

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



GÉPÉSZMÉRNÖKI TERVEZÉS
DÖNTÉSTÁMOGATÁSA TÖBBKRITÉRIUMOS
MÓDSZEREKKEL

Készítette

Judit Albert

Okl. gépészmérnök (MSc)

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET
TERMÉK FEJLESZTÉS ÉS TERVEZÉS TÉMACSOPORT

Doktori Iskola Vezetője

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

DSc, egyetemi tanár

Témacsoport vezető

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

DSc, egyetemi tanár

Tudományos vezető

Dr. Takács Ágnes

PhD, egyetemi docens

Miskolc

2025

1. Tartalomjegyzék

Témavezető ajánlása.....	7
Ábrajegyzék	8
Táblázatjegyzék.....	11
Jelölésjegyzék és rövidítések.....	13
Rövidítések.....	16
Definíciók és fogalmak	17
1. Bevezetés.....	21
1.1. A kutatási háttér és ipari motiváció.....	21
1.2. A disszertáció célkitűzései	21
1.3. A dolgozat szerkezeti felépítése.....	21
1.4. A többcélú optimalizálás elméleti alapjai	22
1.4.1. A Pareto-optimalitás fogalma.....	24
1.4.2. A többcélú optimalizálási algoritmusok	25
1.1. A döntéshozatal szerepe a korai tervezési fázisban	26
2. Szakirodalmi áttekintés	29
2.1. A többcélú szerkezeti optimalizálás kritériumrendszer alapján.....	29
2.1.1. A tervezési változók és geometriai korlátok bemutatása.....	30
2.1.2. Az optimalizációs modell és kritériumrendszer	32
2.1.3. A Pareto-front és a keresési tér szűkítése	33
3. A többkritériumos döntéstámogató módszerek	35
3.1. A MCDM módszerek kategóriarendszere.....	35
3.1.1. A TOPSIS módszer	36
3.1.2. Az AHP módszer.....	36
3.1.3. Az ELECTRE módszer	37
3.1.4. A VIKOR módszer és a kompromisszumos döntések elmélete	37
3.2. A VIKOR klasszikus algoritmus.....	38
3.3. A klasszikus VIKOR problémái intervallum adatok esetén.....	40
3.4. A célértékek szerepe a normalizálásban	40
3.4.1. A klasszikus normalizálás hibái	40
3.4.2. A célérték-alapú közelítés elméleti alapjai.....	41
3.5. Kutatási célok és hipotézisek	44
4. Az intervallum alapú célértékes VIKOR módszer	45
4.1. Bevezetés	45
4.2. Az algoritmus lépései.....	45
4.3. Intervallumok összehasonlítása és kompromisszumos aggregáció.....	46
4.4. Térdprotézis anyagválasztása.....	47
5. Az intervallum alapú célértékes VIKOR módszer vizsgálata	49

5.1. A klasszikus VIKOR hibái intervallum-értékek esetén	49
5.1.1. Hibás normalizálás esetei	49
5.1.2. Pareto-hatékonyság sérülése.....	50
5.1.3. Hibaanalízis.....	52
5.2. A célérték-alapú normalizálás matematikai helyessége.....	54
5.3. Intervallumok összehasonlítása: az α -alapú rendezés problémái	56
5.3.1. A tranzitivitás hiányának bizonyítása.....	56
5.3.2. Megoldási javaslatok	57
5.4. A kompromisszumos döntés definíciója intervallumokra.....	58
5.4.1. A kompromisszumos aggregáció intervallum-alapú S, R, Q mutatókkal	58
5.4.2. Döntési szabály intervallumok alapján.....	59
5.4.3. Elméleti előnyök és a bizonyítási lépések összefoglalása	59
6. Orvosi implantátumok fejlesztése többkritériumos döntéstámogatással.....	61
6.1. Bevezetés	61
6.2. A térdprotézis anyagválasztásának többkritériumos döntéstámogatása.....	62
6.3. A kutatás módszertana	62
6.3.1. Az implantátumok rangsorolásának lépései	63
6.3.2. Az eredmények elemzése	63
6.3.3. Összegzés	64
6.3.4. Tézis (1).....	65
6.1. Kapcsolódó publikációk.....	65
6.2. Fogászati implantátumok optimalizálása	66
6.2.1. Kapcsolódó publikációk	66
6.2.2. A fizikai modell felépítése.....	66
6.2.3. A végeselemes szimulációk eredményeinek értékelése	67
6.3. Az alternatívák döntéstámogatott értékelése és rangsorolása	68
6.3.1. Tézis (2).....	69
7. Alvázmegerősítési alternatívák többkritériumos elemzése	74
7.1. Bevezetés	74
7.1.1. A kutatás módszertana.....	74
7.2. A fizikai modell felépítése	76
7.3. A peremfeltételek bemutatása	76
7.3.1. Az eredmények bemutatása	77
7.3.2. A végeselemes szimulációk eredmények értékelése	78
7.3.3. Az alternatívák döntéstámogatott értékelése és rangsorolása.....	79
7.4. Kapcsolódó publikációk.....	81
7.4.1. Tézis (3).....	81

8. Thermoelektromos modulok élettartam optimalizálása.....	85
8.1. Bevezetés	85
8.2. A kutatás módszertana	86
8.3. A fizikai modell felépítése	87
8.3.1. A TE-modulok tervezése.....	87
8.3.1. Anyagtulajdonságok.....	88
8.3.1. A numerikus szimulációban használt peremfeltételek és paraméterek	88
8.3.2. A terhelések során fellépő feszültségek és elmozdulások	90
8.3.3. Eredmények összegzése	91
8.4. A tervezési koncepciók rangsorolása.....	93
8.4.1. Az értékeléshez használt jellemzők értéke 11 pontos skálán	93
8.4.2. A kritériumok relatív súlyainak meghatározása a Modified Digital Logic (MDL) módszerrel	94
8.4.3. Összefoglalás.....	95
8.4.4. Tézisek (4).....	97
8.5. Kapcsolódó publikációk.....	97
9. Tömítőrendszer optimalizálása.....	99
9.1. A kutatás módszertana	99
9.1.1. Tömörítési arány optimalizálása.....	100
9.1.2. Horonykitöltés optimalizálása	101
9.1.3. O-gyűrű nyúlás optimalizálása	101
9.2. A fizikai modell felépítése	102
9.2.1. Anyagtulajdonságok.....	102
9.2.2. A numerikus szimulációban használt peremfeltételek és paraméterek	102
9.2.1. A O-tömítőgyűrű tömörítési arányának elemzése	103
9.2.1. Az eredmények értékelése	103
9.2.1. A szimulációk eredményeinek értékelése.....	105
9.1. A tervezési koncepciók rangsorolása.....	105
9.1.1. Összefoglalás.....	106
9.1.2. Tézisek (5).....	107
9.2. Kapcsolódó publikációk.....	108
10. Új tudományos eredmények.....	111
10.1. Jövőbeli kutatási irányok	111
10.2. Kapcsolódó publikációk.....	113
11. Irodalomjegyzék.....	114
Publikációk az értekezés témájában.....	124
12. Mellékletek.....	126
12.1. Szakirodalom számításainak mellékletei	126

12.1.1. Alváz optimalizálási táblázatok [33]	126
12.2. A térdprotézis anyagválasztási döntéstámogatás számításainak részletes táblázata	130
12.2.1. A helyes számítással végzett térdprotézis táblázatai [57].....	130
12.2.2. Transzitivitásvizsgálat.....	133
12.2.3. Az intervallum-alapú VIKOR módszerrel számított értékek és végső rangsor.....	134
12.2.4. A szakirodalomból [57] származó hibás döntési mátrix intervallumértékekkel.....	136
12.3. Tömítési teljesítmény modell és elemzés.....	137
12.3.1. A vizsgált geometriai paraméterek meghatározása	137
12.3.2. Faktorok és szintek meghatározása	137
12.3.3. Célfüggvények definiálása	138
12.3.4. Kritériumok meghatározása.....	139
12.3.5. Döntési mátrix felépítése (Q-mátrix).....	140
13. Végeselemes szimulációk eredményei	141
13.1. A TE modul végeselemes szimulációinak eredményei.....	141
Köszönetnyilvánítás	147

Szalay Sándor emlékének

Témavezető ajánlása

Ábrajegyzék

1. ábra Edgeworth féle szerződési és indifferencia görbék [12]	23
2. ábra Pareto-optimális kompromisszum a mérnöki tervezésben: szerkezeti tömeg és szilárdság kapcsolata, ahol a Q pont az optimális megoldást jelöli	23
3. ábra A sokváltozós adatelemzés rendszere [32] alapján	23
4. ábra A klasszikus döntéselméleti elvek beépülése az intervallum-alapú célértékes VIKOR modellbe	24
5. ábra Az ideális, az utópikus (z^{**}) és a nadir (z^{nad}) célvektorok [29]	26
6. ábra Az ismeretek bővítése a korábbi tervezési fázisokban nagyobb tervezési szabadsággal és a fejlesztési idők későbbi csökkentésével az optimalizálási módszereknek köszönhetően [37] [41]	27
7. ábra A MacLeamy-görbe [34] és a tervezési fázisok a mérnöki tervezés folyamatában	27
8. ábra A koncepcionális tervezési fázisa a mérnöki tervezés folyamatában	28
9. ábra A koncepcionális tervezés lépéseinek időigénye	28
10. ábra Az oldalsó hossztartó geometriai kialakítása (1: övlemez; 2: szegélylemez).	29
11. ábra A vizsgált optimalizálási startégia folyamatábrája	31
12. ábra Statnikov [20] alternatívák kiválasztási folyamata	33
13. ábra A 3D Pareto-front ábra, amely bemutatja a keresési tér és a Pareto-hatékony megoldások kapcsolatát a keresési tér szűkítése során	34
14. ábra Az MCDM módszerek kategóriarendszere	35
15. ábra A többkritériumos döntéshozatal módszereinek osztályozása [42]	36
16. ábra A VIKOR módszer érzékenységvizsgálatának szakirodalmi megalapozása [7] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53]	38
17. ábra A klasszikus VIKOR algoritmus folyamatábrája [56]	42
18. ábra Az intervallum alapú célértékes VIKOR algoritmus folyamatábrája	60
19. ábra a) aortabillentyű beépítése, szív kamra kiáramlási pályájának (zöld nyíl) biztosítására [61], b) betegspecifikus érrendszeri gyűrűstent [63], c) térdprotézis műtét utáni és 3D sematikus ábrái [64], d) betegspecifikus 3D nyomtatott PCL implantátum intraoperatív képe [4], e) váll rögzítéséhez használt kanülált csavar és alátét [65], f) varrathorgonnyal vállcsonthoz rögzített lágy szövet [3], g) fogászati implantátumok, felépítmények és kobalt-króm sapkák [71]	62
20. ábra Rangsor összehasonlítása	65
21. ábra Az fogászati implantátum optimalizálása és értékelése során alkalmazott koncepcionális tervezés fázisai: integrált alváztervezési és döntéstámogatási modell	70
22. ábra A B alternatíva a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai, a csont B alternatíva körül c) von Mises feszültségei, d) elmozdulásai, e) nagyított von Mises feszültségek részletei, f) nagyított elmozdulásainak részletei	71
23. ábra A C alternatíva a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai, a csont C alternatíva körül c) von Mises feszültségei, d) elmozdulásai	72
24. ábra Az A alternatíva a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai, a csont A alternatíva körül c) von Mises feszültségei, d) elmozdulásai	73
25. ábra A szerkezeti kifáradási viselkedés elemzési módszerei [80]	74
26. ábra Az alváz megerősítés során alkalmazott koncepcionális tervezés fázisai: integrált alváztervezési és döntéstámogatási modell	75
27. ábra Az URAL-4320 jármű [90]	76
28. ábra Az alvázszerkezet módosított keresztmetszete: a) végig erősített alváz, b) több elemmel erősített alváz	76
29. ábra A végig erősített alváz alternatíva (A1) modellje	77
30. ábra A több elemmel erősített alváz alternatíva (A1) modellje	77

31. ábra A végeselemes modellezés folyamata [92]	78
32. ábra Az eredeti URAL-4320 alváz a) CAD modellje, b) Von Mises feszültségei, c) elmozdulásai.....	82
33. ábra A több elemmel erősített URAL-4320 alváz a) CAD modellje b) von Mises feszültségei, c) elmozdulásai.....	83
34. ábra A végig erősített URAL-4320 alváz a) CAD modellje, b) von Mises feszültségei, c) elmozdulásai.....	84
34. ábra A TE-modul a) belső felépítése (40x40x3,4 mm) felépítése [108], b) a pellet párok a forrasztanyaggal és a réz vezetőelemmel [109], c) a pellet párok a réz vezetőelemmel d) a pelleték	86
35. ábra A javasolt módszertan folyamatának felépítése	87
36. ábra A TE-modul a) modellje, b) szerkezeti elemeinek kinagyított részlete	88
37. ábra a) Az összeszorító elemek: alsó elem, pirossal jelölve a TE-modul helye (bal oldal) és a felső elem (jobb oldal) , b) Az összeszerelt konstrukció a két alumínium elemmel együtt, c) a beszerelt TE modul.....	89
38. ábra A pelletekben ($L=0,6$ mm) ébredő a) von Mises feszültség és b) az elmozdulás a TE-modulban 20°C hőmérséklet különbség esetén a meleg és a hideg oldal között	92
39. ábra A pelletmagasság hatása a von Mises-feszültségre ($\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$, $F = 14$ kgf)	92
40. ábra Az O-tömítőgyűrű a) horonyba helyezett O-gyűrű fotója, b) az O-tömítőgyűrű horony hézag extrudálódása [120] c) A gumigyűrű kopásának részlete egy statikus fémgyűrűn (50 x-es nagyítás) [121], d) O-gyűrű metszeti keresztmetszetének fényképe kompressziós sérüléssel [122]	99
41. ábra A megbízhatóságot befolyásoló tényezők [119]	100
42. ábra Az egyes O-tömítőgyűrű anyagok tulajdonságainak összehasonlítása	103
43. ábra Az O-tömítőgyűrű tömörítésének sematikus ábrája, b) a horonyba helyezett O-tömítőgyűrű [121]	104
45. ábra A VIKOR-alapú döntéstámogató eljárás folyamata az O-tömítőgyűrűs tömítések optimalizálásához	106
46. ábra Az O-tömítőgyűrűk és az alsó és felső horony mélységének (b) kapcsolata a konstrukcióban, amely meghatározza az összenyomás mértékét.....	107
47. ábra Az adatkontaktus a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai	109
48. ábra A szenzor ház a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai	109
49. ábra A szenzor fedőeleme a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai	109
50. ábra a) az O-tömítőgyűrűk von Mises feszültsége, b) felső O-tömítőgyűrű von Mises feszültsége, c) alsó O-tömítőgyűrű von Mises feszültsége	110
51. ábra Az RL keretrendszer sematikus ábrázolása [134]	112
52. ábra Gépi tanulás (DQN) a TE-pellet optimalizálásban.....	112
52. ábra A thermoelektromos modul konstrukciós elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100°C hőmérséklet különbség esetén: a) a felső és b) az alsó kerámia szigetelő elemekben ébredő maximális a modulkonfigurációban 100°C hőmérséklet különbség esetén a meleg és a hideg oldal között	142
53. ábra A thermoelektromos modul konstrukciós elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100°C hőmérséklet különbség a meleg és a hideg oldal között esetén: a) Réz, Cu b) Forrasztó réteg, SnPb, c) n, p típusú pellet, Bi_2Te_3	143
54. ábra A thermoelektromos modul konstrukciós elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100°C hőmérséklet különbség esetén: a) a felső és b) az alsó kerámia elemekben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100°C hőmérséklet különbség a meleg és a hideg oldal között	145

55. ábra A thermoelektromos modul konstrukciós elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet különbség a meleg és a hideg oldal között és 1200 psi összeszorító erő esetén: a) Réz, Cu b) Forrasztó réteg, SnPb, c) n, p típusú pellet, Bi_2Te_3 146

Táblázatjegyzék

1. táblázat A döntési modellek fejlődésének fő mérföldkövei	22
2. táblázat Az ideális (z^*), az utópikus (z^{**}) és a nadir (z^{nad}) célvektorok definíciói.....	25
3. táblázat A kiválasztott modell (168-as) adatainak összehasonlítása a prototípussal	33
4. táblázat A döntéstámogatási folyamat lépései az intervallum alapú célértékes VIKOR döntési modellben	40
5. táblázat A célértékek szerepe a normalizálásban	43
6. táblázat A célérték alapú közelítés előnyei a klasszikus normalizálással szemben	43
7. táblázat Az új döntéstámogatási módszer fő jellemzői	43
8. táblázat A forrás alapadatai (kivonat) [57].....	53
9. táblázat Az M1 és M2 anyag összehasonlítása [57].....	53
10. táblázat A forrás [57] 5.12 táblázatban szereplő anyagok rangsora.....	53
11. táblázat A saját célérték súlyok	64
12. táblázat Q értékek összehasonlítása	64
13. táblázat A szimuláció során alkalmazott anyagok mechanikai tulajdonságai.....	66
14. táblázat Az implantátum alternatívák von Mises feszültségei és elmozdulásaik	68
15. táblázat A fogászati implantátumok esetében vizsgált kritériumok mennyiségi értéke.....	69
16. táblázat A fogászati implantátumok esetében vizsgált kritériumok összehasonlítása	69
17. táblázat Az alvázacél (09G2S) anyagtulajdonságai [91].....	76
18. táblázat A szimulációk eredményei.....	78
19. táblázat Az alváz megerősítésének hatása a maximális feszültségértékre T1 terhelés esetén	79
20. táblázat Az alternatívák jellemzői	79
21. táblázat Az értékelési szempontok és azok fontossági súlyai	79
22. táblázat Az alternatívák normalizált értékei (VijL, VijU)	80
23. táblázat Az alternatívák aggregált eltérésének (SL,SU) értékei.....	80
24. táblázat Az alternatívák legrosszabb eltérésének (RL,RU) értékei.....	80
25. táblázat Az alternatívák Q értékei és rangsora	80
26. táblázat Az intervallum alapú célértékes VIKOR módszer eredményei.....	80
27. táblázat A felhasznált anyagok tulajdonságai a TE-modul összeállításban [113]	89
28. táblázat A modellezett TE-modul (Quick-Cool Quick-Ohm QC-127-1,4-8,5MS) alkotóelemeinek méretei	90
29. táblázat A pelletekben ébredő elmozdulások (mm) a TE-modulban	91
30. táblázat A pelletekben ébredő von Mises feszültség (MPa) a TE-modulban	92
31. táblázat Az értékeléséhez használt jellemzők értéke 11 pontos skálán.....	93
32. táblázat Az egyes kombinációk összehasonlítása	95
33. táblázat Az egyes jellemzők értékelése	95
34. táblázat A jellemzők relatív fontosságának meghatározása	95
35. táblázat Az értékeléshez alkalmazott, illetve a szimulációk során kapott jellemzők értékei	96
36. táblázat A jellemzők szerint kialakult rangsor	96
37. táblázat Az O-tömítőgyűrű ajánlott tömörítési arányai.....	101
38. táblázat A horonykitöltés ajánlott arányai.....	101
39. táblázat A nyálás ajánlott arányai.....	102
40. táblázat A kompressziós arány elemzése során kapott eredmények	103
41. táblázat Az O-tömítőgyűrűs tömítések gyakori meghibásodási okai, kiváltó tényezői és magyarázatuk	104
42. táblázat Az O-tömítőgyűrűk anyagainak tulajdonságai	105

43. táblázat Az O-tömítőgyűrű horony alternatíváinak esetében vizsgált kritériumok összehasonlítása és mennyiségi értéke	107
44. táblázat Az O-tömítőgyűrű horony alternatíváinak VIKOR módszerrel végzett értékelésének eredményei	107
45. táblázat A modellek oldalfali tömege (kg) [33].....	126
46. táblázat A modellek lemezvastagságai (mm) [33]	127
47. táblázat A modellek maximális torziós feszültsége (kgf/cm^2) [33].....	128
48. táblázat A modellek maximális hajlítási feszültsége (kgf/cm^2) [33].....	129
49. táblázat A vizsgált anyagjelöltek listája és típusa a döntéstámogatási elemzéshez	130
50. táblázat A vizsgált anyagjelöltek listája és típusa a döntéstámogatási elemzéshez [57] .	130
51. táblázat A célfüggvényhez használt jellemzők súlyozása és értéktartománya	130
52. táblázat anyagválozatok jellemzőinek alsó-felső határértékei a tervezési paraméterek/jellemzők minimum-maximum értékei alapján.....	131
53. táblázat Anyagjelöltek normalizált értékei alsó és felső határokkal	132
54. táblázat A célfüggvényhez használt jellemzők súlyozása és értéktartománya	132
55. táblázat Anyagválasztási mátrix maximális teljesítményértékek szerint	133
56. táblázat Intervallum-alapú döntésmátrix Q értékekkel és páronkénti összehasonlítással	134
57. táblázat A végső rangsor az anyagválasztási döntéstámogatáshoz	135
58. táblázat A szakirodalomi hibás számítású döntési mátrix [57]	136
59. táblázat A tervezési tér paraméterei: az O-tömítőgyűrűs tömítés optimalizálás kiindulási paraméterei.....	137
60. táblázat A faktorok és szintek meghatározása.....	137
61. táblázat Az O-tömítőgyűrűs tömítési teljesítmény optimalizálásához használt célfüggvények	138
62. táblázat Az O-tömítőgyűrűs tömítési alternatívákra vonatkozó kritériumok	139
63. táblázat Az O-gyűrűs tömítési alternatívákra vonatkozó kritériumok	140
64. táblázat Az alkotóelemekben ébredő legnagyobb von Mises feszültségek értékei $100^\circ C$ terhelés esetén, $L=0,5\text{ mm}$	141
65. táblázat Az alkotóelemekben ébredő legnagyobb von Mises feszültségek értékei $100^\circ C$ terhelés és 1200 psi esetén, $L=0,5\text{ mm}$	144

Jelölésjegyzék és rövidítések

$\forall$	minden elemre igaz
$\exists$	létezik olyan
$\Leftrightarrow$	állítások ekvivalenciája
$\Rightarrow$	állítások implikációja
$ a $	az a szám abszolút értéke
$\mathbb{R}$	valós számok halmaza
$[a; b]$	zárt intervallum $\mathbb{R}$ -ben
VH	a várható haszon az érvényes megoldások halmaza (1)
i	az egyes következményeket jelöli (1)
P_i	az i -edik választás valószínűsége (1)
$H(a)_i$	az i -edik kimenethez tartozó döntéshozó haszna (1)
$f_i(x)$	az egyes célfüggvényeket reprezentálja
X	az érvényes megoldások halmaza
x	egy lehetséges megoldás az érvényes megoldások halmazából
x^*	Pareto-hatékony (Pareto-optimalis) megoldás (3)
$f_i(x)$	az i . célfüggvény értéke az x megoldás esetén (3)
$f_i(x^*)$	az i . célfüggvény értéke a Pareto-hatékony megoldásnál (3)
$\forall i$	Minden i -re (minden célfüggvényre) (3)
$\exists j$	Létezik legalább egy j , amely egy adott célfüggvényt jelöl (3)
$f_i(x) \leq f_i(x^*)$	az x megoldás célfüggvényértéke nem rosszabb, mint a Pareto-megoldásé (3)
$f_j(x) < f_j(x^*)$	van legalább egy célfüggvény, amely szerint az x megoldás jobb (3)
A	a páros összehasonlítások mátrixa (14)
w	a kritériumok súlyvektora (14)
λ_{max}	a mátrix legnagyobb sajátértéke (14)
CI	konzisztencia index (15)
n	a kritériumok száma (15)
CR	konzisztencia arány (16)
RI	egy véletlenszerű index (16) [2]
n	alternatíva: $A_1, A_2, \dots, A_n$ (17)
m	kritérium: $C_1, C_2, \dots, C_m$ (17)

D	döntési mátrix (17)
x_{ij}	az i -edik alternatíva értéke a j -edik kritériumra, (17) (21)
i	az alternatívák indexe (17)
j	a kritériumok indexe, vagyis, hogy melyik szempont szerint vizsgáljuk az adott alternatívát (17)
w_j	minden kritériumhoz hozzárendelt súly (18)
f_j^*	a kritériumok szerint meghatározott legjobb érték (19)
f_j^-	a kritériumok szerint meghatározott legrosszabb érték (20)
N_{ij}	A klasszikus normalizált értékek, az i -edik alternatíva és a j -edik kritérium esetén (21)
S_i	a klasszikus VIKOR esetén az összesített eltérés: aggregált hasznosságmérő (22)
R_i	a klasszikus VIKOR esetén a legrosszabb eltérés: maximális megbánásmérő (23)
Q_i	a klasszikus VIKOR esetén a kompromisszumos mérőszám (24)
S^*	a klasszikus VIKOR esetén a legjobb összesített eltérés/legjobb hasznosságérték (24): ($S^* = \min S_i$)
S^-	a klasszikus VIKOR esetén a legrosszabb összesített eltérés/legrosszabb hasznosságérték (24): ($S^- = \max S_i$)
R^*	Klasszikus VIKOR esetén a legjobb megbánásérték (24): ($R^* = \min R_i$)
R^-	Klasszikus VIKOR esetén a legrosszabb megbánásérték (24): ($R^- = \max R_i$) kerül a Q_i értelmezéséhez a nevezőbe.
v	a kompromisszum súlyozó tényezője (25)
A'	a legjobb alternatíva (25)
A''	a második legjobb alternatíva (25)
DQ	előnyküszöb (25): $DQ = \frac{1}{(n-1)}$
N_{ij}	a klasszikus normalizáció ($\min - \max$) esetén a normalizált eltérés az i -edik alternatíva és j -edik kritérium esetén (26)
f_j^*	a j -edik kritérium maximális (legjobb) értéke a mintában (26)
f_j^-	a j -edik kritérium minimális (legrosszabb) értéke a mintában (26)
$N_{ij}^{Cél}$	a célérték-alapú normalizált eltérés az i -edik alternatíva és j -edik kritérium esetén (27)

G_j	a j -edik kritérium célértéke (27)
Δ_j	a maximálisan elfogadható eltérés (27)
x_{ij}^L, x_{ij}^U	az i -edik alternatíva j -edik kritérium legkisebb és legnagyobb értékét az egyes jellemzőkre (28)
T_j	a j -edik kritérium célértéke (ideális érték) (28)
w_j	a j -edik kritérium súlya (fontossági tényező), $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ (28)
$x_j^{L\min}, x_j^{U\max}$	a j -edik kritérium minimális és maximális értékei az összes alternatíva között (29)
V_{ij}^L	a célértéktől való relatív eltérés j -edik kritérium szerint, az alsó határ alapján (30)
V_{ij}^U	a célértéktől való relatív eltérés j -edik kritérium szerint, az felső határ alapján (31)
S_i^L, S_i^U	Az i -edik alternatíva súlyozott eltéréseinek összegzett alsó és felső értéke (összesítés) (32)
R_i^L, R_i^U	Az i -edik alternatíva legrosszabb eltérésének alsó és felső értéke (maximum a kritériumok között) (33)
S^+	az összes S_i^U maximuma minden alternatíva esetén (34)
S^-	az összes S_i^L minimuma (S^-) minden alternatíva esetén (34)
R^+	az összes R_i^U maximuma minden alternatíva esetén (35)
R^-	az összes R_i^L minimuma (R^-) minden alternatíva esetén (35)
$[Q_{ij}^L, Q_{ij}^U]$	a kompromisszumos index alsó és felső értéke az i -edik alternatívára, ami megmutatja, mennyire esik távol a célértéktől az adott anyag (36)
v	a többségi kritérium súlya a kompromisszumos index számításánál ($0 \leq v \leq 1$, $v = 0,5$ kompromisszum) (36)
α	az optimizmus szintje ($0 < \alpha \leq 1$): nagyobb $\alpha \rightarrow$ optimistább döntéshozó (37)
a^L, a^U	I_A intervallum (37) (38)
b^L, b^U	I_B intervallum (37) (38)

Rövidítések

VNM	von Neumann–Morgenstern
MDO	Több tudományágat átfogó tervezésoptimalizálás (Multi-disciplinary design optimization)
MCDM	Többkritériumos döntéstámogatás (Multi-Criteria Decision Making)
MADM	Többszemponú döntéstámogatás (Multi-Attribute Decision Making)
MOO	Többcélú optimalizálás (Multi-Objective Optimization)
AHP	Analytic Hierarchy Process
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
VIKOR	VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (Többkritériumos optimalizálás és kompromisszumos megoldás)
CTE	hőtágulási együttható

Definíciók és fogalmak

Adatok	A változók megfigyelt, mért értékeinek összesége
Algoritmikus visszakövethetőség	Az algoritmus minden egyes lépése logikailag rekonstruálható és újra számolható.
Célérték-orientált normalizálás	A teljesítményértékek célértékhez viszonyított skálázása, nem abszolút minimumhoz vagy maximumhoz.
Dominancia	Egy megoldás akkor dominál egy másikat, ha minden szempontból legalább olyan jó, és legalább egy szempontból jobb
Döntési robusztusság	Az algoritmus kimenetének érzéketlensége kis bemeneti változásokra.
Extrúzió	Az O-gyűrű anyaga a határoló horony felületei közé szorulva, nyomás hatására extrudálódik, ami egyben a tömítés megszűnését is jelenti.
Funkció-specifikáció	A rendszer által teljesítendő funkciók egyértelmű definiálása és dokumentálása (pl. hűtés).
Szerződési-görbe	A Pareto-határ egy része, ahol a két döntéshozó preferenciái megegyeznek
Kritérium súly (w_j)	A mutató megmutatja, mennyire fontos az adott kritérium a döntéshozó számára. A súlyok összege: $\sum_{j=1}^n w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1$
Klasszikus VIKOR módszer esetén a többségi kritériumnak való megfelelés (the majority criteria)	A VIKOR módszerben az alternatíva összesített eltéréseinek súlyozott átlaga. Ez a kritérium az alternatíva kollektív teljesítményét tükrözi az összes értékelési szempont mentén: $S_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot N_{ij}$ ahol w_j a kritérium súlya, N_{ij} pedig az i-edik alternatíva j-edik kritérium menti normalizált eltérése.
Klasszikus VIKOR módszer esetén az egyéni megbánás (individual regret)	A VIKOR módszer azon komponense, amely azt méri, hogy egy adott alternatíva milyen rosszul teljesít a legrosszabb kritériuma mentén: $R_i = \max_j (w_j \cdot N_{ij})$ ahol a maximumban az i-edik alternatíva j-edik kritérium menti súlyozott eltéréseit vesszük figyelembe. N_{ij} a j-edik kritérium szerinti, i-edik alternatíva normalizált értéke, amit a legjobb (ideális) és legrosszabb (antiideális) alternatívához viszonyítva számítunk.

	Ez a mérőszám mutatja a döntéshozó legrosszabb eshetőségtől való félelmét. Minimalizálandó kritérium esetén: $N_{ij} = \frac{x_j^+ - x_{ij}}{x_j^+ - x_j^-}$ Maximalizálandó kritérium esetén: $N_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^-}{x_j^+ - x_j^-}$ ahol x_{ij} az i-edik alternatíva értéke j-edik kritériumban, x_j^+ a legjobb érték (pl. minimum vagy maximum cél szerint), x_j^- legrosszabb érték.
Klasszikus VIKOR módszer esetén a megbánási mutató (regret index) (R_i)	A klasszikus VIKOR módszer minden bemeneti paraméter és eredmény pontértékként kezelhető. A legrosszabb megbánásérték a döntési mezőben ennek megfelelően: $R^- = \max_i R_i$
Kompromisszumos súly (v)	A mutató az egyensúlyt szabályozza a hasznosság (S_i) és a megbánás (R_i) között: $0 \leq v \leq 1, \text{ tipikusan:}$ • $v = 0.5$ (kiegyensúlyozott kompromisszum) • $v \approx 1$: a teljes hasznosság (S_i) alapján domináns döntés (optimista, kollektív nézőpont). • $v \approx 0$: a megbánás minimalizálása (R_i) kerül előtérbe (pesszimista, egyéni nézőpont).
Kompromisszumos index (Q_i)	A kompromisszum mértékét kifejező aggregált döntési mutató, a S és R értékek súlyozott kombinációjával. A mutató egyidejűleg veszi figyelembe a teljes hasznosságot (S_i) és a megbánás mértékét (R_i) az alternatívák összehasonlításakor.
Konceptuális mérnöki munka	A koncepcióink értékelésének és fejlesztésének módszere. A koncepcionális mérnöki munka a tervezési folyamat olyan korai, céltudatos szakasza, amelyben a műszaki rendszerek lehetséges funkcióit, működési elveit és fő szerkezeti megoldásait azonosítják és strukturálják a tervező mérnökök.
Indifferencia-görbe	Az azonos preferenciaszintet reprezentáló görbe a döntési térben.
Intervallum-alapú értékelés	Olyan döntéstámogatási eljárás, amelyben az alternatívák teljesítményét nem egyetlen pontértékkal, hanem alsó és felső határral meghatározott értéktartománnyal (intervallummal) adjuk

	meg, ezáltal lehetővé téve a bizonytalanság és adatbizonytalanság explicit kezelését.
Intervallum-alapú célértékes VIKOR A döntési mező legrosszabb megbánási értéke	A kompromisszumos index Q_i kiszámításához a VIKOR algoritmusban szükség van az összes alternatíva közül a legrosszabb megbánás felső becslésére: $R^- = \max_i R_i^U$ Ez biztosítja, hogy a döntéshozatal a legrosszabb eshetőség maximális felső határát is figyelembe vegye.
Intervallum-alapú célértékes VIKOR A legrosszabb kritérium szerinti eltérés (R)	$R_i = \max_j (w_j \cdot V_{ij})$ V_{ij} az intervallum-alapú normalizált eltérés az i-edik alternatíva j-edik kritériuma mentén a célértéktől
Intervallum-alapú célértékes VIKOR normalizált egyéni megbánás intervalluma	Azt mutatja meg, hogy az adott alternatíva mennyire tér el a legjobbhoz viszonyítva, amikor a legrosszabb kritérium szerinti teljesítményét vizsgáljuk, de intervallumként, azaz bizonytalansággal együtt: $\left[\frac{R_i^L - R^-}{R^+ - R^-}, \frac{R_i^U - R^-}{R^+ - R^-} \right], R^+ = \max\{R_i^U : i = 1, \dots, m\}, R^- = \min\{R_i^L : i = 1, \dots, m\}$
Intervallum-alapú célértékes VIKOR többségi kritérium normalizált intervalluma (normalized majority criteria)	A többségi kritérium normalizált intervalluma (normalized majority criteria): $\left[\frac{S_i^L - S^-}{S^+ - S^-}, \frac{S_i^U - S^-}{S^+ - S^-} \right],$ $S^+ = \max\{S_i^U : i = 1, \dots, m\}$ $S^- = \min\{S_i^L : i = 1, \dots, m\}$
Pareto-hatékonyság	Egy adott alternatíva (A_i) Pareto-hatékony, ha nem létezik olyan másik alternatíva (A_k), amely minden szempontból legalább olyan jó, és legalább egy szempontból szigorúan jobb A_i -nél.
Pareto-front	A Pareto-hatékony megoldások halmaza
Rangsor stabilitás	Az alternatívák rangsorának stabilitása különböző súlyozások és paraméterkombinációk esetén.
Súlyok (w_j)	Azt fejezik ki, hogy mennyire fontos a döntéshozó számára az adott kritérium.
Tranzitivitás	Egy döntési reláció akkor tranzitív, ha az alternatívák közötti előnyviszony logikailag következetes: ha az A alternatíva előnyösebb B-nél, és B előnyösebb C-nél, akkor ebből szükségszerűen következik, hogy A is előnyösebb C-nél.

Transzparencia	A döntési folyamat bemenetei és eredményei közötti egyértelmű logikai kapcsolat.
Varrat-horgony	A lágy szövetet a megfelelő helyszínen rögzíti, megőrizve annak helyzetét lazítás vagy túlzott feszültség nélkül, amíg a fiziológiai gyógyulás meg nem valósul. [3]
Intraoperatív	Műtét alatti, műtét közben történő esemény vagy beavatkozás. [4]

1. BEVEZETÉS

1.1. A KUTATÁSI HÁTTÉR ÉS IPARI MOTIVÁCIÓ

A gépészeti tervezés során a koncepcionális tervezés szakaszában, az adott alternatívák közötti választáskor, a mérnököknek rangsort kell felállítaniuk, hogy megtalálják a legjobb megoldást jelentő konstrukciót.

A rangsor felállítása általában nem egyszerű, mivel az alternatívákat több szempont szerint kell értékelni, amelyek gyakran ellentmondanak egymásnak.

Ez a feladat a többszempontú döntéselmélet segítségével oldható meg, amihez az alternatívák tulajdonságait és a döntéshozó szempontjait is mérőszámokkal kell tudni jellemezni, mert a feladat csak az adott szempontok megfelelő értékelésével végezhető el szakszerűen.

Mivel a legjobb döntés megtalálása a keresés módjának minőségétől is függ, ezért napjainkban is intenzív kutatási terület a rendelkezésre álló döntéstámogató eszköztárak fejlesztése.

1.2. A DISSZERTÁCIÓ CÉLKITŰZÉSEI

A jelen dolgozat célkitűzése, hogy a döntéstámogatást már a koncepcionális fázisban MDO (különböző mérnöki diszciplínákat ötvöző tervezés optimalizálás) alapú logika mentén kezelje, azaz a különböző szakterületi szempontokat (pl. szerkezeti, gyártási, gazdasági) integrált módon, párhuzamosan értékelje és optimalizálja.

A döntéstámogatási módszerek alkalmazásának érdekében, a dolgozat további célja, olyan többszempontú döntéselméleti módszertanok vizsgálata és gyakorlati alkalmazásának bemutatása, amelyek a koncepcionális tervezés során a szakértői munka támogatására alkalmazhatóak.

1.3. A DOLGOZAT SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE

A dolgozat első két fejezete az elméleti áttekintés. Itt mutatom be döntéstámogató módszerek szakirodalmi feldolgozását és elemzését, majd a dolgozat második része gyakorlati alkalmazásokat mutat be.

Az első fejezetben a szakirodalom feldolgozásának eredményeinek alapján, kutatási kérdésekre teszek javaslatot. A második szakaszában a szakirodalom kritikai elemzését mutatom be, majd azokra alapozva a dolgozatban vizsgált hipotéziseimet írom le.

Ezt követően a második fejezetben a meghatározott kutatási célok és hipotézisek alapján a döntéselméleti módszertanok vizsgálata során feltárom alkalmazhatóságuk gyakorlati aspektusait.

A dolgozat második felében gyakorlati alkalmazási példákon mutatom be a javasolt módszertan alkalmazását a feltárt elméleti struktúra alapján.

1.4. A TÖBBCÉLÚ OPTIMALIZÁLÁS ELMÉLETI ALAPJAI

A többcélú optimalizálási problémák, ahol egyideűleg több egymásnak ellentmondó célt kell figyelembe venni és kompromisszumos megoldást találni, mindig is a kutatások középpontjában álltak. [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] A döntési modellek fejlődésének mérföldköveit szemlélteti a 1. táblázat. Az optimális csere elméletének alapjait Francis Ysidro Edgeworth és Vilfredo Pareto fektette le. [12] A 1. ábra Edgeworth szerződési görbáját ábrázolja, ahol a piros vonal az A , a kék vonal a B döntéshozó elégedettségi szintjét jelöli. Az érintkezési pontokon egyik fél sem tud javítani saját helyzetén a másik kárára, azaz ezek a pontok felelnek meg a Pareto-optimumnak. Ezeket összekötve kaphatjuk meg a fekete vonallal jelölt Pareto-frontot, amely a lehetséges kompromisszumos megoldások halmazát reprezentálja. Az eredeti ábra alapján készült 2. ábra egy mérnöki példát szemléltet, ahol a tömeg és a szerkezeti szilárdság közötti kompromisszum határozza meg az optimális megoldást. A 2. ábra szerinti piros szaggatott vonalak a tömeg, míg a kék szaggatott vonalak a szilárdság szempontjából értelmezett indifferencia görbéket ábrázolják.

1. táblázat A döntési modellek fejlődésének fő mérföldkövei

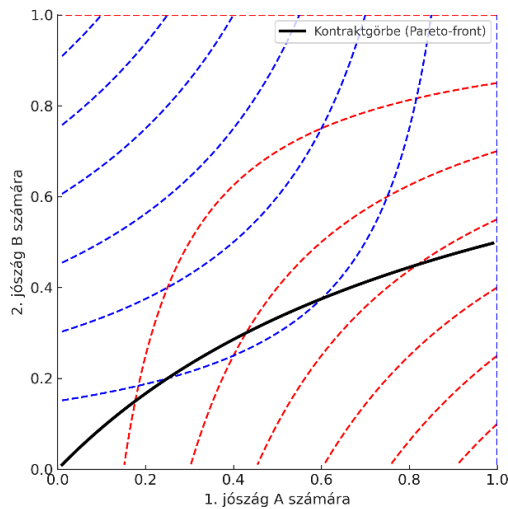
Időszak	Fejlődési szakasz	Módszerek és forrás
1700-1900	Elméleti alapok	1738, D. Bernoulli, Várható hasznosság [13], [14] 1814, Laplace, Bayesi valószínűség [15] 1906, V. Pareto, Pareto-határ [16]
1940-1970	Formalizált döntéselmélet	1944, J. von Neumann, O. Morgenstern, Játékelmélet [17] 1955, A. Charnes, et al., [18] 1965, L. Zadeh, [19]
1970-1990	Többkritériumos módszerek	1968-1978, Roy, ELECTRE I–III [20], [21], [22] 1970-es évek, R. L. Keeney, H. Raiffa, MAUT [23] 1980, L. Saaty, AHP [24] 1983, Saaty, Vargas, ANP [25] 1990, C. L., Hwang, K. Yoon, TOPSIS [26]
1990-2005	Kompromisszum-alapú módszerek	1988, Opricovic, VIKOR [27] 1999, K. Miettinen, Többcélú optimalizálás új keretben [28] 2001, Deb, Tchebycheff evolúciós MCDM [29]
2005-	Intelligens, célorientált megközelítések	Célértékes VIKOR (intervallum + cél) Fuzzy-VIKOR, VIKOR-AHP, hibrid modellek Gépi tanulás + MCDM

Ezzel összhangban áll von Neumann–Morgenstern [17] elmélete is, miszerint a várható haszon képlete:

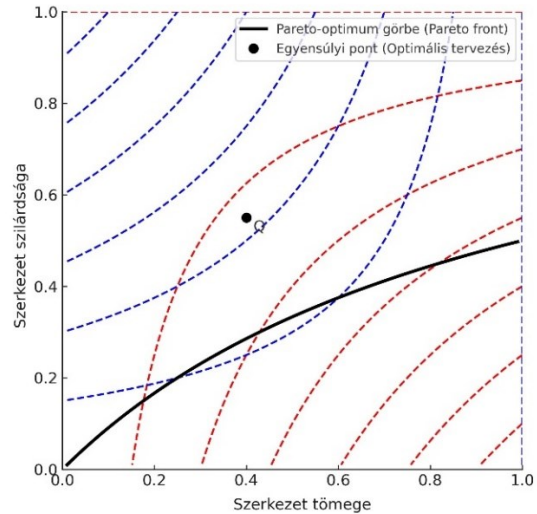
$$VH = \sum (P_i \cdot H(a)_i) \quad (1)$$

ahol VH a várható haszon, i az egyes következményeket jelöli, P_i az i -edik választás valószínűsége, és $H(a)_i$ az i -edik kimenethez tartozó döntéshozói hasznosság. [30] Ez a hasznossági modell alapozta meg a későbbi döntéselméleti modelleket és a kompromisszumos többcélú optimalizálási módszerek fejlődését. [31]

Ebben az összefüggésben a döntési folyamat egy kvantitatív elemzési láncolatként értelmezhető, amely a sokváltozós adatelemzés logikáját követi, ahogy azt a 3. ábra szemlélteti.

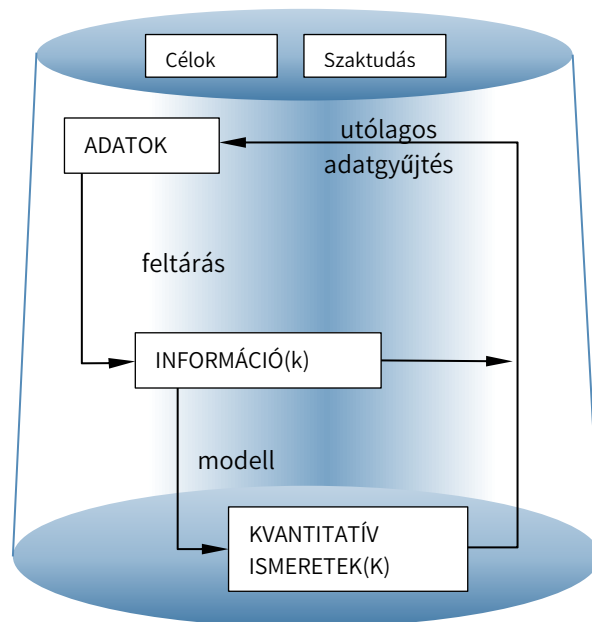


1. ábra Edgeworth féle szerződési és indifferencia görbék [12]



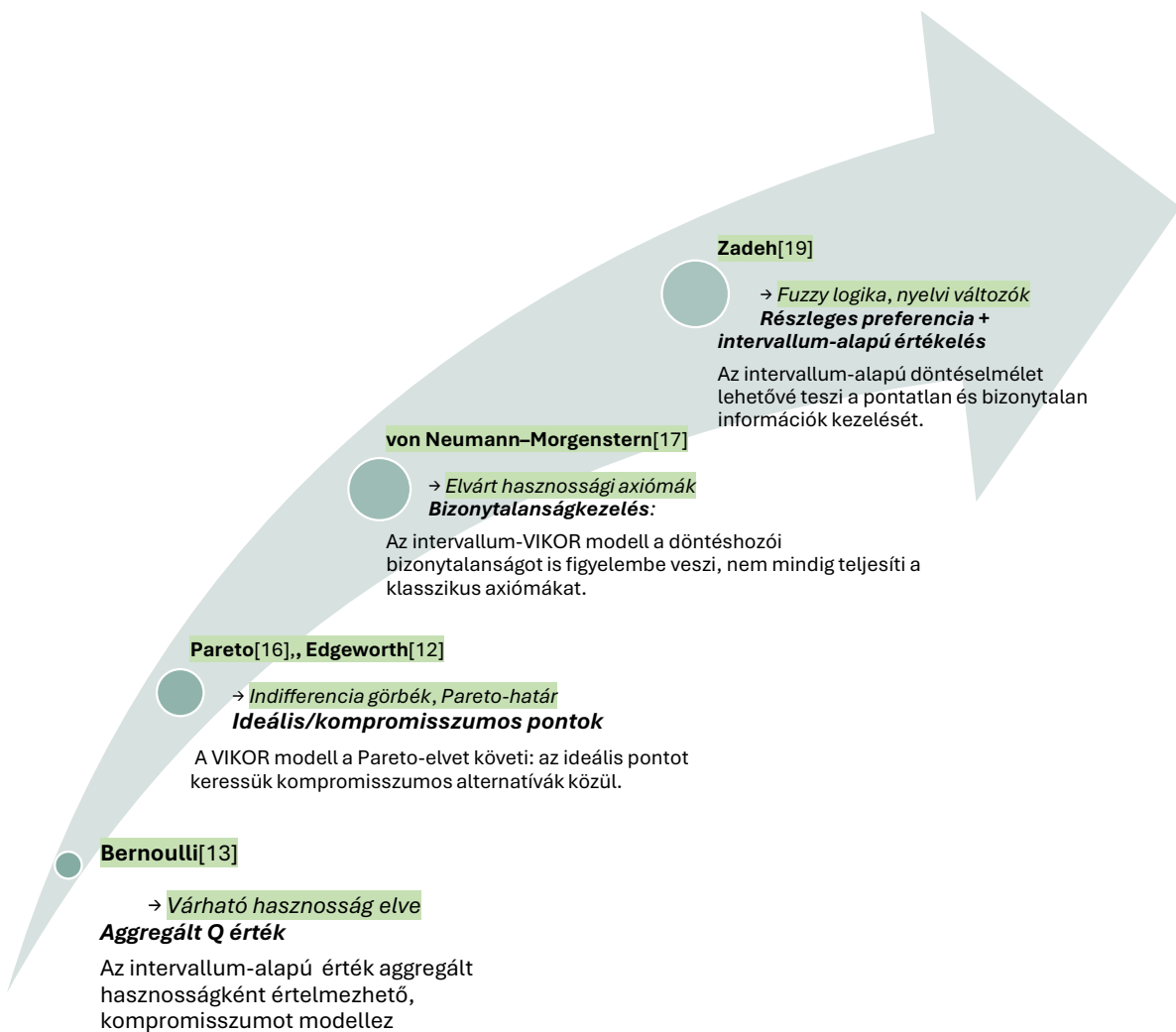
2. ábra Pareto-optimális kompromisszum a mérnöki tervezésben: szerkezeti tömeg és szilárdság kapcsolata, ahol a Q pont az optimális megoldást jelöli

Például ha egy termék tulajdonságait akarjuk javítani az előállítási technológia optimalizálásával, a pontos optimum megtalálása hiányában is jelentős javulás érhető el. [32]



3. ábra A sokváltozós adatelemzés rendszere [32] alapján

A klasszikus döntéseméleti modellek és azok kutatásomban betöltött szerepét foglalja össze a 4. ábra.



4. ábra A klasszikus döntésméleti elvek beépülése az intervallum-alapú céltértékes VIKOR modellbe

1.4.1. A Pareto-optimalitás fogalma

A többcélú optimalizálási problémák során az egyes célfüggvények gyakran ellentétes hatásúak, így egyetlen globális optimum helyett egy Pareto-határt, amely kompromisszumos megoldások halmazát tartalmazza [29]. Az ilyen problémák formálisan az alábbi módon definiálhatók:

$$\min_{x \in \mathbb{X}} F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad (2)$$

ahol $f_i(x)$ az egyes célfüggvényeket reprezentálja, $\mathbb{X}$ az érvényes megoldások halmaza és x egy lehetséges megoldás az érvényes megoldások halmazából.

A Pareto-optimalitás elve szerint egy $x^* \in \mathbb{X}$ megoldás Pareto-hatékony, megoldás, amely minden célfüggvény esetében legalább olyan jó, és legalább egy célfüggvény esetében szigorúan jobb eredményt ad. Azaz $x \in \mathbb{X}$ amelyre teljesül, hogy:

$$\forall i: f_i(x) \leq f_i(x^*) \text{ és létezik legalább egy } j: f_j(x) < f_j(x^*) \quad (3)$$

tehát, nincs olyan megoldás, amely minden célfüggvény szempontjából jobb lenne a x^* megoldásnál.

1.4.2. A többcélú optimalizálási algoritmusok

Először definiálunk néhány speciális megoldást, amelyeket gyakran használnak a többcélú optimalizálási algoritmusokban. [29]

Az M számú ütköző cél mindegyikéhez létezik egy különböző optimális megoldás. Egy célvektor, amely ezen egyedi optimális célértékekkel van konstruálva, alkotja az ideális célvektort.

