



MISKOLCI EGYETEM
MŰSZAKI ANYAGTUDOMÁNYI KAR
TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
3515 MISKOLC Egyetemváros



Mágneses térrel kevert fémolvadék szabad felszínének vizsgálata numerikus szimulációval

Készítette:

Nagy Csaba

I. éves Anyagmérnök MSc. hallgató

Konzulens:

Dr. Rónaföldi Arnold
egyetemi docens

Dr. Gyulai László
egyetemi adjunktus

Anyagtudományi Intézet
2011

Köszönetnyilvánítás

"A Tudományos diákköri dolgozat a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg"

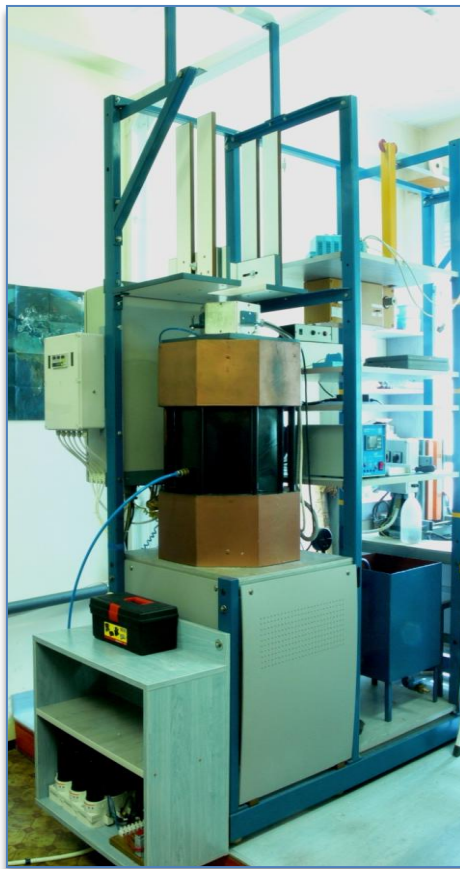
Tartalom

1	Bevezetés	1
2	A modellezni kívánt rendszer leírása	3
2.1	A kristályosító felépítése	3
2.2	A mágneses térben mozgó fémolvadék áramlástan leírása.....	4
2.3	Forgó mágneses térbe helyezett álló és forgó fémolvadéokra ható erő	5
2.4	A kialakuló fordulatszámról	7
3	A numerikus modell tervezése, felépítése.....	9
3.1	A felhasznált szoftvercsomag, a FLUENT	9
3.2	A feladat megközelítése	12
3.3	Geometria, háló, térfogati- és peremfeltételek	12
4	A modell beállításai és eredmények	13
4.1	A megoldás tervezete	13
4.2	Alapvető, a különböző változatokban azonos beállítások	14
4.3	Fordulatszám előírása az olvadéktérfogatban	14
4.4	Az UDF bevezetése	18
4.4.1	Az UDF rövid bemutatása	18
4.4.2	A forráskód előállítás	18
4.4.3	Bővítés a tényleges Lorenz erő egyenletével	21
4.5	A bővített UDF használata	22
4.6	A végső modell.....	23
4.7	A szabad felszínről	24
4.8	Végeredmény.....	25
5	Összefoglalás.....	27
6	Irodalomjegyzék.....	28

1 Bevezetés

Dolgozatom a nyáron indult kutatásomon alapszik, melyet a TÁMOP és a MICAST támogat. Az MTA-ME kutatócsoport egyik csapata keverés közben megszilárdított kristályszerkezetek vizsgálatával foglalkozik. A keverést egy „olvadékmotorral” (1. ábra) végzik. Ez egy újragondolt aszinkron motor melynek mozgó részét fémolvadék képezi. Az induktorba helyezett olvadt fém (a forgó mágneses tér hatására) örvényáram keletkezik, melynek hatására kialakuló Lorentz erő forgásba hozza a fluidum térfogatot.

Dr. Rónaföldi Arnold PhD értekezésében a mágneses tér és a fordulatszám kapcsolatával, valamint a kialakuló olvadékáramlással is foglalkozott. Vizsgálatait gallium színfém és gallium-indium ötvözet olvadékával végezte, mivel ez szobahőmérsékleten olvadék állapotú, s így vizsgálható az olvadék szabad felszíne, fordulatszáma többféle módszerrel.



1. ábra MHD keverővel ellátott kristályosító berendezés

Felkérést kaptam, annak kiderítésére, hogy modellezhető-e az áramlás és a mágneses tér FLUENT programcsomag használatával továbbá, hogy kvalitatíve reprodukáljam az olvadék fordulatszámának felfutását és lehetőleg a forgási parabolaid kialakulását. Az alapul szolgáló disszertáció egy eddig figyelmen kívül hagyott (elhanyagolt) tagot is bevezet a hajtóerő egyenletébe. Ez az olvadék aktuális fordulatszáma.

Szimulációim során ezt a vonalat követem, mivel ez modellezés terén is egy új kihívást jelent az adott témával foglalkozók körében. Világszerte többen foglalkoznak a fémolvadék áramlástan vizsgálatával és szimulációjával. Azonban a legtöbb esetben csak kb. $B = 20 \text{ mT}$ gerjesztési tartományig, az olvadék fordulatszámát elhanyagolva végeznek kísérleteket és szimulációkat. Az általam mintául vett (csapatunk számára még közepesnek sem tekinthető) $B = 57,4 \text{ mT}$ gerjesztéssel valamint az aktuális fordulatszámmal való vizsgálat már új távlatként kezelendő világszinten. Ezen dokumentum segítségével hosszabb távú kutatásom első eredményeit szeretném bemutatni.

Első lépésben a program beépített lehetőségeit vizsgáltam. Ezeket kihasználva az olvadék térfogatában írtam elő a fordulatszámot konstans és időben növekvő értékkel egyaránt.

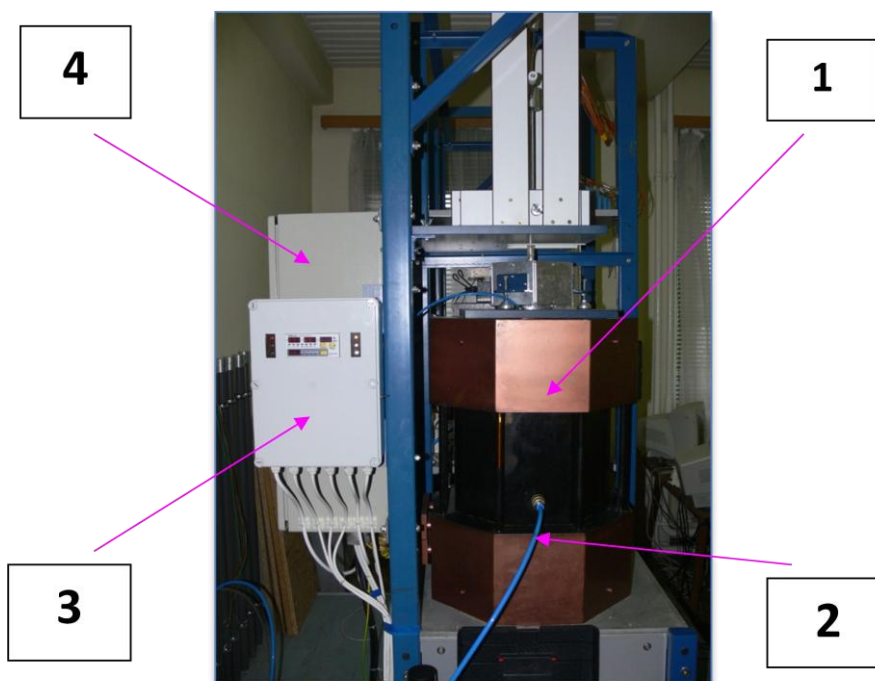
Az eredmények alapján szükségesnek éreztem, hogy saját magam írjam elő a mágneses tér által keltett Lorenz erőt a térben figyelembe véve az említett fluidum mozgását is. Közvetlen, beépített lehetőséget nem nyújt a FLUENT a feladathoz, ezért az UDF (**U**ser **D**efined **F**unction) programrésszel ismerkedtem meg. Itt egy C programnyelven írott forráskóddal megadható az erőhatás egyenlete, melyet minden időpillanatban számol a megoldó. A köztes eredmények alapján további elhanyagolásokra vagy egyszerűsítésekre volt szükség. A Lorenz erő teljes egyenletének használatára nem adódott elegendő futtatási idő, így köztes fix értékben megadott erővel dolgoztam. Eddigi munkám teljes leírását a dolgozatom tartalmazza.

2 A modellezni kívánt rendszer leírása

2.1 A kristályosító felépítése

Munkám alapjául Dr. Rónaföldi Arnold PhD értekezése [1] szolgált, melyben részletesen leírja a gép (2. ábra) felépítését és a működés elméleti hátterét. A berendezés főbb alkotóelemei (az említett értekezés alapján):

- Állványzat
- A kristályosító kemence hőfokszabályzóval
- MHD (magneto-hidrodinamikai) induktor
- Mintatartó hőelemekkel és tokozat a megtartására
- Víz hűtőközeget alkalmazó, szabályozható hűtőegység
- Tartalék hűtőegység
- A minta hűtőközegbe való leeresztését végző mechanizmus
- Az MHD induktor villamos tápegységei és a meddőenergia kompenzációjára szolgáló kondenzátorok
- Számítógépes adatgyűjtő rendszer



2. ábra A berendezés (1. induktor, 2. vízhűtés, 3. hálózati multiméter, 4. kapcsolószekrény)

A minta a kemencében megolvasztható, így erre külön berendezést nem kell alkalmazni. Az induktorban elhelyezett fémolvadékban (később: olvadék) a forgó mágneses tér hatására örvényáram keletkezik. Ezen áram hatására az álló olvadékhengerben Lenz törvénye alapján olyan irányultságú Lorenz-erő lép fel melynek nyomatéka, az őt kiváltó okot gátolni, megszüntetni igyekszik – az ok az álló olvadék – emiatt a fluidum forogni kezd. A forgó olvadékot leeresztik a hűtőközegként funkcionáló vízbe, ahol az megszilárdul (kristályosodik). A fordulatszám és a hőmérsékleti gradiens függvényében számos eltérő és eddig még nem ismert szövetszerkezet alakul ki. Modellem számára csak a forgás kialakulása lényeges – felfutás és beállítás a stacioner rotációs állapotba.

