

OPTIMALIZÁLÁSI MÓDSZER TERMOELEKTROMOS MODULOK SZERKEZETI TERVEZÉSÉHEZ

OPTIMISATION METHODOLOGY FOR STRUCTURAL DESIGN OF THERMOELECTRIC MODULES

Albert Judit, PhD hallgató, Miskolci Egyetem
Takács Ágnes, PhD, egyetemi docens, Miskolci Egyetem

1. ABSTRACT

Environmental protection greatly influences product development paradigms with the appearance of environmental protection aspects, as a result of which many industrial sectors have changed their product development processes. This study presents a method for comparing new product alternatives, which allows environmental protection requirements to be taken into account, using a multi-aspect decision-making methodology.

2. BEVEZETÉS

A hő és villamos energia közötti közvetlen és reverzibilis átalakítást lehetővé tevő termoelektromos (TE) energiaátalakítás széles körű alkalmazást tesz lehetővé a hulladékhő visszanyerésében, a hűtésben és a nagy pontosságú hőmérséklet szabályozásban. A TE-anyagok tehát fontos alternatívát jelentenek az energia hatékony felhasználásában, és mint ilyenek, nagy figyelmet keltettek a megújuló energiatechnológiák területén. Figyelembe véve a termoelektromos készülékekkel kapcsolatos tervezési feladatok sajátosságait, a korszerűsítési, fejlesztési feladatok kidolgozásában részt vevő döntéshozók számára meghatározó jelentőségű a tervezett eszközök különböző feladatokra való alkalmazásának megítélésének hatékonysága. Egy adott, gyakran konkrét feladathoz legmegfelelőbb alternatíva kiválasztása bonyolult, időigényes és költséges, mert egyszerre kell vizsgálni a bonyolult összefüggéseket és a feleletválasztós paramétereket. A cikk bemutatja a kutatás-fejlesztési (K+F) folyamat során a különböző alternatívák közötti rangsorolást és a legmegfelelőbb lehetőség kiválasztásának módját segítő VIKOR módszert. [1,2,3]

3. A TERMOELEKTROMOS TE-MODUL FELÉPÍTÉSE

A vizsgálat során egy kereskedelmi TE-modult elemzünk (QC-127-1.4-8.5 X₁X₂) (1. ábra, 3. ábra).



1. ábra. Az QC-127-1.4-8.5 X₁X₂ TE-modul [4]

1. táblázat A TE-modul elemeinek méretei

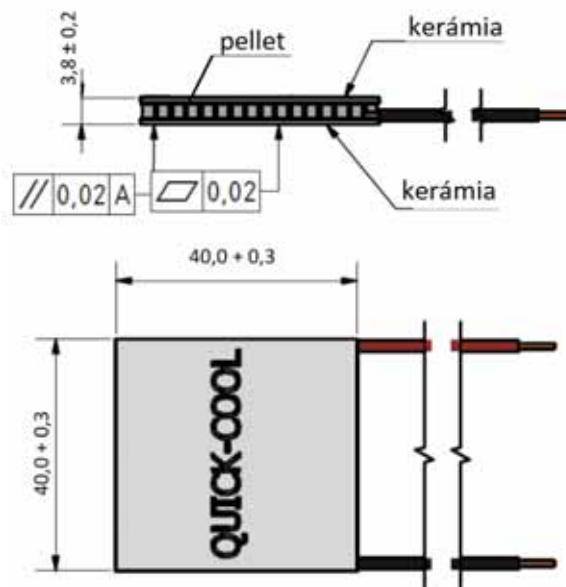
Alap elemek	Anyag	Méret (mm)
P-N pelletek/termo-elemek	Bi ₂ Te ₃	1,4 x 1,4 x 1
Kerámia lemezek	Al ₂ O ₃	40 x 40 x 0,6
Réz forrasztási kötő elemek	Cu	4 x 1,6 x 0,6



2. ábra. Az ISO-10243 rugó [5]

