

TÖMÍTÉSI TELJESÍTMÉNY OPTIMALIZÁLÁSA VÉGESELEMES MÓDSZERREL ÉS TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSHOZATALI MEGKÖZELÍTÉSSEL

OPTIMIZING SEALING PERFORMANCE WITH A FINITE ELEMENT METHOD AND MULTI-CRITERIA DECISION-MAKING APPROACH

Albert Judit*, Dr. Takács Ágnes**

ABSTRACT

Sealing systems are widely used in engineering practice, especially in the automotive, oil and gas, and many areas of the mechanical industry. The function of seals is to prevent unwanted leakage of flows, liquids and gases. A key factor in the design of these systems is sealing performance, which is influenced by parameters such as material selection, geometry, and applied forces and pressures. The combined use of the Finite Element Method (FEM) and multi-criteria decision-making approaches (Multi-Criteria Decision Making, MCDM) provides an opportunity to optimize sealing performance.

With the help of the finite element method, we can perform detailed analysis of the effect of mechanical and thermal loads, enabling the simulation of the seal's behaviour and the discovery of optimization opportunities. At the same time, MCDM techniques help to make design decisions by considering several criteria, such as cost-effectiveness, performance or life-time. The combination of the two approaches can thus be an effective tool for optimizing sealing systems.

1. BEVEZETÉS

A többkritériumos döntéshozatali (MCDM) módszerek fontos eszközök az optimális megoldások kiválasztásában, különösen akkor, ha többféle szempontot kell figyelembe venni. Az MCDM módszerek széles körben alkalmazhatók különböző területeken, beleértve a mérnöki tervezést, az anyagválasztást és a gazdasági döntéshozatalt is. [1] [2] [3] Ez a tanulmány három fő célkitűzést követ, amelyek célja a döntési folyamatok finomítása és optimalizálása különböző objektív súlyozási és MCDM módszerekkel.

2. O-GYŰRŰ VÉGESELEMES MODELLEZÉSE

A végeselemes vizsgálatok (FEM) során a tömítőgyűrűk anyagainak mechanikai tulajdonságait és viselkedését modellezzük különböző terhelések és környezeti hatások mellett. Ezek a vizsgálatok lehetővé teszik a kompressziós arányok és a tömítési teljesítmény alaposabb megértését. A FEM segítségével meghatározhatunk feszültség- és deformációmintákat, amelyek kritikusak a tömítések megbízhatóságának és élettartamának előrejelzésében. [4] [5] [6] [7] [8]

A vizsgálatok során a következő szempontokat vettük figyelembe:

- **Kompressziós Arány:** Az O-gyűrűk esetében a kompressziós arány meghatározása kulcsfontosságú a tömítési teljesítmény maximalizálása érdekében. A vizsgálatok alapján a tömítések kompressziójának 5% és 30% között kell mozognia, hogy megakadályozzuk az extrúziót és a tömítési hibákat.
- **Anyagok Mechanikai Tulajdonságai:** A különböző anyagok (VMQ: Vinyl-Methyl-Szilikon, EPDM: Etilén-Propilén-Dién-Monomer, FKM: Fluorokaucsuk, FFKM: Perfluorokaucsuk) mechanikai tulajdonságait is elemeztük, figyelembe véve a szakítószilárdságot, a nyomószilárdságot és a rugalmassági modulust. A FEM segített az anyagok viselkedésének feltárásában, és abban, hogy kiválasszuk, mely anyagok alkalmazhatók a legjobban az adott horony méretekhez.

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

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

3. O-GYŰRŰ ANYAGVÁLASZTÁSA: EXTRÚZIÓVAL KAPCSOLATOS KORLÁTOK ÉS TERVEZÉSI IRÁNYELVEK

Az O-gyűrűk anyagainak tulajdonságai alapvetően befolyásolják a tömítési teljesítményt és a megbízhatóságot. Az 1. táblázat részletezi az egyes anyagok (VMQ, EPDM, FKM, FFKM) jellemzőit, valamint, hogy ezek hogyan kapcsolódnak a tömítési alkalmazásokhoz.

Az O-gyűrűk használata során fontos, hogy figyelembe vegyük az extrúzióval kapcsolatos korlátokat és tervezési irányelveket. Az extrúzió akkor történik, amikor az O-gyűrű anyaga a horony falai közé szorul, és a nyomás hatására "kicsúszik" a helyéről. Ez a tömítés megszűnéséhez vezethet, ezért fontos a megfelelő tervezés.