2.2 A mágneses térben mozgó fémolvadék áramlástan leírása

A kialakuló mágneses térrel és az általa okozott fémolvadék-áramlás leírásával az alkalmazott magneto-hidrodinamika foglalkozik. A „v” sebességgel mozgó – jelen esetben forgó fémolvadék – közegben érvényes elektrodinamikai Maxwell-egyenletek a következők ([1] alapján):

$$\bullet \quad \text{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad /2.1/$$

$$\bullet \quad \text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad /2.2/$$

$$\bullet \quad \text{div} \vec{B} = 0 \quad /2.3/$$

$$\bullet \quad \text{div} \vec{E} = 0 \quad /2.4/$$

$$\bullet \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad /2.5/$$

$$\bullet \quad \vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad /2.6/$$

Ahol:

- H mágneses térerősség
- J villamos vezetőképesség
- E villamos térerősség
- B mágneses indukció
- μ az áramló közeg mágneses permeabilitása
- σ az áramló közeg fajlagos villamos vezetőképessége
- v a közegáramlási sebesség

A fellépő elektromágneses erő a Lorenz erő, jele „f”, számítása:

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad /2.7/$$

A Lorenz-erővel és a Maxwell-egyenlettel kibővített Navier-Stokes egyenlet:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + [\vec{v} \text{ grad}] \vec{v} = g - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + u \Delta \vec{v} + \frac{\sigma}{\rho} \{[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}] \times \vec{B}\} \quad /2.8/$$

Ahol:

- t idő
- g az egységnyi tömegre vonatkoztatott tömegerő
- p a nyomás
- ρ a közeg sűrűsége
- u a közeg kinematikai viszkozitása

A kontinuitási egyenlet:

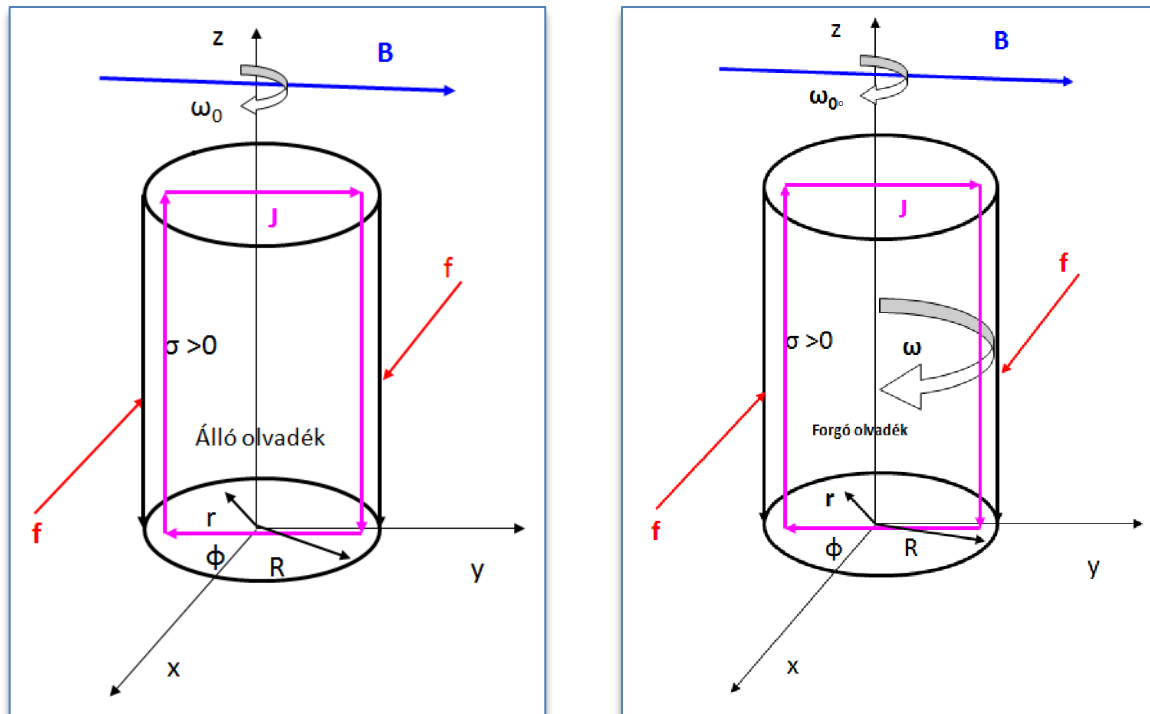
$$\text{div } v = 0 \quad /2.9/$$

A magneto-hidrodinamikai egyenletek instacioner, nemlineáris egyenletrendszer alkotnak, ezért megoldásukkor figyelembe kell venni a kezdeti- és peremfeltételeket.

2.3 Forgó mágneses térbe helyezett álló és forgó fémolvadéokra ható erő

A 2.1-es fejezetben említettek szerint, az álló fémolvadék hengert a forgó mágneses tér forgásba hozza. Az induktorban lévő összeállítás egy speciális elrendezés, mivel a mágneses tér B indukció vektora merőleges a fémolvadék-henger szimmetria tengelyére. Továbbá az olvadékoszlop szimmetria tengelye egybeesik forgási tengelyével.

Az alapul vett disszertáció csak villamos szigetelőanyagból készült mintatartóban végzett kísérleteket említ, így modellem is erre az esetre épül. A szigetelő fal alkalmazásának célja, az hogy a mágneses tér megfelelően be tudjon hatolni a fémbe és mozgásra bírni azt. Vezető falú mintatartóban árnyékolási problémák jelentkeznének, kisebb lenne a behatolási mélység, ergo kisebb hatásokkal forgatná a tér az olvadékokat.



3. ábra Kialakuló erőter álló és forgó olvadék esetén

A 3. ábrán vázolt esetben a Lorentz erő abszolút értékének időátlaga E. Dahlberg (1972) szerint [7], álló olvadékokra (végtelen hosszú közegre):

$$f = \frac{1}{2} \sigma B^2 r \omega_0 \quad /2.10/$$

Ahol

- r az olvadékhenger elemi részének tengelytől való táolsága
- ω_0 a mágneses tér fordulatszáma (szinkronfordulat)

Az összefüggés véges hosszúságú közeg esetén a következőképpen módosul:

$$f = \frac{1}{2} \sigma B^2 r \omega_0 \Phi_1\left(\frac{L}{R}\right) \quad /2.11/$$

- L olvadékhenger hossza
- R olvadékhenger sugara

Ha az $(L/R) > 4$, hatása elhanyagolható és alkalmazható az 2.10-es egyenlet. Forgó olvadék henger esetén a képlet a fluid ω szögsebességével módosul:

$$f = \frac{1}{2} \sigma B^2 r (\omega_0 - \omega) \quad /2.12/$$

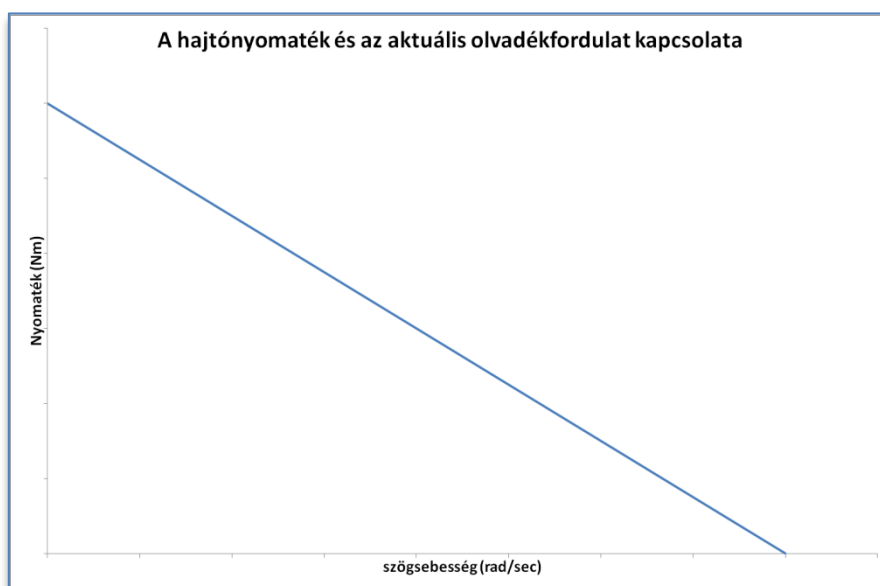
A hossz hatása itt is elhanyagolható $(L/R) > 4$ esetén. A hengerre ható nyomaték a Lorenz erőből:

$$M = 2fr = \sigma B^2 r^2 (\omega_0 - \omega) \quad /2.13/$$

A maximális erőt illetve nyomatékot a $r=R$ érték felhasználásával kaphatjuk.

2.4 A kialakuló fordulatszámról

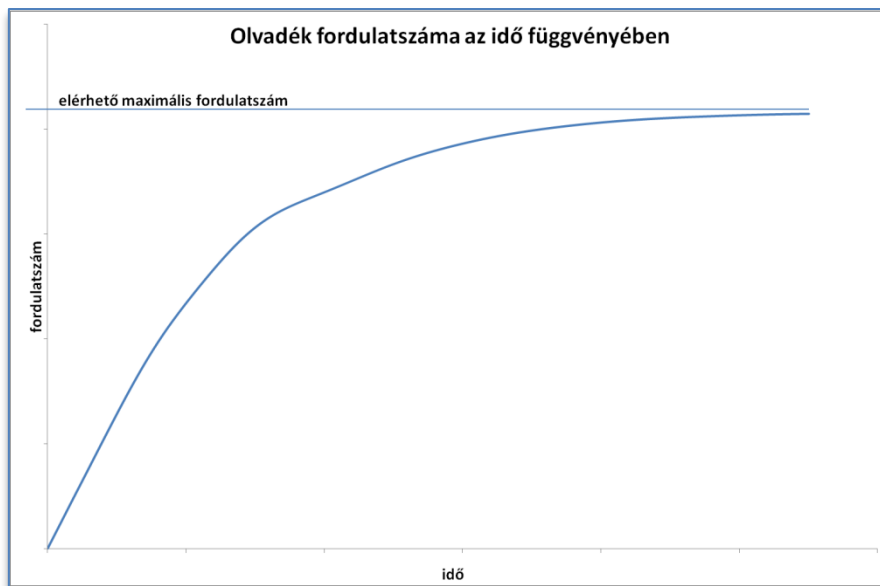
Az olvadék fordulatszáma valós körülmények között nem érheti el a „meghajtó” tér szinkronfordulatót, mivel a fali súrlódás, a közeg viszkozitása és egyéb áramlási veszteségek akadályozzák azt, valamint Lenz törvénye alapján a forgó olvadék a mágneses teret gátolni igyekszik, így a hajtóerő az idő előrehaladtával csökken – az olvadék fordulatszám-növekedése miatt. A 4. ábra mutatja a hajtónyomaték és az aktuális fordulát kapcsolatát.