DEFINÍCIÓ: IDEÁLIS CÉLVEKTOR

Az ideális célvektor m -edik komponense z^* a következő probléma korlátozott minimális megoldása:

$$\text{Minimalizáljuk: } f_m(x) \Big\{ \begin{matrix} x \in S. \end{matrix} \quad (4)$$

Tehát, ha az m -edik célfüggvény minimális megoldása az $x^{*(m)}$ döntési vektor f_m^* függvényértékkel, akkor az ideális vektor a következő:

$$z^* = f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_m^*)^T \quad (5)$$

Általánosságban elmondható, hogy az ideális célvektor egy nem létező megoldásnak felel meg. Ez azért van, mert a (4) egyenlet minimális megoldása minden célfüggvényre nem kell, hogy ugyanaz a megoldás legyen. Az egyetlen módja annak, hogy egy ideális célvektor egy lehetséges megoldásnak feleljen meg, az az, ha az összes célfüggvény minimális megoldása azonos. Ebben az esetben a célok nem ütköznek egymással, és bármely célfüggvény minimális megoldása lenne az egyetlen optimális megoldás. Az ideális célvektort (z^*) mutatja az 5. ábra egy hipotetikus kétcélú minimalizálási probléma célterében. A legtöbb algoritmusban, amely Pareto-optimális megoldásokat keres, az ideális célvektort használják referenciamegoldásként. A 2. táblázat bemutatja a [29] szerint osztályozott célvektorokat.

2. táblázat Az ideális (z^*), az utópikus (z^{**}) és a nadir (z^{nad}) célvektorok definíciói

Fogalom	Definíció
Dominancia	Egy megoldás dominál egy másikat, ha minden célfüggvényben legalább olyan jó, és legalább egyben jobb.
Ideális célvektor z^*	Az egyes célfüggvényekre külön-külön optimalizált értékekből képzett vektor. Egy elméleti optimum, amely a célfüggvények minimumait tartalmazza.
Utópikus célvektor z^{**}	Az ideális megoldás minden célfüggvény legkisebb elérhető értéke.
Nadir célvektor z^{nad}	Minden célfüggvény legalacsonyabb értéke

A 5. ábra megmutatja, hogy az ideális célvektorhoz közelebbi megoldások jobbak.

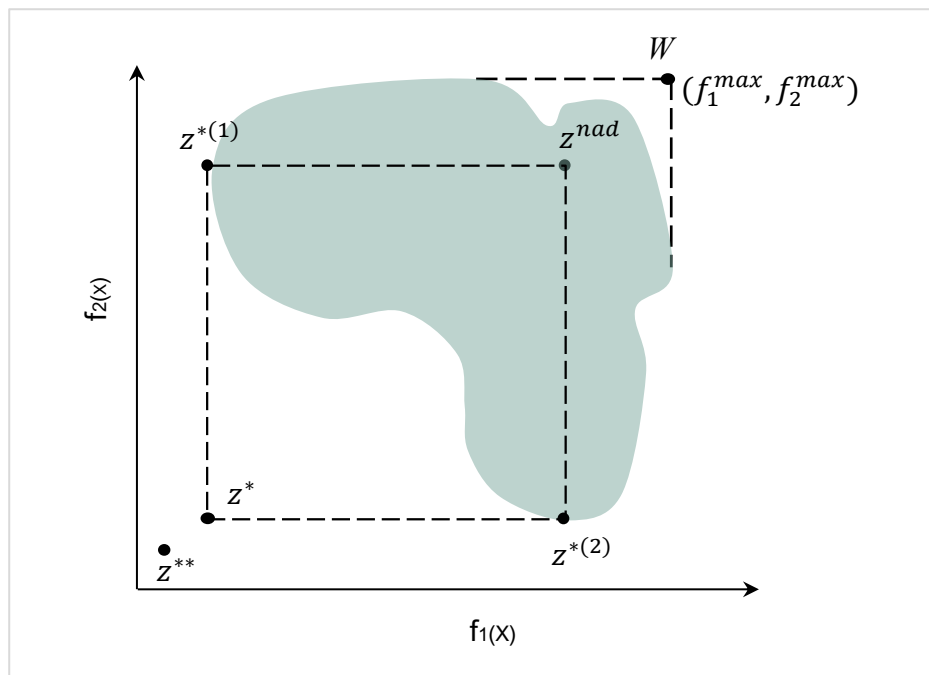
DEFINÍCIÓ UTÓPIKUS CÉLVEKTOR

Egy utópikus z^{**} célvektor minden komponense marginálisan kisebb, mint az ideális célvektor komponense, vagyis

$$z_i^{**} = z_i^* - \epsilon_i \text{ és } \epsilon_i > 0 \text{ minden } i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

Az ideális célvektorhoz hasonlóan az utópikus célvektor is egy nem létező megoldást reprezentál, ami az egyes célfüggvények alsó határértékeit jelöli, ahol minden

célfüggvényhez létezik egy legalább elméleti minimum, ami az adott cél legjobb lehetséges értéke.

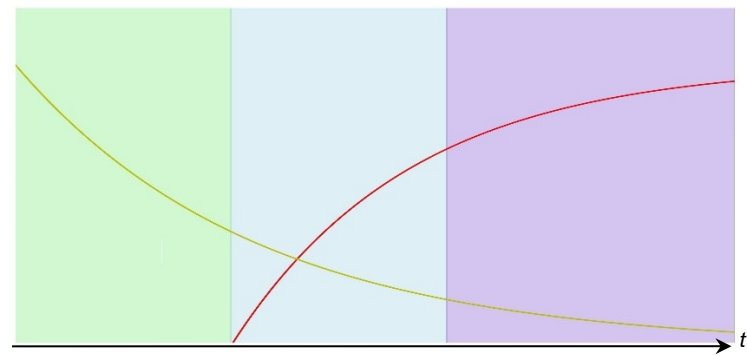


5. ábra Az ideális, az utópikus (z^{**}) és a nadir (z^{nad}) célvektorok [29]

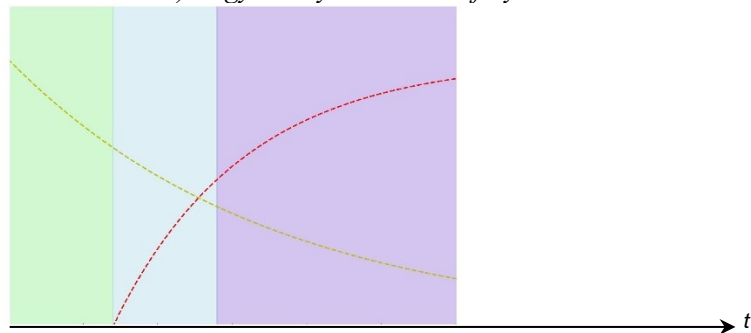
A keresési tér és a Pareto-hatékony megoldások kapcsolatának feltárásának folyamatát a szakirodalomban Statinkov [33] teherautó alváz optimalizáló példája, szemléletesen mutatja be. A forrás elemzésével a 0. fejezetben bemutatom a többszempontú optimalizálási módszerek lényegét.

1.1. A DÖNTÉSHOZATAL SZEREPE A KORAI TERVEZÉSI FÁZISBAN

A mérnöki tervezés tipikus fázisokból épül fel, amelyek közül a koncepcionális szakasz nagy jelentőséggel bír, hiszen az itt meghozott döntések vannak a legnagyobb hatással a további fázisokra, miközben a rendelkezésre álló információk ekkor a leghiányosabbak. [34] [35] [36] Ezen fázisk között a kapcsolat iteratív, mivel gyakran szükséges a korábbi fázisokhoz való visszatérés, amelyeket a 8. ábra zölddel jelölt nyilakkal ábrázol. Ahogy [37] forrás konkrét példákon (A350, MALE UAV) keresztül bemutatja, a tervezők visszatérnek többször is a tervezési ciklusban a korábbi lépésekhez. Rávilágít, hogy az egyidejűleg, integráltan optimalizálva a különböző mérnöki diszciplínákat, jelentős előnyökre tehetünk szert, mivel a tervezési idő csökken. Ezzel összefüggésben a 6. ábra bemutatja a tervezői tudás és a tervezési szabadság összefüggéseit a hagyományos és a javasolt tervezési módszertan között: az ábra a) részén a piros folytonos vonal: a tudás (hagyományos), a sárga folytonos vonal: tervezési szabadság (hagyományos) jelölésére szolgál, míg az ábra b) részén a piros szaggatott vonal a tudást (új), a sárga szaggatott vonal a tervezési szabadságot (új) jelöli.



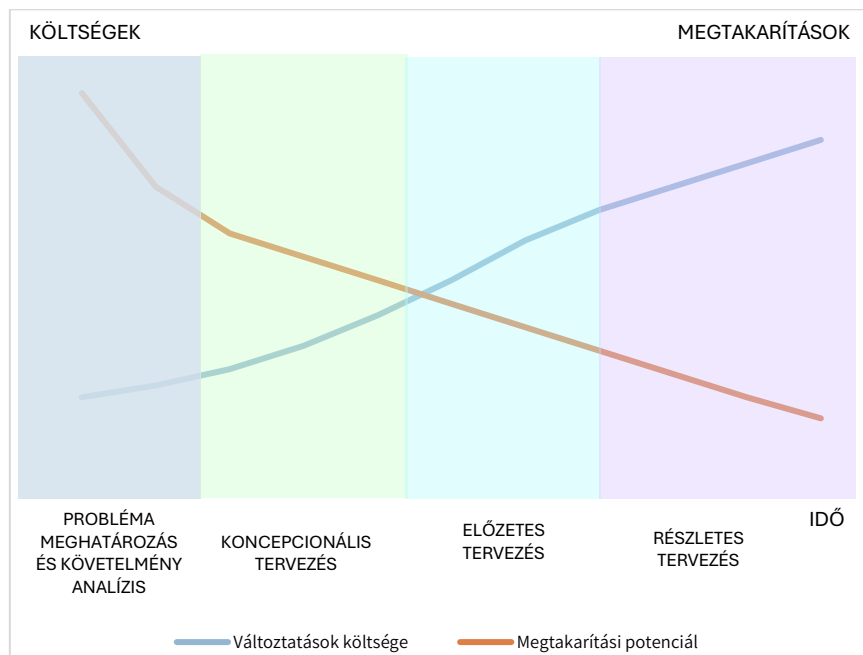
a) hagyományos tervezési folyamat



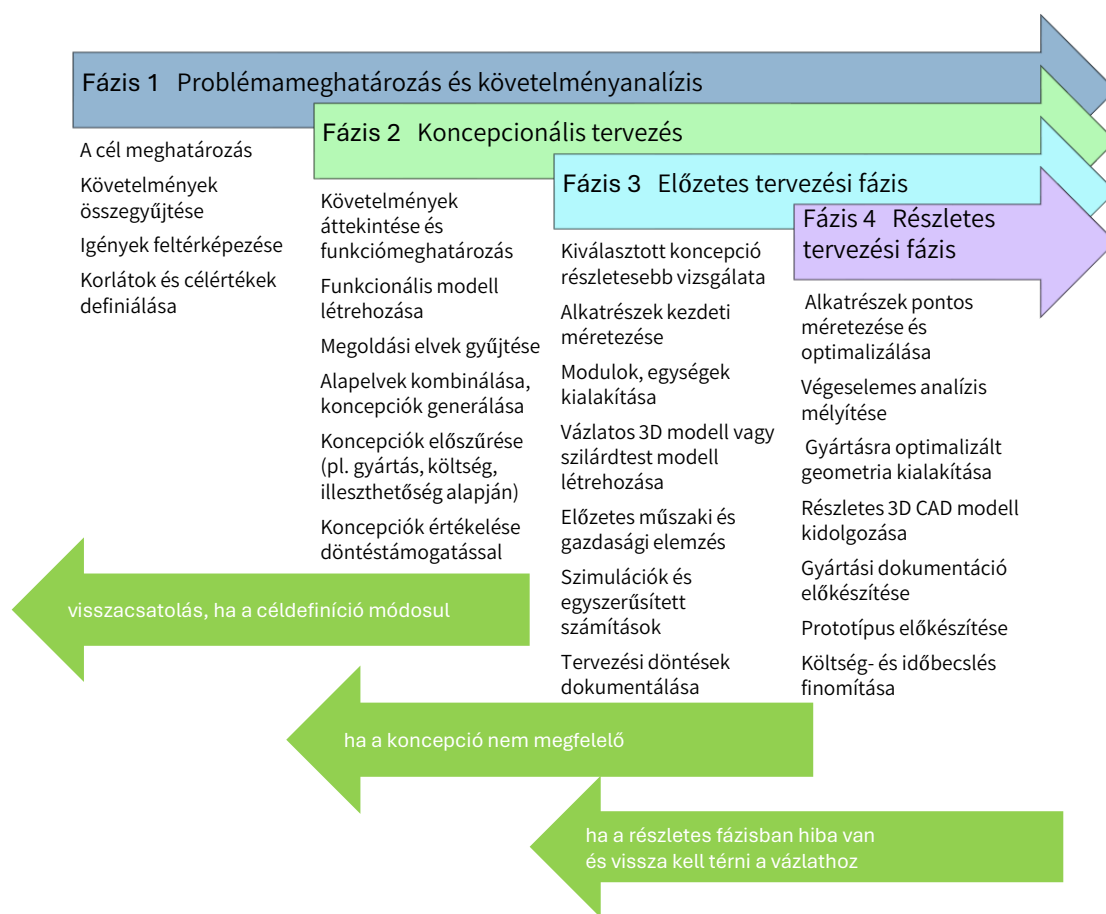
b) különböző mérnöki diszciplínákat
alapul vevő tervezési folyamat

6. ábra Az ismeretek bővítése a korábbi tervezési fázisokban nagyobb tervezési szabadsággal és a fejlesztési idők későbbi csökkentésével az optimalizálási módszereknek köszönhetően [37] [41]

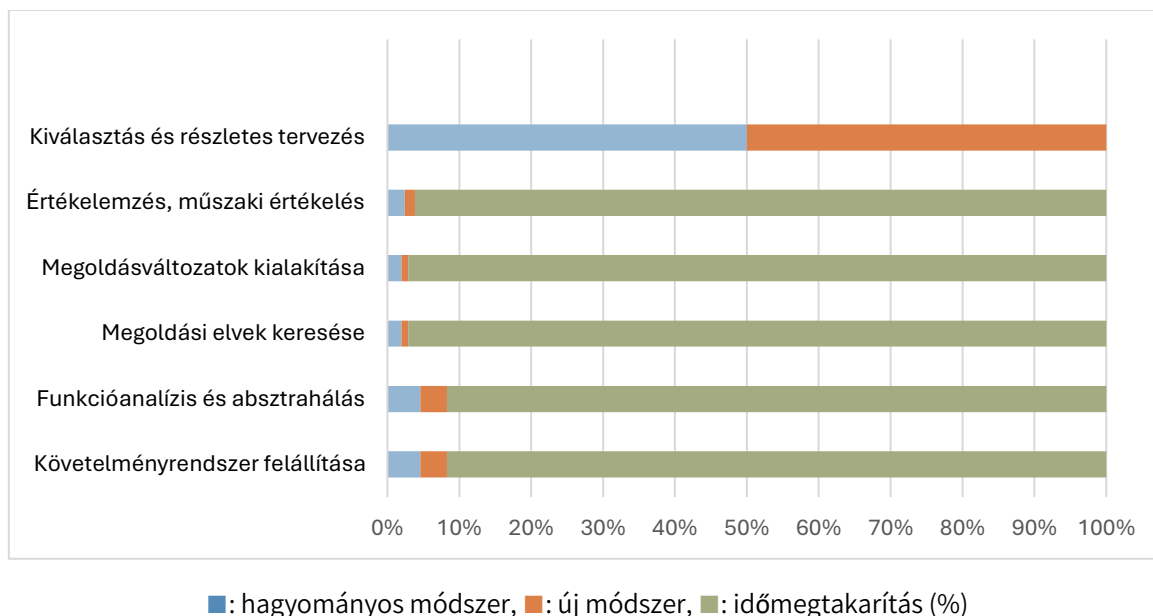
A koncepcionális fázisban [38] [39] hozott döntések kritikus hatását szemlélteti a MacLeamy-görbe [40], miszerint azok jelentősen csökkenthetik a költségeket és a hibákat, összességében a termék életciklus-költségeit. (7. ábra)



7. ábra A MacLeamy-görbe [34] és a tervezési fázisok a mérnöki tervezés folyamatában



8. ábra A koncepcionális tervezési fázisa a mérnöki tervezés folyamatában



9. ábra A koncepcionális tervezés lépéseinek időigénye

A mérnöki tervezési folyamat fázisait részletesen a 8. ábra mutatja be. A 9. ábra szemlélteti, a koncepcionális tervezés lépéseinek időigényét a hagyományos és az új javasolt tervezési folyamat során.

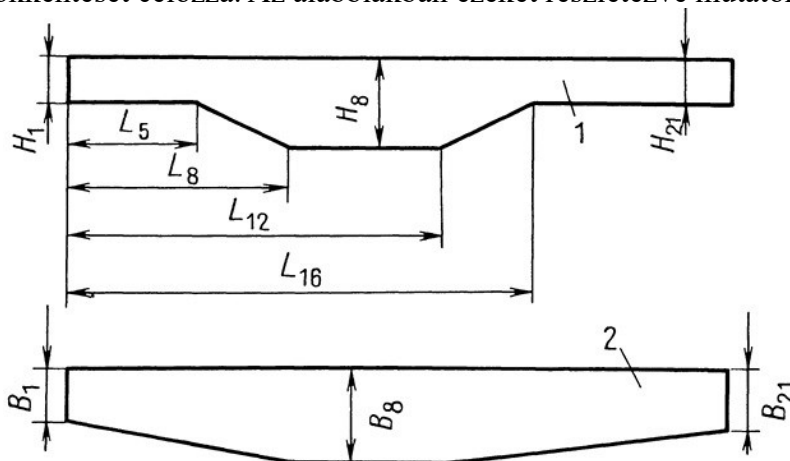
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. A TÖBBCÉLÚ SZERKEZETI OPTIMALIZÁLÁS KRITÉRIUMRENDSZER ALAPJÁN

A teherautó alváza a jármű szerkezetének az egyik legfontosabb szerkezeti eleme, amely egyszerre van kitéve az út egyenetlenségeinek és a ráépített egységek hatásainak. A kidolgozott példa [33] alapján készült. Az adatokat tartalmazó táblázatok a 12.2 és 0 fejezetekben találhatóak (45. táblázat-48. táblázat). A vizsgált alvázszerkezet hatással van a jármű számos tulajdonságára, többek között az irányíthatóságra, a menetkomfortra, a rezgésből adódó terhelésekre, a jármű stabilitására és az össztömegre, mivel jelentős részét adja a teljes jármű tömegének.

A járműalváz-tervezés egyik fő kihívása, illetve célja, hogy csökkentsük az össztömeget, miközben javítjuk a szilárdsági tulajdonságokat és biztosítjuk a szükséges dinamikai tulajdonságokat. A szakirodalmi példa célja az oldalsó főtartó és keresztmervítők méreteinek és szilárdságának optimalizálása, a jobb csavarási és hajlítási merevség és a technológiai megvalósíthatóság, azaz a gyárthatóság biztosításával.

Az alváz geometriáját a 10. ábra mutatja be. Az optimalizálási folyamatot a 11. ábra szemlélteti. Az optimális kialakítás meghatározásához hét kritériumot fogalmaztak meg a szerzők. Ezek közül három pszeudokritérium a prototípushoz viszonyított merevségjellemzőket értékeli és további négy teljesítménykritérium a tömeg és a feszültségek csökkentését célozza. Az alábbiakban ezeket részletezve mutatom be.



10. ábra Az oldalsó hossztartó geometriai kialakítása (1: övlemez; 2: szegélylemez).

A VIZSGÁLT KRITÉRIUMOK BEMUTATÁSA

A. PSZEUDOKRITÉRIUMOK

- Csavarási merevség növelése (ϕ_1)

Az optimalizálás első célja a csavarási merevség növelése.

$$\phi_1 = \phi_i - \phi_p \quad (7)$$

ahol ϕ_i az optimalizált váz csavarodási szöge, és ϕ_p a prototípus váz csavarodási szöge.

- Függőleges síkbeli hajlítási merevség növelése (ϕ_2)

Az optimalizálás második célja a vízszintes síkbeli merevség növelése:

$$\phi_2(\alpha) = 100\% \cdot \frac{f_{max,v}^i - f_{max,v}^p}{f_{max,v}^p} \quad (8)$$

ahol $f_{max,v}^i$ az optimalizált váz maximális függőleges elhajlása és $f_{max,v}^p$ a prototípus maximális függőleges elhajlása.

- Vízszintes síkbeli hajlítási merevség növelése (ϕ_3)

Az optimalizálás harmadik célja a vízszintes síkbeli merevség növelése:

$$\phi_3(\alpha) = 100\% \cdot \frac{f_{max,H}^i - f_{max,H}^p}{f_{max,H}^p} \quad (9)$$

ahol $f_{max,H}^i$ az optimalizált váz maximális vízszintes elhajlása, és $f_{max,H}^p$ a prototípus maximális vízszintes elhajlása.

B. TELJESÍTMÉNYKRITÉRIUMOK

- Oldalsó főtartó tömegének csökkentése (ϕ_4)

Az első cél az oldalsó főtartó teljes tömeg csökkentése:

$$\phi_4(\alpha) = \sum alváz \text{ tömege} + felső \text{ és alsó perem tömege} \quad (10)$$

- A lemezzvastagság minimalizálása (ϕ_5)

A második cél a lemezzvastagság minimalizálása, a megfelelő szerkezeti szilárdság fenntartása mellett:

$$\phi_5(\alpha) \quad (11)$$

- Csavarási feszültség normalizálása (ϕ_6)

A harmadik cél a feszültségek minimalizálása a szerkezetben, ahol a csavarási feszültséget az úton jellemző átlagos $\phi_5 = 5^\circ$ -os átlagos csavarodási szög alapján normalizálták:

$$\phi_6(\alpha) = \frac{\max(\sigma_{tor}) - \Phi_5^\circ}{\Phi_i} \quad (12)$$

ahol σ_{tor} a maximális csavarási feszültség.

- Vízszintes hajlítási feszültség (ϕ_7)

A negyedik cél a vízszintes hajlítási feszültségek (ϕ_7) minimalizálása.

2.1.1. A tervezési változók és geometriai korlátok bemutatása

A TERVEZÉSI VÁLTOZÓK ÁTTEKINTÉSE

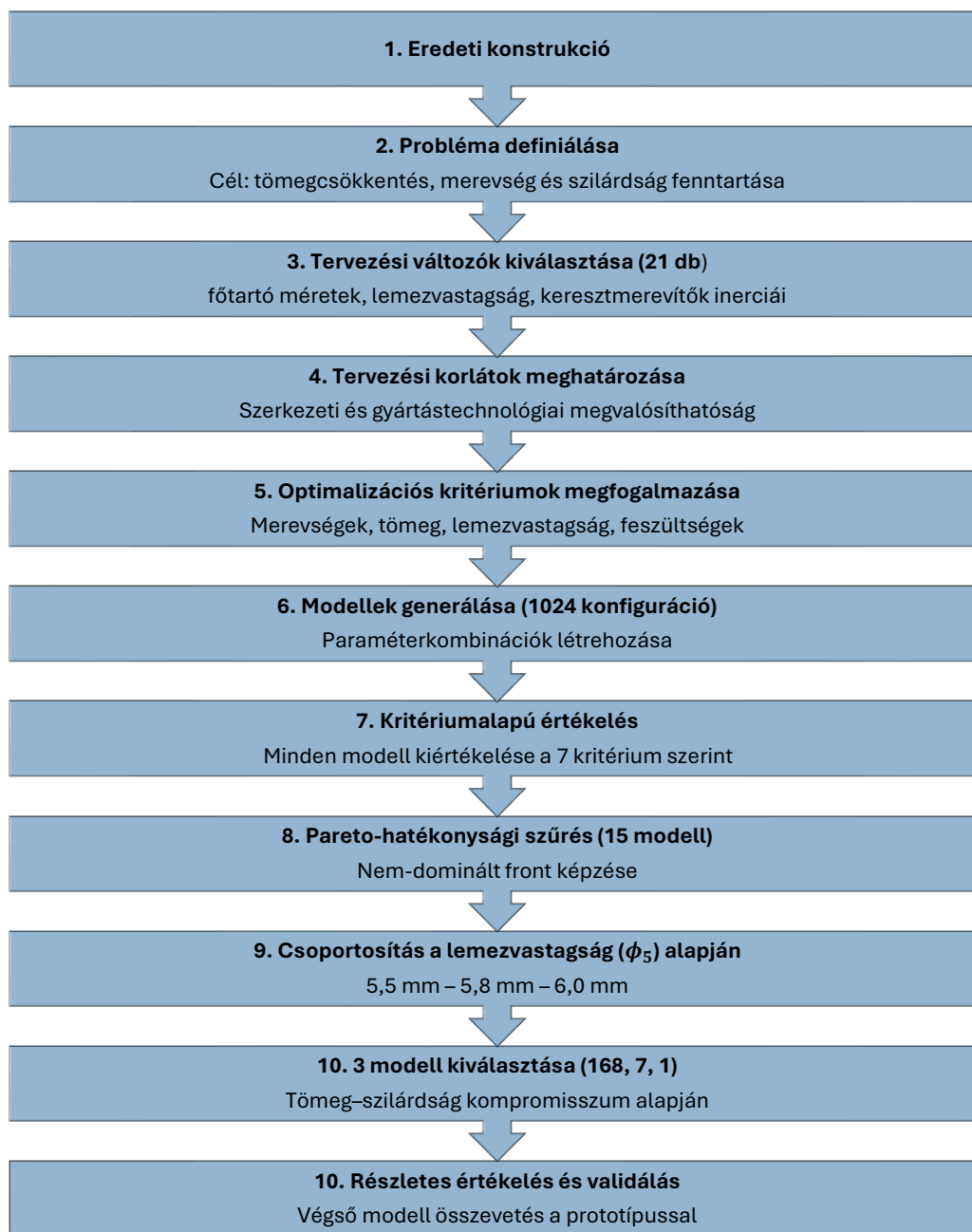
Az optimalizálási probléma megoldásához 21 tervezési változót választottak, amelyek meghatározzák:

- az oldalsó főtartó geometriáját: magasságát (H), szélességét (B), hosszúságát (L),
- a lemezzvastagságot (D),
- a keresztmervítők merevségi jellemzőit (I_{T_i}, I_{W_i})

KERESZTMEREVÍTŐK HATÁSA

A keresztmervítők kulcsszerepet játszanak a váz csavarási és függőleges hajlítási merevségének kialakításában. Ezért az optimalizálási változók közé bekerültek a

keresztmerevítők csavarási merevséghez tartozó tehetetlenségi nyomatékai (I_{T_i}) és a vízszintes síkbeli hajlítási merevséghez tartozó tehetetlenségi nyomatékok (I_{W_i}), ahol mindkét jellemző esetében $i = 1,2,3,4,5$, mivel az adott váz 5 keresztmerevítőt tartalmaz.



11. ábra A vizsgált optimalizálási startégia folyamatábrája

TERVEZÉSI KORLÁTOK MEGADÁSA

A tervezési változók értéktartományainak határait úgy választották meg, hogy figyelembe vegyék a szerkezeti követelményeket (pl.: ne lépje túl a feszültséghatárokat) és a gyártástechnológiai lehetőségeket (pl.: lemezvastagság, hajlíthatóság), ami meghatározta, hogy az optimalizáció során csak a gyártható és szerkezetileg megfelelő megoldások legyenek figyelembe véve.

2.1.2. Az optimalizációs modell és kritériumrendszer

MODELLGENERÁLÁS ÉS KIINDULÓ VIZSGÁLATOK

Az optimalizáció során a szerzők 1024 kísérletet hajtottak végre, amely során a tervező és a számítógép közötti iteratív párbeszéd eredményeinek elemzésével a különböző kritériumok (tömeg, merevség, feszültségek) közötti kapcsolat mélyebb megértése jöhetett létre. Az optimalizálási folyamatot mutatja be a 11. ábra.

AZ ELEMZÉS LÉPÉSEI ÉS AZ ELSŐ EREDMÉNYEK

A prototípus váz esetén a lemezzvastagság 6,35 mm, az oldalsó főtartó tömege 104 kg. Az optimalizált modellek tömegcsökkentést (pl. 104 kg-ról 92,7 kg-ra), lemezzvastagság csökkentést (6,35 mm-ről 5,5 mm-re), merevségjavulást (megnövekedett I_{W_i} és I_{T_i} értékek) és jobb szilárdsági jellemzőket (csökkentett feszültségek) értek el, mint a prototípus. A vizsgált modellek közül a szerzők több lépéssel kiválasztották a legjobbakat, amelyek közül több is Pareto-hatékony volt, azaz nem volt egyértelműen jobb változat.

AZ ELSŐ ITERÁCIÓ

A pszeudokritériumok (csavarási, függőleges és vízszintes hajlítási merevség) esetében az eltéréseket a prototípus értékeihez képest 10%-ban korlátozták, azaz:

$$\phi_v(\alpha) \leq 1,1 \cdot \phi_{v,p}, v = 1, 2, 3 \quad (13)$$

Ez biztosította, hogy az optimalizált váz merevségi tulajdonságai ne térjenek el jelentősen a prototípusétól.

AZ ELSŐ KIVÁLASZTÁS ÉS A PARETO-SZŰRÉS

Az optimalizációban csak azokat a modelleket vették figyelembe, amelyek tömege kisebb volt, mint a prototípusé (104 kg). Az első megoldáshalmaz 11 modellt tartalmazott, ebből 10 Pareto-optimum volt.

TOVÁBBI OPTIMALIZÁCIÓS LÉPÉSEK

A következő öt iteráció során a merevségi korlátokat 20%-kal lazították. A csavarási és vízszintes hajlítási feszültségekre további határokat állapítottak meg:

- Csavarási feszültség: max. $1\,200\text{ kgf/cm}^2$.
- Vízszintes hajlítási feszültség: max. $2\,300\text{ kgf/cm}^2$.

Ennek a folyamatnak az eredményeként a lazább korlátok új megoldásokat eredményeztek, így bővült a megvalósítható megoldások halmaza.

ÚJ PARALLELEPIPED II₂ KERESÉSI TÉR KIALAKÍTÁSA

A célzott keresési tér (Parallelepiped II₂) szűkítése segített a hatékonyabb eredmények elérésében, ahol 256 új modell azonosítottak. A vízszintes hajlítási feszültségek csökkentek, miközben a tömeg optimalizálása sikeres volt.

A HÁROM LEGJOBB MODELL KIVÁLASZTÁSA

A három legjobb modellt további elemzésnek vetették alá. A legjobb modell a 168-as lett, amely kiegyensúlyozott szilárdsági és tömegkarakterisztikát mutatott. A teherautó váz teljesítménykritériumai jelentősen javultak, az oldalsó főtartó tömegét sikerült 14 kg-al csökkenteni. (3. táblázat)

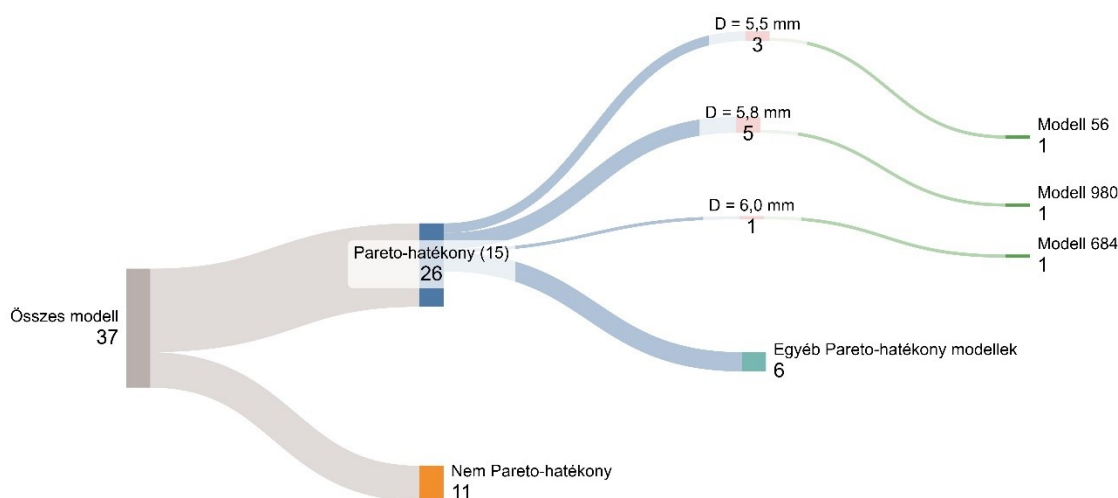
3. táblázat A kiválasztott modell (168-as) adatainak összehasonlítása a prototípussal

Kritérium	Prototípus	Modell 168
Tömeg (ϕ_4)	104 kg	90 kg
Lemezvastagság (ϕ_5)	6,35 mm	5,46 mm
Csavarási feszültség (ϕ_6)	1000 kgf/cm ²	934 kgf/cm ²
Hajlítási feszültség (ϕ_7)	2220 kgf/cm ²	2046 kgf/cm ²

A bemutatott szakirodalmi példa [33] a keresési tér kialakítására összpontosít. A végeselemes módszerek alkalmazásával a szerzők biztosították a szerkezeti jellemzők részletes vizsgálatát.

AZ ALTERNATÍVÁK KIVÁLASZTÁSÁNAK LÉPÉSEI

Az alternatívák kiválasztása során az optimális megoldások csökkenő számát mutatja be a 12. ábra.



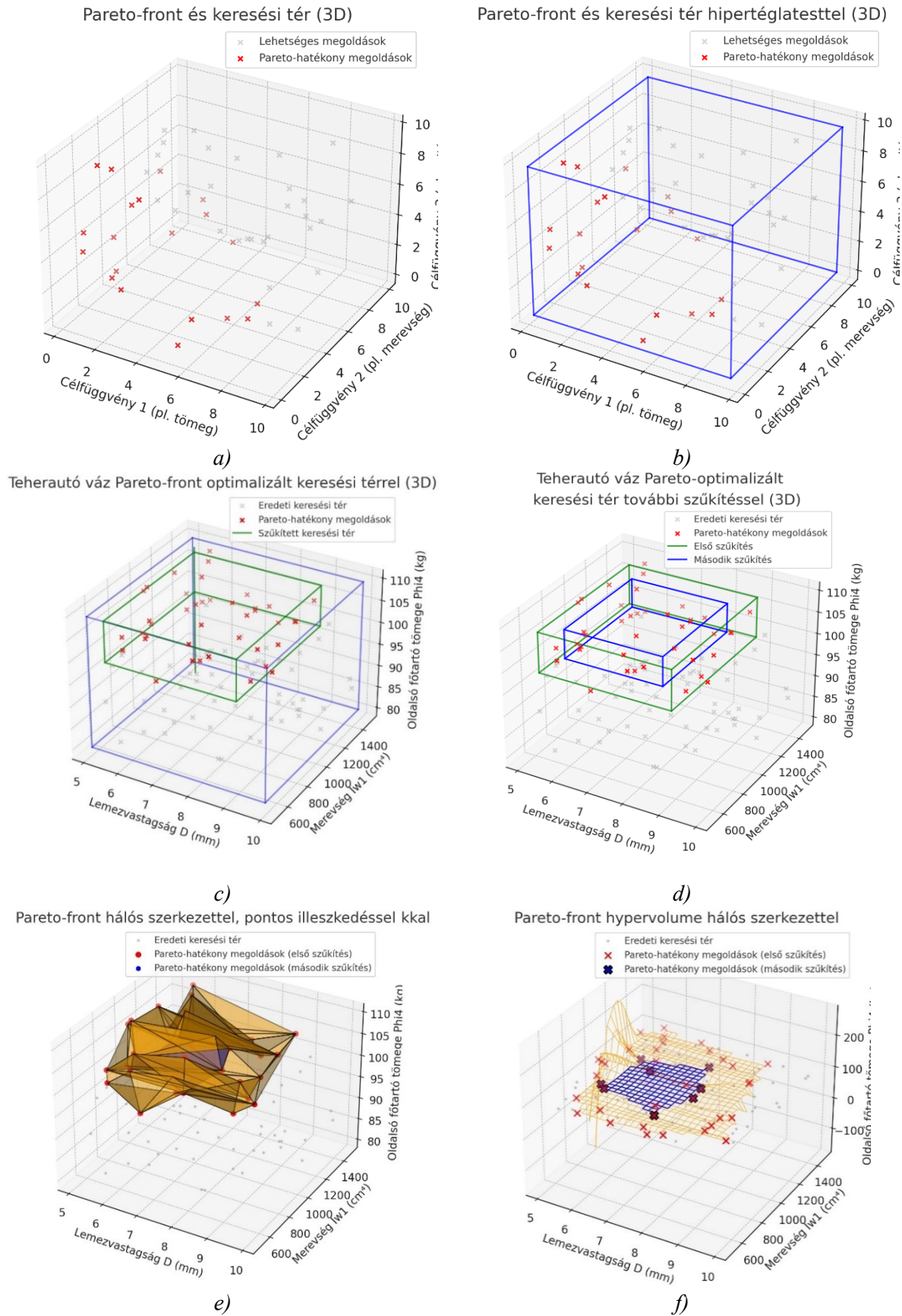
12. ábra Statnikov [20] alternatívák kiválasztási folyamata

2.1.3. A Pareto-front és a keresési tér szűkítése

A 13. ábra végigvezet az optimalizálás során alkalmazott folyamaton, ahol kezdetben sok nem optimális megoldást tartalmazó nagy keresési térben végezték a keresést:

- Teljes hipertéglatest: a kezdeti keresés során kiválasztásra kerültek a legjobb kompromisszumos megoldások.
- Első szűkítés: nem hatékony régiók kizárása.

Az ábra c) része bemutatja a Pareto tartományra fókuszált keresést, a d) pedig a második szűkítést célzott, kompromisszumos megoldásokkal. Az ábra e) részén narancssárga felületű konvex burkolatot használtam, amely az első Pareto-frontot mutatja, így látható, hogy a generált Pareto-front nagyobb lefedettséggel rendelkezik, mint a kék felületű terület, amely a második Pareto-front területe. Az ábra f) részén a felületeket hálóval rajzoltam meg, így jobban látszik a szerkezet és a Pareto-front egymásra épülő szintekként jelenik meg.



13. ábra A 3D Pareto-front ábra, amely bemutatja a keresési tér és a Pareto-hatékony megoldások kapcsolatát a keresési tér szűkítése során

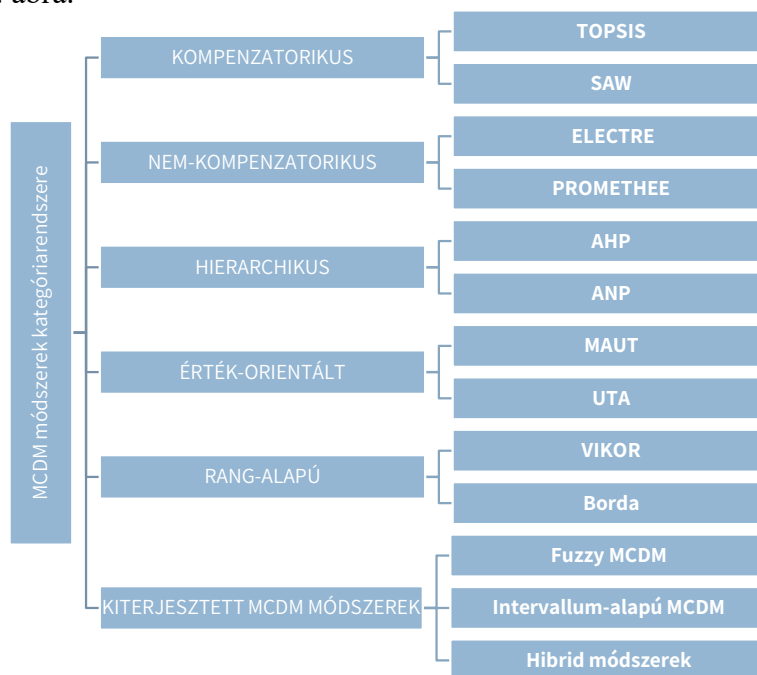
3. A TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSTÁMOGATÓ MÓDSZEREK

3.1. A MCDM MÓDSZEREK KATEGÓRIARENDSZERE

A tervezésben és a mérnöki munkában előforduló optimalizálási problémák gyakran több, egymással ütköző célkitűzést foglalnak magukban, és megoldásuk többcélú optimalizálást (MOO) igényel.

Az MOO-problémák megoldása egyformán jó optimális megoldások halmaza, amelyeket Pareto-optimális megoldásoknak nevezünk. Ezért egy további kritikus lépésre van szükség ahhoz, hogy a Pareto-optimális megoldások közül kiválasszunk egyet a megvalósításhoz; ezt a lépést többkritériumos döntéshozatalnak (MCDM) nevezzük. [42]

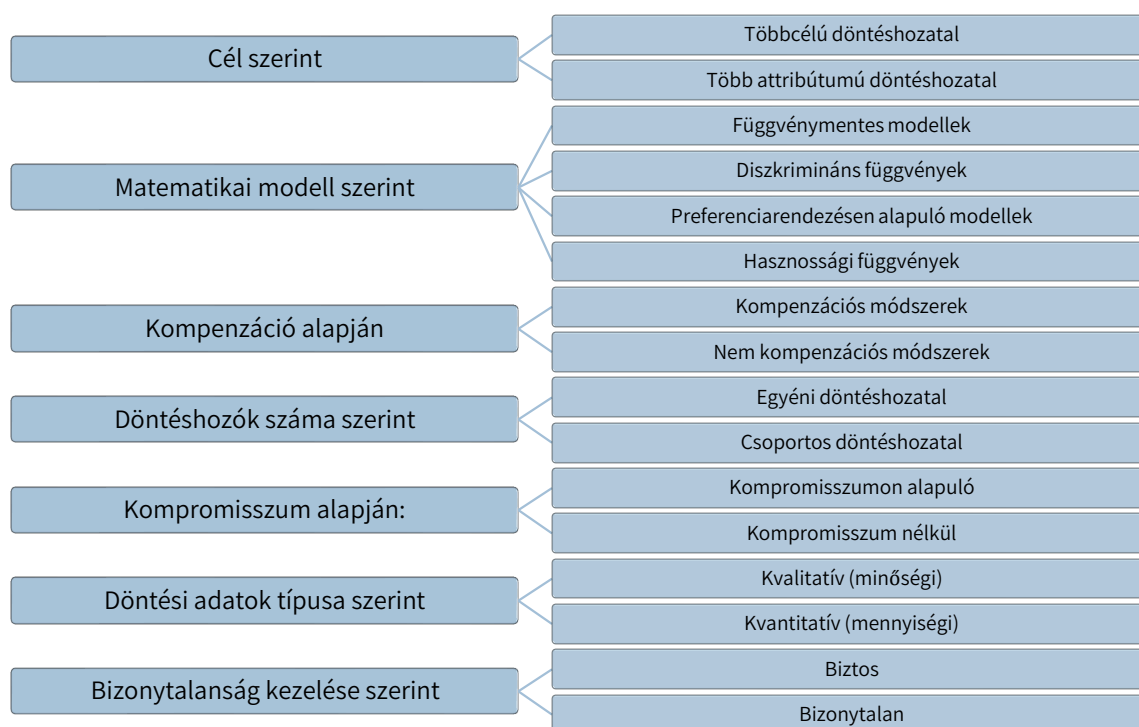
Ebben az alfejezetben bemutatom a leggyakrabban alkalmazott döntéstámogatási módszereket, amelyek relevánsak a gépészmérnöki tervezés során. A többkritériumos döntéstámogató módszerek kategóriarendszerét mutatja be a 14. ábra és osztályozásukat mutatja be a 15. ábra.



14. ábra Az MCDM módszerek kategóriarendszere

A fejezetben négy jól megalapozott, klasszikus MCDM módszer részletes bemutatására kerül sor. Ezek a TOPSIS, AHP, ELECTRE és VIKOR:

- AHP: hierarchikus struktúrára épülő, páros összehasonlításos, szubjektív preferenciákon alapuló módszer.
- TOPSIS: az ideális és anti-ideális megoldásokhoz viszonyított távolságokat méri.
- ELECTRE: részleges rangsorolást ad dominancia relációk alapján, jól kezeli a kompromisszumokat.
- VIKOR: kompromisszumos döntési logikát alkalmaz, figyelembe véve a legjobb és legrosszabb alternatívákhoz való viszonyt.



15. ábra A többkritériumos döntéshozatal módszereinek osztályozása [42]

3.1.1. A TOPSIS módszer

A TOPSIS módszer [26] a következő fő lépésekből áll:

- a döntési mátrix normalizálása,
- kritériumok súlyozása,
- az ideális és antiideális (legjobb és legrosszabb) megoldások meghatározása.
- az alternatívák távolságának kiszámítása az ideális és antiideális pontoktól.
- az alternatívák rangsorolása ezen távolságok alapján.

3.1.2. Az AHP módszer

Matematikailag az AHP lényege egy sajátérték-probléma megoldása, amely a következő formában írható le:

$$A \cdot w = \lambda_{\max} \cdot w \quad (14)$$

ahol:

A : a páros összehasonlítások mátrixa,

w : a kritériumok súlyvektora,

$\lambda_{\max}$: a mátrix legnagyobb sajátértéke.

A konzisztencia arány meghatározásához először a konzisztencia indexet (CI) számítjuk ki:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (15)$$

ahol n a kritériumok száma. Ezután a konzisztencia arány:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (16)$$

ahol RI egy véletlenszerű index. Ha $CR < 0.1$, akkor az összehasonlítások konzisztensnek tekinthetők. [2] Az AHP lépései:

- A döntési probléma hierarchikus felbontása (cél, kritériumok, alternatívák).
- Páros összehasonlítások alapján a preferenciák kifejezése.
- A mátrix következetességének vizsgálata (konzisztencia index).
- A végső prioritási vektorok és a rangsor meghatározása.

3.1.3. Az ELECTRE módszer

Az ELECTRE módszerek célja, hogy részleges preferenciarendezést adjanak, nem pedig teljes rangsort, ezzel modellezve a valóság komplexitását. [43] Az ELECTRE módszer jellemző lépései:

- Kritériumok súlyozása.
- Konkordancia és diszkordancia indexek kiszámítása.
- Dominancia relációk meghatározása.
- A dominancia gráf alapján az alternatívák részleges rangsora.

3.1.4. A VIKOR módszer és a kompromisszumos döntések elmélete

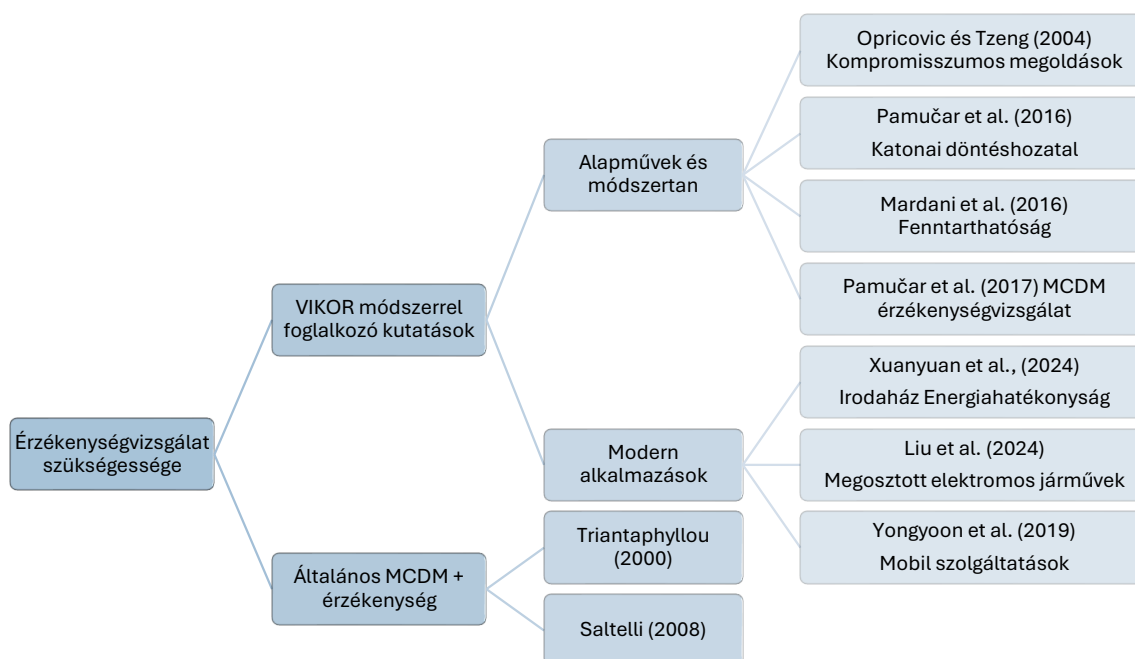
Opricovic és Tzeng [7] által bevezetett VIKOR lépései:

- A legjobb és legrosszabb értékek meghatározása minden kritériumra.
- A kompromisszumos (aggregált) eltérések (S, R) kiszámítása.
- A Q kompromisszumos index meghatározása, amely kombinálja S és R értékeket.
- Alternatívák rangsorolása a Q érték alapján.

A klasszikus VIKOR módszer előnye, hogy kifejezetten a kompromisszumot keresi, nem pedig a legközelebbi megoldást. Azonban, mint a dolgozatomban kifejttem, a klasszikus VIKOR módszer komoly korlátokkal küzd, ha:

- az adatok intervallumokként jelennek meg (nem pontértékek),
- a döntéshozó célértékeket szeretne követni, nem pedig csupán a $max - min$ alapú elérhető legjobbat,
- a rangsorolás során nem biztosított a tranzitivitás.
- Mindezek miatt kiemelném, e dolgozat egyik fő célkitűzése, hogy a VIKOR módszert olyan formában használja, amely képes kezelni a valós döntési helyzetek összetettségét, különös tekintettel a mérnöki konstrukciós tervezésre. [7], [44], [45]

A klasszikus VIKOR módszer érzékenységvizsgálatának szakirodalmi megalapozását mutatja be a 16. ábra.



16. ábra A VIKOR módszer érzékenységvizsgálatának szakirodalmi megalapozása [7] [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53]

3.2. A VIKOR KLASSZIKUS ALGORITMUSA

I. ALAPFOGALMAK

Legyen adva:

n darab alternatíva: $A_1, A_2, \dots, A_n$

m darab kritérium: $C_1, C_2, \dots, C_m$

A döntési mátrix:

$$D = [x_{ij}], \text{ ahol } (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (17)$$

ahol x_{ij} az A_i alternatíva C_j kritérium szerinti értéke. A klasszikus VIKOR algoritmusát mutatja be a 17. ábra

Kritériumok súlyozása

A döntéshozó minden egyes kritériumhoz *súlyt* (w_j) rendel, ahol:

$$\sum_{j=1}^m (w_j) = 1, \quad \text{és } w_j \geq 0 \forall j \quad (18)$$

A súlyok meghatározása történhet szakértői becsléssel vagy egyszerű arányos becsléssel (pl. 1-5 értékű skálán értékelt fontosság alapján).

II. IDEÁLIS ÉS ANTIIDEÁLIS (LEGJOBB ÉS LEGROSSZABB) ÉRTÉKEK

A kritériumok szerint meghatározott legjobb és legrosszabb értékek [27]:

- Legjobb érték:

$$f_j^* = \max_i x_{ij} \quad (19)$$

- Legrosszabb érték:

$$f_j^- = \min_i x_{ij} \quad (20)$$

III. NORMALIZÁLÁS (KLASSZIKUS VIKOR SZERINT)

- Normalizált értékek:

$$N_{ij} = \frac{(f_j^* - x_{ij})}{(f_j^* - f_j^-)} \quad (21)$$

Megjegyzem, hogy ez a képlet csak pontértékű adatokra alkalmazható, intervallumoknál ez a lépés hibás lehet, amint azt a dolgozat 2.3 fejezetében bemutatam.

