

MATLAB-FEM optimalizációs környezet kialakítása és alkalmazása elektromos járműmotorok fejlesztésére

Írta:

Istenes György

4. éves járműmérnök Bsc hallgató, belső égésű motor mérnöki szakirány

Konzulens:

Dr. Horváth Zoltán

egyetemi tanár, tanszékvezető

Széchenyi István Egyetem

2014. november

Győr

Tartalom

1	Bevezetés.....	1
2	A mérnöki probléma felvetése	2
2.1	Az optimalizáció célja	3
2.2	Villamos gépek veszteségszámítása.....	3
2.2.1	Vasveszteség.....	3
2.2.2	Tekercsveszteség.....	4
2.3	Mágnesek tömege.....	4
3	Módszerek áttekintése.....	4
3.1	Számítási módszerek áttekintése.....	4
3.1.1	Maxwell-egyenletek	4
3.1.2	A végeelem-módszer	5
3.2	Optimalizációs módszerek.....	6
3.2.1	Genetikus optimalizáció	6
3.2.2	Többcélú optimalizáció	6
4	A végeelem-módszer validálása.....	7
5	Végelem-modell felépítése	8
5.1	Geometria.....	8
5.2	Tekercselés.....	9
5.3	Anyagtulajdonságok.....	9
5.4	Peremfeltételek.....	10
5.5	Végelem-háló beállítása	10
5.6	A modell egyszerűsítése	14
6	Az optimalizáció beállítása	14
6.1	A megvizsgált paraméterkombinációk számának meghatározása.....	14
6.2	Az Osyczka és Kundu függvény.....	15
7	Költségfüggvény felépítése	18
7.1	A modell kimenetei	19
7.2	A modell bemenetei.....	19
7.2.1	Munkaponti paraméterek.....	19
7.2.2	Optimalizációs paraméterek	19
7.2.3	Rögzített paraméterek.....	20
7.2.4	Implicit paraméterek.....	21
7.3	Optimalizáló beállítása	21
7.3.1	Szelekció.....	21
7.3.2	Utódlás.....	21
7.3.3	Mutáció.....	22

7.4	Kezdeti populáció.....	22
7.5	Feltételek ellenőrzése	22
7.6	A tekercs geometriájának kiszámítása.....	23
7.7	Kitöltési tényező kiszámítása.....	23
7.8	A költségfüggvény működése.....	23
7.9	Árambecslés	24
7.10	Áramkeresés	24
7.11	Határok meghatározása	25
7.12	Futtatás	25
7.13	A MATLAB és az ANSYS Maxwell közötti kapcsolat	26
8	Eredmények kiértékelése	26
8.1	A kiindulási SZEM2 motor célfüggvényértékei	26
8.2	Az optimalizáció során megvizsgált motorkonstrukciók célfüggvényértékei.....	27
8.3	Mágnesek tömegének szempontjából optimális egyed	28
8.4	Energetikailag optimális egyed.....	29
8.5	Egy példa a mindkét szempont szerint előnyös egyedre	30
8.6	Az egyes generációk nem dominált egyedei.....	30
8.7	Eredmények összefoglalása	31
9	Konklúzió	32
10	Köszönetnyilvánítás.....	33
11	Irodalomjegyzék	34

1 Bevezetés

Mivel villamos hajtás rendszereket sok személyautóban és más járműben is alkalmaznak már, a széles körben változó felhasználási területek megkövetelik az egyes alkalmazásokhoz szabott motorok tervezését. A különböző szempontok szerinti specifikus motorok megtervezéséhez az egyik legcélravezetőbb eszköz a validált szimuláción alapuló többcélú optimalizáció. Jó példa ennek a módszernek az alkalmazására a F. Bittner, I. Hahn: Kriging-Assisted Multi-Objective Particle Swarm Optimization of Permanent Magnet Synchronous Machine for Hybrid and Electric Cars című tudományos cikk. [1]

Dolgozatomban egy általam készített, villamos járműmotorok fejlesztését célzó, számítógépes szimulációkon alapuló optimalizációs rendszert, ennek validálását és alkalmazását mutatom be.

A motorszimulációhoz a motormodelleket és szimulációt az ANSYS Maxwell környezetben valósítottam meg. Az optimalizációs problémát a motortervezéssel szemben támasztott mérnöki szempontok szerint állítottam fel:

- tervezési változók: a motor geometriai paraméterei;
- célfüggvények és típusaik: veszteségek (pl. ohmikus ellenállás, örvényáram miattiak) minimalizálása és a mágnesek tömegeinek minimalizálása;
- kényszerfeltételek: a geometriára vonatkozó gyárthatósági feltételek, illetve az egyes optimalizációs paraméterek alsó és felső határértékei.

A MATLAB többcélú genetikusan optimalizáló algoritmusának segítségével végeztem az optimalizációt, amit egy általam készített könnyen kezelhető MATLAB input-output felülettel kezelek.

A modellezés során különösen annak megoldása okozott kihívást, hogy az optimalizáció bemeneti paraméterei általában nem egyeztek meg a szimuláció bemeneti paramétereivel. A nyomaték-fordulatszám munkapontokat nem lehet bemenő adatként megadni, először áram-fordulatszám munkapontokká kell alakítani, ehhez szükség volt egy belső iterációs ciklusra is.

A szimulációt a nemzetközi szakirodalomban publikált Toyota Prius elektromos motorjának mérési adataival validáltam. A MATLAB-ANSYS Maxwell optimalizációs keretrendszert alkalmaztam a SZE Járműipari Kutatóközpontja által tervezett SZEM2 motor fejlesztésére.

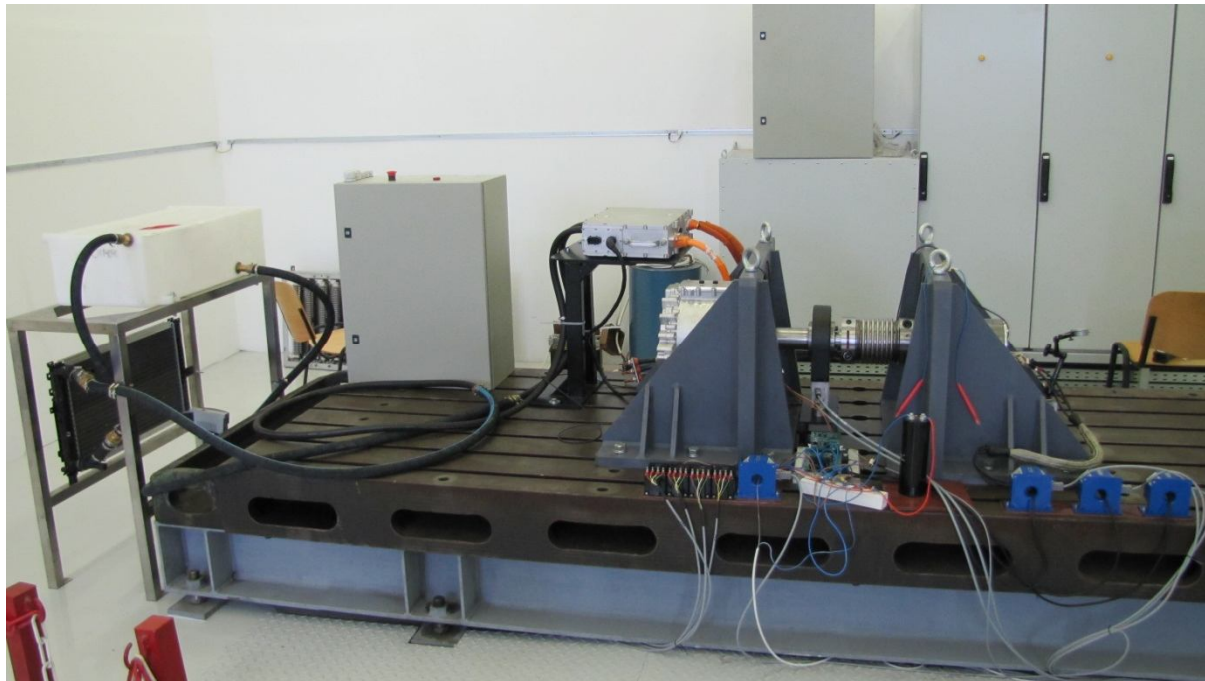
2 A mérnöki probléma felvetése

Az elektromos és hibrid autók területén szükséges villamos motoroknál, fontos a nagy nyomaték- és teljesítménysűrűség, a magas hatásfok, miközben a rendelkezésre álló hely és energiafogyasztás korlátozott. Ezeknek a követelményeknek leginkább az állandó mágneses szinkronmotorok (PMS motorok) felelnek meg, ezért ez egy elektromos és hibrid járművekben gyakran használt motortípus. A dolgozatomban a SZE Járműipari Kutatóközpontja által tervezett SZEM2 motor optimalizációját mutatom be. A SZEM2 motor a következő ábrán látható (1. ábra):



1. ábra: A SZE Járműipari Kutatóközpontja által tervezett SZEM2 motor

A motor tesztelésére nem volt lehetőségem, mivel a dolgozatom leadásáig a SZE Járműipari Kutatóközpontja által tervezett és épített elektromos motor tesztpadja nem készült el. A tesztpadot jelenlegi állapotában (2014. november 5.) a következő kép mutatja be (2. ábra):



2. ábra: A SZE Járműipari Kutatóközpontja által tervezett és épített elektromos motor tesztpad

2.1 Az optimalizáció célja

Az optimalizáció során a két célom a veszteségek csökkentése és az állandómágnesek tömegének csökkentése. Utóbbira a költséghatékonyság miatt van szükség, mivel az ilyen típusú motoroknak ez a legköltségesebb alkatrészük. Az optimalizáció célja egy olyan motor modelljének elkészítése, ami a kitűzött célfüggvények alapján a különböző kényszerfeltételeket figyelembe véve optimális.

A kiindulási SZEM2 és az optimalizáció során vizsgált motorokkonstrukciók vizsgálatára végelelemes-módszert alkalmaztam. A végelelemes motormodelleket ANSYS Maxwell programban építettem fel.

2.2 Villamos gépek veszteségszámítása

Az egy egyedre számított összes veszteség a különböző munkapontokban számolt vas- és tekercsveszteség összege adja meg. A munkapontok veszteség teljesítményei az egyes munkapontok idő szerinti súlyozásával vannak megszorozva, és ezeknek a szorzatoknak az összege adja meg az összes veszteség energiát.

2.2.1 Vasveszteség

Vasveszteség néven az állandómágnesek által keltett mozgó mágneses tér által indukált örvényáramok veszteségteljesítményét és a tekercsben folyó áram gyors irányváltásai miatti hiszterézis veszteségteljesítményt értjük. A következő összefüggés írható fel a vasveszteség kiszámítására:

$$p_c = K_h f |B|^2 + K_e (f |B|)^2 \quad ^1$$

Ahol K_h a hiszterézisveszteség együtthatója, K_e az örvényáramú veszteség együtthatója, $f(B)$ szinuszos váltakozásának frekvenciája. [2]

2.2.2 Tekercsveszteség

A tekercsveszteség a tekercselésben folyó áram ohmikus vesztesége. Kiszámítása a következő összefüggés alapján történik:

$$p_w = 3 \left(\frac{I^2}{\sqrt{2}} \right) \rho \frac{l}{\frac{d^2 \pi}{4}} N p^2$$

ahol I a gerjesztőáram amplitúdója, ρ a vezető fajlagos ellenállása, l a motor hossza, N a menetszám, p pedig a pólusszám. [2]

2.3 Mágnesek tömege

A mágnesek a legdrágább alkatrészei a motornak, ezért fontos csökkenteni a tömegüket és így méretüket is. A tömegek a modell geometriai tulajdonságaiból (a mágnesek 2 dimenziós modelljének területe és a motor hossza), valamint anyagjellemzőiből (sűrűség) adódnak.

3 Módszerek áttekintése

3.1 Számítási módszerek áttekintése

A villamos járműmotorok vizsgálatánál tipikusan nem lehet a felállított problémákat analitikus módszerekkel megoldani. Az általam felépített célfüggvények vizsgálatához (veszteségminimalizálás, nyomatékmaximalizálás) szükség van numerikus módszerekre, az elektrodinamikai eljárásokat leíró Maxwell-egyenletek megoldására. Az általam felépített végelelem-modell is ezeket az egyenleteket használja fel az időtől függő (tranziens) szimulációk futtatásához.

3.1.1 Maxwell-egyenletek

Az időben változó mágneses mező villamos mezőt hoz létre. Ez fordítva is igaz, tehát hogy az időben változó villamos mező mágneses mezőt hoz létre. Ennek a gondolatmenetnek az alapján a Maxwell által felállított egyenletek megoldása szükséges például az

¹ A vasveszteség kiszámítása.

² A tekercsveszteség kiszámítása.

állandómágneses szinkronmotorokban (PMS motorokban) található mozgó mágnesek által létrehozott forgó mágneses tér által indukált örvényáramok, és az ezek által létrehozott veszteségek kiszámításához. [3]

A Maxwell-egyenletek differenciális alakban a következők forgásszimmetrikus alakzatokra értelmezve:

$$\nabla \times H(r, t) = J(r, t) + \frac{\partial D(r, t)}{\partial t} \quad ^3$$

$$\nabla \times E(r, t) = -\frac{\partial B(r, t)}{\partial t} \quad ^4$$

$$\nabla \cdot B(r, t) = 0 \quad ^5$$

$$\nabla \cdot D(r, t) = \rho(r, t) \quad ^6$$

$$B(r, t) = \mu_0 [H(r, t) + M(r, t)]$$

$$J(r, t) = \sigma [E(r, t) + E_i(r, t)]$$

$$D(r, t) = \varepsilon_0 E(r, t) + P(r, t) \quad ^7$$

ahol: r a forgástengelytől mért távolság [m], $H(r, t)$ a mágneses térerősség $\left[\frac{A}{m}\right]$, $E(r, t)$ a villamos térerősség $\left[\frac{V}{m}\right]$, $B(r, t)$ a mágneses fluxussűrűség [T], $D(r, t)$ a villamos fluxussűrűség $\left[\frac{C}{m^2}\right]$, $J(r, t)$ a villamos áramsűrűség $\left[\frac{A}{m^2}\right]$, $\rho(r, t)$ a villamos töltéssűrűség $\left[\frac{C}{m^3}\right]$, $M(r, t)$ a mágnesezettség $\left[\frac{A}{m}\right]$, $E_i(r, t)$ a villamos tér hatása $\left[\frac{V}{m}\right]$, $P(r, t)$ a polarizáció $\left[\frac{C}{m^2}\right]$, μ_0 a vákuum permeabilitása $\left[\frac{H}{m}\right]$, σ a vezetőképesség $\left[\frac{S}{m}\right]$, az ε_0 pedig a vákuum dielektromos együtthatója $\left[\frac{F}{m}\right]$. [4]

3.1.2 A végeelem-módszer

A végeelem-módszer (FEM) egy numerikus módszer parciális differenciálegyenletek közelítő megoldására, tehát analitikus módszerekkel nem megoldható problémák közelítő megoldására alkalmas. A jelen problémán való alkalmazásához szükség van egy a valóságos motor tulajdonságaihoz a legjobban közelítő, mégis a lehető legegyszerűbb végeelem-modell felépítésére. A probléma megoldásához és a peremfeltételek megadásához a modellt diszkretizálni kell, ehhez szükséges a végeelem-háló. Az ANSYS Maxwell beépített hálózója kizárólag háromszög elemeket használ a 2 dimenziós modellek felépítésére. Szükség van még a különböző paraméterek kezdeti értékére $t=0$ s időpillanatban, és a peremfeltételek

³ Amperé–Maxwell törvény.