4. ábra A hajtónyomaték és az olvadék szögsebességének kapcsolata

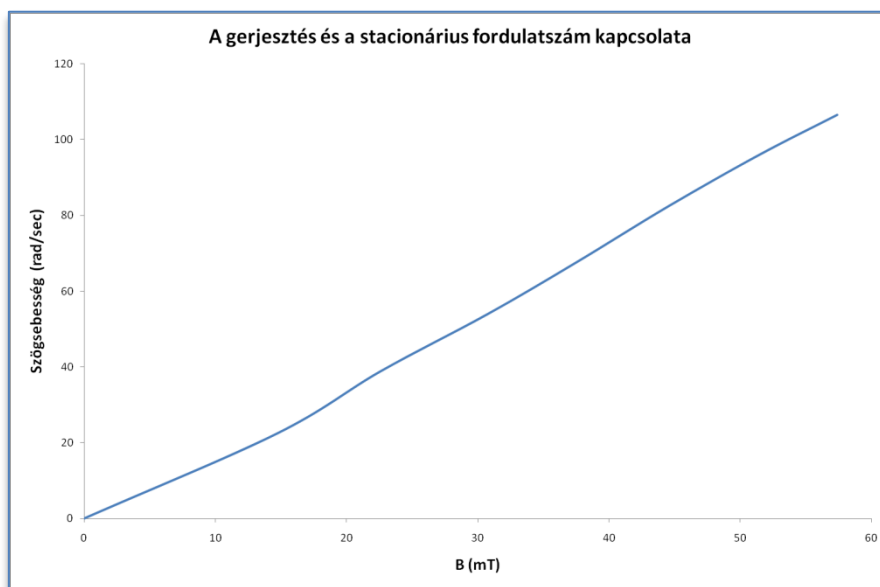
Ebből következik, hogy a fordulatszám időbeli változása nem egyenletes, mivel az áramlási veszteségek és a kialakuló fordulát egyre nagyobb mértékben gyengítik a mágneses tér hajtóerejét. A valóságban a fordulatszám hozzásimul egy maximális értékhez – 5. ábra. Ezen időpillanatban egyenlővé válik a hajtó nyomaték és a súrlódási nyomaték.

$$M_{\text{össz}} = M_{\text{haj}} + M_{\text{surl}} \quad /2.14/$$



5. ábra Fordulatszám időbeli növekedése

A 3. ábra alapján belátható, hogy a mágneses indukció (később: gerjesztés) és a kialakuló fordulatszám között lineárisnak tekinthető a kapcsolat. Ezt számos kísérlet bizonyítja. A diagram [1] mérési adataiból származik.



6. ábra Gerjesztés - maximális fordulatszám kapcsolat

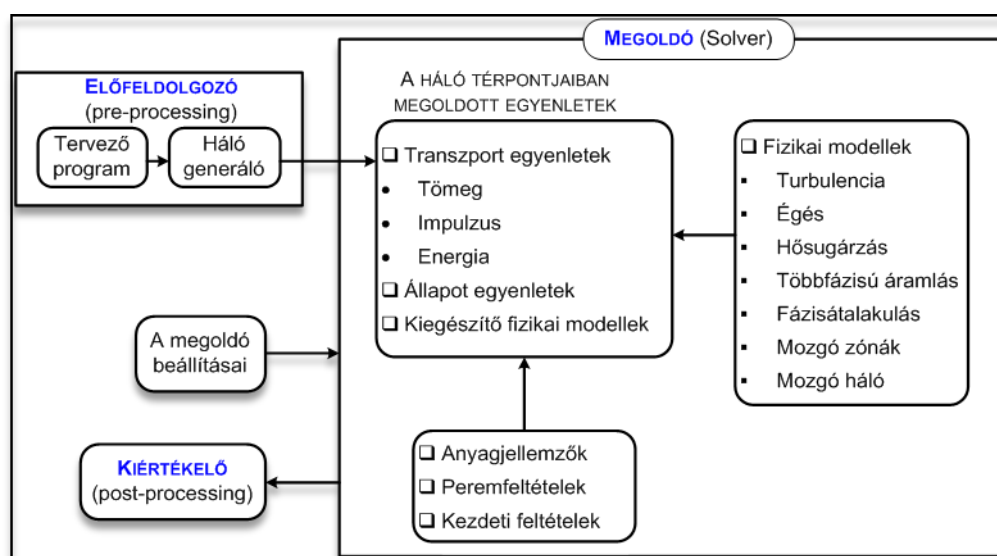
3 A numerikus modell tervezése, felépítése

3.1 A felhasznált szoftvercsomag, a FLUENT

Az áramlás- és hőtechnikai feladatok numerikus modellezésére szolgáló eljárásokat összefoglaló néven CFD-nek (Computational Fluid Dynamics) nevezik. A CFD a folyadék- illetve gázáramlás, a hőtranszport, a hozzá kapcsolódó kémiai reakciók és egyéb jelenségek alkotta rendszerek számítógépes szimulációkon alapuló vizsgálatát jelenti [3].

A TDK dolgozatomban bemutatásra kerülő numerikus szimuláció elkészítéséhez a Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszéken meglévő FLUENT v13.0 kereskedelmi szoftvert alkalmaztam [2]. A FLUENT egy áramlástani problémák megoldására szolgáló szoftver, amely széles körben használható az ipari problémák megoldásánál. A program alapvetően komplex geometriákkal határolt térben végbemenő hő- és áramlástani folyamatok modellezésére szolgál.

A CFD kódok alapvetően három részből épülnek fel, ami egyben a numerikus szimuláció végrehajtásának menetét is meghatározza [4]. Ezek: az előfeldolgozó, a megoldó és a kiértékelő modul (lásd a 7. ábrát). A FLUENT szoftvercsomag korábbi előfeldolgozó szoftverét használtam a Gambitet, mely a geometria és hálófelosztás létrehozásán túl lehetővé teszi a peremtípusok valamint a halmazállapotukban vagy anyagukban eltérő térbeli zónák létrehozását, önálló elnevezését is.



7. ábra A szoftvercsomag felépítése

A FLUENT program a megoldó és kiértékelő modul is egyben, bár lehetőséget nyújt az adatok kiexportálására, így azok más programokkal történő grafikus ábrázolására is lehetőség kínálkozik.

A numerikus megoldás előkészítése több lépést igényel, pl.: a megoldó kiválasztását, anyagjellemzők beállítását, kezdeti és peremfeltételek megadását, stb. A helyes konfiguráció eltalálása nem egyszerű feladat, lévén hogy számos beépített modell és a bemenő adatok többféle megadási módja közül lehet választani és a valós viszonyoknak megfelelően kell a kezdeti és peremfeltételeket beállítani.

A numerikus megoldás előállításához bonyolult számításokra van szükség. A megoldó modul több egyenlettel dolgozik, melyek közül megemlítendő a kontinuitási egyenlet, az energia egyenlet, az impulzus megmaradás egyenlete, az anyagegyenletek, és sok esetben az ideális gáztörvény, valamint az ismert turbulencia modellek. A megmaradási egyenletek legáltalánosabb alakja a transzportegyenlet, melynek integrális formuláját mutatja a 3.1 egyenlet, melyben szereplő tagok a számítással meghatározandó ϕ keresett extenzív mennyiség különböző okok miatti megváltozását írják le. Balról jobbra haladva az egyes integrálok jelentése: tranziens tag (ϕ megváltozása az idő szerint), konvektív tag (ϕ megváltozása a mozgás során), diffúzív tag (ϕ megváltozása a határfelületen való áthaladás miatt), produkciós tag (ϕ megváltozás térbeli keletkezés vagy elnyelődés hatására) [5].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad /3.1/$$

Az alap- és az általunk kiválasztott megoldandó modellegyenletek zárt egyenletrendszerének megoldása diszkretizáció útján történik. Amennyiben olyan egyenlettel szeretnénk dolgozni, melyet a CFD program nem ismer, úgy lehetőség van az adatbázis bővítésére. Ezen egyenletek megoldása általában a térkoordináták és az idő folytonos függvényei, viszont a megoldás néhány egyszerű esettől eltekintve nem adható meg zárt alakban. Ezért a megoldást véges számú időpontban, és véges számú térbeli pontban értelmezett diszkrét értékekkel közelítjük, amit diszkretizációnak nevezünk [6].

Alapvetően három diszkretizációs eljárást különböztethetünk meg: a véges differenciák, a véges elemek, valamint a véges térfogatok módszerét. A FLUENT ez utóbbit alkalmazza. Ennek megfelelően az egyenletrendszert a térbeli cellák (elemek) mindegyikére

ki kell számítani. Mivel a felírt egyenletrendszerben szereplő fizikai mennyiségek impliciten összefüggnek, így analitikus megoldás nem állítható elő. Ezért iteratív módon közelítjük a megoldást.

A kapott eredmények kiértékelésére több lehetőség is kínálkozik. Színes vektoros, kontúr és xy-grafikonos ábrák készíthetők. A fizikai mennyiségek térbeli eloszlása, minimuma, maximuma, átlaga konkrét számadatok formájában is lekérdezhetők a tér bármely pontjában. A FLUENT program alapvetően SI mértékegység rendszerben számol, de az adatok kiértékelése során lehetőség van más mértékegység rendszerek átváltására is.

