

Pokorádi László

ÜZEMELTETÉSI FOLYAMAT SÚLYOZOTT ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLATA

DOI: 10.32560/rk.2019.1.1

Az üzemeltetési, karbantartási vezetők döntésének egyik mozgató rugója az adott szakterület sajátosságain alapuló értékrendjük. Ez meghatározó szerepet játszik a karbantartással kapcsolatos döntéshozatalban. A szakemberek szubjektív megközelítései meghatározhatók, és súlyszámokkal jellemezhetőek. Tanulmányunkban az üzemeltetési folyamatok sztochasztikus modellezésére épülő úgy nevezett súlyozott érzékenység vizsgálatát mutatjuk be.

Kulcsszavak: üzemeltetés, érzékenységvizsgálat, döntéshozatal

BEVEZETÉS

A műszaki élet egyik legfontosabb területe a technikai eszközök karbantartása, javítása. Egy karbantartási rendszer menedzsmentjének hatékonyságát az egységnyi üzemidőre eső karbantartási költség, kiszolgálási munkaigény, vagy a rendelkezésre állás alapján tudjuk minősíteni.

Az üzemeltetési rendszerek, illetve folyamatok rendszerszemléletű leírásának és matematikai modellezésének alapjai Pokorádi [3], [5], [7] publikációiból ismerhető meg részletesen. Pokorádi [3] tanulmányában javasolt szimulációs érzékenység-elemzési eljárás alkalmas a karbantartási rendszer hatékonyságának növeléséhez szükséges döntések támogatására. Ekkor viszont fontos szempont a különböző üzemeltetési rendszer, illetve folyamatjellemzők szakma-specifikus súlyának ismerete.

Kavas szerint a több-szempontrú döntések esetén az egyik lényeges elem az értékelési szempontok fontossági sorrendjének minél pontosabb meghatározása, másképpen a fontossági sorrend súlyozása. A szempontrendszer kialakítása folyamatában a szempontokhoz tartozó konzisztencia meghatározása az egyik legfontosabb és legnehezebb feladat. A komplex adatértékelés elképzelhetetlen súlyozási lépések végrehajtása nélkül, mert a legjobb döntési alternatíva mellett a lehetséges választások rangsora meghatározható [2].

Kavas szerint az alkalmazhatóság, a megbízhatóság és a pontosság szempontjából a Guilford féle eljárás a legelfogadottabb [2]. Egyszemélyes döntéshozatal esetén nem javasolt a módszer alkalmazása, csoportos munkamódszernél is követelmény a nem teljes egyetértés teljesülése. Nagy előnye továbbá, hogy az elemző, összehasonlító munkát csupán az összevetendő tényezők párosaiban szükséges elvégezni, a súlyszámok már automatikusan adódnak az eljárás lépéseinek során. További gyakorlati tapasztalat az elemző csoport vonatkozásában, a szükséges minimális létszám. A Guilford eljárást minimum 5 fős csoport létszám esetében ajánlatos alkalmazni [1].

Ágoston – szerzőtársaival – a karbantartó szakemberek szubjektív, szakma-specifikus véleményeit elemezte a páros összehasonlítás módszerével [1], [4], [6].

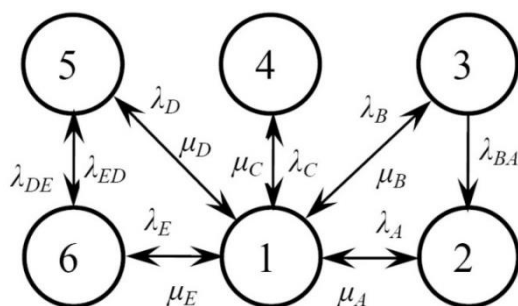
Jelen dolgozat célkitűzése fenti tanulmányok eredményeit felhasználva bemutatni az üzemeltetési folyamatok úgynevezett súlyozott érzékenységvizsgálatát. A javasolt módszer választ ad a vizsgált rendszer szakma-specifikus karbantartási szempontú optimalásának kérdéseire.

