Manyetohidrodinamik Akışkan Simülasyonlarında Ağ Bağımsızlığının İncelenmesi: Dairesel Kesitli Boru Örneği

Abdullah Alperen OKUMUŞ*, Cemalettin AYGÜN **
* Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 29000 Merkez/Gümüşhane, aalperenokumus@gmail.com
** Karadeniz Teknik Üniversitesi Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi Makinaları İşletme Mühendisliği Bölümü Çamburnu, 61530 Sürmene/Trabzon, caygun@ktu.edu.tr

Özet: Bu çalışma, bilimsel ve mühendislik alanındaki önemli konular olan ağ bağımsızlığı ve manyetohidrodinamik üzerine odaklanmıştır. Ağ bağımsızlığı, sayısal analizlerdeki hesaplama ağırlığını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu konsept, simülasyon sonuçlarının çözünürlüğe bağlı olarak nasıl değişebileceğini anlamak açısından hayati önem taşımaktadır. Manyetohidrodinamik (MHD), elektromanyetik etkileşimlerin akışkan dinamiğini etkileyen ve akışkanların manyetik alanlarla etkileşimini inceleyen bir alandır. Bu alanda yapılan araştırmalar, manyetik alanın akışkan davranışları üzerindeki etkilerini anlamamıza ve manyetohidrodinamik olayları analiz etmemize yardımcı olur. Bu bağlamda çalışma, üç boyutlu dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip sıvı lityum akışkanın, manyetik alan etkisindeki akış özellikleri (hız ve sıcaklık) sayısal olarak incelenmiştir. Analizler, sonlu hacimler tekniğine dayalı, ANSYS ticari paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Araştırmada, MHD modülü ile dört farklı manyetik alan değeri (B=0 T – 0.05 T – 0.1 T – 0.15 T) için ağ bağımsızlıkları oluşturulmuş ve sonuçlar incelenmiştir. Sonuçlar, her bir manyetik alan değerinde, ağ yapısındaki hücre boyutlarının sonuçları etkilediğini -benzer bir sonuçta, dikdörtgen kesitli bir kanalda yapılan çalışmayla, rapor edilmiştir- ve en uygun ağ boyutunun tespiti için tüm manyetik alan değerlerinin ortak etkisinin göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermiştir. Özellikle manyetik alanın B=0 T olduğu durumdaki sonuçların sık ağa kadar tam uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ayrıca farklı ağ yapılarındaki manyetik alan değerlerinin referans değere göre %19 oranında sabit kaldığı ve bu ağ yapısının analiz için daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışma, dairesel kesitli kanallarda manyetik alan etkisi altındaki akışkan davranışının analizini ve ağ bağımsızlığının önemini vurgulayan önemli bir katkı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, benzer çalışmalarla desteklenerek manyetohidrodinamik etkileşimlerin akışkan dinamiği simülasyonları için ağ bağımsızlığının önemli etkilerini daha iyi anlamamıza ve gelecekteki mühendislik uygulamalarında kullanılmasına yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimler: Ağ bağımsızlığı, ANSYS, Fluent, Manyetik alan, Manyetohidrodinamik (MHD).

Investigation of Mesh Independence in Magnetohydrodynamic Flow Simulations: Circular Cross-Sectional Pipe Example

Abstract: This study focuses on two significant topics in the scientific and engineering fields: mesh independence and magnetohydrodynamics (MHD). Mesh independence is a method used in numerical analyses to determine the computational mesh's resolution weight. This concept is vital for understanding how simulation results may vary depending on the resolution. Magnetohydrodynamics (MHD) is a field that examines the interactions between electromagnetic effects and fluid dynamics, particularly the interaction of fluids with magnetic fields. Research in this area helps us understand the impact of magnetic fields on fluid behavior and analyze magnetohydrodynamic phenomena. In this context, the study numerically examines the flow properties (velocity and temperature) of a flow of liquid lithium, which has electrical conductivity, in a three-dimensional circular cross-section channel under the influence of a magnetic field. The analysis is carried out using the finite volume technique with the commercial software package ANSYS.

The research creates mesh independence for four different magnetic field values (B=0 T – 0.05 T – 0.1 T – 0.15 T) using the MHD module, and the results are examined. The findings indicate that at each magnetic field value, the results are influenced by the cell size in the mesh structure - a similar outcome was reported in a study conducted in a rectangular cross-section channel. Therefore, it is essential to consider the combined effect of all magnetic field values

to determine the most suitable mesh size. Specifically, the results for the case with B=0 T show a very close match with a dense mesh. Furthermore, it is observed that different mesh structures maintain a constant difference of approximately 19% compared to the reference value, indicating that this mesh structure is more suitable for analysis.

This study provides a significant contribution by analyzing the behavior of fluid under the influence of a magnetic field in circular cross-section channels and emphasizing the importance of mesh independence. The obtained results, supported by similar studies, will improve our understanding of the significant effects of mesh independence in simulating fluid dynamics with magnetohydrodynamic interactions and facilitate its application in future engineering practices.

Keywords: Mesh independence, ANSYS, Fluent, Magnetic field, Magnetohydrodynamics (MHD).

GİRİŞ

Manyetohidrodinamik (MHD), kelime anlamı itibariyle manyetik özelliğe sahip sıvıların hareketi anlamına gelmektedir. MHD bu anlamda, elektriksel iletkenliğe sahip akışkanların manyetik alan etkisi altındaki davranışlarını inceleyen disiplinler arası bir konudur. MHD alanında yapılan öncü çalışmalar şu şekilde sıralanabilir: İlk olarak 1832 yılında Londra'da bulunan Thames Nehrindeki elektriksel potansiyel farkı ölçmek isteyen Faraday, akımın çok küçük olmasından ve o günkü şartlarda yeterli teknolojik donanıma sahip olunamaması sebebiyle bunu başaramamıştır. Sonrasında 1937 yılında Hartmann, iki plaka arasındaki cıvanın manyetik alan etkisi altında akış davranışlarını incelemiştir. Ardından 1940 yılından Alfven manyetik alan altındaki iletken akışkanın akışkanlar mekaniğinde var olmayan yeni dalgaların yayıldığını tespit etmiştir (Yağcı, 2016).

MHD; denizaltıların, gemilerin ve insansız sualtı araçlarının sevk edilmesinde, sınır tabaka müdahalesi ile direncin ve gürültünün azaltılmasında, elektromanyetik izlerin azaltılmasında, özel maksatlı tulumbalarda, güç üretiminde (MHD jeneratörleri) ve akışın kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. MHD itki ve güç sistemlerinde, iletken akışkanları yalnızca elektrik ve manyetik alan ile itici güç oluşturarak kullanılmaktadır, bu sayede hareketli bir parçası (şaft, pervane vb.) bulunmayan sistemde aşınma ve gürültü gibi olumsuz etkiler bulunmamaktadır. MHD sistemlerinde hareketli parça yoktur, bu da iyi bir tasarımın sessiz, güvenilir ve verimli olabileceği anlamına gelmektedir. Ek olarak, MHD tasarımı, bir motor tarafından doğrudan tahrik edilen bir pervane ile aktarma organlarının birçok aşınma ve sürtünme parçasını da ortadan kaldırmış olur. MHD kullanılan bir deniz taşıtına örnek; 1991 yılında, dünyanın ilk tam boyutlu prototip Yamato 1 Haziran 1992'de Kobe Limanı'nda 15 km/sa'e varan hızlarda on altı yolcudan oluşan bir mürettebatı başarıyla taşımıştır. Sualtı MHD itiş gücü ile ilgili askeri araştırmalar, yüksek hızlı torpidoları, uzaktan çalıştırılan sualtı araçlarını (ROV: *Remotely operated underwater vehicle*), otonom sualtı araçlarını (AUV: *Autonomous underwater vehicle*), denizaltılar gibi daha büyük araçları da içermektedir. Uzay araştırmaları için manyetohidrodinamik kullanan plazma tahrik motorları da aktif olarak çalışılmıştır, çünkü bu tür elektromanyetik itme, aynı zamanda yüksek itme ve yüksek özgül itme sağlar ve itici gaz, kimyasal roketlerden çok daha uzun süre dayanır (URL-1, URL-2, URL-3, 2022).

