

## Dairesel bir kanalda soğutma şartları altında MHD sıvı lityum akışın sayısal olarak incelenmesi

### Numerically investigation of MHD liquid lithium flow under cooling conditions in a circular channel

Murat ERDEM<sup>1\*</sup>, Müjdat FIRAT<sup>2</sup>, Yasin VAROL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Elektrik ve Enerji Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.

[muratrdm01@gmail.com](mailto:muratrdm01@gmail.com)

<sup>2</sup>Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.

[mujdatfirat@gmail.com](mailto:mujdatfirat@gmail.com)

<sup>3</sup>Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.

[yvarol@gmail.com](mailto:yvarol@gmail.com)

Geliş Tarihi/Received: 07.03.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 02.11.2017

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2017.27146

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

*Bu çalışmada, lityum sıvısı dıştan manyetik alan indüksiyonuna maruz bırakılan üç boyutlu dairesel bir kanalda sayısal olarak incelenmiştir. Manyetik alan, kanala akış yönüne dik olarak uygulanmıştır.  $Re=2250$  ve manyetik alan kuvveti sırasıyla  $0T$ ,  $0.04T$ ,  $0.08T$  ve  $0.12T$  olarak seçilmiştir. Bunun yanında, akışkan sıcaklığı  $473.15$  K iken cidar sıcaklığı  $373.15$  K'dir. Hesaplamalar ANSYS-Fluent ticari yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Manyetik alanın akışkan hızı, basınç ve sıcaklık üzerindeki etkileri grafiksel olarak sunulmuştur. Manyetik alan etkisinin akışkan hızını azaltırken, basıncı artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, manyetik alan boru uzunluğu boyunca kanalın farklı bölgelerinde, sıcaklığı farklı şekilde etkilediği gözlemlenmiştir.*

**Anahtar kelimeler:** MHD, Manyeto-hidrodinamik, Zorlanmış taşınım, Sıvı lityum soğutma, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

#### Abstract

*In this study, the lithium fluid was numerically analyzed in a three-dimensional circular channel exposed to external magnetic field induction. The magnetic field is applied perpendicular to the flow direction of the channel.  $Re=2250$  and the magnetic field strength was selected as  $0T$ ,  $0.04T$ ,  $0.08T$  and  $0.12T$ , respectively. Besides, while the fluid temperature is  $473.15$  K, the wall temperature is  $373.15$  K. Calculations were performed with ANSYS-Fluent commercial software. The effect of the magnetic field on the fluid velocity, pressure and temperature has presented graphically. While the magnetic field seriously has reduced the fluid velocity, the pressure has observed to increase. Also, it has been observed that the magnetic field affects the temperature differently in different regions of the channel along the pipe length.*

**Keywords:** MHD, Magneto-hydrodynamics, Forced convection, Liquid lithium cooling, Computational fluid dynamic (CFD)

## 1 Giriş

Elektriksel iletkenliğe sahip akışkanların, uygulanan manyetik alanın etkisiyle akış ve ısı transferi karakteristiklerinde önemli değişiklikler meydana geldiği bilinmektedir. Literatürde birçok amaç için akışkana dıştan manyetik alan kuvveti uygulanmıştır. Bunlardan bir tanesi de soğutma amacıyla yapılan doğal ve zorlanmış taşınım olaylarıdır. Soğutma, mikro elektronik, taşımacılık ve imalat sektörünü de içeren birçok farklı alanda uygulanabilen, endüstriyel alandaki en önemli konulardan bir tanesidir [1].

Mikro kanallar ve mikro tüplerdeki akış ve ısı transferi karakteristikleri, mikro-total elektronik sistemleri ve mikro elektronik sistemlerin hızlı gelişmelerinden dolayı araştırmacıların ilgisini çok fazla çekmektedir. Bu gelişmeler, tıp bilimi, insan genomu projeleri, biyo-mühendislik, mikro ısı değiştirgeçleri ve mikro elektronik soğutma teknikleri üzerinde büyük bir etkiye sahiptir [1]. Bu konuyla ilgili literatürde yer alan bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir.

