalmazásával. Egy optikai rácstól visszaverődő, majd egy lencsén áthaladó femtoszekundumos fényimpulzus pusztán vákuumban (ill. levegőben) történő terjedésében is a térbeli és időbeli paramétereinek izgalmas változását figyelhetjük meg. A fényimpulzus időbeli és térbeli fázismodulációja, a spektrális komponenseknek a térben diszperzív (hullámhosszfüggő) terjedése miatt változó átfedése következtében a fényimpulzus jellemzői a terjedés során gyorsan változnak.

A fényimpulzusnak a térbeli és időbeli leírásának kvadratikus közelítésében legáltalánosabb viselkedését leíró (10) összefüggés paramétereinek változását meghatároztam, mint a lencse utáni távolság függvényét. A dolgozat 2. fejezetében leírtak szerint a fényimpulzus jellemzőinek a dolgozatban szerepeltetettél lényegesen részletgazdagabb vizsgálata is lehetséges. A 4–5. ábrákon a terahertz keltés szempontjából legfontosabbnak ítélt függvénykapcsolatokat ábrázoltam csupán.

A dolgozat legfontosabb eredményének azt tekintem, hogy a vizsgálataim eredményeként megmutattam, hogy a terahertz-keltés hatásfoka növeléséhez szükséges nagyobb effektív kölcsönhatási hossz eléréséhez kisebb sáv szélességű gerjesztő lézerimpulzus alkalmazása szükséges, mint ahogyan azt Fülöp József akadémiai doktori disszertációjában is más úton megállapította [6].

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A

projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## Hivatkozások

- [1] J. Hebling, „Derivation of the pulse front tilt caused by angular dispersion”, *Opt. Quant. Electr.*, 28, 1759-1763, 1996.
- [2] O.E. Martinez, „Grating and prism compressors in the case of finite beam size”, *J. Opt. Soc. Am. B*, 3, 929-934, 1986.
- [3] Nobel-díjat kapott az ELI megálmodója a lézerfizikában elért eredményeiért (Elérhető: <https://www.eli-alps.hu/hu/Hirek/view/18> Letöltve: 2018.11.05.)
- [4] J. Hebling, G. Almási, I.Z. Kozma, J. Kuhl, „Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation”, *Opt. Expr.*, 10, 1161-1166, 2002.
- [5] L. Pálfalvi, „Döntött impulzusfrontú gerjesztésen alapuló terahertzes impulzusforrások optimalizálása”, Akadémiai doktori értekezés, 2017.
- [6] J.A. Fülöp, „High-intensity pulses in the Terahertz and Visible Ranges”, Akadémiai doktori értekezés, 2017.
- [7] A. Kőházi-Kis, „Nemkollineáris TeraHertz-keltés gerjesztő optikai impulzusa terjedésének paraxiális hullámoptikai modellje”, *Gradus*, 5, 374-380 (2018).
- [8] A.E. Siegman, „Lasers”, University Science Books, 1986.
- [9] J.C. Diels, W. Rudolph, „Ultrashort Laser Pulse Phenomena”, Academic Press (2006).
- [10] O.E. Martinez, „Pulse distortions in tilted pulse schemes for ultrashort pulses”, *Opt. Comm.*, 59, 229-232, 1986.
- [11] X.J. Wu, J.L. Ma, B.L. Zhang, S.S. Chai, Z.J. Fang, C.Y. Xia, D.Y. Kong, J.G. Wang, H. Liu, C.Q. Zhu, X. Wang, C.J. Ruan, Y.T. Li, „Highly efficient generation of 0.2 mJ terahertz pulses in lithium niobate at room temperature with sub-50 fs chirped Ti:sapphire laser pulses”, *Optics Express*, 26, 7107-7116 (2018).



# OKTATÁSI KÖRNYEZET KIALAKÍTÁSA MODELL ALAPÚ TERVEZÉS TANÍTÁSÁRA

## EDUCATIONAL ENVIRONMENT FOR TEACHING MODEL BASED DESIGN

Papp János <sup>1\*</sup>, Bári Gergely <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar Neumann János Egyetem,  
Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Szimuláció  
Validáció  
Oktatás  
Projektfeladat  
Tervezés

### Keywords:

Simulation  
Validation  
Project  
Design  
Education

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. október 19.  
Átdolgozva 2018. október 27.  
Elfogadva 2019. március 21.

---

---

### Összefoglalás

*Ez a cikk egy olyan feladatot definiál, ami egy jármű kézi működtetésű váltóját automatizáló rendszer fejlesztését tartalmazza. Egy platformot mutat be, ami járműmérnök hallgatók oktatására lett kifejlesztve. Ennek az a célja, hogy a megszerzett elméleti tudást, gyakorlat közeli probléma megoldása során szerzett tapasztalatokkal bővítsük.*

### Abstract

*This paper describes a task to develop a gear shift mechanism automation system. It introduces Hardware in the loop (HiL) test environment, which is developed for teaching undergraduate vehicle engineers. The aim was to extend the lectures with experiences gained, while solving a practical problem based project.*

---

## 1. Bevezetés

Manapság egy járműmérnöknek szembesülnie kell azzal, hogy komplex mechanikus és elektromos rendszerek alkotják a legtöbb korszerű járművet. Ezek a rendszerek számos követelmény és szabvány rendszereknek is megfelelnek. Így ezeket költséghatékonyan a legrövidebb idő alatt megtervezni és a lehető legjobb terméket előállítani is nehéz feladat [1]. Számos módszer született ezért ezeknek a problémáknak a megoldására. Ezek közül az egyik legáltalánosabb a modell alapú tervezés, amit az iparban széles körben alkalmaznak [2]. Elvárás tehát, hogy az ilyen fejlesztő környezetbe a végzett járműmérnök hallgatók, be tudjanak illeszkedni és rendelkezzenek az önálló munkavégzéshez szükséges gyakorlati tudással [3]. Ennek a tudásnak a megszerzéséhez szeretnénk hozzájárulni ezzel az oktató platformmal, hátérrel, amely több hallgató szakdolgozatának készítése közben jött létre.

## 2. Oktatási környezet

Az oktatási környezet célja, hogy a megszerzett elméleti tudást, gyakorlat közeli probléma megoldása során szerzett tapasztalatokkal bővítsük, ami szükséges egy végzett mérnök számára [4]. A környezet úgy jött létre, hogy egy feladat megoldását támogassa, egy jármű kézi működtetésű váltóját kell automatizálni. A probléma megoldása során elvárt, hogy átgondolt, szofisztikált tervezési folyamaton haladjon végig a hallgató, ennek során szükséges alkalmaznia a

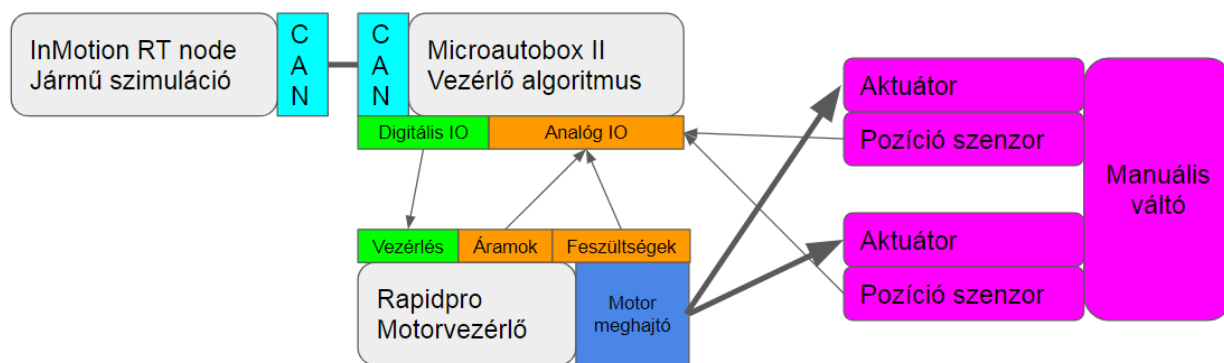
---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 70 398 1261  
E-mail cím: papp.janos@gamf.uni-neumann.hu

képzése során elsajátított ismereteit, képességeit [3]. A feladatra fordított idő rövid, mindössze fél év, ezért a rendszert úgy alakítottuk ki, hogy segítse a fejlesztési folyamat során bemutatott modell alapú metodikát. Megterveztük és kiviteleztuk a vezérlő hardver és szoftver interfész elemeit, így a hallgatónak ezzel a problémakörrel nem kell foglalkoznia, mivel ez túlmutat a járműmérnöki képzésen. A fejlesztett rendszer segítségével magas szinten lehet megismerkedni a rendszer tervezés folyamatával, a jelfeldolgozás, szabályozó tervezés kihívásaival. Illetve a hallgató szembesül a rendszer fizikai megvalósításával, mind számítógépes CAD rendszerben, mind a kész eszközökkel a valós járműbe történő beépítés során felmerülő kihívásokkal.

A hardver tesztelő (Hardware in the Loop továbbiakban HiL) rendszer segíti a tervezési és a tesztelési folyamatokat. A [6] részletesen bemutat egy összetett berendezést, aminek a segítségével a részkomponensek tesztelhetővé válnak a további nélkülözhetetlen komponensek különböző mértékű szimulációjával.

Az általunk tervezett és összeállított HiL környezet a következőkben bemutatott elemekből áll. A váltó működtetéséhez két bovent szükséges mozgatni ezt két lineáris aktuátor valósítja meg, ezek pozícióját lineáris potenciométer méri. Az aktuátor egyenáramú motor, amit dSpace RapidPro [7] egység hajt meg. Ez az eszköz egy dSpace MicroAutobox II [8] eszközhöz csatlakozik, amelyen tetszőleges Matlab/Simulink 0 modell képes futni. Ez utóbbi eszköz kimeneteivel vezérli a motor meghajtó elektronikát, analóg bemeneteinek segítségével méri a motor meghajtó áramait, feszültségeit, illetve méri a váltó vezérlő állapotát lineáris potenciométerek segítségével. Így zártkörű szabályozás is létrehozható, illetve a váltó működéséhez szükséges magasabb szintű komplex logika összeállítására is lehetőség nyílik. Ezt a rendszert egy valós járműbe a hallgatónak lehetősége nyílik beépíteni és ott üzem közben tesztelni. Az eszközt egy további rendszerrel is integráltuk. Ez a rendszer kibővül egy Járműdinamikai szimulációkat - IPG Carmaker szoftver 0 segítségével - valós időben futtatni képes eszközzel az IPG, AVL InMotion Real Time node-dal 0. Ez az eszköz CAN buszon keresztül csatlakozik a MicroAutobox II-hoz, és a szimulált jármű megfelelő változóit biztosítjuk a számára. Az IPG Carmaker által bármilyen jármű modellel végezhetünk szimulációt. Az alábbi ábrán (1. ábra) a rendszer felépítése látható.



1. ábra Rendszer felépítése

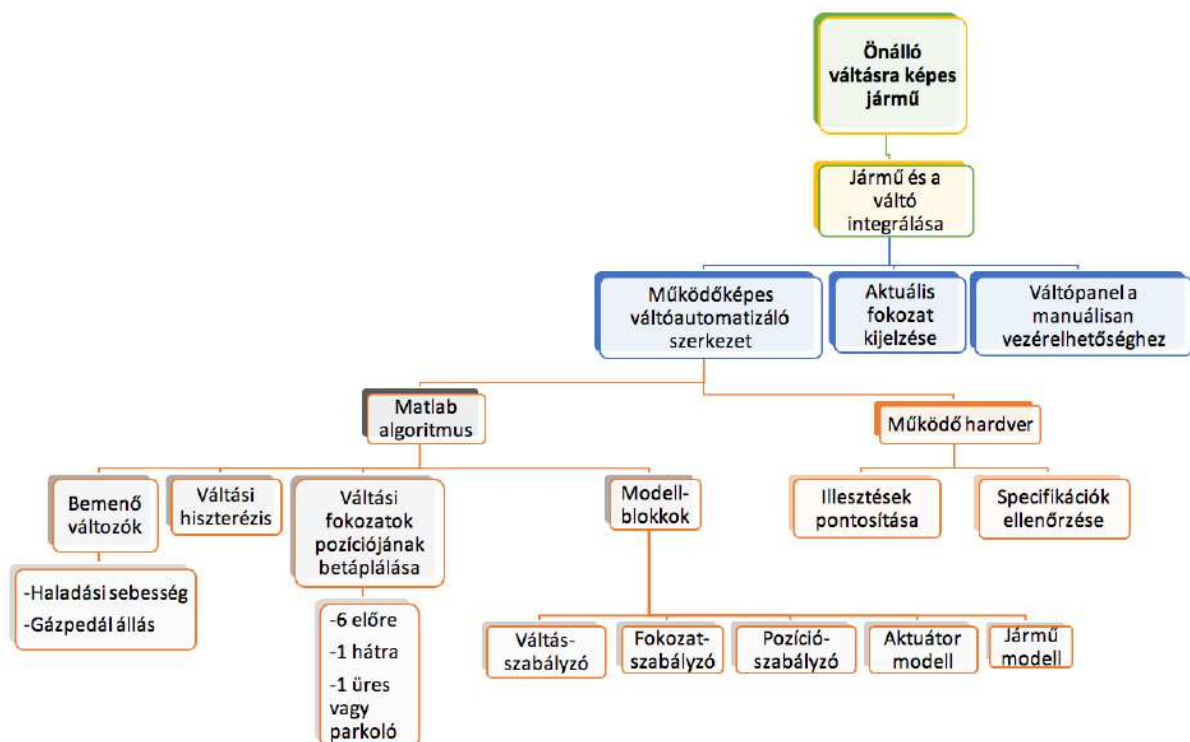
### 3. Feladat

A modell alapú tervezési metódus végigköveti a feladat megoldását, mely széles körben használható komplex feladatok megoldására 0.

A követelmények alapján a kitűzött feladat az, hogy a hallgató tervezzen egy a gépjármű manuális váltójához készített, egyszerű és a rendelkezésre álló alkatrészekből összeépíthető mozgató eszközt és annak vezérlő elektronikáját. A tervezés során a fejlesztéshez alkalmazza a v-modell-t. A végeredmény, a dokumentált tervezési folyamat (Szakdolgozat) mellett, egy vezérlő program, ami egy valós járműben tesztelhetővé válik, a rendelkezésre bocsátott eszközök és a gyors prototípus-tesztelő rendszer segítségével.

A feladat kezdetekor a szükséges alaptudást felvázoltuk a hallgatónak. Az első lépésként az elvégzendő teljes feladatot V-modell segítségével részekre bontottuk, ütemeztük a hallgatókkal. Majd abból egy részproblémát kiemeltünk, ez egy lineáris aktuátor pozíciójának szabályozása. Mint kisebb feladat, gyorsan megoldható, de hasonló felépítést igényel, mint a teljes feladat, ezért nagyobb felügyelettel együtt történt a megoldás. A hallgatóval közösen létrehoztunk egy egyszerű aktuátor modell-t, melyet szimulálva elemeztünk. Majd egy pozíció szabályzót tervezett a hallgató, amelyet szimulációval kellett tesztelni. Majd a hardver tesztelő környezetet felhasználva, ezt a pozíció szabályzót lehetett tesztelni. Így lehetőség nyílik már a legkisebbtől komponenstől a magas szintű modellek tesztelésére és validációjára.

Ezek után már önálló feladat, hogy a hallgató a teljes modellt felépítse. Az előre megszabott szinteken tesztelje, szimulált és valós környezetben. Az alábbi ábrán a hallgató által készített feladat felépítése látható (2. ábra.)



2. ábra A feladat felbontása a hallgató által

### 3.1. A feladat összegezve:

- A meglévő váltó rendszer megismerése, bemutatása
- Esetleges hibák feltérképezése, javítása
- Manuális fokozatok automatizált váltásának megvalósítása
- Algoritmussal szemben támasztott követelmények összegyűjtése, specifikáció megalkotása.
- Algoritmus tesztelése HIL környezetben
- Járművön végzett tesztek elvégzése

## 4. Összegzés

Megterveztünk és megvalósítottunk egy oktatási környezetet, ami hallgatók oktatására lett optimalizálva. Ez a környezet alkalmas arra, hogy egy járművezérlő részegységét megtervezzük: működésének szimulációját vizsgálhassuk szoftveres illetve hardver tesztelő környezetben, valamint valós környezetben is. Így a hallgató betekintést nyerhet a legfontosabb folyamataiba, problémáiba egy mérnöki tervezési munkának.

A jövőre nézve a tervünk az, hogy a platformot több hasonló feladat megoldására is alkalmassá tegyük. Illetve, hogy ezt a környezetet, feladatot, leadott anyagot különálló tantárggyá fejlesszjük, így szélesebb körnek elérhetővé válhatna.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Patrizio Pelliccione, Eric Knauss, Rogardt Haldal, S. Magnus Ågren, Piergiuseppe Mallozzi, Anders Alminger, Daniel Borgentun, Automotive Architecture Framework: The experience of Volvo Cars, Journal of Systems Architecture, Volume 77, 2017, Pages 83-100, ISSN 1383-7621, <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2017.02.005>.
- [2] Felix Oestersötebier, Farisoroosh Abrishamchian, Christopher Lankeit, Viktor Just, Ansgar Trächtler, Approach for an Integrated Model-based Design of Intelligent Dynamic Systems Using Solution and System Knowledge, Procedia Technology, Volume 26, 2016, Pages 436-446, ISSN 2212-0173, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.056>.
- [3] 2. melléklet a 18/2016. (VIII. 5.) EMMI rendelethez VII fejezet 11. alfejezet 7. pont
- [4] Dékányi utasítás, Szakdolgozat Készítés Neumann János Egyetem Műszaki és Informatikai kar, [https://gamf.uni-neumann.hu/images/Hallgatoi\\_informaciok/szakdolgozati\\_informaciok/du\\_a\\_szakdolgozatkeszites\\_rendje.pdf](https://gamf.uni-neumann.hu/images/Hallgatoi_informaciok/szakdolgozati_informaciok/du_a_szakdolgozatkeszites_rendje.pdf)
- [5] Chen, Xiang & Salem, Meranda & Das, Tuhin & Chen, Xiaoqun. (2008). Real Time Software-in-the-Loop Simulation for Control Performance Validation. Simulation. 84. 457-471. 10.1177/0037549708097420.
- [6] Amir Soltani, Francis Assadian, A Hardware-in-the-Loop Facility for Integrated Vehicle Dynamics Control System Design and Validation, IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 21, 2016, Pages 32-38, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.5>
- [7] RapidPro harver, <https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/rapidpro.cfm>
- [8] MicroAutoBox II hardver, <https://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/micautob.cfm>
- [9] Mathworks Matlab Simulink szoftver, <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [10] IPG Automotive, Carmaker szoftver, <https://ipg-automotive.com/products-services/simulation-software/carmaker/>
- [11] IPG Automotive, InMotion RT node hardver, <https://ipg-automotive.com/products-services/real-time-hardware/xpack4-technology/>
- [12] Felix Oestersötebier, Farisoroosh Abrishamchian, Christopher Lankeit, Viktor Just, Ansgar Trächtler, Approach for an Integrated Model-based Design of Intelligent Dynamic Systems Using Solution and System Knowledge, Procedia Technology, Volume 26, 2016, Pages 436-446, ISSN 2212-0173, <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.056>.
- [13] Szabó János, Szakdolgozat, Automatizált váltómű vezérlő algoritmusának fejlesztése HIL környezetben., Járműtechnológia Tanszék, Gépípari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar Neumann János Egyetem, Magyarország

# ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY AND ITS USE FOR TIME AND COST-EFFECTIVE BATTERY-HEALTH-STATUS TESTING

Mihály Görbe\*

Department of Science and Engineering, GAMF Faculty of Engineering and Computer Science,  
John von Neumann University, Kecskemét, Hungary

---

## Keywords:

impedance spectroscopy  
electrochemical impedance  
spectroscopy  
battery testing

## Article history:

Received 2018. September 7.

Revised 2018. November 3.

Accepted 2019. February 28.

---

---

## Abstract

*Impedance spectroscopy is the science of recording and evaluating the impedance of electrical circuit elements as the function of the exciting frequency. The electrical circuit elements can be virtually anything that can be excited by AC voltage sources (conventional discrete electric elements, battery cells and even biological tissues). As battery cells are electrochemical devices, studying them using impedance spectroscopy is electrochemical impedance spectroscopy (EIS). In this paper we provide a literature overview of impedance spectroscopy, and propose it as a measurement principle for the time- and cost-efficient state-of-health testing of individual Li-ion battery cells for the MegaLux solar vehicle racing team at our Faculty.*

---

## 1 Introduction

In recent years, the student solar vehicle racing team “MegaLux” at John von Neumann University, GAMF Faculty of Engineering and Computer Science achieved several successes at the World Solar Challenge [1] (Fig. 1.).



*Fig. 1. The MegaLux team poses after the successful arrival of the MegaLux solar vehicle at the finish, and winning the 3rd prize of the South African Solar Challenge 2016 in Cape Town*

A typical racing solar vehicle uses a Li-ion battery pack to bridge solar energy production breaks due to weather, and to smooth energy production fluctuations. The cell count in a battery pack can be as high as 400 (a maximal mass of 20 kg is allowed according to race regulations), so testing the individual battery cells' status of health (SoH) before battery pack assembly is a time critical operation.

---

\* Corresponding author. Tel.: +36 76 516 436  
E-mail address: gorbe.mihaly@gamf.uni-neumann.hu

Battery charging currents are conventionally measured in  $I_t$  or  $C$  units: both mean the current that, if could be supplied constantly, could deliver the battery's nominal charge in 1 hour. As charging currents mostly range between a few tenths of  $C$  and a few  $C$ 's, full charge-discharge cycles can last several hours (see Fig. 2.). To test the SoH of several hundreds of batteries in an acceptable time using full charge-discharge cycles, unrealistically many parallel test pads must be used.

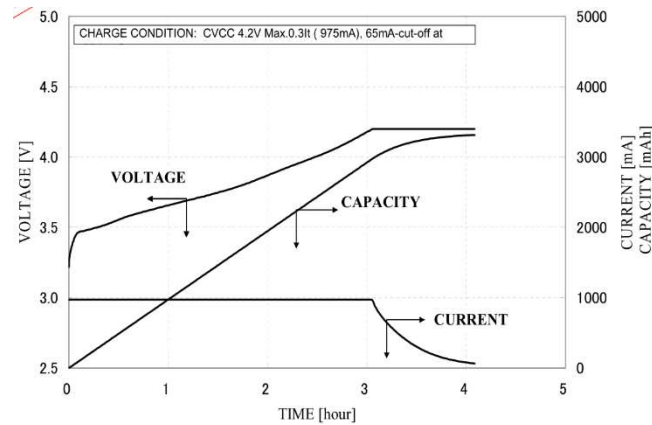


Fig. 2. Charge characteristics for Panasonic NCR18650B, the battery cell used in MegaLux vehicles [2]

My goal is to develop a SoH testing device for the MegaLux racing team, that tests the cells as fast as possible, and that is cost effective and simple enough, so that the team can afford and in-house built several of them, that ensures the possibility of parallel testing.

As the base principle I have chosen the impedance spectroscopy, and this paper is intended to be a review article on this topic especially in the application point of view.

## 2 Literature overview of impedance spectroscopy

Impedance spectroscopy is the science of recording and evaluating the impedance of electrical circuit elements as the function of the exciting frequency [3]. The recorded impedance values can be plotted on either Bode plots (impedance magnitude and phase angle as functions of exciting frequency), or on Nyquist plot (imaginary part as the function of real part, e.g. Figs 6,7,8.). In the latter case, although it is harder for the reader to recognize, what frequency a data point belongs to, the shape of the plot can tell the expert much qualitative information about the system under investigation (e.g. the approximate SoH of the battery, and in the case of defective battery, the defective part).

Quantitative evaluation of the data acquired is possible too, it mostly requires an equivalent circuit model of the system (e.g. Figs 3,4,6,7), whose circuit parameters can be fitted to be as close to the measured impedance data as possible.

The following examples represent the multitude of the application fields of impedance spectroscopy.

In order to develop medical diagnostic methods based on impedance spectroscopy, it is advantageous to understand the behavior difference between healthy and diseased cells. A simulated AC frequency response function of cells with nucleus can be seen on Fig. 3.a, while the corresponding equivalent circuit model is depicted on Fig. 3.b [4]. The electrical parameters of cell components characteristic to diseases can be determined empirically.



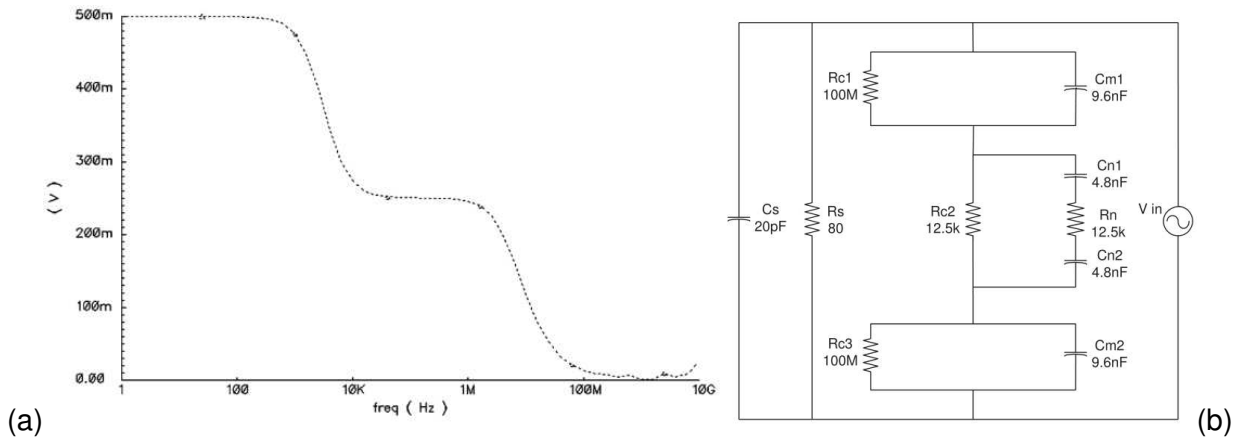


Fig. 3. (a) Simulated AC frequency response function of cells with nucleus (b) The corresponding equivalent circuit model [4]

A simple medical application is the estimation of body water content and fat mass [5]. Body fat can be approximated as an insulator that does not contribute to the circuit model of the body (Fig. 4.a). Inside the fat-free regions of the body there is difference between the conducting path of low-frequency and high-frequency current. At low frequency the cell membranes block the current, only the intracellular liquid conducts, whereas at high frequency all liquid components conduct, serially connected by the capacitances of the cellular membranes (Fig. 4.b). There are diagnostic devices already commercially available (Fig. 4.c) that estimate body water content and/or fat mass using the impedance spectroscopy data and personal physical data (height, weight etc.) based on empirical equations.

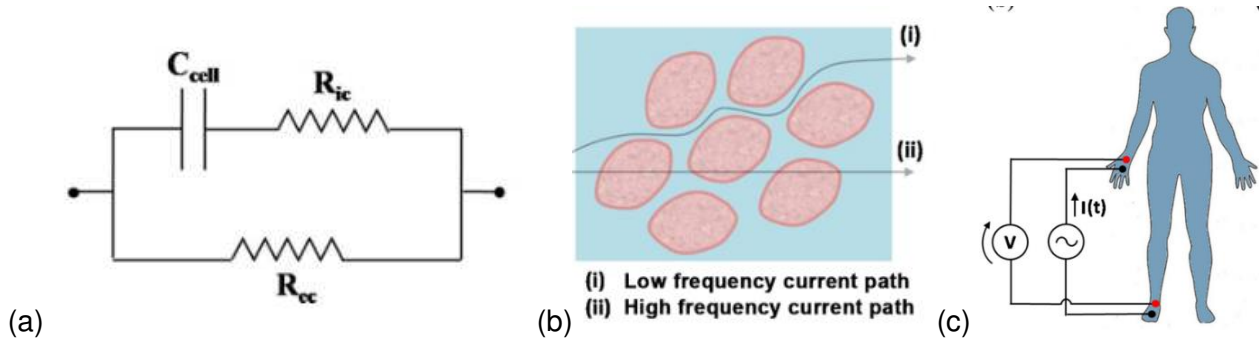


Fig. 4. (a) Equivalent electrical circuit from the human body from the body water content and fat mass measuring point of view (b) Conducting paths in human non-fat tissues (c) The four-electrodes circuit of the body water content and fat mass measurement [5]

It is possible to measure skin impedance spectra at different depths depending on combinations of electrodes at different distances. The system depicted on Fig. 5. works in the frequency range of 1 to 2.5 MHz, and the applied voltage/current is 150 mV/75 mA at maximum.

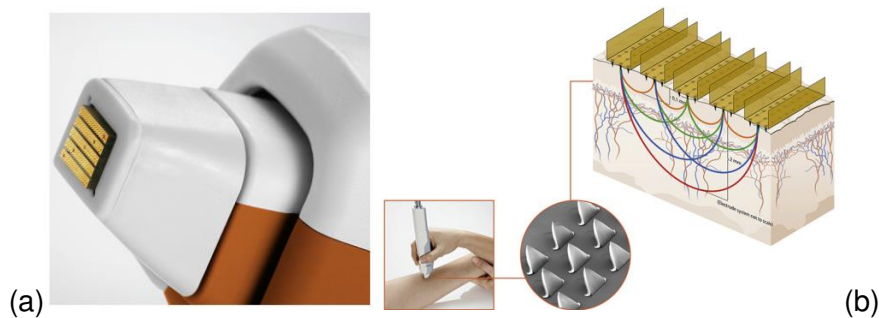


Fig. 5. View of measurement device (a) and measurement principle (b) for skin impedance spectra [6]



There are also studies regarding the relation of fruit quality and impedance spectra [7,8].

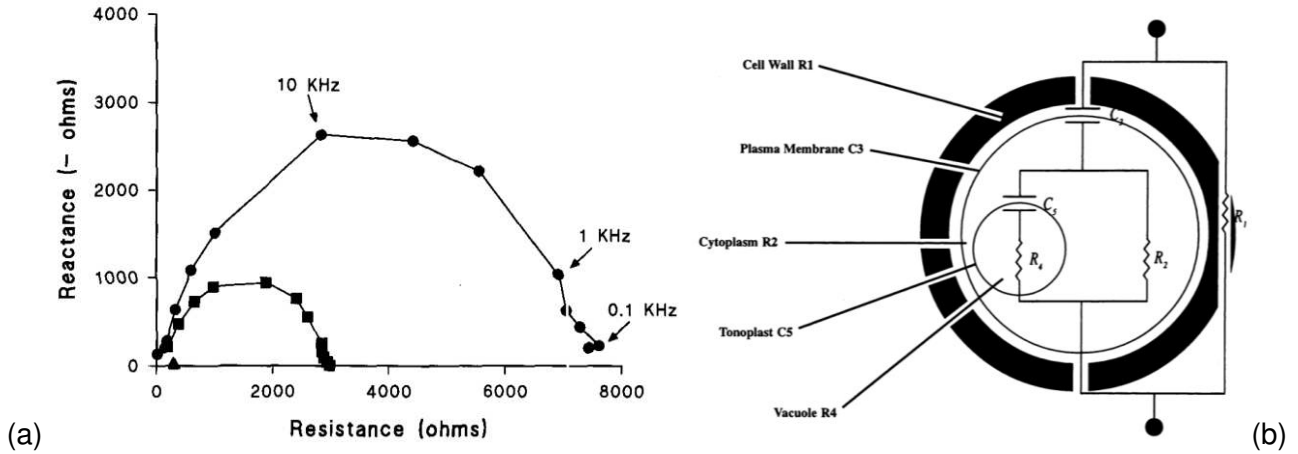


Fig. 6. (a) Impedance spectra of unripe (●) and ripe (■) nectarine tissue, and a frozen and thawed tissue (▲). [7] (b) Equivalent electrical circuit model of a fruit. [8]

The investigation of batteries is also possible using impedance spectroscopy, moreover, it is possible to measure while not disturbing the DC (power) operation, at small alternating currents. Several types of batteries have been investigated experimentally and using simulations of equivalent circuit models, now we cite only Li-ion batteries. Depending on battery type, the excitation frequency range typically extends from a few hundredths of Hz to a few kHz [3,5,9]. There are several equivalent circuit models of the Li-ion battery cell, one of them can be seen on Fig. 7, typical Nyquist plots are depicted on Figs 8 and 9.

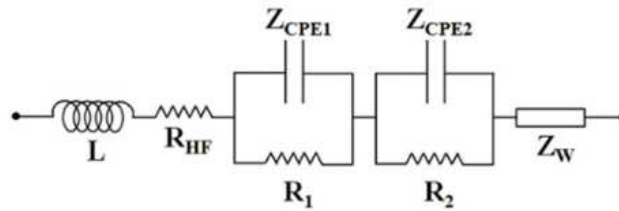


Fig. 7. (a) An equivalent circuit of a Li-ion battery cell [5] (b) Definition of parameters of interest of Li-ion cell Nyquist plot [9]

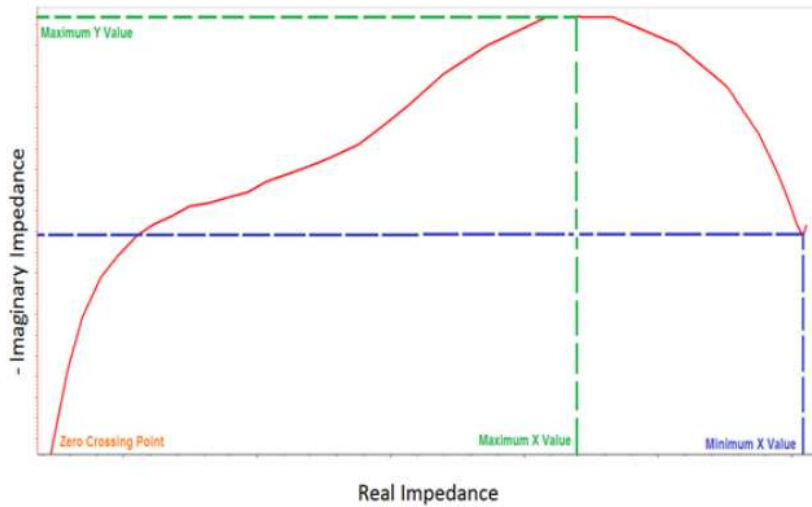


Fig. 8. (a) An equivalent circuit of a Li-ion battery cell [5] (b) Definition of parameters of interest of Li-ion cell Nyquist plot [9]

The ageing of battery cells is a key process in capacity loss. In Fig 9. we can see, how ageing is reflected in the Nyquist plots of the impedance spectra.

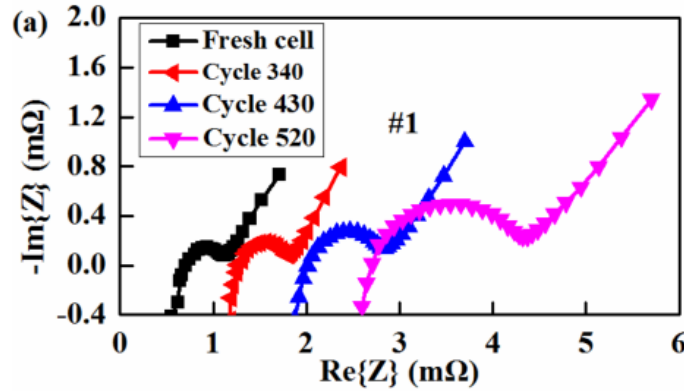
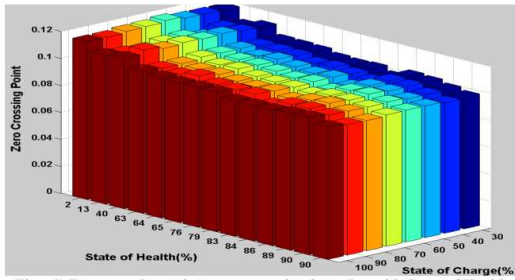
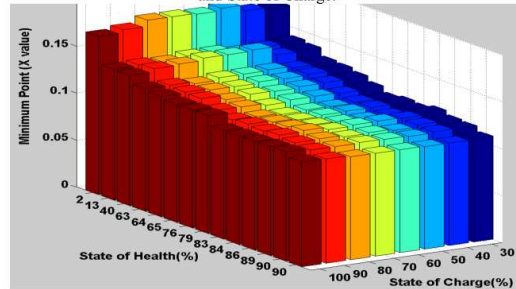


Fig. 9. Evolution of Nyquist plots of a Li-ion battery cell while ageing [10]

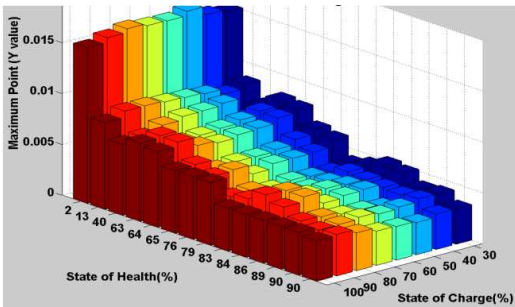
It is worth investigating, if the computing effort of processing full spectral data series, and drawing conclusions from them can be reduced by characterizing the spectra by a few parameters of interest (for definitions see Fig. 8). In Fig. 10. the reflection of the state of health and the state of charge in the parameters of interest is depicted [9].



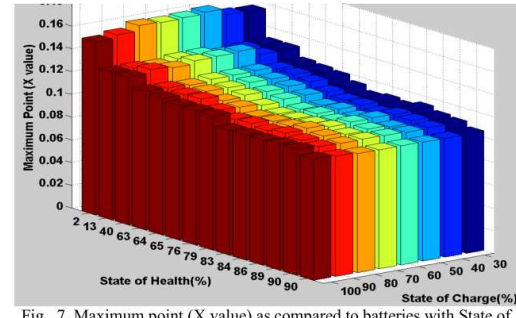
(a) Fig. 4. Zero-crossing point as compared to batteries with State of Health and State of Charge.



(b) Fig. 5. Minimum point (X value) as compared to batteries with State of Health and State of Charge.



(c) Fig. 6. Maximum point (Y value) as compared to batteries with State of Health and State of Charge.



(d) Fig. 7. Maximum point (X value) as compared to batteries with State of Health and State of Charge.

Fig. 10. The effect of the state of health and the state of charge on (a) the zero crossing point, (b) the x-minimum point, (c) the y-maximum point and (d) the x-maximum point.

According to the data on the figures, there is a strong correlation between the parameters of interest chosen and the electrochemical health of the battery.

### 3 Future work

This paper is a preparatory work before the building of the actual impedance spectrum measurement circuit. As electrochemical impedance spectroscopy is a new research field at our University we would like to test as many types of defective batteries as possible, to expertise ourselves in the battery fault–impedance spectrum shape relation.

In some circumstances ultra-low amplitude excitation may be necessary, which requires lock-in amplification before evaluation. At our Faculty there is knowledge of lock-in detection using low-cost (educational grade) DAQ-devices [11].

## 4 Conclusion

We have proposed a measurement principle for the cost- and time-efficient state-of-health testing of individual Li-ion battery cells for the MegaLux solar vehicle racing team at our Faculty. The new experimental device will also serve as basis of knowledge about battery defects, and new researches at material sciences.

## Acknowledgment

This publication is supported by EFOP-3.6.1-16-2016-00006 "The development and enhancement of the research potential at John von Neumann University" project. The Project is supported by the Hungarian Government and co-financed by the European Social Fund.

## References

- [1] <https://www.worldsolarchallenge.org>
- [2] *NCR18650B Standard data*, Energy Company of Panasonic Group (2012)
- [3] Orazem, Tribollet, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, Wiley (2008)
- [4] Ellappan, Sundararajan, *A simulation study of the electrical model of a biological cell*, Journal of Electrostatics **63** (2005) 297–307 (1-s2.0-S0304388604002141-main.pdf)
- [5] Grossi, Riccò, *EIS for biological analysis and food characterization*, J. Sens. Sens. Syst. **6** (2017) 303–325 (jsss-6-303-2017.pdf)
- [6] Braun, Mangana, Goldinger, French, Dummer, Marghoob, *Electrical Impedance Spectroscopy in Skin Cancer Diagnosis*, Dermatol Clin **35** (2017) 489-493 (braun2017)
- [7] Harker, Maingdonald, *Ripening of Nectarine Fruit*, Plant Physiol. **106** (1994) 165-171 (1060165.pdf)
- [8] Bauchot, *The use of electrical impedance spectroscopy to assess the physiological condition of kiwifruit*, Postharvest Biology and Technology **18** (2000) 9–18 (1-s2.0-S0925521499000563-main.pdf)
- [9] Shabbir; Dunford; Shoa, *State of Health Estimation of Li-Ion batteries using Electrochemical Impedance Spectroscopy*, 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Chicago (2017) 108-112 (shabbir2017.pdf)
- [10] Jiang, Lin, Ju, Ma, Zheng, Wang, *Electrochemical impedance spectra for lithium-ion battery ageing considering the rate of discharge ability*, Energy Procedia **105** (2017) 844 – 849 (1-s2.0-S187661021730440X-main.pdf)
- [11] Kőházi-Kis, *Phase-sensitive detection with a low cost DAQ USB device*, Gradus, Vol 3, issue 1, ISSN 2064-8014 (2016)

# NAPENERGIA HASZNOSÍTÁS SZÉNHIIDROGÉN ALAPÚ FÁZISVÁLTÓ ANYAGOKKAL

## SOLAR ENERGY UTILIZATION WITH HYDROCARBON- BASED PHASE CHANGE MATERIALS

Bódi Szabolcs <sup>1\*</sup>, Fekete István <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Természet- és Műszaki Alaptudományi Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar,  
Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

fázisváltó anyagok  
tárolt hőmennyiség  
napenergia hasznosítás

### Keywords:

phase change materials  
stored heat  
solar energy recovery

### Cikk történet:

Beérkezett 2018. szeptember  
20.  
Átdolgozva 2019. január 5.  
Elfogadva 2019. március 15.

---

### Összefoglalás

*Napjaink környezeti problémái miatt egyre nagyobb igény mutatkozik a megújuló energiaforrások iránt. A napenergia hasznosítás egyik jelentős területe a hőtárolás, aminek érdekében az elmúlt időszakban jelentős fejlesztések történtek. A napsugárzás által begyűjthető hő az időjárás, az évszakok függvényében változik, tehát különböző mennyiségben áll rendelkezésre. Ezért indokolt a hő megfelelő tárolása, amit jól el tudunk érni az anyag halmazállapot változása során.*

*Cikkünkben a szénhidrogén alapú fázisváltó anyagok tulajdonságait vizsgáljuk a tárolt hőmennyiség javítása céljából.*

### Abstract

*Due to the environmental problems of today, there is an increasing demand for renewable energy sources. Heat storage is one of the important areas of solar energy utilization, and significant improvements have been made in the past. The heat to be collected by sunlight varies depending on the weather and the seasons, so it is available in different quantities. It is therefore appropriate to store the heat properly, which can be reached well when the substance is changed.*

*In our article, we investigate the properties of hydrocarbon phase change materials to improve stored heat.*

---

## 1. Bevezetés

Az elmúlt 250 év során az ásványi tüzelőanyagok elégetésével állították elő és állítják elő jelenleg is a világ modern civilizációját működtető energiát-akár villamos- vagy hőenergiáról legyen szó.

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76 516 338  
E-mail cím: bodi.szabolcs@gamf.uni-neumann.hu

Egyre nyilvánvalóbbá vált a huszadik század utolsó harmadában, hogy nem fenntartható a fejlődés addigi trendje: korlátozott mennyiségben állnak rendelkezésre a fosszilis energiaforrások, a meglévő források egyre nagyobb költséggel szállíthatók. Globális léptékű éghajlatváltozáshoz vezet az elégetésük során az üvegházhatású gázok nagymértékű megnövekedése. A döntéshozók is felismerték a tudományos és szakmai körök után, hogy valamit tenni kell. A célokat, kibocsátási kvótákat nemzetközi egyezmények rögzítették, valamint a környezetbarát technológiák elterjedését állami szubvenciók segítik [6].

A megújuló energiaforrások felhasználása fontos szerepet játszik a környezetkárosítás csökkentésében, valamint az energiaellátás hosszabb távú racionalitásában [5]. A sugárzás passzív hasznosításakor, olyan épületszerkezetek alkalmazásával lehet csökkenteni az épületek fűtési energiaszükségletét, melyek fokozottan felhasználják a napsugárzást [3].

Az aktív napenergia hasznosítás során a vége energiává alakítjuk át a nap energiáját aktív hasznosító eszközzel. Két alapvető fajtája terjedt el az aktív napenergia hasznosításnak. Az első esetben hőenergiává alakítjuk át a Nap energiáját közvetítő közeg segítségével egy berendezésben (a napkollektorban), ezeket hívjuk napkollektoros rendszereknek. A második esetben közvetlenül villamos energiává alakítjuk át a Nap energiáját egy berendezésben (a napelemben), ezeket hívjuk napelemes rendszereknek [4].

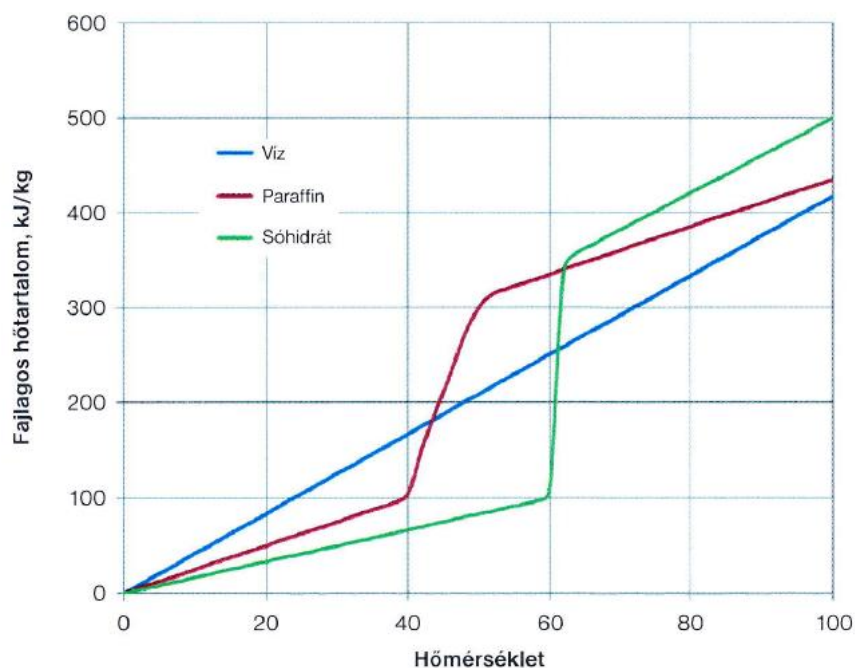
A hőt tárolnunk kell, ha hőenergiát akarunk felhasználni valamilyen formában és nincs mód arra, hogy alkalmazkodjunk a hőtermelés oldaláról a folyamatosan változó igényekhez. Két féle hőtárolásról beszélhetünk: szenzibilis, illetve látens hőtárolásról. Az olvadáspont alatt és felett szenzibilis hőtárolással szinte minden esetben számolnunk kell látens hőtárolás esetén [1]. Gazdaságosan leginkább a folyadék-szilárd/szilárd-folyadék fázisátmenet hőtartalom változást használjuk ki.

Számos műszaki probléma megoldására használjuk az ilyen fázisváltó hőtároló anyagokat (PCM-Phase Change Materials). Az előnyös tulajdonságok mellett, hátrányos pl. a nagy rétegvastagság, a nem túl jó hőátadási tényező, a viszonylag kis hőátadási felület miatt a bennük tárolt hőt csak túlságosan lassan vagy nagy hőmérséklet-különbség hatására veszik fel és adják le [2].

Az 1. ábrán látható az érzékelhető és látens hő tároló anyagok összehasonlítása. Megfigyelhető az ábrán, hogy közel arányos a hőmérséklet-változással az egységnyi tömegben tárolható hőmennyiség (kJ/kg) növekedése a csak érzékelhető hő tárolására használt anyagok (pl. víz) esetén. Viszont ugyan közel lineáris összefüggés áll fent a fázisváltozás tartománya alatt és felett a látens hő tárolására használt anyagok (pl. paraffin) esetében, de a fajlagos dermedéshő vagy olvadáshő nagyságától függően ugrásszerű hőtartalom-változás következik be fázisváltáskor [2].

Cikkünkben a kereskedelemben könnyen beszerezhető szilárd halmazállapotú paraffin viasz (Paraffinum solidum) tulajdonságait vizsgáljuk, mely alapján következtetéseket vonunk le annak hőtárolási célra való felhasználhatóságára a napenergia hasznosító rendszerek esetében. A paraffin a  $C_nH_{2n+2}$  felépítésű alkán szénhidrogéneket foglalja össze, mely elnevezés a latin parum (kevés)+ affinis (reakcióképes) szavak összetétele. Az alkánok azon tulajdonságára utal a neve, hogy nagyon nehezen lépnek reakcióba más molekulákkal.

A paraffin viasz szilárd anyagot alkot, mely tiszta formában fehér, szagtalan. Sűrűsége  $0,9 \text{ g/cm}^3$ , olvadáspontja  $47-64 \text{ }^\circ\text{C}$ , mely függ a benne található molekulák átlagos hosszától. Kiváló villamos szigetelő anyagként használják a tiszta paraffint, a fajlagos ellenállása  $10^{13}-10^{17} \text{ } \Omega\text{m}$ . Olvadáshője  $200-220 \text{ J/g}$ , fajlagos hőkapacitása pedig  $2,14-2,9 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ , ezért előszeretettel használják a jó hőtárolási képességei miatt [9].



1. ábra. Érzékelhető és látens hő tároló anyagok fajlagos hőtartalmának változása a hőmérsékletváltozás során [2]

## 2. A mérőrendszer bemutatása

RADWAG WPS 210/C/2 digitális mérleg (4. ábra) segítségével mértük a paraffin tömegét ~15 g-os kiszerezésekben, melyeket öntapadós zacskókba raktunk (2. ábra). A mérleg méréshatára 210 g, illetve 0,001 g-nyi pontossággal tud mérni [7].



2. ábra. A mérésekhez használt paraffin tömegek

Az víz, illetve a paraffin hőmérsékletének a mérését az idő függvényében a CASSY Lab 2 szoftvert és adatgyűjtő rendszer segítségével végeztük. Az anyagok olvadáshőjének, fajhőjének stb. meghatározására szolgáló kaloriméterben mértük a paraffin-, illetve a hideg- és melegvíz hőmérsékletét (3. ábra).



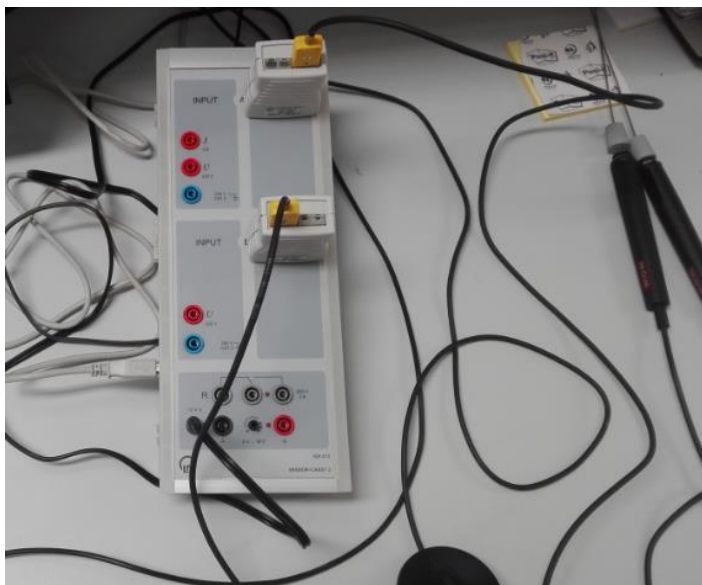


3. ábra. A kaloriméter a ráhelyezett szenzorokkal



4. ábra. RADWAG WPS 210/C/2 digitális mérleg

A hideg- illetve a meleg víz tömegének a mérését a HAUSER® által forgalmazott digitális konyhai mérleg (DKS-1064W) segítségével végeztük, melynek a méréshatára 5 kg, pontossága pedig 1 g. Az víz, illetve a paraffin hőmérsékletének a mérését az idő függvényében a CASSY® Lab 2 szoftvert és adatgyűjtő rendszer segítségével végeztük (5. ábra).



5. ábra. Az adatgyűjtő rendszer a szenzorokkal

A hőmérsékletmérést az ellenállás hőmérsékletfüggését használó szenzorokkal (5. ábra) valósítottuk meg, melyek a LEYBOLD® által forgalmazott NiCr-Ni, 1.5 mm, K típusú digitális termométerek, pontosságuk  $\frac{1}{2}$  DIN IEC 584 class 2 ( $\pm 1.25\%$ ) [8]. A szenzorokat csatlakoztattuk az említett adatgyűjtő rendszerhez. A hideg – illetve forró vizet, valamint a zacskókat, melyekben a paraffint helyeztük egy kaloriméterbe helyeztük a jobb energiátárolás céljából. A nagyobb merevség biztosítása céljából egy hungarocell lapot ragasztottunk a kaloriméter fedelére, hogy a szenzorok merőlegesen álljanak és a mérés menete optimális legyen.

### 3. Mérések bemutatása

A szemléletesség és cikk terjedelmére való tekintet miatt a 6 db. mérés közül a másodikat mutatjuk be, a többi mérés eredményeit táblázatban fogjuk ismertetni. Az ábrán látható diagram három szakaszból áll. Az első szakasz melegítés (6.a. és 6. b. ábra), melynek során 15,01 g tömegű, valamint 28 ° C hőmérsékletű paraffint vettünk. Ehhez melegítettünk vízforralóban 180 g tömegű és 83,6 ° C hőmérsékletű vizet. Ezt követően beleöntöttük a kaloriméterbe a forró vizet, belehelyeztük az öntapadós zacskóban lévő paraffint, lezártuk a kalorimétert. A<sub>12</sub> jelű szenzorral mértük a víz hőmérsékletének az alakulását az idő függvényében (kék szín), valamint B<sub>11</sub> jelű szenzorral a paraffin hőmérsékletének az alakulását az idő függvényében (narancssárga szín). A mért adatokat Excelben ábrázoltuk.

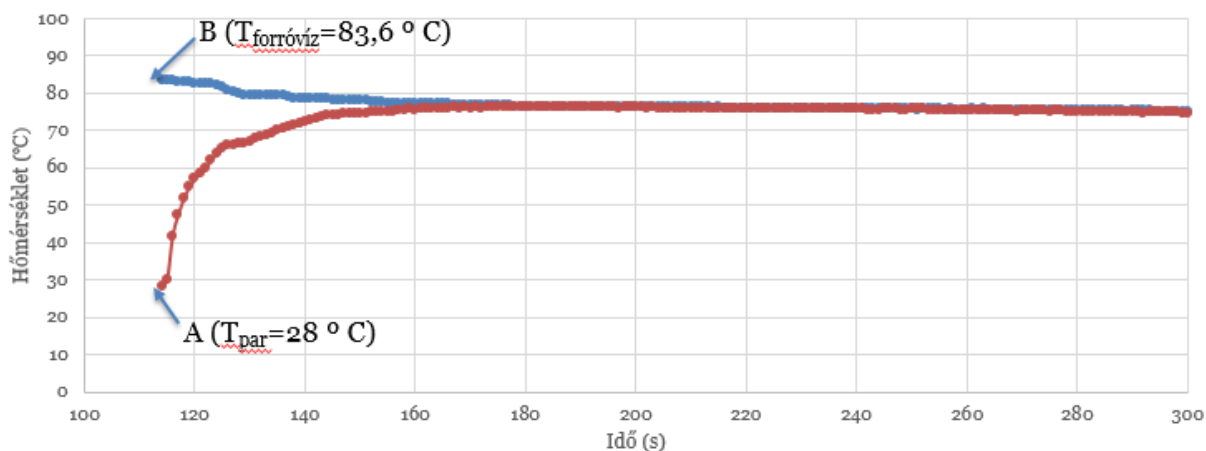
A 6. a. és 6. b. ábra adatai alapján meghatároztuk a fázisváltás olvadáshőjét ( $L_{olv}$ ) azon két hőmérséklet intervallum között, amikor a paraffin elkezd olvadni, illetve amikor az egész paraffin mennyiség megolvadt, valamint a paraffin folyékony fajhőjét ( $c_{part}$ ) azon a szakaszon, amikor már az egész paraffin mennyiség olvadt állapotban van. Mind a folyékony fajhő, mind a szilárd fajhő megállapításakor egy köztes hőmérséklet intervallumot vettünk figyelembe és nem azt a hőmérsékletet, amikor már beállt a közös hőmérséklet, nehogy torz értékeket kapjunk. A számolás korrektsége miatt külön megmértük a kaloriméter vízértékét ( $m_v$ ), melynek részleteit most nem mutatjuk be. Az adatokat az 1. Táblázat tartalmazza.

1. Táblázat. Mérési adatok a 6.a. és 6.b. ábrához

| $m_{par}$<br>[g] | $T_{par}$<br>[°C] | $m_{forróvíz}$<br>[g] | $m_v$<br>[g] | $c_v$<br>[kJ/(kgK)] | $T_{forróvíz}$<br>[°C] | $T_{parolv1}$<br>[°C] | $T_{parolv2}$<br>[°C] | $T_1$<br>[°C] | $T_2$<br>[°C] |
|------------------|-------------------|-----------------------|--------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------|
| 15,01            | 28                | 180                   | 7,74         | 4,183               | 83,6                   | 65,2                  | 67,2                  | 81,4          | 79,3          |

Ahol:

|                     |                                                                                                                                                 |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $m_{par}$ [g]       | a paraffin mennyiség tömege                                                                                                                     |
| $T_{par}$ [°C]      | a paraffin kezdeti hőmérséklete                                                                                                                 |
| $m_{forróvíz}$ [g]  | a forróvíz tömege                                                                                                                               |
| $m_v$ [g]           | a kaloriméter vízértéke                                                                                                                         |
| $c_v$ [kJ/(kgK)]    | a víz fajhője                                                                                                                                   |
| $T_{forróvíz}$ [°C] | a forróvíz kezdeti hőmérséklete                                                                                                                 |
| $T_{parolv1}$ [°C]  | a diagramról leolvasott paraffin olvadásának feltételezett kezdeti hőmérséklete                                                                 |
| $T_{parolv2}$ [°C]  | a diagramról leolvasott paraffin olvadásának feltételezett végső hőmérséklete (az a hőmérséklet, amikor már az egész $m_{par}$ tömeg megolvadt) |
| $T_1$ [°C]          | a paraffin feltételezett olvadásának kezdetekor a víz hőmérséklete                                                                              |
| $T_2$ [°C]          | a paraffin feltételezett olvadásának végén a víz hőmérséklete                                                                                   |



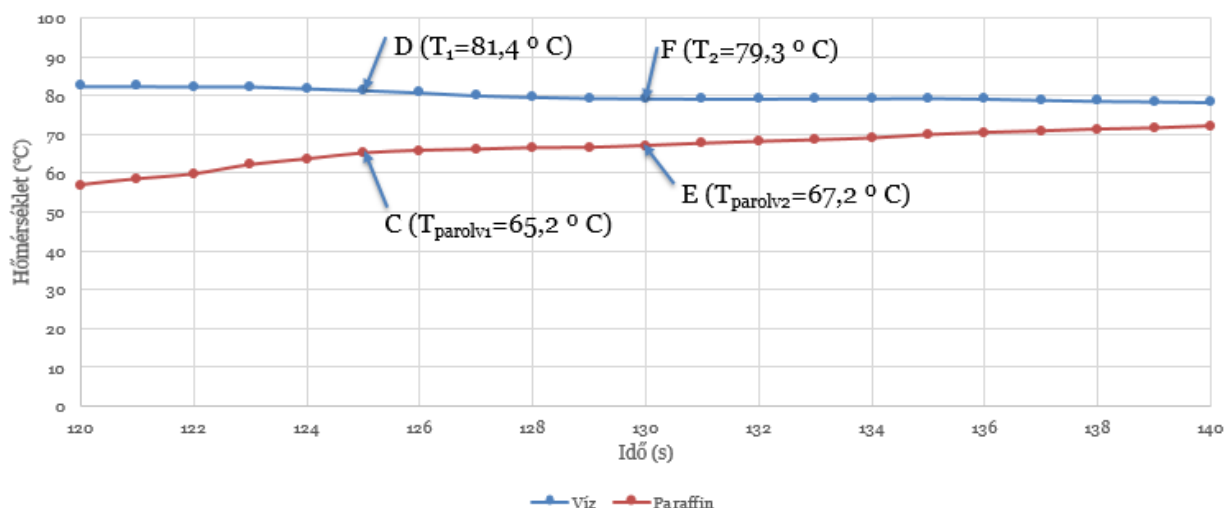
6. a. ábra. Melegítés

Az energia megmaradás törvénye értelmében a víz által leadott hő megegyezik a paraffin által felvett hővel.

$$m_{par}L_{olv} = (m_{forróvíz} + m_v)c_v(T_1 - T_2) \quad (1)$$

Innen:

$$L_{olv} = \frac{(m_{forróvíz} + m_v)c_v(T_2 - T_1)}{m_{par}} = \frac{(180 + 7,74)4,183(81,4 - 79,3)}{15,01} = 110,4 \left[ \frac{kJ}{kgK} \right] \quad (2)$$



6. b. ábra. A 6. a. ábra kinagyítása a paraffin feltételezett olvadásának kezdetének és végének bemutatásával

A paraffin folyékony fajhőjének meghatározására végeztünk számításokat azon a szakaszon, amikor már az egész paraffin mennyiség megolvadt, de a számolt értékek nagy eltérést mutattak, ezért ennek a meghatározása további átgondolást, méréseket igényel.

A paraffin folyékony fajhőjének meghatározása:

Ahol:

|                       |                                                              |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------|
| $m_{\text{par}}$      | a paraffin mennyiség tömege [g]                              |
| $m_{\text{forróvíz}}$ | a forróvíz tömege [g]                                        |
| $T_7$                 | a folyékony paraffin hőmérséklete $t=155$ s pillanatban [°C] |
| $T_8$                 | a folyékony paraffin hőmérséklete $t=170$ s pillanatban [°C] |
| $T_9$                 | a víz hőmérséklete $t=155$ s pillanatban [°C]                |
| $T_{10}$              | a víz hőmérséklete $t=170$ s pillanatban [°C]                |

$$c_{\text{parf}} = \frac{(m_{\text{forróvíz}} + m_v) c_v (T_9 - T_{10})}{m_{\text{par}} (T_8 - T_7)} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] \quad (3)$$

A 2. mérés b. részében a kaloriméterben kicseréltük a forró vizet hideg vízre. Ezen mérési adatokból meghatároztuk a paraffin szilárd fajhőjét ( $c_{\text{parsz}}$ ) azon a szakaszon, amikor a paraffin hőmérséklete csökken, a víz hőmérséklete pedig melegszik (7. ábra). A szilárd fajhő meghatározásához hasonlóan ezúton is vettünk két időpontot ( $t_1=1189$  s és  $t_2=1253$  s), amikor leolvastuk a paraffin és a víz hőmérsékletét. Az adatokat a 2. Táblázat tartalmazza.

2. Táblázat. Mérési adatok a 7. ábrához

| $m_{\text{hidegvíz}} [g]$ | $T_3 [^\circ C]$ | $T_4 [^\circ C]$ | $T_5 [^\circ C]$ | $T_6 [^\circ C]$ |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 150                       | 46,4             | 39,2             | 28,2             | 28,7             |

Ahol:

$m_{\text{hidegvíz}}$  [g]

$T_3$  [°C]

$T_4$  [°C]

$T_5$  [°C]

$T_6$  [°C]

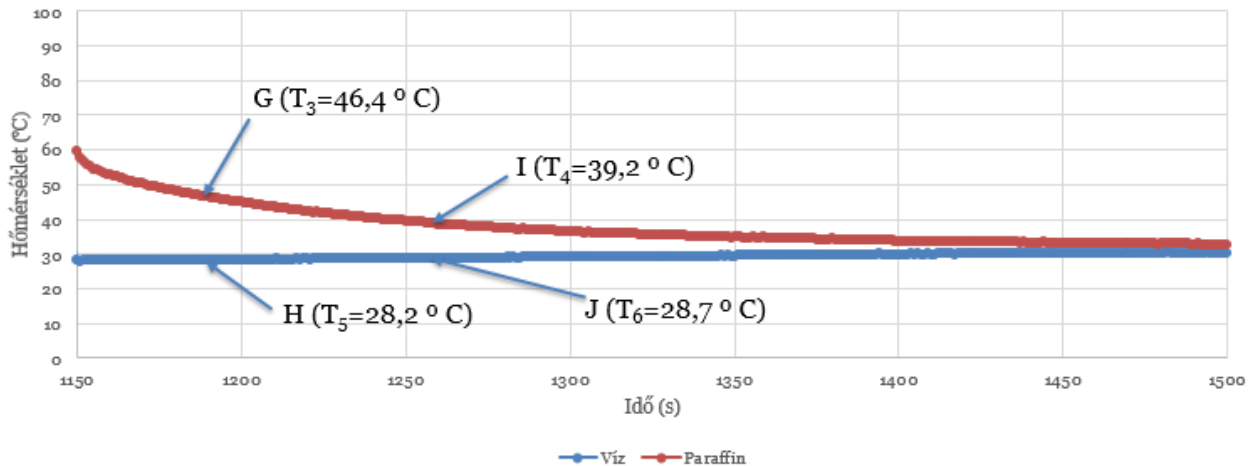
a hidegvíz tömege

a paraffin hőmérséklete  $t=1189$  s pillanatban

a paraffin hőmérséklete  $t=1253$  s pillanatban

a víz hőmérséklete  $t=1189$  s pillanatban

a víz hőmérséklete  $t=1253$  s pillanatban



7. ábra. Hűtés

A szilárd fajhő meghatározása:

$$c_{\text{parsz}} = \frac{(m_{\text{hidegvíz}} + m_v) c_v (T_6 - T_5)}{m_{\text{par}} (T_3 - T_4)} = \frac{(150 + 7,74) 4,183 (28,7 - 28,2)}{15,01 (46,4 - 39,2)} = 3,1 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right] \quad (4)$$

A hűlés hatására a zacskóban lévő paraffin folyamatosan szilárdult.

A melegítési folyamat során (a. és c. szakaszon) meghatároztuk a tárolt hőmennyiséget ( $Q_{\text{tárolt}}$ ), ameddig az egész paraffin mennyiség megolvadt. A víz által leadott hő megegyezik a paraffin által felvett hővel. Mivel a diagramról nem tudjuk egyértelműen meghatározni, hogy pontosan mikor kezdődik meg az olvadás és mikor fejeződik be, ezért a paraffin 40 °C és 65 °C közti intervallumban számoltuk a tárolt hőmennyiséget, vagyis a víz által leadott hőből számoltunk. A tárolt hőmennyiség számolását bemutatom a 2. mérés c esetében, melynél az adatokat a 3. Táblázat tartalmazza.

A paraffin által tárolt hőmennyiség:

$$Q_{\text{tárolt}} = \frac{(m_{\text{víz}} + m_v) c_{\text{víz}} (T_{11} - T_{12})}{1000} \quad (5)$$

$$Q_{\text{tárolt}} = \frac{(196 + 7,74) 4,183 (93,4 - 86,7)}{1000} = 5,7 \text{ [kJ]}$$

## 3. Táblázat. Mérés adatok a tárolt hőmennyiséghez

| $m_{\text{viz}} [\text{g}]$ | $m_v [\text{g}]$ | $c_v [\text{J/gK}]$ | $T_{11} [^\circ\text{C}]$ | $T_{12} [^\circ\text{C}]$ |
|-----------------------------|------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|
| 196                         | 7,74             | 4,183               | 93,4                      | 86,7                      |

Ahol:

|                             |                                                                      |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $m_{\text{viz}} [\text{g}]$ | a forró víz tömege                                                   |
| $m_v [\text{g}]$            | a kaloriméter vízártéke                                              |
| $c_v [\text{J/gK}]$         | a víz fajhője                                                        |
| $T_{11} [^\circ\text{C}]$   | a víz hőmérséklete, mikor a paraffin hőmérséklete $40^\circ\text{C}$ |
| $T_{12} [^\circ\text{C}]$   | a víz hőmérséklete, mikor a paraffin hőmérséklete $65^\circ\text{C}$ |

A 4. Táblázatban ismertetjük az olvadáshőt és a tárolt hőmennyiséget.

## 4. Táblázat. Az olvadáshő és a tárolt hőmennyiség értékei két tizedesnyi pontossággal

| Mérés        | $L_{\text{olv}} [\text{kJ/kg}]$ | $Q_{\text{tárolt}} [\text{kJ}]$ |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. mérés (a) | 86,2                            | 2,4                             |
| 2. mérés (a) | 110,4                           | 1,7                             |
| 2. mérés (c) | 92                              | 5,7                             |
| 4. mérés (a) | 104                             | 0,2                             |
| 4. mérés (c) | 72,1                            | 6,6                             |
| 5. mérés (c) | 147,8                           | 4,9                             |
| 6. mérés (a) | 23,8                            | 2,2                             |
| 6. mérés (c) | 55,6                            | 2,8                             |

Az átlagosan tárolt hőmennyiség:

$$Q_{\text{átl}} = 3,3 \text{ kJ}$$

Az 5. Táblázatban ismertetjük a szilárd fajhő értékeit.

## 5. Táblázat. A szilárd fajhő értékei két tizedesnyi pontossággal

| Mérés        | $c_{\text{parsz}} [\text{kJ/kgK}]$ |
|--------------|------------------------------------|
| 1. mérés (b) | 2,1                                |
| 2. mérés (b) | 3,1                                |
| 4. mérés (b) | 11,6                               |
| 5. mérés (b) | 3,9                                |
| 6. mérés (b) | 1,7                                |

A 3. (b) mérésnél azért nem határoztuk meg a szilárd fajhő értékét, mert ott a víz folyamatosan hűl.



## 4. Következtetések

Cikkünkben a szilárd paraffin viasz (Paraffinum Solidum) tulajdonságait vizsgáltuk annak érdekében, hogy megállapításokat tegyünk a hőtároló képességére, mely alapul szolgálhat az aktív napenergia hasznosítás (fotovillamos, fototermikus, hibrid napelem/napkollektor rendszer (PV/T), vagy akár épületbe integrálható napenergia hasznosító rendszerek) esetén hőtárolásra, vagy akár hűtésre, mely által a napelemes rendszer hatásfoka javítható.

Kaloriméterben mértük a hideg/melegvíz, illetve a paraffin hőmérsékletének a változását az idő függvényében, mely adatokat CASSY Lab 2 szoftvert és adatgyűjtő rendszer segítségével gyűjtöttünk össze és rögzítettünk. Eredeti célunk az volt, hogy meghatározzuk a paraffin szilárd fajhőjét, folyékony fajhőjét, olvadáshőjét, valamint a paraffin által tárolt hőmennyiséget.

A paraffin folyékony fajhőjére végeztünk számításokat, mely értékek viszont túl nagy eltérést mutattak. Ezért ennek a meghatározása további átgondolást, méréseket igényel.

A paraffin olvadáshőjének, szilárd fajhőjének, valamint az olvadás befejezéséig tárolt hőmennyiség értékeinek nagy szórását több tényező okozhatja.

- Egyrészt előfordulhat, hogy a zacskóba helyezett szenzor pontosan a paraffin hőmérsékletét méri-e, vagy hozzáér a zacskóhoz és esetleg a zacskó hőmérsékletét méri.
- Az is előfordulhat, hogy a zacskóban lévő paraffin egy része már megolvadt és nem egyértelmű, hogy az adott időpillanatban a még szilárd halmazállapotú paraffin hőmérsékletét méri a szenzor, vagy a már olvadt halmazállotúét.
- Ha az öntapadós zacskó nem zár teljesen, az is befolyásolhatja a mérési eredményeket.
- További bizonytalanságot jelent a mérési értékek leolvasása, hogy pontosan melyik hőmérsékleten kezdődik el a paraffin olvadása és melyik értéken fejeződik be. A leolvasott hőmérséklet értékek nagyban befolyásolják a számolt eredményeket.

További mérésekre, vizsgálatokra van szükség, hogy a paraffin irodalmi értékeihez közelebb tudjunk kerülni. A gyorsabb hőátadás elérése, valamint a pontosabb eredmények megállapítása céljából szeretnénk vizsgálni a paraffin hőtárolását kapszulázás esetén, mely alkalmazható vizes tárolóban. A paraffint túlmelegedés elleni védelemre is lehetne használni hűtőborda alkalmazásával Al-ból (mivel jobb hővezető a paraffinnál), pl. napelem modul alá helyezve, a napelem cella hőmérsékletének csökkentése által növelve a modul villamos hatásfokát. Megfelelő hőtárolással a hagyományos puffertartályok méreteit is lehetne csökkenteni.

## Irodalomjegyzék

- [1] Árokszállási, K.: Hőtárolás- a jövő technológiája; Roxa Kft., Erd, 9-75. o. ISBN 978-963-08-1681-6 (2011)
- [2] Gyenis, J.; Tóth, J.; Feczko, T.; Szépvölgyi, J.: Mikrokapszulázott fázisváltó anyagok alkalmazása hőtárolásra, Magyar Kémikusok Lapja, LXIX. évfolyam, 12. szám, 368-369. o. (2014)
- [3] Farkas, I. (szerk). és tsai.: Napenergia a mezőgazdaságban, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 37.-55. o. ISBN: 963 9358 91 6 (2003)
- [4] Horváth, J.: Megújuló energia, tankönyv. (2011) Available: [https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021\\_Megujulo\\_energia/ch05s03.html](https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0021_Megujulo_energia/ch05s03.html) [Megtekintés: 27-May-2018]:
- [5] Sembery, P.; Tóth, L.: Hagyományos és megújuló energiák; Szaktudás Kiadó Ház, Budapest, 327-328. o. ISBN 963 9553 15 8 (2004)
- [6] Zöld, A.; Szalay, Zs.; Csoknyai, T.: Energiatudatos építészet 2.0. TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft., Budapest, 11-186. o. ISBN 978 615 5445 34 7 (2016)
- [7] EMALOG Kft. honlapja: <http://www.emalog.hu/hun/termek/precizios/wps.html> [Megtekintés: 24-Nov-2018]
- [8] LD DIDACTIC cég honlapja: <https://www.leybold-shop.com/temperature-probe-nicr-ni-1-5-mm-type-k-529676.html> [Megtekintés: 24-Nov-2018]
- [9] WIKIPÉDIA: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Paraffin> [Megtekintés: 10-Oct-2018]

# HENGERES CSÉSZÉK MÉLYHÚZÁSOKOR FELLÉPŐ RÁNCOSODÁS BECSLÉSÉNEK ELMÉLETI MÓDSZEREI

## THEORETICAL ESTIMATION METHODS ON THE WRINKLING OF CYLINDRICAL DEEP DRAWN CUPS

Béres Gábor<sup>1\*</sup>, Tisza Miklós<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup>Mechanikai Technológiai Intézeti Tanszék, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,  
Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Miskolci Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

mélyhúzás  
hengeres csésze  
ráncosodás

### Keywords:

deep drawing  
axisymmetric cup  
wrinkling

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 11.

