

Állandó mágneses szinkronmotor vizsgálata a mágnesanyag megváltoztatása szempontjából

Írta:

Mészáros Péter

3. éves villamosmérnök Bsc hallgató, automatizálási szakirány

és

Győrfy Csaba

4. éves villamosmérnök Bsc hallgató, automatizálási szakirány

Konzulens:

Istenes György

Kutató mérnök, konzulens

Széchenyi István Egyetem

2022. november

Győr

Absztrakt

Villamos hajtásrendszerrel rendelkező közúti járművekben gyakran alkalmazott megoldás az állandómágneses szinkrongép (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Machine). Ezek a motorok konstrukciótól függően képesek kis forgási sebesség mellett nagy nyomaték leadására, így alkalmasak közvetlen meghajtásra is járműves alkalmazásokban. A viszonylag nagy teljesítménysűrűségük leginkább a ritkaföldfém állandómágneseknek köszönhető, ugyanakkor ezek a magas árak miatt a fajlagos költségeket is megemelik. Ebben a dolgozatban a SZEnergy csapat egy korábbi versenyjárművébe, a SZElectricity-be tervezett külső forgórészű PMSM drága neodímium mágnesének kiváltása kerül megvizsgálásra olcsó ferrit (kerámia) mágnesekre. A ferrit mágnesek jóval gyengébbek a neodímium mágneseknél. Első lépésként a mágnesek változatlan méretben voltak kerámiamágnesekre cserélve, majd ezeknek méretének fokozatos növelésével lett megvizsgálva a motor névleges teljesítménye és a hatásfokmező. A vizsgálatok végelelemes szimulációk (FEM – Finite Element Model) történtek JMAG szoftverben. Mindezek mellett a feladat megvalósításához szükséges módszertani alapok is bemutatásra kerülnek. Végül a három konstrukció gazdasági és mérnöki összehasonlítása alapján készül egy ajánlást a megfelelő motor kiválasztására.

Tartalom

1	Bevezetés.....	1
2	A mérnöki probléma leírása	1
2.1	A SZE mot bemutatása	1
2.2	A mágnesanyagok összehasonlítása	2
2.2.1	Neodímium mágnes.....	3
2.2.2	Ferrit mágnesek	3
3	Számítási módszerek	4
3.1	Villamos gépek veszteségszámítása	5
3.1.1	Vasveszteség	5
3.1.2	Tekercsveszteség	5
3.2	Hatásfok számítás	6
3.3	Maxwell-egyenletek	6
3.4	A végelelem-módszer.....	7
3.5	A sarokmunkapontok meghatározásának módszere.....	7
4	Végelelemes modell felépítése	8
4.1	Geometria	8
4.2	Anyagtulajdonságok	9
4.2.1	Az összehasonlítandó mágnesek tulajdonságai.....	9
4.3	Tekercselés	10
4.4	Peremfeltételek	12
4.5	A végelelemes háló beállítása – hálózékenységi vizsgálat	12
5	Az eredmények bemutatása.....	15
5.1	A neodímium mágnesekkel szerelt motormodell szimulációs eredményei.....	15
5.2	A ferrit mágnesekkel szerelt motormodell szimulációs eredményei.....	16
5.3	A megnövelt ferrit mágnesekkel szerelt motormodell szimulációs eredményei	18
6	Összefoglalás.....	20
7	További célok.....	20
8	Köszönetnyilvánítás	21
9	Irodalomjegyzék.....	22

1 Bevezetés

A modern világban a villamos motorok felhasználási területe egyre jobban kiszélesedik. Jedlik Ányos az első elektromos elven működő forgógépet 1828-ban alkotta meg. Napjainkban már egyre többféle forgógépet különböztetünk meg. Ezen motorok hatékonysága és felhasználása is bővült. Nehezen tudunk eltölteni egy napot úgy, hogy ne találkoznánk elektromos motorokkal, mind a háztartásokban, mind az iparban. Az e-Mobilitás fejlesztéséhez minél hatékonyabb, magasabb hatásfokkal rendelkező forgógépeket kell fejleszteni, szem előtt tartva azok felhasználási területeit. A fejlesztés során figyelni kell arra, hogy a forgógép mely tartományaiban rendelkezzen a legjobb hatásfokkal. [1]

Egy villamos forgógép paramétereinek meghatározásához sok mindenre kell figyelni, ilyenek például az anyagjellemzők. Ezen dolgozat témája egy állandómágneses szinkronmotor vizsgálata a mágnesanyag megváltoztatása szempontjából. A ritkaföldfém-mágnesek árának ingadozása és a bányászati problémák miatt kívánatos lenne, hogy az elektromos gépek olcsóbb és könnyebben hozzáférhető mágnesekkel készüljenek. A dolgozatban azt vizsgáljuk, hogy egy állandó mágneses szinkronmotor paraméterei miként változnak meg, ha más mágnesanyagot alkalmazunk, és megéri-e a neodímium mágneseket ferrit mágnesekre cserélni. Jelen esetben neodímium és ferrit mágneseket fogunk összehasonlítani. [2]

A dolgozatban egy működő szinkrongép végeselemes modellje lett megvalósítva JMAG szoftverben. Összesen három eset lett megvizsgálva. Az első esetről a mágnesanyag neodímium volt, a másodikon ferrit, a harmadikon pedig a ferrit mágnesek méretének növelésével próbáltuk meg megközelíteni az eredeti neodímium mágnesekkel felépített modellből kapott eredményeket.

2 A mérnöki probléma leírása

A dolgozatban leírt munka célja a Széchenyi István Egyetem SZEnergy csapatának a Shell Eco-marathon 2016-os energiahatékonysági versenyére megépített állandómágneses szinkronmotorjának hatásfokmező vizsgálata, valamint a költséges neodímium mágnesek olcsóbb kerámiámágnesekre való lecserélésének lehetőségének elemzése. [3]

2.1 A SZE mot bemutatása

Ez a motor egy egyedi fejlesztésű és gyártású külső forgórészes PMSM, amely illeszkedik az energiatakarékos versenyen felállított követelményekhez, azaz kis súly mellett ez a motortípus nagy teljesítménysűrűséggel rendelkezik. A SZE mot az alábbi ábrán látható.



1. Ábra: A SZE mot.

A motor 3kW névleges teljesítményre képes. A legtöbbet használt munkapontja a 2016-os londoni versenyen 8 Nm és 270 rpm volt, mindemellett a maximális elvárt munkapont 20 Nm és 330 rpm. A londoni versenypályán lévő nagyobb meredekségű emelkedőn az autó alapesetben nem tudott volna feljutni, de a motor tartalékainak köszönhetően, a kellő minimális idejű 150 %-os túlterheléssel tudta teljesíteni az akadályt, viszont itt már nem volt képes megfelelő hatásfokot elérni. A jármű akkumulátorcsomagjának tulajdonságaiból adódóan a maximális teljesítményt a maximális áram és feszültség határozták meg. Az akkupakk névleges feszültsége 48 V (a valóságban ez 42,1 V és 52,5 V között mozoghat) az áramkorlát pedig 35 A (pillanatnyi túlterhelésnél ez lehet több).

2.2 A mágnesanyagok összehasonlítása

A hagyományos neodímium mágnesek sokszor erősebbek a ferrit mágneseknél, de a hőmérséklet növelésével veszítenek az erejükből, nedves környezetben rozsdásodnak és törékenyek. Vannak azonban speciális neodímium mágnesek, amelyek vízállóak, magas hőellenállásúak vagy védő acéltokba vannak helyezve, amely csökkenti sérülékenységüket.

A ferrit mágneseket gond nélkül alkalmazhatjuk nedves környezetben és magas hőmérsékleten egészen 250° C-ig. Kevésbé törékenyek és olcsóbbak, mint a

neodímiommágnesek, ugyanakkor gyengébbek. A mágnesanyagok közötti árkülönbség akár a tízszeres arányt is elérheti. [2]

2.2.1 Neodímium mágnes

A neodímium egy puha ezüsthémet, ami levegőben széteszik ezért egy vékony Ni-Cu-Ni (nikkel- réz- nikkel) réteggel vonják be a felhasználáshoz. A neodímium mágnes egy ferromágneses anyag, amelynek a legismertebb tulajdonsága, hogy fajlagosan ez a legerősebb ismert állandómágnes. A neodímium mágnes ötvözet mikrokristályos szerkezet, amelyek a gyártását erős mágneses mezőben végzik, így mágneses tengelyeik ugyanabba az irányba mutatnak. [2]

A kristályrács mágnesezési irányának megváltoztatási ellenállása nagyon magas. Ennek köszönhetően szinte érzéketlenek a külső mágneses terek által befolyásolt erők a beállított alap értékeket. A neodímium mágnesnek felületvédelem nélkül magas a korrózió hajlama. Nagy koercitív erő és magas remanencia értékkel rendelkezik és a különböző ötvözetek segítségével magasabb hőmérsékleti tartományban is alkalmazhatóvá válnak (250 °C). [4]

- Előnyei:
 - o Erejük 10 év alatt csak 1%-kal csökken.
 - o Ellenállnak a külső mágneses mezők által történő demagnetizálásnak.
- Hátrányai:
 - o Nedves környezetben rozsdásodnak.
 - o Törékenyek.
 - o 80 °C ~ 150 °C fölött tartósan veszítenek az erejükből, azonban ezen hátrányuk különböző ötvözetek segítségével kiküszöbölhető.