Gajbhiye ve Eswaran [2], daraltılmış pürüzsüz dikdörtgen bir geometride ısı transferi ve MHD akış simülasyonunu numerik olarak araştırmışlardır. Problemden kullanılan yönetici denklemleri sonlu hacim yöntemine dayalı ANUPARAVAHA programını kullanarak çözmüşlerdir. Modelin alt tarafı ısıtılırken üst taraf soğuk tutulmuş ve yan duvarları da izole

edilmiştir. Manyetik alan hem dikey hem de yatay olarak uygulanmış ve uygulanan manyetik alanın bu iki durum için benzer etki gösterdiği tespit etmişlerdir. Hartmann ( $Ha$ ) sayısı 20 olduğu durumda akış hareketinin tamamen bastırıldığı, ayrıca  $Ra$  (Rayleigh) sayısının artmasıyla akış hızının arttığı, fakat  $Ha$  sayısının artmasıyla Nusselt sayısının azaldığını gözlemlenmişlerdir. Sun ve diğ. [3], ısı iletkenliğe sahip olan bir akışkan içerisinde, belirli bir mesafede kendileri de iletken olan iki parçacığın çok güçlü bir manyetik alan (10 Tesla) altında, parçacıklar arası etkileşim ile katı-sıvı etkileşimini incelemek için nümerik bir model geliştirmişlerdir. Modeli sonlu hacim metoduna bağlı olan ticari paket programı ANSYS-FLUENT ile (12.016 versiyonu) oluşturmuşlardır. Çalışmada,  $Re$  sayısı, parçacıklar arası mesafe ve manyetik akı yoğunluğu incelenmiştir. Tek bir küresel parçacığın sürüklenme kuvvetinin sürüklenen bir akış sınırında yaklaşık %15 kadar arttırılabileceği ve indüklenen manyeto-hidrodinamik etkileşim kuvvetinin akış alanı ve manyetik akı yoğunluğuna büyük ölçüde bağlı olduğunu savunmuşlardır. Öztöp ve diğ. [4], Galerkin sonlu eleman metodunu kullanarak bir model içine yerleştirilmiş iki tane yarı silindirik izotermal borunun, doğal taşınım üzerinde manyetik alan etkisini incelemek amacıyla nümerik bir çalışma oluşturmuşlardır. Çalışmayı farklı  $Ha$  sayıları,  $Ra$  sayıları ve borular arasındaki mesafe için gerçekleştirmişlerdir. Modelde kullanılan borular arasındaki