Átdolgozva 2018. október 25.

Elfogadva 2019. március 14.

---

### Összefoglalás

A cikkben, hengeres csészek mélyhúzásakor fellépő ráncosodás jelenségének becslésére szolgáló elméleti módszerekről olvashatunk. A ráncosodás (ráncképződés), a lemezalkatrészek tönkremenetelének második leggyakoribb okozója, a lemez szakadása után. Mérnöki és technológusi szinten is komoly kihívásokat jelent olyan alakító technológiák kidolgozása, melyek egyrészt megakadályozzák a lemez ráncosodását, másrészt ezzel nem kényszerítik ki a lemez idő előtti szakadását. A cikkben bemutatjuk, a napjainkban legelterjedtebben használt elméleti módszerek alapjait, alap feltevéseit, alapegyenleteit. Kihangsúlyozásra kerül, az elsőként Hill által megfogalmazott, majd Hutchinson által tovább-fejlesztett, úgynevezett „bifurcation” módszer és az energia-alapú módszer is. Az áttekintésből természetesen nem hiányozhatnak a véges elemes technikák sem, melyek közül jelen esetben, az AutoForm szoftver megoldásaiba nyelhetünk betekintést.

### Abstract

This study presents the theoretical methods for the estimation of wrinkling of cylindrical deep drawn cups. Wrinkling is regarded as the second most frequent failure reason after splitting, in sheet metal industry. Carrying out such forming processes, which are able to eliminate undesirable wrinkling and do not force the early disruption of the blank in the same time, is still a serious challenge for both engineers and technologists. This paper deals with the basic assumptions and equations of recently widely applied theoretical evaluating methods. Hill's bifurcation criterion - later further developed by Hutchinson -, and the energy-based method are primarily highlighted. In the field of finite element techniques, the solutions get by the AutoForm software are described in details.

---

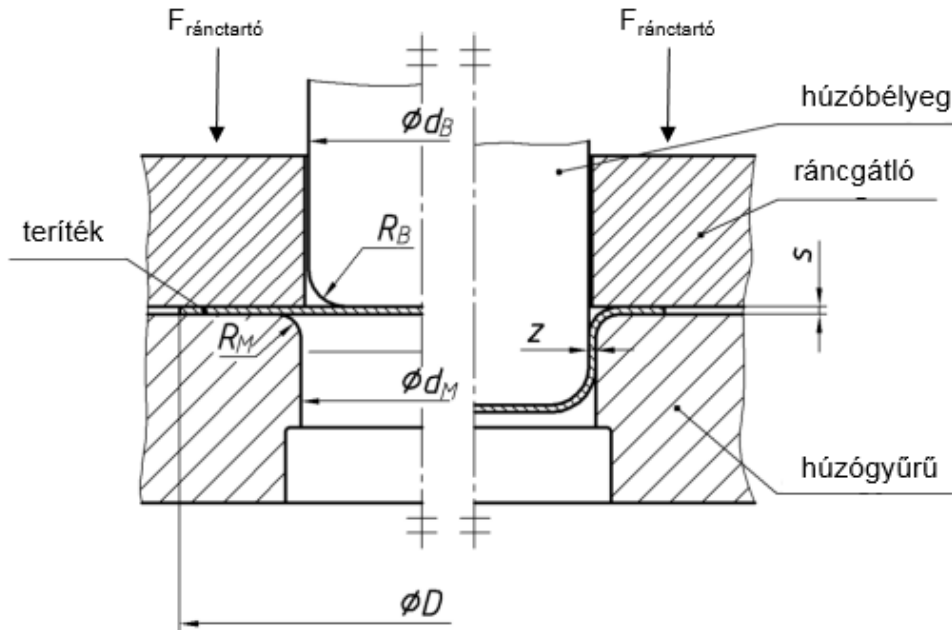
## 1. Bevezetés

Mélyhúzás során jellemzően vékony falú, üreges testet állítunk elő, egy sík lemeznek, az ún. terítéknek a húzógyűrűn történő áthúzása, vagy egyéb tetszőleges alakú húzószerszámba történő

---

<sup>1\*</sup> Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76/516-377  
E-mail cím: beres.gabor@gamf.uni-neumann.hu

préselése folytán. A kiinduló sík teríték kerületi részeit a legtöbb esetben, egy úgynevezett ráncgátló szerszám segítségével a húzógyűrű - vagy egyéb húzószerszám - homlokfelületére szorítjuk, míg a teríték középső részeit a bélyeg alakítja a kívánt alakra. A folyamat során, a teríték pereméről az anyagot a bélyeg, a húzógyűrűbe/szerszámba húzza, így a gyártandó munkadarab mélysége egyre nő. A lemezvastagság, a mélyhúzott darab egyes részein, bár kis mértékben ámde sok esetben ismert módon változik a húzóművelet hatására, mégis a gyakorlati egyszerűsítések többnyire állandó lemezvastagságot tételeznek fel a munkadarab egészére [1]. Ez a közelítés természetesen, csak egyszerűbb darabok mélyhúzása esetén állja meg vita nélkül a helyét. A lemezvastagság változására szemléletes példákat találunk a [2, 3, 4] irodalmakban. A mélyhúzás elvi ábráját az 1. ábra szemlélteti.

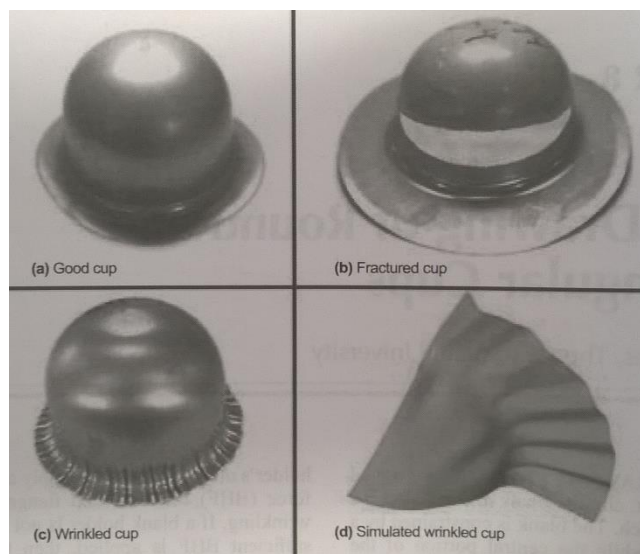


1. ábra: A mélyhúzás elvi ábrája [4]

A mélyhúzási folyamat végezhető egyszeres és kettős működésű prégépeken is. A NJE-GAMF Anyagtechnológia Tanszékén, egy kettős működésű Erichsen-142 típusú hidraulikus lemezvizsgáló berendezés áll a rendelkezésünkre, mely kezelése során külön-külön működtethető a ráncgátló szerszám és a bélyeg mozgása.

A mélyhúzási műveletben résztvevő alkatrész egyik legkritikusabb része a darab pereme, amelyet egyszerre terhel tangenciális (érintő) irányú nyomófeszültség és radiális irányú húzófeszültség. A bonyolult feszültségi állapot következtében, a geometriai viszonyok és az anyagjellemzők függvényében a teríték ráncosodhat. Ennek megakadályozása érdekében szükséges a ráncgátló szerszám használata, mely az előbb jellemzett feszültségi állapotot, a saját maga által kifejtett ráncgátló nyomással (az 1. ábrán függőleges irányú nyomófeszültséggel) tovább bonyolítja. A ráncgátló szerszám, és így az alkalmazott ráncgátló nyomás fő feladata a teríték-peremrész ráncosodásának megakadályozása. Ez egyrészt az axiális irányú nyomófeszültséggel, másrészt pedig a súrlódás útján történik. Előbbi, egyszerűen gátolja a peremrésznek, a lemezteríték síkjából való kitérését, utóbbi pedig nehezíti a perem behúzódnát a húzógyűrűbe/szerszámba, így növelve a radiális irányú húzófeszültséget, mely részben szintén a ráncosodás ellen hat. A nem elégséges ráncgátló erő (vagy a perem felületére vonatkoztatott ráncgátló nyomás) a munkadarab peremének ráncosodását, míg a túl nagy ráncgátló erő a munkadarab idő előtti szakadását eredményezheti. A 2. ábra (a) – (c) képe mélyhúzással gyártott hengeres csészéket mutat, melyeken megfigyelhető a ráncosodás (c) és a szakadás (b) jelensége is. A (d) ábrarészleten egy véges elemes szimuláció eredménye látható, a peremén ráncosodott

egynegyed csészével (a szimmetria miatt elegendő mindössze a munkadarab egynegyed részének vizsgálata) [1].

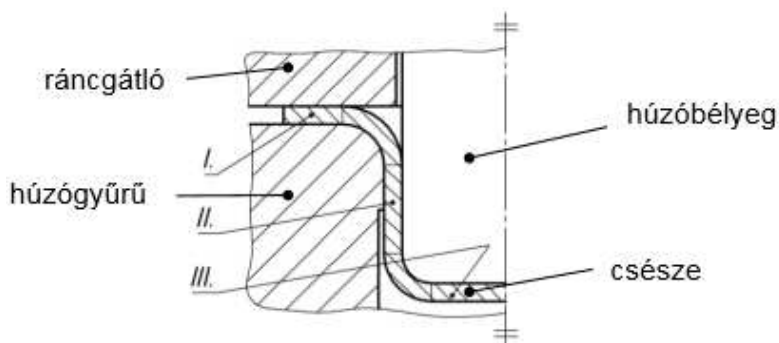


2. ábra: Kísérleti (a), (b), (c) és szimulációs úton előállított mélyhúzott csészek [1]

## 2. Alakváltozás a mélyhúzás során

A mélyhúzott darab ráncosodásának mélyebb megértése érdekében, előbb tekintsük át, hogy milyen alakváltozási állapotok és erőtan viszonyok uralkodnak a mélyhúzási folyamat során. A mélyhúzás ugyanis, az egyik legbonyolultabb, gyakran alkalmazott lemezalakító művelet, így a lemez alakváltozása a darab egyes részein, nem minden esetben magától értetődő.

Egy jellemző, hengeres mélyhúzott csésze a következő részekre és alakváltozási állapotok szerint bontható fel (3. ábra):



3. ábra: Hengeres csésze mélyhúzásának elvi vázlata és a különböző alakváltozási állapotokkal bíró szakaszok [4]

**I szakasz:** a peremrész. A képlékeny alakváltozás legnagyobb részben a darab peremén játszódik le, melyet radiális irányú húzó, és tangenciális, illetve tengely irányú nyomófeszültség terhel – ahol a tengely irány a mélyhúzó bélyeg szimmetria tengelyével párhuzamos. Ahogy a bélyeg a folyamat során egyre több és több anyagrészt húz be a húzógyűrűbe, a perem átmérője csökken, ami a perem ráncosodásával és/vagy vastagodásával járhat. Szintén a bélyeg mozgása folytán, a húzószerszám lekerekítéséhez közel lévő lemezrészek viszont vékonyodnak, ami nem egyenletes lemezvastagsághoz és ráncgátló nyomáshoz vezethet [1].

**I és II közötti szakasz:** a húzószerszám lekerekítési sugarával érintkező anyagrészek. A ráncgátló szorításából kiszabaduló lemezrész a húzószerszám lekerekítési sugarán hajlításnak van kitéve, majd a rádiust elhagyva újra kiegyenesedik. A feszültségi állapot itt radiális húzásnak, és a hajlításra jellemző állapotnak felel meg. Túl kicsi lekerekítési sugár a lemez szakadását idézheti elő,

míg túl nagy sugár esetén csökkenhet a munkadarab mélysége. A lekerekítési sugár optimális értékére, szabványok, szakirodalmak tesznek ajánlásokat [4,5].

**II szakasz:** a csésze fala. A csésze fala tisztán húzó feszültségi állapotban van, mind a radiális, mind pedig az érintő irányt illetően. Amennyiben a bélyeg és a húzószerszám közötti húzóérés elegendően nagy, úgy a fal is képes a peremrészre jellemző ráncosodáshoz hasonlóan hullámosodni, melyet az angol nyelvű szakirodalom „puckering” –nek nevez [1]. (Bizonyos esetekben ettől eltérően, például a karosszéria elemek préselésénél az angol szakirodalom „buckling”-nak nevezi mindazon ráncokat, melyek nem a ráncgátló szerszám és a húzószerszám közötti összeszorított részben, tehát nem az alkatrész peremén alakulnak ki [6].) Az optimálisnál kisebb húzóérés viszont a lemez vasalását eredményezi. Az optimális húzóérés értékére a szakirodalomban találunk ajánlásokat, például Oehler és Kaiser könyvében [7], miszerint az az acélokra a következő képpen számítható:

$$u_{opt} = s_0 + 0,07 \cdot \sqrt{10} \cdot s_0 \quad (1)$$

ahol  $s_0$  a kiinduló terítékvastagság.

A bélyeg által kifejtett húzóerőt, a csésze fenekéről a csésze falának kell továbbítania a fő alakváltozási zónába, ami a peremrész. A húzószerszám lekerekítési sugarán történő hajlítás majd kiegyenesítés következtében megnövekedett szilárdságú fal, az ebben a szakaszban fennálló húzófeszültség hatására már tovább képlékenyen nem alakváltozhat, mert az a csésze szakadását jelentené.

**II és III közötti szakasz:** a bélyeg lekerekítési sugarával érintkező anyagrészek, melyek hajlító igénybevételnek és radiális irányú húzásnak vannak kitéve a folyamat során. Mivel az itt jelenlévő anyagrészek nem mennek át olyan mértékű alakítási keményedésen, mint a csésze falát alkotó – és korábban a húzószerszám lekerekítési sugarán meghajlított majd kiegyenesedett – lemezrész, a csésze szakadása elsősorban itt várható.

**III szakasz:** csésze fenékrész. Az itt található anyagrészek a súrlódás miatt, kedvező esetben, tulajdonképpen közel nulla képlékeny alakváltozáson esnek át. Az [1] irodalom kifejezetten javasolja az LDR növelése érdekében a súrlódás növelését a húzóbélyeg/munkadarab határfelületén, és ezzel egy időben a súrlódás csökkentését a lemez/húzógyűrű érintkezési felületeken. Az LDR a „Limit Drawing Ratio” kifejezéseket összeolvasztó betűszó, jelentése „határ húzási viszony”, mely annak a legnagyobb kiinduló terítékátmérőnek, amelyből még a csésze szakadás nélkül kihúzható, és a magának a csésze közepes átmérőjének a hányadosát jelenti, hengeres csészek mélyhúzása esetén. A súrlódást több tényező is befolyásolhatja, például a szerszámelemek felületi jellemzői, vagy a ráncgátló erő. A mélyhúzás során a Coulomb-féle súrlódási tényező értéke, jellemzően 0,04 és 0,10 között mozog megfelelő kenési feltételek esetén az [1] leírása alapján.

### 3. A mélyhúzott alkatrészek ráncosodása

A mélyhúzott terítékek ráncosodását, a fentiek tükrében, a teríték peremén - a radiális húzófeszültség ( $\sigma_1$ ) okozta átmérőcsökkenés következtében - ébredő tangenciális irányú nyomófeszültség ( $-\sigma_2$ ) okozza (4. ábra). Már korai kísérletek rámutattak, hogy a ráncosodási hajlamot az anyagtulajdonságok és geometriai paraméterek befolyásolják elsősorban. Ez a két tényező, a ráncosodás megindulásához szükséges kritikus feszültség becslésére szolgáló, első félempirikus képletben is szerepel, amely Geckelertől származik még 1928-ból [8]. Elmélete szerint a  $\sigma_c$  kritikus, ráncosodást okozó feszültség a

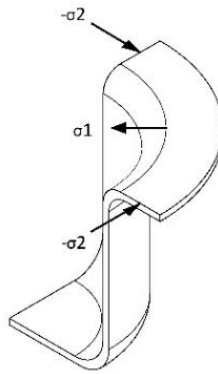
$$\sigma_c = 0,46 \cdot \frac{E_0 t^2}{W^2} \quad (2)$$

egyenlet szerint alakul, melyben  $t$  a lemezvastagság,  $W$  a közepes peremszélesség (azaz  $W = R - r_M$ , ha  $R$  a teríték külső sugara,  $r_M$  pedig a húzógyűrű belső sugara (ld. 1. ábra)), és  $E_0$  a ráncosodási modulus. A ráncosodási modulusot Ramberg és Osgood [9] a következőképpen definiálta:

$$E_0 = \frac{4E_p E}{(\sqrt{E_p} + \sqrt{E})^2} \quad (3)$$

mely egyenletben  $E$  a rugalmassági (Young) modulus,  $E_p$  pedig a képlékenységi modulus (4). Utóbbi paraméter a valódi feszültség ( $\bar{\sigma}$ ) valódi alakváltozás ( $\bar{\varepsilon}$ ) diagram, egy adott pontjához tartozó érintő meredeksége, mely így a görbe mentén folyamatosan változik, és ezzel egy konkrét értékének meghatározása nehézségekbe ütközik. Ennek ellenére, a napjainkban használatos analitikus elméletek mind figyelembe veszik a ráncosodási modulus, és ezáltal a képlékenységi modulus is, bár azok sok esetben tökéletesen képlékeny anyagot tételeznek fel, aminek következtében az  $E_p$  állandó értékűnek vehető.

$$E_p = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}} \quad (4)$$



4. ábra: A mélyhúzott csésze peremén uralkodó feszültségi állapot [6]

A gyakorlatban a ráncképződés eredményesen megakadályozható a ráncgátló szerszám és a megfelelően megválasztott ráncgátló erő (ráncgátló nyomás) alkalmazásával. Siebel [10] szerint az optimális ráncgátló nyomás ( $p_{BH}$ ) értéke a

$$p_{BH} = 10^{-3} \cdot c \cdot \left[ (DR - 1)^3 + \frac{0,005d_0}{s_0} \right] \sigma_u \quad (5)$$

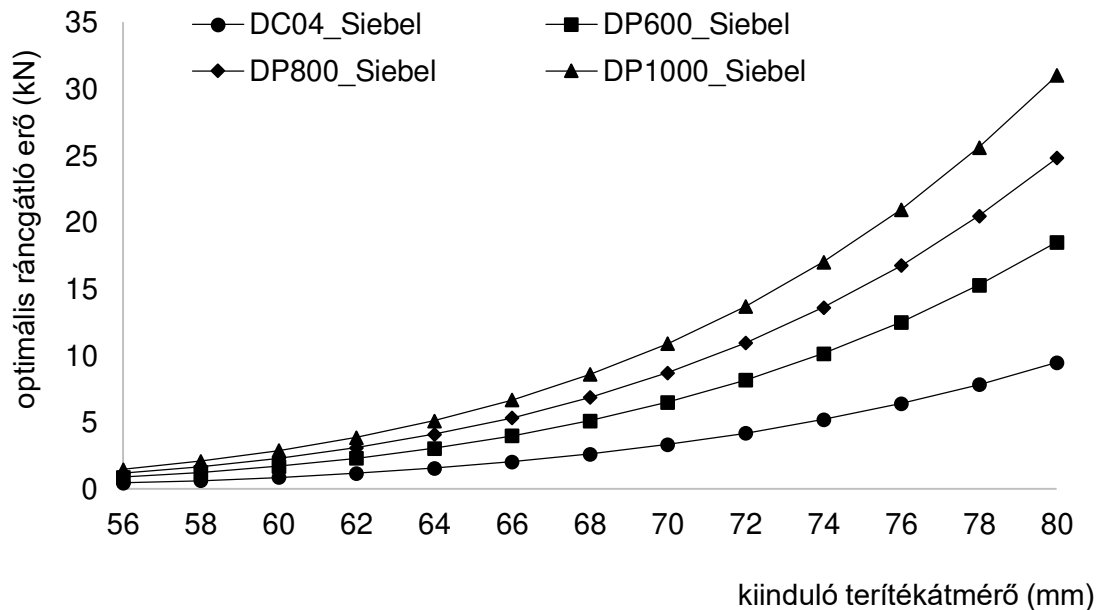
kifejezéssel becsülhető, és így a ráncgátló erő ( $F_{BH}$ ) az

$$F_{BH} = p_{BH} \cdot A_{BH} \quad (6)$$

formában adható meg. Az egyenletekben  $s_0$  a kiinduló teríték vastagság,  $d_0$  a kiinduló teríték átmérő,  $c$  egy tapasztalati alapokon nyugvó tényező, értéke 2 és 3 között változhat,  $\sigma_u$  a lemezanyag szakítószilárdsága,  $DR$  a húzási viszony (terítékátmérő/csésze átmérő), illetve  $A_{BH}$  a lemez ráncgátló alatti területe. Az egyenletből látszódik, hogy ahogy a  $d/s$  viszony növekszik, úgy növekszik a ráncok kialakulásának veszélye is, és ezzel növekszik az azok megakadályozásához szükséges ráncgátló nyomás is. Ez összhangban van Geckerel elméletével (2), melyben a ráncok kialakulásához szükséges kritikus feszültség a lemezzavastagsággal növekszik, a terítékátmérővel arányosan pedig csökken, tehát a nagyobb terítékátmérő és a kisebb lemezzavastagság kedvez a ráncok kialakulásának. A fenti egyenletekből az is megállapítható, hogy a mélyhúzási folyamat során egyre csökkenő terítékátmérő stabil állapotban tartásához, azonos lemezzavastagság mellett, egyre kisebb ráncgátló erő is elegendő. Ez magyarázza, a mélyhúzási folyamat alatt időben változó ráncgátló nyomás alkalmazását, melyre példát találunk a [1,11] irodalmakban.

Az 5. ábrán, a Siebel-egyenlet felhasználásával szerkesztett diagramok láthatók, járműipari, jól mélyhúzható DC04 és különböző növelt szilárdságú DP-s anyagok optimális ráncgátló erőszükségletére vonatkozóan. A geometriai tényező mellett, a ráncosodás illetve annak akadályozása terén másik fontos szerepet játszó tényező, a lemezanyag szilárdságának hatása is szemléletesen nyomon követhető az ábrán. Mindemellett megjegyzendő, hogy a gyakorlatban, egy

adott terítékátmérő/lemezvastagság viszonyszámhoz, nem csupán egy konkrét ráncgátló erő/nyomás érték tartozik, hanem létezik egy tágabb technológiai ablak, amelyben a mélyhúzás megvalósítható.



5. ábra: A Siebel-egyenlet felhasználásával szerkesztett optimális ráncgátló erő diagramok, különböző anyagminőségek és terítékátmérők esetén

### 3.1. Az úgynevezett „bifurcation” módszer

A „bifurcation” szó a Hill [12] által, rugalmas-képlékeny anyagokra általánosan kidolgozott elméletből származik („theory of bifurcation in elastic-plastic solids”). Jelentése szétválás, kettéválás, de igazából, itt nem ebben az értelmezésben használatos. Az elméletet Hutchinson és Neale [13] fejlesztette tovább és javasolta ráncosodási folyamatok vizsgálatához. Ez alapján a ráncosodás akkor következik be, ha a „bifurcation” funkcionál ( $F$ ) értéke zérus.

$$F = \iint (M_{ij}\kappa_{ij} + N_{ij}\varepsilon_{ij}^0 + N_{ij}w_{,i}w_{,j}) dS \quad (7)$$

A funkcionálban  $w$  a ráncosodással járó és egyben az adott helykoordinátától ( $r, \theta$ ) függő elmozdulás-vektor a csésze peremrészén,  $M_{ij}$  az egységnyi szélességre eső hajlítófeszültségek tenzora,  $\kappa_{ij}$  a hajlítással járó alakváltozási tenzor,  $N_{ij}$  a membrán (síkban ható) feszültségek tenzora,  $\varepsilon_{ij}^0$  a nyújtási alakváltozási tenzor, és  $S$  jelenti a lemez (vagy héj) elem középfelületének azon részét, amelyen a ráncosodás bekövetkezik. Az egyenlet jobb oldalának első tagja a hajlító (ha  $i=j$ ), vagy a csavaró (ha  $i \neq j$ ) feszültségek munkája, a második a membrán feszültségek által okozott alakváltozások munkája, míg a harmadik tag úgy értelmezhető, mint a lemez középfelületén működő sík-feszültségi tagok munkája. Ha egy kinematikailag lehetséges  $u, v, w$  elmozdulás-mező esetén  $F > 0$ , akkor ráncosodás nem jöhet létre, mivel a ráncok megjelenése a rendszer potenciális energiáját növelné, ami termodinamikailag nem lehetséges. Tehát az  $F=0$  feltétel tartozik a ráncosodás bekövetkezéséhez, egy nem nulla elmozdulás-mező esetén.

Az elmozdulás-mező leírására több irodalom [16,17,18] egységesen a

$$w(r, \theta) = c(r - r_M)(1 + \cos n\theta) \quad (8)$$

formulát alkalmazza, amelyben  $c$  egy konstans,  $n$  a ráncok (hullámok) száma,  $r$  és  $\theta$  pedig az adott pont helykoordinátái. A [15] ettől eltérő módon adja meg az elmozdulás mező leírását, de ott az a csésze falának ráncosodására, és nem a perem ráncosodására vonatkozik.



A funkcionált legtöbb esetben numerikus módszerekkel integrálják (pl. [14,15]), de van példa az irodalomban analitikus megoldásra is. Bizonyos egyszerűsítő feltételek mellett (kétdimenziós ráncosodási modell) M. Kadkhodayan és F. Moayyedian [16] zárt alakú megoldást dolgozott ki a „bifurcation” módszer funkcionáljából kiindulva. Elméletük szerint, hengeres csésze mélyhúzásakor a ráncosodás akkor következik be izotróp, tökéletesen képlékeny anyag feltételezése és a Tresca-féle folyási feltétel felhasználása esetén, egyrészt ha fennáll a feszültségekre ( $\sigma$ ), hogy

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \bar{\sigma} \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) > 0 \text{ és} \\ \sigma_\theta &= \bar{\sigma} \cdot \left[\ln\left(\frac{R}{r}\right) - 1\right] < 0\end{aligned}\quad (9)$$

másrészről ha a

$$\sqrt{\left(\frac{E}{\bar{\sigma}}\right)} \cdot \frac{t}{R} < \sqrt{-3(1-\nu^2) \frac{H^{ep}(m,n)}{\frac{G^{ep}(m,n,\nu)}{4} + \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \psi_{1+m}^{1-m}}}} \quad (10)$$

kifejezés teljesül. Az egyenletekben  $R$  a teríték külső sugara,  $r$  a vizsgált pont sugara,  $\theta$  pedig a vizsgált pont szöge a hengerkoordináta rendszerben. A (10) összefüggésben

$$m = \frac{r}{R} \quad (11)$$

a  $H^{ep}$  és a  $G^{ep}$  az  $m$  paramétertől, a kialakuló ráncok számától ( $n$ ) és a Poisson-tényezőtől ( $\nu$ ) függő tényezők. Mivel  $m$ , a húzás folyamán bármelyik tetszőleges időpillanatban ismert,  $\nu$  pedig fémekre, a képlékeny alakváltozás tartományában jó közelítéssel 0,5-nek vehető, a ráncok számának ( $n$ ) függvényében  $H^{ep}$  és  $G^{ep}$  a [16]-ban leírtak alapján számolható. A különböző feltételek mellett várható  $n$  értékére, a [16] cikkben találunk utalásokat.

A (10) összefüggésben a  $\psi$  jelenti a ráncgátló hatását, amelyet rugós működtetésű ráncgátlóra a szerzők, a

$$\psi = \frac{S}{D} \quad (12)$$

formában adnak meg, ahol

$$S = k\pi \cdot (R^2 - r_M^2) \quad (13)$$

amelyben  $k$  a ráncgátló rugómerevségi együtthatója, illetve  $D$  a rugalmas hajlító merevség:

$$D = \frac{E_0 t^3}{12(1-\nu^2)} \approx \frac{E_0 t^3}{9} \quad (14)$$

A képlékeny alakváltozás szilárdságnövelő hatását a

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n \quad (15)$$

egyenlettel figyelembe véve, és azt mindig az adott  $\bar{\epsilon}$  alakváltozásokhoz tartozónak tekintve, és így a  $D$  értékét is az adott alakváltozás függvényében változóként kezelve, a (11) – (17) egyenleteknek a (10)-be történő behelyettesítésével szerkesztett diagramokat mutat a 6. ábra. Az ábrán szürke vonallal jeleztük a (10) egyenlet jobb oldalának értékeit különböző ráncgátló rugómerevségi együtthatókra vonatkozóan (N/mm), míg fekete folytonos vonal mutatja a (10) baloldalának értékeit a mélyhúzási folyamat előrehaladtával,  $\varnothing 74$  mm-es kiinduló terítékméret esetén ( $1-r/R = 0,39$ ), DC04 anyagra. Az ábrából az látható, hogy ekkora átmérőnél biztosan számíthatunk ráncosodásra a mélyhúzás kezdetén, amennyiben a ráncgátló rugómerevségi együtthatója nem éri el legalább az 50 N/mm értéket.

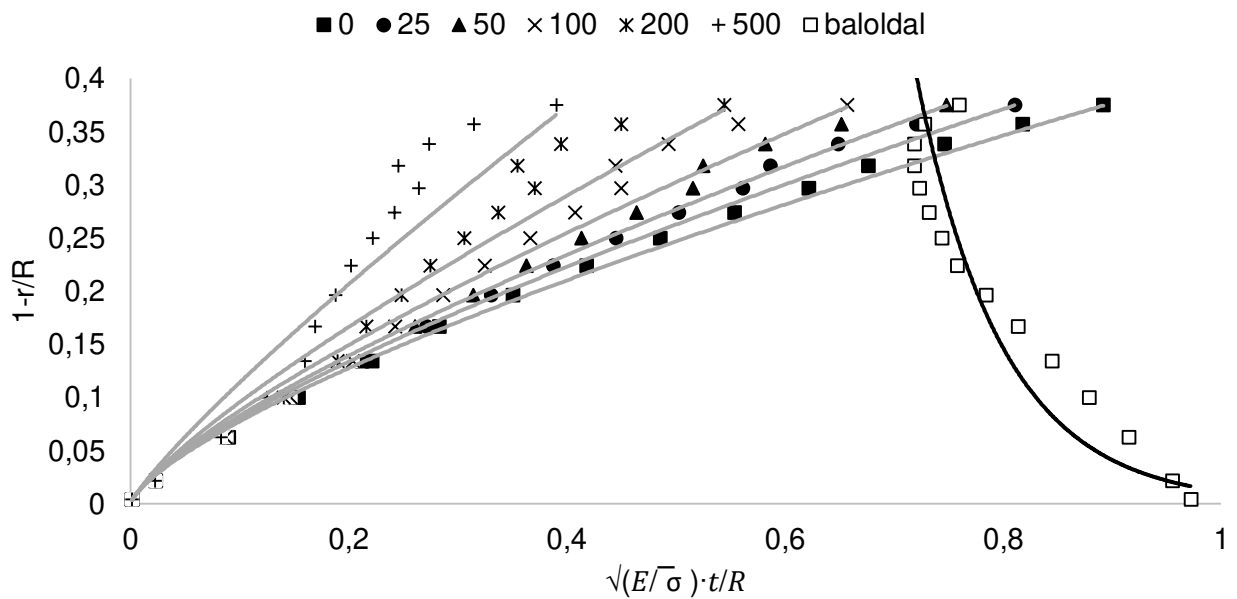
Az  $\bar{\varepsilon}$  számításnál azt az egyszerűsítő feltételt alkalmaztuk, hogy [2] szerint a mélyhúzás során a lemeztvastagságot állandónak feltételezve írható, hogy

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d}{D}, \varepsilon_2 = 0 \text{ és } \varepsilon_3 = \ln \frac{D}{d} \quad (16)$$

továbbá, hogy

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3}(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad (17)$$

amelyből (15) már számolható.



6. ábra: A Hutchinson és Neale –féle funkcionálból, M. Kadkhodayan és F. Moayyedian [16] megoldásával analitikai úton számolt ráncosodási kritérium diagramok

### 3.2. Az energia alapú módszer

Az energia alapú módszer úgy értelmezi a ráncok megjelenését, mint egy nyomófeszültségi instabil állapot elérésekor bekövetkező jelenséget („compressive instability”) [6]. A módszer alapja az a feltételezés, hogy a membrán feszültségek (a lemez síkjában ható feszültségek) munkája egyenlő kell legyen, a ráncosodáshoz szükséges hajlítási energiával, és a ráncgátló visszatartó hatásából származó energiával, azaz

$$\Delta T^p = \Delta U^p + E_s \quad (18)$$

amelyben  $\Delta T^p$  a kerületi, nyomófeszültségek energiája,  $\Delta U^p$  a hajlítási energia, és  $E_s$  a ráncgátló szerszám visszatartó energiája. Ennél a módszernél is szükséges a ráncosodással kialakuló hullámforma előzetes becslése, mely peremfeltételként épül be a megoldandó egyenletekbe. Így a ráncok száma a feladat során, tulajdonképpen oda-vissza hat, így fontos annak előzetes, helytálló becslése. Becslésére utalást a [16] mellett a [17]-ben és [18]-ban is találunk, melyek közül a két utolsó irodalom tartalmazza a (18)-ben felsorolt energia tagok részletesebb kifejtését is.

Yu és Johnson [17] - tökéletesen képlékeny, izotróp anyagokra, állandó lemeztvastagság mellett – zárt alakú megoldást dolgozott ki a (18) differenciálegyenlet megoldására, bizonyos peremfeltételek betartása mellett (19). Többek között, ez az elmélet szolgáltatja az alapot (mintegy

harminc évvel korábbról) a [16] cikk szerzői számára, a „bifurcation” módszerből történő zárt alakú megoldás kidolgozásához (ld. (10) összefüggés). Ez magyarázza a két elmélet közötti alaki hasonlóságot.

$$\sqrt{\left(\frac{E}{k_f}\right)} \cdot \frac{t}{R} < \frac{3}{2} \sqrt{\frac{H^{ep}}{F^{ep} + \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 \psi_{1+m}^{1-m}}} \quad (19)$$

A  $H^{ep}$  és  $F^{ep}$  tényezők ebben az esetben is  $m$ -től és  $n$ -től függenek, számítási módjuk a [17] irodalomban megtalálható.

Itt érdemes megjegyezni, hogy a ráncgátló szerszám hatását mindkét elmélet úgy értelmezi, mint a ráncosodás által okozott hullámosságnak ellentartó energiát, azaz a ráncgátló szerszámban tárolódó energia mennyiségét egységes módon az

$$E_s = \frac{1}{2} k \cdot w_{max}^2 \quad (20)$$

összefüggéssel adják meg. Ez azt az energia mennyiséget jelenti, amelyet a ráncok fejtenek ki a  $k$  rugómerevséggel rendelkező ráncgátló szerszám megemelésékor.

### 3.3. Az AutoFom szoftver megoldásai

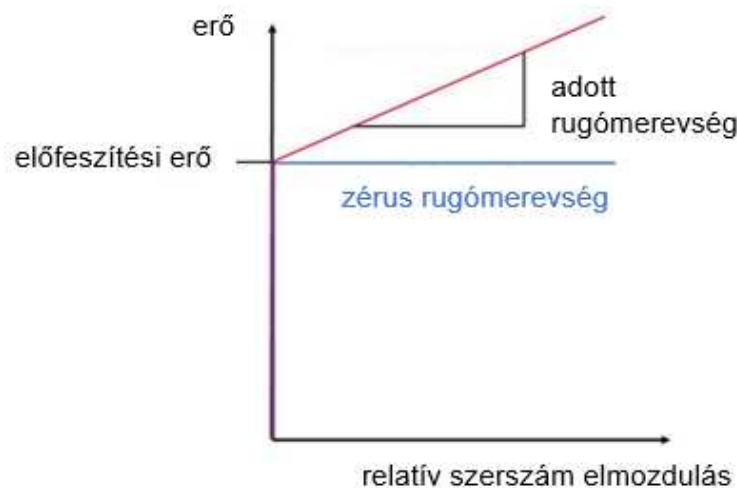
Az AutoForm véges elemes szimulációs szoftverben több lehetőség kínálkozik a ráncgátló szerszám kinematikájának, illetve a ráncosodás jelenségének definiálására. A mélyhúzási folyamat virtuális felépítésekör alkalmazhatunk

- állandó erővel záró ráncgátló megoldást,
- rugós működtetésű ráncgátló szerszámot, illetve
- húzórés szabályozású ráncgátlót.

Az állandó erőre szabályzott ráncgátlós szerszám esetében megadható a szerszámok zárásakor felépülő erő, mely később a szerszámok mozgása során nem változik. Ennél a megoldásnál a munkadarab nem emeli el a ráncgátlót, akkor sem, ha a lemez ráncosodásából származó reakcióerő nagyobb, mint a záróerő. Ilyen esetben a program automatikusan megnöveli a záróerőt, a reakcióerő értékénél nagyobb értékre. A mérnöki alkalmazásoknál így becsülhető, hogy adott esetben mekkora az a szükséges legkisebb záróerő, melyet a húzási folyamat igényel.

Rugós működtetésű ráncgátlós szerszámban, ezzel ellenben, túl kicsi rugóerő mellett, elemelheti a teríték ráncosodása által kifejtett reakcióerő a ráncgátlót. A rugós szerszám kinematikája és az általa kifejtett erő a rugó paramétereitől függenek. Ezek a rugóparaméterek az előfeszítési erő és a rugómerevség. Ahogy azt a 7. ábra szemlélteti, a rugómerevség, a záróerő megváltozási karakterisztikáját jelenti a szerszám elmozdulásának függvényében (piros folytonos vonal). A program feltételezi, hogy az alkalmazott rugók lineáris karakterisztikával rendelkeznek, ahogy az az acél, vagy a gáz rugóknál a gyakorlatban legtöbbször megfigyelhető. A rugó merevségének nulla értékre történő megválasztásával (kék folytonos vonal) tulajdonképpen, állandó erővel, méghozzá az előfeszítési erővel megegyező erővel záró szerszámot kapunk.

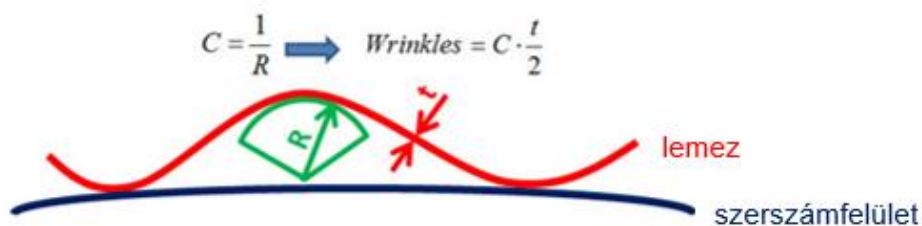
A húzórés szabályozás azt jelenti, hogy a program, a folyamat során, a ráncgátló szerszámot a húzószerszám felületéhez képest egy előre meghatározott állandó értéken tartja. Ez tulajdonképpen azt az esetet szimulálja, amikor nincs ráncgátló nyomás, ami a valóságban távtartók használatakor állhat elő.



7. ábra: A rugós működtetésű ráncgátlás elve az AutoForm szoftverben

A munkadarab ráncosodásának, ráncosodási hajlamának becslésére a program két eredményváltozó lehetőségének vizsgálatát szolgáltatja. Az egyik változó geometriai alapú, míg a másik feltétel a feszültségi/alakváltozási állapotból következtet a ráncosodásra.

A geometriai alapú kritérium számításakor a szoftver, a munkadarab görbületét veti össze a referenciaként szolgáló szerszámfelülettel (8. ábra). A ráncok kialakulása akkor következik be, amennyiben megszűnik az érintkezés a munkadarab és a referencia szerszámfelület között. A változó értéke dimenzió nélküli szám, számítási módja az ábrán látható.

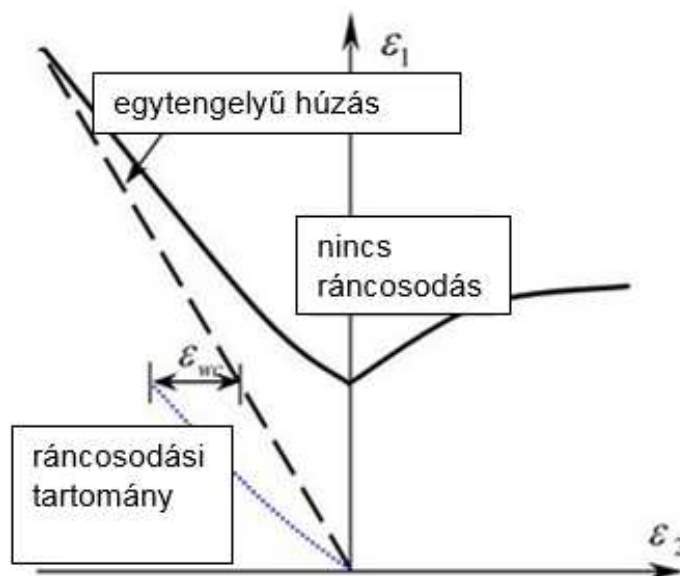


8. ábra: A ráncosodás geometriai értelmezése és eredményváltozója az AutoFormban

Az alakváltozási (és ebből feszültségi) állapoton alapuló eredményváltozó, az úgynevezett „ráncosodási potenciál”, melynek alap definíciója a

$$\varepsilon_{wc} = \max \left[ - \left( \varepsilon_2 + \frac{R}{1+R} \cdot \varepsilon_1 \right), 0 \right] \quad (21)$$

egyenlettel írható le, melyben  $R$  az anizotrópia tényező,  $\varepsilon_1$  és  $\varepsilon_2$  pedig a nagyobb és kisebb főalakváltozások. Ez nem más, mint a vizsgált anyagi pont alakváltozási állapotának, az alakítási határdiagrammban, az egytengelyű húzófeszültség által létrehozott alakváltozási állapothoz történő viszonyítása. Ettől az állapottól a diagramban balra, a negatív kisebbik főalakváltozás irányában ugyanis nyomó feszültségnek kell hatnia az ott található pontokra. Így ez a változó, a nyomófeszültség nagyságából következtet a ráncosodásra. Amennyiben (21) nagyobb mint nulla, úgy fenn áll a lehetősége a ráncosodásnak, továbbá minél nagyobb ez az érték, annál nagyobb a ráncosodás valószínűsége is. Ha (21) értéke zérus, úgy az alakváltozási állapot megegyezik az egytengelyű húzás okozta alakváltozási állapottal, tehát a ráncosodás megjelenése nem lehetséges, ahogy az a 9. ábrán látható.



9. ábra: A ráncosodási potenciál értelmezése

## Összefoglalás

A cikkben, a mélyhúzás technológiája során mintegy annak velejárójaként fellépő ráncosodás jelenségének okát, értelmezését, illetve elméleti leírási lehetőségeit mutattuk be. Az alkalmazott matematikai módszerek a ráncosodást, a kontinuummechanika törvényszerűségeiből levezetve határozzák meg. A ráncosodást okozó feszültségek, és a ráncosodást jelentő alakváltozások energiái által definiált differenciálegyenletek sokszor csak numerikus úton oldhatók meg, de találunk példát az irodalomban zárt alakú megoldásokra is. Általában véve elmondható, hogy ezeket az energia tagokat számos – és sok esetben a folyamat során változó – tényező befolyásolja, mint például a munkadarab anyagi jellemzői, geometriai viszonyai, illetve egyes technológiai tényezők is, mint a súrlódás, vagy a szerszámgeometria, vagy a ráncgátló nyomás. Ez koránt sem kedvez a számítások pontosságának és egyszerűsítési lehetőségeinek, amiből az is következik, hogy azok eredményeinek értelmezése nem minden esetben magától értetődő, és azok nem is alkalmazhatók bármilyen tetszőleges körülmények között.

A képlékenyalakítási feladatok megoldása terén egyre elterjedtebb módszer, a véges elemes technika is kínál megoldásokat a ráncosodás becslésére. Ezek a ráncosodási kritériumok geometriai alapon, illetve a feszültségi/alakváltozási állapot vizsgálatának eredményeiből következtetnek a ráncok kialakulásának mértékére. A véges elemes módszer bár az esetek nagy többségében pontosabb megoldásra vezet, mint az egyéb matematikai algoritmusok, de a ráncosodás jelenségének bonyolult mivoltából következően, ezeknek a feltételeknek a megfelelő alkalmazása is megköveteli a technológiai/szerszámozási körülmények pontos ismeretét, és a szimulációs eredmények felelős kiértékelését.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.



Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült

## Irodalomjegyzék

- [1] Taylan Altan, A. Erman Tekkaya: Sheet Metal Forming Fundamentals, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002 USA, (2012).
- [2] Kurt Lange: Handbook of Metal Forming, SME, Dearborn, Michigan 48121 USA, (1985).
- [3] Gál Gaszton, Dr. Kiss Antal, Dr. Sárvári József, Dr. Tisza Miklós: Képlékeny hidegalakítás, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, (2008).
- [4] Dr. Danyi József, Dr. Végvári Ferenc: Lemezmegmunkálás, Kecskemét, (2011).
- [5] MSZ 52 Hidegalakító és térformázó szabványgyűjtemények (visszavont szabvány), Szabványkiadó, Budapest, (1986).
- [6] Roger Pearce: Sheet Metal Forming, The Adam Hilger Series on New Manufacturing Processes and Materials, IOP Publishing Ltd. (1991).
- [7] Oehler Gerhard, Kaiser Fritz: Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1969).
- [8] J. W. Geckeler: Plastische knicken der wandung von hohlzylindern und einige andern faltungserscheinungen. Z. Angewandte Mathematik und Mechanik 8, 341-352 (1928).
- [9] W. Ramberg, W. R. Osgood: Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters, National Advisory Committee for Aeronautics, Technical Note 902, Washington, (1943).
- [10] E. Siebel, H. Beisswanger: Deep Drawing, Munchen, Carl Hanser, (1955).
- [11] T. Yagami, K. Manabe, Y. Yamauchi: Effect of alternating blank holder motion of drawing and wrinkle elimination on deep-drawability, Journal of Materials Processing Technology 187–188 (2007) 187–191.
- [12] R. Hill: A general theory of uniqueness and stability in elastic/plastic solids, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 6, pp. 236–249 (1958).
- [13] J. W. Hutchinson, K. W. Neale: Wrinkling of curved thin sheet metal, Proceedings of International Symposium on Plastic Instability, Paris, France, pp. 1841–1914 (1985).
- [14] J. P. De Magalhães Correia, G. Ferron: Wrinkling of anisotropic metal sheets under deep-drawing: analytical and numerical study, Journal of Materials Processing Technology 155–156 (2004) 1604–1610
- [15] M. Abbasi, M. Ketabchi, T. Labudde, U. Prahl, W. Bleck: New attempt to wrinkling behavior analysis of tailor welded blanks during the deep drawing process, Materials and Design 40 (2012) 407–414.
- [16] M. Kadkhodayan és F. Moayyedien: Analytical elastic–plastic study on flange wrinkling in deep drawing process, Scientia Iranica B (2011) 18 (2), 250–260
- [17] T. X. Yu, W. Johnson: The buckling of annular plates in relation to the deep-drawing process, Int. J. Mech. Sci. Vol. 24, No. 3, pp. 175-188, (1982).
- [18] Anupam Agrawal, N. Venkata Reddy, P.M. Dixit: Determination of optimum process parameters for wrinkle free products in deep drawing process, Journal of Materials Processing Technology 191 (2007) 51–54

# NEM HEGESZTHETŐ AA7075 ÉS HEGESZTHETŐ AA6082 ALUMÍNIUM ÖTVÖZETEK HEGESZTÉSE KAVARÓ DÖRZSHEGESZTÉSSEL

## WELDING OF NON-WELDEABLE AA7075 AND WELDABLE AA6082 ALUMINIUM ALLOY BY FRICTION STIR WELDING

Kovács Zsolt <sup>1\*</sup>, Hareancz Ferenc <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskeméti Főiskola,  
Magyarország

<sup>2</sup> Anyagtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar, Kecskeméti Főiskola,  
Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Friction Stir Welding  
FSW  
vegyeskötés  
alumínium hegesztés

### Keywords:

Friction Stir Welding  
FSW  
dissimilar bond  
aluminum welding

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 7.  
Átdolgozva 2018. október 27.  
Elfogadva 2019. március 4.

---

### Összefoglalás

Ezen tudományos kutató munka során a szerzők vegyeskötéseket hoztak létre nem hegeszthető AA7075 és hegeszthető AA6082 alumínium ötvözetek összehegesztésével. A hegesztéshez egy viszonylag új hegesztési technológiát a kavaró dörzshegesztést (friction stir welding - FSW) használták. A hegesztéshez hengeres szerszámot használtak és a munkadarabot márványtáblára rögzítették, elkerülve a káros hőelvonást. Az elkészült varratok keménységét és szövetszerkezetét vizsgálták. A kapott eredmények alapján megállapították, hogy az FSW eljárás alkalmas az AA7075 és AA6082 alumínium ötvözetek összehegesztésére. A kutatás további vizsgálatokat igényel, hogy feltárják az optimális technológiai paramétereket.

### Abstract

In this study, an attempt has been made mix-join with the weldable AA6082-T651 and non-weldable AA7075-T651 aluminum. For the welding a novel technology was used namely the friction stir welding (FSW). For the welding were using cylindrical pin tool, marble table to avoid the harmful heat conduction. For evaluations, hardness testing were using to create hardness profiles across the joint in through thickness direction and optical microscope to classify the microstructures. Based on the results obtained it can be stated that the FSW suitable for AA7075 and AA6082 welding by further optimization of the process parameters.

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 20 532 2092  
E-mail cím: kovacs.zsolt@gamf.uni-neumann.hu



## 1. Bevezetés

Napjainkban a fémipar folyamatos és gyors fejlődései, a hegesztéstechnológiák hasonló ütemű fejlődését igénylik. A megmunkálható anyagok köre folyamatosan bővül újabbnál újabb anyagokkal, ennek érdekében számos téren indokolt fejlesztéseket eszközölni. A felhasznált anyagokat tekintve az iparban egyre nagyobb mennyiségben használnak alumínium ötvözeteket. Azonban az alumínium ötvözetek hegesztése sok esetben problémás, főként ha vegyeskötést szeretnénk létrehozni. A hegesztéstechnológiai fejlesztéseknek köszönhetően 1991-ben Angliában feltalálták a kavará dörzshegesztést. A NASA 1993-tól elkezdte használni ezt a fajta hegesztési eljárást a projektjeihez, mellyel sikeresen egyesítettek egy új alumínium ötvözetet (Al-Li 2195), amivel jelentős fejlődés jelentkezett a súlycsökkentés terén. Másik fő szempontjuk a súlycsökkentés mellett, hogy a kötés nagy szilárdságú legyen valamint repedéssálló, hogy elviselje a rá ható extrém körülményeket [1 - 2].

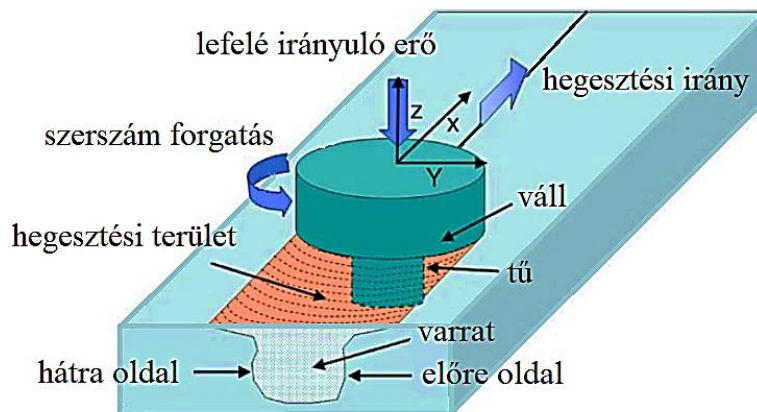
Ez a technológia a feltalálása óta folyamatos fejlődésnek indult, így számos forradalmi újítást tartalmaz. Felhasználási területe mára rengeteg mindent lefed, szinte bármely iparágban megtalálható alkalmazása. Kezdetekben lágy anyagok egyesítésére alkalmazták, főleg alumínium és ötvözeire, de mára gyakorlatilag bármely anyag egyesíthető ezzel az eljárással. Környezetbarát technológiának nevezhető, mivel az eljárás során, a többi hegesztő eljárással szemben sokkal kisebb a hőbevitel (szilárd fázisú hegesztés), így az anyag nem éri el az olvadáspontját. Ez abból a szempontból is fontos, hogy nem keletkeznek például veszélyes gázok, melyek magas hőmérséklet esetén kiválnak a fémekből, valamint a hőhatás is sokkal kisebb, továbbá az emberi szem számára káros fényhatások sincsenek [1 - 2].

## 2. Kavará dörzshegesztés technológiája

A kavará dörzshegesztés szilárd fázisú hegesztés révén jelentősen több előnnyel bír a fúziós hegesztési eljárásokhoz képest, például a folyadékfázisú anyag hűtéskor fellépő problémák azonnal elkerülhetők. Továbbá olyan problémák, mint a porozitás, újrakristályosodás és repedékenység kevésbé jelent problémát. Általánosságban kijelenthető, hogy a kavará dörzshegesztés hibalehetőségei minimálisak, és a helyes paraméterek megválasztásával gyakorlatilag teljes mértékben elkerülhetők. A hagyományos hegesztő eljárásokhoz képest a kapott varrat is sokkal szebb, esztétikusabb, nem keletkeznek rajta varrati dudorok, ami megkönnyíti a további felhasználásaiban [1 - 2].

Mindazonáltal ez a technológia is rendelkezik számos egyedi hibával, például ha a hőmérséklet értéke elégtelen a megfelelő anyagáramoltatás biztosításának érdekében, vagy a túl nagy haladási sebesség amely nem arányos a hőtermeléssel, mind ezek alagúthibákhoz vezethetnek, melyek vagy a felszínen, vagy a varratban alakulnak ki, és rossz hatással vannak a kötés minőségre nézve, mivel csökken a folytonosság. Ha a tű nem elég hosszú, vagy rossz paramétereket választunk meg, már a behatolás kezdetekkor kialakulhat repedés, ami az egész kötésre kihatással lehet, ami alkatrészek, szerkezetek gyártásakor rendkívül előnytelen, mivel fáradási repedések forrása lehet, így kihat a termék élettartamára [1 - 2].

Az 1. ábrán látható az FSW eljárás elvi ábrája.



1. ábra. A kavará dörzshegesztés elvi ábrája [2]

### 3. Kísérleti részletek

#### 3.1. Vizsgált anyagok tulajdonsága

A vizsgálatokhoz két különböző anyagi összetétellel rendelkező alumínium ötvözetet használtunk, nevezetesen a AA6082-T651 és a AA7075-T651. Az alapanyagok választása során az volt a cél, hogy egy jól hegeszthető alumínium ötvözetet egy nem hegeszthetővel hegesszünk össze.

A hegesztés előtt a darabok anyagösszetételét is meghatároztuk. Az anyagvizsgálatokat egy FOUNDRY MASTER PRO típusú spektrométer segítségével határoztuk meg. Az anyagok összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. Táblázat. Vizsgált alapanyagok összetétele

| Számjel     | Si     | Fe  | Cu        | Nm   | Mg      | Cr        | Zn      | Ti   |
|-------------|--------|-----|-----------|------|---------|-----------|---------|------|
| AA6082-T651 | 0,4-08 | 0,7 | 0,15-0,40 | 0,15 | 0,8-1,2 | 0,04-0,35 | 0,25    | 0,15 |
| AA7075-T651 | 0,4    | 0,5 | 1,2-2,0   | 0,3  | 2,1-2,9 | 0,18-0,28 | 5,1-6,1 | 0,2  |

Az anyagokat nem csak összetétel szerint vizsgáltuk, hanem számunkra az alkalmazott technológia miatt fontosak voltak az alakíthatósági, forgácsolhatósági, hőkezelési és hegeszthetőségi tulajdonságok is. Ezek összegzően a 2. táblázatban találhatóak meg.

2. Táblázat. Technológiai szempontból fontos tulajdonságok

| Ötvözet     | Alakíthatóság | Forgácsolhatóság | Hőkezelés               | Hegeszthetőség  |
|-------------|---------------|------------------|-------------------------|-----------------|
| AA6082-T651 | jó            | közepes          | nemesíthető             | jó              |
| AA7075-T651 | jó            | jó               | nemesíthető, önnemesedő | nem hegeszthető |

#### 3.2. Alkalmazott hegesztő berendezés

A hegesztési kísérletekhez MFP 320 típusú félautomata marógépet használtunk (1. ábra). A hegesztés során előforduló erőviszonyok elbírására követelmény, hogy megfelelő merevséggel bírjon és a reprodukálhatóság miatt gépi előtolással rendelkezzen. További szempont, hogy kellően nagy méretű asztallal és széles tartományban (esetünkben 24) állítható fordulatszámmal rendelkezzen.



2. ábra. FSW hegesztéshez átalakított MFP 20 típusú marógép

#### 3.3. Szerszám geometriai kialakítása

Az eljárás szerszáma erősen befolyásoló tényezője a minőségi varrat készítésének, mivel ez generálja az alakításhoz szükséges hőt, továbbá a másik fontos szerepe hogy elkeverje a meglágyult anyagot. Két fő részből áll a szerszám, a tű valamint a váll részből, ezt szemlélteti az 1.

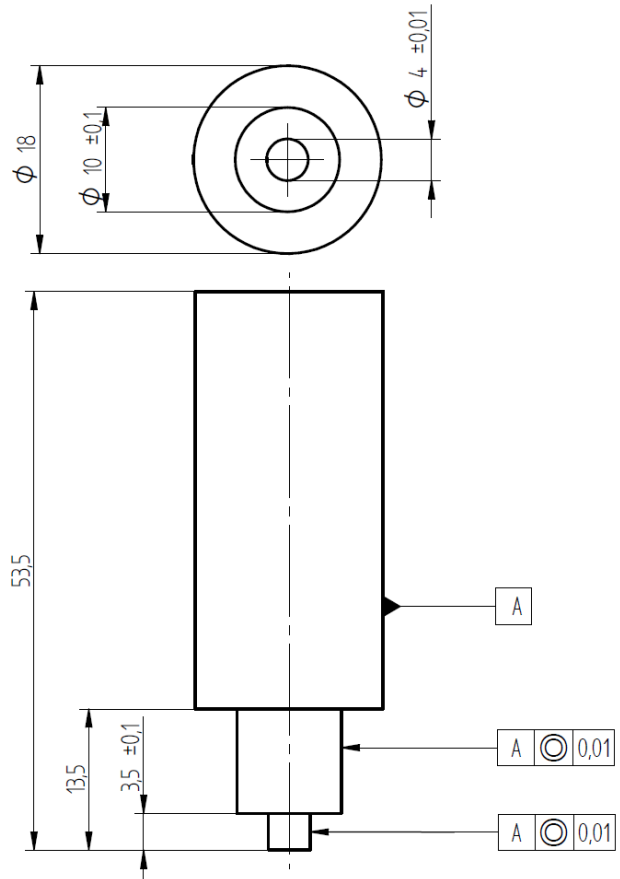
ábra. Általában egy anyagból munkálják meg, ami jellemzően keményfém vagy gyorsacél, de ez erősen függ a megmunkálni kívánt anyagoktól, anyagpárosításoktól. A váll és a túske kialakítása nagyon fontos szerepet tölt be a varrat készítésénél. A túske biztosítja azt a hőhatást amitől az anyag meglágyul, így keverhető állapotú lesz, a váll pedig a meglágyult anyag, hegesztési tartományból való kilépésének megakadályozásán kívül, a varrat felszínének minőségéért felel, továbbá a súrlódás végett segít fenntartani az alakításhoz szükséges hőt [1; 2].

Az FSW hegesztés fejlődésének legbefolyásosabb eleme a szerszámgeometria fejlesztése. Kulcsfontossággal bír a geometria a hegesztés folyamatában, ami érinti a kezdeti felmelegítést valamint azt, hogy a szerszámunk az anyagban milyen gyorsasággal képes mozogni. A fordulatszám jelentősebb befolyásoló tényező a hőbevitel számára, mivel minél nagyobb a fordulatszám, vagyis a szerszámunk kerületi sebessége, a súrlódás növekedése mellett nagyobb hő keletkezik [3].

A hegesztéshez használt szerszámokat mi gyártottuk le gyorsacél ujjmaróból köszörüléssel, ami megfelelő a hegesztéshez. Az elkészült szerszám a 3 ábrán látható méreteivel.



a)



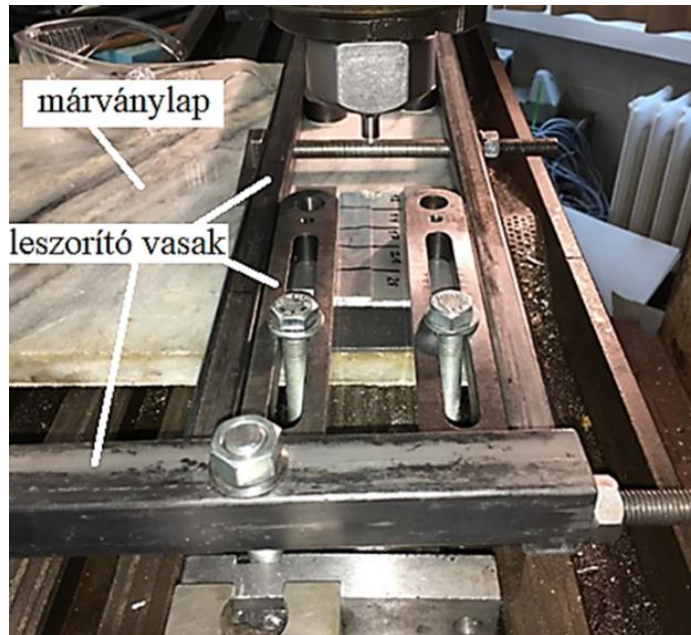
b)

3. ábra. Szerszám kialakítása a) és mérete b)

### 3.4. Munkadarab rögzítése

A hegesztési folyamat megkezdése előtt a munkadarabokat megfelelően rögzíteni kell a berendezés munkaterében. A munkadarab befogása rendkívül fontos a kötés minőségére nézve. hatalmas erők terhelik a munkadarabokat, így azok, nem megfelelő rögzítés esetén, a szerszám forgásának hatására kifordulnak a rögzítés alól. A munkadarab és a gép asztala közé egy márványlapot helyeztünk, amellyel a hőelvonást megakadályoztuk, a gép asztala valamint a munkadarabok között.

A leszorításhoz készítettünk egy befogó készüléket, aminek a segítségével a mintadarabokat pontosan és elmozdulás mentesen tudtuk rögzíteni, úgy hogy a szerszámmal is még kelőképpen (ütközésmentesen) oda fértünk. Az elkészült befogó készülék a 4. ábrán látható.



4. ábra. Befogó készülék

#### 4. Hegesztési kísérletek

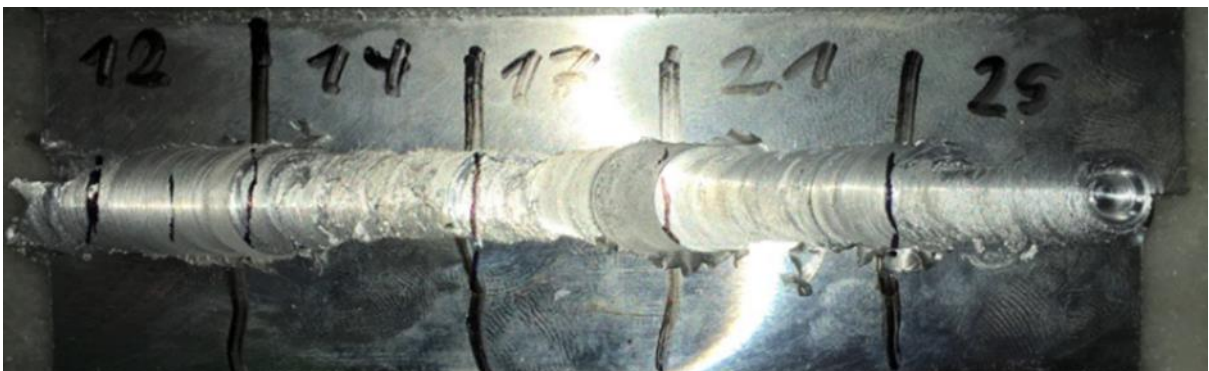
A hegesztés során a AA7075-T651 minta volt a hátra oldalon, míg az előre oldalon a AA6082-T651 alumínium ötvözetet helyeztük el. Fordított állapotban a szerszám kihajlása nagy, ami nem megfelelő kötéshez vezet.

A kísérleteket elő kísérletekkel kezdtük, amely során 500 és 1500 ford./min közötti fordulatszámokkal végeztünk hegesztést. Az előkísérletek alapján az 1000 ford./min-es érték bizonyult a legjobbnak, így a további kísérletekhez ezt az értéket használtuk. A kísérlet során alkalmazott technológiai paramétereket a 3. táblázat tartalmazza.

3. Táblázat. Technológiai paraméterek

| Paraméter                | Érték              |
|--------------------------|--------------------|
| Fordulatszám (ford./min) | 1000               |
| Előtolás (mm/min)        | 12; 14; 17; 21; 25 |

A hegesztés során nem alkalmaztunk semmiféle védőgázt vagy felületkezelés. A mintákat tompán illesztettük, ezek mérete 60x120mm-es és 4mm vastagságú volt. A kész varratot az 5. ábra szemlélteti.

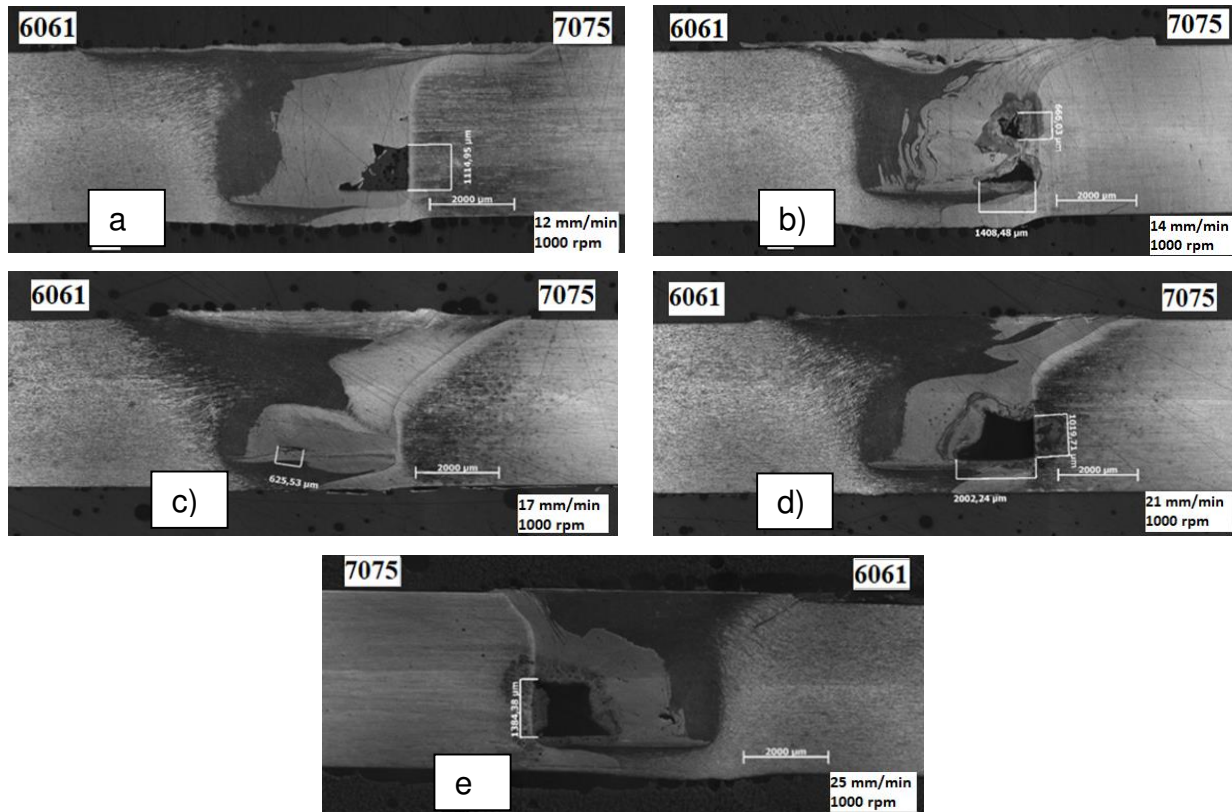


5. ábra Kész varrat képe, rajta jelölve az előtolási értékekkel



## 5. Eredmények kiértékelése

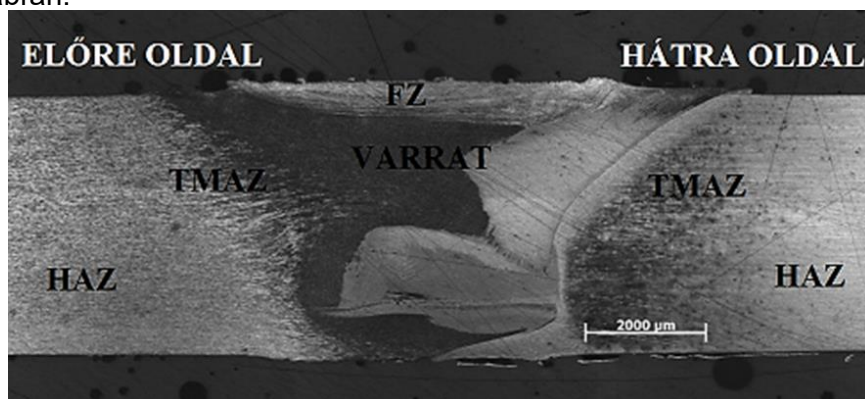
A varratokból csiszolatok készültek, melyeket mikroszkóppal és mikrokeménység méréssel vizsgáltunk. A csiszolatokat Keller-féle maratószerrel (5 ml HNO<sub>3</sub>, 3 ml HCl, 2 ml HF és 190 ml desztillált víz) 10-20 másodpercig maratunk. A csiszolatok mikroszkópi képei 6. ábrán láthatóak.



6. ábra. Csiszolatok mikroszkópi képei

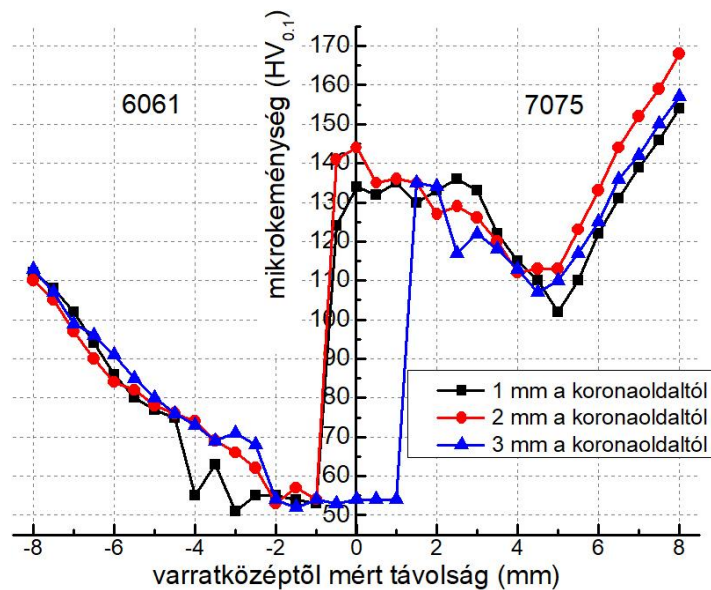
A keletkezett hibák mindegyike az FSW hegesztésre jellemző úgynevezett alagút hiba. A. Tongne, C. Desrvaud, M. Jahazi és En Fleuvarch kutatásuk során vizsgálták ezt a problémát, s azt a megállapítást tették, hogy akkor keletkeznek ilyen, hosszanti üregek, ha a szerszám nem képes megfelelően mozgatni az anyagot [4].

A varratok mikroszkópi képeit nézve megállapítható, hogy a 17mm/perc-es előtolásnál készült jó minőségű varrat, és a keletkezett üreg ennél a legminimálisabb, mintegy 10x625 µm-es. Ennek képe látható a 7. ábrán.



7. ábra. Mikrostruktúrája a 17 mm/min előtolással készült kötésnek

Mivel a 17 mm/min-es előtolással készült kötés bizonyult a legjobbnak, keménységméréssel csak ezt vizsgáltuk. A keménységet micro Vickers keménységmérővel mértük a lemez két szélétől 1-1mm-re valamint a lemez közepén. A keménységmérés lépésköze 0.5mm volt. A kapott eredményeket a 8. ábrán látható diagram tartalmazza.



8. ábra. A 17 mm/min-es kötés keménységmérési eredményei

A 8. ábrán látható keménységmérési eredményekből jól látszódik, hogy a hőhatásövezetben megfigyelhető némi keménységcsökkenés. Továbbá az is szembeütő, hogy a AA7075-T651-nél ez a csökkenés nagyobb. Mindere a magyarázat, hogy itt található a tű vége, mely alatt jelentős anyagáramlás történik és így jön létre egy finomszemcsés szövetszerkezet is.

## 6. Összefoglalás

A mikroszkópi képek és a keménységmérési eredményei alapján elmondható, hogy az FSW hegesztési eljárás alkalmas AA7075-T651 - AA7075-T651 alumínium vegyeskötés létrehozására.

Továbbá az is látható, hogy úgynevezett alagútképződésre hajlamos a technológia ezen anyagok esetében.