2. táblázat Az ISO-10243 rugó paramétereit

Rugó paraméterek	Érték
Külső átmérő(mm) /OD	16
Belső átmérő (mm)/ID	8
Hosszúság/L (mm)	25
Rugóállandó (kgf /mm)	12
Min. összenyomódás (17%) mm, 51.7 kgf	4.3
Max. összenyomódás (25%) mm, 75.8 kgf	6.3

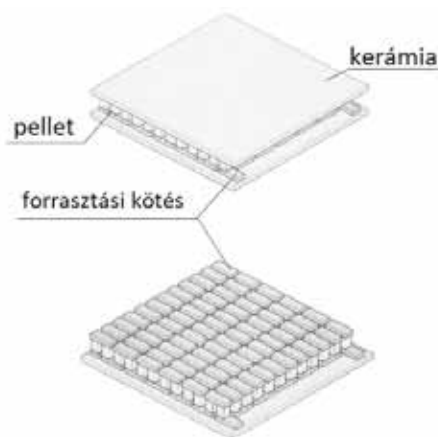


3. ábra. A TE- modul méretei [4]



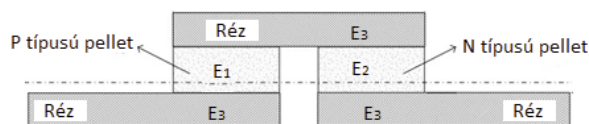
4. ábra. A TE-modulok Bi₂Te₃ pelletjei [6]

Az összeszereléskor a megfelelő szorító erő biztosításához 16 x 8 x 25 mm méretű AISI L2 anyagú huzalrugót alkalmaztunk (ISO-10243) (2. ábra, 2. táblázat). [5] A vizsgált TE-modul mérete 40 x 40 x 3,8 mm, 128 pár P-N típusú hőelemet tartalmaz, a termoelektromos elemek pedig Bi₂Te₃ alapú ötvözetek (4. ábra), melyeket réz forrasztási kötő elemek kapcsolnak össze. Az egyes párokban lévő P vagy N típusú pelletek magassága: 1 mm, keresztmetszete pedig 1,4 × 1,4 mm²; a szomszédos sor-párok közötti távolság 0,6 mm, az oszlop-párok közötti távolság az 0,16 mm (5. ábra, 1. táblázat).



5. ábra. A TE modulok sematikus ábrája

A termoelektromos TE-modulok által tapasztalt nagy hőmérsékleti gradiensek jelentős hőfeszültségeket indukálnak, amelyek végül az eszköz meghibásodásához vezetnek. A TE-modulok megbízhatósága függ a modulok mechanikai beépítésétől (nyíró- és nyomatékfeszültségek), és az üzemi feltételektől (hőmérséklet, hőmérsékleti gradiens is. A TE-modulokban használt kerámia lemezek és félvezető pelletek különböző hőtágulási együtthatóval rendelkeznek. A TE-modulok abszolút hőmérsékletének változása mellett az eszközön átívelő termikus gradiensek mechanikai igénybevételeket eredményeznek. A különböző rugalmassági modulusokat szemlélteti a konstrukcióban a 6. ábra.



6. ábra. A különböző rugalmassági modulusok a konstrukcióban

A hőtágulási együtthatók eltérése mechanikai feszültségeket indukál, amelyek repedéseket, töréseket okozhatnak a pelletekben, amikor a modul melegszik vagy hűl.

4. A TE-MODUL SPECIFIKÁCIÓI

A nyírófeszültség az anyag keresztmetszetével egysíkú feszültség összetevője. A nyírófeszültség a keresztmetszettel párhuzamos erővektor komponensből adódik. A hő elemekre ható általános nyíró feszültség mértéke, 350 N maximálisan megengedett terhelő erő esetén:

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{350N}{256 \cdot 1.4mm^2 \cdot 1.4mm^2} = 0,69754 \frac{N}{mm^2}$$

Ahol τ a nyírófeszültség. V az alkalmazott erő. A az anyag keresztmetszete, az alkalmazott erővektorral párhuzamos felület.