mesafenin ısı ve akış alanını etkileyen önemli parametreler olduğunu ve Ha sayısının ısı transferi üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu gözlemişlerdir. Di Piazza ve Ciofalo [5], karşıt kenarları diferansiyel olarak ısıtılmış içi sıvı metal ile dolu olan kübik bir modelde, yerçekimine bağlı MHD doğal taşınım akışını üç boyutlu olarak CFX-4 ticari paket programı yardımıyla incelemişlerdir (100,200 ve 1000 olan Ha sayılarıyla). Parametre olarak Pb-17Li sıvısını kullanılmıştır. Elde edilen verilerin literatürdeki diğer verilerle uyumlu olduğunu ve artan Ha sayısının Nu sayısını azalttığı sonucuna varmışlardır. Pekmen ve Tezer-Sezgin [6], karşıt sınır eleman yöntemini kullanarak iki farklı geometri için nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir (biri ters basamak şeklinde olan oyuk, diğeri kademeli bir kanal). Çalışmalarında, farklı Re sayıları, manyetik Reynolds sayısı (Rem), Ha sayısı ve Ra sayısı için sonuçlar elde edilmiştir. Her iki problemde ortaya çıkan ana sonuç, Ha sayısı arttığında sınır tabaka oluşumu ve Rem'deki artışla indüklenen manyetik alandaki karışıklıkların artmasıdır. Ayrıca Nu ve Ra sayılarının orantılı olarak arttığını belirtmişlerdir. Mejri ve diğ. [7], yan duvarları sinüsoidal olarak ısıtılmış içi nano akış dolu kare bir modele manyetik alan uygulayarak laminer doğal taşınım ve entropi üretimini incelemişlerdir. Modelin alt ve üst duvarları adyabat olarak tutulmuştur. Akış ve sıcaklık alanı probleminin çözümü için Lattice Boltzman metodunu (LBM), entropi üretimini hesaplamak için de sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Sıvı akış, ısı transferi ve entropi üzerinde farklı Ra sayısı, Ha sayısı, nano parçacık ve faz sapma etkisi incelenmiştir. Tüm faz sapmalarında akış ve ısı transferi, Ra sayısıyla artarken Ha sayısının artmasıyla azaldığı görülmüştür. Recebli ve diğ. [8], dar bir kanalda Manyetohidrodinamik (MHD) akışı hem ısıtma hem de soğutma için sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada, uygulanan manyetik alan kuvvetinin akış ve ısı transferi karakteristiklerini önemli oranda etkilediğini vurgulamışlardır. Isıtma ve soğutma için uygulanan manyetik alan kuvvetinin hız ve basınç üzerindeki etkisinin hemen hemen aynı olduğu ve kanal uzunluğu boyunca cidara çok yakın bölgelerdeki sıcaklığın, manyetik alanın artmasıyla ısıtma için azaldığı, soğutmada ise sıcaklığın arttığı sonucuna varmışlardır. Kim [9], elektriksel iletkenliği olan ani genişlemeli dikdörtgen bir kanalda üç boyutlu sıvı metal MHD akışı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla nümerik olarak incelemiştir. Yazar, akış alanındaki akış hızı, akım yoğunluğu, elektrik potansiyeli, basınç düşümü ve Lorentz kuvvetini MHD akışı üzerindeki manyetik alanın yönü ve kanal genişlemesinin etkisi için incelemiştir. Ha sayısı 1000 olarak seçilmiştir. Manyetik alan, kanalın genişleyen bölümüne dik ve paralel olarak uygulanmıştır. Basınç düşümünün kanalın dar kısmında daha dik bir şekilde indiği gözlemlenmiştir. Ke ve diğ. [10], ticari paket programı PHOENICS'i kullanarak sıvı metal/helyum gazının MHD akışı üzerinde nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Zaloğlu ve Yalçinkaya [11], elektriksel iletkenliği olan viskoz bir akışkanın aralarında titreşimli bir kaynak bulunan paralel iki levha arasında, levhayla dik yönde üniform bir manyetik alan uygulaması sonucu oluşan manyeto-hidrodinamik akışı incelemişlerdir. Değiştirilmiş Re sayısının küçük değerleri için bir seri çözüm yapmışlardır. Çalışmada, Ha sayısı ile radyal hızlardaki değişimlerin sonuçlarını analiz etmişlerdir. Kumar ve Singh [12], manyetik alan altında yarı-sonsuz dikey bir plakada elektriksel iletkenliğe sahip kararsız (sürekli olmayan) bir akış için bazı parametrelerin etkisini analiz etmişlerdir. Problem Crank-Nicolson tipi implicit sonlu farklar metodu yardımıyla nümerik olarak çözülmüştür. Ortalama