⁴ Faraday–Lenz törvény.

⁵ Gauss mágneses törvénye.

⁶ Gauss-törvény.

⁷ Mágneses fluxus sűrűség, elektromos áramsűrűség és az elektromos fluxus sűrűség.

ismeretére. Ezek a számítások csak közelítő eredményt adnak, viszont a modell paramétereinek beállításával (pl. háló mérete) befolyásolható a közelítés pontossága. [5]

3.2 Optimalizációs módszerek

A matematikai optimalizációt olyan, általában analitikus módszerekkel nem megoldható problémák megoldásakor alkalmazzuk, amikor egy- vagy többváltozós térben kell megtalálni azt az optimális paraméterkombinációt, ahol a célfüggvényünk értéke extrémális. Ez az extrémizálás általában a célfüggvény-értékének minimalizálása vagy maximalizálása. [6]

3.2.1 Genetikus optimalizáció

Az evolúciós matematikai optimalizáló algoritmusok közé tartozik a genetikus optimalizáló algoritmus. A kezdeti populációban van p darabszámú véletlenszerű paraméterkombináció, az ezeken futtatott célfüggvény kiértékelések után a célfüggvény-értékeknek megfelelő sorrendbe rendeződnek. Az optimalizáló algoritmus ezekből a paraméterkombinációkból (egyedekből) hoz létre egy újabb generáció p darabszámú egyedét. Az új generációba az előző generáció legjobbjai egy az egyben belekerülnek, a többi az előző generációk kombinációiból jönnek létre, két előző generációs szülőből jön létre egy utód az új generációba. Ezen kívül létrejöhetnek még az előző generáció egyedeiből mutálódással is egyedek. Minden generációban azonos számú egyed jön létre. Az optimalizáció során lefut g darab generáció, és az utolsó generáció legjobbját alkotja az optimalizáció eredményét. [7]

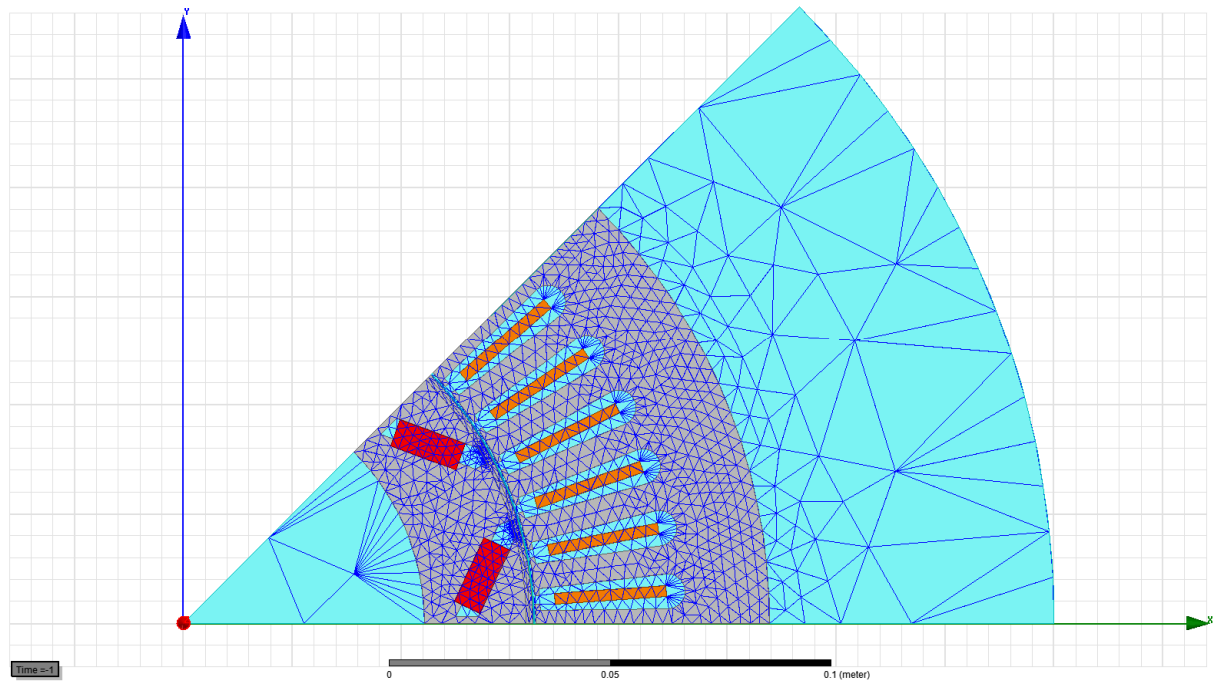
3.2.2 Többcélű optimalizáció

Amennyiben nem csak egy célfüggvényt kell optimalizálni, nem minden esetben lehet megállapítani, hogy egy paramterkombináció egyértelműen jobb egy másiknál. A legegyszerűbb módszer ezek kezelésére, a célértékek súlyozott átlagával egy egycélű optimalizációra lehet visszavezetni a problémát.

Más megközelítésnél a kiértékelt egyedek két részre oszthatóak, a domináltakra, és a nem domináltakra. Egy több célfüggvényből álló problémánál egy adott egyednél csak akkor lehet egyértelműen jobb egy másik egyed, ha a másik egyed dominálja ezt, tehát az összes célfüggvény-értéke jobban megközelíti az optimumot. Azokat az egyedeket, amiknél van egyértelműen jobb egyed, dominált egyedeknek nevezik, amiknél viszont nincs egyértelműen jobb, azokat nem domináltaknak. A nem dominált egyedek generációnként alkotnak egy frontot, ezek az adott generáció legjobb egyedei. Az utolsó generáció nem dominált egyedei által kirajzolt front a többdimenziós célfüggvény terében a pareto front. [7]

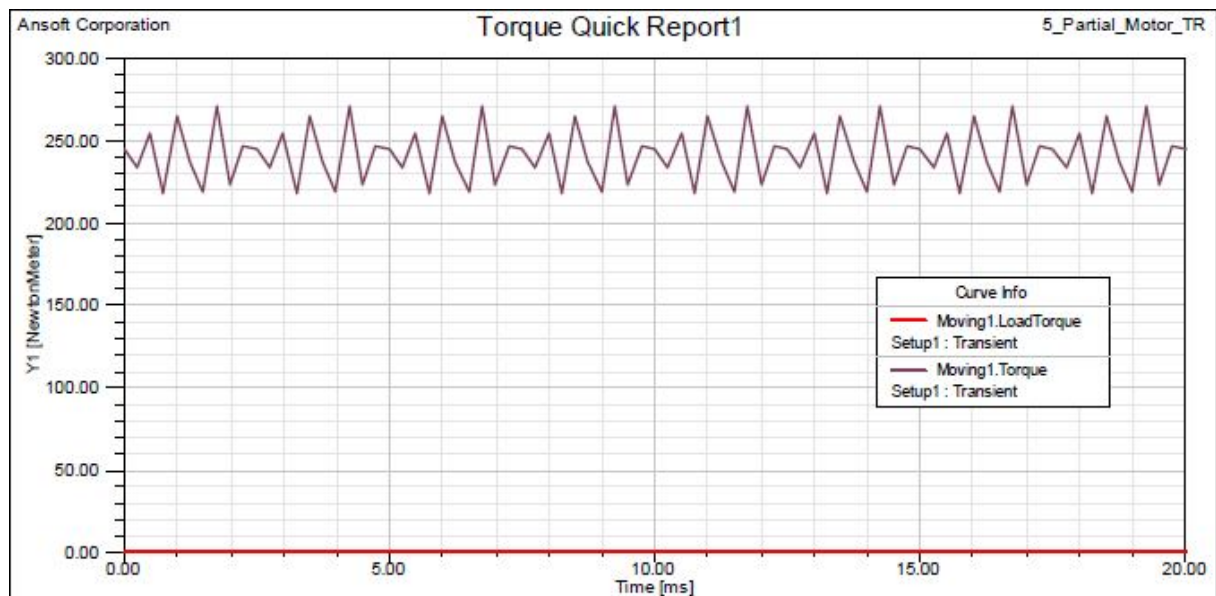
4 A végelem-módszer validálása

A szimuláció validálásához az Example of the 2004 PriusIPM Motor című motoralkalmazás-jegyzet alapján készítettem el a végelem-modellt ANSYS Maxwell programban. A behálózott végelem-modell a következő ábrán látható (3. ábra):



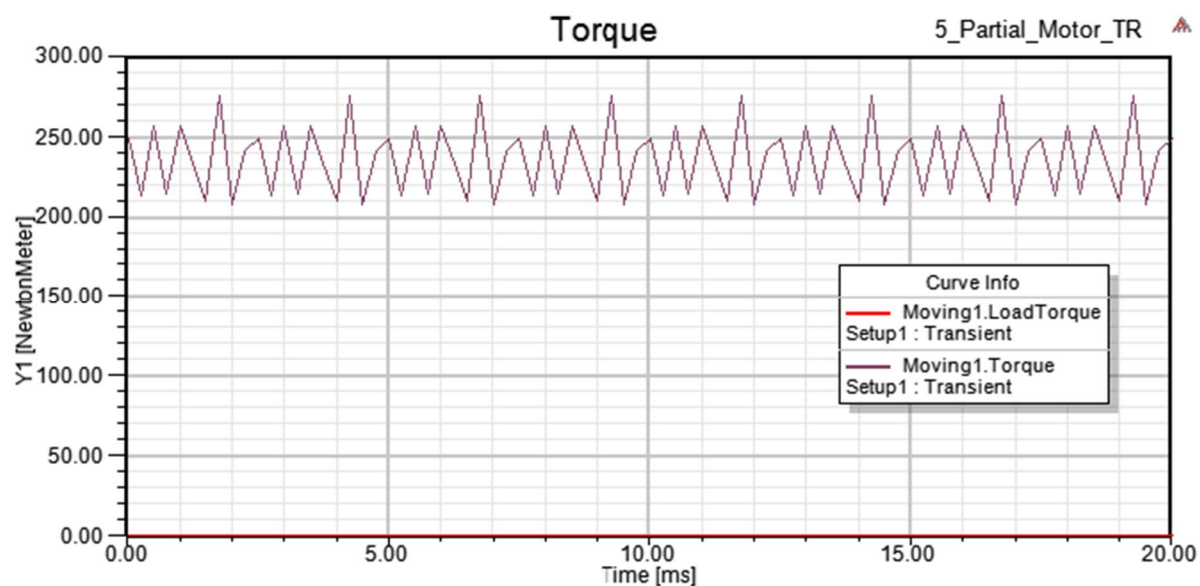
3. ábra: A 2004 PriusIPM Motor behálózott végelem-modellje.

A jegyzetben található eredmény 250A gerjesztőáram-amplitúdónál és 3000 1/min forgási sebességnél az alábbi ábrán látható (4. Ábra): [10]



4. ábra: 2004 PriusIPM Motor nyomaték-idő függvény. [10]

Az általam futtatott ANSYS Maxwellben felépített modell szimulációja a következő eredményt adta azonos áramgerjesztés és fordulatszám mellett (5. Ábra):



5. ábra: 2004 PriusIPM Motor általam szimulált nyomaték-idő függvény.

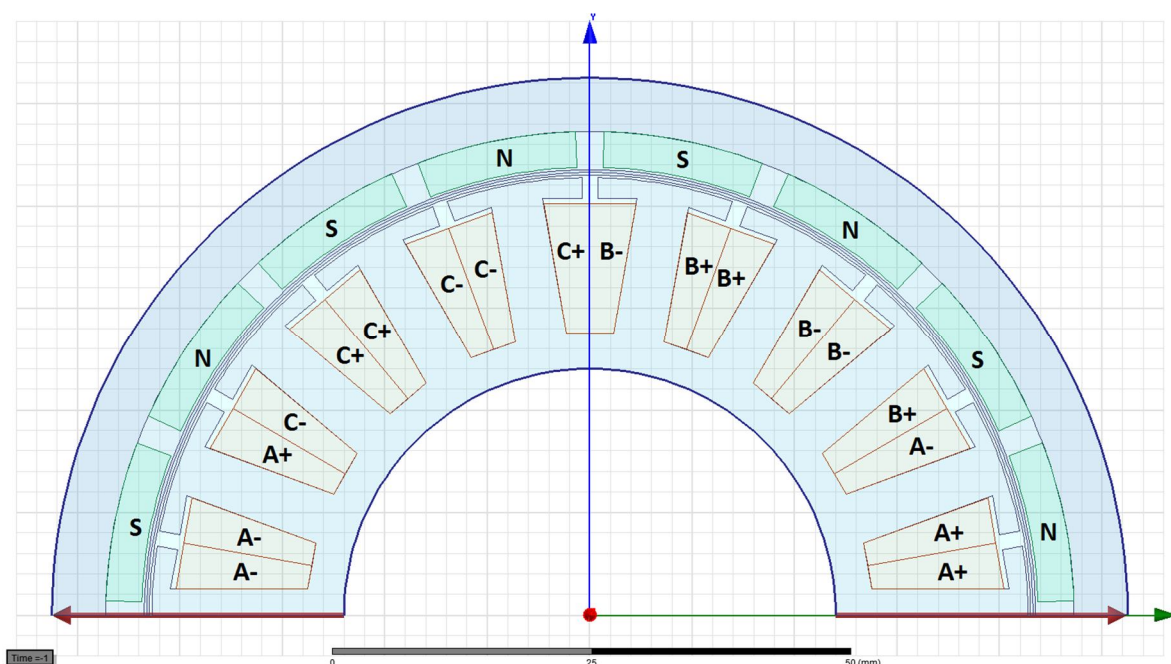
A két nyomatékfüggvény közel azonos, csupán a fluktuáció tér el minimálisan.