A program széleskörű alkalmazhatóságát számos kutatás és publikáció igazolja, melyek többsége bárki számára az interneten is hozzáférhető. Példaként megemlíteném, hogy ipari alkalmazása a repülő szárnya körüli légáramlatok modellezésétől kezdve a kemencékben kialakuló égés modellezéséig, a fűtőtestben fellépő gőzképződéstől az üveggyártásig, a véráramlástól a félvezetőgyártásig, a tiszta terek tervezésétől a szennyvízkezelő telepekig számtalan helyen megfigyelhető. A szoftver még szélesebb körű elterjedését segítette, hogy képes modellezni a motorhengereken belüli tereket, akusztikát, áramlástechnikai gépeket és a többfázisú rendszereket is.

Sokirányú alkalmazása köszönhető mindazon előnyöknek, melyek a numerikus szimulációkra is érvényesek:

- lerövidíti a tervezési időt
- költségcsökkentő
- lehetővé teszi a gyártást megelőző előzetes elméleti vizsgálatokat
- lehetővé teszi olyan rendszerek tanulmányozását, ahol lehetetlen szabályozott kísérleteket végezni (nagy rendszereknél)
- lehetővé teszi bizonyos rendszerek kockázatos körülmények közötti vizsgálatát a normál teljesítmény határokon túl is (vészforgatókönyvek, biztonsági tanulmányok)
- lehetővé teszi az eredmények részletes elemzését

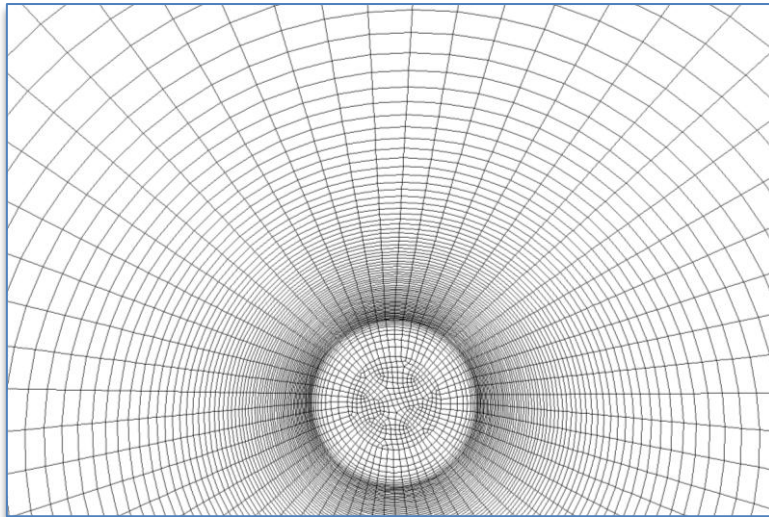
3.2 A feladat megközelítése

Modellezéshez egy egyszerű geometria is elegendő volt. Oka, hogy csak az olvadék áramlását kívánom vizsgálni. A vizsgálatot a legegyszerűbb megoldás felől kezdtem, haladva a bonyolultabb felé. A mágneses teret első közelítésben helyettesíteném a kiváltott hatással - azaz a kialakuló fordulatszámmal, vagy a Lorenz erővel. Mielőtt a kedves olvasóban kételyek támadnának, megemlíteném, hogy az áramlás (és a technológia, a kristályosodás) szempontjából mindegy, hogy a mágneses tér Lorenz ereje, avagy egy eltérő rendszer (pl.: mechanikus keverő) forgatja az olvadékot. Modellezésemhez ezt a tényt veszem alapul. Ezért elegendő a mintatartót a benne lévő olvadékkal (virtuális fallal határolva) hengerként modellezni, első közelítésben közvetlen mágneses tér nélkül. A berendezés többi alkatrészére nincs szükség a vizsgálathoz.

3.3 Geometria, háló, térfogati- és peremfeltételek

A geometria egy primitív henger melynek átmérője 10 mm, magassága 90 mm. A henger palástját és talpát fal (wall) peremtípussal, a felső körlapot egy szabad átjárásra alkalmas peremtípussal láttam el – nyomás-bemenetet adva (pressure inlet). Az utóbbi peremtípus magyarázatát a modell beállításában fogom magyarázni.

A hálózást köbös (hexahedron) cellákkal végeztem. 65790 db cellára osztottam fel a teret. A 8. ábrán látható a háló az alapkörön és a paláston. Az alapkör hálózása lett minden egyes szintre „felmásolva” HEX - Cooper sémával. A különböző szintek a hálózás függőleges osztásait jelentik. Minden hálóelem ugyanolyan alaplapú és a paláston lévő osztásnak megfelelő magasságú. Ezzel a megoldással egy jobb minőségű háló érhető el. A cellák minősége lényegében a forrás felületen lévő cellák minőségétől függ.



8. ábra A háló a paláston és az alaplapon

4 A modell beállításai és eredmények

4.1 A megoldás tervezete

Az induktorban kialakuló áramlásra számos mérést végzett Dr. Rónaföldi Arnold egyetemi docens. A méréseket a láthatóság és a kezelhetőség végett tiszta gallium illetve 74,5 m/m % gallium – 25,5 m/m % indium ötvözet olvadékával végezte, mivel ezek szobahőmérsékleten már olvadék állapotúak. Kísérleteket hajtott végre az olvadék felszínének és fordulatszámának vizsgálatára, mérésére. Méréseinek részletes leírásai a disszertációjában olvashatóak [1]. Ezeknek a méréseknek köszönhetően számos háttér információ és adatom volt a modellezéshez.

Három különböző módon közelítettem meg a feladatmegoldást:

- A fémolvadék térfogatába írtam elő a korábbi mérésekből származó fordulatszámot fix és növekvő értékben (PhD értekezés – [1])
- Forráskódot írtam elő a térre ható Lorenz erő megadására fix nagyságú erővel
- A forráskódot kibővítettem a Lorenz erő teljes egyenletével

4.2 Alapvető, a különböző változatokban azonos beállítások

Voltak olyan beállítások, melyeket közösen alkalmaztam minden modelltípus esetén, mivel változtatásukra nem volt szükség vagy csak köztes tesztfuttatások céljából lettek átállítva. A tesztfuttatásokat itt nem említem. A közös beállítások a következők:

- Időben változó, nyomás alapú megoldó
- Volume of Fluid többfázisú modell 2 fázisra
- Realizable k- ϵ turbulencia modell
 - + Enhanced Wall Treatment fal közeli funkció
- Peremtípusok:
 - „pressure-inlet” a mintatartó tetején
 - „wall” - fal a paláston és a talpon
- anyagok
 - levegő és gallium

Az Enhanced Wall Treatment fal közeli funkció nem kínál lehetőséget a fali érdesség figyelembe vételére, ellenben a Non-Equilibrium típussal [2]. Utóbbi típus egy időben korábbi megjelenésű megoldó. Használatát későbbi számolási instabilitások miatt elvetetem.

A nyomásos bemenet – „pressure-inlet” – peremtípust azért használtam, hogy a rendszer ne legyen teljesen elhatárolva a környezettől. Alapvetően fluidum bevezetésére szolgál a peremtípus, de ha zérus nyomást állítunk be rá, akkor egy átjárható felületet kapunk, és így a valóságot tükrözi a modell, mivel a mintatartó teteje nem zárt.

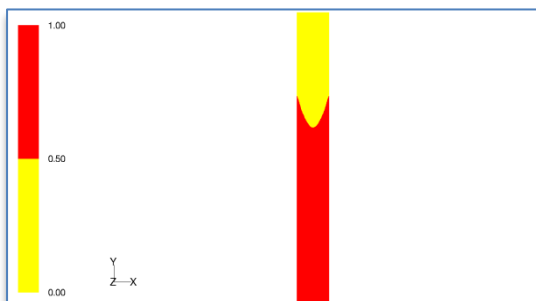
Az anyagok terén a gallium adatait nekem kellett megadni, mivel ez nem szerepelt a FLUENT adattárában, ellentétben a levegővel. A gallium szükséges adatai:

- sűrűség = 6350 kg/m^3
- dinamikai viszkozitás = $0,00216535 \text{ kg/(m*s)}$

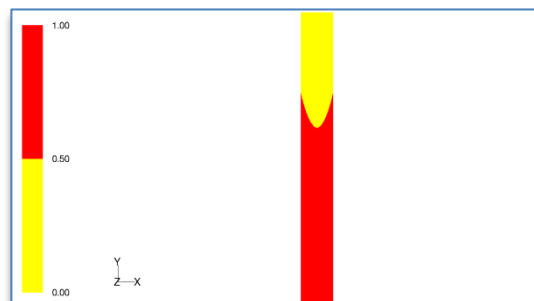
4.3 Fordulatszám előírása az olvadéktérfogatban

A lehetőségek vizsgálatának legelső lépése a program által kínált alapvető egység a „Moving Reference Frame” [2] volt. A kezdeti feltételek beállításakor megadom az olvadék fordulatszámát és az - az egész futtatás alatt - akkora szögsebességgel fog forogni. A számítás 10^{-3} másodperces időlépéssel futott.

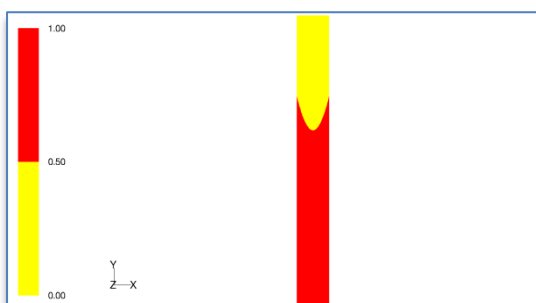
A kapott eredményeket az alábbi képsoron mutatnám be. A képek 917 rpm fordulattal forgatott olvadékról készültek, a henger közepén metsző síkban. A piros fázis az olvadék, a sárga a levegő.