Kompromisszumos mutatók (S , R , Q)

Összesített eltérés (S_i) aggregált hasznosságmérő:

$$S_i = \sum_{j=1}^m (w_j) \cdot N_{ij} \quad (22)$$

Legrosszabb eltérés (R_i), maximális megbánás mértéke:

$$R_i = \max_j [w_j \cdot N_{ij}] \quad (23)$$

- Kompromisszumos mérőszám (Q_i) [7]:

$$Q_i = v \cdot \frac{(S_i - S^*)}{(S^- - S^*)} + (1 - v) \cdot \frac{(R_i - R^*)}{(R^- - R^*)} \quad (24)$$

ahol: $S^* = \min_i S_i$, $S^- = \max_i S_i$, $R^* = \min_i R_i$, $R^- = \max_i R_i$, v a kompromisszum súlyozó tényező, általában $v = 0.5$.

Fontos, hogy Q_i értéke $[0, 1]$ között kell legyen matematikailag, de a klasszikus módszernél, hibás normalizálás esetén (pl. intervallumoknál), kicsúszhat ebből a tartományból!

IV. DÖNTÉSI SZABÁLY: AZ ELFOGADHATÓ KOMPROMISSZUM FELTÉTELEI

A VIKOR módszer preferenciarendszere alapján az alternatívák rangsorolása a Q majd szükség esetén S és R szerint történik. Ebben az esetben [7] szerint az A' legjobb alternatíva akkor elfogadható kompromisszumos megoldás, ha:

1. Feltétel (előny):

$$Q(A'') - Q(A') \geq DQ \quad (25)$$

ahol A'' a második legjobb alternatíva, és $DQ = \frac{1}{(n-1)}$ az előnyküszöb, ahol n az alternatívák száma.

2. Feltétel (stabilitás):

Az A' legyen első S és R szerint is.

Ha a fenti feltételek nem teljesülnek, kompromisszumos alternatívák csoportját adják vissza.

V. KOMPROMISSZUM ÉRTELMEZÉSE

A VIKOR módszer filozófiája szerint a döntéshozó nem abszolút legjobbat keres, hanem a legjobb kompromisszumot, amely:

- Kisebb összesített eltérést (S) mutat.
- Kisebb legrosszabb eltérést (R) biztosít.
- Kiegyensúlyozza a két szempontot (Q).

Mint azt [8], [11] és [10] is hangsúlyozzák, a kompromisszumos döntések célja elfogadható egyensúly megtalálása az ellentétes kritériumok között.

3.3. A KLASSZIKUS VIKOR PROBLÉMÁI INTERVALLUM ADATOK ESETÉN

Bár a VIKOR módszer rendkívül hatékony kompromisszumos döntésekben, több probléma is fellép, ha:

- az adatok intervallumok, nem pontértékek,
- a döntéshozó célértéket akar megközelíteni, nem feltétlenül a maximális/minimális értéket [54]

Ezekben az esetekben a normál VIKOR normalizálási lépése hibás és a Q index kicsúszhat a $[0,1]$ intervallumból, matematikailag hibás eredményt adva.

4. táblázat A döntéstámogatási folyamat lépései az intervallum alapú célértékes VIKOR döntési modellben

Folyamat/lépés	Művelet / eszköz
Paramétertér	Kritériumok, igények, bemeneti adatok (X, Y)
Tervezési tér	Alternatívák generálása, modellek előállítása
Céltér	végeselemes szimulációk, kulcstényező kiszámítása
Döntési tér	VIKOR módszer alkalmazása
Rangsorolás	Q, R, S számítása, kompromisszumos mutatók
Megoldástér	Legjobb alternatíva kiválasztása

A dolgozat következő fejezeteiben ezért az intervallum alapú célértékes VIKOR módszer alkalmazására teszek javaslatot.

A döntéstámogatási folyamat lépéseit mutatja be az intervallum alapú célértékes VIKOR döntési modellben a 4. táblázat.

3.4. A CÉLÉRTÉKEK SZEREPE A NORMALIZÁLÁSBAN

3.4.1. A klasszikus normalizálás hibái

A klasszikus normalizáció ($\min - \max$) egyik legelterjedtebb formája a következő:

$$N_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-} \quad (26)$$

ahol

f_j^* : a j -edik kritérium maximális (legjobb) értéke a mintában.

f_j^- : a j -edik kritérium minimális (legrosszabb) értéke a mintában.

x_{ij} : az i -edik alternatíva (A_i) értéke a j -edik kritériumra.

A klasszikus és a célérték alapú normalizálás összehasonlítását mutatja be a 5. táblázat, kiemelten a klasszikus módszer hajlamosságát a torzításra, a döntéshozói szándékhoz képest és a minta-alapúság problémájára fókuszáltnan.

3.4.2. A célérték-alapú közelítés elméleti alapjai

a) Célértékek mint a döntéshozói preferenciák explicit kifejezése

A célérték-alapú normalizálás logikája, hogy a döntéshozó nem a minta szélsőértékeit tekinti viszonyítási alapnak, hanem előre meghatározza a számára elfogadható értékeket.

Például:

- Az anyag szakítószilárdsága legalább 600 MPa legyen.
- A költség ne haladja meg a 1000 Ft-ot.

Ezáltal a normalizáció során az eltéréseket a célértékhez mérjük, nem pedig a minta szélső értékeihez.

b) Célérték-alapú normalizáció képlete

A célérték-alapú eltérés számítása:

$$N_{ij}^{cél} = \frac{|x_{ij} - G_j|}{\Delta_j} \quad (27)$$

ahol:

x_{ij} : az i -edik alternatíva (A_i) értéke a j -edik kritériumra,

G_j : a j -edik kritérium célértéke,

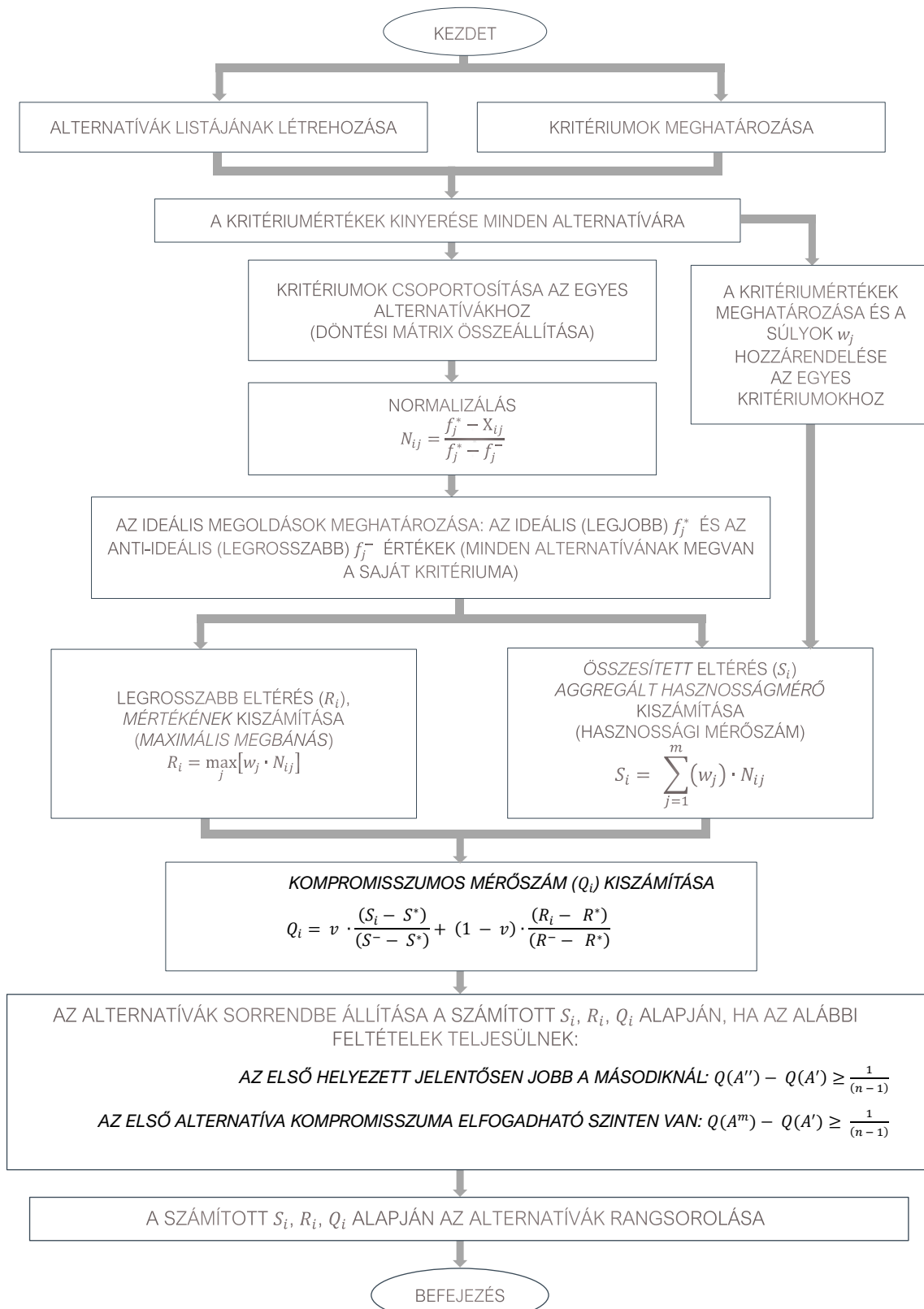
Δ_j : a maximálisan elfogadható eltérés (pl. szakértői tűréshatár). [55] Ez a képlet független a minta összetételétől, és a döntéshozó valós igényeit tükrözi.

c) Célértékek szerepe a kompromisszumos döntésekben

A célértékekhez mért normalizáció lehetővé teszi, hogy a kompromisszumos döntések valóban a döntéshozói igényekhez igazodjanak, és ne a minta torzításait kövessék, továbbá transzparens módon mutassák meg, mely alternatívák közelítik meg legjobban a célokat. (6. táblázat)

ÖSSZEGZÉS

Kimondható, hogy **a célérték-alapú normalizálás bevezetése elengedhetetlen** a modern többkritériumos döntési modellekben, különösen, olyan módszerek kiterjesztése esetén, mint a VIKOR. A jelen dolgozatban alkalmazott módszertan célja ezen elv következetes alkalmazása intervallum-adatok mellett.



17. ábra A klasszikus VIKOR algoritmus folyamatábrája [56]

5. táblázat A célértékek szerepe a normalizálásban

Szempon	Klasszikus normalizálás (min-max)	Célérték-alapú normalizálás
Normalizáció alapja	A minta legjobb (max) és legrosszabb (min) értékei f_j^*, f_j^-	A döntéshozó által megadott célérték (G_j)
Képlet	$N_{ij} = \frac{f_j^* - x_{ij}}{f_j^* - f_j^-}$	$N_{ij}^{cél} = \frac{ x_{ij} - G_j }{\Delta_j}$
Döntéshozói szándék megjelenik?	Nem: a minta szélsőértékei dominálnak	Igen: a célérték explicit módon szerepel
Rugalmasság új alternatívák esetén	Instabil: új érték módosíthatja a normalizálást	Stabil: a célérték fix, a skála nem változik
Minta-alapúság problémája	Jelentős torzítást okozhat	Nem függ a mintától
Kompenzáció lehetősége	Szélsőséges értékek torzíthatják a döntést	Reális kompromisszum a célértékhez képest
Alkalmazhatóság célvezérelt döntésekben	Korlátozott: a legjobbnak hitt opció lehet túl jó vagy irreleváns	Kiemelkedően alkalmas célvezérelt döntésekre

6. táblázat A célérték alapú közelítés előnyei a klasszikus normalizálással szemben

Szempon	Klasszikus (min – max) normalizálás	Célérték-alapú normalizálás
Normalizáció alapja	Minta szélsőértékei	Döntéshozói célértékek
Stabilitás	Minta változásával változik	Stabil, mintafüggetlen
Preferencia	Nem jelenik meg explicit	Közvetlenül figyelembe vett
Kiegyensúlyozottság	Torzítás lehetséges	A célt követi, arányos eltérés

7. táblázat Az új döntéstámogatási módszer fő jellemzői

Elem	Leírás
Cél	Megvalósítható szerkezeti tervezési alternatívák előzetes kiválasztása
Teljesítménykritériumok	Tömeg, szerkezeti integritás stb.
Tervezési fázis	Részletes tervezés előtti szakasz
Módszer	VIKOR + vége-selelemes szimuláció alapú alternatíva szűrés és optimalizáció
Tervezési tér jellemzők	Kényszerekkel szűkített tervezési tér, gyártási és konstrukciós korlátokkal
Optimalizáció	Kompromisszumalapú optimális megoldás keresése többkritériumos döntéshozatali módszerrel

3.5. KUTATÁSI CÉLOK ÉS HIPOTÉZISEK

Összefoglalva az eddigi elemzéseket a következő kutatási kérdéseket és hipotéziseket fogalmazom meg.

KUTATÁSI KÉRDÉSEK

1. A klasszikus VIKOR módszer képes-e megbízhatóan rangsorolni a konstrukciókat akkor is, ha az értékek intervallum jellegűek?
2. Az intervallum-alapú célértékes VIKOR módszer képes-e stabilabb, mérnökiileg relevánsabb döntést nyújtani, mint a hagyományos rangsorolási megközelítések?
3. Alkalmas-e, gépészeti konstrukciók tervezési optimalizálásra a koncepcionális tervezési szakaszban a végelelemes modellezés és a többszemponútú döntésmélet együttes integrálása?
4. Alkalmas-e a gyakorlatban, a gépészeti konstrukciók élettartam növelését célzó alternatívák rangsorolására a többszemponútú döntésmélet, a koncepcionális tervezés szakaszában?
5. Hogyan alkalmazható a gyakorlatban a többszemponútú döntésmélet a döntéshozói preferenciák figyelembevételére?

HIPOTÉZISEK

1. A klasszikus VIKOR módszer korlátozott megbízhatósággal alkalmazható olyan döntési helyzetekben, ahol a bemeneti adatok intervallum-jellegűek vagy nemlineáris viselkedést mutatnak, mivel az ilyen esetekben sérülhet a tranzitivitás és a rangsor stabilitása.
2. A gyakorlatban, a gépészeti konstrukciók tervezési optimalizálásra koncepcionális tervezési szakaszban a végelelemes modellezés és a többszemponútú döntésmélet integrálása alkalmas.
3. Az intervallum-alapú célértékes VIKOR módszer stabilabb és mérnökiileg relevánsabb döntési eredményeket biztosít, mint a hagyományos VIKOR, különösen kompromisszumos helyzetekben.
4. A gyakorlatban, alkalmas a gépészeti konstrukciók élettartamának növelését célzó konstrukciós alternatívák rangsorolására a többkritériumos döntésmélet, a koncepcionális tervezés szakaszában.
5. A gyakorlatban az gépészeti konstrukciók fejlesztésében, alkalmas a többszemponútú döntésmélet a döntéshozói preferenciák figyelembevételére.

4. AZ INTERVALLUM ALAPÚ CÉLÉRTÉKES VIKOR MÓDSZER

4.1. BEVEZETÉS

Az intervallum alapú célértékes VIKOR módszer (18.) egy lehetséges megoldás multiattribútumú döntési problémákra (MADM). Az alábbiakban bemutatom az algoritmust, valamint egy konkrét példát. A vizsgálathoz tartozik egy Excel implementációja a módszernek, melynek adatait a 49. táblázat-58. táblázat mutatja be.

Az alábbi algoritmus és a hozzá tartozó kidolgozott példa mind [57]-ből származik. Az algoritmus tárgyalása a 4.8 fejezetben található, míg a példa az 5.2.2 alfejezet taglalja.

AZ ALAPPROBLÉMA BEMUTATÁSA

A többszemponú döntés során ebben az esetben tegyük fel, hogy valamilyen konstrukció alapanyagát szeretnénk megválasztani. Az anyagokat több jellemző alapján értékeljük. A piacon elérhető anyagokról minden jellemzőre egy intervallumot tudunk adni, mely leírja, hogy az adott anyag adott jellemzője milyen értékek között mozog.

A cél valamilyen szempont alapján kiválasztani a legmegfelelőbb alapanyagot, vagy felállítani egy rangsort az alapanyagok között, hogy melyik mennyire felel meg számunkra.

Jelölje a jellemzők számát n és a szóba jöhető anyagok számát m . Legyen továbbá $[x_{ij}^L, x_{ij}^U]$ az i -edik anyag j -edik jellemzőjére vonatkozó intervallum $i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$.

Ahhoz, hogy dönteni tudjunk, kell egy célérték, hogy milyen lenne számunkra az ideális anyag, jelölje az egyes jellemzőkre adott célértékeket $T_1, T_2, \dots, T_n$, valamint szükségünk van egy súlyozásra is, hogy az egyes jellemzőkben mennyire fontos, hogy közel legyünk a célértékhez, jelölje az egyes jellemzőkhöz tartozó súlyokat $w_1, \dots, w_n$, ahol:

$$w_j \geq 0, j = 1, \dots, n \text{ és } \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (28)$$

Amennyiben egy jellemzőt maximalizálni vagy minimalizálni szeretnénk (pl. a költséget minimalizálni), akkor választhatjuk célértéknek az adott jellemzőre vonatkozó adatok maximumát, illetve minimumát.

A VIKOR algoritmussal meghatározunk minden egyes anyaghoz egy $[Q_{ij}^L, Q_{ij}^U], i = 1, \dots, m$ intervallumot, ami összesítve jelzi, mennyire esik távol a célértéktől az adott anyag. Ezután intervallumok páronkénti összehasonlításával állíthatunk fel rangsort.

4.2. AZ ALGORITMUS LÉPÉSEI

Első lépésben normalizáljuk az adatainkat. Vezessük be az

$$x_j^{L \min} := \min\{x_{ij}^L: i = 1, \dots, m\}, x_j^{U \max} := \max\{x_{ij}^U: i = 1, \dots, m\}, j = 1, \dots, n \quad (29)$$

jelöléseket. Ezek jelzik jellemzőnként az anyagok között elérhető legkisebb és legnagyobb értéket az egyes jellemzőkre. Ezt a T_j célértékekkel kiegészítve fogjuk felhasználni arra, hogy

meghatározzuk az adatok terjedelmét és ennek segítségével normalizáljuk a célértéktől való eltérést. Vezessük be:

$$V_{ij}^L := \frac{|x_{ij}^L - T_j|}{\max\{x_j^{U \max}, T_j\} - \min\{x_j^{L \min}, T_j\}} \in [0,1] \quad (30)$$

$$V_{ij}^U := \frac{|x_{ij}^U - T_j|}{\max\{x_j^{U \max}, T_j\} - \min\{x_j^{L \min}, T_j\}} \in [0,1] \quad (31)$$

$i = 1, \dots, m$ $j = 1, \dots, n$ normalizált mennyiségeket, ahol a két mennyiség abban különbözik, hogy az egyes jellemzőkre a célértéket az intervallum alsó vagy felső végpontjával hasonlítjuk össze. (Azért csináljuk ezt, hogy a nagyobb skálán mozgó jellemzők ne torzítsák túlzottan az eredményeket.)

Ezután minden anyagra kiszámolhatóak a következő mutatószámok:

$$S_i^L := \sum_{j=1}^n w_j \min\{V_{ij}^L, V_{ij}^U\}, \quad S_i^U := \sum_{j=1}^n w_j \max\{V_{ij}^L, V_{ij}^U\}, \quad (32)$$

$$R_i^L := \max\{\min\{V_{ij}^L, V_{ij}^U\} : j = 1, \dots, n\}, \quad R_i^U := \max\{\max\{V_{ij}^L, V_{ij}^U\} : j = 1, \dots, n\} \quad (33)$$

A többségi kritérium normalizált intervallumát (normalized majority criteria) az

$$\left[\frac{S_i^L - S^-}{S^+ - S^-}, \frac{S_i^U - S^-}{S^+ - S^-} \right], \quad S^+ = \max\{S_i^U : i = 1, \dots, m\}, \quad S^- = \min\{S_i^L : i = 1, \dots, m\} \quad (34)$$

intervallum, míg

$$\left[\frac{R_i^L - R^-}{R^+ - R^-}, \frac{R_i^U - R^-}{R^+ - R^-} \right], \quad R^+ = \max\{R_i^U : i = 1, \dots, m\}, \quad R^- = \min\{R_i^L : i = 1, \dots, m\} \quad (35)$$

a normalizált egyéni megbánás intervallumát (normalized individual regret) fejezi ki. A két intervallumot összedolgozhatjuk aszerint, hogy az egyes mutatószámokat mennyire tartjuk fontosnak, legyen $v \in [0,1]$ a többségi kritérium súlya (ahol $v = 0,5$ a kompromisszumos megoldást fejezi ki). Ekkor

$$[Q_i^L, Q_i^U] = \left[v \left(\frac{S_i^L - S^-}{S^+ - S^-} \right) + (1 - v) \left(\frac{R_i^L - R^-}{R^+ - R^-} \right), v \left(\frac{S_i^U - S^-}{S^+ - S^-} \right) + (1 - v) \left(\frac{R_i^U - R^-}{R^+ - R^-} \right) \right] \quad (36)$$

jelzi mennyire esik távol a célértéktől az adott anyag. Ezen intervallumok közül szeretnénk kiválasztani a minimálisat, ehhez szükségünk van egy módszerre, ami alapján két intervallumról eldönthető, hogy melyik a „kisebb”.

4.3. INTERVALLUMOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA ÉS KOMPROMISSZUMOS AGGREGÁCIÓ

Az algoritmus leírása során volt több lehetőségünk az elvárásainkhoz igazítani az algoritmust, megválaszthattuk a célértékeket ($T_1, T_2, \dots, T_n$, az ideális anyag jellemzői), az egyes jellemzők fontosságát ($w_1, \dots, w_n$), valamint a többségi kritérium súlyát (v), ezen

ponton adjuk meg az utolsó szabad paramétert az algoritmusban, az optimizmus $\alpha \in (0,1]$ szintjét. Az optimista döntéshozót a nagyobb α értékek jellemzik, míg racionális döntéshozó esetén $\alpha = 0,5$.

Legyenek $I_A = [a^L, a^U]$ és $I_B = [b^L, b^U]$ olyan intervallumok, amelyekre $a^L < b^L$, ekkor három eset lehetséges:

1. Az I_A és a I_B intervallumoknak nincs közös pontjuk, azaz diszjunktak, azaz $a^U < b^L$, ekkor $I_A < I_B$.
2. Az I_A intervallum tartalmazza az I_B intervallumot, azaz $a^L < b^L < b^U < a^U$, ekkor amennyiben

$$\alpha(b^L - a^L) \geq (1 - \alpha)(a^U - b^U) \quad (37)$$

akkor $I_B < I_A$.

3. Az I_A és a I_B intervallumoknak van közös átfedő része, de egyik sem tartalmazza a másikat, azaz $a^L < b^L < a^U < b^U$, ekkor amennyiben

$$\alpha(b^L - a^L) \geq (1 - \alpha)(b^U - a^U) \quad (38)$$

akkor $I_A < I_B$, ellenkező esetben $I_B < I_A$.

Amennyiben $b^L < a^L$, akkor felcserélve a két intervallumot elvégezhető az ellenőrzés.

Megjegyzem, hogy sajnos ez a reláció nem rendelkezik a rendezésektől elvárt tranzitív tulajdonsággal, így előfordulhat, hogy nincs egyértelmű minimum. Erre mutatok egy példát, tekintsük a következő intervallumokat:

$$I_1 = [0.05, 0.2], \quad I_2 = [0, 0.6], \quad I_3 = [0.1, 0.5], \quad (39)$$

továbbá legyen az optimizmus szintje $\alpha = 0,5$. Ekkor $I_2 = [0, 0.6]$ intervallumot az $I_1 = [0.05, 0.2]$ intervallummal összehasonlítva a 2. esetben vagyunk, és

$$0.5(0.05 - 0) = 0.025 < (1 - 0.5)(0.6 - 0.2) = 0.2 \quad (40)$$

következésképpen $I_1 < I_2$. Ezután az $I_2 = [0, 0.6]$ és $I_3 = [0.1, 0.5]$ intervallumok összehasonlítása következik, ekkor újfent a 2. esetben vagyunk, és

$$0.5(0.1 - 0) = 0.05 \geq (1 - 0.5)(0.6 - 0.5) = 0.05 \quad (41)$$

következésképpen $I_2 < I_3$. Eddig azt mutattuk meg, hogy $I_1 < I_2 < I_3$ ekkor a tranzitivitás azt jelentené, hogy $I_1 < I_3$, azonban az összehasonlítást elvégezve ennek éppen az ellenkezőjét találjuk! Most a 3. esetben vagyunk, $I_1 = [0.05, 0.2]$, $I_3 = [0.1, 0.5]$

$$0.5(0.1 - 0.05) = 0.025 < (1 - 0.5)(0.5 - 0.2) = 0.15 \quad (42)$$

következésképpen $I_3 < I_1$.

4.4. TÉRDPROTÉZIS ANYAGVÁLASZTÁSA

A bevezetőben említett könyv 5.2.2 alfejezetében egy konkrét problémát tárgyal a szerző, nevezetesen a térdprotézisek anyagának megválasztását. Ebben a problémában 10 anyagból kell választani 7 jellemző alapján.

Sajnálatos módon a számítás menetébe több hiba is csúszhatott, például az 5.12 táblázat utolsó 6 oszlopában megjelennek 1-nél nagyobb értékek is (58. táblázat), ami a normalizálás miatt nem történhetne meg. Ez abból adódik, hogy ezeknél a jellemzőknél a szerzők nem veszik bele a terjedelem számításba a célértéket, csak az adatokból dolgoznak.

Az algoritmus leírása és a kiinduló adatok felhasználásával mi is elvégezhetjük az anyagok rangsorolását. Az Excel implementációban található értékek ebből a példából valók. A kapott legjobb alternatíva megegyezik a könyvben találhatóval, azonban a rangsor további részén akadnak eltérések.

A könyv valóban deklarálja a célértékek (target values, T_j) használatát a térdprotézis anyagválasztás példájában. Ezt kifejezetten leírják a 91. oldalon:

„1. lépés: Az összes kritérium legkedvezőbb értékeinek meghatározása ($T_j = 1,3, 1240, 16, 54, 0.96, 0.96, 0.96$).”

Ez tehát azt mutatja, hogy elvileg a normalizálást célérték-alapon akarták végezni.

Ha megnézzük a könyv 96. oldalán a 5.11 és 5.12 táblázatokat, kiderül, hogy a normalizálást nem a célértékek (T_j) alapján végzik el, hanem a mintabeli minimum-maximum értékek alapján.

Ezt bizonyítják a normalizált értékek pl. a sűrűség vagy rugalmassági modulus esetén.

Ez a fajta eltérés módszertani hiba, különösen akkor, ha a cél az volt, hogy a döntéshozói preferenciák (pl. $T_j = 1,3 \text{ g/cm}^3$) érvényesüljenek a döntési folyamatban.

Ez módszertani inkonzisztenciához és potenciálisan Pareto-ineffektív döntésekhez vezet.

Ha a célértékeket (T_j) nem vonjuk be a normalizációba, és a normalizálás csak adott minimum-maximum szerint történik, akkor könnyen előfordulhatnak negatív értékek is, főleg, ha a célérték a szélsőértékek között van.

5. AZ INTERVALLUM ALAPÚ CÉLÉRTÉKES VIKOR MÓDSZER VIZSGÁLATA

5.1. A KLASSZIKUS VIKOR HIBÁI INTERVALLUM-ÉRTÉKEK ESETÉN

A klasszikus VIKOR módszer a kompromisszumos döntések egyik legismertebb eszköze, azonban intervallum-alapú adatok esetén jelentős matematikai és logikai problémákkal szembesül, ezek vizsgálatára és megoldására számos szakirodalmi példát találunk. [58] Ebben a fejezetben részletesen bemutatom és formálisan is igazolom az előző fejezetben általam vizsgált esettanulmányban megjelenő hibák létezését.

5.1.1. Hibás normalizálás esetei

A klasszikus VIKOR módszer egyik alapvető lépése a döntési mátrixban szereplő alternatívák normalizálása a különböző kritériumok szerint. A módszer a klasszikus min-max normalizálást alkalmazza, amelynek célja az eltérő mértékegységű kritériumok összehasonlíthatóságának biztosítása. A normálás klasszikus formája a következő:

$$f_{ij}^L = \frac{x_j^+ - x_{ij}}{x_j^+ - x_j^-}, \text{ ha a kritérium minimalizálandó} \quad (43)$$

$$f_{ij}^U = \frac{x_{ij} - x_j^-}{x_j^+ - x_j^-}, \text{ ha a kritérium maximalizálandó} \quad (44)$$

ahol x_j^+ és x_j^- rendre a j -edik kritériumra vonatkozó minta legjobb és legrosszabb értékei.

Ez a normalizálás pontértékek esetén helyes, és biztosítja, hogy a f_{ij} értékek a $[0,1]$ intervallumba esnek. Intervallum-értékek kezelésekor azonban számos súlyos matematikai és logikai probléma lép fel, amelyeket az alábbi tétellel és bizonyítással mutatok be.

1.Tétel

A klasszikus VIKOR módszer min-max alapú normalizálása intervallum-értékek esetén általában nem biztosítja, hogy a normalizált értékek a $[0,1]$ zárt intervallumba essenek. Továbbá, ha a normalizálás a minta szélsőértékeihez viszonyítva történik, és nem a döntéshozói célértékhez (T_j), akkor a normalizált döntési mátrix torzul, és a kapott kompromisszumos rangsor nem felel meg a döntéshozó valós preferenciáinak.

Bizonyítás:

Legyen $x_{ij} = [x_{ij}^L, x_{ij}^U] \subset \mathbb{R}$ intervallumérték i -edik alternatíva j -edik kritériumára. Továbbá legyen az $x_j^+, x_j^- \in \mathbb{R}$ a minta legjobb és legrosszabb pontértékei a j -edik kritériumban.

A klasszikus normalizálás intervallumokra alkalmazva a következőképpen adódik:

$$f_{ij}^L = \frac{x_j^+ - x_{ij}^L}{x_j^+ - x_j^-}, \quad f_{ij}^U = \frac{x_{ij}^U - x_j^-}{x_j^+ - x_j^-} \quad (45)$$

Vizsgáljuk, hogy teljesül-e: $f_{ij} = [f_{ij}^L, f_{ij}^U] \subseteq [0, 1]$.

ELLENPÉLDA:

Vegyük a következő konkrét értékeket:

$$x_j^+ = 10, \quad x_j^- = 2, \quad x_{ij} = [1, 12] \quad (46)$$

Ekkor:

$$f_{ij}^L = \frac{10 - 1}{10 - 2} = \frac{9}{8} = 1,125 > 1 \quad (47)$$

$$f_{ij}^L = \frac{10 - 12}{10 - 2} = \frac{-2}{8} = -0,25 < 0 \quad (48)$$

Így a normalizált intervallum:

$$f_{ij} = [-0,25, 1,125] \quad (49)$$

látható, hogy:

$$f_{ij} \notin [0, 1] \quad (50)$$

amely ellentmond a normalizálás céljának.

Tehát kimondható, hogy ezért nem igaz, hogy a klasszikus VIKOR min-max alapú normalizálása intervallum-értékek esetén garantálná a $[0,1]$ intervallumba esést.

A hibás normalizálás következménye, hogy a VIKOR módszer által meghatározott kompromisszumos rangsor nem felel meg a Pareto-hatékonyság követelményének. Ezt a problémát és annak formális bizonyítását a következő. alfejezet részletezi.

5.1.2. Pareto-hatékonyság sérülése

A VIKOR módszer egyik központi elve, hogy az általa generált kompromisszumos megoldás Pareto-hatékonyság, azaz olyan alternatívát választ, amely mellett nem létezik más alternatíva, amely minden szempontból jobb, legalább egy szempontban pedig szigorúan jobb. Pareto-hatékonyság megoldásról tehát akkor beszélhetünk, ha nincs más alternatíva, amely dominálja a kiválasztottat.

A klasszikus VIKOR módszer azonban intervallum-adatok esetén nem képes garantálni a Pareto-hatékonyságot, mivel a hibás normalizálás miatt a döntési mátrix torzul, a kompromisszumos aggregáció (S, R, Q) intervalluma pedig nem értelmezhető egyértelmű dominancia viszony szerint. Ennek oka részben az, hogy az intervallumok átfedése miatt a rangsorok nem egyértelműen meghatározhatók, részben pedig az, hogy a normalizált értékek nem maradnak a $[0,1]$ intervallumban, így a VIKOR kompromisszum logikája sérül.

$$f_{ij} = [-0,25, 1,125] \quad (51)$$

VI. DEFINÍCIÓ (PARETO-HATÉKONYSÁG)

- Kritériumok: $C_1, C_2, \dots, C_m$ melyek mentén értékelünk.
- Súlyok: $w_j \geq 0$ ($j = 1, \dots, m$), a kritériumok fontosságát jelző súlytényezők, ahol $\sum_{j=1}^m w_j = 1$
- n darab alternatíva: $A_1, A_2, \dots, A_n$,
- m darab kritérium: $C_1, C_2, \dots, C_m$.
- Célértékek: T_j minden kritériumra: $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$

Legyen $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ az alternatívák halmaza, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ a kritériumok halmaza. Egy $A_i \in A$ alternatíva Pareto-hatékony, ha nem létezik olyan $A_k \in A$ amelyre teljesül, hogy minden kritériumban legalább olyan jó, és legalább egy kritériumban szigorúan jobb:

$$A_j \in \{1, \dots, n\}, x_{kj} \leq x_{ij} \text{ és } \exists j \in \{1, \dots, m\}: x_{kj} < x_{ij} \quad (52)$$

maximalizálás esetén (minimalizálásnál fordítva).

TÉTEL (PARETO-HATÉKONYSÁG SÉRÜLÉSE A KLASSZIKUS VIKOR MÓDSZERBEN INTERVALLUM-ADATOK ESETÉN)

Ha az alternatívák kritériumértékei intervallumok $x_{ij} = [x_{ij}^L, x_{ij}^U]$ és az értékelést a klasszikus VIKOR módszer min-max alapú normalizálása szerint végezzük el, akkor a kiválasztott kompromisszumos megoldás általában nem lesz Pareto-hatékony.

BIZONYÍTÁS:

- 1. lépés: Pareto-hatékonyosság feltétele intervallum-értékekre

Intervallumok esetén A_i alternatíva Pareto-dominálja A_k -t, ha minden kritériumban legalább olyan jó, és legalább egyben szigorúan jobb, azaz:

$$x_{ij} = x_{ij}^L > x_{kj}^U \quad \forall j \quad (53)$$

és

$$\exists j: x_{ij}^L > x_{kj}^U \quad (54)$$

(mert ekkor biztosan jobb minden kritériumban).

- 2. lépés: VIKOR aggregáció torzulása hibás normalizálás miatt $f_{ij} = [f_{ij}^L, f_{ij}^U]$ normalizált érték kiléphet a $[0,1]$ tartományból, azaz:

$$\exists j: f_{ij}^L < 0 \text{ vagy } f_{ij}^U > 1 \quad (55)$$

Így az aggregáció során kapott kompromisszumos mutatók:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j f_{ij}, \quad R_i = \max_j (w_j f_{ij}) \quad (56)$$

szintén nem korlátosak $[0,1]$ között, ezért értelmezhetlenné válik az összehasonlítás.

- 3. lépés: Pareto-hatékonyosság sérülése

Mivel az S_i, R_i, Q_i mutatók számítása hibás alapra épül, a VIKOR által választott A^* alternatíva olyan alternatíva is lehet, amelyet egy másik alternatíva dominál.

Ez ellentmond a Pareto-hatékonyság elvének.

- 4. lépés: Példával igazolva:

Vegyünk az alábbi két alternatívát két kritérium esetén:

$$A_1 = ([3,7], [4,8]), \quad A_2 = ([5,6], [6,9]) \quad (57)$$

Itt:

$$x_{21}^L = 5 > 3 = x_{11}^L, \quad x_{21}^U = 6 < 7 = x_{11}^U \quad (58)$$

$$x_{22}^L = 6 > 4 = x_{12}^L, \quad x_{22}^U = 9 > 8 = x_{12}^U \quad (59)$$

Az intervallumok átfednek, de ha a normalizálás hibás, és az A_1 -et választjuk, miközben A_2 sok szempontból jobb, a Pareto-elv sérül.

KÖVETKEZMÉNY

A hibás normalizálás és aggregáció miatt a klasszikus VIKOR módszer intervallum-alapú problémák esetén nem biztosítja a Pareto-hatékonyságot. Ez komoly elméleti probléma, mivel a kompromisszumos döntés értelmét veszti, ha egyértelműen dominált alternatívát is választhat a módszer.

A klasszikus VIKOR módszer intervallum-értékek esetén nem biztosít Pareto-hatékonny megoldást, mivel a hibás min-max normalizálás torz döntési mátrixhoz vezet, amelynek eredményeképpen a VIKOR aggregációs mutatói (S, R, Q) nem tükrözik a valós dominancia-viszonyokat, és a kompromisszumos rangsorban dominált alternatívák is előfordulhatnak. A Pareto-hatékonyság sérülését konkrét példával is demonstráljuk a következő alfejezetben, amelyben a [57] található eset tanulmányozása és hibáinak részletes elemzése következik.

5.1.3. Hibaanalízis

A VIKOR módszer alapját képező könyvben [57] szereplő példák között található egy klasszikus többkritériumos döntési probléma, amelyben különböző alternatívák összehasonlítása történik számított S, R, Q mutatók alapján. E példák azonban pontértékekkel dolgoznak és nem kezelik a valós döntési helyzetekben előforduló intervallum-alapú adatok problémáját. Az általunk elemzett, 5.12-es táblázat alapján, amikor a döntési mátrixban intervallum-értékeket használunk, a klasszikus min-max alapú normalizálás során több szempontból is súlyos hibák lépnek fel. A térdprotézis anyagválasztási példáján keresztül (5.12. táblázat), amelyben különböző anyagok összehasonlítása történik több kritérium szerint, jól szemléltethető a klasszikus VIKOR módszer hibája, amikor intervallum-alapú adatokkal dolgozunk. A példa célja, hogy számszerűen is igazoljuk:

- a hibás normalizálás következményeit,
- a Pareto-hatékonyság megsértését,
- és az érvénytelen aggregációs mutatók (S, R, Q) kialakulását.

(1) A szakirodalmi [57] táblázat kivonata a 8. táblázat, kivonatos alapadataival.

(2) Hibás normalizálás következménye (1-nél nagyobb, negatív értékek)

A klasszikus min-max normalizálás alkalmazásakor, mivel a szélsőértékek (min-max) nem feltétlenül fedik le az összes intervallumhatárt, a következő problémák jelennek meg:

- 1-nél nagyobb érték: pl.

$$1. \frac{x_j^+ - x_{ij}^L}{x_j^+ - x_j^-}, > \text{ha } x_{ij}^L < x_j^- \quad (60)$$

- Negatív érték: pl.

$$2. \frac{x_j^+ - x_{ij}^U}{x_j^+ - x_j^-}, < \text{ha } x_{ij}^U > x_j^+ \quad (61)$$

Konkrét példában:

- ha $x_j^+ = 520, x_j^- = 150$ és $x_{ij} = [500, 520]$

$$3. \frac{520 - 600}{520 - 150} = \frac{-80}{370} \approx -0.126 \quad (62)$$

Az eredmény negatív érték, ami matematikailag értelmezhetetlen a VIKOR-ban. Tehát intervallumok esetén a normalizálás torzul, az eredmény kilép a $[0,1]$ tartományból.

(3) Pareto-hatékonyság sérülése a szakirodalom [57] adatai alapján

Vizsgáljuk meg két anyag összehasonlítását (pl. M1 és M2). Az intervallum átfedések miatt a VIKOR nem tud egyértelműen dönteni a kompromisszumos rangsorban, viszont hibás normalizálás miatt az M2 akár hátrébb sorolódhat, noha bizonyos kritériumokban jelentősen jobb.

8. táblázat A forrás alapadatai (kivonat) [57]

Anyagok	Kritérium 1 (pl. Sűrűség)	Kritérium 2 (pl. Szilárdság)	Kritérium 3 (pl. Modul)
M1	[7.8, 8.0]	[500, 520]	[180, 200]
M2	[4.5, 4.8]	[300, 330]	[120, 150]
M3	[2.2, 2.4]	[150, 180]	[60, 80]

9. táblázat Az M1 és M2 anyag összehasonlítása [57]

Kritérium	M1	M2
Sűrűség	[7.8, 8.0]	[4.5, 4.8]
Szilárdság	[500, 520]	[300, 330]
Modul	[180, 200]	[120, 150]

Ennek következményeként a VIKOR megsérti a Pareto-elvet, mert egyértelműen jobb alternatívát hátra sorolhat.

(4) A szakirodalom [57] szerinti végső rangsor hibái

A 5.12. táblázatban szereplő anyagok rangsorát mutatja be 8. táblázat.

10. táblázat A forrás [57] 5.12 táblázatban szereplő anyagok rangsora

Anyag	Q (VIKOR klasszikus)
M1	0,32
M2	0,55
M3	0,81

Azonban intervallumokkal számolva:

- M1: [0,22; 0,45]
- M2: [0,35; 0,60]
- M3: [0,70; 0,95]

Ez átfedéshez vezet mivel M1 és M2 között nincs egyértelmű különbség, tehát a rangsor hibás lehet.

Összefoglalásként elmondható, hogy a klasszikus VIKOR módszer forrásában [57] közölt példái (pl. 5.12. táblázat) intervallum-értékek alkalmazásakor hibás rangsorra vezetnek, mivel a klasszikus min-max normalizálás negatív vagy 1-nél nagyobb értékeket adhat, amely

torzítja az aggregációs mutatókat (S, R, Q) , és így a végső döntési sorrendet. Ennek következményeként a módszer nem garantál Pareto-hatékony megoldást valós adatok esetén. Ezen problémák kezelése céljából a következő alfejezet bemutatja a célérték-alapú normalizálás matematikai helyességét és előnyeit, amelyek képesek kiküszöbölni a bemutatott hibákat.

5.2. A CÉLÉRTÉK-ALAPÚ NORMALIZÁLÁS MATEMATIKAI HELYESSÉGE

Az előző alfejezetekben bemutattuk, hogy a klasszikus VIKOR módszer min-max alapú normalizálása intervallum-alapú adatok esetén súlyos hibákhoz vezet, mivel a normalizált értékek kiléphetnek a $[0,1]$ tartományból, ezáltal érvénytelen aggregációs mutatókat és nem Pareto-hatékony rangsort eredményezve.

A következőkben egy matematikailag helyes és döntéstudományi szempontból is indokolt normalizálási eljárást mutatunk be, amely figyelembe veszi a döntéshozói célértékeket (T_j) , és biztosítja, hogy az így kapott normalizált értékek a $[0,1]$ intervallumba essenek.

BIZONYÍTÁS

I. DEFINÍCIÓ (CÉLÉRTÉK-ALAPÚ NORMALIZÁLÁS)

Legyen az $x_{ij} = [x_{ij}^L, x_{ij}^U]$ az i -edik alternatíva j -edik kritériumra vonatkozó intervallumértéke, ahol $x_{ij}^L, x_{ij}^U \in \mathbb{R}$, $x_{ij}^L \leq x_{ij}^U$.

$$\Delta_j = \max_i \left(\max(|x_{ij}^L - T_j|, |x_{ij}^U - T_j|) \right) \quad (63)$$

Az intervallum-alapú célérték-normalizálás definíciója szerint a normalizált érték intervalluma:

$$N_{ij} = \frac{|x_{ij}^L - T_j|}{\Delta_j}, \frac{|x_{ij}^U - T_j|}{\Delta_j} \quad (64)$$

II. TÉTEL (NORMALIZÁLT ÉRTÉKEK TARTOMÁNYA)

Az N_{ij} normalizált értékek minden i, j esetén teljes egészében a $[0,1]$ zárt intervallumba esnek, azaz:

$$\forall_{i,j}: N_{ij} \subseteq [0,1] \quad (65)$$

Bizonyítás:

Mivel:

$$\Delta_j = \max_i \left(\max(|x_{ij}^L - T_j|, |x_{ij}^U - T_j|) \right) \quad (66)$$

a Δ_j minden x_{ij} esetében a legnagyobb abszolút eltérés a célértéktől a teljes mintában.

Ezért:

$$\frac{|x_{ij}^L - T_j|}{\Delta_j} \leq 1, \quad \frac{|x_{ij}^U - T_j|}{\Delta_j} \leq 1 \quad (67)$$

Mivel a számláló és nevező nemnegatív, az alábbi reláció is teljesül:

$$0 \leq \frac{|x_{ij}^L - T_j|}{\Delta_j}, \frac{|x_{ij}^U - T_j|}{\Delta_j} \leq 1 \quad (68)$$

Tehát:

$$N_{ij} = \left[\frac{|x_{ij}^L - T_j|}{\Delta_j}, \frac{|x_{ij}^U - T_j|}{\Delta_j} \right] \subseteq [0,1] \quad (69)$$

Következmény:

Ezáltal garantált, hogy a normalizált értékek nem lépik túl a $[0,1]$ intervallum határait, és értelmezhetők a VIKOR módszer további lépéseiben (S, R, Q aggregációk).

Ezzel kiküszöböljük a klasszikus VIKOR módszer hibáit (negatív érték, 1-nél nagyobb érték), és biztosítjuk a korrekt kompromisszumos döntést.

$$\forall_{i,j}: = N_{ij} \max_i \left(\max(|x_{ij}^L - T_j|, |x_{ij}^U - T_j|) \right) \quad (70)$$

A CÉLÉRTÉK-ALAPÚ NORMALIZÁLÁS ELŐNYEI

A célérték-alapú normalizálás nem csupán matematikailag helyes, hanem döntéstudományi szempontból is indokolt, mivel:

- a döntéshozó céljaihoz igazítja az alternatívák értékelését, és nem a minta szélsőértékeihez,
- képes kezelni a valóságban előforduló intervallumokat, amelyek például:
 - ⊙ anyagminőségek eltérő gyártási tűréseiből,
 - ⊙ biológiai rendszerek természetes szórásából,
 - ⊙ bizonytalan mérési adatokból fakadnak,
- nem torzítja a döntési mátrixot a szélsőértékek miatt,
- transzparens és stabil: a döntési mátrix változása (például új alternatíva) nem befolyásolja a már meglévő alternatívák normalizált értékét, ha a célérték változatlan. Ez stabilitást ad a döntéshez, közvetlenül kapcsolódik a döntéshozói elvárásokhoz, így a döntés érthetőbb és elfogadhatóbb a döntéshozó számára.

A $[0,1]$ intervallumba eső értékek biztosítása után a következő probléma az intervallumok összehasonlítása lesz. A következő alfejezet ennek matematikai nehézségeit (pl. tranzitivitás sérülése) és javasolt megoldásait fogja részletezni.

Az intervallum-alapú, célértékes normalizálás biztosítja, hogy a normalizált értékek a $[0,1]$ intervallumba esnek, és ezáltal matematikailag helyes és döntéstudományilag megalapozott kiindulópontot biztosít a kompromisszumos döntések meghozatalához, kiküszöbölve a klasszikus VIKOR módszer min-max alapú normalizálásának hibáit.

5.3. INTERVALLUMOK ÖSSZEHAISONLÍTÁSA: AZ α -ALAPÚ RENDEZÉS PROBLÉMÁI

Az intervallum-alapú VIKOR módszer során minden alternatíva egyesített értékelése (S , R , Q mutatók) intervallumként jelenik meg, azaz:

$$S_i = [S_i^L, S_i^U], \quad R_i = [R_i^L, R_i^U], \quad Q_i = [Q_i^L, Q_i^U] \quad (71)$$

Ezen intervallumértékek összehasonlítása nem triviális, különösen akkor, ha átfedés van az intervallumok között.

Az α -alapú összehasonlítás egy klasszikus módszer intervallumok rangsorolására, de ennek alkalmazása során több problémát is azonosíthatunk.

5.3.1. A tranzitivitás hiányának bizonyítása

III. (1) AZ α -ALAPÚ ÖSSZEHAISONLÍTÁS DEFINÍCIÓJA

Az α -alapú összehasonlítás egy $[0,1]$ paraméterrel súlyozza az intervallum alsó és felső határát:

$$V_i(\alpha) = [\alpha \cdot S_i^L + (1 - \alpha) \cdot S_i^U] \quad (72)$$

Az intervallumok összehasonlítása ekkor:

$$S_i < S_j \Leftrightarrow V_i(\alpha) < V_j(\alpha) \quad (73)$$

Az α paraméter kiválasztása (pl. $\alpha = 0,5$) döntéshozói attitűdöt tükröz (optimista ill. pesszimista).

IV. (2) TRANZITIVITÁS PROBLÉMÁJA

Az intervallumok α -alapú összehasonlítása nem tranzitív minden esetben.

Formális definíció szerint az összehasonlítás tranzitív, ha:

$$A > B \wedge B > C \Rightarrow A > C \quad (74)$$

Az α -alapú összehasonlítás sértheti ezt a feltételt.

V. (3) PÉLDA A TRANZITIVITÁS HIÁNYÁRA

Tekintsük a következő intervallumokat:

$$I_1 = [1, 3], \quad I_2 = [2, 4], \quad I_3 = [3, 5], \quad (75)$$

Az α -alapú értékek ($\alpha = 0,5$ esetén):

$$V_1(0,5) = 0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 3 = 2$$

$$V_2(0,5) = 0,5 \cdot 2 + 0,5 \cdot 4 = 3$$

$$V_3(0,5) = 0,5 \cdot 3 + 0,5 \cdot 5 = 4$$

Így:

$$I_1 < I_2, \quad I_2 < I_3 \quad (76)$$

De ha α változik (pl. $\alpha = 0,9$):

$$V_1(0,9) = 0,9 \cdot 1 + 0,1 \cdot 3 = 1,2$$

$$V_2(0,9) = 0,9 \cdot 2 + 0,1 \cdot 4 = 2,2$$

$$V_3(0,9) = 0,9 \cdot 3 + 0,1 \cdot 5 = 3,2$$

Viszont, ha más intervallumokkal kombináljuk, a relációk változhatnak, és nem garantált, hogy a sorrendek stabilak.

Tehát ez sérti a tranzitivitást, azaz a végső rangsor ellentmondásos lehet, ha az α paraméter nincs rögzítve vagy nem megfelelő.

VI. (4) KÖVETKEZMÉNY A VIKOR MÓDSZERRE

A VIKOR kompromisszumos logikája azt kívánja, hogy egyértelmű, stabil rangsort állítsunk fel. Ha az összehasonlítás nem tranzitív, a kompromisszumos döntés alapelve sérül, mert előfordulhat:

- alternatívák körkörös dominanciája ($A > B > C > A$),
- döntéshozói zavar, inkonzisztens döntés,
- nem létezik stabil kompromisszum, aminek következményeképpen a módszer célja meghiúsul.