A tanulmány az alábbi fejezetekből áll: A 2. fejezet a szemléltetésre választott üzemeltetési folyamat sztochasztikus matematikai modelljét mutatja be, röviden. A 3. fejezetben a páros összehasonlítás módszerével meghatározott szakma-specifikus súlyértékei ismerhetőek meg. A 4. fejezet a súlyozott érzékenység vizsgálatot írja le. Végezetül az 5. fejezetben a Szerző összegzi munkáját.

A VIZSGÁLT ÜZEMELTETÉSI FOLYAMAT MODELLJE

A szemléltetésre kiválasztott technikai rendszer egyik berendezésének üzemeltetése során négy eltérő fő típusú – adott részegységekhez kötődő – meghibásodást tapasztaltak (**A**; **B**; **D**; **E**), melyek a leállások körülbelül 94%-t okozzák. A többi, nem szignifikáns mértékű meghibásodások javítását a **C** típusú meghibásodás javításaként kezeljük. A **B** típusú hiba javítása közben gyakran feltárták a szerelők, hogy az **A** típusú hiba fellépése is hamarosan bekövetkezhet. Hasonló (de „oda-vissza”) jelenségeket tapasztaltak a **D** és az **E** típusú meghibásodások javítása során is. Ekkor, megelőzési céllal, a másik típusú hibát kiváltó részegység javítását is elvégezték a karbantartók. A üzemeltetési adatok statisztikai elemzése kimutatta, hogy a meghibásodások bekövetkezési gyakoriságai exponenciális jellegű eloszlásokkal bírnak és a gyártósor működési idejétől függetlenek. A meghibásodások és a javításaik statisztikai főbb adatait az 1. táblázat tartalmazza.

Üzemeltetési folyamat stacioner valószínűségi modelljének felállítását a gráf modell felrajzolásával kezdjük. A folyamatot súlyozott élű, irányított gráffal tudjuk szemléltetni, ahol az élek súlyát az állapotváltási valószínűség sűrűségek (meghibásodási, illetve javítási ráták) adják meg (1. ábra).



1. ábra A folyamat gráf modellje

- 1 – rendeltetésszerű használat; 2 – **A** típusú meghibásodás javítása;
- 3 – **B** típusú meghibásodás javítása; 4 – **C** típusú meghibásodás javítása;
- 5 – **D** típusú meghibásodás javítása; 6 – **E** típusú meghibásodás javítása

A gráf modell alapján a Kolmogorov-féle differenciál-egyenletrendszer – mely az állapotokban való tartózkodás valószínűségeinek időbeni változását írja le – estünkben az alábbi módon adható meg:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP_1}{d\tau} &= m_{11}P_1 + m_{12}P_2 + m_{13}P_3 + m_{14}P_4 + m_{15}P_5 + m_{16}P_6 \\
 \frac{dP_2}{d\tau} &= m_{21}P_1 + m_{22}P_2 + m_{23}P_3 \\
 \frac{dP_3}{d\tau} &= m_{31}P_1 + m_{33}P_3 \\
 \frac{dP_4}{d\tau} &= m_{41}P_1 + m_{44}P_4 \\
 \frac{dP_5}{d\tau} &= m_{51}P_1 + m_{55}P_5 + m_{56}P_6 \\
 \frac{dP_6}{d\tau} &= m_{61}P_1 + m_{65}P_5 + m_{66}P_6
 \end{aligned} \tag{1}$$

ahol m_{ij} az állapotváltási intenzitások, melynek értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

Meghibásodás	A	B	C	D	E
MTBF [óra]	1316,3	892,8	1339,4	1410,1	1396,4
Meghibásodási ráta λ [óra ⁻¹]	$7,597 \cdot 10^{-4}$	$1,1201 \cdot 10^{-3}$	$7,466 \cdot 10^{-4}$	$7,0917 \cdot 10^{-4}$	$7,1613 \cdot 10^{-4}$
Javítási átlagidő MTTR [óra]	7,08	9,63	2,14	8,21	7,62
Javítási ráta μ [óra ⁻¹]	0,14124	0,10384	0,46729	0,1218	0,13123
Átl. javítási költség rc_i [€]	150,2	115,4	98,7	210,8	352,4
Átlagos munkaigény rw_i [munkaóra]	14,16	14,45	5,35	24,63	17,5
λ_{ij} [óra ⁻¹]	–	0,427	–	0,613	0,524