A kísérletek eredményessége alapján érdemesnek tartjuk további optimalizációs kísérletek elvégzését, valamint célul tűztük ki további alumínium ötvözetek és kompozitok FSW eljárással történő hegesztését.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Bharat Raj Singh 2012 A Hand Book on Friction Stir Welding, LAP Lambert Academic Publishing, UK pp. 1 - 70
- [2] R.S. Mishra, Z.Y. Ma 2005 Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering pp. 50 1 – 78
- [4] M. Ilangoan, S. Rajendra Boopathy, V. Balasubramanian 2005 Effect of tool pin profile on microstructure and tensile properties of friction stir welded dissimilar AA 6061-AA 5086 aluminium alloy joints, Defence Technology 11 pp. 174 - 184
- [3] A. Tongne, C. Desrayaud, M. Jahazi, En Fleuvarch 2017 On material flow in Friction Stir Welded Al alloys, Journal of Materials Processing Technology, Volume 239, pp. 284-296

# ALUMÍNIUMHAB HEGESZTÉSÉNEK SAJÁTOSSÁGAI

## THE PROPERTIES OF ALUMINIUM FOAM WELDING

Kiss Norbert <sup>1\*</sup>, Hareancz Ferenc<sup>1</sup>, Weltsch Zoltán<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Anyagtechnológiai Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### **Kulcsszavak:**

tömegcsökkentés, alumíniumhab, hegesztés, optimális paraméterek

### **Keywords:**

light weight design, aluminium foam, welding, optimal parameters

### **Cikktörténet:**

Beérkezett 2018. szeptember 20.

Átdolgozva 2018. október 27.

Elfogadva 2019. március 10.

---

### **Összefoglalás**

*Napjainkban az iparban gyártott szerkezetek, gépelemek, járművek tömegének csökkentésére egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a gyártók. Ehhez, olyan újszerű anyagok felhasználására van szükség, mint például az alumíniumhabok. Ennek az anyagnak a hegesztése számos nehézséget rejt magában. Ahhoz, hogy megismerjük a hegesztés közbeni viselkedését és tulajdonságait, kutatást kell végeznünk, ezáltal következtethetünk az anyag hegesztési paramétereire.*

### **Abstract**

*In nowadays industry, manufacturers pay more and more attention on reducing the mass of manufactured structures, machine parts and vehicles. For that matter, it is necessary to use advanced materials, such as aluminum foams. Welding of this material can have many difficulties. In order to get to know the properties of this material during the process of welding, we have to do research, from which we can conclude the optimal welding parameters of this material.*

---

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 30 855 35 87;  
E-mail cím: kiss.norbert321@gmail.com



## Bevezetés

Napjainkra világossá vált az emberiség számára, hogy a technológiai fejlődése számára elengedhetetlen és szükséges olyan új anyagok létrehozása és felhasználása, melyekkel a fejlődés tendenciája fenntartható. Kiváló példa erre a gépjárműipar ipar mely az utóbbi évtizedekben óriási növekedésen ment keresztül, melyet tükröz az alábbi (1. diagram) diagram is.



1. Diagram  
Gyártott gépjárművek száma [1]

Az elmúlt években az iparág olyan irányba kezdett haladni, ami nagy hangsúly fektet a járművek tömegcsökkentésére és ezzel a károsanyag kibocsátás minimalizálására. A károsanyag kibocsátás csökkentésére globális szinten folynak a törekvések. Ezt a tömegcsökkentést főleg az új típusú anyagokkal érték el, mint például AHSS acélok, nagy szilárdságú alumínium ötvözetek vagy celluláris anyagok ezek közül is a fémhabok.

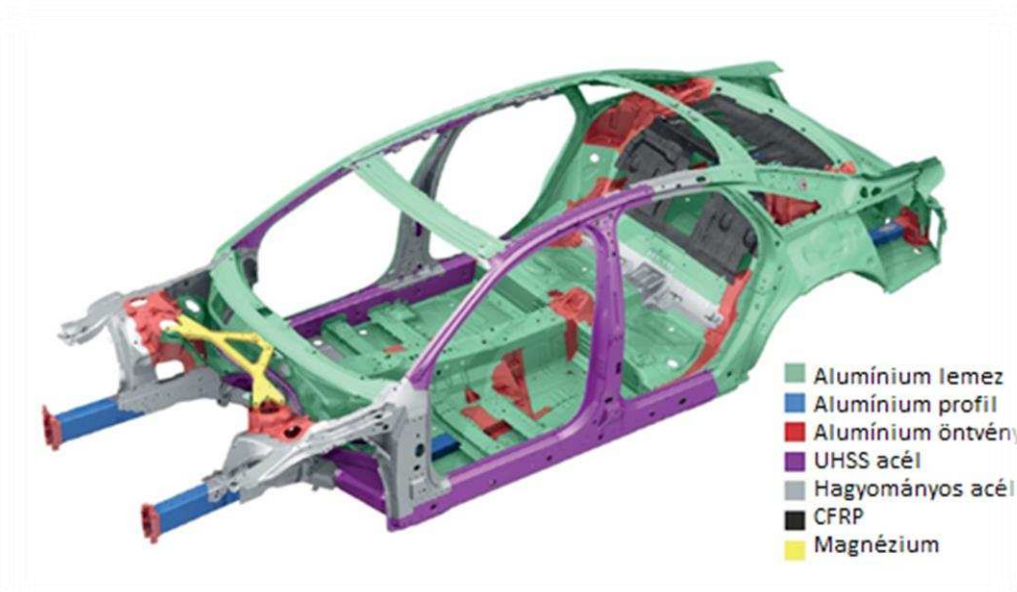
Az olyan fémek, amelyekből celluláris anyagokat, állítanak elő mint a titán, réz, acél és alumínium felhasználási köre egyre inkább bővül. Ez köszönhető kivételes tulajdonságaiknak melyek miatt érdemes lehet az alkalmazásuk: jó alakítási, hővezetési tulajdonságaik, jó ütközésenergia elnyelők, kedvező akusztikus és rezgéscsillapítók. Ezen tulajdonságok révén a fémhabok felé egyre nagyobb figyelem terelődik.

A felhasználás növekedésével egyre nagyobb érdeklődés mutatkozik a lehetséges kötéstechológiák felé, így a hegesztett kötések kialakítás felé is. Jelen irodalomkutatás az alumínium és alumíniumhabok főbb tulajdonságai, alkalmazási területei bemutatása mellett, ezen anyag hegesztési sajátosságainak bemutatását tűzi ki céljául.

## 1. Alumínium felhasználás a gépjármű iparban

Az üzemanyag fogyasztás és CO<sub>2</sub> kibocsátás csökkentésére irányuló törekvések jelentősen megnövekedtek az utóbbi időben, a növekvő gazdasági és politikai nyomás hatására. A járművek tömegcsökkentésének egy lehetséges útja a könnyűszerkezetes alvázak és karosszériák tervezése és építése. Olyan új koncepciók kerültek kifejlesztésre, mint a „Super Light Car” SLC (Szuper könnyű autó), mely fő tervezési iránya a súlycsökkentés volt. Ennek keretein belül, minden alkatrésze a rendeltetésének legmegfelelőbb anyagból került kialakításra. Ezeknek az alkatrészeknek a legnagyobb arányban az alumínium szolgál alapanyagául [2].

Az alumínium kezdeti felhasználása a járműiparban csak a luxus kategóriájú autókra terjedt ki. Az első sorozatgyártású autó, mely teljes alumínium vázzal rendelkezett 1994-ben debütált, Audi A8 volt. Ezt a trendet követni kezdte a többi nagy autógyártó vállalat is [2].



1. Kép  
Audi A8 karosszériája [3]

Ennek köszönhetően 2014-re az alumínium felhasználás a tömegpiacra szánt modellekben is egyre nagyobb részarányt tett ki. Sikerült elérni néhány autó esetében a 39 %-os tömegcsökkenést is [2].

Az alumínium mellett szól a könnyű súlya ezen kívül az a tulajdonsága is, hogy remek energiaelnyelőként funkcionál. Emiatt rendszeresen készítenek belőle életvédelmi elemeket, lökhárítókat, ütközőelemeket és gyakran fordul elő a karosszéria ütközésvédelmében is. A forradalmi elektromos autót gyártó Tesla modelljei akkumulátor csomagjait alulról 8 mm vastag golyóálló alumíniumötvözet lemez védi, mely garantálja a biztonságát és védelmét az akkumulátoroknak [4].

Az európai gépkocsikra jutó átlagos alumínium felhasználás 2012-ben 140 kg/db volt. Eloszlása a következők alapján alakul:

- Hajtáslánc (motor, üzemanyag rendszer, hűtőrendszer): 69 kg található a motor blokkban, hengerfejben, váltóházban és radiátorokban.
- Váz és felfüggesztés (bölcső, keréktengelyek): 37 kg található a kerekekben, lengőkarokban és kormányműben.
- Karosszéria elemek (autó karosszéria, motorháztető, ajtók, csomagtartó, lökhárítók, és belső tér): 26 kg a motorháztetőben és ajtóknál, első felépítésben és hátsó lökhárítóban [3, 4].

Ezzel lényegesen csökkenteni tudták a káros anyag kibocsátást és üzemanyag fogyasztást [3].

Az alumínium ilyen nagymértékű elterjedését a járműiparban hozzásegítette, az új és jobb minőségű alumínium ötvözetek fejlesztése mellett megjelent, új formája az alumíniumnak. Ez a forma nem más, mint a celluláris szerkezetű alumíniumhab. Ez a szerkezet tovább fokozza az alapanyag könnyedségét, emellett megtartja szilárdságát.

## 2. Celluláris anyagok

Ugyan az emberiség csak a 20. században kezdett el mesterségesen celluláris anyagokat előállítani, elsőként polimerekből, kerámiákból, üvegekből és fémekből előtte is megtalálhatók voltak ezek az anyagok a természetben. A legalapvetőbbek a fa a szivacs és korall, de ilyen szerkezetű az emberi koponya és combcsont is. Manapság a legelterjedtebb mesterséges

celluláris felépítésű anyagok a polimer habok. Ezeknek az anyagoknak bevezetésben is említett csekély szilárdságuk, alacsony olvadáspontjuk és fokozott tűzveszélyességük szab határt.[5]

## 2.1. Fémhabok tulajdonságai

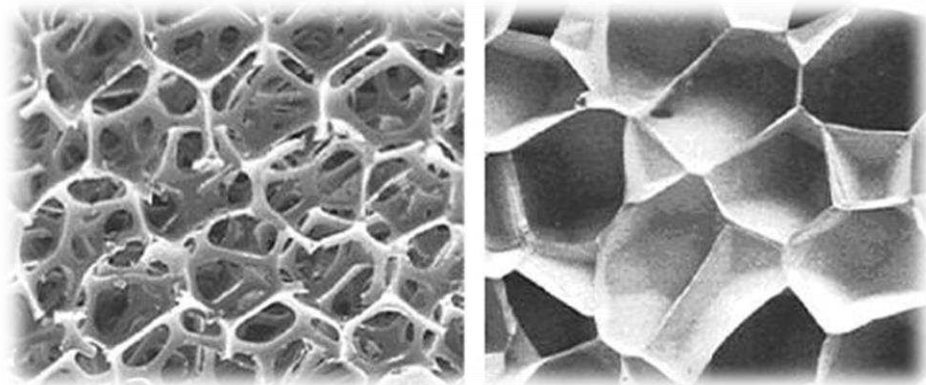
A fémek habosításával nagy fajlagos szilárdságú, könnyű, jó energiaelnyelő anyagokhoz juthatunk, amelyek magas hőmérsékleten is stabilak maradnak, ráadásul száz százalékban újrahasznosíthatók, így környezetbarátok is. További jó tulajdonságaik a jó rezgéscsillapító képesség, hangelnyelés és elektromágneses árnyékoló képesség. A fémhabok nagy energiaelnyelő képességét a porozitásuk biztosítja. A cellákat határoló gömbhéjak nem egy időben omlanak össze és, így a fémhabok nagymértékű alakváltozásra képesek azonos feszültség szinten. A fémhabok főbb tulajdonságait az alábbi (1. Táblázat) táblázat mutatja [5,6].

1. Táblázat.. Fémhabok fizikai tulajdonságai [5]

| Fémhabok legfőbb fizikai tulajdonságai |                                                    |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Cellaméret                             | 20 nm - kb. 20 cm                                  |
| Relatív sűrűség                        | 0,003 - 0,5                                        |
| Rugalmassági modulus                   | 0,02 - 15 GPa                                      |
| Rugalmasság határa                     | 0,02 - 50 MPa                                      |
| Hővezetési tényező                     | 0,3 - 35 W/m · K                                   |
| Fajlagos ellenállás                    | $9 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$ |

A sejtes felépítésű anyagokat tömör rudak és/vagy lemezek hálózataként lehet elképzelni. A tömör rudakat cella élnek, a lemezeket cellafalaknak hívjuk. A háromdimenziós celluláris anyagokat haboknak nevezzük, ha a bennük található szilárd anyag térfogati hányada más néven relatív sűrűsége nem haladja meg az 50%-ot [5].

Ezt a relatív sűrűséget meghaladó háromdimenziós anyagokat porózus anyagoknak nevezzük. A fémhabokat két fő szerkezeti felépítésük szerint osztályozhatjuk: lehetnek nyitott cellásak vagy zárt cellásak is, melyet az alábbi kép (2. Kép) szemléltet [5].



2. Kép.

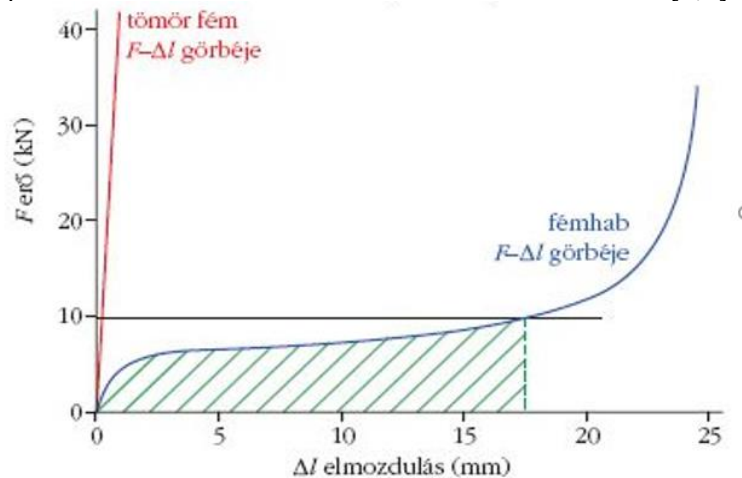
Nyitott (balra) és zárt (jobbra) cellás szerkezet [7]

Nyitott cellás a szerkezet, ha a cellák nyitott cellaoldalakon keresztül érintkeznek. Zárt cellás a szerkezet, ha a sejtek üregeit szilárd cellafalak határolják. Ezen felül előfordulhatnak félig nyitott és félig zárt celluláris felépítésű szerkezetek is, de ezek a szerkezetek csekély jelentőséggel bírnak.[5,6]

## 2.2. Fémhabok felhasználása

A fémhaboknak a fentebb említett előnyös tulajdonságaik révén több alkalmazási területük is van és ezek folyamatosan bővülnek. Az egyik legnagyobb előnyük révén, ami a nagy energiaelnyelő képesség beépíthetők gépjárművekbe. Például ütközésvédelmi elemekbe, mint

ütközők, bukókeretek és lökészsillapítók vagy éppen lökhárítók. Felhasználhatók még ajtók, küszöbök belsejében merevítésként. Ezzel növelhető az utasok védelme és elérhető a tüzelőanyag fogyasztás csökkenése is. Jelenleg alumínium habokat használnak például az Audi A8-ban, a Ferrari F430 sportautóban és a Siemens Combino villamosaiban [5,6].



2. Diagram.

*Fémhabok és tömör fémek erő-elmozdulás diagramja [5]*

A jó hangszigetelő tulajdonsága miatt alkalmazzák Japánban felüljárók, viaduktok alját borítják be, ilyen anyagból készült „lemezekkel”. Hőszigetelő tulajdonsága miatt épületek mennyezetét és külső falaira is szerelnek, fémhabból készül táblákat ezzel javítva az épület szigetelését és egyben esztétikai szempontokat is szem előtt tartanak [5].

Tovább növeli a felhasználási területeket a szintaktikus habok javított tulajdonságai. Ezeknek a haboknak a mátrixa fém, erősítő anyaga pedig fém vagy kerámia, a hő és kémiai stabilitásuk jó. A felhasznált könnyűfémek (alumíniumötvözetek) olvadáspontja, a polimer habok degradációs hőmérsékletét lényegesen meghaladja, korrózióval való ellenállásuk ugyancsak megfelelő. Ezzel a felhasználásuk köre kiterjedhet a nagy hőmérsékletű, nedves, erősen korrozív környezetekre is [6].

### 3. Az alumíniumhegesztés sajátosságai

Az alumínium szerkezetek hegesztése során, az anyag sajátosságai révén nagyobb felkészülést és szakmai tapasztalatot igényel, mint a szénacél esetében. Több hátráltató tényező is van a hegesztés során, melyek nagyban kihatnak az elkészített hegesztett kötés minőségére.

#### 3.1. Kilágulás

Az alumínium hegesztése során a kötést alkotó varratfém mechanikai tulajdonságai rendszerint elmaradnak az alapanyagétól. Ez a jelenség a hegesztési hő hatására bekövetkező kilágulás, mértéke a hőhatásövezetben a legnagyobb. Viszont azt, hogy ez mégis mekkora mértékben lép fel nagyban meghatározza a hegesztési eljárás és technológia [19].

Minél kisebb szakaszenergiával, vagyis minél nagyobb hegesztési sebességgel dolgozunk annál inkább kisebb lesz a hőhatásövezet szélessége. Fontos a minél koncentráltabb hőbevitel, ömlesztő eljárások közül a legkoncentráltabb és legelterjedtebb eljárás az AFI hegesztés [8].

#### 3.2. Repedési hajlam

Az alumínium repedési hajlama igen magas lehet, emiatt ez a hegesztés egyik legfontosabb kritériuma. Létrejöhetnek a repedések a kristályosodás közben, illetve az olvadáspont alatti hőmérsékleten is, szilárd állapotban. A legnagyobb esély a repedés kialakulására a dermedés során van, ekkor a legkisebb az alumínium szilárdsága, képlékenysége és szívóssága viszont a belső feszültségek ekkor ébrednek az anyagban. A repedéseket létrehozó belső feszültségek forrása mindig az akadályozott alakváltozás [8].

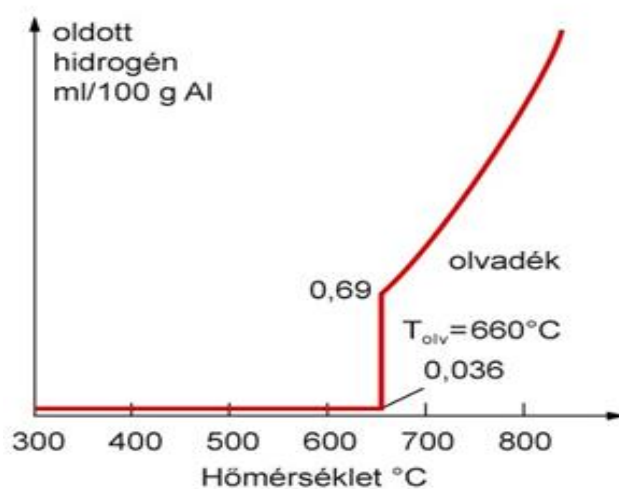
A belső feszültségek jelentősen csökkenthetők:

- a túlhevítés elkerülésével
- a befogás merevségének csökkentésével
- a hegesztési sorrend helyes meghatározásával
- a hegesztési hibák utólagos javítása is repedési veszéllyel jár [8].

Minden esetben törekedni kell a legkoncentráltabb hőbevitelre, a legkisebb szakaszenergiára, valamint kerülni kell az utólagos felhevítéseket [8].

### 3.3. Hidrogén okozta porozitás

A hőmérséklet növekedésével és az alumínium olvadáspont körüli értékének elérésével kiugróan megnő a hidrogénoldó képessége. A hidrogén az egyetlen gáz, amely oldódik az alumíniumban. A hidrogén oldhatóságát a hőmérséklet függvényében a következő ábra szemlélteti [9].



3. Diagram

*Az alumínium hidrogénoldó képessége a hőmérséklet függvényében [9]*

Mivel a hidrogén a hőmérséklet csökkenés és az ebből fakadó, alumínium hidrogénoldó képességének csökkenésével az anyagból eltávozni igyekszik, maga után üregeket, porozitást hagy. Ez a hegesztett kötés szilárdságát csökkenti, ami kerülendő. Azonban teljes mértékben ezt elkerülni fogyóelektródás hegesztés esetében nem lehet. [18]

A gázzárványokat képző hidrogén forrása:

- felületi nedvesség, páralecsapódás
- szerves anyagú szennyeződés, kenőanyag maradványok
- a vízű hegesztőpisztoly tömítetlensége
- tömítetlen védőgáz rendszerbe keveredő levegő nedvességtartalma
- helytelen pisztolytartásból eredő levegő bekeveredése a védőgáz burokba

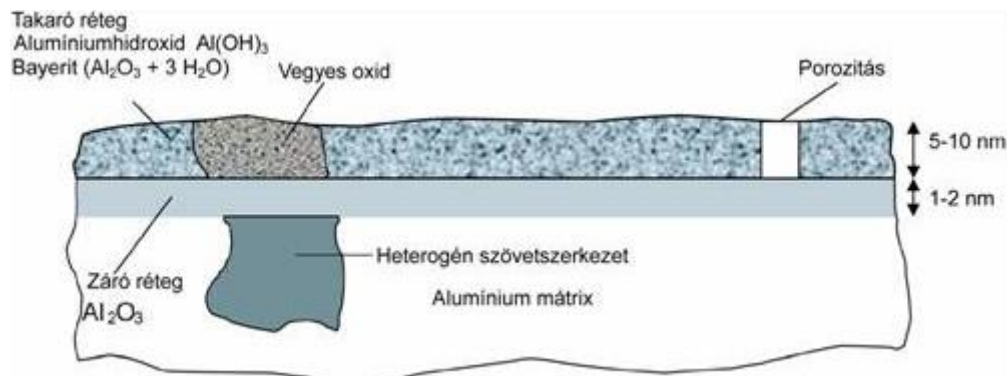
Az alapvető megoldás a környezet hidrogén leadó képességét olyan csekély értéken tartani, amennyire csak lehetséges. Ezt a következőkkel érhetjük el:

- a porozitás képződés csökkenthető az ívfeszültség növelésével [8].
- a tiszta raktározás és feldolgozás
- lényeges a védőgáz tisztasága, argonból legalább 4.6-os tisztaság kell (Ar min 99,996%) [9].



### 3.4. Alumínium-oxid

Az alumínium felületén szinte azonnal oxidréteg képződik szabad levegőn, amely amorf  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ez a felületet beborító réteg két részből tevődik össze: egy megközelítően tömör amorf alumíniumoxid alap és egy porózus, víztartalmú, Bayerit tartalmazó takaró rétegből ezt az alábbi ábra (ábra 1.) szemlélteti. Az oxidréteg vastagsága az idővel, a hőmérséklettel és a rendelkezésre álló oxigén mennyiséggel növekszik [8, 9].



1. Ábra  
Az oxidréteg szerkezete [10]

Az alumínium ötvözetek hegesztése ennek az oxidrétegnek az eltávolítása nélkül nem lehetséges. Ennek oka az olvadáspontja, ami  $2050\text{ }^{\circ}\text{C}$  így a jóval alacsonyabb hőmérsékletű alumínium megolvad és mivel az alumínium-oxid sűrűsége nagyobb az alumíniuménál a varrat aljára süllyed. Van még egy másik káros hatása is az oxidrétegnek: mivel nedves környezetben a réteg vizet vehet fel, így hegesztés során hidrogén egyik fő forrása lehet. Ezek a tények a hegesztet kötésre nézve katasztrofális hatással vannak. A felületet lehetőleg közvetlenül a hegesztés megkezdése előtt mechanikusan vagy vegyi úton meg kell tisztítani [9, 18].

Eltávolításának lehetőségei:

- mechanikai tisztítás,
- pácolás,
- folyasztószerek,
- váltakozóáram (TIG), egyenáram fordított polaritás (MIG)[9].

### 3.5. Magnézium-oxid

Fekete lecsapódásként jelentkezik a varraton és annak környezetében. Ezt a szennyeződést alumínium és magnézium oxid alkotja. Melyek az alapanyagból és a hozaganyagból gőzölnek el a hegesztési ív alatt és az alacsonyabb hőmérsékletű varrat körüli felületeken lecsapódnak alumínium vagy magnézium-oxid formájában [11].

A magnézium veszteség mérhető a hegesztés során. Ha a lerakott hegesztési varratot kémiai elemezzük, mindig kevesebb magnéziumot találunk benne, mint a hozaganyagban, néha akár fél százalékkal is kevesebbet [11].

A kulcsa annak, hogy csökkentsük a hegesztés során a szennyeződést a megfelelő gázvédelem kialakítása a varrat körül, szinte kivétel nélkül. Ezt a következők betartásával érhetjük el:

- a leggyakoribb hiba, amit a hegesztők elkövetnek, hogy túl nagy gázterelő-munkadarab távolságot alkalmaznak. Ideális esetben ez a távolság TIG és MIG esetén nem lehet több mint  $5/8\text{ in}$  ( $18,8\text{ mm}$ ). Ha ez a távolság túl nagy a varrat kormos lesz,
- a másik fontos változó a pisztoly vezetés szöge. Mind a TIG, mind a MIG esetében toló pisztolymozgást kell alkalmazni. Ha a pisztolyt húzzuk a varrat fekete lesz. Másik

szélsőséges eset, mikor túl nagy pisztolyvezetési szöget alkalmazunk, így emiatt lesz a varrat szennyezett. Ebben az esetben a nagy pisztoly szög Venturi hatást válthat ki, ami során levegő fog bekeveredni a védőgázunk közé,

- egyéb tényezők is okozhatnak szennyeződést, mint pl. szennyezett védőgáz, visszamaradt szénhidrogének a hegesztés felületén vagy szennyezett hozaganyag [11].

A szennyeződés nem csökkenti a varrat mechanikai tulajdonságait. Azonban egy korommal borított varrat rossz gázvédelmet jelez, magasabb gázporozitást tartalmazhat a rossz gázvédelem okán [11].

#### 4. Lehetséges hegesztési eljárások összefoglalása

Az alumíniumhabok hegesztése mind ömlesztő, mind sajtoló hegesztési eljárásokkal lehetséges. Olyan különböző eljárásokkal készültek már hegesztési kísérletek, mint:

- TIG hegesztés,
- AFI hegesztés,
- plazmahegesztés,
- lézersugaras hegesztés,
- elektronsugaras hegesztés,
- hidegsajtoló hegesztés,
- dörzshegesztés,
- diffúziós hegesztés,
- ellenállás-tompahegesztés[12].

Az eljárások alkalmazhatósága annak a kritériumnak a függvénye, miszerint szükséges-e biztosítani a varratban a nyitott cellás szerkezetet vagy sem [12].

##### 4.1. Ívhegesztési eljárások

Az ilyen eljárásokkal készített kötések nem teljes beolvadásúak. A varratban részlegesen biztosítható a nyitott cella szerkezet. Ez a nem teljes keresztmetszetű beolvadás elegendő a terhelések átvitelére. Ilyen varratok készíthetők TIG, MIG és plazmahegesztéssel. Egy TIG eljárással készített kötés látható az (3. Kép) alábbi képen [12].

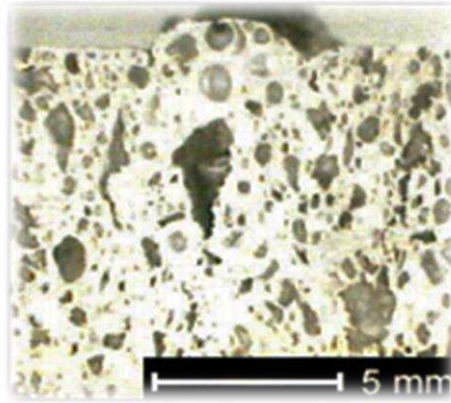


3. Kép  
*TIG hegesztéssel készített kötés beolvadó alátétlemez alkalmazásával*



### *Lézersugaras hegesztés*

A lézersugaras hegesztéssel kialakított kötések esetében lehetséges a porózus és zárt szerkezet is. A tömör varratok kialakítása csökkenti az alumíniumhab egyik nagy előnyét, ami a könnyedségéből adódik, így ilyen varratokat csak nagy méretű szerkezetek esetében érdemes használni. Az előnyösebb nyitott cellás varrat kialakítása esetében szükségünk van habosító szerek adagolására a varratfürdőbe, amik biztosítják a porózus szerkezetet [12].



4. Kép  
*Porózus varrat keresztmetszet [12]*

### **4.2. Sajtoló hegesztési eljárások**

Az ilyen eljárások során biztosítani kell a hab megfelelően biztos rögzítését, amellet hogy annak szerkezete nem roncsolódik [12].

#### *Dörzshegesztés*

A hagyományos forgó mozgású dörzshegesztés alkalmazása problémás, a munkadarab a megfogóban megroppan, eltörik vagy akár kihajlik. Megfelelő megfogással a rezgőmozgású dörzshegesztés alkalmazható, illetve forgógyűrűs dörzshegesztés is alkalmas lehet. A lineáris dörzshegesztés is alkalmazható, nem csak homogén hanem heterogén kötések létesítésére is [12].

#### *Ellenállás tompahegesztés*

Kisebb keresztmetszetek esetében a zömítő tompahegesztés alkalmazható. Nagyobb keresztmetszet esetében pedig a leolvasztó tompahegesztést érdemes használni [12].



5. Kép  
*Ellenállás tompahegesztéssel készített kötés [12]*

## 5. Összegzés

Mivel a hegeszteni kívánt anyag szerkezete porózus, légüres cellákból épül fel, melyek fala igen vékony fontos a minél kisebb hőbevitelű hegesztő eljárás alkalmazása. Az ömlesztő eljárások közül alumínium esetében a két, jelenleg az iparban legelterjedtebb hegesztő technológia a fogyóelektródás semleges védőgázos ívhegesztés (MIG) és a volfrámelektródás semleges védőgázos ívhegesztés (TIG). E két eljárás közül lenne érdemes választani a kisebb szakaszenergiáját, hogy elkerüljük az alumíniumhab összeroskadását a hegesztés során.

Az ívhegesztési eljárások két fő paramétere az áramerősség ( $I$ ) és az ívfeszültség ( $U$ ). Ennek a két értéknek a meghatározása lenne a fő feladat, mivel főleg ezekről a paraméterektől függ a hőbevitel. Ha a hőforrás koncentrátsága növekszik: csökken a megolvasztásig eltelt idő, így növelhető a hegesztési sebesség. Ezeket együttevén a bevitt hőmennyiség és ebből fakadóan a szakaszenergia is csökken [8].

A  $Q$  hőbevitelt a következő összefüggéssel (1) lehet kiszámítani:

$$Q = k \frac{U I}{v} 10^{-3} [kJ/mm] \quad (1)$$

ahol,  $k$  a hegesztési eljárás termikus hatásfoka,  $U$ , V-ban,  $I$ , A-ban a fentebb említett villamos paraméterek,  $v$  pedig a hegesztési sebesség mm/s-ban.

A semleges védőgázos ívhegesztés esetében a termikus hatásfok 0,6, ezzel szemben a fogyóelektródás semleges védőgázos ívhegesztés termikus hatásfoka 0,8. Mivel az utóbbi eljárás termikus hatásfoka lényegesen nagyobb, így a fentebb említett okokból ez az eljárás alkalmasabb lehet a kísérletek elvégzésére [8].

A hegesztési áramerősség ( $I$ ), feszültség ( $U$ ) és sebesség ( $v$ ) megválasztása során olyan beállításokra kell törekedni, hogy a hőbevitelt minél inkább leszorítsuk. Ez lehetséges lehet egy alapvetően alacsony áramerősséggel, és a mai hegesztő gépek esetében alapvető funkcióval az áramerősséghez tartozó ív feszültség negatív irányban való változtatásával addig, amíg az ív stabilitása még elfogadható.

## Irodalomjegyzék

- [1] <http://www.oica.net/category/production-statistics/2016-statistics/> [Megtekintés: 22-Szept-2018].
- [2] Juergen R. Hirsch: Recent development in aluminium for automotive applications [Online]. Elérhető: [https://www.researchgate.net/publication/265129257\\_Recent\\_development\\_in\\_aluminium\\_for\\_automotive\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/265129257_Recent_development_in_aluminium_for_automotive_applications) [Megtekintés: 24-Szept-2018].
- [3] <https://automotivemanufacturingsolutions.com/process-materials/blend-ambition> [Megtekintés: 26-okt-2018]
- [4] <https://www.aluminiumleader.com/application/transport/> [Megtekintés: 5-okt-2018]
- [5] Kádár Csilla, Kenesei Péter: NAPJAINK KORSZERŰ ANYAGAI: A FÉM HABOK [Online]. Elérhető: <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0807/kadar0807.html> [Megtekintés: 24-Szept-2018].
- [6] Orbulov Imre Norbert: Szintaktikus fémhabok, PhD-értekezés
- [7] Goga Vladimír: Testing and Application of New Phenomenological Material Model for Foam Materials [Online]. Elérhető: <http://www.posterus.sk/?p=3923> [Megtekintés: 21-okt-2018].
- [8] Dr. Szunyogh László, főszerkesztő: Hegesztés és rokon technológiák kézikönyv
- [9] Dr. Komócsin Mihály: Anyagok hegeszthetősége [Online] Elérhető: [https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013\\_anyagok\\_hegeszthetosege/1\\_acelok\\_gyartasa\\_es\\_jelolesi\\_rendszere.html](https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_anyagok_hegeszthetosege/1_acelok_gyartasa_es_jelolesi_rendszere.html) [Megtekintés: 9-szept-2018]
- [10] <http://hegpont.hu/aluminiumhegesztes/> [Online] [Megtekintés: 25-szept-2018]
- [11] Frank Armao: How to recognize, minimize weld smut [Online]. Elérhető: <https://www.thefabricator.com/article/aluminumwelding/how-to-recognize-minimize-weld-smut> [Megtekintés: 26-Szept-2018].
- [12] Prof Dr. Bolshakov Michail, Dr. Németh Árpád, Nyári Péter, Dr. Palotás Béla: Fémszivacsok hegesztése, Hegesztés technika, XVI. évfolyam 2005/1

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával valósult meg.

# HABOSÍTOTT ALUMÍNIUMMAL ERŐSÍTETT VÉKONYFALÚ CSŐ FEJLESZTÉSE

## DEVELOPMENT OF THIN-WALLED TUBES REINFORCED BY FOAMED ALUMINIUM

Garai Flórián <sup>1\*</sup>, Hareancz Ferenc <sup>1</sup>, Dr. Weltsch Zoltán <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

### Kulcsszavak:

súlycsökkentés  
biztonsági rendszerek  
alumínium hab  
energiaelnyelő képesség  
töltött csövek  
betöltési módszerek

### Keywords:

weight reduction  
safety systems  
aluminium foam  
energy absorption  
filled tube  
loading method

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 20  
Átdolgozva 2018. november 18  
Elfogadva 2019. március 6

### Összefoglalás

Napjainkban a járműiparban egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek a súlycsökkentésre és a biztonságra. Ez a két tényező fordítottan arányos, hiszen a nagyobb fokú biztonság erősebb anyagok és több biztonsági elem felhasználását követeli, ami viszont növeli a járművek tömegét. Ezen tényezőket figyelembe véve került előtérbe az alumínium hab használata, amely ultrakönnyű és jó energiaelnyelő képességekkel rendelkezik. A biztonsági rendszerek közül használható a gyűrődési zónákban, ütközés csillapító rendszerekben, és a karosszériaelemek merevítésére. A cikk bemutatja az alumínium habbal töltött csövek betöltésének módszereit és lehetséges felhasználási területeit.

### Abstract

Nowadays weight reduction and safety get more and more emphasis in automotive industry. These two factors are inversely proportional because higher safety level demands the usage of stronger materials and more safety elements but it leads to an increase in weight. Considering these conditions has come to the fore of aluminium foam usage which is ultra light weighted and it has good energy absorbing ability. Among passive safety systems it can be used in crumple zones, collision damping systems and stiffening of body parts. The article describes the loading methods of aluminium foam-filled tubes and their application area.

## 1. Bevezetés

Egyre gyorsuló és dinamikusán fejlődő világunkban a közlekedésnek kiemelkedő szerepe van. A közlekedés egyik folyamatosan fejlődő ágazata a közúti közlekedés. Az egyre szigorodó környezetvédelmi szabályozások miatt a fő fejlesztések a járművek fogyasztásának és károsanyag-kibocsátásának csökkentésére irányulnak.

A károsanyag-kibocsátás csökkentésére több módszer is létezik, ilyen például a hajtóegység fejlesztése, felhasznált tüzelőanyag mennyisége, a gépjármű tömegének csökkentése. Ezek közül egyik potenciális fejlődési irány a jármű össztömegének csökkentése [1]. A legkézenfekvőbb megoldás az alapanyag változtatása: a már megszokott acél alapanyagon kívül más anyagból is gyárthatunk gépjármű karosszériát, például alumíniumból. A karosszéria tömegének redukálása az alapanyag megváltoztatásán kívül a falvastagság csökkentésével érhető el. Azonban felmerül a

\* Garai Flórián. Tel.: +36 30 825 9787  
E-mail cím: garaiflori@gmail.com

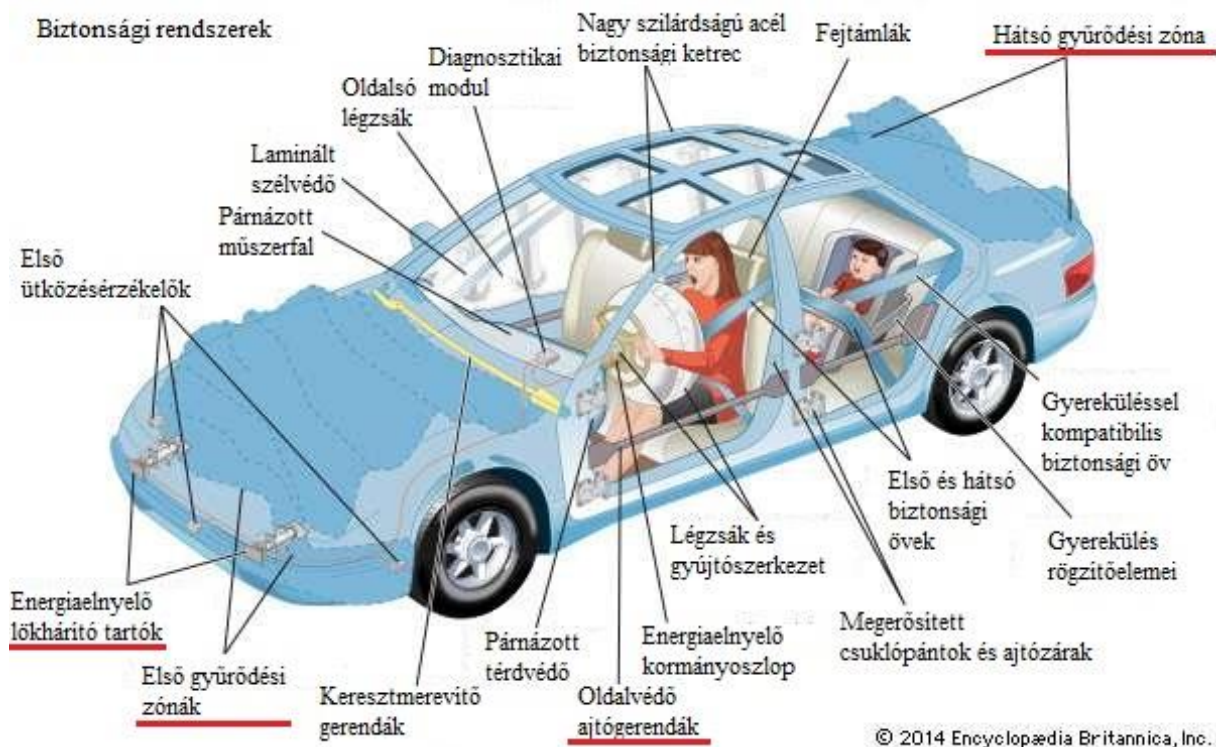
kérdés, hogy a kevesebb alapanyag felhasználása milyen kockázattal van a járműben utazók biztonságára. A fejlesztések ez irányban is folynak és ma már többféle biztonsági rendszer áll rendelkezésre az utasok védelmére [1].

Az előbb említett két trend kismértékű ellentmondással bír: több biztonsági elemet kell felhasználnunk, ha valamit biztonságosabbá akarunk tenni. Biztonsági elemnek tekinthetjük a karosszéria átalakítását, anyagának megváltoztatását vagy éppen az autó elektronikájának köszönhetően a balesetmegelőzést. A jelenlegi autókarosszériák formáját jelentősen változtatni nem célszerű, hiszen meg kell felelnie az aerodinamikai és a biztonságtechnikai követelményeknek és már több évtizedes tervezési irányvonalat követnek [2].

Az anyagok változtatása esetén szilárdságilag jobb tulajdonsággal rendelkező anyagok használatát értem (pl.: acél használata alumínium helyett, nagyobb falvastagságú csövek, vastagabb lemezek használata). Az acél szilárdságtanilag jobb tulajdonságokkal bír, egy ütközés esetén kisebb deformációt szenvedne, mint az alumínium, azonban jóval nagyobb növekedést jelentene az autó össztömegében, ami miatt sokkal több energiára (üzemanyagra) lenne szükség ugyan azon út megtételéhez. A nagyobb üzemanyag fogyasztás értelemszerűen drágább üzemeltetést jelentene, ill. a világ mai helyzetét figyelembe véve (folyamatosan csökken a világ kőolaj készlete) egyre nagyobb hangsúlyt kéne fektetni az alternatív üzemanyag-módok bevezetésére.

Azonban az energiaelnyelő elemek használata és a karosszéria vázának lehetőség szerinti belső merevítése egy nagyon jó kompromisszumos megoldás. 1948-ban szabadalmaztattak egy anyagot, amely sok évtizede fejlesztésen ment keresztül, míg elnyerte a mai formáját. Ez az anyag nem más, mint az alumínium hab. A cellás szerkezetének köszönhetően ultra könnyű, nagyon jó energiaelnyelő, hangszigetelő. Az alumínium habot különleges tulajdonságai alkalmassá teszik a széles körű felhasználásra [3].

## 2. Alumínium hab lehetséges autóiipari felhasználása



1. ábra: Biztonsági rendszerek [4]

A képen piros aláhúzással jelöltük azokat a rendszereket, ahol alkalmazható az alumínium hab. A fent említett passzív biztonsági rendszerek az ütközéscsillapító és energiaelnyelő elemek megfelelői [4].



Az oldalvédő ajtógerendák minden esetben keresztben felfüggesztett profilok, amelyek az oldalirányú ütközések során kiemelt fontossággal bírnak az utasok biztonságának védelmében. A gerendák úgy vannak beépítve, hogy elnyelik, majd az alsó, merevebb keretszerkezet felé továbbítják az ütközési energiát [4].

Az elülső és oldalsó gyűrődési zóna teljes egészében az energiaelnyelésről és a deformációról szól. Az elülső gyűrődési zóna úgy van kialakítva, hogy frontális ütközés során a motor, a kormánymű és az első kerekek a felfüggesztéssel együtt a sofőr (és az autó) alá „gyűrődjen”. Ezek mellett nagy mértékű energiát nyel el a lökhárító, a törésdobozok, a motorháztető és a karosszéria ezen részének többi alkotóeleme a deformációjával. A törésdobozok az elülső és a hátsó gyűrődési zónában is megtalálhatóak. Elsődleges szerepük nem az utasok védelme, hanem a kis sebességű ütközések okozta energia elnyelése, ez által a karosszériában keletkező károk minimalizálása. [4,5,6].

Az energiaelnyelő lökhárító tartók három részből állnak: a lökhárító homloklemezéből, a lökhárító gerendájából és a tartóelemekből. Egy rugó és a lökhárító homloklemeze és gerendája között található energiaelnyelő elem alkalmazásával biztosítják a rugalmasságot [7].

Az energiaelnyelő elem többféleképpen is felépíthető, használhatunk habokat, dupla vékonyfalú csöveket (egy kisebb átmérőjű a nagyobbban), dupla félkör profilú csöveket vagy akár az egész elemet az ún. „honeycomb” (méhkaptár) struktúrájú, hatszögprofilokat egymáshoz épített vékonyfalú csövek alkalmazásával [7].

### 3. Alumínium habbal erősített csövek előállítása

#### 3.1. Alumínium hab rudak előállítása

Az alumínium hab általános felhasználásra történő gyártása során a végtermék egy téglalap keresztmetszetű, adott méretű késztermék. Ezeknek a késztermékeknek a kimunkálendő rúd átmérőjénél nagyobbobbnak kell lenniük. Sablonok segítségével egyedileg, formára habosított alumínium habokat is előállíthatunk (pl.: négyzet keresztmetszetű, ledugózott zárszelvény, ledugózott cső, stb.).

Az alumíniumhab-rudak előállítására 3 módszert teszteltünk: a késztermékekből való lyukasztást, koronafúrós kivágást és esztergálást.

A lyukasztási technológia elsősorban lemezalakítási technológia, melynek lényege, hogy a vágóerő a kivágott rész kerületére és a vágott rész vastagságára koncentrálódik. Az alumínium hab celluláris szerkezete miatt a vágóerő nem egy homogén, számolható keresztmetszeten oszlik el, hanem egy inhomogén, cellafalak által határolt keresztmetszeten. A vágóerő egyenlőtlen eloszlása és a celluláris szerkezet miatt a lyukasztás nem megfelelő módszer.



2. ábra: Lyukasztott alumínium hab

A koronafúró esetében a habon belüli cellák nem elnyíródnak, hanem szakadnak, ez által nem lehet méretpontosan hengert kimunkálni. A másik probléma a központosítás, mivel a habba nem fúrhatunk lyukat, a központosító fúró nélkül kell azt megoldanunk.



3. ábra: Koronafúróval kivágott alumínium hab

A legalkalmasabb technológia az esztergálás. A legelső lépés, hogy az alumínium hab darabokból négyzet keresztmetszetű, négyfőcsúszású tokmányba befogható testeket alakítsunk ki. Az alumínium hab jól fűrészelve, fűrészeléssel el is lehet végezni a méretre vágást. A jól forgácsolhatóság, megmunkálhatóság a habok esetében szorosan összefügg a cellamérettel és a sűrűséggel. Minél kisebb cellaméretű az alumínium hab, annál nagyobb a sűrűsége és annál jobban megmunkálható. Mint minden hosszabb rúdanyag esetében, az alumínium habnál is fontos a megfelelő központozás és megtámasztás. A megmunkálás során nagyon fontos, hogy kenőanyagot ne alkalmazzunk, mert az beszívároghat a hab celláiba. A kenőanyag nélküli esztergálás, ill. az alumínium miatt a megmunkálás során élrátétes lesz a megmunkáló szerszám. Sajnos esztergálás közben is előfordul a cellák kiszakadása, de kisebb mértékben, mint a másik két technológiánál (a hab belső szerkezetétől, és a hab felszínén lévő cella kapcsolatok típusától is függ a kiszakadások mértéke).



4. ábra: Esztergált alumínium hab

### 3.2. Betöltési módok

#### 3.2.1. Alumínium hab utólagos megmunkálása nélkül

Az alumínium habok csőbe töltésére többféle módszer is alkalmas lehet. A legegyszerűbb módszer az alumínium közvetlenül a töltési kívánt csőben történő habosítása, mivel nincs szükség további alakadó, megmunkáló eljárásokra. Az eljárás első lépése egy prekursor (előtermék anyag) létrehozása, amely tartalmazza a habosítani kívánt ötvözetet és a habképző anyagokat. A habképző anyagok egy bizonyos hőmérséklet felett, kémiai reakciók útján fogják elkezdni a gázképzést, ez által habosítva a prekursor. A habosítási hőmérséklet kevéssel nagyobb, mint az alumínium olvadási hőmérséklete ( $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), optimális értéke a prekursorától függ (a  $680\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot már megfelelőnek mondhatjuk) [3]. Ez azt jelenti, hogy a csőnek vagy az előbb említett hőmérséklet feletti olvadásponttal kell rendelkeznie (pl.: acélcsövek), vagy biztosítani kell a cső hőmérsékletének olvadáspont alatti tartását a habosítási időtartam alatt. Alumínium csövek esetén az olvadáspont  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de az EN AW 6060 T66-os csövek  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on 6 perces hőn tartási időt bírhatnak deformáció és oxidáció nélkül [8]. Számunkra az alumínium csövek kiemelt fontosságúak, hiszen az autóipar használ vékonyfalú alumínium csöveket a súlycsökkentés miatt. Az eljárás során figyelembe kell venni a hő bevitelt, amely már egy hőkezelésnek felel meg. Az alumínium habosítási paramétereiből felírható a hőkezelés technológiája. A habosítás hőmérséklete adott, az ehhez szükséges időtartam felírható hőn tartási időnek, és az általunk választott hűtés típusa is megadható. Az így elkészített hőkezelési technológia segítségével következtethetünk a cső töltés utáni állapotára, mechanikai

tulajdonságainak változására. A cső egyik felét mindenképpen le kell zárni, ami további műveleteket eszközöl (kiváltható a cső állított helyzetű habosításával). A varrat nélküli csövek esetén nincs olyan tényező, amely a habképzés során befolyásolná a cső belső átmérőjének teljes mértékű kitöltését, ill. a cső teljes hosszán megvalósul a kitöltés, ezért nagyon jó minőségű kitöltést kapunk.

A következő módszer a sablonban történő habosítás. Annyiban hasonlít az előző eljárásra, hogy a prekuzort egy adott geometriára habosítjuk, ez által befolyásolhatjuk az alumínium habunk geometriáját. A sablon lehet zárt szelvény (téglalap, négyzet, stb. geometriájú) vagy éppen cső (az alumínium hab sablonból való eltávolítása miatt két hosszában metszett cső, félcső egymáshoz történő rögzítésével megoldott). A két félcső illeszkedési hézagját is elkezdki kitölteni az alumínium a habosodás közben, ezért a kapott alumínium hab sűrűsége nem lesz olyan mértékű, mint az előző eljárás során, és a geometriája sem lesz teljesen kör keresztmetszetű. Ennek az eljárásnak nagy előnye, hogy bonyolult geometriájú habok is előállíthatók [8].

### 3.2.2. Alumínium hab utólagos megmunkálásával

A betöltött habok egy 31x31 mm-es négyzet profilból lettek egy 24 mm-es átmérőjű kör keresztmetszetű rúddá leesztergálva.

Az általunk vizsgált betöltési módszerek az illesztéseken alapulnak: szilárd és laza illesztésen. A húzott csövek falvastagságának tűrése  $\pm 10\%$ , a kísérletekhez 0,5 és 1 mm-es falvastagságú EN AW 6060-as, 25 mm-es külső átmérőjű csöveket használtunk, tehát a tűrések értéke 0,05 és 0,1 mm. A betöltött alumínium habok 4 mm-es cellamérettel rendelkeztek.

A szilárd illesztés esetén az alumínium hab rúd külső átmérője min. 0,05 mm-el, max. 0,2 mm-el nagyobb, mint a cső belső átmérője. A laza illesztés esetén az alumínium hab rudat 0,1-0,2 mm-el a cső belső átmérőjénél kisebbre esztergáltuk.

Szilárd illesztés esetén a betöltést présseléssel vagy zsugorkötéssel, míg laza illesztés esetén ragasztással végeztük.

1. Táblázat: Alumínium hab rudak betöltési módjai

|                                                | Préselés                          | Zsugorkötés                 | Ragasztás                   |
|------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>Illesztés típusa</i>                        | szilárd                           | szilárd                     | laza                        |
| <i>Módszer</i>                                 | mechanikus/hidraulikus<br>présgép | cső hevítése, hab<br>hűtése | nagyszilárdságú<br>ragasztó |
| <i>Össztömeg változása a<br/>betöltés után</i> | minimális<br>tömegcsökkenés       | nem változik                | jelentős növekedés          |

A betöltések előtt minden esetben megmértük a cső és a hab rúd tömegét is, majd a betöltés elvégzése után megmértük az össztömeget. A töltés utáni tömegekből következtethetünk a töltés során bekövetkezett tömegváltozásokra, és előzetes képet kaphatunk, hogy melyik töltési eljárás a legkedvezőbb súlycsökkentési szempontból.

A zsugorkötés során az alumínium csövet felmelegítettük, az alumínium hab rudat lehűtöttük. Az alumínium cső hevítése során a cső átmérője és hossza is lineárisan növekszik. A hosszváltozással jelen esetben nem foglalkozunk, az átmérő változása a számunkra lényeges tényező. A lineáris hőtágulás képletéből kifejezve meg tudjuk határozni a szükséges hevítési hőmérsékletet. A hab rudakat  $-30\text{ °C}$ -ra hűtöttük le. A kötés során a tágult cső rázsugorodik a habra, ez által a hab képlékeny alakváltozást nem szenved. A hab belülről nekifeszül a cső falának, ezzel egy kis belső feszültséget hozva létre. Azonban számolni kell azzal a következménnyel, hogy az alkalmazott hőmérséklet hatására a cső kilágyulhat.

A préselés során a hab képlékeny alakváltozást szenved betöltés közben. Az előző módszertől annyiban tér el, hogy a hab benyomásához szükséges erő fokozatosan növekszik, mivel minél nagyobb része van benne a csőben, annál nagyobb lesz a súrlódás. Az alumínium hab rúd préseléséhez kulcsfontosságú a megfelelő központosítás, a rúd és a cső tengelye essen egybe egymással.

A ragasztás lényege, hogy a ragasztóanyag létesíti a kapcsolatot két különálló anyag között. A ragasztóanyag adhéziós kapcsolatot létesít a ragasztott anyagok között, míg a ragasztóanyag



belsejében kohéziós kapcsolat van. A kötés tulajdonságai, létrejötte függ az adhéziótól, azaz a ragasztó munkadarabhoz tapadásától, valamint a ragasztó szilárdságától, kohéziótól. A ragasztó a munkadarabhoz való tapadása függ a felületek nedvesítésétől, ugyanis nedvesítés nélkül nem jöhet létre kapcsolat a felület és a ragasztóanyag között. A ragasztóanyagnak ki kell töltenie a felületek közötti egyenetlenségeket. A ragasztáshoz kétkomponensű szerkezeti ragasztót használtunk. A ragasztás kétféleképpen történhet: a cső falát bekenve és a habot ragasztó nélkül betolva, vagy a hab felületére ragasztót juttatva és a csőbe betolva. A műveletet a ragasztó fazékideje alatt kell végrehajtani.

Az előállításához szükséges időtartamot alapul véve a zsugorkötésnek az időtartama a hevítésből, hűtésből és a hőn tartásból áll össze, a ragasztásnál meg kell várni a ragasztóanyag térhálósodását, míg a préselésnél csak a hab benyomását kell elvégezni.

A betöltési módok összehasonlítása különböző kritériumok szerint:

- A betöltendő rudak méretpontosságát figyelembe véve a ragasztás és a préselés nem igényel túl nagy méretpontosságot, zsugorkötés esetén egy szűkebb mérethatáron belül kell maradni.
- A betöltés nehézsége szerint a ragasztást lehet a legkönnyebben elvégezni, a préselésnél figyelni kell a központosításra, zsugorkötésnél pedig a hőmérsékletekre és a hab rúd betöltésének gyors elvégzésére.
- A betöltéshez szükséges időtartam tekintetében a préselés a leggyorsabb eljárás, mert zsugorkötésnél a kemencék felfűtését és a hőn tartást is meg kell várni, ragasztás esetén pedig a használt ragasztóanyag kötési idejét meg kell várni (szobahőmérsékleten több óra, a hőmérséklet növelésével lehet csökkenteni).

Összességében a préselés a leggyorsabban elvégezhető betöltési eljárás, a legkönnyebben megvalósítható töltési eljárás pedig a ragasztás.

## Eredmények

A vékonyfalú alumínium csövek betöltése sikeresen megtörtént, az eljárásokat figyelembe véve a legkisebb tömegnövekedést a ragasztás adta, míg a legnagyobbat a préselés.

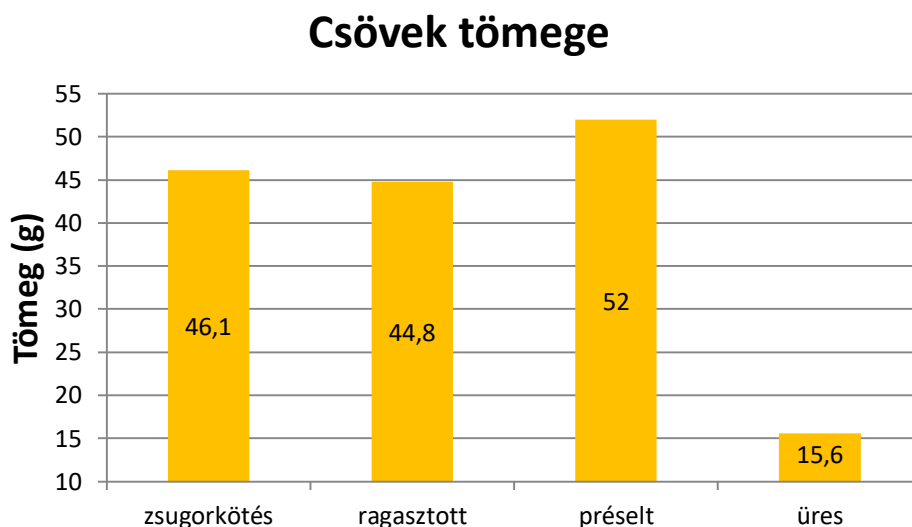
A zsugorkötés esetén csak a betöltött hab tömege adódik hozzá a cső tömegéhez. Mivel nem éri erőhatás sem a csövet, sem a habot a betöltés során, a tömegük nem változik. A préseléses betöltéshez nagyobb átmérőjű hab rudak szükségesek, ezért az így előállított töltött csövek tömege is nagyobb lesz, mint a zsugorkötésé. Az erőhatás miatt a hab egy kicsit zömöl, minek hatására a nyomott felületen a szélső szemcsék kitöredeznek.

Ragasztás esetén a hab rúd tömege mellett még a ragasztóanyag tömege is hozzáadódik az össztömeghez. Azonban a három töltési mód közül a ragasztásnál van szükség a legkisebb átmérőjű, ez által a legkisebb tömegű alumínium hab rúdra. A ragasztóanyag plusz tömegének ellenére is ez a töltési mód eredményezi a legkisebb tömegű erősített csöveket. A ragasztás technikáját és a felhasznált ragasztóanyag tömegét lehet optimalizálni, a kapott eredményeken lehet javítani.

2. Táblázat: Töltött csövek keresztmetszeti képe

| Zsugorkötéssel betöltött cső keresztmetszeti képe                                   | Préseléssel betöltött cső keresztmetszeti képe                                      | Ragasztással betöltött cső keresztmetszeti képe                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |

A fenti táblázatban látható képeken sárga vonal jelzi a csövek belső átmérőjét. Látható, ahogyan a préselés hatására a felső részen kitöredezett szemcsék miatt a nyomott felületnél nem teljes a kitöltés (a kitöredezett szakasz határát fehér vonal jelöli).



1.Ábra: Töltött csövek tömegei töltési mód szerint

Az 1. ábra a 150 mm hosszú, 0,5 mm falvastagságú és 24 mm belső átmérőjű csövek töltés előtti és töltés utáni tömegeit mutatja be. A ragasztott csövek tömege a felhasznált ragasztóanyag függvényében változhat, az ábrázolt tömeget tekinthetjük ideálshoz közeli töltésnek.

## Következtetések

A vékonyfalú alumínium csövek alumínium habbal történő merevítésével változtattunk az elem inercianyomatékán, amelynek hatása sejtéseink szerint 2,5-3-szoros növekedés is elérhető a maximális terhelő erő nagyságában hajlító igénybevétel esetén. Ez azt jelenti, hogy az autók ajtajában lévő ajtóvédő gerenda alumínium habbal történő feltöltése után 2,5-3-szoros védelmet tud nyújtani az utasok számára oldal irányú ütközés esetén.

Továbbá a belső feszültségek és az alumínium hab eleve nagy energia elnyelő képességének hatására a töltött csövek nyomó igénybevétel esetén sokkal kisebb mértékű deformációt szenvednek el, mint az eredeti, belső merevítés nélküli csövek. Megfordítva a dolgot, sokkal nagyobb erőt kell kifejteni rájuk ahhoz, hogy ugyan akkora deformációt érzünk el, mint az üres csövek esetében. Amennyiben a deformáció mértéke megegyező, de ehhez a töltött csövek esetében sokkal nagyobb terhelő erő volt szükséges, következtethetünk, hogy a töltött csövek sokkal nagyobb mennyiségű energiát nyeltek el. A gyűrődési zónákban elhelyezett törésdobozok felépítésükben is vékonyfalú zárt szelvények vagy csövek, amelyek elsődleges feladata a kis sebességű ütközések során az egyik gépjármű által a másiknak átadott energia minél nagyobb részének elnyelése, ez által a karosszériában keletkező károk minimalizálása. Az energiát deformáció révén nyelik el, ezért következtethetünk arra, hogy a töltött csövek nagyobb mennyiségű energiát képesek elnyelni ugyan akkora deformációval egy ütközés során. Ezek lehetővé teheti a kisebb méretű, töltött darabokból álló törésdobozok használatát, ez által tömeget spórolhatunk meg.

Az előbb említett tulajdonságot aknázhathatjuk ki az energiaelnyelő lökhárító tartók kialakításakor is. Míg a törésdobozok esetén a karosszéria védelme volt kis sebességű ütközések esetén, a lökhárító tartók fontosabb elemei a gyűrődési, deformációs zónáknak, mert rajtuk ezek közvetítik át az energiát a lökhárítóról a karosszéria többi részére. A karosszéria ezen részén is számításba lehet venni a habosított alumíniummal merevített szelvényeket.

A vizsgált betöltési módok eredményesek voltak, további céljaink a technológiák optimalizálása, új módszerek tesztelése, a felhasználási terület bővítése.

## Hivatkozások

- [1] "Lightweighting Is Top Priority for Automotive Industry.", Austin Weber [Online]. Available: <https://www.assemblymag.com/articles/94341-lightweighting-is-top-priority-for-automotive-industry> [Megtekintés: 2018.08.14.]
- [2] Kiran Kumar Dama, V Suresh Babua, R N Raoa, IsmailJani Shaik: State of the Art on Basic Methodologies for Crashworthy Design of Automotive Body Components Considering Bending Collapse Mode, Materials Today: Proceedings 4 (2017) 9930–9936
- [3] „Ultra-lightweight Aluminum Foam Materials for Automotive Applications.”, T. Dennis Claar, Chin-Jye Vu, Ian Hall, John Banhart , Joachim Baumeister, Wolfgang Seeliger [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/216046031\\_UltraLightweight\\_Aluminum\\_Foam\\_Materials\\_for\\_Automotive\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/216046031_UltraLightweight_Aluminum_Foam_Materials_for_Automotive_Applications). [Megtekintés: 2018.08.4.]
- [4] "Automobile", Orville C. Cromer, Christopher G. Foster, Ken W. Purdy, George C. Cromer [Online] Available: <https://www.britannica.com/technology/automobile> [Megtekintés: 2018.08.01.]
- [5] „How Crumple Zones Work”, Ed Grabianowski [Online] Available: <https://auto.howstuffworks.com/car-driving-safety/safety-regulatory-devices/crumple-zone.htm>. [Megtekintés: 2018.08.04.]
- [6] Antonio Fuganti, Lorenzo Lorenzi, Arve Gr~nsund Hanssen, Magnus Langseth: Aluminium foam for automotive applications, Advanced Engineering Materials 2(4):200 - 204· April 2000
- [7] Amit Chege , Kshitij , Abhishek Kale , Mohammad Rafiq B. Agrewale , Dr. K.C.Vora: Design and development of impact energy absorbing bumper, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 8, Issue 3, March-2017 (326-330)
- [8] Isabel Duarte, Matej Vesenjak, Lovre Krstulovic, Opara, Ivan Anz, Jose M.F. Ferreira: Manufacturing and bending behaviour of in situ foam-filled aluminium alloy tubes, Materials and Design 66 (2015) 532–544

[https://easychair.org/conferences/review\\_add\\_sub\\_yes.cgi](https://easychair.org/conferences/review_add_sub_yes.cgi)

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával valósult meg.

# MARADÓ FESZÜLTSEGEK CSÖKKENTÉSE ULTRAHANGON ALAPULÓKEZELÉSSSEL

## REDUCTION OF RESIDUAL STRESS WITH ULTRASONIC BASED TREATMENT

Gyóni Viktor Zoltán<sup>1</sup>\*, Weltsch Zoltán<sup>1</sup>

<sup>1</sup>AnyagtechnológiaTanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Ultrahang  
Feszültség  
Csökkentés  
Acél  
Anyag

### Keywords:

Ultrasonic  
Stress  
Reducing  
Steel  
Material

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 20  
Átdolgozva 2018. október 27  
Elfogadva 2019. március 5

---

### Összefoglalás

*Egy termék, munkadarab előállítása tulajdonságai alapján pl.: geometriai méret stb. sok folyamatból állhat. Az eljárások során nem csak a munkadarab geometriai méreteit változtatjuk meg, hanem a darab belsejében a feszültségeket minden egyes alakadás és megmunkálás során. Az így keletkezett feszültségeket csökkenteni vagy éppen kiegyenlíteni kell annak érdekében, hogy ne okozzanak problémát a későbbiek során. Ilyen eljárások során számolni kell a kezelés idejével, alkalmazhatóságával és energia igényével. A jelen szakirodalmi áttekintésben bemutatott kísérleti eredmények azt bizonyítják, hogy egy gyors és sokoldalú kezelési eljárás létrehozására alkalmas technológia az ultrahangos feszültségcsökkentés, ami a későbbiekben leválthatja a termikus eljárásokat is.*

### Abstract

*The production of a product can consist of many steps and processes depending on what expectations are requested. During the processes, not only the geometrical dimensions of the workpiece are altered, but the stress state inside of the piece inside of the piece also can be changed after each finishing and machining processes. The resulting stress states should be reduced or balanced to not avoid any problems later. Such procedures should consider the time, applicability and energy need of the treatment. The experiments we reviewed in the literature so far have proved that ultrasonic residual stress reduction could be a novel technology to create a fast and versatile treatment process, which can eventually replace thermal procedures.*

---

## 1. Bevezetés

Az iparban mindig arra törekszenek, hogy a terveknek elvárásoknak megfelelően elő tudják állítani a megfelelő terméket. A megmunkálások során, azok következtében, vagy éppen az előzetes képlékeny alakítások során maradó feszültségek alakulnak ki, amik nem csak a darab

---

\* Kapcsolattartó szerző: 0630/938-9337  
E-mail cím: viktorgy12@gmail.com

élettartamát csökkenthetik a felhasználás során ért hatásoktól függően, hanem magát a gyártás menetét, hatékonyságát is nehezíthetik az általuk okozott deformációk miatt.

A feszültség csökkentéseknek fontos szerepe van, csak úgy, mint a gyártás többi részénél, itt is törekedni kell a költséghatékonyságra, mégis a legfontosabb szempont a hatékonyság és az adott feszültség csökkentő eljárásra szánt idő, ami a mai gyártási tendenciákat figyelembe véve minél rövidebb, annál kedvezőbb mind a cég és a felhasználó szempontjából is.

A legsűrűbben alkalmazott eljárások mai napig a termikus eljárások, mivel az ilyen eljárások terén van a legtöbb ismeret, amit alkalmazni tudunk. A feszültség csökkentés terén a hatékonysága a mai napig kielégíti az ipar bizonyos szegmenseit, mivel anyagtól függetlenül használható és optimalizálható. Egyetlen nagy hátránya viszont a berendezés. Mivel a megfelelő hőmérsékletek elérése nagy energia igényű és a gép fizikai méreteiből adódóan korlátozott méretű geometriákat lehet vele kezelni.

A legtöbb esetben mikor a maradó feszültségeket csökkentjük szem előtt kell tartani, hogy a darab tulajdonságait, ha nem szükséges ne változtassuk meg. Ez akkor lényeges, hogyha az adott szerkezet tulajdonságai megfelelnek az elvártaknak és csak a maradó feszültséget szeretnénk csökkenteni.

Ilyen esetekben ajánlott olyan eljárásokat alkalmazni, amelyek nem igényelnek hőbevitelt, eljárástól függően nagyobb vagy kisebbet. Azok az eljárások, amik nem ezen az elven működnek kis számban vannak jelen és még kisebb számban alkalmazzák a gyártásban. Talán a legelterjedtebb a mechanikai rezgések útján történő eljárás, aminek alapelve a megfelelő amplitúdó és frekvencia alkalmazásával történő feszültség csökkentés, itt a hátránya, hogy a darab geometriája befolyásolja az eljáráshoz alkalmazott berendezések méreteit és paramétereit.

Így jöhetnek szóba az ultrahangos rezgéseket alkalmazó eljárások, aminél egy magasabb állandó frekvencia értéken vagyunk képesek az eljárást elvégezni, figyelembe véve a kezelés idejét és amplitúdóját.

Több kutatás, irodalom is kimutatta, hogy az ultrahanggal történő vibrációs feszültségcsökkentő technológia jól alkalmazható a fémek belső feszültségének úgy evezett kioltásában. Wen He rámutatott, hogy a munkadarabra kifejtett nagy frekvenciás vibráció csökkenteni tudja a maradó feszültséget - a hagyományos, vibrációs feszültségcsökkentéshez hasonlóan -, ugyanakkor maga a mechanizmus teljesen eltérő és egy kisebb feszültségkeltő eszköz is lehetővé teszi akár mikro-mechanikai egység belső feszültségeinek csökkentését. [4]

A cikk során ultrahangos kezelésekkal foglalkozó irodalmak eredményeit és a paraméterek, változtatásainak hatékonyságát foglaltam össze.

## **2. SU-8 fényérzékeny réteg, ultrahanggal történő rezgetés elvén megvalósuló feszültségcsökkentése**

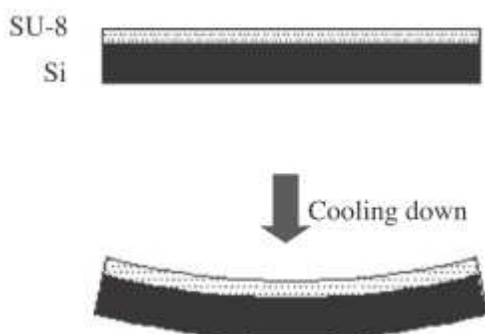
Az SU-8 egy epoxi alapú, UV fény közelében negatív tónusú fényvédő polimer. Kiváló fizikai, mechanikai tulajdonságokkal és korrózióálló képességgel rendelkezik, ezáltal ideális fotopolimeranyaga nagy kiterjedési tényezőjű szerkezetek gyártásához, a mikro-elektromechanikai rendszerekben (MEMS). Azonban az SU-8-at csak korlátozott mértékben használják a MEMS rendszerek gyártásakor, mivel az anyagban lévő belső feszültség jól ismert módon hatással van a szerkezet általános mintázatának minőségére. A belső feszültség az SU-8 réteg repedéseit okozhatja és azt, hogy ez által nem megfelelő mértékben tapad az alapréteghez. Ezek a jelenségek annál jobban felerősödnek, minél vékonyabb a filmréteg.

A probléma megoldása céljából természetesen más kutatók is végeztek már kutatásokat. Ugyanakkor ezek a munkák mind a folyamat paramétereinek vagy a maszk kidolgozás optimalizálására törekedtek és nagyban függtek a kísérleti körülményektől.

### **2.1. Feszültség keletkezése és hatása a fényérzékeny rétegben**

Tény, hogy a gyártás során (post-exposure-bake – PEB) az SU-8 rétegben belső feszültségek alakulnak ki. A PEB folyamata során, a molekulák között keresztkötések képződnek, és az SU-8 réteg odatapad az alapréteghez. A SU-8 (50 ppm/K) fotopolimer termikus expanziós együtthatója (CTE) nagyon magas, az általában alapréteggként (szubsztrátumként) használt anyagokéhoz képest, mint például a szilícium esetében 2,3 ppm/K. A folyamat során

térfogatcsökkenés megy végbe, amely az SU-8 rétegben húzófeszültség kialakulásához vezet, az SU-8 réteg és a szubsztrátum CTE-jének eltérése miatt. A bevonat meghajlik a filmrétegben található belső feszültség hatására. (1. ábra) [1]



1. ábra: Az SU8 fényvédő réteg és az alapréteg meghajlása a belső feszültségek hatására [1]

A térfogatcsökkenést az SU-8 molekuláinak keresztkötései gerjesztik. Kutatók kimutatták, hogy az SU-8 filmréteg belső feszültségei a PEB hűtési folyamata során keletkeznek, és amikor azok felszabadulnak, akkor a rétegen látható repedések, torzulások, jönnek létre. Ezért az ultrahangos feszültségcsökkentést a PEB után végezték. [3]

## 2.2. Alkalmazott eszköz

Az alkalmazott eszköz frekvenciája 20 kHz, a vibráció amplitúdója a munkaasztalon folyamatosan állítható. Az ultrahang generátor alakítja át az állandó jelet (50 Hz) egy ultrahang frekvenciájú, elektromos oszcillációs jellé (20 kHz) majd az ultrahang jelátalakító a jelet mechanikai (20 kHz) rezgésekké. A vibrációt átviszik a munkatáblára, miután a fogantyú segítségével fokozzák annak amplitúdóját, és ekkor a munkaasztalon rögzített minta együtt rezeg a munkaasztallal. Ha a minta a munkaasztalon nincs rögzítve, akkor horizontális irányba fog kilengeni a kísérlet során. Ezért egy szorító berendezés elkészítése elkerülhetetlen. A kísérlet során egy Si lapkát használtak szubsztrátumként. Mivel a Si lapka vékony és törékeny, a szorító nem csak a minta rögzítéséhez kell, hogy alkalmas legyen, de nem is tehet kárt az SU-8 filmréteg felületi szerkezetében. [1]

## 2.3. Vizsgált darab előkészítése

A fizikai kísérlet során 1,5 inch átmérőjű Si alapréteget és az SU-8 2075 fényvédőt (MicroChem Corporation, USA) használtak. A kísérlet előtt az Si réteg vastagságát indukciós mikrométerrel mérték, az Si réteg felületi érdesség profilját pedig profilométer segítségével határozták meg (Surfcorder ET4000M, Kosaka Laboratory Ltd. Japan). [1]

A kísérlet menete során először lemosták a Si lapot acetonnal, etanollal, desztillált vízzel, majd szárították, és ezt követően forgatták az SU-8 fényvédőt maximum 1500 ford/perc sebességgel, majd áthelyezték a mintát 20 percre egy síkfelületre. Ezt követte az előmelegítés 75 percen keresztül 85°C -on egy vízszintes melegítőlapon, majd lehűtötték szobahőmérsékletre. Az utómelegítés 5 percig tartott 85°C-on. [1]

## 2.4. Kezelések hatásai paraméterek függvényében

A kezelések során három különböző paramétert vizsgáltak meg, amelyek befolyásolták annak eredményességét: a kezelés ideje, teljesítmény bevitel, vibráció amplitúdója.