5 Végeselem-modell felépítése

A végeselem-modell ANSYS Maxwell környezetben lett felépítve. az optimalizációt egy külső forgórészű, állandómágneses szinkronmotor modelljén hajtottam végre.

5.1 Geometria

A modell egy 18 horonyszámú és 16 pólusszámú külső forgórészes PMS motor. A motor 2 dimenziós geometriáját egy Descartes-féle koordináta-rendszer xy síkján értelmezzük. A motor forgástengelye a z tengely. Mivel a motor 180 fokos szeletei forgásszimmetrikusak, ezért elég a motor felét szimulálni. A motor geometriáját a következő ábra mutatja be (6. ábra):



6. ábra: A végelem-modell geometriai felépítése.

Az ábrán az S és N jelölések a déli és északi mágneses pólusokat jelölik. A tekercselésen az A, B és C a fázisokat, az utána lévő + vagy – jel pedig a gerjesztőáram irányultságát. A + jelnél az irányultság +z irányú, a – jelnél pedig –z.

5.2 Tekercselés

A tekercselés a 6. ábrán látható módon van megvalósítva. A tekercselésen szinuszos áramfüggvény van megadva terhelésként, ennek az állítható paraméterei az amplitúdó, a frekvencia és a kezdeti fázis. Ezeket a paramétereket az előre meghatározott munkapontok (nyomaték és fordulatszám) határozzák meg. Ezen kívül az amplitúdót még befolyásolja a tekercselés kitöltési tényezője is, ezt pedig a horony geometriai tulajdonságai a felhasznált huzal átmérője és zománcozása, ill. a menetszám határozzák meg.

5.3 Anyagtulajdonságok

A motor alkatrészeinek anyagtulajdonságai a következő táblázatban láthatóak (1. táblázat):

Alkatrész	Anyag
Vasmag	M19_29G
Rotor	M19_29G
Tekercselés	réz
Mágnesek	NdFe35

1. táblázat: Anyagtulajdonságok.

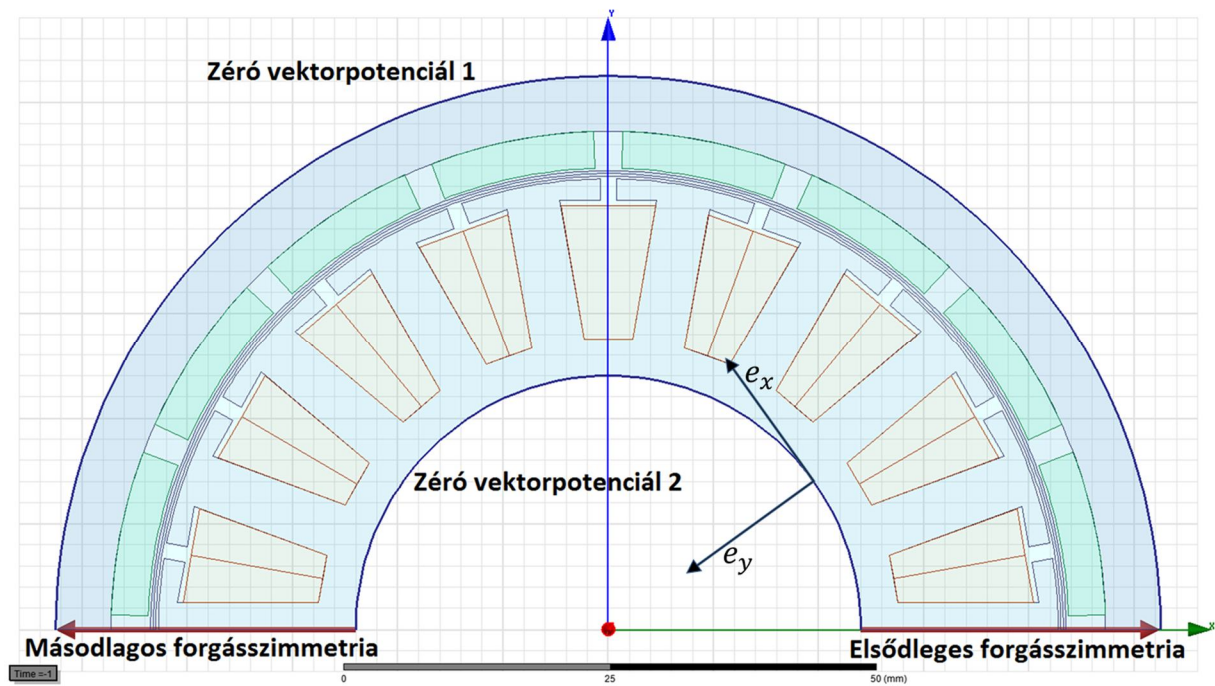
5.4 Peremfeltételek

A rotor külső és a vasmag belső átmérőjén is zéró vektorpotenciál peremfeltétel van. Ez a peremfeltétel nem engedi a modellen kívülre a mágneses fluxusvonalakat. A mágneses vektorpotenciál rotációja kifejezhető $\nabla \times A = B$ alakban. 2 dimenziós problémák esetén ez a kifejezés a következőképpen írható:

$$B = \frac{\partial A_z}{\partial y} e_x - \frac{\partial A_z}{\partial x} e_y$$

e_x -et és e_y -t lokális koordinátákként értelmezve a peremek mentén biztosítható, hogy B érintőleges lesz a peremek mentén, ha $A_z = \text{const}$, mivel ekkor $\frac{\partial A_z}{\partial x} e_y = 0$.

A forgásszimmetria miatt mind a két szabad élre szimmetria peremfeltétel kerül. Az egyik élre elsődleges, a másikra pedig a másodlagos feltétel, ahogy az az alábbi ábrán látható (7. ábra):



7. ábra: A végeselem-modell peremfeltételei.

5.5 Végeselem-háló beállításai

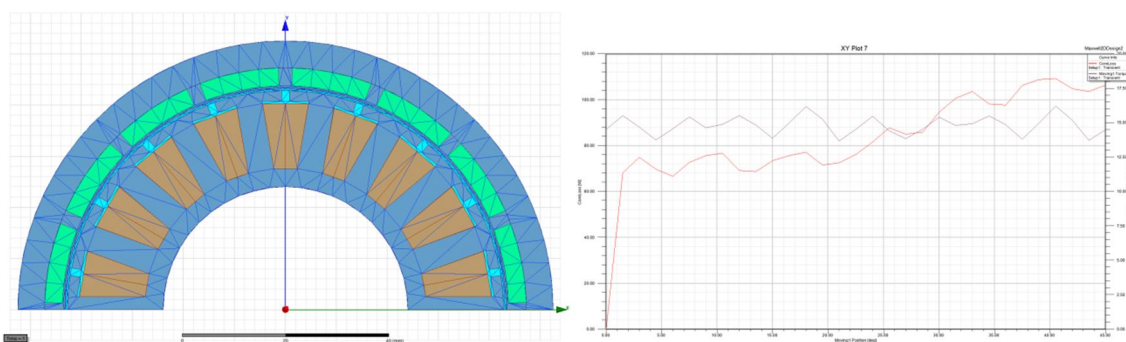
Az optimalizáció során elsősorban a nyomaték és a vasvesztés a legfontosabb kimeneti paraméterei a szimulációnak.

A nyomaték pontos közelítéséhez a légrésben szükséges megfelelő minőségű háló, a vasvesztés kiszámításához pedig a vasmag felületén. Ezen kívül mindkét szempontból

⁸ A mágneses vektorpotenciál rotációja 2 dimenziós problémák esetén.

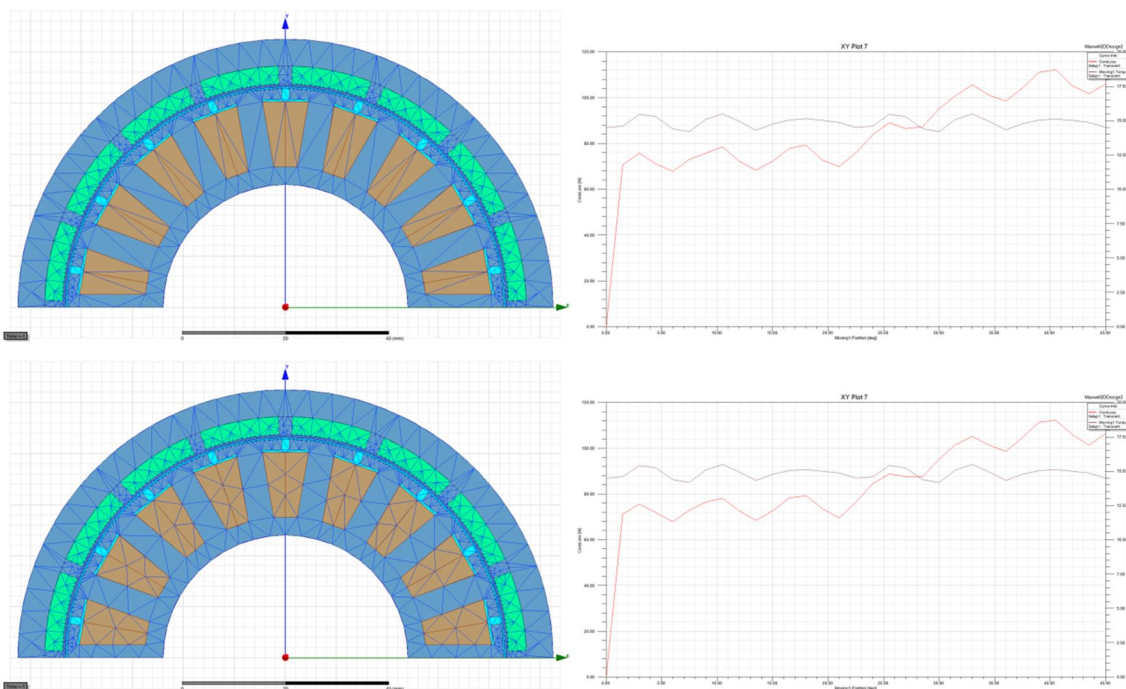
szükséges a tekercselésen is jó minőségű háló. A számítások időszükségletének minimalizálása érdekében a lehető legkevesebb hálóelem felhasználása szükséges.

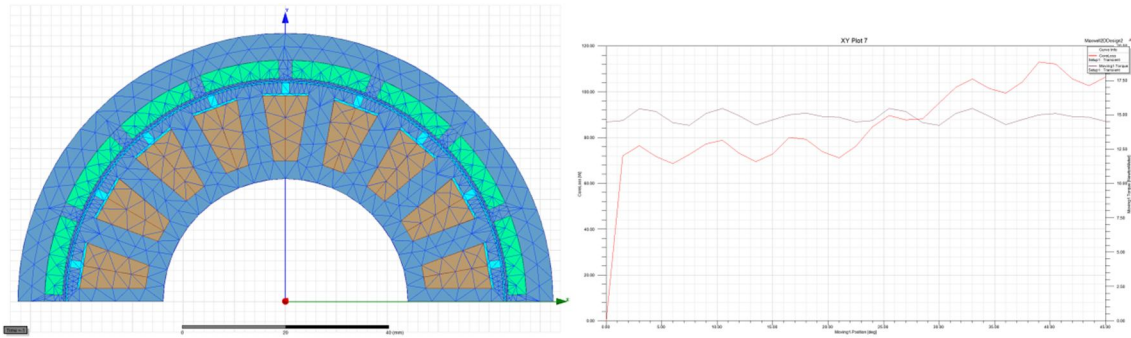
Az ANSYS Maxwell beépített hálózója háromszögelemekből készíti el a végelem-hálót. A hálózónak meg lehet adni az elemek darabszámára, torzulására és méreteire is korlátokat. A torzulásra minden esetben egy feltételt fogalmaztam meg, a háromszög elemeknek nem lehetnek 30 foknál kisebb szögei. A feltételek folyamatos szigorításával megkerestem azt a legkisebb elemszámú hálót, aminél részletesebb hálónál már nem változik jelentősen a számítások eredményének pontossága, tehát az ezzel a hálózással kapott eredmények már függetlenek a további hálófinomításra nézve. A méretfeltételek nélküli eredmények az alábbi ábrán láthatóak (8. Ábra):



8. ábra: A kezdeti hálózhoz tartozó nyomaték és veszteség.