MHD'nin sağlık alanına örnek çalışması; manyetik akışkan hipertermidir, ilk olarak manyetik nanoparçacık içeren bir akışkan tümöre enjekte edilir ardından uygulanan manyetik alan yardımı ile nanoparçacıkların ısı üretmesine dayanan ve tümörün tahribatı ile sonuçlanan kanser tedavi yöntemidir (Rinaldi, ve Latorre, 2009).

Manyetohidrodinamiğin astronomi ve jeofizikteki uygulamaları arasında; yıldızların ve gezegenlerin yapısı, güneş fırtınaları, gezegenler ve yıldızlararası madde, gezegenlerarası manyetik alan ve akışkan etkileşimleri, uzay iletişim sistemleri ve iyonosferde radyo dalgaları üretimi yer almaktadır (Zaloğlu, 2003).

2023 tarihinde Amerikan Savunma İleri Araştırma Projeleri Ajansı (DARPA) tarafından bir program oluşturuldu. PUMP (Denizaltı MHD Pompalarının İlkeleri) adındaki program; MHD tasarımlarını ölçeklendirmek için hidrodinamik, elektrokimya ve manyetikler dahil olmak üzere çoklu fizik modelleme ve simülasyon araçlarını bir araya getirecek ve doğrulayacaktır. Programın amacı, bir elektrot malzeme sistemi belirlemek ve ölçeklendirilebilen bir MHD sürücüsünün prototipini oluşturmaktır. DARPA'nın Savunma Bilimleri Ofisinde yönetici Susan Swithenbank: Bir manyetohidrodinamik sürüşte bugüne kadar gösterilen en iyi verimlilik, yaklaşık 4 Tesla'lık bir manyetik alan kuvveti kullanarak yaklaşık %30'luk bir verimlilikle 6,6 deniz mili elde eden 30 metrelik bir gemi olan Yamato-1'de 1992'de gerçekleştirildiğini, son birkaç yılda, ticari füzyon endüstrisi, bir manyetohidrodinamik sürücüde potansiyel olarak %90 verimlilik sağlayabilen 20 Tesla'ya kadar büyük ölçekli manyetik alanlar sergileyen nadir toprak baryum bakır oksit (REBCO) mıknatıslarında ilerleme kaydettiğini açıklamıştır (URL-4, 2023).

Bu çalışma kapsamında, manyetik alanın boru içi laminer akışa etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Dört farklı manyetik alan değerinde (B=0 T – 0.05 T – 0.1 T – 0.15 T) ve Re=1000 değerinde yapılan farklı ağ yapılarındaki çalışmada; hız profillerindeki değişimler incelenmiştir. Sayısal çalışmaya başlamadan önce literatürde daha öncesinde MHD ile ilgili çalışmanın doğrulaması yapılarak çözüm yönteminin doğruluğu teyit edilmiştir.

MHD doğrulama aşamasında literatürden farklı olarak; yarım kesitli boru geometrisinde, yapılandırılmış sınır tabaka ağı ile ve malzeme özellikleri program içerisindeki denklemler yardımıyla tanımlanarak çözülmüştür. Bu hususların literatürdeki çalışmadan farklı olmasının sebepleri şunlardır: Tam boru geometrisinde artık (*residual*) olarak tanımlanan terimlerin -verilen taşıyıcı (*transport*) denklem çözümlerinin tam çözümden sapma ölçütü- fazla olacağından yakınsama problemlerine neden olmaktadır, bu sebeple yarım kesitli boru tercih edilmiştir. Akış problemlerinde boru cidarındaki kaymama sınır şartı sebebiyle bu bölgedeki akışkan davranışlarının daha hassas incelenmesi gerekmektedir, bu sebeple hem yapılandırılmış ağ hem de cidara doğru sıklaşan ağ yapısının (*inflation*) uygulanması tercih edilmiştir.

MATERYAL YÖNTEM

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip bir akışkanın, ısıl olarak gelişmiş, hidrodinamik olarak gelişmekte olan atımlı akışta manyetik alanın, akış ve ısı transferi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma, sonlu hacimler tekniğine dayalı, ANSYS Fluent paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

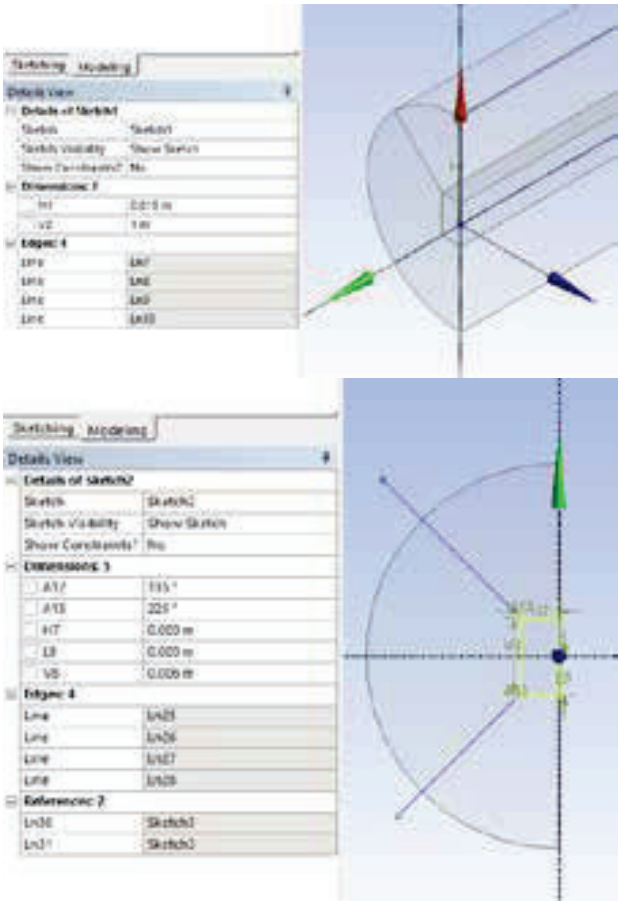
Sayısal analiz çalışmaları, mühendislik problemlerinde sıklıkla kullanılmakla beraber, deneysel çalışmalara göre daha pratik ve az maliyetli olduğundan, gerçek sonuçlara nispeten yakın sonuçlar sağlaması açısından, deneysel çalışmalardan önce veya birlikte kullanılmaktadır.

Sayısal analiz çalışmalarından birisi olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), akışkan hareketlerinin incelenmesinde ve ısı transferi uygulamalarında kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin ana parametrelerinden birisi ağ yapısı diğeri ise sınır koşullarıdır. Bu iki parametre ne kadar doğru ve gerçeğe yakın oluşturulursa sonuçlar da o kadar doğru çıkmaktadır. Analize başlamadan önce ağ yapısında ağdan bağımsız çözümün oluşturulması gerekmektedir. Uygun ağ yapısı ve yeterli miktarda düğüm noktası elde edilmelidir. Analizi yapılacak geometriye; uygun olmayan ağ yapısı, düşük veya çok fazla miktarda düğüm noktası ile yapılan çözümlerdeki sonuçlar yanıltıcı veya gerçek sonuçlardan uzak olabilir. Ayrıca çok fazla düğüm noktası içeren ağ yapısının analiz süresi de çok uzun olabilmektedir (Çengel ve Cimbala, 2020: 349).

HAD analizleri üç ana işlem basamağından oluşmaktadır. Bunlar; ön işlemci, çözümleyici ve son işlemcidir. Ön işlemci kısmında; analizi yapılacak geometrinin hazırlanması, geometriye uygun ağın oluşturulması ve sınır şartlarının tanımlanması yapılmaktadır. Çözümleyici kısımda; problemin hangi yöntem ile çözüleceğinin belirlenmesi (sonlu fark, sonlu hacim, sonlu elemanlar), ayrıklaştırma işlemi ve çözüm yer almaktadır. Son işlemci kısmında ise hesaplanan çözümlerin çeşitli grafikler veya şekiller vasıtası ile elde edilmesi sağlanmaktadır (Taşkesen, 2021: 35).