Az NdFeB mágnesekre nemzetközi osztályozás létezik. Értékeik 35 és 52 között mozognak. Az értékek előtti első N betű a neodímium rövidítése. Az értékeket utáni betűk a belső koercitivitást és a maximális üzemi hőmérsékletet jelentik. [5]

2.2.2 Ferrit mágnesek

A ferrit egy kerámiaanyag, amely olyan fémekből áll, mint stroncium, bárium, mangán, nikkel és cink, valamint nagy mennyiségű vas-oxid. A ferritmágnesek alapvető fizikai tulajdonságuk lehet blokk, gyűrű vagy korong. Legismertebb tulajdonságai az örvényáram elnyomás. Olcsó, stabil permanens mágnes kategóriába tartoznak. Nagy a koercitivitásuk. [6]

A ferritmágnesek vagy kerámiamágnesek bárium-ferritporból vagy stroncium-ferritporból készülnek. Ezt a ferritport megolvasztják, majd egy formába öntik. A ferritet ezután lehűtik és 2 μm -nél kisebb részecskékre őrölik. Erre azért van szükség, hogy minden részecske egyetlen mágneses doménből álljon. Ezután a port préssel a kívánt formára nyomják, majd szárítják. A forma kialakításakor a préselés külső mágneses térben történik ezzel érhető el a mágneses orientációjának elérése, azaz az anizotrópia, ami az egyes anyagok a térben különböző irányba mutató tulajdonságai. Az állandó ferritmágnesek kemény ferritekből készülnek, amelyek mágnesezés után nagy koercitivitással és nagy remanenciával rendelkeznek. Vas-oxidot és báriumot vagy stroncium-karbonátot használnak kemény ferritmágnesek gyártásához. A nagy koercitivitás azt jelenti, hogy az anyagok jól ellenállnak a mágnesezésnek, a külső mágneses hatásoknak, ami az állandó mágnes alapvető jellemzője. A remanencia, pedig azt jelenti, hogy a mágnesesmező eltávolítása után mágneses marad az anyag. [7]

Nagy mágneses permeabilitással is rendelkeznek. A mágneses indukció (B) maximális értéke körülbelül 0,35 T. A ferritmágnesek sűrűsége körülbelül 5 g/cm³. A -20 °C ~ 200 °C tartományon belül képes megtartani a mágneses tulajdonságait.

- Előnyei:
 - Nem rozsdásodnak.
 - Alkalmasak kültéri használatra.
 - Nedves környezetben is használhatóak.
 - Kevésbé törékenyek, mint más anyagokból készült mágnesek.
- Hátrányai:
 - Jóval gyengébbek a neodímium mágneseknél. [8]

3 Számítási módszerek

A villamos járműmotorok vizsgálatánál tipikusan nem lehet a felállított problémákat analitikus módszerekkel megoldani. A korrekt veszteségszámításokhoz szükség van numerikus módszerekre, az elektrodinamikai eljárásokat leíró Maxwell-egyenletek megoldására. A végeselemes szimuláció is ezeket az egyenleteket használja fel az időtől függő (tranziens) szimulációk futtatásához.

A hatásfokmező vizsgálatok végeselemes modell segítségével lettek elkészítve. Ennek alapja a motorok különböző munkapontokban történő szimulációs kiértékelése. A modell

bemenetei a fordulatszám és az áramgerjesztés, a kimenetek pedig a különböző veszteségek, feszültségek és a nyomaték. Ezek alapján kerül kiszámításra az adott munkapontokban a hatásfok értéke, és ennek a teljes motorüzemű mezőre vett interpolációs felületét vizsgáltuk. Az egyes munkapontok kiértékelése során kétdimenziós, rögzített fordulatszámú, áramgerjesztett, tranziens szimulációk segítségével történt meg.

3.1 Villamos gépek veszteségszámítása

A villamos gépek veszteségei a rézvesztésből és a vasvesztésből állnak. [9]

3.1.1 Vasvesztés

Vasvesztés néven az állandómágnesek által keltett mozgó mágneses tér által indukált örvényáramok veszteségteljesítményét és a tekercsben folyó áram gyors irányváltásai miatti hiszterézis veszteségteljesítményt értjük. A vasvesztés két komponensét különböző módszerekkel vizsgáltuk. [9], [10]

A hiszterézis veszteségeket a szoftver Apply Loop modell segítségével számítja ki. Ez a mágnesesindukció (B mező) maximumát és minimumát keresi meg időlépésenként. Az így szerzett adatok alapján becslés készül a hiszterézis hurokra. Ennek a huroknak a területe adja a veszteséget. A módszer előnye, hogy nem kell frekvenciafüggő B-H görbét megadni az egyes anyagokhoz. Természetesen az így kapott veszteségteljesítmény csak egy adott esetre vonatkoztatott érték, nem pedig időfüggvény. [11]

Az örvényáramú veszteségek FFT módszer alkalmazásával kerültek kiszámításra. A módszer lényege az, hogy a forgórész és állórész felületére számított mágnesesindukció mező időfüggvényeit FFT-vel frekvenciatartományba transzformálja a szoftver. Ezeknek a frekvenciafüggvényeknek az amplitúdójából kerülnek kiszámításra az örvényáramú veszteségek. [11]

3.1.2 Tekercsvesztés

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

$$P_{copper} = 3 \left(\frac{I^2}{\sqrt{2}} \right) R_p,^1$$

¹ A tekercsvesztés kiszámítása.

ahol I a gerjesztőáram amplitúdója, R_p pedig a fázisellenállás. A fázisellenállás nem csupán a rezisztív ellenállás alkotja, a szoftver képes megbecsülni a tekercs induktív veszteségeit is, ezáltal a fázisellenállás a tekercs frekvenciafüggő impedanciáját jelenti. [9], [10]

3.2 Hatásfok számítás

Mivel a végeselemes szimulációk eredményeként megkapjuk a nyomatékokat és a veszteségeket, valamint a modell bemenete a fordulatszám, könnyű kiszámítani a munkapontok kimeneti- és veszteségteljesítményeit, ebből adódóan a hatásfokot célszerű ezek segítségével meghatározni. A hatásfokszámítás módszerét a következő képlet adja meg:

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_v},^2$$

ahol P_m az adott munkapont mechanikai teljesítménye és P_v az adott munkapont veszteség teljesítménye. [10]

3.3 Maxwell-egyenletek

A Maxwell-egyenletek parciális differenciálegyenletek, melyek leírják az elektromos és a mágneses tér viselkedését, valamint az anyaggal való kölcsönhatásukat is. Ezek az egyenletek számos területen alkalmasak matematikai modellek létrehozására, köztük villamos hajtások működésének leírására is. Ezen belül a dolgozatban tárgyalt külsőforgórészű szinkronmotorokban a mozgó mágnesek által keltett forgó mágneses tér által keltett örvényáramok, és az ezek által létrejött veszteségek megadására alkalmas. [12]

A Maxwell-egyenletek differenciális alakban a következők:

$$\nabla \times H = J + \frac{\delta D}{\delta t},^3$$

$$\nabla \times E = - \frac{\delta E}{\delta t},^4$$

$$\nabla \cdot D = \rho,^5$$

$$\nabla \cdot B = 0,^6$$

² A hatásfok kiszámítása

³ Ampere-féle gerjesztési törvény

⁴ Faraday-féle indukciós törvény

⁵ Gauss elektromos törvénye

⁶ Gauss mágneses törvénye

ahol H a mágneses térerősség $\left[\frac{A}{m}\right]$, J a villamos áramsűrűség $\left[\frac{A}{m^2}\right]$, D a villamos fluxus térerősség $\left[\frac{C}{m^2}\right]$, t az idő $[s]$, E a villamos térerősség $\left[\frac{V}{m}\right]$, ρ a villamos töltéssűrűség $\left[\frac{C}{m^3}\right]$ és B a mágnesesindukció $[T]$.

3.4 A végeelem-módszer

A végeelemes módszer népszerű módszer a mérnöki és matematikai modellezésben felmerülő parciális differenciálegyenletek numerikus megoldására. Megoldást ad az analitikus módszerekkel nem megoldható problémákra. A végeelemes módszer egy nagy rendszert kisebb részekre oszt fel, melyek a végeelemek. Ezt térdiszkrétizálással érjük el az adott térben, amelyet az objektum hálójának létrehozásával valósítunk meg. A JMAG szoftverben részletes paraméterek alapján készül el a végeelem háló. Ezen kívül a tranziens szimulációk időbeli diszkrétizálást is alkalmaznak. A végeelem számítások csak közelítést adnak a számított paraméterek értékére, de a modell részletességének javításával a pontosság is növelhető. [13]

3.5 A sarokmunkapontok meghatározásának módszere

A járműves felhasználásból adódóan a motor rendelkezik áram és feszültségkorláttal. Az áramkorlát modellben való implementálása viszonylag egyszerű feladat, mivel a tranziens szimuláció bemeneti paramétere a gerjesztőáram amplitúdó. A feszültségkorlát figyelembevétele már komolyabb feladat. A DC feszültségkorlát a megfelelő gerjesztőáram eléréséhez szükséges feszültség és az indukált feszültség összegének csúcstól csúcsig értéke. Az indukált feszültségek a tekercsekben azért jönnek létre, mivel az állandómágnesek által létrehozott mágneses mező a motor üzeme közben a forgási sebességgel arányosan elmozdul a tekercsekhez képest, és ez a folyamatosan változó mágneses mező feszültséget indukál a tekercsekben. Ennek mértéke az állandómágnesek tulajdonságaitól és a motor forgási sebességétől (frekvenciától) függ. A végeelem szimuláció során az indukált feszültségeket nem kapjuk meg közvetlenül, viszont az egyes fázisokhoz tartozó tekercsek eredő fluxusait igen. Ez adja meg egy adott időpillanatban a mágneses mező erősségét, így ennek időbeli deriváltjából kapható meg ennek változása, és így az indukált feszültségek. A következő összefüggés alapján kerülnek kiszámításra az indukált feszültségek. [12]

$$\begin{bmatrix} V_{indU}(t) \\ V_{indV}(t) \\ V_{indW}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta \Psi_U(t)}{\delta t} \\ \frac{\delta \Psi_V(t)}{\delta t} \\ \frac{\delta \Psi_W(t)}{\delta t} \end{bmatrix},^7$$

⁷ Az indukáltfeszültségek kiszámítása

ahol $\Psi_U(t)$, $\Psi_V(t)$ és $\Psi_W(t)$ az egyes fázisokhoz tartozó tekercsek eredő fluxusai. Az így megkapott indukált feszültségek alapján az adott munkapont eléréséhez szükséges gerjesztőfeszültséget következő módon lehet kiszámítani. [12]

$$\begin{bmatrix} V_U(t) \\ V_V(t) \\ V_W(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_U(t) \\ I_V(t) \\ I_W(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_p & 0 & 0 \\ 0 & R_p & 0 \\ 0 & 0 & R_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{indU}(t) \\ V_{indV}(t) \\ V_{indW}(t) \end{bmatrix},^8$$

ahol $I_U(t)$, $I_V(t)$ és $I_W(t)$ az egyes fázisokhoz tartozó tekercsek gerjesztőáramai, R_p pedig az egyes tekercsellenállások. Így tehát a munkaponthoz tartozó DC feszültség a következő.