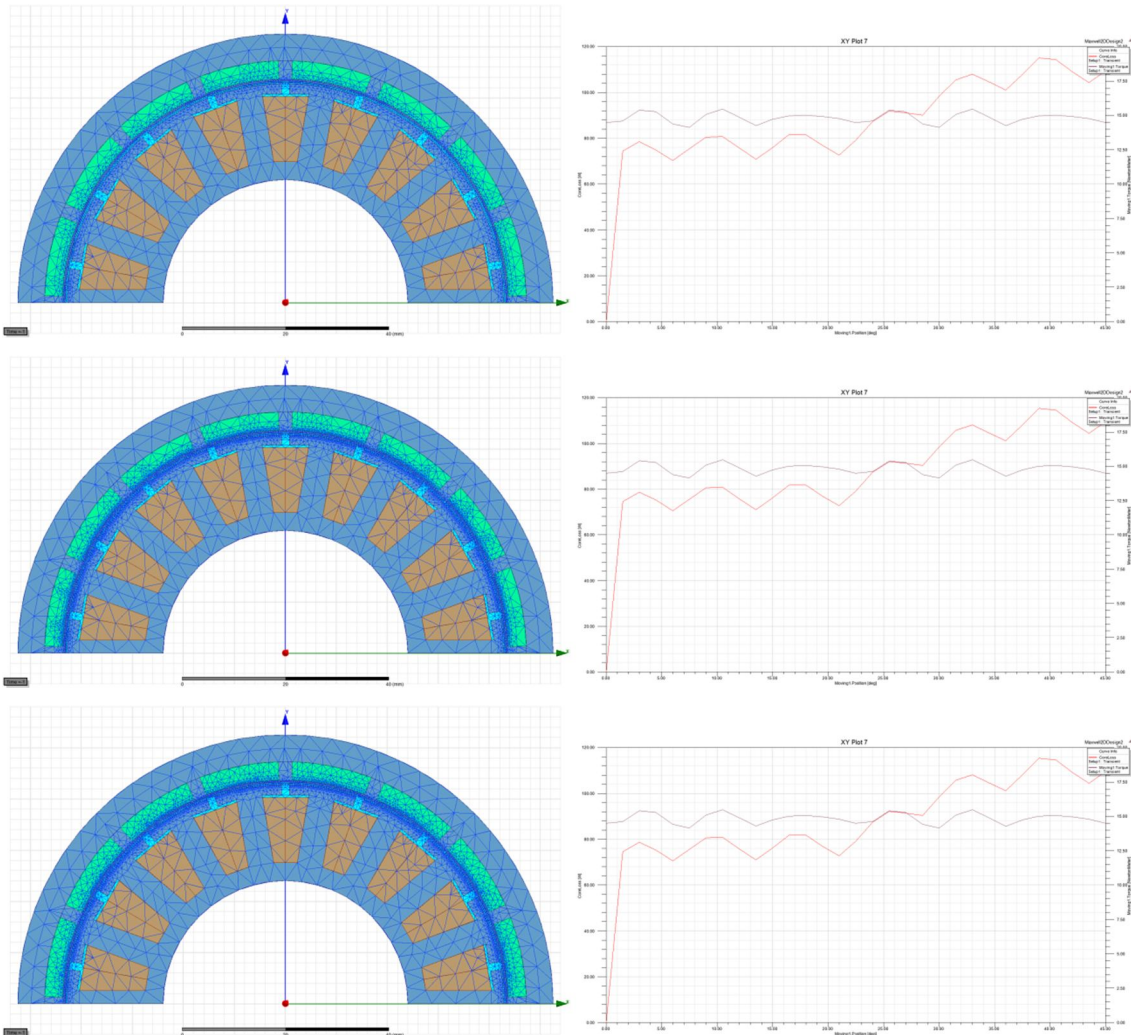
Ezek után a teljes modellre érvényes 20, 10 végül 5 mm-es méretkorlátot, valamint a légrésre vonatkozó 1 mm-es méretkorlátot fogalmaztam meg. A szimuláció eredményei a következő ábrán láthatóan módosultak (9. Ábra):





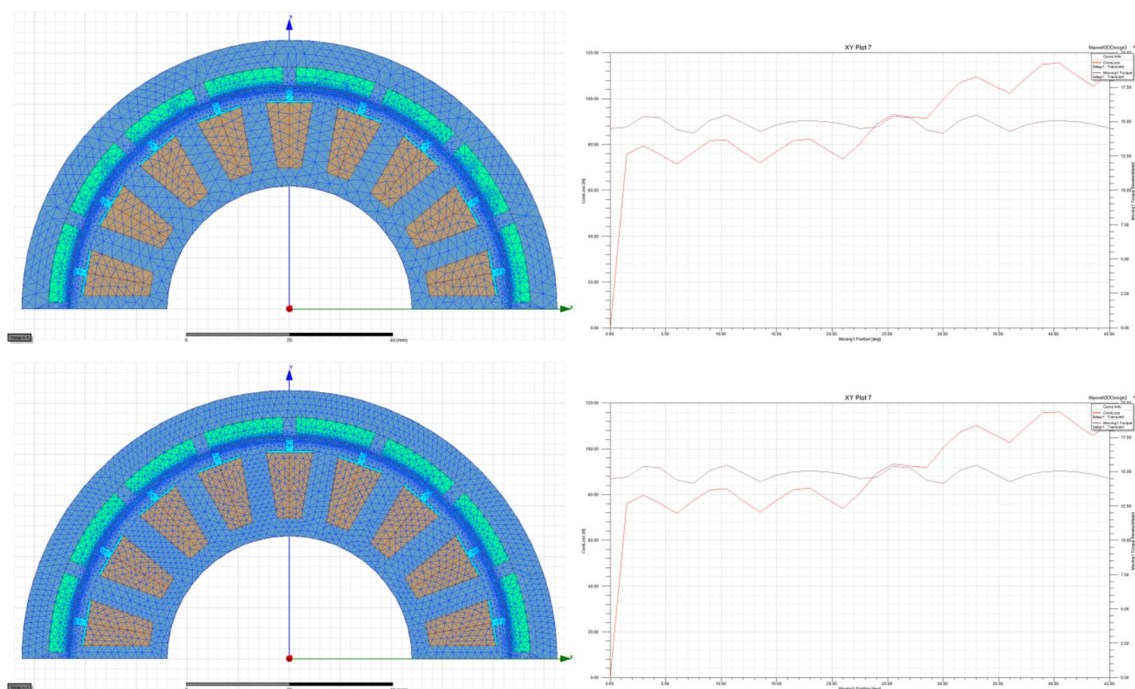
9. ábra: A teljes motorra vonatkozó méretkorlát szűkítésének hatásai a szimuláció eredményeiben..

Minden feltétel szigorítás után javult valamilyen mértékben az eredmények pontossága. Ezután a légrés hálóméretét csökkentettem először 0,5 majd 0,4 mm-re, végül pedig a mágnesekre tettem egy 2 mm-es maximum hálóméret-feltételt (10. ábra):



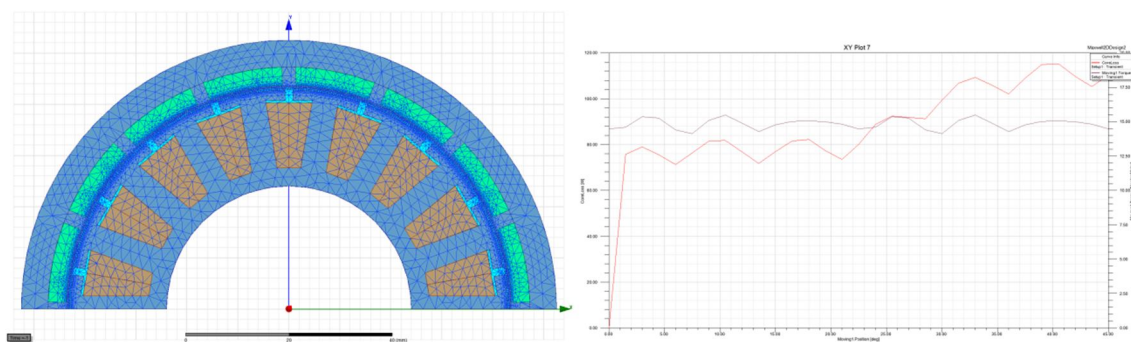
10. ábra: A légrésre és mágnesekre vonatkozó méretkorlát szűkítésének hatásai a szimuláció eredményeiben.

A légrésen lévő hálósűrítés javított az eredmények pontosságán, viszont a mágnesekre megfogalmazott feltétel nem, így azt elhagytam. Ezután a teljes motorra változtattam 3, majd 2 mm-re a maximális hálóméretet (11. ábra):



11. ábra: A teljes motorra vonatkozó méretkorlát szűkítésének hatásai a szimuláció eredményeiben.

A 3 mm-es szigorítás még kimutatható, de a 2 mm-es már elenyésző változással járt az eredményekben, így a teljes modellre felírt maximum elemméretet 3 mm-ben határoztam meg a végső modellen. Ezek után a légrésben csökkentettem az elemméretet 0,3 mm-erre, de ez már nem mutatott jelentős javulást, így azt is az eredeti értékén hagytam (12. ábra):



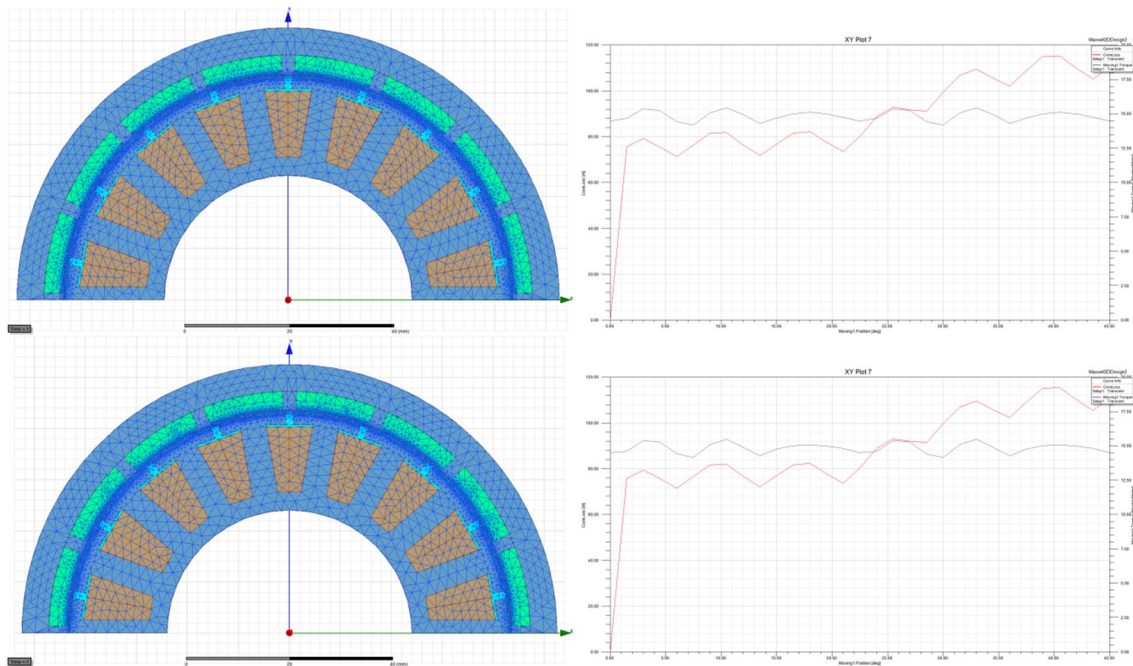
12. ábra: A teljes légrésre vonatkozó méretkorlát szűkítésének hatásai a szimuláció eredményeiben.

A végső hálóra vonatkozó feltételek a következő táblázatban olvashatóak (2. táblázat):

Típus	Hatókör	Érték
Torzulás	Teljes motor	Max. 30 fokos szögek
Méretkorlát	Teljes motor	Max. 3 mm

5.6 A modell egyszerűsítése

A megépített motor mágnesének élén $r = 0,5$ mm sugarú lekerekítés van. Ez a hálózást is megnehezíti, valamint az optimalizációt is korlátozza (pl. a kényszerfeltételeknél figyelembe kell venni), ezért megvizsgáltam, hogy ennek az elhagyása milyen mértékben befolyásolja az eredményeket. Az összevetés a következő ábrán látható (13. ábra):



13. ábra: A mágnesek lekerekítéseinek figyelembevételének, és azok elhagyásának hatásai a szimuláció eredményeiben.

Elenyésző mértékben befolyásolta az eredményeket a módosítás, így a továbbiakban nem vettem figyelembe a lekerekítéseket.

6 Az optimalizáció beállítása

Mivel a végeselem-modellek szimulációjának nagy időszükséglete van, fontos hogy megszabjunk egy futtatási időlimitet. Ennek az időlimitnek a legjobb kihasználásával megtalálni az optimális paraméterkombinációkat. [8]

6.1 A megvizsgált paraméterkombinációk számának meghatározása

Előzetes becslések alapján a jelenlegi modellel egy célfüggvény-kiértékelés átlagosan 6 percig tart. A futtatásra szánt idő 40 óra, ez alatt az idő alatt körülbelül 400 egyed tud lefutni. Mivel $n=400$ és az

$$n = p + (p \cdot g)^9$$

összefüggés alapján (ahol „n” az összes egyedszám, „p” a generációnkénti egyedszám és „g” a generációs szám) meg kellett találni azt a p és g értéket, ahol a legjobban működik az optimalizáló algoritmus ezen a problémán. Ehhez egy olyan akadémiai példafeladatot használtam fel, ami analitikus módon kiértékelhető, így gyorsan (néhány másodperc alatt) lefut.

6.2 Az Osyczka és Kundu függvény

Az általam optimalizálni kívánt modell 6 optimalizációs változóból és 2 célfüggvényből állt. Ezen kívül az optimalizációs változókra vonatkoznak kényszerfeltételek is. Az Osyczka és Kundu függvény szintén 6 optimalizációs változóra és 2 célfüggvényre van felírva, lineáris és nemlineáris kényszerfeltételekkel. [11]

A célfüggvények:

$$f_1(x) = -25(x_1 - 2)^2 - (x_2 - 2)^2 - (x_3 - 1)^2 - 25(x_4 - 4)^2 - 25(x_5 - 1)^2^{10}$$

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^6 x_i^2^{11}$$

A határok:

$$0 \leq x_1, x_2, x_6 \leq 10^{12}$$

$$1 \leq x_3, x_5 \leq 5^{13}$$

$$0 \leq x_4 \leq 6^{14}$$

A lineáris kényszerfeltételek:

$$g_1(x) = x_1 + x_2 - 2 \geq 0^{15}$$

$$g_2(x) = 6 - x_1 - x_2 \geq 0^{16}$$

$$g_3(x) = 2 - x_2 + x_1 \geq 0^{17}$$

$$g_4(x) = 2 - x_1 + 3x_2 \geq 0^{18}$$

A nemlineáris kényszerfeltételek:

$$g_5(x) = 4 - (x_3 - 3)^2 - x_4 \geq 0^{19}$$

$$g_6(x) = (x_5 - 3)^2 - x_6 - 4 \geq 0^{20}$$

⁹ Az összes egyedszám, a generációnkénti egyedszám és a generációs szám közötti összefüggés.

¹⁰ Az Osyczka és Kundu függvény első célfüggvénye.

¹¹ Az Osyczka és Kundu függvény második célfüggvénye.

¹² Az Osyczka és Kundu függvény x_1, x_2, x_6 változókra vonatkozó határ kényszerfeltételei.

¹³ Az Osyczka és Kundu függvény x_3, x_5 változókra vonatkozó határ kényszerfeltételei.

¹⁴ Az Osyczka és Kundu függvény x_4 változóra vonatkozó határ kényszerfeltételei.

¹⁵ Az Osyczka és Kundu függvény első kényszerfeltétele.