Geometrinin Oluşturulması

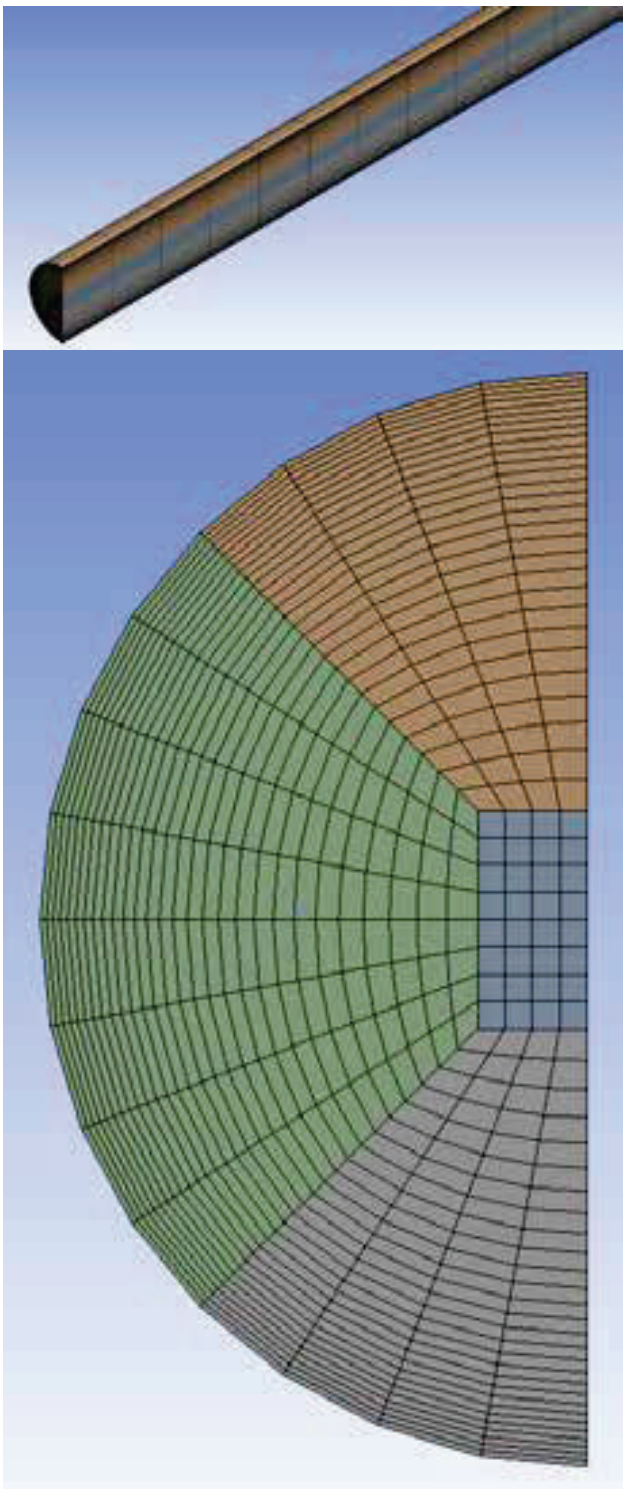
ANSYS Design Modeler kullanılarak, D=0.03 m ve L=1 m boyutlarında 3B yarım kesitli dairesel kanal geometrisi oluşturulmuştur. Ağ yapısı kısmında yapılandırılmış ağ kullanılacağından Şekil 1'de görüldüğü gibi geometri düzenlenmiştir. Boru merkezinde oluşturulan dikdörtgenin boyutlarının analiz sonuçlarını etkilediği çalışma sürecinde görülmüştür ve farklı ölçülerde çalışmalar yapılarak uygun ebatlar belirlenmiştir.



Şekil 1. ANSYS'de geometrinin oluşturulma görselleri

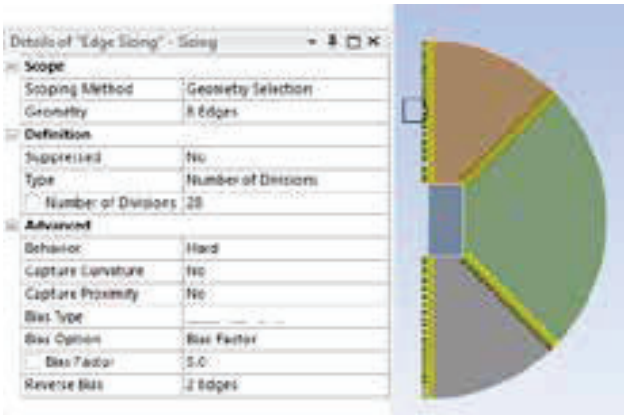
Ağ Yapısının Oluşturulması

Sayısal analizlerde en önemli kısım ağ yapısının (*mesh*) oluşturulmasıdır. Geometrinin yapısına göre uygun ağ şeklinin belirlenmesi, sayısal çözümdeki hataları azaltabilmekte ve zamandan tasarruf sağlayabilmektedir. Ağ şekli yapılandırılmış (*structured mesh*) ve yapılandırılmamış ağ (*unstructured mesh*) olarak ayrılmaktadır. Yapılandırılmamış ağ yapısı daha kolay oluşturulabilmektedir ancak birtakım hatalara yol açmakta ve daha fazla sayıda düğüm noktası oluşturmaktadır. Boru cidarındaki kaymama şartı nedeniyle cidara yakın bölgelerde istenilen hassasiyette çözüm yapılamamaktadır. Bu sebeple, sınır tabaka ağı ile birlikte, akış değişkenlerinin hesaplanacağı hücreleri tanımlayacak ağın yapılandırılmış olması tercih edilmektedir. Bu çalışmada, Şekil 2'de gösterildiği gibi yapılandırılmış ağ uygulanmıştır.

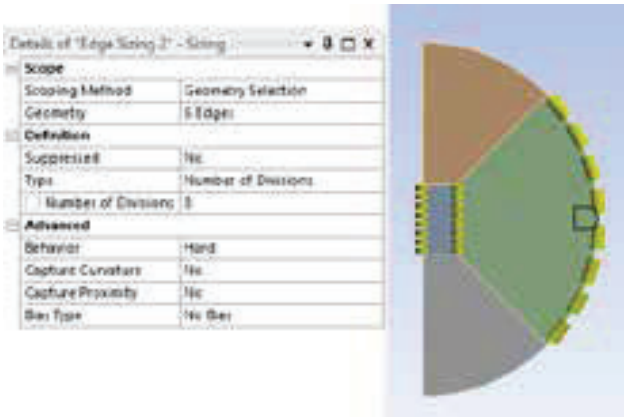


Şekil 2. Yapılandırılmış ağ görüntüsü

Sayısal çalışmalarda bir diğer önemli husus yapılan çözümlerin ağ bağımsızlığının gösterilmesidir. Her ne kadar ağ yapısı düzgün oluşturulsa da ideal yapı sağlanamamaktadır veya yapılan ağın uygun olup olmadığının denetlenmesi gerekmektedir. Bu sebeple analiz çözümlerine geçmeden önce ağ bağımsızlık testleri (*mesh independence test*) yapılmaktadır. Bu çalışmada yapılacak ağ bağımsızlığı testleri için, geometriyi oluşturan kenarlar belirli oranlarda bölünmüştür (Şekil 3-4-5-6).



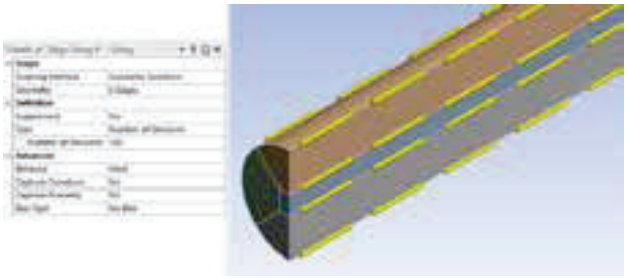
Şekil 3. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 1



Şekil 4. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 2



Şekil 5. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 3



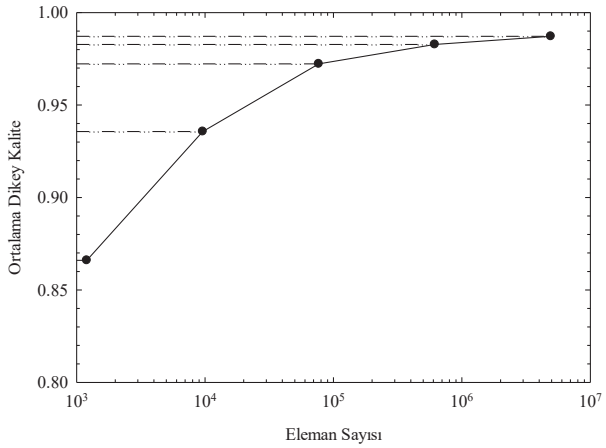
Şekil 6. Ağın yapılandırılmasında kullanılan kenar boyutlandırma işlemi 4

Oluşturulan kenar boyutlandırmaları (*edge sizing*) ile parametrik çalışma yapılmıştır ve boyutlandırma sonucu oluşan değerler Tablo 1'de belirtilmiştir.