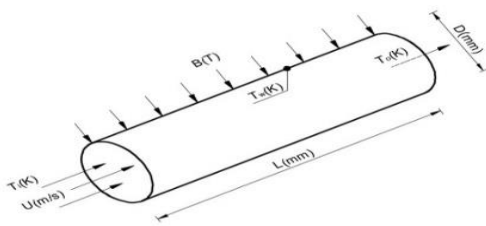
yüzey sürtünme katsayısının manyetik parametre ve manyetik Pr sayısı ile orantılı olarak arttığı, ancak ortalama Nu sayısının bu iki parametrenin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Gedik [13], iki farklı boyuttaki silindirik kanallarda üç farklı akışkan için MHD laminer zorlanmış akışın deneysel ve sayısal sonuçlarını analiz etmiştir. Farklı manyetik alan şiddetleri için deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştırmıştır. Manyetik alan şiddetinin artmasının her iki analiz tipi için hızı azalttığı ve basıncı arttırdığı sonucuna varmıştır. Aynı zamanda sonuçların birbiriyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Aoyagi [14] ve diğ. güçlü bir manyetik alan altında ( $B=5T$ ) üstü açık üç kademeli bir kanalda, MHD akışın basınç düşümü ile ilgili deneysel ve sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Akışkan olarak Bi-Sn ötektik alaşımını kullanmışlardır. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında bazı farkların olmasına rağmen, deneysel sonuçlardan elektromanyetik kuvvetin etkisinin tabakalı kanalda azaldığını tespit etmişlerdir. Ellahi [15], bir boru içerisinde MHD ve sıcaklığa bağlı viskozite etkisini nıvtsonal olmayan nanoakışı kullanarak farklı modeller için (Reynolds modeli ve Vogel's modeli) analitik olarak çözmüştür. Boru sıcaklığının akışkan sıcaklığından daha yüksek tutulan problem HAM yöntemiyle çözülmüştür. Çalışmada, nano yoğunluğunun artmasının ısı transferini arttırdığı fakat MHD parametresinin artmasıyla hız profillerinde önemli düşüşler meydana geldiğini gözlemlenmiştir. Nasrin ve Alim [16], dış duvarları yalıtılmış sekizgen bir çitin içerisine ısı üreten bir boru yerleştirilerek MHD doğal ve zorlanmış taşınım ile ilgili nümerik bir çalışma yapmışlardır. Nümerik çalışma Galerkin kontrol hacmi sonlu eleman metodu kullanılarak oluşturulmuştur. Ha sayısı, Joule (J) ısıtma parametresi ve Ri sayısının farklı değerleri için akışkanın maksimum sıcaklığı ve ortalama Nu sayısının izotermal ve akım çizgileri sunulmuştur. Joule ısıtmanın akım çizgileri üzerinde önemli bir rol oynadığı, Ha sayısının artmasıyla termal ısı tabakanın azaldığı ve ısı transfer hızının artan Ha sayısı ve J ısıtma parametresiyle azaldığı sonucuna varmışlardır. Malvandi ve diğ. [17], dikey bir halka boruda  $Al_2O_3$ -su ile dolu nano-akışın MHD karma taşınım üzerinde nümerik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Borunun iki tarafına ısı akışı uygulanmıştır. Nanoparçacık göçünün etkisini hesaplamak için Brownian hareket yöntemi kullanılmıştır. ısı transferi artırımında bir avantaj olarak görülen nanoakışın, manyetik alan varlığında ısı transferini azaltan bir parametre olduğu, fakat temel akışta Ha sayısının artmasıyla ısı transferinin arttığı gözlemlenmiştir. Shekholeslami ve diğ. [18], en küçük kareler yöntemi ve Galerkin metoduyla manyetik alana maruz kalan yarı poroz bir kanalda, laminer nano akış problemini analitik olarak çözmüşlerdir. Yazarlar, elde ettikleri sonuçları dördüncü mertebe Runge-Kutta metoduyla karşılaştırmışlardır. En küçük kareler yöntemi ve Galerkin metoduyla elde edilen sonuçların birbirinden yok denek kadar farklı olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın ana sıvısı olarak su ve etilen glikol kullanılırken, nano parçacık olarak da bakır ve gümüş kullanılmıştır. Çalışmada boyutsuz hız profilleri üzerinde nano parçacık hacim fraksiyonu, Ha sayısı ve Re sayısının etkisi incelenmiştir. Re sayısının artmasıyla hız sınır tabaka kalınlığının azaldığını, Ha sayısının artmasıyla bu kalınlığın arttığını, ayrıca bakır- etilen glikol nano akışı ile hız profillerindeki en büyük artışın elde edildiği sonucuna varmışlardır. Kiyasatfar ve Pourmahmoud [19] tarafından, dıştan üniform manyetik alana maruz bırakılan kare mikro bir kanalda, elektriksel iletkenliğe sahip nıvtsonal olmayan sürekli, tamamen gelişmiş laminer akış ve ısı transferi karakteristikleri sonlu fark yaklaşımı Değiştirilmiş