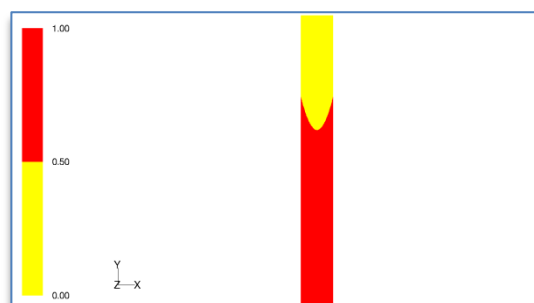
0,1 sec



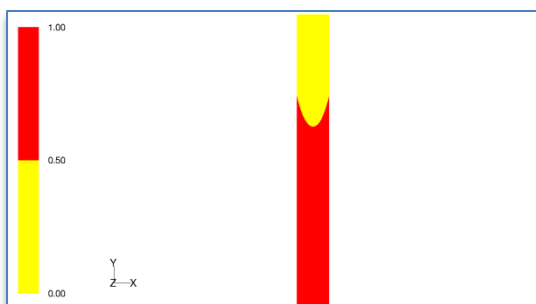
0,2 sec



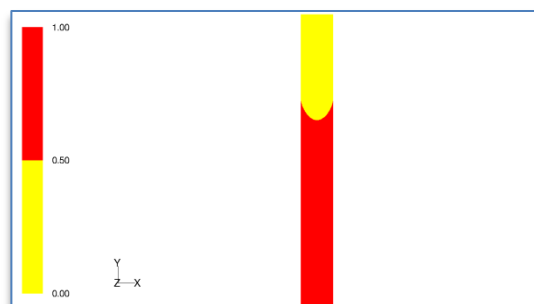
0,3 sec



0,4 sec



0,5 sec

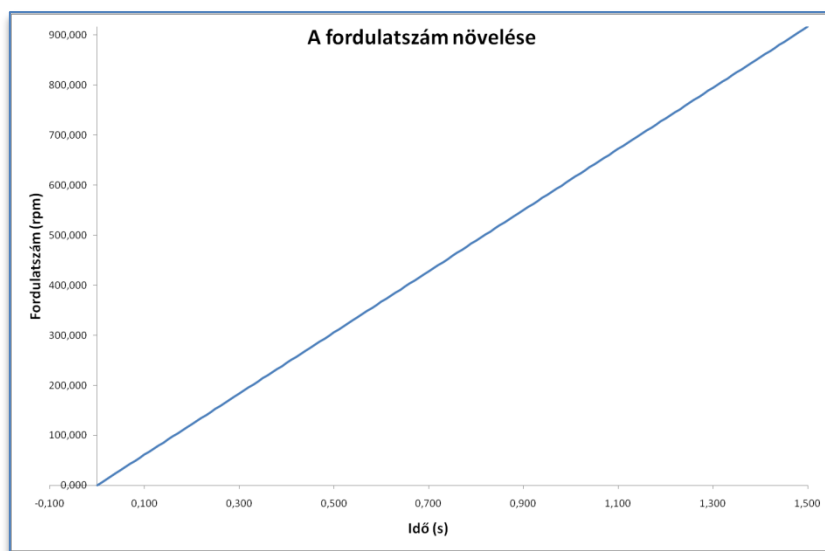


1 sec

9. ábra Kialakuló olvadékfelszín-profil az idő függvényében

A képek alapján látható, hogy a kapott felfutás valótlan, fordított menetű. Mivel a fordulatszám maximális értékben jelentkezik az első időpillanattól kezdve, nem mutathatja a valós képet (a fordulatszám időben növekszik a beállt áramlásig). Így a feladatomban lényegét nem tudja teljesíteni. A beállt állapotról számos kép és eredmény létezik. Számomra a felfutás a lényeges.

A hibát megpróbáltam úgy orvosolni, hogy a fordulatszám beállított értékét fokozatosan növeltem. 150 részre osztottam fel a 1,5 másodperces vizsgálati időt (6. ábra) és a megfelelő időlépés előtt „journal” fájl (parancs fájl) segítségével növeltem meg az adott értéket. Az időlépés továbbra is 10^{-3} másodperc.

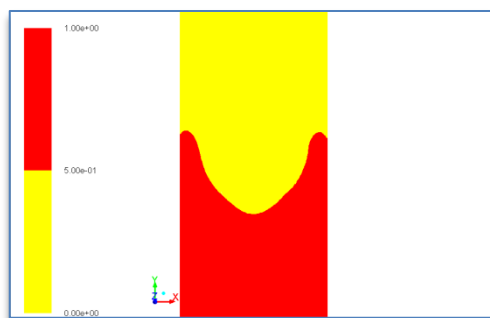


10. ábra A beállított felfutás

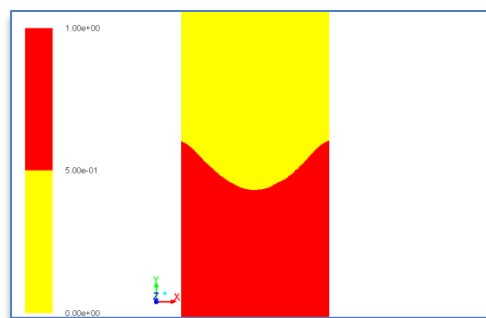
A növelés fokozatos, mivel véges számú részre osztottam fel az időintervallumot. A valós felfutási görbe ugyan ellaposodik és hozzásimul a beállt áramlás fordulatszámához, de első közelítésnek ez a megoldás is megfelel, mivel így kideríthető, hogy megfelelően működik-e a modell vagy más módszerhez kell folyamodnom.

A fordulatszám növekedés és a beállítás kb. 1-1,5 mp alatt játszódik le. Ezt mutatja az első modell és a valós mérési eredmények is. Ezek alapján, további vizsgálataimat is eddig az időpontig végeztem. Az időben növekvő fordulatszámú eredmények a 11. ábrán láthatóak.

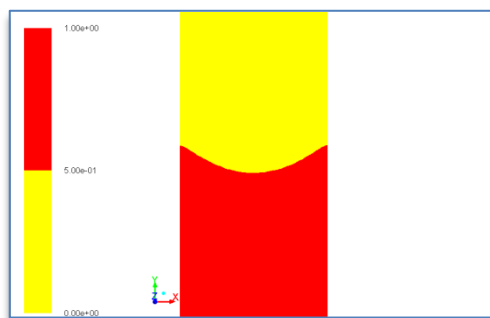
Az átalakítás minőségi változást annyiban mutat, hogy az olvadék felhúzódása a fal közelében csökken. Ennek oka a fali súrlódás – ott lassabban forog az olvadék, így nem tud annyira „felmászni” a falra. Ez a jelenség is csak kezdeti időpillanatokban mutatkozik, annak ellenére, hogy a valóságban az egész folyamatot végigkíséri.



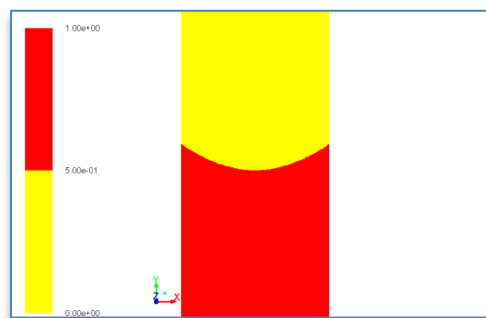
0,1 sec



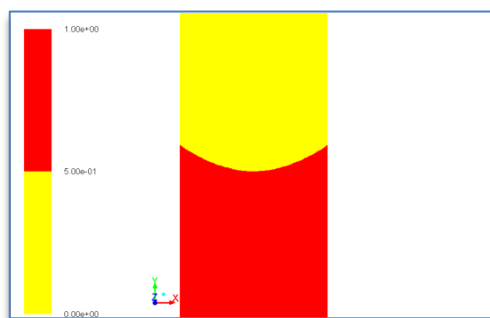
0,2 sec



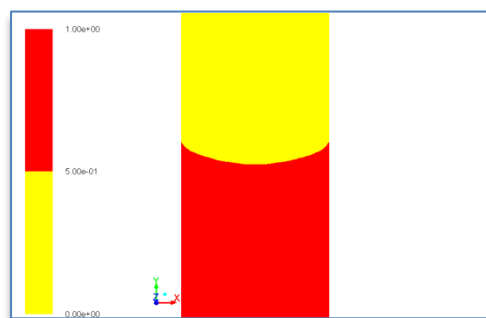
0,3 sec



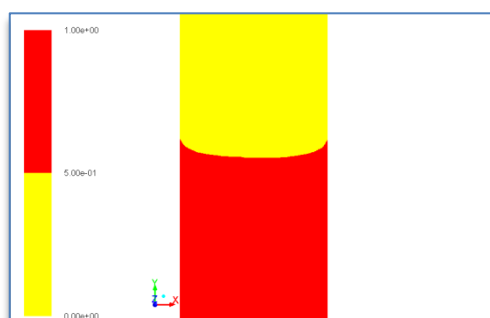
0,5 sec



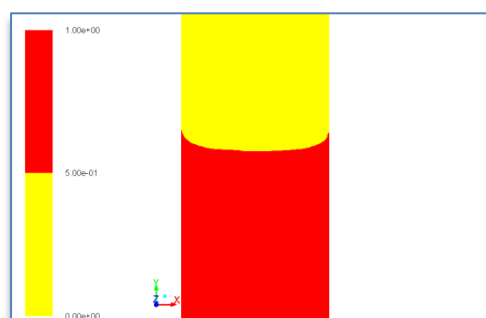
0,75 sec



1 sec



1,25 sec



1,5 sec

11. ábra Növelt fordulatszámmal forgatott modell eredményei

4.4 Az UDF bevezetése

A fentebb ismertetett két modell végeredményei alapján ezt az irányt elvetettem és máshonnan közelítettem a feladatot. Az UDF (**U**ser **D**efined **F**unction) használatát láttam megfelelőnek. Nevének jelentése „felhasználó által definiált funkció”.

4.4.1 Az UDF rövid bemutatása

Az UDF rendszere egy C programnyelven írott parancsfájl, forráskód alapján dolgozik. Az előre meghatározott felépítésű - „MACRO” – keretbe tetszőleges parancsok írhatóak elő. Számos eltérő MACRO típus áll a felhasználó rendelkezésére, amivel megadható:

- a feladat elvégzésének időpillanata
 - belépéskor, iterációnként, időlépés végén, stb.
- peremfeltétel módosítása
 - sebesség bemenet, tömegáram, falhőmérséklet, stb.
- kezdeti feltétel, fix érték
 - energia, turbulencia értékek, impulzus, stb.