A mérések során egy átalakított, mondhatjuk tovább fejlesztett Stoney formulát alkalmaztak, ami figyelembe vette a réteg vastagságát, az anyagi tulajdonságokat és a görbület sugarát.

$$\sigma_{st} = \left(\frac{1}{1+\delta}\right) \frac{E_s t_s^2}{6(1-\nu_s) t_f} \times \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right) \quad (1)$$

$\delta$ = kétréteg vastagsága közötti arányszám

$E_s$ = szubsztrátum Young-modulusa

$t_s$ = teljes vastagság



$t_f$ = filmréteg vastagsága

$\nu_s$ = szubsztrátum Poisson tényezője

$R$ = görbület rádiusza

$R_0$ = kiinduló görbületi sugár

Ez alapján határozták meg a feszültség értékeket, amik a rétegben keletkeztek. A csökkenés mértékét egy  $k$  tényezővel mérték, ami a kezdeti és a kezelés utáni feszültség értékek különbsége és a kezelés előtti feszültség hányadosaként adta meg a hatékonyságát a paraméterek alapján.

Kezelés ideje alapján való mérések azt mutatták, hogy kezelés idejének variálása az egyik olyan paraméter, ami kapcsolódik a kezelés hatékonyságához, de ennek az egy paraméternek a változtatása nem feltétlenül okozza a legjobb hatást, amit elvárnánk. A kezelés során 64W teljesítmény bevitellel dolgoztak és 5, 10, 15, és 20 percig alkalmazták rögzített pozícióban. A mérések alapján elmondható, hogy a legnagyobb hatékonyságot 10 percnél érték el utána annak mértéke a későbbi időkben fokozatosan csökkent a tíz percig való növekedése is mindössze 4-5% között esett.

A bevitt teljesítmény változtatása a második paraméter, ami alapján vizsgálták az effektivitást, a 64, 102, 144 W-on. Mivel a 10 perces kezelés hatásfoka volt a legjobb a kezelési idő ennek megfelelően volt megválasztva. A mérések alapján a bemeneti teljesítmény növelésével az effektivitás is drasztikusan megnőtt. A teljesítmény növelésével 8-9%-os növekedés tapasztalható volt.

A harmadik vizsgált paraméter a vibráció amplitúdója, amit a darab helyzetének változtatásával változtattak meg. A darab geometriai középpontja a rezgés középponttól távolabb lett elhelyezve, és ennek hatására változott az amplitúdója a kezelésnek. A rezgés középpontban 15  $\mu$ m a szélén 19  $\mu$ m. Itt is 10 percig és 64 W-on kezelték a darabokat. A távolság növelésével itt is növekedést értek el, ami viszont nem nagyobb a kezelési idő változtatásánál, ami 4-5% volt a feszültség csökkentés terén. Ennek ellenére itt folyamatos növekedés volt tapasztalható.

### 3. 316-os megjelölésű anyag feszültségcsökkentésének sikeressége

M Shalvandi, Y Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi kutatásaik során, az ultrahangos feszültségcsökkentés eredményét a konvencionális, termikus eljárás eredményeivel hasonlították össze a 316-os rozsdamentes anyagon. Leírások szerint a hagyományos vibrációs feszültségcsökkentés folyamata alacsony frekvenciájú, magas amplitúdójú, dinamikus feszültségekkel történő gerjesztés révén kivitelezhető. Ez az eljárás viszont csak a nagyobb méretű tárgyakra korlátozódik, hiszen a nagy amplitúdójú vibráció deformálja a kisebb, vékonyabb szerkezeteket. A kutatók egy új, az ultrahangos vibráción alapuló feszültségcsökkentő eljárást mutatnak be, amely alkalmazható kisebb, vékonyabb alkatrészekben is. Az ultrahangos vibráció amplitúdóját, a feszültségcsökkentés idejét, illetve az előterhelési paramétereket értékelték ki a vizsgálatok során. [2]

A folyamat hatékonyságát a maradó feszültség művelet előtti és utáni értékeinek összehasonlításával becsülték meg. A folyamat hatékonyságát szintén összevetették a termikus feszültségcsökkentés módszerével. Ez a módszer alkalmazható majdnem minden vékony lemez, vagy kisebb falvastagságú alkatrész termikus és mechanikus maradó feszültségének csökkentése esetében, mint például a repülőgép szárnyának hegesztett lemezei.

Itt a kutatást végzők nem csak a feszültség csökkentést vizsgálták a darabon, hanem az acél akusztikai lágyulását is.

#### 3.1. Alkalmazott eszköz

A berendezés egy nagy frekvenciájú energiaellátóból, amely nagyteljesítményű elektromos impulzusokra képes, egy ultrahangos jelátalakítóból, amely piezoelektromos szerkezet, egy összekötőelemből, egy repülőgépekhez használt alumínium ötvözetből készült tölcser jellegű alkatrészből, egy különleges érmesajtolóból áll, amely a vibráció útján erő fejti ki a munkadarabra. A piezoelektromos szerkezet állandó hullámot bocsát az összekapcsoló részre.

Nagy teljesítményű MPI generátort használtak a vibráció keltésére. A jelátalakító rezonancia frekvenciája körülbelül 24500 Hz volt. A jelátalakítóéval megegyező rezonancia frekvenciával

rendelkező tölcseért erre a célra alakították ki, melynek anyaga Al7075-T6 volt. Az ultrahangos vibrációt a tölcsezen keresztül juttatták el a munkadarabhoz. [2]

### 3.2. Vizsgált darab előkészítése

Három különböző típusú, ugyanolyan hosszúságú és szélességű, de eltérő vastagságú Almen mintát választottak ki. Ezeket N, A és C típusoknak nevezték, melyek 0,772; 1,283 és 2,372 mm a vastagságuk voltak. A mintadarabok alakítását (kalapálását) a Reymehr cég gépével végezték, a szabvány leírásainak megfelelően. A légnyomás 8 MPa volt, a darabnak a fúvókától lévő távolságát 100 mm-re, a csapás szögét 83°-ra állították, a fúvóka átmérője 5 mm a gömbfejes ütés átmérője pedig 0,45 mm volt. A munkadarabok gömbfejes kalapálása, a fejen elért ívmagasság mérése után, elvégezték az ultrahangos feszültségcsökkentő műveletet a mintadarabokon.[2]

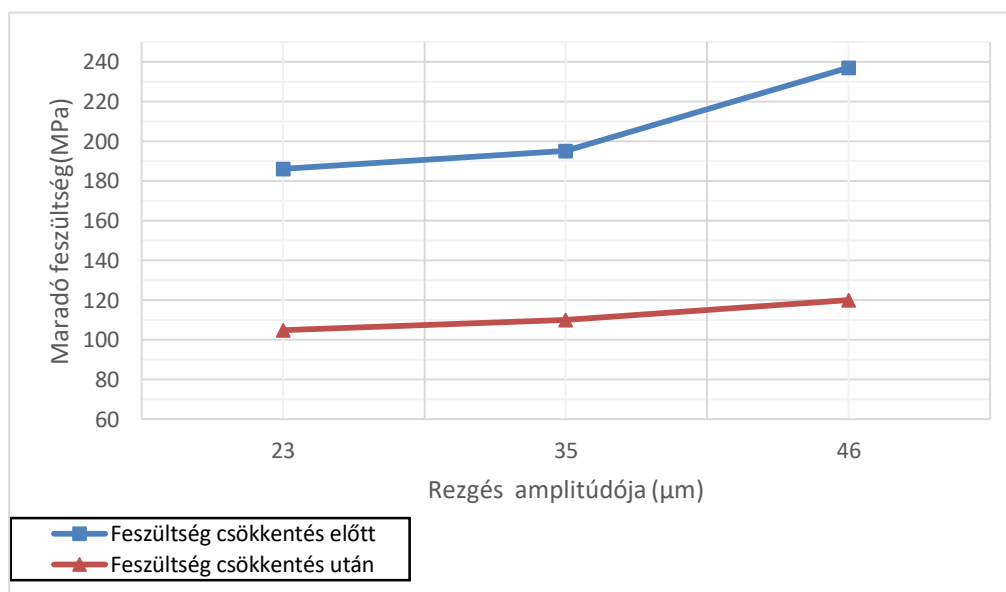
### 3.3. Kezelés és eredményei

A feszültségcsökkentés ideje rendre 2, 5 és 8 perc, a vibrációs amplitúdó 23, 34,5 és 46  $\mu\text{m}$  volt. A szerzők a feszültség csökkentés hatásait a termikus kezelések hatásaival hasonlítottak össze a vizsgált paraméterek beállítása mellett.

Elsőnek a termikus eljárást vették figyelembe, amely során a mérésekből az jött ki, hogy a feszültség csökkentés hatása nagyjából 40%.

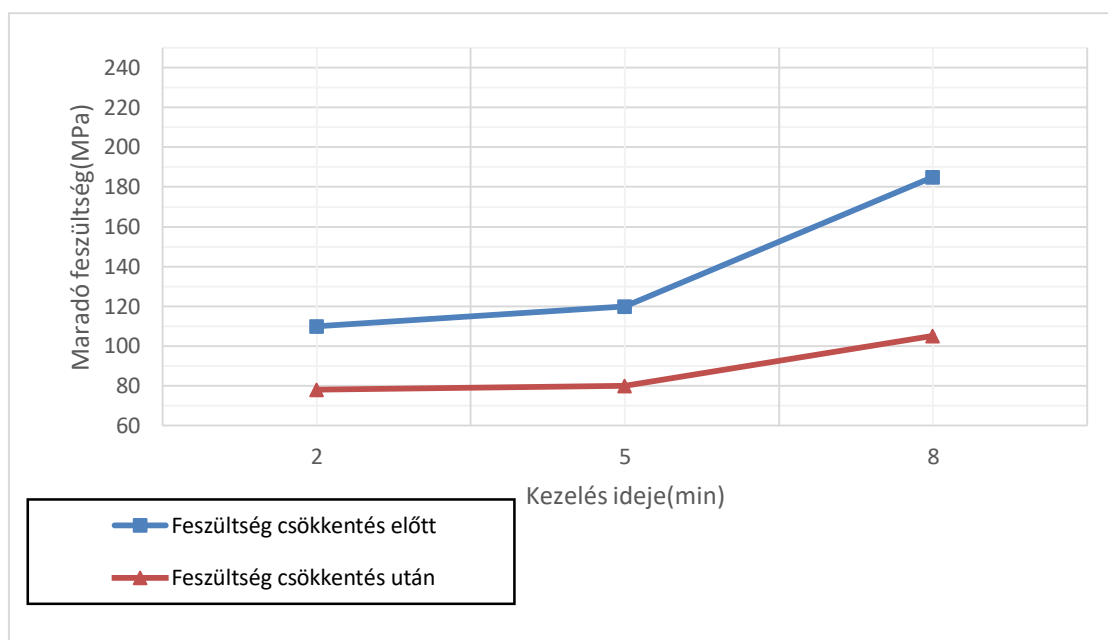
Ezután az ultrahangos kezelés eredményeit vizsgálták a kezelés idejének és amplitúdójának függvényében.

A vibrációs amplitúdó hatását vizsgálva elmondható, hogy annak értékét 23  $\mu\text{m}$ -ról 46  $\mu\text{m}$ -ra növelve, a maradó feszültség jelentősebb mértékben (237 MPa-ról 120 MPa-ra) csökkent. (2. ábra) [2]



2. ábra: A vibráció amplitúdójának hatása a maradó feszültségre [2]

Látható, hogy a feszültségcsökkentésre szánt idő is növeli a feszültség csökkentés várható eredményét. Jelen tanulmány szerzői is arról számolnak be, hogy a feszültségcsökkentési idő 2-ről 8 percre történő növelésével a feszültség értéke 185 MPa-ról 105 MPa-ra csökkent. (3. ábra) Egyes irodalmak szerint ez a tendencia, hosszabb idők esetében, például már 20 perc után megfordulhat és csökkenés várható a feszültségcsökkenés mértékében, intenzitásában.



3. ábra: A vibrációs idő hatása a belső feszültségek csökkenésére [2]

A kísérletek során kijött, hogy az ultrahangos eljárással kapott feszültségcsökkenés értékei 38%-ra tehetők, ami kissé elmarad ugyan a termikus kezelés eredményeitől, de az nem számottevő és nagy berendezéseknél is kisebb energiafelhasználással alkalmazható.

#### 4. Következtetés

Az Su-8 és a acélon elvégzett kísérletek során különböző paramétereket vizsgáltak, amelyek befolyásolhatják a kezelés eredményességét. Ezek a paraméterek a kezelés ideje, teljesítmény bevitel és a vibráció amplitúdója volt. Ezel a vibrációs elven történő eljárások fontos tényezői a frekvencia mellett. Ultrahang által generált vibrációt alkalmaztak így annak tartományában egy állandó frekvencián kezelték a darabot. Az acél és a fényvédő réteg kezelése során 20 és 30 kHz közötti értékekkel dolgoztak és ezek a hatásokot kismértékben befolyásolták. Ebből következtethetünk arra, hogy a másik három paraméter jelentősége nagyobb mértékű.

Elsőnek is a kezelés ideje, mindkét kísérlet során hatással volt a kezelésre. A kezelési idő a mérések alapján egészen tíz percregig effektív az e feletti idő tartományt nem vizsgálták. A 316-os rozsdamentes anyagon nem mentek el tíz percregig a kezelés során, a nyolc perces kezelési idő mellett jó eredményeket mutattak fel így is. A fényvédő réteg vizsgálatából viszont következtethetünk arra, hogy a tíz perces kezelési időn belül is a feszültség csökkentő hatás növekszik.

A második vizsgált paraméter, amely közös volt a két kísérlet során, a kezelés amplitúdója. Itt egyértelműen kijött, hogy a kezelés amplitúdója minél nagyobb, annál nagyobb hatásokkal dolgozik az eljárás. A kísérletek alapján az vonható le következtetésként, hogy az amplitúdó növelésének hatására nem következik be hatásfok csökkenés csak növekedés.

A harmadik paraméter a teljesítmény bevitel volt. Ennél csak az egyik cikk foglalkozott olyan formában, ami a feszültség csökkentéshez kapcsolódik (a másik cikk magasabb teljesítmény alkalmazásával csak az akusztikus lágyulásra tér ki). Ennél a paraméternél az időhöz és amplitúdóhoz viszonyítva nagymértékű növekedést tapasztalhatunk nem csupán 4-5% értékűt, hanem attól függően mekkora ugrás van a két teljesítmény érték között, akár 10%-ról is beszélhetünk.

Ezek ismeretében kijelenthetjük, hogy igenis van lehetőség és potenciál az ilyen típusú feszültség csökkentő eljárásokban. A megfelelő paraméterek megválasztása mellett anyagon és geometrián alkalmazható és költséghatékonyabb eljárások jöhetnek létre belőle.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és Európai Unió támogatásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Experimental study on ultrasonic stress relief for cured SU-8 photoresist layer Du Ligun, Wang Qijia
- [2] Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief M Shalvandi, Y Hojjat, A. Abdullah, H. Asadi
- [3] SU-8 Photolithography and Its Impact on Microfluidics Rodrigo Martinez-Duarte and Marc J. Madou (<https://pdfs.semanticscholar.org/ac6a/495d309f93a08746f7dc7957dd85b71fc7c1.pdf>)
- [4] Effects of ultrasonic impact treatment on weld microstructure, hardness, and residual stress Chuan Liu, Dongjun Chen, Michael R. Hill, Minh N. Tran & Jiasheng Zou

# NAGYSZILÁRDSÁGÚ JÁRMŰIPARI ACÉL NEDVESEDÉSI TULAJDONSÁGAINAK JAVÍTÁSA LÉZERSUGARAS FELÜLETKEZELÉSEL

## IMPROVE WETTABILITY OF HIGH STRENGTH AUTOMOTIVE STEELS BY LASER SURFACE TREATMENT

Tajti Ferenc<sup>1\*</sup>, Berczeli Miklós<sup>1</sup>, Weltsch Zoltán<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Anyagtechnológia Tanszék, Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetemen, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Nagyszilárdságú acél  
Lézersugaras felületkezelés  
Nedvesedés  
Határfelületi tulajdonságok  
Kötéstechnológia

### Keywords:

High strength steel  
Laser surface treatment  
Wetting  
Interfacial properties  
Bonding technologies

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 20.  
Átdolgozva 2018. október 27.  
Elfogadva 2019. március 6.

---

### Összefoglalás

A járműgyártó cégekkel szemben támasztott egyre szigorúbb környezetvédelmi és biztonsági előírások hatására, egyre nagyobb számban használnak fel nagyszilárdságú acéllemezeket a járművek gyártása során. Az így elért súlycsökkenés hatására, jelentősen csökken az üzemanyag fogyasztás és a káros anyag kibocsátás. További súlycsökkenés érhető el megfelelő kötéstechnológia alkalmazásával (forrasztás, ragasztás), melynek optimalizálásával növelhető a kötés szilárdsága. Irodalomkutatások alapján a határfelületi tulajdonságok javulásának nagymértékű hatása van az adhéziós és kohéziós kötéstechnológiákra. A határfelületi tulajdonságok javítására alkalmazhatunk lézersugaras felületkezelést, melynek hatására elért változásokat nedvesedés mérésel határozhatjuk meg. A kutatás célja olyan lézersugaras felületkezelés meghatározása, mellyel optimalizálhatók bizonyos kötéstechnológiák.

### Abstract

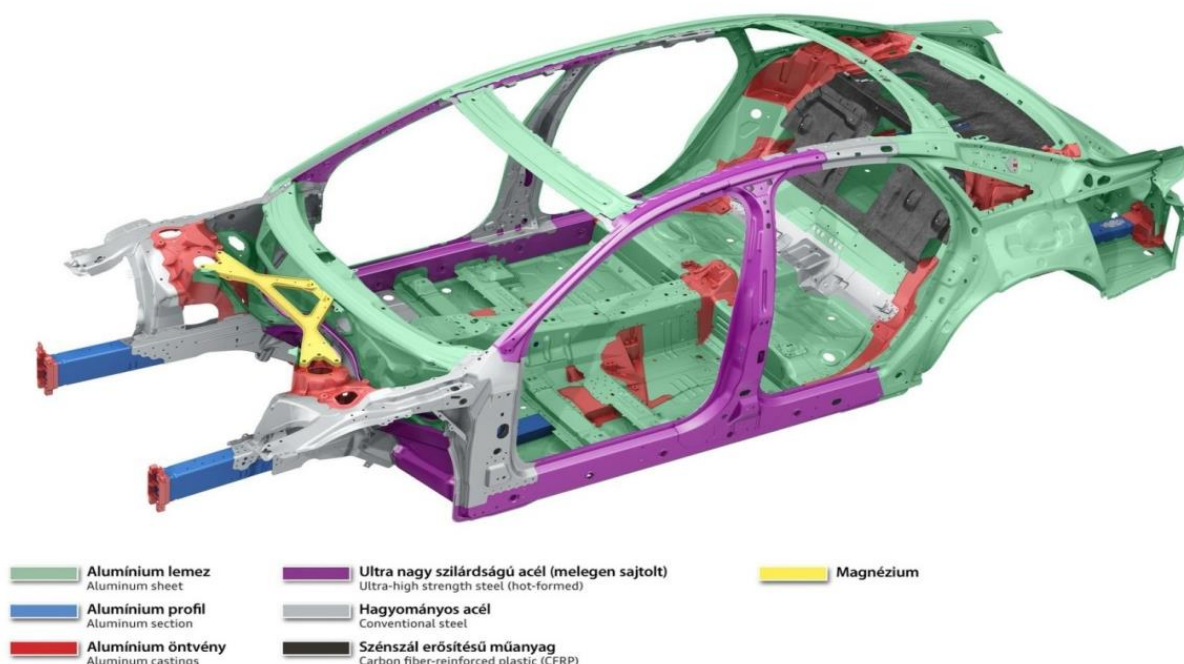
As a result of stricter environmental and safety standards, vehicle manufacturers have to high strength steels. As a result of this weight loss, they can significantly reduce fuel consumption and harmful emission. Further weight loss can be achieved by using appropriate bonding technology (soldering, sticking). According to literature research, the improvement of interface properties has a major effect on adhesion and cohesion bonding technologies. We can use laser beam surface treatment to improve interface properties. We can examine the effect of the treatment with sessile drop method. The purpose of the research is to define a laser beam surface treatment to optimize certain binding technologies.

---

\* Tajti Ferenc. Tel.: +36 70 525 9005  
E-mail cím: cbfferi@gmail.com

## 1. Bevezetés

A közúti járművek számának növekedésével különböző társadalmi és környezetvédelmi problémák alakulnak ki, ezért a járműgyártó cégeknek egyre szigorúbb környezetvédelmi és biztonsági előírásoknak kell megfelelniük. 2020-tól a járművek CO<sub>2</sub> kibocsátása nem haladhatja meg a 95 g/km-t. Napjainkban, az autógyártásban nagy szerepet kap a járművek tömegének csökkentése a káros anyag kibocsátás minimalizálása érdekében. A legújabb kutatások szerint 57 kg tömegcsökkenéssel 0,09-0,21 liter üzemanyag spórolható meg kilométerenként. Ahhoz, hogy a gyártók elérjék ezt a célt, olyan alapanyagokat kell felhasználniuk, amelyekkel elérhető a kívánt súlycsökkenés, a szilárdság megtartása mellett. Ezt korszerű anyagok felhasználásával és hibrid anyagok párosításával érik el, attól függően milyen funkciót kell betölteniük a karosszériában [1,2]. Az 1. ábrán látható, hogy egy modern autó karosszériája milyen anyagokból épül fel [3].



1.ábra: Egy modern autó karosszériája [3]

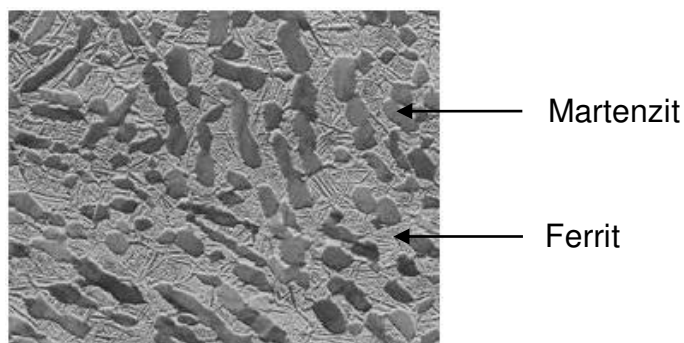
Látható, hogy a biztonság szempontjából fontos helyeken nagy szilárdságú acélokat, míg az energia elnyelő zónákban, alumínium ötvözeteket és hagyományos acélokat használnak.

A jövőbeli kutatásunk célja, emeltszilárdságú acéllemezek lágyforrasztott kötésének optimalizálása lézersugaras felületkezeléssel, így növelve a kötés szilárdságát.

## 2. Emeltszilárdságú DP acélok

A kettős fázisú acélok (Dual Phase steel) lágy, jól alakítható ferritbe ágyazott kemény martenzit szigetekből állnak, melynek mennyisége általában 10-60%, a kívánt mechanikai tulajdonságoktól függően. A 2. ábrán látható szürke részek a jó alakíthatóságot biztosító ferrit szemcséket, míg a beékelődött fekete részek a nagy szilárdságért felelős martenzit szemcséket jelölik. Kettős fázisú acélokkal jelentősen csökkenthető a járművek súlya, mivel a martenzit hatására nagy szilárdság érhető el, így vékonyabb lemezvastagsággal is biztosítható a kellő szilárdság. Olyan alkatrészeket gyártanak belőle, amelyek ütközés esetén nagy terhelésnek kell ellenállnia. Ilyen például az A és B oszlop, ajtó és tetőelemek [4].

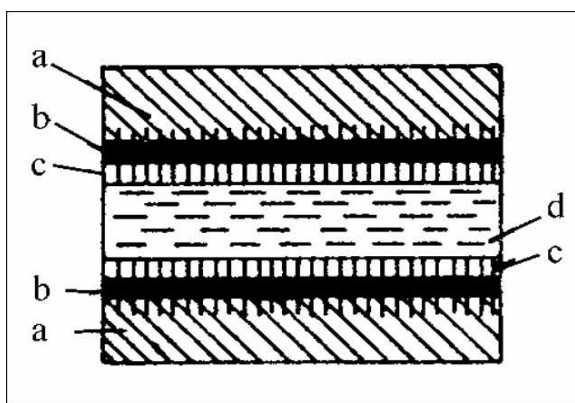




2. ábra: DP acél szövetszerkezete [4]

### 3. Forrasztás

Forrasztással a hegesztéshez hasonlóan oldhatatlan kötést lehet készíteni. A forrasztás mindig egy, az alapanyagnál kisebb olvadáspontú anyaggal történik. A megolvasztott forrasz bevonja az alapanyagot, felületi ötvözetet alkot vele, majd a határfelületeken diffúziós folyamat megy végbe, és ez lehűlés után adhéziós kötést hoz létre 3. ábra [5].



3. ábra: A forrasztott kötés zónái a) változatlan összetételű alapanyag; b) diffúziós réteg az alapanyagban; c) diffúziós réteg a forraszanyagban; d) a forrasz anyaga [7].

Lágyforrasztáshoz általában alacsony olvadáspontú ötvözeteket alkalmaznak. Az alkalmazott ötvözetek olvadáspontja viszonylag alacsony (legfeljebb 300°C), ami lehetővé teszi a kis teljesítményű elektromos fűtésű forrasztópákák használatát. A felületeket a forrasztás művelete előtt tisztítani és zsírtalanítani kell.

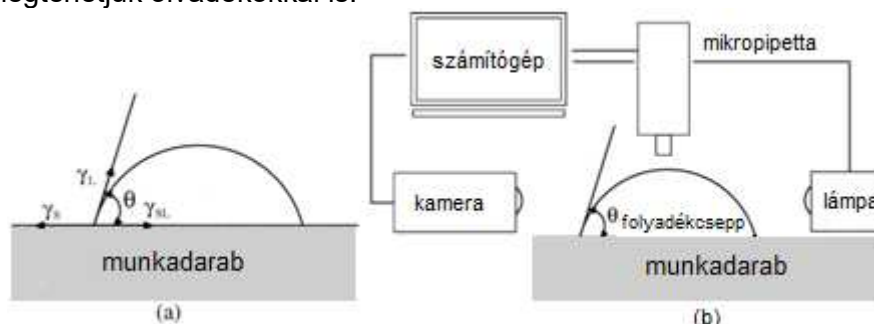
A keményforrasztáshoz általában a gázhegesztés eszközeit alkalmazzuk. Viszonylag nagy szilárdságú kötést csak magasabb olvadáspontú forraszanyag alkalmazásával tudunk készíteni. A forraszanyag többnyire réz vagy ezüst, melyek olvadáspontja 700 és 1000°C között van. A felületen, magas hőmérsékleten képződő oxidréteg eltávolításáról különböző folyósító- és tisztítószerrel (pl.: bórax) kell gondoskodni, mely olvadt állapotban az oxidréteget felmarja [6].

A megfelelő lágyforrasztott kötés létrehozásának feltétele, hogy a forraszanyag olvadáspontja kisebb legyen, mint az összeforrasztandó anyagoké. Ugyan az alapanyag nem olvad meg, de diffúzió megy végbe, ami hozzájárul az erős kötés kialakulásához, ezért a forrasz és az alapanyag között oldódás jön létre. A megolvadt forrasznak nedvesítenie kell az alapanyag felületét. A nedvesítést jellemző peremszögnek 90°-nál feltétlenül kisebbnek kell lennie. Minél kisebb a peremszög, annál jobb a nedvesítés, annál jobban terül, folyik a forrasz [8].

### 4. Nedvesítés és határfelületi energia

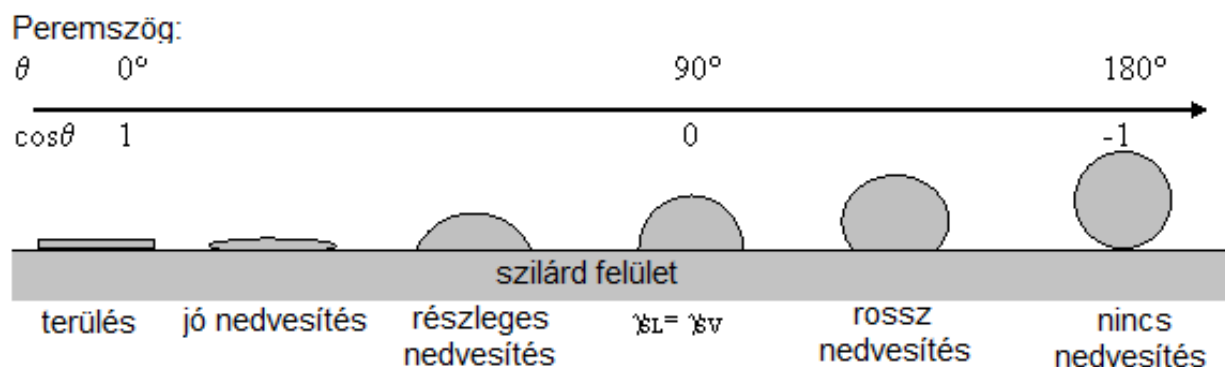
A nedvesítés alatt egy folyadék szilárd felületen való szétterülését értjük. A szétterülést a két fázis érintkezése mentén kialakuló peremszög ( $\Theta$ ) nagyságával tudjuk jellemezni. A nedvesedést a két fázis határfelületein végbemenő kölcsönhatások szabják meg [9]. A peremszög mérését a

nyugvó csepp módszerrel tudjuk elvégezni, melynek lényege, hogy egy csepp folyadékot cseppentünk a felületre, a cseppet a kamerával szemben megvilágítjuk, majd lefényképezzük 4. ábra. Ugyan ezt megtehetjük olvadékokkal is.



4. ábra: A peremszög mérés elvi vázlata [10].

A nyugvó csepp módszeren alapuló mérés viszonylag egyszerű eszköz a hidrofób vagy hidrofil jelenségek, a szilárd felületi energia, a folyadék felületi feszültség meghatározására. A kialakult csepp alakjából következtethetünk a nedvesítő képesség mértékére 5. ábra.



5. ábra: A folyadék peremszöge szilárd felületen,  $\theta < 90^\circ$  a jó nedvesedést jelöli,  $\theta > 90^\circ$  a rossz nedvesedést jelöli, ha  $\theta = 0^\circ$  tökéletes a nedvesítés, ha  $\theta = 180^\circ$  nincs nedvesítés [10]

A nedvesedés nagyban függ a határfelületi energiától, a felület érdességétől, a tisztaságtól. A határfelületi energiát a Fawkes módszer alapján tudjuk kiszámolni, ehhez két folyadékkal kell peremszöget mérni (desztillált víz és olyan folyadék, aminek csak poláris komponense van), majd a Fawkes egyenletbe behelyettesítjük a mért szögértékeket, így megkapjuk a szilárd anyag felületi energiáját.

$$\sigma_S^D = \frac{\sigma_L \cdot (\cos \theta + 1)^2}{4} \quad (1)$$

$$(\sigma_L^D)^{1/2} \cdot (\sigma_S^D)^{1/2} + (\sigma_L^P)^{1/2} \cdot (\sigma_S^P)^{1/2} = \frac{\sigma_L \cdot (\cos \theta + 1)}{2} \quad (2)$$

A határfelületi energia növelésével nagymértékben növelhető a nedvesedés. Erre több módszer is alkalmas. Irodalomkutatás alapján azt találtam, hogy fémeknél a lézers felületkezelésnek van nagy hatása a felületi energiára [11].

## 5. Lézers felületkezelések

Az elmúlt pár évben egyre nagyobb teret hódítanak a lézersugaras megmunkálási módszerek. A lézer szó az angol LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – fényerősítés kényszerített fénykibocsátás útján) betűszóból származik. Sok fajta lézer létezik

melyek a fizikai méretükben, a teljesítményükben, a lézersugár hullámhosszában, és az előállítási költségükben nagyban különböznek egymástól. A lézerek nagy előnye, hogy szinte minden anyag megmunkálási módszer megvalósítható velük. A lézeres anyagtechnológiák legfontosabb felhasználási területei a vágás, hegesztés és a felületkezelés, melyek nagy energiasűrűséget igényelnek.

Az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb szerepet tölt be a felületkezelés technológiája. Ennek lényege, hogy egy alkatrészben csak ott hozzuk létre az elvárt tulajdonságokat, ahol éppen szükséges, így jelentősen csökkenthető a megmunkálás költsége. A felületkezelés minőségét nagyban befolyásolják a technológiai paraméterek, melyek a lézerteljesítmény, a hullámhossz, a sugárnyaláb alakja, a sugárnyaláb átmérője, a besugárzott területen belüli intenzitás eloszlás jellege, pásztázási sebesség. Lézersugaras felületkezeléssel növelni tudjuk a felületi keménységet, így jelentős szerepe van a kopásállóság javításában. Segítségével lehetőségünk van változtatni a felületi oxid rétegen, és a felületen mikrostruktúrát tudunk létrehozni amik befolyásolják a nedvesedést [12].

L. Hao és társai CO<sub>2</sub> lézeres felületkezelést hajtottak végre korrózióálló acélon és azt találták, hogy az acél határfelületi rétegében az O<sub>2</sub> koncentrációja közel a duplájára nőtt, a felületi energia pedig 10%-al emelkedett [13].

Khadka Indira és társai Nd:YAG lézerrel végeztek felületkezelést magnézium ötvözetben, melynek hatását, desztillált vízzel vizsgálták. A kezelés hatására a felületre cseppentett desztillált víz peremszőge 81°-ról 41°-ra csökkent, ami jelentős nedvesedés javulásnak számít [14].

## 6. Összefoglalás

Napjainkban, az iparban egyre nagyobb mennyiségben használnak fel lézereket megmunkálás céljára, ennek hatására a lézeres felületkezelésen is egyre nagyobb a hangsúly. Lézersugaras felületkezeléssel gazdaságosan tudjuk módosítani a fémek felületi tulajdonságait, felületi energiáját. A felületi energiának nagy jelentősége van az adhéziós kötéstehnológiákban mivel növelni tudjuk az adhéziós kötőanyagok nedvesítő képességét, mellyel javítható a létrejövő kötések szilárdsága. A forrasztás is egyre nagyobb jelentőséggel bír a járműiparban, ezért ennek a fejlesztésében is nagy lehetőség van.

A jövőbeli kutatásunk célja emeltszilárdságú acéllemezeken CO<sub>2</sub> lézerrel felületkezelést végezni, majd a kezelés hatását cseppentéses módszerrel vizsgálva meghatározni egy optimális kezelési paramétert. Ezzel a paraméterrel kezelt lemezeken forrasztási vizsgálatot végrehajtani.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] X. Cui, S. Wang, S. Jack Hu: A method for optimal design of automotive body assembly using multi-material construction, *Materials and Design*, 2008, 381–387.
- [2] "CO<sub>2</sub> kibocsátás 2020-tól" [Online]. Available: [https://hvg.hu/cegauto/A\\_legdurvabb\\_fogyokura\\_100\\_kilokat\\_is\\_ledob\\_I82L2X](https://hvg.hu/cegauto/A_legdurvabb_fogyokura_100_kilokat_is_ledob_I82L2X). [Megtekintés: 19-Okt-2018].
- [3] Audi A8 car body 2017. [Online]. Available: [http://totalcar.hu/galeria/totalcar/technika/2017/07/18/sajtogaleria\\_audi\\_a8\\_tecnologia](http://totalcar.hu/galeria/totalcar/technika/2017/07/18/sajtogaleria_audi_a8_tecnologia). [Accessed: 19-Oct-2018]
- [4] "Dual Phase (DP) Steels". [Online]. Available: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phasedp-steels/>. [Megtekintés: 24-Okt-2018].
- [5] Dr. Szabó László: Forgácsolás, hegesztés. Miskolc: Miskolci Egyetem, 2000. (2.4. fejezet). Available: <http://www.uni-miskolc.hu/~wwwfemsz/forgacs.htm>. [Megtekintés: 25-Okt-2018].
- [6] "Forrasztás" [Online]. Available: <http://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/faipar/gepeszeti-ismeretek/forrasztas/kemeny-es-lagyforrasztas>. [Megtekintés: 25-Okt-2018].
- [7] Szántó Jenő: Javítástechnológia (Károsodás-elmélet). 2013. (10.3. fejezet). Available: [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013\\_javitastechnologia\\_karosodas\\_elmelet/10\\_3\\_a\\_felületi\\_feszultseg\\_hatasa.html](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0013_javitastechnologia_karosodas_elmelet/10_3_a_felületi_feszultseg_hatasa.html). [Megtekintés: 25-Okt-2018]

- [8] Bagyinszki Gyula, Borossay Béla: Anyagtechnológiák. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar, 2012. p.1051.
- [9] Balla Sándor, Bán Krisztián, Bárdos András, Lovas Antal, Szabó Attila, Weltsch Zoltán, Járműanyagok, Typotex Kiadó, 2012.
- [10] Derrick O. Njobuenwu, Eiso O. Oboho, Rhoda H. Gumus: Determination of Contact Angle from Contact Area of Liquid Droplet Spreading on Solid Substrate. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies. Issue 10, January-June 2007 p. 29-38
- [11] Haiyan Chen, Jianke Peng, Li Fu, Xincheng Wang, Yan Xie. Solder wetting behavior enhancement via laser-textured surface microcosmic topography. Applied Surface Science. Volume 368. 2016. Pages 208-215. January-June 2007 p. 29-38
- [12] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés. Kolozsvár: Erdélyi Múzeum-egyesület. 2007.
- [13] L. Hao, J. Lawrence, L. Li: The wettability modification of bio-grade stainless steel in contact with simulated physiological liquids by the means of laser irradiation. Applied Surface Science 247. 2005.
- [14] Khadka Indiraa, Castagne Sylviea, Wang Zhongkea, Zheng Hongyua: Investigation of Wettability Properties of Laser Surface Modified Rare Earth Mg Alloy. Procedia Engineering 141 ( 2016 ) 63 – 69.

# ALKÁLI-HUMÁT ÉS RÉZTARTALMÚ CELLULÓZALAPÚ LAPOK FELÜLETANALÍTIKAI VIZSGÁLATA

## SURFACE ANALYSIS OF CELLULOSE SHEETS CONTAINING ALKALINE HUMATE AND COPPER

Tóth Annamária<sup>1</sup>, Halász Katalin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faalapú Termékek és Technológiák Intézet, Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar, Soproni Egyetem

---

### Kulcsszavak:

Kálium-humát  
Cellulóz  
Réz-szulfát  
Pásztázó elektronmikroszkópia  
(SEM)

### Keywords:

Potassium humate  
Cellulose  
Copper sulfate  
Scanning electron microscopy  
(SEM)

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. október 24.  
Átdolgozva 2019. február 26.  
Elfogadva 2019. március 18.

---

### Összefoglalás

Kutatásunk során dudari szénből állítottunk elő káliumi-humátot. Kálium-humáttal, valamint réz(II)-szulfáttal módosított linter cellulóz rostokból készítettünk lapokat. Az előállított lapok felületének elemi összetételét, felületi morfológiáját, CIE Lab színekoordinátáinak változását, felületi pH-ját és felület nedvesíthetőségét vizsgáltuk. Az eredmények alapján a humát jól kötődik a rostok felületéhez, emellett nagymértékben segíti a réz immobilizációját is a rostokon.

### Abstract

In our study we produced potassiumhumate from brown coal of Dudar. Linter cellulose fibers were modified with the obtained potassium humate and copper(II) sulfate to prepare handsheets. Elemental composition, surface morphology, color (CIE Lab), surface pH and surface wetting properties were examined. Based on the results, humate is bound to the surface of the fibers, and it also greatly supports copper immobilization on the fibers.

---

## 1. Bevezetés

Az élő anyag körforgásában a humusz és a benne található huminsavak ugyanolyan fontos résztvevők, mint a növényi és állati szervezetekben a fehérjék, poliszacharidok és nukleinsavak. A huminsavak - idetartozik huminsav, fulvosav és himatomelánsav is - túlnyomórészt növényi eredetű, természetes anyagok [1, 2]. A huminanyagok fosszilis formái a geológiai korok ideje és a geológiai hatások alatt alakultak ki más kőzetrétegek által eltemetett egykori recens formákban és az őket alkotó vegyületek szintén a körülmények szabta mennyiségi arányokban lelhetők fel ásványi szekben [2, 3, 4].

Kinyerésük a legmodernebb technológiákkal, növényi üledékekből pl. a tőzegtől történik. Huminsavak vázát egymáshoz kapcsolódó heterociklikus és izociklikus aromás gyűrűk alkotják. A gyűrűk közvetlenül hidrogénkötéssel kapcsolódnak egymáshoz. A vázhoz kötődő oldalláncok savas (fenol-OH, alkoholos-OH, karbonil-COS és karboxil-COOH) vagy bázikus (imino és amino) jellegűek [2, 5, 6].

A talajhuminsavak és a szénhuminsavak közt genetikai összefüggés van, kémiai szerkezetük is nagyon közel áll egymáshoz. Az utóbbiak igen jelentősek a talajjavítás és a növénytermesztés szempontjából, a bioföldművelésben egyre fokozódik használatuk [2, 7]. A huminsavak talajbéli

---

\*Kapcsolattartó: Tóth Annamária Tel: +3699 518 990  
E-mail cím: toth.annamaria@phd.uni-sopron.hu

szerepükön kívül, biológiailag aktív anyagok az élettudományok minden területén, így például még az állat- és humángyógyászat területén is szerephez juthatnak [4, 8, 9, 10].

Alkáli-fém humátokat (Na, K) a huminsavak vízben oldódó sóit, magas huminsavtartalmú lignitből állítják elő, lúgos extrakcióval. Magas huminsav tartalmú lignit például a Dudarit. Extrakcióhoz használt lúgok: kálium-hidroxid vagy nátrium-hidroxid, az így előállított alkáli humátok: kálium-humát vagy nátrium-humát [11]. Ezek a humátok jól kötődnek fémekhez, a humátban található aromás karboxil- és hidroxil csoportok a fémekkel és egyéb kationokkal metastabil komplexeket képeznek [5]. Minél nagyobb a fém atomtömege, annál erősebb a komplexkötés. A humát emellett nagy fajlagos felületű, a micellaszerkezete az aktív szénhez viszonyítva hatásosabb abszorbenssé teszi, megköti az oxigént, az alkoholokat [12], a szén-dioxidot [13] ami potenciális aktív élelmiszer-csomagolóanyagga teheti.

A papírgyártás során a cellulóz rostokat alumínium-szulfáttal kezelik, ami növeli a papír szilárdságát, elpusztítja a káros mikroorganizmusokat a papírban [14]. Kísérletünk során alumínium-szulfát helyett réz-szulfát hozzáadásával készítettünk lapot. A réz-szulfát hasonlóan az alumínium-szulfáthoz, jól oldódik vízben, oldata savas pH-jú, azonban antibakteriális tulajdonsága jobb az alumínium-szulfáthoz képest. Papírkészítés során, annak vizes közegében a réz-szulfátból felszabaduló rézionok a cellulóz rostokhoz kötődnek, melyek a cellulóزالap felhasználása során antibakteriális tulajdonságot képesek kölcsönözni az anyagnak [5, 15].

A humát felhasználásával és réz-szulfát hozzáadásával, linter cellulóz alapú mintalapokat készítettünk. Kutatásunk során vizsgáltuk, hogy a réz(II)-szulfátot tartalmazó cellulóz rost szuszpenzióhoz dudari szénből előállított kálium-humát hozzáadása, képes-e növelni a rostból készült lapok réztartalmát. Az előállított papírlapoknak vizsgáltuk: az elemi összetételét és felületi morfológiáját, a színváltozását, a felületi pH-ját és a felület nedvesíthetőségét.

## 2. Alapanyagok és módszerek

### 2.1. Alapanyagok

Alkáli-humát az alábbi alapanyagok felhasználásával készült:

Dudari barnaszén (Agroterm Kft. Magyarország),

Kálium-hidroxid (Molar Chemicals Kft., Magyarország)

Mintalapok az alábbi alapanyag felhasználásával készültek:

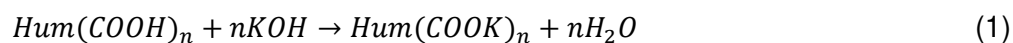
Réz(II)-szulfát-pentahidrát (Molar Chemicals Kft., Magyarország)

Cellulóz rost (primer linter cellulóz)

### 2.2. Módszerek

#### 2.2.1. Kálium-humát előállítása

A huminsav előállításának alapjait a HU 209 134 szabadalom képezte. 100 g Dudari szénhez 50 ml 5M KOH oldatot adtunk, melyet 3 órán keresztül mágneskeverővel kevertettünk. Szobahőmérsékleten egy éjszakát állni hagytuk. A humát kinyerése érdekében az anyagot másnap 2400 fordulat/perc sebességgel 10 percen át centrifugáltuk.



#### 2.2.2. Lapképzés



A cellulóz rostot a megfelelő fibrilláltság elérése érdekében hollandi malomban őrültük 40 percen keresztül. A rostok MSZ EN ISO 5267-1:1999 szabvány szerint mért őrlésfoka 48 SR° lett.

Az alkáli-humátot tartalmazó papírlapok elkészítése, HU 207 682 A szabadalom alapján történt, változtatásokkal. Cellulóz rostból készült szuszpenzióhoz (mágnes keverőn kevergetve) annyi  $\text{CuSO}_4$ -ot adagoltunk, amíg a szuszpenzió pH-ja 4,5 lett. Szobahőmérsékleten egy napig állni hagytuk majd hozzáadtuk a kálium-humát oldatot. 20 percig, 200 rpm sebességen kevertettük mágneses keverővel. A rostok szuszpenziójából különböző arányú kálium-humátot tartalmazó keverékeket állítottunk elő, majd Erst Haage, D-45476 típusú lapképzőn mintalapokat készítettünk belőlük. A mintalapok készítéséhez felhasznált rostsuszpenziók összetételét az 1. táblázat tartalmazza:

*1. Táblázat: Mintalapok előállításához használt rostsuszpenziók összetétele*

| <i>Mintalap</i> | <i>Összetétel</i>          | <i>Négyzetmértőmeg (<math>\text{g/m}^2</math>)</i> |
|-----------------|----------------------------|----------------------------------------------------|
| 1.              | 100 t% CR                  | 139,53                                             |
| 2.              | 50 t% Cu-CR+ 50 t % KH     | 166,37                                             |
| 3.              | 66,66 t% Cu-CR+33,33 t% KH | 158,46                                             |
| 4.              | 100 t% Cu-CR               | 139,02                                             |

CR: Cellulóz rost

Cu-CR: Réz-szulfátot tartalmazó cellulóz rost

KH: Kálium-humát

### **2.2.3. Fourier-transzformációs infravörös (FT-IR) spektroszkópia**

A színekép felvétele az analitikai infravörös ( $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ ) tartományon zajlott. A mintát FTIR spektrofotométer (JASCO FT/IT 4100) készülékkel vizsgáltuk. A mérés fényforrása standard volt, a minták szkennelési sebessége  $2\text{ mm/sec}$ , felbontása pedig  $4\text{ cm}^{-1}$  értéken került meghatározásra.

### **2.2.4. Felületmorfológia**

Felületmorfológia tanulmányozására a pásztázó elektronmikroszkóp (Hitachi S-4300N) szekunder elektron- (secondary electron, SE) detektoros módját használtuk. Mérés során az  $5\times 5\text{ mm}$  nagyságú mintadarabokat rögzítettük mintatartó lemezre. Ebben a módban a mintát nagy energiájú ( $20\text{ keV}$ ) elektronokkal bombázzuk és a felületről kilépő kis energiájú ( $<50\text{ eV}$ ) elektronokat detektáljuk. Az így létrejövő képnek topográfiai kontrasztja van, azaz a felület morfológiája meghatározható.

### **2.2.5. Minták elemi összetétele**

A felületi összetétel meghatározásához energiadiszperzív spektroszkópiát (EDS) használtunk. Ebben az esetben a nagy energiájú elektronok által kiváltott karakterisztikus röntgensugárzás spektrumát vizsgáljuk. A spektrumból a felület összetételének kvantitatív meghatározása válik lehetővé.

### **2.2.6. Színmérés**

A minták egymáshoz képesti színkülönbségének ( $\Delta E$ ) meghatározását a 2. egyenlet alapján, a CIE Lab szíenkoordináták (világosság:  $L^*$ , pirosság vagy zöldesség mértéke:  $a^*$ , sárgaság vagy kéesség:  $b^*$ ) mérésével végeztük, X-Rite 500 spektrodenzitométer segítségével.

$$\Delta E = \sqrt{(L_i^* - L^*)^2 + (a_i^* - a^*)^2 + (b_i^* - b^*)^2} \quad (2)$$

### 2.2.7. Felületi pH mérés

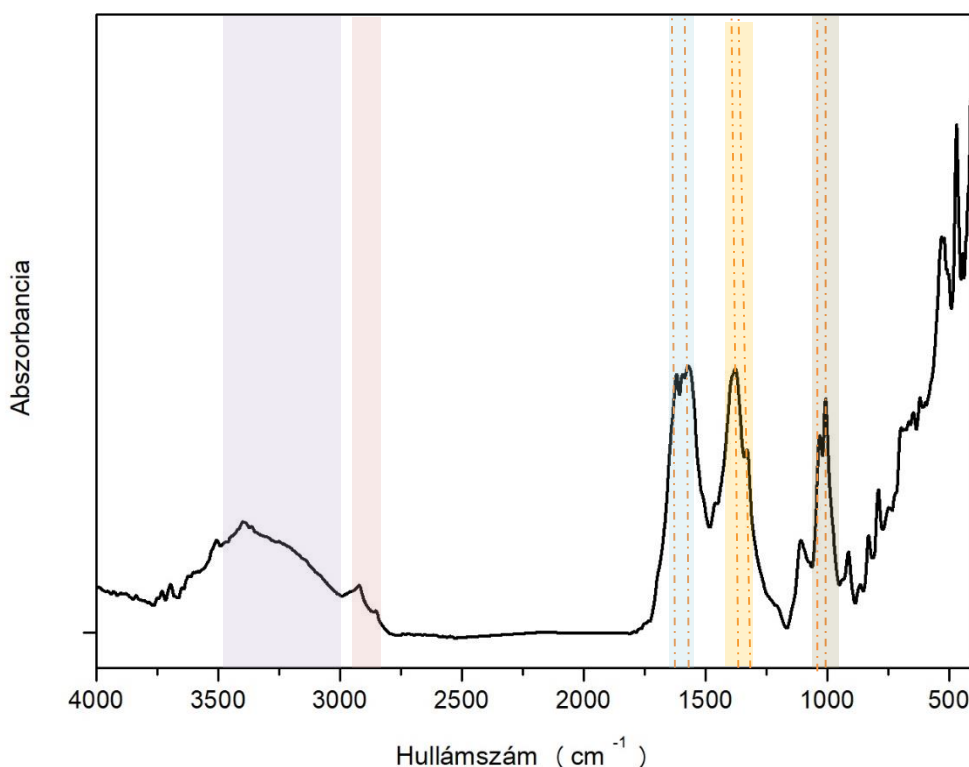
A mintalapok felületi pH-jának meghatározása lapos felületű pH elektródával (Jenway 3540 pH mérővel) történt, a lapok desztillált vízzel való benedvesítését követően.

### 2.2.8. Felületi nedvesíthetőség

A lapok felületének vízzel szemben való viselkedését peremszög méréssel határoztuk meg, melyhez PG-X goniométert eszközt alkalmaztunk. A felületre juttatott 4 µl-es desztillált vízcsepp területe határoztuk meg az eszköz által rögzített felvételek alapján.

## 3. Eredmények

### 3.1. Fourier-transzformációs infravörös (FT-IR) spektroszkópia

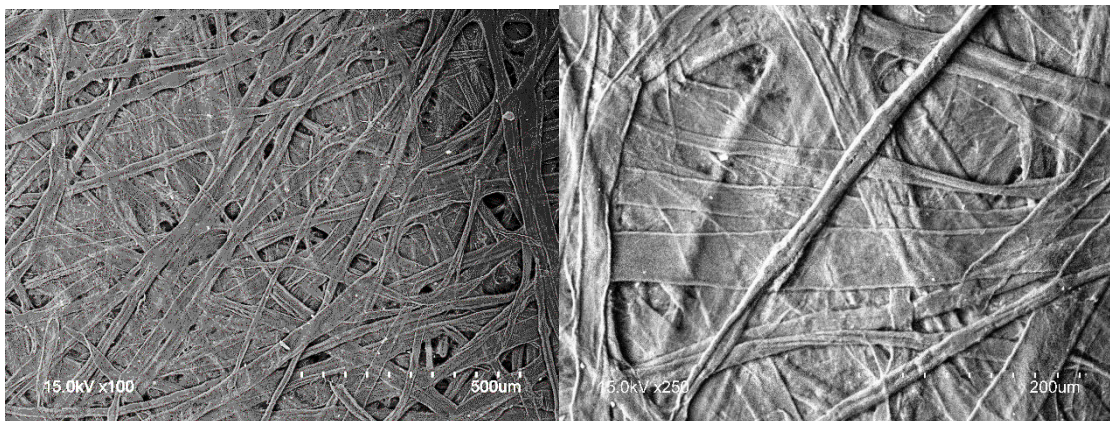


1. ábra Kálium-humát FT-IR spektruma

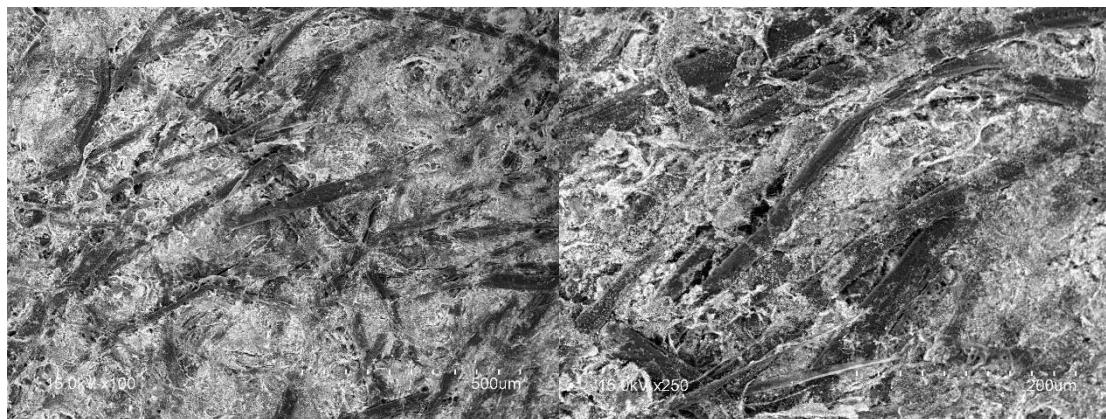
A kálium-humát FT-IR spektrumait az 1. ábra szemlélteti. A vizsgálat során hasonló helyeken észleltünk abszorpciós csúcsokat, mint Jonas és trs., Rodrigues és trs., Kar és trs., [16 -18]. 3500-3000 cm<sup>-1</sup> hullámszám tartomány az –OH csoport abszorpciós tartományára utal, amely megtalálható az alkoholos, fenolos funkciós csoportokban. 2922-2851 cm<sup>-1</sup> tartományban a C-H

vegyértékrezgése található [16].  $1710\text{ cm}^{-1}$  hullámszámnál lévő elnyelési sáv a keton és a karboxil csoportok  $\text{C}=\text{O}$  kötésére utal [19]. Az  $1605, 1640$ , és  $1640\text{--}1505\text{ cm}^{-1}$  hullámszámoknál jelentkező sávok az aromás  $\text{C}=\text{C}$  kötés rezgéseit jelzik.  $\text{C-H}$  kötésre utal az  $1420\text{--}1370\text{ cm}^{-1}$  hullámszám tartományban található rezgés.  $1220\text{--}1025\text{ cm}^{-1}$  között található sávok a huminsavak karakterisztikus abszorpciós tartománya, a  $\text{C-O}$  vegyértékrezgése [18] [19].

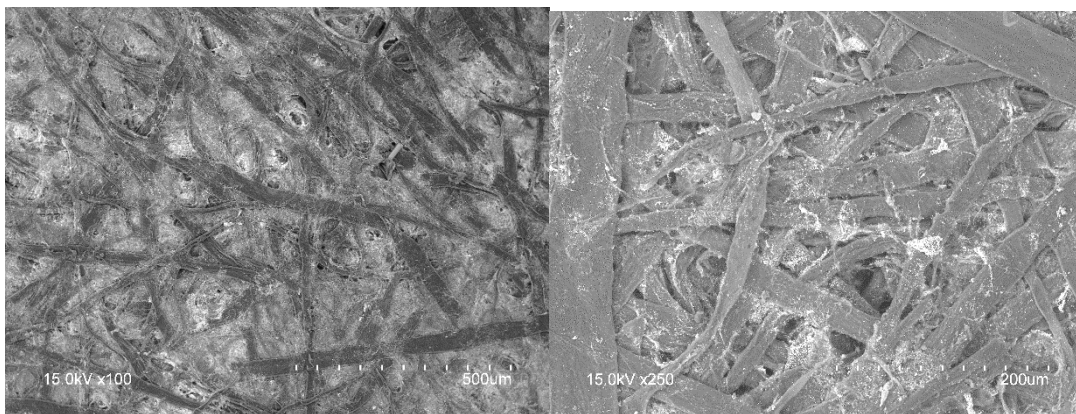
### 3.2. Felületmorfológia



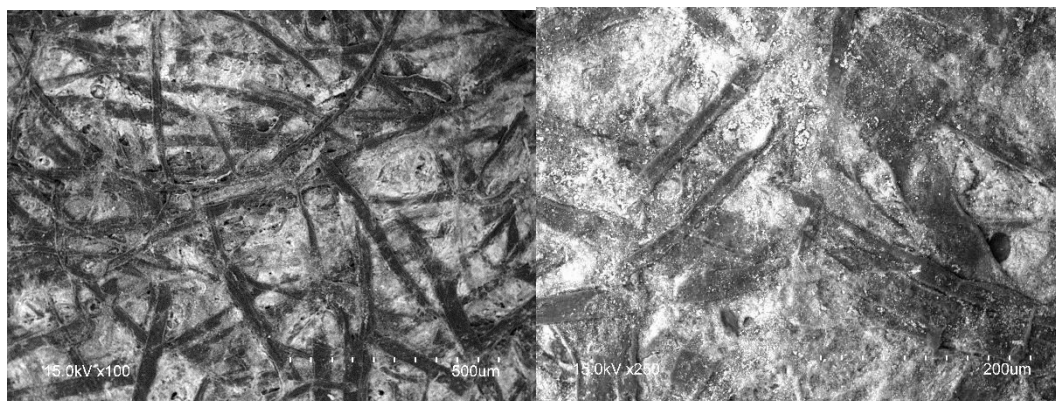
2. ábra. 1. Mintalap felületének pásztázó elektronmikroszkópos képe, 100 és 250-szeres nagyításban



3. ábra. 2. Mintalap felületének pásztázó elektronmikroszkópos képe, 100 és 250-szeres nagyításban



4. ábra. 3. Mintalap felületének pásztázó elektronmikroszkópos képe, 100 és 250-szeres nagyításban



5. ábra. 4. Mintalap felületének pásztázó elektronmikroszkópos képe, 100 és 250-szoros nagyításban

A kontroll, kezeletlen cellulózzrostból készített mintalap SEM képét a 2. ábra mutatja. 3-4. ábrán láthatók a réz-szulfáttal kezelt, kálium-humátot is tartalmazó mintalapok pásztázó elektronmikroszkópos képei. A réz-szulfáttal kezelt cellulózzrostból készült mintalap felvétele az 5. ábrán látható. Mintalapokon jól látható cellulóz rostok őrlés okozta fibrilláltsága.

Az adalékanyagokat tartalmazó minták esetén (3-5 Mintalap) a cellulózzrostokból álló lap tömörebb szerkezetet mutat. A hozzáadott anyagok a rostok felületéhez kötődtek és kitöltik a cellulózzrostok közötti teret. A rostok felületén megfigyelhető képződmények feltételezhetően a humát, humát-réz komplex és egyéb réz vegyületek részecskéi.

### 3.3. Mintalapok összetétele

Mintalapok felületi összetételét a 2. táblázat tartalmazza. Kálium-humát hozzáadásával készült lapok tartalmaznak Ca-ot is, ami valószínűleg vagy a szerves huminsavat tartalmazó Dudari barnaszénből származhat vagy, a mintalap készítése során felhasznált csapvizzből, amelyben található kalcium ion kémiai kötással kötődhetett a humáthoz.

Egyik minta felülete sem tartalmaz káliumot, feltételezhetően az anyag belsejében sincs jelen. Ennek oka lehet, hogy a cellulózhoz, illetve a rézhez való kötődés során kálium-humátról lehasadt a kálium, majd a leeresztés során távozott a mintából a felesleges vízzel együtt.

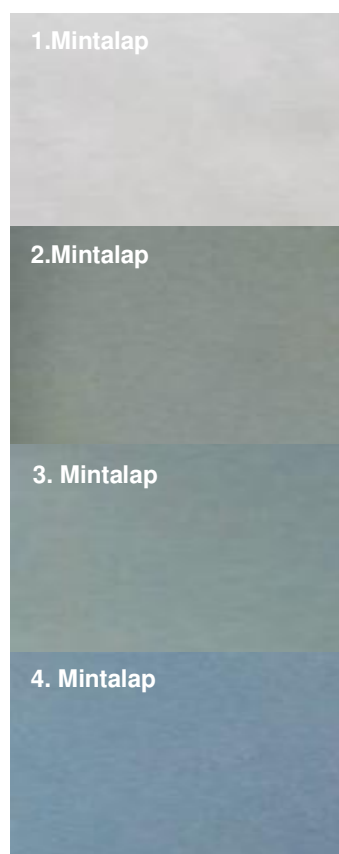
Összehasonlítva a réz-szulfáttal kezelt mintalapokat (2-5. minta) megállapítható, hogy humát jelenlétében több rézion tudott kötődni a cellulózzrostokhoz a mintalapokban, mint humát jelenléte

nélkül. Csak réz-szulfáttal kezelt lapban (4. minta) ~8 t %-ban található réz míg humátot is tartalmazó mintákban ~12 és ~18 t % a réztartalma a próbalapoknak.

2. táblázat: Mintalapok felületi összetétele

|       | Tömegszázalékos összetétel (t %) |       |       |      |
|-------|----------------------------------|-------|-------|------|
| Minta | Cu                               | C     | O     | Ca   |
| 1.    | 0,00                             | 54,48 | 45,52 | 0,00 |
| 2.    | 17,76                            | 43,20 | 38,54 | 0,50 |
| 3.    | 12,37                            | 57,45 | 29,87 | 0,31 |
| 4.    | 8,18                             | 57,04 | 34,78 | 0,0  |

### 3.4. Színmérés



6. ábra. Mintalapok fotója

A kontroll mintához képest a humátot is tartalmazó lapok színe láthatóan megváltozott, ahogy az a 6. ábrán látható, és amit a CIE Lab mérési eredményei is mutatnak (3. táblázat). Noha a színkülönbség a kontroll és a humátos lapok között nagy, az L, a és b színkoordinátákból kapott  $\Delta E$



alapján a különböző mennyiségű humátot tartalmazó 2. és 3. minta közötti színkülönbség „alig észrevehető” osztályba tartozik [20]. A nagyobb mennyiségű humát hozzáadása nem eredményezte a lapok nagymértékű sötétedését, ennek oka lehet, hogy a cellulóz rostok nem tudtak több humátot megkötni. A felesleges humát a lapképzés, leeresztő fázisában távozott a felesleges vízzel együtt.

3. Táblázat: A mintalapok CIE Lab színmérésének eredményei

|             | <i>L</i>   | <i>a</i>    | <i>b</i>   | $\Delta E$ |
|-------------|------------|-------------|------------|------------|
| 1. Mintalap | 91,93±0,17 | -0,13±0,05  | 5,79±0,35  |            |
| 2. Mintalap | 66,74±0,61 | -2,94±0,09  | 6,28±0,05  | 22,81      |
| 3. Mintalap | 67,28±0,73 | -2,77±0,16  | 5,19±0,24  | 21,03      |
| 4. Mintalap | 84,3±0,51  | -17,89±0,41 | -3,57±0,61 | 27,89      |

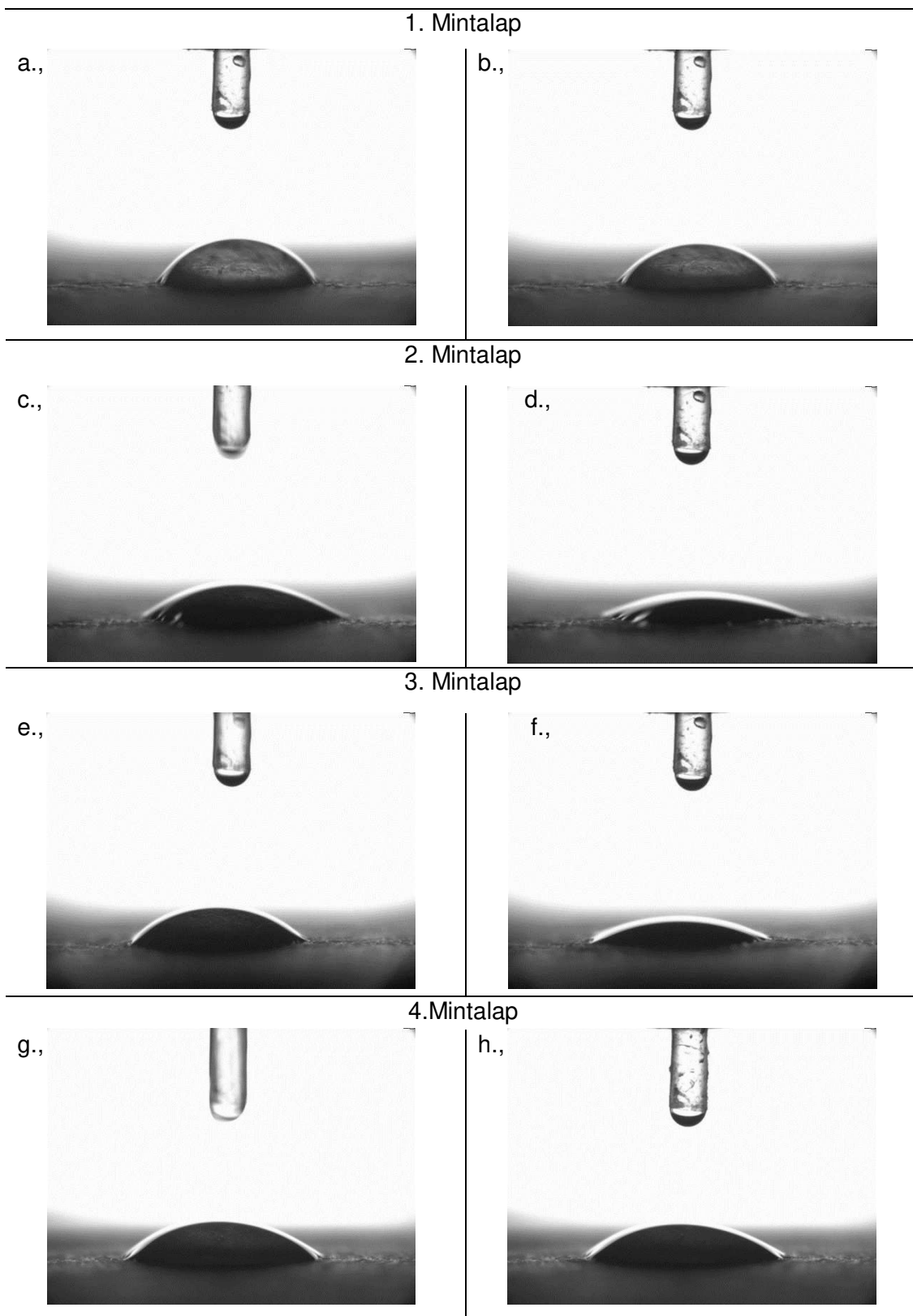
### 3.5. Felületi pH mérés

A felületi pH mérés eredményei (4. táblázat) alapján a különböző mintalapok felületi hidrogénion koncentrációjában csupán kis különbségek vannak. A réz-szulfát, illetve a humát rost szuszpenzióhoz adása nem változtatta meg a rostokból képzett lapok felületi kémhatását. A lapok pH-ja 9,4 és 9,6 közötti. A humát erős bázikus kémhatása a kész mintalapok felületi kémhatását nem befolyásolta. Mintalapok enyhén lúgos felületi pH-ja alkalmassá teheti élelmiszer csomagolásként való alkalmazhatóságra.

4. Táblázat: Mintalapok felületi pH-ja és mérésének szórás értékei

|            | <i>felületi pH</i> |
|------------|--------------------|
| 1.Mintalap | 9,623±0,13         |
| 2.Mintalap | 9,493±0,17         |
| 3.Mintalap | 9,419±0,15         |
| 4.Mintalap | 9,416±0,14         |

### 3.6. Felületi nedvesíthetőség



6. ábra. Mintalapok felületi nedvesíthetőség a: 1. Mintalap  $t=0s$ ,  $\vartheta=54,8^\circ$ ; b: 1. Mintalap  $t=0,375s$ ,  $\vartheta=50,5^\circ$ , c: 2. Mintalap  $t=0s$ ,  $\vartheta=34,8^\circ$ ; d: 2. Mintalap  $t=0,375s$ ,  $\vartheta=24,6^\circ$ ; e: 3. Mintalap  $t=0s$ ,  $\vartheta=41^\circ$ ; f: 3. Mintalap  $t=0,375s$ ,  $\vartheta=26,1^\circ$ ; g: 4. Mintalap  $t=0s$ ,  $\vartheta=44^\circ$ ; h: 4. Mintalap  $t=0,375s$ ,  $\vartheta=39^\circ$

A különböző alapanyagból készült mintalapok felületi nedvesíthetőségét a 6. ábra szemlélteti. A peremszög ( $\theta$ ) mérések alapján megállapítható, hogy a módosított rostból képzett lapok felülete hidrofilebb tulajdonságú, mint a kontroll minta felülete. Ennek oka valószínűleg a



papírkészítés során hozzáadott kálium-humát jó vízmegkötő képessége lehet. A kálium-humátot tartalmazó mintákra ejtett cseppek peremszöge ( $34,8^\circ$ ,  $41^\circ$ ) alacsonyabb értékeket mutatott a kezeletlen cellulózból készített 1. mintalaphoz ( $54,8^\circ$ ) képest. Desztillált vízcseppek penetrációja lényegesen gyorsabb volt a humát tartalmú minták esetén. A humátot tartalmazó mintáknál (2. és 3. Mintalap)  $0,375$  s alatt  $10,2^\circ$  és  $14,9^\circ$  a peremszögváltozás, ezzel szemben a humátmentes (1.) mintalapnak  $4,3^\circ$ -kal, a 4. mintalapnak  $5,0^\circ$ -kal változott a peremszöge ugyanannyi idő elteltével.

#### 4. Összefoglalás

A kutatás során Dudari barnaszénből állítottunk elő kálium-humátot. Az előállított humátot vizsgáltuk Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia segítségével mely vizsgálat során 4 különböző vegyértékrezgést, funkciós csoport jelenlétét igazoltuk ( $-\text{OH}$ ,  $\text{C-H}$ ,  $\text{C=O}$ ,  $\text{C-O}$ ). Mintalap készítés során homogén eloszlású humátot tartalmazó lapokat készítettünk

Az eredményekből megállapítható, hogy a kálium-humát segíti rézionok megkötődését a linter cellulóz rostokon. A kálium-humát hozzáadásával készült mintalapban  $\sim 18$  t% (2. mintalap) és  $\sim 12$  t% (3. mintalap) ezzel szemben humát hozzáadása nélkül készült 4. mintalap réztartalma  $\sim 8$  t% volt. Mintalapok készítésénél felhasznált kálium-humát mennyisége arányos a mintalapokban megkötött réz mennyiségével. Összegzőként elmondható, hogy sikerült kálium-humát segítségével olyan mintalapot készítenünk, ami megnövelt réztartalommal rendelkezik. A hozzáadott anyagok nem befolyásolták a felület pH értékét, de a felületi nedvesíthetőséget és a víz penetrációját, a lapok nedvszívóképességét növelték. Ezek a próbalapok alkalmasak lehetnek élelmiszer-csomagolásként való alkalmazásra. Magas réztartalmuk meggátolhatja az csomagolt termék, például zöldség vagy gyümölcs romlását okozó baktériumok, gombák szaporodását. Ezen magas réztartalmú cellulóz lapok új felhasználási lehetőséget nyithatnak a cellulóz alapú csomagolások számára az élelmiszeripari termékek csomagolása terén.

#### Irodalomjegyzék

- [1] Dhanapal, S., Sekar, D. S., Manasa, P. (2014): Enhancement of antioxidant potential in *Musa accuminata* using humic acid. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 2.4: 429-435.
- [2] Erdogan, S., Baysal, A., Akba, O., Hamamci, C. (2007): Interaction of Metals with Humic Acid Isolated from Oxidized Coal. *Polish Journal of Environmental Studies*. 16, 671-675.
- [3] Dogan, H., Koral, M., Vatansever, A., Inan, T., Ziypak, M., Olgun, Z. Beker, Ü. (2015): New Method for the Production of Barium Humate from Turkish Coal. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 5.03: 290.
- [4] Kumar, D., Singh, A. P., Raha, P., Rakshit, A., Kishor, P., & Singh, C. M. (2013). Potassium humate: A potential soil conditioner and plant growth promoter. *International Journal of Agriculture Environment and Biotechnology*, 6(3), 441-46.
- [5] Booshehri, A. Y., Wang, R., & Xu, R. (2015). Simple method of deposition of CuO nanoparticles on a cellulose paper and its antibacterial activity. *Chemical Engineering Journal*, 262, 999-1008.
- [6] Stevenson F.J. (1992): Comparison of soil humic substances with those of other environments, *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*, second ed. Wiley, Canada, pp. 54.
- [7] He Zh., Mao J., Honeycutt W., Ohno T., Hunt J.F., Cade-Menun B.J.: Spectral Characterization of Plant-Derived Dissolved Organic Matter Perminova, I.V., Kulikova, N.A., (Eds.) *From Molecular Understanding to Innovative Applications of Humic Substances*. MGUMUS Publications, Moscow, 2008. pp. 87-91
- [8] Stepchenko, L. M., Zhorina, L. V., & Kravtsova, L. V. (1991). The effect of sodium humate on metabolism and resistance in highly productive poultry. In *Nauchnye doklady vysshei shkoly. Biologicheskie nauki* (No. 10, pp. 90-95).
- [9] Tunc, M. A., & Yoruk, M. A. (2017). Effects of Humate and Probiotic on the Number of *Escherichia coli*, Blood and Antioxidant Parameters in Suckling Period of Calves. *Asian Journal of Animal and Veterinary Advances*, 12, 169-176.
- [10] Yörük, M. A., Gül, M., Hayirli, A., & Macit, M. (2004). The effects of supplementation of humate and probiotic on egg production and quality parameters during the late laying period in hens. *Poultry Science*, 83(1), 84-88.
- [11] Novák J., Kozler J., Jano P., Cezíková, J., Tokarová, V. Madronová, L.: *Humic Acids from Coals of the North-Bohemian Coal Field: I. Preparation and Characterisation Reactive and Functional Polymers*, 2001. 47, 101-109.
- [12] Ikan, R., Ioselis, P., Rubinsztain, Y., Aizenshtat, Z., Miloslavsky, I., Yariv, S., & Dorsey, T. (1992): Chemical, isotopic, spectroscopic and geochemical aspects of natural and synthetic humic substances. *Science of the total environment*, 117, 1-12.

