

# INDUKTÍV KÖZELÍTÉSKAPCSOLÓ VIZSGÁLATA VÉGESELEM-MÓDSZERREL

Készítette:

PRUKNER PÉTER

Villamosmérnöki (B.Sc.) szakos hallgató

Konzulensek:

DR. HABIL. KUCZMANN MIKLÓS, PH.D.

tanszékvezető, egyetemi tanár

PÓLIK ZOLTÁN

Ph.D. hallgató

Automatizálási Tanszék

Elektromágneses Terek Laboratórium

Széchenyi István Egyetem

Győr

2012

## Tartalomjegyzék.

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés.....                                                                  | 3  |
| 2. Az induktív közelítéskapcsoló.....                                              | 5  |
| 3. A végeselem-módszer és a Maxwell-egyenletek.....                                | 9  |
| 3.1 A végeselem-módszer.....                                                       | 9  |
| 3.2 A Maxwell-egyenletek.....                                                      | 11 |
| 3.3 A Maxwell-egyenletek osztályozása.....                                         | 12 |
| 3.2.1 A mértékkel ellátott $\mathbf{A}$ -formalizmus.....                          | 14 |
| 3.2.1 A mértékkel ellátott $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus..... | 15 |
| 4. FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS.....                                            | 17 |
| 4.1 Induktív közelítéskapcsoló szimulációja FEMM környezetben.....                 | 17 |
| 5. Induktív közelítéskapcsoló mágneses terének vizsgálata.....                     | 20 |
| 6. Konklúzió, jövőbeli tervek.....                                                 | 33 |
| 7. Irodalomjegyzék.....                                                            | 34 |

## 1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre fontosabb szerepet játszik egy termék vagy eszköz tervezésében a szimuláció. Az számítástechnika és a számítási módszerek rohamos fejlődésének köszönhetően egyre pontosabb szimulációk készíthetők a tervezési fázisban, ami idő és költséghatékonyság szempontjából elengedhetetlen, hiszen így a gyártás előtt meghatározható a termék optimális felépítése. A szimuláció alapú termékfejlesztés sokkal gyorsabb és költséghatékonyabb a prototípus építés és tesztelés alapú fejlesztésnél, mivel nem szükséges drága alapanyagból költséges munkafolyamatok árán elkészített mintákat legyártani, majd azok mérését, kiértékelését elvégezni. Ennek eredményeként a fejlesztési fázis sokkal későbbi időszakában sokkal kevesebb számú prototípus készül, amelyeken a paraméterek finomhangolását, illetve a sorozatgyártás előtt szükséges méréseket elvégzik. Így, a szimuláció alapú fejlesztés segítségével sok időt és pénzt takarítanak meg a gyártók. Ezt a gyártási módszert az ipar minden területén használják, például az automatizált rendszerek alkatrészeinek tervezésénél is.

A mai automatizálás és gyártástechnológia egyik legfontosabb kellékei a szenzorok. Minden automatizált rendszerben található valamilyen érzékelő, ezért nagyon fontos jó minőségű szenzorok tervezése és gyártása. A fejlesztési fázisban sok fontos szempontot kell figyelembe venni, ami a különböző típusú szenzoroknál más és más lehet. Ezért a szimulációs módszerek alkalmazása a szenzorok elemeinek tervezésben nagy segítséget nyújt a gyártóknak. A Balluff a világ egyik vezető szenzorgyártója, több mint 40 éve foglalkozik szenzorok gyártásával, fejlesztésével és értékesítésével. Gyártásban és értékesítésben minden földrészben képviselteti magát, a fejlesztési munkák főként Európa országaiban folynak. A cég központja Stuttgart mellett Neuhausen auf den Fildernben található, ahol a cég a legnagyobb fejlesztőgárdájával rendelkezik. A legnagyobb gyártókapacitást azonban a magyarországi üzem képviseli, amely Veszprémben található. Itt induktív-, kapacitív-, illetve optikai szenzorok, valamint útmérő, azonosító és hálózati eszközök gyártása folyik. A fejlesztőbázis szintén említésre méltó, közel 60 fejlesztőmérnökkel rendelkezik a veszprémi üzem.

Jelenleg a Széchenyi István Egyetem Elektromágneses Terek Laboratóriumában dolgozom és a Balluff Elektronika Kft.-nél vagyok gyakornok, ahol különböző, elsősorban induktív elven működő szenzorok vizsgálatával foglalkozom. Ezen belül is távolságmérők és közelítéskapcsolók elsődleges érzékelő elemének optimalizálása illetve vizsgálata a fő feladatom szimulációval és méréssel.

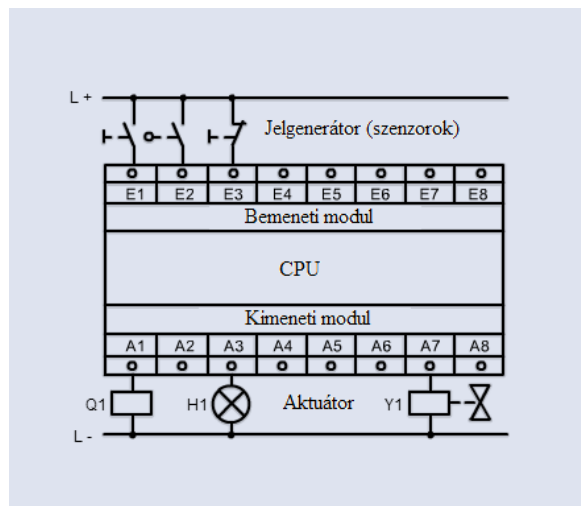
Tudományos diákköri munkám során egy induktív közelítéskapcsoló mágneses terét vizsgáltam végeelem-módszer használatával a fő érzékelőelem paramétereinek megváltoztatásával. Ez azt jelenti, hogy a szenzorban található nyitott vasmag geometriai méreteit változtattam és szimuláció segítségével meghatároztam a mágneses térerősséget az érzékelési irányban, majd a különböző változtatások után összehasonlítottam a számított eredményeket. A munkám célja az volt, hogy olyan következtetésekre jussak, amelyek segítségével növelhető a szenzorok kapcsolási távolsága és javítható a beépíthetősége. A végeselemes szimulációkat a FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS (FEMM) nevű ingyenesen letölthető szoftverrel végeztem.

Dolgozatomban bemutatom az induktív közelítéskapcsoló fő tulajdonságait, felépítését, a végeelem szimuláció elméleti hátterét, a számításhoz szükséges potenciálformalizmusokat, és azok gyenge alakját a Maxwell-egyenletektől kiindulva. Ismertetem a FEMM legfontosabb tulajdonságait, demonstrálok a feladatomhoz szükséges szimulációs modell felépítését és legfontosabb beállításait. Bemutatom a munkám során elvégzett szimulációs eredményeket illetve az optimalizálás lépéseit, majd a szimulációs eredmények alapján kiválasztott, javított paraméterekkel rendelkező vasmag geometriáját. Végül az utolsó fejezetben az értékelés illetve a jövőbeli terveim olvashatók, valamint dolgozatom végén az általam használt irodalom felsorolása található. Jövőbeli terveim közé tartozik a modell validációja méréssel, amellyel igazolni szeretném a modellem által szolgáltatott eredmények helyességét. A dolgozat megírásának idején a mérés még nem készült el, várhatóan a szóbeli fordulóban, az előadáson ismertetem a mérés és a szimuláció összehasonlításának eredményeit.

## 2. AZ INDUKTÍV KÖZELÍTÉSKAPCSOLÓ

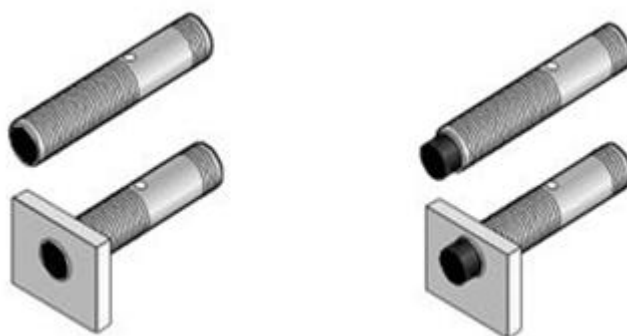
A szenzor olyan eszköz, amely egy mérendő tulajdonságnak megfelelő jelet állít elő. A mérendő tulajdonság és a jel lehet fizikai, kémiai, biológiai jellegű [13, 15]. A jel a fizikai mennyiség olyan értéke vagy értékváltozása, amely egy egyértelműen hozzárendelt információt hordoz, tehát információtartalommal bír [14]. Fontos, hogy a szenzor csak a mérendő tulajdonság változását érzékelje, minden más változásra kevésbé reagáljon. Mindezek mellett az érzékelőnek nem szabad befolyásolni a mérendő jelenséget. Léteznek mechanikus szenzorok melyek működésük során mechanikai kapcsolatba kerülnek a mérendő tulajdonsággal, például mechanikus kapcsoló esetén az kapcsolatba kerül végállást jelző fizikai akadállyal, fallal, eszközzel. Ezekben az esetekben alkalmazástechnikailag meg kell oldani, hogy a kialakuló kölcsönhatás ne befolyásolja a mérendő jelenséget. Léteznek érintés nélküli érzékelők, melyeket például a működési elv szerint csoportosíthatunk. Ilyenek például az induktív-, kapacitív-, optikai-, mágneses-, ultrahangos- és pneumatikus szenzorok.

Az induktív közelítéskapcsoló nagyon fontos eszköz az ipari automatizálásban [13, 15, 16, 17, 20, 21]. Felhasználási területe széleskörű, általában automata gyártósorokban, összeszerelő gépekben, robotokban, a logisztika eszközeiben használják őket. Nagyon időtálló termék, mivel kontaktusmentesen képes érzékelni a fémtárgyakat, ezért nem kell tartani a mechanikai behatásoktól, szennyeződésektől. Léteznek a külső rádiófrekvenciás zavaroktól védett, minden fémre azonosan reagáló induktív közelítéskapcsolók, illetve analóg távolságmérők is. Az induktív szenzorok általában hőmérséklet kompenzáltak, azaz egy bizonyos hőmérséklettartományon belül (pl.: -40 és +85 Celsius között) invariánsak a hőmérséklet változására. Kialakításuk miatt könnyen beépíthetők bármilyen rendszerbe, csatlakoztathatók elektronikus áramkörökhöz, relékhez, mágnes kapcsolókhoz, vagy akár PLC bemenetére is. Ez a példa az 1. ábrán látható.



1. Ábra: Induktív közelítéskapcsoló csatlakoztatása PLC bemenetére [17]

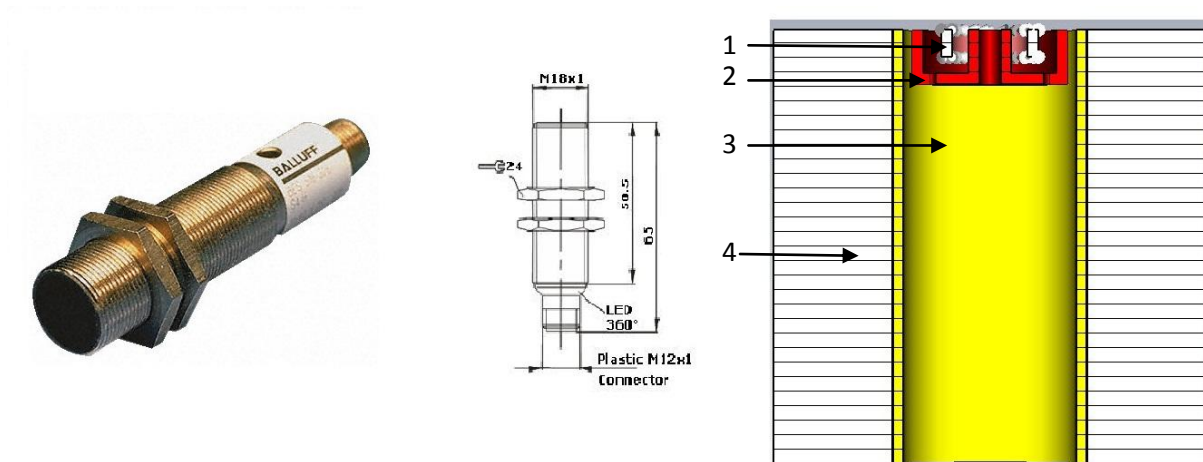
Az induktív közelítéskapcsolóknak számos kivitele létezik, például egyenáramú és váltakozóáramú. Mindkét fajta kapható különböző méreteken illetve különböző vezetékvezetéssel, továbbá vannak speciális szenzorok, amik extra védelemmel vannak ellátva. Az induktív közelítéskapcsolók legfontosabb paraméterei a kapcsolási távolság, kapcsolási frekvencia, kapcsolási hiszterézis [13, 15]. A kapcsolási távolság, az a távolság, melynél a szenzor aktív felületéhez közelítő fémtárgy változást idéz elő a gerjesztő jel paramétereiben. A kapcsolási frekvencia a maximális másodpercenkénti impulzusszámot jelenti. A kapcsolási hiszterézis alatt a bekapcsolási és kikapcsolási pont közötti távolság különbséget értjük, mely a mérőlapnak a közelítéskapcsolóhoz történő közelítése- és távolítása között jön létre. Beépíthetőség szempontjából megkülönböztetünk beépíthető és nem beépíthető szenzort, valamint ezek között átmenetet képez a részlegesen beépíthető szenzor, amely csak kissé emelkedik ki a környezetéből. A beépíthető és nem beépíthető szenzor felépítése a 2. ábrán látható.