5.3.2. Megoldási javaslatok

VII. (1) LEXIKOGRAFIKUS ÖSSZEHASONLÍTÁS

Ha két intervallum átfed, vagy α -alapú összehasonlítás nem ad egyértelmű sorrendet, alkalmazzuk a lexikografikus szabályt:

- Először: alsó határ (optimista nézőpont),
- Másodszor: felső határ (pesszimista nézőpont):

$$I_i < I_j \text{ ha } \begin{cases} S_i^L < S_j^L, \\ S_i^L = S_j^L \text{ és } S_i^U < S_j^U \end{cases} \quad (77)$$

Tehát tranzitív, egyértelmű rangsort ad.

VIII. (2) FUZZY LOGIKA ALKALMAZÁSA

Az intervallumok közötti átfedések esetén fuzzy relációk vezethetők be [59], pl.:

- mennyire „jobbna” tekinthető az egyik intervallum a másikhoz képest,
- fuzzy dominancia: nem 0-1 reláció, hanem fokozatos (pl. 0.7 „jobb”).

Példa fuzzy szabályra:

$$\mu_{I_i > I_j} = \max \left(\frac{S_j^L - S_i^U}{S_j^L - S_j^U} \right) \quad (78)$$

Tehát rugalmasságot ad az összehasonlításnak, ha átfedések vannak.

KÖVETKEZTETÉS

Az α -alapú intervallum összehasonlítás a VIKOR módszerben nem biztosítja a tranzitivitást, ezért a kompromisszumos döntés logikája sérülhet. A lexikografikus vagy fuzzy alapú intervallum összehasonlítás alkalmasabb a stabil, Pareto-hatékony kompromisszumos döntések meghozatalára

Az intervallumok stabil és korrekt összehasonlítása alapján definiálom a kompromisszumos döntési szabályt intervallumokra a következő alfejezetben, amely biztosítja a matematikailag korrekt, Pareto-hatékony döntést.

5.4. A KOMPROMISSZUMOS DÖNTÉS DEFINÍCIÓJA INTERVALLUMOKRA

Az előző alfejezetekben bemutattam, hogy a klasszikus VIKOR módszer, amely pontértékekkel dolgozik, intervallum-alapú adatok esetén matematikailag és logikailag hibás eredményekhez vezet.

E hibák kiküszöbölésére javaslom a célérték-alapú normalizálással számoló, intervallum-alapú VIKOR módszert (17. ábra), amelyhez kompromisszumos döntési szabály szükséges.

Az alábbiakban definiálom az intervallum-alapú kompromisszumos döntést és az ennek megfelelő S, R, Q mutatókat, valamint a döntési szabályt.

5.4.1. A kompromisszumos aggregáció intervallum-alapú S, R, Q mutatókkal

IX. DEFINÍCIÓ (INTERVALLUM-ALAPÚ S, R MUTATÓK)

Legyen adott:

- az i -edik alternatíva j -edik kritériumra vonatkozó normalizált intervallumértéke:

$$N_{ij} = [N_{ij}^L, N_{ij}^U] \subseteq [0, 1] \quad (79)$$
- j -edik kritérium súlya: w_j ahol $\sum_j w_j = 1, w_j \geq 0$.

Az intervallum-alapú aggregált eltérés (S és R) definíciója:

$$S_i = \left[\sum_{j=1}^n w_j N_{ij}^L, \sum_{j=1}^n w_j N_{ij}^U \right] \quad (80)$$

$$R_i = \left[\min_j (w_j N_{ij}^L), \max_j (w_j N_{ij}^U) \right] \quad (81)$$

Értelmezés:

S_i : az összesített eltérés a célértékektől: összesített kompromisszum.

R_i : a legnagyobb eltérés egyetlen kritériumon: legrosszabb kompromisszum.

X. DEFINÍCIÓ (INTERVALLUM-ALAPÚ Q KOMPROMISSZUM MUTATÓ)

A Q kompromisszumos mutató intervallumként:

$$Q_i = [Q_i^L, Q_i^U] \quad (82)$$

ahol:

$$Q_i^L = v \cdot \frac{(S_i^L - S^-)}{(S^+ - S^-)} + (1 - v) \cdot \frac{(R_i^L - R^-)}{(R^+ - R^-)} \quad (83)$$

$$Q_i^U = v \cdot \frac{(S_i^U - S^-)}{(S^+ - S^-)} + (1 - v) \cdot \frac{(R_i^U - R^-)}{(R^+ - R^-)} \quad (84)$$

ahol $v \in [0, 1]$ a kompromisszumos súly (általában $v = 0.5$), $S^+ = \min_i S_i^L$, $S^- = \max_i S_i^U$ és $R^+ = \min_i R_i^L$, $R^- = \max_i R_i^U$.

5.4.2. Döntési szabály intervallumok alapján

Az így kapott Q intervallumok összehasonlítására javasolt:

1 Lexikografikus sorrend:

$$\text{Ha } Q_i^L < Q_j^L, \text{ akkor } A_i > A_j \quad (85)$$

$$\text{Ha } Q_i^L = Q_j^L \text{ és } Q_i^U < Q_j^U \text{ akkor } A_i > A_j \quad (86)$$

2 Átfedés esetén (ha $Q_i^L < Q_j^L$ de $Q_i^U > Q_j^U$: döntéshozói preferencia.

5.4.3. Elméleti előnyök és a bizonyítási lépések összefoglalása

XI. TÉTEL (PARETO-HATÉKONYSÁG BIZTOSÍTÁSA INTERVALLUM-ALAPÚ KOMPROMISSZUMOS DÖNTÉS ESETÉN)

Az intervallum-alapú, célérték-alapú VIKOR módszer kompromisszumos aggregációja a fenti definíciók szerint biztosítja, hogy:

- A választott alternatíva Pareto-hatékony az intervallumok figyelembevételével.
- A döntés figyelembe veszi a kritériumok közötti kompromisszumokat.
- A normalizálás és aggregáció során nem sérül a $[0,1]$ skála.
- Az alternatívák közötti összehasonlítás stabil és tranzitív.

Bizonyítások összegzése:

(1.) Normalizálás helyessége: $[0,1]$ -be eső értékek.

(2.) Aggregáció:

- Súlyozott összeg és minimum-maximum stabilitása intervallumokkal.
- Intervallum algebra szerint a műveletek stabilak.

(3.) Q intervallum:

- Alsó-felső határok közötti korrekt kompromisszum.

(4.) Döntési szabály:

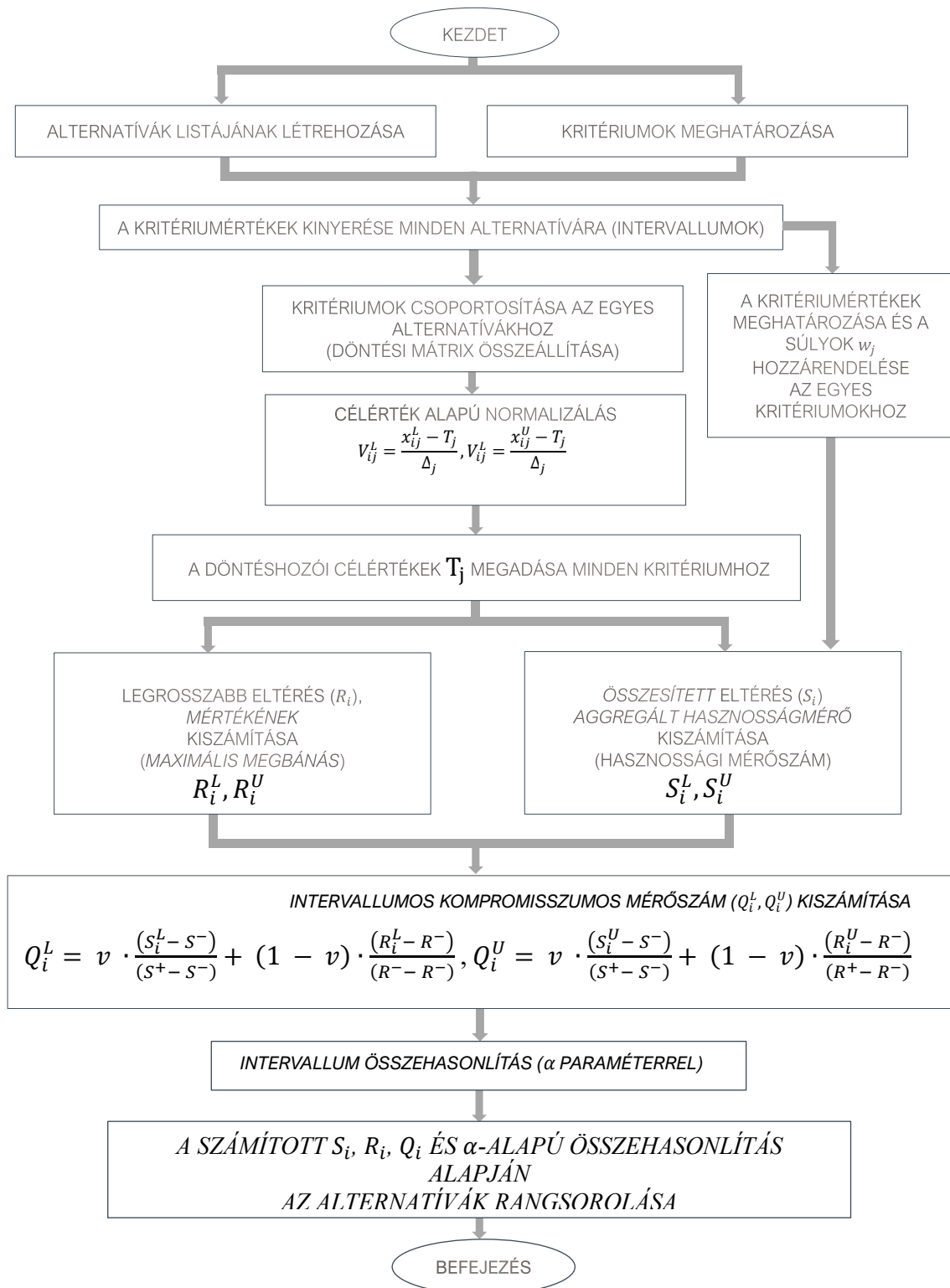
- Lexikografikus összehasonlítás: tranzitív, stabil.

(5.) Pareto-hatékonyság:

- Ha egy alternatíva jobb minden kritériumban, akkor az S , R , Q intervallumok is alacsonyabbak, így a döntési szabály automatikusan választja (dominanciát követi).

KÖVETKEZTETÉS

Az intervallum-alapú, célérték-alapú VIKOR módszer által definiált kompromisszumos döntés stabil, Pareto-hatékony, és figyelembe veszi a valós adatokból származó intervallum jellegű bizonytalanságot. A lexikografikus összehasonlításon alapuló döntési szabály biztosítja az alternatívák tranzitív és egyértelmű rangsorát.



18. ábra Az intervallum alapú célértékes VIKOR algoritmus folyamatábrája

6. ORVOSI IMPLANTÁTUMOK FEJLESZTÉSE TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSTÁMOGATÁSSAL

6.1. BEVEZETÉS

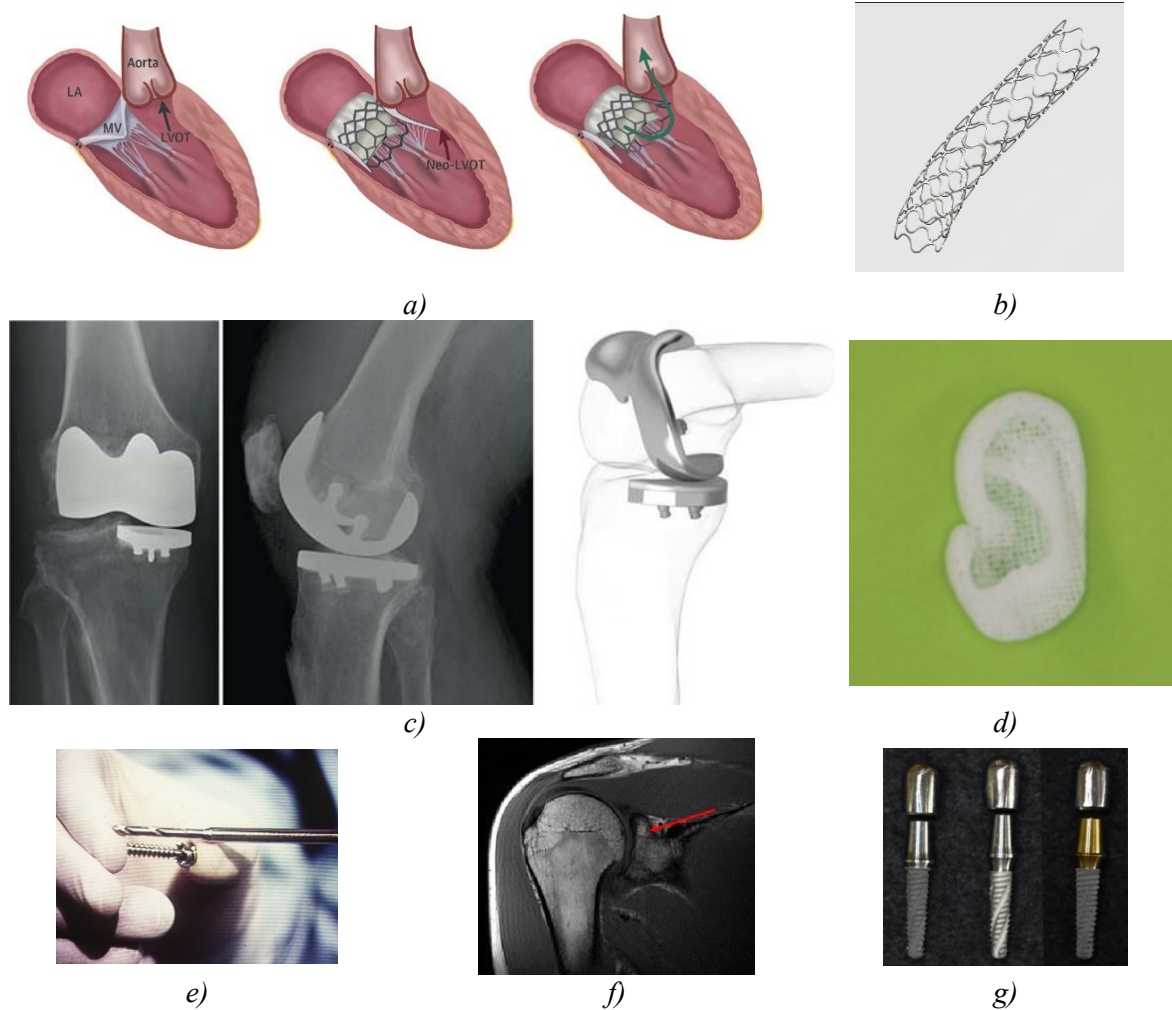
Az orvosbiológiai implantátumok, helyettesítik a beteg ill. sérült szervezeti rendszereket, hogy fájdalommentes életet biztosítsanak a betegeknek ezért fejlesztésük napjainkban is a kutatások fókuszpontjában vannak. *Továbbá az implantátumok esetében az egyre inkább idősödő lakosság ellátási igényei is folyamatosan növelik az új és továbbfejlesztett termékek gazdaságosan és nagy mennyiségben történő létrehozásával kapcsolatos elvárásokat.* Ezen implantátumokat az emberi test különböző részein használják, mint például mesterséges billentyűk a szívben [60] [61], stentek az erekben [62] [63], implantátumok a térdben [64], fülben [4], vállban [65] [3], csípőben [66] [67] [68], könyökben [69], térdben [70] és szájban. [71] Az implantátumok egyes típusait mutatja be a 19. ábra.

A szakirodalom vizsgálata alapján megállapíthatjuk, hogy a implantátumok anyagválasztása [72] [73] és geometriai kialakítása, a kutatások alapján nagyban befolyásolja a betegek életminőségét és az implantátum sikerességét, ahogy [69] is megállapítja, például az implantátum nagyobb csavarátmérője vagy az alátétek használata, növeli annak, a *beteg panaszok miatti eltávolításának kockázatát.* A gyorsprototípus gyártás egy ilyen megoldás lehet a jövőben, amint [4] is hangsúlyozza, továbbá a végeselemes szimulációs vizsgálatok használata is, ahogyan azt [50] mutatja be, ahol végeselemes szimulációval kimutatták, hogy a térdimplantátum méretének növelésével csökken a kontakt nyomás, a nagyobb felületen eloszló terhelés következtében.

Ennek eredményeként az orvosbiológiai implantátumok fejlesztését komplex tervezési problémamegoldó tevékenységnek tekinthetjük, ahol a megfelelő anyagok (és anyagkombinációk) kiválasztása többszörösen jelent egyedi kihívást.

A fejezet célja, hogy:

- (1.) *Bemutassa az implantátum-tervezés adatainak feldolgozását és intervallum-alapú előkészítését.*
- (2.) *Ismertesse a klasszikus VIKOR módszerrel végzett számításokat és azok korlátait, különös tekintettel a hibás normalizálásra és a Pareto-hatékonyság sérülésére.*
- (3.) *Bemutassa az intervallum-alapú, célértékes VIKOR módszer alkalmazását szakirodalmi példán, részletes számításokkal alátámasztva.*
- (4.) *Összehasonlítsa a klasszikus és az intervallum-alapú, célértékes VIKOR módszer által kapott rangsorokat, a saját eredményekkel és elemezze a különbségeket.*
- (5.) *Bemutassa a kompromisszumos döntések stabilitását és érzékenységét az intervallum-adatok tükrében*



19. ábra a) aortabillentyű beépítése, szív kamra kiáramlási pályájának (zöld nyíl) biztosítására [61], b) betegspecifikus érrendszeri gyűrűstent [63], c) térdprotézis műtét utáni és 3D sematikus ábrái [64], d) betegspecifikus 3D nyomtatott PCL implantátum intraoperatív képe [4], e) váll rögzítéséhez használt kanülált csavar és alátét [65], f) varrathorgonnyal vállcsonthoz rögzített lágyzóvet [3], g) fogászati implantátumok, felépítmények és kobalt-króm sapkák [71]

6.2. A TÉRDPROTÉZIS ANYAGVÁLASZTÁSÁNAK TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSTÁMOGATÁSA

6.3. A KUTATÁS MÓDSZERTANA

Az anyagválasztási alternatívák jellemzőinek feldolgozásával, Excel implementációban rangsoroltam az anyagokat az intervallum alapú célértékes VIKOR döntéstámogató módszer matematikai modelljét felhasználva. Az esettanulmányban használt adatokat a 49. táblázat-55. táblázat mutatja be. A VIKOR algoritmus segítségével a kiválasztott anyag alternatívákra meghatároztam azt az intervallumot, ami összesítve jelzi, hogy az anyag mennyire esik távol az adott célértékektől, majd az intervallumokat páronként összehasonlítottam.

Ebben az esetfüggő konkrét döntési szituációban a véges számú szempontok, (továbbiakban jellemzők), az anyagtulajdonságok voltak, mivel kellőképpen tükrözik számunkra a használati megbízhatóságot és ezzel együtt, az implantátumnak a biztosított élettartamát is.

6.3.1. Az implantátumok rangsorolásának lépései

1. Normalizálás a célértékhez képest

Mivel sűrűség és a rugalmassági modulus típusú jellemzőknél minimális érték a jó (kisebb annál jobb), míg a többinél (szakítószilárdság, megnyúlás, Korrózióállóság, kopásállóság, osseointegráció) minél nagyobb érték a jó, ezért különböző képleteket kell alkalmazni a számítások során:

- Kedvező célfüggvény esetén (maximalizálás):

$$f_j^+ = \max_i x_{ij} \quad (87)$$

$$f_j^- = \min_i x_{ij} \quad (88)$$

- Kedvezőtlen célfüggvény esetén (minimalizálás):

$$f_j^+ = \min_i x_{ij}, \quad (89)$$

$$f_j^- = \max_i x_{ij} \quad (90)$$

A normalizált értékek:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - f_j^-}{f_j^+ - f_j^-} \quad (91)$$

A célérték súlyok értékeit mutatja be a 11. táblázat.

6.3.2. Az eredmények elemzése

A preferencia rangsor első helyére az A10-es Porózus NiTi SMA (alakemlékező ötvözet) anyag alternatíva került, megelőzve az A8-as és az A6-os titánötvözeteket. A rozsdamentes acél, a titán és más fémek a biológiai anyagokhoz képest nagyon merevek, mindezzel erő hatására a környező szövetre jelentős nyomást generálnak. [79] Az alakemlékező ötvözetek különleges tulajdonságaikat kihasználva az ortopédiai alkalmazásokban orvosbiológiai sikereket könyvelhetnek el, mivel ezen anyagok tulajdonságaiknak köszönhetőek, kitűnnek a hagyományos anyagok közül. Sok SMA közül a NiTi ötvözetet tartják a legjobbnak, és számos implantációs alkalmazásban használják. [80] Kiemelkedő tulajdonságaik, például a szuperelasztikus hatás, a nagy tehercsillapító tulajdonság és gumyszerű effektusok miatt, például csonttörések rögzítésére szolgáló lemezek, belső rögzítők elemek, csigolyatávtartók esetén. A harmadik helyen a Ti-Al-V ötvözet szerepel magas korrozioállóságának és biokompatibilitásának köszönhetően. [81] A 12. táblázat-ban láthatóak a cikk és a saját Q értékek eredményei. A 20. ábra bemutatja a rangsorok összehasonlítását.

11. táblázat A saját célérték súlyok

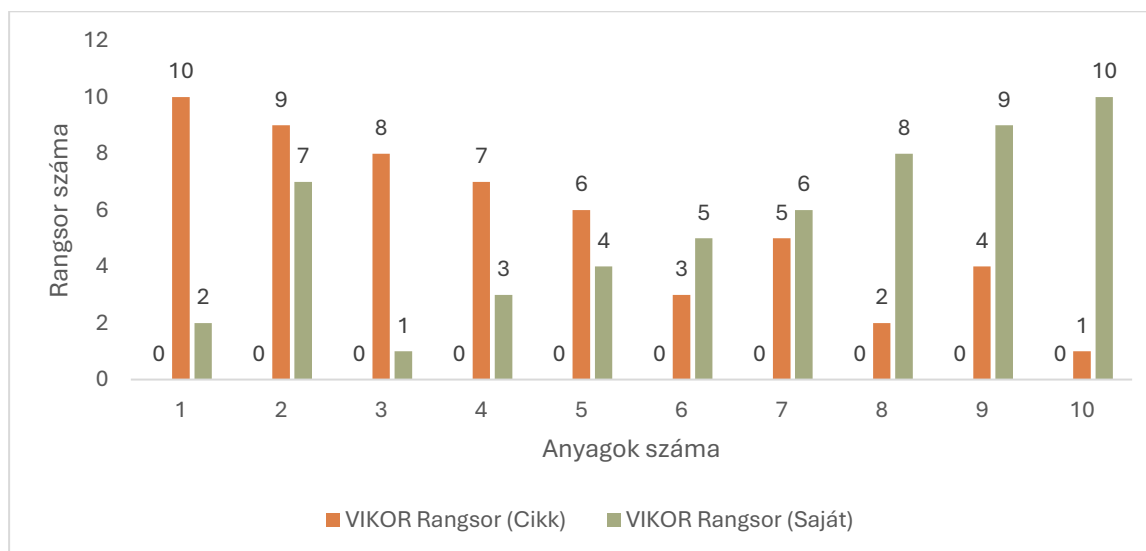
Saját célérték súlyok		
Anyagtulajdonság	Célérték (T_j)	Súly (w_j)
Sűrűség (g/cm^3)	1,3	0,07
Szakító szilárdság (MPa)	1240	0,11
Rugalmassági modulus (GPa)	16	0,14
Megnyúlás (%)	54	0,11
Korrózióállóság	0,955	0,18
Kopásállóság	0,955	0,2
Osseointegráció	0,955	0,19

12. táblázat Q értékek összehasonlítása

Anyag száma	SAJÁT Q	CIKK Q	SAJÁT rangsor	CIKK rangsor	Rangsor különbsége
10	0	1	1	10	-9
8	0,356341	0,791	2	9	-7
6	0,36682	0,306	3	2	1
3	0,379927	0,333	4	4	0
7	0,384058	0,658	5	8	-3
4	0,406394	0,368	6	5	1
9	0,484414	0,382	7	6	1
5	0,657687	0,345	8	3	5
2	0,795421	0,481	9	7	2
1	1	0	10	1	9

6.3.3. Összegzés

A forrás 5. fejezet-ében a konkrét számításokat (pl. térdprotézis példa) végignévezve sehol nem látszik, hogy a normalizálás során alkalmazták volna a célértékeket, holott azokat a szöveg szerint előzetesen definiálták. Ez nyilvánvaló hiba, mert ez azt eredményezi, hogy a „jó” anyagok (amelyek a célértékhez közelebb állnak) nem kapják meg a nekik megfelelő súlyt, torzítva az összes további lépést: S , R , Q értékek, és így a rangsort is.



20. ábra Rangsor összehasonlítása

6.3.4. Tézis (1)

1. Tézis

INTERVALLUM-ALAPÚ CÉLÉRTÉKES VIKOR MÓDSZER ALKALMAZÁSA ORVOSTECHNIKAI DÖNTÉSTÁMOGATÁSBAN: A TÉRDPROTÉZIS-ANYAGVÁLASZTÁS ESETTANULMÁNYA

A klasszikus és intervallum-alapú célértékes VIKOR módszerek által generált rangsorok között szignifikáns eltérések figyelhetők meg, ami bizonyítja, hogy a célérték figyelmen kívül hagyása döntésbeli instabilitást okoz.

A klasszikus VIKOR módszer intervallum-alapú, célérték-orientált kiterjesztése lehetőséget biztosít a bizonytalan, többkritériumos döntési helyzetek hatékonyabb modellezésére. A célérték bevonásával és az intervallum-adatok normalizálásával olyan új rangsorolási eljárás hozható létre, amely érzékenyebben tükrözi a kompromisszumos megoldások stabilitását.

Az intervallum-alapú célértékes VIKOR módszer által támogatott döntések transzparenssebbek és döntéshozó barátabbak, mivel lehetővé teszik a preferenciák közvetlen beépítését, ezzel elősegítve a szakterületi validációt az orvosi implantációk tervezésében.

A térdprotézis femur komponensének anyagválasztására alkalmazott intervallum-alapú célértékes VIKOR módszer képes a kompromisszumos döntések meghozatalára.

A térdprotézis példában a célérték-alapú VIKOR módszer által kiemelt legjobb alternatívák rangsora eltért a klasszikus módszer által preferált alternatíváktól, így igazolva a döntési tér belső szerkezetének célértékes feltárásának fontosságát

6.1. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

[AJ 1] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: The VIKOR Algorithm in Material Decision Support, DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES 12: 2 pp. 5-13., 9 p. (2022), 10.32972/dms.2022.008

[AJ 13] Albert Judit: THE VIKOR METHOD ALGORITHM IN HIP PROTESIS MATERIAL SELECTION DECISION SUPPORT (2022), Doktoranduszok Fóruma 2022.november 18., Angol nyelvű konferenciaelőadás

[AJ 17] The VIKOR algorithm in material decision support (2022), Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11., Angol nyelvű konferenciaelőadás

[AJ 24] Albert Judit: Az MCDM módszer alkalmazása az anyagválasztásban az optimális tervezés érdekében: Áttekintés (2022) Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11. Magyar nyelvű konferenciaelőadás

[AJ 15] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Anyagválasztáshoz alkalmazott intervallum alapú célértékes VIKOR módszertan, In: Vadászné Bognár, Gabriella; Pillér, Imre (szerk.) Doktoranduszok fóruma: Miskolc, 2022. november 17. Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa, Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Igazgatóság (2024) 105 p. pp. 7-14., 8 p.

[AJ 23] Albert, Judit: Csípő protézis anyagválasztási folyamata VIKOR algoritmussal, Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11., Magyar nyelvű konferenciaelőadás

6.2. FOGÁSZATI IMPLANTÁTUMOK OPTIMALIZÁLÁSA

6.2.1. Kapcsolódó publikációk

[AJ 3] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Optimization of multicriteria decision-making for dental implant selection, Design of Machines and Structures, Vol. 14, No. 1. pp. 75–83. (2024), 10.32972/dms.2024.007

[AJ 25] Többszempon্তু döntéshozatal optimalizálása fogászati implantátumok kiválasztására, MTA MAB Gépészeti és Informatikai Szakbizottság MAB Gépszerkezetani Munkabizottság rendezvénye, Miskolci Egyetem, 2024. november 14., Magyar nyelvű konferenciaelőadás

6.2.2. A fizikai modell felépítése

Az optimális fogászati implantátumok konstrukciós alternatívái ideális esetben minimális stressz koncentrációt kellene eredményezzenek, ezáltal, a külső terhelések egyenletesen elosztva továbbítódnak a kapcsolódó csontokra. [84] Jelen kutatásban három implantátum modellt vizsgáltunk.(13. táblázat-14. táblázat)

13. táblázat A szimuláció során alkalmazott anyagok mechanikai tulajdonságai

Anyag	Rugalmassági modulus	Poisson szám
Titán ötvözet	110	0,35
Kéreg csont [85]	22.8	0,30
Szivacsos csont [85]	1,148	0,30

6.2.3. A végeelemes szimulációk eredményeinek értékelése

Az eredmények azt mutatják (14. táblázat), hogy az optimális feszültségeloszlás az implantátum méretétől és alakjától függ. A szimmetrikus rögzítési pontok és az optimális távolságok kiválasztása javíthatja az implantátum stabilitását és hosszú távú teljesítményét. Az Alternatíva A mutatja a legkisebb feszültséget mind a csontban, mind az implantátumban (40,5 MPa a csontban és 135 MPa az implantátumban), míg az Alternatíva C a legnagyobb feszültséget mutatja (59,45 MPa a csontban és 293,3 MPa az implantátumban).

Az elmozdulás tekintetében az Alternatíva A mutatja a csontban a legkisebb elmozdulást (0,010 mm) és az implantátumban a legnagyobbat (0,1010 mm). Az Alternatíva B mutatja az implantátumban a legkisebb elmozdulást (0,01 mm) és a csontban is viszonylag kicsi (0,00858 mm). Az Alternatíva C mind a csontban (0,01977 mm), mind az implantátumban (0,02668 mm) a legnagyobb elmozdulást mutatja.

Az A alternatíva a legkisebb feszültséget mutatja mind a csontban, mind az implantátumban, de az implantátumban a legnagyobb elmozdulást mutatja, ami azt jelenti, hogy bár kisebb feszültség éri, az implantátum nagyobb mozgást szenved el. A B alternatíva közepes feszültséget mutat mind a csontban, mind az implantátumban, és az elmozdulások is alacsonyak, különösen az implantátumban, ami egy jó egyensúlyt mutathat. A C alternatíva a legnagyobb feszültséget és elmozdulást mutatja mind a csontban, mind az implantátumban, ami valószínűleg a legrosszabb opció a nagyobb igénybevétel és elmozdulás miatt. A legjobb alternatíva valószínűleg Alternatíva B, mivel ez mutatja a legkiegyensúlyozottabb eredményeket alacsony elmozdulással és közepes feszültséggel mind a csontban, mind az implantátumban.

Az eredmények azt mutatják, hogy a platformváltó módszerek és a geometriai optimalizáció jelentősen javíthatják az implantátumok hosszú távú stabilitását és teljesítményét. (22. ábra-24. ábra) A platformváltás segíthet megelőzni az implantátum körüli csontvesztést, ami alapvető fontosságú az implantátum hosszú távú sikeréhez és stabilitásához.

14. táblázat Az implantátum alternatívák von Mises feszültségei és elmozdulásaik

Alternatíva	Feszültség (MPa)		Elmozdulás (mm)	
	Csont	Implantátum	Csont	Implantátum
A 	40.5	135	0.010	0.1010
B 	51.49	187.2	0.00858	0.01
C 	59.45	293.3	0.01977	0.02668

6.3. AZ ALTERNATÍVÁK DÖNTÉSTÁMOGATOTT ÉRTÉKELÉSE ÉS RANGSOROLÁSA

Az alternatívák értékelése során az értékelési szempontok (15. táblázat) és súlyozás alapján végeztem el. Az értékelési szempontok alapján az Alternatíva *B* mutatja a legkiegyensúlyozottabb eredményeket alacsony elmozdulással és közepes feszültséggel mind a csontban, mind az implantátumban, ezért ez az optimális rögzítési konstrukciós alternatíva. A MDL (Modified Digital Logic) módszer alapján végeztem a páronkénti összehasonlításokat, és utána normalizáltam az eredményeket.

15. táblázat A fogászati implantátumok esetében vizsgált kritériumok mennyiségi értéke

Kritérium száma	Kritérium	Fontosság (w_i)
1	Költség (Ft)	0.117647
2	Csontban ébredő deformáció	0.137255
3	Implantátumban ébredő deformáció	0.156863
4	von Mises feszültség a csontban (MPa)	0.196078
5	Élettartam (év)	0.117647
6	von Mises feszültség az implantátumban (MPa)	0.176471
7	Karbantartási igények	0.098039
Összeg		1

16. táblázat A fogászati implantátumok esetében vizsgált kritériumok összehasonlítása

Kritérium / Alternatíva	1	2	3	4	5	6	7
A	10	0.01000	0.1010	40.50	100	135.0	100
B	7	0.00858	0.0100	51.49	100	187.2	100
C	0.0612	0.01977	0.02668	59.45	100	293.3	100
Rangsor: 1. A Alternatíva, 2. B Alternatíva, 3. C Alternatíva							

A korábbi publikációink [86], [87] az intervallum alapú célértékes VIKOR döntési módszerre koncentráltak. Ez a fejezet szisztematikus elemzéssel egészíti ki a fentieket, ugyanakkor a döntéshozói folyamatot két különböző támogató módszerre alapozza, amelyet a 21. ábra szemléltet.

6.3.1. Tézis (2)

2. Tézis

BIOMECHANIKAI TELJESÍTMÉNYJAVÍTÁS FOGÁSZATI IMPLANTÁTUMOKNÁL: A GEOMETRIAI OPTIMALIZÁCIÓ ÉS A VIKOR MÓDSZER INTEGRÁLT MEGKÖZELÍTÉSE

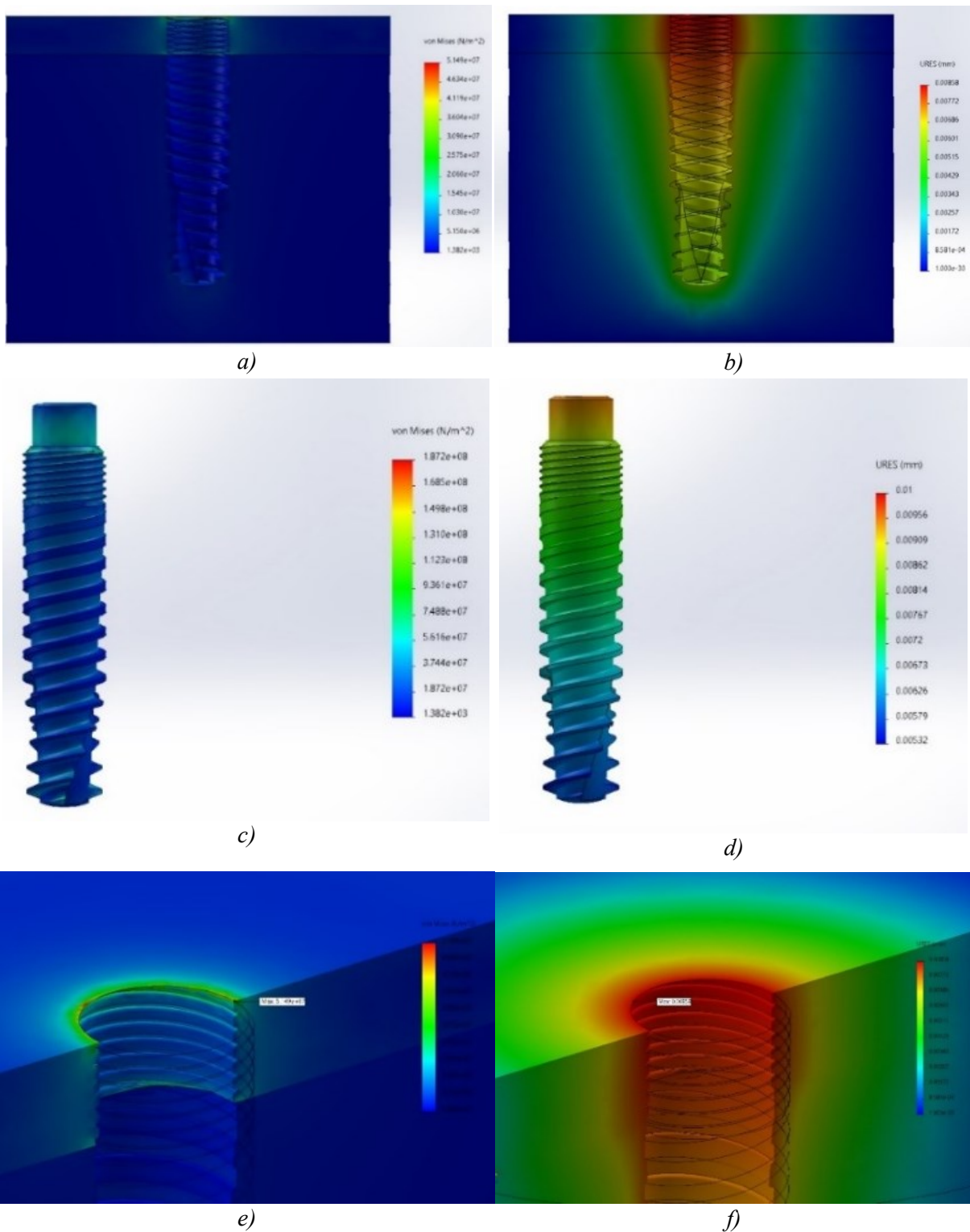
A fogászati implantátumok körüli csontban ébredő fezsültségkoncentrációt a geometriai optimalizálás és a VIKOR döntéstámogató módszer kompromisszumos megoldáskeresésével együttesen alkalmazva, az optimális alternatíva kiválasztásával a biomechanikai teljesítmény jelentősen növelhető.

A kapcsolóplatformokkal rendelkező modellek alacsonyabb maximális feszültségértékeket produkálnak, ahol a fő terhelési területek az implantátum-pillér határfelületen és a környező kéri csonton összpontosultak.

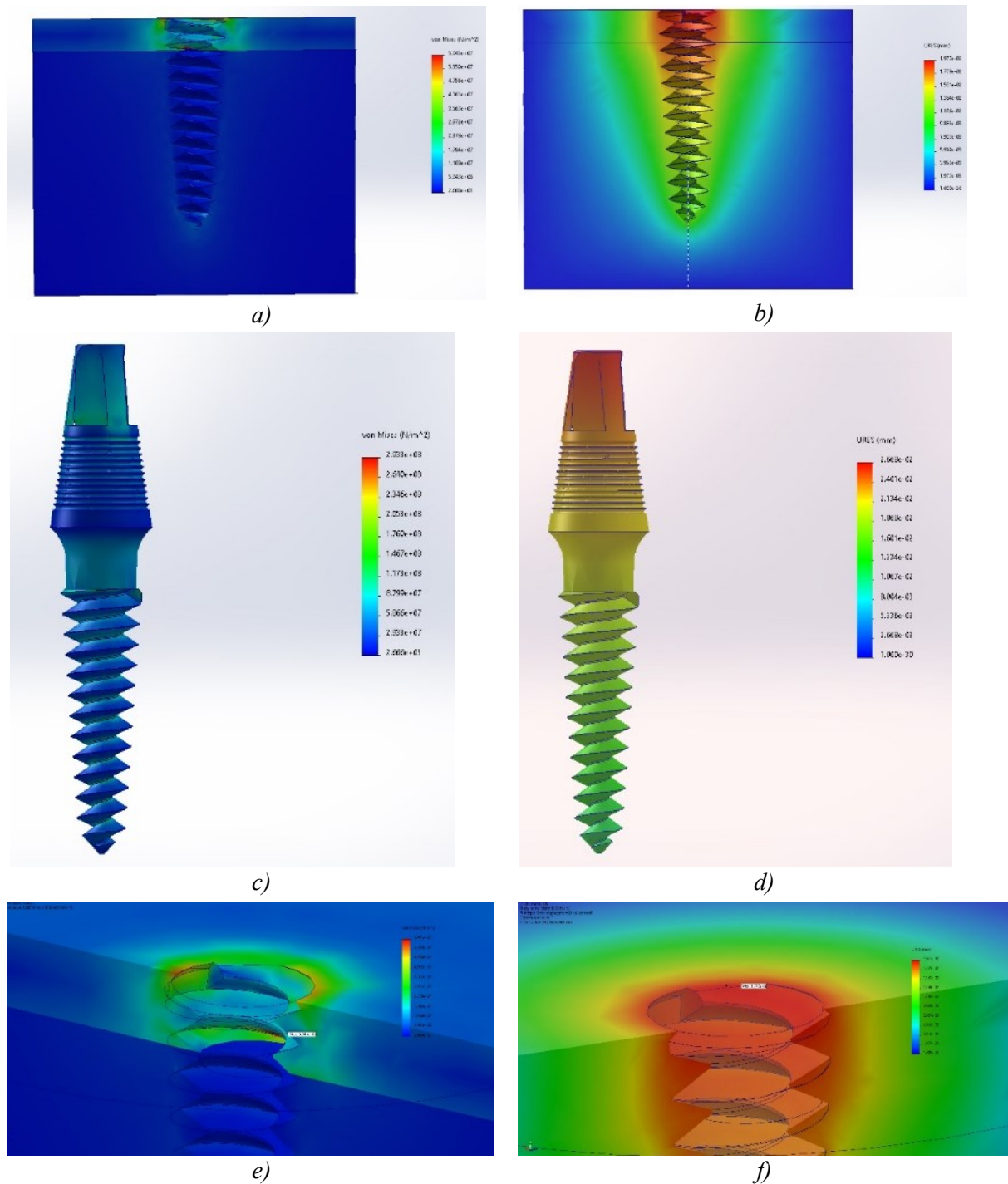
A különböző alternatívákon végzett szimulációk eredményei és a VIKOR módszer együttes alkalmazásával, amely az értékelési szempontok alapján rangsort állítva fel, megállapítható, hogy az alkalmazott módszertan hatékonyan támogatja a fogászati implantátumok fejlesztési folyamatait.



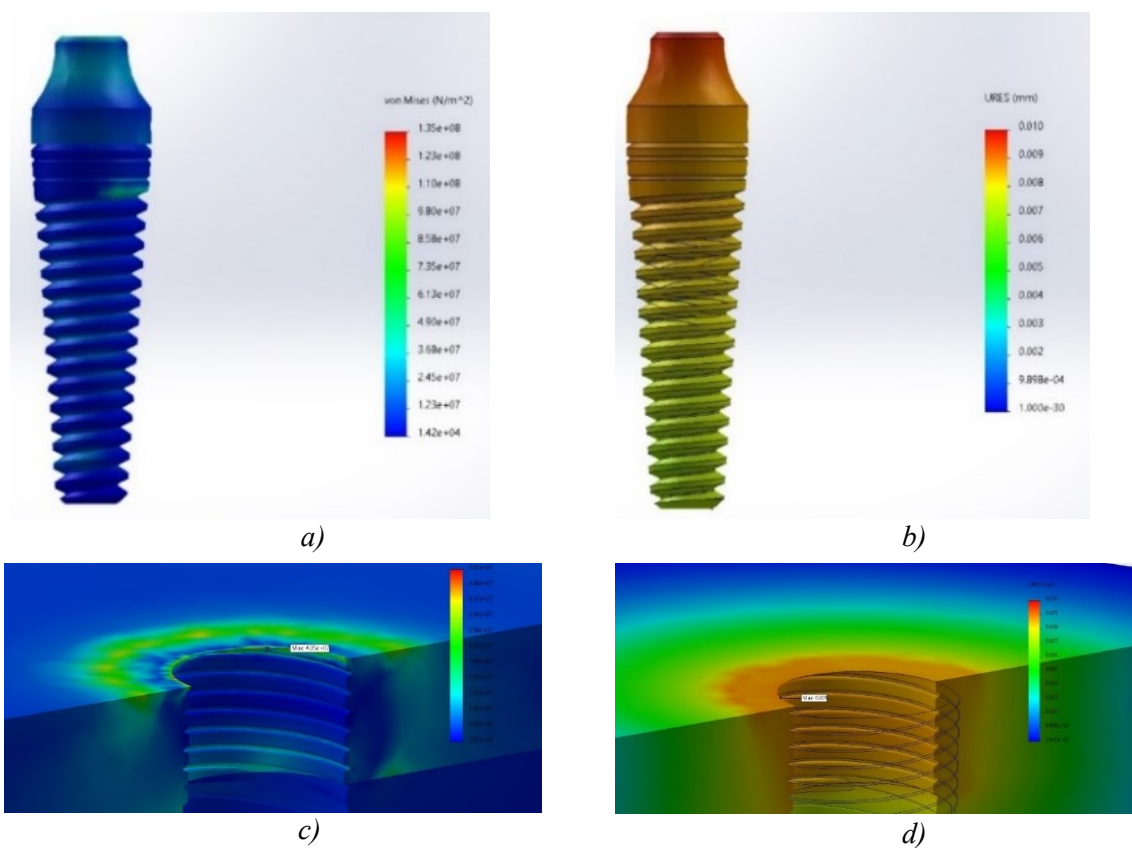
21. ábra Az fogászati implantátum optimalizálása és értékelése során alkalmazott koncepcionális tervezés fázisai: integrált alváztervezési és döntéstámogatási modell



22. ábra A B alternatíva a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai, a csont B alternatíva körül c) von Mises feszültségei, d) elmozdulásai, e) nagyított von Mises feszültségek részletei, f) nagyított elmozdulásainak részletei



23. ábra A C alternatíva a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai, a csont C alternatíva körül c) von Mises feszültségei, d) elmozdulásai



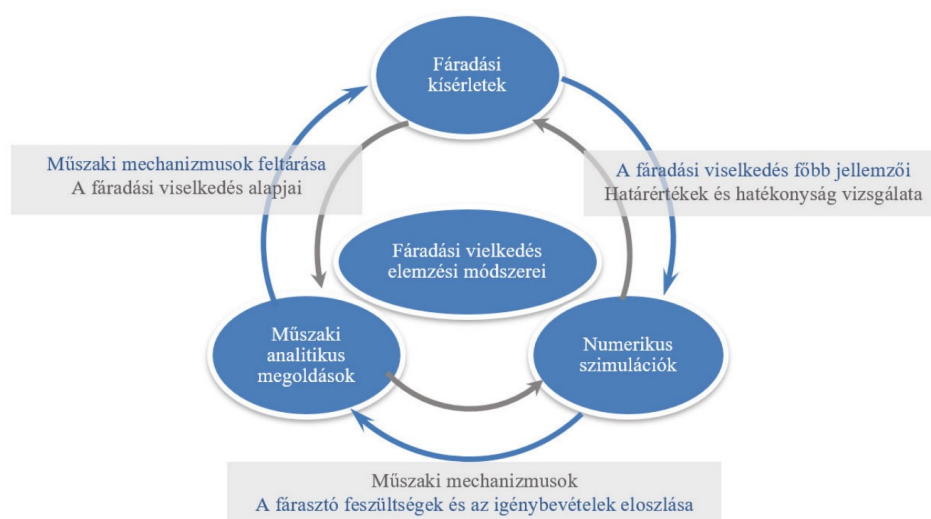
24. ábra Az A alternatíva a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai, a csont A alternatíva körül c) von Mises feszültségei, d) elmozdulásai

7. ALVÁZMEGERŐSÍTÉSI ALTERNATÍVÁK TÖBBKRITÉRIUMOS ELEMZÉSE

7.1. BEVEZETÉS

A járművek vázszerkezete több komponenst integrál, mint például az tengelyek, felfüggesztés, hajtómű, kabin és utánfutó és a kabin súlyának, tartalmának és az útburkolat durvaságából eredő inerciaerőknek van kitéve (például statikus, dinamikus és ciklikus terhelés). Az alváz egy rendszer, amely fogadja és továbbítja a reakcióerőket a jármű működése során különböző útviszonyok mellett. Ezenkívül az alvázat a motor, a hajtáslánc rezgései is befolyásolják. A feszültséganalízis fontos szerepet játszik a kifáradás vizsgálatában és a komponensek élettartamának előrejelzésében.

A kifáradási kísérletek során feltárt alapvető kifáradási adatok, iránymutatást adnak a numerikus szimulációkhoz és a mechanikai elemzésekhez. A topológia-fáradási viselkedési kapcsolatok mechanikai mechanizmusainak feltárásához a numerikus szimulációkat gyakran alkalmazzák a szerkezeten belüli feszültség- és alakváltozás-eloszlás meghatározására, kompenzálva az adatgyűjtés és a kifáradási kísérletek hatékonyságának korlátait és leküzdve az analitikai megoldások hiányosságait. [80] Ezt a folyamatot szemlélteti a 25. ábra.



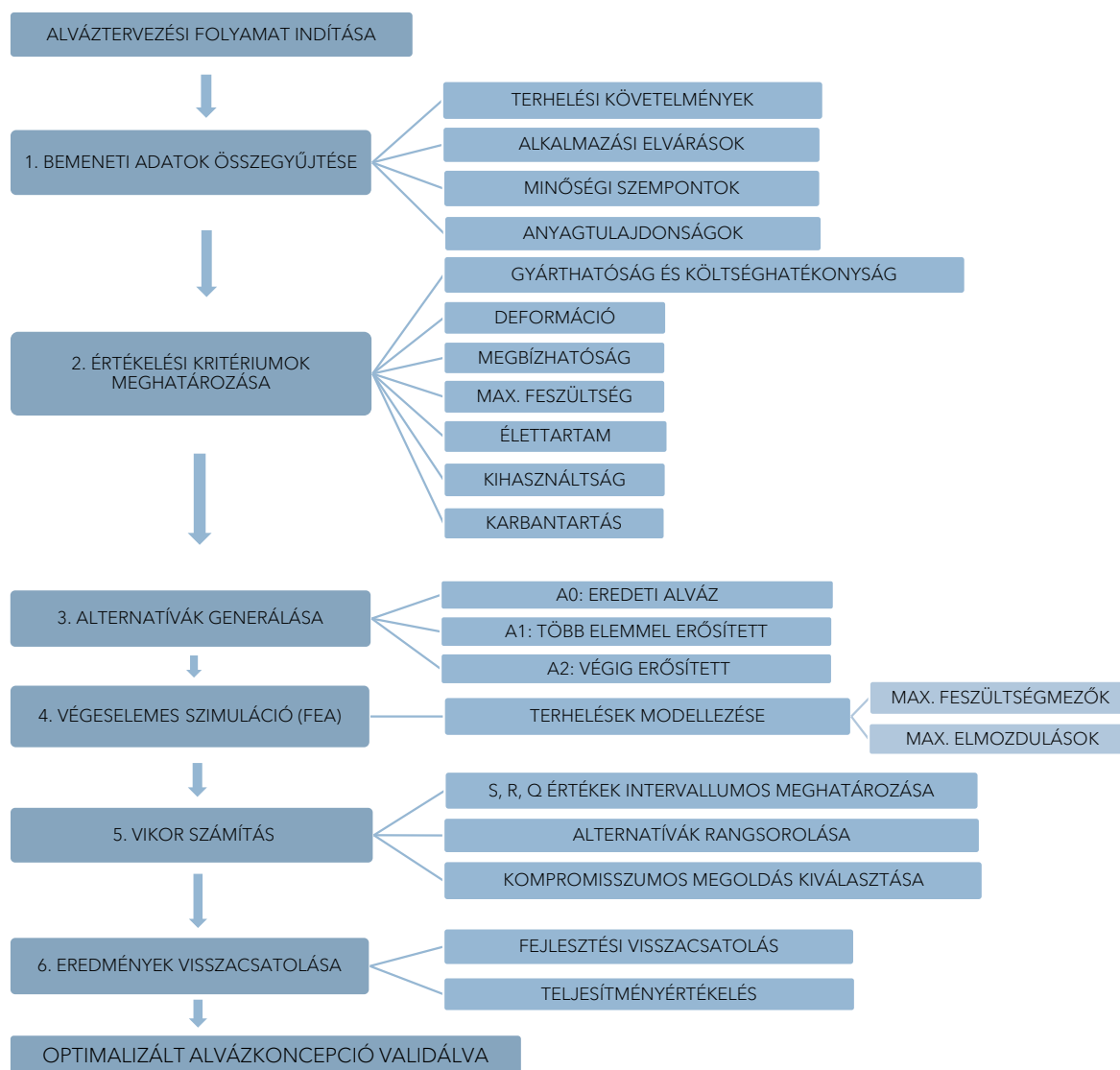
25. ábra A szerkezeti kifáradási viselkedés elemzési módszerei [80]

Ezenkívül az alvázat a motor, a hajtáslánc rezgései is befolyásolják. A feszültséganalízis fontos szerepet játszik a kifáradás vizsgálatában és a komponensek élettartamának előrejelzésében, hogy meghatározzuk a legnagyobb feszültséget, amely a lehetséges meghibásodás kezdetét jelzi. A feszültség nagysága felhasználható a vázszerkezet élettartamának előrejelzésére.