- Maximális megengedett rés:

A maximális megengedett rés csökkentése lehetővé teszi a nagyobb nyomás alkalmazását anélkül, hogy az O-gyűrű extrudálódna. A rés csökkentése segít elkerülni az extrúziót, és javítja a tömítés hatékonyságát.

- Keménység növelése:

Az O-gyűrű keménységének növelése szintén növeli a megengedett nyomást az adott rés mellett. A keményebb O-gyűrűk jobban ellenállnak a deformációnak és a tömítési hibáknak. A tervezési irányelvek:

- Tömörítési korlátok: A kompresszió szintje meghatározza a tömítési teljesítményt. Az O-gyűrűk tervezésénél ajánlott a kompressziós arányt 5% és 30% között tartani, hogy elkerüljük az extrúziót.
- Tolerancia figyelembevétele: Az O-gyűrű és a horony toleranciáit is figyelembe kell venni, különösen kicsi O-gyűrűk esetén.
- Az O-gyűrűk telepítése során ügyelni kell arra, hogy a telepítési nyúlás ne lépje túl a 25-50% -ot.

Az O-gyűrű és a horony méreteit mutatja be az 1. táblázat, kompressziós arányának elemzése során kapott eredményeket pedig a 2. táblázat.

4. KRITÉRIUMOK SÚLYOZÁSÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA OBJEKTÍV MÓDSZEREKKEL

A MCDM alkalmazása hatékony eszköz a komplex paraméterterek kezelésére és optimalizálására a konstrukciós tervezésben. [9] Az MCDM módszerek esetében a kritériumok súlyainak meghatározása jelentős hatással van az alternatívák rangsorolására. [10] [11] [12] [13] Ebben a tanulmányban öt objektív súlyozási módszert hasonlítunk össze: Entropia, MEREC, LOPCOW, CRITIC és MEAN. [14] [15] Ezek

a módszerek mind objektív alapon számítják ki a kritériumok súlyait, minimalizálva a döntéshozók szubjektív ítéleteinek hatását.

- **Entropia módszer:** A kritériumok információtartalmát méri, és segít az automatikus súlyszámításban.
- **MEREC módszer:** A minimális tartomány módszer, amely a kritériumok hatását minimalizálja a rangsorolás megváltoztatásával.
- **LOPCOW módszer:** Figyelembe veszi a kritériumok közötti preferenciákat és ezek hatását az alternatívákra.
- **CRITIC módszer:** A kritériumok közötti korreláció és variancia alapján számítja ki a súlyokat, figyelembe véve a kritériumok diszkriminációs képességét.
- **MEAN módszer:** A kritériumok középértékeként határozza meg a súlyokat, minimalizálva a súlyozási torzításokat.

Az elemzés során összehasonlítjuk az egyes módszerek által generált súlyokat, valamint az ezek által okozott eltéréseket a végső döntési eredményekben. A különböző súlyozási módszerek jelentős eltéréseket mutathatnak az alternatívák rangsorolásában, ami rávilágíthat a súlymeghatározás fontosságára. A kiválasztott anyagok jellemzői alapján az alábbi kritériumokat definiáljuk:

- Nyomószilárdság (MPa)
- Hőmérsékleti ellenállás (°C)
- Rugalmassági modulus (MPa)
- Szakítószilárdság (MPa)

A tömítőgyűrűk anyagainak tulajdonságait tartalmazza a 3. táblázat.

Az anyagválasztási feladatban az O-gyűrűk AS568 szabványának megfelelő méretű O-gyűrűk elemzését végezzük el.

Az elemzés során feltárjuk, hogy melyik MCDM módszer képes a legjobban kezelni, elemezni a tulajdonságokat és meghatározni a legmegfelelőbb anyagot az O-gyűrűk élettartamát és a feszültségváltozásokkal szembeni ellenállását helyezve a fókuszba.

A számítás az alábbi lépésekből áll:

1. Az adatok előkészítése: Először is összegyűjtjük a releváns adatokat (anyagok jellemzői és kritériumok).
2. A súlyozási módszerek alkalmazása: Az öt objektív súlyozási módszer alapján meghatározzuk a kritériumok súlyait (Entropia, MEREC, LOPCOW, CRITIC, MEAN).
3. Az MCDM módszerek alkalmazása: Az MCDM módszerek (MARA, RAM, PIV, VIKOR) segítségével rangsoroljuk az alternatívákat (VMQ, EPDM, FKM, FFKM).
4. Az eredmények összehasonlítása: Végül összehasonlítjuk a különböző súlyozási módszerekkel előállított és súlyozás nélküli rangsorokat.

