

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].

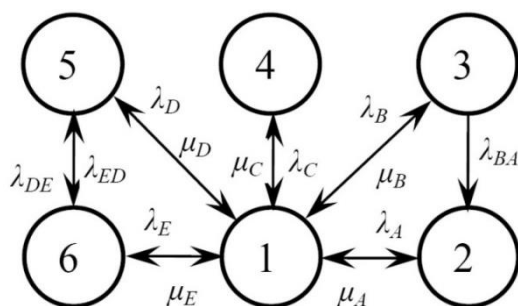
Jelen dolgozat célkitűzése fenti tanulmányok eredményeit felhasználva bemutatni az üzemeltetési folyamatok úgynevezett súlyozott érzékenységvizsgálatát. A javasolt módszer választ ad a vizsgált rendszer szakma-specifikus karbantartási szempontú optimalásának kérdéseire.

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 $\lambda$ [óra <sup>-1</sup> ]	$7,597 \cdot 10^{-4}$	$1,1201 \cdot 10^{-3}$	$7,466 \cdot 10^{-4}$	$7,0917 \cdot 10^{-4}$	$7,1613 \cdot 10^{-4}$
Javítási átlagidő MTTR [óra]	7,08	9,63	2,14	8,21	7,62
Javítási ráta $\mu$ [óra <sup>-1</sup> ]	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
$\lambda_{ij}$ [óra <sup>-1</sup> ]	–	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  $RC_\Sigma$  javítási költséget, illetve  $WE_\Sigma$  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

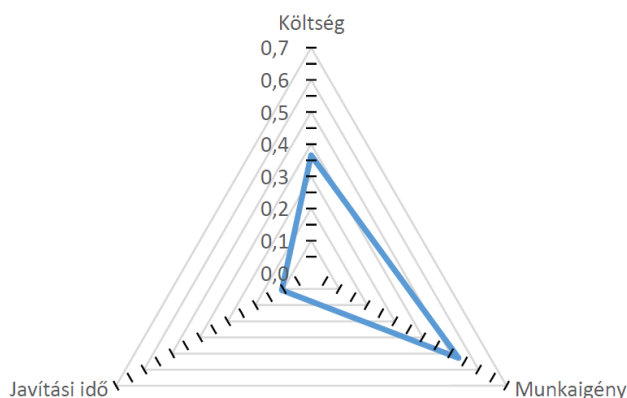
2. ábra A kérdőív részlete

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.

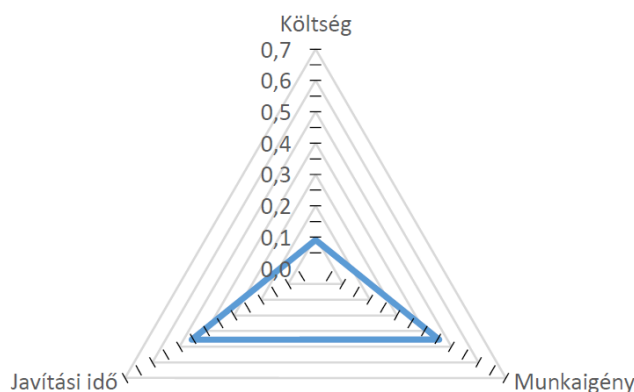
Az erőművekben dolgozó karbantartó szakember számára a munkaórában kifejezett munkaigény a leginkább preferált karbantartási, javítási szempont. Ezeknek a szakembereknek a második legfontosabb célja is az, hogy a javítási költségeket optimalizálhassák, minél alacsonyabb szinten tarthassák. Az itt dolgozó 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
$\Sigma$	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
$\Sigma$	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](mailto:pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu)  
[orcid.org/0000-0003-2857-1887](https://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](mailto:pokoradi.laszlo@bgk.uni-obuda.hu)  
[orcid.org/0000-0003-2857-1887](https://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>