- [13] Sun, Z., Feng, R., Zhang, L., & Xie, H. (2018). CO<sub>2</sub> capture and sequestration by sodium humate and Ca (OH)<sub>2</sub> from carbide slag. *Research on Chemical Intermediates*, 1-15.
- [14] Orosz K (2008): XVI-XVII. Századi festett papírtárgyak vizsgálata és konzerválási lehetőségei, DLA értekezés, Magyar Képzőművészeti Egyetem Doktori Iskola
- [15] Pinto, R. J., Daina, S., Sadocco, P., Neto, C. P., & Trindade, T. (2013). Antibacterial activity of nanocomposites of copper and cellulose. *BioMed research international*, 2013.
- [16] Rodrigues, A., Brito, A., Janknecht, P., Proenca, M.F., Nogueira, R., (2009): Quantification of humic acids in surface water: effects of divalent cations, pH, and filtration. *J. Environ. Monit.* 11, 377–382.
- [17] Jonas P., Alexandre G.S. P. (2007): Buffer capacity of humic acid: Thermodynamic approach, *J. Colloid and Interface Science* 314 484–489
- [18] Kar, S., Maity, J.P., Jean, J.-S., Liu, C.-C., Nath, B., Lee, Y.-C., Bundschuh, J., Chen, C.-Y., Li, Z., (2011): Role of organic matter and humic substances in the binding and mobility of arsenic in a Gangetic aquifer. *J. Environ. Sci. Health A* 46, 1231–1238.
- [19] Perelomov, L. V., Sarkar, B., Sizova, O. I., Chilachava, K. B., Shvikin, A. Y., Perelomova, I. V., & Atroshchenko, Y. M. (2018). Zinc and lead detoxifying abilities of humic substances relevant to environmental bacterial species. *Ecotoxicology and environmental safety*, 151, 178-183.
- [20] Lukács Gy. (1982): Színmérés. Műszaki Kiadó, Budapest, 341. p
- [21] MSZ EN ISO 5267-1:2000 Cellulózok. Az őrlésfok meghatározása. 1. rész: Schopper–Riegler-módszer (ISO 5267-1:1999), MSZT, [www.mszt.hu](http://www.mszt.hu), Budapest
- [22] HU 209 134 Eljárás huminsav-alkálisót tartalmazó kolloid oldatok előállítására, 1991.január 11, Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivata, Budapest
- [23] HU 207 682 A : Eljárás növelt adszorpcióképességű cellulózbázisú csomagolóanyagok előállítására, 1991.április 17. Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivata, Budapest

# TEMPERATURE INCREASE IN A LASER-BEAM HEAT-TREATMENT OF METALS

Ambrus Kőházi-Kis\*

Department of Natural Sciences and Engineering Basics, GAMF Faculty of Engineering and Computer  
Science, John von Neumann University, Hungary

---

## Keywords:

Temperature-increase  
Heat-diffusion  
Dimensionless propagation parameter  
Formula of temperature  
Laser-beam heat treatment

## Article history:

Received 7 September 2018  
Revised 6 February 2019  
Accepted 16 March 2019

---

---

## Abstract

*Laser-beam heat-treatment of a plane metal surface is modeled in a constant material parameters approximation. A relatively simple formula is created for the maximal temperature increase as a function of material parameters, the power and the width of the light-beam, and velocity of the sweep. This constant parameter approximation cannot be very precise but it is hoped to be useful in practice of laser surface heating experiments just to get an approximate value of the surface temperature increase.*

---

## 1 Introduction

Frequently, bulky and surface properties of metal should be different. Laser heat treatment (also known as laser surface hardening) can obtain approximately 10 Rockwell C higher hardness than any other hardening method available on the market today [1]. This can be achieved by focusing a well defined beam of intense laser light on the component to be laser hardened, combined with rapid self-quenching. This method is important (see for example [1, 2]), and its fundamentals are well known [3, 4].

In this paper I give a simple formula for temperature increase on a metal surface when it is irradiated with a scanning laser beam. This formula is based on a very crude approximation of real processes: we assume that all the parameters (heat conductivity, density, specific heat) of the metal are constant during the heating-cooling process. I present here also the derivation of the basic equations because it is quite instructive, but I know that very similar calculations were published as early as in 1977 [3]. My real work was just to create a formula for a fast evaluation of the temperature increase in the vicinity of the metal surface. This formula cannot be very precise because its' derivation disregards the effect of reradiation of heat and the variation of material parameters of the heated metal. Its precision cannot be enough for precise temperature calibrations for laser heat treatment [5]. However, I hope that the presented formula will be useful for experimentalist heating of metal surfaces with scanning laser beams just to guess the current temperature increase.

## 2 The model of surface heating of a metals

The air-metal interface is on the  $x$ - $y$  plane, the metal fills the lower halfspace ( $z < 0$ ). The laser beam of width  $w_0$  and of power  $P$  arrive orthogonally onto the air-metal interface, it moves along the surface with a constant speed of  $v$ . The heat is generated by absorption of the power of the laser beam. Let us suppose a laser beam with Gaussian lateral intensity distribution with a light-beam-width parameter  $w_0$  (see fig. 1) [6]. The heat-source,  $f$  is concentrated on the  $z = 0$  plane, because of the high absorptivity of metals:

---

\*Corresponding author. Tel.: +3676516436; fax: +3676516299  
E-mail address: kohazi-kis.ambrus@uni-neumann.hu

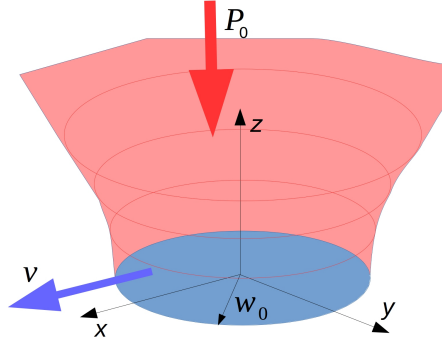


Figure 1. The model of surface heating by a scanning laser beam

$$f(x, y, z, t) = \frac{P}{\pi w_0^2} \exp\left(-\frac{(x - vt)^2 + y^2}{w_0^2}\right) \delta(z) \quad (1)$$

where  $P_0$  is the power of the laser beam,  $P$  is the absorbed power,  $P = \tau P_0$ , and  $\tau$  is the transmissivity of the air-metal interface (it can be regarded also as absorption coefficient because the light transmitted by the interface is absorbed in the bulk material);  $\delta(z)$  denote the Dirac-delta “function” which can be used here because metals have high absorption coefficient values, that is the incident light is absorbed on the very close ( $\mu\text{m}$  or less) vicinity of the surface.

The heat expansion is governd by the following equation:

$$c \rho \frac{\partial \Delta T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = f \quad , \quad (2)$$

where  $\Delta T = \Delta T(x, y, z, t)$  is the sought temperature-increase distribution in the metal in the lower half-space below the  $z = 0$  plane;  $c$  is the specific heat,  $\rho$  is the density and  $\lambda$  is the heat conducting coefficient of the metal.

In this paper constant values are suppose for the material constants ( $\tau, c, \rho, \lambda$ ).

This inhomogenous heat-diffusion equation will be solved using it's Green-function.

In the next chapter an expressive derivation is given of the Green-function of the homogeniuos space. The temperature distribution induced by the absorption of the scanning laser beam (see eq. (1)) is determined in section 4.

### 3 Self-similar diffusion of a Gaussian heat distribution

Let us suppose that the space filled width a material homogenously. The homogeneous heat diffusion equation

$$c \rho \frac{\partial \Delta T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

can be shown to have a self-similar solution ( $w = w(t)$ ):

$$\Delta T(x, y, z, t) = \frac{E}{c \rho} \frac{1}{\pi^{\frac{3}{2}} w^3} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{w^2}\right) \quad , \quad (4)$$

where the temperature distribution is normalized the way that the energy of the temperature increase is  $E$ :

$$c \rho \int \Delta T dV = E \quad . \quad (5)$$

The width of the distribution increases:

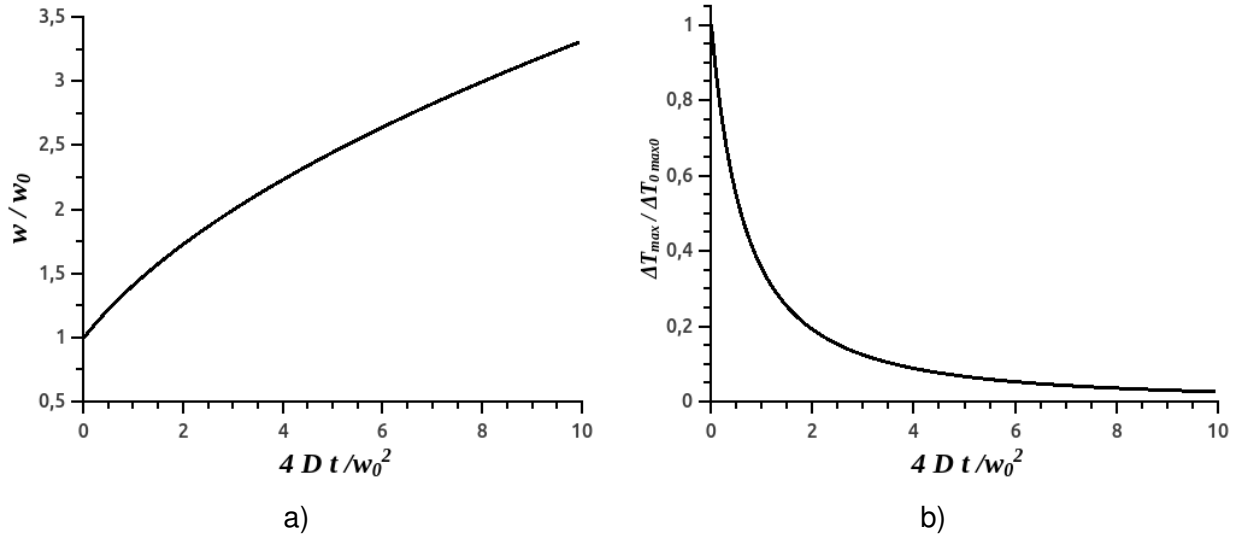


Figure 2. (a): The speed of growing of the width of the distribution decreases in time. (b): The speed of the decrease of temperature departure also decreases as time rolls on (dimensionless time variable is used on the figures)

$$w(t) = \sqrt{w_0^2 + 4Dt} \quad , \quad (6)$$

where  $D = \frac{\lambda}{c\rho}$  diffusion constant of the material.

The width of the temperature departure (Gaussian-shaped) distribution increases with a speed decreased as the ditribution become bigger (see Fig. 2.a). The maximal temperature departure (at the origin of the coordinate system) can be seen on Fig. 2.b decreases slower as the time elapses, that is the size of the distribution gets bigger. This also means that a smaller hot spot cools more quickly.

The eq. (4) gives a solution that cloud be started from infinitesimal width of the distribution, that can be regarded as a Green-function of the heat conduction equation (eq. (3)).

## 4 Determination of the temperature distribution with the help of the Green-function

The Green-function  $G_0$  of the whole space can be read from the above solution:

$$G_0(x, y, z, t) = \frac{1}{c\rho(4\pi Dt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{4Dt}\right) \theta(t) \quad . \quad (7)$$

where  $\theta(t)$  is for the delta function of Heaviside.

The same heat packet on the boundary of the half space (in the model of Sec. 2) results double temperature-increase in the lower half-space  $G = 2G_0$ . The temperature distribution can be obtained with the help of the Green-function of the heat diffusion equation in the lower half space, which is the temperature-increase distribution obtained for a unit energy excitation in the origin at  $t = 0$ :

$$\Delta T(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} dt' \iiint dV' f(x', y', z', t') G(x - x', y - y', z - z', t - t') \quad , \quad (8)$$

where using  $G$  is in close connection to the fact that the sources are on the boundary of the lower half-space.

The integrals (except one) can be evaluated by the help of the so called Siegman-integral [6]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-a t^2 - 2 b t) dt = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(\frac{b^2}{a}\right) \quad (9)$$

The solution gets simpler with the new variable  $u = x - v t$  instead of  $x$ , the solution can be given in the coordinate system moving with the exciting laser beam:

$$\Delta T(u, y, z, t = 0) = \frac{2 P}{c \varrho \pi^{\frac{3}{2}}} \int_0^{\infty} \frac{dt'}{(w_0^2 + 4 D t') \sqrt{4 D t'}} \cdot \exp\left(-\frac{(u + v t')^2 + y^2}{(w_0^2 + 4 D t')} - \frac{z^2}{4 D t'}\right) \quad (10)$$

If we introduce the following dimensionless variables

$$\xi = \frac{u}{w_0}, \quad \eta = \frac{y}{w_0}, \quad \zeta = \frac{z}{w_0}, \quad \vartheta = \frac{t' D}{w_0^2}, \quad \kappa = \frac{v w_0}{D} \quad (11)$$

the temperature departure,  $\Delta T$  can be obtained in a simpler form:

$$\Delta T(\xi, \eta, \zeta) = \frac{P}{\pi^{\frac{3}{2}} \lambda w_0} \int_0^{\infty} \frac{d\vartheta}{(1 + 4 \vartheta) \sqrt{\vartheta}} \exp\left[-\frac{(\xi + \kappa \vartheta)^2 + \eta^2}{1 + 4 \vartheta} - \frac{\zeta^2}{4 \vartheta}\right] \quad (12)$$

The above is an improper integral: the integrand is not defined in  $\vartheta = 0$ . It can be transformed to a definite integral with a new variable  $s = 2 \sqrt{\vartheta}$  ( $4 \vartheta = s^2$ ,  $ds = \frac{d\vartheta}{\sqrt{\vartheta}}$ ):

$$\Delta T(\xi, \eta, \zeta) = \frac{P}{\pi^{\frac{3}{2}} \lambda w_0} \int_0^{\infty} \frac{ds}{(1 + s^2)} \exp\left[-\frac{(\xi + \kappa s^2/4)^2 + \eta^2}{1 + s^2} - \frac{\zeta^2}{s^2}\right] \quad (13)$$

With this simple integral the temperature deviation value in any position can be calculated. It is worth to notice that this solution is valid if all the parameters of the medium is absolutely constant (see Sec. 2).

## 5 Simple formula for maximal temperature increase

The maximal temperature increase value can be well approximated by the value at the central point of the laser beam on the surface where  $\xi = 0$ ,  $\eta = 0$ ,  $\zeta = 0$ :

$$\Delta T_{max}(P, \lambda, w_0, \kappa) = \frac{P}{\lambda w_0} I(\kappa) \quad (14)$$

$$I(\kappa) = \frac{1}{\pi^{\frac{3}{2}}} \int_0^{\infty} \frac{ds}{(1 + s^2)} \exp\left[-\frac{\kappa^2 s^4}{16 (1 + s^2)}\right] \quad (15)$$

From the practical point of view it is important to find the useful parameter range in  $\kappa$ . Moderate values for steel are the following ( $0.1 \text{ m/s} = 6 \text{ m/min}$ ,  $c_{steel} \approx 470 \text{ J/kg K}$ ,  $\lambda \approx 50 \text{ W/m K}$ ,  $\rho \approx 7800 \text{ kg/m}^3$ ):

$$D = 13.7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}, \quad w_0 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad v = 0.1 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad \kappa = \frac{v w_0}{D} \approx 29 \quad (16)$$

The integrand is simple (see Fig. 3), it can be evaluated with a simple numerical integral formula (Simpson-formula). The integral was evaluated numerically with a C++ program by the Simpson-formula on an interval from 0 to  $10^3$  values divided by  $10^6$  equal parts. The following approximate formulas were fitted by the QtiPlot computer program, with a Levenberg-Marquardt algorithm:

- If  $10 < \kappa < 10^4$  then (see Fig. 4.a)

$$\Delta T_{max}(P, \lambda, w_0, \kappa) = \frac{P}{\lambda w_0} 0.31 \kappa^{-0.491} \quad (17)$$

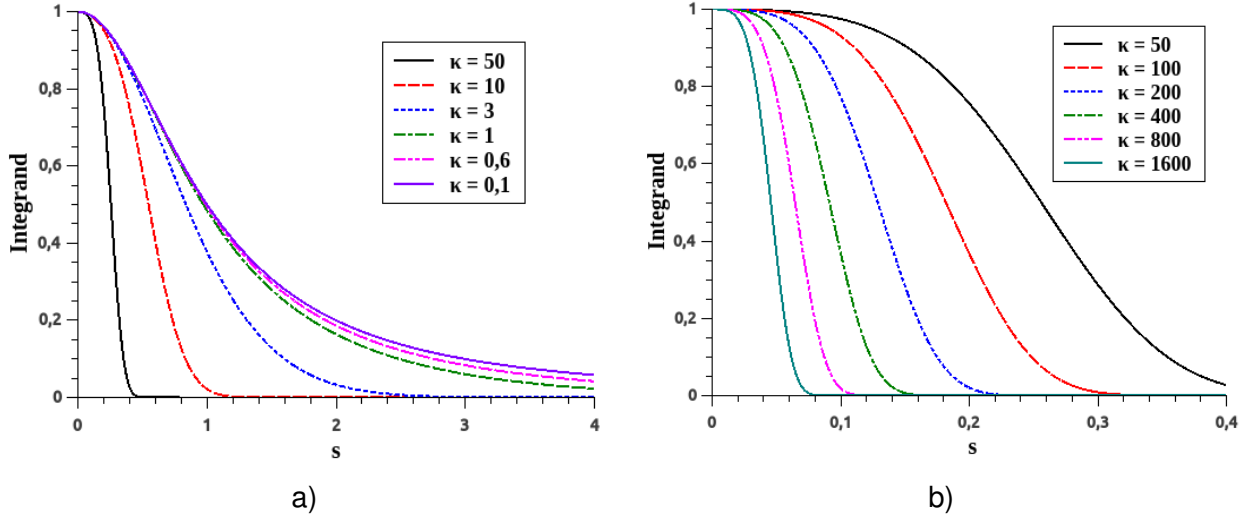


Figure 3. The integrand of Eq. (15) is a smooth function of  $s$  for a quite wide range of parameter  $\kappa$

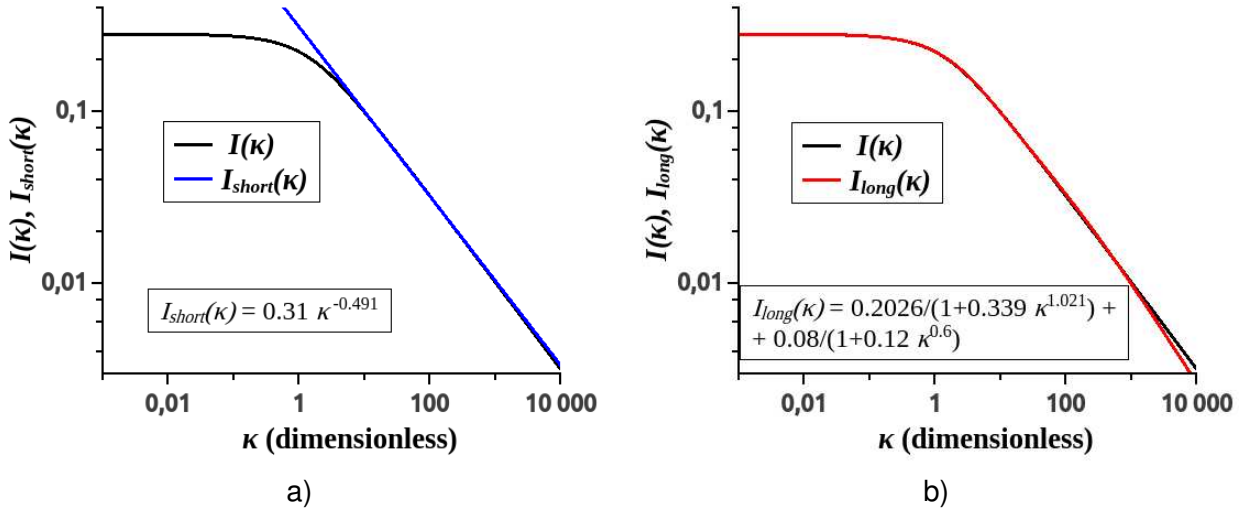


Figure 4. The fitted formulas: (a) eq. (17), (b) eq. (18)

- If  $10^{-3} < \kappa < 10^3$  then (see Fig. 4.b)

$$\Delta T_{max}(P, \lambda, w_0, \kappa) = \frac{P}{\lambda w_0} \left( \frac{0.2026}{1 + 0.339 \kappa^{1.021}} + \frac{0.08}{1 + 0.12 \kappa^{0.6}} \right), \quad (18)$$

where (just for a good local transparency)

$$\kappa = \frac{v w_0}{D}, \quad (19)$$

$v$  is the scanning speed,  $w_0$  is the width of the beam, and  $D = \frac{\lambda}{c \rho}$  is the diffusion constant,  $c$  is the specific heat capacity, and  $\rho$  is the density of the metal,  $P = \tau P_0$  is the absorbed beam power,  $\tau$  is the transmission constant of the metal,  $P_0$  is the incident beam power.

Equation (17) can be used when the normalized scanning speed parameter has a much higher value than unity. This critical scanning speed,  $v_{cr}$  can be calculated with the use of eq. (19):

$$v_{cr} = \frac{D}{w_0}. \quad (20)$$

For steel ( $D = 13.7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ ) it gives

$$v_{cr} \approx \frac{0.8}{w_0}, \quad (21)$$



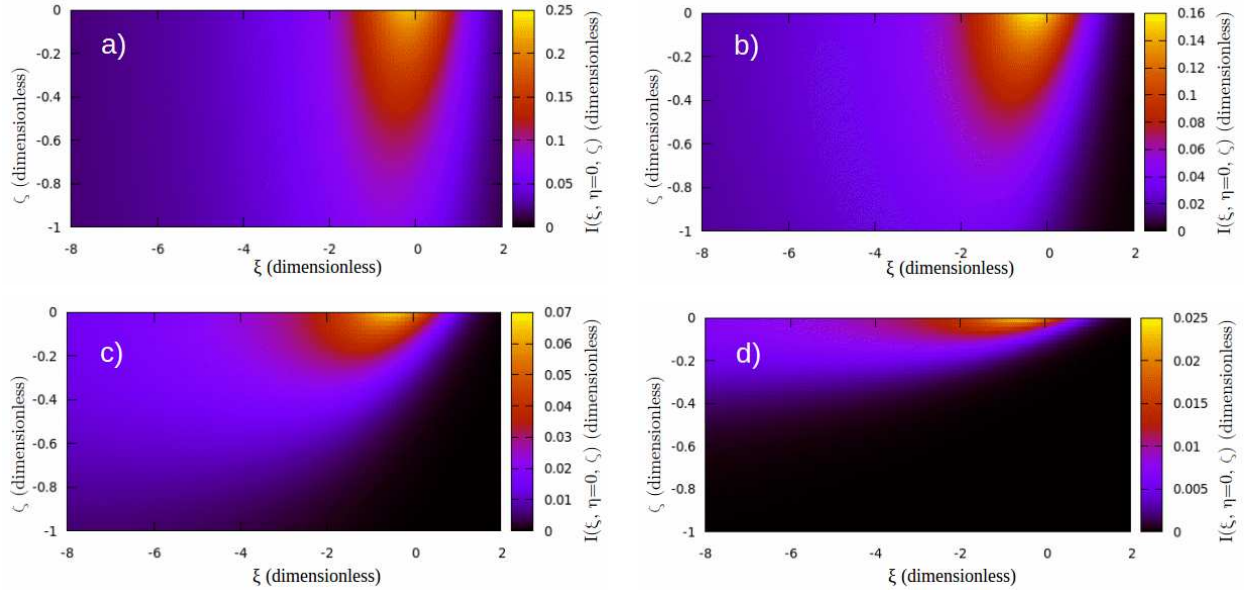


Figure 5. Temperature increase distributions at different dimensionless speed parameter,  $\kappa$  values, a:  $\kappa = 0.5$ , b:  $\kappa = 4.0$ ; c:  $\kappa = 32.0$ , d:  $\kappa = 256.0$

when the beam width parameter of the incident light beam,  $w_0$  (see ref [6]) is given in millimeter then the value of the critical speed is obtained in meter per minutum.

Below this critical scanning speed the (15) integral gives approximately constant value,  $I \approx 0.28$ . For steal it gives (see eq. 14)

$$\Delta T_{max} \approx 6 \frac{P}{w_0} \quad , \quad (22)$$

when the absorbed power,  $P$  is measured in watt, the beam width,  $w_0$  is measured in mm then the temperature increase,  $\Delta T_{max}$  is obtained in K or in  $^{\circ}\text{C}$ . It is important to remember, that this formula is valid only for metal blocks with dimensions much bigger than the characteristic spatial parameters of the problem.

## 6 Discussion

One can determine not only the temperature increase but also the whole temperature distribution from eq. (13):

$$\Delta T(\xi, \eta, \zeta) = \frac{P}{\lambda w_0} I(\xi, \eta, \zeta) \quad , \quad (23)$$

where the dimensionless  $I(\xi, \eta, \zeta)$  integral is

$$I(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{\pi^{\frac{3}{2}}} \int_0^{\infty} \frac{ds}{(1+s^2)} \exp \left[ -\frac{(\xi + \kappa s^2/4)^2 + \eta^2}{1+s^2} - \frac{\zeta^2}{s^2} \right] \quad . \quad (24)$$

Figure 5. shows the  $I$ -integral dependence on  $\xi$  and  $\eta$ . It can be seen that as the scanning speed increased the temperature deviation is decreased, the temperature increase distribution is widened behind the light beam, and the heat effected depth is decreased.

It can be noticed that the maximal tempreature increase appears not exactly at the center of the scanning light beam but some distance behind. Table 6. shows the values of the distance lags ( $\Delta\xi$ ) and temperature differences ( $T_{max}$ ) as a function of the dimensionless scanning speed parameter ( $\kappa$ ) values.

It is important that the temperature deviation measured at the centre of the beam,  $T_0$  and the maximal temperature deviation  $\Delta T_{max}$  ( $\Delta\xi$  behind the laser beam) are not differs more than 20%. That

| $\kappa$ | T(0)      | dx  | T-max     | T-max/T(0) |
|----------|-----------|-----|-----------|------------|
| 0        | 0.280119  | 0   | 0.280119  | 1          |
| 0.5      | 0.247834  | 0.1 | 0.249166  | 1.005      |
| 1        | 0.222386  | 0.2 | 0.22572   | 1.015      |
| 2        | 0.18704   | 0.2 | 0.193926  | 1.037      |
| 4        | 0.146894  | 0.3 | 0.157534  | 1.072      |
| 8        | 0.109551  | 0.4 | 0.121775  | 1.112      |
| 16       | 0.079385  | 0.5 | 0.0906718 | 1.142      |
| 32       | 0.0567434 | 0.5 | 0.066031  | 1.164      |
| 64       | 0.0402964 | 0.5 | 0.0473799 | 1.176      |
| 128      | 0.0285192 | 0.5 | 0.0337267 | 1.183      |
| 256      | 0.0201407 | 0.5 | 0.0239024 | 1.187      |
| 512      | 0.0141986 | 0.5 | 0.0168944 | 1.19       |

Figure 6. The temperature increase is not maximal in the centre of the scanning laser beam, but it is delayed as the scanning is fast enough

is the approximation does not get wrong because the temperature increase was taken as maximal at the centre of the scanning laser beam.

It is also interesting to notice, that the spatial lag of the position of the maximal temperature increase is stabilized to  $\Delta\xi = 0.5$  if the dimensional scanning speed parameter,  $\kappa$  has much higher value than unity. The distances are normalized to the width parameter of the laser beam (see eq. 11), that is the spatial lag of the maximal temperature increase is half of  $w_0$  behind the centre of the laser beam if the scanning is fast enough (see table 6.).

## 7 Conclusion

The temperature increase caused by a scanning laser beam on a metal surface is investigated. New, simple formula is given for the maximal temperature increase as a function of the scanning speed, the width and the power of the laser beam, and the parameters of the metal (density, specific heat, heat conductivity, and absorptivity). The formula is simple, that is, it cannot be precise. It can be used in practice of laser-beam metal surface heating to guess the heating of the metal surface at a given experimental conditions.

## Acknowledgement

This research is supported by EFOP-3.6.1-16-2016-00014 "Research Development of Disruptive Technologies in e-Mobility and their Integration into Measurement Training" project. The Project is supported by the Hungarian Government and co-financed by the European Social Fund.

## References

- [1] Laser Cladding Services – Laser heat treatment,  
Available: <http://www.lasercladdingservices.com.au/laser-heat-treatment.html>,  
Accessed: 2018.11.05.
- [2] A. Jarvenpaa, M. Jaskari, M. Hietala, K. Mantyarvi, "Local laser heat treatment of steel sheets", Physics Procedia, 78, 296-304 (2015).

- [3] H.E. Cline and T.R. Anthony, "Heat treating and melting material with a scanning laser or electron beam", J. Appl. Phys., 48, 3895-3900 (1977).
- [4] D.J. Sanders, "Temperature distributions produced by scanning Gaussian laser beams", Appl. Opt. 23, 30-35 (1984).
- [5] M. Seifert, K. Anhalt, C. Baltruschat, S. Bonss, B. Brenner, "Precise temperature calibration for laser heat treatment", J. Sens. Sens. Syst., 3, 47-54 (2014).
- [6] A.E. Siegman, *Lasers*, University Sciences Books, 1986.
- [7] R. Uyhan, "Three-Dimensional Temperature Distribution Produced by a moving Laser Beam", J. Appl. Math., <http://dx.doi.org/10.1155/2013/649590> (2013).

# HATÁRFELÜLETEK RAGASZTÁSI TULAJDONSÁGAINAK VÁLTOZÁSA LÉGKÖRI NYOMÁSÚ PLAZMA FELÜLETKEZELÉS HATÁSÁRA

## CHANGE OF INTERFACES ADHESIVE PROPERTIES BY EFFECTS OF ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA SURFACE TREATMENT

Juhász Gergely <sup>1\*</sup>, Berczeli Miklós <sup>1</sup>, Barna Gábor <sup>2</sup>, Weltsch Zoltán <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Anyagtechnológia Tanszék, Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> PlasmaTreat GmbH, Kecskemét, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Ragasztás  
Felület kezelés  
Felületi feszültség  
Nedvesítés  
Plazma

### Keywords:

Adhesive  
Surface treatment  
Surface tension  
Wetting  
Plasma

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 20.  
Átdolgozva 2018. október 27.  
Elfogadva 2019. március 5.

---

### Összefoglalás

Az utóbbi évtizedben a kutatások száma megnőtt a kötéstechológiák javítása terén. A kutatók felület kezelésekkkel próbálják javítani a felületek tapadási tulajdonságait. A ragasztás az egyik ilyen kötéstechológia, aminél fontos, hogy a ragasztás szempontjából milyen felületek lesznek összekötve. Az egyik ilyen felületi tulajdonság a nedvesedés, amelyet több fajta felületkezeléssel lehet javítani. Az utóbbi időszakban megjelentek a légköri nyomású plazmák, amelyekkel kutatások folynak a felületkezelések terén. Jövőbeli kutatásunkban légköri nyomású plazma felületkezelés hatásával, illetve ennek mérésével fogunk foglalkozni. Célunk, hogy javítsuk a tapadási tulajdonságot, és így a ragasztás minőségét. Ez a cikk a ragasztás, a felületi feszültség és a légköri nyomású plazmákkal történő felületkezelés elméleti hátterét foglalja össze.

### Abstract

Over the last decade, the number of researches has increased in the field of bonding technologies. Researchers attempt to improve surface adhesion properties by surface treatments. Adhesive bonding is one of these bonding techniques, where it is important to see what surfaces will be bonded. One such surface property is wetting, which can be improved by several types of surface treatment. In recent years, atmospheric pressure plasmas have appeared, with which research is ongoing on surface treatments. In our research, we will deal with the effects of plasma surface treatment at atmospheric pressure and its measurement. In addition, we summarize the theoretical background of adhesion, surface tension and surface treatment with atmospheric pressure plasma. Our goal is to improve adhesion properties and thus the adhesion quality.

---

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 70 668 4835  
E-mail cím: gregoryshepard.95@gmail.com

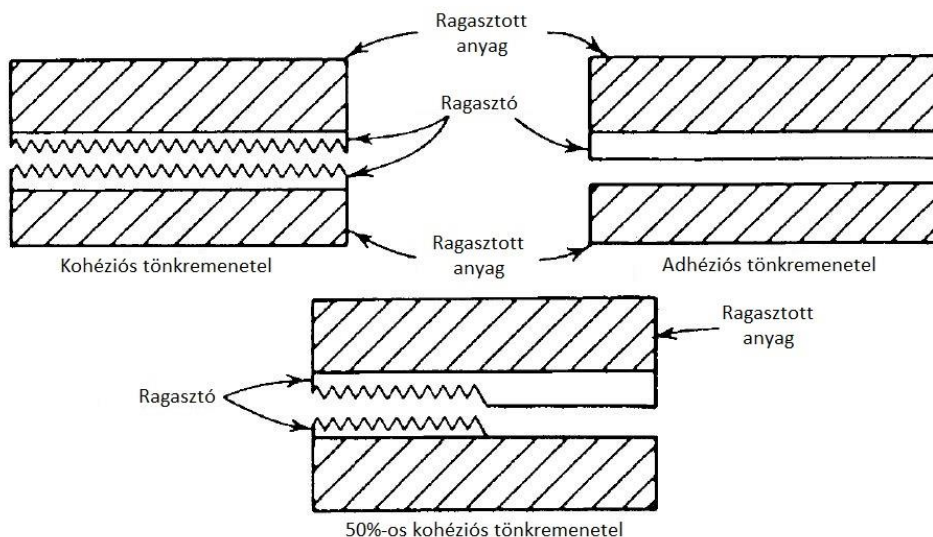
## 1. Bevezetés

A mai világban mindenhol körbevesz minket a ragasztás technológiája. A ragasztást alkalmazzák például az űrtechnikában, az autópárban és a mindennapi életben. Lassan nincs olyan háztartás, ipar, vagy berendezés amiben ne lenne alkalmazva ragasztás, mint kötési forma. A ragasztás iparága évezrednyi kihívással találkozott, de továbbra is fejlődik [1]. A ragasztások vizsgálatának és az ezt körülvevő tudományoknak soha nem volt ennyire fontos szerepe, mint manapság. A ragasztások minőségét számos kutatás [7 - 9] próbálja javítani különböző felületi kezelésekkkel, mint például bevonatolás, lézeres felületmódosítás, ionimplantáció, mechanikus érdesítés. Az utóbbi évtizedben megjelentek a légköri nyomású plazmák, amelyek képesek voltak leváltani a vákuumban működő plazmákat. Ez gyakorlati szempontból hatalmas jelentőséggel bír, mivel ezek a légköri nyomáson működő plazmák könnyen integrálhatóak a gyártósorokba [2].

A mi jövőbeli kutatásunk célja a ragasztási kötéstechnológia javítása légköri nyomású, sűrített levegővel működő plazma felületkezeléssel.

## 2. Ragasztás technológiája

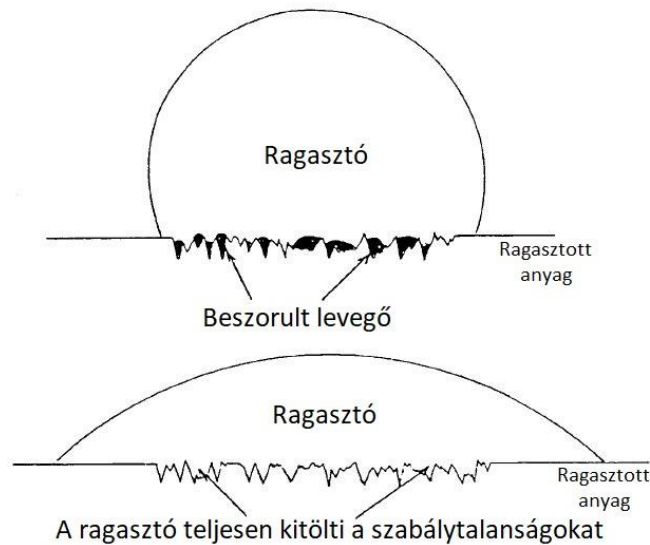
A ragasztóknak van néhány alapvető tulajdonsága, mint például folyadékként kell, hogy viselkedjen a kötés valamely fázisában, azért, hogy szét tudjon folyni és be tudja nedvesíteni az adott felületet, az adott felülethez tapadnia kell, ellen kell, hogy tudjon állni folyamatos és változó erő hatásoknak és ezeket az erőket szét kell, hogy tudja osztani az alkotóelemek között. A legfőbb alapvető tulajdonsága a ragasztóknak az adhézió. Az adhézió két különböző anyag molekulái között fellépő vonzóerő. Ez más mint a kohézió, ami egy anyag molekulái között fellépő vonzóerőt jelent. A molekulák közötti erők mind az adhézióban, mind a kohézióban elsődlegesen Van der Waals erők. A kötések tönkremehetnek adhéziósan, vagy kohéziósan. Ez azt jelenti, ha adhéziósan szakad el a ragasztás, akkor a két összeragasztott felület egyikéről le fog válni a ragasztás. Ha kohéziósan megy tönkre a kötés, akkor maga a ragasztó fog elszakadni (1. ábra). Ez akkor lehetséges, ha az adhéziós erő nagyobb, mint a ragasztó kohéziós ereje, vagy eltört a ragasztó [1].



1. ábra: Példák adhéziós és kohéziós tönkremenetelre [1]

A sikeres ragasztás több tényezőtől is függ, ilyen például a ragasztandó minta tisztasága, az anyag nedvesedő tulajdonsága (ami a ragasztóanyaggal érintkezik), a ragasztó térhálósodása, a kötés elrendezésének megfelelő megválasztása (a ragasztás a lefejtéssel szemben a leggyengébb), az anyagok megfelelő megválasztása. A legalapvetőbb, hogy a ragasztandó felületet megtisztítjuk, mivel ha a felület koszos (por, olaj, nedvesség, gyenge oxid rétegek), akkor a ragasztó ezekhez a gyenge felületi rétegekhez fog tapadni a ragasztandó felület helyett. Ezeket a szennyeződések el lehet távolítani mechanikus, illetve kémiai úton. A ragasztónak továbbá szét kell folynia a

ragasztandó felületen, amit a nedvesítés befolyásol. Ha a felületet nem nedvesíti a ragasztó megfelelően, akkor a ragasztás nem lesz megfelelő minőségű (2. ábra) [1].

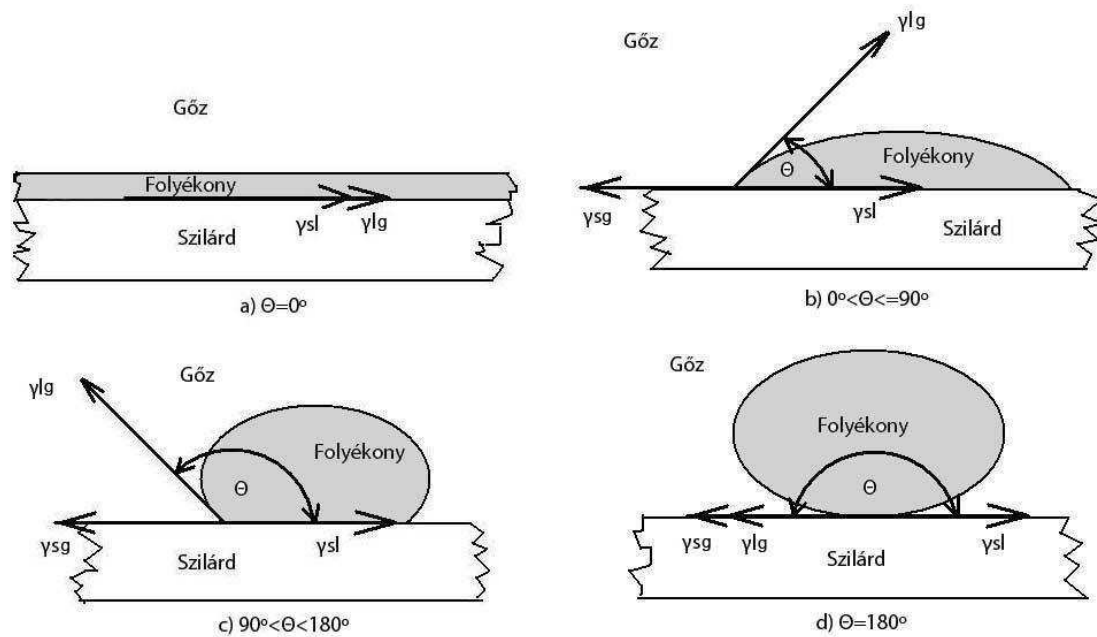


2. ábra: Illusztráció a rossz nedvesítés (felső) és a jó nedvesítés (alsó) esetén a ragasztó szétterülésére [1]

A nedvesítést, mint fogalmat már régen a mindennapi megfigyelésekből származtatták, például egy adott folyadék nem ugyanúgy terül el más anyagokon. Egy tisztább felületen jobban elterül az adott folyadék, mint egy szennyezett felületen. A nedvesedő képességet elsősorban a folyadékokban a szilárd felületeken való szétterülésével jellemezhetjük [3].

### 3. Felületi feszültség

A felületi feszültséghez szorosan kapcsolódik a nedvesítés fogalma. A nedvesítés közvetlen mérőszáma a peremszög ( $\Theta$ ), azaz a két fázis érintkezése mentén kialakuló illeszkedési szög. a XIX. században Thomas Young foglalkozott részletesen a folyadékok nedvesedési viszonyairól. A Young által leírt összefüggések mind a mai napig az alapját képezik a nedvesedési jelenségek leírásának, az általa megalkotott összefüggés teremt kapcsolatot a nedvesedési peremszög és a felületi feszültség között. A szétterülés mértékét a szilárd test és a folyadék molekuláinak a határfelületein végbemenő kölcsönhatások szabják meg. A határfelületek tulajdonságait - így a szilárd felületek nedvesítőképességét is - a legkülső, néhány atomnyi távolságra terjedő réteg, annak is főként a folyadékfázissal közvetlenül érintkező atomjai vagy atomcsoportjai határozzák meg. Ezt a független felületi hatások elvének nevezzük, amiből következik, hogy a nedvesítőképességet a megfelelő szerkezetű és irányítottaságú adszorpciós rétegek kialakulásával tudatosan befolyásolhatjuk [3].



3. ábra: Szilárd fázisra helyezett folyadékcsepp esetén a nedvesedési peremszög alakulása különböző esetekben [3]

A 3. ábrán látható, hogy ha a peremszög  $0^\circ$ , akkor a felületen annyira jól szétterül a folyadék, hogy egy folyadék réteg keletkezik, ez nagyon jó nedvesedő tulajdonságnál jöhet elő. Ha ezt a peremszöget olvassuk le, akkor a felületnek legalább akkora feletti feszültsége van, mint az adott folyadéknak. Ha az érték  $0^\circ$  és  $90^\circ$  között van akkor a felület már nem annyira hidrofíli, de ha  $30^\circ$  alatt van akkor még mindig jól nedvesedőnek lehet tekinteni. Amikor  $90^\circ$  és  $180^\circ$  között van, akkor hidrofób, a felület nem nedvesedik eléggé, mondhatni alkalmatlan a ragasztásra, mivel inkább a környező gázzal próbál kölcsönhatásba lépni a ragasztó, és nem a ragasztandó felülettel. Ha a peremszög megközelíti a  $180^\circ$ -ot akkor szuper hidrofób a felület, ez esetben már szinte teljesen eltaszítja a folyadékot a felület [3].

### 3.1. Felületi feszültség mérése

Egy folyadék felületi energiájának a mérése egyszerű és egyértelmű, mivel a felületi energia értéke egy folyadéknál megegyezik a folyadék felületi feszültségével. Egy folyadék felületi feszültségének megmérése pedig számos technika létezik. Viszont, ha egy szilárd test felületi energiáját szeretnénk megmérni, az már nem ilyen könnyű, mivel ezt az értéket egy adott számú csepp és szilárd test határfelületének találkozásánál való peremszög mérésével számolható, ami nagyban függ a megfelelő folyadékok megválasztásától, a szög értékének megfelelő mérésétől, a felületi kölcsönhatásoktól, a felületi reakcióktól és a felület nedvesedő képességétől. Még ha sikerült is kiválasztani a megfelelő folyadékokat, még akkor sem biztos a szilárd test felületi energia értéke, mivel számos definíciója van a felületi energiának a szakirodalmakban. Ezért számos módszerek és teóriák léteznek, amik a peremszög értékeket átalakítják felületi energia értékévé. Ezekből a módszerekből egyik sem egyetemes, mivel egyik sem tökéletes a valóságban. Ezek miatt olyan folyadékokat kell választani, amik az egyik ilyen módszernek megfelelnek és ésszerű eredményeket mutatnak. Nem poláris felületeknél célszerű nem poláris folyadékokat választani, míg poláris felületeknél poláris folyadékokat, és ezekhez megfelelő módszert [4].

A legtöbbet használt módszer felületi energia megállapításához a Fowkes-féle módszer. Fowkes módszere egy két komponensű modell a szilárd test felületi energiájának meghatározásához. Ez a módszer két komponensre választja szét a szilárd test felületi energiáját, egy diszperzív és egy poláris komponensre. Fowkes módszere három alapvető egyenleten alapszik,



amelyek leírják a kölcsönhatásokat a szilárd felületek és a folyadékok között. Ezek a három egyenletek a következők:

Young egyenlete

$$\sigma_S = \sigma_{SL} + \sigma_L \cdot \cos\theta \quad (1)$$

ahol:  $\sigma_S$  - a szilárd test teljes felületi feszültsége,  $\sigma_{SL}$  - a szilárd test és a folyadék közötti határfelületi feszültség,  $\sigma_L$  - a folyadék teljes felületi feszültsége és  $\theta$  a peremszög nagysága a folyadék és a szilárd test kontakt pontjában.

Dupre meghatározása a tapadási energiáról

$$I_{SL} = \sigma_S + \sigma_L - \sigma_{SL} \quad (2)$$

ahol:  $I_{SL}$  - a folyadék és a szilárd felület közötti egységnyi területre eső adhéziós energia, és végül Fowkes teóriája, hogy a folyadék és a szilárd felület közötti adhéziós energia szétbontható a diszperz komponensek kölcsönhatására és a polár komponensek kölcsönhatására.

$$I_{SL} = 2 \cdot [(\sigma_L^D)^{1/2} \cdot (\sigma_S^D)^{1/2} + (\sigma_L^P)^{1/2} \cdot (\sigma_S^P)^{1/2}] \quad (3)$$

ahol:  $\sigma_L^D$  - a folyadék felületi feszültségének a diszperz komponense,  $\sigma_L^P$  - a folyadék felületi feszültségének a polár komponense,  $\sigma_S^D$  - a szilárd test felületi feszültségének a diszperz komponense,  $\sigma_S^P$  - a szilárd test felületi feszültségének a polár komponense.

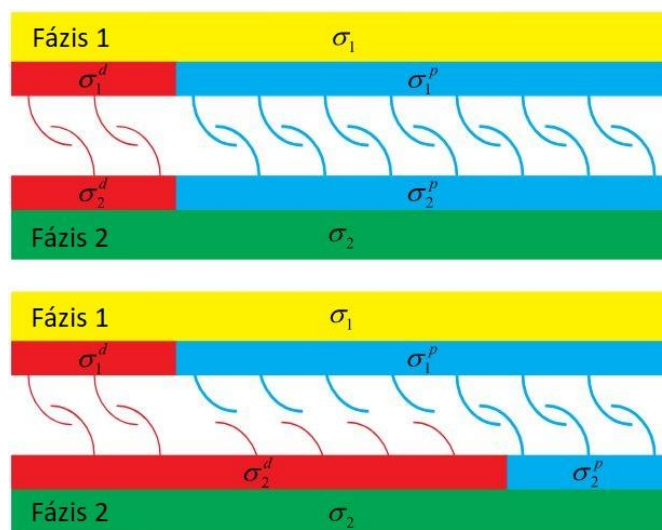
Ennek a három egyenletnek a kombinálása adja a Fowkes módszer elsődleges egyenletét:

$$(\sigma_L^D)^{1/2} \cdot (\sigma_S^D)^{1/2} + (\sigma_L^P)^{1/2} \cdot (\sigma_S^P)^{1/2} = \frac{\sigma_L \cdot (\cos\theta + 1)}{2} \quad (4)$$

Tipikusan a Fowkes módszer két folyadék peremszögértékeit használja fel. Egy olyan folyadékot, amelynek csak poláris komponense van és egy olyan folyadékot, amelynek van diszperzív és poláris komponense is. Azért ajánlott egy olyan folyadékot használni, amelynek csak poláris komponense van, mert így leegyszerűsödik az elsődleges képlet a következő képletre,

$$\sigma_S^D = \frac{\sigma_L \cdot (\cos\theta + 1)^2}{4} \quad (5)$$

és így rögtön meghatározható a szilárd felület diszperzív komponense, így innen kiszámolható a teljes felületi feszültség. Az ajánlott folyadékok dióddmetán és desztillált víz. A módszer használható két olyan folyadékkal is amelynek van poláris és diszperzív komponense is, de abban az esetben egy egyenletrendszerrel kell megoldani, mivel két ismeretlenünk lesz egy egyenletben. A Fowkes módszer olyan felületekhez alkalmazható, mint például a poli(vinil-klorid), poliuretánok, poliimidek, poliészterek, poliakrilátok, polikarbonátok. Egy módszerként, aminek az alapja a tapadás, a Fowkes módszert gyakran használják tapadási és bevonási problémákhoz, mivel Fowkes egyenletét használhatják a tapadási energia kiszámolásához a ragasztó és a felület vagy a bevonat és a felület között. Az, hogy Fowkes szerint a polár komponens csak polár komponenssel tud kölcsönhatásba lépni azt vetíti előre, hogy akkor lesz a felület és a ragasztó tapadási energiája a legnagyobb, amikor a teljes felületi feszültség komponensei hasonló százalékban polár és diszperz a felület és a ragasztó között. (4. ábra) [4].



4. ábra: Illusztráció a kölcsönhatásokról két fázis között, ha azonos százalékban (felső), vagy nem azonos százalékban (alsó) diszperz és polár komponense van a két fázisnak [5]

A felületek felületi energiáját számos felületkezeléssel lehet növelni. Az egyik ilyen felületkezelés a plazmával való felületkezelés.

#### 4. Felületkezelés plazmával

Az elmúlt ötven évben a plazmával való felület módosítás területe óriási növekedést mutatott. E bővülés nagy része az elmúlt évtizedben zajlott, ahol óriási érdeklődés keletkezett az felületek előkészítésének és változtatásainak különféle technikáival kapcsolatban. Napjainkban számtalan ipari alkalmazás létezik, például a festék tapadásának javítására, a polimer mátrix kompozitok belsejében és felszínén lévő kötések javítására és sok másra. Ezeknek a plazma technológiáknak a használata azon az alapelven alapszik, amely lehetővé teszi az anyag felületének felületi tulajdonságainak megváltoztatását, anélkül, hogy megváltoztatnánk az anyag többi tulajdonságát.

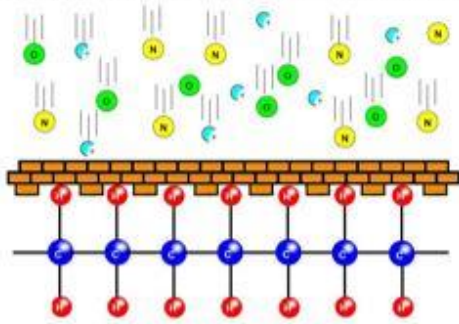
A légköri nyomású plazmák gyakorlati jelentőséggel bírnak sok alkalmazás tekintetében. Ez azért van, mert ellentétben az alacsony vagy nagy nyomású plazmával, nincs szükség a kamrában történő feldolgozásra annak biztosítására, hogy a megfelelő és következetes felületi módosításhoz egy bizonyos nyomást tartsanak fenn. Ezért, a légköri plazmák könnyen beépíthetők a gyártósorokba. Így nem kellenek a tökeigényes vákuum kamrák, amik az alacsony nyomás létrehozásához voltak szükségesek. A nem egyensúlyi légköri plazmák alkalmazása igen széles körű, mivel a funkcionáló gázok szabályozhatóan alkalmazhatók ipari gyártási folyamatokra, és a környezeti hőmérséklettől akár a 950 °C-ig terjedő hőmérsékleten működhetnek. A funkcionális követelmények teljesítéséhez a légköri plazma felszíni funkcionálás során alkalmazott feszültségeket alkalmazzák, amik 1kV-tól 20 kV-ig terjedhet. A felső határokbán a feszültség az UV sugárzás egyes hullámhosszait hozza létre, amelyek hozzájárulnak a szabad gyök létrehozásához, és ezután felszíni aktiválódáshoz és funkcionáláláshoz vezetnek. A légköri nyomású plazmák felületi funkcionálálását nagyrészt gördülő tekerces folyamatokhoz igazították, például csomagoló iparban. Ily módon a légköri plazmával való felület funkcionálizáció ugyanolyan hatásos lehet, mint a kamrában történő plazma kezelés. A légköri nyomású plazmák általi funkcionálálással kimutatták, hogy a felületi nedvesedés nem csak javul, hanem mind a kibocsátott felszíni szabad energia, amit átadtunk a felületnek, mind a kezelt minta szabad energiája megállapítható. Egyszerűen a levegő, mint funkcionáló közeg alkalmazásával a kezelési résben, például gyorsan elősegítheti a reaktív oxigénfajokat, hogy elősegítse az anyagok széles körének felületi oxidációját [2].

##### 4.1. Felület aktiválás

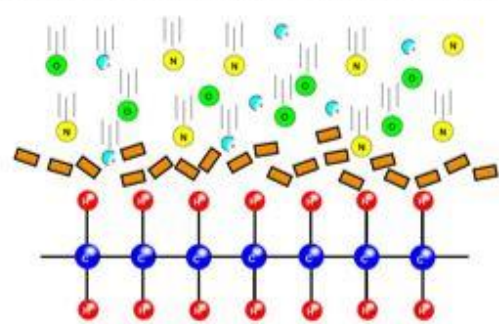
A plazma felületkezelés két elsődleges mechanizmussal rendelkezik a felületi reakciók szemszögéből. Az egyik egy fizikai reakció mechanizmus, amelyet ionos aktivitással végzünk. A

másik a szabad gyökök által létrehozott kémiai reakció mechanizmus. A fizikai reakciók során az ionos részecskék töltést és kinetikus energiát kapnak egy elektródából előállított elektromos tápegységből. A molekulák és az atomok (és a nyomelemek is) a célzott felületektől eltávolodnak, mivel az elektromos mező energiája átkerül ezekre az ionokra. Ez a bombázás növeli a molekuláris felületi érdességet és elősegíti határfelület tapadását. A plazmából származó kémiai reakció mechanizmusok szabad gyökös hatásokra támaszkodnak, amelyek a felületeken keletkeznek. Ezek a kémiaailag aktív szabad gyökök tulajdonképpen csökkentik a kémiai reakció aktiválási potenciálját, ami a felszíni anyag atomi méretű eltávolítását eredményezi. Általánosságban elmondható, hogy a felületi reakciómechanizmusokat a minta felületén található gázfázisú reakció elemek jellemzik [2].

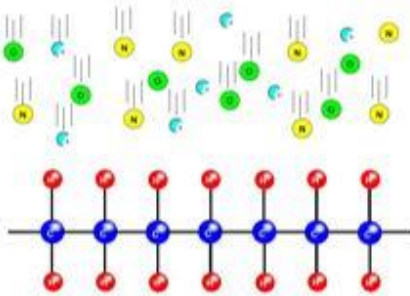
#### 1. A felületi szennyeződések feloldása



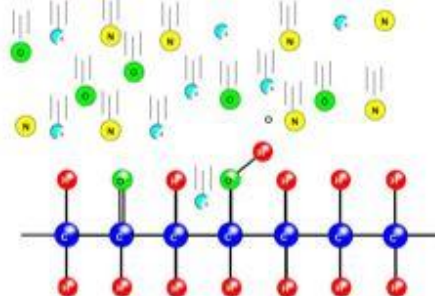
#### 2. A feloldott szennyeződések eltávolítása



#### 3. A felület aktiválása



#### 4. Funkcionális csoportok létrehozása



5. Ábra: A plazma felületkezelés hatásának lépései [6]

## 5. Összefoglalás

Összefoglalva a ragasztás elterjedt kötéstechológia a mai világban, fontos helyeken is egyre gyakrabban alkalmazzák, ahol lényeges, hogy jó minőségű kötés jöjjön létre. A ragasztás előtt a felületeket elő kell készíteni, amelyek nem csak a tisztítást foglalják magukban, hanem javítani kell a felületek nedvesedő tulajdonságait, mivel ha nem nedvesíti a ragasztó a felületet megfelelően, akkor romlik a kötés minősége. Az egyik tulajdonság, amely befolyásolja a nedvesedést a felületi feszültség, amelyet különböző felületkezelésekkel lehet javítani. Az egyik ilyen felületkezelés a légköri nyomáson működő plazma kezelés, amely gyors, hatékony és környezetkímélő. A felületet egyszerre tisztítja, valamint aktiválja, amely segíti a nedvesítést.

Jövőbeli kutatásunkban ütészálló polisztirolt fogunk kezelni légköri nyomású plazmával és ragasztási kísérleteket fogunk végrehajtani a kezelt felületeken.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával valósult meg.

Továbbá köszönjük a PlasmaTreat GmbH-nek és Barna Gábornak a jövőbeli kísérletekhez szükséges plazma felületkezelő berendezést, illetve a kapott szakmai segítséget.

## Irodalomjegyzék

- [1] Edward M. Petrie, Handbook of Adhesives and Sealants, McGraw-Hill Professional, 1999
- [2] Rory A. Wolf, Atmospheric Pressure Plasma for Surface Modification, Scrivener Publishing, 2013, ISBN 9781118547519 doi: 10.1002/9781118547519
- [3] Balla Sándor, Bán Krisztián, Bárdos András, Lovas Antal, Szabó Attila, Weltsch Zoltán, Járműanyagok, Typotex Kiadó, 2012.
- [4] CR, Models for Surface Free Energy Calculation, Academic research, 1999.
- [5] „Dispersive & polar parts of the surface energy and surface tension” Available: <https://www.dataphysics-instruments.com/knowledge/understanding-interfaces/dispersive-polar-parts/> [Megtekintés: 2018. 07.23.]
- [6] Plasmatreat felület aktiválási ismeretek, segédanyag [Megtekintés: 2018. 09.03.]
- [7] Divyansh Singh Patel, Abhilasha Singh, K. Balani, J. Ramkumar, Topographical effects of laser surface texturing on various time-dependent wetting regimes in Ti6Al4V, Surface and Coatings Technology, Volume 349, 2018, Pages 816-829, ISSN 0257-8972, <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.032>.
- [8] Zhiwu Xu, Zhengwei Li, Shijiang Zhong, Zhipeng Ma, Jiuchun Yan, Wetting mechanism of Sn to Zr50.7Cu28Ni9Al12.3 bulk metallic glass assisted by ultrasonic treatment, Ultrasonics Sonochemistry, Volume 48, 2018, Pages 207-217, ISSN 1350-4177, <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.05.036>.
- [9] Z.B. Chen, H. Bian, S.P. Hu, X.G. Song, C.N. Niu, X.K. Duan, J. Cao, J.C. Feng, Surface modification on wetting and vacuum brazing behavior of graphite using AgCu filler metal, Surface and Coatings Technology, Volume 348, 2018, Pages 104-110, ISSN 0257-8972, [Fhttps://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.039](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.05.039).

# PLAZMA- ÉS LÉZERSUGÁRRAL FELÜLETKEZELT ANYAGOK TOPOGRÁFIAI ELEMZÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

## MEASUREMENT POSSIBILITIES OF SURFACE MODIFICATED SUBSTRATES USING PLASMA AND LASER BEAM TECHNOLOGY

Berczeli Miklós <sup>1\*</sup>, Weltsch Zoltán <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

plazma  
lézersugár  
topográfia  
felületkezelés  
nedvesítés

### Keywords:

plasma  
laser  
topography  
surface treatment  
wetting

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember  
21.  
Átdolgozva 2018. október 27.  
Elfogadva 2019. március 4.

---

### Összefoglalás

Különböző, korszerű anyagok felületmódosítási eljárásai során felmerülnek olyan vizsgálati kérdések, amik az eddigi konvencionális kezelési módszerek során még nem jelentkeztek. Légköri nyomású plazma és femtoszekundomos lézersugaras felületkezelések esetén azonban már olyan fizikai, kémiai folyamatok zajlanak le a szubsztráton amik nagyon nehezen követhetőek. Annak érdekében, hogy megértsük az alapvető folyamatokat, amik akár atomi és molekuláris szinten zajlanak le különböző anyagtechnológiai vizsgálati eljárásra van szükség. A cikkben végrehajtott elemzésünkben azt vizsgáljuk, milyen lehetséges megoldások vannak a határfelületi rétegeken végbemenő jelenségek jellemzésére.

### Abstract

During the surface modification procedures of various modern materials new analysis methods arises. In case of atmospheric plasma and femtosecond laser beam surface treatments, there are physical and chemical processes occurring on the substrate that are very difficult to investigate. In order to understand the basic processes that take place at both atomic and molecular levels, new and various test methods are required. We look at the possible solutions to determine the phenomena occurring on the interface layers during the surface treatments.

---

## 1. Bevezetés

Napjaink korszerű járműiparában a hibrid anyagfelhasználások vették át a konvencionális alapanyagok terét. A járművek különböző területein a gyártók csak funkcióspecifikus anyagokat építenek be a szerkezet műszaki követelményeinek megfelelően. A tömegcsökkentés és gazdaságosság szintjének emelése érdekében a gyártók ezeket a vegyes anyagfelhasználási módokat alkalmazzák, hogy mindenhol csak azok az anyagtulajdonságok teljesüljenek amelyek feltétlen szükségesek. Nem elegendő azonban ezeket a kombinációkat megtervezni, foglalkozni kell ezek kötéstéchnológiai fejlesztésével. Erre egy innovatív megoldásnak bizonyul a lézeres vagy plazmasugaras felületkezelés. A kezelések végrehajtásán túl műszaki és minőségbiztosítási szempontok miatt feltétlen értékelni kell a változás fokát. Meg kell foglalmazni azokat a konkrét

anyagvizsgálatokat, amikkel kimutathatók és számszerűen vizsgálhatók a felületkezelések következményeként lezajló fizikai folyamatok. Ilyen anyagvizsgálati folyamat lehet a nedvesedési peremszögmérés, XPS (röntgen fotoelektron-spektroszkópia), SEM (pásztázó elektrónmikroszkópia). Azonban ahhoz, hogy ezekből a vizsgálati technológiákból következtetéseket és összefüggéseket vonhassunk le, meg kell vizsgálni azok működési mechanizmusát és a felületkezelések következményeként adódó mérési eredményeket.

## 2. Felületkezelési módszerek

Amikor a műszaki életben felületmódosításról vagy felületkezelésről beszélünk, rendszerint nem fizikai felületre gondolunk. A fizikai felület néhány atomsíkra kiterjedő réteg, amelyben az atomok koordinációs környezete az anyag belsejét jellemző koordinációs környezettől eltér. Emiatt itt számos tulajdonság, mint pl. az adszorpció jellemzők (gáz megkötő képesség, kémiai reaktivitás, oldékonysági viszonyok stb.) megváltozik. Maga a felületmódosítás ettől a fizikai képtől koncepciójában lényegesen eltér. A felület, amiről itt szó esik, tulajdonságait tekintve magának a tömbi anyagnak a tulajdonsága, és ezt helyileg, a felületen, vagy annak környezetében akarjuk módosítani. A változtatásnak mindig határozott műszaki célkitűzése van: a felületen, annak közelében olyan tulajdonságokat hozunk létre, amelyek - valamilyen kölcsönhatás szempontjából - úgy mutatkoznak, mintha az egész munkadarab ezzel a tulajdonsággal rendelkezne. Ez a változtatás azonban, az alkalmazott technológia természetéből adódóan, nem terjed ki az egész próbatestre, hanem csak egy hatásövezetre, amely a kérdéses műszaki célkitűzés szempontjából szóbajön. A felületmódosítások osztályozása többféleképpen lehetséges [1]:

- fizikai felület átalakítási módszerek: a fizikai módszereknél kémiai összetétel változás a felületen vagy annak közelében nincs,
- kémiai összetétel változás önmagában létrehozhat a felületen fizikailag is eltérő réteg-tulajdonságokat.

Megkülönböztetjük a felületmódosításokat aszerint is, hogy a felületen réteget hozunk létre (bevonatolunk) fizikai vagy kémiai módszerrel, vagy magát a felületi réteget alakítjuk át kémiai vagy fizikai folyamatokkal (esetleg mindkettővel). A két jelenségkör gyakran összemosódik. Osztályozhatjuk a felületmódosító eljárásokat a bevezetésük időrendje szerint is: Így például megkülönböztetünk:

- Hagyományos technológiákat: festés, fémes védőréteg: Cr, Ni, elektrokémiai módszerek,
- Modern technológiákat: PVD (fizikai gőzfázisú leválasztás), CVD (kémiai gőzfázisú leveálasztás), plazmaszórás, lézeres felületmódosítás, ionimplantáció, plazmasugaras felületmódosítás [1].

### 2.1. Felülettisztítás

A felülettisztítás különösen fontos olyan esetekben, ha a felületmódosítás egy réteg felvitelét jelenti (akár fizikai, akár kémiai módszerrel). A védőréteg felvitelének hatékonysága vagy a réteg élettartama ugyanis nagymértékben függ a réteg kielégítő tapadásától. Az előkészítés legtöbb esetben hagyományos, kémiai és fizikai tisztást jelent (zsírtalanítás, oldószeres, elektrolitikus tisztítás, a fizikai módszerek közül legismertebbek ultrahangos ill. a mechanikai tisztítás: pl. szemceszórás). E hagyományos módszerek azonban nem elegendőek, nem nyújtanak kellően tiszta felületet. Itt molekulárisan, vagy „atomi szinten tiszta felületekre van szükség [1, 2].

### 2.2. Lézeres felületkezelés

A lézeres felületkezeléseket három fő csoportra bontották először. Ezek voltak a hevítés (hőközlés), az olvasztás, és a szilárdítás. Ennek a csoportosításnak az alapelve azon alapszik, hogy a kezelés hatására a felület eléri-e az olvadáspontját, vagy az alatt marad. Egy elméletileg leginkább megalapozott elmélet szerint pedig két fő csoport van aszerint, hogy a hő hatására bekövetkező módosítás csak a szerkezet átalakítását jelenti-e vagy szándékosan módosítjuk a kémiai összetételét a kezelt felületnek. Szerkezetmódosító eljárások közé sorolható a lézeres felületedzés, a felületszilárdítás, a lézeres átolvasztás, a szerkezetfinomító átolvasztás, a homogenizáló átolvasztás, a zománcozás, illetve a sűrűsénövelő átolvasztás. A kémiai összetételt is



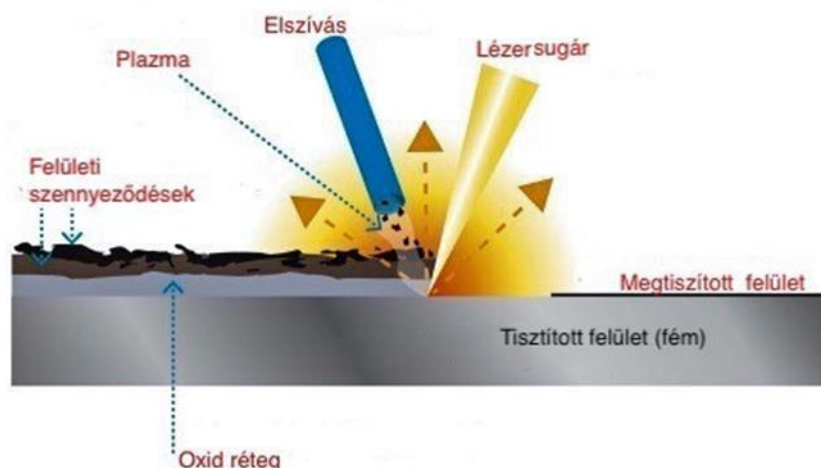
megváltoztató kezelések közé sorolhatók például a felületötvözés, a ráolvasztás, a diszperz részecskék bevitele.

A felületkezelés lényege, hogy a munkadarab közel teljes tömegének tulajdonságait változtatlanul hagyva, a felületi jellemzőket – s azok rétegmélység szerinti változását – az igénybevétel szempontjából szükséges, legoptimálisabb tulajdonságkombináció elérésével módosítsuk. A lézernyaláb és a munkadarab termikus kölcsönhatása során az elnyelt energia hőenergiává alakul az anyagunkban. Ennek következtében beszélhetünk az anyag megolvadásáról, párolgásáról és végül plazma állapotba kerüléséről [3-5].

### 2.2.1. Lézeres felülettisztítás

A felülettisztítás során a lézerfényt, mint munkaközeget használjuk fel. Ahogy a lézernyaláb eléri a felületet, a szennyeződés-, illetve az alatta található oxidréteg elnyeli a sugár energiáját (1. ábra). Emiatt ezek a rétegek maradéktalanul elpárolognak, vagy leválasztódnak a tiszta fém felületéről. Mivel a tiszta fém nem nyeli el a felületre érkező energiákat, nem károsodik a tisztítási folyamat során.

A lézeres felülettisztítás rendkívül gyors eljárást jelent, illetve kimagasló felületi minőség érhető el vele. Azonban az alkalmazásának számos más előnye is van, úgy mint a csökkent zajterhelés, a veszélyes anyagok használatának mellőzése (nem kell semmilyen kémiai vegyszert használni a tisztításhoz), ezáltal pedig a környezetterhelés mértékének csökkentése. A szigorodó szabályozások miatt egyre inkább előtérbe kerülnek a környezetbarát technológiák, a lézer alkalmazása pedig nem termel veszélyes hulladékot, így hosszú távon is fenntartható megoldást jelenthet. A kezdeti beruházás az egyszerű kezelésnek és a gyors munkasebességnek köszönhetően hamar megtérülhet [6].



1. ábra: Lézersugaras felülettisztítás elvi alapja [7]

### 2.3. Felületkezelés plazmával

A plazma feldolgozási módszerek két elsődleges mechanizmussal rendelkeznek a felületi reakciók szempontjából. Az egyik egy fizikai reakció mechanizmus, amelyet ionos aktivitással végzünk. A másik a szabad gyökök által létrehozott kémiai reakció mechanizmus. A fizikai reakciók során az ionos részecskék töltést és kinetikus energiát kapnak egy elektródából előállított elektromos tápegységből [8]. A molekulák és az atomok (és a nyomelemek is) a célzott felületektől eltávolodnak, mivel az elektromos mező energiája átkerül ezekre az ionokra. Ez növeli a molekuláris felületi érdességet és elősegíti határfelület tapadását. A plazmából származó kémiai reakció mechanizmusok szabad gyökös hatásokra támaszkodnak, amelyek a felületeken keletkeznek. Ezek a kémiailag aktív szabad gyökök tulajdonképpen csökkentik a kémiai reakció aktiválási potenciálját, ami a felszíni anyag atomi méretű eltávolítását eredményezi. Általánosságban elmondható, hogy a felületi reakciómechanizmusokat a minta felületén található gázfázisú reakció elemek jellemzik. Ezeket a reakciómechanizmusokat tekintetbe kell venni a gázfázisú plazmaparaméterek, például a

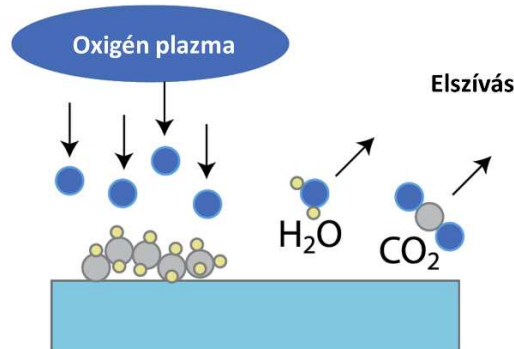


plazma teljesítménysűrűség vagy a plazma gázkeveréktől függetlenül. Természetesen ezek a paraméterek befolyásolják a felületi reakciók nagyságát, de nem befolyásolják az alapreakció mechanizmusát. A plazmával való felületi reakciómechanizmusok megvitatásakor az atomréteglerakódások specifikus leírása jól alkalmazható ezeknek a mechanizmusoknak a szemléltetésére. Jellemzően ezek a lerakódások elsőrendű jelöltek a konformációs fóliák növekedésére, amelyek az atomiszintű vastagságokat szabályozzák. Annak érdekében, hogy megértsük a felszínreakciók mechanizmusát, amely gázfázisú plazma atomi rétegben történő lerakódás során következik be, csak a fémoxidok vagy nitrdek lerakódásának vizsgálatára van szükség. A fémoxidok például kiváló minőségű, konformációs fóliákat biztosítanak oxigén alapú plazmák segítségével [9]. Számos módja van a felületek kezelésének: tisztítás (dekontaminálás, zsírtávolítás), aktiválás (tapadási vagy adhéziós tulajdonságok), maratás, funkcionizálás (elektromos vezetőképesség, korrózió elleni védelem, kémiai akadály stb.). A tisztítási és aktiválási lépések gyakran megelőzik a bevonatolást, mivel a felületi minőség meghatározza a bevonat minőségét [10].