1. táblázat Statisztikai elemzés főbb adatai

$m_{11} = -(\lambda_A + \lambda_B + \lambda_C + \lambda_D + \lambda_E)$	$m_{12} = \mu_A$
$m_{13} = \mu_B$	$m_{14} = \mu_C$
$m_{15} = \mu_D$	$m_{16} = \mu_E$
$m_{21} = \lambda_A$	$m_{22} = -\mu_A$
$m_{23} = \lambda_{BA}$	$m_{31} = \lambda_B$
$m_{33} = -(\mu_B + \lambda_{BA})$	$m_{41} = \lambda_C$
$m_{44} = -\mu_C$	$m_{51} = \lambda_D$
$m_{55} = -(\mu_D + \lambda_{DE})$	$m_{56} = \lambda_{ED}$
$m_{61} = \lambda_E$	$m_{65} = \lambda_{DE}$
$m_{66} = -(\mu_E + \lambda_{ED})$	

2. táblázat Állapotváltási sűrűségek

Mivel az általunk vizsgált folyamatot beálltnak, azaz időben állandónak tekinthetjük, így az állapotokban való tartózkodási valószínűségek időszerinti deriváltjainak zérusnak kell lenniük, azaz:

$$\frac{dP_1}{d\tau} = \frac{dP_2}{d\tau} = \frac{dP_3}{d\tau} = \frac{dP_4}{d\tau} = \frac{dP_5}{d\tau} = \frac{dP_6}{d\tau} = 0 \tag{2}$$

A megoldás további feltétele az is, hogy

$$\sum_{i=1}^6 P_i(\tau) = 1 \quad , \quad (3)$$

amely azt fejezi ki, hogy az üzemeltetés tárgya csak a fenti hat állapot (melyek a teljes eseményteret alkotják) valamelyikében tartózkodhat.

A fenti feltételek alapján felállítható matematikai modell megoldásakor problémaként jelentkezett, hogy a numerikus algoritmusok könnyen a

$$p = 0$$

triviális megoldást adják, vagy adhatják. Az esetünkben hat-ismeretlenes egyenletrendszer hét-ismeretlenesre alakította át. Az állapotokban tartózkodások valószínűségeinek vektora hetedik elemének a teljes eseménytér bekövetkezésének valószínűségét adják meg. Így az alábbi lineáris matematikai modellt kell megoldani.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} & m_{15} & m_{16} & 1 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ m_{31} & 0 & m_{33} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ m_{41} & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 & 1 \\ m_{51} & 0 & 0 & 0 & m_{55} & m_{56} & 1 \\ m_{61} & 0 & 0 & 0 & m_{65} & m_{66} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad . \quad (4)$$

Az egyenletrendszer – az 1. táblázat értékeinek felhasználásával történő – megoldása az alábbi állapotokban való tartózkodási valószínűségeket jelenti:

$$\begin{aligned} P_1 &= 9,7399 \cdot 10^{-1}; & P_2 &= 1,1452 \cdot 10^{-2}; \\ P_3 &= 2,0551 \cdot 10^{-3}; & P_4 &= 1,5562 \cdot 10^{-3}; \\ P_5 &= 5,1048 \cdot 10^{-3}; & P_6 &= 5,8403 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

A kapott eredmény alapján ki tudjuk jelenteni, hogy a berendezés esetén 97,4%-os készenlélet tudunk biztosítani a jelenlegi karbantartási rendszerrel. Mivel ismertek a javítási költségek, illetve a javítási munkaigények, így prognosztizálhatjuk, egy adott T vizsgálati idő alatti RC_Σ javítási költséget, illetve WE_Σ munkaigényt. Ez az alábbi összefüggések segítségével oldható meg:

$$RC_\Sigma = T \sum_{i=2}^6 \frac{rc_i P_i}{\tau_i} \quad , \quad (5)$$

illetve

$$WE_\Sigma = T \sum_{i=2}^6 \frac{we_i P_i}{\tau_i} \quad , \quad (6)$$

ahol:

- rc_i – i -edik javítás költsége;
- we_i – i -edik javítás munkaigénye.