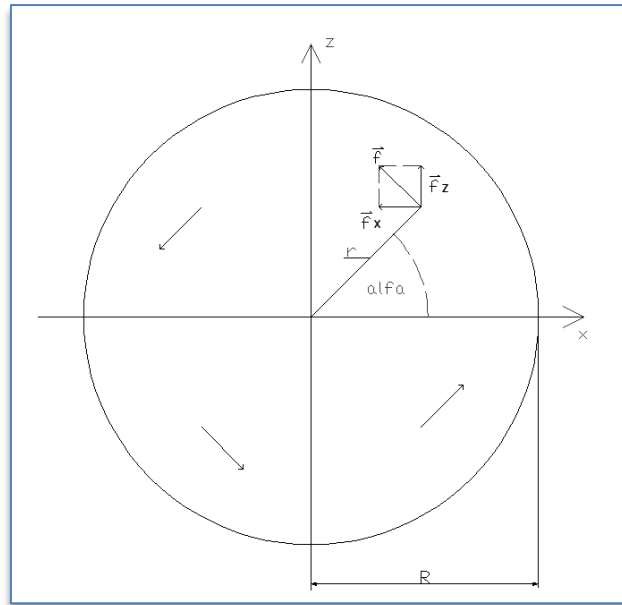
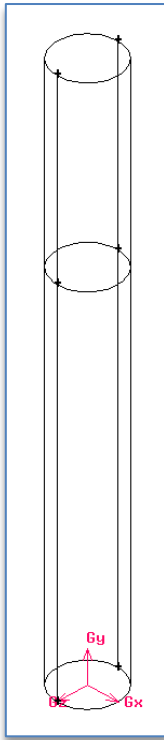
Előnye, hogy olyan függvény szerinti változások, források előállítása is lehetséges, melyekre közvetlen lehetőséget nem nyújt a FLUENT [2].

4.4.2 A forráskód előállítása

Mivel a Lorenz erő nyomatóka a tér minden pontján más irányba hat, nem megfelelő csak a koordináta rendszer egy vagy két tengelyének irányába megadni a hajtóerőt. Beépített lehetőség viszont csak konstans koordináta irányú erő megadására létezik.

Ezért folyamodtam a DEFINE_SOURCE nevű UDF-hez [2]. Ebben lehet közvetlenül momentum - impulzus – értéket megadni. A felépítés első lépése a hajtóerő irányultságának megadása. Mivel ez az irány a függőleges tengelyre biztosan merőleges így egy körszeletre határoztam meg; ennek alapján alakítottam ki a forráskódot. Későbbiekben a cella koordinátái alapján megadom, hogy milyen irányultságot kell éppen használni a tér minden egyes pontján. A körszeletet ehhez négy síkra kell felosztani.

A globális koordináta rendszer középpontja a henger alsó lapjának középpontjában helyezkedik el (12. ábra - bal kép), így a sík körszelet középpontjában van a 2 dimenziós x - z koordináta rendszer origója is. Ezt a rendszert használtam fel az irány előállítására.



12. ábra A globális koordináta rendszer helye (bal) és az erő irányultságának segédábrája (jobb)

A 12. ábra jobb oldali képe mutatja az erő irányának meghatározásához kellő segédletet. A hajtó erő valójában erőpár, de nekem minden egyes cella középpontjára kell előírnom az egy pontban ébredő erőt. Az előállítás az első és a harmadik térsíkra:

$$\vec{f} = \vec{f}_x + \vec{f}_z \quad /4.1/$$

$$\vec{f}_x = -\vec{f} * \cos \alpha \quad /4.2/$$

$$\vec{f}_z = \vec{f} * \sin \alpha \quad /4.3/$$

A 4.1 – 4.3 egyenletekből adódóan:

$$\vec{f} = -\vec{f} * \cos \alpha + \vec{f} * \sin \alpha \quad /4.4/$$

Az előállítás a második és a negyedik térsíkra:

$$\vec{f}_x = \vec{f} * \cos \alpha \quad /4.5/$$

$$\vec{f}_z = -\vec{f} * \sin \alpha \quad /4.6/$$

A 4.1,4.5, 4.6 egyenletekből adódóan:

$$\vec{f} = \vec{f} * \cos \alpha - \vec{f} * \sin \alpha \quad /4.7/$$

A 4.4 és 4.7 egyenletek felhasználásával készítettem el az elsőként használt forráskódot. Ahhoz, hogy a szoftver tudja, hogy éppen melyik irányba is kell állítania az erőt if-ciklust használtam (segítségével különféle feltételeket lehet kiszabni, melyek teljesülése esetén a beírt feladat végrehajtásra kerül). Az alapként felhasznált körszeletben említett négy síknegyedet behatároltam x, és z koordináták alapján és minden egyes if-cikluson belül elhelyezkedett egy forráskód – hogy mit is kell éppen tennie a megoldónak, ha az adott feltétel teljesül.

A képletbe szükséges alfa szög értékét is koordinátákból kaptam meg (mivel ezek az adatok állnak rendelkezésemre a modellben a FLUENT alatt). Az aktuális sugár:

$$r = \sqrt{x^2 + z^2} \quad /4.8/$$

Az aktuális alfa szög:

$$\alpha = \sin^{-1}(z/r) \quad /4.9/$$

A sugár, az alfa szög és a Lorentz-erő abszolút értékét konstansként definiáltam az UDF-en belül (átláthatóság érdekében) és úgy helyettesítettem be az egyenletbe. Az alfa szöget a síknegyednek megfelelően korrigáltam, így az alfa tényleges értéke:

$$\alpha = (\sin^{-1}(z/r)) + C \quad /4.10/$$

Ahol C korrekciós tényező értéke:

- első síknegyedre 0
- második síknegyedre 90
- harmadik síknegyedre 180
- negyedik síknegyedre 270

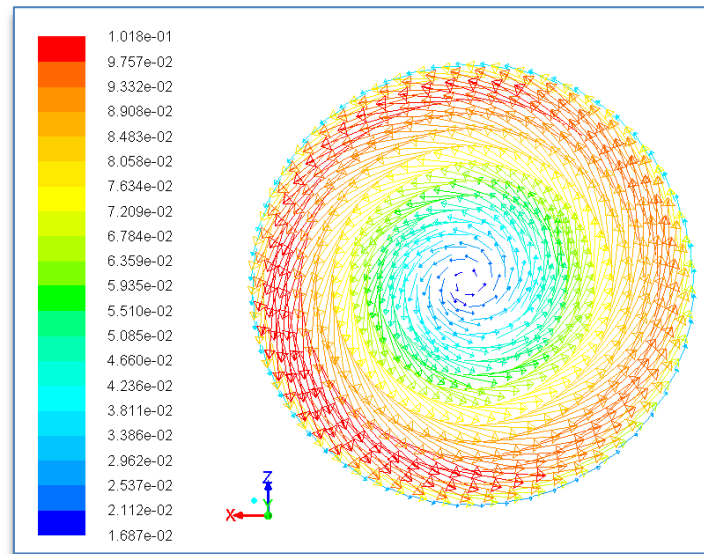
Kezdetben a Lorentz erőt egyetlen fix számként definiáltam az irányok tesztelése érdekében. A kapott UDF részlete:

```
#include "udf.h"

DEFINE_SOURCE(xz_mom_src, c, t, dS, eqn)
{
    real x[ND_ND];
    C_CENTROID(x, c, t);
    if (x[0] > 0., x[2] > 0.);
    {
        real con1, con2, source;
        con1 = 2500;
        con2 = sqrt(pow(x[0],2)+pow(x[2],2));
        source = -con1*cos (asin (x[2]/con2))+con1*sin (asin (x[2]/con2));
        return source;
    }
}
```

13. ábra UDF részlet

Az eredmények alapján az irányítás megfelelő (tesztfuttatásból):



14. ábra Sebesség szerint színezett vektorok

4.4.3 Bővítés a tényleges Lorenz erő egyenletével

Mivel a valóságban a Lorenz erő hely- és olvadékfordulat függő, a pontos számítás érdekében a 2.12 egyenletet beírtam az UDF keretébe. Az összefüggésben változó értékként az aktuális sugár (4.8 képlet) és az olvadék fordulatszáma (szögsebessége) szerepel. Ez utóbbit a következőképpen kaptam:

$$\omega = 2\pi \frac{\sqrt{|v_x|^2 + |v_z|^2}}{r} \quad /4.11/$$

Mértékegysége rad/sec. A szereplő elemek:

- v_x x irányú sebesség
- v_z z irányú sebesség
- r sugár

A teljes beírt egyenlet 2.12 és 4.11 felhasználásával:

$$f = \frac{1}{2} \sigma B^2 r (\omega_0 - 2\pi \frac{\sqrt{|v_x|^2 + |v_z|^2}}{r}) \quad /4.12/$$

Konstansként definiált érték a σ villamos vezetőképesség, a B mágneses indukció, az r sugár és az ω_0 szinkronfordulat. A sebességek értékét a modellből kérdeztem le minden időlépésre. A 4.12 egyenlet értéke került a forráskód konstansának helyére. Az UDF tartalmi változása a 15. ábrán látható.

```

#include "udf.h"

#define omega0 314
#define sigma 3580000
#define B0 0.0574
#define PI 3.141592654

DEFINE_SOURCE(xz_mom_src,c,t,dS,eqn)
{
    real x[ND_ND];
    C_CENTROID(x,c,t);
    if (x[0] > 0., x[2] > 0.);
    {
        real con1, con2, con3, source;
        C_U(c,t);
        C_W(c,t);
        con1 = sqrt(pow(x[0],2)+pow(x[2],2)); /* current radius */
        con2 = 2*PI*(sqrt(pow(fabs(C_U(c,t)),2)+pow(fabs(C_W(c,t)),2)))/con1; /* omega */
        con3 = 0.5*sigma*pow(B0,2)*con1*(omega0-con2);
        source = -con3*cos(asin(x[2]/con1))+con3*sin(asin(x[2]/con1));
        return source;
    }
}

```

15. ábra UDF a teljes erőter-leírással

4.5 A bővített UDF használata

A közös beállításokon kívül az UDF betöltését és megfelelő funkcióhoz való rendelését kellett elvégezni. „Interpreted” UDF-ként nyitottam meg a forráskódot. Ez a verzió egyszerűbben kezelhető és nem igényel olyan bonyolult programozást, mint párja a „compiled” [2]. A sikeres beolvasást követően a térfogati zónák beállításában (Cell Zone Conditions) „Source Term”-ként adtam meg az térerőt. Így az egész henger térfogatára érvényesen hat a Lorenz erő.