Tablo 1. Ağ yapılarının eleman sayılarına göre değişimi

Eleman Sayısı	Hız (m/s)	Ağ Yapısı
1.20E+03	0.090	Çok Kaba
9.60E+03	0.091	Kaba
7.68E+04	0.092	Orta
6.14E+05	0.092	Sık
4.92E+06	0.092	Çok Sık

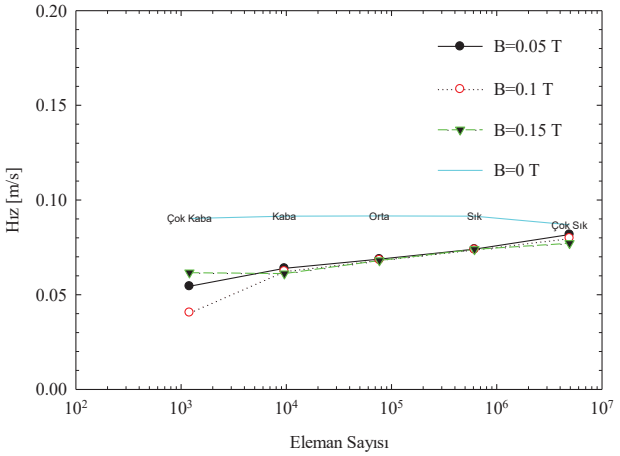
Ağ yapısında bakılması gereken bir diğer husus hücre kaliteleridir. Bunlardan sıklıkla kullanılanları; hücrelerin en-boy oranı (*aspect ratio*), çarpıklık (*skewness*) ve skewness değerinin tersi olan orthogonal quality değeridir. İdeal dikey kalite (*orthogonal quality*) değeri 1'dir ve hesaplanan değerler 1'e yaklaştıkça kalitenin arttığını ifade etmektedir. Çalışmamızdaki dikey kalite değerleri Şekil 7'de belirtildiği gibidir.



Şekil 7. Eleman sayısına göre ortalama dikey kalite grafiği

Yapılan ağ bağımsızlık testleri, boru çıkışındaki eksenel hız değerleri hesaplanarak oluşturulmuştur ve sonuçlar Şekil 8'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre en uygun hücre yapısının "sık ağ" olduğu sonucuna varılmıştır ve bundan sonraki hesaplamalar bu ağ boyutunda gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada manyetik alan uygulandıktan sonra da ağ bağımsızlık testleri yapılmıştır.



Şekil 8. MHD ağ bağımsızlık testleri hız değerleri

Manyetik alan altındaki ağ bağımsızlık test değerleri Şekil 8'de görülmektedir. Bu sonuçlara göre; manyetik alan uygulanmadan ve B=0 T değerindeki sonuçların; sık ağa kadar tam uyum içerisinde olduğu ancak çok sık ağda, yakınsama kriterleri sebebi ile tam uyum içerisinde olmadığı görülmüştür.

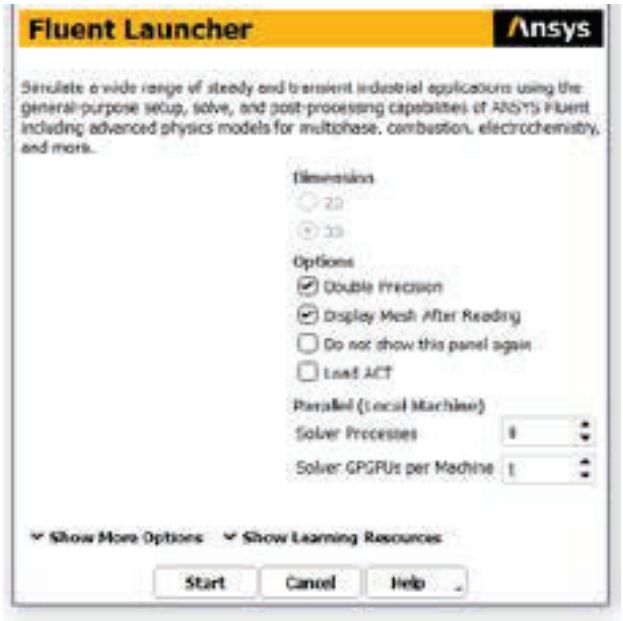
Farklı ağ yapılarındaki manyetik alan değerlerinin referans (B=0 T) değerinden sapma oranları Tablo 2'de görülmektedir. Veriler incelendiğinde, sık ağ yapısında, diğer manyetik alan değerlerinin referans değere göre %19 ile sabit kaldığı görülmektedir. Sonuç olarak bu ağ yapısının analiz için daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Farklı ağ yapılarındaki manyetik alan değerlerinin referans değerden sapma oranları

Ağ Yapısı	B=0.05 T	B=0.1 T	B=0.15 T
Çok Kaba	40%	55%	32%
Kaba	30%	32%	33%
Orta	25%	25%	26%
Sık	19%	19%	19%
Çok Sık	6%	8%	11%

Sınır Koşullarının Belirlenmesi ve Analiz

Sayısal çalışmada, sınır koşullarının belirlenmesi ve problemin çözdürülmesi bu aşamada gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmadaki çözümler; 3B, çift hassasiyet (*double precision*) ve çözümlerin hızlı olabilmesi için 8 paralel çekirdek ve 1 ekran kartı kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. ANSYS Fluent ayar menüsü

Bu çalışma; zamana bağlı olarak, laminer akış şartlarında ve MHD modülü kullanılarak manyetik alan uygulaması ile çözülmüştür. MHD modülünün etkinleştirilmesi Ek 1.'de belirtilmiştir. MHD modülü ayarları Şekil 10'da görülmektedir.





Şekil 10. MHD model ayarları

Bu çalışmada akışkan olarak, yüksek elektrik iletkenliği ve analiz sırasında sürekli akmaya uygun viskozitesi nedeniyle sıvı lityum seçilmiştir. Malzeme özellikleri (yoğunluk, ısı iletkenliği ve dinamik viskozite), ANSYS Fluent programı içerisinde denklem (*expression*) oluşturabilme özelliği kullanılarak, Şekil 11'deki gibi tanımlanmıştır. Özgül ısı değeri ise, program içerisinde denklem oluşturabilme özelliğinin olmaması nedeniyle, polinom (*polynomial*) olarak tanımlanmıştır.