2. ábra: Beépíthető és nem beépíthető induktív közelítéskapcsolók [17]

A kettő között a legfontosabb különbség, hogy a beépíthető szenzor aktív felületéig fém veheti körül anélkül, hogy az a megengedettnél nagyobb mértékben befolyásolná az érzékelő működését. A nem beépíthető szenzor érzékelő elemét nem veheti körbe fém, de ezek a termékek általában nagyobb a kapcsolási távolsággal rendelkeznek.

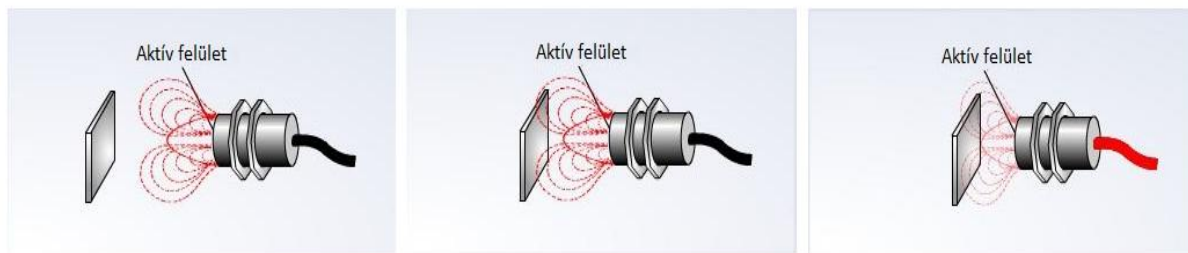
Az 3. ábrán látható a Balluff Elektronika Kft. által gyártott M18 típusú szenzor képe, a szenzor burkolatának paraméterei és egy CAD rajz a félbevágott szenzorról oldalnézetből, melyen jól látható a belső felépítés.



1: Tekerics, 2: Vasmag, 3: Sárgeáz ház, 4. Szerkezeti acélkörnyezet

2. ábra: Az induktív közelítéskapcsoló [17]

Az általam vizsgált kompakt szenzor elsődleges érzékelő eleme az előre irányban nyitott vasmagos tekercs, mögötte helyezkedik el a gerjesztést, mérést, kiértékelést, a szenzor egyéb funkcióit ellátó és kapcsoló kimenetet előállító elektronikai áramkör, amelyek egy sárgeáz házban van elhelyezve. A működés során a nyitott vasmagos tekercset szinuszos jellegű árammal gerjesztjük, amely hatására változó mágneses tér jön létre, amely a vasmag nyitott felületén kilép a szenzor előtti térbe és záródik [2, 4, 15, 16, 17, 20, 21]. Ha ebbe a mágneses térbe bármilyen fémtestet, vagy vezető anyagból készült tárgyat helyezünk, akkor ebben a céltárgyban örvényáram jön létre. Az örvényáram mágneses teret gerjeszt, amely a gerjesztő mágneses teret megváltoztatja és a tekercsen átfolyó gerjesztő szinuszos áram amplitúdójának és fázisának megváltozását eredményezi. Ezt a változást a szenzorban található elektronikai áramkör megméri, kiértékeli és a mért adatoknak megfelelően a kimenetet a kívánt állapotba állítja. A kapcsolás menete a 4. ábrán látható.



3. ábra: A kapcsolási folyamat [17]

A bal oldali ábrán a fém próbatest távoli zónában van. Ekkor nincs hatással a fém a szenzorra, ezért az nem változtat a kimenetén. A középső ábrán már hat a fém a szenzorra, de még nem lépte át a küszöbértéket, így még nem kapcsol. A jobb oldali képen a küszöb érték alatt az amplitúdó, kapcsolt állapotban van a szenzor.

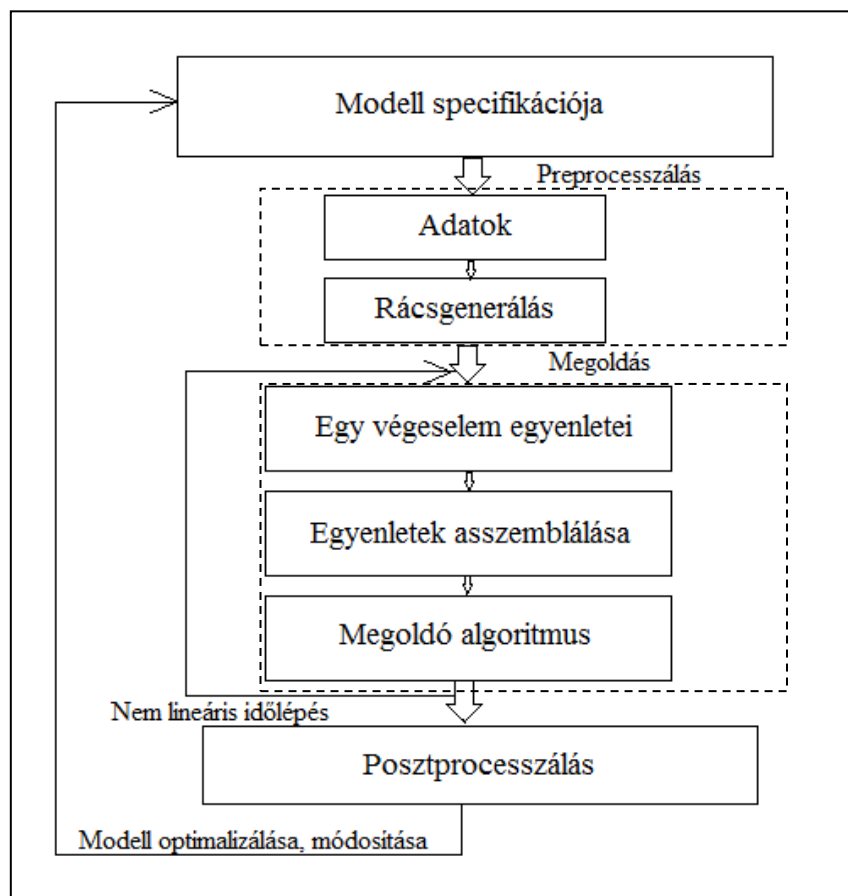
Munkám során az itt bemutatott típusú eszköz mágneses terét vizsgáltam szimulációval. Ahhoz, hogy a számítások elvégezhetőek legyenek, szükségünk van egy olyan módszerre, amellyel a Maxwell-egyenletek megoldhatók. A végeselem-módszer napjaink legelterjedtebb és leghatékonyabb módszere erre a feladatra. Ezt a két témakört a következő fejezetben részletezem.

### 3. A VÉGESELEM-MÓDSZER ÉS A MAXWELL-EGYENLETEK.

#### 3.1 A végeelem-módszer

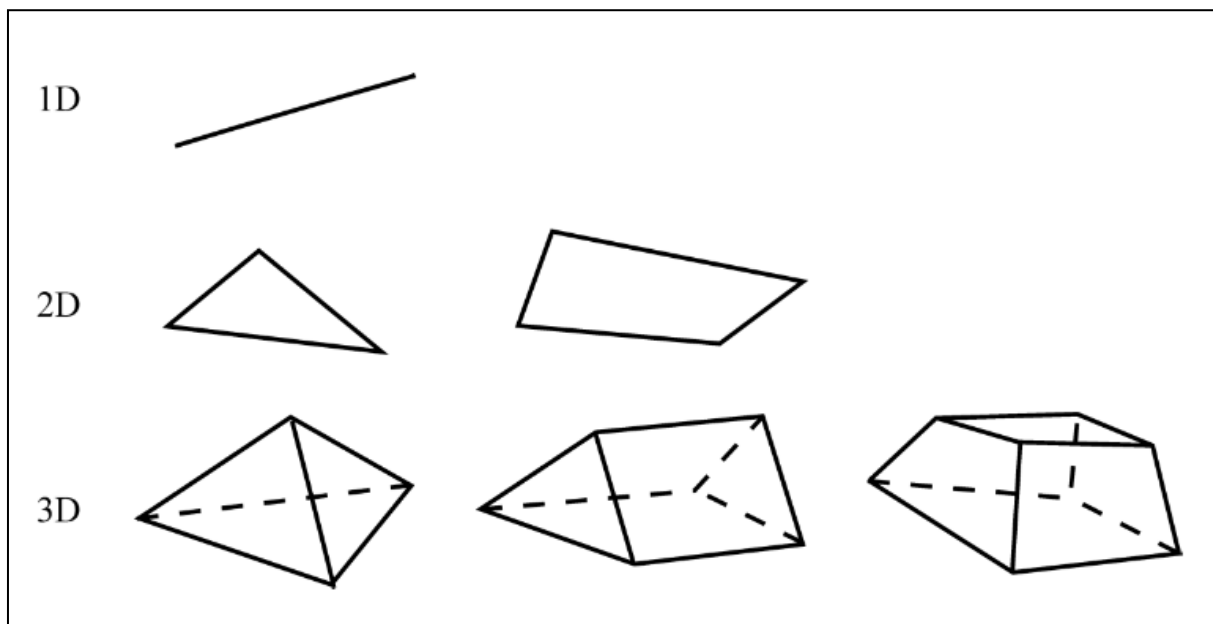
A végeelem-módszer (FEM - Finite Element Method) [1,3,7,8] az egyik legelterjedtebb és legrugalmasabban kezelhető numerikus technika parciális differenciálegyenletek megoldására. A FEM egy olyan közelítő matematikai eljárás, mellyel nagyon jó hatékonysággal megoldhatunk olyan bonyolult feladatokat, amelyekre nem létezik analitikus megoldás. A módszer lényege, hogy egy tetszőleges geometriájú tartományt véges számú elemre bontunk fel, majd a vizsgált probléma fizikai viselkedését leíró parciális differenciálegyenletek kiszámításával határozzuk meg a probléma megoldását, amiből egyéb kérdéses adatok is kiszámíthatóak.

Egy végeelemes szimuláció az 5. ábrán látható lépésekből áll. A modell specifikációja során meg kell határoznunk az általunk vizsgált probléma geometriai paramétereit. Egy modern végeelemes szoftver használata során ez egy CAD (Computer Aided Design) környezetben történik.



5. ábra: A végeelemes szimuláció lépései [3]

Következő lépés a megoldó algoritmushoz differenciálegyenletek és peremfeltételek meghatározása. Az egyenletek a vizsgált jelenséget leíró fizikai törvényekből vezethetők le. Ezek után következik a preprocesszálás, amikor különböző paramétereket adhatunk meg, például az anyagi jellemzőket, gerjesztést stb. Lehetőségünk van továbbá szimmetria tengelyek definiálására a geometria egyszerűsítése érdekében, aminek eredményeképpen csökkenthető a modell rácselemeinek száma, így növelhető a megoldás sebessége. Következő lépésben hozzuk létre a végeselemes rácsot, mely során a geometriát kis részekre, elemekre bontjuk fel, tehát diszkrétizáljuk. Ha a vizsgált probléma geometriája egydimenziós, akkor a rács szakaszokból álló vonalakat tartalmaz, ha kétdimenziós, akkor háromszög vagy négyszög lehet, háromdimenziós probléma esetén pedig tetraéder vagy hexaéder alakú elemekre bonthatjuk fel a geometriát. Egy háromszögelemnek három csomópontja és három éle, míg egy négyszögelemnek négy csomópontja és négy éle van, ahogy az 6. ábrán is látható.



6. ábra: Végeselemek lehetséges alakjai [6]

Háromdimenziós elemek esetében a tetraédernek négy csomópontja és hat éle, a hexaédernek pedig nyolc csomópontja és tizenkét éle van. A végeselem-módszer megvalósításától függően lehetőségünk van az ismeretlen potenciálokat az elemek csomópontjaiban illetve élein keresni. A véges-elem háló készítésénél figyelembe kell venni, hogy a teljes tartományt le kell fedni, nem lehet lyuk a rácselemek között és nem lehet átfedés sem [1,3,7,8].

A következő lépés a probléma megoldása. Ennek alapjául a vizsgált fizikai jelenségeket jellemző potenciálformalizmusok gyenge alakja szükséges, amik a Maxwell-

egyenletekből vezethetők le matematikai átalakításokon keresztül. Ezt követi az asszemblálás, mely során az elemenkénti egyenleteket a végeselemes rácson keresztül összegezzük. Ennek eredményeként létrejön a teljes egyenletrendszer, aminek a megoldásával meghatározatók az ismeretlen potenciálokat közelítő függvények együtthatói. Amennyiben a megoldandó egyenletrendszer nemlineáris, iterációt is kell alkalmazni a megoldás során. Az egyenletrendszer létrehozása után az egyenlet megoldása következik, amelyet több, az irodalomból ismert algoritmussal is elvégezhetünk [1,3,7,8]. Az egyenletek megoldását az előre definiált megoldó algoritmus elemenként végzi el, majd ezek szuperpozíciójaként előállnak a keresett potenciálok közelítő értékei.

A számítás elvégzése után következik az utófeldolgozás vagy más néven posztprocesszálas, mely során vizualizálhatjuk a kapott eredményeket, kiszámíthatjuk a szükséges fizikai mennyiségeket, illetve az elektromágneses térjellemzőket. A posztprocesszálas során lehetőségünk van változtatni a geometrián, az anyagjellemzőkön vagy finomíthatunk a rácson a pontosabb eredmény elérése érdekében [1,3,7,8].