A szükséges csavaró nyomaték a TE-modul ajánlott összeszorítási ereje alapján (értéke: 1200 kPa) (3. táblázat):

$$T = \frac{c \cdot D \cdot P \cdot A}{N} = \frac{0.14 \cdot 0.004 \cdot 1200000 \cdot (2 \cdot 0.04 \cdot 0.04)}{4} = 2.304 \frac{kgf}{cm^2}$$

ahol c a M4x0.7-es méretű csavar csavarási együtthatója (értéke: 0,15), a D csavar névleges átmérője (értéke: 4 mm), az A pedig a vizsgált TE modul alapterülete (40 x 40 mm) és N a csavarok száma.

A keresztirányú terhelés (P) hajlítónyomatékot $M(x)$ és nyíróerőt $V(x)$ generál. A hajlítónyomatékok hajlítási normálisai okoznak feszültségeket, a nyíróerők keresztirányú nyírófeszültséget (τ) a hajlítási nyomaték x távolságban:

$$M = P \cdot x,$$

a normál feszültség a keresztmetszet közepétől:

$$\sigma = \frac{M \cdot x \cdot c}{I}$$

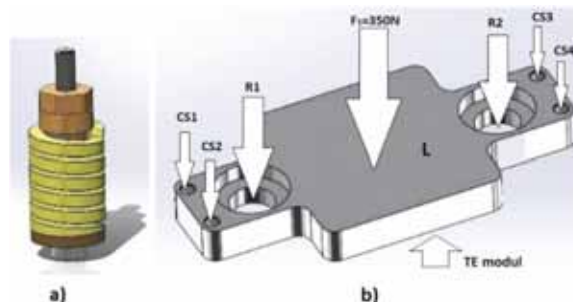
ahol, M a hajlítási nyomaték, c a távolság a keresztmetszettől a felszínig. Az I terület tehetetlenségi nyomatéka:

$$I = \frac{b_{Cu} \cdot h_{Cu}^3}{12} = 0.0288 \text{ mm}^4$$

ahol h_{Cu} a magasság és b_{Cu} a keresztmetszet szélessége (1. táblázat).

5. A TE-MODUL MECHANIKAI SZIMULÁCIÓJA

A SolidWorks programcsomaggal végzett végeleemes szimulációban, az alkalmazott alkatrészmelleket mutatja be a 7. ábra.



7. ábra. a) a huzalrugó (R1, R2: 16x25 mm méretű AISI L2 anyagú) beszerelési összeállítási modellje;

b) a TE-modul összeszerelési sematikus ábrája: az AISI 304 anyagú, 120x48x8 mm befoglaló méretű leszorítóelem (L), a csavarok: (CS1-CS4: AISI 304 anyagú M4x0.7) és a rugók: (R1, R2) beszerelési helyével

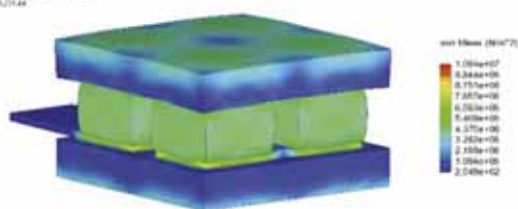
A TE modulok alapelemeinek méreteit tartalmazza a 1. táblázat és a használt anyagtulajdonságokat a 4. táblázat. A TE modulokhoz az ajánlott összeszorítási erőket tartalmazza a 2. táblázat. A szimuláció során a TE-modul kerámia lemezének felső felülete minden irányban rögzítve van, illetve az alsó felület csak vízszintes irányban tolódnak el. Az elvégzett végeleemes terhelési szimulációk eredményeit alapján az alapmodulon ébredő feszültségek (8. ábra) és a keletkező elmozdulások (9. ábra) a legnagyobb maximum terhelést alkalmazva sem érik el a konstrukció sérülését eredményező értékeket (5. táblázat).