5. MCDM MÓDSZEREK ELEMZÉSE ANYAGVÁLASZTÁSI PROBLÉMÁRA

A legalkalmasabb MCDM módszer meghatározásához, hogy a legjobb anyag kiválasztását megoldjuk az O-gyűrűk esetében, az anyagok mechanikai tulajdonságai szükségesek. Az elemzés négy MCDM módszert foglal magában:

- **MARA (Multi-Attribute Ranking Approach):** Ez a módszer az alternatívákhoz rendelt kritériumok területeit használja fel, amelyek egy átfogó értékelést nyújtanak.
- **RAM (Root Analysis Method):** A RAM módszer a döntési rendszer struktúráját elemzi, és a gyökértényezőik alapján rangsorolja az alternatívákat.
- **PIV (Proximity Index Value):** A PIV módszer előnye, hogy minimalizálja a rangsor megfordulásának jelenségét, amely különösen fontos lehet, amikor több kritérium alapján értékelünk.
- **VIKOR:** A kompromisszumos rangsorolást végzi el az alternatívák között.

Olyan kritériumoknak adtunk nagyobb súlyt, amelyek jobban kapcsolódnak a mechanikai feszültségekkel szembeni ellenálláshoz, mint a nyomószilárdság, rugalmassági modulus, és szakítószilárdság. Ezzel jobban tükrözhetjük az anyagok élettartamra és feszültségváltozásra vonatkozó teljesítményét.

Az egyes anyagok tulajdonságait ábrázolja az 1. ábra, lehetővé téve a különböző jellemzők összehasonlítását. A diagramon jól látható, hogy melyik anyag hogyan teljesít az adott tulajdonságokban.

- az **EPDM** és **FFKM** anyagok teljesítettek a legjobban az új prioritásos súlyozás során, különösen a CRITIC és LOPCOW módszerekben.
- a **VMQ** anyag a legalacsonyabb pontszámokat kapta, különösen a feszültség- és tartósságkritériumok miatt, amelyek jelentősebb súlyt kaptak ebben az elemzésben.

A kiszámolt súlyokat a következő lépésben integráltuk a különböző MCDM módszerekbe (MARA, RAM, PIV, VIKOR), hogy a különböző módszerek által generált rangsorokat össze tudjuk hasonlítani és elemezni, hogy meghatározzuk, melyik módszer nyújtja a legmegbízhatóbb eredményeket az O-gyűrűk anyagainak értékelésében.

Az adatok alapján a prioritásos súlyokat és a különböző tulajdonságokat elemeztük az alábbi lépések alapján:

1. **Súlyozási adatok normalizálása:** Először a megadott súlyokkal kell az egyes anyagokat értékelni. Ezek a súlyok segítenek a tulajdonságok összehasonlításában.
2. **MCDM módszerek alkalmazása:** A VIKOR, MARA és PIV módszerek segítségével rangsoroljuk az anyagokat, figyelembe véve a különböző objektív súlyokat:
 - **VIKOR módszer:** Az anyagok kompromisszumos rangsorolása.
 - **MARA módszer:** Többváltozós rangsor összehasonlítás és elemzés.
 - **PIV módszer:** Preferenciaindex alapján rangsoroljuk az anyagokat.
3. **Eredmények összehasonlítása:** Az egyes módszerek által generált rangsorokat összehasonlítjuk, hogy megvizsgáljuk, melyik módszer adja a legmegbízhatóbb eredményt az O-gyűrű anyagainak értékelésére.

Az összes prioritásos súlyozási eredményt és MCDM módszer (VIKOR, MARA, RAM, PIV) által generált adatokat mutatja be a 4. táblázat.

Az alábbi eredményeket kaptuk:

FFKM: Legjobb választás az összes módszer alapján.
EPDM: Második helyen áll, kedvező mechanikai tulajdonságokkal.