### 3.2 A Maxwell-egyenletek

A Maxwell-egyenletek az elektrodinamika alapegyenletei [1,2,4]. Olyan parciális differenciálegyenlet-rendszert alkotnak, amelynek segítségével minden elektromágneses jelenség leírható. Kétféle formában adható meg, melyek közül az integrális alak az ismertebb:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_A \left( \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{A}, \quad (1.1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_A \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{A}, \quad (1.2)$$

$$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0, \quad (1.3)$$

$$\oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \rho dV. \quad (1.4)$$

A másik forma a differenciális alak:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1.5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1.7)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho. \quad (1.8)$$

Az első Maxwell-egyenletet (1.1), (1.5) Ampere-törvénynek is szokás nevezni, mely szerint a  $\mathbf{J}$  áramsűrűség és a  $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  eltolási áram  $\mathbf{H}$  mágneses térerősséget hoz létre. A törvény kimondja, hogy a mágneses térerősség vektorok zárt  $l$  görbén számított vonalmenti integrálja egyenlő az  $l$  görbe által határolt  $A$  felületet átdöfő áramsűrűségek felületi integráljával [1,3,4].

A második egyenletet Faraday-törvénynek nevezzük (1.2), (1.3), amely leírja, hogy az időben változó mágneses tér, elektromos teret hoz létre. Az integrális alak megmutatja, hogy az elektromos térerősség vektorok  $l$  zárt görbén számolt vonalmenti integrálja egyenlő az  $l$  görbe által határolt  $A$  felületen vett mágneses indukció időbeli változásának felületi integráljával.

A harmadik (1.3), (1.4) Maxwell-egyenletet mágneses Gauss-törvénynek is nevezik. Ez kimondja, hogy a mágneses fluxusvonalak önmagukban záródnak, tehát a mágneses tér forrásmentes.

A negyedik egyenlet más néven az elektrosztatika Gauss-törvénye kimondja, hogy az elektromos tér forrása a töltés. Az integrális alak azt fejezi ki, hogy az elektromos fluxussűrűség  $A$  zárt felületen vett integrálja egyenlő a töltéssűrűség  $V$  térben vett térfogati integráljával.

Ötödik Maxwell-egyenletnek szokták nevezni a konstitúciós relációkat. Ezek tulajdonképpen az anyagok jellemzőit határozzák meg például a következő formában.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad (1.9)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}, \quad (1.10)$$

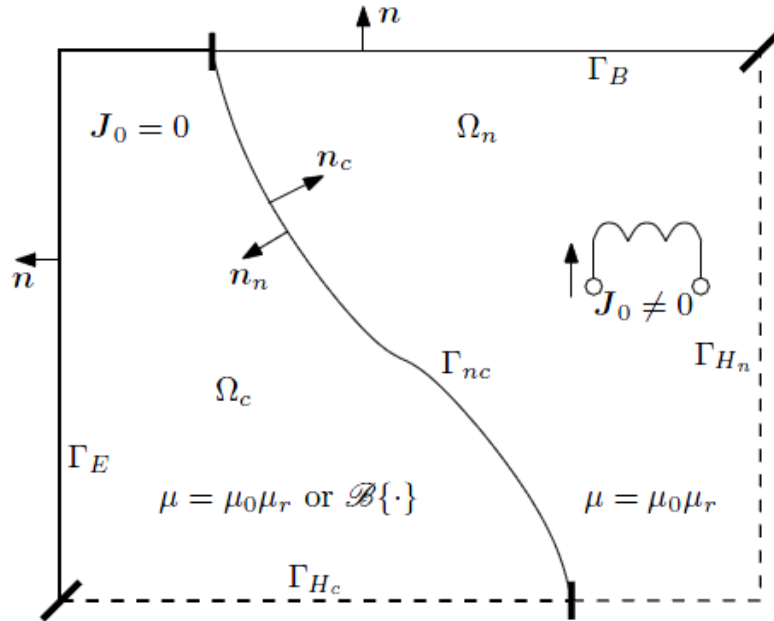
$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_k). \quad (1.11)$$

Az  $\mathbf{E}_k$  külső elektromos mező,  $\mu_0$  a vákuum permeabilitása,  $\varepsilon_0$  a vákuum permittivitása,  $\varepsilon_r$  az anyag relatív permittivitása és a  $\sigma$  az anyag elektromos vezetése.

### 3.3 Maxwell-egyenletek osztályozása

Az elektrodinamikát a Maxwell-egyenletek alapján több fejezetre oszthatjuk fel. Ezek az elektrosztatika és magnetosztatika, a stacionárius áramok tana, a majdnem stacionárius vagy kvázistacionárius áramok tana vagy más néven örvényáramú tér és a hullámterjedés [1,2,4]. Az induktív közelítéskapcsoló szimulációjához szükséges számításokhoz az örvény áramú tér és a stacionárius áramok tana témakörök csatolására van szükség, mivel az egyik tartományban ahol közönséges vezető található létre jön örvényáram a másik pedig a

levegővel kitöltött örvényáramtól mentes. A 7. ábrán egy örvényáramú feladat elrendezése látható. Az  $\Omega_n$  az örvényáramtól mentes teret jelenti, vagyis a levegőt, az  $\Omega_c$  pedig a vezető anyagot jelenti.



7. ábra: Örvényáramú feladat elrendezése [1]

Örvényáramú térnél figyelembe kell vennünk az időbeni változást, mert a mágneses és elektromos jelenségek kapcsolatban vannak, tehát  $\frac{\partial}{\partial t} \neq 0$  [1,3,9,10,11,12]. Az időben változó mágneses tér elektromos teret hoz létre, de az eltolási áramot figyelmen kívül hagyhatjuk  $|J| \gg \left| \frac{\partial D}{\partial t} \right|$ . A Maxwell-egyenleteket örvényáramú tér esetén a következőképpen írhatjuk fel:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.14)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}, \quad \text{lineáris mágneses anyagban, } \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.15)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}, \quad \Omega_c \text{ tartományban.} \quad (1.16)$$

Örvényáramú tér esetén már időfüggő a forrás áramsűrűség  $J_0 = J_0(r, t)$ , ami időtől függő mágneses térerősséget és időtől függő mágneses indukciót hoz létre, ami (1.13)

egyenlet szerint elektromos teret hoz létre. Ez okozza az örvényáram áramlását. Ha az (1.12) egyenletnek vesszük a divergenciáját akkor a következő összefüggést kapjuk:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0. \quad (1.17)$$

Ez azt jelenti, hogy a létrejövő áramsűrűség forrásmentes, tehát az örvényáramnak nincs forrása.

Örvényáramtól mentes elektromágneses tér időben állandó, tehát  $\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0$ . Ekkor az időben állandó  $\mathbf{J}_0$  áramsűrűség időben állandó  $\mathbf{H}$  mágneses teret és  $\mathbf{B}$  mágneses fluxust hoz létre. Ebben az esetben a Maxwell-egyenletek a következő formában írhatóak fel:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0, \quad \Omega_n \text{ tartományban}, \quad (1.18)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \Omega_n \text{ tartományban}, \quad (1.19)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad \text{levegőben, } \Omega_n \text{ tartományban}, \quad (1.20)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \text{ vagy } \mathbf{H} = \nu_0 \mathbf{B}, \quad \Omega_n \text{ tartományban}. \quad (1.21)$$

Ezek után olyan potenciálformalizmust lehet használni amiben, párosítjuk az örvényáramú és a stacionárius tér potenciálformalizmusait. Munkám során erre a mértékkel ellátott  $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmust használtam. Az  $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus használatához szükségünk van az  $\mathbf{A}$  mágneses vektorpotenciálra.

### 3.3.1 A mértékkel ellátott A-formalizmus

Mágneses vektorpotenciál definíciója [1,3,9,10,11,12]:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}. \quad (1.22)$$

Az (1.22) egyenlet az (1.23) és az (1.24) azonosságok miatt kielégíti az (1.19) egyenletet.

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{v} \equiv 0, \quad (1.23)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}(r). \quad (1.24)$$

Ha az (1.22) egyenletet behelyettesítjük az (1.18) egyenletbe akkor a következőt kapjuk:

$$\nabla \times (v \nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0, \quad (1.25)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (1.26)$$

Ha a feladat kétdimenziós, akkor a Coulomb-mérték automatikusan teljesül, háromdimenziós esetben viszont elő kell írni az implicit alakját (1.26), ami a teljes tartományra vonatkozik. Ehhez még hozzá kell vennünk a peremfeltételeket, amik az 5. ábrán láthatóak. A  $\Gamma_H$  peremen a mágneses térerősség tangenciális komponensére, a  $\Gamma_B$  peremen pedig a mágneses indukció normális komponensére írunk elő peremfeltételt és a következő egyenletrendszert kapjuk:

$$\nabla \times (v \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla \cdot (v \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0, \quad \Omega \text{ tartományban} \quad (1.27)$$

$$(v \nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n} = \mathbf{K}, \quad \Gamma_H \text{ permen}, \quad (1.28)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \Gamma_H \text{ permen}, \quad (1.29)$$

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \alpha, \quad \Gamma_B \text{ permen}, \quad (1.30)$$

$$v \nabla \cdot \mathbf{A} = 0. \quad \Gamma_B \text{ permen}, \quad (1.31)$$

Az  $\mathbf{A}$ -formalizmus gyenge alakja az (1.27) az (1.28) és az (1.31) egyenleteket összegezve a Galjorkin-módszer és a súlyozott maradék elv alkalmazásával az (1.32) formában kapjuk meg. [5]:

(1.32)

$$\int_{\Omega} [(\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (v_0 \nabla \times \mathbf{A}) + v_0 \nabla \cdot \mathbf{W} \nabla \cdot \mathbf{A}] d\Omega = \int_{\Omega} \mathbf{W} \cdot \mathbf{J}_0 d\Omega + \int_{\Gamma_H} \mathbf{W} \cdot \mathbf{K} d\Gamma.$$

### 3.3.2 A mértékkel ellátott $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus

Az  $\mathbf{A}$  mágneses vektorpotenciált az örvényáramú és az örvényáram mentes részben is használjuk [1,3,9,10,11,12]. Ezért a mágneses vektorpotenciálnak folytonosnak kell lennie a  $\Gamma_{nc}$  peremen, az örvényáramú és örvényáram mentes rész között (5. ábra). Ha mágneses vektorpotenciál tangenciális komponense folytonos, akkor a mágneses indukció normális komponense is folytonos lesz. Ahhoz hogy a mágneses vektorpotenciál tangenciális komponense folytonos legyen, elő kell írni egy határfelületet  $\Gamma_{nc}$ -re. Szintén elő kell írni a Coulomb mértéket (1.26) ha a probléma háromdimenziós.

Ezek után a következő egyenletrendszer írható fel:

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = 0, \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.33)$$

$$-\nabla \cdot \left( \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V \right) = 0, \Omega_c \text{ tartományban,} \quad (1.34)$$

$$\nabla \times (\nu \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla(\nu \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0, \Omega_c \text{ tartományban.} \quad (1.35)$$

Szintén meg kell határoznunk a peremfeltételeket. A  $\Gamma_B$  peremfeltétel a feladatot körbefogó külső részt jelenti, a  $\Gamma_{nc}$  pedig a határ a stacionárius és az örvényáramú rész között. A peremfeltételek a következők:

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \alpha, \Gamma_B \text{ peremen,} \quad (1.36)$$

$$\nu \nabla \cdot \mathbf{A} = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.37)$$

$$(\nu \nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n}_c + (\nu \nabla \times \mathbf{A}) \times \mathbf{n}_n = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.38)$$

$$\mathbf{n}_c \times \mathbf{A} + \mathbf{n}_n \times \mathbf{A} = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.39)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_c + \mathbf{A} \cdot \mathbf{n}_n = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.40)$$

$$\nu \nabla \cdot \mathbf{A} \mathbf{n}_c + \nu \nabla \cdot \mathbf{A} \mathbf{n}_n = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen,} \quad (1.42)$$

$$-\left( \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V \right) \cdot \mathbf{n} = 0, \Gamma_{nc} \text{ peremen.} \quad (1.43)$$

Végül a következő egyenletrendszert kapjuk, amely az  $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus gyengealakja:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_c} [\nu (\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) + \nu \nabla \cdot \mathbf{W} \nabla \cdot \mathbf{A}] \cdot d\Omega + \int_{\Omega_c} \mathbf{W} \cdot \left( \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \frac{\partial v}{\partial t} \right) d\Omega + \\ \int_{\Omega_n} [\nu (\nabla \times \mathbf{W}) \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) + \nu \nabla \cdot \mathbf{W} \nabla \cdot \mathbf{A}] \cdot d\Omega = \int_{\Omega_n} \mathbf{W} \cdot \mathbf{J}_0 + \int_{\Gamma_{H_n}} \mathbf{W} \cdot \mathbf{K} d\Gamma, \end{aligned} \quad (1.44)$$

$$\int_{\Omega_c} \nabla \mathbf{N} \cdot \left( \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \frac{\partial v}{\partial t} \right) d\Omega = 0. \quad (1.45)$$