Şekil 11. Malzeme özellikleri tanımlama görüntüsü

Sıvı lityumun fiziksel özellikleri sıcaklığa bağlı ($300 \leq T \leq 600$ K) ampirik ilişkiler şeklinde aşağıdaki Eş. (1-2-3-4)'de verilmiştir (Selimli, 2015):

$$\rho = 558.4[kg/m\hat{}3] - 0.101[kg\ /\ m\hat{}3.K\hat{}(-1)] * StaticTemperature \quad (1)$$

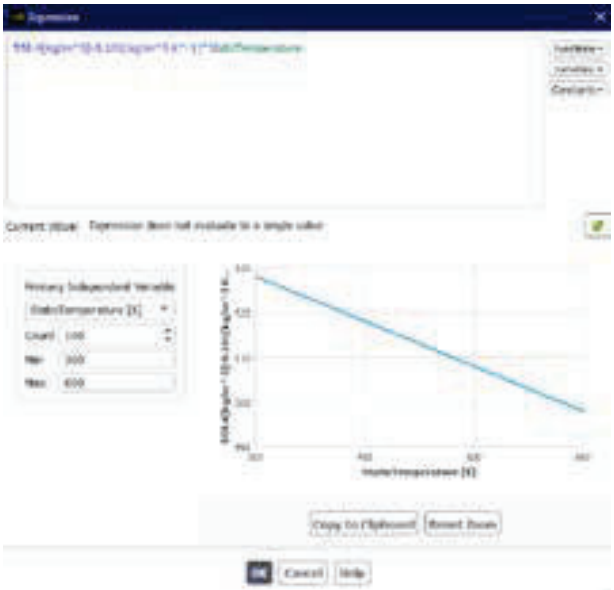
$$C_p = 5714.5 - 4.417T + 0.0033T\hat{}2 \quad (2)$$

$$k = 21.42[W/m.K] + 0.0523[W/m.K\text{^}2] * StaticTemperature - 1.371E-5[W/m.K\text{^}3] * StaticTemperature\text{^}2 \quad (3)$$

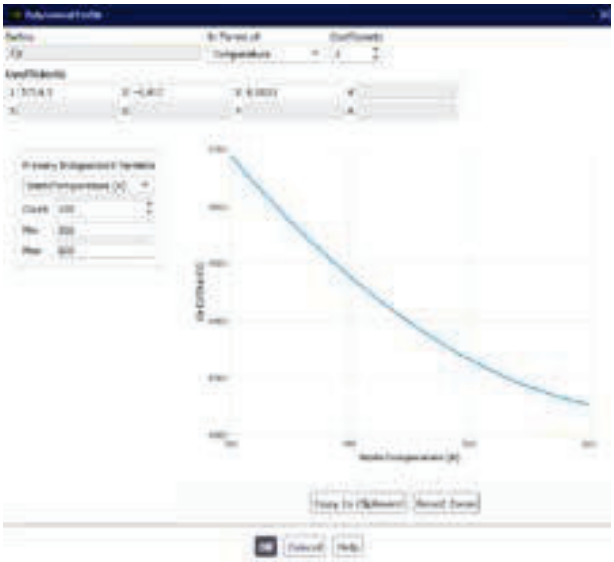
$$\mu = 0.0015[Pa.s] - 3E-6[Pa.s/K] * StaticTemperature + 2E-9[Pa.s/K\text{^}2] * StaticTemperature\text{^}2 \quad (4)$$

Bu eşitliklerde:
ρ: Yoğunluk [kg/m3],
C_p: Özgül ısı [J/kg K],
k: Isıl iletkenlik [W/m K],
μ: Dinamik viskoziteyi [kg/m s] ifade etmektedir.

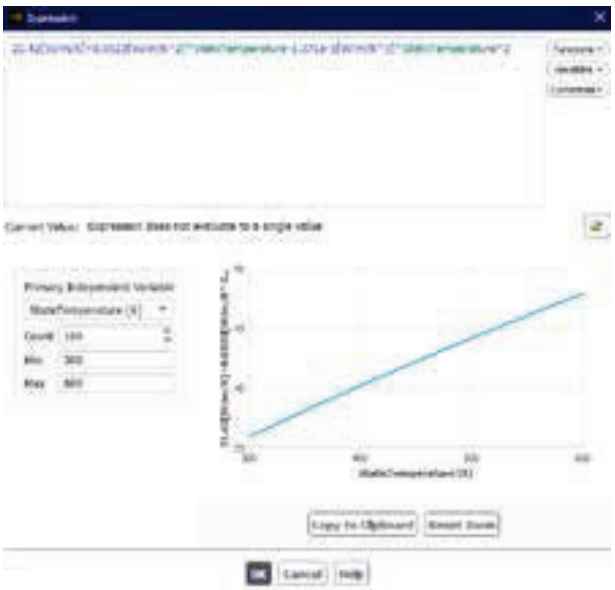
Belirtilen denklemlerin programa tanımlanmaları Şekil 12-13-14-15'te gösterilmiştir.



Şekil 12. Yoğunluk değişiminin tanımlanması



Şekil 13. Özgül ısının tanımlanması



Şekil 14. Isı iletim katsayısının tanımlanması



Şekil 15. Dinamik viskozitenin tanımlanması

Sıvı lityuma ait elektrik iletkenliği (Eş. 9) ve manyetik geçirgenliği (Eş. 10) değerleri sabit (*constant*) olarak tanımlanmıştır.

$$\frac{1}{\rho_e} = 4x10^6 \quad (9)$$

$$\mu_e = 1.2x10^{-6} \quad (10)$$

Bu eşitliklerde:
$1/\rho_e$: Elektriksel iletkenlik [S/m],
μ_e: Manyetik geçirgenliğini [H/m] ifade etmektedir.

Bu çalışmada kullanılan sınır koşulları; giriş (*inlet*) ve yüzey (*wall*) sıcaklıkları sabit kabul edilmiştir ve sırasıyla şu şekildedir: T_i = 300 K ve T_w = 573.15 K.

Analizlerde sabit ısı akısı kabulü gerçek koşullara daha uygun olmaktadır ancak sabit yüzey sıcaklığı, ısı depolama gibi faz değiştiren sistemlerde (faz değişiminde sıcaklığın sabit kalması sebebiyle) ve MHD

gibi özel durumlarda daha uygun bir kabuldür ve çalışmada bu prensip benimsenmiştir.

Hesaplamalarda, laminer akış şartlarında çözüm yapılacağı için Re = 1000 kabul edilmiştir ve giriş hız Eş. (11)'de hesaplanmıştır.

$$Re = (Atalet\ kuvvet)/(Viskoz\ kuvvet) = \rho xDxU/\mu = 528.1x0.03xu/(7.8x10\text{^}(-4)\ ) = 1000 \rightarrow u = 0.04923 \quad (11)$$

Bu eşitlikte:
Re: Reynolds sayısı,
ρ: Yoğunluk [kg/m3],
D: Boru çapı [m],
u: Hız [m/s],
μ: Dinamik viskoziteyi [kg/m s] ifade etmektedir.

Bu çalışma kapsamında akışın ısıl olarak tam gelişmiş, hidrodinamik olarak gelişmekte olan bölgedeki davranışları incelenmiştir. Hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının ısıl sınır tabaka kalınlığına oranını temsil eden, boyutsuz bir parametre olan Prandtl sayısı ile ısıl ve hidrodinamik gelişme uzunlukları Eş. (12-13 ve 14)'de ifade edilmiştir.

$$Pr = Viskoz\ difüzyon/Isıl\ difüzyon = (C_p\mu)/k = (4686.4x7.8x10\text{^}(-4))/35.88 = 0.102 \quad (12)$$

$$L_t = 0.05xRexDxPr = 0.05x1000x0.03x0.102 = 0.153\ m \quad (13)$$

$$L_h = 0.05xRexD = 0.05x1000x0.03 = 1.5\ m \quad (14)$$

Bu eşitliklerde:
Pr: Prandtl sayısı,
C_p: Özgül ısı [J/kg K],
μ: Dinamik viskoziteyi [kg/m s],
k: Isıl iletkenlik [W/m K],
L_t: Isıl gelişme uzunluğu [m],
Re: Reynolds sayısı,
D: Boru çapı [m],
L_h: Hidrodinamik gelişme uzunluğunu [m] ifade etmektedir.

Analizlerde; süreklilik, momentum ve enerji denklemleri için yakınsama kriterleri 10^{-6} olarak tanımlanmıştır. Çözüm yöntemi Tablo 3'te belirtilmiştir.

Tablo 3. Analiz çözümünde kullanılan ayrıklaştırma yöntemleri

Parametre	Yöntem
Basınç-Hız İlişkisi	Basit (*Simple*)
Basınç	İkinci Derece (*Second Order*)
Momentum	İkinci Derece (*Second Order*)
Enerji	İkinci Derece (*Second Order*)
Zaman Formülasyonu	İkinci Derece Kapalı (*Second Order Implicit*)

Sayısal analizin son aşaması sonuçlar kısmıdır. Buradan elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde irdelenecektir. Elde edilen sonuçların boyutlardan bağımsız olması için hız, sıcaklık ve boru çapı değerleri boyutsuz olarak grafikler ile sunulmuştur.