3. táblázat A TE modulok ajánlott összeszorítási erői

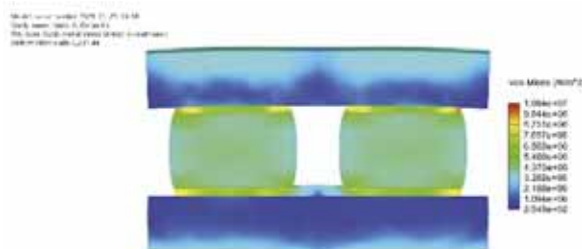
Modul hatékonyság	Ajánlott összeszorítási erő
általános	500-1200 kPa
Magas hatékonyság	800-1200 kPa
Kis hatékonyság	200-600 kPa

4. táblázat. A felhasznált anyagok tulajdonságai

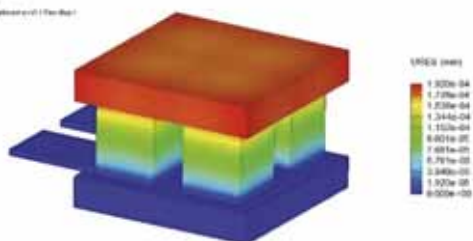
Mechanikai tulajdonságok	Anyagok			
	AISI 304	Al ₂ O ₃	Bi ₂ Te ₃	Cu
Rugalmassági modulus	193,0 MPa	220,590 MPa	54,2 GPa	124.8 GPa
Folyáshatár	260,8 MPa	15,4 GPa	200 MPa	137.9 MPa
Sűrűség (kg/m ³)	8000	2300	6858	8 930
Poisson tényező	0,29	0,22	0,28	0.355
Nyírási modulus	780 GPa	90.407 GPa	51,4 GPa	44 GPa
Szakítószilárdság	517 MPa	172,34 MPa	40 MPa	220.6
Fajlagos hőkapacitás (J/kgK)	500	877,96	154,4	389
Hővezetőképesség (W/mK)	14	1,4949	P-típus: 1,2, N-típus:1,3	390.8
Hőtágulási együttható (1/K)	17,3 · 10 ⁻⁸	1 · 10 ⁻¹²	1 · 10 ⁻⁵	16.7



8. a. ábra. A terhelés hatására kialakuló mechanikai feszültségek egységnyi elemkonstrukcióban



8. b. ábra. A terhelés hatására kialakuló mechanikai feszültségek egységnyi elemkonstrukcióban



9. a. ábra. A terhelés hatására kialakuló elmozdulások egységnyi elemkonstrukcióban



9. b. ábra. A terhelés hatására kialakuló elmozdulások egységnyi elemkonstrukcióban

5. táblázat. A szimuláció eredményei

Terhelés	Anyagok	Max. feszültség	Max. elmozd. (mm)	Megfelel
350 N	Al ₂ O ₃	4,375 MPa < 10,938 MPa	0,000192 mm	igen
350 N	Cu	9,844 MPa	0,0001728 mm	igen
350 N	Bi ₂ Te ₃	6,563 MPa	0,0001535 mm	igen

6. A PELLET FORMA KIALAKÍTÁSÁNAK ÉS ANYAGÁNAK KIVÁLASZTÁSHOZ ALKALMAZOTT DÖNTÉSI MODELL

Ebben a tanulmányban 4 kritérium és 4 alternatíva van rangsorolva a VIKOR módszer [3] alapján. (6. táblázat, 7. táblázat) A példánkban vizsgált döntési helyzetben a döntéshozó véges számú alternatívát értékel korlátozott számú kritérium alapján. Az alternatívák értékelésénél a legalapvetőbb szempont a hatékony konstrukciós tervezés.

Egy másik fontos szempont a felhasznált anyagok mechanikai tulajdonságainak kihasználása. Lényeges továbbá az alternatívák megbízhatósága és egyben garantált élettartama. Az értékelés során fontos a fenntartathatóság problémája is.