## 4. FINITE ELEMENT METHOD MAGNETICS

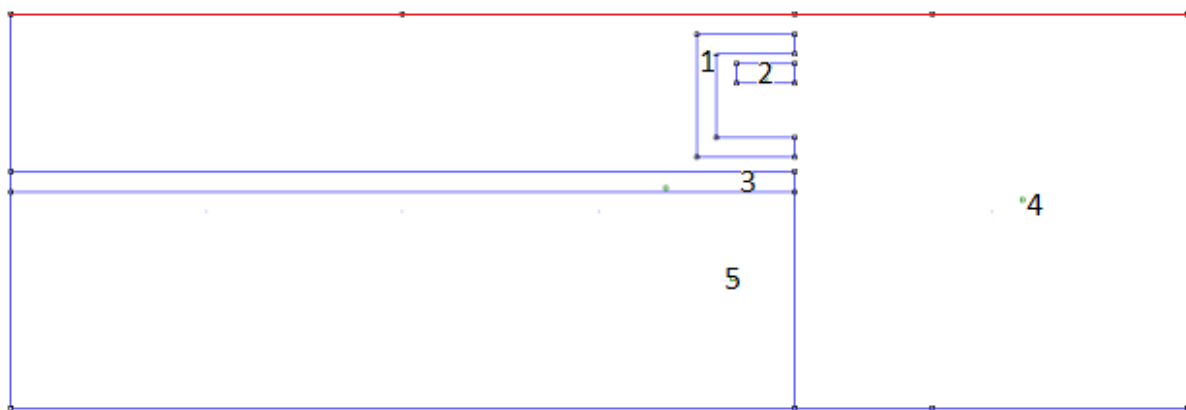
A FEMM egy ingyenesen elérhető, kétdimenziós végeselemes szimulációra képes szoftvercsomag, amelyet elektromágneses térszámítási feladatokra használhatunk [14]. A szoftvercsomag felhasználhatósága nagyon széleskörű. Attól függően, hogy milyen témakörbe tartozik a probléma, négy választási lehetőség van. Ez első a *Magnetics Problem*, mely használata során magnetosztatikai számításokat végezhetünk, a második az *Electrostatic Problem* mikor elektrosztatika témakörbe tartozó feladatokat oldhatunk meg, a másik kettő pedig a *Heat Flow Problem*, mely során hőterjedési számítások végezhetőek illetve a *Current Flow Problem*, ami stacionárius áram problémakörével foglalkozik. Az összes modul egy közös CAD felülettel rendelkezik, és az alapbeállítási lehetőségek is nagyon hasonlóak, viszont az egyes modulok különböznek a problémát leíró háttéregyenletekben, illetve a szimulációhoz szükséges legfőbb beállítások is problémaszpecifikusak, mint például a rácsozási beállítások, a peremfeltételek, gerjesztések stb. Sok olyan beállítást alkalmazhatunk, ami kényelmesebbé teheti a szoftver alkalmazását. Szimmetrikus probléma esetén egyszerűsíthetjük a modellt így könnyebben kezelhető és a számítás is egyszerűbbé válik. Lehetőségünk van a számítási eredményeinket többféleképpen ábrázolni, több számítási eredmény összehasonlítani, illetve a végeredményeinket kép vagy text file formába importálni. Megfelelő ismeretek mellett a FEMM szoftvercsomag egy jól használható környezetet biztosít a szimulációink elvégzésére.

A munkám során a *Magnetics Problem* modult használtam, mivel ez alkalmas örvényáramú tér és stacionárius mágneses tér számítása. A következő fejezetben ismertetem az elvégzett számításaimhoz szükséges modellt és beállításokat.

### 4.1 Induktív közelítéskapcsoló szimulációja FEMM környezetben

Ahogy már a második fejezetben kifejtettem, egy végeselemes szimuláció első lépése mindig a modell specifikációja, ami egy CAD környezetben történik. FEMM környezetben ez többféle módon is megtehetjük [19]. Lehetőségünk van a geometriát másféle CAD szoftverből beimportálni .dxf formátum használatával, berajzolhatjuk egér segítségével a geometriai elemeket, de a pontosabb modell elkészítésének érdekében érdemes az erre alkalmas konzol felületet használni, vagy a modellt a forrásfájlban meghatározni. Következő lépés az anyagjellemzők meghatározása előre definiált adatokból, vagy saját magunk is megszabhatjuk az anyagjellemzőket. Ehhez meg kell adnunk az anyag tulajdonságait, mint

például az elektromos permittivitást, a mágneses permeabilitást, vagy az elektromos vezetést. Meghatározhatunk továbbá tekercset, állandó mágnezt, potenciálértéket, vagy gerjesztést. Fontos megjegyezni, hogy nem csak a vizsgálandó eszközt kell realizálni, hanem az eszközt körülvevő illetve kitöltő levegőt is definiálni kell. Mivel a probléma kétdimenziós és forgásszimmetrikus, ezért egyszerűsíthető a modell, úgy hogy a háromdimenziós modell keresztmetszetének a felét határozzuk meg és egy szimmetriatengelyt definiálunk megfelelő peremfeltétel beállításokkal, illetve a megfelelő ablakban be kell állítanunk, hogy szimmetrikus típusú a probléma. Az 8. ábrán látható az induktív közelítéskapcsoló egyszerűsített CAD modellje FEMM környezetben.

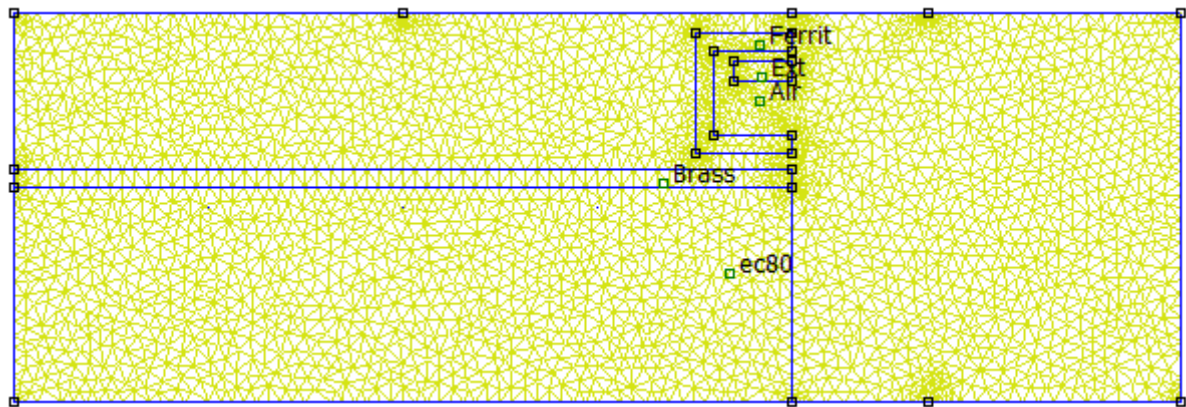


1: Vasmag, 2: Tekercs, 3: Sárgaréz ház, 4: Levegő, 5: Szerkezeti acél környezet

### 8. Ábra: Induktív közelítéskapcsoló CAD modellje

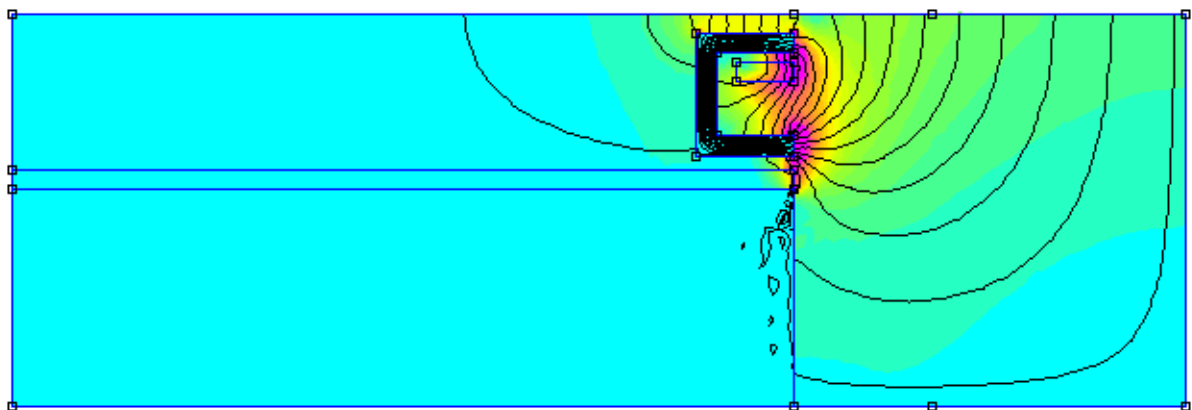
A geometria elkészítése után meg kell határozni a peremfeltételeket a `boundaries` menüben, majd hozzá kell rendelni a megfelelő peremhez. Az általam vizsgált probléma esetében az 5. ábrán pirossal jelölt peremen kívül minden peremre az úgy nevezett elektromos peremfeltételt kell beállítani. Ez azt jelenti, hogy a perem egy tökéletes elektromos vezető, vagyis az elektromos tér tangenciális komponense, illetve, a mágneses fluxus normál komponense nullával egyenlő. Az összes magnetosztatikus és örvényáramú probléma esetében az elektromos peremfeltétel az ajánlott beállítás. A felső perem jelöli a szimmetriatengelyt, amire az úgynevezett Neumann-peremfeltételt kell előírni.

Meg kell még határoznunk az vizsgált frekvenciatartományt, ami a bemutatott probléma esetében 100 kHz. Ezek után következik a rácsgenerálás. Szimulációim során háromszög rácselemeket használtam és 3652 elemmel dolgoztam. A 9. ábrán a szenzor végeelem rácsa látható.



9. ábra: Induktív közelítéskapcsoló végeslem ráccsal

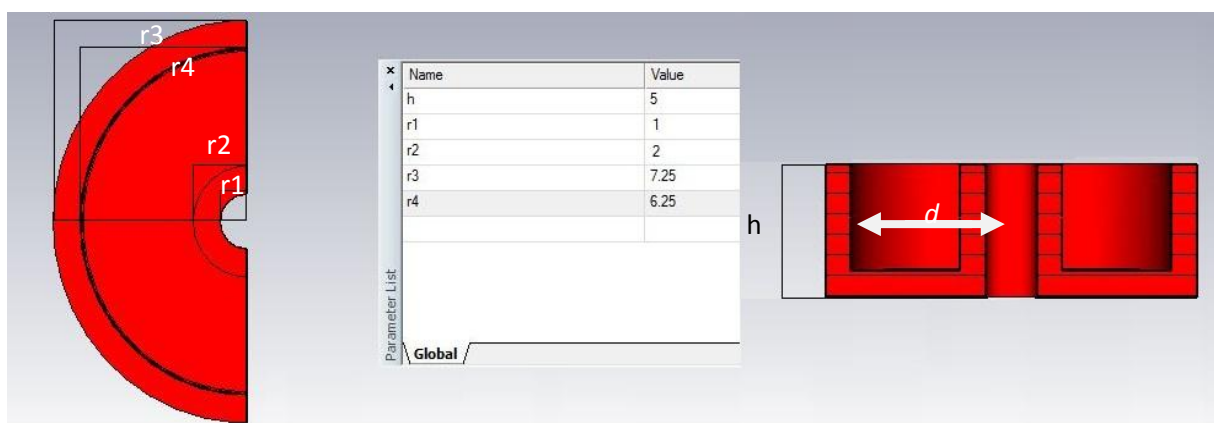
Következő lépés a feladat megoldása. A számításhoz a 3.3.2-es fejezetben ismertetett mértékkel ellátott  $\mathbf{A}, \mathbf{V} - \mathbf{A}$ -formalizmus gyenge alakját használja a szoftver, majd elvégzi az asszemblálást és megoldja a teljes egyenletrendszert. Az egyenletrendszer kiszámítása után következik a posztprocesszáls, mely során az előre meghatározott mennyiségeket jeleníti meg. Lehetőség van úgy nevezett monitorokat kijelölni pontokban, görbék mentén, egy síkon vagy a térben és ezek mentén a szoftver vizualizálja azt az értéket, ami számunkra szükséges. A 10. ábrán például a szenzor által gerjesztett mágneses tér, illetve a mágneses vektorpotenciál látható.