Boyutsuz sayıların kullanılmasının temel sebepleri, problemdeki parametre sayısının az olması ve parametreler arasındaki ilişkilerin kavranmasını sağlamaktır. Bu sebeple yapılan çalışmada boyutsuz hız ve sıcaklıklardan ve diğer boyutsuz sayılardan yararlanılmıştır. Boyutsuz hız Eş. (15) ile elde edilmektedir.

$$u^* = u/u_{ort} \quad (15)$$

Bu eşitliklerde:
u^*: Boyutsuz hız,
u: Anlık hız [m/s],
u_{ort}: Ortalama hızı [m/s] ifade etmektedir.

Boyutsuz sıcaklık için logaritmik ortalama sıcaklık farkı, Eş. (17-18) yardımıyla, Eş. (16) ile elde edilmiştir.

$$\Delta Tln = (\Delta T_e - \Delta T_i)/ln(\Delta T_e/\Delta T_i) \quad (16)$$

$$\Delta T_e = T_s - T_e \quad (17)$$

$$\Delta T_i = T_s - T_i \quad (18)$$

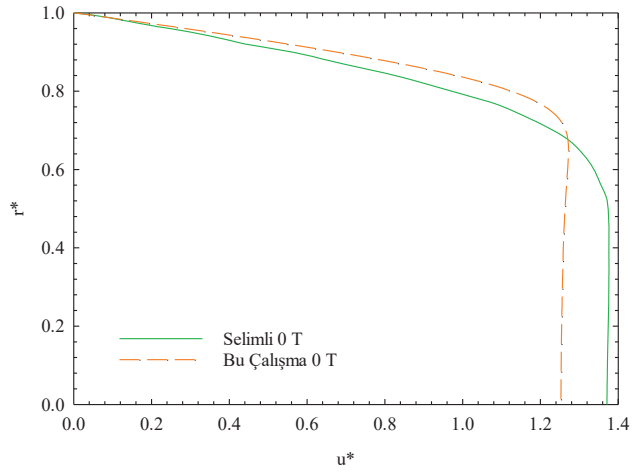
Bu eşitlikte:
ΔTln: Logaritmik ortalama sıcaklık farkı [K],
ΔT_e: Borunun çıkışında yüzeyle akışkan arasındaki sıcaklık farkı [K],
ΔT_i: Borunun girişinde yüzeyle akışkan arasındaki sıcaklık farkı [K],
T: Yüzey sıcaklığı [K],
T_i: Giriş sıcaklığı [K],
T_e: Çıkış sıcaklığını [K] ifade etmektedir.

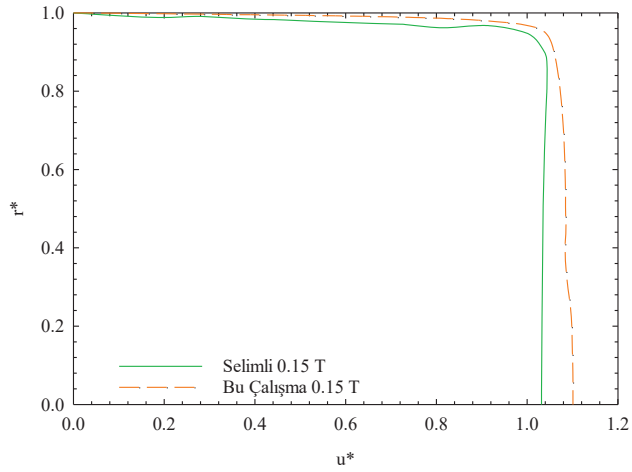
Boyutsuz sıcaklık Eş. 19 ile elde edilmektedir.

$$\theta^* = T\ /\ (T_s - T_m\ ) = T/\Delta Tln \quad (19)$$

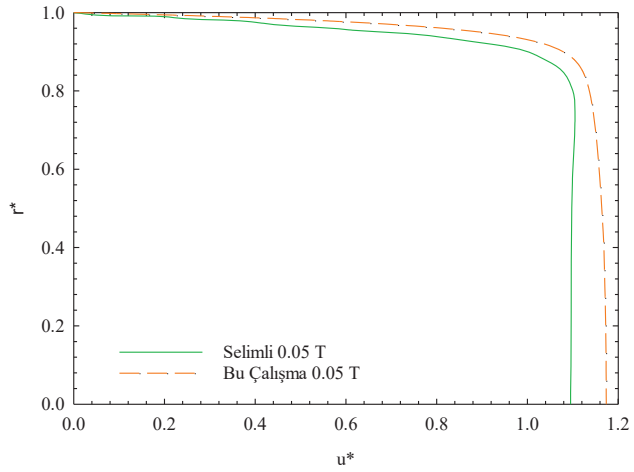
MHD için Sayısal Modelin Doğrulama Çalışmaları

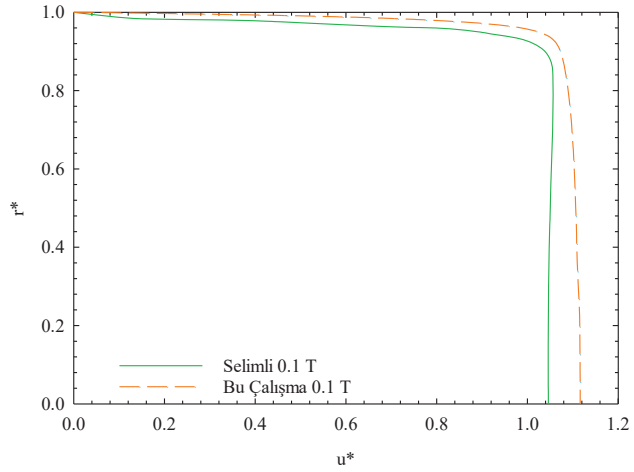
Bu çalışmada MHD uygulanarak yapılan çözüm yönteminin doğruluğu, literatürde daha önce -Selimli (2015) tarafından- yapılmış farklı bir çalışma ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Her iki çalışmada da akışkan olarak elektrik iletkenliğine sahip sıvı lityum kullanılmıştır ve benzer sınır koşulları ile Re=2200 değerinde laminer akış şartlarında çözümler yapılmıştır.