Güç-Yasası modelini (Modified Power-Law) kullanılarak incelenmiştir. Hız alanının uygulanan manyetik alandan güçlü bir şekilde etkilendiği ve Nu sayısının hem Joule ısıtma ile viskoz yayılma parametrelerinin artmasıyla kademeli olarak azaldığını savunmuşlardır. Sheikholeslami ve diğ. [20], değişken dış manyetik alan altında kapak-odaklı yarı bir halkada ferrofluid ( $Fe_3O_4$ -su) sıvısının zorlanmış taşınım ısı transferi karakteristiklerini incelemiştir. Kontrol hacmine dayanan sonlu eleman metodunu hem ferrohidrokinamik hem de manyetohidrokinamik etkiler düşünülerek problemin yönetici denklemleri çözülmüştür. Elde edilen sonuçlardan Kelvin kuvvetlerinin etkilerinin yüksek Re sayıları için daha baskın olduğu ve Re sayısı ile manyetik sayının ısı transferini doğrudan etkilediği sonucuna varmışlardır. Karimipour ve diğ. [21], bir mikro kanala enine manyetik alan uygulayarak zorlanmış laminer MHD nanoakışın ısı transferi ve akış karakteristiklerini nümerik olarak incelemiştir. İki boyutlu nümerik çalışmayı FORTRAN yazılımı kullanılarak farklı fiziksel sınır şartları için gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın ana sıvısı olarak su tercih edilirken, nano parçacık olarak Ag ve  $Al_2O_3$  seçilmiştir. Isı transferi üzerinde bu iki nano parçacığın akış içerisindeki davranışı kıyaslanmıştır. Çalışmayı, boyutsuz duvar kayma katsayıları (0.01, 0.05, 0.1), farklı  $Ha$  sayıları ( $Ha=0, 20, 40$ ), farklı Re sayıları ( $Re=10, 100$ ) ve sabit nano hacim fraksiyonu ( $\phi=0.04$ ) gibi fiziksel büyüklükler için oluşturmuşlardır. Ag nin sabit kayma katsayısında (0.05), her iki Re değeri için X koordinatı boyunca yerel Nusselt sayısının  $Ha$  değerlerinin artmasıyla arttığı ve kanalın sonuna doğru bu değerlerin  $Ha$  sayısının artmasıyla azaldığını rapor etmişlerdir. Isı transferini arttırmak için, düşük Re sayısında ( $Re=10$ ) Ag'nin yerine  $Al_2O_3$ -su nanoakışının tercih edilmesi ve Re sayısının daha büyük değerleri için ( $Re=100$ ) termal iletkenlik katsayısının daha büyük olan nano parçacıkların tercih edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

İncelenen literatür ışığında bu çalışmanın amacı, dik olarak manyetik alan indüksiyonuna maruz bırakılan dairesel bir kanalda sıvı lityum MHD akış davranışını nümerik olarak incelemektir. Akışkan sıcaklığı kanal sıcaklığından daha yüksek tutulmuştur. Analizler ANSYS-Fluent ticari yazılımı ile yapılmıştır. Akışkan giriş hızı sabit tutulurken, manyetik alan şiddetleri farklı seçilmiştir. Elde edilen veriler grafik olarak sunulmuştur. Bu çalışmayla özellikle zorlanmış taşınım konusunda MHD etkisinin anlaşılabilmesi için literatürde bu konuda bulunan eksikler doldurulmaya çalışılacaktır.