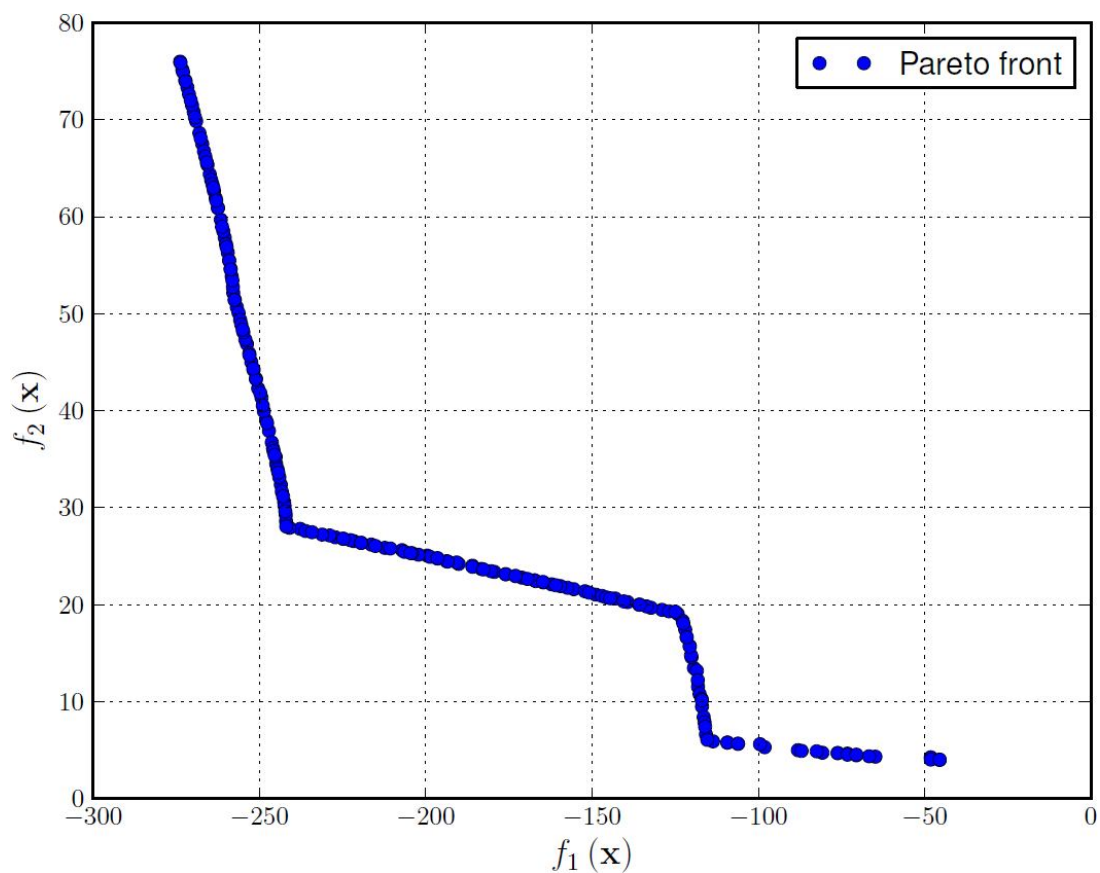
¹⁶ Az Osyczka és Kundu függvény második kényszerfeltétele.

¹⁷ Az Osyczka és Kundu függvény harmadik kényszerfeltétele.

¹⁸ Az Osyczka és Kundu függvény negyedik kényszerfeltétele.

¹⁹ Az Osyczka és Kundu függvény ötödik kényszerfeltétele.

A példafeladat megoldása alapján a pareto frontnak az alábbi ábrán látható módon kell alakulnia (14. ábra):



14. ábra: Osyczka és Kundu függvény pareto frontja. [11]

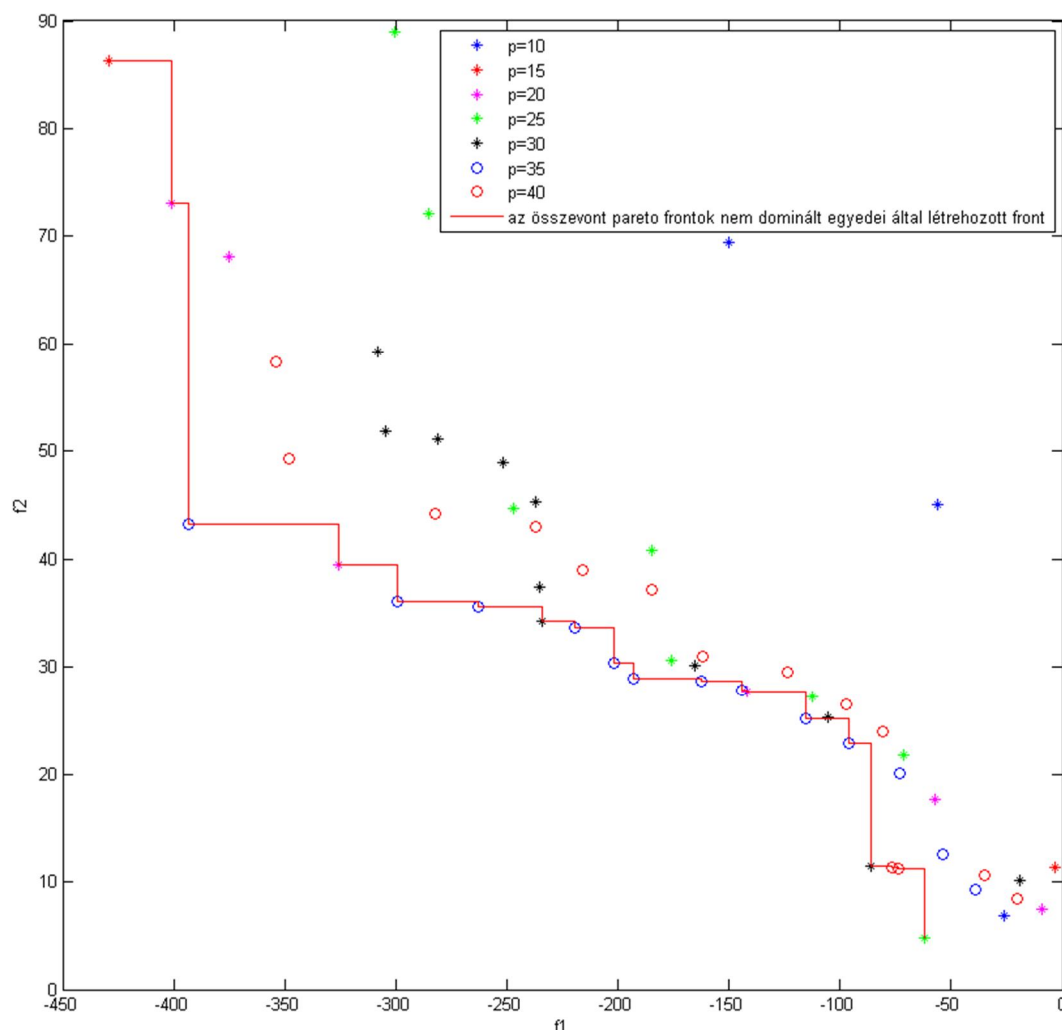
Az általam vizsgált p és g paraméterpárok az következő táblázatban láthatóak (3. táblázat):

p	g	n
10	39	400
15	25	390
20	19	400
25	15	400
30	12	390
35	10	385
40	9	400

3. táblázat: mért értékek különböző vizsgálati paraméterek során.

²⁰ Az Osyczka és Kundu függvény hatodik kényszerfeltétele.

Az eredményként kapott pareto frontok, és az összes pont közül a nem dominált egyedek a következő ábrán láthatóak (15. ábra):

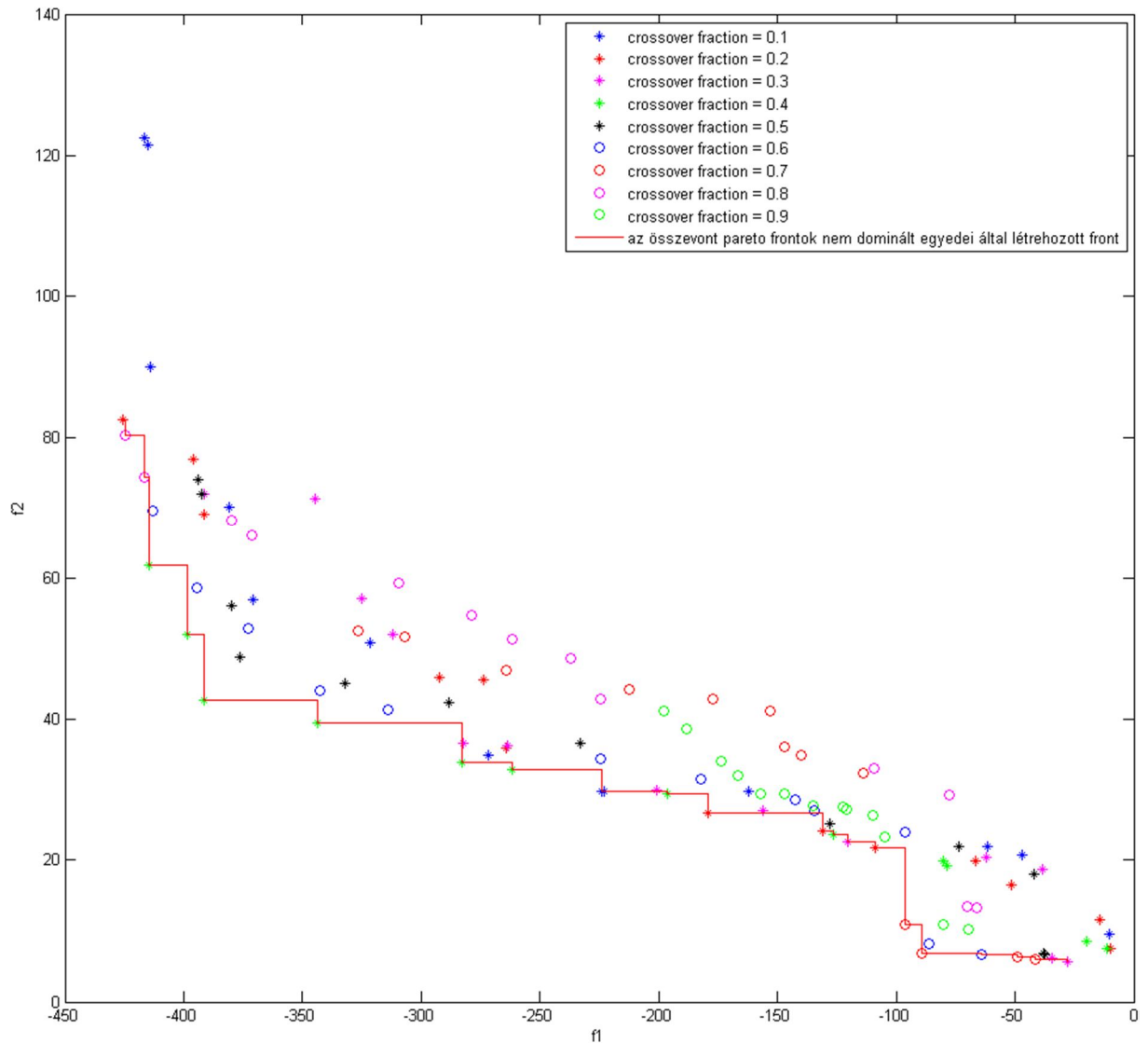


15. ábra: Különböző p és g értékekkel kapott pareto frontok, és az összes pont közül a nem dominált egyedek.

A legtöbb pareto front jól közelítette a megoldásfront jellegét. Az összevont paretofrontok nem dominált 20 egyedéből a legtöbb (10 darab) a $p=35$ és $g=10$ paraméterkombinációból adódtak, így én is ezt a paraméterezést választottam a végeselemes modellem optimalizációjának lefuttatásához.

A genetikus optimalizáció egy másik fontos paramétere a keresztezési arány. Ez egy arányszám, az értéke 0 és 1 között változhat, azt határozza meg, hogy egy adott generáció hányadrésze készüljön két szülő felhasználásával, és hányadrésze mutációval. Ha az értéke 0, akkor az összes egyed mutációval keletkezik, ha pedig az értéke 1, akkor az összes egyed két szülőből keletkezik. [9]

Az előzőleg beállított p és g paraméterekkel futtattam a példafeladatot 0,1 és 0,9 közötti keresztezési arány értékekkel, 0,1-es lépésközzel (16. ábra):

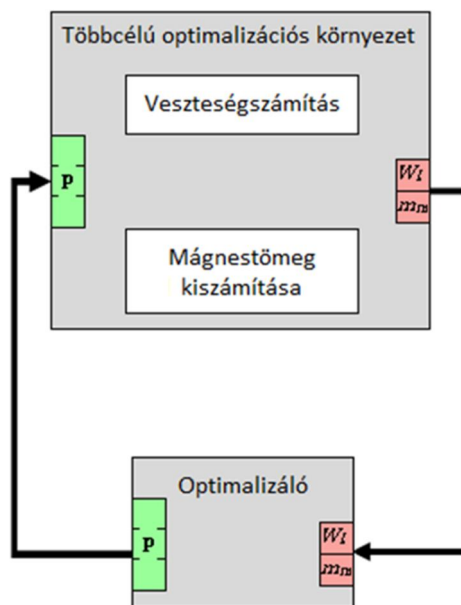


16. ábra: Különböző crossover fraction értékekkel kapott pareto frontok, és az összes pont közül a nem dominált egyedek.

Az összevont paretofrontok nem dominált 24 egyedből a legtöbb (8 darab) a 0,4-es keresztezési arány beállításokkal jöttek ki, így a végeselem-modell optimalizációjakor is ezt a beállítást használtam.

7 Költségfüggvény felépítése

A költségfüggvény két kimenettel rendelkezik, az egy egyedre számított összes veszteség, és a mágnesek tömege. A kimenetek minimalizálása a cél. A következő ábra bemutatja a költségfüggvény és az optimalizáló kapcsolatát (17. ábra):



17. ábra: A költségfüggvény és az optimalizáló kapcsolata.

7.1 A modell kimenetei

A modell kimenetei a 2.2 és 2.3 fejezetekben leírt veszteségek és mágnes tömegek.

7.2 A modell bemenetei

A modell paramétereit négy részre lehet osztani: a munkaponti, az optimalizációs, a rögzített és az implicit paraméterekre.