7.1.1. A kutatás módszertana

Speciális alkalmazások esetén, például a járműváz többcélú felhasználásakor, megnőhet a jármű terhelése, ami hátrányosan befolyásolja az alváz tartósságát. Ebben a kutatásban az URAL 4320 háromtengelyes jármű, túlterheléssel járó felhasználását elemeztém, mivel az

alap-alváz konstrukciós kialakítása lehetővé teszi, a járművet kiegészítve különböző felépítményekkel, annak többcélú felhasználásra való alkalmazhatóságát.

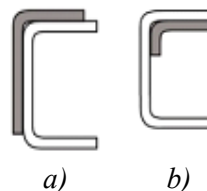


26. ábra Az alváz megerősítés során alkalmazott koncepcionális tervezés fázisai: integrált alváztervezési és döntéstámogatási modell

Van Van és társai [81] tanulmányukban például a többcélú erdőtűzoltó járművek tűzoltó berendezéseinek (pl.: nagynyomású vízszivattyú, tűzoltó homokszóró berendezés) kombinációjának terhelési hatását vizsgálja ugyanezen jármű esetén. Az alváz élettartamára vonatkozó kutatásokat a tervezés során jelentősen segítik, a szerkezetelemző végeselemes szoftverek, melyek alkalmazásával megbízható és kevésbé időigényes, ezáltal költséghatékony eredményeket biztosíthatunk, az alváz megerősítési terveinek kidolgozása során, már a koncepcionális fázisban. [90] Ezt követően bemutatjuk a különböző alternatívák közötti rangsorolást és a legmegfelelőbb lehetőség kiválasztásának módját segítő intervallum alapú célértékes VIKOR módszer alkalmazását.(26. ábra)



27. ábra Az URAL-4320 jármű [90]



28. ábra Az alvázszerkezet módosított keresztmetszete: a) végig erősített alváz, b) több elemmel erősített alváz

7.2. A FIZIKAI MODELL FELÉPÍTÉSE

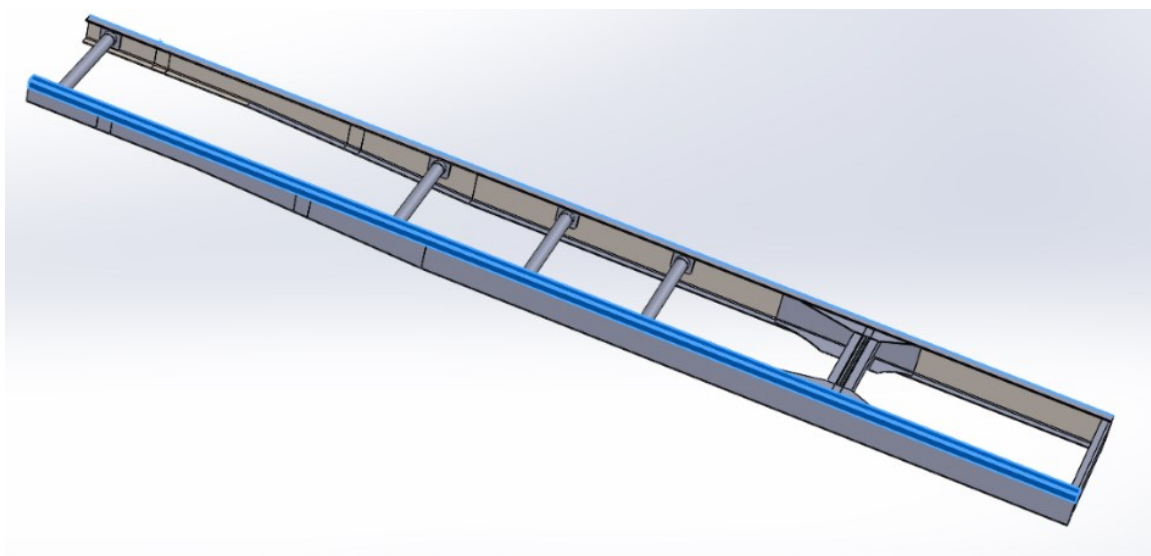
A kutatásom során a többletterhelések által keltett hatást kompenzálандó, alváz megerősítési alternatívákat dolgoztam ki, hogy javítsam a jármű-alváz stabilitását, tartósságát. A javasolt alváz megerősítési alternatívák célja az alváz terhelhetőségének növelése volt. A fejlesztési folyamatban a probléma strukturalása során, új alternatívákat (több lemezzel erősített alváz, és a végig erősített alváz) hoztam létre, azzal a céllal, hogy áthidaljam az aktuális és a kívánt állapot közötti szakadékot. Az alternatívák keresztmetszeti sematikus ábráját a 28. ábra, modelljüket az eredeti alvázkonstrukción a 29. ábra és a 30. ábra mutatja be. A kutatás során az alváz-profil megerősítésére tett javaslataim vizsgálatok a keresztmetszetek feszültséganalízisére koncentráltam. A terhelések és az elmozdulások összehasonlítása lehetővé teszi, hogy megértsük az erősítés hatásait a szerkezet feszültségviselő képességére.

17. táblázat Az alvázacél (09G2S) anyagtulajdonságai [91]

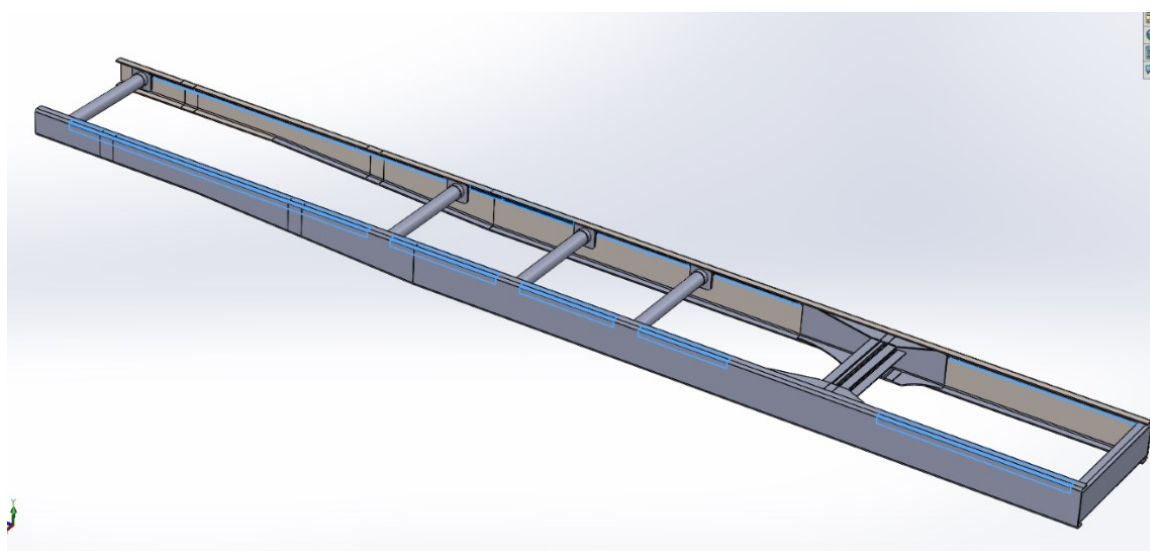
Rugalmassági modulus Pa	Sűrűség kg/m^3	Folyáshatár (MPa)	Szakítószilárdság (MPa)	Poisson tényező
200×10^9	7860	250	510-650	0,266

7.3. A PEREMFELTÉTELEK BEMUTATÁSA

A végelelemes szimulációk során az URAL 4320 háromtengelyes jármű (27. ábra) alvázának vizsgálatát végeztem el. Az alváz 200 mm x 55 mm x 5 mm-es C-szelvényekből készült, hossza 7366 mm, a tengelytáv 4830 mm. A teherautó vázszerkezetét a SolidWorks szoftver segítségével modelleztem és szilárdsági analíziseket a szoftver végelelemes megoldójában végeztem el. A kapott eredményeket szemlélteti a 32. ábra-34. ábra. Három különböző esetben vizsgáltam a profil változtatások hatását a vázszerkezet feszültségeire: a két kidolgozott megerősítési alternatíva és az eredeti konstrukció vizsgálata történt meg, eredeti terheléssel. Az URAL-4320 eredeti terhelése 3,5 tonna volt. A megnövelt terhelés 11 tonna $T_1 = 10000N + 10000N + 90000N$.



29. ábra A végig erősített alváz alternatíva (A_1) modellje



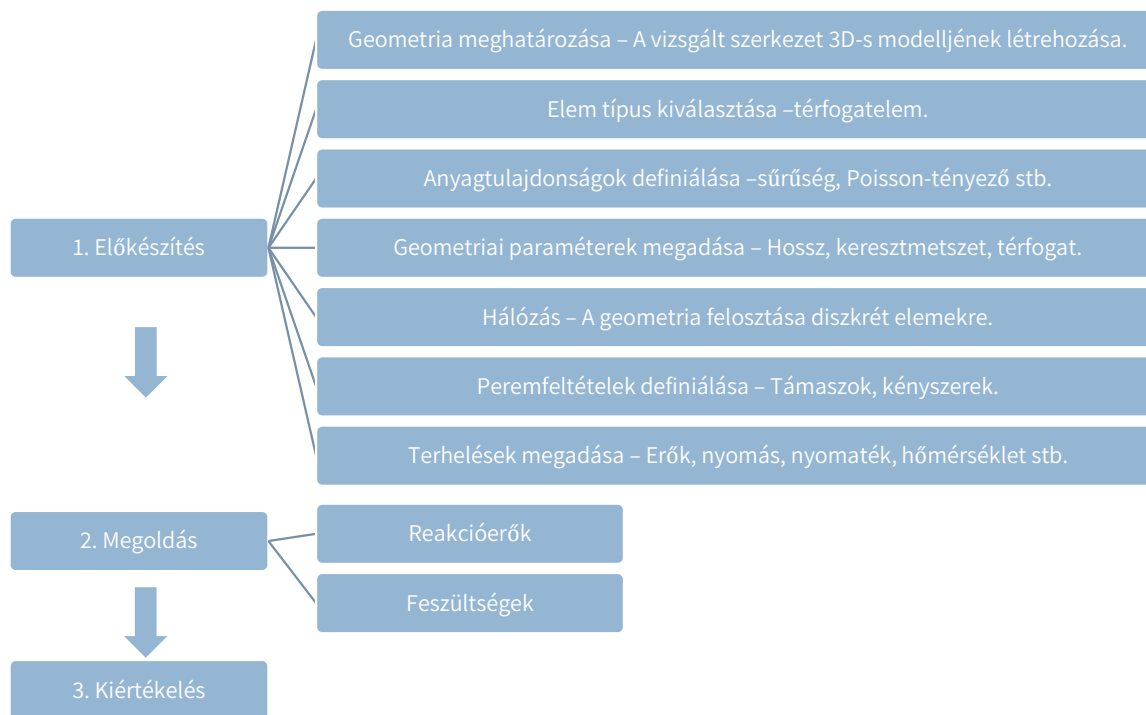
30. ábra A több elemmel erősített alváz alternatíva (A_1) modellje

A végelelemes szimulációkhoz használt alvázacél (09G2S) [91] anyagtulajdonságait a 17. táblázat mutatja be. A végelelemes modellezési folyamat leírását a 31. ábra mutatja be. [92] Az eredeti alváz esetében a maximális feszültség 137 MPa . A 18. táblázat a $T_1 = 10000\text{ N} + 10000\text{ N} + 90000\text{ N}$ terhelés során kapott eredményeket foglalja össze.

7.3.1. Az eredmények bemutatása

A több lemezzel erősített alváz esetében ez az érték $123,1\text{ MPa}$ -ra csökken, ami 10,22%-os csökkenést jelent. A végig erősített alváz esetében a maximális feszültség $93,01\text{ MPa}$ -ra csökken, ami jelentős, 32,1%-os csökkenést jelent az eredeti alvázhoz képest. Az eredeti alváz maximális elmozdulása $2,288\text{ mm}$. A több lemezzel erősített alváz esetében a maximális elmozdulás $1,985\text{ mm}$, ami 13,24%-os csökkenést jelent. Bár a több elemmel erősített alváz csökkenti a maximális feszültséget, a csökkenés mértéke nem olyan jelentős,

mint a végig erősített alváz esetében. Az erősítés egyenlőtlen terheléseloszlást eredményezhet, mivel a megerősített területek merevbbek lesznek, mint a többi rész. Ez a különbség a merevségben potenciálisan gyenge pontokat hozhat létre, ahol a feszültségek koncentrálnak. A végig erősített alváz esetében a maximális elmozdulás 1,887 mm-re csökken, ami 17,53%-os csökkenést jelent az eredeti alvázhoz képest. (32. ábra-34. ábra)



31. ábra A végeleemes modellezés folyamata [92]

18. táblázat A szimulációk eredményei

Modell	T ₁	T ₁	T ₁	T ₁
	Max. fesz. (MPa)	Min. fesz. (MPa)	Max. elm. (mm)	Min. elm. (mm)
Eredeti alváz A_0	137,0	0,002609	2,288	0,02939
Több lemezzel erősített alváz A_1	123,1	0,00067	1,985	0,02519
Végig erősített alváz A_2	93,01	0,0005805	1,887	0,01189

7.3.2. A végeleemes szimulációk eredmények értékelése

A több lemezzel erősített alváz bár hatékony lehet a feszültség és elmozdulás csökkentésében, számos hátránnyal jár. A tervezési komplexitás és a karbantartási nehézségek tovább növelhetik az ilyen típusú erősítés hátrányait. A végig erősített alváz jelentősen csökkentette a maximális feszültséget az eredeti alvázhoz képest, ami arra utal,

hogyan ez a hatékonyabb erősítési módszer a feszültség csökkentése szempontjából. (19. táblázat)

19. táblázat Az alváz megerősítésének hatása a maximális feszültségértékre T_1 terhelés esetén

Alváz típusa	Terhelés: T_1 (10000N+10000N+90000N)	
	Max fesz.	
A0	137 MPa	-
A1	93 MPa	32,1% csökkenés
A2	123 MPa	10,22% csökkenés

7.3.3. Az alternatívák döntéstámogatott értékelése és rangsorolása

Az értékelési szempontokat és azok fontossági súlyait mutatja be a 21. táblázat.

20. táblázat Az alternatívák jellemzői

Alváz típusa	Azonosító	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Eredeti alváz	A0	5	120	0,5	137	15000	1,3	30
Több elemmel erősített	A1	10	102	1	93	20000	1,565	50
Végig erősített	A2	7	106,2	2	123	20000	1,891	100

21. táblázat Az értékelési szempontok és azok fontossági súlyai

Értékelési szempontok	Minimalizálandó	Maximalizálandó	Fontosság	Súly (normalizált)
C1 költségigény	x		6	0,111
C2 deformáció	x		7	
C3 megbízhatóság		x	8	0,130
C4 maximum feszültség	x		10	0,148
C5 Élettartam		x	6	0,185
C6 Szerkezeti kihasznál.		x	9	0,111
C7 Karbantartás, javítás	x		5	0,093
Összesen			51	1

Ezek figyelembevételével a következő lépésekkel rangsoroltuk az alternatívákat:

- S érték meghatározása: Az alternatívák aggregált távolságát jelzi az ideális megoldástól, figyelembe véve az összes kritérium súlyát. (23. táblázat)
- R érték meghatározása: Az alternatívák legrosszabb kritérium távolságát mutatja. (24. táblázat)
- Q érték meghatározása: a kompromisszumos megoldást jelöli, amely figyelembe veszi a különböző kritériumokat és azok fontosságát. (25. táblázat)

- Rangsor meghatározása: Az alternatívák rangsorolása a Q érték alapján történt, melynek eredményeit a 26. táblázat mutatja be.

22. táblázat Az alternatívák normalizált értékei (V_{ij}^L, V_{ij}^U)

Alváz	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A0	0,00 / 0,00	1,00 / 1,00	1,00 / 1,00	1,00 / 1,00	1,00 / 1,00	1,00 / 1,00	0,00 / 0,00
A1	1,00 / 1,00	0,00 / 0,00	0,67 / 0,67	0,00 / 0,00	0,00 / 0,00	0,56 / 0,56	0,33 / 0,33
A2	0,40 / 0,40	0,23 / 0,23	0,00 / 0,00	0,68 / 0,68	0,00 / 0,00	0,00 / 0,00	1,00 / 1,00

23. táblázat Az alternatívák aggregált eltérésének (S_L, S_U) értékei

Alváz	S_L	S_U
A0	0,654	0,860
A1	0,289	0,607
A2	0,489	0,691

24. táblázat Az alternatívák legrosszabb eltérésének (R_L, R_U) értékei

Alváz	R_L	R_U
A0	1,000	1,000
A1	1,000	1,000
A2	1,000	1,000

25. táblázat Az alternatívák Q értékei és rangsora

Alváz	Q_L	Q_U	Q intervallum	Rangsor
A0	1,000	1,000	[1,000; 1,000]	3.
A1	0,000	0,523	[0,000; 0,523]	1.
A2	0,324	0,688	[0,324; 0,688]	2.

26. táblázat Az intervallum alapú célértékes VIKOR módszer eredményei

Alváz alternatívák	S érték	R érték	Q érték	Rangsor
Eredeti alváz	0.655	0.320	0.682	3
Több elemmel erősített alváz	0.491	0.240	0.517	2
Végig erősített alváz	0.226	0.150	0.201	1

Az eredmények az mutatják, hogy az optimalizált alvázszerkezettel a többletterhelésének kompenzálása biztosítható. Az erősítések hatására a maximális elmozdulás is csökkent mindkét módosított alváz esetében. A tervezés során alkalmazott módszertan lépéseit mutatja be a 26. ábra.

7.4. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

[AJ 9] Albert Judit, Takács Ágnes: Teherautó alváz szerkezetének végeselemes vizsgálata, GÉP 75: 1 pp. 5-8., 4 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.1.1

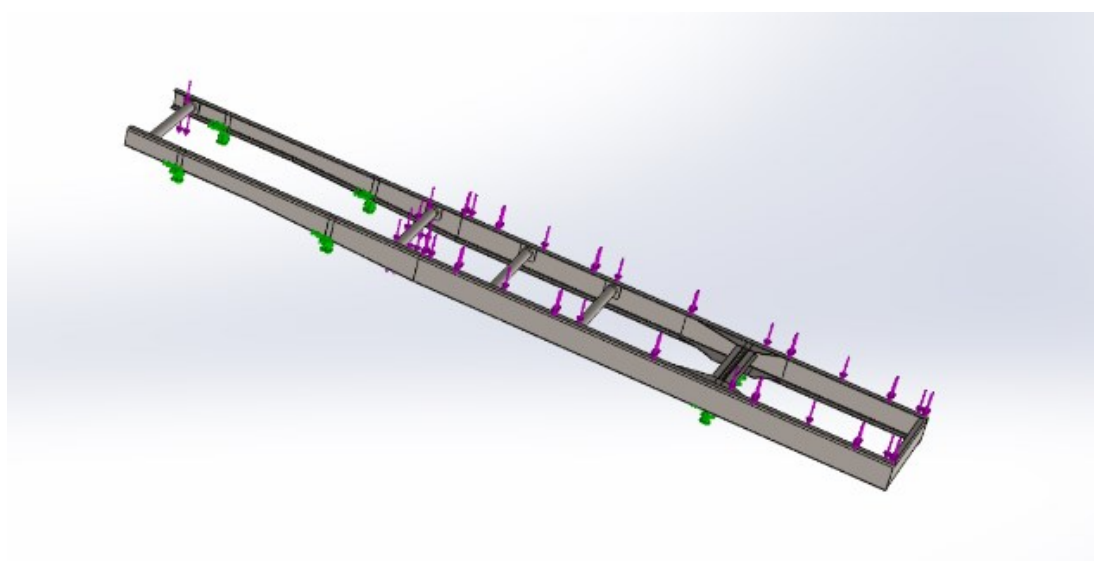
7.4.1. Tézis (3)

3. Tézis

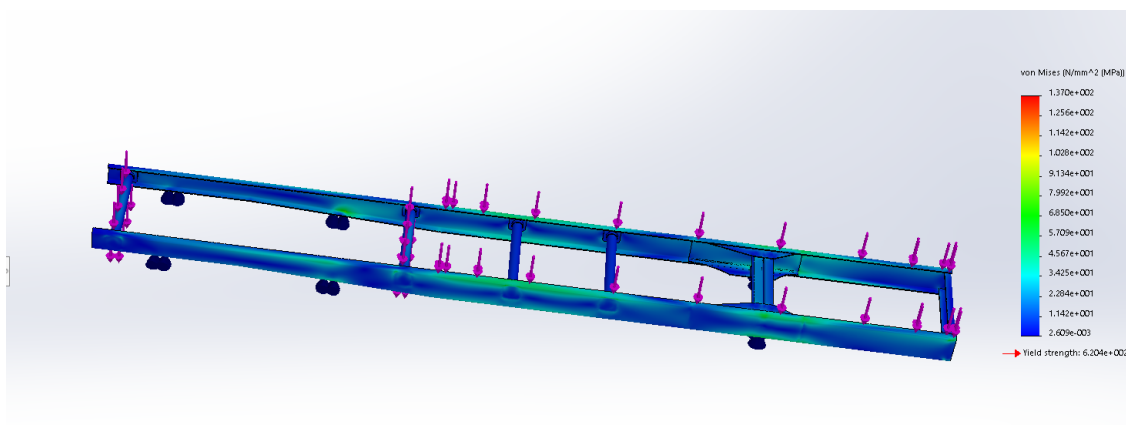
**KOMPROMISSZUMOS RANGSOROLÁS VIKOR MÓDSZERREL
FESZÜLTSEGI ÉS ÉLETTARTAM SZEMPONTÚ SZERKEZETI
OPTIMALIZÁLÁSBAN**

Az alváz élettartam növelése céljából újratervezett konstrukciós alternatívák feszültség és alakoptimalizálása során, az intervallum alapú célértékes VIKOR döntéstámogatási modell alkalmazása lehetővé teszi a különböző szerkezeti alternatívák kompromisszumos rangsorolását, figyelembe véve nemcsak a szilárdsági, hanem az élettartam, karbantartás és költség szempontokat is.

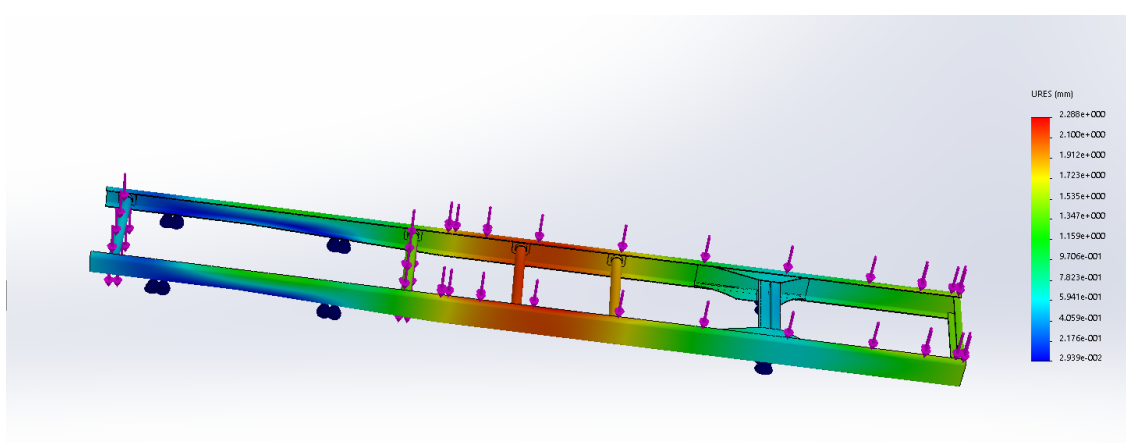
Megállapítható, hogy a konstrukciós tervezési módosítás elérte a kívánt célt, azaz, a szerkezet megfelel a többletterhelés során megnövekedett terhelésnek. A tervezés során alkalmazott módszertan lépéseit mutatja be a 26. ábra.



a)

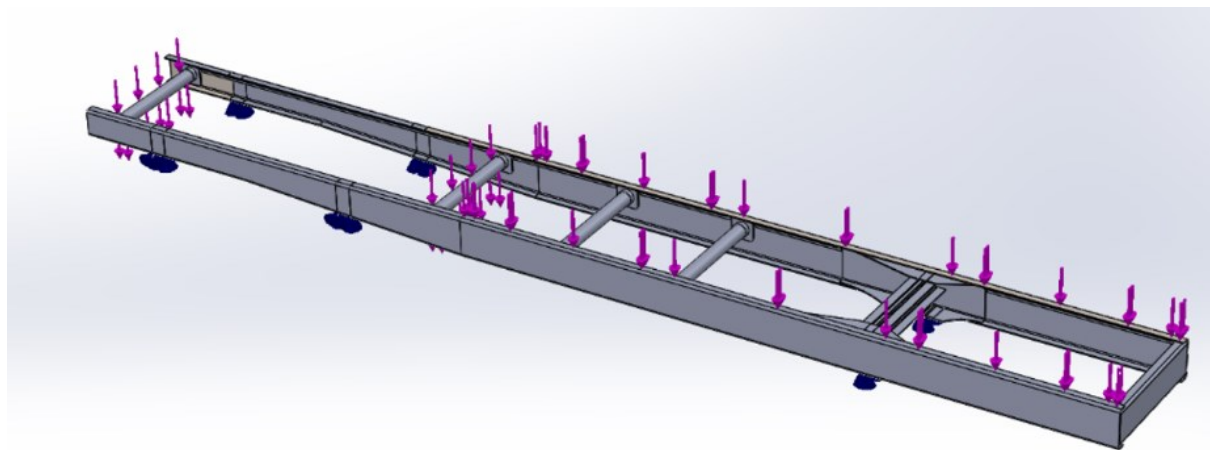


b)



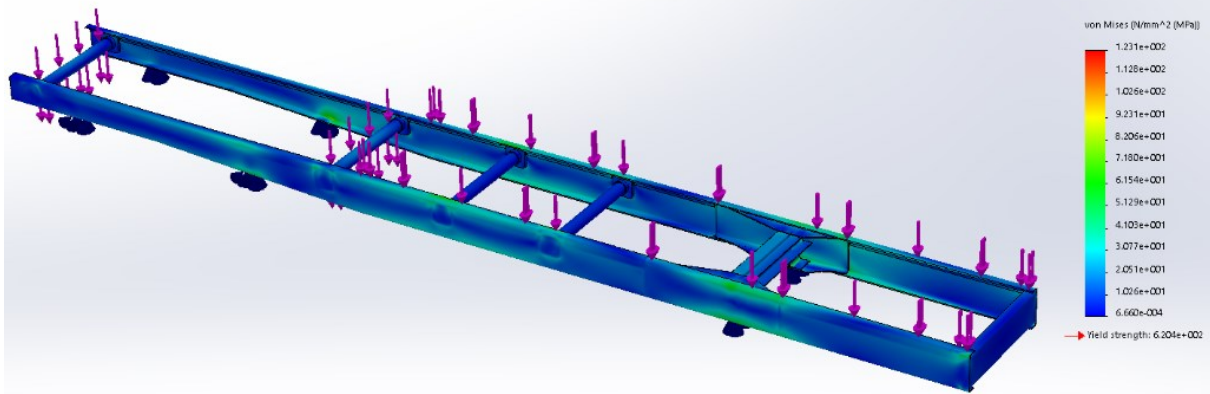
c)

32. ábra Az eredeti URAL-4320 alváz a) CAD modellje, b) Von Mises feszültségei, c) elmozdulásai



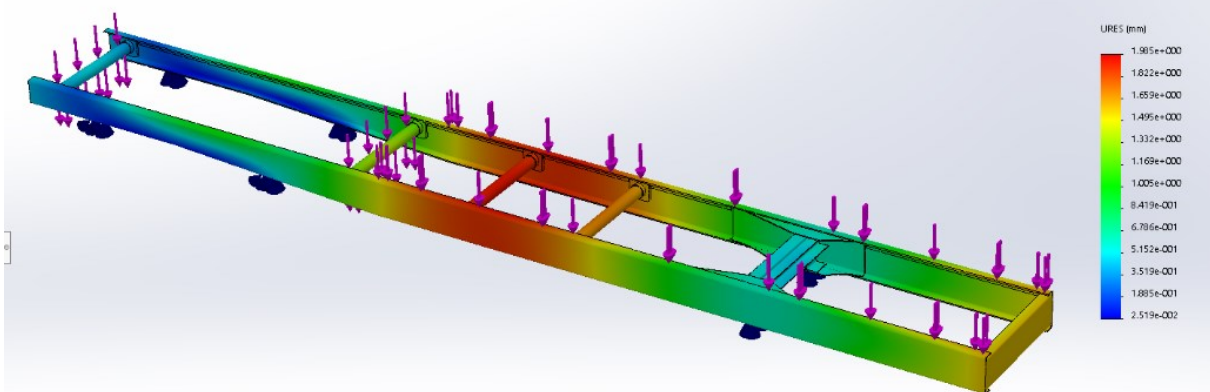
a)

Model name: Assem4
Study name: Static 1 (Default)
Plot type: Static nodal stress Stress1
Deformation scale: 1



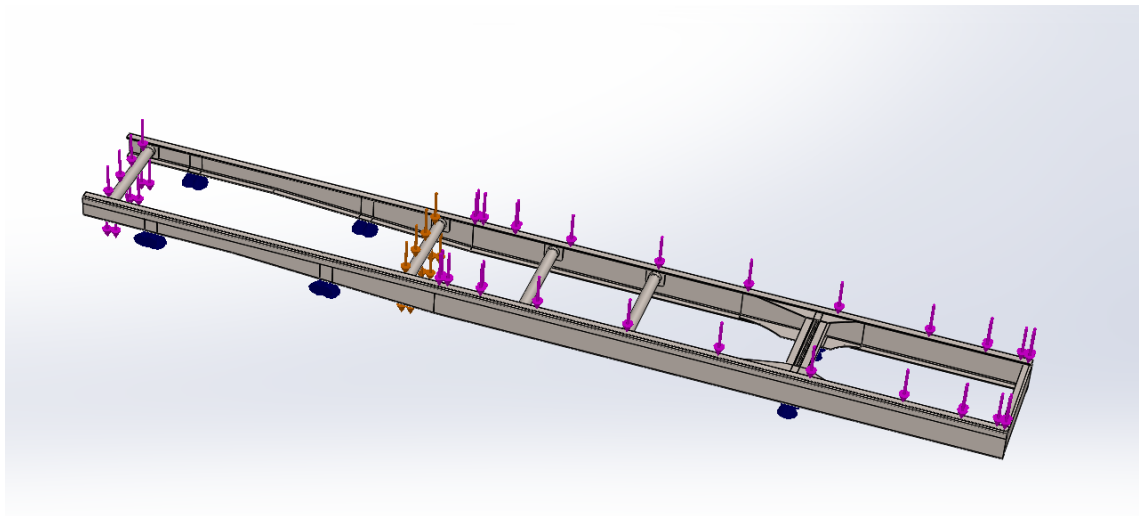
b)

Model name: Assem4
Study name: Static 1 (Default)
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 1

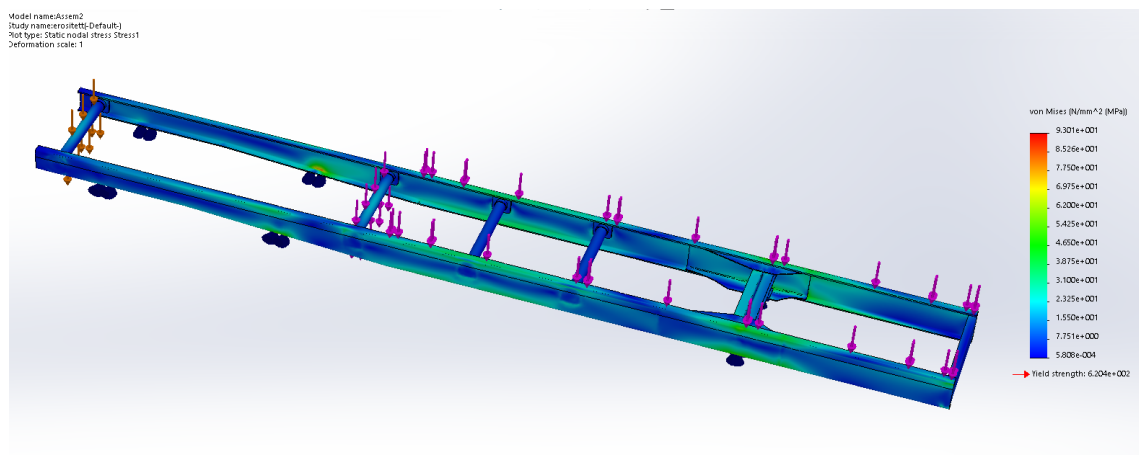


c)

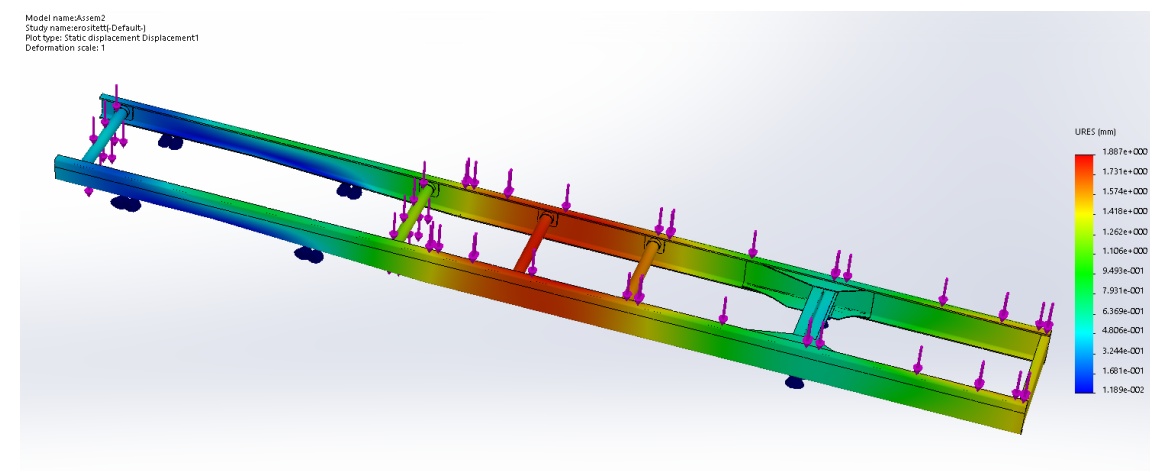
33. ábra A több elemmel erősített URAL-4320 alváz a) CAD modellje b) von Mises feszültségei, c) elmozdulásai



a)



b)



c)

34. ábra A végig erősített URAL-4320 alváz a) CAD modellje, b) von Mises feszültségei, c) elmozdulásai

8. THERMOELEKTROMOS MODULOK ÉLETTARTAM OPTIMALIZÁLÁSA

8.1. 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 hőmérsékletszabályozásban. 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 alkalmasságának megítélésének hatékonysága. Egy adott, gyakran konkrét feladathoz legmegfelelőbb alternatíva kiválasztása bonyolult, időigényes és költséges feladat.

A fejezetben a termoelektromos modulok tervezéséről, modellezéséről és optimalizálásáról számolunk be.

A javasolt modelleket részletes 3D-s numerikus szimulációk eredményeivel és többszemponútú döntésmélet segítségével való rangsorolással validáltuk. A termoelektromos modul optimalizálására javasolt módszer hatékonyságát demonstráljuk, ahol a bemeneti áram mellett a termoelektromos hűtőrendszer hűtési kapacitása növekszik a termoelektromos modul geometriai arányának növekedésével. Ez a tanulmány rávilágít a nagy teljesítményű termoelektromos modulok optimális paraméterekkel történő tervezésének és gyártásának fontosságára. Az eredmények azt mutatják, hogy az optimalizált paraméterekkel rendelkező termoelektromos modulok használatával a teljesítmény növelhető a kereskedelmi forgalomban kapható, nem optimalizált termoelektromos modulokhoz képest.

A hőfeszültségek és deformációk fő okai az elektronikus eszközök korlátozott élettartamának [99], [100]. Többek között a különböző anyagok hőtágulási együtthatóinak (CTE) helyi különbségei okozzák a meghibásodást [101]. Az elektronikus eszközök mechanikai megbízhatóságának ellenőrzésére a végesselemes szoftvert ma már széles körben használják az elemzési idő megtakarítása érdekében. A termoelektromos modulok tönkremeneteli kritériumait illetően [102] a szakirodalom széles körben a von Mises-feszültséget, mint általános feszültséget veszi figyelembe a meghibásodás meghatározásához, illetve végesselemes szimulációt használ az ilyen feszültségek kiszámításához [103], [104] [105]. Mások a mechanikai meghibásodásért felelős hajlítási és nyírófeszültséget emelik ki [106]. A vizsgálatunk eredményei azt mutatják, hogy a pelletekben a maximális hőterhelés csökkentésével a várható élettartam jelentősen javítható. Az elektronikus eszközök mechanikai megbízhatóságának igazolására ma már széles körben elterjedt a végesselemes szimuláció alkalmazása. A korábbi szakirodalmat tekintve a legtöbb tanulmány az üzemi terhelések változtatásának, a mechanikai és elektromos teljesítményre gyakorolt hatásait tárgyalja. Gao kutatásában [107] egy termoelektromos modul hőfeszültség-eloszlását, mechanikai tulajdonságait és termoelektromos tulajdonságait vizsgálta végesselemes módszerrel. Megállapította, hogy a termoelektromos modul teljesítményét és hatékonyságát nem csak az anyagtulajdonságok (Seebeck-együttható, elektromos ellenállás és hővezető

képesség) befolyásolják, hanem a termoelektromos modul mechanikai tulajdonságai is meghatározzák.

A korábbi irodalmakat tekintve a legtöbb tanulmány a paraméterek változtatásának a mechanikai és elektromos teljesítményre gyakorolt hatásait tárgyalta. Ezek közül azonban kevesen nyújtottak gyakorlati módot a teljes szerkezetre nehezedő mechanikai és termikus igénybevételek csökkentésére. Ezért ennek a munkának az a célja, hogy már a tervezés korai szakaszában figyelembe vegye, és ezáltal csökkentse az általános feszültségeket és az elhajlásokat, így növelve a modulok élettartamát.

8.2. A KUTATÁS MÓDSZERTANA

A termoelektromos modulok (TE-modul) hűtésre és fűtésre egyaránt használhatók gyógyászati termékek hőmérsékletének monitorozása kidolgozott konstrukciókban. (35. ábra)

A kutatás a tervezési koncepciók értékelésének kiterjesztését tárgyalja súlyozott teljesítmény értékek figyelembevételével, a termékfejlesztési folyamat korai szakaszában.

Az egymásnak ellentmondó követelmények esetén, fontos már ebben a tervezési szakaszban az anyagok kiválasztását, a tervezési koncepció kiválasztását, a gyártási folyamatok kiválasztását és az életciklusokat analizálni, mivel a megszerzett információk alapján kompromisszumos megoldásokat lehet találni.



a)



b)



c)



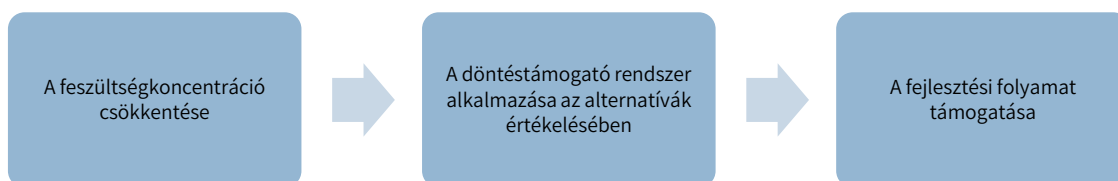
d)

35. ábra A TE-modul a) belső felépítése (40x40x3,4 mm) felépítése [108], b) a pellet párok a forrasztanyaggal és a réz vezetőelemmel [109], c) a pellet párok a réz vezetőelemmel d) a pelleték

A TE-modulok fejlesztésének koncepcionális tervezése során, a legjobb tervezési koncepciót VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) [9] használatával választjuk ki, amely egy több kritériumú döntéshozatali (MCDM) módszer. Az 36. ábra a

továbbiakban javasolt módszertan bemutatását és a folyamatát szemlélteti, amely képes a tervezés korai szakaszában eredményeket produkálni a kezdeti tervezési problémákra.

A tervezési koncepciók összehasonlítása érdekében a végelemes analízis során kapott adatait rögzítettük. A tervezési koncepciók teljesítményét MCDM-módszerrel, nevezetesen a VIKOR-al előre jeleztük és becsültük meg, hogy megkapjuk az egyes részjellemzők konkrét értékeit. A teljesítményadatok a TE-modulok pelleteiben ébredő maximális von Mises feszültség, a maximális deformáció, a teljes alakváltozási energia értékei, illetve a TE-modulban lévő pelletek magassága, térfogata, felülete és tömege. Végül az összegyűjtött adatokat a VIKOR módszer segítségével hasonlítottuk össze, alternatívaként hét részkritériumot és tíz tervezési koncepciót. Az egyes lépések részleteit a következő alfejezetben mutatom be.



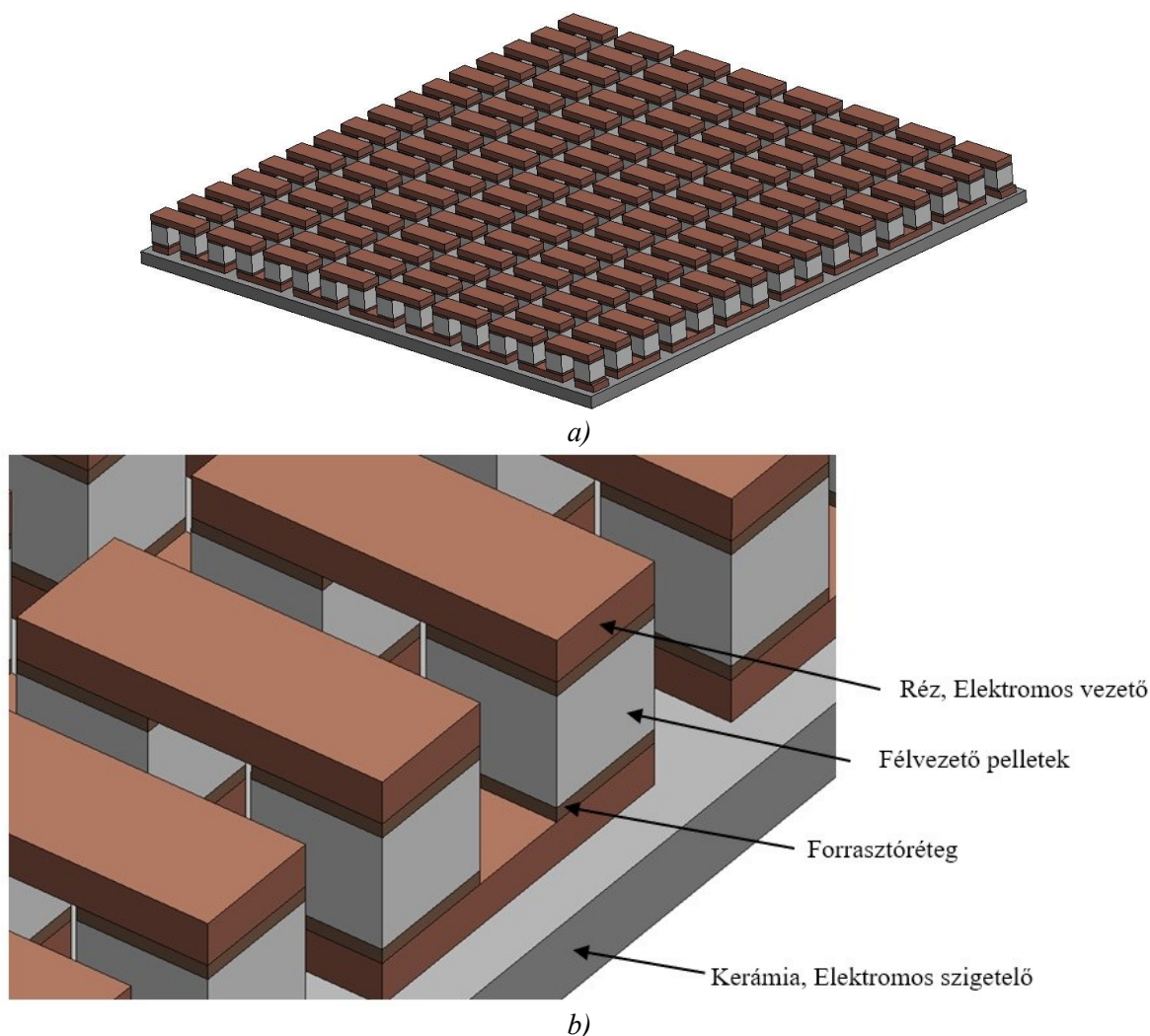
36. ábra A javasolt módszertan folyamatának felépítése

8.3. A FIZIKAI MODELL FELÉPÍTÉSE

A numerikus modellezési technikákat hatékonyan alkalmazhatjuk a tervezés korai szakaszában, hogy fontos információkat nyújtsanak a szerkezeti szilárdságról. Számos szakirodalom a von Mises-feszültséget általános feszültségként alkalmazza a TE-modul meghibásodásának meghatározásához, míg mások pedig a mechanikai meghibásodásért felelős hajlítási és nyírófeszültségeket emelik ki. Ebből a szempontból ez a munka a TE-modulok modellezésével kezdődik, a SolidWorks háromdimenziós (3D) számítógépes tervezőszoftver segítségével, majd a program végelemes megoldójával a modelleket elemezzük. A feszültségeloszlás és a teljes TE-modul deformációjának megértése alapján a feszültség csökkentésének céljából olyan hatásokat vizsgálunk, mint pl. az elmozdulás. Ezen túlmenően a végelelemelemzés megerősítette, hogy a forrasztott kötések és a pelletek a szerkezet olyan alkotóelemei, amelyekben a legnagyobb feszültségek ébrednek.

8.3.1. A TE-modulok tervezése

A modellezett TE-modul (Peltier 40×40 sealed Quick-Cool Quick-Ohm QC-127-1.4-8,5MS) (35. ábra), alakváltozási és feszültségkontúrjainak előzetes vizsgálatai alapján új beépítési konstrukciós-elrendezés került kidolgozásra.



37. ábra A TE-modul a) modellje, b) szerkezeti elemeinek kinagyított részlete

A 37. ábra a TE-modul modelljének felépítését mutatja be. A modellezett TE-modulokban 254 db $1,4 \times 1,4 \times 0,6$ mm méretű pellet van, amely anyaga bizmut tellúrid. A 28. táblázat a TE-modul alkotóelemeinek kezdeti méreteit tartalmazza.

Mind az eredeti, mind az új TE-modulok 3D modelljei a feszültségek (von Mises és nyírás) és a teljes elmozdulás meghatározásának céljából készültek. A kezdeti elemzett eredmények azt mutatták, hogy a félvezető hőelemek, úgynevezett pelletek terhelésének megváltozása jelentős hatással van a von Mises-feszültségre, a nyírófeszültségre és a teljes elmozdulásra.

8.3.2. Anyagtulajdonságok

A TE-modulok felső és alsó kerámia fedőlemezeket, réz forrasztási csatlakozókat, forrasztórégeket és bizmut tellúrid félvezető pelleteket tartalmaznak.

Az alkotóelemek anyagtulajdonságait szobahőmérsékleten a 27. táblázat tartalmazza.

8.3.1. A numerikus szimulációban használt peremfeltételek és paraméterek

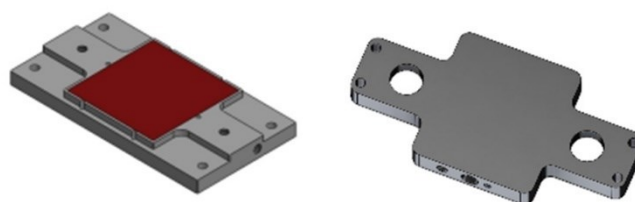
Amint azt korábban említettük, a geometria alakváltozásra, feszültségekre és hőmérséklet-eloszlásra gyakorolt hatásának szimulálására különféle konstrukciós geometriákat modelleztünk, és végeselem-elemzések sorozatát végeztük el.

A numerikus szimuláció a SolidWorks végelelemes funkcióival történt. Elsőként a beszerelt TE-modulokat vizsgáltuk, hogy meghatározzuk termomechanikai viselkedésüket a terhelési feltételek mellett.

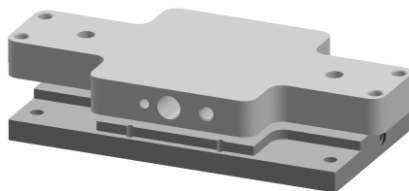
27. táblázat A felhasznált anyagok tulajdonságai a TE-modul összeállításban [113]

Anyagi tulajdonságok	Szerkezeti acél AISI 304 SS	Kerámia, (Elektromos szigetelő), Al_2O_3	Réz (Elektromos vezető), Cu	Forrasztó réteg $SnPb$	Bizmut tellúrid Bi_2Te_3 p-típusú	Bizmut tellúrid Bi_2Te_3 n-típusú
Hőtágulási együttható, $CTE, 50-190^\circ C (K^{-1})$	16,5	0,75	1,7	27,0	16,8	16,8
Sűrűség, $\rho (kg/m^3)$	7900	3970	8940	7260	6858.7	7858.7
Rugalmassági modulus, $E (GPa)$	200	380	115	44,5	61,6	61,6
Poisson-szám, μ	0,3	0,26	0,31	0,33	0.4	0.4
Folyáshatár, $\sigma (MPa)$	205	-	70-90	24	35-45	35-45
Törési szilárdság (MPa)	505-700	200-400	210-220	41	50-70	50-70

A modell pelletei között a szomszédos sor- illetve oszloppárok távolsága 0,5 mm.