## 2 Materyal ve metod

Bu nümerik çalışma için, içinde sıvı lityum bulunan, üç boyutlu ve et kalınlığı 0.0415 milimetre olan silindirik alüminyum bir boru kullanılmıştır. Kullanılan model, sabit akışkan giriş hızı ve sıcaklığı ile sabit cidar sıcaklığına sahiptir. Akışkan x-yönünde hareket ederken, akışkana dik yönde dıştan farklı manyetik alan kuvvetleri uygulanmıştır. Şekil 1 bu çalışmanın amacı için kullanılan modeli göstermektedir.



Şekil 1: Üç boyutlu boru modeli.

Boru modeli ANSYS-Workbench ile tasarlanmış ve ANSYS-Fluent ticari yazılımı ile hesaplanmıştır. Mesh büyüklüğü bilgisayarın özellikleri dikkate alınarak çözümün gerçeğe daha yakın olması için oldukça küçük (0.0005 m) seçilmiştir. Kanalın fiziksel boyutları ile mesh kalitesine ait özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1: Borunun boyutları ve mesh özellikleri.

Değişken	Değeri
L (mm)	200
D (mm)	15
Mesh büyüklüğü	0.0005
Mesh sayısı	597303
Mesh orthogonal kalitesi	%98.4
Mesh davranışı (behavior)	Hard (sıkı)

Modele ait sınır şartları da Tablo 2'de verilmiştir. Reynolds 2250 seçilmiş ve bu değere karşılık hesaplanan akışkan giriş hızı değeri  $U=0.140625$  m/s'dir.

Tablo 2: Modelin sınır şartları.

Sınır Şartları	Değeri
U (m/s)	0.140625
$T_i$ (K)	473.15
$T_o$ (K)	298.15
$T_w$ (K)	373.15

Çalışma sıvısı olarak kullanılan Lityum sıvısına ait termo-fiziksel özellikler Tablo 3'te gösterilmiştir. Verilen bu değerler Flunte girilerek hesaplamalar yapılmıştır. Laminer termal hidrokinamik giriş uzunluğu Denklem (1) ile hesaplanarak,  $L_{t, laminer}=0.103275$  m olarak bulunmuştur.

Tablo 3: Akışkanın termo-fiziksel özellikleri [22].

Akışkan	$C_p$ (J/kg K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	K (W/m K)	$\mu$ (Pa.s)
Lityum	4169	516	44	$0.645 \times 10^{-3}$

$$L_{t, laminer} = 0.05 * Re * D * Pr \quad (1)$$

Boru çapı hız ve sıcaklık değişimleri laminer termal olarak tamamen gelişmiş bölgede incelenmiştir.

$$\rho * (U \cdot \nabla)U = -\nabla P + \mu * \Delta U + [j \times B] \quad (2)$$

$$j = \sigma * [E + U \times B] \quad (3)$$

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (4)$$

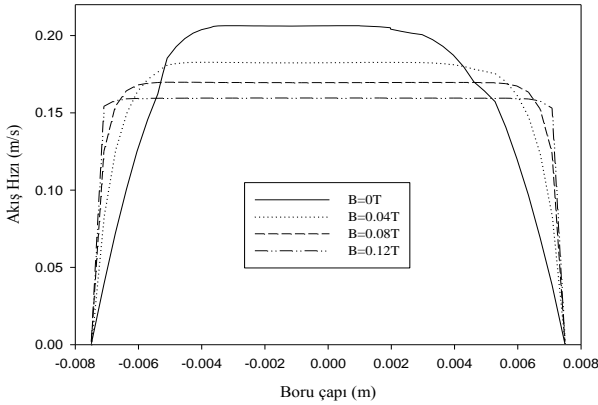
$$\rho * c_p * (U \cdot \nabla)T = k * \Delta T + \frac{j^2}{\sigma} + W_f \quad (5)$$

Sayısal analiz, momentum Denklemi (2), Ohm yasası Denklemi (3), süreklilik Denklemi (4) ve enerji denklemi (5) kullanılarak ANSYS-Fluent ticari paket yazılımı ile oluşturulmuştur [8].