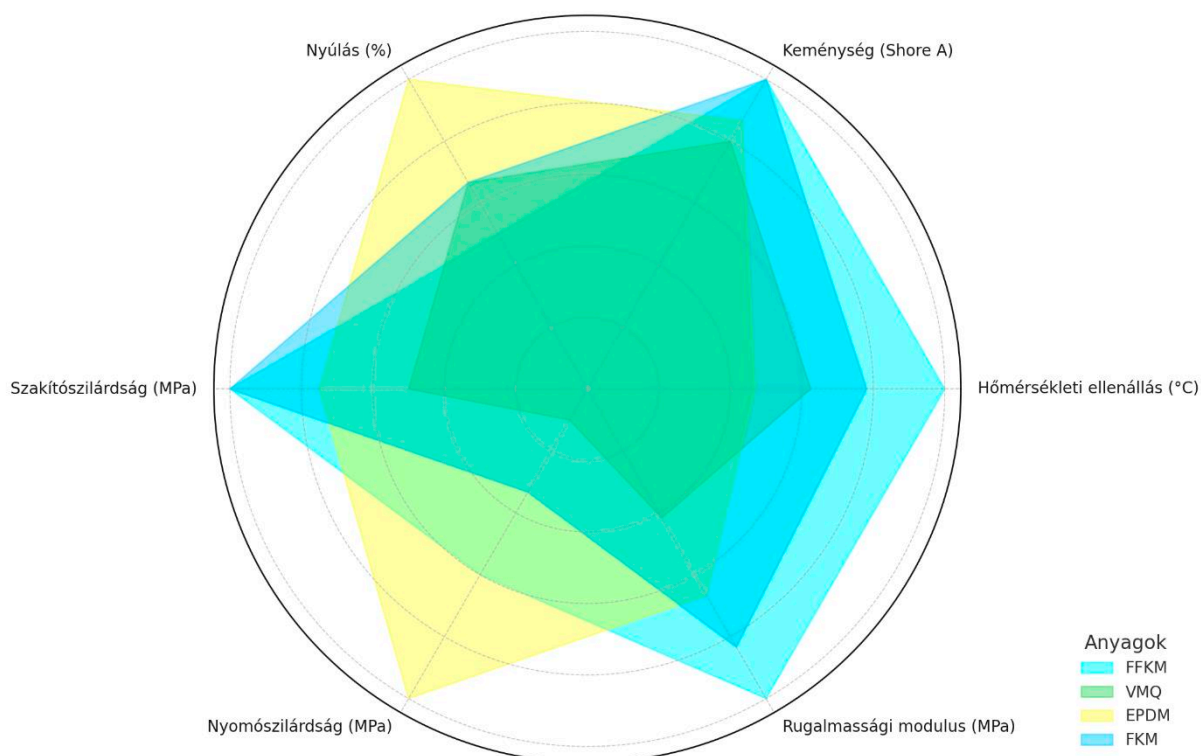
FKM: Harmadik helyen, erős, de nem a legjobb anyag.

VMQ: A legrosszabb teljesítmény az összes módszer szerint.

6. KÖVETKEZTETÉSEK

Az anyagok közötti különbségeket a mechanikai tulajdonságok, a nyomószilárdság, rugalmassági modulus, és szakítószilárdság alapján értékeltük. Ezek a kritériumok fontosak a feszültségváltozásokkal szembeni ellenállás meghatározásában. A legmegfelelőbb anyag az FFKM, ami a legjobb teljesítményt nyújtja a legtöbb súlyozási módszer és MCDM modell alapján. Ennek oka a kiváló mechanikai tulajdonságai, mint a magas hőmérsékleti ellenállás és szakítószilárdság, valamint a jó rugalmassági modulus.

Az FKM is jó teljesítményt mutat, különösen a CRITIC és LOPCOW súlyozási módszerek esetében, ahol a stresszel szembeni ellenállás kulcsfontosságú. Az EPDM is versenyképes, különösen a CRITIC módszerrel, ahol magas pontszámokat ér el. Azonban az FFKM kiemelkedik az összes vizsgált módszer alapján. Az objektív súlyozási módszerek közötti különbségek megértése segíthet a megfelelő módszer kiválasztásában, míg az MCDM módszerek részletes elemzése új perspektívát nyújt az anyagválasztási problémákra.



1 ábra: Az egyes anyagok összehasonlítása

1. táblázat: Az O-gyűrű és a horony méretei

Horony	Belső átmérő (mm)	Külső átmérő (mm)
Horony 1	14,1	14,93
Horony 2	13,9	15,16
Horony 3	13,9	19,16

2. táblázat: A kompressziós arány elemzése során kapott eredmények

O gyűrű zsinór átmérője	O-gyűrű kompressziója
1,8	23,5-31,5%
2,65	22-25,5%
3,55	20-22,5%

3. táblázat: A tömítőgyűrűk anyagainak tulajdonságai

Anyagtulajdonság	VMQ	EPDM	FKM	FFKM
Hőmérsékleti ellenállás (°C)	-60°C-200°C	-40°C-150°C	-20°C-250°C	-10°C-320°C
Keménység (Shore A)	40-80	40-90	60-90	60-90
Nyúlás (%)	200-700	300-600	150-300	100-200
Szakítószilárdság (MPa)	7-10	10-15	12-20	15-20
Nyomószilárdság (MPa)	7,5	75	25	45
Rugalmassági modulus (MPa)	250	400	500	600
Sűrűség (g/cm ³)	1,10-1,20	1,10-1,20	1,80-2,00	1,90-2,10
Vegyis ellenállás	Jó	Jó	Kiváló	Kiváló
Nyomásállóság	Max 10 bar	Max 15 bar	Max 30 bar	30 bar felett
Hőtágulási együttható (1/°C)	0,0001	0,00007	0,00008	0,00009