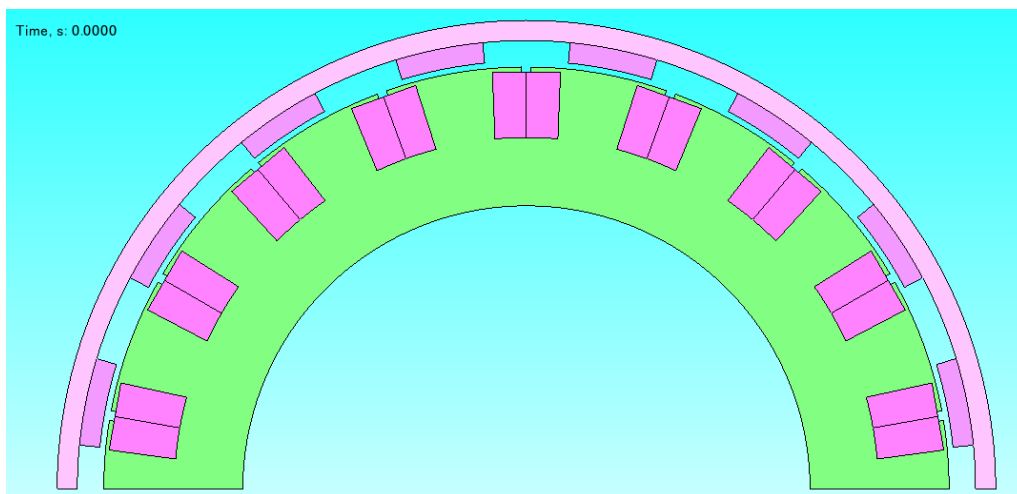
$$V_{DC} = \max \left(\begin{bmatrix} \max(V_U(t)) \\ \max(V_V(t)) \\ \max(V_W(t)) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \min(V_U(t)) \\ \min(V_V(t)) \\ \min(V_W(t)) \end{bmatrix} \right),^9$$

4 Végeelemes modell felépítése

A végeelem-modell JMAG környezetben lett felépítve, ugyanakkor az eredmények kiértékeléséhez MATLAB szoftver lett felhasználva. Itt készültek az utólagos számítások és az ábrák egy része is.

4.1 Geometria

A motor modell 8 póluspárból és 18 horonyból álló külső forgórészes PMSM. A modell Descartes-féle koordináta-rendszerben lett felépítve. A motor keresztmetszetét az xy síkon értelmezzük, forgástengely pedig a z tengely. A motor felépítésénél fogva két forgásszimmetrikus motorszeletből áll, így elegendő csak a motor felét modellezni, amivel a számítási igényt csökkenthetjük. A motor geometriáját a következő ábra mutatja be.



2. Ábra: A végeelem-modell geometriai felépítése.

⁸ A gerjesztőfeszültségek kiszámítása

⁹ A DC feszültség kiszámítása

A geometria paramétereit az 1. táblázatban találhatók.

1. Táblázat: Geometria paraméterek

Paraméter	Méret
Állórész külső átmérő:	140,50 mm
Állórész belső átmérő:	209,38 mm
Mágnes szélesség	11,30 mm
Mágnes vastagság	5,10 mm
Légrés:	1,02 mm
Forgórész külső átmérő:	232,50 mm
Forgórész belső átmérő:	212,30 mm
Horony magasság:	16,30 mm
Horony szélesség:	16,90 mm
Horony nyílásszög:	4,57 fok
Horony fog vastagság:	1,20 mm
Horony fog rész:	2,40 mm

4.2 Anyagtulajdonságok

A motort alkotó anyagokat a 2. táblázat mutatja be.

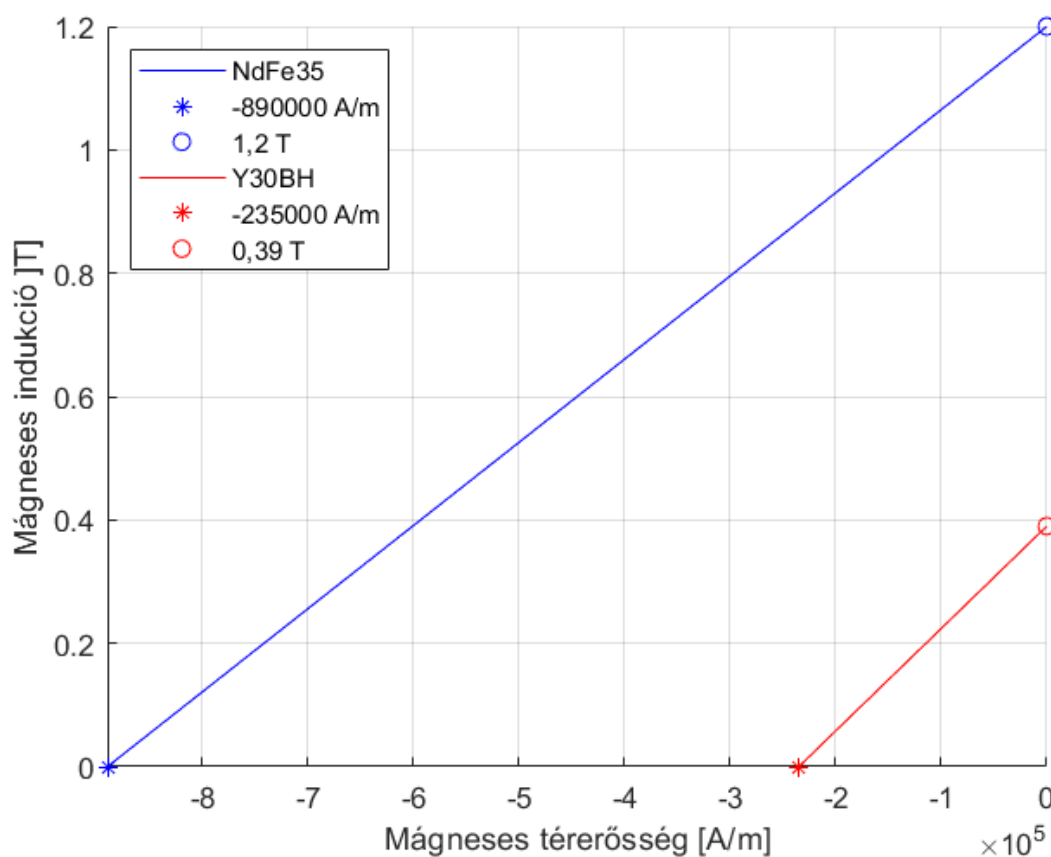
2. Táblázat: A motor alkatrészeinek anyagai

Alkatrész	Anyag megnevezése
Állórész	M19_29G
Tekercselés	Réz
Forgórész	M19_29G
Mágnesek	NdFe35 vagy Y30BH

Az állórész és a forgórész lemezelte vasanyagból készült. A 0,35 mm-es lemezeket ragasztó tartja egyben. A vasanyag az alkatrészek 96%-át tölti ki, a maradék a ragasztó. A tekercselés laminált rézhuzalokból áll.

4.2.1 Az összehasonlítandó mágnesek tulajdonságai

Az eredeti motor mágnesei NdFe35 megnevezésű neodímium anyagból készültek, így a kezdeti modell is ezzel az anyagjellemzővel lett elkészítve. Az irodalomkutatás alapján egy viszonylag széles körben alkalmazott jó tulajdonságokkal rendelkező és olcsó mágnesanyag lett kiválasztva, az Y30BH. A következő ábrán ezeknek az anyagoknak a B-H görbéje látható.