Példánkban 10 000 órával számolva a javítási költség: 7405,1 Euro, illetve a munkaigény: 586,05 munkaóra.

SZAKÉRTŐI VÉLEMÉNYEK ELEMZÉSE

A karbantartási szakértők véleményének felmérésére a páros összehasonlítás módszerét választottuk, melynek módszertana részletesen Kavas [2] munkájából ismerhető meg. A felmérés elvégzéséhez egy kérdőívet készítettünk, melyet eljuttattunk különböző területen dolgozó karbantartó szakemberekhez [1].

Az ön szervezete melyik alábbi kategóriába sorolható? *

termelő vállalat

villamos erőmű

vasúti közlekedés

légi közlekedés

közúti (városi) közlekedés

Az alábbi két szempont közül melyiket tartja fontosabbnak a karbantartás-javítás hatékonyságának megítélése szempontjából? *

az eszköz (üzemképes) rendelkezésre állása

karbantartási, javítási költség

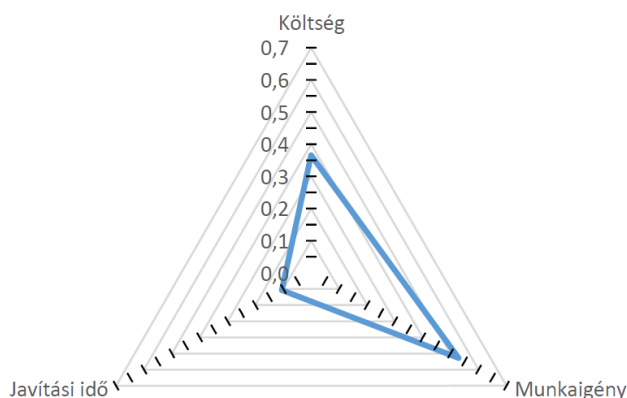
2. ábra A kérdőív részlete

A kérdőív első kérdése a szakemberek szakterületenkénti csoportosításához szükséges. A többi kérdése tulajdonképpen ugyanazt az egy, a véleménynyilvánítás rangsorolását lehetővé tevő kérdést tettük fel. A rangsorolandó szempontok az alábbiak voltak:

- az eszköz (üzemképes) rendelkezésre állása: F_1 ;
- karbantartási, javítási költség: F_2 ;
- karbantartási, javítási (munkaórában kifejezett) munkaigény: F_3 ;
- karbantartási, javítási (naptári) időigény: F_4 .

Jelen tanulmányban csak az erőműi karbantartók és a katonai repülőtechnikát üzemeltetők válaszait értékeljük. A további elemzéshez csak a javítási költség, valamint javítási munkaigény súlyszámait alkalmazzuk.

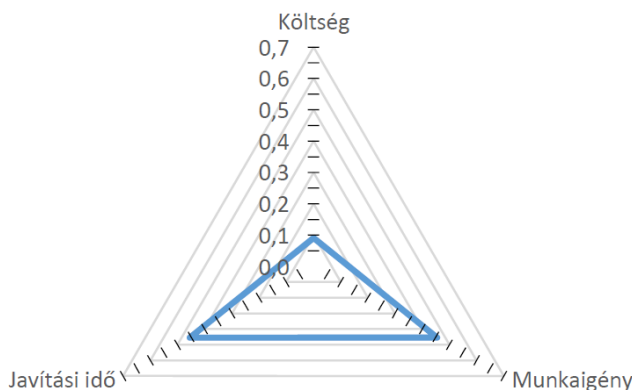
Az erőművekben dolgozó karbantartó szakember számára a munkaórában kifejezett munkaigény a leginkább preferált karbantartási, javítási szempont. Ezeknek a szakembereknek a második legfontosabb célja is az, hogy a javítási költségeket optimalizálhassák, minél alacsonyabb szinten tarthassák. Az itt dolgozó döntéshozók a beérkezett szavazatok alapján a javítás időkiadására a legkevésbé érzékenyek.