A réz-jodid (CuI) egy ígéretes félvezető, amely számos potenciális alkalmazási lehetőséget kínál az optoelektronika, a napelemek, a fotodetektorok és az energia-gyűjtő termoelektromos anyagok területén. [7] Alacsony hőmérsékleti tartományban a réz-jodid (CuI) ígéretes jelölt pelletanyagként is a termoelektromos modulokban. A CuI potenciális alternatívája lehet a kereskedelemben kapható alacsony hőmérsékletű TE anyagoknak, ebben az esetben például a bizmut tellúridnak (Bi₂Te₃). [8], amely az általában használt félvezető termoelektromos anyagok. [9]

A változó formájú (A1-kitöltött kocka és A2-üreges kocka, A3: kitöltött trapéz és A4: üreges trapéz) és változó anyagú (A1, A3: CuI, A2, A4: Bi₂Te₃) pelletekkel kialakított alternatívák modelljeinek és a rajtuk végzett végeselemes terhelési szimulációk eredményeinek feldolgozása után, a kritériumok Excel implementációban való rangsorolására, - a VIKOR módszer matematikai modelljét használtuk fel.

Az értékelési folyamat eredményeit a 8. táblázat tartalmazza.

6. táblázat. Az alternatívák összehasonlítása során figyelembe vett szempontok és fontossági értékeik

Szempont	Fontossági érték
C1 anyagfelhasználás	0,4
C2 megbízhatóság	0,2
C3 fenntarthatóság	0,3
C4 konstrukciós tervezés	0,1

Az alternatívákat A1, ..., A4, a szempontokat pedig C1, ..., C4 jelölések jelentik. A 7. táblázat a többi lehetőség rangsorát mutatja be az S, R és Q értékek alapján.

7. táblázat. Döntési mátrix

Döntési mátrix	C1	C2	C3	C4
A1-Pellet CuI,kitöltött kocka	0,4	0,2	0,2	0,3
A2-Pellet Bi ₂ Te ₃ ,üreges kocka	0,3	0,2	0,4	0,1
A3-Pellet CuI,kitöltött trapéz	0,2	0,3	0,2	0,1
A4-Pellet Bi ₂ Te ₃ ,üreges trapéz	0,2	0,2	0,2	0,2

A VIKOR módszer rangsorolása eredményeként az alternatívák közül a második alternatíva (A2) volt a legjobb, a negyedik alternatíva (A4) pedig az, amelyik a rangsor végére került. Ezért végső alternatívaként az A2, A1 kerül kiválasztásra.

8 táblázat. A változatok rangsora

Változatok	Kritériumok				R érték	R rangsor	S érték	S rangsor	Q érték	Q rangsor
	C1	C2	C3	C4						
A1	0,696	0,436	0,378	0,775	0,3	2	0,5	1	0,25	2
A2	0,522	0,436	0,756	0,258	0,2	1	0,5	2	0	1
A3	0,348	0,655	0,378	0,258	0,4	3	0,8	3	0,833	3
A4	0,348	0,436	0,378	0,516	0,4	4	0,95	4	1	4

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A feladat komplexitásának forrásait figyelembe véve a tervezési feladat összetettségét vizsgáltuk. Láthatjuk, hogy minden feladatnak vannak olyan feladatkomplexitási dimenziói, amelyeknél a döntéshozatal a VIKOR módszer matematikai modelljével támogatható.

Az értékelés során megállapítható, hogy a módszer egyik hátránya, hogy az eredmény csak rangsort ad az alternatívák között, így nincs elegendő információ az alternatívák közötti különbség nagyságáról. Ezért hasznos lenne az AHP (Analytical Hierarchy Process) [10, 11, 12, 13, 14] felhasználása a módszertan továbbfejlesztéséhez, amely ezen információkat is azonosíthatóvá teszi, így növelve a döntéshozók megfelelő támogatását, és segíthetik a döntéshozó preferenciáinak konzisztenciájával és inkonzisztenciájával kapcsolatos problémák megoldását. A hierarchia kialakítása, a prioritások meghatározása, a kritériumok súlyozása mind lehetővé teszik az AHP döntéshozatali folyamatba való illesztésével, hogy számos különböző tervezési feladatra is kiterjeszhető használata, beleértve az orvostudományi döntésméleletet is.