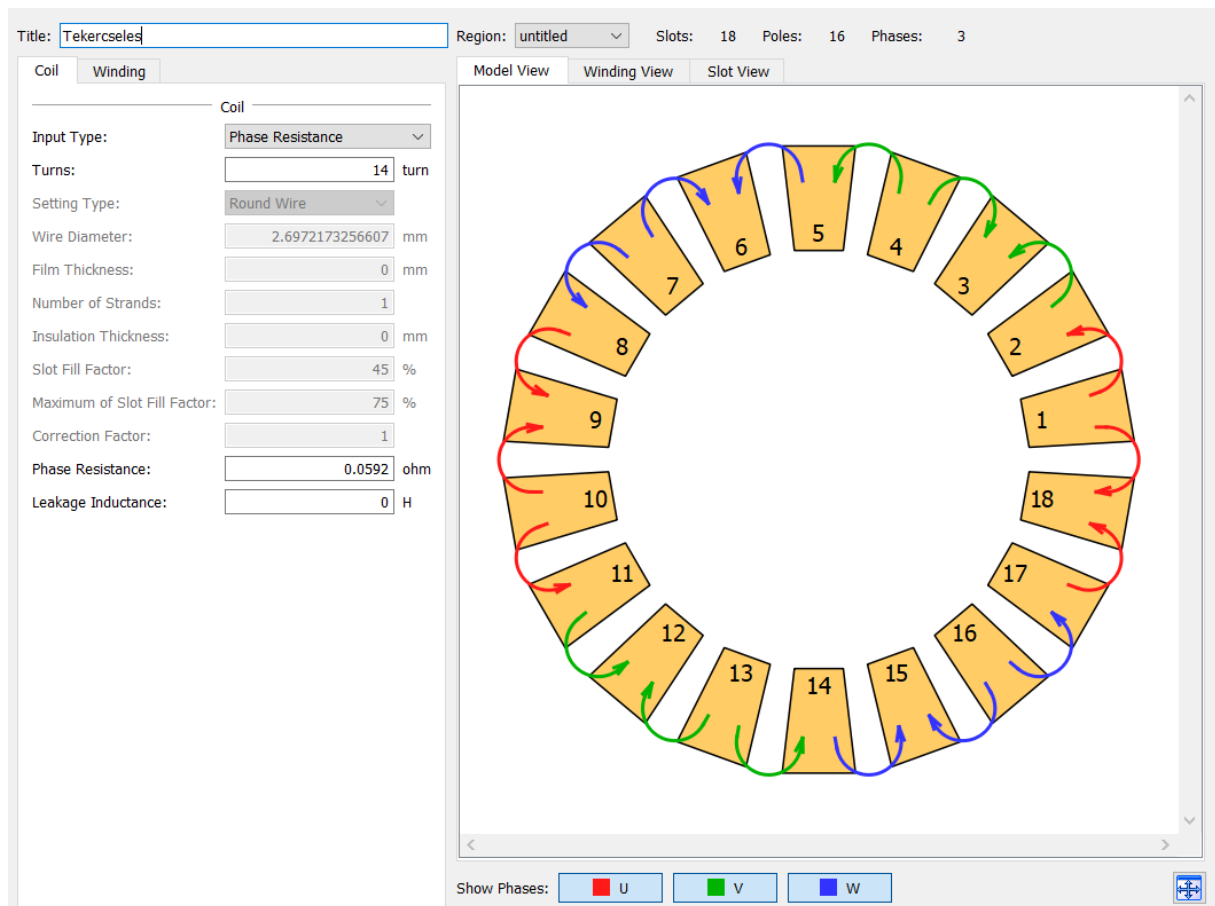


3. Ábra: A két mágnesanyag B-H görbéje.

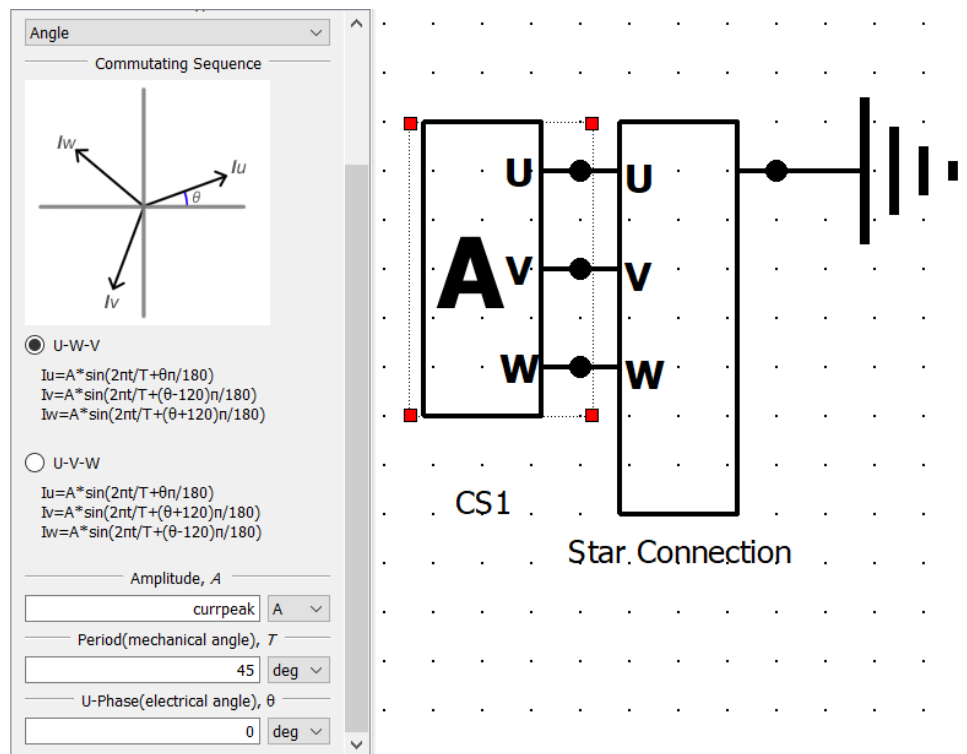
Ezek az adatok alapján megállapítható, hogy az NdFe35 egy háromszor erősebb mágnes, mint a Y30BH.

4.3 Tekercselés

A motor tekercselése az ábrán látható módon koncentrált tekercseléssel lett megvalósítva, valamint ennek terhelése az ábrán látható háromfázisú szinuszos áramgerjesztés. A gerjesztésnél paraméterként adható meg a motor kezdeti mechanikai- és villamos szöghelyzete. A hatásfokmező vizsgálat során kizárólag a mezőgyengítés nélküli motorüzemű tartomány lett vizsgálva szinuszos áramgerjesztéssel, mivel a villamosgép felhasználásának szempontjából csak ez a tartomány releváns, ezért az uvw (tekercseléshez rögzített) koordinátarendszerben értelmezett fáziseltolás minden esetben 0, a forgórész pozíciója pedig ezzel összhangban mindig $I_q = \max$ és $I_d = 0$ értékre van beállítva. A gerjesztést befolyásolja továbbiakban a fázisellenállás és a tekercselés kitöltési tényezője is, amely függ a horonytól és a tekercselést az állórésztől elválasztó szigetelőanyag vastagságától, továbbá a rézhuzal geometria kialakításától, szigetelésére használt anyag vastagságától és a menetszámtól.



4. Ábra: A tekercselés felépítése.

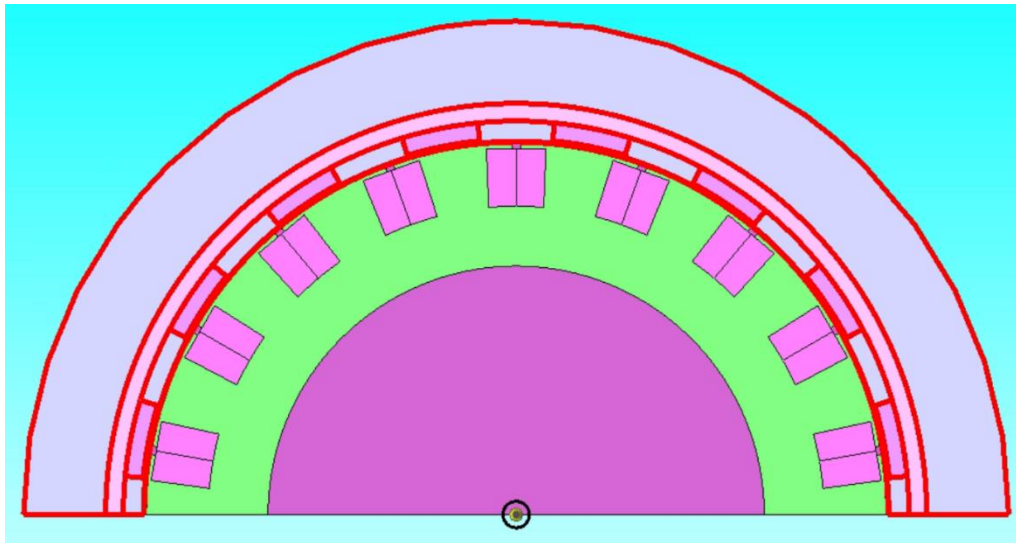


5. Ábra: A tekercselés áramgerjesztése.

4.4 Peremfeltételek

Mivel a motor a hossz tengelye mentén változatlan, elegendő volt kétdimenziós szimulációkat végezni. Ezeknél a szimulációknál csupán a motor keresztmetszete van megrajzolva, és csak egy-egy keresztmetszetben történnek végeselemes számítások. A modell paraméterként kezeli a motor hosszát.

A végeselemes szimuláció során meg kell adni a peremeken lévő feltételeket. A következő ábrán látható piros színnel kiemelve a modell forgórésze.



6. Ábra: A modell álló- és forgórésze.

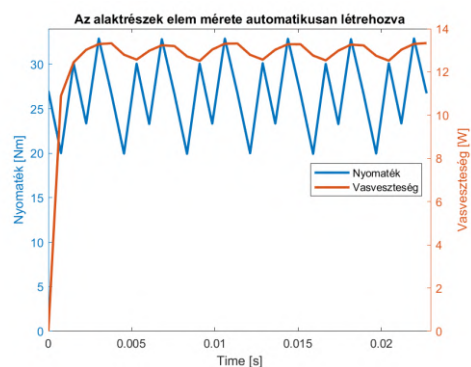
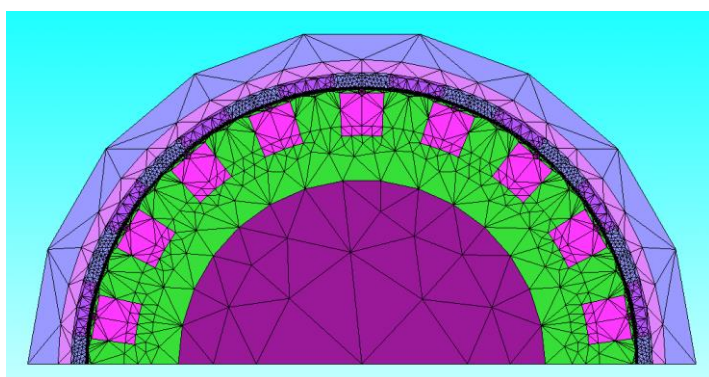
Ez a motor forgórészét és a körülötte lévő levegőt foglalja magában. Az álló- és a forgórész közötti határvonal a légrés közepén húzódik. A levegőtartomány külső élén zéró vektorpotenciál peremfeltétel van értelmezve. A vektorpotenciál az a fizikai paraméter, amelynek a rotációja a mágneses indukció. Amennyiben ez 0, a mágneses indukcióvonalak a peremen nem léphetnek ki, azokkal tangenciálisak. A motor x-tengelyen lévő élei forgásszimmetrikus peremfeltételt kaptak, mivel csupán a keresztmetszet fele van megrajzolva, a másik fele a forgásszimmetria alapján van modellezve. A nyomatékszámítás a modell álló- és forgórésze közötti tangenciális erőből kerül kiszámításra.