7.2.1 Munkaponti paraméterek

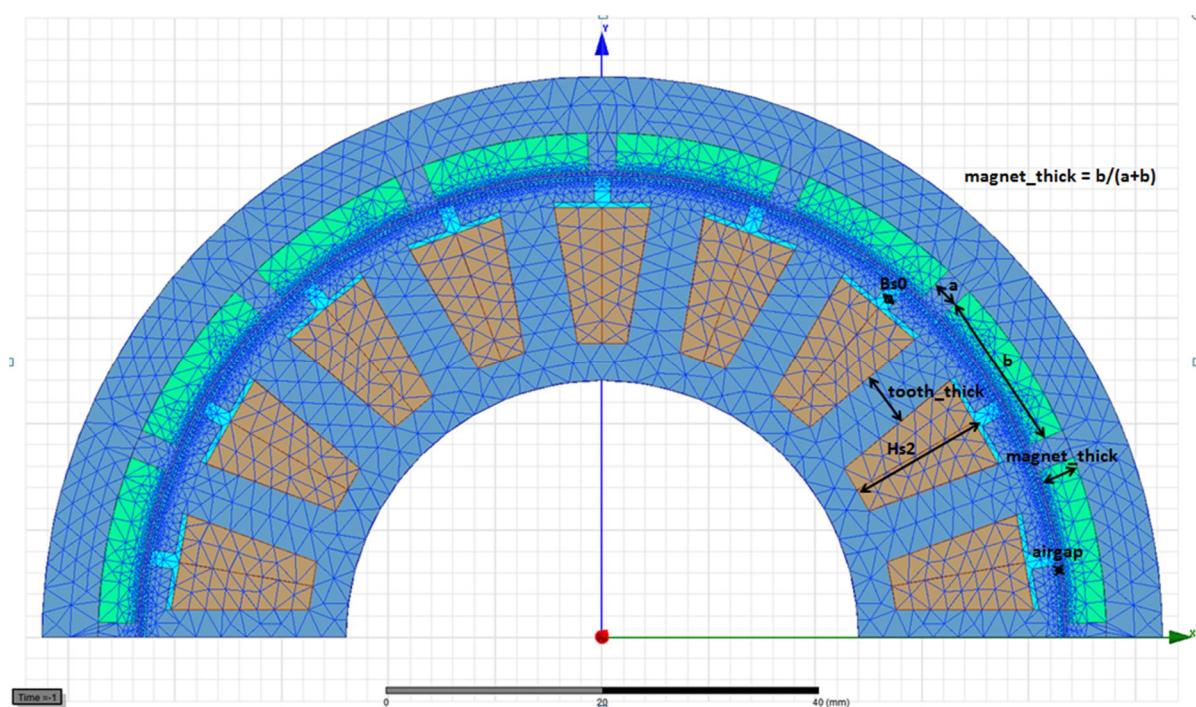
A szimulációt két előre megadott nyomatékigény – fordulatszám – idősúlyozás munkapont határozza meg. Ezek a munkapontok egy motor tervezésénél adottak, a tesztfeladathoz viszont fiktív munkapontokat használtam, amik a következő táblázatban láthatóak (4. táblázat):

Nyomaték	Fordulatszám	Idősúlyozás
20 Nm	1700 1/min	250 s
10 Nm	3400 1/min	108 s

4. táblázat: Munkapontok.

7.2.2 Optimalizációs paraméterek

Az optimalizációs paraméterek azok, amiket az optimalizáló a kényszerfeltételek betartása mellett szabadon változtathat az optimális motormodell megtalálása érdekében. Az optimalizációs paraméterek a következő ábrán láthatóak (18. ábra):



18. ábra: Az optimalizációs paraméterek.

A képen látható a és b nem optimalizációs paraméterek, csak az általuk meghatározott magnet_thick az.

7.2.3 Rögzített paraméterek

A rögzített paraméterek főleg a végelem-modellre vonatkoznak (5. táblázat):

Leírás	Érték
A munkakönyvtár neve.	Az optimalizáció indításának időpontja.
Pólusszám.	16
Horonyszám.	18
A körszimmetrikus modell aránya.	2
Maximum áram.	5000 A
Fognyak vastagsága.	2 mm
Motor hossza.	90 mm
A huzal sorszáma (d = 1,12 mm).	22
A motor külső átmérője.	105 mm
A motor belső átmérője.	48 mm
Menetszám.	3

5. táblázat: Rögzített paraméterek.

7.2.4 Implicit paraméterek

Az implicit paraméterek azok a paraméterek, amiket a többi paraméter határoz meg (6. táblázat):

Név	Leírás
OptSwitch	A futtatás hosszát befolyásoló paraméter.
nullphase	Az áramgerjesztés kezdeti fáziseltolása.
wires_of_conductors	Vezetőnkénti huzalszám.
Bs1	A hornyok légrés felőli oldala.
Bs2	A hornyok belső oldala.
frequ	Az áramgerjesztés frekvenciája.
rotor_inner_d	A rotor belső átmérője.
slot_angle	A horony nyílásszöge.
stator_outer_d	A vasmag külső átmérője.
fill_factor	A horony kitöltési tényezője.
Hs0_wind	A fognyak és a tekercsrés együttes szélessége.

6. táblázat: Implicit paraméterek.

7.3 Optimalizáló beállítása

A MATLAB programba integrált *gamultiobj* nevű többcélú genetikus algoritmust használok az optimalizációhoz. A korábban meghatározott p, g és n paraméterek alapján a generációk egyedszáma 35, és a kezdeti populáció után még 19 generációt futtat le az optimalizáló, tehát összesen 700 paraméterkombináció lesz megvizsgálva. A keresztezési arány paraméter 0,4, ez azt jelenti, hogy az egyes generációk 40%-a utódlással, és 60%-a mutációval jön létre.

7.3.1 Szelekció

A szelekció a *selectiontournament* függvénnyel történik, ez két-két egyedet hasonlít össze, és a kettő közül a jobb kerül be a következő körbe, így állítja fel a sorrendet a generáció egyedi között.

7.3.2 Utódlás

Az utódlásról az eredetileg beépített *crossoverintermediate* függvény általam módosított *crossoverintermediate_own* függvény gondoskodik. Ez a függvény a két szülő paramétereiből egy véletlenszerűen generált súlyozással hoz létre egy utódot. A módosításra azért volt szükséges, mert a probléma megoldásához szükséges kényszerfeltételek között van olyan, amihez szükséges belső iteráció, és ezt az optimalizáló a beépített kényszerfeltétel-kezelőjével

nem tudná figyelembe venni, ezért a létrehozott utódot a saját kényszerfeltétel-ellenőrző algoritmusom ellenőrzi.

7.3.3 Mutáció

Az utódlásról az eredetileg beépített *mutationadaptfeasible* függvény általam módosított *mutationadaptfeasible_own* függvény gondoskodik. A módosítás itt is a saját kényszerfeltétel-ellenőrző kód beépítését jelenti.

7.4 Kezdeti populáció

Az egyedek létrehozása a WG.txt nevű fájl beolvasásával kezdődik, ami tartalmazza az általunk használható huzalok effektív és zománcozott átmérőjét, valamint huzalok jellemző ohmikus ellenállását. Jelen esetben a huzal rögzítve van, ennek a huzalnak tulajdonságait a következő táblázat mutatja be (7. táblázat):

Effektív átmérő	Szigetelt átmérő	Fajlagos ellenállás
1,12 mm	1,498 mm	0,01735 Ω /m

7. táblázat: Huzal tulajdonságai.

Ezek után a limitek figyelembevételével minden paraméterre véletlenszerűen (egyenletes eloszlást alkalmazó véletlen-számgenerátor segítségével) létrejön egy érték.

Minden paraméterkombinációt megvizsgál a program, hogy minden kényszerfeltételnek és határnak megfelel-e. Ha nem, akkor új generálódik. Ez a folyamat addig folytatódik, amíg a paraméterként megadott egyedszámú minden feltételnek megfelelő paraméterkombináció létre nem jön.

7.5 Feltételek ellenőrzése

Először a húrtrapéz alakú horony két alapjának kiszámítása történik. Ez azért lehetséges az optimalizációs és a konstans paraméterek felhasználásával, mivel csak párhuzamos fogazású vasmagokkal foglalkozunk, így az ebből adódó feltételekkel már ki lehet számolni. Utána a feltételekhez szükséges tekercsgeometria és kitöltési tényező kiszámítása történik. A különböző feltételek különböző értékű hibakódot eredményeznek, így utólag kiszűrhető, hogy a hibás paraméterkombinációknál mely feltételek sérültek.

Hibakód szerint a következő feltételeknek kell teljesülni:

- 1e0: A felső limitnél nagyobb egy vagy több paraméter.
- 1e1: Az alsó limitnél kisebb egy vagy több paraméter.
- 1e2: A vasmag belső átmérője nagyobb, mint ami a hornyok alá beférne a minimális backiron figyelembevételével. A backiron a horony belső oldala és a vasmag

belső átmérője közötti anyagvastagság. Ennek a minimális értéke kizárólag a gyárthatósági szempontok figyelembevételével 1 mm.

- 1e3: A húrtrapéz alakú horony tengely felőli alapja kisebb, mint 1 mm.
- 1e4: A fográs nagyobb, mint a húrtrapéz alakú horony rotor felőli alapja.
- 1e5: A húrtrapéz alakú tekercselés mélysége (a trapéz magassága) nagyobb, mint a horony mélysége mínusz fél milliméter. Erre azért van szükség, hogy megfelelő minőségű hálót készíthessen az ANSYS Maxwell a tekercseléshez.
- 1e6: A húrtrapéz alakú tekercselés mélysége (a trapéz magassága) kisebb, mint a horony mélységének nyolcvan százaléka.

7.6 A tekercs geometriájának kiszámítása

Először a húrtrapéz alakú horony két alapjának kiszámítása történik. Ezek után a kitöltési tényezőt számolja ki a függvény egy másodfokú polinom segítségével.

Az optimalizációs paraméterek segítségével a horony és a tekercselés területe kiszámítható. A tekercselés területének számolásakor figyelembe van véve az előzőleg meghatározott kitöltési tényező. Először a vezetónkénti szálak száma 1-nek van véve. Ezután ez folyamatosan növekszik, és a legnagyobb értéke lesz az eredmény, ami még befér a horonyba. Eredményként még a tekercselés húrtrapéz alakú geometriájának mélysége (a trapéz magassága) is kiadódik. Ez a belső iteráció teszi szükségessé a saját feltétel-ellenőrző használatát.

7.7 Kitöltési tényező kiszámítása

Először a húrtrapéz alakú horony két alapjának kiszámítása történik. Ezek után a tekercseléshez szükséges szigetelőpapír és a horony keresztmetszetének kiszámítása történik. Ez előbbi jó közelítéssel a horony kerülete szorozva 0,2mm-el.

A kitöltési tényező három komponensből tevődik össze:

- A horony és szigetelőpapír területeinek különbsége osztva a horony területével.
- A huzalok kör alakú keresztmetszete miatti nem tökéletes egymáshoz való illeszkedésük (ez a szabályos hatszög és a legnagyobb beleírható kör területeinek arányából számolva 0,866).
- A fájlból kiolvasott huzal effektív átmérője osztva a huzal zománczott átmérőjével.

A végleges kitöltési tényezőt a három komponens szorzata adja meg.

7.8 A költségfüggvény működése

Először egy creature_<sorszám>.txt nevű fájl jön létre. Ha még nem létezik ilyen, akkor 1-es sorszámmal, ha már létezik, akkor a legnagyobb sorszámú +1 sorszámmal. Később a különböző adatok kiírásánál ennek a fájlnak a nevéből követhetik vissza a függvények és eljárások az aktuális egyed sorszámát.

Ezután a külső fájlban tárolt munkapont-adatokat a nyomatékigények abszolútértékei szerinti sorrendben olvassa be a költségfüggvény. Először a legnagyobb abszolútértékűt, aztán a legkisebbet, utána a maradékból újra a legnagyobbat és így tovább. Erre a megfelelő árambecslés miatt van szükség. Végül az implicit paraméterek kiszámítása történik.

A következő ciklus annyiszor fut le, ahány munkapont van. Ebben a ciklusban először a költségfüggvény az adott munkaponti nyomatékigényhez tartozó áramot számítja ki. Ez az eddigi futtatások eredményeként kapott nyomaték-áram pontokra illeszt egy másodfokú polinomot, majd végrehajtódik a fő futtatás. Ha még nincsenek ilyen eredmények vagy a becslés által meghatározott áramhoz tartozó nyomatékérték több mint 10%-ban eltér a fő futtatás által eredményül kapott nyomaték értéktől, akkor elindul az áramkeresés, ami intervallumfelezős eljárás alapján találja meg a kellő áramértéket.

Ha megvan a szükséges áram, akkor indul el a fő futtatás. Ez a futtatás két villamosfordulatig tart (jelen esetben ez 360 fokos rotor-elfordulásnak felel meg), mivel az első villamosfordulatnál a vasveszteség tranziens jelleget mutat. A futtatás eredményeképpen megkapjuk a futtatásnál számolt nyomatékot, a munkapontra számított veszteséget és a mágnesek tömegét.

A ciklus után a munkapontok veszteségeit a munkapontokban meghatározott súlyok segítségével kiszámítja a költségfüggvény az egyedre számított veszteségek súlyozott összegét. Mivel egy egyeden belül nem változik a mágnesek tömege, így ezzel a kimenettel itt már nincs további művelet.

Végül az egyed minden adata és képe kimentésre kerül.

7.9 Árambecslés

Az árambecslő először ellenőrzi, hogy vannak-e már korábbi futtatásból kimentett nyomaték-áram pontok, ha nincsenek, eredményként 0-át ad vissza. A pozitív és negatív nyomatékú pontokat külön kezeli, negatív fordulatszámú munkapontokkal pedig nem foglalkozik. A kimentett pontok betöltése után egy másodfokú polinomot illeszt a pontokra. Az illesztett függvényen kikeresi a nyomatékigényhez tartozó áramértéket, és ezt adja vissza eredményül.

7.10 Áramkeresés

Az áramkeresés intervallumfelezős módszerrel történik. Egy alsó és felső áramhatárérték közötti átlag áramértékkel indul egy szimuláció, ami visszaad egy nyomatékértéket. A kapott érték lesz az új alsó vagy felső határ (attól függően, hogy a nyomaték az előírtnál nagyobb vagy kisebb lett), és az új határok közötti átlagértékkel lefut ismét egy szimuláció. Ez egészen addig folytatódik, amíg kellően közel nem kerül az eredményként kapott nyomaték az előírthoz, ekkor a függvény eredménye az utolsó futtatáskor felhasznált áramérték. A futtatások számának minimalizálásához szükség van a határok minél szűkebb meghatározására.