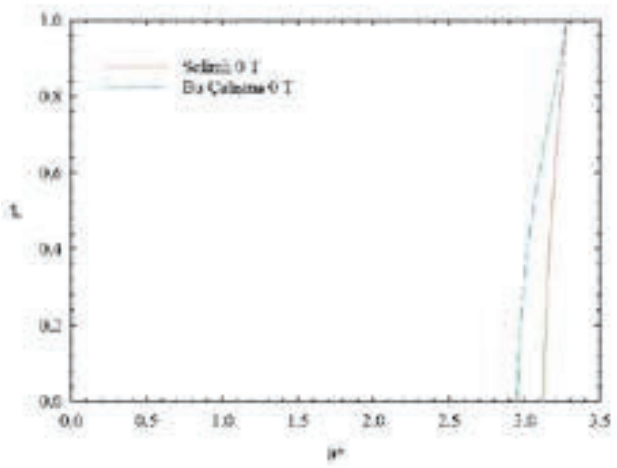


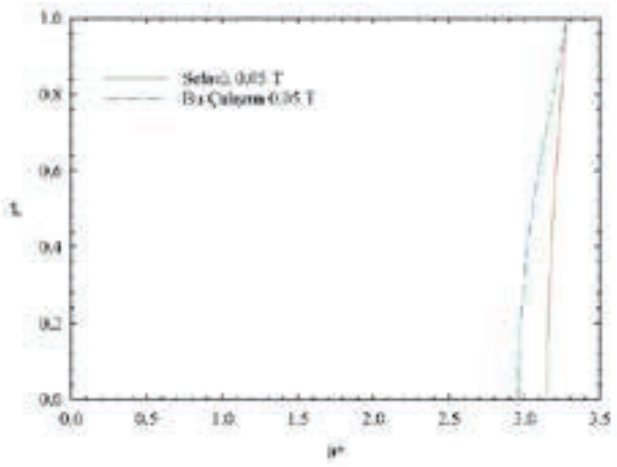


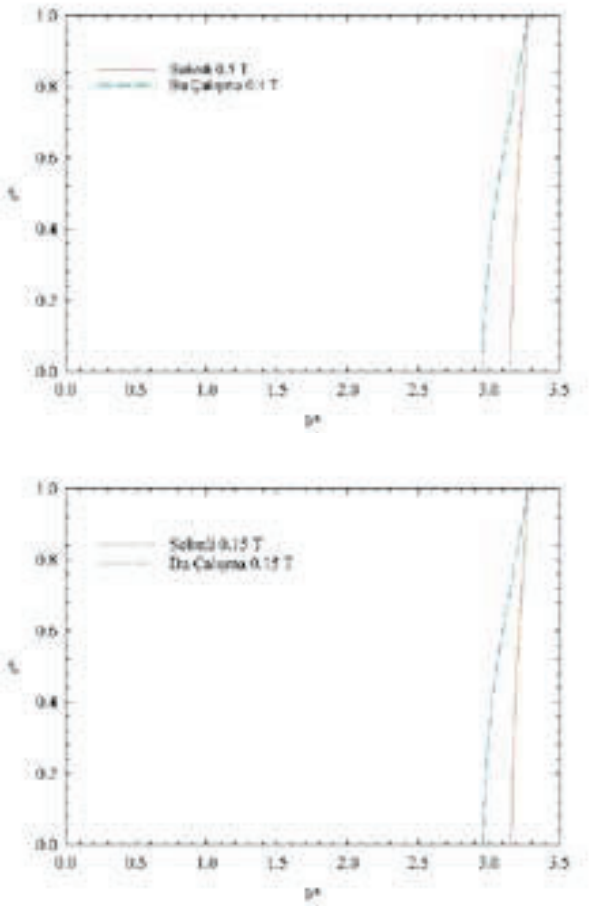
Şekil 16. MHD etkisindeki boyutsuz hız profillerinin literatür ile karşılaştırılması











Şekil 17. MHD etkisindeki boyutsuz sıcaklık profillerinin literatür ile karşılaştırılması

Analiz sonuçlarının literatürdeki çalışma ile karşılaştırılması Şekil 16 ve 17'de görülmektedir. Boru girişinden 0.12 m mesafeden alınan hız ve sıcaklık profillerinin tam uyum içerisinde olmamasının sebepleri; boru geometrisinden, ağ yapısından ve malzeme özelliklerini tanımlama biçiminden kaynaklanmaktadır. Literatürdeki çalışma, tam boru geometrisinde, yapılandırılmamış ağ şeklinde ve malzeme özellikleri UDF tanımlanarak çözümlenmiştir. Bu çalışmada ise, yarım kesitli boru geometrisinde, yapılandırılmış sınır tabaka ağı ile ve malzeme özellikleri program içerisindeki denklemler yardımıyla tanımlanarak çözülmüştür. Bu hususların farklı olmasının sebepleri şunlardır: Tam boru geometrisinde artık (residual) olarak tanımlanan terimlerin -verilen taşıyıcı (*transport*) denklem çözümlerinin tam çözümden sapma ölçütü- fazla olacağından yakınsama problemlerine neden olmaktadır, bu sebeple yarım kesitli boru tercih edilmiştir. Akış problemlerinde boru cidarındaki kaymama sınır şartı sebebiyle bu bölgedeki akışkan davranışlarının daha hassas incelenmesi gerekmektedir, bu sebeple hem yapılandırılmış ağ hem de cidara doğru sıklaşan ağ yapısının (*inflation*) uygulanması tercih edilmiştir.

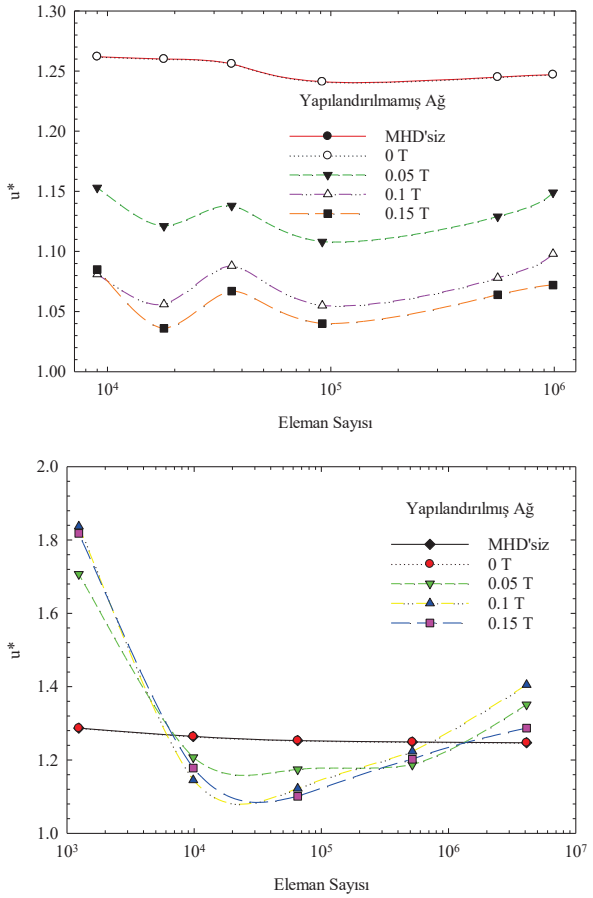
BULGULAR ve TARTIŞMALAR

Bu çalışmada iki önemli bulgu irdelenmiştir: Manyetik alan uygulamasında ağ bağımsızlığının önemi ve çalışmanın bir diğer bulgusu olan, manyetik alanın akış özelliklerine etkisidir.

MHD Çalışmalarında Ağ Bağımsızlığın Önemi

Elektrik iletkenliğine sahip sıvı lityum akışkanına uygulanan manyetik alan sonucunda ulaşılan bulgular bu bölümde incelenmiştir.

Doğrulama çalışması yapıldıktan sonra ağ şekli akış analizlerine uygun olarak yapılandırılmış ve dört farklı manyetik alan değerinde (B=0 T, 0.05 T, 0.1 T ve 0.15 T) analizler yapılmıştır.



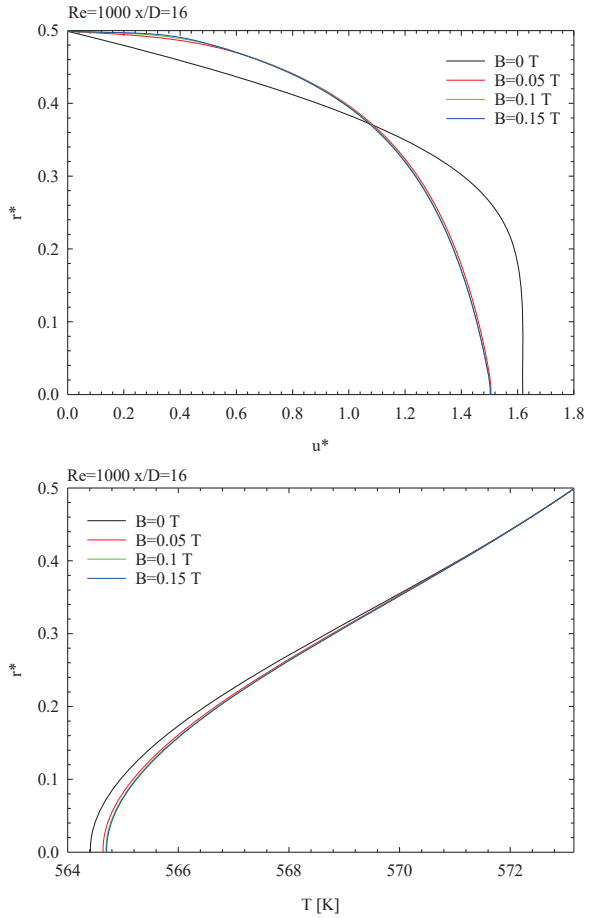
Şekil 18. Ağ yapısına göre ağdan bağımsızlık grafikleri

Bu analizde; MHD modülü kullanılırken parametrik çalışmanın yapılamadığı, her bir manyetik alan değerinde ve her bir ağ boyutunda analizlerin birer birer koşturulması gerektiği görülmüştür. Şekil 18'deki sonuçlara göre, MHD modülü etkinleştirilmeden önce ve etkinleştirilerek oluşturulan B=0 T değerindeki sonuçların tam uyum içerisinde oldukları görülmektedir. B=0 T ile diğer manyetik alan değerlerinde oluşan eğrilerin aynı olmadığı ve bu sebeple manyetik alan uygulandıktan sonra tekrar ağ bağımsızlık testlerinin yapılması gerektiği görülmüştür. Benzer bir sonuçta, Mousavi vd. (2016) tarafından dikdörtgen kesitli bir kanalda yapılmış olup, manyetik alan uygulanmasıyla

sonuçların ağ sayısına göre değişiklik gösterdiği rapor edilmiştir. Bu bağlamda, dairesel kesitli kanallarda benzer bir araştırmanın yapılmadığı görülmüş ve bu çalışma literatüre kazandırılmıştır.