4.5 A végeselemes háló beállítása – hálózérékenység vizsgálat

A megfelelő minőségű háló elkészítése elengedhetetlen fontosságú a végeselemes szimuláció esetén, mivel az jelentősen befolyásolja a szimuláció pontosságát és a szimuláció elvégzéséhez szükséges időt. [14]

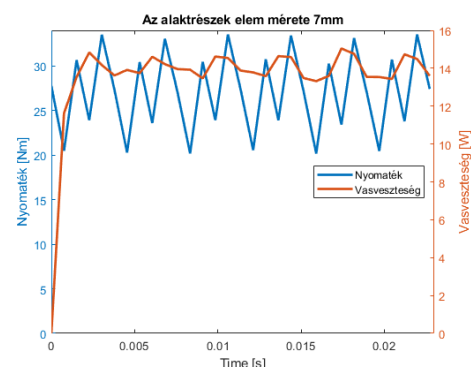
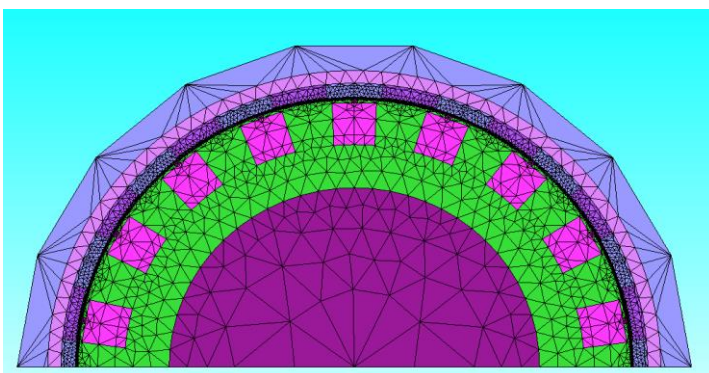
Esetünkben a két legfontosabb kimeneti paraméter a vasvesztés és a nyomaték. Különös tekintettel kell lenni a légrésben lévő hálórészre, mivel ez egy a modell méretéhez képest viszonylag szűk terület, és a nyomatékszámítás itt történik. [14]

A hálót a JMAG-Designer beépített hálózójával hoztuk létre, amely háromszög elemekből építkezik, de a légrésben lévő csúszó réteget téglalap elemekkel tölti ki, amely segíti a nyomaték pontosabb számítását. A motor körüli levegő tartomány paraméterként adható meg. Ezt nem érdemes túl nagyra választani. Egyrészt mert a forgórészt viszonylag kis mértékben hagyják csak el erővonalak, valamint a valós felhasználás során a motor valamilyen külső házba is belekerül általában, ezért olyankor nem levegő veszi körül. A hálóméret alkatrészenként megadható. A hálóérzékenység vizsgálat során azt a legkisebb elemszámú hálót keressük, ahol az eredmények már nem változnak jelentősen. Ezt a feltételek folyamatos szigorításával lehet elérni. A vizsgálatok minden esetben 35 A és 330 rpm munkaponton történtek. A következő ábrán a szoftver alapértelmezett végelemléte látható.

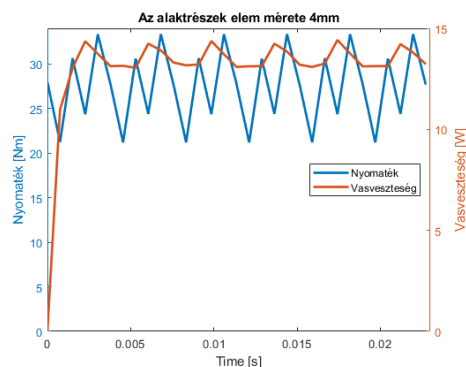
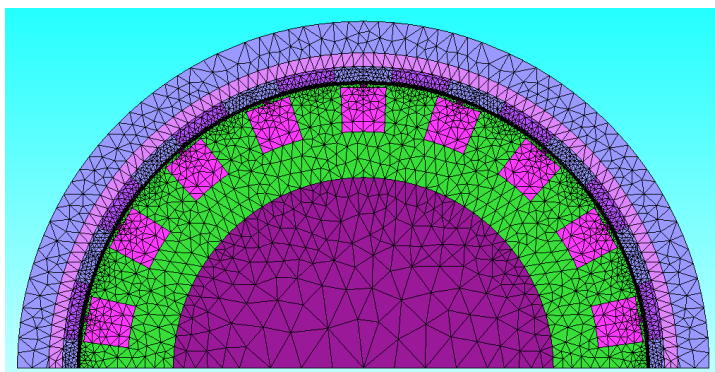


7. Ábra: A szoftver alapértelmezett végelemléte.

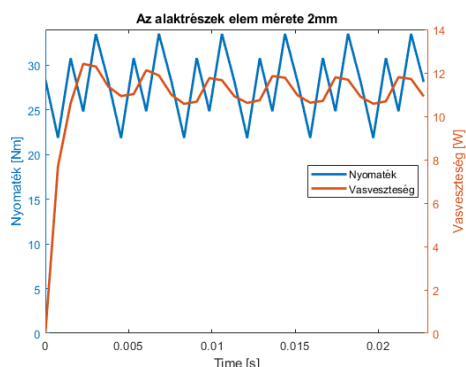
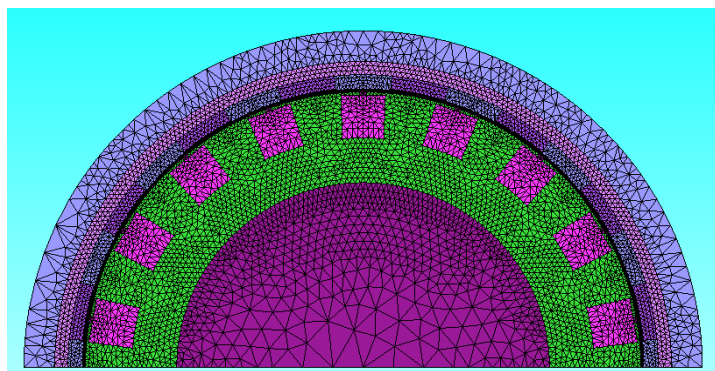
Ezek után a végelemléte méretét a motor alkatrészein fokozatosan csökkentettük, miközben a légrésben lévő elemméretet automatikus méretváltóztatásra volt beállítva, mivel a szimulációk során jelentékeny eredményváltozást nem mutatott annak manuális megadása, viszont a szimuláció lefutásának idejét nagyban növelte. A hálóméret lépései a következő ábrákon láthatóak.



8. Ábra: A 7 mm-es háló és annak eredményei.



9. Ábra: A 4 mm-es háló és annak eredményei.



10. Ábra: A 2 mm-es háló és annak eredményei.

A különböző végelem hálókön a kapott nyomatékok és veszteségek értéke hasonló arányban javult, és mivel a veszteségszámítás nem tisztán végelemes módszerrel történnek, hanem különböző matematikai modellek alapján vannak becsülve a mezőjellegű végelemes eredményekből, a hálók jóságát a nyomatékérték változásához kötöttem. A számszerű eredményei, és azok összehasonlításai a következő táblázatban láthatóak.

3. Táblázat: A hálóérzékenység vizsgálat eredményei

Elemméret	Átlag nyomaték	Eltérés az előző hálófinomsághoz képest
Alapértelmezett	26,61 Nm	~
30 mm	23,30 Nm	12,44 %
15 mm	26,24 Nm	12,62 %
7 mm	27,08 Nm	3,20 %
4 mm	27,48 Nm	1,48 %
2 mm	27,84 Nm	1,31 %
1 mm	27,95 Nm	0,40 %

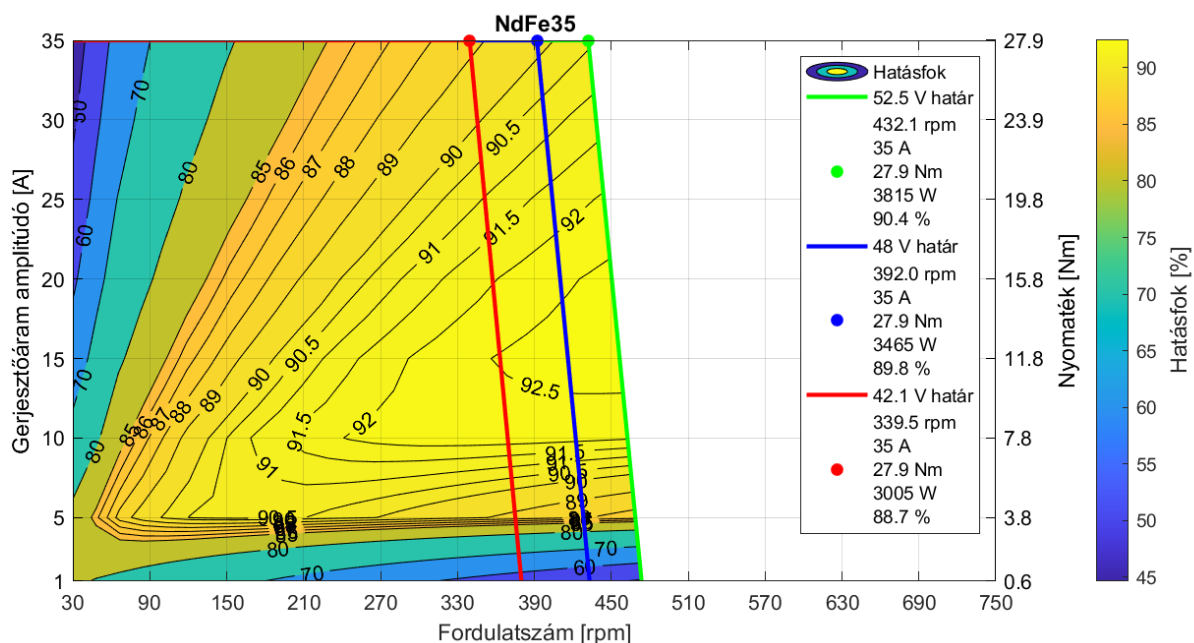
Mivel az elemszám az elemméret csökkenésével négyzetesen nő, és mivel az 1 mm-es háló kevesebb, mint fél százalékkal javított az eredményeken a 2 mm-eshez képest, a további vizsgálatok során a 2 mm-es hálóbeállítás volt alkalmazva. A végleges végelemes háló 11739 elemből és 6331 csomópontból áll.