Ezeknél a futtatásoknál elég 1/6 villamos-fordulatot leszimulálni, mivel a nyomatékfüggvény periódusideje is ennyi.

Minden futtatás előtt ellenőrizni kell, hogy az adott áramértékkel történt-e már futtatás. Ha már történt, akkor az áramhoz tartozó nyomatékot adja eredményül, ellenkező esetben nullát.

7.11 Határok meghatározása

A határok meghatározása az eddigi futtatások eredményeinek vizsgálatával kezdődik. Ha a keresett nyomatékérték alatt és fölött is volt már futtatás, akkor a legközelebbi alsó és felső szomszéd lesz az alsó és felső határ.

Ha csak nagyobb nyomatékértékeket számoltatott eddig a költségfüggvény, akkor a legkisebb pontpár lesz a felső határ, és 0 A az alsó.

Ha csak kisebb nyomatékértékeket számoltatott eddig a költségfüggvény, akkor a legnagyobb pontpár lesz az alsó határ, ezek után ennek az értéknek a duplájával lefut egy szimuláció. Ha az így eredményül kapott nyomaték már nagyobb, mint a munkapontban előírt, akkor ez lesz a felső határ. Ha még mindig kisebb, ez lesz az új alsó határ, és ennek a duplájával is elindul egy szimuláció. Ez addig folytatódik, amíg egyértelműen meg nincs határozva az alsó és felső határ.

Ha még nem volt futtatás a kezdeti határértékek 0A és 50A. Ezekből kiindulva az előzővel megegyező módon van kiszámítva az alsó és felső határ.

Negatív nyomatékigény esetén ugyan ez történik, a határok felcserélésével.

7.12 Futtatás

A futtatás a MATLAB és az ANSYS Maxwell közötti kapcsolat megteremtésével indul. Ezután a szimulációhoz szükséges paraméterek megadása következik az ANSYS Maxwell-nek. Az összes paramétert egyszerre egy paranccsal adja meg, mivel ez jóval gyorsabb, mint egyesével megadni, így a változatlan paraméterek is újra értéket kapnak.

A futtatási idő beállítása történik a következő szakaszban. Ezután a MATLAB kiadja a parancsot a szimulációra az ANSYS Maxwellnek.

Eredményként a MATLAB megkapja az ANSYS Maxwelltől a nyomaték idő szerinti függvényét (amiből kiszámolja az idő szerinti átlagából az adott áramhoz tartozó nyomatékértéket), a különböző alkatrészek területét (amiből a motor hosszát és a felhasznált anyagok sűrűségét figyelembe véve tömegeket számol) és az ANSYS Maxwell által kiszámolt vasveszteséget.

A szükséges számítások után minden szükséges adatot kiír fájlokba (beleértve a futtatás során keletkezett nyomaték-áram pontpárt), majd a felesleges fájlokat (a kommunikációhoz használt segédfájlokat, és az ANSYS Maxwell cache mappáját).

7.13 A MATLAB és az ANSYS Maxwell közötti kapcsolat

A két program között actxserver-rel lehet kapcsolatot teremteni. Ennek a struktúrája és parancsai az ANSYS Maxwell Scripting Help-jében vannak leírva. [12]

8 Eredmények kiértékelése

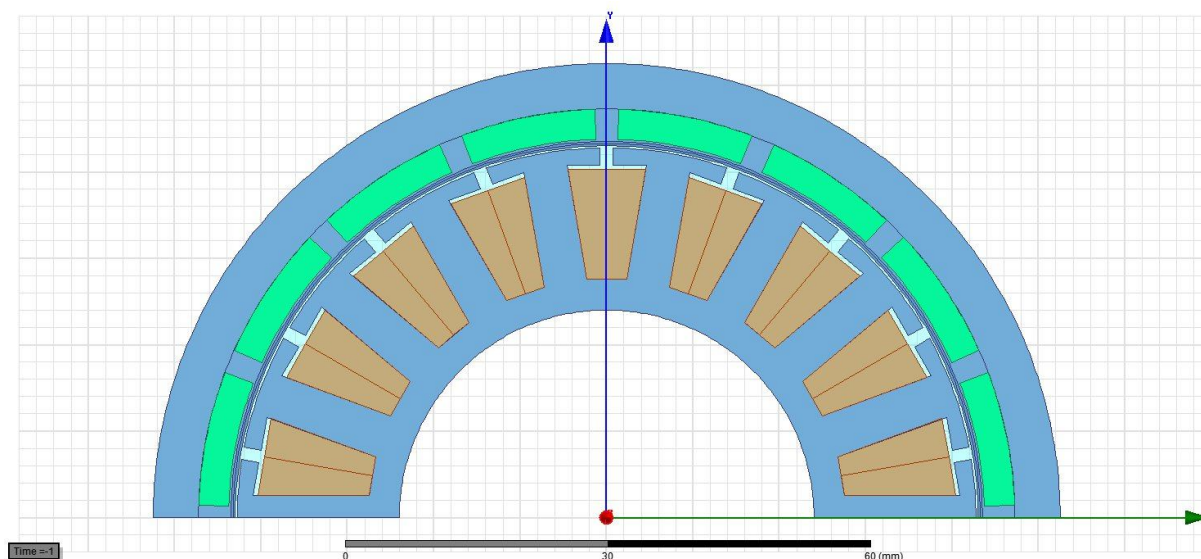
8.1 A kiindulási SZEM2 motor célfüggvényértékei

A kiindulási SZEM2 motor modelljének a bemeneti paramétereit következő táblázat mutatja be (7. táblázat):

Név	Érték
Bs0	1,5 mm
tooth_thick	5 mm
Hs2	13,2 mm
airgap	1 mm
magnet_thick	3,5 mm
magnet_embrace	0,85

7. táblázat: SZEM2 motor tervezési paramétereit.

A táblázatban felírt változónevek a 15. ábrán láthatóak. A motor modellje a következő ábrán látható (19. ábra):



19. ábra: A SZEM2 motor végeselem-modellje.

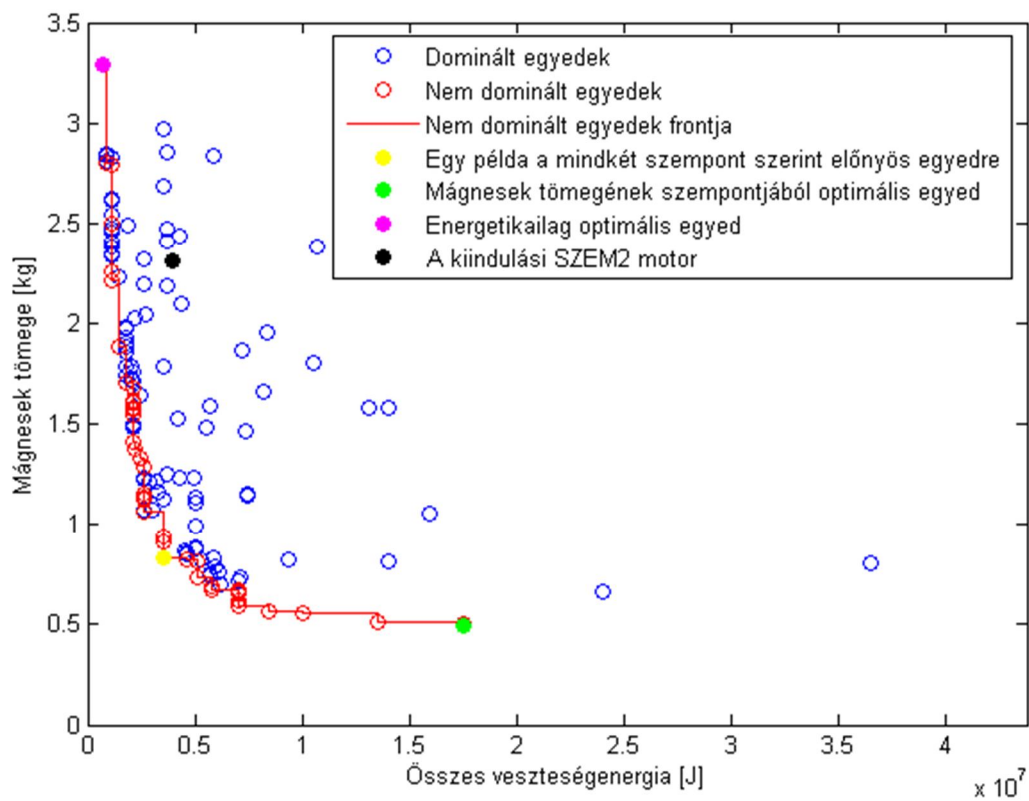
Az optimalizáció során felállított munkaponti paraméterek szerint a kiindulási SZEM2 motor modelljének célfüggvény-értékei a következők (8. táblázat):

Célfüggvény	Érték
Veszteségenergia	3976333 J
Mágnesek tömege	2,3117 kg

8. táblázat: SZEM2 motor modelljének célfüggvény-értékei

8.2 Az optimalizáció során megvizsgált motorkonstrukciók célfüggvényértékei

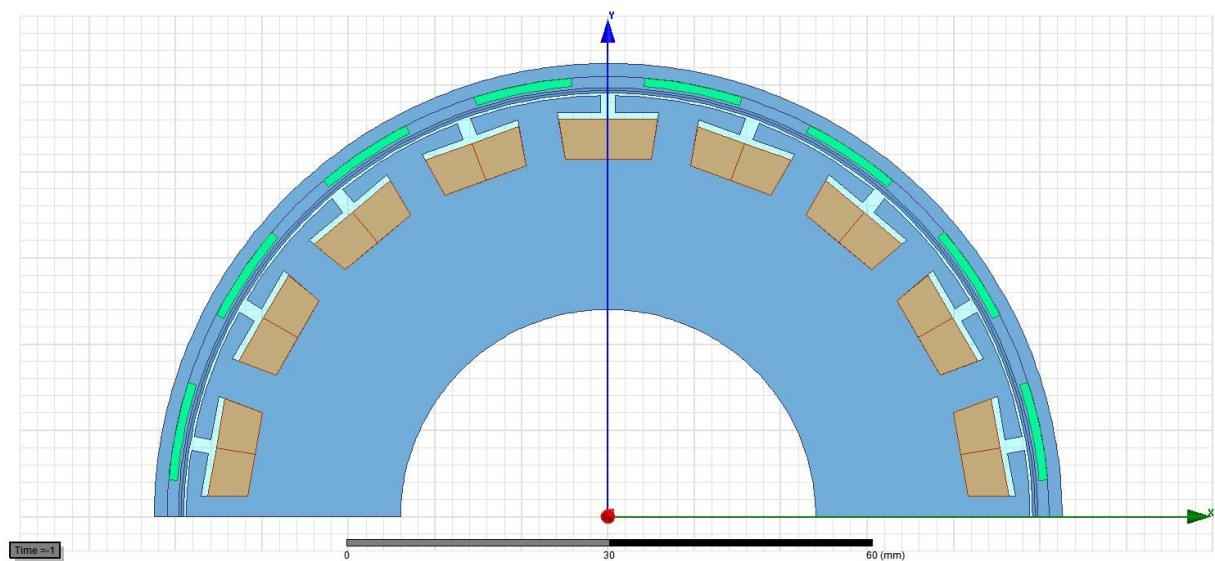
A többcélú genetikus optimalizáció 35 egyedszámú véletlenszerű kezdeti populációból kiindulva 10 generációt futtatott, tehát összesen 385 paraméterkombináció lett megvizsgálva. A vizsgált egyedek célfüggvény-értékei a következőképpen alakultak (20. ábra):



20. ábra: A vizsgált egyedek célfüggvény-értékei.

8.3 Mágnesek tömegének szempontjából optimális egyed

A mágnesek tömegének szempontjából a 20. ábrán zöld színnel jelölt motorkonstrukció volt az optimális. A motor modellje a következő ábrán látható (21. ábra):



21. ábra: Mágnesek tömegének szempontjából optimális egyed.

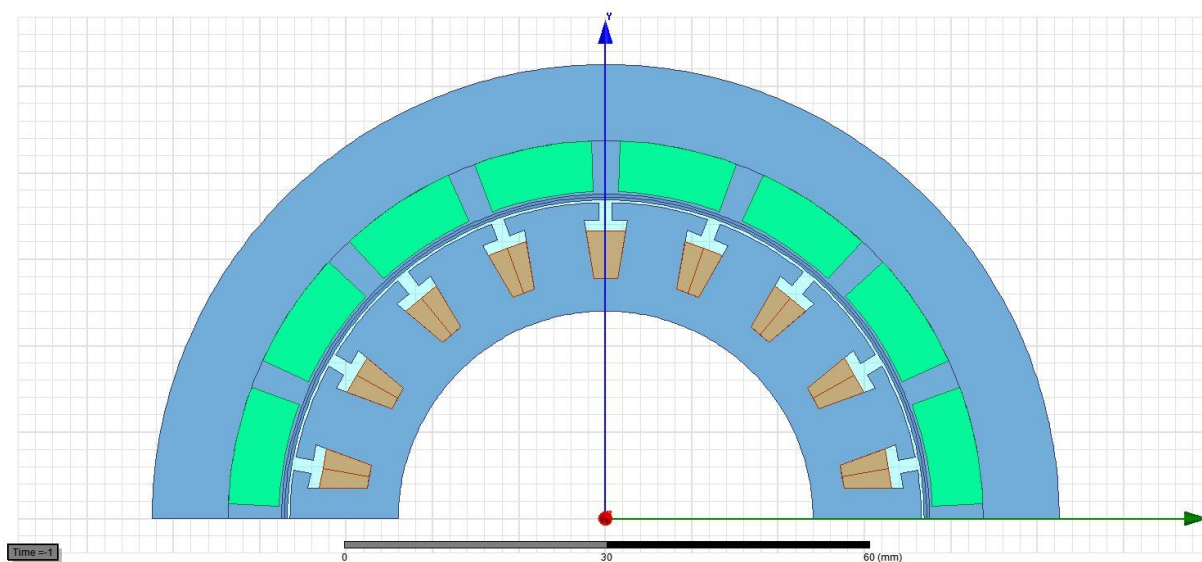
Ez a motorkonstrukció a mágnesek szempontjából előnyös, hiszen a mágneseknek tömege csupán 21,5%-a a kiindulási SZEM2 mágneseknek tömegéhez képest, viszont az összes energiavesztesége 441,2%-a a kiindulási SZEM2 veszteségeihez képest. A mágnesek tömegének szempontjából optimális motor modelljének célfüggvény-értékei a következők (9. táblázat):

Célfüggvény	Érték
Veszteségenergia	17543840 J
Mágnesek tömege	0,4972 kg

9. táblázat: A mágnesek tömegének szempontjából optimális motor modelljének célfüggvény-értékei

8.4 Energetikailag optimális egyed

A veszteségenergia értékének szempontjából a 20. ábrán rózsaszínnel jelölt motorkonstrukció volt az optimális. A motor modellje a következő ábrán látható (22. ábra):



22. ábra: Energetikailag optimális egyed.