3. ábra A szempontok fontosságának normált NWV_i súlyértékei erőművek esetén

	F_2	F_3	F_4	a	a^2	p	u	z	S	NWV
F2	0	8	10	18	324	0,5196	0,0492	61,543	0,3462	0,3659
F3	9	0	14	23	529	0,6176	0,2993	100	0,5	0,5284
F4	7	3	0	10	100	0,3627	-0,3511	0	0,1	0,1057
Σ	16	11	24	51	953	–	–	–	0,9462	1

3. táblázat Kitöltött preferencia táblázat erőművek esetén



4. ábra A szempontok fontosságának normált NWV_i súlyértékei katonai repülőtechnika esetén

	F_2	F_3	F_4	a	a^2	p	u	z	S	NWV
F_2	0	1	2	3	9	0,367	-0,341	0	0,1	0,0909
F_3	4	0	2	6	36	0,567	0,168	100	0,5	0,4545
F_4	3	3	0	6	36	0,567	0,168	100	0,5	0,4545
Σ	7	4	4	15	81	–	–	–	1,1	1

4. táblázat Kitöltött preferencia táblázat katonai repülőtechnika esetén

Az előző területhez képest jelentősen eltérő mutatók születtek a katonai repülés területén. Elmondható, hogy számukra a munkaigény mellett hasonlóan releváns a karbantartás, javítás minél rövidebb idő alatt történő elvégzése. Ez a két szempont a repülés bármely területén dolgozó szakembernek és döntéshozóiknak kiemelkedően fontos, míg a rájuk szánt költségeket kevésbé relevánsnak jelölték meg, ezt mutatja, hogy ez utóbbi súlyozott értéke ötödét teszi ki az előző két szempontnak.

SÚLYOZOTT ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT

A 2. fejezetben felállított sztochasztikus matematikai modell felhasználható a vizsgált üzemeltetési rendszer szimulációs érzékenységvizsgálatának elvégzésére. A felállított matematikai modell alkalmazásával – a (4)–(6) egyenletek megoldásával – meghatározható, hogy miként fognak változni a vizsgált üzemeltetési rendszer kimenő jellemzői.

Következő lépésként meghatároztuk a modellezett meghibásodások közti átlag idő (*MTBF*) változás úgynevezett

$$FV_i = \sqrt{\Delta WE^2 + \Delta RC^2} \quad (10)$$

Fitness Értékét (Fitness Values – *FV*). Ezen értékek szerepelnek az 5. táblázat „Alap” című résztáblázatában.

Következő lépésként figyelembe vesszük a különböző karbantartási szakemberek véleményét a 3., illetve 4. táblázatokban szereplő NWV_i normalizált súlyértékekkel határozzuk meg a Súlyozott Fitness értéket (*Weighted Fitness Value* – *WFV*)

$$WFV_i = \sqrt{(NWV_{WE} \Delta WE)^2 + (NWV_{RC} \Delta RC)^2} \quad (11)$$

Az 5. táblázat tartalmazza a Fitness Értékeket. A 6. táblázat a Súlyozott Fitness Értékek sorrendjét szemlélteti.

	A	B	C	D	E
Alap					
RC_i	-0,690	-0,967	-0,454	-1,226	-1,302
WE_i	-0,826	-1,222	-0,309	-1,155	-1,126
FV_i	1,0762	1,5580	0,5489	1,6847	1,7213
Erőmű					
$NWV_{RC} \cdot RC_i$	-0,252	-0,354	-0,166	-0,449	-0,476
$NWV_{WE} \cdot WE_i$	-0,436	-0,646	-0,163	-0,610	-0,595
WFV_i	0,5042	0,7361	0,2328	0,7576	0,7622
Katonai repülés					
$NWV_{RC} \cdot RC_i$	-0,063	-0,088	-0,041	-0,111	-0,118
$NWV_{WE} \cdot WE_i$	-0,375	-0,555	-0,140	-0,525	-0,512
WFV_i	0,3806	0,5622	0,1463	0,5367	0,5254

5. táblázat Súlyozott Fitness Értékek meghatározása

	Alap		Erőmű		Katonai repülés	
1.	E	1,7213395	E	0,7622427	B	0,5621757
2.	D	1,6846523	D	0,7575614	D	0,5367392
3.	B	1,5580265	B	0,7361362	E	0,5253583
4.	A	1,0762175	A	0,5041713	A	0,3805629
5.	C	0,5488791	C	0,2328021	C	0,1463063