5 Az eredmények bemutatása

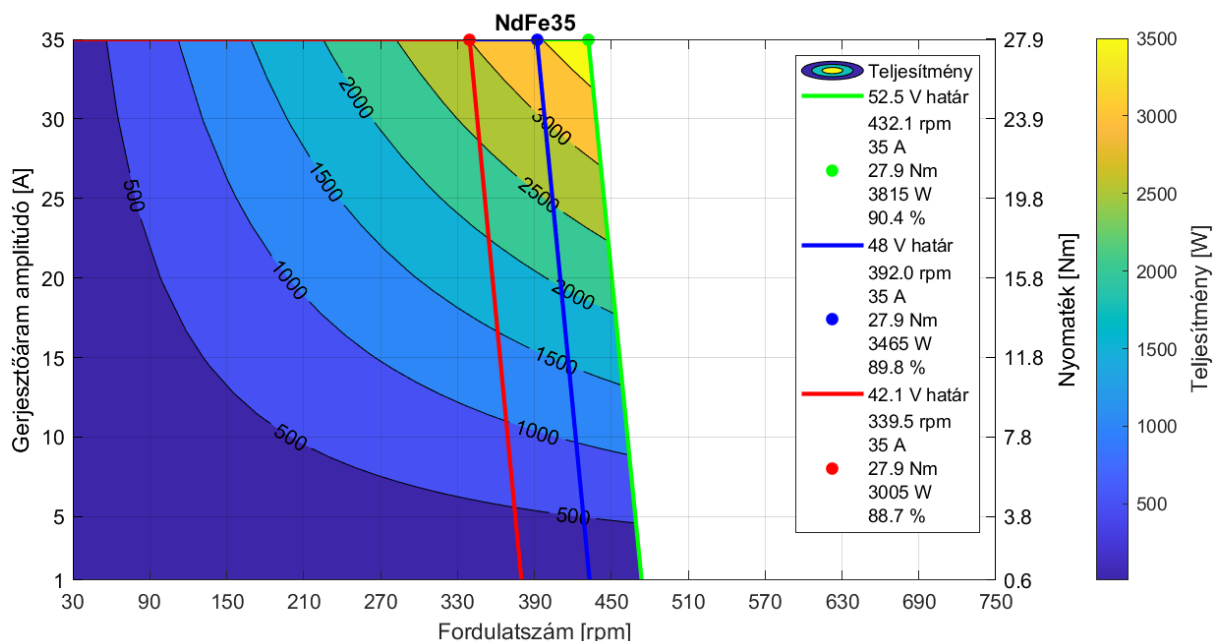
Kezdeti lépésként a létező motor modellezése és hatásfokmező szimulációja készült el. Ezek után a végeselemes modellben neodímium mágnesek ki lettek cserélve ferrit kerámia mágnesekre, és ennek is elkészült egy hatásfokmező vizsgálata. Mivel az új mágnesek sokkal gyengébbek, így az indukáltfeszültségei is kisebbek azonos frekvencián, tehát a megadott korlátokon belül jóval nagyobb fordulatszámú munkapontok is elérhetővé válnak. Ennek megfelelően a kerámia mágnesekkel szerelt motoroknál lassító áttétel alkalmazása ajánlott. A hajtómű modellezése nem tartozott a dolgozatban kitűzött célok közé, emiatt az irodalomkutatás során összeszedett ismeretek alapján lettek meghatározva a hatómű tulajdonságai. A hajtómű minden esetben egy műanyag fogaskerékpár, aminek bár teljesítményfüggő a hatásfoka, jó közelítéssel lehet átlagosan 97 %-kal számolni. Ezek után több lépésben növelve lettek a mágnesek méretei. [15], [16]

5.1 A neodímium mágnesekkel szerelt motormodell szimulációs eredményei

A következő ábrákon látható a neodímium mágnesekkel rendelkező motormodell hatásfokmezője és teljesítménymezője.



11. Ábra: Az NdFe35 mágnesekkel szerelt modell hatásfokmezője.



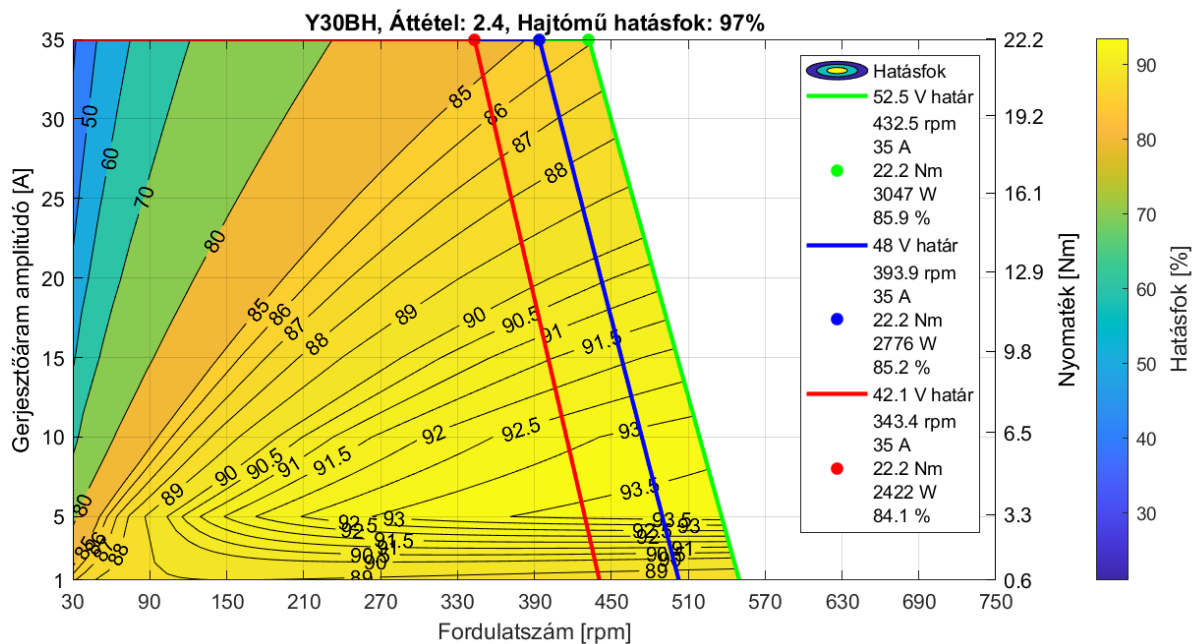
12. Ábra: Az NdFe35 mágnesekkel szerelt modell teljesítménymezője.

A fenti ábrákon az x-tengely a fordulatszám, az y-tengelyek pedig a gerjesztőáram amplitúdó és a nyomaték. Mivel a szimulációk során áramgerjesztéssel volt terhelve a motor a leadott nyomaték kizárólag a gerjesztés amplitúdójától függ. A piros, a kék illetve a zöld vonalak a feszültség és áramkorlátokat jelölik az akkumulátorcsomag töltöttségétől függően. Mivel a motorvezérlő áramkorlátja az akkumulátor töltöttségi szintjétől független, így az áramkorlát minden esetben 35 A. A munkatér jobb oldalát határoló görbék a DC feszültségkorlát határozza meg. A különböző színek a teljesen lemerült, a névleges feszültségű és a teljesen feltöltött akkumulátorhoz tartoznak. A vizsgálat során az egyes munkapontoknál tapasztalható akkumulátor feszültség esés nem lett figyelembevéve, mivel erről nem állt rendelkezésre megfelelő adat.

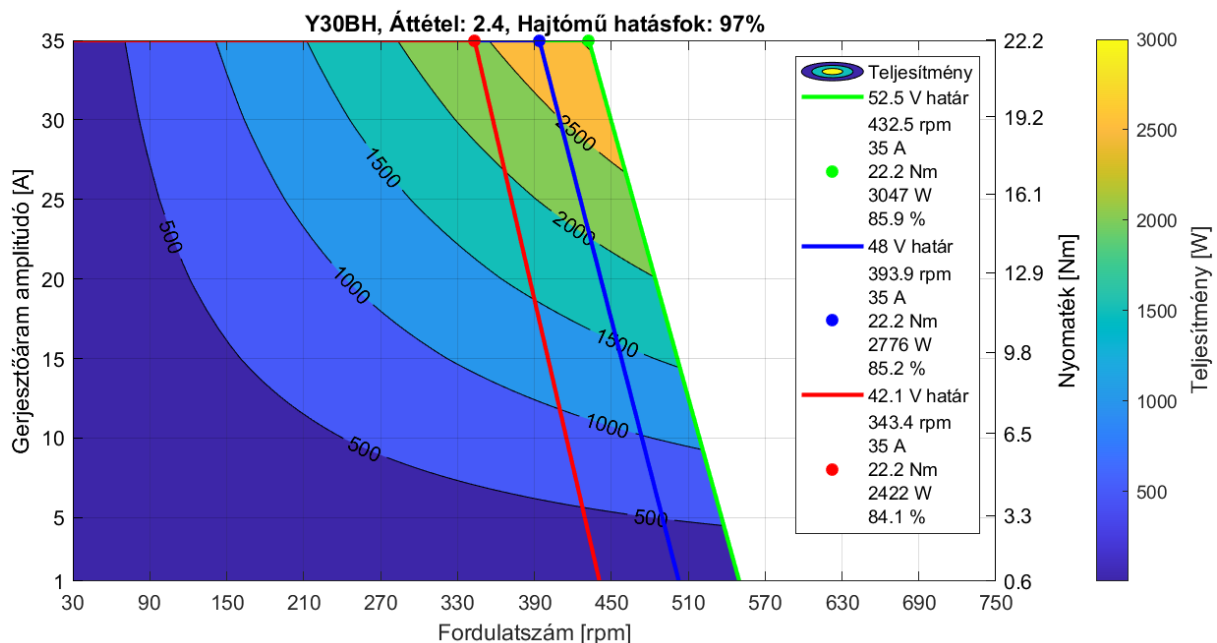
Az ábrákon jól látható, hogy a lemerült akkumulátorhoz tartozó sarokmunkapont is az elvárt 20 Nm és 330 rpm munkapont fölött van minden szempontból, ezáltal a motor bármilyen töltöttségi szinttel képes elérni ezt az üzemállapotot. A verseny során leggyakoribb munkapont körüli tartományban 90 % és 92 % közötti hatásfokon képes üzemelni ez a motorkonstrukció.