## 3 Sonuçlar ve tartışma

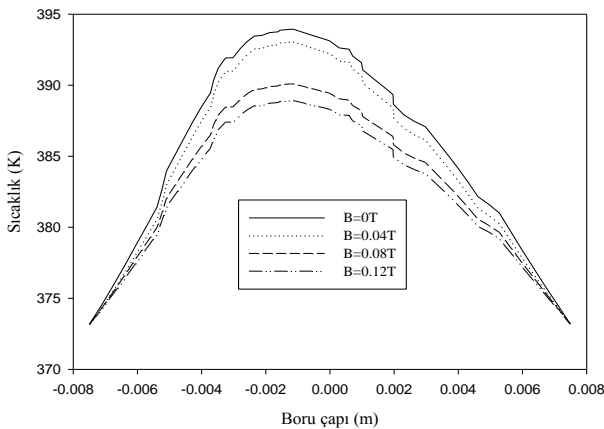
Mevcut çalışma, termal olarak tamamen gelişmiş boru kesitindeki ( $x=170$  mm) hız ve sıcaklık ile kanal uzunluğu boyunca merkez sıcaklığı ve basınç düşümünü incelemektedir. Ayrıca kanal uzunluğu boyunca kanalın duvara çok yakın ve kanal merkezi ile cidar ortasında kalan bölgedeki sıcaklık değişimi analiz edilmiştir. Kanala akış yönüne dik, üç farklı manyetik alan kuvveti ( $B = 0.04T, 0.08T, 0.12T$ ) ve manyetik alanın olmadığı durum ( $B=0T$ ) uygulanarak, elde edilen sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Şekil 2, üç boyutlu silindirik kesitli kanalın termal olarak tamamen gelişmiş bir bölgesinde (kanal girişinden 170 mm uzaklıkta) boru çapı boyunca, dört farklı manyetik alan kuvveti için lokal hız değişimini tasvir etmektedir. Manyetik alan şiddeti arttırıldığında Lorentz kuvvetinin geciktirici etkisinden dolayı hızlarda bir azalma olduğu görülmektedir. Sıvı lityum ve cidar sıcaklığı sınır şartı değerleri yer değiştirdiğinde hızlardaki azalma oranlarının çok değişmediği ve neredeyse aynı olduğu Recebli ve arkadaşları [8] tarafından vurgulanmıştır. Boru merkezinde maksimum hız değerleri,  $B=0T$  için  $U=0.2064$  m/s,  $B=0.04T$  için  $U=0.1828$  m/s,  $B=0.08T$  için  $U=0.1697$  m/s ve  $B=0.12T$  için  $U=0.1596$  m/s olarak elde edilmiştir.



Şekil 2: Boru çapı boyunca hız profilleri ( $X=0.17m$ ).

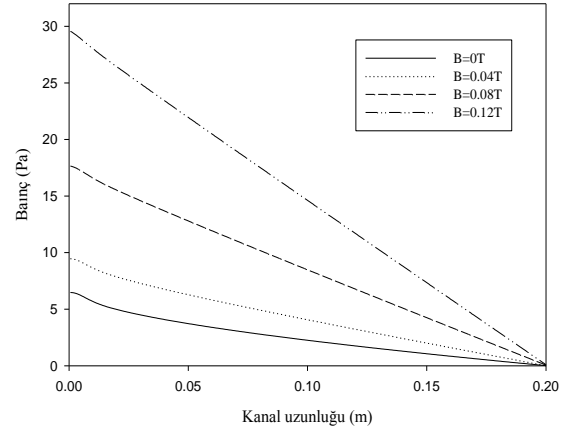
Şekil 3, silindirik boru çapı boyunca farklı manyetik alan kuvvetleri için sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekilden de net bir şekilde görüldüğü gibi manyetik alan kuvveti arttıkça sıcaklık değerlerinin azaldığı görülmektedir.  $B=0T$ ,  $0.04T$ ,  $0.08T$  ve  $0.12T$  için elde edilen sıcaklık değerleri sırasıyla  $393.9070$  K,  $393.058$  K,  $390.09$  K ve  $388.914$  K olarak belirlenmiştir. Bu sonuç manyetik alan etkisinin soğutma üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.