6. táblázat Súlyozott Fitness Értékek rangsorolása

Az érzékenységvizsgálat eredményei alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

→ az súlyozatlan Fitness Értékek fontossági sorrendje **E; D; B; A; C;**

- az erőműi karbantartó szakemberek véleménye alapján is a vizsgált folyamat legérzékenyebb az **E** típusú meghibásodás meghibásodások közti üzemidejére;
- a katonai repülőműszaki szakemberek véleménye szerint a vizsgált folyamat legérzékenyebb a **B** típusú meghibásodás meghibásodások közti üzemidejére;
- mindkét szakembercsoport szerint a második legfontosabb meghibásodás a **D** típusú;
- helyes döntésnek bizonyult, hogy a nem szignifikáns meghibásodásokat a modellalkotás során egy (**C** típusú) meghibásodásként kezeltük.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmányban a karbantartó szakemberek véleményének összehasonlító elemzése, illetve a vizsgált folyamat matematikai modellje alapján az üzemeltetési rendszerek súlyozott szimulációs érzékenységvizsgálatát dolgoztuk ki.

Miért lehet ez fontos számunkra?

Például, egy új javítási technológia esetén nem mindegy a két terület karbantartói számára, hogy a javítási munkaigény vagy a költség lesz kevesebb. Adott esetben, a több lehetséges javítási technológia, vagy javítási munka-szervezés közül a szakterületek igénye alapján más és más lesz az optimális választás.

Más megfogalmazásban, elemzésünkkel azt szemléltettük, hogy a bemutatott két szakterület számára a vizsgált rendszer szakma-specifikus karbantartási szempontú optimálása eltérő, amit a döntéshozóknak figyelembe kell venni..

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Ágoston Gábor, Pokorádi László: A XXII. Fialat Műszakiak Tudományos Ülészak előadásai, Kolozsvár, (2017) pp. 59-62. , 4 p.
- [2] Kavas László: A súlyszámok problematikája komplex rendszerek értékelése során, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2007/1, p. 7.
- [3] Pokorádi László: Simulation-based Sensitivity Analysis of Manufacturing Equipment Availability, Polytechnica University of Bucharest. Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 78/2, pp. 67–78.
- [4] Pokorádi László, Gáti József - Fenyvesi Csaba - Ágoston Gábor: Comparison of Maintenance Experts' Opinions, Proceedings of the SISY 2017, Újvidék pp. 203–206. DOI: <https://doi.org/10.1109/SISY.2017.8080553>
- [5] Pokorádi László: Karbantartási folyamatok szimulációs elemzési módszerei, Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016, Miskolc, pp. 519-536.
- [6] Pokorádi, László - Ágoston, Gábor Közlekedési karbantartó szakemberek véleményeinek összehasonlítása, IFFK 2017 Budapest, pp. 128-132.
- [7] Pokorádi, László, Gáti, József: Markovian Model-based Sensitivity Analysis of Maintenance System, SISY 2018, Újvidék pp. 117-121. DOI: <https://doi.org/10.1109/SISY.2018.8524692>

WEIGHTED SENSITIVITY ANALYSIS OF MAINTENANCE PROCESS

One of the most important “task” of technical management’s decision making is showing scale of values of given part of engineering. It plays a decisive role in the decision of maintenance management. The subjective opinions of experts can be characterized by different weight numbers. This paper shows the weighted sensitivity analysis of maintenance processes.

Keywords: *maintenance; sensitivity analysis; decision making*

Dr. Pokorádi László (CSc)
egyetemi tanár
Óbudai Egyetem,
Mechatronikai és Járműtechnikai Intézet
pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0003-2857-1887

László Pokorádi Dr. (CSc)
Full professor
Óbuda University,
Institute of Mechatronics and Vehicle Engineering
pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0003-2857-1887

A kutatást a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával megvalósuló EFOP-3.6.2-16-2017- 00016: „Autonóm járművek dinamikája és irányítása az automatizált közlekedési rendszerek követelményeinek szinergiájában” projekt támogatta.



<http://journals.uni-nke.hu/index.php/reptudkoz/article/view/262/30>