A légköri nyomáson való működtetés vonzó gazdasági előnyei számos ipari, tudományos és akadémiai nemtermikus plazmaforrás kifejlesztését eredményezték. A legfontosabb minta feldolgozási alkalmazások közé tartozik a fémek és polimerek felszíni maratása. Ezek az eszközök képesek biológiai és kémiai anyagok lebontására, felületek felületi szennyeződésmentesítésére, valamint az instabil atommagok eltávolítására a felületekről. Ugyancsak hasznosak ökológiai technikákként a fémfelületek szerves szennyeződéseinek elpárologtatására, szemben a kémiai felületaktív anyagok és oldószerek használatával, az orvostechikai eszközök és felületek sterilizálására, valamint a keskeny szélességű kétdimenziós tekercsalapú anyagok funkcionálására [7].

### 2.3.1. Felülettisztítás

A szilárd anyagok felülete úgynevezett többrétegű szerkezet, amit az anyagok "határrétegének" neveznek. Ennek a határrétegnek a vastagsága függ az anyag eredeti molekuláris összetételétől és a környezeti hatások mértékétől. Alapvető funkcionális definíciójában a felületi tisztítás rendkívül összetett felületeken eltávolítja a szennyeződést. Ezek a szennyezések természetesen és technikai eljárásokkal is kialakíthatók. A természetben előforduló szennyeződések a felszíni oxidok, az elnyelt víz részecskék és a széntartalmú vegyületek formájában keletkező, atmoszférakusan jelen lévő elemek - például az oxigén, a szén és a hidrogén - hatása következtében alakulnak ki. Technológiailag bevezetett szennyező rétegek azok, amelyek egy korábbi felületkezelési vagy módosítási eljárás után találhatóak meg a felületen, például gördülést segítő olajok fémfóliák feldolgozásához vagy maradék oxidokhoz az üvegfelületek vizes öblítési eljárásait követően. Fontos megjegyezni, hogy sok szennyezettségi réteg fizikailag és / vagy kémiailag kötődhet a felülethez. A felületi tisztítás folyamata több lépést foglal magában, kezdve a plazmafajok aktiválásával, az elemeknek a minta felületéhez való eljutásával, ezeknek a fajoknak a felszíni reakciója, majd a felületi reakció eltávolításához a plazma reakcióterületről származó termékekkel való eltávolítása (2. ábra) [9].



2. ábra: Plazmasugaras felülettisztítás elve, szennyező molekulacsoportok eltávolítása [11]

### 3. Határfelületi jelenségek vizsgálatának lehetőségei

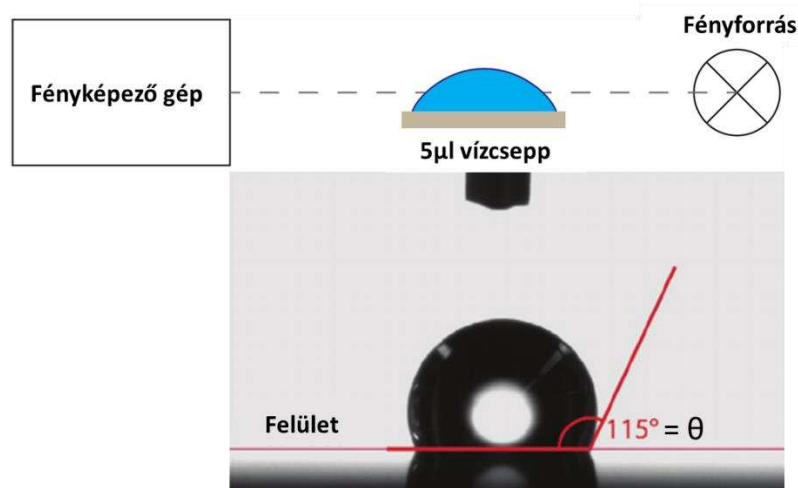
Minden szilárd felületnek van egy határfelülete. A lehetséges határfelületek közé tartoznak a szilárd-folyadék, szilárd-gáz vagy szilárd-szilárd anyagpárok, az adott állapottól függően. Lehetséges, hogy szilárd-plazma, tehát az anyag első halmazállapota és az anyag negyedik halmazállapota alkot egymással határfelületet, ha éppen plazmával kezeljük. A felszíni tulajdonságok célzottabb módosításai, mint például a jobb nedvesíthetőség, a kémiai kötés és a megnövekedett ellenjavító hatások kulcsfontosságúak a repülőgépipari, nanotechnológiai, nukleáris tudomány, a napelem, az elektronika és az ipari gyártás területén megvalósuló kereskedelmi megvalósítások szempontjából. Folyamatos erőfeszítések folynak a felületi tulajdonságok változásainak tanulmányozására, mivel ezek a különböző légköri plazma felületi módosításokra vonatkoznak. Az atmoszférikus plazmafelületi hatások mélyebb megértésére azonban szükség van, mivel a felületmódosítás ezen területe felgyorsul az iparban, és leginkább a molekuláris szint felett az atomi és nano méretekben. Ezeknek a nanoméretű módosulatoknak a fémfelületekre való jellemzése például általában röntgen fotoelektron-spektroszkópiával (XPS) és pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) valósítható meg. Az XPS az elsődleges eszköz, amivel ezeket a sekély mélységeket jellemezni lehet, mivel képes azonosítani a kémiai funkcionálisokat és meghatározni más felületi tulajdonságokat. Hatékonyan alkalmazható a vékony rétegű bevonatok kezelésének mélységeire, valamint a kötési profilok biztosítására. A SEM-analízis kiegészítő információt nyújt a felületi topográfia és a felületi morfológia változásairól [9].

#### 3.1. Nedvesedési mérések

Folyadékok, illetve közel hasonló nagyságrendű viszkozitással rendelkező anyagok - esetünkben például a forrasztanyagok - nedvesítő képességének mértékét legszemléletesebben a szilárd felületen való szétterülés esetén vizsgálhatjuk. A szilárd fázissal történő érintkezés során a folyadékcsepp és a szilárd fázis, annak egy kis részén, közös felületen kontaktál. Továbbá, a fajlagos felületminimumra való törekvés elve alapján a csepp alakja gömbsüveg lesz, ami egy kör mentén fog érintkezni a szilárd fázissal. A csepp által felvett egyensúlyi alaknak a közvetlen jellemzésére használatos mérőszám a peremszög ( $\Theta$ ), ami az érintkezési körvonalra merőleges és a folyadék/gáz határfelülettel párhuzamos egyenes, valamint a szilárd felület síkja közötti szög, vagyis a két fázis érintkezése mentén kialakuló illeszkedési szög [12].

A független felületi hatások elméletének értelmében a határfelületek tulajdonságait a legszélsőbb, atomnyi távolságra lévő rétegek (azok közül is leginkább a folyadékkal közvetlenül érintkező atomcsoportok) határozzák meg. Ezt a független felületi hatások elvének nevezzük [21]. Ezen elv elfogadása után könnyedén beláthatóvá válik az, hogy az esetleges szétterülés mértékét a szilárd test és a folyadék határfelületi molekulái között végbemenő kölcsönhatások határozzák meg. Ennek értelmében a szilárd fázis felületén létrehozott változások segítségével a nedvesítő képesség tudatosan tervezhető paraméterré válik.

A nyugvó csepp módszer alkalmas a felületi feszültség és a kontaktszög ( $\theta$ ) meghatározására. A nedvesedési peremszög meghatározásához a csepp fotózását alkalmazzák (3. ábra). A megfelelően nagy felbontású fotó segítségével a peremszög meghatározható (megszerkeszthető), ha érintőt húzunk a csepp kontúrvonalához az érintkezési pont közelében [13].



3. ábra: Nyugvócsepp módszeres nedvesedési pereszög kiértékelés vázlatja és a cseppen mért  $\theta$  szög értelmezése

### 3.2. Röntgen fotoelektron-spektroszkópia (XPS)

A röntgen fotoelektron spektroszkópia egy rendkívül érzékeny felületi analízis technika, amely alkalmas szilárd anyagok jellemzésére kb. 10 nanométer mélységben. A technika megmondja a felület elemi összetételét, de ezen elemek kötési energiaállapotát is. Ennek a technikának a széles körű diagnosztikai tartománya a rutinszerű használatához vezetett minden plazmával kapcsolatos felületi módosításnál.

A röntgen fotoelektron-spektroszkópiát (XPS) a kémiai analízis elektronmikroszkópiájának is nevezik (ESCA). A korábban tárgyalt számos felületi módosítási eredményre alkalmazható, mint pl. polimerizáció, felületi korrózió, fémtudományok, orvosi biológiai alkalmazások, mikroelektronika stb. Az XPS elve egy röntgensugárral indukált elektron kibocsátáson alapul, amelyet kinetikus energiájuk szerint jellemeznek. Ez a "fotoelektromos effektus" néven ismert, melynek során a fotoelektronokat eltávolítják a vizsgált minta felületéről röntgenfotonok gerjesztésével és egy elektron energia vizsgálóval jellemzik ezeket a fotoelektronokat. Az elemek kinetikus energiáit és azok kötődési (oxidatív) állapotát vizsgálja. A hélium és a hidrogén kivételével az összes elem detektálható röntgen fotoelektron-spektroszkópiával. Amikor a röntgensugár eltalál egy atomot, akkor elektronok bocsájtódnak ki az elektronfelhő belső szintjéből. A kinetikus energia függ a becsapódó foton energiájától, az elektronok kötési energiájától és a környezeti nyomásszinttől. Ilyen körülmények között csak a külső felületréteg az, amelyből az elektronok el tudnak szabadni bármennyi energiavesztéssel. Emiatt az röntgen fotoelektron-spektroszkópia mérési mélysége 50 atomnyi rétegre korlátozódik (tíz nanométer).

A röntgen fotoelektron-spektroszkópia képalkotással mikrostrukturált felületelemzést lehet feltárni. Az XPS képalkotás hasznos módszer a kémiai anyagok eloszlásának meghatározására a minta felületén. A technika nagyon korai módszerei magukban foglalják az XPS leképezés használatát, melynek során egy röntgensugár szondával átvizsgáljuk a mintafelületet, és a felületi képet pixelről pixelre alakítjuk ki, ahogy az analízis folt végig halad a mintán. Vannak más módszerek is, amelyek lehetővé teszik egy meghatározott látómező párhuzamos felismerését a kötési energia meghatározott tartományán. A detektor kialakításának további fejlődése olyan impulzusszámlálás kvantitatív módszereit eredményezi, amelyek képesek a nagy felbontású XPS képeket kvantitatívan meghatározott intenzitással ellátni. Az XPS képalkotó elemzéssel végzett kezdeti lépése az érdekelt mintán lévő különböző kémiai elemek feltérképezése. Ennek a képalkotásnak az elsődleges elve az, hogy egy teljes XPS spektrumot gyűjtünk össze egy kép minden pixelén. A képalkotó szoftver lehetővé teszi a vizsgált területek spektrumának kinyerését és a kémiai állapot képének rekonstrukcióját kémiai feltérképezéssel.

Az elemi képalkotás megköveteli, hogy az érzékelő állandó energia szintre legyen állítva, hogy az elemek (vagy kötési állapotok) egymást követő képalkotása megtörténjen. A jellemző röntgenintenzitást a minta által választott pozícióhoz viszonyítva mérjük. A röntgensugár intenzitásának változása bármely energiaértéknél megadja a fókuszselem koncentrációját a minta

felületén. Jellemzően több feltérképezést egyidejűleg rögzítenek a képintenzitás felhasználásával, a jelen esetben azonosított elem(ek) helyi koncentrációjának függvényében. Kb. 1 mikron felbontás lehetséges [9].

### 3.3. Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM)

A katódból kilépő elektronokat elektromos tér gyorsítja a szükséges energiára. A pásztázó elektronmikroszkópban elektronok maximális energiája általában  $E_{\max} = (30 - 40)$  keV. A legtöbb mikroszkópban az elektronok energiája szabályozható. A forrásból kilépő nyalábot elektromágneses elven működő lencse fókuszálja. Az elektronmikroszkópokban alkalmazott elektron lencsék a Lorentz-erőhatás alapján működő mágneses lencsék. A lencse fókusz távolsága az elektromágneses áramával szabályozható. A nagyítástól függően a nyaláb átmérője a mintán az objektív lencse segítségével változtatható. A legjobb mikroszkópok esetén a nyaláb minimális átmérője a mintán  $\sim 1$  nm. Sokszor az objektív lencsével összeépített pásztázó tekercsek segítségével a nyaláb sorról sorra végigpásztázza a minta felületét. Az elektronnyaláb a mintából különböző „termékeket” vált ki. A SEM esetében általában a szekunder elektronokat (SE), a visszaszórt elektronokat (backscattered electron = BSE) és a röntgen fotonokat használjuk a kép leképezésére [14].

#### 3.3.1. A visszaszórt (backscattered) elektronkép sajátosságai

A visszaszórt elektronok átlagos energiája a nyaláb energiájának fele. Ezért, mivel a visszaszórt elektronok energiája viszonylag nagy ( $E \sim 15$  keV), összegyűjtésük nehezebb, mint a kis energiájú szekunder elektronoké. A visszaszórt elektronok esetén a gerjesztett térfogat nagyobb, mint a nyaláb átmérője a minta felületén, ezért a maximális felbontás általában kisebb, mint a szekunder elektronok esetén. Ugyanakkor, a visszaszórt elektronok hozama függ annak az atomnak a rendszámától (elektronszámától), amelyikről szóródik. Ezért a visszaszórt elektron kép ún. Z-kontrasztot mutat. Ahhoz, hogy a legjobb BSE képeket tudjuk előállítani polírozott felületű minták szükségesek, ahol nem jelenik meg a morfológia, csak az átlagrendszám különbség [14].

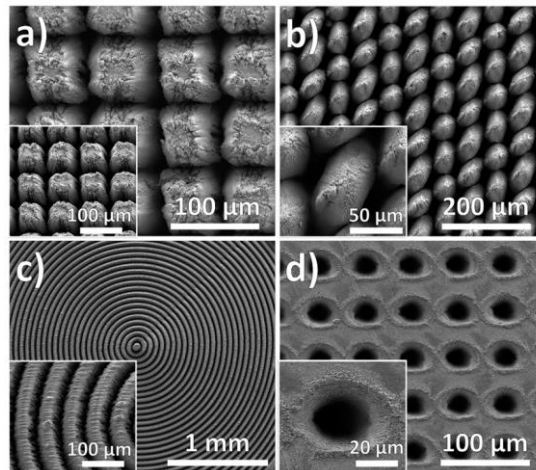
#### 3.3.2. Röntgen spektroszkópia

A pásztázó elektronmikroszkópokat gyakran felszerelik röntgendetektorral is. A röntgen detektorral az elektronnyaláb által kiváltott röntgen fotonokat detektáljuk. A röntgen fotonok energiája jellemző arra az atomra, amelyből kiváltódott. A kapott spektrum tehát tükrözi a minta atomi összetételét. Ez az energia diszperzív röntgen mikroanalízis alapja (energy dispersive X-ray microanalysis = EDX). A spektrumon kirajzolódó csúcsok helyéből azonosíthatjuk a mintában található elemeket. A csúcsok területe pedig az egyes elemek mennyiségével függ össze [14].

#### 3.3.3. A szekunder elektron kép sajátosságai

A pásztázó mikroszkópokban általában a szekunder elektron képet használják. A nyaláb által a külső elektronhéjakról kilökött szekunder elektronok energiája széles eloszlású, de kis energiával rendelkeznek ( $E < 50$  eV), így ezek az elektronok csak kis mélységből (1 - 10 nm) érik el a felszínt. Ezért a szekunder elektron kép elsősorban a felület közeli vékony rétegről hordoz információt.

Mint ahogy a pásztázó elektronmikroszkóp mélységélessége fordítottan arányos a nagyítással, ezért a szekunder elektron kép sajátossága, hogy kis nagyítás esetén nagy mélységélesség érhető el. A megfelelő beállításokkal részletes 3D minőségű képeket kaphatunk. A SE segítségével alkotott képeket gyakran alkalmazzák a felületi morfológiai vizsgálatokhoz [14]. A szekunder elektronok segítségével megvizsgálhatjuk a felületen létrejövő elváltozásokat (4. ábra).



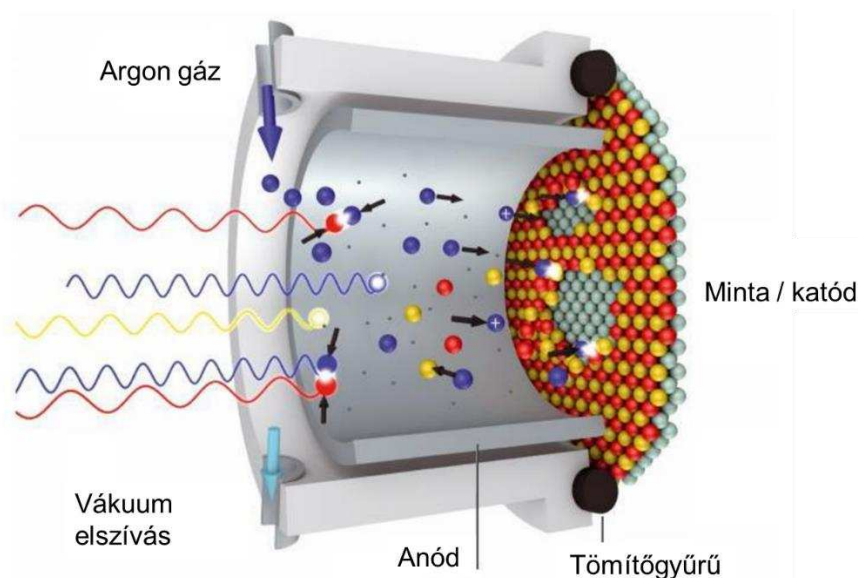
4. ábra: Szekunfer elektronos képalkotás példája a felületi kezelések, mikrostruktúrák elemzésére, a): négyzet pilléres struktúra, b): hengeres pillér struktúra, c): koncentrikus körök struktúra, d): felületi furatok ) [15]

### 3.4. Gyűrűszerűen gerjesztett plazma kisüléssel leválasztó optikai emissziós spektrometria (GDOES)

Gyűrűszerűen gerjesztett plazma kisüléssel leválasztó optikai emissziós spektrometria (angolul: Glow Discharge Optical Emission Spectrometry, röviden: GDOES) egy minőségi és mennyiségi összetétel elemzésre alkalmas eljárás fémes és nem fémes anyagok esetében egyaránt. A módszer lehetővé teszi a minta elemi összetevőinek mérését valamint a mélységi elemzést és a rétegstruktúrák vizsgálatát. Az így analizálható rétegek vastagsága 50 nm és néhány száz µm között változhat. A vizsgálatra alkalmas anyagok közé tartoznak fémek, félvezetők, üveg, kerámiák és polimerek [16].

A fényenergia forrása egy Grimm típusú kibocsátó cső, amely jellemzője az elektródák különleges elhelyezése. Az egyenáram két elektródája egy üreges henger alakú anódból és egy katódból épül fel. A mintadarab közvetlenül a katódra kerül, és így az is katódként funkcionál. A darabnak, egy tömítő gyűrű felületén jól kell zárnia a teret, hogy vákuumot lehessen generálni, így a vizsgálandó mintán megfelelően sima sík felületet, kell kialakítani. Plazmagázként legtöbbször argont használnak, azonban olyan gázok is alkalmazhatók, mint a neon vagy az argon és hidrogén keveréke [16].

A fénykibocsátó forrás vákuumterét alacsony nyomású argonnal töltik fel. Az üreges anód és a katód (vagyis a minta) közötti egyenfeszültség az argon atomokat ionizálja, plazmát létrehozva. Az argon kationok ekkor a minta negatív felülete felé gyorsulnak, és kiütnek néhány atomot a vizsgálandó felületből. Ezek a részecskék a plazmába kerülve nagyenergiájú elektronokkal ütköznek. Az ütközések során az atomok egy magasabb, gerjesztett energiaszintre jutnak, amelyről alapállapotba visszaesve karakterisztikus hullámhosszú fényt bocsátanak ki (5. ábra). A spektrométer a fényt a spektrális komponenseire bontja, amelyeket az érzékelő rendszerből megfelelő frekvenciánként és intenzitásként szolgáltatja az információt az adatok feldolgozásához. Az egyes hullámhosszokon érzékelhető intenzitás arányos a megfelelő elem mennyiségi előfordulásával a plazmában, amelyet az etalonokkal elvégzett kalibráláskor beállított erősítési szintek segítenek hitelessé tenni [16].



5. ábra: Porlasztó folyamat a fénykibocsátó forráson belül. Sárga/piros gömbök: minta atomjai; kék gömbök: argon atomok vagy kationok [16]

#### 4. Összefoglalás

A plazma- és lézersugaras felületkezelések hatását különböző alapanyagok felületén célszerű több, különböző vizsgálati módszerrel elemezni. A topográfiai módosulások és a kezelések hatására létrejövő változások mérésére megfelelők lehetnek az alábbi módszerek:

- felületi nedvesedés mérés: ez a módszer egy gyors, közvetlen visszacsatolást ad a felület nedvesedési jellemzőiről és a határfelületi energiák nagyságáról,
- XPS vizsgálattal a határrétegben megváltozott funkcionális molekulacsoportok mennyisége és azok milyensége mérhető, így atomi szinten vonhatunk le következtetést a kezelések hatásáról,
- SEM mérések esetén leginkább a szekunder elektronok képalkotását lehet hatékonyan kihasználni a szubsztrátok topográfiájának jellemzésére, a röntgen eredmények megtéveszthetők lehetnek, hiszen az XPS-el szemben nagyon anyagmélységről tér vissza a sugárzás, ami számunkra már érdektelen és csak hátrányos lehet,
- GDOES legnagyobb előnye miszerint képes a felületen lévő oxigén, nitrogén és hidrogén csoportok mennyiségének a mérése.

A jövőben elvégzendő kutatásinkban ezeket a vizsgálati módszereket szeretnénk felhasználni annak érdekében, hogy megértsük a fémek és a polimerek felületkezelése esetén a topográfia változásának mechanizmusát és az atomi szinten lezajló fizikai folyamatokat.

#### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00014 pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával valósult meg.

Köszönöm a támogatást a Nemzeti Tehetség Program keretében, az Emberi Erőforrások Minisztériuma támogatásával, az Emberi Erőforrás Támogatáskezelő lebonyolításban megvalósult Nemzet Fiatal Tehetségeiért Ösztöndíjpályázatának. (pályázat azonosító jele NTP-NFTÖ-18-B-0301)

#### Irodalomjegyzék

- [1] Balla Sándor, Bán Krisztián, Bárdos András, Lovas Antal, Szabó Attila, Weltsch Zoltán, Járműanyagok, Typotex Kiadó, 2012.
- [2] Balla Sándor, Bán Krisztián, Dömötör Ferenc, Kiss Gyula, Markovits Tamás, Vehovszky Balázs, Pál Zoltán, Weltsch Zoltán, Járműszerkezeti Anyagok és Technológiák I., Budapest, 2011.

- [3] Dr. Buza Gábor: Lézersugaras technológiák I., Typotex Kiadó, 2012.
- [4] Dr. Buza Gábor: Lézersugaras technológiák II., Typotex Kiadó, 2012.
- [5] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés, Erdélyi Múzeum-Egyesület, 2007.
- [6] <https://www.fort.hu/technologiak/fort-laser-lezeres-felulettisztitas.html> (Megtekintve: 2018.10.05.)
- [7] <https://www.fort.hu> (Megtekintve: 2018.10.15.)
- [8] H Conrads and M Schmidt, Plasma generation and plasma sources, INP Greifswald, Institut für Niedertemperatur-Plasmaphysik e.V., Friedrich Ludwig-Jahn-Str. 19, D-17489 Greifswald, Germany, 2000
- [9] Rory A. Wolf, Atmospheric Pressure Plasma for Surface Modification, Scrivener Publishing, 2013, ISBN 9781118547519 doi: 10.1002/9781118547519
- [10] Claire Tendero, Christelle Tixier, Pascal Tristant, Jean Desmaison, Philippe Leprince, Atmospheric pressure plasmas: A review, Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, Volume 61, Issue 1, 2006, Pages 2-30, ISSN 0584-8547,
- [11] <http://archive.plasticsdecorating.com/> (Megtekintve: 2018.9.10.)
- [12] Z. Weltsch, A. Lovas, J. Takács, Á. Cziráki, G. Tichy, A. L. Tóth, L. Illés (2010): Wetting Ability of Ag Based Molten Alloys on Graphite Substrate, Solid State Phenomena, Vol. 159, pp.117-120
- [13] Weltsch Zoltán (2008): Fémolvadékok és szilárd kerámiafázisok közötti nedvesedés vizsgálata nyugvó csepp módszer segítségével, diplomamunka, BME-KSK JJT
- [14] <http://szft.elte.hu/oktat/www/Mscfizikalabor/meresleirasok/SEM3.pdf> (Megtekintve: 2018.07.14.)
- [15] Sojoudi, Hossein & Wang, Minghui & Boscher, Nicolas & McKinley, Gareth & Gleason, Karen. (2015). Durable and Scalable Icephobic Surfaces: Similarities and Distinctions from Superhydrophobic Surfaces. Soft Matter. 12. 10.1039/C5SM02295A.
- [16] Spektruma Analytik GmbH. Fabrikzeile 21. 95028 Hof, Deutschland, Használati útmutató részlet. (Megtekintve: 2018.07.02.)



# 3D NYOMTATOTT PRÓBATESTEK MECHANIKAI VIZSGÁLATA

## MECHANICAL TESTING OF 3D PRINTING SPECIMENS

Ádám Balázs<sup>1\*</sup>, Polgár Balázs<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

### **Kulcsszavak:**

3D nyomtatás  
PLA  
FDM/FFF  
nyomtatási paraméterek  
mechanikai tulajdonságok

### **Keywords:**

3D printing  
PLA  
FDM/FFF  
print settings  
mechanical properties

### **Cikktörténet:**

Beérkezett 2018. augusztus 7.  
Átdolgozva 2018. március 8.  
Elfogadva 2019. március 19.

### **Összefoglalás**

3D nyomtatásnál fontos a megfelelő beállítások megválasztása, mert befolyásolni tudják a nyomtatott termék mechanikai szilárdságát. PLA szálból FDM/FFF típusú nyomtatóval próbatestek lettek kinyomtatva három hőmérsékleten, két sebességgel, és két felépítési struktúrával. Az eredmények azt mutatták, hogy az építési szálorientáció hatása a legnagyobb, kisebb, de jól kimutatható a hőmérséklet hatása, és nem egyértelmű, így további vizsgálatokat igényel a sebesség hatásának pontosítása.

### **Abstract**

In 3D printing, it is important to choose the right settings because they can influence the mechanical strength of the printed product. From PLA fiber, FDM/FFF type printer was used to print specimens. The changing parameters were three temperatures, two speeds, and two building structure. The results showed that the impact of the construction of fiber orientation was the greatest. The effect of temperature is less influencing, but it is well demonstrated. The effects of speed is not clear, so further studies are required.

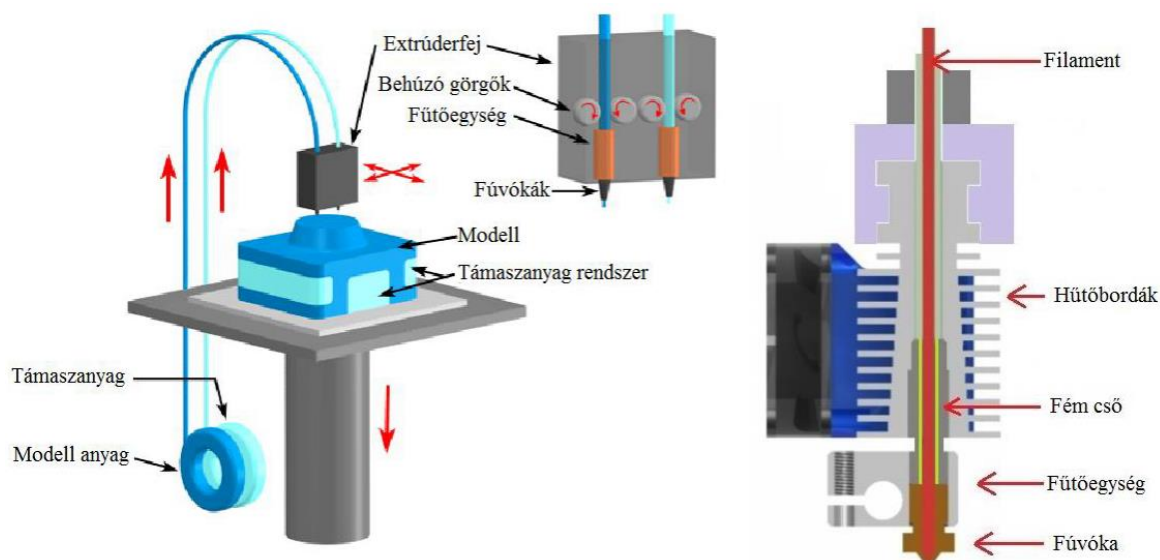
## 1. Bevezetés

A gyors prototípusgyártás, vagy elterjedtebb nevén 3D nyomtatás napjainkra nemcsak egyre népszerűbbé, hanem egyúttal elérhetőbbé is vált. Már nem csak a nagyobb vállalatok engedhetik meg maguknak, hogy vizuális modelleket, funkcionális prototípusokat, gyors szerszámelőállítás [1] valósítsanak meg, hanem magánszemélyek is vásárolhatnak az elérhető árral rendelkező 3D nyomtatók közül, és így saját maguk is előállíthatnak különböző dekor termékeket, ajándéktárgyakat. A minőség azonban ugyanolyan fontos, bármilyen típusú felhasználásról van szó, ezért nagyon fontos, hogy megvizsgáljuk a rendelkezésre álló nyomtatók beállítási lehetőségeit és természetesen az adott berendezéshez használható nyomtatóanyagokat is.

Többféle 3D nyomtatási technológia van, ezek lényege, hogy a legyártani kívánt termék virtuális modelljét a nyomtató szoftvere rétegekre darabolja, majd valamilyen eljárással újra felépíti rétegről rétegre [2]. A különböző technológiák közül az FDM (Fused Deposition Modelling), vagy FFF (Fused Filament Fabrication) névvel ellátott eljárás az, amit egyaránt használ az ipar és a magánszektor, mert a gyártók különböző minőségű és árú termékeket hoznak forgalomba, lehetőséget adva a magánszemélyek részére is a vásárlásra, ami nagyban hozzájárult a 3D nyomtatás népszerűségének növeléséhez.

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76 516 395  
E-mail cím: adam.balazs@gamf.uni-neumann.hu

Az FDM/FFF technológia működését, és a nyomtatófej felépítését az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Az FDM/FFF gyártástechnológia működési elve és felépítése [1]

A feltekercselt hőre lágyuló polimer szál behúzó görgők segítségével jut el a fűtött nyomtatófejbe, ahol ömledék állapotba kerül és a fűvókán keresztül a nyomtató a megadott helyre fekteti le a megömlesztett szálát. Egy réteg elkészítése után a tálca lassabban süllyed és a síkban szabadon mozgó fej elkezd lefektetni a következő réteg szálait. Ha a nyomtató rendelkezik két fejjel, akkor lehetőség van támaszanyag használatára, vagy többszínű termék nyomtatására.

A legtöbb nyomtatóhoz a gyártó felkínál egy úgynevezett gyári beállítást, ami a nyomtatás optimális minőségét biztosítja, de természetesen van lehetőségünk a paramétereket módosítani. A nyomtatás hőmérsékletének, sebességének a megváltoztatásával befolyásolni tudjuk a korábbi és a friss rétegek közötti hőátadást, ami befolyásolja az összehegedési folyamatokat, a zsugorodást, és kristályos anyagoknál a kialakuló kristályszerkezetet. De ugyanilyen fontos, hogy a szálakból milyen módon építjük fel a terméket, milyen irányokat, orientációt alkalmazunk. Ezeknek a paramétereknek a megfelelő megválasztásával növelni tudjuk a nyomtatott tárgy minőségét, esztétikáját és mechanikai szilárdságát is.

A nyomtatáshoz többféle alapanyag használható, az FDM/FFF technológia egyik kiemelkedő anyaga a PLA (Poly-Lactic Acid), a politejsav. A PLA biopolimer, ami azt jelenti, hogy természetes anyagokból állítható elő, és ipari körülmények között, magas páratartalom és hőmérséklet mellett komposztálással biológiailag lebomló polimer. Napjainkban a környezetvédelem egyre fontosabb szerepet játszik, ráadásul a mechanikai tulajdonságai (60 MPa húzószilárdság, 3 GPa rugalmassági modulus) is kedvezőek, ezeknek köszönhetően elterjedt nyomtató alapanyaggá vált. [3-5]

A PLA részben kristályos, hőre lágyuló poliészter, előállításának az alapja a tejsavas erjesztés, a fermentálás. Két izomerje fordul elő, az L-laktid és a D-laktid. A kereskedelmi forgalomban kapható PLA anyagok kopolimerek, melyek L-laktidot (PLLA, Poly-L-Lactic Acid) és D,L-laktidot (PDLLA, Poly-D,L-Lactic Acid) is tartalmaznak. Ezek különböző arányai miatt eltérő tulajdonságokkal rendelkeznek. [4-7]

Jelen cikkünkben kereskedelmi forgalomban kapható PLA nyomtatószálból, különböző nyomtatási paraméterekkel készült próbatestek vizsgálatát végeztük el, arra keresve a választ, hogy a különböző nyomtatási hőmérsékletek, sebességek és építési orientációk alkalmazása hogyan befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat.

## 2. Kísérleti rész

### 2.1. Alapanyag

A nyomtatószálak közül a Filament 1,75 mm átmérőjű, zöld színű PLA szálra esett a választás, ami a Bitshapes Webáruházon keresztül lett megrendelve. [8]

### 2.2. Nyomtató

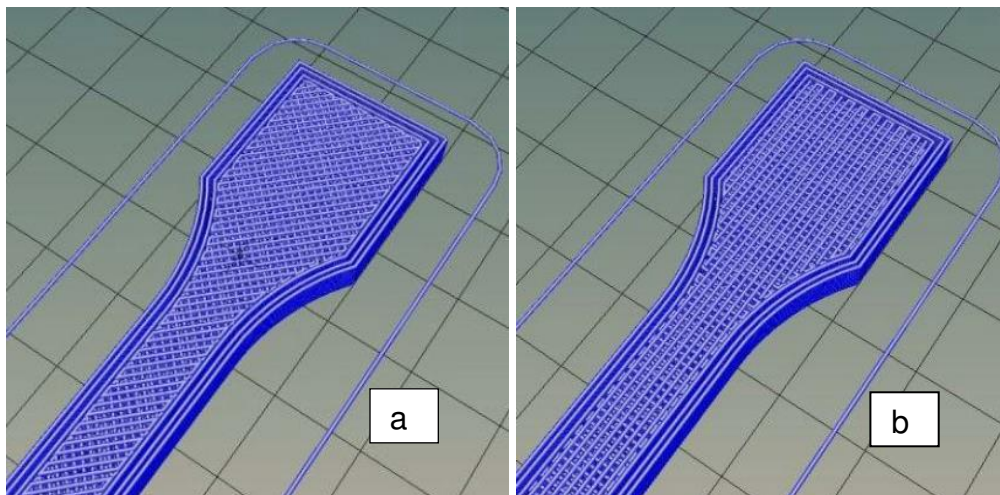
A nyomtatáshoz a Neumann János Egyetem Anyagtechnológia Tanszék Craftbot PLUS típusú FFF technológiával működő 3D nyomtatóját használtuk. A nyomtató X és Y irányban 4 mikron, Z irányban 2 mikron pontossággal tud mozogni, a rétegek vastagsága 50 és 300 mikron között állítható. A nyomtatási tér alapterülete 250x200 mm, magassága 200 mm. A nyomtató 1,7 mm átmérőjű szálát képes feldolgozni, a maximális nyomtatási sebesség 200 mm/s, és a nyomtatófej fűvóka átmérője 0,4 mm. Az elérhető maximális hőmérséklet a nyomtatófej esetén 250°C, a nyomtatótálcánál pedig 110°C. [9]

### 2.3. Nyomtatási paraméterek

A vizsgálatokhoz két különböző felépítési struktúra, két nyomtatási sebesség, és három nyomtatási hőmérséklet lett kiválasztva. Az első struktúránál az egyik réteg megegyezik a próbatest hossz tengelyével, a másik merőleges rá, így építve fel a vizsgálandó darabot, elnevezése 90°-os orientáció. A második struktúránál az egyik réteg 45°-os, a rá következő erre szintén merőleges, elnevezése 45°fokos orientáció. A két sebesség 40 és 60 mm/s. A három hőmérséklet pedig 205, 215 és 225°C volt.

Egy beállításból öt darab szakító és öt darab ütés-hajlító próbatest került nyomtatásra, vizsgálati keresztmetszetük 4x10 mm. A beállítások elnevezése tartalmazza először az orientációt, majd azt követi a sebesség, végül pedig a hőmérséklet. Például a 90°-os orientációjú, 60 mm/s-os sebességgel és 225°C-on gyártott próbatest jelölése 90-60-225, a 45°-os orientációjú, 40 mm/s-os sebességgel és 205°C-on gyártott próbatest jelölése pedig 45-40-205.

A két nyomtatási struktúra a 2. ábrán látható.



2. ábra. Nyomtatási struktúrák, a) +45/-45°, b) 0/90°

### 2.4. Vizsgálati eljárások

A nyomtatott próbatesteken szakító és Charpy ütés-hajlító vizsgálatokat végeztünk a Neumann János Egyetem akkreditált Anyagvizsgáló és Méréstechnikai Laboratóriumában. A szobahőmérsékleten végzett szakító vizsgálatához Instron 3366 univerzális vizsgálóberendezést (vizsgálati sebesség 50 mm/perc), a Charpy ütés-hajlító vizsgálatokhoz Ceast Impactor II ütőgépet használtunk (5 kJ-os kalapács). [10, 11]

### 3. Eredmények és kiértékelés

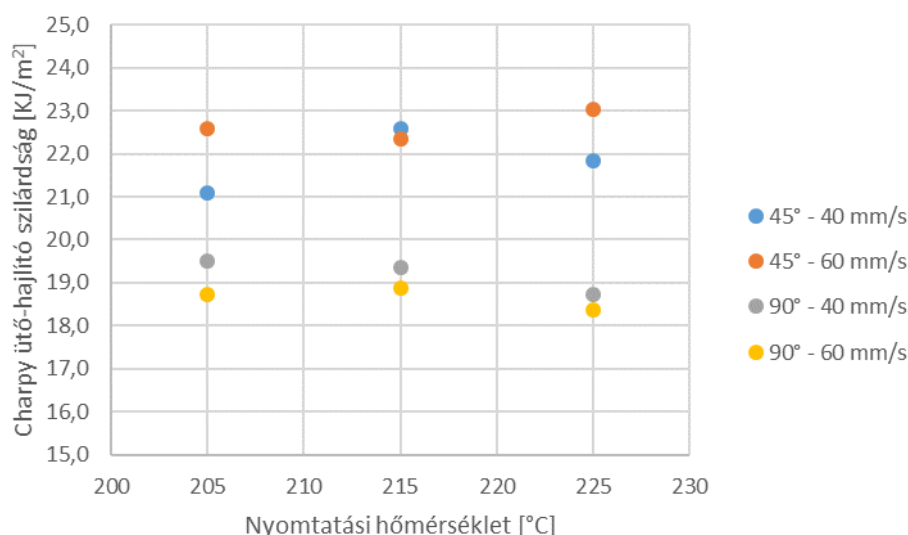
#### 3.1. Ütő-hajlító szilárdság

Az 1. táblázatban láthatóak a különböző nyomtatási beállítások során mért ütő-hajlító szilárdság értékek átlag és szórás eredményei.

1. Táblázat. Charpy ütő-hajlító szilárdság eredményei

| Nyomtatási beállítás | Ütő-hajlító szilárdság    |                            |
|----------------------|---------------------------|----------------------------|
|                      | átlag [ $\text{kJ/m}^2$ ] | szórás [ $\text{kJ/m}^2$ ] |
| 45-40-205            | 21,1                      | 1,8                        |
| 45-40-215            | 22,6                      | 0,9                        |
| 45-40-225            | 21,9                      | 1,4                        |
| 45-60-205            | 22,6                      | 1,3                        |
| 45-60-215            | 22,3                      | 2,2                        |
| 45-60-225            | 23,0                      | 3,2                        |
| 90-40-205            | 19,5                      | 7,6                        |
| 90-40-215            | 19,4                      | 1,3                        |
| 90-40-225            | 18,7                      | 2,4                        |
| 90-60-205            | 18,7                      | 1,0                        |
| 90-60-215            | 18,9                      | 0,7                        |
| 90-60-225            | 18,4                      | 2,2                        |

A 3. ábra szemlélteti az ütő-hajlító szilárdság változását a hőmérséklet, az orientáció és a nyomtatási sebesség függvényében.



3. ábra. Charpy ütő-hajlító szilárdság változása

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a 45°-os orientáció alkalmazásával nagyobb ütő-hajlító szilárdság érhető el, rugalmasabban viselkedik, mint a 90°-os, és jól láthatóan el is különül egymástól a két struktúra. A 90°-os orientáció esetén a hőmérséklet és a sebesség növelése kismértékben csökkentette az ütő-hajlító szilárdságot, míg 45°-nál a paraméterek növelésének hatása nem egyértelmű, de a tendencia növekvő, bár ennek igazolására több, különböző hőmérsékleten való nyomtatás eredményeire lenne még szükség.

### 3.2. A szakító vizsgálat eredményei

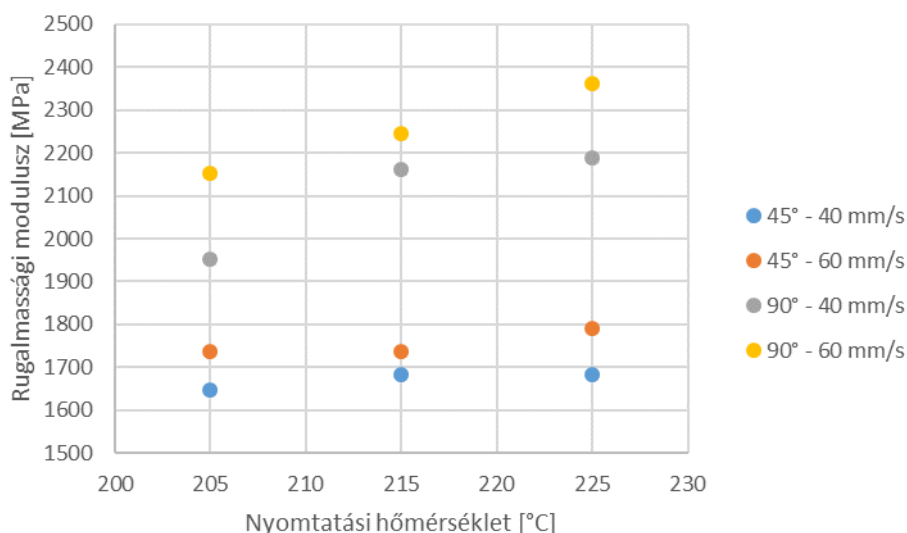
A 2. táblázatban láthatóak a szakító vizsgálat eredményei, a különböző nyomtatási beállítások mérése során kapott húzó rugalmassági modulusz, szakító szilárdság és szakadási nyúlás értékek átlag és szórás eredményei.

2. Táblázat. A szakító vizsgálat eredményei

| Nyomtatási beállítás | Rugalmassági modulusz |              | Szakító szilárdság |              | Szakadási nyúlás |            |
|----------------------|-----------------------|--------------|--------------------|--------------|------------------|------------|
|                      | átlag [MPa]           | szórás [MPa] | átlag [MPa]        | szórás [MPa] | átlag [%]        | szórás [%] |
| 45-40-205            | 1646                  | 30,8         | 51,3               | 3,8          | 3,9              | 0,33       |
| 45-40-215            | 1684                  | 23,2         | 55,4               | 1,9          | 4                | 0,07       |
| 45-40-225            | 1684                  | 23,2         | 55                 | 2            | 4,1              | 0,09       |
| 45-60-205            | 1738                  | 239,3        | 52,1               | 1            | 3,8              | 0,22       |
| 45-60-215            | 1738                  | 239,3        | 54,8               | 0,7          | 3,7              | 0,07       |
| 45-60-225            | 1792                  | 190,9        | 55,6               | 1,6          | 3,9              | 0,11       |
| 90-40-205            | 1952                  | 249,2        | 48,1               | 1,5          | 3,5              | 0,22       |
| 90-40-215            | 2161                  | 66,2         | 47,4               | 1,2          | 3,3              | 0,12       |
| 90-40-225            | 2189                  | 91,7         | 50                 | 1,4          | 3,4              | 0,08       |
| 90-60-205            | 2154                  | 65,4         | 46,5               | 0,9          | 3,3              | 0,07       |
| 90-60-215            | 2246                  | 110,5        | 48,4               | 1,3          | 3,4              | 0,07       |
| 90-60-225            | 2362                  | 51,3         | 48,9               | 0,7          | 3,3              | 0,09       |

### 3.3. Rugalmassági modulusz

A 4. ábra mutatja a rugalmassági modulusz változását a hőmérséklet, a nyomtatási sebesség, és az orientáció függvényében.

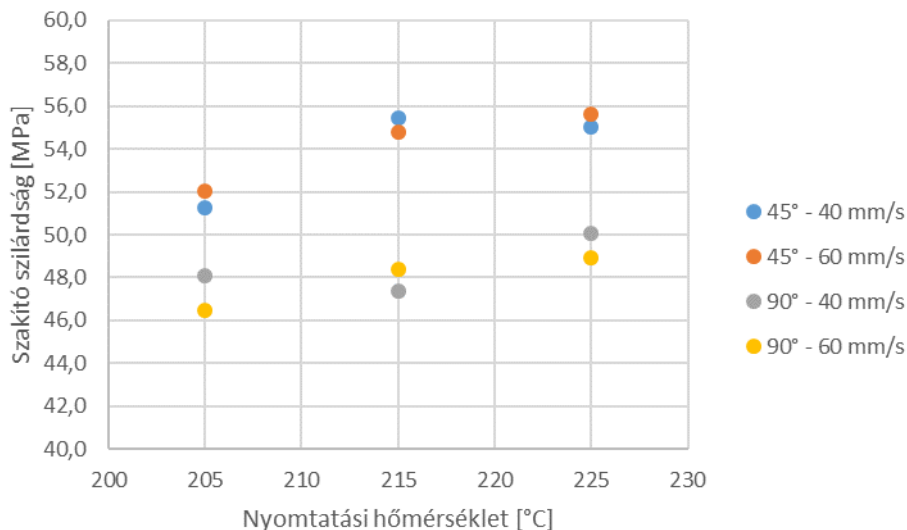


4. ábra. Rugalmassági modulusz változása

A rugalmassági modulusz változása jól illeszkedik az ütés-szilárdság eredményeihez, a 90°-os orientáció alacsonyabb fajlagos ütmunkája ridegebb viselkedésre utalt, és ezt a kapott magasabb rugalmassági modulusz értékek jól igazolják. A paraméterek közül a hőmérséklet és a sebesség növelésével is minden esetben növekszik a rugalmassági modulusz.

### 3.4. Szakító szilárdság

A 5. ábra szemlélteti a szakító szilárdság változását a hőmérséklet, az orientáció és a nyomtatási sebesség függvényében.

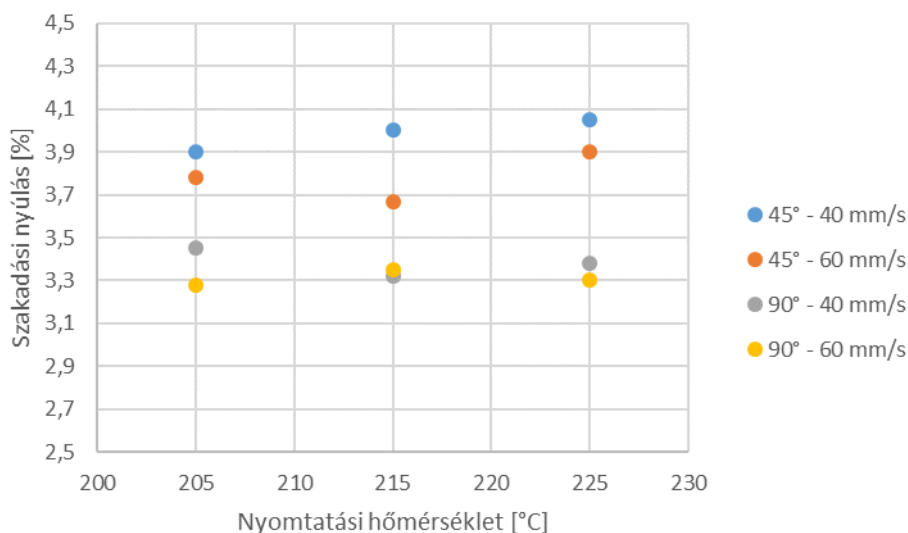


5. ábra. Szakító szilárdság változása

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a 45°-os orientáció alkalmazásával nagyobb szakító szilárdság érhető el, mint 90°-os esetén, és a két struktúra jól láthatóan el is különül egymástól. A hőmérséklet növelése minden esetben növelte a szakító szilárdságot, de a sebesség növelése már nem egyértelmű. A 215°C-on nyomtatott próbatestek eredményei különböznek a másik két hőmérsékleten mért értékektől, így több, különböző hőmérsékleten való nyomtatás eredményeire lenne még szükség a sebesség hatásának pontosabb igazolására.

### 3.5. Szakadási nyúlás

Az 6. ábra mutatja a szakadási nyúlás változását a hőmérséklet, a nyomtatási sebesség, és az orientáció függvényében



6. ábra. Szakadási nyúlás változása

A szakadási nyúlás eredményei alapján megállapítható, hogy a 45°-os itt is elkülönül a 90°-os orientációtól, és bár minden beállítás a PLA-ra jellemző rideg viselkedést mutatja, 45°-os szálorientáció és lassabb, 40 mm/s-os sebesség alkalmazásával érhetjük el, hogy még ha tized



milliméterekkel is, de tovább nyúljon a nyomtatott termék húzóigénybevétel esetén. A hőmérséklet növelés hatása kismértékű, de növekvő tendenciát mutat 45°-nál, és gyakorlatilag nem változik 90° esetében. A sebesség növelése csak a 45°-os orientáció esetén egyértelmű, ott csökkenti a nyúlás értékeit, 90° alkalmazásánál a három vizsgált hőmérséklet közül kettőnél is inkább csökkentő hatást fejt ki, de a tényleges változás igazolásához itt is több mérési pontra lenne szükség.

#### 4. Összefoglalás

A mérési eredményekből az állapítható meg, hogy az alkalmazott változtatások, 45°-os és 90°-os építési orientáció, 40 és 60 mm/s-os nyomtatási sebesség és 205, 215, valamint 225°C-os nyomtatási hőmérséklet közül a legnagyobb befolyásoló hatása az építési struktúrának van. A 45°-os szálorientáció a húzó rugalmassági moduluszon kívül minden esetben magasabb értékeket mutatott, nagyobb ütő-hajlító szilárdsággal, nagyobb szakító szilárdsággal és nagyobb szakadási nyúlással rendelkezett.

A hőmérséklet változtatás volt a következő paraméter, aminek a hatása a legtöbb esetben egyértelműen kimutatható volt. A nyomtatási hőmérséklet növelése a szakító vizsgálat eredményeit pozitívan befolyásolta, tehát a magasabb nyomtatási hőmérséklet hatására a szálak összehegedése javul, és így a húzóigénybevételnek jobban ellen tud állni a nyomtatott termék. 45°-os szálorientáció esetén kismértékben, de az ütő-hajlító szilárdságra is növelő hatással van.

A nyomtatási sebesség változtatásának a hatása a legtöbbször nem volt egyértelmű, csak a rugalmassági modulusz esetén volt kimutatható, hogy a sebesség növelése növeli a rugalmassági moduluszt, a többi esetben további mérésekre lenne szükség a pontos hatás igazolásához.

Összeségében tehát elmondható, hogy a szálak összehegedéséért leginkább felelős paraméterek, mint a hőmérséklet és a sebesség csak kismértékben változtatta meg a mechanikai tulajdonságokat, sokkal jelentősebb a hatása az építési struktúrának, szálorientációnak. Nagy valószínűség szerint a 45°-os orientáció esetén a szálak részben fel tudják venni a próbatest hossztengegyével megegyező és arra merőleges terhelő erőket is, míg a 90°-os orientáció esetén a hossztengegyre merőlegesen elhelyezkedő szálak mind ütő-, mind húzóigénybevétel esetén könnyen, hamarabb elválnak egymástól, és a termék szilárdságát inkább a hosszirányú szálak biztosítják. Ennek a ténynek az igazolására további vizsgálatokra van szükség.

#### Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

#### Irodalomjegyzék

- [1] Polimer termékek kisszériás gyártása, Jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Polimertechnika Tanszék, változat: 3.6 kiadva: 2017.03.22.
- [2] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [3] Pál Károlyné: Komposztálható és az élő szervezetben lebomló politejsav alkalmazása, <http://www.muanyagipariszemle.hu/2012/01/komposztalhato-es-az-elo-szervezetben-lebomlo-politejsav-alkalmazasa-17.pdf>
- [4] Dr. Tábi Tamás: Biopolimerek, biopolimer kompozitok, Budapesti Műszaki Egyetem előadás, [www.pt.bme.hu/futotargyak/57\\_BMEGEPTMG12.../Biopolimerek\\_eloadas\\_2015.pdf](http://www.pt.bme.hu/futotargyak/57_BMEGEPTMG12.../Biopolimerek_eloadas_2015.pdf)
- [5] Dr. Bodnár Ildikó: Lebomló polimerek, Debreceni Egyetem előadás [www.eng.unideb.hu/userdir/bodnari/lebonthato%20muanyagok/lbm-ea-2014.pdf](http://www.eng.unideb.hu/userdir/bodnari/lebonthato%20muanyagok/lbm-ea-2014.pdf)
- [6] L.-T. Lim, R. Auras, M. Rubino: Processing technologies for poly(lactic-acid), Progress in Polymer Science 33 (2008) 820-852
- [7] Anders Södegard, Mikael Stolt: Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition, Progress in Polymer Science 27 (2002) 1123-1163
- [8] <http://www.bitshapes.hu/shop/alapanyagok/philament-pla/pla-175-zold-philament-1kg>
- [9] <http://bitshapes.hu/shop/nyomtatok/craftbot-plus-3d-nyomtato>
- [10] MSZ EN ISO 527-1 Műanyagok. A húzási tulajdonságok meghatározása.
- [11] MSZ EN ISO 179-1 Műanyagok. A Charpy-féle ütési jellemzők meghatározása.



# POLIMER ÖMLEDEK LEKÉPEZŐDÉSÉNEK VIZSGÁLATA FORMAÜREG FELÜLETI STRUKTÚRÁIN

## INVESTIGATION OF POLIMER MELT'S SURFACE MAPPING ON A CAVITY SURFACE STRUCTURE

Kun Krisztián <sup>1</sup>, Boza Pál <sup>1</sup>, Weltsch Zoltán <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Anyagtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

### Kulcsszavak:

Formaadó betét  
Struktúra  
Leképeződés  
Makro geometria  
Fröccsöntés

### Keywords:

Cavity  
Structure  
Surface mapping  
Macro geometry  
Moulding

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember  
26.  
Átdolgozva 2019. február 25.  
Elfogadva 2019. március 19.

### Összefoglalás

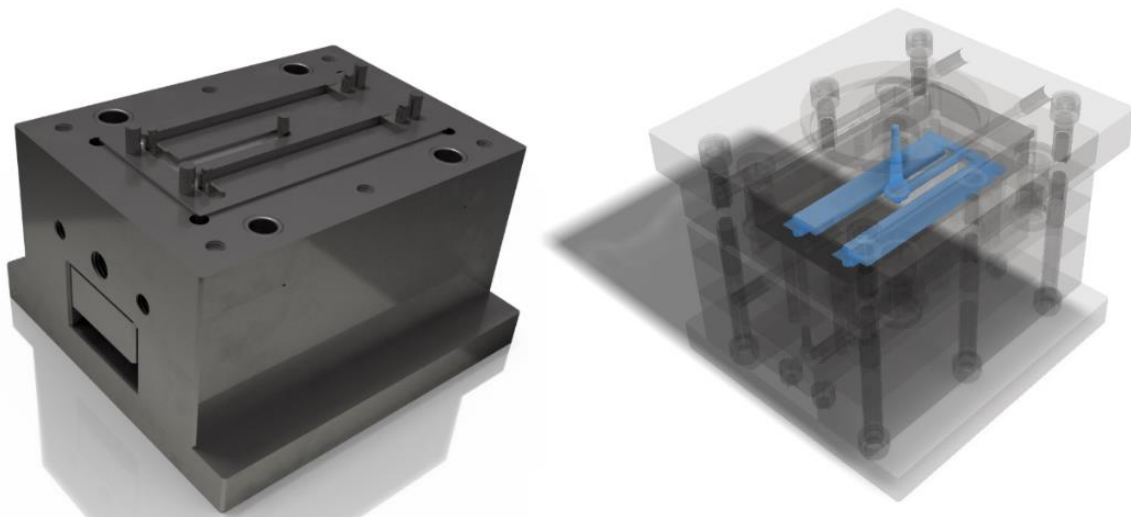
Napjainkban a fröccsöntött termékek felületi minősége egyre fontosabbá válik a felhasználók számára. Minőségi késztermék gyártásához a feldolgozási paraméterek mellett döntő fontosságú annak ismerete, hogy a termék geometriája hogyan befolyásolja a leképeződést. A kutatás fő célja formaadó betéten, forgácsolással létrehozott makro-geometriai struktúrák leképeződésének vizsgálata.

### Abstract

Mould products surface quality is becoming increasingly important to users. In order to create quality parts, besides processing parameters, it is also crucial how to design the mould. Therefore, it is important to know how the processing parameters affect the mould surface mapping. The main objective of this research is to investigate the surface mapping on a cavity, effect of different macro-geometric structures created by cutting technology.

## 1. Bevezetés

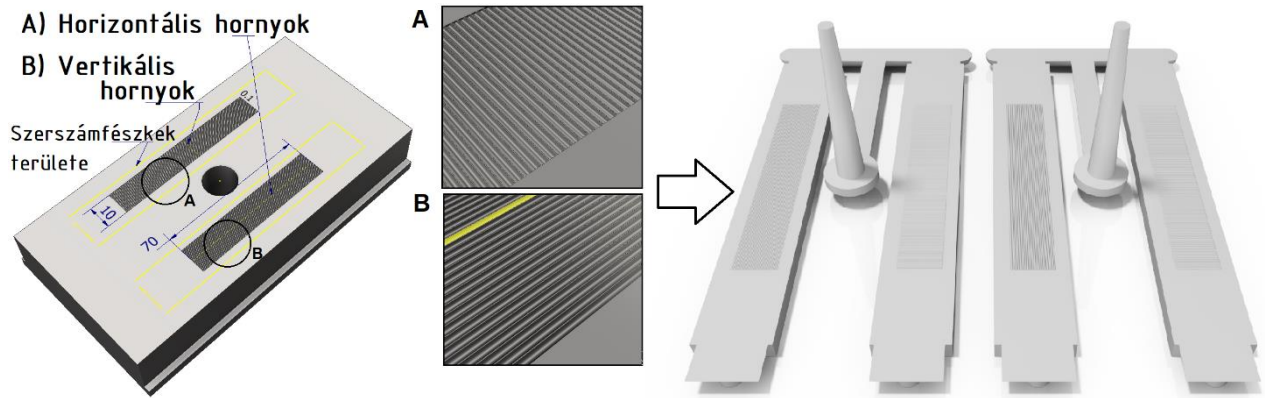
A minőségi késztermék előállítása megköveteli a kitöltési és a tömörítési fázis tökéletes ismeretét [1,2]. Ezen kutatás egyik fő célkitűzése a polimer ömledék viselkedése és a szerszámgyártási technológia közötti kapcsolat tanulmányozása. A kutatás gerincét egy speciális, kísérleti fröccsöntő szerszám adja, mely két, szimmetrikusan elhelyezett formaüreget tartalmaz, terméke pedig két hajlító próbatest. (1. ábra.).



1. ábra. A kísérleti fröccsöntő szerszám

## 2. Kutatás leírása, kísérleti körülmények

A kutatás az aktív elem hatásának vizsgálatára irányult, ezért a szerszámban eredetileg helyet foglaló álló oldali formabetét helyzet- és mérettűréseit alapul véve történt a tervezés. A betétben két olyan geometria létrehozását céloztuk meg, amelyek jelentősen eltérő orientációt eredményeznek a fröccsöntés során. Folyásirányra merőleges és párhuzamos horony geometriák kerültek kialakításra, melyek mélysége 0,1mm (2. ábra).



2. ábra. A tervezett aktív elem (balra) és a szerszám fröccsterméke (jobbra).

A geometriák kialakítása előtt a lehetséges gyártástechnológia vizsgálata is megtörtént. Mivel forgácsolással előállított geometria kialakítása volt a cél, ehhez igazodóan történt a szerszámválasztás is. A választás egy keménymű, 30° csúcshöghő gravitúra esett, melynek éllekeresítése az adatlapja szerint 0,2 mm volt, illetve TiN bevonattal látták el (3. ábra). Típusa: SKU311611.



3. ábra. TiN bevonatú, keménymű gravitúra

A geometriai peremfeltételek rögzítése után az anyagválasztás következett. A szakirodalmi áttekintés után kézenfekvő volt egy amorf és egy részben kristályos anyag alkalmazása. A részlegesen kristályos polimerekben a kristályos fázis olvadásának melegítéskor többelérési igénye, lehűtéskor pedig a kristályosodásnak többelérési-leadása van az amorf polimerekhez képest. A fázisátmenet során a sűrűség is változik: a kristályos fázis nagyobb sűrűségű, mint az amorf fázis vagy az ömledék, ezért a részlegesen kristályos polimerek zsugorodása nagyobb: [8]

- a kristályos polimerek zsugorodása 1,5-2,5%,
- az amorf polimerek zsugorodása: 0,4-0,8%.

A választás az alábbi két, a tanszéken is alkalmazott anyagra esett:

1. Lexan Resin 141R – Polikarbonát (amorf)
2. Dowlex 2027G – LLDPE (részben-kristályos)

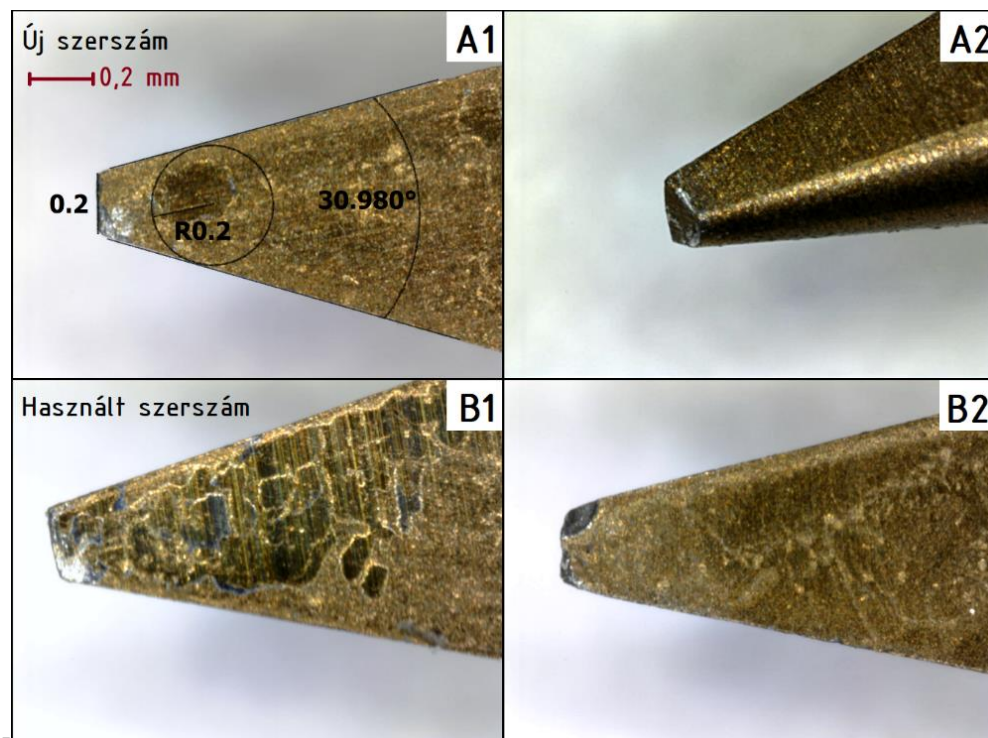
1. táblázat. Az alkalmazott polimerek és tulajdonságaik

| Tulajdonságok                              | Lexan 141R | Dowlex 2027G | Mértékegység      |
|--------------------------------------------|------------|--------------|-------------------|
| <b>Ajánlott feldolgozási hőmérsékletek</b> |            |              |                   |
| Szerszámfelület hőmérséklete               | 100        | 16           | °C                |
| Olvadékhőmérséklet                         | 320        | 230          | °C                |
| <b>pVT tulajdonságok</b>                   |            |              |                   |
| Sűrűség (ömladék)                          | 1,0534     | 0,72883      | g/cm <sup>3</sup> |
| Sűrűség (szilárd)                          | 1,1983     | 0,92819      | g/cm <sup>3</sup> |
| MFI                                        | 11         | 4            | g/10 min          |

### 3. Vizsgálati eredmények

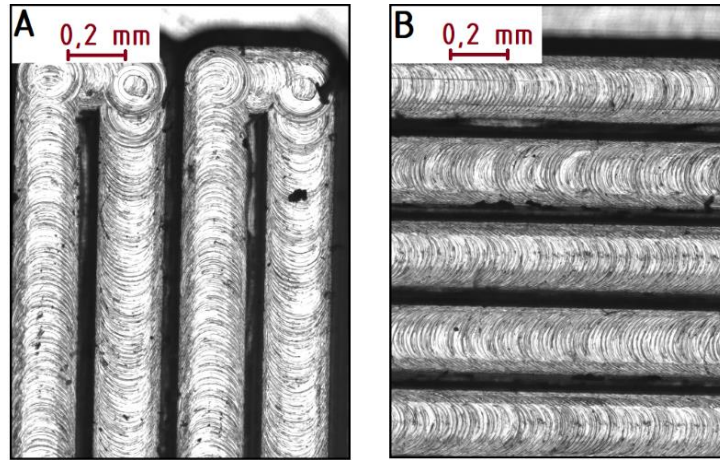
#### 3.1. Mikroszkópi felvételek

A gravírtűről egy Dino-Lite Pro HR AM7000 mikroszkóp segítségével készültek színes felvételek (4. ábra). Egy új szerszám felvételén látszik, hogy az ékszöge a leírásnak (közel) megfelelő, viszont az éllekerekítése nem 0,2 mm-es rádiusz volt, sokkal inkább a megmunkált felülettel párhuzamos, egyenes. A szerszámok az optimális értékektől némileg eltérő a forgácsolási paraméterek miatt fokozott kopásnak voltak kitéve. Mivel az aktív elemen létrehozott pályák két külön gravírtűvel készültek a hornyok minőségét a szerszámkopás azonos mértékben befolyásolta.



4. ábra. Mikroszkópi felvétel egy még használatlan gravírtűről (A1-A2) és egy használt szerszámról, a megmunkálás után (B1-B2).

A kialakított pályák minőségének ellenőrzésére egy Mitutoyo QuickVision Elf Pro mikroszkóp segítségével készültek felvételek (5. ábra). A felvételeken jól látszottak a hornyok makro- és mikrogeometriai jellemzői.



5. ábra. A Mitutoyo Quick Vision mikroszkóp segítségével készített vertikális (A) és a horizontális (B) hornyok felvételei

### 3.2. Vizsgálat kontúrmérő berendezés segítségével

A kitöltési minőség vizsgálata egy Mitutoyo Formtracer Sv-C3000 kontúrmérő gép segítségével történt. A kontúrmérés elsődleges céljai:

- A tervezett és a ténylegesen kialakított geometriák különbségének mérése a betéten
- A fröccstermékek kitöltöttségének vizsgálata
  - vizsgálat a Dowlex 2027G LLDPE esetében
    - *utónyomásos próbatesteknél (500 bar)*
    - *utónyomás nélküli próbatesteknél*
  - vizsgálat a Lexan 141R polikarbonát esetében
    - *utónyomásos próbatesteknél (500 bar)*
    - *utónyomás nélküli próbatesteknél*

#### 3.2.1. A betéten kialakult struktúra elemzése [3,4]

Mind a horizont, mind pedig a vertikális pályákat 3-3 részre osztva, 3,5 mm hosszon történt a kontúrmérés (6. ábra). A szakaszok a pálya elején, közepén, illetve a végén lettek felvéve. Ezzel a szerszámkopásból adódó magasságkülönbséget is vizsgálni lehetett.



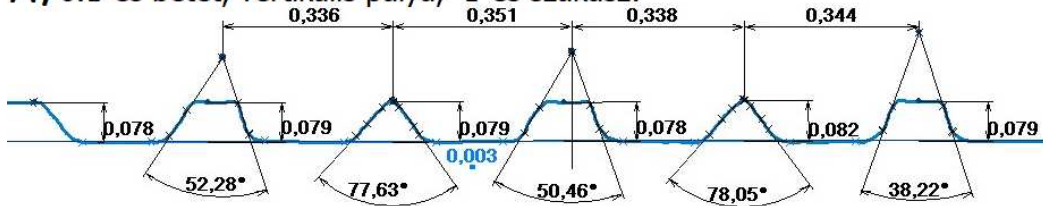
6. ábra. A kontúrmérés vizsgálati pontjai



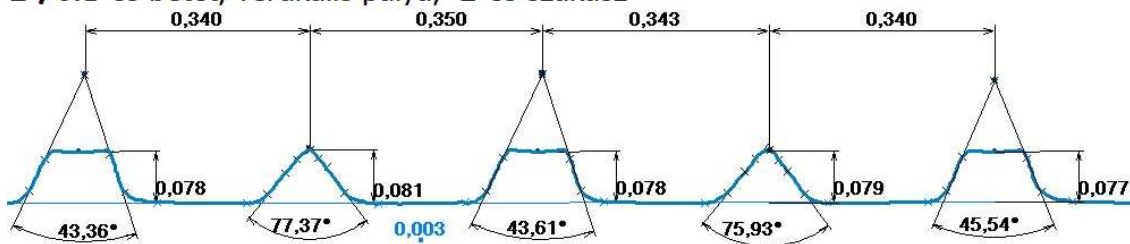
A gravírozott pályák már előzetesen, a mikroszkópi képeken is eltérő képet mutattak a tervezettől. A kontúrmérést követően az ott megállapított tények igazolódtak. A forgácsolt hornyok között azonban szabályos rendezettség alakult ki, azonban a horizontális és a vertikális pályák kontúrjai nem mutattak lényeges különbséget. (7. ábra).

A gravírtúk mikroszkópi képein látható szerszámgeometria és a jelentkező kopások szintén észrevehetőek a kialakított pályákon. A 3 vizsgálati szakasznál a hornyok mélysége közti különbség nem számottevő, így kijelenthető, hogy a szerszám a kopás jelentős részét fogásvételkor szenvedte el, nem a kontúrton haladva. A kopás nagyságrendileg 0,02 mm-t jelentett. Az ábrán az is megfigyelhető, hogy a szerszám pályák távolsága a programozott értéknek (0,346 mm) megfelelően történt.

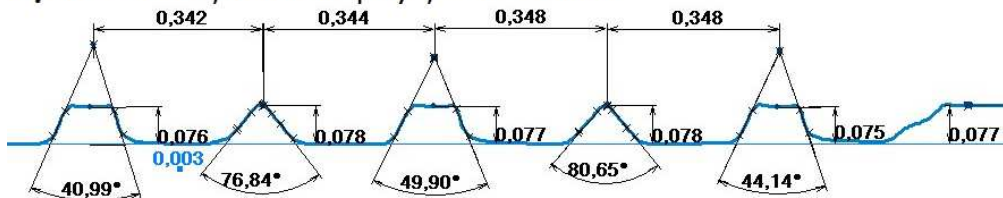
A) 0.1-es betét, vertikális pálya, 1-es szakasz:



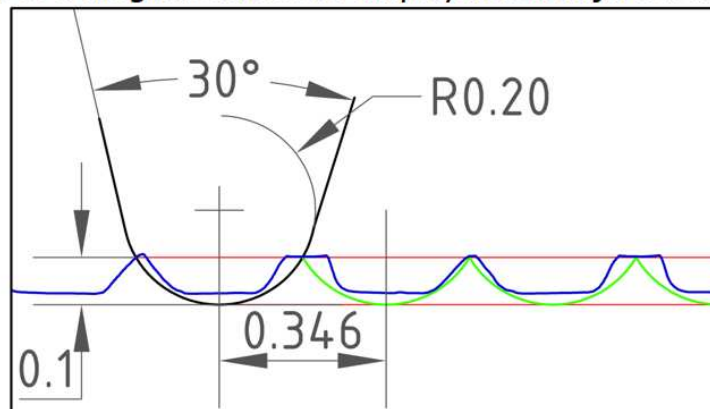
B) 0.1-es betét, vertikális pálya, 2-es szakasz:



C) 0.1-es betét, vertikális pálya, 3-as szakasz:



D) A tervezett és a megvalósult szerszám pályák kontúrjai a betéten:

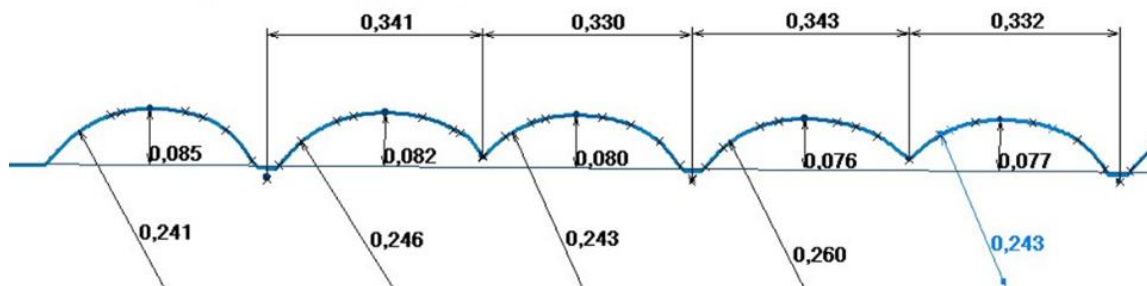


7. ábra. A betéten kialakított hornyok mélységeinek változása a vertikális pálya egyes szakaszain (A-C) és a tervezett és a megvalósult szerszám pályák kontúrjainak összevetése (D).