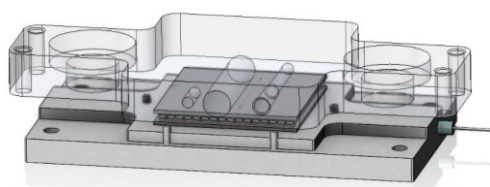


a)



b)

Hideg oldal $T_h = 20C^\circ$



c)

Meleg oldal $T_m = 45C^\circ$

38. ábra a) Az összeszorító elemek: alsó elem, pirossal jelölve a TE-modul helye (bal oldal) és a felső elem (jobb oldal) , b) Az összeszerelt konstrukció a két alumínium elemmel együtt, c) a beszerelt TE modul

28. táblázat A modellezett TE-modul (Quick-Cool Quick-Ohm QC-127-1,4-8,5MS) alkotóelemeinek méretei

Szerkezeti elemek	Hosszúság (mm)	Szélesség (mm)	Magasság(mm)
1 Félvezető pelleték, n és p típusú (Bi_2Te_3)	1,4	1,4	0,6
2 Forrasztó réteg, $SnPb$	1,4	1,4	0,15
3 Réz (Elektromos vezető), Cu	3,3	1,4	0,45
4 Kerámia, (Elektromos szigetelő), Al_2O_3	40	40	0,8

A TE-modul viselkedésének numerikus szimulációjához két merev felület közé helyeztük a TE modult a számítások elvégzéséhez. A főkonstrukcióba való illeszkedést szemlélteti a 38. ábra.

Terhelésként az előírt, illetve a szükséges összeszerelési erőből adódó mechanikai nyomásértékek kerültek megadásra, az alkalmazott csavarok és alátétek vonatkozó felületén felvéve.

A vizsgált thermoelektromos TE-modul esetében az alumínium-oxid kerámia hordozó felületére a meleg oldalon, a TE-modul gyártója által ajánlott 14 kg/cm^2 nyomóterhelést alkalmaztam.

A TE-modul konstrukciós modellezése során, az alumínium-oxid kerámia és a közrefogó felületek között a csúszó érintkezés miatt az érintkezést $0,6$ súrlódási együtthatóval jellemeztem. A numerikus szimulációkhoz 20°C hőmérsékletkülönbséget írtam elő a TE-modul külső alumínium-oxid felületein, a hideg oldali felületet 20°C -on tartva, a meleg oldalon 45°C -ot alkalmazva..

A TE-modulra vonatkozóan mutatjuk be az elemzett eredményeket, hogy szemléltetve legyen az összes releváns mechanikai viselkedés és elmozdulás az előírt összeszorító erő alkalmazása közben. Üzemi körülmények között, a hőmérsékletváltozások hatására a pelletekben tovább fokozódik a terhelés, mivel akadályozott a TE-modul hőtágulása, a merev felületek által kifejtett nyomás miatt.

8.3.2. A terhelések során fellépő feszültségek és elmozdulások

A 29. táblázat és a 30. táblázat által bemutatott szimulációs eredményekben a pelletekben ébredő von Mises-feszültség és az elmozdulások maximális és minimális értékeit adjuk meg 20°C hőmérséklet különbség és 14 kgf összeszorító terhelőerő esetén.

Az eredmények alapján elmondható, hogy a maximum feszültség nem mindig ugyanabban a pellet elemekben található (39. ábra-40. ábra), de mindig egy pellet sarkánál, a forrasztanyaggal való érintkezési pontnál. A hőmérsékleti intervallum csökkentésével a maximális feszültség szint is csökken.

Ezt a TE-modul viselkedést a forrasztási ötvözet okozza, amely képlékeny alakváltozáson megy keresztül, ha a feszültség szintje meghaladja a folyáshatárt. Ez a deformáció csökkenti a pelletekben ébredő feszültségeket. Tehát, ha a mechanikailag ellenállóbb Sn-Sb forrasztási ötvözet helyett Pb-Sn ötvözet került volna felhasználásra, a folyáshatára kisebb lenne, és a TE-modul pelletjeiben a maximális feszültség szint tovább csökkenne.

A kerámia felülethez közeli réz elemek sarkainál lokálisan nagy feszültségű régiók vannak, mivel ezeken a területeken nagy feszültségi gradiensek alakulnak ki, a réz és a pellet hőtágulási együtthatói közötti különbség miatt. Ezen túlmenően a feszültség csökken a nagy igénybevételnek kitett tartománytól egészen a szorító elem alapfelületéig.

8.3.3. Eredmények összegzése

Jelen kutatás a TE-modulok szerkezeti integritásának javításának megvalósíthatóságát vizsgálta. Ebből a célból végelelemes analízist végeztünk, ahol a deformáció jelentős növekedést eredményez nagy hőmérsékleti gradiensek esetén, tehát javasolható, hogy a TE-modul csillapító rugóval legyen beépítve, csökkentve az általános konstrukció elemeiben ébredő feszültségeket, ami lehetővé teszi a TE-modul élettartamának meghosszabbítását. A TE-modulok összeszereléskor a megfelelő szorító erő biztosításához 16x8x25 mm méretű AISI L2 (Inconel) anyagú huzalrugót alkalmaztunk (ISO-10243). A modelleknél a csillapítórugó alkalmazásával a feszültségek és a teljes deformáció jelentős csökkenése volt megfigyelhető, alacsonyabb von Mises feszültségekkel, nyírófeszültségekkel és kisebb TE-modul teljes alakváltozással. A maximális feszültségek minden esetben a rézelemek széle körül, a kerámialemez közelében jelentkeztek. A sarokzónák körüli magasabb feszültség szinteket a feszültségkoncentrációk okozták. A feszültség eloszlás a TE-modul keresztmetszeti területein egyenletesen változik.

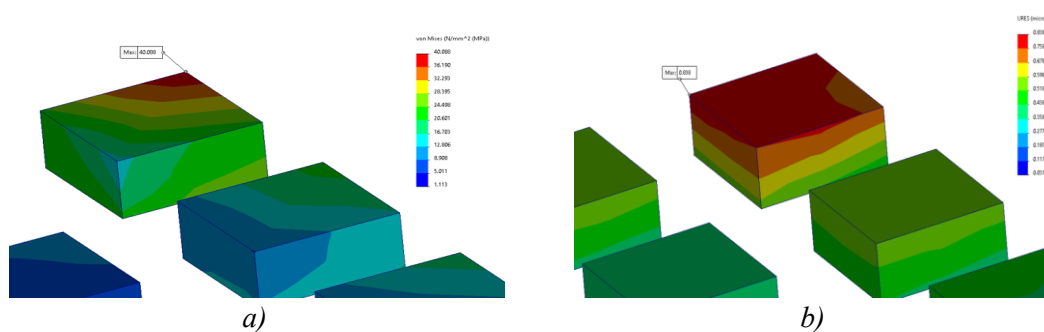
29. táblázat A pelletekben ébredő elmozdulások (mm) a TE-modulban

20°C hőmérséklet különbség esetén a meleg és a hideg oldal között

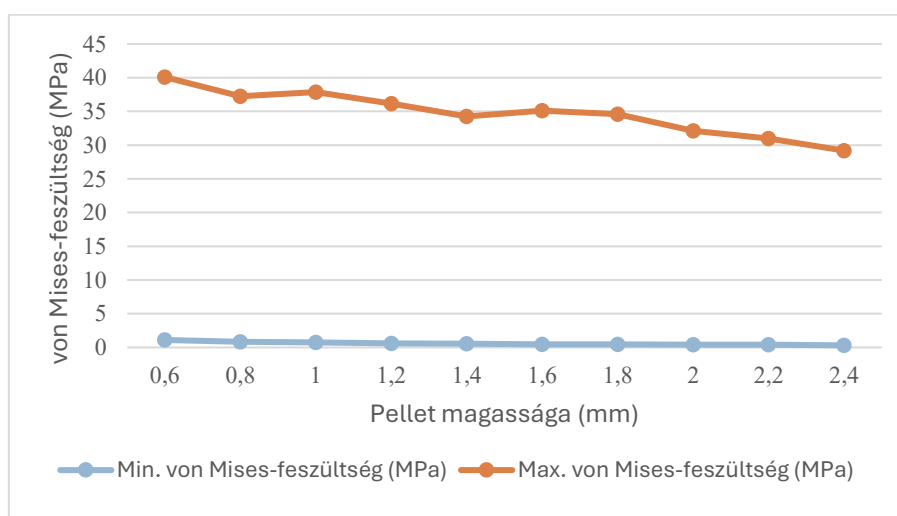
Pellet magasság L (mm)	Max. elmozdulás (mm)	Min. elmozdulás (mm)
0,6	0,838	0,0372
0,8	0,896	0,0374
1	0,948	0,0368
1,2	1	0,0361
1,4	1,04	0,0326
1,6	1,1	0,0307
1,8	1,15	0,0295
2	1,19	0,0252
2,2	1,22	0,0233
2,4	1,26	0,0219

30. táblázat A pelletekben ébredő von Mises feszültség (MPa) a TE-modulban
20°C hőmérséklet különbség esetén a meleg és a hideg oldal között

Pellet magassága (mm)	min. von Mises fesz. (MPa)	max. von Mises fesz. (MPa)
0,6	1,113	40,088
0,8	0,856	37,237
1	0,767	37,855
1,2	0,599	36,183
1,4	0,574	34,278
1,6	0,483	35,101
1,8	0,467	34,587
2	0,418	32,106
2,2	0,437	30,972
2,4	0,312	29,195



39. ábra A pelletekben ($L=0,6$ mm) ébredő a) von Mises feszültség és b) az elmozdulás a TE-modulban 20°C hőmérséklet különbség esetén a meleg és a hideg oldal között



40. ábra A pelletmagasság hatása a von Mises-feszültségre ($\Delta T = 20$ °C, $F = 14$ kgf)

8.4. A TERVEZÉSI KONCEPCIÓK RANGSOROLÁSA

Az eredmények alapján elmondható, hogy a változó pelletmagassággal a tervezési koncepciókban csökkenthető a maximális feszültség szint és a teljes elhajlás a geometriai kialakítás változtatásával, és ennek megfelelően javulhat a TE-modul mechanikai teljesítménye és élettartama. A pelletmagasság hatását mutatja be a von Mises-feszültségre a 40. ábra. Az intervallum alapú célértékes VIKOR kiválasztási módszer segítségével a tervezési koncepciók mindegyik jellemzőjére megadhatunk egy intervallumot, amely leírja, hogy az adott koncepció adott jellemzője milyen értékek között mozog. A cél, a kritériumok alapján a legmegfelelőbb koncepció kiválasztása, illetve a koncepciók között egy rangsor felállítása, hogy melyik mennyire felel meg. A VIKOR módszer alkalmazása ebben az esetben lépésről lépésre az alábbiak szerint történik:

1. lépés: A legkedvezőbb értékek (célkritérium) meghatározása minden jellemzőhöz (1. jellemző: pelletekben ébredő von Mises feszültség, (MPa); 2. jellemző: pellet tömege, (g); 3. jellemző: pellet elmozdulása, (mm); 4. jellemző: pellet térfogata, (mm^3); 5. jellemző: pellet felülete, (mm^2); 6. jellemző: pellet magassága, (mm); 7. jellemző: pelletekben ébredő teljes alakváltozási energia). Jelen esetben egy 11 pontos skálát (31. táblázat) használunk a kvalitatív tulajdonságok megjelenítésére, valamint a nyelvi kifejezések megfelelő számokká alakítására. Az így átskálázott értékek egyenértékűen használhatók a döntési mátrix numerikus elemeiként, azaz: $x_{ij}^* = f(L_{ij})$ ahol x_{ij}^* a nyelvi változóból származtatott numerikus érték, a $f(\cdot)$ pedig a fenti 11 pontos skála alapján rendeli hozzá a számértéket.

Ez az eljárás lehetővé teszi, hogy a döntéshozatal során a szubjektív szakértői véleményeket reprodukálhatóan lehessen kezelni továbbá, hogy a nyelvi kategóriák objektív súlyozásává alakuljanak, illetve, hogy minden attribútum közös skálára vetíthető legyen. Így alkalmazhatóvá válnak a kvantitatív döntéstámogató modellek, így a VIKOR számításai során.

8.4.1. Az értékeléséhez használt jellemzők értéke 11 pontos skálán

A 31. táblázat a [57] Jahan et al., Multicriteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials, 5. fejezet, 5.8. táblázata alapján készült.

31. táblázat Az értékeléséhez használt jellemzők értéke 11 pontos skálán

Verbális érték (minőségi osztályozás)	Súlyérték
Kivételesen alacsony	0,045
Rendkívül alacsony	0,135
Nagyon alacsony	0,255
Alacsony	0,335
Átlag alatti	0,410
Átlagos	0,500
Átlag feletti	0,590
Magas	0,665
Nagyon magas	0,745
Nagyon magas	0,865
Kivételesen magas	0,955

2. lépés: A szubjektív súlyozások, amelyek módosított digitális logika (MDL) alapján számítunk. Az MDL módszernél a skála a súlyozott jellemzők pontszáma 1, 2 vagy 3: egy (1) kevésbé fontos jellemzőkhöz, kettő (2) azokhoz az jellemzőkhöz, amelyek egyformán fontosak, és három (3) az olyan jellemzők esetében, amelyek fontosabbak a többinél. (32. táblázat)

8.4.2. A kritériumok relatív súlyainak meghatározása a Modified Digital Logic (MDL) módszerrel

A MÓDSZER CÉLJA

A döntési kritériumok fontossági rangsora alapján, azokhoz objektív súlyértékeket rendeljen.

2. BEMENETEK

Legyen m darab döntési kritérium.

$$P_j \in \mathbb{N}^+, j = 1, 2, \dots, m \quad (92)$$

ahol a nagyobb érték nagyobb fontosságot jelent (pl. 1 – 10 skálán).

A RELATÍV SÚLYOK KISZÁMÍTÁSA

A relatív súly minden kritériumhoz a következő módon számítható:

$$w_j = \frac{P_j}{\sum_{i=1}^m P_i}, \quad 1, 2, \dots, m \quad (93)$$

ahol, P_j az adott kritériumhoz rendelt fontosság, $\sum_{i=1}^m P_i$ az összes kritérium fontossági pontszámának összege, $w_j \in [0,1]$ az adott kritérium normalizált súlya, $\sum_{i=1}^m w_j = 1$, azaz a súlyok összege egységnyi. [57]

A feltett kérdés az, hogy melyik jellemző jobban fontos a cél alternatíva kívánt eredményéhez: az A jellemző vagy B jellemzők? A lehetséges döntések teljes száma (páronként összehasonlítások) N , az alábbi képlettel számítható:

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (94)$$

ahol n a figyelembe vett jellemzők száma. Az egyes kombinációk összehasonlítása és egy bináris pontszám hozzárendelése után az eredményeket mátrixformába helyezzük és az egyes tulajdonságokra vonatkozó pozitív döntések számát (azaz „1-es” értékkel) összeadjuk, és súlyozást kapunk. A tényező, w_j kiszámítása az alábbi képlettel írható le:

$$\sum w_j = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (95)$$

A 33. táblázat mutatja be az egyes jellemzők összehasonlításának eredményét, a jellemzőkhöz tartozó célértékeket és relatív fontosságukat a 34. táblázat mutatja be. Az értékeléshez alkalmazott, illetve a szimulációk során kapott jellemzők értékeit mutatja be a 35. táblázat.

3. lépés: A reális döntéshozó optimizmusának $v=0,5$ értéke alapján a jellemzők rangsorolásával kapott eredményt a 36. táblázat 16. táblázat mutatja be. Az ismertetett eredmények azt mutatják, hogy a 1 mm magas pellettel kialakított koncepció kapta a legmagasabb helyezést, és a 0,6 mm, illetve az 1,2 mm magas pellettel megvalósított

tervezési koncepciók voltak a további legjobb tervek, azaz ezek a tervezési koncepciók közel álltak az ideális megoldáshoz a VIKOR módszer alapján.

32. táblázat Az egyes kombinációk összehasonlítása

Jel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Össz.	Fontosság, w_j
1	1	1	1	1	1	1																6	0,071
2	3						1	2	1	1	1											9	0,107
3		3					3					3	1	1	1							12	0,142
4			3					2								1	1	1				9	0,107
5				3				3								3			1	2		15	0,178
6					3					3							3		3		2	17	0,202

33. táblázat Az egyes jellemzők értékelése

Jellemző	Összesen	Fontosság, w_j
1. Pelletben ébredő von Mises feszültség (MPa)	6	0,071
2. Pellet tömege (g)	9	0,107
3. Pellet elmozdulása (mm)	12	0,142
4. Pellet térfogat (mm^3)	9	0,107
5. Pellet felülete (mm^2)	15	0,178
6. Pellet magassága L (mm)	17	0,202
7. Pelletben ébredő teljes alakváltozási energia	16	0,190

34. táblázat A jellemzők relatív fontosságának meghatározása

Jellemző	1	2	3	4	5	6	7
Fontosság, w_j	0,071429	0,1071429	0,1428571	0,1071429	0,1785714	0,202381	0,190476
Célérték, T_j	0,6	7,28	1,18	0,01	0,312	0,0219	1,2117
Max., $x_j^u max$	2,4	17,36	4,7	0,03	40,088	1,26	2,4016
Min., $x_j^l min$	0,6	7,28	1,18	0,01	0,312	0,0219	1,2117

8.4.3. Összefoglalás

A korábbi publikációink [86], [87] az intervallum alapú célértékes VIKOR döntési módszerre koncentráltak. Ez a tanulmány szisztematikus elemzéssel egészíti ki a fentieket, ugyanakkor a döntéshozói folyamatot két különböző támogató módszerre alapozza.

Megállapítottam, hogy a legjobban teljesítő tervezési koncepciónál a TE modulban a pelletek keresztmetszete közelebb került az optimális arányhoz, nőtt a pellet magasság és csökkent az érintkezési ellenállás.

35. táblázat Az értékeléshez alkalmazott, illetve a szimulációk során kapott jellemzők értékei

Pellet Magasság a L (mm)	Pellet Felület e (mm ²)	Pellet Térfogat a (mm ³)	Pellet Tömeg e (g)	Teljes alakváltozási energia Max.	von Mises feszültség Max. (MPa)	von Mises feszültség Min. (MPa)	Pellet Elmozdulás Max. (mm)	Pellet Elmozdulás Min. (mm)
0,6	7,28	1,18	0,01	1,58E-06	40,088	1,113	0,838	0,0372
0,8	8,4	1,57	0,01	2,06E-06	37,237	0,856	0,896	0,0374
1	9,52	1,96	0,01	1,21E-06	37,855	0,767	0,948	0,0368
1,2	10,64	2,35	0,02	1,35E-06	36,183	0,599	1	0,0361
1,4	11,76	2,74	0,02	1,33E-06	34,278	0,574	1,04	0,0326
1,6	12,88	3,14	0,02	1,52E-06	35,101	0,483	1,1	0,0307
1,8	14	3,53	0,02	1,60E-06	34,587	0,467	1,15	0,0295
2	15,12	3,92	0,03	1,57E-06	32,109	0,418	1,19	0,0252
2,2	16,24	4,31	0,03	2,40E-06	30,972	0,437	1,22	0,0233
2,4	17,36	4,7	0,03	2,38E-06	29,195	0,312	1,26	0,0219

36. táblázat A jellemzők szerint kialakult rangsor

Súlyozás	0,5	Optimizmus	0,5				
Pellet magasság L (mm)	S_i^L	S_i^U	R_i^L	R_i^U	Q_i^L	Q_i^U	Rangsor
0,6	0,064797	0,3706723	0,3081772	1	0,0552567	0,6730919	2
0,8	0,176903	0,4805804	0,7153542	0,9283236	0,380453	0,6892103	7
1	0,075817	0,3912661	0,2222222	0,9438606	0,0062357	0,6486562	1
1,2	0,185655	0,5029667	0,5	0,9018252	0,2469637	0,6848438	3
1,4	0,218479	0,534461	0,5	0,853932	0,2655384	0,6718777	4
1,6	0,283913	0,614117	0,5568182	0,8746229	0,3390932	0,7302556	5
1,8	0,332329	0,668666	0,6676136	0,9111542	0,4377167	0,7846088	6
2	0,415764	0,7484379	1	1	0,698609	0,8868662	9
2,2	0,584168	0,9168668	1	1	0,7939075	0,9821786	8
2,4	0,61631	0,9483594	1	1	0,8120963	1	10

Összességében elmondható, hogy a javasolt módszertan a konstrukciós folyamat kezdeti szakaszában a TE-modul tervezési koncepcióiban a konstrukciós geometria, jelen esetben a pelletek méretének megváltoztatására tett javaslatok VIKOR módszerrel támogatott kiválasztási értékelése meggyorsítja és segítheti a hosszabb élettartalmú konstrukciók tervezési folyamatát.

8.4.4. Tézisek (4)

4. Tézis

VÉGESELEMES ÉS VIKOR ALAPÚ TÖBBKRITÉRIUMOS ELEMZÉS A TERMOELEKTROMOS MODULOK KONSTRUKCIÓS OPTIMALIZÁLÁSÁRA

A bizmut tellúrid (Bi_2Te_3) alapú termoelektromos pellet geometriai paramétereinek (különösen a magasságának) megváltoztatása jelentős hatással van a von Mises feszültség csökkentésére a TE-modulban.

A végeselemes szimulációk szerint a pellet magasságának növelésével akár 27%-os (40,08 MPa-ról 29,2 MPa -ra) feszültségcsökkenés érhető el.

A különböző anyagok eltérő hőtágulási együtthatója (CTE) helyi feszültségkoncentrációkat eredményez a TE-modul kritikus csomópontjain (pl. $Cu - SnPb - Bi_2Te_3$ csomópont), ami a fáradási hibák fő oka.

Ez a jelenség különösen a TE-modul sarkainál figyelhető meg a rézlemezek és pelletek találkozásánál.

A VIKOR döntéstámogató módszer alkalmazása lehetővé teszi a TE-modul geometriai konfigurációinak objektív összehasonlítását több szempont alapján.

A 7 szemponton alapuló értékelés szerint a mechanikai és termikus szempontok súlyozott egyensúlya alapján az 1 mm-es pelletmagasság koncepció a legkedvezőbb.

A konstrukciós modellekben a pellet keresztmetszetének és tömegének optimalizálásával a von Mises-féle feszültség, és az elmozdulás, illetve az alakváltozási energia csökkenthető, miközben a TE-modul elektromos jellemzői nem romlanak jelentősen.

A végeselemes szimuláció alapú mechanikai modell nemcsak a von Mises-feszültség becslésére alkalmas, hanem a élettartam-modellezések alapjául is szolgál.

A szimulációk eredményei azt mutatják, hogy a termoelektromos TE-modul geometriai optimalizálása a kezdeti tervezési szakaszban csökkentheti a termomechanikai repedések előfordulását, ezáltal meghosszabbítja a TE-modul élettartamát az orvosi és ipari alkalmazásokban.

8.5. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

[AJ 2] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 21: 12 pp. 217-229., 13 p. (2024) 10.12700/APH.21.2.2024.2.12, Q2

[AJ 11] Albert, Judit; Takács, Ágnes, Optimalizálási módszer termoelektromos modulok szerkezeti tervezéséhez, GÉP 73. 3-4.: 11-14 pp. 11-14., 4 p. (2022)

[AJ 12] Albert Judit: OPTIMIZATION OF THE DESIGN PROCESS OF A PELTIER MODULE (2022), Doktoranduszok Fóruma, 2022.11.18., Angol nyelvű konferenciaelőadás

[AJ 14] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Termoelektromos Peltier-modulok optimalizálási módszertana szerkezeti tervezéshez és anyagválasztáshoz, In: Vadászné Bognár, Gabriella; Piller, Imre (szerk.) Doktoranduszok fóruma: Miskolc, 2022. november 1717.:

Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa, Miskolc, Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Igazgatóság (2024) 105 p. pp. 15-25., 11 p.

[AJ 16] Optimization of the Design process of a Peltier module (2022), Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11., Angol nyelvű konferencia előadás

[AJ 19] Albert Judit: Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling, Emerson 7th Agria Conference on Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions (InnoVeTAS 2023), Continue in New World, Eger, Hungary, 2023. április 27., Angol nyelvű konferencia előadás

9. TÖMÍTŐRENDSZER OPTIMALIZÁLÁSA

9.1. A KUTATÁS MÓDSZERTANA

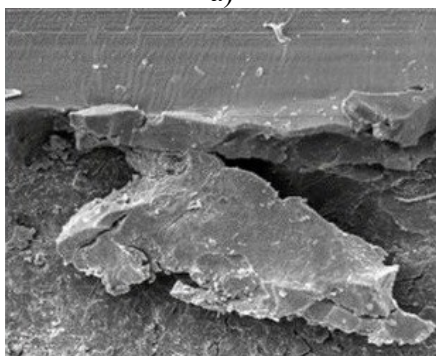
A polimer O-gyűrűs tömítések a leggyakrabban használt tömítési megoldások közé tartoznak a pneumatikus és hidraulikus rendszerekben. Az O-tömítőgyűrűk mechanikai tulajdonságai és alkalmazási területeinek megfelelő ismerete döntő fontosságúak a tömítés hatékonyságában. [119]



a)



b)



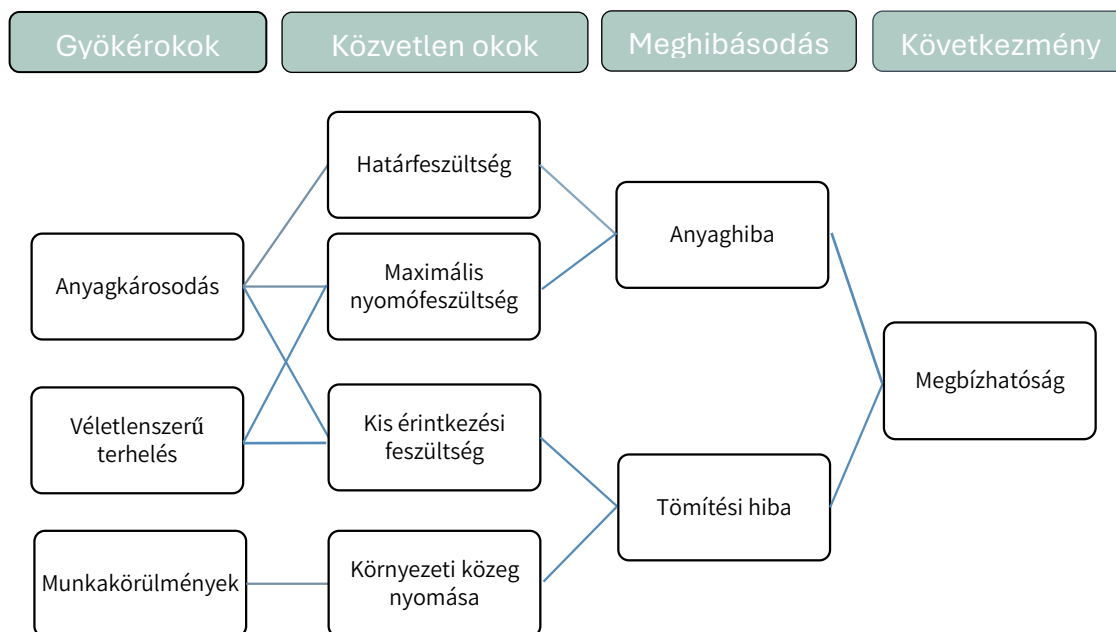
c)



d)

41. ábra Az O-tömítőgyűrű a) horonyba helyezett O-gyűrű fotója, b) az O-tömítőgyűrű horony hézag extrudálódása [120] c) A gumigyűrű kopásának részlete egy statikus fémgűrűn (50 x-es nagyítás) [121], d) O-gyűrű metszeti keresztmetszetének fényképe kompressziós sérüléssel [122]

Az O-gyűrű horony egyik leggyakoribb alakja egy lekerekített élű téglalap alakú horony. Ez a kialakítás lehetővé teszi az egyszerű telepítést és az O-gyűrű mindhárom oldalán az egyenletes összenyomást, amelyek a tömszelencével érintkeznek. Az érintkezési felület csökkentése növelheti a gumigyűrűk kopásállóságát, késleltetheti kopásukat és öregedésüket, ezáltal javítva élettartamukat. [122] A vegyipari szenzorokban ugyanúgy kulcsfontosságú a tömítési hatékonyság biztosítása, amely nagy kihívást jelent a magas nyomással szembeni ellenálló konstrukció létrehozásában. Az O-gyűrűs tömítések gyakori meghibásodási okait és magyarázatukat mutatja be a 41. táblázat. Az O-gyűrűs tömítési rendszerek gyakori meghibásodási okai és kiváltó tényezőit mutatja be a 41. ábra és a 42. ábra.



42. ábra A megbízhatóságot befolyásoló tényezők [119]

Az O-gyűrűk optimális működése szempontjából a horony mélységének és szélességének pontos tervezése elengedhetetlen. Ezeket úgy kell megtervezni, hogy az biztosítsa az O-tömítőgyűrű megfelelő elmozdulását és deformációját terhelés alatt, anélkül, hogy az túlzottan összenyomódna vagy sérülne. (41. ábra) A tömítési teljesítményt a szakirodalom szerint a tömörítési arány, a horonykitöltés és a szerelési nyúlás mértéke határozza meg. [123]

9.1.1. Tömörítési arány optimalizálása

Amint a 44. ábra szemlélteti, az O-tömítőgyűrűk tömörítési aránya (ε) fontos paraméter a tömítőtöljesítmény és a tömítőgyűrűk élettartamának növeléséhez. (46. ábra) A tömörítési arány a tömítőgyűrűk keresztmetszeti átmérőjének kompressziója, jelen esetben és a keresztmetszeti átmérő közötti aránya. (37. táblázat) A következő képlettel fejezhető ki:

$$\varepsilon = \frac{d_{O-gyűrű} - h_{horony}}{d_0} \cdot 100\% \quad (96)$$

ahol ($d_{O-gyűrű}$ O-gyűrű összenyomásának százalékos értéke, az O-gyűrű szabad keresztmetszeti átmérője (nem terhelt állapot), a h_{horony} a horony aljától a tömítőfelületig mért távolság (az összenyomott keresztmetszeti magasság). A szakirodalom szerint a statikus tömítéseknél a 20–35% közötti összenyomás az elfogadható érték. Az O alakú tömítőgyűrűk tömörítési arányának kiválasztásának fő tényezői a következők:

- biztosítson elegendő érintkezési nyomást a tömítőfelületeken,
- a súrlódásnak a lehető legkisebbnek kell lennie,
- kerülje a maradandó torzulást.

A tömítőtöljesítmény mérésének és értékelésének alapvető mutatója a tömítőfelületeken ható érintkezési nyomás.

37. táblázat Az O-tömítőgyűrű ajánlott tömörítési arányai

Tömítési típus	Tömítő közeg	Összenyomási arány (%)
Statikus tömítés síkfelületen	Olaj/levegő	10–30
Statikus tömítés hengeres felületen	Olaj/levegő	10–15

9.1.2. Horonykitöltés optimalizálása

A szakirodalom szerint a statikus O-tömítőgyűrűs tömítéseknel a 75–85% horonytöltöttség és 15–25% szabad tér az elfogadható. (38. táblázat) Számítása:

$$\varepsilon = \frac{V_{O-gyűrű}}{V_{horony}} \cdot 100\% \quad (97)$$

ahol $V_{O-gyűrű}$ az O-tömítőgyűrű térfogata, V_{horony} pedig a horony térfogata.

(1.) Az O-tömítőgyűrű térfogata

Az O-tömítőgyűrű metszete kör, ennek térfogata ($V_{O-gyűrű}$):

$$V_{O-gyűrű} = \pi \left(\frac{d_{O-gyűrű}}{2} \right)^2 \cdot L \quad (98)$$

ahol,

L a kör alakú O-tömítőgyűrű tengely menti hossza, azaz a kerület:

$$L = \pi \cdot D_{belső} \quad (99)$$

azaz:

$$V_{O-gyűrű} = \pi \left(\frac{d_{O-gyűrű}}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot D_{belső} = \frac{\pi^2}{4} \cdot d^2 \cdot D_{belső} \quad (100)$$

Ez a térfogat jellemzi a rugalmas tömítőgyűrűt.

(2.) A horony térfogata

A téglalap alakú horony méretei a horony szélesség, és H a horony mélysége, tehát

$$V_{horony} = W \cdot H \cdot L = W \cdot H \cdot \pi \cdot D_{belső} \quad (101)$$

(3.) A kitöltési arány

$$V_{horony} = \frac{\pi \cdot d_{O-gyűrű}^2}{4 \cdot W \cdot H} \cdot 100 \quad (102)$$

ahol $d_{O-gyűrű}$ a O-tömítőgyűrű keresztmetszet átmérője, W a horony szélessége, H a horony mélysége.

38. táblázat A horonykitöltés ajánlott arányai

Értékek	Ajánlott értékek (%)
Optimális kitöltés	75-85
Maximum elfogadható érték	95

9.1.3. O-gyűrű nyúlás optimalizálása

O-tömítőgyűrű belső átmérőjéhez képesti nyúlás (39. táblázat):

$$\varepsilon_{\%} = \frac{D_{horony} - D_{O-gyűrű,belső}}{D_{O-gyűrű,belső}} \cdot 100\% \quad (103)$$

ahol $\varepsilon_{\%}$ a szerelés alatti megnyúlás százalékban, D_{horony} a horony átmérője, amelyre az O-tömítőgyűrűt ráfeszítik és $D_{O-gyűrű,belső}$ az O-gyűrű belső átmérője szerelés előtt.

39. táblázat A nyálás ajánlott arányai

Alkalmazás típusa	Ajánlott értékek (%)
Statikus tömítés	0-5
Ideális érték	0-2

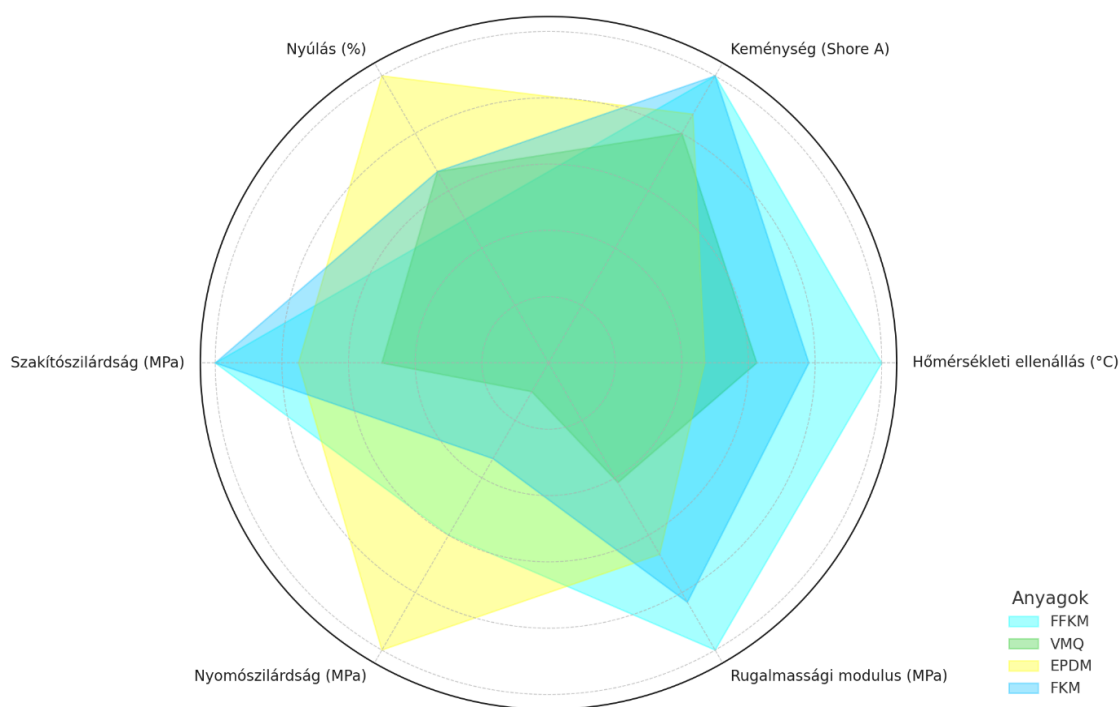
9.2. A FIZIKAI MODELL FELÉPÍTÉSE

9.2.1. Anyagtulajdonságok

A polimer O-tömítőgyűrűk különböző anyagokból készülhetnek, mint például NBR (nitril-butadién gumi), FKM (fluor-kaucsuk) és EPDM (etilén-propilén-dién monomer gumi) (43. ábra), amelyek kiválasztása az alkalmazás specifikus kémiai és fizikai követelményeitől függ. [124] [125] (42. táblázat)

9.2.2. A numerikus szimulációban használt peremfeltételek és paraméterek

A vizsgált esetben szenzortömítések hornyainak optimalizálását végeztük el. A szenzor két darab O-tömítőgyűrűt tartalmaz, amelyek paramétereit és a szenzorban való elhelyezkedésüket a 46. ábra szemlélteti. A szenzor befoglaló maximális méretei 18 mm x 9 mm, az alkalmazott O-tömítőgyűrű átmérője maximálisan 14 mm, zsinórvastagsága 1 mm, a működési peremfeltételek 85°C hőmérséklet és 8 bar nyomás volt. Az O-tömítőgyűrűk méretezése, beleértve a belső és keresztmetszeti átmérőt, kritikus a megfelelő tömítés biztosításához. A horony, amelyben az O-tömítőgyűrű elhelyezkedik, szintén kulcsfontosságú az optimális tömítési teljesítmény szempontjából. (46. ábra)



43. ábra Az egyes O-tömítőgyűrű anyagok tulajdonságainak összehasonlítása

9.2.1. A O-tömítőgyűrű tömörítési arányának elemzése

Az elemzés során a horony méreteit és a kitöltési tényezőt vizsgáltuk. Az eredeti ferde horony méretei ($a = 0,83$ mm, $b = 1$ mm, $c = 0,251$ mm, $d = 1,155$ mm) egy $0,54$ mm² területű hornyot eredményeztek, amely 145,2%-os horony-kitöltési tényezőt mutatott. Az új változat kisebb méretekkel ($a = 0,63$ mm, $b = 1,17$ mm, $c = 0,63$ mm, $d = 1,17$ mm) egy $0,7956$ mm² területű hornyot eredményezett, amely 98,67%-os horony-kitöltési tényezőt mutatott. A kitöltési tényező hatását vizsgálva az eredeti horony-kitöltési tényező jóval meghaladta a 100%-ot (145,2%), ami azt jelzi, hogy a horony túl szűk volt az O-tömítőgyűrű számára, és túlzott mértékű összenyomódást eredményezett.

40. táblázat A kompressziós arány elemzése során kapott eredmények

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

Ez károsan befolyásolhatja a tömítés hatékonyságát és élettartamát, mivel a túlzott összenyomás növeli az O-tömítőgyűrű anyagának kopását és deformációját.

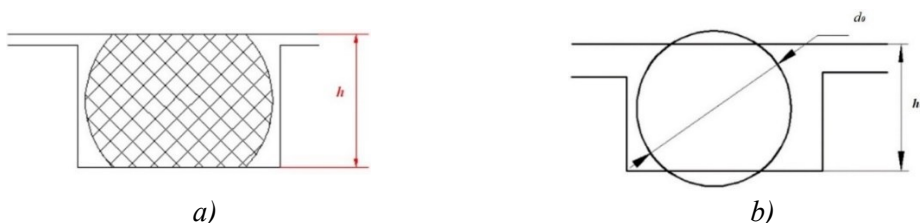
9.2.1. Az eredmények értékelése

Az új változat 98,67%-os horony-kitöltési tényezője közel áll az ideálshoz (100%), ami azt jelenti, hogy az O-tömítőgyűrű jobban illeszkedik a horonyba, megfelelő kompresszióval.

Ez optimális tömítési teljesítményt és hosszabb élettartamot biztosít. A javított tervezés előnyei közé tartozik, hogy az új horony méreteinek és a kitöltési tényező optimalizálása révén a tömítési rendszerek megbízhatósága és hatékonysága jelentősen javul. A közel 100%-os kitöltési tényező biztosítja, hogy a tömítés megfelelően működjön, csökkentve a karbantartási igényeket és növelve az üzemidőt. A végeselemes modellezés eredményei alátámasztják, hogy a horony méreteinek és a kompressziós aránynak az optimalizálása elengedhetetlen a tömítési mechanizmusok hatékonyságának javításához. Összességében az új horony tervezése jelentős előnyöket kínál a tömítési rendszerek megbízhatósága és élettartama szempontjából, mivel a megfelelő méretek és a közel optimális horony-kitöltési tényező hozzájárulnak a hatékony és tartós tömítési teljesítmény eléréséhez.

41. táblázat Az O-tömítőgyűrűs tömítések gyakori meghibásodási okai, kiváltó tényezői és magyarázatuk

Hiba mechanizmus	Leírás	Kiváltó ok
Nem megfelelő horony kialakítás	Túl nagy vagy túl kicsi összeszorító erő alkalmazása, illetve nincs elegendő hely az anyag elmozdulásához.	Helytelen horonymélység vagy hézagméret
Nem megfelelő O-gyűrű méret	Az O-gyűrű nem illeszkedik, túl feszes vagy túl laza.	Méreteltérés, nem megfelelő geometriai illeszkedés.
Túlzott összenyomás	Állandó deformáció vagy repedés.	Túlméretezett előfeszítés vagy túl mély horony.
Tekeredő torzulás	Az O-gyűrű megsérül a beépítés során (pl. csavarás, nyújtás, amely során az O-gyűrű csavarodva helyeződik be a horonyba.	Torzult beszerelési irány.
Hibás beszerelés	Éles él által okozott sérülés	Konstrukciós kialakítás.
Nem megfelelő kenés	Kopás, súrlódás, beszorulás a kenőanyag hiánya miatt.	A kenőanyag hiánya vagy nem megfelelő típusa.
Anyagkárosodás	Az anyag elveszíti mechanikai tulajdonságait (ridegedés, repedés).	Hő, vegyi reakciók.
Anyagkompatibilitási probléma	Az O-gyűrűt károsítja a környezet (közeg, gáz, vegyi anyag).	Sav, olaj, vákuum.
Kontakt stressz túl kicsi	Nem jön létre megfelelő tömítőerő.	Nem megfelelő előfeszítés, alacsony kompresszió.
Maximális nyomófeszültség túllépése	Az O-gyűrű túlterhelődik, szakad, extrudálódik a horonyból.	Nagy hő és mechanikai gradiensek



44. ábra Az O-tömítőgyűrű tömörítésének sematikus ábrája, b) a horonyba helyezett O-tömítőgyűrű [121]

42. táblázat Az O-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
Vegyi 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

9.2.1. A szimulációk eredményeinek értékelése

A végeselemes modell alkalmazása (47. ábra-50. ábra) a tömítés teljesítményének vizsgálatára és a tömítési mechanizmus részleteinek feltárására lehetőséget ad az O-tömítőgyűrű keménységének, a kompressziós aránynak és a külső nyomásnak a tömítési teljesítményre gyakorolt hatásainak elemzésére. A 10-25% kompressziós tartományban az O-tömítőgyűrű keménysége jelentősen befolyásolta a kapcsolati nyomást. Az eredmények alapján az új változat kialakítása jelentős előnyöket kínál a tömítési rendszerek megbízhatósága és élettartama szempontjából. (47. ábra-50. ábra) Az eredmények igazolják, hogy a tervezési paraméterek és módszertanok prioritizálása a horony tervezése során elengedhetetlen az optimális összenyomási arányok eléréséhez, biztosítva a hatékony tömítési teljesítményt és az O-tömítőgyűrű hosszú élettartamát.

9.1. A TERVEZÉSI KONCEPCIÓK RANGSOROLÁSA

A vizsgálat során a VIKOR módszert alkalmaztuk az alternatívák rangsorolására. (0 fejezet), (45. ábra) A VIKOR módszer a kompromisszumos megoldások rangsorolására szolgál, figyelembe véve az egyes alternatívák közötti kompromisszumokat. Az Alternatíva 4 követi az Alternatíva 3 ($b = 1,165$ mm), az Alternatíva 2 ($b = 1,16$ mm) és végül az Alternatíva 1 ($b = 1,155$ mm). Tehát az Alternatíva 4 biztosítja a legjobb tömítési teljesítményt és élettartamot, miközben minimalizálja a horonyméretet és a horony-kitöltési tényezőt. Ezáltal csökkenthetők a karbantartási költségek és növelhető az üzemidő. A végeselemes modellezés révén részletesen vizsgálhatók az egyes paraméterek hatásai, amely lehetővé teszi a tömítési rendszerek finomhangolását és optimalizálását. A megfelelő anyagválasztás és geometriai kialakítás kulcsfontosságú a tömítési rendszerek tervezésekor, különösen a kompressziós arány optimalizálása, mivel a túlzott vagy elégtelen összenyomás hátrányosan befolyásolhatja a tömítés hatékonyságát és élettartamát.



45. ábra A VIKOR-alapú döntéstámogató eljárás folyamata az O-tömítőgyűrűs tömítések optimalizálásához

Az új fejlesztések és tervezési megközelítések alkalmazásával a tömítési rendszerek nemcsak megbízhatóbbá, hanem tartósabbá is válhatnak, ezáltal csökkentve a karbantartási költségeket és növelve az üzemeltetési hatékonyságot. A végeselemes modellezés tehát elengedhetetlen eszköz a modern tömítéstechnika területén, amely hozzájárul a tömítési rendszerek folyamatos fejlesztéséhez és optimalizálásához, elősegítve a megbízhatóság és a teljesítmény növelését.

9.1.1. Összefoglalás

Az elemzések rámutattak, hogy az új tervezési változatok jelentős előnyöket kínálnak a tömítési rendszerek megbízhatósága és élettartama szempontjából. Az eredmények azt is megerősítik, hogy a tervezési paraméterek és módszertanok gondos kiválasztása a horony tervezésekor elengedhetetlen az optimális összenyomási arányok eléréséhez. Ez biztosítja a hatékony tömítési teljesítményt és az O-tömítőgyűrű hosszú élettartamát.