5.2 A ferrit mágnesekkel szerelt motormodell szimulációs eredményei

A következő ábrákon látható a ferrit mágnesekkel rendelkező motormodell hatásfokmezője és teljesítménymezője.



13. Ábra: Az Y30BH mágnesekkel szerelt modell hatásfokmezője.



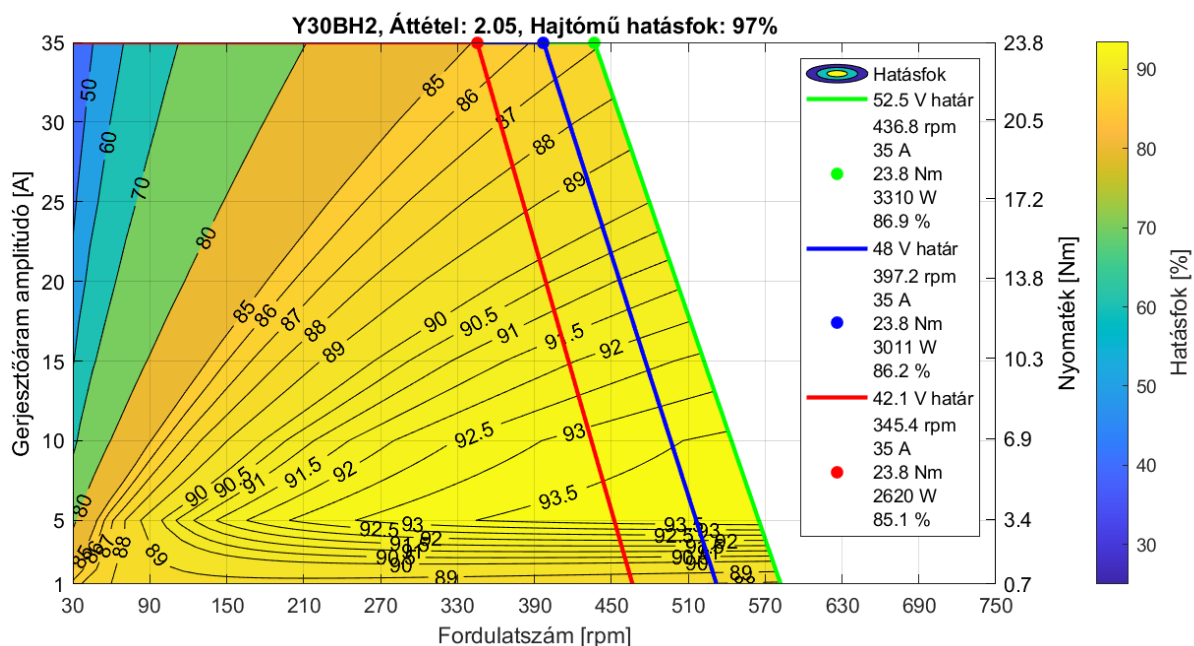
14. Ábra: Az Y30BH mágnesekkel szerelt modell teljesítménymezője.

Ebben az esetben a fordulatszám tartomány nagymértékben nőtt, ugyanakkor a leadható nyomaték csökkent. Ezt kompenzálva egy 2,4-es lassítóáttétel közbeiktatásával vizsgáljuk a hatásfok- és teljesítményezőket. A feltételezés alapján a hajtómű hatásfoka a teljes munkaterületen konstans 97 %, amivel a motormodell hatásfokmezője már meg van szorozva, tehát a fenti adatok a motor és a hajtómű együttes tulajdonságaira vonatkoznak. Látható, hogy a motor teljesítménye kb. 20 %-kal csökkent, valamint a magas hatásfokú tartomány is a kisebb nyomatékú munkapontok felé tolódott el. A motor még így is képes az elvárt maximális munkapont elérésére lemerült akkumulátorokkal is, és még a hajtómű miatti hatásfokromlás

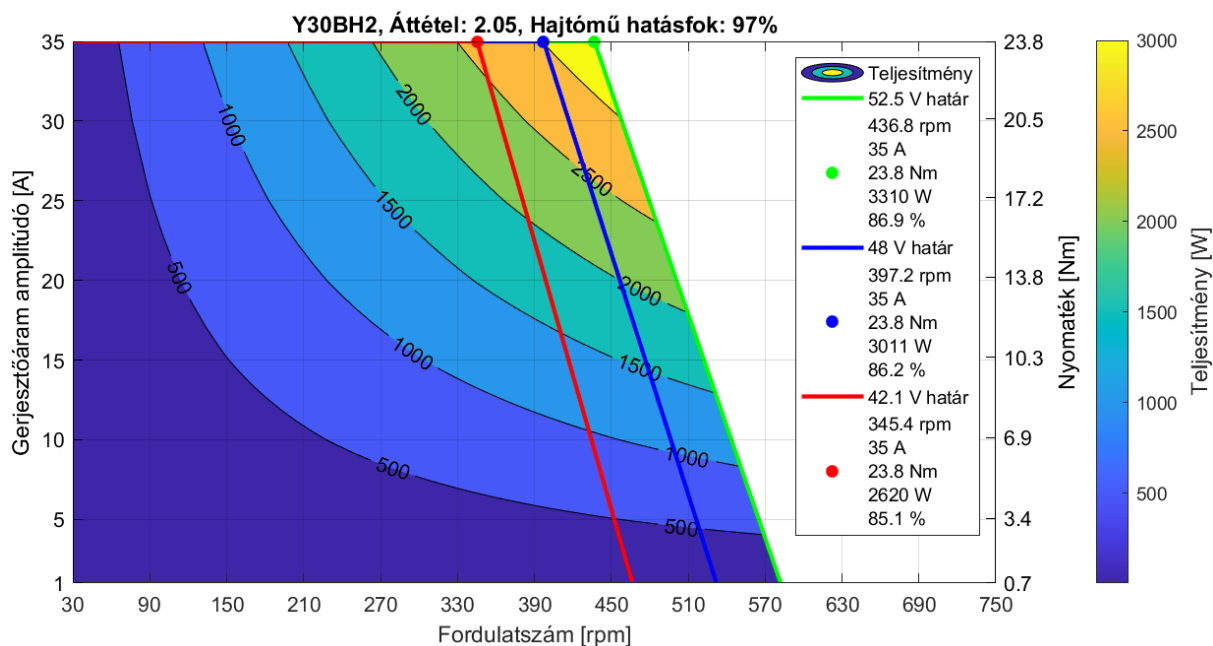
ellenére is a gyakran alkalmazott munkapont körüli terület hatásfoka átlagosan 1 %-ot nöött az előző konstrukcióhoz képest.

5.3 A megnövelt ferrit mágnesekkel szerelt motormodell szimulációs eredményei

A következő ábrákon látható a 38 %-kal megnövelt ferrit mágnesekkel rendelkező motormodell hatásfokmezője és teljesítménymezője. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az eredeti 11,3 mm-es mágnesszélesség 15,6 mm-re módosult.



15. Ábra: A 38 %-kal megnövelt Y30BH mágnesekkel szerelt modell hatásfokmezője.

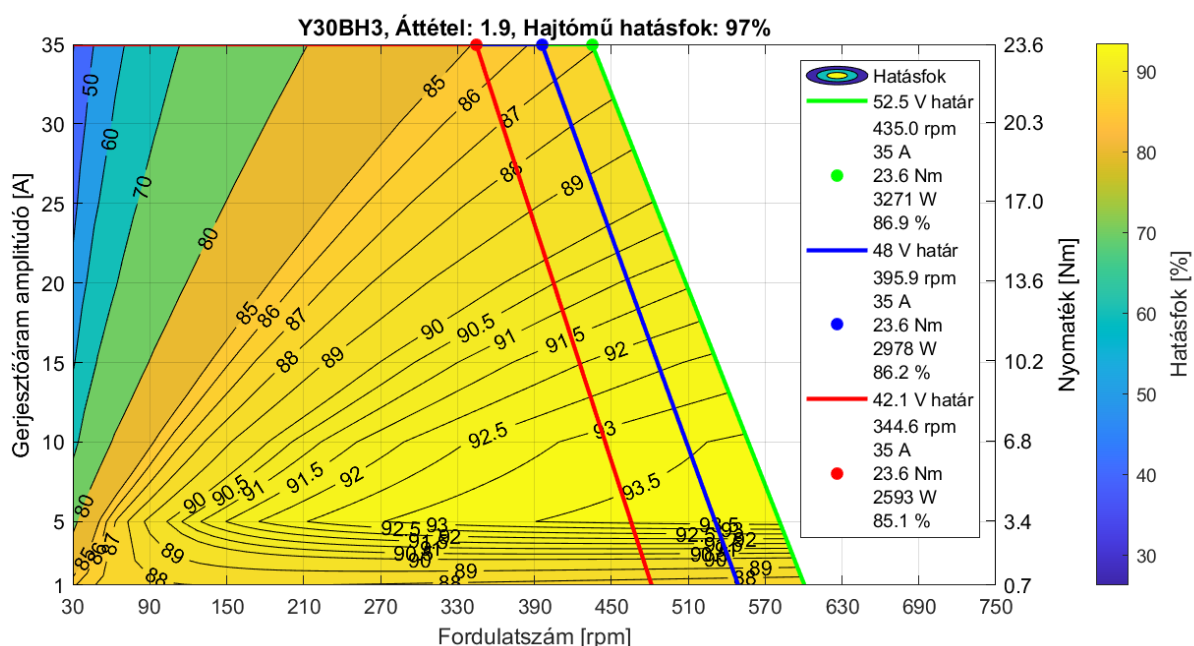


16. Ábra: A 38 %-kal megnövelt Y30BH mágnesekkel szerelt modell teljesítménymezője.