10. ábra: Induktív közelítéskapcsoló által létrehozott mágneses tér, illetve vektorpotenciál

## 5. AZ INDUKTÍV KÖZELÍTÉSKAPCSOLÓ MÁGNESES TERÉNEK VIZSGÁLATA

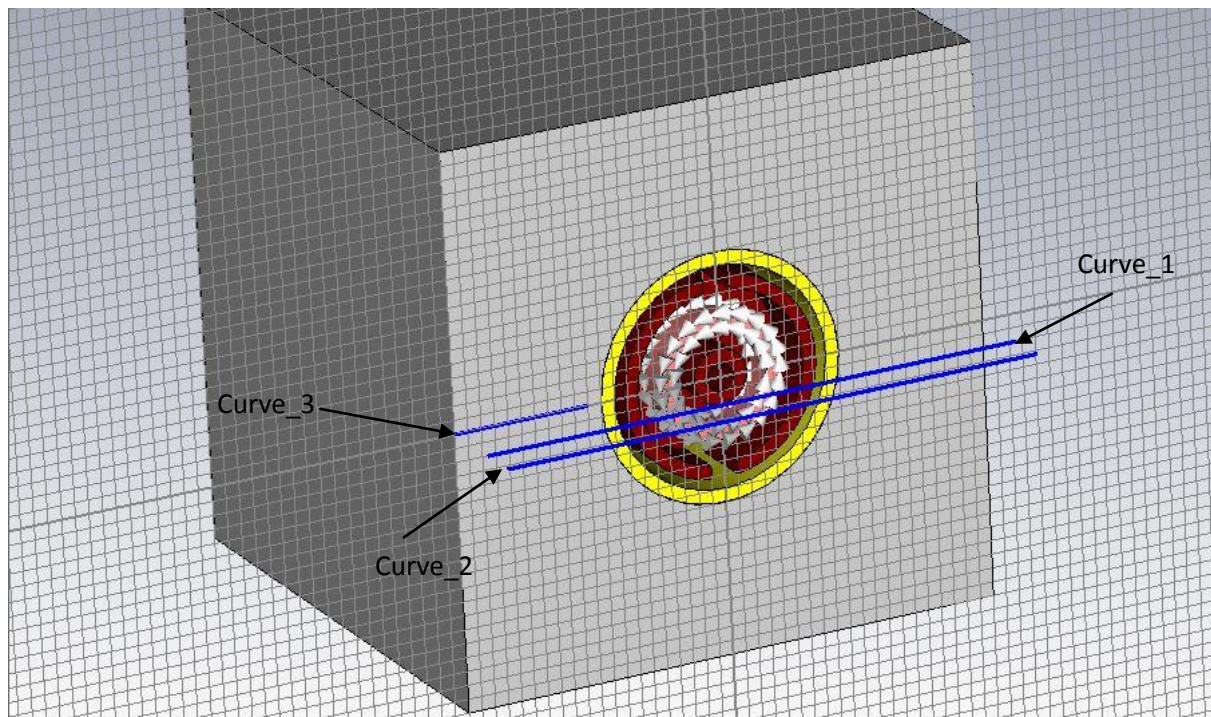
A szenzor érzékelési irányába és az azt körülvevő anyagban kialakuló mágneses tér alapján lehet következtetni a kapcsolási távolságra és a beépíthetőségre, de fontos megjegyezni, hogy nincs egyenes arányosság. A szenzor kapcsolási távolságát és beépíthetőségét a FEMM környezetben úgy vizsgáltam, hogy a vasmag geometriai paramétereinek változtatásával előidézett mágneses tér változást figyeltem a szenzor érzékelési zónájában és a szenzort körülvevő beépítő anyagban. A cél az, hogy egy új vasmag geometriával a gyárhoz képest nagyobb térerősség jöjjön létre az érzékelési irányban és minél kisebb a szenzor környezetében. A beépíthetőség esetében azért fontos a beépítő anyagban létrejövő mágneses tér minimalizálása, mert a szenzor az ott elhelyezkedő vezetőben is örvényáramot hoz létre, amely ugyanolyan módon hat vissza a mérést végző rezgőkörre, mint ahogyan a céltárgy is teszi. Így a céltárgy által létrehozott perturbációt módosítja a beépítő anyagban létrejövő örvényáram mágneses tere is, ennek köszönhetően a céltárgy pozíciójának meghatározása pontatlan lesz. A 11. ábrán láthatóak az érzékelő vasmagjának gyári paraméterei illetve CAD modellje. A FEMM szoftver segítségével elvégzett szimulációk kétdimenziósak, azonban valóságban a vasmag háromdimenziós, így a módosításokat háromdimenziós ábrákon is szemléltetem.



11. ábra: A vasmag gyári paraméterei

A szimulációk során 3 görbét határoztam meg a mágneses térerősség vizsgálatához. A fő érzékelési irányba 6 illetve 8 milliméterre található a vasmagtól a Curve\_1 és a Curve\_2 illetve a szenzort körülvevő szerkezeti acél környezetben a geometria középpontjától nézve 10 és 20 milliméter között található a Curve\_3. A Curve\_1 és

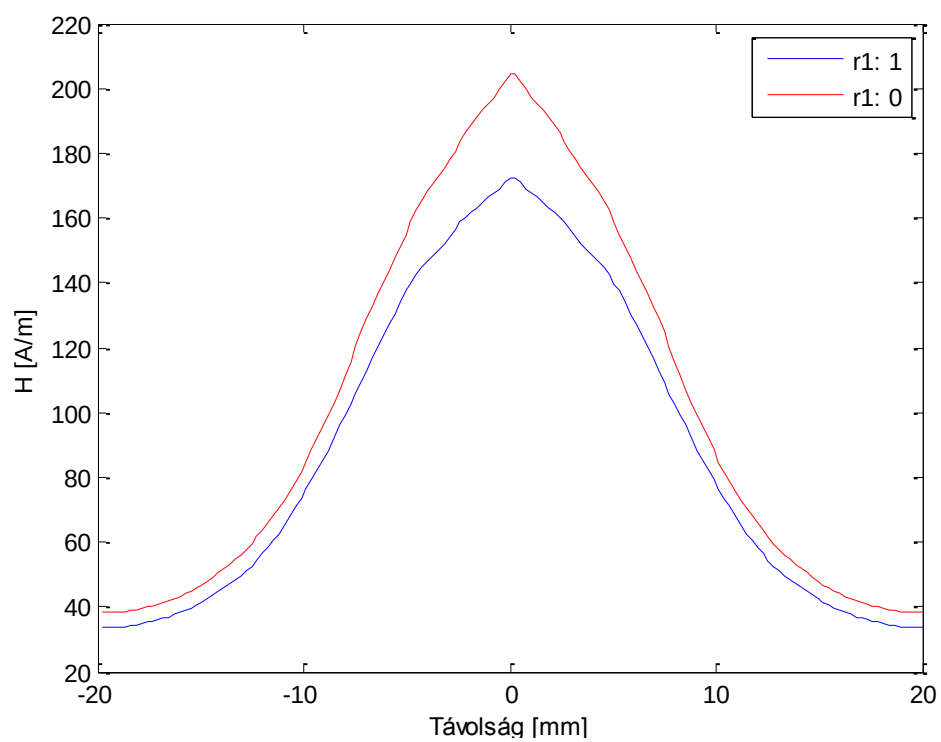
Curve\_2 azért érdekes mert az érzékelő gyári kapcsolási távolsága 7 milliméter, a Curve\_3 pedig a beépíthetőség vizsgálat szempontjából fontos. A görbék a 11. ábrán láthatóak.



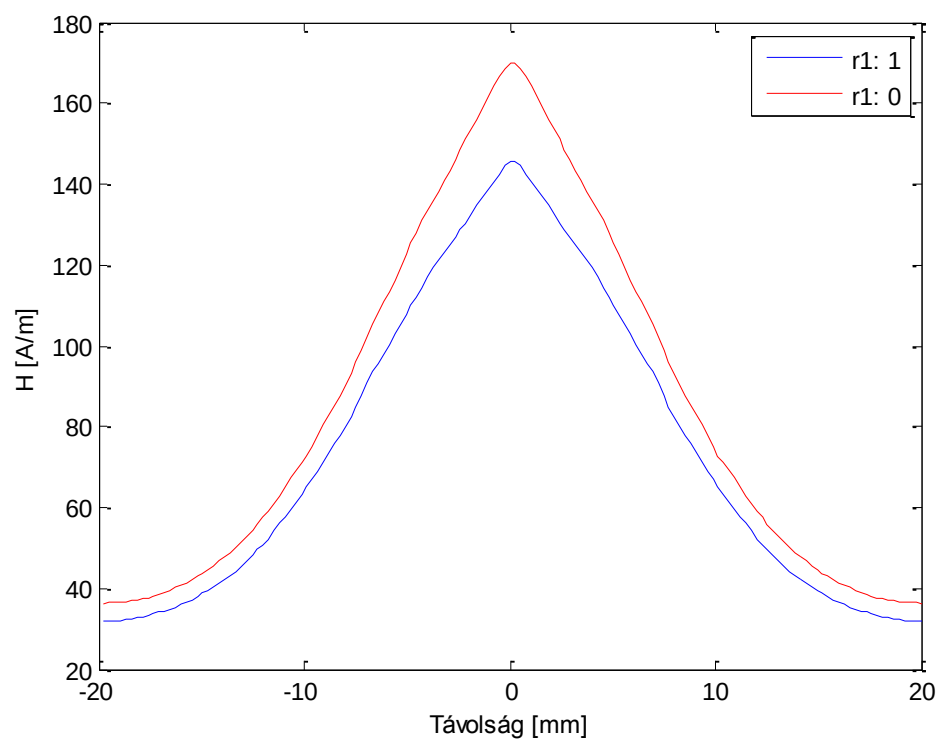
12. ábra: Mágneses tér vizsgálata görbék mentén

Munkám során több számítást is elvégeztem. Ezek közül csak a legfontosabbakat ismertetem dolgozatomban. A szimulációkat oly módon végeztem, hogy egy paramétert változtattam, majd a továbbiakban azt az értéket használtam, amelyik vagy a beépíthetőség, vagy az érzékelési távolság szempontjából optimális. Ez a paraméterenkénti optimalizálás. A beépíthetőséget úgy vizsgáltam, hogy a szenzort szerkezeti acélból készült beépítő környezetbe helyeztem.

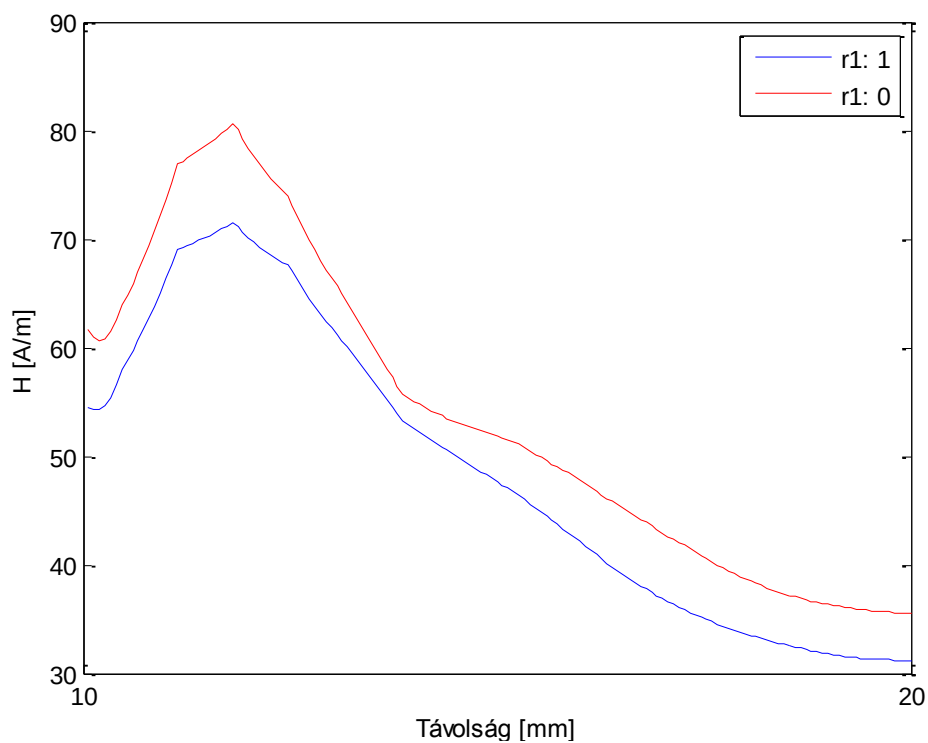
Az első szimuláció során azt vizsgáltam, hogy milyen hatás érhető el, ha a vasmag közepén elhelyezkedő henger közepén található luk méretét változtatjuk, illetve azt eltüntetjük. Az  $r1$ -es paraméter jelenti a hézag sugarát, amit 1 és 0 értékek közt vizsgáltam. Az eredmények a 13. 14. és 15. ábrákon láthatók.