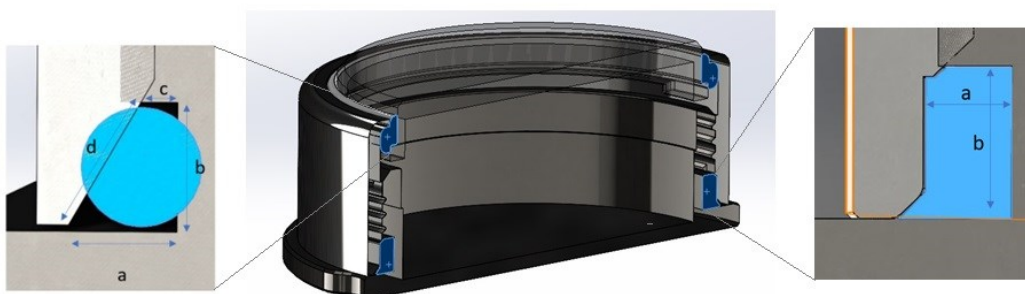
Az elemzés alapján (43. táblázat) az Alternatíva 4 ($b = 1,17$ mm, horony-kitöltési tényező = 93,9%) a legjobb választás, mivel a VIKOR módszer szerint a legkisebb Q értéket kapta. (44. táblázat)

43. táblázat Az O-tömítőgyűrű horony alternatíváinak esetében vizsgált kritériumok összehasonlítása és mennyiségi értéke

Kritérium száma	Kritérium	Fontosság	Relatív fontosság, w_j
1	von Mises stressz az 1. O-tömítőgyűrűben (MPa)	6	0,071
2	von Mises stressz a horony falában (MPa)	7	0,107
3	A horony falában ébredő deformáció (mm)	8	0,142
4	von Mises stressz a 2. O-tömítőgyűrűben (MPa)	10	0,107
5	Költség (Ft)	6	0,178
6	O-gyűrű Horonykitöltési tényezője (%)	9	0,202
7	Karbantartási igények	5	0,190

44. táblázat Az O-tömítőgyűrű horony alternatíváinak VIKOR módszerrel végzett értékelésének eredményei

Alternatíva	b mérete (mm)	Horonykitöltési tényező (%)	S érték	R érték	Q érték	Rangsor
Alternatíva 1	1,155	92,93	0,5	1	1	4
Alternatíva 2	1,16	93,2	0,7129	0,7591	1	3
Alternatíva 3	1,165	93,56	0,357	0,3807	1	2
Alternatíva 4	1,17	93,9	0	0	0	1



46. ábra Az O-tömítőgyűrűk és az alsó és felső horony mélységének (b) kapcsolata a konstrukcióban, amely meghatározza az összenyomás mértékét

9.1.2. Tézisek (5)

5. Tézis

O-TÖMÍTŐGYŰRŰS IPARI TÖMÍTÉSEK MEGBÍZHATÓSÁGÁNAK NÖVELESE TÖBBKRITÉRIUMOS DÖNTÉSI ÉS FIZIKAI SZIMULÁCIÓS MODELLEK INTEGRÁCIÓJÁVAL

A O-tömítőgyűrűk esetén a horony-kitöltési tényező optimalizálására alkalmazott végelelemes modellezés és az intervallum alapú célértékes VIKOR döntéstámogatási módszer együttesen lehetővé teszi az ipari tömítőrendszerek célorientált optimalizálását, csökkentve a karbantartási költségeket és növelve az üzemidőt. A módszertan hatékonyan támogatja a kompromisszumos, mégis optimális megoldások azonosítását. A megfelelő

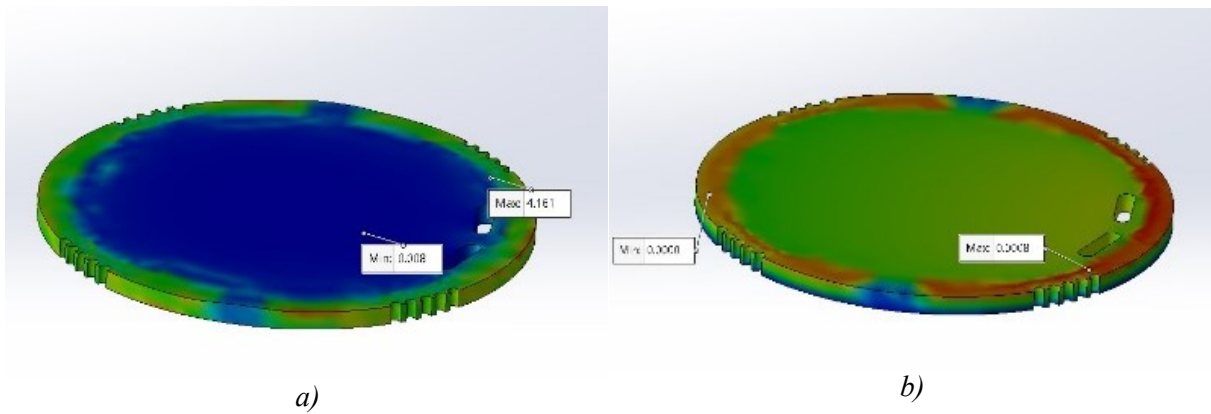
geometria paraméterek (pl. horonymélység és -szélesség) és az alkalmazási peremfeltételek együttes optimalizálásával lehetővé teszi a tömítőrendszerek ipari megbízhatóságának biztosítását

9.2. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

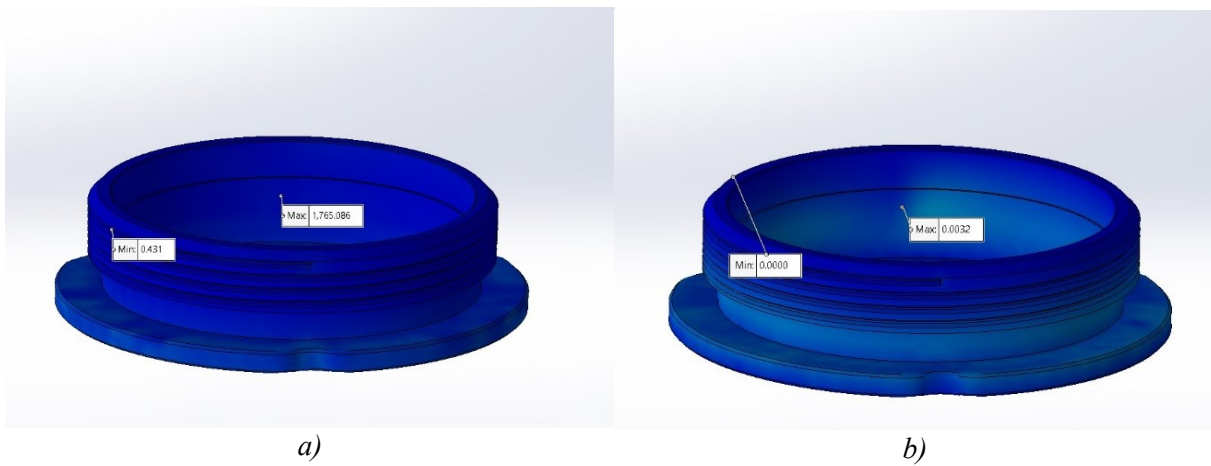
[AJ 6] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Tömítési teljesítmény optimalizálása végeselemes módszerrel és többkritériumos döntéshozatali megközelítéssel, GÉP 75: 3-4 pp. 5-9., 5 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.3-4.1

[AJ 20] Albert, Judit: Analysing the effects of the structural design of the sealing construction with Finite Elements Method, 8th Agria Conference on Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions - InnoVeTAS 2024, Hungary, Eger, május 9., Konferencia előadás angol nyelven

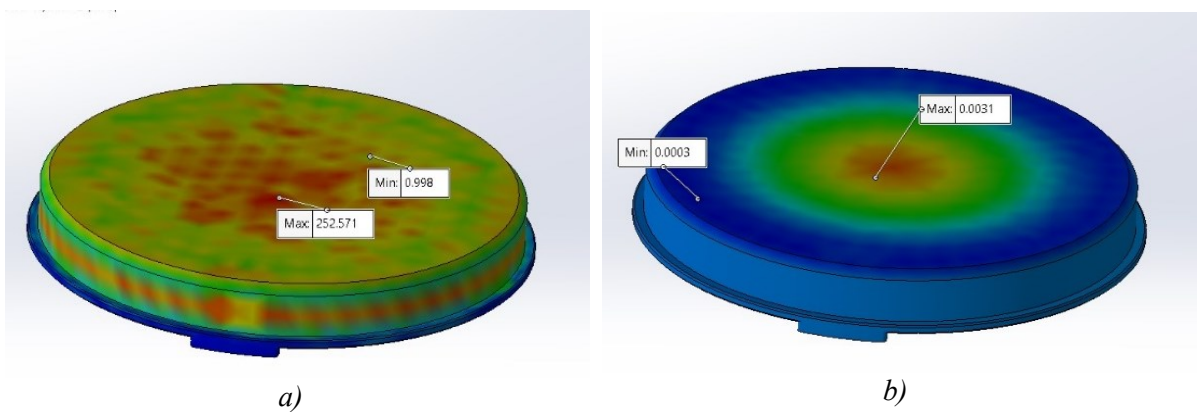
[AJ 21] Albert Judit, Takács Ágnes: Optimizing Sealing Performance with Finite Element Method and Multi-Criteria Decision-Making Approach, XL. Conference of Machine and Product Designers, Miskolc, 2024. november 7-8., Konferencia előadás angol nyelven



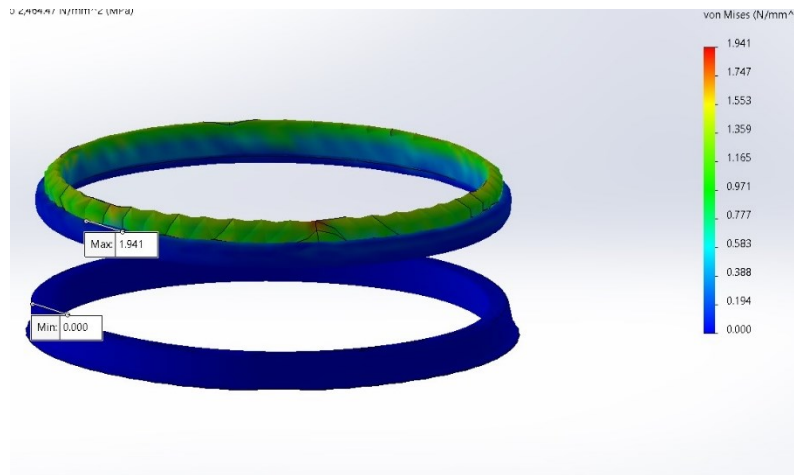
47. ábra Az adatkontaktus a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai



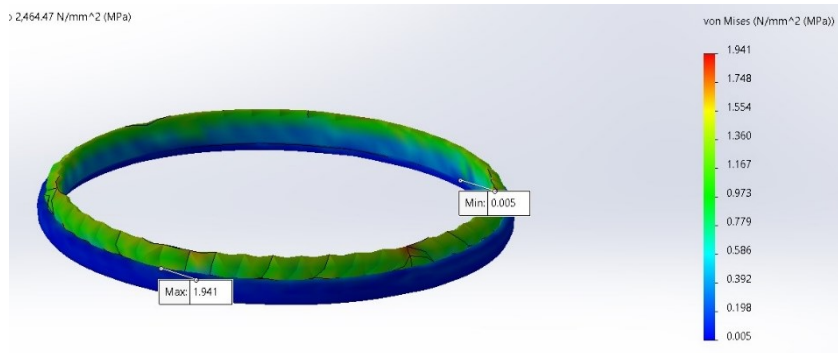
48. ábra A szenzor ház a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai



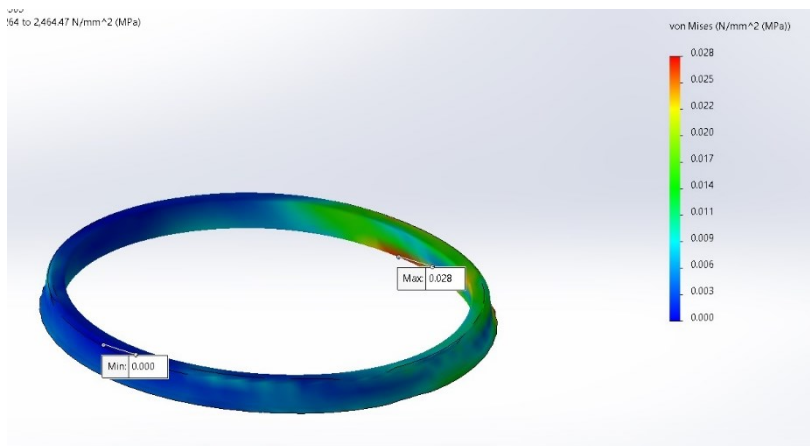
49. ábra A szenzor fedőeleme a) von Mises feszültségei, b) elmozdulásai



a)



b)



c)

50. ábra a) az O-tömítőgyűrűk von Mises feszültsége, b) felső O-tömítőgyűrű von Mises feszültsége, c) alsó O-tömítőgyűrű von Mises feszültsége

10. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A mérnöki tervezési folyamatokban a kihívás a nagyszámú és változatos követelmény és szempont kezelése, ahogyan az a tipikus mechanikai rendszerekben. A komponensek egyenkénti rögzítése, a komponensek közötti kölcsönhatások azonosítása és a relációs csoportosítások megkülönböztetése legtöbbször meghaladja egyetlen mérnök, sőt akár egy csoport képességeit is.

A jelen dolgozat különböző mérnöki diszciplínák integrálását vizsgálta a tervezési folyamatokban, és az intervallum-alapú célértékes VIKOR módszerrel új módszertani keretet dolgozott ki, az intervallumokban rejlő bizonytalanság és a döntéshozói szándékok közötti döntés segítéséhez.

A megközelítés ötvözi a klasszikus gépészeti modellezést és szimulációt modern, széles spektrumban használható döntéstámogató módszerrel. Nem pontértékű célértékekkel dolgozik, hanem rugalmas intervallumokkal, amik kellően tükrözik a tervezési gyakorlatban előforduló bizonytalanságokat és elvárásokat, melyekkel a tervező mérnök feladatai során nap mint nap szembesül. Ugyanakkor az alkalmazása még további gyakorlati integrációkat és azokban rejlő új módszertani fejlesztési lehetőségeket rejt magában.

AZ INTERVALLUM-ALAPÚ, CÉLÉRTÉKES VIKOR MÓDSZER ELŐNYEI

A dolgozat megmutatta, az intervallum-alapú célértékes VIKOR módszer gyakorlati alkalmazásának előnyeit a koncepcionális tervezési szakaszban, mi szerint:

- (1.) *Transzparens: nem rejt el az alternatívák közötti kompromisszumokat, hanem expliciten számol velük.*
- (2.) *Skálafüggetlen: a normalizáció a célértékekhez igazodik, nem torzul el a mintabeli szélsőértékektől.*
- (3.) *Döntéshozó-központú: nemcsak adatokat, hanem célokat is figyelembe vesz.*
- (4.) *Robusztusabb a klasszikus VIKOR módszerhez képest, mert jobban kezeli a minta változását és a szándékalapú döntéseket.*

JAVASLATOK A MÓDSZER ALKALMAZÁSÁRA (IPARI, ORVOSTECHNIKAI)

Az intervallum-alapú, célértékes VIKOR alkalmazása a koncepcionális tervezés során nemcsak egy elméleti innováció, hanem gyakorlati eszköz, amely alkalmas többek között:

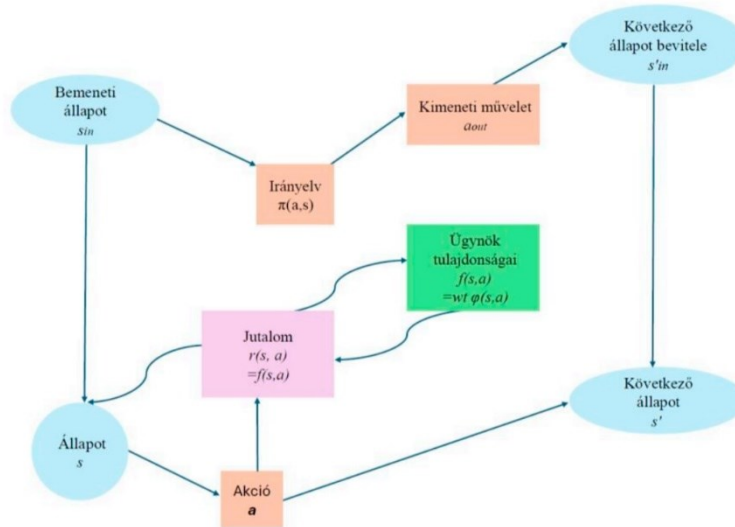
- Orvostechnikai eszközök (pl. térdprotézisek, fogászati implantátumok) anyagválasztásának optimalizálására, ahol a biokompatibilitás, élettartam és mechanikai stabilitás kompromisszumai egyszerre vannak jelen.
- Szenzortechnikai tömítőrendszerek tervezésére, ahol a horonyméret, hőmérsékletállóság és nyomáskompatibilitás közötti optimum keresése elengedhetetlen.
- Autó- és repülőgépipari konstrukciós döntések támogatására, ahol anyagköltség, tömeg és biztonsági tényezők versenyeznek egymással.

10.1. JÖVŐBELI KUTATÁSI IRÁNYOK

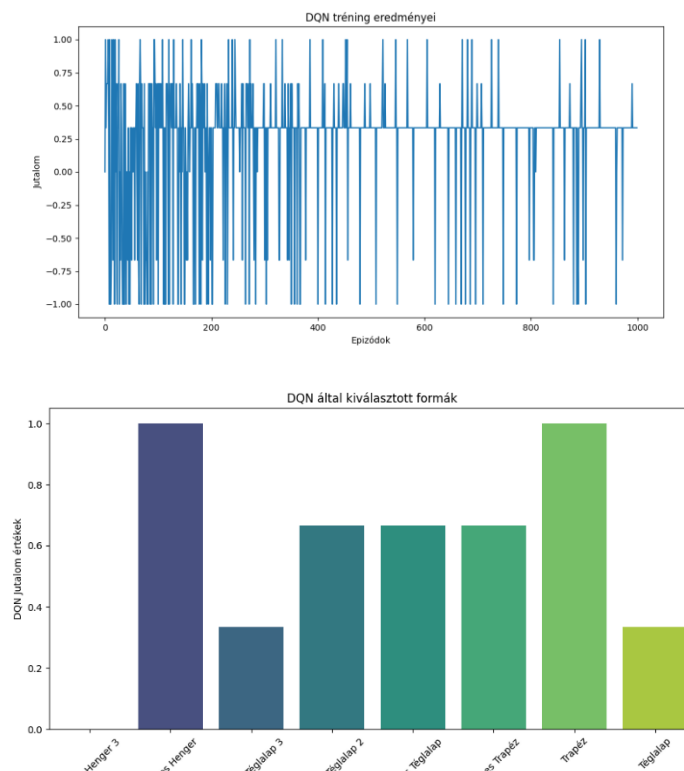
Ahogy publikációnkban rámutattunk a mély megerősítéses tanulás (DQN) kiszámíthatja a thermoelektromos tulajdonságokat (51. ábra-52. ábra), a hűtőkapacitást (QL), a hőkapacitást (QH), a hatékonysági együtthatót (COP), és az anyagköltséget a megadott paraméterek alapján.

Ezeket az értékeket felhasználja a fitness függvények számításához, majd a DQN algoritmust és a VIKOR módszert alkalmazhatjuk az optimalizálásra.

Továbbá ígéretes terület az adat vezérelt súlyozás, az additív gyártás és a körforgásos ipari rendszerek és a döntéshozatali folyamatok életciklus-értékelésben és újrafelhasználhatóságban való alkalmazása.



51. ábra Az RL keretrendszer sematikus ábrázolása [134]



52. ábra Gépi tanulás (DQN) a TE-pellet optimalizálásban

10.2. KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

- [AJ 4] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Advancing plant cell wall modelling: parametric finite element approach, DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES 14: 2 pp. 49-56., 8 p. (2024), 10.32972/dms.2024.013
- [AJ 5] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Additive manufacturing from biomimetic approach, DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES 14: 1 pp. 5-12., 8 p. (2024), 10.32972/dms.2024.001
- [AJ 7] Albert, Judit; Takács, Ágnes: A termoelektromos modulok körforgásos gyártásának DQN alapú döntéstámogatásos optimalizációja, GÉP 75: 2 pp. 42-47., 6 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.2.8
- [AJ 8] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Új termékfejlesztési módszerek trendjei: irodalmi áttekintés, GÉP 75: 1 pp. 9-14., 6 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.1.2
- [AJ 10] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Additív gyártás biomimetikai megközelítéssel, GÉP 74: 4 pp. 9-11., 3 p. (2023)
- [AJ 18] Albert Judit: Additive manufacturing with biomimetic approach, Conference of Machine and Product Designers, Miskolc, 2023. november 16-17. Angol nyelvű konferencia előadás
- [AJ 22] Albert Judit, Takács Ágnes: Weak points of circular manufacturing, Xplorer Conference Mining and Minerals, amid Geopolitics and Energy Transition, Lappeeranta, Finnország, 2024. június 10-11., Angol nyelvű konferencia előadás

11. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] T. Saaty, „The Analytic Hierarchy Process,” McGraw-Hill, New York, 1980.
- [2] C. M. Stewart, H. Raja, E. Torrance és L. Funk, „In Vivo Randomized Controlled Study of the Bone Response of All-Suture Anchors and Biocomposite Anchors,” *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, %1. kötet8, %1. szám4, pp. 1-6, 2020.
- [3] M. Kim, Y. J. Kim, Y. S. Kim, T. Roh, E.-J. Lee, J.-H. Shim, E. Kang, M. J. Kim és I. S. Yun, „One-Year Results of Ear Reconstruction with 3D Printed Implants,” *Yonsei Medical Journal*, %1. kötet65, %1. szám8, pp. 456-461, 2024.
- [4] A. Montesano és M. McLure, „Thinking Outside the Box: Edgeworth, Pareto and the Early History of the Box Diagram,” The University of Western Australia, 2018.
- [5] M. S. Ozdemir és T. L. Saaty, „The unknown in decision making: What to do about it,” *European Journal of Operational Research*, %1. kötet174(1), pp. 349-359, 2006.
- [6] S. Opricovic és G.-H. Tzeng, „Compromise Solution by MCDM Methods: A Comparative Analysis of VIKOR and TOPSIS,” *European Journal of Operational Research*, pp. 445-455, 2004.
- [7] B. Roy, *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [8] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3 szerk., Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, p. 624.
- [9] J. Figueira, S. Greco és M. Ehrgott, *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, %1. kötetInternational Series in Operations Research & Management Science, Springer Science & Business Media, 2005.
- [10] S. Greco, M. Ehrgott és J. R. Figueira, *Multiple Criteria Decision Analysis*, Springer, 2016.
- [11] F. Y. Edgeworth, *Mathematical psychics, an essay on the application of mathematics to the moral sciences*, %1. kötet12, London: London C.K. Paul, 1881, pp. 1-164.
- [12] D. Bernoulli, „Specimen Theoriae Novae de Mensura Sortis,” *Commentarii academiae scientiarum imperialis Petropolitanae*, %1. kötet, összesen: %2Tomus V, (In Classe Mathematica), pp. 175-192, 1738.
- [13] D. Bernoulli, „Exposition of a New Theory on the Measurement of Risk,” *Econometrica*, %1. kötet22(1), pp. 23-36, 1814.
- [14] P.-S. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*, %1. kötet30(1), Paris, 1812.
- [15] V. Pareto, *Manual of Political Economy*, Oxford University Press, 1906.
- [16] J. von Neumann és O. Morgenstern, *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton, 1944, pp. 1-641.
- [17] A. Charnes, W. Cooper és A. Henderson, „An Introduction to Linear Programming,” pp. 1-39, 1953.
- [18] L. Zadeh, „Optimality and non-scalar-valued performance criteria,” *IEEE Transactions on Automatic Control Engineering, Mathematics*, %1. kötet8, pp. 59-60, 1963.
- [19] B. Roy, „Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE),” *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle*, %1. kötet8, pp. 57-75, 1968.

- [20] B. Roy és P. Bertier, „La méthode electre II : une application au media-planning,” *Operational research*, pp. 291-302, 1973.
- [21] B. Roy, „ELECTRE III: Un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples,” *Cahiers du Centre d'études de recherche operationnelle*, pp. 3-24, 1978.
- [22] R. Keeney és H. Raiffa, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*, New York: John Wiley, 1976, pp. 1-569.
- [23] T. L. Saaty, „Optimum positions for m airports,” *Naval Research Logistics Quarterly*, %1. kötet19(1), pp. 101-109, 1972.
- [24] T. L. Saaty és L. Vargas, „The Analytic Network Process,” in *Decision Making with the Analytic Network Process*, 2006, pp. 1-28.
- [25] C. Hwang és . K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Springer-Verlag, 1981.
- [26] S. Opricovic, „Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems,” Faculty of Civil Engineering, Belgrade, 1998.
- [27] K. M. Miettinen, *Non Linear Multiobjective Optimization*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999, pp. 1-298.
- [28] K. Deb, *Multiobjective Optimization Using Evolutionary Algorithms*, New York: Jhon Wiley and Sons, 2001, pp. 1-475.
- [29] P. Modesti, „On Specimen Theoriae Novae de Mensura Sortis of Daniel Bernoulli,” *Decisions Econ Finan*, pp. 1-19, 2024.
- [30] R. Keeney és H. Raiffa, *Decision with Multiple Objectives: Preference and Value Tradeoffs*, New York: Cambridge University Press, 1979.
- [31] A. P. Borosy, K. Héberger, G. Horvai, I. Kolossváry, A. Lengyel, L. Paksy, R. Rajkó és P. Szepesváry, *Sokváltozós adatelemzés (kemometria)*, Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2001, pp. 1-356.
- [32] R. B. Statnikov és J. B. Matusov, *Multicriteria Optimization and Engineering*, Springer Science+Business Media Chapman and Hall, 1995.
- [33] K. Roth, *Tervezés katalógussal*, Műszaki Könyvkiadó, 1969.
- [34] R. Koller, *Konstruktionslehre für den Maschinenbau (Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte)*, Springer-Lehrbuch, 1994.
- [35] F. Hansen, *A módszeres géptervezés*, Műszaki Könyvkiadó, 1969.
- [36] G. Schuhmacher, F. Daoud, Ö. Petersson és M. Wagner, „MULTIDISCIPLINARY AIRFRAME DESIGN OPTIMISATION,” in *ACAS 2012, Multidisciplinary Airframe Design Optimisation*, 2012.
- [37] „OPTIMIZATION OF COMPOSITE AIRCRAFT STRUCTURES IN CONSIDERATION OF POSTBUCKLING BEHAVIOR,” *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, pp. 905-915, 2010.
- [38] L. Kamondi, F. Sarka és Á. Takács, „Fejlesztés-módszertani ismeretek,” Miskolci Egyetem, Miskolc, 2011.
- [39] Á. Takács, „Számítógéppel segített koncepcionális tervezési módszer,” Miskolci Egyetem, Miskolc, 2010.
- [40] C. J. Kibert, *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*, New York, United States: John Wiley & Sons, 2007, pp. 1-407.

- [41] Z. Wang, S. Nabavi és R. Gade, „Selected Multi-criteria Decision-Making Methods and Their Applications to Product and System Design,” in *Optimization Methods for Product and System Design*.
- [42] B. Roy, „Classement et choix en présence de points de vue multiples,” %1. kötet, összesen: %2Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle, pp. 57-75, 1968.
- [43] P. Chatterjee és S. Chakraborty, „Selection of materials using multi-criteria decision-making methods with minimum data,” *Decision Science Letters*, %1. kötet2, pp. 135-148, 2013.
- [44] K. Rashidi, K. Cullinane és L. Tavasszy, „A multi-criteria decision-making approach to logistics service providers selection,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, %1. kötet103, pp. 69-93.
- [45] D. Pamučar, D. Božanić és A. Milić, „Selection of a course of action by Obstacle Employment Group based on a fuzzy logic system,” *Yugoslav Journal of Operations Research*, %1. kötet26, %1. szám1, pp. 1-16, 2016.
- [46] D. Pamucar, D. Božanić és A. Randjelovic, „Multi-criteria decision making: An example of sensitivity analysis,” *Serbian Journal of Management*, %1. kötet1, %1. szám1, pp. 1-27, 2017.
- [47] A. Mardani, E. K. Zavadskas, K. Govindan, A. A. Senin és A. Jusoh, „VIKOR Technique: A Systematic Review of the State of the Art Literature on Methodologies and Applications,” *Sustainability*, %1. kötet8, %1. szám37, pp. 1-38, 2016.
- [48] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana és S. Tarantola, *Global Sensitivity Analysis*, Wiley Online Library, 2008.
- [49] E. Triantaphyllou, *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [50] H. Liu, C. Lu, X. Hao és H. Zhao, „Optimal performance selection of sustainable mobility service projects based on IFSS - Prospect theory - VIKOR: A case study of electric vehicle sharing program,” *PLOS One*, %1. kötet19, %1. szám11, 2024.
- [51] P. Xuanyuan, Y. Zhang, J. Yao és R. Zheng, „Sensitivity Analysis and Optimization of Energy-Saving Measures for Office Building in Hot Summer and Cold Winter Regions,” *Energies*, %1. kötet17, %1. szám1675, pp. 1-29, 2024.
- [52] Y. Suh, Y. Park és D. Kang, „Evaluating mobile services using integrated weighting approach and fuzzy VIKOR,” *PLOS ONE*, %1. kötet14, %1. szám6, 2019.
- [53] S. Corrente, S. Greco és R. Słowiński, „<https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.03.004>,” *Decision Support Systems*, %1. kötet53(3), pp. 660-674, 2012.
- [54] M. Behzadian, S. K. Otaghsara, M. Yazdani és J. Ignatius, „A State-of-the-Art Survey of TOPSIS Applications,” *Expert Systems with Applications*, %1. kötet39, pp. 13051-13069, 2012.
- [55] A. Mardani, E. Zavadskas, K. Govindan, A. Amat Senin és A. Jusoh, „VIKOR Technique: A Systematic Review of the State of the Art Literature on Methodologies and Applications,” *Sustainability*, %1. kötet8, %1. szám37, pp. 1-38, 2016.
- [56] A. Jahan and K. L. Edwards, *Multi-criteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design*, Butterworth-Heinemann, 2013.

- [57] J.-J. Huang, G.-H. Tzeng és H.-H. Liu, „A Revised VIKOR Model for Multiple Criteria Decision Making - The Perspective of Regret Theory,” *Communications in Computer and Information Science*, pp. 761-768, 2009.
- [58] L. Zadeh, „Fuzzy sets,” *Information and Control*, pp. 338-353, 1965.
- [59] J. Fernandez, D. Morse, P. Spagna, V. Maranhao, G. Lemole, A. Gooch és S. Yang, „Results of Mitral Valve Replacement with the Beall Prosthesis in 209 Patients,” *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, pp. 218-225, 1976.
- [60] H. Russell, M. Guerrero, M. Salinger, A. Melissa, B. S. Manzuk, K. Amit, M. D. Pursnani, D. Wang, N. Hassan, S. Rahul, S. Melnitchouk, P. Ashish, K. Kenith Fang, M. S. Sameh, J. Kauten, H. Gilbert, M. Tang, G. Aldea, T. E. Feldman, V. N. Bapat és M. G. Isaac, „Open Atrial Transcatheter Mitral Valve Replacement in Patients With Mitral Annular Calcification,” *JACC*, %1. kötet72, %1. szám13, p. 1437-1448, 2018.
- [61] H. Zhao és M. Lei, „Application and biocompatibility of a new absorbable magnesium alloy stent in blood vessels,” *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, pp. 1165-1170, 2016.
- [62] I. Andrianov, J. Awrejcewicz és A. Diskovsky, *Structural design of patient-specific vascular ring stents*, www.researchsquare.com, 2022, pp. 1-23.
- [63] P. Jemmett és S. Roy, „The iDuo Bi-compartmental Knee Replacement: Our Early Experience,” *Reconstructive Review*, %1. kötet6, %1. szám4, pp. 13-17, 2016.
- [64] J. Kramer, S. Robinson, E. Hohn, C. Purviance és E. Wolf, „Fixation Methods and Implants in Shoulder Stabilization: A Historical Perspective,” *Journal of Orthopaedics*, %1. kötet15, pp. 630-635, 2018.
- [65] H. Derar és M. Shahinpoor, „Recent patents and designs on hip replacement prostheses,” *Open Biomed Eng J.*, pp. 92-102, 2015.
- [66] M. J. Funk és A. S. Litsky, „Effect of cement modulus on the shear properties of the bone-cement interface,” *International Mathematical Forum*, %1. kötet7, %1. szám52, pp. 1561-1567, 1998.
- [67] R. Quan, Y. Ni, L. Zhang, J. Xu, X. Zheng és D. Yang, „Short- and long-term effects of vertebroplastic bone cement on cancellous bone,” *J Mech Behav Biomed Materiasl*, pp. 102-110, 2014.
- [68] M. Siebert, E. Zhang, S. Stephens, A. Wey, K. Eppich, A. Presson, S. Holmes és C. Makarewich, „Screw Diameter and Use of a Washer Affect Symptomatic Implant Removal Rates in Pediatric Medial Epicondyle Fractures,” *Journal of Pediatric Orthopaedics*, %1. kötet44, pp. 427-432, 2024.
- [69] S. Kashif, M. Waleed, G. Murtaza Amjad, S. Irfan, Z. u. R. Tahir, M. T. Adil, U. Navid és Y. Mahmood, *Computational prediction of contact pressure for different sizes of knee implants in total knee replacement*, 2021.
- [70] J.-W. Choi, K.-H. Choi, H.-J. Chae, S.-K. Chae, E.-B. Bae, J.-J. Lee, S.-H. Lee, C.-M. Jeong és J.-B. Huh, „Load-Bearing Capacity and Retention of Newly Developed Micro-Locking Implant Prosthetic System: An In Vitro Pilot Study,” *Materials*, pp. 1-15, 2018.
- [71] S. L. Wu, P. K. Chu, X. M. Liu, C. Y. Chung, J. P. Y. Ho, C. L. Chu, S. C. Tjong, K. W. K. Yeung, W. W. Lu, K. M. C. Cheung és K. D. K. Luk, „Surface characteristics, mechanical properties, and cytocompatibility of oxygen plasma-implanted porous nickel titanium shape memory alloy,” *J Biomed Mater Res A.*, %1. kötet79, %1. szám1, pp. 139-146, 2006.

- [72] M. Bahraminasab és B. Sahari, „NiTi Shape Memory Alloys, Promising Materials in Orthopedic Applications,” in *Shape Memory Alloys - Processing, Characterization and Applications*, InTech - open science | open minds, 2013.
- [73] M. Bahraminasab és B. Sahari, „NiTi Shape Memory Alloys, Promising Materials in Orthopedic Applications,” in *Engineering, Materials Science, Medicine*, 2013, pp. 261-278.
- [74] *Orvostechnikai anyagok, alakemlékező anyagok.*
- [75] A. Jemat, M. J. Ghazali, M. Razali és Y. Otsuka, „Surface Modifications and Their Effects on Titanium Dental Implants,” *BioMed Research International*, pp. 1-11, 2015.
- [76] S. Koosha, E. Jalalian, S. Safari és S. Zandrahimi, „Effect of Abutment Angulation and Material on Stress and Strain,” *Journal of Research in Dental and Maxillofacial Sciences*, %1. kötet2(4), 2017.
- [77] K. Tian, J. Chen, L. Han, Y. Yang, W. Huang és D. Wu, „Angled abutments result in increased or decreased stress on surrounding bone of single-unit dental implants: a finite element analysis,” *Med Eng Phys*, pp. 1526-1531, 2012.
- [78] J. Albert és Á. Takács, „The VIKOR Algorithm in Material Decision Support,” *Design of Machines and Structures*, %1. kötet12, pp. 5-13, 16 11 2022.
- [79] J. Albert és Á. Takács, „A VIKOR algoritmus alkalmazhatósági kérdési anyagválasztási döntésekben,” *GÉP*, %1. kötet, összesen: %271(7-8), pp. 65-68, 2020.
- [80] H. Huang, L. Wang és Y. Fan, „Metallic meta-biomaterials: A critical review of fatigue behaviors,” *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, %1. kötet8, pp. 1-22, 2023.
- [81] L. Van Van, C. Hung Phi és N. Thanh Tung, „Effect of Suspension System Stiffness on Dynamic Load Action Chassis Multi-purpose,” *International Journal of Engineering*, %1. kötet35, %1. szám8, pp. 1572-1578, 2022.
- [82] T. T. Nguyen, V. V. Luong és T. Q. Nguyen, „A survey on the effects of bumpy road on the vibration of multi-purpose forest fire fighting vehicle,” *Engineering Solid Mechanics*, pp. 1-9, 2021.
- [83] *EN 10025-2:2019.*
- [84] R. Rahman, N. Tamin és O. Kurdi, „Stress analysis of heavy duty truck chasis as a preliminary data for its fatigue life prediction using FEM,” *Jurnal Mekanikal*, %1. kötet26, pp. 76-85, 2008.
- [85] K. Biswas, J. He, I. D. Blum, C. I. Wu, T. P. Hogan, D. N. Seidman és M. G. Kanatzidis, „High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures,” *Nature*, %1. kötet489(7416), pp. 414-418, 2012.
- [86] C. C. Lee és K. N. Chiang, „Thermal Stress–Induced Interfacial Failure Modes of Advanced Electronic Devices,” in *Encyclopedia of Thermal Stresses*, R. B. Hetnarski, Szerk., Dordrecht, Springer, 2014, p. 5495.
- [87] E. Suhir, „Thermal Stress Failures in Electronics and Photonics: Physics, Modeling, Prevention,” *Journal of Thermal Stresses*, pp. 537-563, 2013.
- [88] M. A. Zoui, S. Bentouba, J. Stocholm és M. Bourouis, „A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications. Energies,” *Energies*, %1. kötet13(14), pp. 1-32, 2020.

- [89] A. Al-Merbaty, B. Yilbas és A. Sahin, „Thermodynamics and thermal stress analysis of thermoelectric power generator: Influence of pin geometry on device performance,” *Applied Thermal Engineering*, %1. kötet50, %1. szám10, pp. 683-692, 2013.
- [90] U. Erturun és K. Mossi, „A Feasibility Investigation on Improving Structural Integrity of Thermoelectric Modules With Varying Geometry,” 2012.
- [91] B. Prasad, Concurrent engineering fundamentals : integrated product and process organization, B. Prasad, Szerk., Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering, 1996, pp. 1-502.
- [92] K. N. Subramanian, „Lead-Free Solders: Materials Reliability for Electronics,” in *Lead-Free Solders: Materials Reliability for Electronics*, Wiley, 2012, p. 520.
- [93] J.-L. Gao, Q.-G. Du, X.-D. Zhang és X.-Q. Jiang, „Thermal Stress Analysis and Structure Parameter Selection for a Bi₂Te₃ Based Thermoelectric Module,” *Journal of Electronic Materials*, pp. 884-888, 2011.
- [94] „asset.conrad.com,” 2022. [Online]. Available: <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>.
- [95] S. Lucas, R. Marian, M. Lucas, T. Ogunwa és J. Chahl, „Employing the Peltier Effect to Control Motor Operating Temperatures,” *Energies*, %1. kötet16, %1. szám2498, pp. 1-15, 2023.
- [96] Z. P. Guan és D. Dunand, „Compressive creep behavior of cast Bi₂Te₃,” *Materials Science & Engineering A*, pp. 321-325, 2013.
- [97] B. Liao, B. Sun, M. Yan, Y. Ren, W. Zhang és K. Zhou, „Time-Variant Reliability Analysis for Rubber O-Ring Seal Considering Both Material Degradation and Random Load,” *Materials*, pp. 1-18, 2017.
- [98] www.oring-seal.com, *Why O-rings fail performance?-Gap extrusion 6*, 2018.
- [99] M. Zeng, Y. Zhou és Y. Ma, „Evaluation of sealing performance of bearing rings of roller-cone bits based on grid-shaped bionic non-smooth surface,” *Advances in Mechanical Engineering*, %1. kötet10, %1. szám5, pp. 1-21, 2018.
- [100] A. Kömmling, M. Jaunich, P. Pourmand, D. Wolff és M. Hedenqvist, „Analysis of O-Ring Seal Failure under Static Conditions and Determination of End-of-Lifetime Criterion,” *Polymers*, %1. kötet11, %1. szám1251, pp. 1-19, 2019.
- [101] *ISO 3601-1 Fluid power systems — O-rings —Part 1:Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes*, Switzerland, 2012.
- [102] Z. Qin, Y.-T. Wu, L. He, X. Gao és S.-K. Lyu, „Empirical research on the friction behavior of O-rings in hydraulic cylinders,” *PLOS One*, %1. kötet18(1), pp. 1-18.
- [103] R. Flitney, SEALS AND SEALING, Elsevier Ltd, 2014.
- [104] A. Wahid, I. Faiud és K. Mason, „Integrating Renewable Energy in Agriculture A Deep Reinforcement Learning-based Approach,” 2023.
- [105] J. Albert and A. Takacs, “The VIKOR Algorithm in Material Decision Support,” *DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES*, vol. 12, no. 2, pp. 5-13, 2022.
- [106] J. Albert and Á. Takács, “Application aspects of the VIKOR algorithm in material selection decisions,” *GÉP*, vol. 71, no. 7-8, pp. 65-68, 2020.

- [107] M. Mbogori, A. Vaish, R. Vaishya, A. Haleem and M. Javaid, "Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) in orthopaedic practice- A current concept review," *Journal of Orthopaedic Reports*, vol. 1, no. 1, pp. 3-7, 2022.
- [108] E. Zavadskas, Z. Turskis és J. Tamošaitienė, „Risk assesment of construction projects,” *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT*, %1. kötet16(1), pp. 33-46, 2010.
- [109] S. Opricovic, „Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning,” *Expert Systems with Applications*, %1. kötet38(10), p. 12983–12990, 2011.
- [110] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3 szerk., Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004, p. 624.
- [111] J. Zhao, X. Y. You, H. C. Liu és S. M. Wu, „An Extended VIKOR Method Using Intuitionistic Fuzzy Sets and Combination Weights for Supplier Selection,” *Symmetry*, %1. kötet9(9), pp. 169 (1-16), 2017.
- [112] S. Greco, V. Mousseau és R. Slowinski, „Multiple criteria sorting with a set of additive value functions,” *Laboratoire d'Analyse et Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision*, 2008.
- [113] C.-T. Chen, „Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment,” *Fuzzy Sets and Systems*, %1. kötet114(1), pp. 1-9, Augusztus 2000.
- [114] T. Elhag, Y.-M. Wang és T. M. Elhag, „Fuzzy TOPSIS Method Based on Alpha Level Sets with an Application to Bridge Risk Assessment,” *Expert Systems with Applications*, %1. kötet31(2), pp. 309-319, 2006.
- [115] E. Czogała és H.-J. Zimmermann , „Decision making in uncertain environments,” *European Journal of Operational Research*, %1. kötet53(3), pp. 202-212, 1986.
- [116] D. Bouyssou és P. Perny, „Ranking methods for valued preference relations:A characterization of a method based on leaving and entering flows,” 1990.
- [117] H. Guo, W. Pedrycz és X. Liu, „Fuzzy time series forecasting based on axiomatic fuzzy set theory,” *Neural Computing and Applications*, %1. kötet31, p. 3921–3932, Január 2018.
- [118] S. Corrente, S. Greco, F. Leonardi és R. Słowiński, „The hierarchical SMAA-PROMETHEE method applied to assess the sustainability of European cities,” *Appl Intell*, %1. kötet51, pp. 6430-6448, Április 2021.
- [119] S. Corrente, M. Doumpos, S. Greco, R. Slowinski és C. Zopounidis, „Multiple criteria hierarchy process for sorting problems based on ordinal regression with additive value functions,” *Mathematical Sciences*, pp. 117-139, 2015.
- [120] . G. Derringer és R. Suich, „Simultaneous Optimization of Several Response Variables.,” *Journal of Quality Technology*, pp. 214-219, 1980.
- [121] Hwang és Yoon, 1981.
- [122] Zitzler, 2003.
- [123] A. Jahan és E. Kevin, *Multi-criteria Decision Analysis for Supporting the Selection of Engineering Materials in Product Design*, 2013.
- [124] J. BOWRING, Szerk., *Deontology or, The science of morality*, LONDON: LONGMAN, REES, ORME, BROWNE, GREEN, AND LONGMAN., 1834, pp. 1-333.
- [125] J. Von Neumann és O. Morgenstern, *Theory of games and economic behavior*, Princeton University Press, 1947.

- [126] E. C. Harrington, „The Desirability Function,” *Industrial Quality Control*, %1. kötet21, pp. 494-498, 1965.
- [127] K. Biswas, J. He, I. Blum, C.-I. Wu, T. P. Hogan, D. N. Seidman, V. P. Dravid és M. G. Kanatzidis, „High-Performance Bulk Thermoelectrics with all-Scale Hierarchical Architectures,” *Nature*, %1. kötet489(7416), pp. 414-418, 2012.
- [128] „Thermal Stress–Induced Interfacial Failure Modes of Advanced Electronic Devices,” in *Encyclopedia of Thermal Stresses*, 2014, p. 5495.
- [129] Z. M. Amine, S. Bentouba, J. G. Stocholm és M. Bourouis, „A Review on Thermoelectric Generators: Progress and Applications,” *Energies*, %1. kötet13, %1. szám3606, pp. 1--32, 2020.
- [130] S. Mirjalili, . S. Mohammad és A. Hatamlou, „Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired,” *Neural Computing and Applications*, 2015.
- [131] R. Storn és K. Price, „Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces,” *Journal of Global Optimization*, %1. kötet11, pp. pp. 341-359, december 1997.
- [132] „Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling,” *Acta Polytechnica Hungarica*, pp. 217-229, 2024.
- [133] „Optimalizálási módszer termoelektromos modulok szerkezeti tervezéséhez,” *GÉP*, %1. kötet73, %1. szám3-4, pp. 11-14, 2022.
- [134] G. Quick-Ohm Küpper & Co., *Datenblatt Kühlbetrieb. Peltier-Element-TEC-QC-127-1.4-8.5-Datenblatt.pdf*, Cronenfelder Straße 75 D-42349 Wuppertal: Quick-Ohm Küpper und Co. GmbH.
- [135] *Compression springs ISO 10243*.
- [136] N. Metropolis és . S. Ulam, „The Monte Carlo Method,” *Journal of the American Statistical Association*, %1. kötet44, pp. 335-341, 1949.
- [137] J. von Neumann és S. Ulam, „The Monte Carlo Method,” *Bulletin AMS*, 1945.
- [138] *Datenblatt 4301*, Germany: DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE GMBH, 2007.
- [139] P. C. Fishburn, „Nontransitive Preferences and Normative Decision Theory. Decision Making Under Risk and Uncertainty,” in *Theory and Decision Library*, %1. kötet22, J. Geweke, Szerk., Springer, Dordrecht, 1991, pp. 3-10.
- [140] A. Tversky, „Intransitivity of preferences,” *Psychological Review*, %1. kötet76, pp. 31-48, 1969.
- [141] M. Regenwetter, J. Dana és C. P. Davis-Stober, „Testing transitivity of preferences on two-alternative forced,” *Frontiers in Psychology | Quantitative Psychology and Measurement*, pp. 1-15., 2010.
- [142] H. Koc és A. M. Mamedov, „Structural. elastic, and electronic properties of topological insulators: Sb₂ Te₃ and Bi₂ Te₃,” in *IEEE, 2013 Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium*, 2013.
- [143] J. Albert és Á. Takács, „Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling,” *ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA*, %1. kötet21, pp. 217-229, 2024.
- [144] J. Albert és Á. Takács, „Optimization of multi-criteria decision-making for dental implant selection,” *Design of Machines and Structures*, %1. kötet14, pp. 75-83, 2024.

- [145] J. Albert és Á. Takács, „TEHERAUTÓ ALVÁZ SZERKEZETÉNEK VÉGESELEMES VIZSGÁLATA,” *GÉP*, pp. 5-8, 2024.
- [146] J. Albert és Á. Takács, *Optimization of the Design Process of a Peltier Module*, Doktoranduszok Fóruma: Miskolci Egyetem, 2022.11.18..
- [147] J. Albert, *The VIKOR Method Algorithm in Hip Prosthesis Material Selection Decision Support*, Doktoranduszok Fóruma: Miskolci Egyetem, 2022.11.18..
- [148] J. Albert, *Az MCDM módszer alkalmazása az anyagválasztásban az optimális tervezés érdekében: Áttekintés*, Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma: GÉP, 2022.
- [149] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen és K.-H. Grote, *Engineering Design: A Systematic Approach*, Aachen, Germany: Springer, 2007.
- [150] T. Clin, S. Turenne, D. Vasilevskiy és R. Masut, „Numerical Simulation of the Thermomechanical Behavior,” *Journal of Electronic Materials*, %1. kötet38, pp. 994-1001, 2009.
- [151] G. Silva és M. C. N. Belderrain, „Prioritization of strategic initiatives in the context of natural disaster prevention,” *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, pp. 473-489, 2019.
- [152] 10.1371/journal.pone.0309512.
- [153] *The VIKOR algorithm in material decision support*. [Performance]. 2022.
- [154] J. Albert és Á. Takács, „Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Anyagválasztáshoz alkalmazott intervallum alapú célértékes VIKOR módszertan,” 2024.
- [155] A. Judit és Á. Takács, Szerzők, *Csípő protézis anyagválasztási folyamata VIKOR algoritmussal*. [Performance]. 2022.
- [156] A. Judit, Szerző, *öbbszempon্তু döntéshozatal optimalizálása fogászati implantátumok kiválasztására*. [Performance].
- [157] „Albert, Judit ; Takács, Ágnes: A termoelektromos modulok körforgásos gyártásának DQN alapú döntéstámogatásos optimalizációja,” *GÉP*, %1. kötet75, pp. 42-47, 2024.
- [158] J. Albert és Á. Takács, „Optimalizálási módszer termoelektromos modulok szerkezeti tervezéséhez,” *GÉP*, %1. kötet 73, %1. szám3-4., pp. 11-14, 2022.
- [159] J. Albert és Á. Takács, „Termoelektromos Peltier-modulok optimalizálási módszertana szerkezeti tervezéshez és anyagválasztáshoz,” Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Igazgatóság, Miskolc, 2024.
- [160] J. Albert és Á. Takács, Szerzők, *Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling*. [Performance].
- [161] J. Albert és Á. Takács, „Tömítési teljesítmény optimalizálása végelelemes módszerrel és többkritériumos döntéshozatali megközelítéssel,” *GÉP*, %1. kötet75, %1. szám3-4, pp. 5-9, 2024.
- [162] J. Albert és Á. Takács, Szerzők, *Analysing the effects of the structural design of the sealing construction with Finite Elements Method*. [Performance]. 2024.
- [163] J. Albert és Á. Takács, Szerzők, *Optimizing Sealing Performance with Finite Element Method and Multi-Criteria Decision-Making Approach*,. [Performance]. 2024.
- [164] E. Teller, „Hiroshima - egy döntés pszichológiája,” Eötvös Társulat, Eötvös Egyetem, Gólyavár, 1993. november 25.

- [165] „www.santechchem.com,” [Online]. Available:
<https://www.santechchem.com/bismuth-telluride-cube-127.html>.
- [166] J. Albert és Á. Takács, „Additív gyártás biomimetikai megközelítéssel,” *GÉP*, %1. kötet74, pp. 9-12, 2023.
- [167] „Advancing plant cell wall modelling: parametric finite element approach,” *DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURE*, pp. 49-56, 2024.
- [168] J. Albert és Á. Takács, Szerzők, *Additive manufacturing with biomimetic approach*. [Performance]. Conference of Machine and Product Designers, Miskolc, 2023. november 16-17, 2023.
- [169] J. Albert és Á. Takács, Szerzők, *Weak points of circular manufacturing*. [Performance]. Xplorer Conference Mining and Minerals, amid Geopolitics and Energy Transition, Lappeeranta, Finnország, 2024. június 10-11..
- [170] J. Albert és Á. Takács, „A TERMOELEKTROMOS MODULOK KÖRFORGÁSOS GYÁRTÁSÁNAK DQN ALAPÚ DÖNTÉSTÁMOGATÁSOS OPTIMALIZÁCIÓJA,” *GÉP*, %1. kötet75, pp. 42-47, 2024.
- [171] J. Albert és Á. Takács, „Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Advancing plant cell wall modelling: parametric finite element approach,” *DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES*, %1. kötet14, pp. 49-56, 2024.
- [172] J. Albert és Á. Takács, „Új termékfejlesztési módszerek trendjei: irodalmi áttekintés,” *GÉP*, %1. kötet75, pp. 9-14.
- [173] J. Albert és Á. Takács, Szerzők, *Additive manufacturing with biomimetic approach*. [Performance]. Conference of Machine and Product Designers, Miskolc, 2023. november 16-17..
- [174] T. K. P. Holmqvist és M. L. Persson, „Analysis and improvement of product modularization methods: Their ability to deal with complex products,” *Systems Engineering*, %1. kötet3, p. 195–209, 2003.

Publikációk az értekezés témájában

XII. IDEGEN NYELVŰ FOLYÓIRATBAN MEGJELENT LEKTORÁLT SZAKCIKK

- [AJ 1] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: The VIKOR Algorithm in Material Decision Support, DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES 12: 2 pp. 5-13., 9 p. (2022), 10.32972/dms.2022.008
- [AJ 2] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 21: 12 pp. 217-229., 13 p. (2024) 10.12700/APH.21.2.2024.2.12, Q2
- [AJ 3] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Optimization of multicriteria decision-making for dental implant selection, Design of Machines and Structures, Vol. 14, No. 1. pp. 75–83. (2024), 10.32972/dms.2024.007
- [AJ 4] Albert, Judit ; Takács, Ágnes: Advancing plant cell wall modelling: parametric finite element approach, DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES 14: 2 pp. 49-56., 8 p. (2024), 10.32972/dms.2024.013
- [AJ 5] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Additive manufacturing from biomimetic approach, DESIGN OF MACHINES AND STRUCTURES 14: 1 pp. 5-12., 8 p. (2024), 10.32972/dms.2024.001

XIII. MAGYAR NYELVŰ FOLYÓIRATBAN MEGJELENT LEKTORÁLT SZAKCIKK

- [AJ 6] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Tömítési teljesítmény optimalizálása végeselemes módszerrel és többkritériumos döntéshozatali megközelítéssel, GÉP 75: 3-4 pp. 5-9., 5 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.3-4.1
- [AJ 7] Albert, Judit; Takács, Ágnes: A termoelektromos modulok körforgásos gyártásának DQN alapú döntéstámogatásos optimalizációja, GÉP 75: 2 pp. 42-47., 6 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.2.8
- [AJ 8] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Új termékfejlesztési módszerek trendjei: irodalmi áttekintés, GÉP 75: 1 pp. 9-14., 6 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.1.2
- [AJ 9] Albert Judit, Takács Ágnes: Teherautó alváz szerkezetének végeselemes vizsgálata, GÉP 75: 1 pp. 5-8., 4 p. (2024), 10.70750/GEP.2024.1.1
- [AJ 10] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Additív gyártás biomimetikai megközelítéssel, GÉP 74: 4 pp. 9-11., 3 p. (2023)
- [AJ 11] Albert, Judit; Takács, Ágnes, Optimalizálási módszer termoelektromos modulok szerkezeti tervezéséhez, GÉP 73. 3-4.: 11-14 pp. 11-14., 4 p. (2022)

XIV. TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNY, LEKTORÁLT, MAGYAR NYELVŰ KONFERENCIA KIADVÁNYBAN

- [AJ 12] Albert Judit: OPTIMIZATION OF THE DESIGN PROCESS OF A PELTIER MODULE (2022), Doktoranduszok Fóruma 2022.11.18., Angol nyelvű konferenciaelőadás
- [AJ 13] Albert Judit: THE VIKOR METHOD ALGORITHM IN HIP PROTESIS MATERIAL SELECTION DECISION SUPPORT (2022), Konferenciaelőadás, Doktoranduszok Fóruma 2022.11.18.
- [AJ 14] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Termoelektromos Peltier-modulok optimalizálási módszertana szerkezeti tervezéshez és anyagválasztáshoz, In: Vadászné

Bognár, Gabriella; Piller, Imre (szerk.) Doktoranduszok fóruma: Miskolc, 2022. november 17.: Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa, Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Igazgatóság (2024) 105 p. pp. 15-25., 11 p.

- [AJ 15] Albert, Judit; Takács, Ágnes: Anyagválasztáshoz alkalmazott intervallum alapú célértékes VIKOR módszertan, In: Vadászné Bognár, Gabriella; Piller, Imre (szerk.) Doktoranduszok fóruma: Miskolc, 2022. november 17.: Gépészmérnöki és Informatikai Kar szekciókiadványa, Miskolc, Magyarország: Miskolci Egyetem Tudományos és Nemzetközi Igazgatóság (2024) 105 p. pp. 7-14., 8 p.