4. táblázat: Az MCDM módszer (VIKOR, MARA, RAM, PIV) eredményei

Anyag	VIKOR	MARA	PIV
VMQ	4	4	4
EPDM	2	2	2
FKM	3	3	3
FFKM	1	1	1

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Taherdoost, H. & Mitra M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. Encyclopedia 3. 77-87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- [2] Štilić, A. & Adis P. (2023). Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices. Eng 4. 1536-1549. <https://doi.org/10.3390/eng4020088>
- [3] Wang, Z., Nabavi, S.R., Rangaiah, G.P. (2023). Selected Multi-criteria Decision-Making Methods and Their Applications to Product and System Design. In: Kulkarni, A.J. (eds) Optimization Methods for Product and System Design. Engineering Optimization: Methods and Applications. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1521-7_7
- [4] Albert, J. Analysing the effects of the structural design of the sealing construction with Finite Elements Method, in 8th Agria Conference on Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions - InnoVeTAS 2024. Hungary, Eger, 9 May, 2024.
- [5] Szabó, F. J. (2023). Optimization of key joints. Multidiszciplináris Tudományok: a Miskolci Egyetem közleménye 13. 153-162. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2023.2.14>
- [6] Ficzer, P. & Borbás, L. & Török, Á., (2012). Műanyag közúti gépjárműelemek anyagmodelljének definiálása és validálása végelesemes módszerrel. Jövő járműve: járműipari innováció. 16-19.
- [7] Ficzer, P. & Borbás, L. (2009). Gyors-prototípus készítő eljárással gyártott termékek anyagtulajdonságainak meghatározása végelesemes analízis számára. GÉP 60. 36-39. <http://hdl.handle.net/10890/4100>
- [8] Ficzer, P. & Borbas, L. & Török, Á. (2014), Validation of Numerically Simulated Rapid-prototype Model by Photoelastic Coating. Acta Mechanica Slovaca. 18. 14–24. <https://doi.org/10.21496/ams.2014.002>
- [9] Albert, J. & Takács, Á., 2020. Application aspects of the VIKOR algorithm in material selection decisions. GÉP, 71(7-8), pp. 65-68.
- [10] Uyala, Shrinivas & Uyala, Shrimayee & Jannu, Sunny & Gadakh, Vijay. (2024). MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION OF MACHINING PARAMETERS FOR EDM OF MAGNESIUM ALLOY- ZE41 USING MARCOS ALGORITHM AND DIFFERENT WEIGHING METHODS: SD, CRITIC AND MEREC. International Journal of Modern Manufacturing Technologies. 16. 124-140. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2024.16.1.124>
- [11] Rong, Yuan & Yu, Liying & Liu, Yi & Simic, Vladimir & Garg, Harish. (2024). The FMEA model based on LOPCOW-ARAS methods with interval-valued Fermatean fuzzy information for risk assessment of R&D projects in industrial robot offline programming systems. Computational and Applied Mathematics. 43. 25. <https://doi.org/10.1007/s40314-023-02532-2>
- [12] Sellamuthu, Prabhukumar & Chohan, Jasgurpeet & Kalita, Kanak. (2023). MEREC-MABAC Based-Parametric Optimization of Chemical Vapour Deposition Process for Diamond-Like Carbon Coatings. 414-422. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50158-6_41
- [13] Nguyen, Van-Canh & Vu, Dinh-Toan & Tran, Quoc-Hung & Kieu, Van & Nguyen, Trong. (2024). Optimizing EDM for titanium alloys: an in-depth comparison of five MCDM techniques. EUREKA: Physics and Engineering. 89-98. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003283>
- [14] Cherrez, M., Martinez-Gomez, J., Nicolalde, J.F., Riofrio, A. (2021). Material Selection Based on Multicriteria Decision Methods for Brake Disc Manufacture. In: Botto-Tobar, M., Zambrano Vizuete, M., Díaz Cadena, A. (eds) Innovation & Research. CI3 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1277. Springer, Ch. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60467-7_35
- [15] Kumari, A., Acherjee, B., Kumar, K. (2023). Gear Material Selection Using an Integrated PSI-MOORA Method. In: Kulkarni, A.J., Gandomi, A.H. (eds) Handbook of Formal Optimization. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8851-6_23-1