13. ábra: Mágneses térerősség Curve\_1 mentén  $r1$  paraméter változtatása esetén

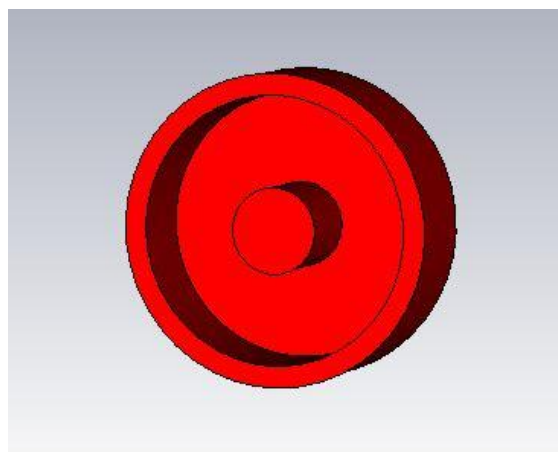


14. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_2 mentén  $r1$  paraméter változtatása esetén



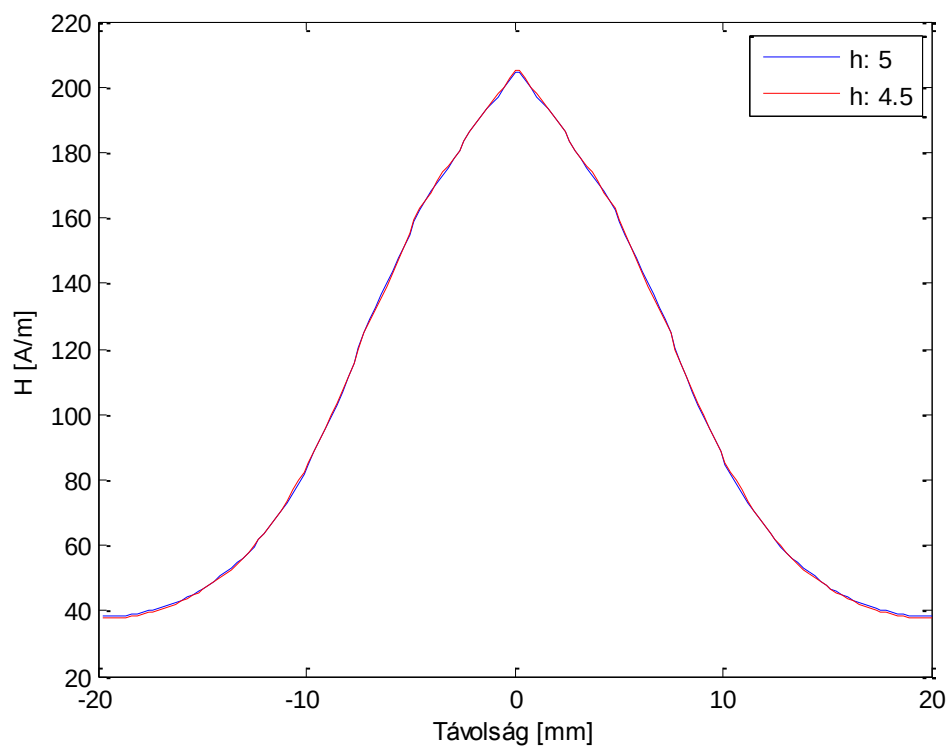
15. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_3 mentén  $r1$  paraméter változtatása esetén

A görbéken látszik, hogy a változtatás hatására nőtt a térerősség mind a szenzor érzékelési irányába mind a környezetében. Azért is jobb ez a geometria az eredetinél, mert így később a belső henger méretének változtatására nagyobb tartományban nyílt lehetőségem. A megváltozott geometria CAD modellje a 16. ábrán látható.

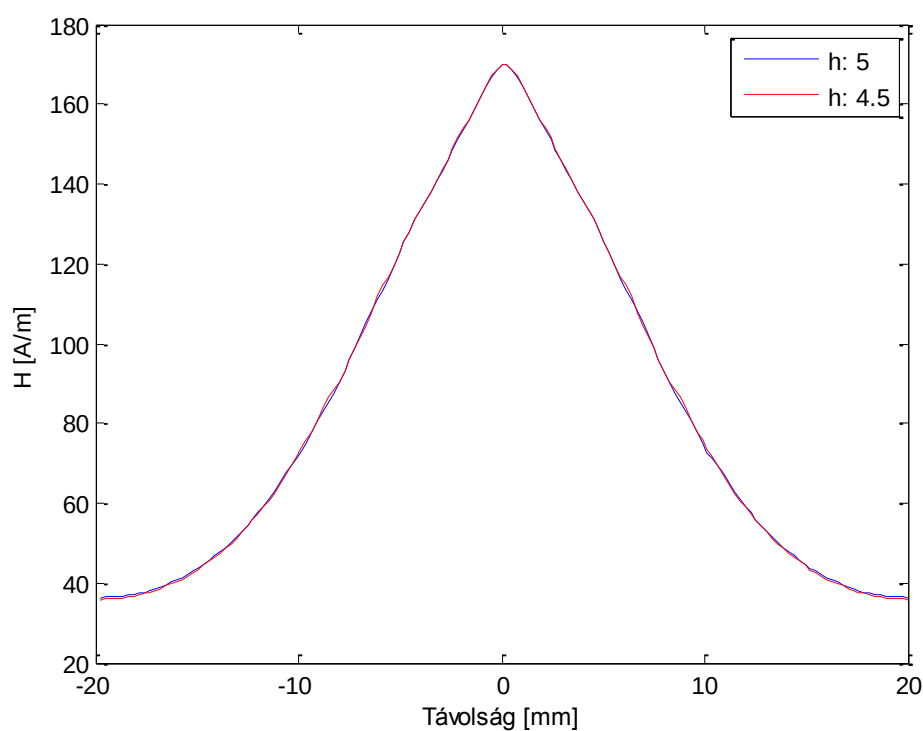


16. ábra: A vasmag geometriája  $r1$  paraméter változtatása után

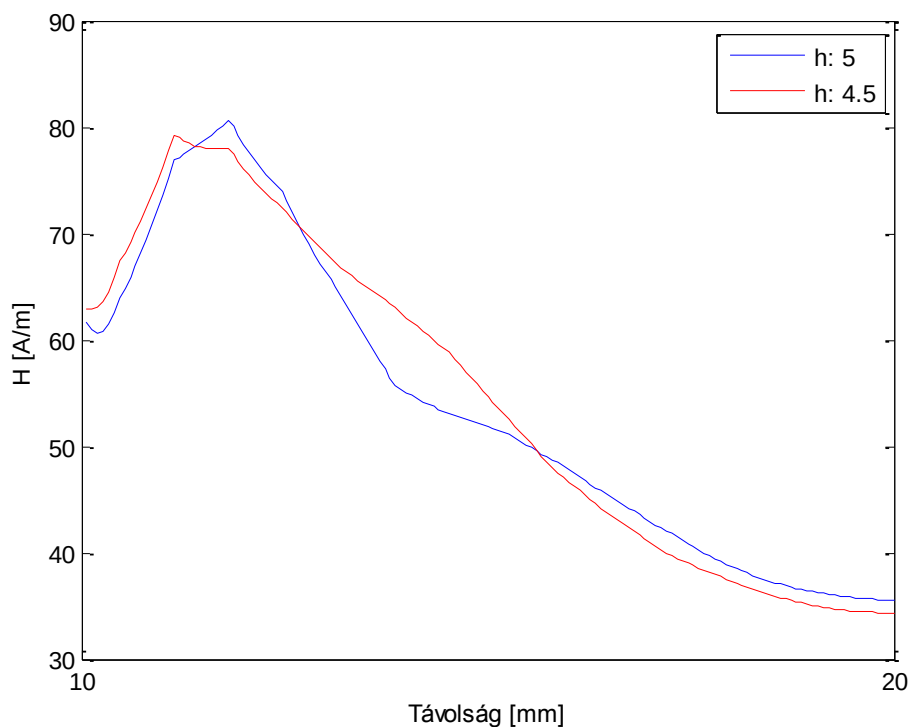
A következő szimulációk során a vasmag magasságát, vagyis a  $h$  paramétert változtattam 5 és 4.5 mm között. Az eredmények a 17. 18. és 19.-es ábrákon láthatóak.



17. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_1 mentén  $h$  paraméter változtatása esetén

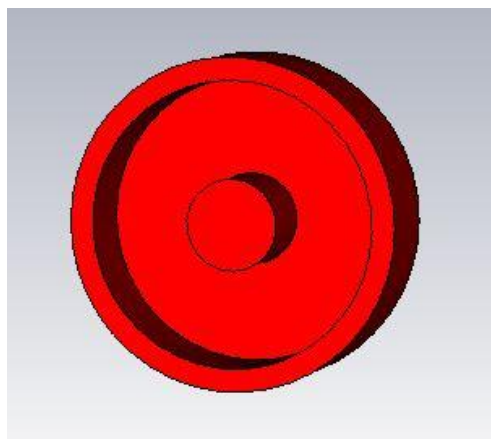


18. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_2 mentén  $h$  paraméter változtatása esetén



19. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_3 mentén  $h$  paraméter változtatása esetén

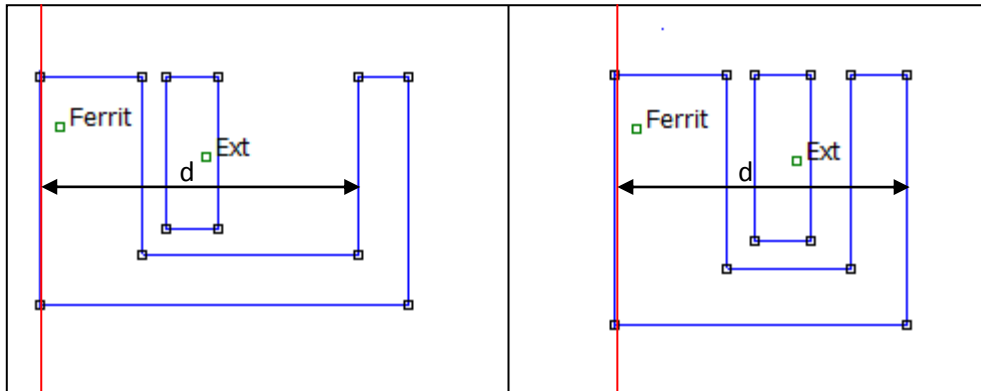
A görbéken látszik, hogy ez a változtatás nem hozott jelentős különbséget. Érdekes a 4.5 milliméteres paramétert választani, hiszen így kisebb méretű a vasmag ezzel több helyt nyerhetünk a nyomtatott áramköri elemnek, illetve a szenzor mérete kisebb lehet. Az így kapott geometria a 20. ábrán látható.



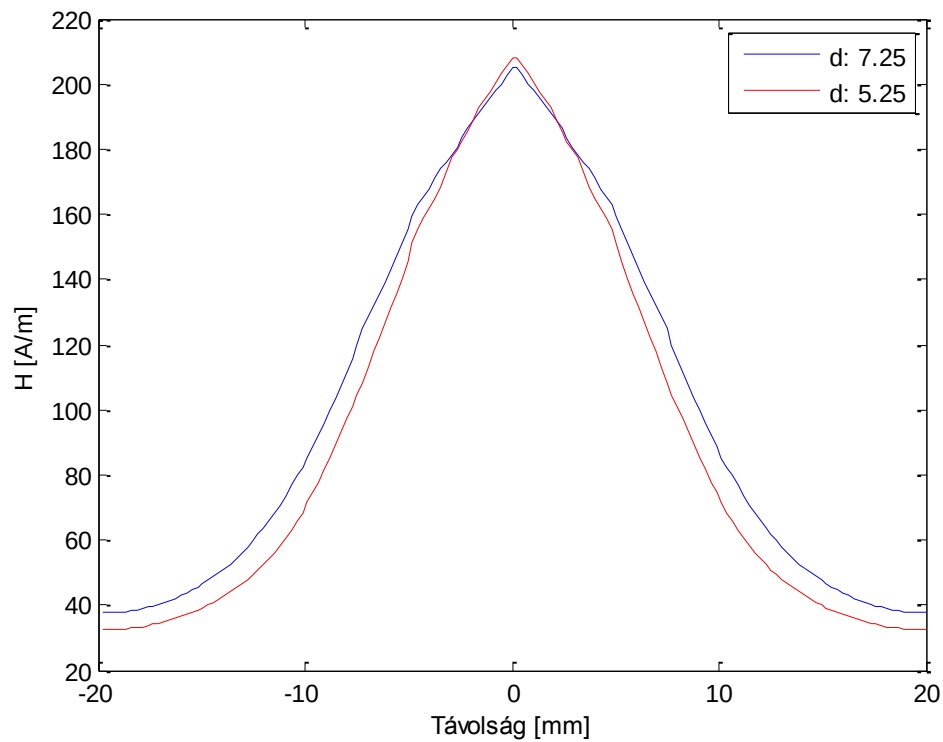
20. ábra: A vasmag geometriája  $h$  paraméter változtatása után

Ezek után a  $d$  paramétert adtam meg változónak, ami azt jelenti, hogy a vasmag teljes sugarát csökkentettem úgy, hogy a középen elhelyezkedő henger sugara változatlan maradjon. A 21. ábrán látható a vasmag keresztmetszetének félbevágott modellje FEMM környezetben,