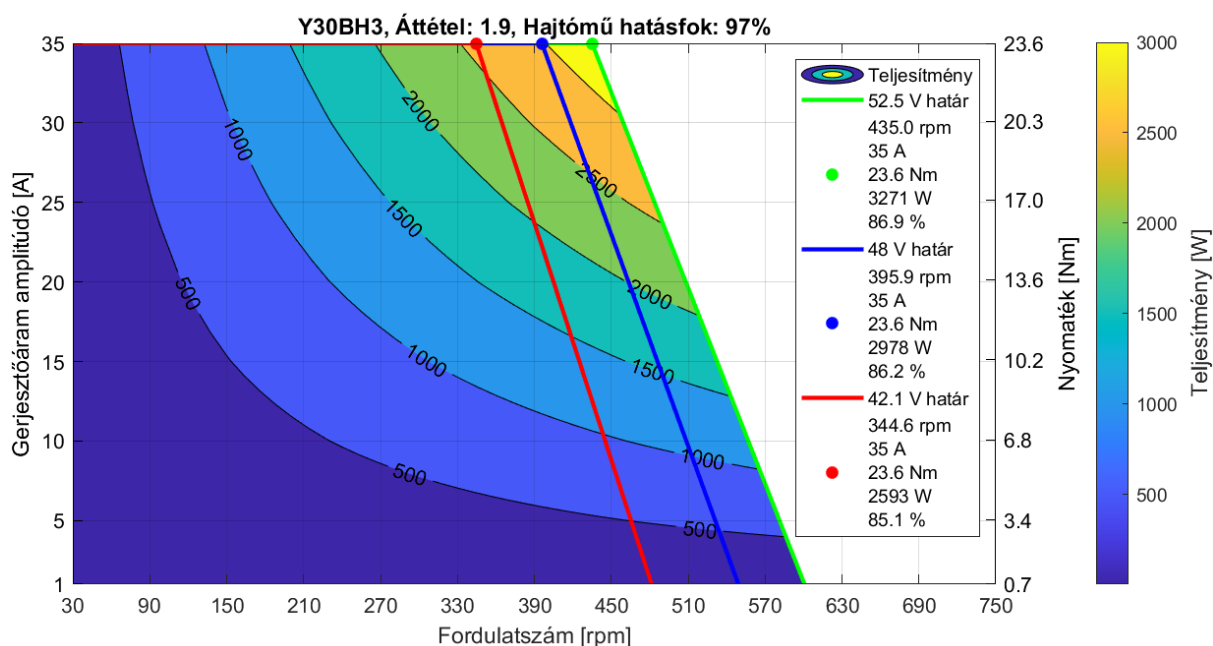
A megnövelt méretű mágnesekhez természetesen megnövekedett mágneses mező, ezáltal nagyobb indukált feszültség tartozik, és így a munkatér fordulatszámtartománya is lecsökken.

Emiatt az áttétel értéke 2,4-ről 2,05-re lett lecsökkentve. A maximális munkapont így is elérhető akkumulátor töltöttségtől függetlenül, és a gyakran használt munkatartomány átlagos hatásfoka is nőtt, igaz csak minimálisan.

Az itt kapott eredmények alapján megvizsgálásra került a mágnesek méretének további növelése. Itt szintén a mágnesek szélessége lett megnövelve 59 %-kal, tehát az eredeti 11,3 mm-ről 18 mm-re módosultak a mágnesszélességek. A következő ábrákon láthatóak ennek a modellnek a szimulációs eredményei.



1. Ábra: A 59 %-kal megnövelt Y30BH mágnesekkel szerelt modell hatásfokmezője.



2. Ábra: A 59 %-kal megnövelt Y30BH mágnesekkel szerelt modell teljesítménymezője.

Az előző méretváltatáshoz képest itt már nem volt jelentős változás, ugyanakkor a lassítóáttételt tovább kellett csökkenteni 1,9-re. Az egyetlen jól észrevehető változás, hogy a tartomány sarokmunkapontjainak csökkentek a teljesítményei. Nem túl nagy ez a csökkenés, és a maximálisan elvárt munkapont elérését sem veszélyezteti, de jól látható, hogy ezzel a további mágnesnöveléssel nem sikerült javulást elérni. Ennek oka a feltételezéseink szerint az, hogy mivel csak a mágnes szélességét változtattuk meg, a mágnes arányai is megváltoztak, és így az általuk létrehozott mágneses mezők alakjai is.

6 Összefoglalás

Az eredményekből jól látható, hogy bár a ferritmágnesekkel szerelt motorok nem voltak képesek olyan teljesítményt leadni az adott korlátok között, mint a neodímium mágnessel szerelt modellek, viszont már a mágnesek méreteinek megváltoztatása nélkül is sikerült az elvárt maximális munkapont elérésére és a leggyakrabban használt tartomány hatásfoknövelésére egy egyfokozatú hajtómű beépítésével. A mágnesek méretének növelése további javulást eredményezett egy bizonyos pontig. Mivel csak a mágnesek szélessége változott, ezért a túl nagy méretnövekedés már rontott az eredményeken. A mágnesek vastagságának növelése azonban a teljes motorkonstrukció megváltozását jelentené, ezért ezzel nem foglalkoztunk. Összességében a mágnesek anyagának megváltoztatásával bár lehet csökkenteni a költségeket, viszont egy kerékagymotor átalakítása egy közvetett hajtású rendszerbe való illesztéssel egyértelműen megnöveli a költségeket és a tömeget. Ezek alapján egyedi konstrukciók átépítése ilyen formán semmiképpen sem gazdaságos, viszont az itt szerzett tapasztalatok hatékonyabbá tehetik az újabb hajtáskonstrukciók megtervezését.

7 További célok

A további célok között szerepel más mágnesanyagjellemzők vizsgálata. Ez magában foglalja nem csak a ferritmágnes anyagokat, hanem akár egyéb neodímium mágnesanyagok vizsgálatát is a megfelelő hatásfok eléréséhez. Ezek után a Széchenyi István Egyetem hallgatói csapatának, a SZEenergy Team új járműhajtásának a tökéletesítése a cél, ahol talán az egyik legfontosabb szempont a minél jobb hatásfok elérése, beleértve a hajtás villamos hatásfoka mellett a teljes hajtásrendszer tömegére számított fajlagos teljesítményét. Itt más felépítésű állandómágneses szinkrongép lesz alkalmazva, ami már fel van készítve konstrukciós szempontból is a közvetett, hajtóműves hajtásra.

További cél még az új motorkonstrukció geometriai optimalizációja.

8 Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a SZE Járműipari Kutatóközpontjának az Autonóm Rendszerek Nemzeti Laboratórium nevű és RRF-2.3.1-21-2022-00002 nyilvántartású projekt keretében: Emellett a SZEenergy csapatának a feladat megbízásáért.

Szeretnék még köszönetet mondani Istenes Györgynek a folyamatos mentorálásért, valamint a szakami segítségéért.

9 Irodalomjegyzék

- [1] István Kalincsák és József Polák: Az irányítás szerepe és helyzete a közlekedési rendszerben
IFFK 2018: XII. Innováció és fenntartható felszíni közlekedés, Budapest, Magyarország, Magyar Mérnökakadémia (MMA), 2018, pp. 274-282.
- [2] Nikhil Manakshya and Praveena Pandurangan: Permanent magnet synchronous machine using ferrite vs rare earth magnets-how do they compare?
Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2021, p.102
- [3] SZEenergy Team
<https://szenergy.hu/> - 2022. 11. 04.
- [4] Neodímium mágnesek
<https://orodian.hu/neodimium-magnesek/> - 2022.11.04.
- [5] A neodímium mágnes típus ismertetése
<https://www.euromagnet.hu/a-neod%C3%ADmium-m%C3%A1gnes-t%C3%ADpus-ismertet%C3%A9se> - 2022.11.04.
- [6] Tuğberk Özmen and Nevzat Onat: The Effects of Magnetic Circuit Geometry and Material Properties on Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator Performance
Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering, Vol. 9, No. 2, Turkey, April 2021, pp. 99-105.
- [7] A ferrit mágnes típus ismertetése
<https://www.euromagnet.hu/a-ferrit-m%C3%A1gnes-t%C3%ADpus-ismertet%C3%A9se> - 2022.11.04.
- [8] Ferrit mágnesek
<https://orodian.hu/ferrit-magnesek/> - 2022.11.04.
- [9] Miklós Kuczmann és Amália Iványi: The Finite Element Method in Magnetism
Akadémiai Kiadó, Budapest, Magyarország, 2008, p. 319.
- [10] Huiyuan Xiong, Xionglai Zhu and Ronghui Zhang: Energy Recovery Strategy Numerical Simulation for Dual Axle Drive Pure Electric Vehicle Based on Motor Loss Model and Big Data Calculation
Hindawi Complexity, Guangzhou, Guangdong, China, 2018, p. 15
- [11] Powesys-JMAG Application - Solutions
<https://www.jmag-international.com/> - 2022.11.04.
- [12] Kustlits Márton: Állandómágneses szinkrongépek modellalapú irányítástervezése
Publio Kiadó Kft. Győr, 2016, p. 98
- [13] Daryl L. Logan: A first course in the finite element method.
Cengage Learning Engineering, Howrah, India, 2011, p. 976

- [14] Yucheng Liu and Gary Glass Effects: of Mesh Density on Finite Element Analysis
University of Louisiana, USA, Lafayette, 2013, p. 7
- [15] Polák József: Elektromos közúti jármű hajtóművének optimalizációs célú elemzése
Doktori értekezés, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2015, p. 149.
- [16] Paul G. Cummings, W. D. Bowers and alter J. Martiny: Induction Motor Efficiency Test
Methods
IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. Ia-17, No. 3, Greenfield, USA,
May/June 1981, pp. 253-272.