A legelső észrevétel a modellel kapcsolatban az, hogy jelentősen kisebb időlépésre van szüksége. A forráskód miatt a stabil futáshoz eleinte 10^{-4} másodperces időlépéssel próbálkoztam a kezdeti divergenciák miatt (divergencia a modell összeomlását jelenti [2]). Ez az időlépés megfelelő méretű volt az első UDF-el /állandó Lorenz erővel/ való számításhoz. A rendszer időlépés csökkentési igénye érthető, mivel egy bonyolultabb kódot is kell kezelnie a hajtóerő irányítására – minden egyes cellában más irányú az erőhatás. Az első modellhez képest egy nagyságrenddel kellett csökkenteni az időlépést, ami reálisnak tekinthető.

Ellenben azon UDF esetén, ami a valós térerő-képlettel számol az időlépést folyamatosan csökkentenem kellett divergencia miatt. 10^{-7} másodperces időlépés esetén kezdett stabilnak tekinthető futást mutatni a modell. Mivel a legegyszerűbb UDF-es modell futtatása is kb. 3-5 napot vett igénybe (UDF nélkül pár óra is elegendő lehet) ez az időlépés irreális számolási időt eredményezett volna – megközelítőleg 40-50 nap.

4.6 A végső modell

Idő hiányában kénytelen voltam egyszerűsítéseket alkalmazni. Korábban említettem, hogy a forgást kiváltó térerő a sugár függvénye – ha a sugár nő, az erőhatás is növekszik – valamint azt is, hogy az olvadék fékezni igyekszik az őt mozgásra kényszerítő teret, tehát ha az olvadék gyorsul a Lorenz erő csökken. A számítási idő csökkentése végett ezek elhanyagolását próbáltam megtenni.

A változó sugár helyett az $r = \frac{1}{2} R$ helyen ébredő erőt használom, továbbá az aktuális fordulát helyett a fix $\frac{1}{2} R$ -re vonatkozó erőt különböző ω értékekkel kompenzáltam /számítását a 2.12 egyenlet alapján végeztem - σ , B , ω_0 , $r = \frac{1}{2} R$ és az aktuális szögsebesség is stacionárius érték/. A kapott erőt (mely egy fix érték, egy szám) helyettesítettem be az első generációs UDF-embe. Öt különböző ω kompenzációs változatot készítettem. A kompenzációs értékeket és a hozzájuk tartozó erőt, valamint a kialakult fordulatot az 1. táblázat tartalmazza.

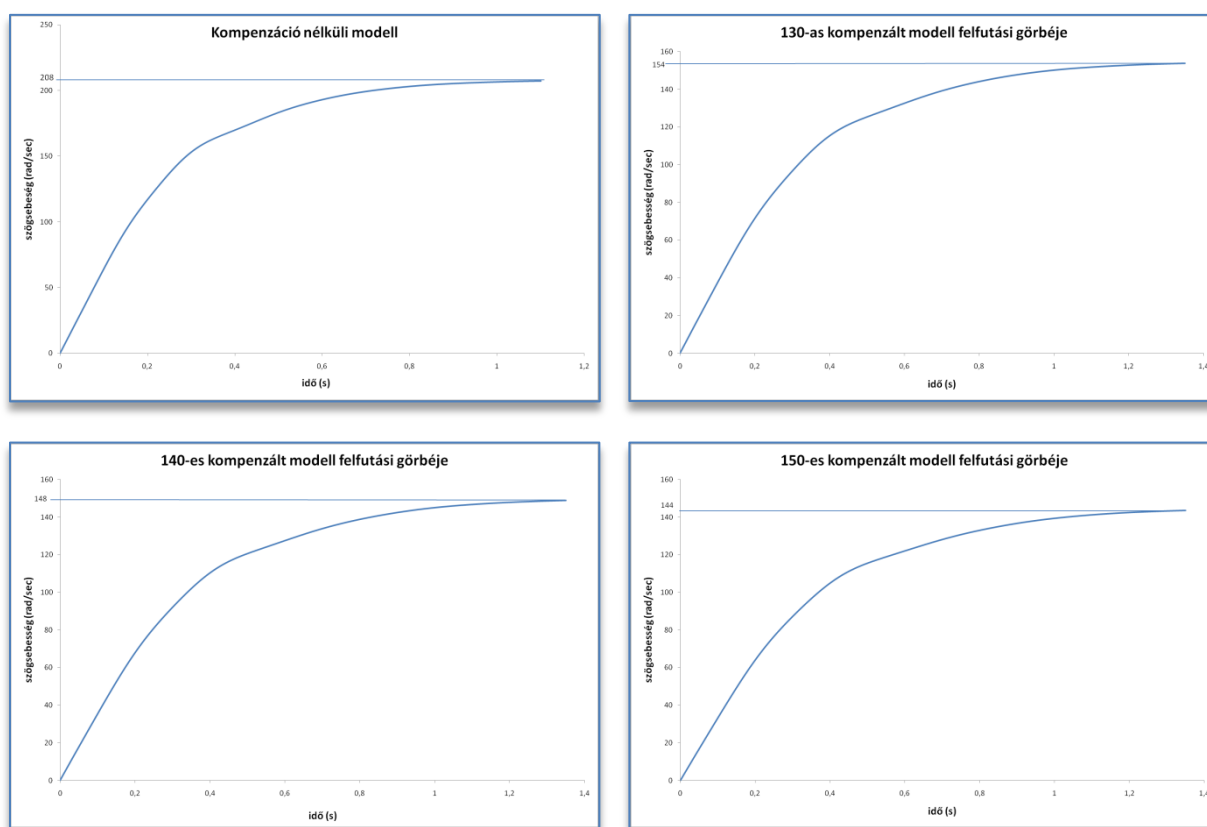
1. táblázat A kompenzáció eredménye

sorszám	kompenzált ω [rad/sec]	f [N/m ³]	kialakult ω (rad/sec)
1	0	4629,63	208
2	106,5	3059,39	165
3	130	2712,91	154
4	140	2565,47	148
5	150	2418,02	144
valós ($B = 57,4$ mT)	időben növekvő	r függvényében változó	106,5

A sugár felén ébredő erő használatát az indokolja, hogy ez egy középérték és ez tekinthető a legreálisabb közelítésnek. A tengely közelében csekély erők ébrednek, a mintatartó falánál keletkező erővel pedig várhatóan nagy hibákat generálnék.

Az 1. és 2. kísérlet eredményeiből látható, hogy nem közelíti a valós 106,5 rad/sec fordulatot egyik modell sem. Ezért készültek a 3, 4, 5. számú változatok, hogy a kompenzáció növelésével jobban megközelítsem a valós ω értékét.

Az elhanyagolás ellenére a felfutási görbe nem változott az elméleti menethez képest, tehát kvantitatív oldalról sikerült szimulálni az áramlást – 16. ábra.



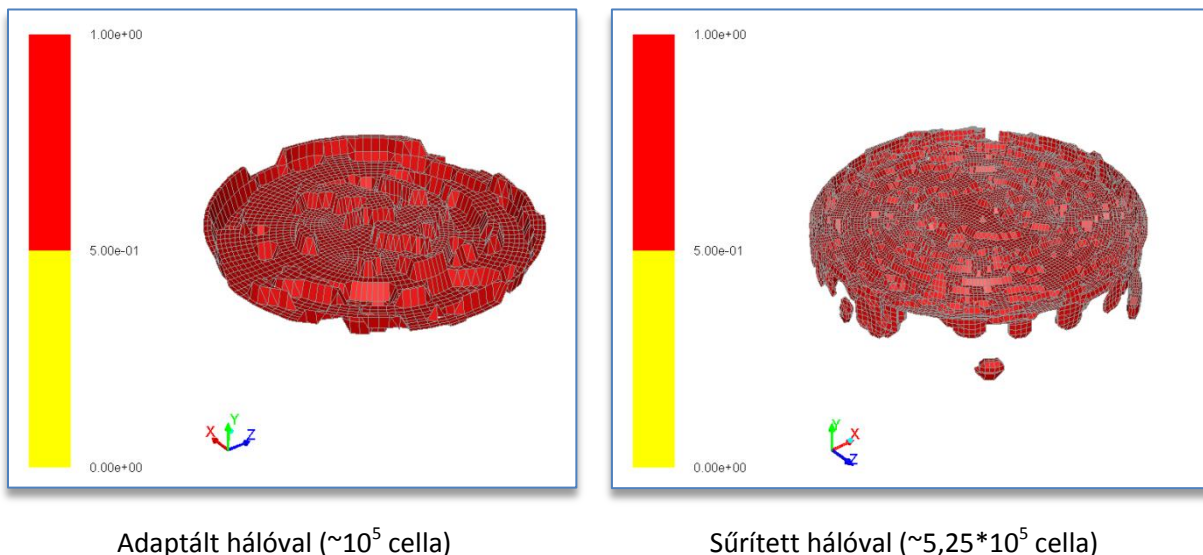
16. ábra Egyes kompenzációs modellek felfutási görbéi

4.7 A szabd felszínről

Az olvadék szabad felszínét is szerettem volna vizsgálni. A számítások során legtöbbször 66 ezer cellás geometriát használtam (3.3 fejezet), amely a két fázis közti határfelület kontúrjának jó minőségű leképezéséhez túlságosan ritka felosztásnak bizonyult. A 17. ábra bal oldali képén feltűnhet a felszín lépcsőzetessége. Az egyenletesebb eloszlás érdekében hálósűrítéseket végeztem a geometria azon szakaszában, ahol a forgási parabolaid várhatóan kialakul. A művelet a FLUENT felületén is elvégezhető, de csak egy adott módszerrel, méghozzá adaptációval.