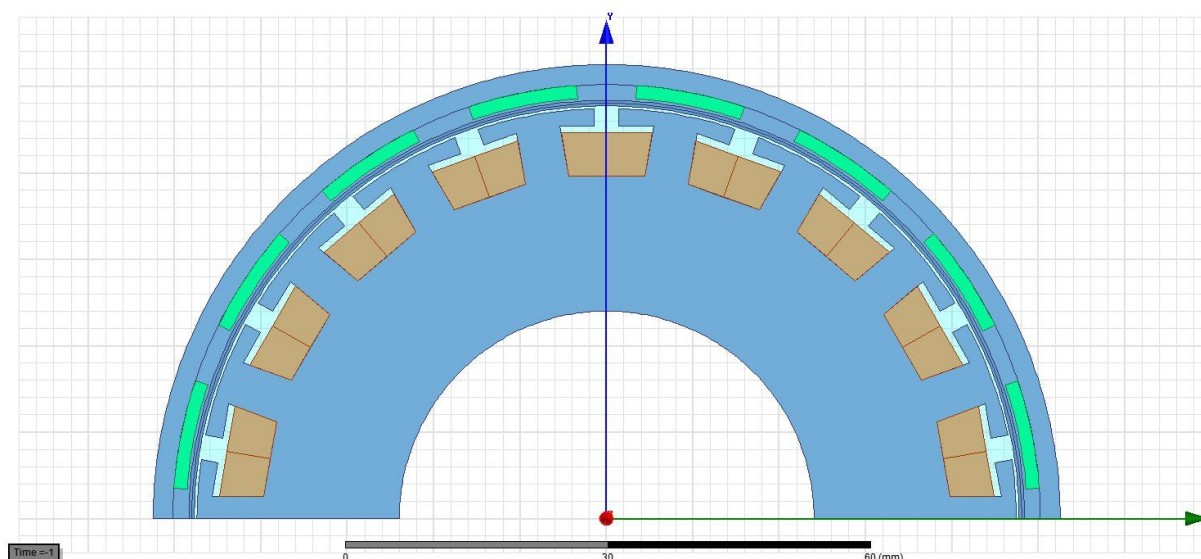
Ez a motorkonstrukció energetikai szempontból előnyös, hiszen az összes energiavesztesége csupán 18,6%-a a kiindulási SZEM2 veszteségeihez képest, viszont a mágneseknek tömege 142,4%-a a kiindulási SZEM2 mágneseknek tömegéhez képest. Az energetikailag optimális motor modelljének célfüggvény-értékei a következők (10. táblázat):

Célfüggvény	Érték
Veszteségenergia	738687 J
Mágnesek tömege	3,2924 kg

10. táblázat: Az energetikailag optimális motor modelljének célfüggvény-értékei

8.5 Egy példa a mindkét szempont szerint előnyös egyedre

Példaként a kiindulási SZEM2 motor célfüggvény-értékeihez képest egy olyan mindkét szempont szerint előnyösebb egyedet választottam, ami a veszteségenergia szerint már egyértelműen előnyös, és az ennek megfelelő célfüggvény-értékű egyedek közül a lehető legelőnyösebb a mágnesek tömege szerint. Ez az egyed a 20. ábrán sárga színnel van jelölve. A motor modellje a következő ábrán látható (23. ábra):



23. ábra: Mindkét szempont szerint előnyös egyed.

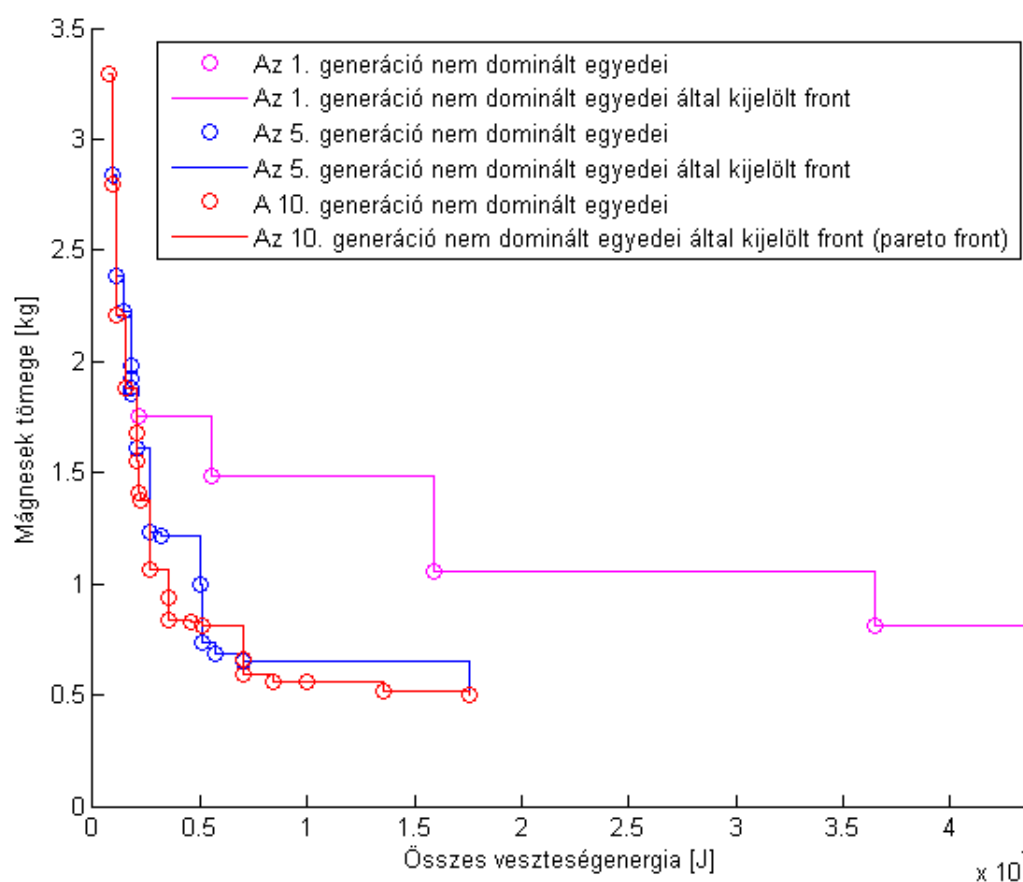
Ez a motorkonstrukció mindkét szempontból előnyösebb a kiindulási SZEM2 motornál. Az összes energiavesztesége 89,8%-a, a mágnesek tömege pedig 36,1%-a a kiindulási SZEM2 célfüggvény-értékeihez képest. Ennek a motor modelljének célfüggvény-értékei a következők (11. táblázat):

Célfüggvény	Érték
Veszteségenergia	3570447 J
Mágnesek tömege	0,8347 kg

11. táblázat: Mindkét szempont szerint előnyös motor modelljének célfüggvény-értékei

8.6 Az egyes generációk nem dominált egyedei

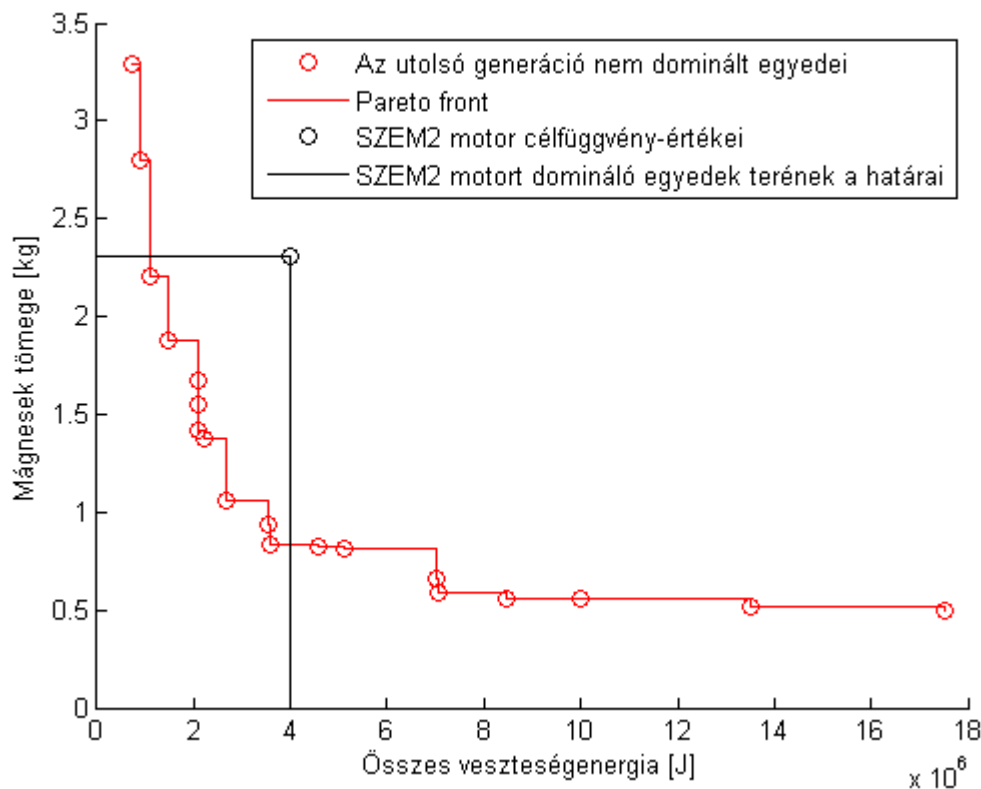
Az első, ötödik és utolsó (tizedik) generáció nem dominált egyedei a következő ábrán láthatóak (24. ábra):



24. ábra: Az egyes generációk nem dominált egyedei.

8.7 Eredmények összefoglalása

Az optimalizáció során futtatott paraméterkombinációk közül az összes elem, ami a pareto frontban található az optimalizációs probléma megoldása, mivel legalább az egyik szempontból optimálisabbak a kiindulási SZEM2 motornál. A következő ábra bemutatja a pareto front elemeinek és a kiindulási SZEM2 motor a különbségeit a 2 dimenziós célfüggvény-térben (25. ábra):



25. ábra: A pareto front elemeinek és a SZEM2 motor a különbségeit a 2 dimenziós célfüggvény-térben.

A pareto front 34 egyede közül 15 egyértelműen jobb motorkonstrukció található. A pareto front távolsága a SZEM2 motor célfüggvény-értékeihez képest, a pareto front a populációméretéhez képesti nagy elemszáma és az, hogy ezek az elemek nem néhány csomópontban tömörülnek, jól bemutatják az algoritmus hatékonyságát.

9 Konklúzió

A munkám során sikeresen felépítettem egy állandómágneses szinkronmotorok optimalizációjára alkalmas programot MATLAB környezetben. A program alkalmas a hozzá kapcsolt ANSYS Maxwell végelem-modellel a motorok energetikai, tömeg és egyéb szempontok alapján egy kezdeti modellből egy minden szempontból optimálisabb motormodell létrehozására.

Az általam kifejlesztett algoritmus alkalmas ipari alkalmazásra, ezt alátámasztják a 8. fejezetben bemutatott eredmények.

További célok lehetnek például a motor teljes tömegének vagy méretének csökkentése, a nyomatékklütketés minimalizálása, vagy a nyomaték maximalizálása.

10 Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a SZE Járműipari Kutatóközpontjának a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0012 nyilvántartású projekt keretében: Szimuláció és optimalizáció numerikus matematikai alapkutatása és alkalmazása hibrid és elektromos járművek kutatásában c. kutatási főirány keretei közötti támogatásának.

Szeretnék még köszönetet mondani Kollár Bettinának és Kuslits Mártonnak a rendszeres konzultációkért.

11 Irodalomjegyzék

- [1] F. Bittner, I. Hahn: *Kriging-Assisted Multi-Objective Particle Swarm Optimization of Permanent Magnet Synchronous Machine for Hybrid and Electric Cars*
IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2013.
- [2] Halász Sándor: *Automatizált villamos hajtások I.*
Tankönyvkiadó, Budapest 1989., ISBN 963-18-2099-8
- [3] Dr. Selmeczi Kálmán, Schnöller Antal: *Villamosságtan I.*
Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978., ISBN 963-10-2603-5
- [4] Miklós Kuczmán, Amália Iványi: *The Finite Element Method in Magnetics*
Akadémiai Kiadó, 2008, ISBN 963-05-8649-5
- [5] Moharos István, Oldal István, Szekrényes András: *Végeselem-módszer*
Typotex Kiadó, Budapest, 2011., ISBN-13 978-963-2795-39-3
- [6] Hatwágner Ferenc Miklós: *Nagy számításidejű, folytonos változójú célfüggvények optimalizációja evolúciós számítások segítségével*
Széchenyi István Egyetem, Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola, 2012.
- [7] Kalyanmoy Deb: *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*
John Wiley & Sons, Ltd, Chichester., 2001, ISBN 0-471-87339-X
- [8] Horváth Zoltán, Morauszki Tamás, Tóth Krisztián: *CAD-based optimization and applications in automotive engineering*
EUROSIM 2007. Proceedings of the 6th EUROSIM congress on modelling and simulation. Vol. 2. Ljubljana: EUROSIM, 2007. pp. 9-16., ISBN:978-3-901608-32-2
- [9] *Mathworks Ltd: MATLAB gamultiobj solver:*
<http://www.mathworks.com/help/gads/gamultiobj.html>, 2014. 10. 30.
- [10] *ANSYS Ltd, ANSYS Maxwell tutorial on the 2004 PriusIPM Motor*
Study of a Permanent Magnet Motor with MAXWELL 2D, ANSYS Maxwell, 95, 2004.
- [11] Gilberto Alejandro Ortiz García: *Identificación de sistemas estructurales histeréticos usando algoritmos de optimización multi-objetivo*
Master of Engineering - Industrial Automation, Universidad Nacional de Colombia, 2013.
- [12] *ANSYS Ltd, ANSYS Maxwell:*
<http://www.ANSYS.com/Products/Simulation+Technology/Electronics/Electromechanical/ANSYS+Maxwell>, 2014. 10. 31.