XV. SZAKMAI TUDOMÁNYOS ELŐADÁS IDEGEN NYELVEN

- [AJ 16] Optimization of the Design process of a Peltier module (2022), Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11., Angol nyelvű konferencia előadás
- [AJ 17] The VIKOR algorithm in material decision support (2022), Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11., Angol nyelvű konferencia előadás
- [AJ 18] Albert Judit: Additive manufacturing with biomimetic approach, Conference of Machine and Product Designers, Miskolc, 2023. november 16-17., Angol nyelvű konferencia előadás
- [AJ 19] Albert Judit: Optimization Methodology of Thermoelectric Peltier-Modules, for Structural Design and Material Selection, using MCDM and FEM Modelling, Emerson 7th Agria Conference on Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions (InnoVeTAS 2023), Continue in New World, Eger, Hungary, 2023. április 27., Angol nyelvű konferencia előadás
- [AJ 20] Albert, Judit: Analysing the effects of the structural design of the sealing construction with Finite Elements Method, 8th Agria Conference on Innovative Vehicle Technologies and Automation Solutions - InnoVeTAS 2024, Hungary, Eger, május 9. Konferencia előadás angol nyelven
- [AJ 21] Albert Judit, Takács Ágnes: Optimizing Sealing Performance with Finite Element Method and Multi-Criteria Decision-Making Approach, XL. Conference of Machine and Product Designers, Miskolc, 2024. november 7-8., Konferencia előadás angol nyelven
- [AJ 22] Albert Judit, Takács Ágnes: Weak points of circular manufacturing, Xplorer Conference Mining and Minerals, amid Geopolitics and Energy Transition, Lappeeranta, Finnország, 2024. június 10-11., Konferencia előadás angol nyelven

XVI. SZAKMAI TUDOMÁNYOS ELŐADÁS MAGYAR NYELVEN

- [AJ 23] Albert, Judit: Csípő protézis anyagválasztási folyamata VIKOR algoritmussal, Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11., Magyar nyelvű konferenciaelőadás
- [AJ 24] Az MCDM módszer alkalmazása az anyagválasztásban az optimális tervezés érdekében: Áttekintés, Géptervezők és Termékfejlesztők XXXVIII. Szemináriuma, 2022. november 10-11., Magyar nyelvű konferenciaelőadás
- [AJ 25] Többszempon্তু döntéshozatal optimalizálása fogászati implantátumok kiválasztására, MTA MAB Gépészeti és Informatikai Szakbizottság MAB Gépszerkezettani Munkabizottság rendezvénye, Miskolci Egyetem, 2024. november 14., Magyar nyelvű konferenciaelőadás

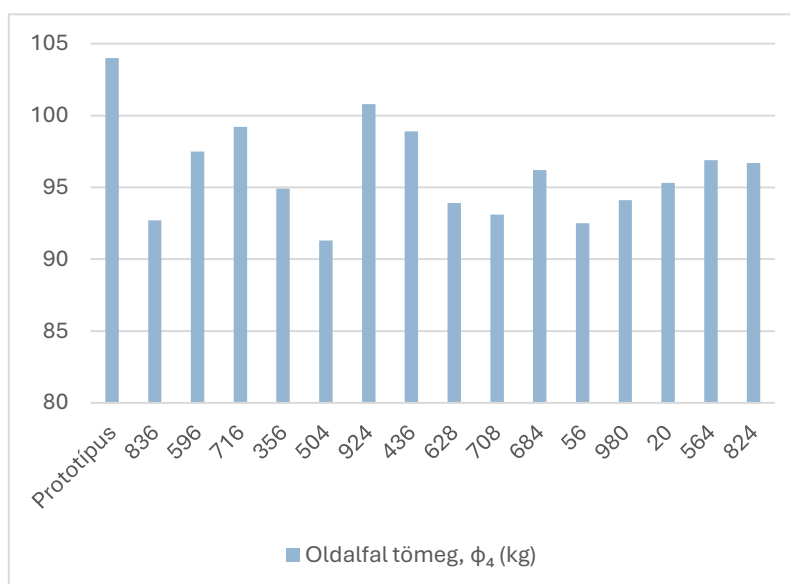
12. MELLÉKLETEK

12.1. SZAKIRODALOM SZÁMÍTÁSAINAK MELLÉKLETEI

12.1.1. Alváz optimalizálási táblázatok [33]

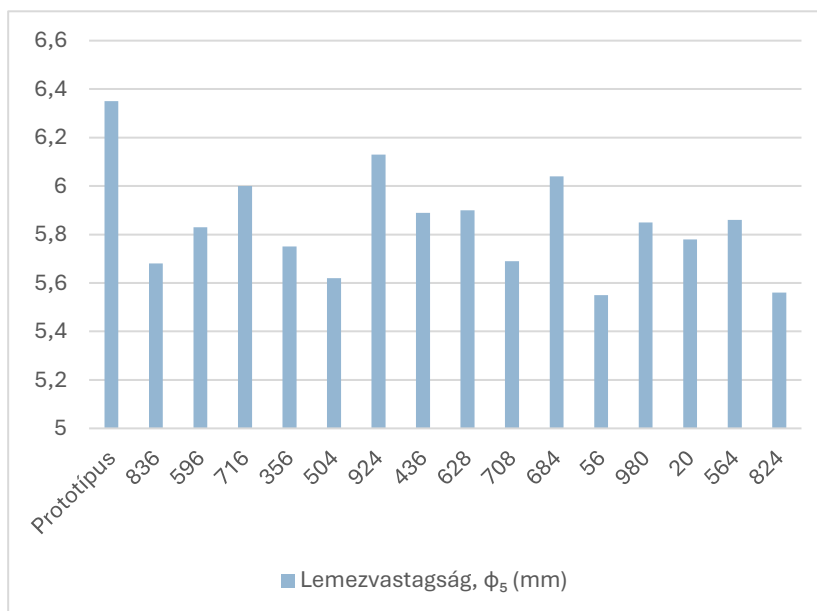
45. táblázat A modellek oldalfali tömege (kg) [33]

Modell	Oldalfal tömeg ϕ_4 (kg)
Prototípus	104
836	92,7
596	97,5
716	99,2
356	94,9
504	91,3
924	100,8
436	98,9
628	93,9
708	93,1
684	96,2
56	92,5
980	94,1
20	95,3
564	96,9
824	96,7



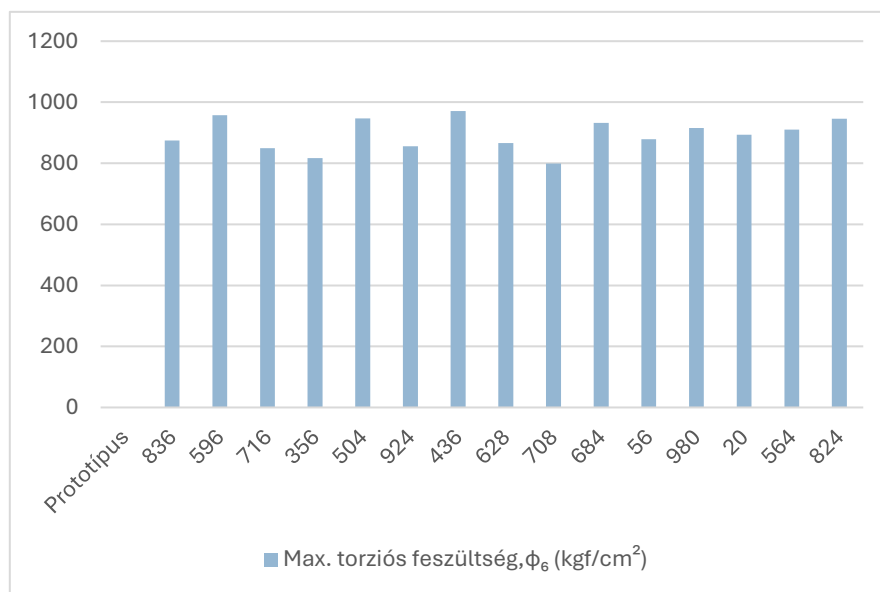
46. táblázat A modellek lemezvastagságai (mm) [33]

Modell	Lemez- vastagság ϕ_5 (mm)
Prototípus	6,35
836	5,68
596	5,83
716	6
356	5,75
504	5,62
924	6,13
436	5,89
628	5,9
708	5,69
684	6,04
56	5,55
980	5,85
20	5,78
564	5,86
824	5,56



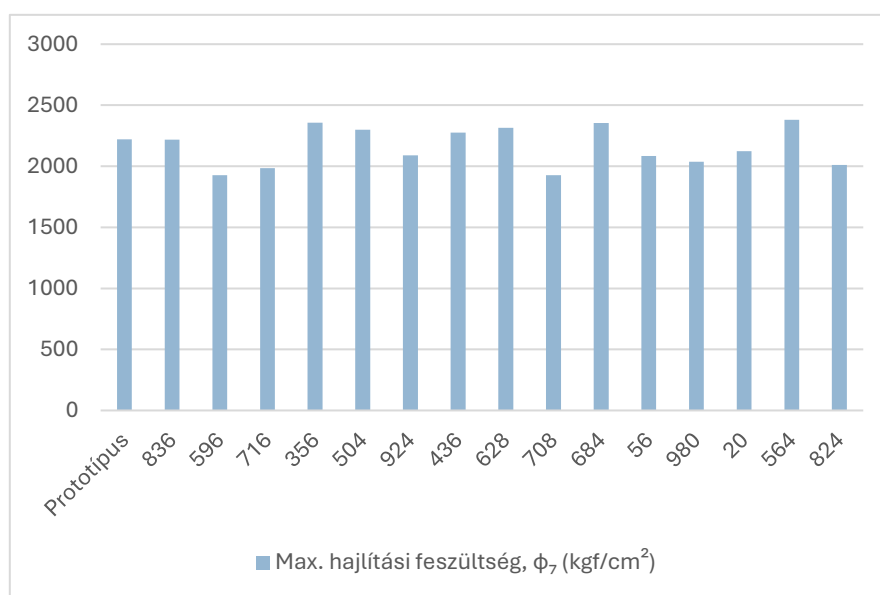
47. táblázat A modellek maximális torziós feszültsége (kgf/cm^2) [33]

Modell	Max. torziós feszültség ϕ_6 (kgf/cm^2)
Prototípus	1 000
836	875
596	958
716	850
356	817
504	947
924	856
436	971
628	866
708	799
684	932
56	879
980	916
20	894
564	910
824	946



48. táblázat A modellek maximális hajlítási feszültsége (kgf/cm^2) [33]

Modell	Max. hajlítási feszültség ϕ_6 (kgf/cm^2)
Prototípus	2220
836	2217
596	1928
716	1984
356	2356
504	2299
924	2089
436	2275
628	2314
708	1927
684	2354
56	2084
980	2036
20	2125
564	2381
824	2011



12.2. A TÉRDPROTÉZIS ANYAGVÁLASZTÁSI DÖNTÉSTÁMOGATÁS SZÁMÍTÁSAINAK RÉSZLETES TÁBLÁZATA

12.2.1. A helyes számítással végzett térdprotézis táblázata [57]

49. táblázat A vizsgált anyagjelöltek listája és típusa a döntéstámogatási elemzéshez

Anyagok	
Anyag 1	rozsdamentes acél L316 (hevített)
Anyag 2	rozsdamentes acél L316 (hidegen megmunkált)
Anyag 3	4 Co-Cr ötvözetek (önthető Co-Cr-Mo)
Anyag 4	Co-Cr (ötvözet Co-Cr-Mo)
Anyag 5	Ti ötvözetek (tisztá Ti)
Anyag 6	Ti ötvözetek (Ti-6Al-4V)
Anyag 7	7 Ti-6Al-7Nb (IMI-367 kovácsolt)
Anyag 8	8 Ti-6Al-7Nb (Protasul-100 melegen kovácsolt)
Anyag 9	NiTi SMA
Anyag 10	Porózus NiTi SMA

50. táblázat A vizsgált anyagjelöltek listája és típusa a döntéstámogatási elemzéshez [57]

Jellemzők	
1	Sűrűség (g/cm^3)
2	Szakítószilárdság (MPa)
3	Rugalmassági modulus (GPa)
4	Nyúlás (%)
5	Korrózióállóság
6	Kopásállóság
7	Osszintegráció

51. táblázat A célfüggvényhez használt jellemzők súlyozása és értéktartománya

Jellemzők	1	2	3	4	5	6	7
Fontosság	0,071429	0,1071429	0,1428571	0,1071429	0,1785714	0,202381	0,190476
Célérték	1,3	1240	16	54	0,955	0,955	0,955
Max	9,13	1240	240	54	0,955	0,955	0,955
Min	4,3	517	15	10	0,665	0,59	0,5

52. táblázat anyagváltozatok jellemzőinek alsó-felső határértékei a tervezési paraméterek/jellemzők minimum-maximum értékei alapján

Jellemzők	1		2		3		4		5		6		7	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Anyag 1	8	8	517	517	200	200	40	40	0,66 5	0,66 5	0,59	0,59	0,59	0,59
Anyag 2	8	8	862	862	200	200	12	12	0,66 5	0,66 5	0,74 5	0,74 5	0,59	0,59
Anyag 3	9,13	9,13	896	896	240	240	10	30	0,74 5	0,74 5	0,86 5	0,86 5	0,66 5	0,66 5
Anyag 4	8,3	8,3	655	655	240	240	10	30	0,74 5	0,74 5	0,86 5	0,86 5	0,66 5	0,66 5
Anyag 5	4,5	4,5	550	550	100	100	54	54	0,95 5	0,95 5	0,59	0,59	0,74 5	0,74 5
Anyag 6	4,43	4,43	985	985	112	112	12	12	0,95 5	0,95 5	0,66 5	0,66 5	0,74 5	0,74 5
Anyag 7	4,52	4,52	900	900	105	120	10	10	0,95 5	0,95 5	0,66 5	0,66 5	0,74 5	0,74 5
Anyag 8	4,52	4,52	1000	1100	110	110	10	15	0,95 5	0,95 5	0,66 5	0,66 5	0,74 5	0,74 5
Anyag 9	6,5	6,5	1240	1240	48	48	12	12	0,95 5	0,95 5	0,95 5	0,95 5	0,5	0,5
Anyag 10	4,3	4,3	1000	1000	15	15	12	12	0,74 5	0,74 5	0,95 5	0,95 5	0,95 5	0,95 5

A 53. táblázat a vizsgált anyagok normalizált értékeit tartalmazza jellemzőnként, külön-külön az alsó (V_{ij}^L) és felső (V_{ij}^U) értékhatárookra. Ez a formátum lehetővé teszi a bizonytalanságok és rugalmassági sávok kezelését fuzzy logikával támogatott többkritériumos döntési módszerek alkalmazása során.

53. táblázat Anyagjelöltek normalizált értékei alsó és felső határokkal

V_{ij}^L, V_{ij}^U	1		2		3		4		5		6		7	
	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
Anyag 1	0,855 7	0,855 7	1	1	0,817 8	0,817 8	0,318 2	0,318 2	1	1	1	1	0,802 2	0,802 2
Anyag 2	0,855 7	0,855 7	0,522 8	0,522 8	0,817 8	0,817 8	0,954 5	0,954 5	1	1	0,575 3	0,575 3	0,802 2	0,802 2
Anyag 3	1	1	0,475 8	0,475 8	0,995 6	0,995 6	1	0,545 5	0,724 1	0,724 1	0,246 6	0,246 6	0,637 4	0,637 4
Anyag 4	0,894 7	0,894 7	0,809 1	0,809 1	0,995 6	0,995 6	1	0,545 5	0,724 1	0,724 1	0,246 6	0,246 6	0,637 4	0,637 4
Anyag 5	0,408 7	0,408 7	0,954 4	0,954 4	0,373 3	0,373 3	0	0	0	0	1	1	0,461 5	0,461 5
Anyag 6	0,399 7	0,399 7	0,352 7	0,352 7	0,426 7	0,426 7	0,954 5	0,954 5	0	0	0,794 5	0,794 5	0,461 5	0,461 5
Anyag 7	0,411 2	0,411 2	0,470 3	0,470 3	0,395 6	0,462 2	1	1	0	0	0,794 5	0,794 5	0,461 5	0,461 5
Anyag 8	0,411 2	0,411 2	0,193 6	0,193 6	0,417 8	0,417 8	1	0,886 4	0	0	0,794 5	0,794 5	0,461 5	0,461 5
Anyag 9	0,664 1	0,664 1	0	0	0,142 2	0,142 2	0,954 5	0,954 5	0	0	0	0	1	1
Anyag 10	0,383 1	0,383 1	0,332	0,332	0,004 4	0,004 4	0,954 5	0,954 5	0,724 1	0,724 1	0	0	0	0

A 54. táblázat a korábbi döntési mátrix 53. táblázat konzervatív értékelésre előkészített változata, ahol minden cellában a $\min(V_{ij}^L, V_{ij}^U)$ érték szerepel, vagyis az adott jellemzőnél az alsó és felső érték közül a kedvezőtlenebb (óvatosabb) lett megtartva.

54. táblázat A célfüggvényhez használt jellemzők súlyozása és értéktartománya

Jellemző	$\min(V_{ij}^L, V_{ij}^U)$						
	1	2	3	4	5	6	7
Anyag 1	0,855683	1	0,8177778	0,3181818	1	1	0,802198
Anyag 2	0,855683	0,5228216	0,8177778	0,9545455	1	0,5753425	0,802198
Anyag 3	1	0,4757953	0,9955556	0,5454545	0,7241379	0,2465753	0,637363
Anyag 4	0,893997	0,8091286	0,9955556	0,5454545	0,7241379	0,2465753	0,637363
Anyag 5	0,408685	0,9543568	0,3733333	0	0	1	0,461538
Anyag 6	0,399745	0,3526971	0,4266667	0,9545455	0	0,7945205	0,461538
Anyag 7	0,411239	0,4702628	0,3955556	1	0	0,7945205	0,461538
Anyag 8	0,411239	0,1936376	0,4177778	0,8863636	0	0,7945205	0,461538
Anyag 9	0,664112	0	0,1422222	0,9545455	0	0	1
Anyag 10	0,383142	0,3319502	0,0044444	0,9545455	0,7241379	0	0

55. táblázat Anyagválasztási mátrix maximális teljesítményértékek szerint

Jellemző	$\max(V_{ij}^L, V_{ij}^U)$						
	1	2	3	4	5	6	7
Anyag 1	0,855683	1	0,8177778	0,3181818	1	1	0,802198
Anyag 2	0,855683	0,5228216	0,8177778	0,9545455	1	0,5753425	0,802198
Anyag 3	1	0,4757953	0,9955556	1	0,7241379	0,2465753	0,637363
Anyag 4	0,893997	0,8091286	0,9955556	1	0,7241379	0,2465753	0,637363
Anyag 5	0,408685	0,9543568	0,3733333	0	0	1	0,461538
Anyag 6	0,399745	0,3526971	0,4266667	0,9545455	0	0,7945205	0,461538
Anyag 7	0,411239	0,4702628	0,4622222	1	0	0,7945205	0,461538
Anyag 8	0,411239	0,3319502	0,4177778	1	0	0,7945205	0,461538
Anyag 9	0,664112	0	0,1422222	0,9545455	0	0	1
Anyag 10	0,383142	0,3319502	0,0044444	0,9545455	0,7241379	0	0

12.2.2. Tranzitivitásvizsgálat

A 56. táblázat az intervallum-alapú VIKOR módszer döntési mátrixának tranzitivitási táblázata, amely azt ellenőrzi, hogy az alternatívák közötti rangsor tranzitív és következetes-e az intervallum értékek alapján.

A mátrixban minden sor egy alternatívához tartozik, és az oszlopok mutatják, hogy az adott alternatíva dominálja-e a többi.

A sárgával jelölt sorok egy intervallum-alapú dominanciaellenőrzést reprezentálnak, amelyben minden egyes alternatíva (sor) össze van hasonlítva a többi alternatívával a következő feltétel alapján: $Q_i^U \leq Q_i^L$. Ez az eset garantálja, hogy az i -edik alternatíva legalább olyan jó, mint j -edik alternatíva minden megengedett érték szerint, azaz tranzitív és megbízható a döntés.

Példa:

Anyag 1:

- $Q_i^L = 1, Q_i^U = 1$
- Dominálja-e Anyag 2-t? Ez csak akkor igaz, ha $1 \leq 0,938249$ tehát HAMIS
- Tehát az Anyag 1 nem biztosan jobb a többinél.

Anyag 10:

- $Q_i^L = 0,3, Q_i^U = 0,3$
- Minden Q_i^L nagyobb: 0,558, 0,794 stb.
- Minden oszlop: IGAZ
- Tehát az Anyag 10 dominál minden más alternatívát biztosan, tehát ez az egyértelműen legjobb választás.

Összefoglalás:

- A mátrix megvizsgálja a Q intervallumok közötti egyértelmű sorrendet.
- Az „IGAZ” azt jelenti, hogy az adott sorban lévő anyag biztosan jobb (kisebb Q) a vizsgált oszlop béli anyagnál.

- A teljes sorban IGAZ eset (pl. Anyag 10) azt jelenti, hogy az az alternatíva minden másnál jobb, intervallum szerint is.
- Ez a vizsgálat feltárja az intervallum alapú döntésekben rejlő bizonytalanságokat és megmutatja, hogy egy adott alternatíva minden más felett állhat-e függetlenül az intervallumok átfedésétől.

TRANZITIVITÁSI MÁTRIX ÉRTELMEZÉSE

A domináns (1-es) értékeket világoszöld színű mező jelöli, míg a nem domináns (0) értékek háttérre fehér.

- Q_i^L az alsó határ a kompromisszumos döntési mutatóra (legjobb eset),
- Q_i^U a felső határ (legrosszabb eset).

56. táblázat Intervallum-alapú döntésmátrix Q értékekkel és páronkénti összehasonlítással

Optimizmus	0,5											
Intervallum összehasonlítás		Q_i^L	1	0,938 249	0,794 501	0,800 173	0,661 282	0,464 154	0,676 563	0,141 927	0,558 582	0,3
		Q_i^U	1	0,938 249	0,838 158	0,863 385	0,661 282	0,464 154	0,685 1	0,666 125	0,558 582	0,3
Q_i^L	Q_i^U	#1 <= #2?	Anyag 1	Anyag 2	Anyag 3	Anyag 4	Anyag 5	Anyag 6	Anyag 7	Anyag 8	Anyag 9	Anyag 10
1	1	Anyag 1	IGAZ	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS
0,93824 892	0,938 249	Anyag 2	IGAZ	IGAZ	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS
0,79450 139	0,838 158	Anyag 3	IGAZ	IGAZ	IGAZ	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS
0,80017 323	0,863 385	Anyag 4	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS	HAMIS
0,66128 159	0,661 282	Anyag 5	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	HAMIS	IGAZ	HAMIS	HAMIS	HAMIS
0,46415 417	0,464 154	Anyag 6	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	HAMIS	IGAZ	HAMIS
0,67656 321	0,685 1	Anyag 7	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	HAMIS	HAMIS	IGAZ	HAMIS	HAMIS	HAMIS
0,14192 667	0,666 125	Anyag 8	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	HAMIS
0,55858 19	0,558 582	Anyag 9	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	HAMIS	IGAZ	HAMIS	IGAZ	HAMIS
0,3	0,3	Anyag 10	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ	IGAZ

12.2.3. Az intervallum-alapú VIKOR módszerrel számított értékek és végső rangsor

Az utolsó sorban az algoritmus végrehajtásához szükséges normalizálási referenciaértékek:

- a legalacsonyabb kompromisszumos eltérés
 $S_i^L = 0,295151355$,
- a legmagasabb kompromisszumos eltérés
 $S_i^U = 0,852931359$,
- a legkisebb legrosszabb eltérés
 $R_i^L = 0,886363636$,

d) a legnagyobb legrosszabb eltérés

$$R_i^U = 1.$$

57. táblázat A végső rangsor az anyagválasztási döntéstámogatáshoz

Súlyozás	0,5	Optimizmus	0,5				
Anyagok	S_i^L	S_i^U	R_i^L	R_i^U	Q_i^L	Q_i^U	Rang
Anyag 1	0,852931	0,8529314	1	1	1	1	10
Anyag 2	0,784044	0,7840443	1	1	0,9382489	0,9382489	9
Anyag 3	0,623685	0,6723866	1	1	0,7945014	0,8381578	8
Anyag 4	0,651828	0,7005293	0,9955556	1	0,8001732	0,8633852	7
Anyag 5	0,475071	0,4750706	1	1	0,6612816	0,6612816	5
Anyag 6	0,478275	0,4782752	0,9545455	0,9545455	0,4641542	0,4641542	3
Anyag 7	0,492118	0,501642	1	1	0,6765632	0,6851005	6
Anyag 8	0,453479	0,4804736	0,8863636	1	0,1419267	0,6661249	2
Anyag 9	0,360503	0,360503	1	1	0,5585819	0,5585819	4
Anyag 10	0,295151	0,2951514	0,9545455	0,9545455	0,3	0,3	1
	0,295151	0,8529314	0,8863636	1			

12.2.4. A szakirodalomból [57] származó hibás döntési mátrix intervallumértékekkel

Ez a mátrix a forrásban publikált intervallum-alapú értékelést tartalmazza.

58. táblázat A szakirodalomi hibás számítású döntési mátrix [57]

V_{ij}^L, V_{ij}^U	1		2		3		4		5		6		7	
	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
Anyag 1	0,85 57	0,85 57	1 1	1 1	0,81 78	0,81 78	0,31 82	0,31 82	1,01 72	1,01 72	1,01 37	1,01 37	0,81 32	0,81 32
Anyag 2	0,85 57	0,85 57	0,52 28	0,52 28	0,81 78	0,81 78	0,95 45	0,95 45	1,01 72	1,01 72	0,58 9	0,58 9	0,81 32	0,81 32
Anyag 3	1 1	1 1	0,47 58	0,47 58	0,99 56	0,99 56	1 1	0,54 55	0,74 14	0,74 14	0,26 03	0,26 03	0,64 84	0,64 84
Anyag 4	0,89 4	0,89 4	0,80 91	0,80 91	0,99 56	0,99 56	1 1	0,54 55	0,74 14	0,74 14	0,26 03	0,26 03	0,64 84	0,64 84
Anyag 5	0,40 87	0,40 87	0,95 44	0,95 44	0,37 33	0,37 33	0 0	0 0	0,01 72	0,01 72	1,01 37	1,01 37	0,47 25	0,47 25
Anyag 6	0,39 97	0,39 97	0,35 27	0,35 27	0,42 67	0,42 67	0,95 45	0,95 45	0,01 72	0,01 72	0,80 82	0,80 82	0,47 25	0,47 25
Anyag 7	0,41 12	0,41 12	0,47 03	0,47 03	0,39 56	0,46 22	1 1	1 1	0,01 72	0,01 72	0,80 82	0,80 82	0,47 25	0,47 25
Anyag 8	0,41 12	0,41 12	0,33 2	0,19 36	0,41 78	0,41 78	1 1	0,88 64	0,01 72	0,01 72	0,80 82	0,80 82	0,47 25	0,47 25
Anyag 9	0,66 41	0,66 41	0 0	0 0	0,14 22	0,14 22	0,95 45	0,95 45	0,01 72	0,01 72	0,01 37	0,01 37	1,01 1	1,01 1
Anyag 10	0,38 31	0,38 31	0,33 2	0,33 2	0,00 44	0,00 44	0,95 45	0,95 45	0,74 14	0,74 14	0,01 37	0,01 37	0,01 1	0,01 1

12.3. TÖMÍTÉSI TELJESÍTMÉNY MODELL ÉS ELEMZÉS

A statikus O-tömítőgyűrűs tömítések hatékonyságát befolyásoló geometriai tényezőket foglalja össze a 59. táblázat, amelyek különösen fontosak az O-tömítőgyűrű és a horony kölcsönös illeszkedésének szempontjából. A táblázat meghatározza a releváns méretparamétereket, az 61. táblázat pedig a tömítési teljesítmény optimalizálásához használt célfüggvényeket tartalmazza.

12.3.1. A vizsgált geometriai paraméterek meghatározása

A TERVEZÉSI FAKTOROK (VÁLTOZÓK) KIVÁLASZTÁSA

Az 59. táblázatban zölddel jelöltek a változó tervezési faktorok, a D paraméter fixált, az F paraméter konstans jellemzőként lett kezelve..

59. táblázat A tervezési tér paraméterei: az O-tömítőgyűrűs tömítés optimalizálás kiindulási paraméterei

Jelölés	Paraméter	Állapot	Megjegyzés
A	O-tömítőgyűrű belső átmérő	Változtatható	ISO tűrésmező: 13,78–14,22 mm
B	O-tömítőgyűrű keresztmetszet	Változtatható	ISO tűrésmező: 1,70–1,86 mm
C	Horony külső átmérő Ø	Változtatható	H9 tűrésmező: 14,980–15,023 mm
D	Horony belső átmérő Ø	Fixált	h9 tűrésmező: nem változik
E	Horony mélység	Változtatható	Ajánlott: 0,83–0,93 mm
F	Horony rádiusz	Jellemző érték	Állandó: 0,01 mm

12.3.2. Faktorok és szintek meghatározása

60. táblázat A faktorok és szintek meghatározása

Paraméter	Alsó szint (L)	Közép szint (M)	Felső szint (H)
A (O-gyűrű belső átmérő)	13,78 mm	14,00 mm	14,22 mm
B (O-gyűrű keresztmetszet)	1,70 mm	1,78 mm	1,86 mm
C (Horony külső Ø)	14,98 mm	15,00 mm	15,02 mm
E (Horony mélység)	0,83 mm	0,88 mm	0,93 mm

12.3.3. Célfüggvények definiálása

A 61. táblázatban szereplő négy definiált fő célfüggvényt (összenyomás, horonykitöltés, megnyúlás, külső összenyomás) alkalmazom a döntési mátrix felépítéséhez. A célfüggvények mindegyike a az illeszkedés és a tömítettség minőségét jellemzi.

61. táblázat Az O-tömítőgyűrűs tömítési teljesítmény optimalizálásához használt célfüggvények

Célfüggvény	Jelölés	Típus	Ideális érték	Definíció
Összenyomás (%)	$C_{\%}$	Célérték	20–35% (statikus)	az O-tömítőgyűrű axiális összenyomása
Összenyomás (mm)	C_{mm}	Származtatott	—	az O-tömítőgyűrű keresztmetszeti méretéből adódik, tényleges alakváltozás mértékét határozza meg
Horonykitöltés (%)	$F_{\%}$	Maximum	$\leq 85\%$ ideális, $<95\%$ még elfogadható	a horony térfogatához viszonyított O-tömítőgyűrű térfogat
Szerelési megnyúlás (%)	ε	Minimum-orientált	0–2% ajánlott	a belső átmérő változása beszereléskor
Külső összenyomás (%)	$C_{ext.\%}$	Maximum-orientált	$\leq 3\%$	az axiális tömítési síkon kívüli deformációs tartomány

12.3.4. Kritériumok meghatározása

62. táblázat Az Az O-tömítőgyűrűs tömítési alternatívákra vonatkozó kritériumok

Kritérium	Típus	Előnyös értéktartomány
Összenyomás (%)	Célértékhez közeli	20–35% (statikus alkalmazás esetén)
Horonykitöltés (%)	Max. 85%	max. 85% (optimális), de <95% még elfogadható
Megnyúlás a szerelésnél (%)	Minél kisebb	0–2% ajánlott
Külső összenyomás (%)	Max. 3%	0–3%
Kritérium	Típus	Előnyös értéktartomány

12.3.5. Döntési mátrix felépítése (Q-mátrix)

63. táblázat Az O-gyűrűs tömítési alternatívákra vonatkozó kritériumok

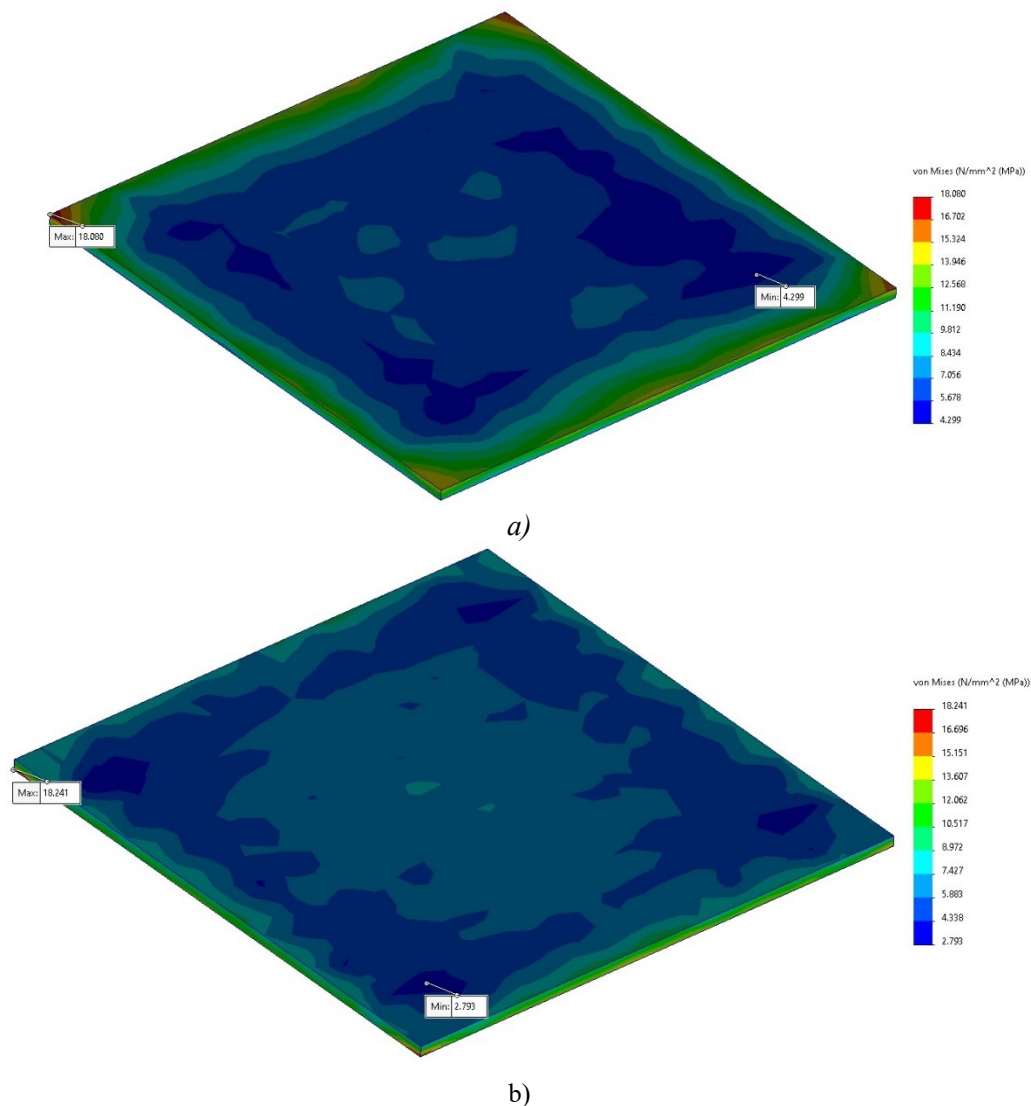
Alternatíva	Összenyomás (%)	Horonykitöltés (%)	Megnyúlás a szerelésnél (%)	Külső összenyomás (%)
A1	45,29–55,38	548–822,94	0–2,325	12,55–16,50
A2	45,29–55,38	391,56–575,13	0–0,874	11,51–15,50
A3	45,29–55,38	91,74–129,83	0–2,325	0–0

13. VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓK EREDMÉNYEI

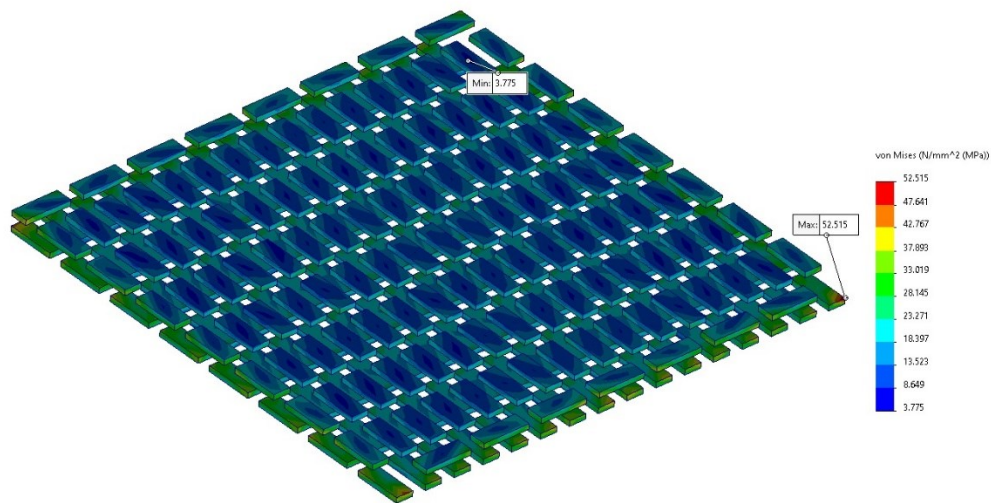
13.1. A TE MODUL VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓINAK EREDMÉNYEI

64. táblázat Az alkotóelemekben ébredő legnagyobb von Mises feszültségek értékei 100 °C terhelés esetén, $L=0,5$ mm

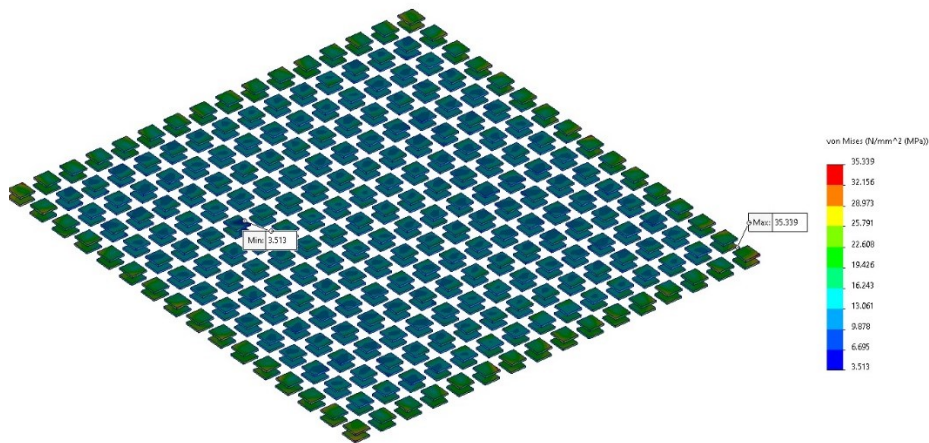
Terhelés	Elemek	Anyagok	Max. fesz. / MPa	Min. fesz. / MPa	Megfelel
-	Felső szigetelő	Al_2O_3	18,080	4,299	igen
$\Delta T=100$ °C	Alsó szigetelő	Al_2O_3	18,247	2,793	igen
	Elektromos vezető	Cu	52,515	3,775	igen
	Forraszanyag	$SnPb$	35,339	3,513	igen
	p-pellet/n-pellet	Bi_2Te_3	48,785	7,314	igen



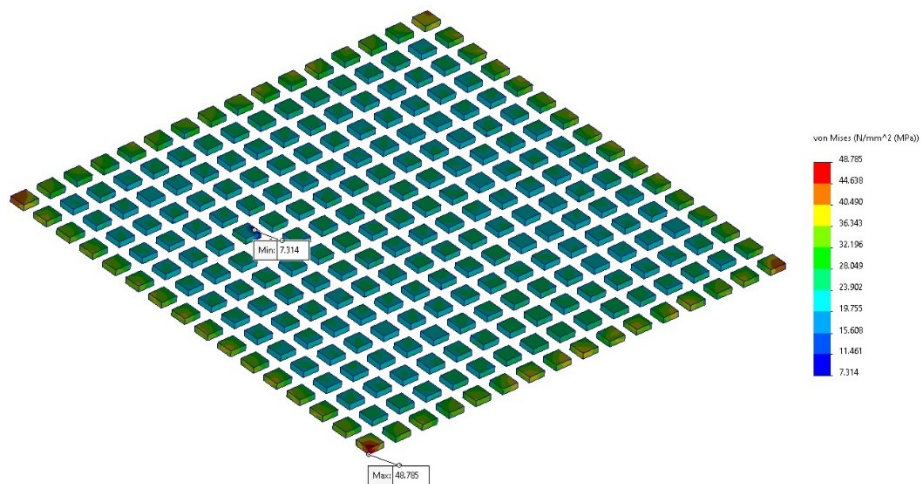
53. ábra A thermoelektromos modul konstrukciós elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100 °C hőmérséklet különbség esetén: a) a felső és b) az alsó kerámia szigetelő elemekben ébredő maximális a modulkonfigurációban 100 °C hőmérséklet különbség esetén a meleg és a hideg oldal között



a)



b)

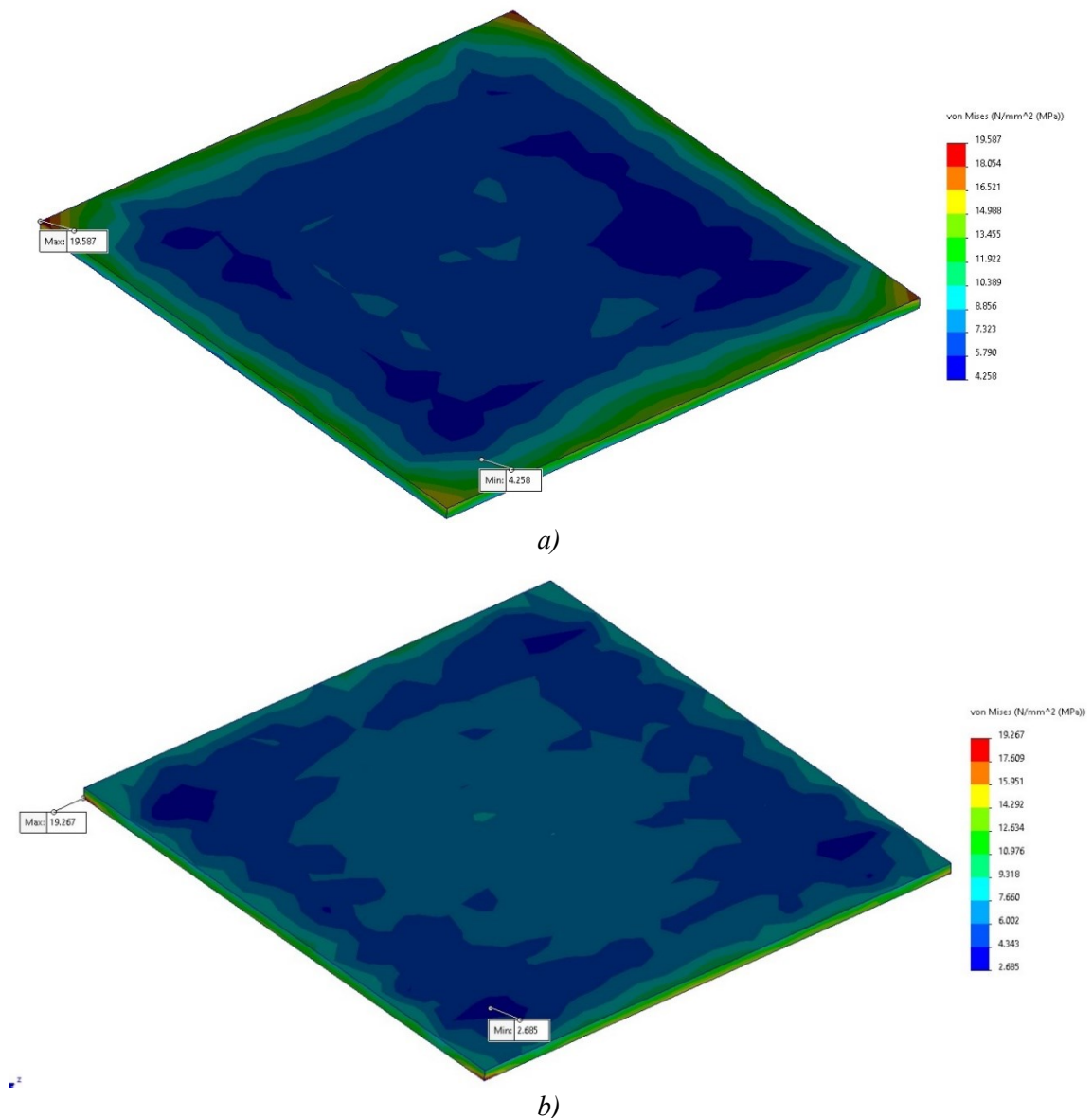


c)

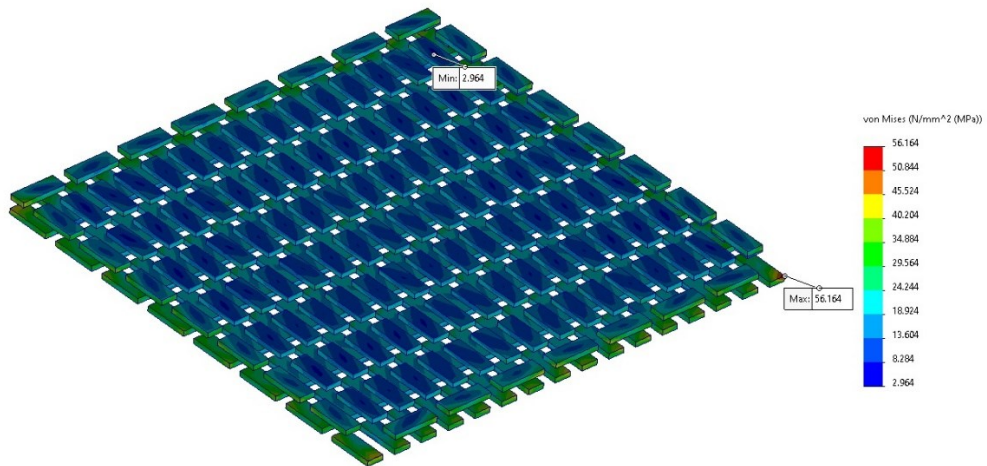
54. ábra A thermoelektromos modul konstrukciós elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100 °C hőmérséklet különbség a meleg és a hideg oldal között esetén: a) Réz, Cu b) Forrasztó réteg, SnPb, c) n, p típusú pellet, Bi₂Te₃

65. táblázat Az alkotóelemekben ébredő legnagyobb von Mises feszültségek értékei 100 °C terhelés és 1200 psi esetén, $L=0,5$ mm

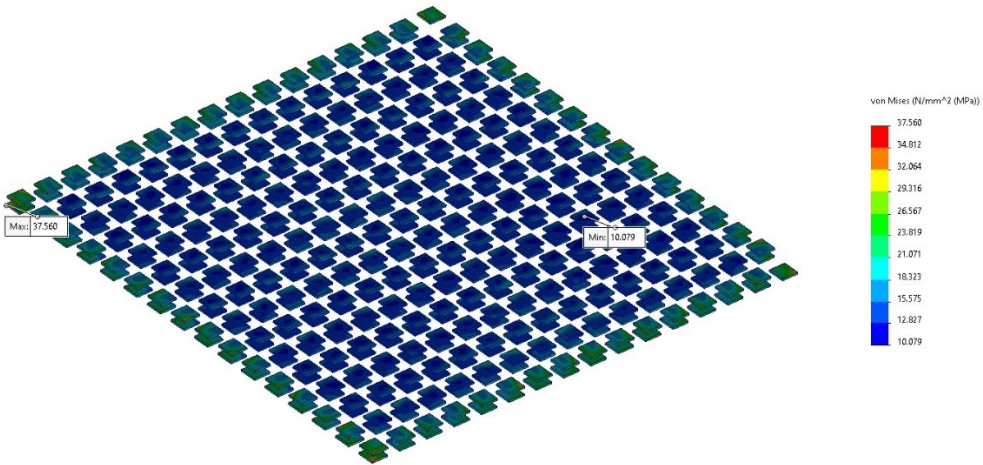
Terhelés	Elemek	Anyagok	Max. fesz. / MPa	Min. fesz. / MPa	Megfelel
1200 psi	Felső szigetelő	Al_2O_3	19,587	4,587	igen
$\Delta T=100^\circ C$, 1200 psi	Alsó szigetelő	Al_2O_3	19,267	2,685	igen
	Elektromos vezető	Cu	56,164	2,964	igen
	Forraszanyag	$SnPb$	37,560	10,079	igen
	p-pellet/n-pellet	Bi_2Te_3	51,735	17,855	igen



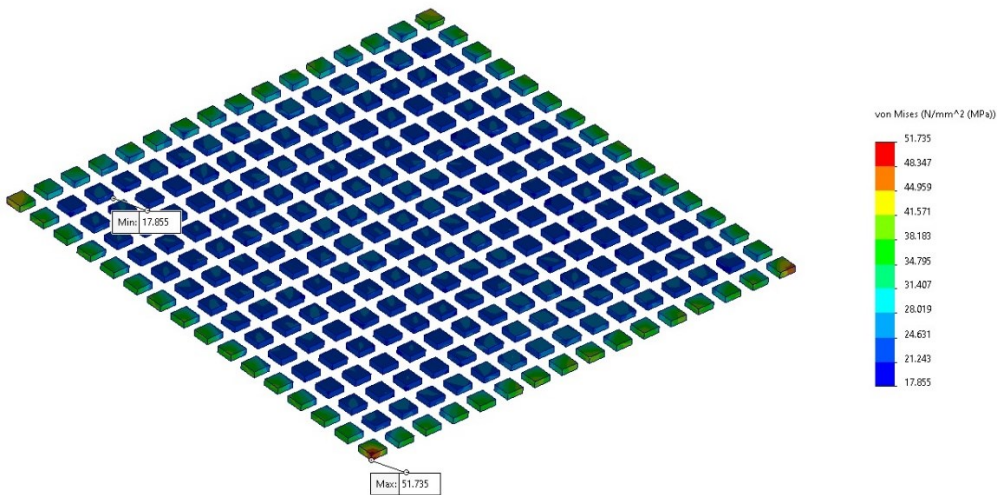
55. ábra A thermoelektromos modul konstrukciós elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100 °C hőmérséklet különbség esetén: a) a felső és b) az alsó kerámia elemekben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100 °C hőmérséklet különbség a meleg és a hideg oldal között és 1200 psi összeszorító erő esetén



a)



b)



c)

56. ábra A thermoelektromos modul konstrukció elemeiben ébredő maximális von Mises feszültség (MPa) a modulkonfigurációban 100 °C hőmérséklet különbség a meleg és a hideg oldal között és 1200 psi összeszorító erő esetén: a) Réz, Cu b) Forrasztó réteg, SnPb, c) n, p típusú pellet, Bi₂Te₃

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani, a kutatásom során segítséget nyújtóknak, elsősorban konzulensemnek Dr. Takács Ágnes docensnek a kutatás során nyújtott támogatásért.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani kedves tanárainknak: Prok Istvánnak, Szilágyi Brigittának, Niczinger Évának, Szabó Margitnak és id. Szabó Margitnak, hogy támogattak.

Köszönettel tartozom a tanszék összes munkatársának, akik munkájukkal segítették a kutatásom létrejöttét.

Továbbá, szeretnék köszönetet mondani, akiknek nem lehetek elég hálás türelmükért és támogatásukért: családomnak.