Működése egyszerű. Az adott cella minden egyes élét megfelezi és az új pontokat összeköti. Így egy köbös cellából 8 új – ugyanúgy hexa - cella keletkezik. Ez sem volt elegendően nagy sűrítésű, hiába emelkedett ~100.000. darabra a cellaszám. 525.000. cella

esetén a felbontás már jónak tekinthető, viszont a számolási idő arányosan négy-ötszörösére nőtt (a 100.000. cellás adaptált geometriájú és a 66.000. cellás modellhez képest). Az időkorlát miatt nem rendelkezem olyan futtatással, amely eljutott volna az áramlás beálltáig.

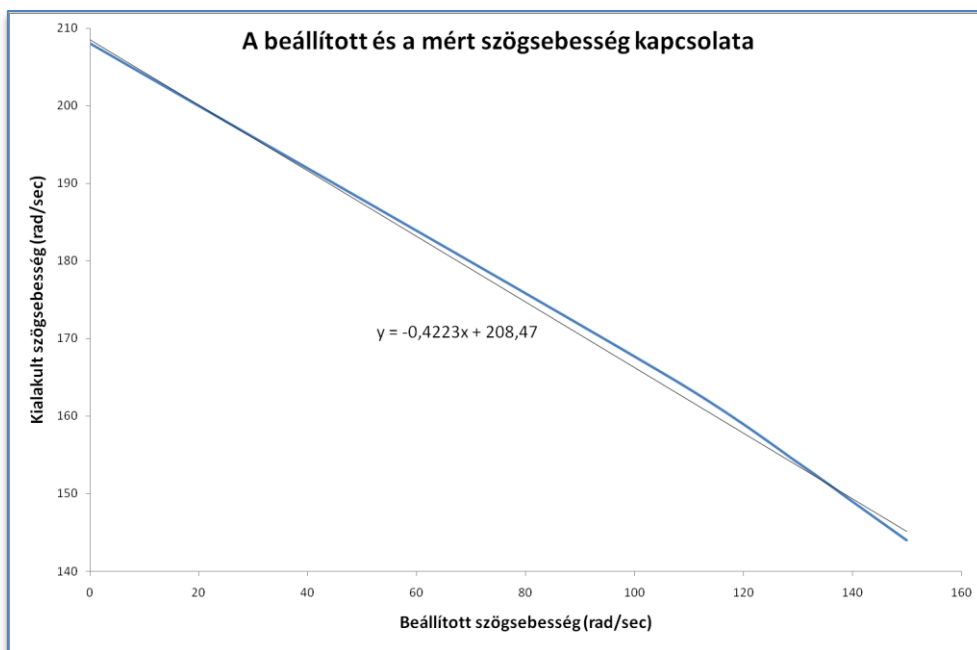


17. ábra A hálósűrités hatása

4.8 Végeredmény

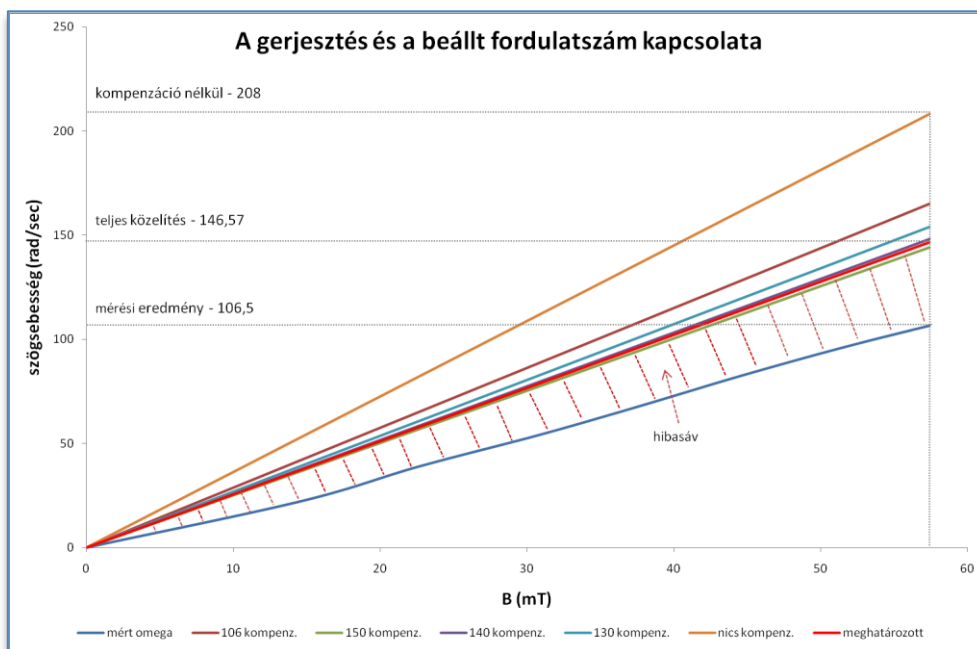
A 4.6-os fejezetben leírt iterációs folyamat segítségével az egyszerűsítések által képzett hibásávot igyekeztem leszűkíteni. Az általam alkalmazott egyszerűsítéseken túl további hibalehetőségeket rejt a vizsgálat, melyek a valós kísérletek alapadataiból származnak. Ilyen például a fémolvadék villamos vezetőképessége. Az adatot irodalmi források alapján kapták meg, egy adott tisztaságú fémre és/vagy ötvözetre. A beszerzett fém néveleges tisztasága kis valószínűséggel egyezik meg a valós tisztasággal. Mivel a néveleges értékhez lett keresve a vezetőképesség adat, így ez eltérést generálhat. A vezetőképesség megváltozása nagyban befolyásolja számításaim pontosságát, mivel 1%-os eltérés is jelentősen más Lorenz erő értéket képezhet.

A közelítés pontos értékét részben grafikus úton kaptam meg. A kompenzációként beállított és számítási eredményből kapott $\omega - \omega'$ függvényről (18. ábra), a lineáris trendvonal egyenletéből meghatároztam azt a kompenzációs értéket, amelynek beállítása esetén ugyanazon értéket számolja a program. Az érték $\omega = 146,57$ rad/sec.



18. ábra A végső kompenzáció meghatározását segítő diagram

A 2.4-es fejezetben említett összefüggés szerint a vizsgált gerjesztési tartományban a stacionárius fordulatszám és a mágneses indukció között lineáris az összefüggés. Ez alapján elkészíthető az egyes kompenzációs modellekhez illeszthető gerjesztési egyenes és ezzel szemléltethető az egyszerűsítések hatása. A hibasávot a 19. ábra mutatja be.



19. ábra A hibasáv

5 Összefoglalás

A dolgozatomban leírtak igazolták, hogy modellezni lehet a kristályosító berendezésben kialakuló erőrendszert, mely a hosszú távú kutatás alappillére. Ennek kapcsán megismerkedtem az ANSYS-FLUENT programcsomag nyújtotta lehetőségekkel, az egyes funkciók működési menetével.

Bemutattam, hogy a gerjesztés hatására fellépő Lorenz erő UDF forráskóddal történő előírása működőképes megoldást ad. A dolgozat beadási határidejéig azonban nem sikerült ezt a változatot lefuttatni, mivel a stabil futtatáshoz nagyon kicsi időlépést kell alkalmazni. Az egyszerűsítéseket alkalmazó modell segítségével előállt egy olyan, relatíve nagyobb időlépés alkalmazó megoldás mely gyorsabb lefutása révén későbbiekben elvégzendő vizsgálatoknál lehet hasznos (például különböző mértékű gerjesztések hatásainak összehasonlításához).

A kutatómunkám itt nem áll meg. Jövőbeli célom a teljes erőter egyenletét alkalmazó UDF, valamint a FLUENT MHD (magnetohidrodinamics) moduljának használata az olvadék szabad felszínének részletesebb vizsgálata érdekében.

6 Irodalomjegyzék

- [1] *Rónaföldi Arnold: Forgó mágneses mezős magneto-hidrodinamikai keverővel ellátott kristályosító berendezés kifejlesztése és vizsgálata. PhD értekezés. Miskolc. (2008)*
- [2] *ANSYS FLUENT 13.0 User's Guide*
- [3] *H. K. VERSTEEG, W. MALALASEKERA: An introduction to computational fluid dynamics, The finite volume method. Longman Group Ltd. Malaysia. (1995)*
- [4] *Gyulai László: Bevezetés a CFD világába a Transzportfolyamatok modellezése által a FLUENT szoftvercsomag alkalmazásával. Oktatási segédlet. Miskolc. (2009)*
- [5] *Dr. Szentgyörgyi Sándor, Dr. Molnár Károly, Dr. Parti Mihály: Transzportfolyamatok. Tankönyvkiadó. Budapest. (1986)*
- [6] *Baranyi L., Kalmár L., Könözy L.: Hő- és áramlástan feladatok numerikus modellezése. HEFOP. Miskolci Egyetem. (2005)*
- [7] *E. Dahlberg: On the action of a rotating magnetic field on a conducting liquid. AB Atomenerg. Sweden. Rep AE-447 (1972)*
- [8] *D. Brito, P. Cardin, H.-C. Nataf, G. Marolleau: Experimental study of a geostrophic vortex of gallium in a transverse magnetic field. Physics of the Earth and Planetary Interiors. 91 (1995) 77-98*
- [9] *J.K. Ropelkar, J.A. Dantzig: A study of Solidification with a Rotating Magnetic Field. Int. J. Cast Metals Research. 14 (2001) 79-98*
- [10] *J. Stiller, A. Cramer, K. Frana, K. Varshney: Stirring with rotating magnetic fields. Numerical and experimental results. Flow control by Tailored Magnetic Fields. Dresden. (April 1-2, 2004)*
- [11] *P. Nikrityuk, K. Eckert, B. Willers, S. Eckert, U. Michel, G. Zouhar: Numerical and experimental studies on solidification control by alternating magnetic fields. Sino-German Workshop on Electromagnetic Processing of Materials. Shanghai, China. (October 11-12, 2004)*