Manyetik Alanın Akış Özelliklerine Etkisi

Çalışmamızın ana odağı ağ bağımsız çalışmalar olmasına rağmen bir diğer bulguya daha ulaşılmıştır. Uygulanan manyetik alanların akışkan özelliklerine etkisi Şekil 19'da belirtilmiştir.



Şekil 19. Manyetik alanın akış özelliklerine etkisi

Dört farklı manyetik alan (B=0 T – 0.05 T – 0.1 T – 0.15 T) değerinde analizler yapılarak, ilk manyetik alan değerinde (B=0.05 T) akışkan davranışlarında gözle görülür bir etkinin olduğu, ancak yüksek manyetik alan değerlerinin akış davranışlarına çok fazla etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun sebebi, manyetik alanın artmasıyla akışkanın oluşturduğu direnç kuvvetlerinin artmasıdır. Bu direnç Lorentz kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. Lorentz kuvvetleri; cidara yakın yerlerde akış doğrultusunda etki ederek akışı hızlandırdığı, ancak boru merkezine doğru ilerledikçe akışa zıt yönde etki ettiği için akışı yavaşlattığı görülmektedir (Yağcı, 2016).

SONUÇLAR

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir kanal içerisinde akmakta olan elektrik geçirgenliğine sahip akışkanın, ısıl olarak gelişmiş, hidrodinamik olarak gelişme bölgesinde, manyetik alanın, ağ bağımsızlığına ve akış özelliklerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

Manyetohidrodinamik (MHD) etkileri, laminer boru akışında akışkan davranışları üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Akışkan içinde hareket eden yüklerin davranışı, manyetik alanın şiddeti tarafından belirgin şekilde değiştirilmektedir. Bu nedenle, ağdan bağımsızlık çalışmalarında manyetik alanın etkisinin göz ardı edilmemesi son derece önemlidir. Farklı manyetik alan değerleri için yapılan analizler, ağ yapısındaki hücre boyutlarının sonuçlar üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. En uygun ağ boyutunu belirlemek için, tüm manyetik alan değerlerinin toplu etkisinin dikkate alınması gerekmektedir. Özellikle sık ağ yapısında, diğer manyetik alan değerlerinin referans değere (B=0 T) göre %19 oranında sabit kaldığı gözlemlenmiş ve bu ağ yapısının analiz için daha elverişli olduğu belirlenmiştir. Bu bulgu, manyetik alanın akışkan davranışları üzerindeki etkisinin ve uygun ağ boyutunun belirlenmesinde dikkate alınması gereken önemli faktörleri vurgulamaktadır. Sonuç olarak, manyetik alanın akışkanlar üzerindeki etkisi, MHD etkilerini anlamak ve uygun ağ yapısını belirlemek açısından dikkate değer bir öneme sahiptir.

Makalenin odağını ağ bağımsızlı oluşturmasına rağmen, önemli sonuçlarından bir diğeri ise, ilk manyetik alan değeri (B=0.05 T) altında akışkan davranışlarında açıkça gözlemlenebilir bir etkinin olduğudur; ancak yüksek manyetik alan değerlerinin akış davranışları üzerinde önemli ölçüde etki oluşturmadığıdır. Bu bulgu, MHD etkisinin akışkan davranışlarına duyarlı olduğunu göstermektedir, ancak manyetik alanın etkisini artırmak için aşırı yüksek değerlere ihtiyaç olmadığı anlamına gelir. Dolayısıyla, çalışmada ele alınan süreçlerin anlaşılması ve uygun ağ yapısının belirlenmesi için, özellikle ilk manyetik alan değeri altında yapılacak analizlerin önemli olduğu sonucuna varılabilir. Yüksek manyetik alan değerlerinin akışkan davranışları üzerindeki sınırlı etkisi, uygulamalı MHD sistemleri için önemli bir keşif olup, bu alanda ileri çalışmalar için temel bir anlayış sunmaktadır.

Bu çalışmaya ilave olarak; farklı akışkan, frekans, genlik, manyetik alan ve Reynolds sayılarında çalışmalar yapılarak etkilerinin incelenmesi önerilmektedir.

SEMBOLLER

D	: Boru çapı [m]
ϑ	: Kinematik viskozite [m^2/s]
Re	: Reynolds sayısı [$V\rho D/\mu$]
ρ	: Yoğunluk [kg/m^3]
Cp	: Özgül ısı [J/kg.K]
k	: Isıl iletkenlik [W/m.K]
μ	: Dinamik viskozite [kg/m.s]
$1/\rho e$	: Elektriksel iletkenlik [S/m]
μe	: Manyetik geçirgenlik [H/m]
r	: Boru yarıçapı [m]

Pr : Prandtl sayısı $[(C_p\mu)/k]$
Lt : Isıl gelişme uzunluğu [m]
Lh : Hidrodinamik gelişme uzunluğu [m]
u* : Boyutsuz hız $[u/u_{ort}]$
ΔTln : Logaritmik ortalama sıcaklık farkı [K]
θ^* : Boyutsuz sıcaklık $[T/\Delta Tln]$

KAYNAKLAR

Çengel, Y. A. ve Cimbala J. M., 2020, Isı ve Kütle Transferi. (3. Baskıdan Çev. T. Ergin), Palme Yayınevi.

Mousavi, S. M., Farhadi, M., Sedighi, K., 2016, Effect Of Non-Uniform Magnetic Field On Biomagnetic Fluid Flow In A 3d Channel, *Applied Mathematical Modelling*, 40, 7336–7348.

Rinaldi, C., Latorre M., 2009, Applications Of Magnetic Nanoparticles In Medicine: Magnetic Fluid Hyperthermia. *PRHSJ*, 28(3), 227-238.

Selimli, S., 2015, *Computatıonal Hydrodynamic And Heat Transfer Analysis Of Magnetohydrodynamic Internal Flow.* Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Taşkesen, E., 2021, *Sabit Manyetik Alan Etkisi Altında Dairesel Kesitli Kanal İçerisinde Akan Ferro Nanoakışkanın Akış ve Isı Transferi Karakteristiklerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi.* Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.

URL-1, 2022, https://alarga.uskudar.biz/kemere/b%c3%a2li-kaptan.html.

URL-2, 2022, https://tr.wikipedia.org/wiki/Manyetik_hidrodinamik.

URL-3, 2022, https://en.wikipedia.org/wiki/Yamato_1.

URL-4, 2023, https://www.darpa.mil/news-events/-2023-05-18.

Yağcı, E., 2016, *İç Akışta Manyetik Alan Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Zaloğlu, A., 2003, *Paralel İki Levha Arasındaki Rivlin-Ericksen Akışlarının MHD Radyal Titreşimli Akışı*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

EKLER

Ek 1. MHD modülünün etkinleştirilmesi

/define/models> addon-module
Fluent Addon Modules:
0. None
1. MHD Model
2. Fiber Model
3. Fuel Cell and Electrolysis Model
4. SOFC Model with Unresolved Electrolyte
5. Population Balance Model
6. Adjoint Solver
7. Single-Potential Battery Model
8. MSMD Battery Model
9. PEM Fuel Cell Model
10. Macroscopic Particle Model
11. Reduced Order Model
12. PCB Model
Enter Module Number: [0] 1