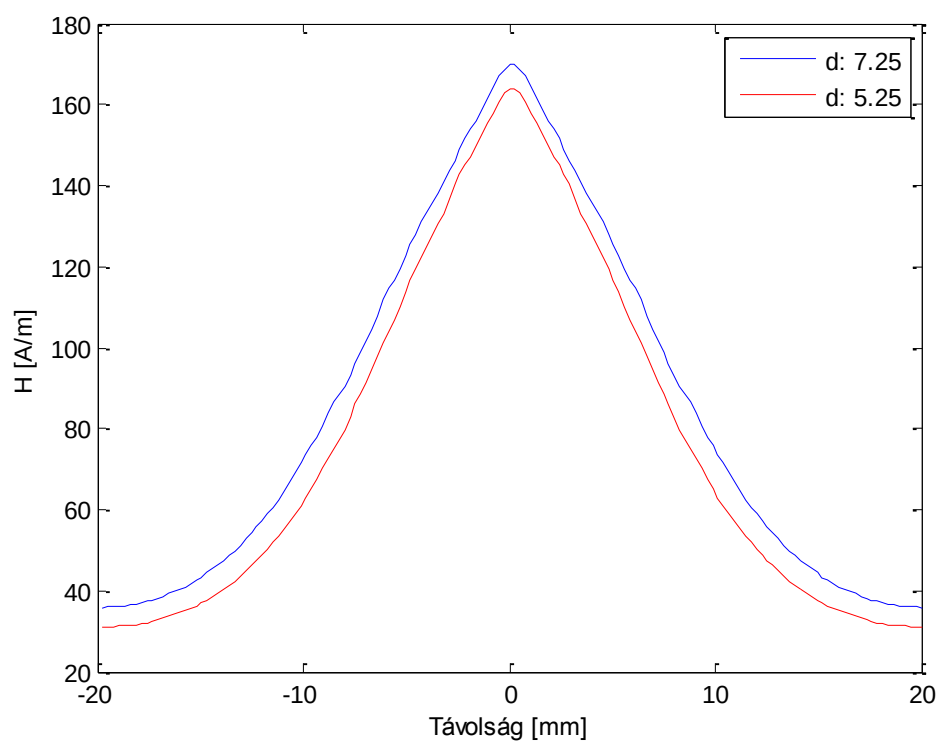
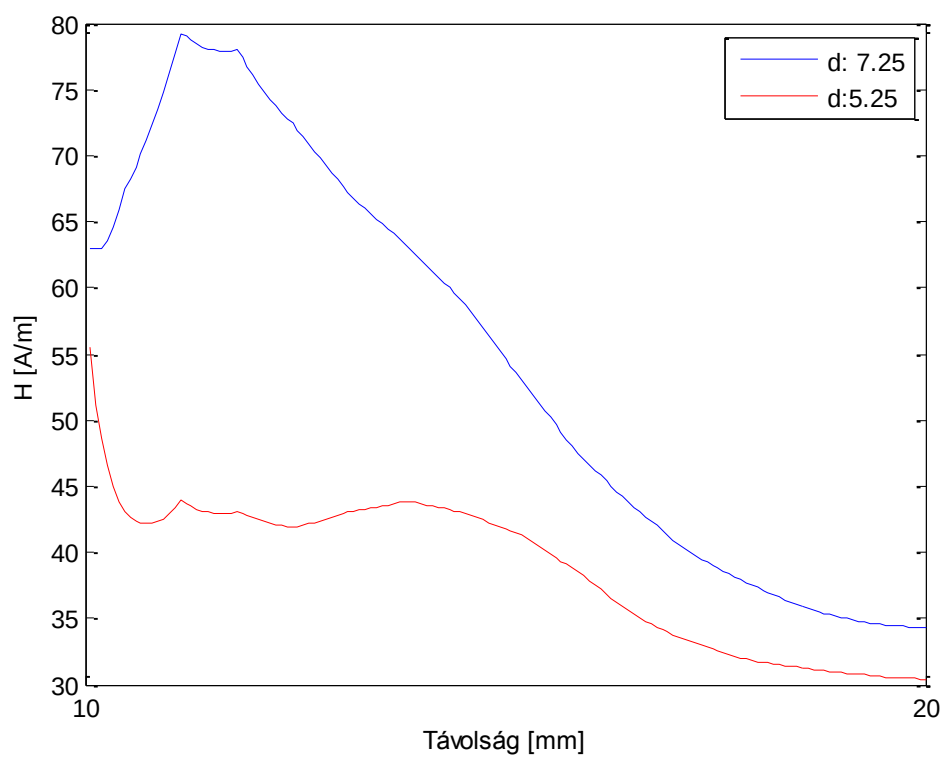
ahol a piros vonal jelöli a szimmetria tengelyt. A vizsgált tartomány 7,25 mm és 5,25 mm volt, melynek az eredményei a 22. 23. illetve 24. ábrákon láthatóak.



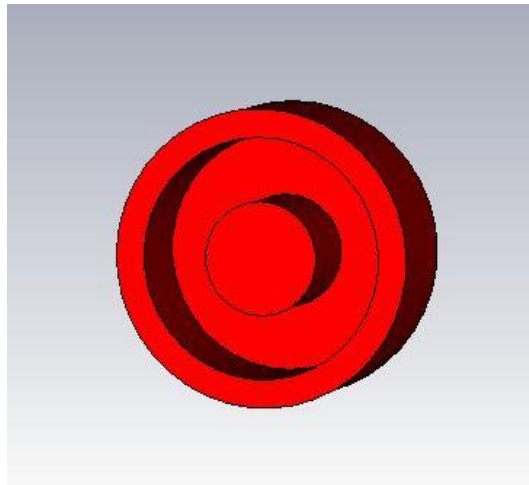
21. ábra: Geometria  $d=7.25$  mm és  $d=5.25$  mm esetén



22. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_1 mentén  $d$  paraméter változtatása esetén

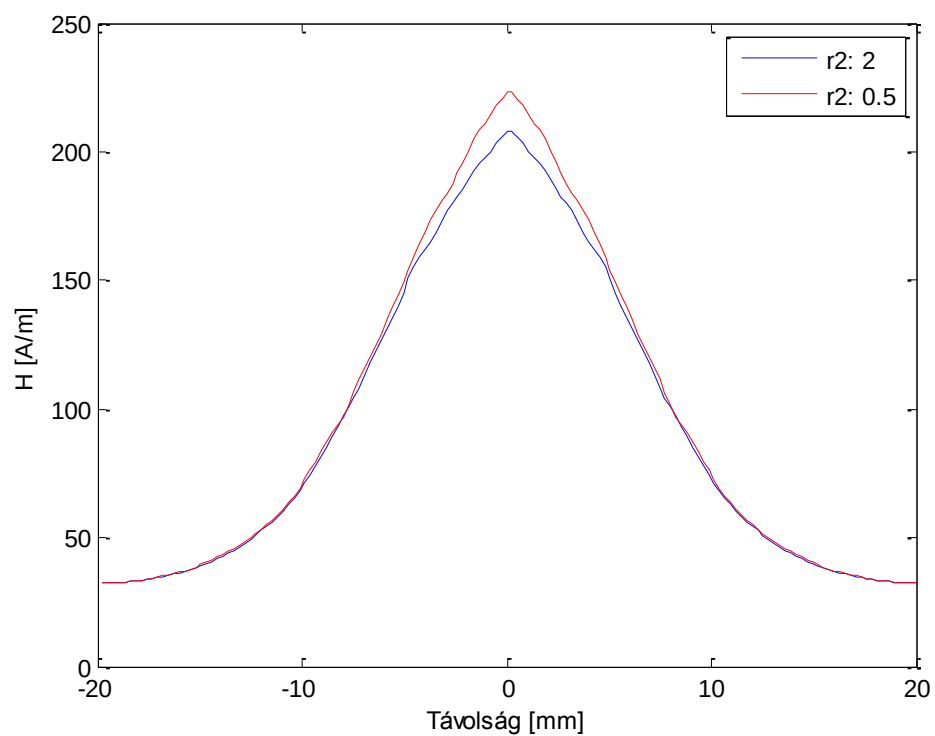
23. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_2 mentén  $d$  paraméter változtatása esetén24. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_3 mentén  $d$  paraméter változtatása esetén

A 22. és 23. es ábrán kismértékű változás vehető észre, amely néhány százalékos térerősség csökkenést mutat a szenzor érzékelési tartományában. Ez nem elhanyagolható mértékű csökkenés, azonban jóval kisebb nagyságrendű a 24. ábrán látható jelentős térerősség csökkenésnél, amely a beépítő anyagban figyelhető meg. Ez a megfigyelés nagyon fontos fejlődés a beépíthetőség szempontjából, mivel itt a szenzor előtt és a beépítő anyagban létrejövő térerősségek aránya a meghatározó tényező. Ezzel a változtatással a 25. ábrán látható geometriát kaptam.

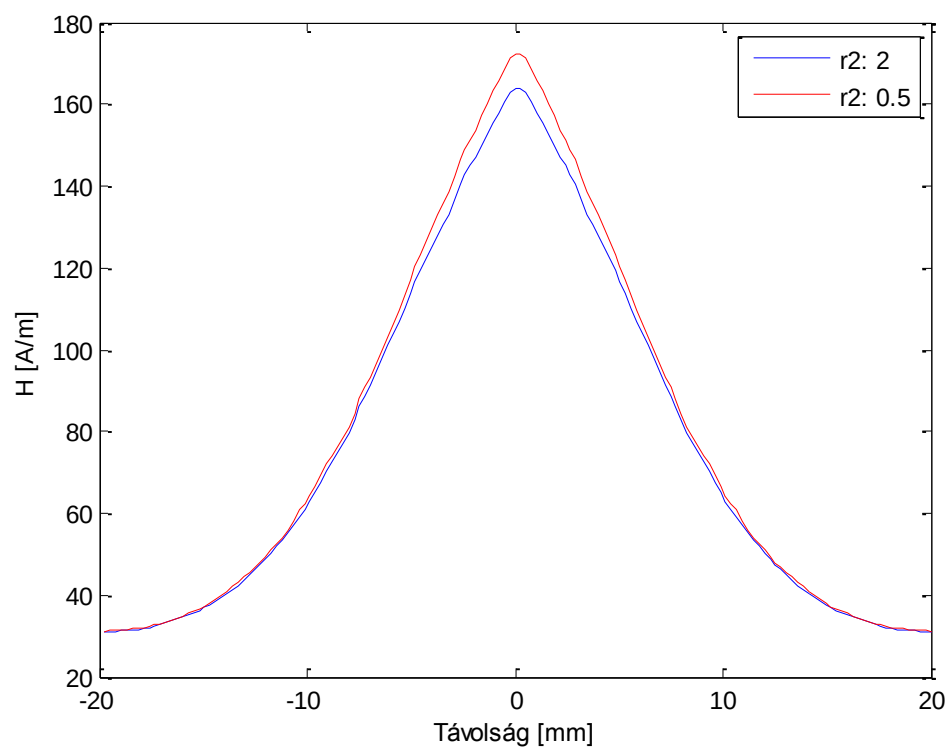


25. ábra: A vasmag geometriája  $d$  paraméter változtatása után

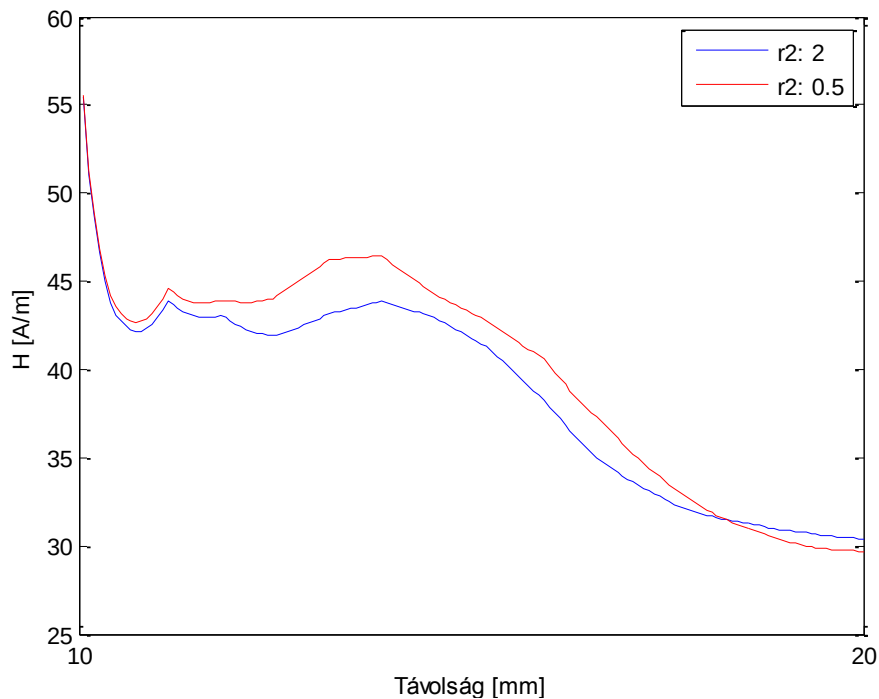
Következő szimulációk során a vasmag közepén elhelyezkedő henger sugarát változtattam, vagyis az  $r_2$  paramétert 2 milliméter és 0.5 milliméter közötti tartományban. A szimuláció eredményei a 26. 27. és 28. ábrákon láthatóak.



26. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_1 mentén  $r2$  paraméter változtatása esetén

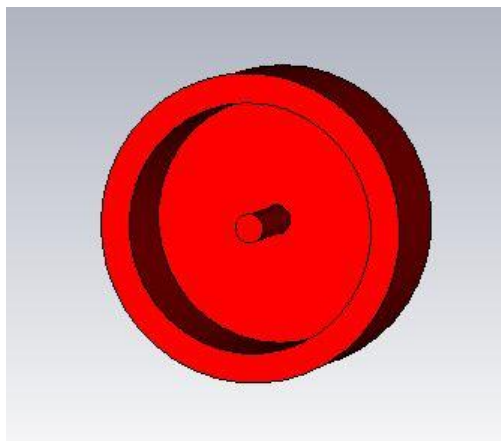


27. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_2 mentén  $r2$  paraméter változtatása esetén



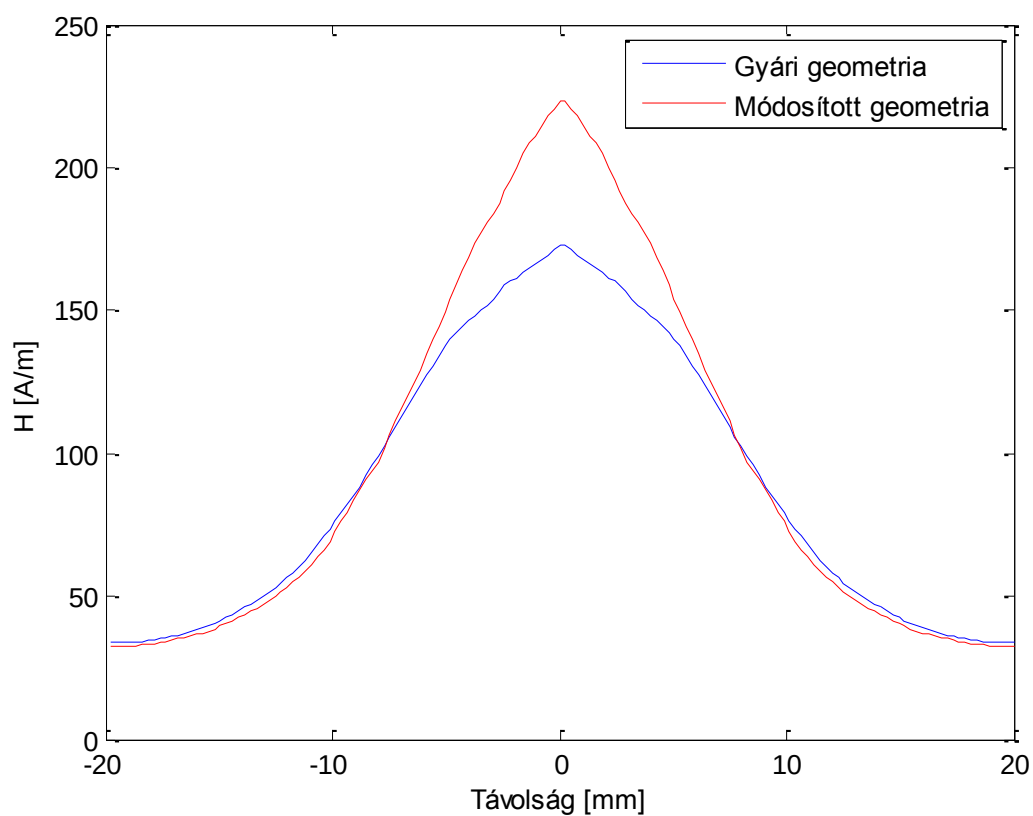
28. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_3 mentén  $r2$  paraméter változtatása esetén

A 26. és 27. ábrán jól látszik, hogy nőtt a térerősség a kapcsolási irányban. Kis mértékben nőtt a térerősség a környezetben is. Ennek ellenére mégis érdemes ezt a paramétert választani, mert a tekercs geometriájának vizsgálata esetén a későbbiekben nagyobb tartományban nyílik lehetőség, úgy hogy nem növeljük a vasmag teljes sugarát. A 29. ábrán látható az így kapott geometria.

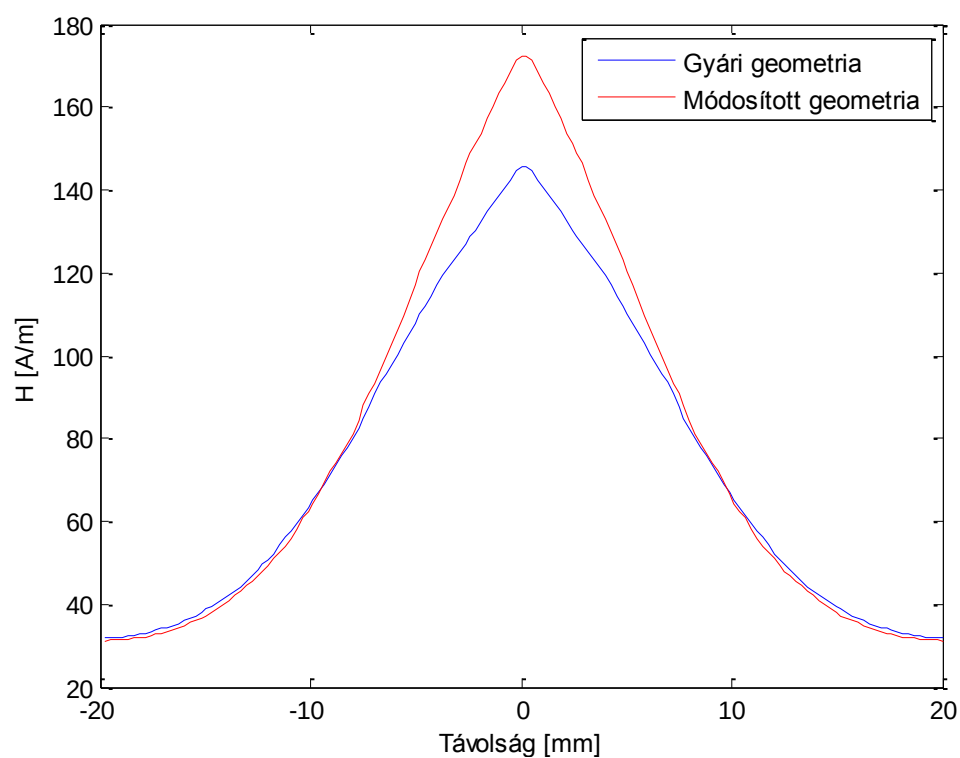


29. ábra: A vasmag geometriája  $r2$  paraméter változtatása után

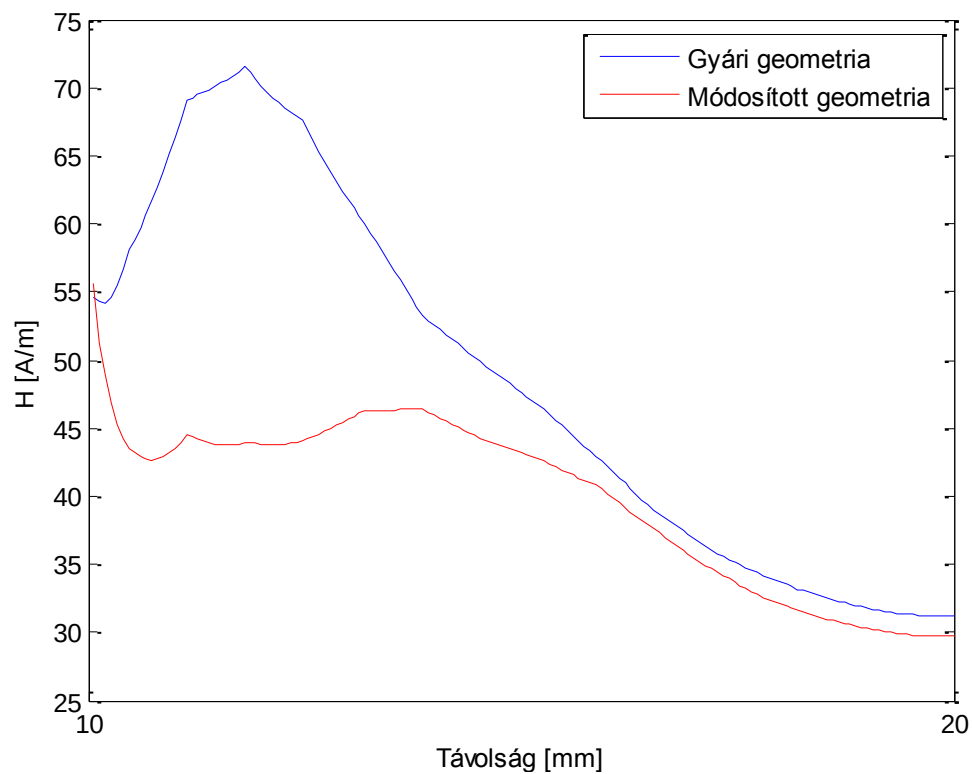
Ezután összehasonlítottam a mágneses térerősséget az eredeti geometria és az általam meghatározott geometria esetén. Ennek az eredménye a 30. 31. illetve 32. ábrán látható.



30. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_1 mentén gyári, illetve módosított geometria esetén



31. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_2 mentén gyári, illetve módosított geometria esetén



32. ábra: Mágneses térerősség a Curve\_3 mentén gyári, illetve módosított geometria esetén

A 30. és 31. ábra alapján elmondható hogy jelentősen nőtt a térerősség a szenzor érzékelési irányában, illetve a 32. ábra alapján nagymértékű csökkenés figyelhető meg a szerkezeti acél környezetben a módosított geometria esetén. Ezen eredmények alapján arra lehet következtetni, hogy a dolgozatban bemutatott a módosításokon alapuló vasmag geometria alkalmazásával növelhető a szenzor kapcsolási távolsága illetve beépíthetősége javítható. A dolgozatom eredményeit felhasználva egy olyan szenzor kerülhet gyártásba, ami ház méretében megegyezik a gyárral, de messzebb lévő testek érzékelésére is képes, ugyanakkor kisebb hatást gyakorol rá a körülötte elhelyezkedő vezető anyag.

## 6. Konklúzió, jövőbeli tervek

Tudományos diákköri munkám során az ipari világ számára nagyon fontos területen végeztem kutatást. Dolgozatomban ismertettem az szenzorpiac egyik legfontosabb termékének tulajdonságait, működési elvét. Bemutattam az eszköz működését leíró fizikai egyenletekből kiindulva a végeelem-módszerrel történő szimulációjához szükséges potenciálformalizmusok gyenge alakját. A számításához egy ipari környezetben is jól használható, ingyenes végeelem szoftvert alkalmaztam. A munkám legfontosabb eredménye, hogy jelentősen megnöveltem az induktív közelítéskapcsoló elsődleges érzékelő eleme által létrehozott mágneses térerősséget a szenzor érzékelési zónájában és csökkentettem azt a beépítő anyagban. Ezeknek a paramétereknek eredményeképpen várhatóan növelhető a szenzor kapcsolási távolsága és a beépíthetősége is javítható. Mint már említettem szükség van a kiindulási szimuláció validálására mérési eredménnyel, ami a következő hetekben elkészül. A szimulációval meghatározott vasmag jelenleg gyártás alatt áll. Miután elkészült mérésekkel szeretném alátámasztani a számítási eredményeket.

Továbbá a jövőben szeretnék a szimulációhoz saját algoritmust készíteni MATLAB illetve C környezetben. Továbbá célom a számítási folyamat felgyorsítása grafikus kártya használatával, amikor a számítást a grafikus kártya központi egysége a GPU veszi át a CPU-tól. Tervezem továbbá a multiGPU megoldás alkalmazását, mely során nem egy, hanem több grafikus kártya között osztjuk meg a számítást, illetve az Element-by-Element módszer használatát [18]. Ezekkel a módszerekkel, nagyságrendekkel csökkenthető a számításához szükséges idő költséghatékony módon, illetve lehetőségünk van sokkal pontosabb szimulációk készítésére.

## 10. Irodalomjegyzék

- [1] M. Kuczmán and A. Iványi. *The Finite Element Method in Magnetism*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2008.
- [2] J. D. Jackson. *Classical Electrodynamics*. J Wiley, New York, 1962.
- [3] Z. Pólik, M. Kuczmán. *Rádiófrekvenciás Induktivitás Véges elem Analízise és Fejlesztési Lehetőségei*. OTDK Dolgozat, 2009.
- [4] I. Standeszky. *Elektrodinamika*. Universitas, Győr, 2006.
- [5] I.N. Bronstejn, *Matematikai Kéziköny*. TypoTex, Budapest, 2002.
- [6] G. Gergő, M. Kuczmán, *Monopol Antenna Elektromos Terének Vizsgálata Numerikus Módszerekkel és Reflexiómentes Kamrában*. OTDK Dolgozat, 2011.
- [7] O. Bíró and K. R. Richter. *CAD in Electromagnetism. in Series Advances in Electronics and Electron Physics, Academic Press, New York, 82, 1991.*
- [8] J. M. Jin. *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley and Sons, New York, 2002.
- [9] D. Marcsa, M. Kuczmán, Two-dimensional modeling of the motion in induction motor with ferromagnetic hysteresis, *Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 55, No. 4, pp. 351-356, 2010.*
- [10] G. Kovács, *Potenciálformalizmusok alkalmazása kvázistacionárius elektromágneses terek szimulációjában*. Széchenyi István Egyetem, M.Sc. Diplomamunka, 2011.
- [11] G. Kovács, M. Kuczmán, Solution of the TEAM workshop problem No.7 by the finite element method, *Przegląd Elektrotechniczny* 87(3) pp. 99-102, 2011.
- [12] G. Kovács, *Potenciálformalizmusok összehasonlítása a T.E.A.M. No.7. problémakiírás kapcsán*. TDK, SZE, 2010.április 21.
- [13] J. Hegedűs, *Kétállapotú, elektronikus közelítéskapcsolók*. Miskolci Egyetem. Elektrotechnikai - Elektronikai Tanszék, 2011.
- [14] M. Kuczmán, *Jelek és rendszerek*. Universitas, Győr, 2006.
- [15] Gy. Bolla, *Szenzorika*. Tanfolyami jegyzet, Festo.
- [16] <http://www.kvalix.hu/termek/erzekelo/induktiv/ias.html>
- [17] <http://www.balluff.hu>
- [18] I Kiss, Sz Gyimóthy, Zs Badics, J Pávó, *Parallel realisation of the element-by-element FEM technique by CUDA*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS 48: (2) pp. 507-510. Paper, 2012.
- [19] <http://www.femm.info/wiki/HomePage>

- 
- [20] M. Jagiella, Fericean, S., Dorneich, A., *"Progress and Recent Realizations of Miniaturized Inductive Proximity Sensors for Automation"*, Sensors Journal, IEEE, On page(s): 1734 - 1741 Volume: 6, Issue: 6, Dec. 2006.
- [21] M. Jagiella, *Miniaturized inductive sensors for industrial applications*, Sensors Journal, IEEE, On page(s): 771 - 778 Volume: 2, Issue: 2, Nov. 2002.