7. IRODALOM

- [1] GILL, T. Grandon; MURPHY, W. Task complexity, and design science. In: 9th International Conference on Education and Information Systems, Technologies and Applications (EISTA 2011). 2011.
- [2] Ali Jahan, Kevin L. Edwards, Marjan Bahraminasab, 2 - Materials selection in the context of design problem-solving, Multicriteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design (Second Edition), Butterworth-Heinemann, 2016, Pages 25-40, ISBN 9780081005361
- [3] M. Ashby: Designing architected materials, Scripta Materialia 68, ISSN: 1359-6462, 2013., 5.
- [4] <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/002236979DS00/adatlap-2236979-quickcool-qc-127-14-85a-peltier-elem-143-v-85-a-713-w-lxbxh-40-x-40-x-38.pdf>, Megtekintve: 2022.02.20.
- [5] <http://vijaydeep.in/rectangular-wire-die-springs-iso-10243-standard-characteristics-and-tolerances-vg1/>, Megtekintve: 2022.02.20.

- [6] <https://www.santechchem.com/bismuth-telluride-cube-127.html>, Megtekintve: 2022.02.20.

- [7] Murmu, Peter & Kennedy, John & Liu, Zihang & Mori, Takao.: The role of sulfur valency on thermoelectric properties of sulfur ion implanted copper iodide, Journal of Alloys and Compounds. 921. 166103. 10.1016/j.jallcom.2022.166103.

- [8] Wei-Di Liu, Zhi-Gang Chen, Jin Zou: Eco-Friendly Higher Manganese Silicide Thermoelectric Materials: Progress and Future Challenges, Advanced Energy Materials, Volume 8, Issue 19, July 5, 2018, ISSN: 1614-6840

- [9] Karegoudar, Shilpa & Raheman, Md Abdul & Aabid, Abdul & Baig, Muneer & Rk, Veerasha & Kudva, Nagesh. (2022). A Systematic Review of Thermoelectric Peltier Devices: Applications and Limitations. Fluid Dynamics and Materials Processing. 1-20. 10.32604/fdmp.2022.020351.

- [10] Ghaleb, Atef & Kaid, Husam & Alsamhan, Ali & Mian, Syed Hammad. (2020). Assessment and Comparison of Various MCDM Approaches in the Selection of Manufacturing Process. Advances in Materials Science and Engineering. 2020. 13. 10.1155/2020/4039253.

- [11] Yue, Han & Zhu, Tian-Lu & Zhou, Zheng-Jun & Zhou, Tao. (2022). Improvement of Evaluation Method of Elderly Family Medical Product Design Based on AHP. Mathematical Problems in Engineering. 2022. 1-8. 10.1155/2022/4036030.

- [12] Tian-Lu Zhu, Ya-Jun Li, Ceng-Juan Wu, Han Yue, Yi-Qian Zhao: Research on the Design of Surgical Auxiliary Equipment Based on AHP, QFD, and PUGH Decision Matrix. Mathematical Problems in Engineering. 2022. 10.1155/2022/4327390.

- [13] Barkaoui, Housseem & Rejeb, Helmi & Barkaoui, Abdelwahed & Tavares, Joao. (2022). Multi-criteria Decision Making for Medical Device Development. Engineering Management Journal; EMJ. 10.1080/10429247.2022.2040267.

- [14] Tseng, Chun-Chieh & Hong, Cheng-Fang & Chang, Hui-Ling. (2008). Multiple Attributes Decision-Making Model for Medical Service Selection: An AHP Approach. 15.