### 3.2.2. A fröccstermékek geometriájának összehasonlító vizsgálata [3,4]

A termékeken kialakult struktúrák összehasonlító vizsgálata a betét vizsgálatához hasonlóan történt. A termékeken rögzített kontúrvonalakat mindkét anyag esetében elemeztük, valamint összehasonlításra kerültek az utónyomás nélkül és utónyomással készült darabok. A betétek vizsgálati szakaszát az általuk kialakított termék azonos kontúrával vetettük össze. Cél a geometriai leképeződés elemzése. [6,7]

#### Lexan 141R, Vertikális pálya, 1-es szakasz:

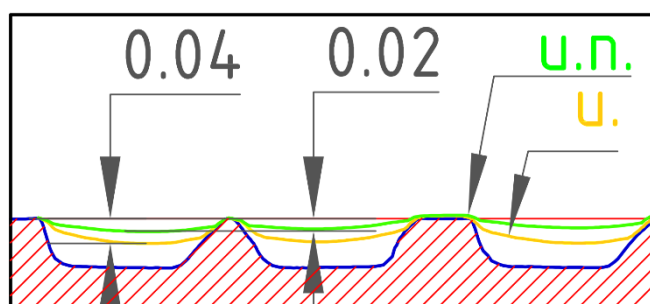


8. ábra. A vertikális pályák kitöltöttsége, zsugorodása (Lexan 141R)

A Lexan 141R esetében a horizontális és a vertikális pályák kontúrjai a termékeken nem mutattak lényeges különbséget (8. ábra). A Dowlex 2027G esetében is hasonló eredmények tapasztalhatók, így a kialakult struktúrákat ez alapján nem különböztettük meg. A továbbiakban olvasható, összehasonlított szakaszok vizsgálata a vertikális pályákon történt.

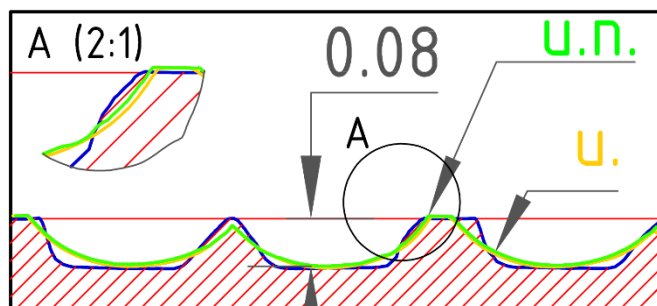
A kontúrmérő által rögzített pontok „.dxf” formátumban is kimenthetők. A szoftver képes ezeket a pontokat automatikusan polinomokkal közelíteni. Mivel a pontok egy nagyságrenddel nagyobb számban szerepelnek, mint kívánt mérési határ, ezért a közelítés elégséges. Az összehasonlítás ezután a „.dxf” fájlok segítségével elvégezhető volt, AutoCAD szoftverben. A pályaillesztéshez bázisként a megmunkálatlan, sík felületet vettünk alapul, míg hosszirányba az első horony szolgáltat referenciának. Ezek a felületek az ábrázolt szakaszokon <0,01 mm pontossággal illeszthetők voltak.

A vizsgálat a részben kristályos, Dowlex 2027G-vel kezdődött (9. ábra). A termékekre a kristályos anyagoknál jellemző, nagyobb térfogatváltozás miatt az utónyomási fázisnak nagyobb hatása van. Ez az előzetes elvárás szerint alakult. Megfigyelhető, hogy a geometriai leképeződés korántsem tökéletes, illetve, hogy az éles sarkokban jelentősebb zsugorodás, anyaghiány tapasztalható. [4]



9. ábra. A betétben leképeződött utónyomás-(sárga), és utónyomás nélküli (zöld) termékkontúrok Dowlex 2027G alapanyag esetében

Ezt követően a Lexan 141R alapanyagból készült termékek vizsgálata következett (10. ábra). Amorf anyagról lévén szó a várt zsugorodás kisebb mértékű, de a termék és a betét között itt is jelentős különbség mutatkozott. Jelentős hosszirányú zsugorodás nem jelentkezett. A hornyok kitöltöttsége az LLDPE alapanyaghoz mérten jobban alakult: A hornyokat teljes mélységben lekövette az ömledék és az éles sarkok is jobban kivehetőek voltak. Az utónyomásnak azonban itt nem mutatkozott jelentős hatása.



10. ábra. A betétben leképeződött utónyomás-(sárga), és utónyomás nélküli (zöld) termékkontúrok Lexan 141R alapanyag esetében

## 4. Eredmények

A mérésekből összességében elmondható, hogy a pályák orientációja (horizontális-vertikális) a leképeződést kevésbé befolyásolják. A formalapon kialakított hornyok kitöltöttsége egyik esetben sem tökéletes. Mindkét anyagnál észrevehető az utónyomás kedvező hatása a zsugorodásra. Hosszirányú zsugorodás mindkét alapanyag termékénél jelentkezik. Bár a Lexan 141R-nél is tapasztalható zsugorodás, a kontúrt (jobb folyási tulajdonságának köszönhetően) jobban követi, a geometriai leképeződés az LLDPE-hez mérten pontosabb.

## 5. Összegzés

A geometriai leképeződés vizsgálata kontúrmérések segítségével szemléletes eredményekkel szolgált. Ahhoz, hogy a tervezett felületelemek (az alakadó gyártástechnológia és a kialakuló struktúra a betéteken) minél inkább egyezzenek gondos geometriai és technológiai előtervezés szükséges [5]. Geometriai szempontból a fröccsöntött termék vastagsága és a kialakított struktúra alakja és mélysége, míg technológiai szempontból a forgácsolási paraméterek és a feldolgozási technológiák jelentős befolyással bírnak. Ezek hatásának vizsgálata és törvényszerűségek keresése további kutatást igényel.

A termékeken kialakított struktúrák molekulaorientációra gyakorolt hatása az anyagok tulajdonságjellemzőit is befolyásolhatja [1]. Távlati cél lehet olyan felületegységek kialakítása, amelyek az ömledékfront áramlásán keresztül irányítottan, a különböző igények szerint alakíthatnák a kialakult morfológiát.

## Irodalomkutatás

- [1] M Pósa, K Belina, P Boza, Műanyagszerszám felületek mikrogeometriájának hatása a fröccstermékekre (Gépgyártás 46:(3) 2006.) pp 32-35.
- [2] M Pósa, K Belina, P Boza, A Szűcs Examination of the effect of machining technology on the surface of injection moulding parts, (Inter-Ing 2005, Targu Mures 2005.) pp 19-25.
- [3] Gy Bánhegyi., A mikrofröccsöntés jelene és lehetőségei, MŰANYAGOK FELDOLGOZÁSA (2007.)
- [4] Deligio, T.: Thinner thin-wall. Modern Plastics Worldwide, 83. k. 4. sz. 2006. p. 78–81. Yokoi, H.; Han, X.stb.: Effects of molding conditions on transcription molding of microscale prism patterns using ultra-highspeed injection molding. Polymer Engineering and Science, 46. k. 9. sz. 2006. p. 1140–1146.
- [5] K M B Jansen, D J van Dijk, M H Husselman Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding, (Polymer Engineering and Science, 1998.) pp 838-846
- [6] C. Liu, L. T. Manzione Process studies in precision injection molding, (I: Process parameters and precision, Polymer Engineering and Science, 36, 1996.) pp 1-9.
- [7] Eladl, Abdelkhalik et al. Effect of Process Parameters on Flow Length and Flash Formation in Injection Moulding of High Aspect Ratio Polymeric Micro Features (Micromachines 2018; 9 (2):58.)
- [8] Bánhegyi. Gy. Kristályos és amorf polimerek termikus vizsgálata differenciális pásztázó kalorimetriával (DSC), In: Műanyagipari szemle 2014.



# SZIMULÁCIÓS LEHETŐSÉGEK HIBRID HAJTÁS MŰKÖDÉSI KONCEPCIÓ KIDOLGOZÁSÁRA

## OPPORTUNITIES FOR SIMULATION IN HIBRID PROPULSION OPERATIONAL CONCEPT DESIGN

Papp János <sup>1\*</sup>, Kis Dávid István <sup>2</sup>, Kereszty Balázs <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar Neumann János Egyetem,  
Magyarország

<sup>2</sup> Anyagtechnológia Tanszék, Gépipari és Automatizálási Műszaki Főiskolai Kar Neumann János Egyetem,  
Magyarország

---

### Kulcsszavak:

konceptcionális tervezés  
hibrid propulzió  
szimuláció

### Keywords:

conceptual design  
hybrid propulsion  
simulation

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. október 19.  
Átdolgozva 2018. október 31.  
Elfogadva 2019. március 1.

---

### Összefoglalás

A cikk célja, hogy hibrid jármű koncepció tervezéséhez rugalmas szimulációs környezet kialakításának lehetőségeit összegezze. Különös tekintettel a hibrid kisrepülőgép különböző koncepcióinak összehasonlítására, a támasztott követelmények alapján. Alapot adjon a legígéretesebb koncepció kiválasztásához, részletesebb vizsgálatához.

### Abstract

The aim of this paper is to provide a summary on a flexible simulation environment for designing hybrid vehicle concepts. Specially for comparing different concept for small hybrid aircraft designs, based on the given requirements. This gives a base for choosing the best concept and for further analyzing that.

---

## 1. Bevezetés

Manapság a hagyományos járművek villamosítása segíti a folyamatos káros anyag kibocsátás csökkentést és az akkumulátoros hajtások egyre nagyobb teret nyernek a közutakon. Illetve a legfontosabb, hogy növekszik ezen új technológiákba fektetett bizalom, kezd kiforrni a gyártásuk, használatuk [1]. Ezért érdemes lehet a következő nagy károsanyag kibocsájtó ágazat, vagyis a repülőgépipar megoldásait újragondolni.

A piacon kapható kisrepülőgépek hajtásláncának felépítése nem sokat változott az elmúlt században. Történt ez azért, mert a repülőgépekkel szemben támasztott követelmények rendkívül szigorúak. Sokak véleménye szerint elérkezett az idő, hogy elkezdődjön az új technológiák bevonása ebbe az ágazatba is.

Csapatunk hibrid kisrepülőgépek koncepcióival foglalkozik, ezért szeretnénk a lehető legtöbb felépítési struktúrát megvizsgálni, elrugaszkodni a konvencióktól, teret adni az új technológiák használatának [2]. A koncepciótervezés kezdeti szakaszában felmerült az igény a különböző ötletek rögzítésére, szimulációjára a későbbi analízis érdekében, ezért szeretnénk kidolgozni egy rugalmas szimulációs környezet MATLAB / Simulink szoftver segítségével [3].

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 70 398 1261  
E-mail cím: papp.janos@gamf.uni-neumann.hu

## 2. A tervezés menete

A modell alkotás kezdeti fázisában a követelmény listát szeretnénk megfogalmazni, ilyenkor szükség van egy környezetre, amiben a munka folyni tud. Hamar kiderül, hogy a sok különböző ötletet nehéz egységesen kezelni-tárolni. MATLAB / Simulink környezetben fogjuk felépíteni, már erről a szintről indítva a tervezést. Minden szimulációs programnál szükséges, hogy a követelmények számokkal kifejezhetőek legyenek, mivel csak így ellenőrizhető objektíven a teljesítésük. Illetve, több követelmény, szabvány teljesítésekor ezt több különböző, akár sok száz esetben ellenőrizni, csak automatizált környezetben érdemes. Szerintünk fontos előre tekinteni és megérteni a tesztelési folyamatot is, a környezet lehetőségeit figyelembe venni a követelmények megfogalmazásakor, így megkönnyíthetjük a tervezési folyamatot.

Ezután megkeressük a szükséges leegyszerűsített funkciókat, amit blokkokkal ábrázolhatunk, majd a lehető legtöbb lehetséges módon összekapcsolva egy struktúra halmazt kapunk. Közben érdemes konvencionális megoldásokkal is leellenőriznünk a kitalált környezetet.

Ezt követően az egyes funkciókat a piacon kapható, kutatás alatt álló modellekkel helyettesítjük. Majd a megfelelően meghatározott szimulációs profil segítségével megvizsgáljuk a modell viselkedését, ellenőrizzük a követelményeket.

Végül értékeljük a kapott eredményeket és levonjuk a megfelelő következtetéseket. Ez persze egy leegyszerűsített tervezési folyamat, ennek kifejtése nem témája e cikknek. A továbbiakban a koncepciótervezés elindításához szükséges ismeretanyagot, lehetőségeket mutatjuk be.

## 3. Modell felépítése

### 3.1. Hőerőgép modell

A konvencionális és az újabb fejlesztésű hőerőgépeket egy csoportba rendeztük, ilyen például: belsőégésű motorok, gázturbinák, Stirling-motorok és még számos más. Kiforrott technológiával rendelkeznek, a legtöbb szimulációs környezet, mint az általunk használt is, rendelkezik többféle komplexitású, felépítésű parametrizálható modellel. Méréstechnikája is előrehaladott, ami egyszerűvé teszi a mérési eredményeken alapuló modell alkotást, ha nem állna rendelkezésünkre az adott gépről. A mérési eredmények alapján a modell készítményt is különböző szoftver eszközök támogatják [2] [4]

### 3.2. Egyéb átalakítók

Az üzemanyag cella köré épített hibrid rendszer számos kutatás alapját képezte [1] [2]. Napelem által előállított és tárolt energia segítségével üzemeltetett hajtásrendszerekből készített tanulmányokkal bővítik a lehetőségeinket [3].

Nem szükséges a kémiai reakciók modellezésével foglalkozni, ha rendelkezünk megfelelő modellel, amelyet fel tudunk használni a saját szimuláció készítéséhez.

### 3.3. Elektromos motor

A hőerőgépek, mellett villamos energiából többféle típusú motorral is lehetséges forgó mozgás előállítása [4]. Ezért szükséges ezt a sokféle motortípust is vizsgálni. Lehetséges az is, hogy a gyártói vagy saját mérések alapján, térképek segítségével szükséges előállítani a változókat, úgymint a szükséges fordulathoz tartó nyomaték, határfok.

### 3.4. Akkumulátor

Ha repülőgépek meghajtására a villamos energiát akkumulátor segítségével szeretnénk előállítani, ezt sokan diszruptív technológiának tekintik, viszont számos lehetőséget és újítást rejt, hogy megalapozza az hibrid repülő létezését, ezért mindenképpen vizsgálni a használatával, amit számos cikk támaszt alá: [2] [3] [4] [5] [6] [7].

Számos típusa létezik, melyek jelentősen eltérnek egymástól főbb paramétereikben, azonban a terület felkapottsága miatt számos kutatásban, gyártónál fellelhetőek koncepció kutatáshoz alkalmas modellek, méretezési segédletek.

### 3.5. Energia elosztó rendszer

Részletes modell alkotás esetén szükséges az elosztó rendszerrel is foglalkozni. A különböző részekösszekapcsolásából alkotott rendszereket illeszteni kell egymáshoz, adott esetben távol helyezkedhetnek el egymástól. Pont ezért jelentős mértékű veszteség keletkezhet a vezetékálózatban, ennek hatásait is érdemes vizsgálni a későbbiekben. Ezekre jó példa az elektromos rendszerek összekötésére használt vezetékrendszer, biztosítóberendezések vagy csatlakozók.

### 3.6. Zajterhelés

A konvencionális hajtásrendszerrel rendelkező repülőgépekkel szemben (melyek jelentős zajkibocsátással rendelkeznek), az elektromos meghajtás egyik nagy előnye a csökkentett zajkibocsátás lehet 0. Számos tényező befolyásolja a keltett zajt: a különböző üzemállapotoktól, a közeg tulajdonságától, a távolságtól és még számos paramétertől függ [1]. Rendelkezésünkre állnak olyan kutatások, melyek segítségével, a szükséges komplexitású modell által ezt a jelenséget is szimulálni, vizsgálni tudjuk.

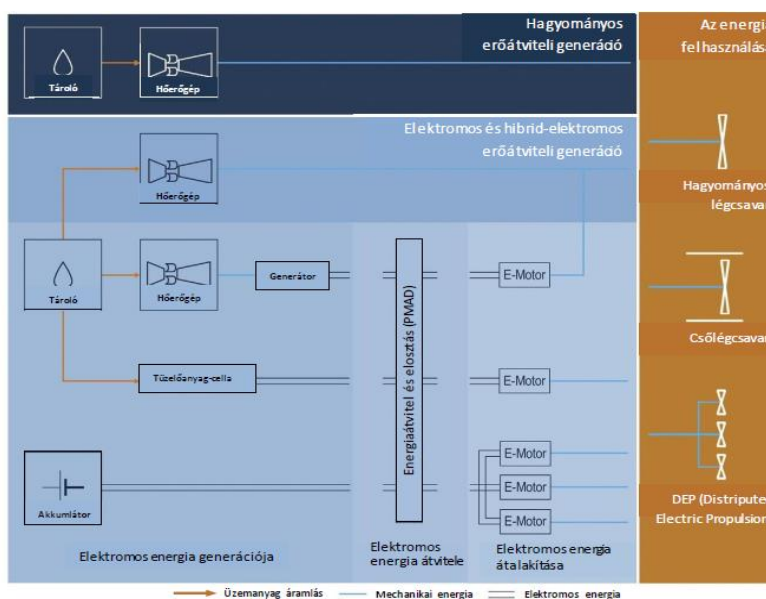
### 3.7. Vezérlés

Ahhoz, hogy egy komplex modellelemekből álló részmodell vagy teljes repülés környezet szimulációja bármilyen viselkedést produkáljon, szükséges biztosítanunk egy vezérlő modult, amely az egyes üzemállapotoknak, illetve követelményeknek megfelelően vezérelni, szabályozni tudja a modellt.

## 4. Repülési profilok - Szimuláció

A szimuláció során bemeneti paraméter lehet a repülőgép sebessége, magassága. Ezek alapján számos más változó már meghatározható. A sebesség és a levegő sűrűsége alapján pedig meghatározható a szükséges propeller sebesség, és a teljesítmény. Ez persze egy nagyon leegyszerűsített modell, ennél sokkal komplexebb modell alkotása szükséges érdemleges eredmények érdekében. Továbbá meghatározandók a modellek veszteségei és azok hatásai.

Az egyes koncepciók összehasonlíthatóvá válnak a különböző repülési állapotokban, valamint az üzemállapotok mellett vizsgálható a teljes működési tartomány is. Számos konfigurációs lehetőséget vázol és vizsgál [2] is, például többféle légcsavar lehetőséget, többféle villamos energia előállítási módot, a hagyományos elrendezés mellett, amit az alábbi ábrán (1. Ábra).



1. Ábra Különböző konfigurációk összevetése [2]

## 5. Tesztelés

Használhatunk a szimulációs környezetbe integrálható hardver eszközöket, az alábbi hivatkozásokban közölt példák mind támogatják a Simulink környezetet [17]. Ezek zökkenőmentesen tudnak egymással együttműködni, például az automatikus kódgenerálás segítségével. Így csak a modellalkotással szükséges foglalkozni, a rendszerek integrálása gyorsan megoldható. A [17] is bizonyítja, hogy lehetséges komplex hajtáslánc modell felépíteni és ennek szimulációja közel esett a mérési eredményekhez.

## 6. Elemzés

A szimulációs környezet segítheti az optimális koncepció kiválasztását, illetve a tervezés további szakaszaiban a meghatározó paraméterek optimalizálását is [18]. Többféle módon is megfogalmazhatjuk, mi is számít optimális eredménynek. Lehet szempont az alacsonyabb üzemanyag felhasználás különböző üzemállapotokban, a vonatkozó szabványok betartása, az üzemeltetési költség vagy akár a gyártási költség minimalizálása. Az is lehet a cél, hogy több nagyon eltérő feltételnek egyszerre feleljen meg a tervezett jármű, ami szintén egy vizsgált probléma köré.

## 7. Összegzés

A tanulmány taglalja hibrid jármű koncepció tervezés előkészítő fázisa közben a szerzőkben felmerülő kérdéseket. Főként arra vonatkozóan, hogy áttudjuk-e ültetni az adott problémát egy szimulációs környezetbe. A konkrét követelmények meghatározása, koncepciók összeállítása, ezután következik. De fel szeretnénk hívni a figyelmet – már a tervezés elején -, hogy érdemes előre gondolkodni és beépíteni a célokat is valamilyen formában a követelmények mellett a készített koncepciókba is. Tehetjük ezt rugalmas struktúra kialakításával, amit a modern vizuális szimulációs programok, mint a Simulink, egyszerűvé teszi a tervező számára.

## Köszönetnyilvánítás

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. EFOP-3.6.1-16-2016-00014

## Irodalomjegyzék

- [1] Emilia Silvaş, Theo Hofman, Maarten Steinbuch, Review of Optimal Design Strategies for Hybrid Electric Vehicles, IFAC Proceedings Volumes, Volume 45, Issue 30, 2012, Pages 57-64, ISSN 1474-6670, <http://dx.doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00054>
- [2] C. Pornet, A.T. Isikveren, Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft, Progress in Aerospace Sciences, Volume 79, 2015, Pages 114-135, ISSN 0376-0421, <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2015.09.002>.
- [3] The MathWorks, Inc. <https://www.mathworks.com/>
- [4] Jacob Sliwinski, Alessandro Gardi, Matthew Marino, Roberto Sabatini, Hybrid-electric propulsion integration in unmanned aircraft, Energy, 2017, ISSN 0360-5442, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.183>
- [5] G. Abbe, H. Smith, Technological development trends in Solar-powered Aircraft Systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 60, 2016, Pages 770-783, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.053>
- [6] N. Lapeña-Rey, J.A. Blanco, E. Ferreyra, J.L. Lemus, S. Pereira, E. Serrot, A fuel cell powered unmanned aerial vehicle for low altitude surveillance missions, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 42, Issue 10, 2017, Pages 6926-6940, ISSN 0360-3199, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.01.137>
- [7] Teresa Donateo, Antonio Ficarella, Luigi Spedicato, Alessandro Arista, Marco Ferraro, A new approach to calculating endurance in electric flight and comparing fuel cells and batteries, Applied Energy, Volume 187, 2017, Pages 807-819, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.100>

- [8] Antonio Filippone, Aircraft noise prediction, Progress in Aerospace Sciences, Volume 68, 2014, Pages 27-63, ISSN 0376-0421, <http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.02.001>
- [9] Dimitrova, François Maréchal, Techno–economic design of hybrid electric vehicles and possibilities of the multi-objective optimization structure, Applied Energy, Volume 161, 2016, Pages 746-759, ISSN 0306-2619, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.071>
- [10] M. Arntzen, D.G. Simons, Modeling and synthesis of aircraft flyover noise, Applied Acoustics, Volume 84, 2014, Pages 99-106, ISSN 0003-682X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.09.002>
- [11] M.F. M. Sabri, K.A. Danapalasingam, M.F. Rahmat, A review on hybrid electric vehicles architecture and energy management strategies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 53, 2016, Pages 1433-1442, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.036>
- [12] Simos A Evangelou, Wassif Shabbir, Dynamic modeling platform for series hybrid electric vehicles, IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 11, 2016, Pages 533-540, ISSN 2405-8963, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.078>
- [13] Spedicato, Gianluca Trullo, A. Paolo Carlucci, Antonio Ficarella, Sizing and Simulation of a Piston-prop UAV, Energy Procedia, Volume 82, 2015, Pages 119-124, ISSN 1876-6102, <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.201512.003>
- [14] dSPACE GmbH <https://www.dspace.com/>
- [15] AVL LIST GmbH <https://www.avl.com/>
- [16] IPG Automotive GmbH <https://ipg-automotive.com/>
- [17] Elisabetta Bongiorno, Michele Tomaselli, Vito G. Monopoli, Gianluca Rizzello, Francesco Cupertino, David Naso, Hybrid Aeronautical Propulsion: Control and Energy Management, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 2, 2017, Pages 169-174, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.12.031>

# AUTONÓM FORMULA STUDENT AUTÓ MECHANIKAI PARAMÉTEREINEK HATÁSA A TAPADÁSI HATÁRON VALÓ MANŐVEREZÉSRE

## MECHANICAL PARAMETERS EFFECT TO GRIPLIMIT BEHAVIOUR OF AUTONOM FORMULA STUDENT CAR

Szűcs Gergely <sup>1\*</sup>, Bári Gergely <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, Neumann János Egyetem, Kecskemét, Magyarország

<sup>2</sup> Járműtechnológia Tanszék, Neumann János Egyetem, Kecskemét, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Formula student  
MRA moment method  
jármű stabilitás  
autó egyensúly

### Keywords:

Formula student  
MRA moment method  
vehicle stability  
car balance

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. október 4.  
Átdolgozva 2019. október 31.  
Elfogadva 2019. március 20.

---

### Összefoglalás

*Az autonóm jármű lehetséges mozgásának korlátai nagymértékben függenek az autó paramétereitől. Vizsgálatunk célja, hogy egy általunk épített autonóm formula student autó paraméter változtatásának érzékenységet meghatározzuk a jármű tapadására, vezethetőségére, stabilitására. Ennek megállapítására az "MRA nyomaték módszer" használtunk a szimulációs környezetben. A módszer lényege, hogy képet kaphatunk a jármű tapadási határán való viselkedéséről.*

### Abstract

*Autonom vehicles motion depends on the parameter of the car. The aim of our study is to determine which parameters affect the controllability and stability of an autonom formula student car. To find this, we used the "MRA moment method" to create the "MMM diagram" in our simulation environment. MMM is a powerful tool to study, analyze and troubleshoot the "big picture" of vehicle stability, control and handling.*

---

## 1. Bevezetés

A tanulmány célja annak megértése, hogy az autó paraméterei miként befolyásolhatják az autonóm jármű viselkedését, és meghatározhatják, hogy mely paraméterek befolyásolják az autó irányíthatóságát és stabilitását. Egy önjáró jármű esetében fontos, hogy elkerülje a baleseteket azok megelőzésével, például ha egy gyalogos hirtelen lelép az útestre.

A vizsgálat során egy autonóm formula student autó [1] paramétereinek hatását vizsgáltuk. Az autonóm formula student verseny célja, egy egyetemisták által megépített önz vezető versenyautó megépítése és versenyeztetése. A járművek tapadási határán való mozgásának megértésével, könnyebben tudunk tervezni autonóm pilóta algoritmusokat is. [2] Ehhez azonban olyan autót kell tervezni és megépíteni, melynek jellegzetes paraméterei lehetővé teszik az autó gyors irányváltását a jármű stabilitásának megtartása mellett, valamint minél nagyobb tapadást tudjon kinyerni az abroncsokból.

A jármű tapadási határának megállapításához van segítségünkre az MMM diagram. [3]

---

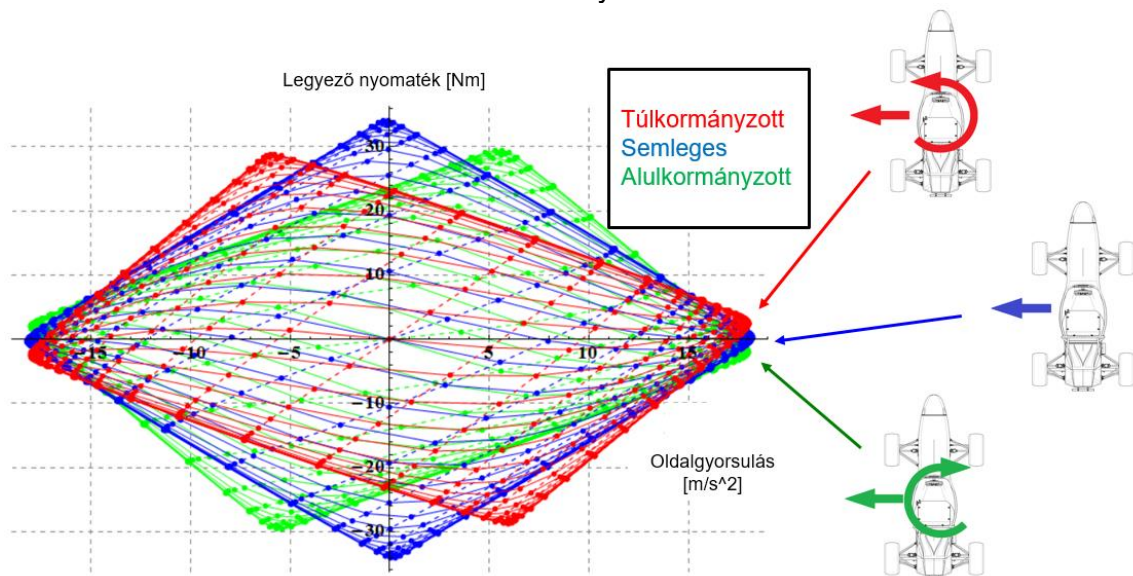
\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 30 440 6024  
E-mail cím: szucsi.90.07.09mail.com

## 2. MRA módszer [4]

Az MRA Moment Method (MMM) egy kvázi-statikuss, átfogó járműdinamikai vizsgálatokra alkalmas módszer, melynek lényege, hogy állandó sebességek mellett, az autó manőverezhetőségéről és stabilitásáról kapunk képet. Az MMM segítségével számtalan járműdinamikai szempontból fontos paraméter hatása vizsgálható.

A módszer lényege, hogy a járműmodellre adjuk az egész autóra vett oldalkúszási szöget, illetve a kormányzöveget, ezután ezeket léptetve számítjuk ki az egyes állapotokban a járműre ható oldalerőt és nyomatékot. Ezzel képet kapunk az egyes állapotokhoz tartozó szöggyorsulás és oldalgyorsulás értékeiről. Ezeket az értékeket egy közös diagramon ábrázolva megfigyelhető, az adott autó milyen határok között tud mozogni, emellett az alul-, illetve túlkormányzottságáról is kapunk információt.

Az általunk vizsgált formula student autó határait tekintve az a jó, ha minél nagyobb területű az 1. ábrán látható rombuszhoz hasonlító tartomány.



1. ábra: Egy semleges, egy túl-, illetve egy alulkormányzott autó MMM diagramja

Az autó túl-, illetve alulkormányzottságáról a diagram szélső csücskeinél kaphatunk információt. Az 1. ábraán megfigyelhető, hogy a diagram jobb oldali csücske, nem esik a vízszintes tengelyre. Ez azt jelenti, hogy maximális oldalgyorsulás közben az autónak szöggyorsulása is van a kanyar irányába, tehát az autó túlkormányzott. Ez alapján elmondható, hogy ha az MMM diagram jobb oldali csücske a yaw acceleration = 0 egyenesen van, akkor az autó semleges, ha felette, akkor túl-, illetve ha alatta, akkor alulkormányzott az autó.

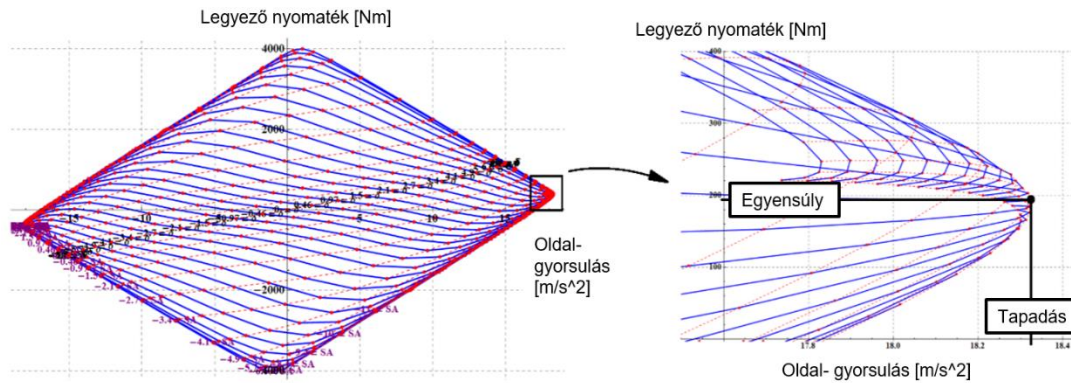
### 2.1. Mérőszámok: Tapadás, Egyensúly, Manőverezhetőség, Stabilitás

Az MMM diagram alapján meg tudunk határozni különböző mérőszámokat:

- Tapadás (Grip)
- Egyensúly (Balance)
- Manőverezhetőség (Control)
- Stabilitás (Stability)

A tapadás és egyensúly mértékét az MMM diagram jobb oldalának csücsében érdemes nézni, hiszen ebben a pontban a legnagyobb az autó oldalgyorsulása, azaz az oldalirányú tapadása.





2. ábra. Az MMM diagramon a tapadás és egyensúly mértékére használt mérőszám definiálása

Ahogy a 2. ábra mutatja, a tapadás mértékét az autó maximálisan elérhető oldalgyorsulásával jellemezzük, míg az autó egyensúlyát, az ebben a pillanatban ráható nyomaték nagysága jellemzi. Az egyensúly pozitív értéke azt jelenti, hogy az autó túlkormányzott, hiszen pozitív legyező nyomaték hat rá. Ennek megfelelően az autó semleges, ha az egyensúly értéke zérus, valamint alulkormányzott, ha az egyensúly negatív.

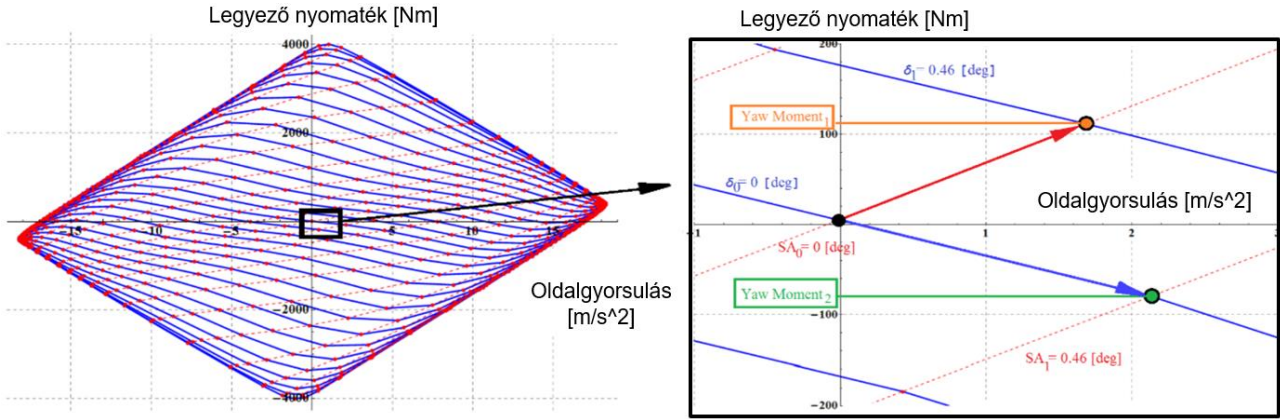
Az manőverezhetőség mértékére, az egységnyi kormánymozdulatra létrejövő nyomatéket szokás számítani. Tehát az manőverezhetőség, a kerék 1 fokos elkormányzására létrejövő legyezőnyomaték. Ugyanakkor az autó stabilitását meghatározó mérőszámnak, az 1 fokos oldalkúszás kialakulás közben létrejövő nyomatéket szokás számítani.



3. ábra. A manőverezhetőség és stabilitás mérőszámának definiálása  
[Claude Rouelle: Applied V.D. seminar]

Tehát például, ha az oldalkúszás következtében kialakuló legyező nyomaték pozitív, akkor a plusz nyomaték további oldalkúszást generál (lásd 3. ábra jobboldala). Ekkor az autó hátulja „kitör” (pozitív nyomaték - Instabil). Ha az egységnyi oldalkúszás hatására létrejövő nyomaték negatív, ekkor a létrejövő nyomaték a további oldalkúszás (azaz forgás) kialakulását akadályozza, azaz az autó egyenes állásba szeretne visszatérni (negatív nyomaték - Stabil).

Az autó viselkedése ilyen szempontból leginkább az irányváltás kezdetekor fontos, vagyis mikor az MMM diagram origójából mozdulunk el, ahogyan az a 4. ábrán figyelhető meg.



4. ábra. Az manőverezhetőség és stabilitás irányváltáskor

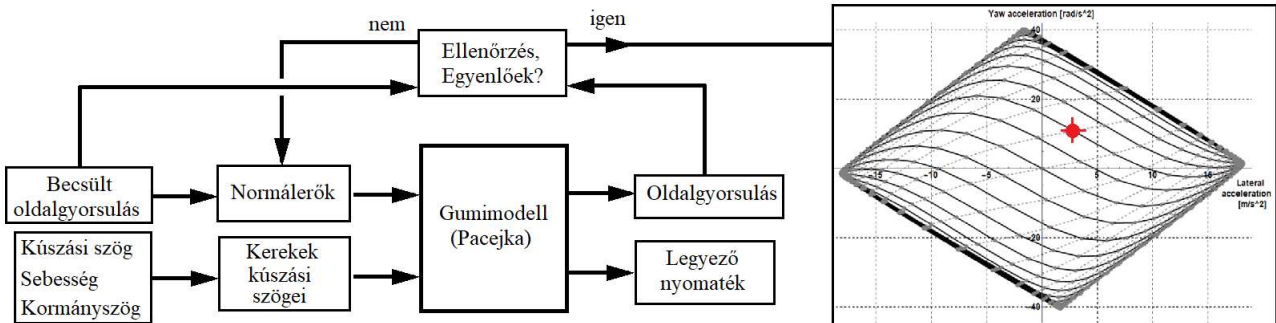
$$Control = \frac{d \text{ YawMoment}}{d \text{ SteeringAngle}} \cong \frac{\text{YawMoment}(SA = 0 ; \delta = \delta_1)}{\delta_1} \quad (1)$$

$$Stability = \frac{d \text{ YawMoment}}{d \text{ CG SlipAngle}} \cong \frac{\text{YawMoment}(SA = SA_1 ; \delta = 0)}{SA_1} \quad (2)$$

### 3. Matematikai modell

A matematikai modell egy négykerekű, azaz két nyomvonalú modell. A gumimodell a nemlineáris empirikus Pac2002 modell. [5] Ennek következtében az átterhelődések hatását is figyelembe vettük. A számítás során a sebességet konstansnak tekintjük, míg az autó kúszási szögét, illetve a kormányoszögét lépésről lépésre változtatjuk. Egy lépésben kapunk egy pontot az MMM diagramon.

A numerikus számítási módszer alapja egy ciklus, mely során egy oldalgyorsulást becslünk, aminek következtében kiszámíthatóak az átterhelődés során keletkezett normálerők. Eközben az autó sebességéből, oldalkúszásából és kormányoszögéből kiszámíthatóak az egyes kerekek oldalkúszásai. A kúszások és normálerők ismeretében a gumimodell alapján megkapjuk az egyes kerekek oldalerőit, melyekből megkapjuk az adott állapothoz tartozó oldalgyorsulást és legyező nyomatékot. Ezután a ciklusban ellenőrizzük, hogy a korábban becsült oldalgyorsulás megegyezik-e a becsült oldalgyorsulással. Ha igen, akkor a számítás egy adott pontra befejeződött, ha nem, akkor pedig a számítás végén kapott oldalgyorsulást vesszük a következő lépés becsült oldalgyorsulásának. A számítás addig tart, amíg a lépés elején becsült és a lépés végén kapott oldalgyorsulás kvázi azonos nem lesz.



5. ábra. Egy pont számítása az MMM diagramon

### 3.1. Változtatható paraméterek

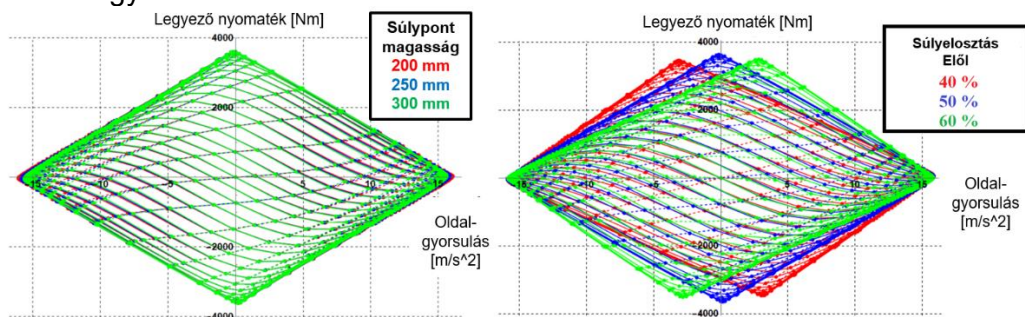
A korábbi évek során egy Formula Student csapat tagja voltam, ennek következtében a számítás során egy FS autó paramétereit vettem alapul. A modellben számos paraméter változtatható, melyeket alap értékeikkel az 1. táblázat foglal össze.

1. Táblázat. A járműmodell változtatható paramétere

| Paraméter neve             | Mértékegység      |      | Paraméter neve            | Mértékegység | Elöl | Hátul |
|----------------------------|-------------------|------|---------------------------|--------------|------|-------|
| Jármű tömege               | [kg]              | 300  | Tengelytáv                | [mm]         | 1200 | 1160  |
| Tömegeloszlás elöl         | [%]               | 50   | Roll Center magasság      | [mm]         | 30   | 50    |
| Súlypontmagasság           | [mm]              | 270  | Rugómerevség              | [N/mm]       | 30   | 35    |
| Nyomtáv                    | [mm]              | 1540 | Mozgásvizony (kerék-rugó) | [mm/mm]      | 1.03 | 1.07  |
| Sebesség                   | [km/h]            | 70   | Stabilizátor merevség     | [N/mm]       | 52   | 32    |
| Leszorító erő tényező      | [-]               | 1.5  | Mozgásvizony (kerék-stab) | [mm/mm]      | 2    | 2.7   |
| Homlokfelület              | [m <sup>2</sup> ] | 1.5  | Össze-/Széttartás         | [deg]        | 0    | 0     |
| Leszorítóerő eloszlás elöl | [%]               | 50   |                           |              |      |       |

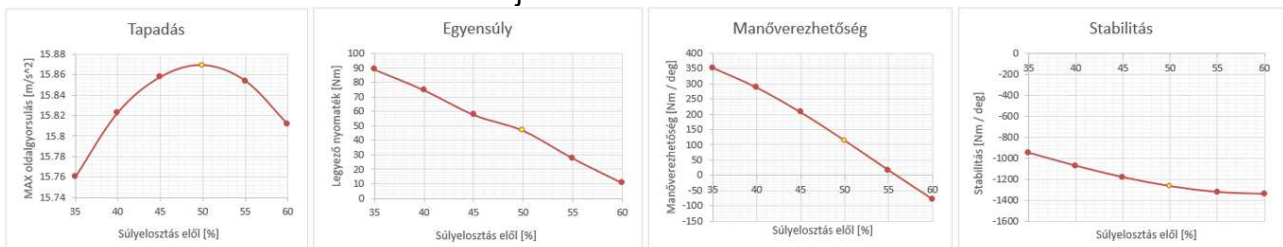
## 4. Eredmények

Az egyes paraméterek változtatásával az MMM diagram alakja is változik, mely folytán a leolvasható tapadás, egyensúly, manőverezhetőség és stabilitás értékek szintén változnak. A 6. ábrán például a súlypontmagasság, illetve az első-hátsó súlyelosztás megváltoztatásának hatása figyelhető meg. Mint látható a súlypontmagasság főként a tapadásra, míg a súlyelosztás az autó egyensúlyára van nagy hatással.



6. ábra. Különböző súlypontmagasság és súlyelosztás hatása

Az 1. Táblázatban található paramétereket észszerű keretek közötti változtatásával az MMM diagram formája mellett változik a 2.1 fejezetben taglalt négy mérőszám is. A súlyelosztás változtatásának hatását a 7. ábra mutatja:



7. ábra. A súlyelosztás hatása a tapadásra, egyensúlyra manőverezhetőségre és stabilitásra

Mint az megfigyelhető a súlyelosztás főként az autó egyensúlyára és stabilitására van hatással. Az ábrát megfigyelve látható, hogy ha az autó első tengelyén növeljük a tömeget, az auto stabilabbá, illetve alulkormányzottabbá válik, ugyanakkor a manőverezhetősége csökken, azaz a hirtelen irányváltásokkal szemben lomhának tűnhet.

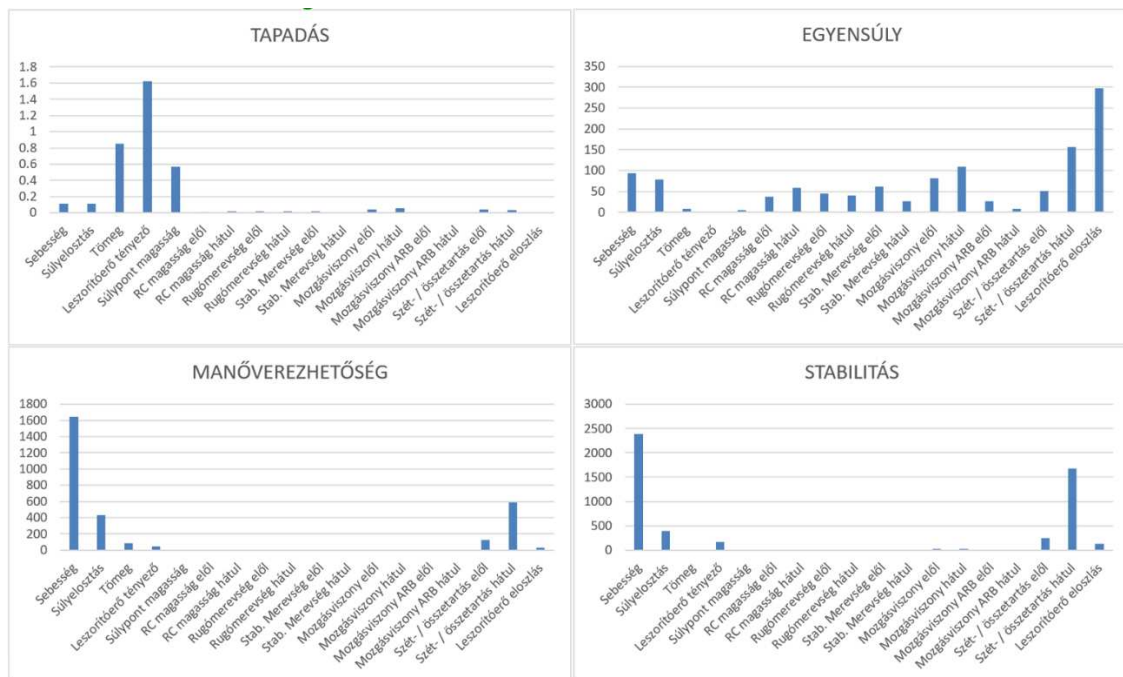
Az egyes paraméterek érzékenységét úgy állapítottuk meg, hogy a vizsgált intervallumon a minimális mérőszámot kivontuk a maximális mérőszámból. Mint az a 8. ábrán látható, négy paraméter közül a súlyelosztás van a legnagyobb hatással az autó egyensúlyára





8. ábra. A súlyelosztás, a tömeg, a leszorítóerő tényező és a súlypontmagasság hatása az autó egyensúlyára

Természetesen az 1. táblázat összes paraméterét megvizsgáltuk a fent taglalt módszerrel, mind a négy mérőszám tekintetében. Az auto paramétereinek hatását a 9. ábra foglalja össze.



9. ábra. Az autó paramétereinek hatása a tapadásra, egyensúlyra, manőverezhetőségre és stabilitásra

Végeredményként elmondható, hogy az autó tervezésekor a tapadásának maximalizálására a kis tömeg, az alacsony súlypontmagasság és a jó aero csomag a kulcs. Emellett az autó egyensúlyára az aerobalansz és a hátsó szét-/összetartás van nagy hatással. Manőverezhetőség és stabilitás szempontjából ugyancsak a hátsó szét-/összetartás a fontos tényező, így a hátsó önkormányzási karakterisztika tervezésére nagy hangsúlyt kell fektetni.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] <https://www.fsaeonline.com/>
- [2] Kritayakirana K. and Gerdes J. C. 2012 Autonomous vehicle control at the limits of handling, *Int. J. Vehicle Autonomous Systems*, **10**, 271–96
- [3] Milliken Research Associates, <http://www.millikenresearch.com/mmmoutput.html> (accessed on Aug. 2018)
- [4] Milliken W F, and Milliken D L, 1995 Race car vehicle dynamics *Society of Automotive Engineers*
- [5] Pacejka H B, 2002 Tyre and Vehicle Dynamics, *Elsevier Butterworth-Heinemann*

# SZIMULÁCIÓS SZOFTVER KIVÁLASZTÁSA ÉS ELLENŐRZÉSE AUTONÓM JÁRMŰVEK DINAMIKÁJÁNAK VIZSGÁLATÁHOZ

## SELECTION AND ANALYSATION OF A SIMULATION SOFTWARE FOR THE INVESTIGATION OF AUTONOMOUS VEHICLE DYNAMICS

Widner Attila <sup>1</sup> Bári Gergely <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

### Kulcsszavak:

dőlési momentán centrum  
safety-margin  
autonóm jármű  
vehicle dynamics

### Keywords:

roll center  
safety-margin  
autonomous vehicle  
vehicle dynamics

### Cikk történet:

Beérkezett 2018. október 24.  
Átdolgozva 2018. október 31.  
Elfogadva 2019. március 20.

### Összefoglalás

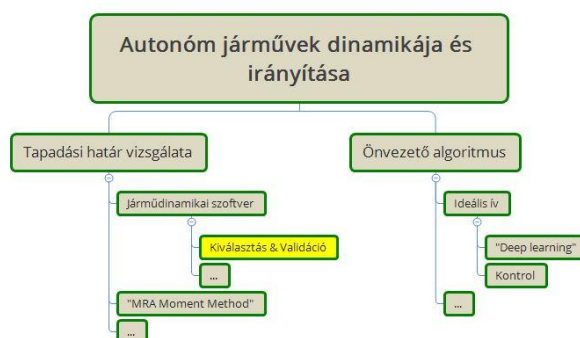
Napjainkban a mobilitással kapcsolatos kutatások egyre inkább az autonóm járművekről szólnak. Kutatásunk során célunk egy olyan fejlesztési környezet kialakítása, ami önvezető algoritmus fejlesztése során alkalmas a jármű tapadási határon való viselkedésének vizsgálatára. Egy ilyen környezet fontos eleme a szimulációs szoftver. Ebben a dokumentumban a szoftver kiválasztását valamint vizsgálatát mutatom be.

### Abstract

Nowadays mobility-researches are about autonomous vehicles. Our goal is to create an environment which is suitable for grip limit behavior analysis during self-driving algorithm development. A simulation software is essential part of such an environment. This document introduces the selection and validation of the simulation environment.

## 1. Bevezetés

Az autonóm járművekről szóló publikációk száma nagymértékben növekszik. Önvezető algoritmus fejlesztés, neurális hálók, "deep learning" és a rendszerhez szükséges szenzorokkal kapcsolatos témában számtalan tanulmány született az elmúlt években. A mi célunk egy olyan környezet megalkotása, ami alkalmas a jármű menetdinamikai vizsgálatára is az önvezető algoritmus fejlesztése során. A kutatás két fő ágát az 1. ábra mutatja. Az általunk kivitelezendő környezet központjában egy járműdinamikai szimulációs szoftver áll.



1. ábra Kutatási struktúra

Jelen dokumentumban a szoftver kiválasztási illetve validálási módszer első lépéseit mutatjuk be, nagyobb hangsúlyt fektetve a tapadási határ vizsgálatához szükséges követelményeknek.

Habár hagyományos járművek ritkán üzemelnek a gumi szaturációs tartományában közel a tapadási határhoz, esetünkben kritikus fontossággal bír, hogy az önvezető algoritmus számára megfelelő információk álljanak rendelkezésre a jármű mozgásállapot-változtató képességéről, valamint stabilitásáról. Minderre azért van szükség, hogy a jármű képes legyen gyors manőverekre, ugyanakkor mindvégig stabil maradjon. A fent említett képességek jellemzésére az úgynevezett "safety-margin"-t szokás meghatározni.

A vizsgálathoz használandó szoftvernek szigorú és összetett követelményrendszernek kell megfelelnie. A vele szemben támasztott követelményeket a következő fejezetben tárgyaljuk. Viszont fontos megemlíteni az elején, hogy a validációra azért van szükség, mert e programok más és más algoritmus alapján számítják a járműmozgást, továbbá hajlamosak túlegyszerűsíteni a számítási kapacitás és sebesség növelése érdekében. Így olykor elhanyagolják olyan paraméterek hatását melyek csekély jelentőséggel bírnak hagyományos körülmények között, viszont nagy hatással lehetnek a tapadási határon való viselkedésre - így esetünkben fontosak.

A szoftvert a kiválasztás után - annak érdekében, hogy megbizonyosodjunk arról, hogy megfelel a mi igényeinknek - le kell ellenőrizni. Ez azért szükséges, mert a legtöbb esetben a szoftvert fejlesztő csapat dönti el, hogy a számítási algoritmus megfelelően pontos-e. [1]

Megvizsgáljuk, hogy a paraméterek változása milyen hatással van a jármű viselkedésére. Első lépésként meggyőződünk arról, hogy az eredmények ésszerűek-e, a kimeneti értékek (átterhelődés mértéke, aránya a tengelyek között, stb.) reálisnak mondhatók-e adott jármű paramétereknél és teszteseteknél. [2] Ezután megvizsgáljuk a modellt a bemeneti paraméterek ésszerű nagyságú tartományán ez a módszer az úgynevezett érzékenységvizsgálat. Végül, összehasonlítjuk a modell kimeneteit a tényleges rendszer múltbeli teljesítményével.

## 2. Szimulációs környezet kiválasztása

A járműdinamikai szimulációs szoftvereknek széles skáláját alkalmazzák az iparban, és legtöbbjük számos funkcióval rendelkezik. A mi nézőpontunkból két fontos terület van, amelyeket figyelembe kell venni. Az első a szenzor szimuláció és a valós idejű HIL (Hardware in loop) tesztek - az önvezető algoritmus fejlesztéséhez. A második az, hogy milyen pontosan kezeli a program a futómű paraméterek hatását - a safety-margin kutatáshoz.

Az autonóm járművek kamerákat, radart, lidart és egyéb érzékelőket használnak a jármű mozgásállapotával (pozíció, mozgás iránya, sebessége) és a környezettel (út, környező objektumok) kapcsolatos információszerzéshez. Ezek az érzékelők nagyágrendekkel több adatot produkálnak, mint azok, amelyeket hagyományos vezetés támogató rendszerekhez használnak. A kiválasztott szoftvernek képesnek kell lennie e szenzorok szimulálására is. Az önvezető modul fejlesztés későbbi lépéseire való idejű HIL teszt modulra is szükség van, a rendszer megfelelő teszteléséhez.

A legelterjedtebb járműdinamikai szimulációs szoftvereket az alábbi fő szempontok alapján vizsgáltuk:

- Szenzor szimuláció (radar, lidar, kamera)
- Matlab / Simulink integráció
- Python integráció
- HIL teszt modul
- Ár
- Futómű tervező/vizsgáló modul

A szoftverek részletes összehasonlításához sok információra van szükség, amelyet nehéz összegyűjteni, ha nincs lehetőség a programok mélyreható tesztelésére. A rendelkezésre álló információk alapján az IPG Carmaker bizonyult a legalkalmasabbnak a projekthez, így a validációs folyamatot is ezen dolgoztuk ki. Az ellenőrzési procedúra szoftverfüggetlen, ami azt jelenti, hogy később ez a folyamat könnyen átültethető bármely más alkalmazásra.

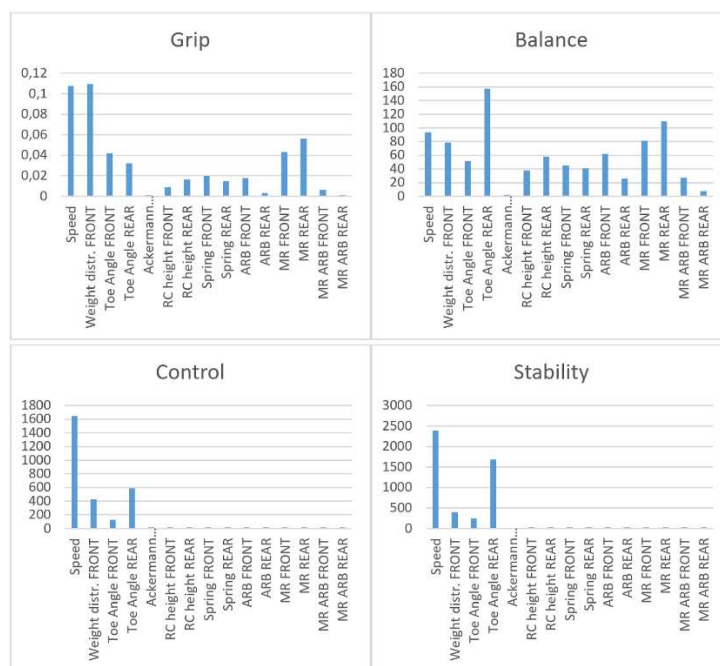
### 3. A választott szoftver validálása

“Az ellenőrzés és validálás célja egy olyan modell, amely pontos, az általa képviselt valós rendszer teljesítményének előrejelzésekor, valamint két különböző forgatókönyv vagy modell konfiguráció közötti teljesítménykülönbség megjósolásakor. Továbbá a modell validálási folyamatnak növelnie kell a modell használhatóságát és megbízhatóságát a döntéshozók számára” [3]

Számos szakértő szerint nincs abszolút validált modell, szoftver. [2,4,5] "A modell érvényessége csak a projekt és a tervezett alkalmazás határain belül határozható meg. Annak ellenére, hogy egy átfogóbb érvényességi elemzés növeli a modell hitelességét, az többlet pénzügyi és időbeli ráfordítást igényel. Így egy komplex rendszer szimulációs modellje csak a tényleges rendszer közelítése lehet." [1]

A szimulációs környezet csak akkor tekinthető érvényesnek, ha a modell kimenetek megfelelnek egy pontossági kritériumnak.[1] Milyen pontossággal kell megközelítenie a járműdinamikai szimulációs eredményeknek a valóságot, ahhoz hogy ezen információk biztonsággal használhatóak legyenek egy önvezető algoritmus fejlesztésekor? Mely jármű paraméterek befolyásolják jelentős mértékben a jármű tapadását, irányíthatóságát, balanszát? Ezen kritériumok meghatározása nagy és összetett feladat, így jelen publikációban eltekintünk a részletes bemutatástól.

Vizsgálat fontos a paraméterek megemléítése, melyek hatását a validációs folyamatban vizsgáltuk vagy vizsgálni fogjuk. A menetdinamika szempontjából fontos paramétereket MRA Moment Method-dal (MMM) határoztuk meg. Az MMM vizsgálatról a [6]-ban olvashatnak bővebben. A 2. ábra a vizsgálat eredményeit mutatja, vízszintes tengelyen az egyes paraméterek találhatók. A függőleges tengelyen látható, hogy mely paraméterek milyen mértékben befolyásolják a jármű tapadását (grip), balanszát (balance), irányíthatóságát (control), valamint stabilitását (stability) állandósult állapotban.



2. ábra. Paraméterek hatása az állandósult állapotú menetdinamikára [6]

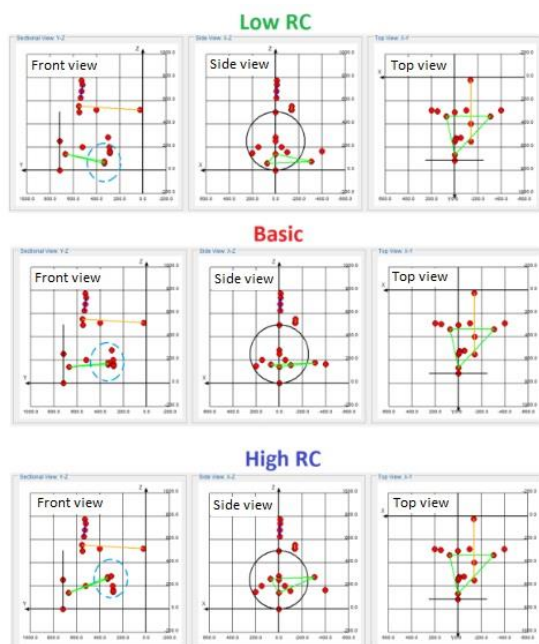
A járműdinamikai szimulációkkal célunk a manőverezhetőség és stabilitás vizsgálata a tapadási határon, így az állandósult állapot mellett a jármű tranziens viselkedésével kapcsolatos információkra is szükségünk van. Mindkét állapotban jelentős hatása van a dőlési momentán centrum helyzetének, mivel befolyásolja tengelyek dőlési merevségét, az átterhelődések időbeni lefolyását, a karosszériára ható erők irányát, valamint hatással van a futómű kinematikára is. [7]

A szoftver ellenőrzési folyamatot a momentán centrum magasság hatásának vizsgálatán keresztül mutatjuk be.



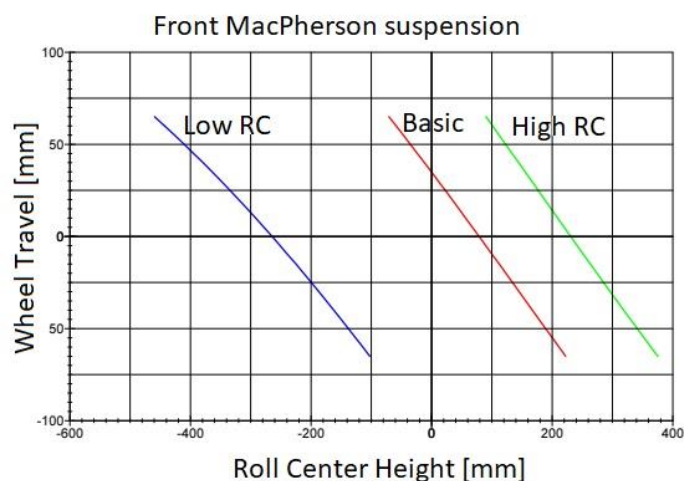
### 3.1. A vizsgált jármű paraméterei

A szimulációkat egy első kerék meghajtású személygépkocsival végeztük. Az első MacPherson felfüggesztés momentán centrumának magassága IPG Kinematics-ben lett módosítva a lengőkar belső bekötési pontjainak áthelyezésével.



3. ábra. MacPherson futómű bekötési pontok

A vizsgálatokhoz három futómű konfigurációt használtunk. Alap felfüggesztés, magasabb momentán centrummal és talajszint alatti momentán centrummal rendelkező. A futómű bekötési pontokat piros pontokkal ábrázolva a 3. ábra mutatja, szaggatott karikázással jelölve látható a lengőkar belső bekötési pontja melyet módosítva kaptuk a magasabb (High RC), illetve alacsonyabb (Low RC) momentán centrumot. A momentán centrum változási karakterisztikák a 4. ábrán láthatók.

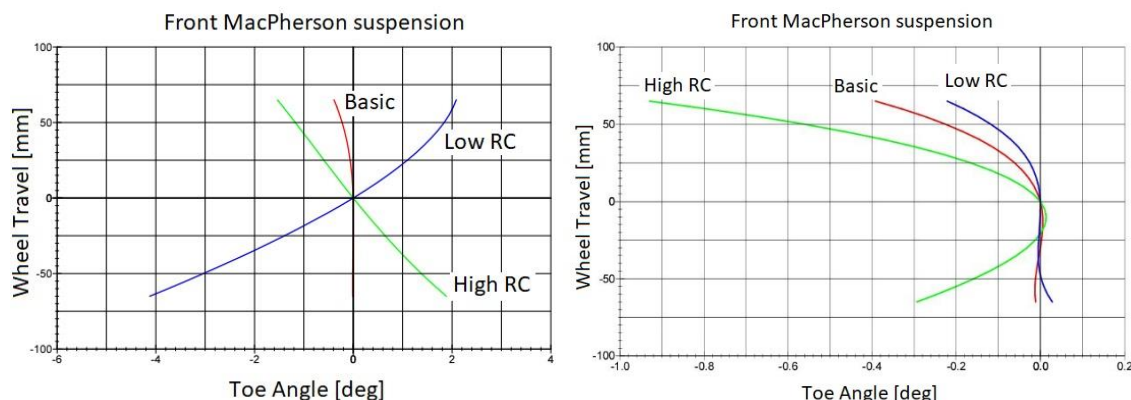


4. ábra. Dőlési momentán centrum magasság változási karakterisztika alap és módosított futóművek esetén

A futómű módosításnak a momentán centrum változás mellett számos nem kívánt hatása is van, melyek befolyásolhatják a szimulációk eredményét.

A momentán centrum pozíciója hatással van többek között a kerék dőlésváltozási és önkormányzási karakterisztikáira. A dőlésváltozási karakterisztikát elhanyagolható mértékben befolyásolta a dőlési momentán centrum magasság változása.

Ellenben az önkormányzási karakterisztika jelentős mértékben változott. Ezt mutatja az 5. ábra bal oldala.



5. ábra. Önkormányzási karakterisztika módosítás előtt (bal) és után (jobb)

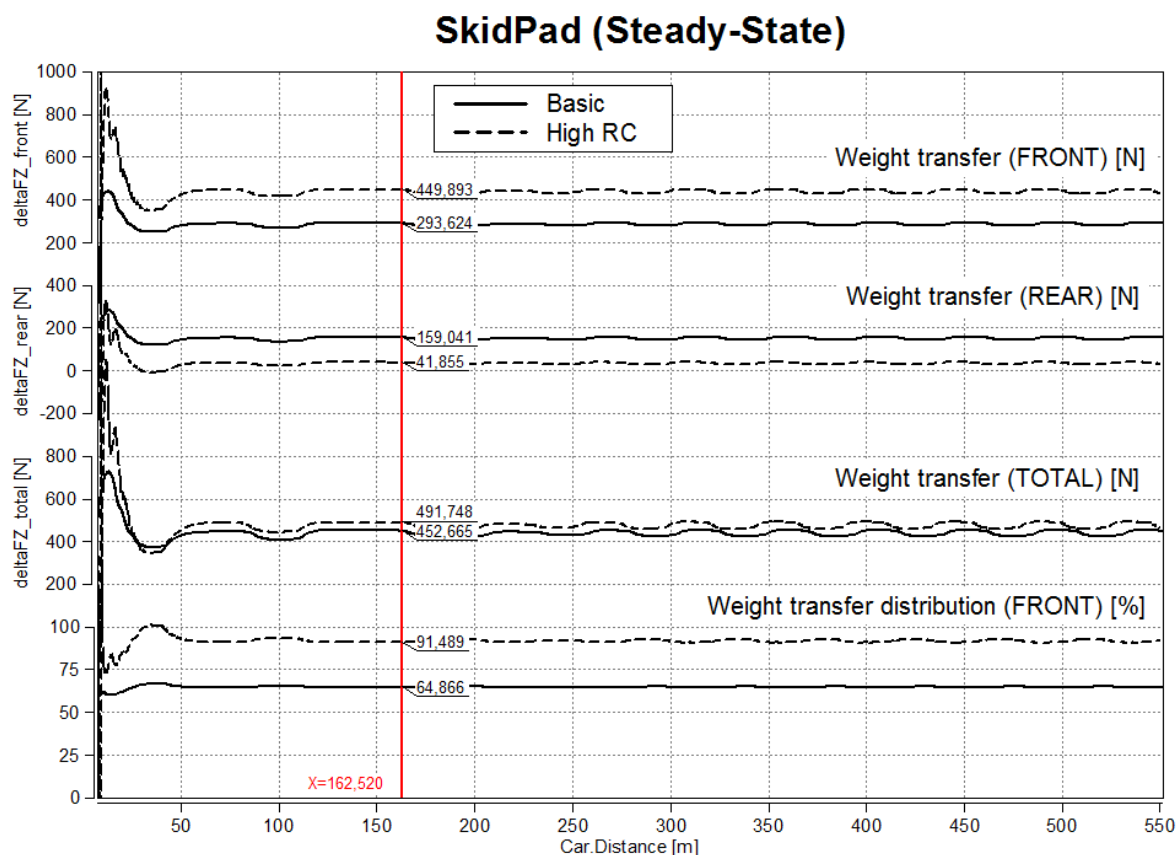
Az önkormányzást a kormányösszekötő két bekötési pontjának áthelyezésével oldottuk meg. Így az 5. ábra jobb oldalán látható karakterisztikákat kaptuk. Jól látható, hogy az alacsony (Low RC) és magas (High RC) momentán centrummal rendelkező futóműveknél még mindig van eltérés viszont a működési tartományban ez elhanyagolható mértékű.

A rugórugók mozgás áttétele szintén változott és ez jelenetős hatással van az átterhelődésekre mivel a kerékre számolt redukált rugómerevség négyzetesen függ a mozgás áttételtől. Ezt a rugók merevségének illetve terheletlen hosszának változtatásával oldottuk meg, így a hasmagasság és a kerék fölé számolt rugómerevség megegyezik mindhárom esetben.

### 3.2. Szimulációs eredmények kiértékelése

Az átterhelődést állandósult állapotban konstans sugarú körpályán vizsgáltuk. A szimuláció eredményeit ezen a szinten kvalitatív módon értékeltük, azaz azt vizsgáltuk, hogy az eredmények megfelelnek-e az elméletnek, de más módszerrel nem számoltuk, vagy az eredményeket nem hasonlítottuk össze a valós mért értékekkel.

A jármű egy 100 m átmérőjű körpályán halad állandó sebességgel. Az elmélet szerint a teljes átterhelődés alapvetően három paramétértől függ: oldalirányú gyorsulás, nyomtáv szélesség és súlypont magassága [7]. Az átterhelődések aránya az első és a hátsó tengely között arányos a tengelyek dőlési merevségével. A momentán centrum magassága befolyásolja a dőlési merevségét. Minél magasabb a momentán centrum annál nagyobb a dőlési merevség az adott tengelyen. [6] Amint az a 6. ábrán látható az első átterhelődés arányát (Weight transfer distribution (FRONT) [%]) növeli a tengely magasabb dőlési momentán centruma. Továbbá látható, hogy a teljes átterhelődés is megnövekedett, ennek oka a magasabb momentán centrum által megnövekedett kocsitestre ható emelő erő („jacking force”). Az emelő erő hatására magasabbra kerül a jármű tömegközéppontja, így nagyobb mértékű lesz a teljes átterhelődés.



6. ábra. Átterhelődések az állandósul állapotú konstans sugarú körpályá vizsgálaton

#### 4. Konklúzió és további lépések

A szimulációs környezet ellenőrzése és validálása kritikus fontosságú a safety-margin kutatás megalapozásánál. A szimuláció során az elméletnek megfelelő eredményeket kaptunk, így elmondható, hogy eddig nem talákoztunk jelentős elhanyagolással. A környezet ellenőrzésének további lépései az érzékenységvizsgálat és a szimulációs eredmények összehasonlítása valós mért adatokkal.

#### Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg

#### References

- [1] Kutluay E and Winner H 2014 Validation of vehicle dynamics simulation models – a review, *Vehicle System Dynamics*, p 186-200
- [2] Sargent RG. 2010 Verification and validation of simulation models *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* (Winter Simulation; Austin, TX)
- [3] Carson JS. 2002 Model verification and validation (Winter Simulation Conference; San Diego, CA)
- [4] Babuska I and Oden JT. Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts.
- [5] Law AM and Kelton WD 1991 *Simulation modeling & analysis*.
- [6] Szűcs G. and Bári G. Generating MMM diagram for defining the safety margin of self-driving cars (IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 393 (2018) 012128)
- [7] Milliken WF. and Milliken DL. 1995 *Race car vehicle dynamics*. (Warrendale: Society of Automotive Engineers)

# LIDAR MODELLEZÉS AUTONÓM JÁRMŰVEK RENDSZERSZINTŰ TESZTELÉSÉHEZ

## LIDAR MODELLING FOR SYSTEM LEVEL TEST OF AUTONOMOUS VEHICLES

Erődsdi Zakariás\*, Papp János, Bári Gergely

Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

Lidar  
Szimuláció  
Validáció  
Autonóm  
Önvezető

### Keywords:

Lidar  
Simulation  
Validation  
Autonomous  
Self-Driving

### Cikk történet:

Beérkezett 2018. október 24.  
Átdolgozva 2019. február 24.  
Elfogadva 2019. március 19.

---

### Összefoglalás

Az egyes algoritmusok fejlesztésére különféle keretrendszerek állnak rendelkezésre (ROS, MATLAB/SIMULINK), melyekhez különféle szimulációs környezetek léteznek, viszont az autonóm rendszer, rendszerszintű tesztjére általában csak a tesztpályán kerül sor. Célunk egy olyan szimulációs környezet kialakítása, melyben az autonóm rendszert teljes egészében tesztelni lehet az érzékeléstől kezdve, az aktuáláson át a járművet menet közben befolyásoló különböző dinamikai hatásokig. Jelen kutatás egy ilyen lehetséges szimulációs környezetet mutat be, ezen belül kiemelve egy lidar szenzor modellezési és validálási folyamatát, illetve, hogy a szenzor modellezése hogyan segíthet az önvezető algoritmusok rendszerszintű fejlesztésében.

### Abstract

There are various frameworks available for the development of each algorithm (ROS, MATLAB / SIMULINK) for which different simulation environments exist, but the autonomous system's system test usually only takes place on the test track. Our goal is to create a simulation environment in which the autonomous system can be fully tested from perception, through actuation with various dynamic impacts affecting the vehicle while driving. This paper presents a possible simulation environment, highlighting the modeling and validation process of a lidar sensor and how the sensor model can help system-level development of self-driving algorithms.

---

## 1. Bevezetés

Az autonóm járművekkel kapcsolatos kutatások már a 90-es években kezdetüket vették, az elmúlt pár évben pedig számtalan, a témához kapcsolódó tanulmány született. A közúti járművekben is kezd szépen lassan megjelenni ez a technológia, elég hogyha csak az olyan vezetőt segítő rendszerekre gondolunk, mint a sávkövetés, holtter érzékelés vagy az automatikus távolságszabályozó. [1] A fejlődési irány is ki van jelölve, teljesen önvezető autó létrehozása, amely el tud végezni bármilyen körülmény között bármilyen a feladatot, amit egy sofőr tudna. [2]

Ehhez a célhoz vezető algoritmus fejlesztés során pedig elengedhetetlen a tesztelés. Az autonóm rendszer rendszerszintű tesztelésére a legkézenfekvőbb mód természetesen az éles tesztelés, tesztautón, viszont ez rendkívül költséges, elég, hogyha csak az autóra felszerelendő

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 301974973  
E-mail cím: zacherosdi@gmail.com

szenzorokra, aktuátorokra gondolunk. Jogilag is korlátozottak a dolgok, ugyanis különböző engedélyek nélkül nem lehet önvezető autót a közutakon tesztelni. [3] Továbbá számos esetben a fejlesztés során a tesztelés reprodukálhatósága elengedhetetlen, elég hogyha csak a behangolandó szabályzóparaméterekre vagy az algoritmus különböző - szélsőséges körülmények közötti viselkedésére gondolunk. Ezek miatt a jövőben kiemelt szerepe lesz a szimulációnak.

Jelenleg számos szimulációs program létezik, viszont kimondottan autonóm járművek fejlesztésére szánt környezet még nincs a piacon. Van amelyik program kimondottan az autó menetdinamikai vizsgálatára van kifejlesztve, mint például az IPG CarMaker, van ami kimondottan a járműveken használatos érzékelő szenzorok modellezésére lett tervezve, például a Pro-SIVIC. Van olyan aminek a közúti forgalom szimulálása a célja, mint például a SUMO [4], illetve vannak a különböző, robotok fejlesztésére szánt szimulációs környezetek, mint a például a Gazebo, ami integrálódik a manapság leginkább használatos robot-fejlesztési keretrendszerbe, a ROS-ba.[5]

A választott szimulációs környezet számos szigorú követelménynek kell megfeleljen és egy modellezési folyamat után validálni is kell a kapott eredményeket. Egyáltalán nem egyértelmű a választás, viszont hogyha valóban az a cél, hogy a robot minden körülmény között leváltsa az embert akkor elengedhetetlen az autó menetdinamikájának a pontos szimulálása is, hiszen a hirtelen, váratlan helyzetekben is megfelelő modellre van szükségünk, elég hogyha csak olyan esetekre gondolunk, amikor az autó a tapadási határ környékén van például egy hirtelen irányváltás, vagy vészfék esetén. Ezekre pedig a CarMaker egy megfelelő választásnak tűnik.[6] Továbbá az IPG szoftverének újabb verzióiban már különböző érzékelő szenzorok modellezésére is lehetőség van, így ebben a környezetben kivitelezhető lehet az önvezető autók rendszerszintű szimulációja.

A továbbiakban CarMaker által biztosított szimulációs szoftver által nyújtott szenzor modellezés lesz bemutatva, egy LiDAR szenzor példáján, valós mérési eredményekkel összehasonlítva, illetve ennek a modellnek az autonóm rendszer fejlesztésébe való integrációja.

## 2. Szenzor modellezés

A LiDAR szenzor a kibocsátott lézerefény hullámhossza, illetve a kibocsátott és visszaverődő fény fáziskülönbsége alapján érzékeli a szenzor közelében elhelyezkedő objektumokat nagy pontossággal. Az autonóm járművek fejlesztésénél a LiDAR szenzor az egyik alapfelszerelés a kifejezetten tesztelésre szánt autók körében [1], ahol egyik legelterjedtebb algoritmus, amihez használják a szenzort, az a SLAM (simultaneous localization and mapping). [7]

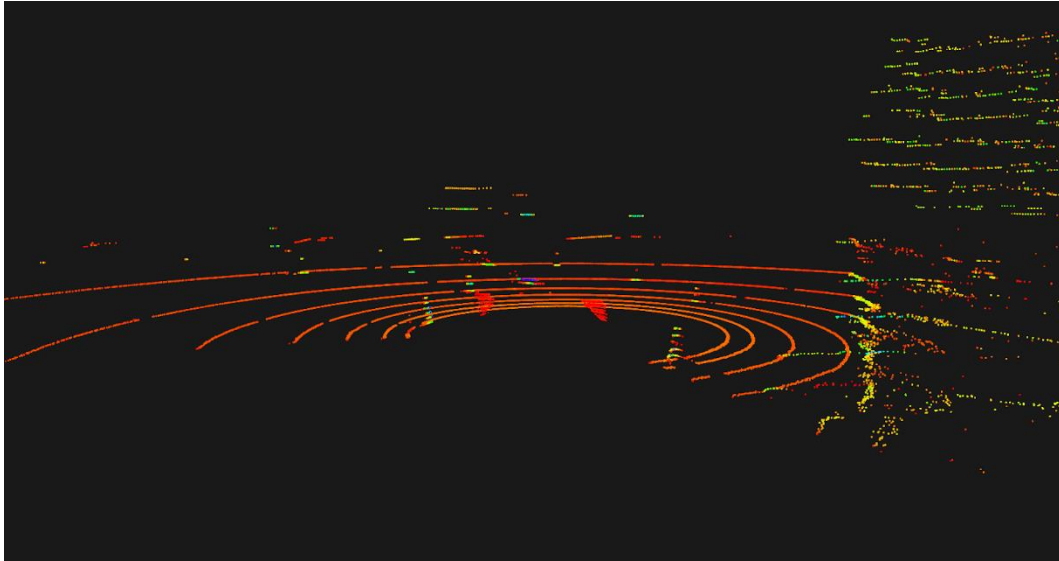
### 2.1. LiDAR Mérés

A modellezett LiDAR egy Velodyne VLP-16 volt, mellyel először méréseket végeztünk.

1. Táblázat. A szenzor fontosabb adatai

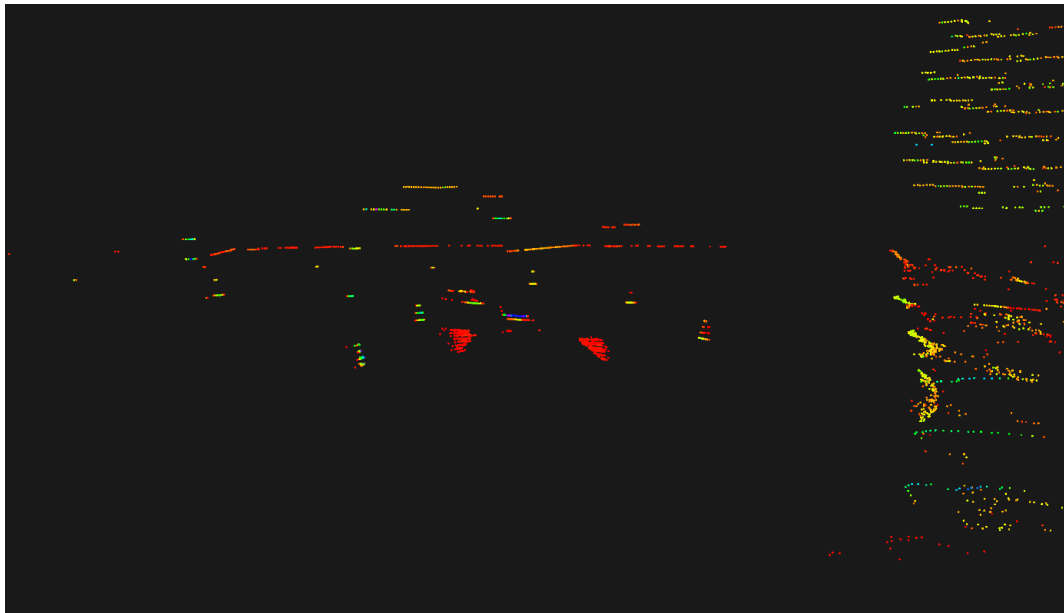
|                            |              |
|----------------------------|--------------|
| Mérési tartomány           | 100 m-ig     |
| Pontosság                  | +/- 3 cm     |
| Függőleges látószög        | 30° (+/-15°) |
| Szögfelbontás (függőleges) | 2°           |
| Szögfelbontás (vízszintes) | 0.1° - 0.4°  |

A szenzor az autó elejére volt felszerelve, és egy bójákkal kirakott pályán teszteltük az érzékelését. A kapott eredményeket szerettük volna reprodukálni a szimulációs környezetben.



1. ábra. Raw data

A fenti képen látható a különböző objektumokról visszaverődő fénysugarak alapján létrejövő pontfelhő. A különböző színek különböző fényintenzitáshoz tartoznak. Az első szembetűnő dolog a sík érzékelése, ugyanis az autó vízszintes tengelyéhez képest lefelé induló fénysugarak mind visszaverődnek a talajról, ennek a jelenségnek a modellezése viszont nem feltétlenül szükséges, ugyanis a síkszűrés egyszerűen megvalósítható, és elég csak a ténylegesen az autó útjában álló objektumokkal foglalkozni.



2. ábra. Pontfelhő a síkszűrés után

A síkszűrés utáni képen már kivehetőek a bóják, látható egy épület a kép előterében, a bóják között az autó vázáról visszaverődő pontok piros színnel, illetve a távolból érkező zajok. Egy ehhez hasonló pontfelhő reprodukálása az, amit a szimulációs környezettől elvárunk.



### 3. Szimulációs környezet

#### 3.1. Carmaker

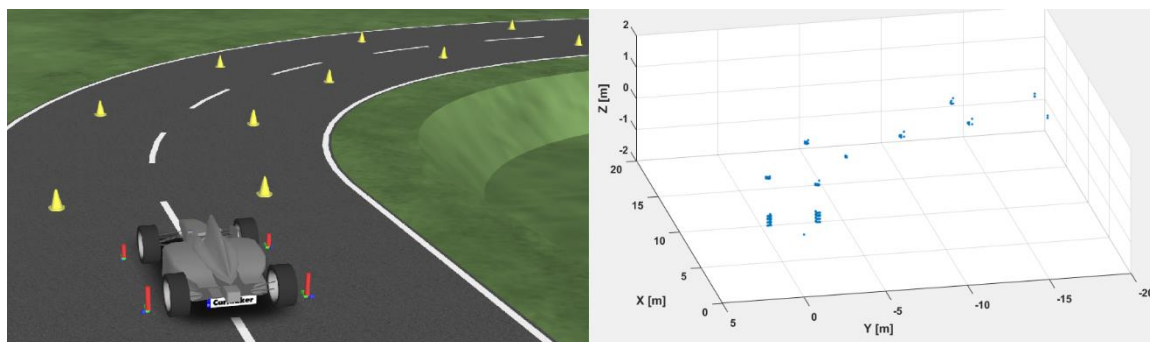
A Carmaker nyújt számunkra egy alap járműmodellt, melyet tetszés szerint paraméterezhetünk. Ha a modell valamelyik részével nem lennénk elégedettek, akkor pedig ezt akár teljesen újra is írhatjuk más környezetben, ami aztán tud integrálódni a Carmakerben. A legkézenfekvőbb környezet ehhez a MATLAB/Simulink, ugyanis ez a program eleve a modell alapú fejlesztésre lett kitalálva [8], egyszerűen integrálható Carmakerbe [9], illetve manapság a szabályzókat többnyire Simulinkben fejlesztik [10]. Az autonóm algoritmusok fejlesztése lényegében úgy tud megvalósulni, hogy a jármű-vezető modelljét írjuk meg mi magunk. Egy ilyen modell bemenete a szenzoradatok, kimenete pedig az aktuátorok alapjele. A Munkám során Carmaker által felkínált LiDAR modellt elemeztem.

#### 3.2. LiDAR modellezés Carmakerben

3. ábra. Lidar modell változtatható paraméterei

Megadhatjuk a szenzor elhelyezkedését az autón, illetve egyéb paramétereket, amiket az 1)-es táblázatban kiemeltem, viszont az alap modellnek van egy komolyabb megkötése. Ahhoz, hogy a szimuláció sebesség ne csökkenjen drasztikusan, a pontfelhő nem állhat több, mint 3000 elemből. Ezt a Segments h/v mezőben lehet megadni. Ahhoz, hogy a szenzor felbontását meg tudjam tartani, a függőleges látószöveget 20°-ra, a vízszintes látószöveget 110°-ra csökkentettm, amiket rendre 10 illetve 280 részre oszt fel a szenzor, így jön ki a 2°-os függőleges felbontás, és a 0.4°-os vízszintes felbontás. Rendelkezésre áll egy bonyolultabb szenzormodell is, a free space sensor plus, viszont ez külön szoftverintegrációt igényel.

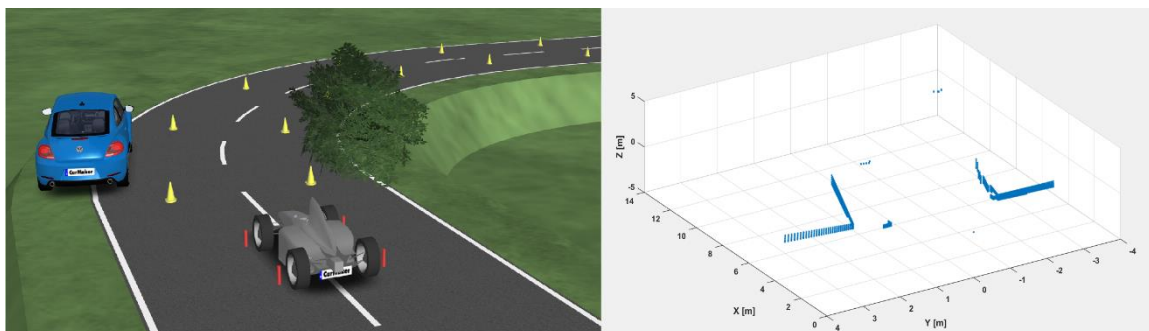
A felparaméterezett szenzor alapvetően előre elkészített objektumokat képes érzékelni, olyan objektumokat, amivel az autó a közutakon is szembetalálkozhat, viszont 3D modellező programmal készíthetünk mi is saját objektumot. Első körben a bóják lettek bemodellezve, illetve a pályán kirakott teszt esetet igyekeztünk szimulálni.



4. ábra. Szimulált pálya és a kapott pontfelhő

A kapott pontfelhő megfelelő, egyszerű bójadetektáló algoritmust lehet fejleszteni ebben a szimulációs környezetben, ami alapján az autó autonóm módban elnavigálhat a bóják között. Adódik a kérdés viszont, hogy a bonyolultabb közlekedési szituációkat hogyan kezeli le a program, ugyanis az alap szenzormodell az objektumokat hasábokkal közelíti. Látható a 4. ábrán is, ahogyan a bója egyszerűsítve van.

Ennek érdekében, a bójás pályát kiegészítettük egyéb tereptárgyakkal, ami egy személyautó közúton történő közlekedése közben gyakorta előjön. Parkoló autó illetve növényzet hozzáadása után is megnéztük a szimuláció eredményeit.



5. ábra. Eredmények bonyolultabb közlekedési szituáció esetén

Bonyolultabb közlekedési szituációkban már jól látszanak a modell korlátai, viszont alap útvonal-kereső algoritmusok fejlesztésére, egyszerűbb SLAM, illetve térképező algoritmusok fejlesztésére megfelelő ez a szimulációs környezet.

Járókelők, valós, veszélyes közlekedési helyzetek modellezésére viszont már nem alkalmas a modell. Az 5. ábrán látható, például ahogy nem lehet különbséget tenni a kapott pontfelhő alapján a parkoló autó, illetve a bokor között. Olyan döntési helyzetek elé nem lehet tehát állítani az algoritmust, amikor annak morális döntést kellene hoznia. [11]

## 4. Összefoglalás

Az a cél, hogy egy olyan szimulációs környezetet találjunk, amiben az autonóm járművet „vezető” algoritmus tesztelhető az érzékeléstől kezdve az aktuálásig. Az IPG által felkínált Carmaker lehetőségeit vizsgáltuk, azon belül is a LiDAR modellezést. A kapott eredmények alapján már tesztelhetőek, fejleszthetőek különböző útvonal tervező algoritmusok, viszont a modell egyszerűségéből adódóan bonyolultabb közlekedési helyzetek nem modellezhetőek.

Az egyik fejlesztési lehetőség, hogy integráljuk a MATLAB/Simulinkbe a Carmaker másik, bonyolultabb lidar modelljét. Ez már leköveti az egyes objektumok geometriáját, nem egyszerűsíti azokat hasábkkal, illetve egyéb paramétereket is ad az egyes pontokról (pl. Intenzitás)

Egy másik fejlesztési lehetőség a kamerák modellezése, és akkor már tesztelhető szenzorfüzió, képdetektáló algoritmus, illetve így a szimulációs környezet méginkább le fogja fedni az igényt, amit az autonóm járművek tesztelése kíván.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] Jessica Van Brummelen, Marie O'Brien, Dominique Gruyer, Homayoun Najjaran, Autonomous vehicle perception: The technology of today and tomorrow, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 89, 2018, Pages 384-406, ISSN 0968-090X, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.02.012>.
- [2] Federal Automated Vehicles Policy, Accelerating the Next Revolution In Roadway Safety, September 2016 , Page 9
- [3] Nynke E. Vellinga, From the testing to the deployment of self-driving cars: Legal challenges to policymakers on the road ahead, Computer Law & Security Review, Volume 33, Issue 6, 2017, Pages 847-863, ISSN 0267-3649, <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2017.05.006>.
- [4] ssia Belbachir, Jean-Christophe Smal, Jean-Marc Blosseville, Dominique Gruyer, Simulation-Driven Validation of Advanced Driving-Assistance Systems, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 48, 2012, Pages 1205-1214, ISSN 1877-0428, <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1096>.
- [5] Mostafa Sharifi, XiaoQi Chen, Christopher Pretty, Don Clucas, Erwan Cabon-Lunel, Modelling and simulation of a non-holonomic omnidirectional mobile robot for offline programming and system performance analysis, Simulation Modelling Practice and Theory, Volume 87, 2018, Pages 155-169, ISSN 1569-190X, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.06.005>.
- [6] Widner, A & Bári, G. (2018). Investigating the effects of roll center height in simulation, for safety-margin research. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 393. 012034. 10.1088/1757-899X/393/1/012034.
- [7] Tobias M. Quack, Matthias Reiter, Dirk Abel, Digital Map Generation and Localization for Vehicles in Urban Intersections using LiDAR and GNSS Data, IFAC-PapersOnLine, Volume 50, Issue 1, 2017, Pages 251-257, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.042>.
- [8] <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- [9] Abhishek Bhat, Akshay Vishwanath Malghan, Modelling of propulsion system for complete vehicle verification through simulation, Master's Thesis 2016:72, ISSN 1652-8557, Department of Applied Mechanics, Division of Vehicle Engineering and Autonomous Systems, Chalmers University of Technology
- [10] A.S. Martyanov, E.V. Solomin, D.V. Korobotov, Development of Control Algorithms in Matlab/Simulink, Procedia Engineering, Volume 129, 2015, Pages 922-926, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.135>.
- [11] Yochanan E. Bigman, Kurt Gray, People are averse to machines making moral decisions, Cognition, Volume 181, 2018, Pages 21-34, ISSN 0010-0277, <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.08.003>.

# AKKUMULÁTORHŰTÉS MÉRETEZÉSI FOLYAMATÁNAK VIZSGÁLATA FORMULA STUDENT VERSENYAUTÓBAN

## INVESTIGATION OF ACCUMULATOR COOLING SYSTEM SIZING METHOD FOR FORMULA STUDENT RACECAR

Sipos Gábor <sup>1</sup> Bári Gergely <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Járműtechnológia Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

---

### Kulcsszavak:

elektromos  
autó  
akkumulátor-hűtés  
hűtés  
regeneratív fékezés

### Keywords:

electric  
car  
accumulator cooling  
cooling  
regenerative braking

### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 17.  
Átdolgozva 2019. február 27.  
Elfogadva 2019. március 19.

---

### Összefoglalás

Az elektromos autók, versenyautók egyik nagy megoldandó kihívása az akkumulátor megfelelő kialakítása. Érdekes kiemelt figyelmet fordítani az elektromos energiatároló berendezések hűtésteknikai méretezésére, hogy a teljes versenytáv alatt maximális teljesítménnyel tudjon üzemelni a jármű hajtásrendszere. A kutatás az akkumulátor-hűtés méretezési folyamatával foglalkozik.

### Abstract

The proper design of electric vehicle's and racecar's accumulator is one of the biggest challenge of these vehicles. It is important to pay special attention to the sizing of the accumulator cooling system, in order to maximize the performance of the racecar for the entire race. This paper shows one way of the sizing method of accumulator cooling.

## 1. Bevezetés

A Formula Student nemzetközi versenysorozatban belsőégésű motorral szerelt és elektromos hajtásláncú autóknek is lehetőséget nyújtanak az indulásra. A BME Formula Racing Team e sorozatba fejleszt elektromos járműveket már 2011 óta. Az autó számára legnagyobb kihívást jelentő, 22 km hosszú Endurance versenyszám [1] ( a továbbiakban Endurance) során az autók nagyjából 20-25 percen keresztül üzemelnek folyamatosan, pusztán a féltávnál ejtenek meg a csapatok egy pilótacserét. Az évek során e versenyszám során tapasztaltak alapvetően jelölik ki az induló csapatok fejlesztési irányait, így a mi csapatunk számára is. Az elektromos járműveinknél felmerülő megbízhatósági problémák jellemzően a hajtáslánc hatékonysága, az akkumulátor kapacitása és e két terület hűtése köré csoportosultak. Annál fogva, hogy az említett versenyszám bír a legnagyobb pontértékkel, e problémák kiküszöbölése kulcsfontosságú. A felsorolt problémaköröket a fejlesztési folyamat legelején, a jármű-, és részegység szintű követelmények és specifikációk formájában lehet hatékonyan kezelni. Munkámmal egy, hűtés szempontjából is megfelelően felépített kialakítást szeretnék elérni, illetve az ehhez vezető utat bemutatni.

### 1.1. Járműkonceptió

A dolgozat alapjául szolgáló járműkonceptió elektromos, összkerék-hajtású és karbon

kompozit monocoque-vázsal szerelt. Nagyfeszültségű, 600 V-os, 80 kW leadására alkalmas akkumulátor szolgáltatja az energiát, mely a motorvezérlőn keresztül látja el a négy darab kerékagyra szerelt motort. Összkerékajtott elektromos járműként képes mind gyorsításkor, mind fékezéskor mind a négy motor nyomatékát használni, így kizárólag regeneratíván fékezni is - mely üzemmód hozzájárul az akkumulátor melegeedéséhez, az energiahatékonyság növelés mellett. A szabályzatból következő 80 kW-os teljesítményhatár, melyet az akkumulátorból kifolyó ágon mérnek árammérő szenzorok segítségével megköti a csapatok kezét teljesítmény tekintetében, ám a hozzá társított 60°C-os maximális cellahőmérséklet - melyet a verseny szervezői szintén ellenőrizhetnek - már komoly kihívás elé állítja a csapatokat az akkumulátor-tervezés kapcsán.

A nagyfeszültségű energiatároló hűtését a korábbi modellek esetében levegővel oldottuk meg, mellyel azonban komoly, túlmelegedési problémákat tapasztaltunk: az Endurance verényszám tesztelésekor, jellemzően a táv kétharmadánál (pályától függően), 33 °C-os környezeti hőmérsékletnél már túlmelegedés miatt állt meg az autó, az akkumulátor hőmérséklete elérte a 60 °C-ot.

## 2. Akkumulátor melegeedés számítása

Egy hűtésrendszer méretezésénél mindenekeelőtt az egység által disszipált hőmennyiséget szükséges ismerni, amit a rendszernek el kell vezetni.[2] A pontos érték meghatározása annál nagyobb feladat, minél több dolog függvénye - az akkumulátor esetében pedig több, egymást összetetten befolyásoló tényezőtől függ a melegeedés mértéke. E tényezők az akkumulátorban helyet foglaló cellák, ezek töltöttségi állapota, elhasználtsága és az éppen kifolyó áram erőssége, melyek két ugyanazon felépítésű pakk közt is különbséget tehetnek. Egy ilyen egység melegeedésének modellezése a belső ellenállás fogalmának bevezetésével lehetséges, ugyanis egy akkumulátor belső ellenállásán átfolyó áram fog fűteni, a feljebb említett tényezők tehát ezt a belső ellenállást befolyásolják tulajdonképpen.[3]

$$R_b = f(T_c, Soc, Soh, I)$$

## 3. Metódu

Az elektromos Formula Student autónk a verseny koncepciójából fakadóan jól szenzorozott, a jármű számot területéről gyűjtünk információt minden egyes pályára guruláskor. Csapatunk járművei sem kivételek, többek közt a következő értékeket monitorozzuk, monitoroztuk az FREC-006 és 007 modellekben:

- |                                          |                                      |
|------------------------------------------|--------------------------------------|
| • kormányzó                              | • akkumulátor összefeszültség        |
| • hőcserélő belépő hűtőközeg hőmérséklet | • gyorsulás (első és hátsó mérőpont) |
| • hőcserélő kilépő hűtőközeg hőmérséklet | • CAN üzenetek                       |
| • motorvezérlő hőmérséklete              | • motor fordulatszám                 |
| • motor hőmérséklet                      | • köridők                            |
| • akkumulátor cellák hőmérséklete        | • gps pozíció                        |
| • akkumulátor cellák feszültsége         | • féknyomások                        |
| • akkumulátor árama                      | • pedálállások                       |
|                                          | • rugóút                             |

A rendelkezésre álló információk alapján [4], célravezető eljárás lehet a belső ellenállás meghatározására, ha egy vagy több korábbi modell által gyűjtött adatokból indulunk ki, hisz az akkumulátor konfigurációja nem változik, kapacitást és feszültség szintet tekintve nincs, nem szükséges eltérni a korábbi megoldásoktól.

Első körben a gyorsulás verényszámon, illetve az erre történt gyakorlásokon gyűjtött adatokat kell megvizsgálni, hisz ekkor az autót egy 75 m hosszú egyenes szakaszra állítják, majd a pilóta a rajtjelet követően hirtelen gyorsítani kezd, teljes teljesítményt kikérve a motorvezérlőtől, egész a pálya végéig. Ez a szituáció egy letisztult helyzetet eredményez a járműnél, innen érdemes tehát belső-ellenállás becslést végezni. Legalább 5-6 adathalmazt szükséges megvizsgálni, hiszen

változhat akár ugyanazon pálya tapadási viszonya is, indulhat máshonnan is az autó, továbbá a pilóták reakcióiban is lehetnek eltérések. Amennyiben követjük az akkumulátor villamos modellezését [2], a kiértékelés során vizsgálni kell az akkumulátor összefeszültség beesését ( $\Delta U$ ), hogy ez mekkora áram hatására következett be ( $I$ ), így pedig eljutunk az egység belső ellenállásához ( $R_{b,Acc}$ ).

$$R_{b,Acc} = \frac{\Delta U}{I}$$

A belső ellenálláson disszipálódó hő ( $W_{melegítés}$ ) kiszámolása a következő lépés, az Endurance időtartama ( $t_2-t_1$ ), az akkumulátor belső ellenállása ( $R_{b, Acc}$ ) és a folyó áram négyzetének ( $I^2$ ) segítségével, így az alábbi integrál:

$$W_{melegítés} = \int_{t_1}^{t_2} I^2(t) \cdot R_{b, Acc} dt$$

E műveletet az autó adatgyűjtő rendszerével kell elvégezni, miután betápláltam az általam meghatározott belső ellenállás értékét, a szoftver pedig ehhez a hajtásrendszeren átfolyt áramot integrálva eredményül adja az akkumulátort melegítő hőt. Fontos kiegészítés, hogy eredetileg a rendszer a regeneratív fékezéskor negatív előjellel látja el az áramot, hiszen ellenkező irányban folyik, viszont esetünkben az áram iránya teljesen mindegy, mindkét esetben fűti a rendszerünket, így abszolút értékben számolunk vele.

Emellett a felhasznált energiát is érdemes feljegyezni a teljes versenytávra, így a képletből megkapott, és a teljes felhasznált energia hányadosával veszteségtényezőt tudunk definiálni. Az akkumulátor teljes kapacitását, amelyet egy versenytáv alatt el szándékozunk használni, ezzel a veszteségtényezővel megszorozva, majd a versenytáv becsült idejével elosztva megkapjuk a teljesítményt, mely az akkumulátort melegíteni fogja, ezáltal a modellezés alapjául szolgálhat.

### 3.1. FREC-006

Első körben a 2016-ban használt versenyautó adatai kerülnek elemzésre. Nyolc gyorsulás-versenyszám gyakorlás, illetve verseny adatsorait elemeztem az előző fejezetben leírt módon, mely elemzés eredményét az alábbi táblázat foglalja össze.

|    | $\Delta U$ [V] | $I$ [A] | $R$ belső [ $\Omega$ ] |
|----|----------------|---------|------------------------|
| 1. | 42,7           | 143,4   | 0,3                    |
| 2. | 37             | 136     | 0,27                   |
| 3. | 44             | 143,5   | 0,31                   |
| 4. | 44,7           | 157,2   | 0,28                   |
| 5. | 36,4           | 137,5   | 0,26                   |
| 6. | 38,6           | 145,3   | 0,27                   |
| 7. | 37,4           | 141,2   | 0,26                   |
| 8. | 42,7           | 147,9   | 0,29                   |

1. táblázat. Belső ellenállás meghatározása

A  $\Delta U$  oszlop a gyorsításkor beeső feszültségértékeket foglalja össze, míg az  $I$  oszlop az ekkor a cellákon folyó áramot, ezekből pedig előállt minden sorban az előző fejezetben vázolt módon a számolt belső ellenállás. A maximális érték 0,31  $\Omega$ -ra adódott, így a továbbiakban ezzel számolok.

Következő lépésként 9 db hosszútávú versenyszám adatsorait elemeztem, felhasznált és melegeedésre fordított energiamennyiségek segítségével. Az adatokat az alábbi táblázatban foglaltam össze, az adatsorokat azok keletkezési dátumaival azonosítom, meghatározom továbbá a veszteségtényezőt.



| Dátum    | Felhasznált energia | Melegítésre fordított energia | Veszteségtényező |
|----------|---------------------|-------------------------------|------------------|
|          | Wh                  | Wh                            | %                |
| 20160812 | 7511                | 188                           | 2,5              |
| 20160807 | 5675                | 139                           | 2,4              |
| 20160724 | 7893                | 237                           | 3                |
| 20160723 | 6377                | 191                           | 3                |
| 20160710 | 4636                | 128                           | 2,8              |
| 20160707 | 11179               | 258                           | 2,3              |
| 20160624 | 8215                | 191                           | 2,3              |
| 20160614 | 6063                | 147                           | 24               |
| 20160614 | 7085                | 171                           | 2,4              |

2. táblázat. 2016-os adatsor

A legnagyobb veszteségtényező a vizsgált távok alatt 3 % volt, ennek segítségével határozom meg az akkumulátor fűtő teljesítményt: a 6kWh-s akkumulátorpakkot - akkumulátor melegedés szempontjából - legrosszabb esetben 20 perc alatt merítjük le. Így a fűtőteliesség:

$$P_{melegítés} = 6 \text{ kWh} \cdot \frac{3\%}{20 \text{ min}} = 0,54 \text{ kW}$$

### 3.2. FREC-007

Egy, az előző fejezetben tárgyalt jármű vizsgálata mellett vizsgáltam a 2017-es modell által készített adatsorokat is. Mivel az akkumulátor konfigurációja megegyező volt, összehasonlítható vizsgálatokról beszélünk. Az alábbi táblázat 4 darab 2017-es Endurance fogyasztási és melegedési adatait mutatja.

| Dátum    | Felhasznált energia | Melegítésre fordított energia | Veszteségtényező |
|----------|---------------------|-------------------------------|------------------|
|          | Wh                  | Wh                            | %                |
| 20170525 | 6899                | 105                           | 1,5              |
| 20170526 | 8009                | 240                           | 3                |
| 20170703 | 7564                | 238                           | 3,1              |
| 20170802 | 6878                | 212                           | 3,1              |

3. táblázat. 2017-es adatsor

A maximális veszteségtényező 3,1 % volt, ezt egy hivatalos időmérési adattal, a csehországi versenyen abszolvált Endurance mérési adatával kiegészítve egy újabb fűtési teljesítményt lehet számolni.

$$t_{endurance, Csehország} = 1552,21 \text{ s}$$

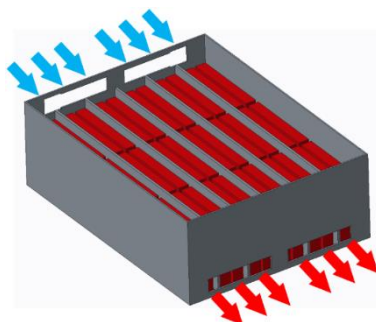
$$P_{melegítés} = 6,878 \text{ kWh} \cdot \frac{3,1\%}{t_{endurance, Csehország}} = 0,4961 \text{ kW}$$

Így az FREC-006 és 007 fejezetek eredményei alapján, a rosszabb esetet alapul véve, 0,54 kW érdemes feltételezni, mint az akkumulátorban termelődő hőáram.

#### 4. Hőtani - áramlástanai modellezés

Konceptcionális vizsgálatot és tervezést követően kijelenthető, a versenyszabályzat alapján az akkumulátorhűtés módjának leginkább a léghűtés felel meg. Megoldandó feladat, hogy a cellatestekre és a cellafülekre egyaránt megfelelő mennyiségű hűtőlevegő jusson. Hogy ezt a megfelelő mennyiséget meghatározzam, hőtani-áramlástanai szimulációknak szükséges alávetnem az akkumulátor belső kialakítását, majd úgy rendezni a cellatömböket, hogy azokat az autón kívülről beszívott levegő egyenletesen tudja hőmérsékleten tartani.

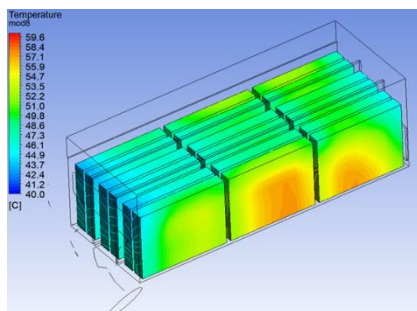
Az akkumulátor konfigurációja, melyhez nem nyúlhatok, a következő: 144s3p, vagyis a cellákat először párhuzamosan kötve 3-as egységekre osztjuk (modulok), majd ezekből 144-et sorosan építünk be. Ez 432 cellát jelent. Egy ilyen sok elemből álló, biztonságkritikus rendszer elektronikai és mechanikai kialakítása, felügyelő rendszere túlságosan összetett felépítésű, hogy egy végeselemes programban hatékonyan lehessen vizsgálni, egyszerűsíteni szükséges.[5] A geometriai egyszerűsítések következtében állt elő egy kiinduló modell, melynek negatívját is elkészítettem, hogy azt, mint a hűtőlevegő térfogatáramként funkcionáló térrészt tudjak használni a végeselemes programban. A kiinduló modellt és a levegő be-, és kilépési nyílásait az 1. ábra mutatja.



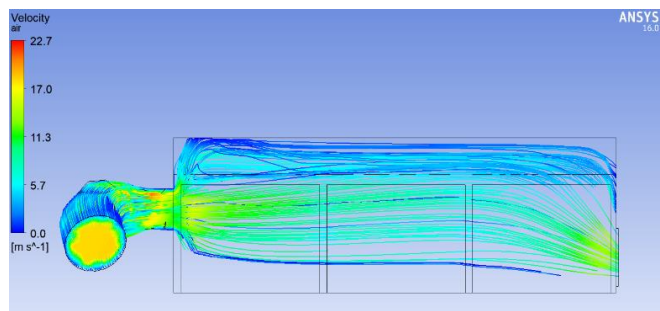
1. ábra. A kiinduló geometriai modell

Lipo cellák lévén, lítium-polimer anyagtulajdonságokat alkalmaztam [6] a cellákat jelentő tömbökre, vagyis a már említett cellahármasokra. A modell felépítése során a nyílásokon túl megadtam a cellatömbök, mint hőforrások hővezetési és hőátadási együtthatóit, a belépő levegő térfogatáramát és hőmérsékletét és kiinduló hőmérsékletet. A vizsgálatok során paramétereztem a be-, és kilépőnyílások méretét és pozícióját, illetve bizonyos terelőelemeket is építettem be az áramlási térbe, hogy a cellák hőeloszlása minél egyenletesebb legyen, ezek hatásait figyelembe véve közelítettem a végleges, autóba építendő megoldáshoz. Az egyes kialakítások milyenségét az átlagos modulhőmérséklet – térfogatáram, maximális modulhőmérséklet-térfogatáram diagramok alapján, az egyenletes hőmérséklet eloszlás alapján, és a nyomásesés alacsony szinten történő tartása alapján ítélt meg. A nyomásesésre a korlátozottan rendelkezésre álló, akkumulátorhűtésre fordítható teljesítmény miatt kellett ügyelni, melyet az autó kisfeszültségű akkumulátorából oldunk meg. Ez 160 W-ot jelent. Hogy pontosan mely típusú ventilátorok, milyen elrendezésben és mennyiségben alkalmasak a kiszámolt, szükséges, 0,178 m<sup>3</sup>/s előállítására, nyomásesés-térfogatáram diagram segítségével vizsgáltam meg, és jutottam el – az általam kialakított belső elrendezés görbéjének felvétele után.

A kutatómunka alapján kijelenthető, hogy a 2017-es modell kialakítása sem átáramoltatott levegőmennyiség, sem hőmérsékleteloszlás, sem pedig beömlőnyílások pozíciója alapján nem volt megfelelő, e tényezők okozták a versenyeken tapasztalt akkumulátor túlmelegedési problémákat. Az új elrendezéssel és hűtéssel az átlaghőmérséklet 50°C-ra adódott 40°C-os külső (és kiinduló) hőmérsékletet feltételezve, míg a maximális hőmérséklet sem éri el az 60°C-ot. A biztonsági



2. ábra. A hőmérséklet eloszlása



3. ábra. A hűtőlevegő útja és sebessége

tényezőt egyfelől a 40°C-os kiinduló hőmérséklet, másfelől – és nagyobb részben – az egyszerűsített geometria miatt csökkent hőleadó felület nagysága jelenti. A szimmetria, és a beömlő jelentette nagyobb számítási igény miatt csak a modell felével dolgoztam, ezt jól mutatja a 2. ábra, amely egyébként a hőmérséklet-eloszlást is ábrázolja. A 3. ábrán a légáramlatok sebességeloszlását ábrázoltam.

## 5. Konklúzió és fejlesztési lehetőségek

A vizsgálatokat Formula Student versenyautóra végeztem el, az akkumulátorhűtés-méretezési folyamat tehát így került kidolgozásra. Az általam használt modell legfontosabb bemenő paraméterét, a termelődő hőmennyiséget olyan, versenypályán használt akkumulátor által generált adatokból nyertem ki, mely konfigurációját tekintve egyezik az általam kialakítottal. A további fejlesztési irányokat illetően fontos lépés kell legyen, hogy az akkumulátor tervezésekor még nem rendelkezésre álló, akkumulátor-szintű adatsorok nélkül is képesek legyünk hőmennyiséget meghatározni. Ennek egy lehetséges módja lehet, hogy egy darab cella letesztelése alapján alkotunk olyan hőtani modellt, melyből kinyerhető a cellák összes belső ellenállása, a beépített áramutakéval egyetemben. A vizsgálatra – természetesen a cellatesztet követően – a MATLAB Simulink moduljának Racing Lounge – Battery Modelling funkciója lehet alkalmas, melyben áramkörökkel tudjuk modellezni a cellákat. Az itt alkotott modellek bemenetére definiálhatjuk az Endurance versenytávok alatt gyűjtött adatainkat - a feszültség és áram görbéket -, hogy pontos, e cikkben használt állandósult állapot béli vizsgálat helyett időben változó, tranziens jelenségekként írjuk le az akkumulátorok melegedését. E melegedési értékeket pedig be tudjuk táplálni az ebben a cikkben is használt ANSYS FLUENT modellbe, így modellezve a még nem összeépített új akkumulátor melegedését, hűtését és elektronikai paramétereit is. E kutatás eredményeképp sikerült feltárni a meglévő akkumulátorpakk fő gyengeségét, modellt alkotva megoldást találni, és új irányokat kijelölni is.

## Köszönetnyilvánítás

A cikk kutatásaihoz az Új Széchenyi Terv keretein belül az EFOP-3.6.2-16-2017-00016 számú projekt biztosított forrást. A kutatás az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

## References

- [1] [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2019/rules/FS-Rules\\_2019\\_V1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2019/rules/FS-Rules_2019_V1.1.pdf)
- [2] Mehrdad Mastali, Evan Foreman, Ali Modjtahedi, Ehsan Samadani, Amir Amirfazli, Siamak Farhad, Roydon A. Fraser, Michael Fowler 2018 Electrochemical-thermal modeling and experimental validation of commercial graphite/LiFePO<sub>4</sub> pouch lithium-ion batteries
- [3] Lip Huat Sawa, Yeong Jin Kinga, Ming Chian Yewa, Tan Ching Nga, Wen Tong Chongb, Nugroho Agung Pambudi 2017 Feasibility study of mist cooling for lithium-ion battery
- [4] Jiuchun Jiang, Yan Liang, Qun Ju, Linjing Zhang, Weige Zhang, Caiping Zhang 2017 An Equivalent Circuit Model for Lithium-sulfur Batteries
- [5] Zhao Lu, Xiaoling Yu, Lichuan Wei, Yalin Qiu, Liyu Zhang, Xiangzhao Meng, Liwen Jin 2018 Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement
- [6] Yuanwang Deng, Changling Feng, Jiaqiang E, Hao Zhu, Jingwei Chen, Ming Wen, Huichun Yin 2018 Effects of different coolants and cooling strategies on the cooling performance of the power lithium ion battery system: A review

## PALACK CÍMKÉK ELLENŐRZÉSE KAMERARENDSZERREL

### PLASTIC BOTTLE LABEL VERIFICATION USING CAMERA SYSTEM

Dokonpil Norbert<sup>2</sup>, Koszna Ferenc<sup>1,2,\*</sup>, Vincze Imre<sup>1,2</sup>, Piller László<sup>1,2</sup>, Megyesi Zoltán<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Informatika Tanszék, Gamf Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem, Magyarország

<sup>2</sup> Számítógépes Optikai Érzékelés és Feldolgozás Kutatólaboratórium, MTA-SzTAKI, Magyarország

---

#### Kulcsszavak:

Minőség ellenőrzés  
Látó rendszerek  
Ipari kamera  
Palack címke  
Mintaillesztés

#### Keywords:

Quality Control  
Vision System  
Industrial Camera  
Bottle Label  
Template Matching

#### Cikktörténet:

Beérkezett 2018. szeptember 21.  
Átdolgozva 2018. október 2.  
Elfogadva 2019. március 5.

---

---

#### Összefoglalás

Kamera rendszerek alkalmazása ipari minőség ellenőrzésre széles körben elterjedt gyakorlat, azonban legtöbbször jól kontrollált környezetben, meghatározott munkadarabok limitált változására alkalmazható. Ettől eltérően bemutatunk egy kamera rendszer megoldást, amely ismeretlen geometriájú palackra elhelyezett rendszeresen változó címkék ipari minőség ellenőrzését célozza meg egyedi képfeldolgozási módszerek alkalmazásával.

#### Abstract

Industrial vision systems are being widely applied for quality control application. However, these systems are mostly reliable in controlled environment, known work piece geometry and limited changes to the piece. In contrast we show a camera system based quality control application that verifies changes of unknown labels on plastic bottles of unknown geometry, using images processing techniques.

---

## 1. Bevezetés

Az ipari minőségellenőrzés régóta alkalmazott eszköze az ipari kamera és a kapcsolódó szoftver csomagok, azonban a megbízhatóság érdekében az ellenőrzési területek köre és az ellenőrzés körülményei általában jól meghatározottak. Gyakori a munkadarabok hiánytalanságának ellenőrzése vagy hibájának mérése. A munkadarabok általában ismert pozícióban érkeznek a kamera mérési terébe a kamerától megadott távolságban. A jelenlegi probléma egy változó méretű munkadarabra elhelyezett szöveges címke torzulását, illetve referenciától való eltérésének mérését célozza meg. A munkadarabok műanyag flakonok, amelyek eltérő méretűek: ürtartalmuk 10 cl-től 20l-ig terjed. A méretkülönbségek és a különböző gyártások miatt a munkadarabok manuálisan kerülnek a mérőcellába. A vizsgált címkék a flakon teljes oldalfalán megtalálhatók, és gyakran változhatnak. Ezen nehézségek miatt ez a probléma túlmutat az általunk vizsgált készen elérhető minőségellenőrzési szoftverek képességi körén.

Egy lehetséges megoldás erre a minőségellenőrzési problémára a palackok gyártási terveinek ismerete (CAD modellje) és a címkék pontos leírása segítségével elkészíteni a vizsgált munkadarabok látványtervét, amely a mért munkadarabbal összevethető. Azonban a munkadarabok és a referencia címkék sokfélesége, gyors változása, a palackok és a címke láthatósági modelljének összetettsége miatt ez nem járható út (különösen, mivel átlátszó palackok is lehetségesek). A választott módszer a referencia palack felvétele és annak a mintával való összehasonlítása, vagyis palackként és címkéként a referencia gyorsan megváltoztatható, de a mérést megelőzően rögzíteni kell azt.

---

\* Kapcsolattartó szerző. Tel.: +36 76 516 442

E-mail cím: koszna.ferenc@gamf.uni-neumann.hu

A mérőcella kiépítésénél több problémára is választ kellett találni, amelyek közül többet ismertetünk ebben a cikkben. A legfontosabb problémák a vizsgált felületek ismert pozícióba való elhelyezése, illetve a lehetséges torzulások modellezése és kompenzálása. A képfeldolgozási problémák elsősorban a behelyezési pozíció helyes detektálása illetve a címke hibák összehasonlítása során merülnek fel.

A cikk célja a mérőcella felépítésének bemutatása és a szoftver eredményeinek szemléltetése. A cikk felépítése a következő: Először kapcsolódó munkákat mutatjuk be (2. fejezet), majd a probléma bemutatása (3. fejezet) után a mérőcella felépítését (4. fejezet) és a működését ismertetjük (5. fejezet). A cikket az összehasonlítási függvények eredményeinek bemutatásával zárjuk (6. fejezet).

## **2. Kapcsolódó munkák**

Számos munka foglalkozik azzal, hogyan lehet komplett rendszerrel palackok bizonyos aspektusait vizsgálni. Riza Sulaiman és Anton S. Prabuwno [1] munkája: egy komplett, neurális hálózaton alapuló automata palackvizsgáló rendszert készítettek meglévő rendszerre építve. Éldetektálással palackok folyadékszintjének vizsgálatát kutatta Chintan Modi és társai [2]. Továbbá kutatások folytak intelligens képfeldolgozási rendszerek létrehozására [3], kész rendszer készítése megfelelő folyadék és kupak szint mérésére [4]. Az üres vizes palackok vizsgálatával [5] foglalkozó kutatás áll legközelebb a mi problémánkhoz. Az egyes munkák részben tartalmazzák a mi célkitűzéseinket, azonban a probléma megoldásához egyedi megoldásokat tervezünk használni. A különbséget a felsorolt munkákhoz képest a vizsgálandó palackok mérete, formája, színe határozza meg, és a feladatunk a címkék egyedi ellenőrzésére fókuszál, nem pedig a gyártás során a palackon keletkezett hibákra.

### 3. Probléma bemutatás

Különböző méretű palackokat gyártó cég felkérésére olyan minőségellenőrző eszközt, palackvizsgálót készítettünk, amely meghatározza a hibás címkézéseket, mint amelyre példát láthatunk az 1. ábrán.



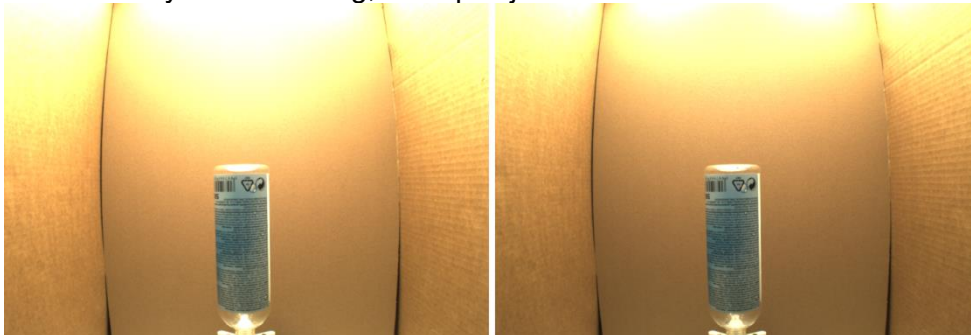
1. ábra - Hibás címkék

A probléma a gyártás során keletkezett selejtek észrevétele. Jelenleg ez a módszer emberi erőforrásokat és kézi ellenőrzést igényelnek, a későbbiekben ezt félig/teljesen automatizált rendszerrel szeretnék támogatni. Igény merült fel a címkék gyártás utáni/közbeni ellenőrzésére is, de ez elsősorban hardver kialakítási és teljesítménybeli követelmény különbségeket jelent, az ellenőrzési problémát nem befolyásolja.

Emberi szem által nehezen észrevehetőek például a minimális fokban eltérő címkék, több száz, több ezer palack ellenőrzéskor a szem elfáradásából eredő hibákat is ki kell szűrni majd. A kamerás ellenőrzés által detektált hibák azonban nem csak a címke hibákból eredhetnek, ezért fontos a lehetséges képi változások modellezése és olyan összehasonlítás kifejlesztése, amely ezen hibákra invariáns. A következő alfejezetekben a fontosabb képi hibák okát ismertetjük.

#### 3.1. Fénytani változások

Minden képfeldolgozási problémánál az első feladat a helyes megvilágítás meghatározása. Mindenképpen törekedni kell a kontrollálható mérés környezetre, vagyis arra, hogy a képfelvétel közben csak az általunk meghatározott fényforrások világítsanak. Viszont ebben az esetben is lehetségesek fénytani változások, amelyek pusztán a munkadarab önárnyékoló, illetve felületének visszaverő tulajdonsága miatt is kialakulhatnak. A 2. ábra illusztrálja a fénytani változásokat, amelyek az önárnyékolás és visszaverődés okoznak. A képek felső részén, illetve a megfogó területén jól látszik a fénytani különbség, de kép teljes területén vannak eltérések.



2. ábra - Fénytani változások önárnyékolás és felületi visszaverődés miatt



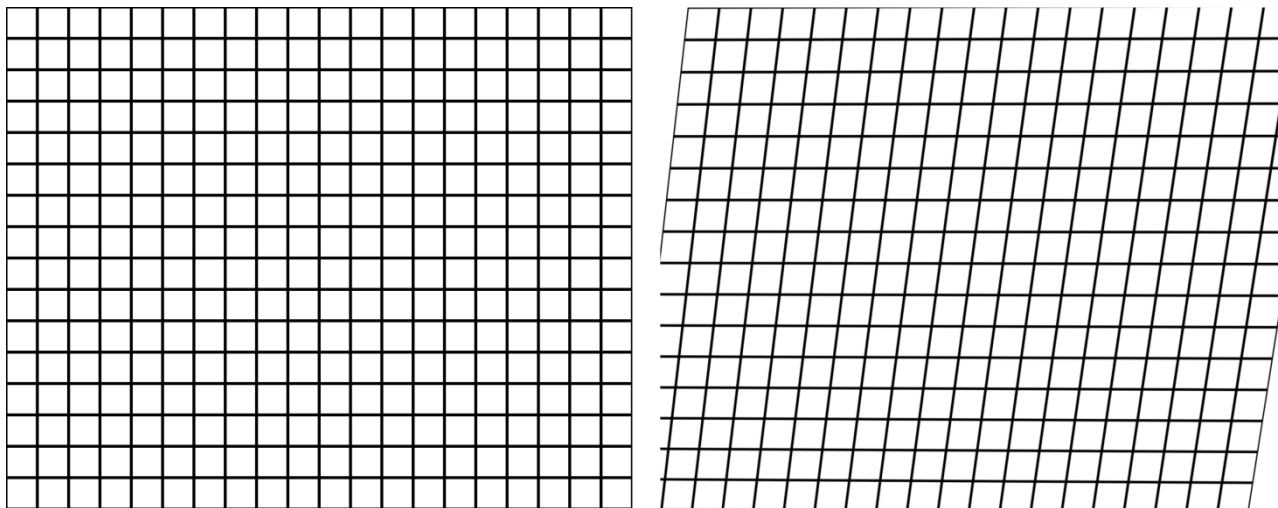
A fénytani változások kompenzálására fénytani *eltolás invariáns mintaillesztési módszerek* alkalmazása szükséges.

### 3.2. Vetítési torzulás

Egy másik fontos különbség, amely munkadarabokról készített felvételek esetén megfigyelhető az a vetítésből származó torzulás. Ha feltételezzük, hogy a munkadarabunk geometriailag azonos, de a referenciához képest máshol van elhelyezve, a torzulás modellezése csak a munkadarab 3D geometriájának pontos ismeretében lehetséges. Ha feltételezhető lenne, hogy a munkadarab vizsgálendő felszíne egy sík, úgy a torzulás jól közelíthető lenne egy affin torzulással, amely csak az alábbi torzulásokat engedi meg:

- Forgatás
- Eltolás
- Nyírás

Viszont a munkadarab mérete és aránya alapján a sík torzulását valójában egy perspektív transzformáció tudná megfelelően leírni, ahol csak az a megkötés, hogy az egyenes képe egyenes legyen (lásd 3. ábra).



3. ábra - Rács perspektív torzulása

Az affin és a perspektív torzulás detektálására és kompenzálására léteznek eszközök: olyan affin és perspektív invariáns jellemzők, amelyek alapján egyes képrészletek beazonosíthatók.

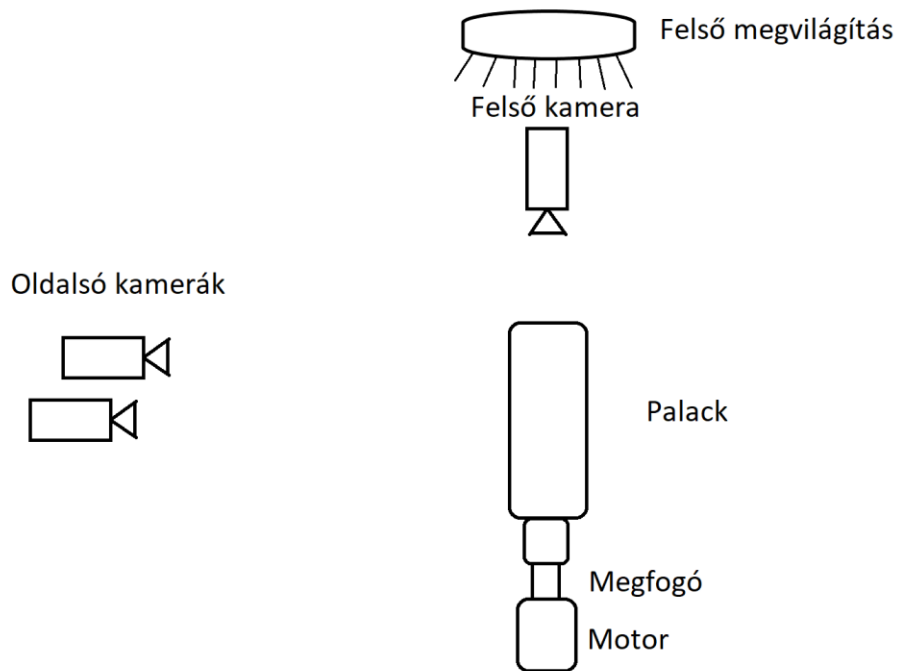
Ismeretlen geometria esetén azonban nem lehet pontosan leírni és kompenzálni a torzulást. Ilyenkor az alkalmazható módszer a címke részletekben való illesztése illetve a geometria detektálása vezethet sikerre. Ezért is különösen fontos, hogy a munkadarabok behelyezésekor a lehető legpontosabb legyen a pozicionálás. Megfelelő elhelyezés esetén az affin torzulás feletti torzulás általában elhanyagolható.

#### 4. A mérőcella hardver kialakítása

A tervezett rendszer az alábbi komponensekből épül fel:

- 2 oldalsó kamera,
- 1 felső kamera,
- a forgató motor, melyre egy megfogó van szerelve
- egy fényforrás, mely megvilágítja a palackot és a környezetét
- és egy fekete doboz melyben elhelyezkednek.

Az eszközök sematikus elhelyezkedését a 4. ábra mutatja.



4. ábra - Sematikus rendszerterv

A két oldalsó kamerára azért van szükség, mert a rendszernek tetszőleges méretű és formájú palackokat kell mérnie, vagyis a mérési felületek eltérő fókuszsíkon helyezkednek el. Egy kamera esetén lehetőség van automatikus fókusz használata, azonban nem lehetne garantálni az összehasonlítás során az azonos fókusz beállításokat. Két különböző fókuszú kamera segítségével az ismert méretbeli határértékek figyelembevételével minden esetben lehetséges majd éles mérési képet venni.

A felső kamera ahhoz kell, hogy amennyiben nem teljesen merőlegesen lett elhelyezve a palack a megfogóra a dőlésszögből eredő hiba kiszámítható és kompenzálható legyen. Ezen kívül információt szolgáltat - a későbbiekben részletezett mérés esetén - a behelyezett palack helyzetéről (forgásszögéről) a referencia felvételhez viszonyítva. A forgató motor a palackok forgatásáért felelős, segítségével körbe lehet fényképezni azokat, amely mind a referencia vételhez, mind az összehasonlításhoz szükséges. Fontos a forgató motor pontossága, ugyanis ez alapján kerülnek tárolásra az elkészült képek szögei. Amennyiben pontatlan a motor, nem az elvárt eredmény születik. A fekete dobozra a fényviszonyok kontrollálhatósága miatt van szükség, illetve segítségével könnyebben szegmentálhatók a palackok a nagyfelbontású képeken. Az elkészült CAD modell az 5. ábrán látható.



5. ábra - A rendszerterv CAD modellje

A kamerarendszerhez tartozik egy vezérlő program, amely kiadja a szükséges műveleteket és elvégzi a számításokat, melyekről később lesz szó. Alapvetően az elvégzendő műveletek egyszerűek: A motort forgatni kell, amelyen a palackok helyezkednek el, a kameráknak képet kell azokról készíteni, illetve el kell küldeni egyrészt a képeket, másrészt a különböző információkat a feldolgozó szoftver számára.

A szoftver képes referencia palackok felvételére, felvett palackok esetén pedig mérésre. A mérés lényegében egy egyedi képfeldolgozási algoritmus, melynek eredménye egy igaz/hamis érték. Ez annyit jelent, hogy képes megmondani a különböző palackokról, hogy azok címkéi hibásak-e vagy sem.

## 5. A munkafolyamat leírása

A mérési probléma megoldásához először is szükség van a megfelelő referencia képekre. Ennek elkészítése során az első lépés a kamerák és a motor inicializálása. Ezután, érkezik egy trigger jel a feldolgozó programtól a kamerák felé, hogy képet kell készíteni. A kép elkészülte után az visszaérkezik a feldolgozó programhoz, ahol ellenőrzésre kerül, hogy jó szögben készült-e. Amennyiben helyes a szög, a motorvezérlőnek küldött szög segítségével a palack elfordul, majd ismét képkészítési trigger jel kerül kiküldésre a kameráknak. A folyamat addig ismétlődik, míg a palack körbe nem fordult. Hiba esetén előlről kell kezdeni a referencia képek felvételét. Miután rendelkezésre állnak a szükséges referencia állományok, lefuttatható különböző palackokon a mérés algoritmus, mely a következőkben olvasható.

Összefoglalva tehát a szoftver a paraméterek beállítása után két fajta használati módban működhet. Az egyik a referencia készítés, a másik a mérés.

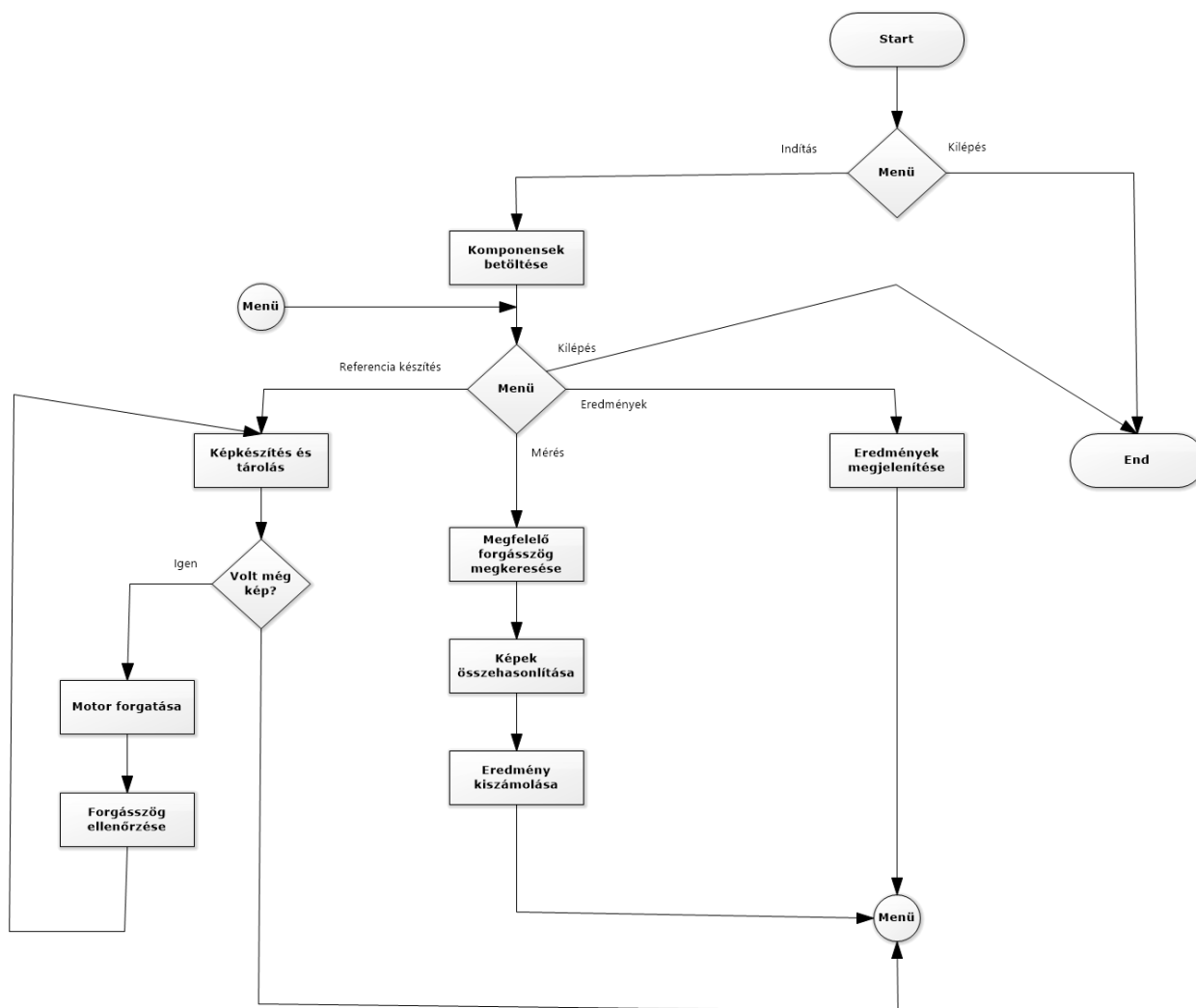
A referencia készítés folyamata:

- palack behelyezése
- palack tulajdonságainak rögzítése
- forgatás és felvétel készítés (1-0.1 fokként)
- referencia adatok tárolása

A mérés folyamata:

- palack behelyezése
- referencia kiválasztása
- forgatás és felvétel készítés (60-90 fokként)
- forgásszög alapú keresés a referenciaadatokban (forgásszög meghatározása)
- címke hibák mérése
- naplózás

A munkafolyamatokhoz tartozó szoftver működés folyamatábrája a 6. ábrán látható.



6. ábra - Az algoritmus folyamatábrája

Képfeldolgozási eszközökre a forgásszög meghatározásánál és a címke hibák detektálásánál van szükség. Mindkettő esetében valamilyen hibát kell számítani. A 2. ábrán látható, hogy egy általunk vizsgált képen nem csak a palack látható, hanem annak környezete is. Ez hibakalkuláció esetén egyrészt zavaró lehet (nem valódi hiba, zaj), másrészt megnöveli a számításigényt. Erre ad megoldást a palackszegmentáció. Ezt azt jelenti, hogy a képből minden felesleges részt eltávolítunk, csak a palack marad. Erre láthatunk példát a 7. ábrán.

A működése röviden:

- Bináris maszk készítése
  - Ki kell vonni a palackos képből az üres mérőcella képét
  - Küszöbölés segítségével megkapjuk a palack helyzetét
- ROI (Region of Interest) meghatározása a maszkra (Palack körüli téglalap pozíciója és mérete)
- Eredeti képen lévő palack körbevágása a ROI segítségével



7. ábra - Szegmentálás

### 5.1. Forgásszög meghatározása

Tegyük fel, hogy elkészült egy felcímkézett palackról egy nagy szögfelbontású referencia felvétel sorozat, és szeretnénk egy munkadarabon ellenőrizni a címke helyességét.

Ehhez miután a munkadarabot a mérőcellába helyeztük, hasonlóan a referencia készítéshez körbe kell fényképezni a palackot meghatározott szögekben, amelyeknek nem feltétlen kell egyeznie a referenciáknál használt szöggel. Első lépésként meg kell határozni a munkadarab forgásszögét a referenciához képest, vagyis meg kell keresni a legjobb illeszkedést a referenciákra a következő képlet segítségével (lásd 1. képlet).

$$\min \sum_i e_i^2, e: \text{mérési hiba} \quad (1)$$

Az  $e_i$  mérési hiba összegzi az egy forgásszöggel készült mérési képek eltérését (felső és oldalsó kamerákét egyaránt) az  $i$  szöghöz tárolt referencia képektől. Ahol a mérési hibák négyzetösszege minimális, ott van a forgásszög nullpontja, amely meghatározza, mely referencia képet kell használni a címke hibák számításához. A legjobb szögben készült felső és oldalsó kamerák arra is információt adnak, hogy mekkora a dőlésszögből eredő torzulás.

### 5.2. Címke hiba számítása

Amint meg van a megfelelő forgásszög és meg van határozva a dőlésszög hiba, sorban össze kell hasonlítani a mérési képeket a referencia képekkel. Ez azt jelenti, hogy nem keressük ki újra a referenciák közül azt amelyik a legjobban illeszkedik minden egyes mérési képre. Az előző lépésben meghatározott kezdőszög és a mérési kép szöge alapján már könnyedén megkereshető a következő referenciakép. Jelenleg egy kis tartományban keresi a legjobb referenciaképet a várt szög közelében.

Olyan mintaillesztési algoritmust alkalmazunk, amely forgatás, eltolás és fénytani változásokra invariáns. A kapott hiba alapján már egyértelműen el lehet dönteni, hogy az adott palack címkéje hibás-e vagy sem. Az összehasonlításra a fénytani változások miatt a Normalizált Kereszt Korrelációval (NCC) (2. képlet), és Normalizált Hibanégyzet Összeg (NSSD) (3. képlet) összehasonlítással is kísérleteztünk.



$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} T(x', y') \cdot I(x+x', y+y')}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x+x', y+y')^2}} \quad (2)$$

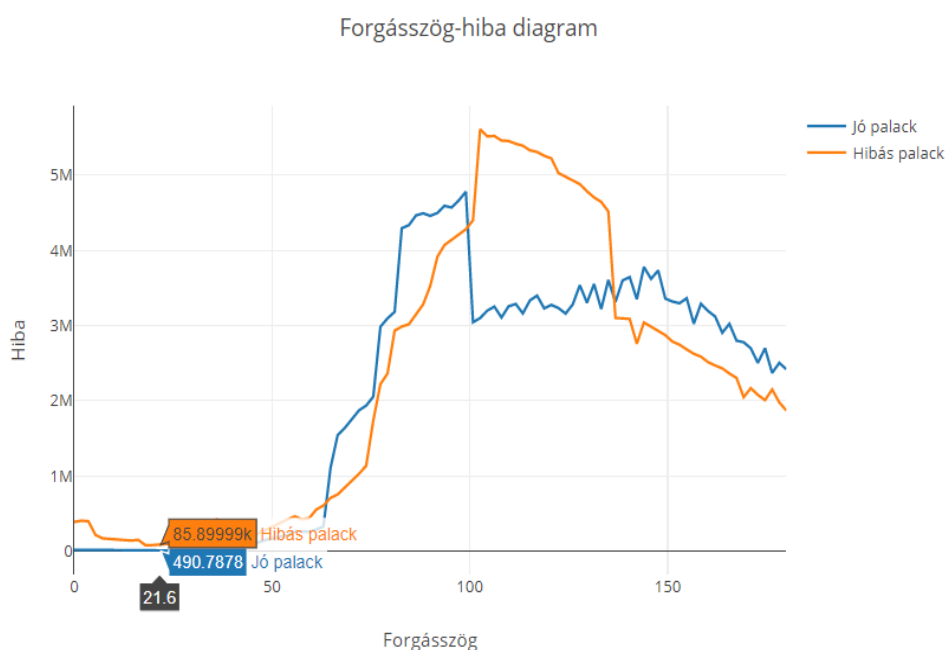
$$R(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} (T(x', y') - I(x+x', y+y'))^2}{\sqrt{\sum_{x', y'} T(x', y')^2 \cdot \sum_{x', y'} I(x+x', y+y')^2}} \quad (3)$$

Az összehasonlításokat, hogy affin invariáns legyen, limitált affin torzított képekre is el kell végezni, így minimalizálható a vetítési hibából adódó címke hiba. Az összehasonlítás eredménye a palack minden mérési szögéből vett hasonlósági érték, vagy hiba együttese. A jelen cikkben a pixelszámra átlagolt NSSD hibák négyzetes összegét alkalmaztuk.

## 6. Eredmények

A mérőcellát teszteltük több címke és palack sorozat esetén. Az itt bemutatott eredmények egy kiválasztott referenciához hasonlított helyes és címke hibás palackkal készültek.

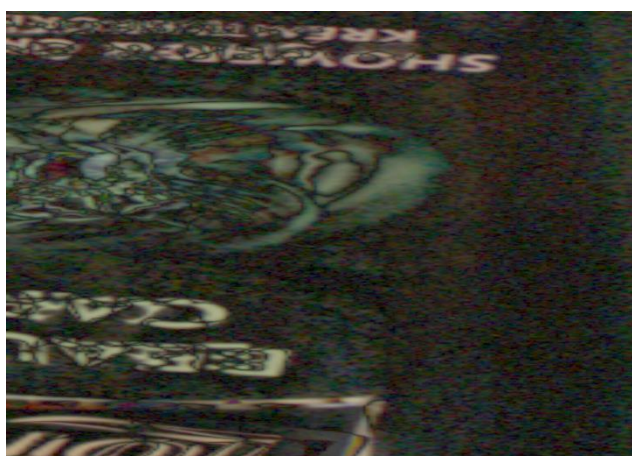
Az első eredmény a forgásszög meghatározásának módszerét támasztja alá. A 8. ábra a mérési palackok referenciával való összehasonlítását mutatja különböző forgásszögekben. Jól látható, hogy a legjobb forgásszöge egyértelműen meghatározható a hibafüggvény minimalizálásával mind a helyes palack, mind a hibás palack esetén. Fontos megállapítani, hogy a címkehibák a felső kamera használata miatt nem befolyásolják a forgásszög meghatározást.



8. ábra - Forgásszög-hiba diagram

A címke hiba ellenőrzésénél összehasonlítottuk a legjobb forgásszögben levő pozícióban készült referencia és mérési képeket mind helyes és hibás palackok esetében.

Hibás palack esetében az összehasonlításkor jelentős hibák jelentkeznek, amit a 9. ábra is mutat. A nagyságrendi hiba eltérés lehetőséget ad a küszöbölés alkalmazására, bár a helyes küszöb változhat a palackok függvényében.



9. ábra - Bal oldalon hibás (gyűrött címke) 197,4-es hiba értékkel, jobb oldalon helyes címke van 15,7-es hiba értékkel.

## 7. Összefoglalás

Bemutattuk a hardver koncepciót és egy tervezett munkafolyamatot egy mérőcella kialakítására, amely képes különböző méretű palackok címke hibájának ellenőrzésére. Az elmélet igazolására megépítettünk egy mérőcella deszkamodellt és megvalósítottuk a forgásszög ellenőrzésére és a címke hibák összehasonlítására alkalmas képfeldolgozási kódot, majd kísérleteket végeztünk helyes és hibás palackokon. A módszert igazolja, hogy a hibás és helyes palackok hiba értékei között nagyságrendi különbség van. A következő feladat a helyes küszöbértékek meghatározása, amely palackonként eltérhet, illetve a rendszer pontosságának, vagyis a legkisebb megbízhatóan detektálható címke hiba mérése.

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az EFOP-3.6.1-16-2016-00006 „A kutatási potenciál fejlesztése és bővítése a Neumann János Egyetemen” pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, mely a GINOP-2.2.1-15-2017-00075 „Új, innovatív műanyag extrudálási, flakonfúvási és címkézési technológia fejlesztése” pályázat keretében a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet együttműködésével valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- [1] “Intelligent Visual Inspection of Bottling Production Line through Neural Network” Riza Sulaiman and Anton S. Prabuwno Department of Industrial Computing Faculty of Information Science and Technology. [Online] Elérhető: <https://pdfs.semanticscholar.org/d710/2e0ce56139acb229c74cfa6401cf5adc2530.pdf> [Megtekintés: 25-Oct-2018].
- [2] “Selecting the Most Favourable Edge Detection Technique for Liquid Level Inspection in Bottles” Chintan Modi et al. Indian Institute of Technology Bombay. [Online] Elérhető: [https://www.researchgate.net/publication/229016146\\_Selecting\\_the\\_Most\\_Favourable\\_Edge\\_Detection\\_Technique\\_for\\_Liquid\\_Level\\_Inspection\\_in\\_Bottles](https://www.researchgate.net/publication/229016146_Selecting_the_Most_Favourable_Edge_Detection_Technique_for_Liquid_Level_Inspection_in_Bottles) [Megtekintés: 25-Oct-2018].
- [3] “Development of Intelligent Visual Inspection System (IVIS) for Bottling Machine” Anton Satria Prabuwno, Riza Sulaiman, Abdul Razak Hamdan, A. Hasniaty Faculty of Information Science & Technology, National University of Malaysia [Online] Elérhető: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4142152> [Megtekintés: 25-10-2018].
- [4] “Feature extraction algorithm for fill level and cap inspection in bottling machine” Leila Yazdi, Anton Satria Prabuwno, Ehsan Golkar, Center for Artificial Intelligence Technology (CAIT), Faculty of Information Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia [Online] Elérhető: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5976910> [Megtekintés: 25-10-2018].
- [5] “Fault detection and localization in empty water bottles through machine vision” F. Shafait, S.M. Imran, S. Klette-Matzat Hamburg Univ. of Technol., Germany [Online] Elérhető: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1353840> [Megtekintés: 25-10-2018].