Şekil 3: Kanal çapı boyunca sıcaklık değişimi ( $X = 0.17 m$ ).

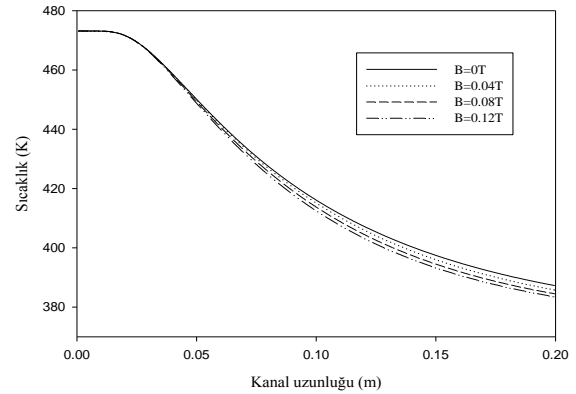
Dört farklı manyetik alan şiddeti için ( $B = 0T$ ,  $0.04T$ ,  $0.08T$  ve  $0.12T$ ) kanal uzunluğu ( $0-200$  mm) merkez eksenı boyunca basınç düşümü değerleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekilden anlaşıldığı üzere manyetik alan kuvveti arttığı zaman basınç değerleri de artmaktadır. Şekil 2'de manyetik alan kuvvetinin artmasıyla akış hızlarında azalma meydana geldiği belirtilmişti

ve hızlardaki bu azalmadan dolayı basınç değerleri artmaktadır. Elde edilen maksimum basınç değerleri  $0T$  için  $6.4774$  Pa,  $0.04T$  için  $9.4869$  Pa,  $0.08T$  için  $17.6498$  Pa ve  $0.12T$  için  $29.5489$  Pa olarak belirlenmiştir. Hız eğrilerinde olduğu gibi, sıvı lityum için cidar ve akışkan sıcaklığı sınır değerleri bir birleriyle yer değiştirdiğinde, yani hem ısıtma hem de soğutma için basınç değerlerinin de çok az değiştiği ve hemen hemen aynı kaldığı Recebli ve diğ. [8] tarafından tespit edilmiştir.



Şekil 4: Kanal merkezi boyunca basınç değişimi.

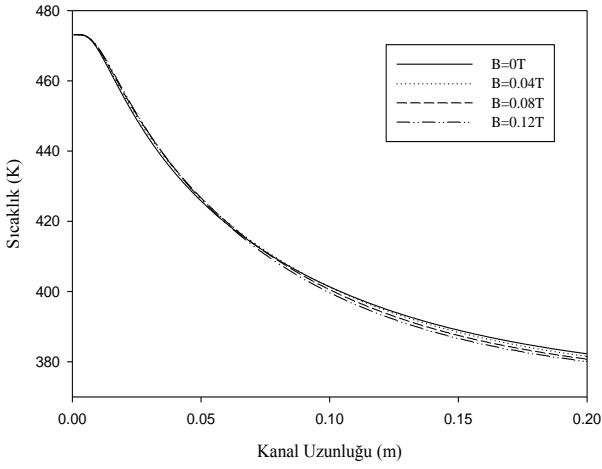
Dairesel boru uzunluğunun eksenı boyunca farklı manyetik alan kuvvetleri ve manyetik alanın olmadığı durum için elde edilen sıcaklık değişimleri Şekil 5'te sunulmuştur. Kanalın merkez sıcaklıkları, başlangıçta biraz sabit kaldığı ve sonrasında sıcaklığın azaldığı, yani lityum sıvısının tüm manyetik alan şiddetleri için kanal boyunca sürekli soğuduğu görülmektedir. Bu model için beklenen bir durumdur. Ayrıca, boru merkezinde daha yüksek manyetik alan kuvveti için sıcaklığın daha çok azaldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5: Kanal uzunluğu boyunca merkezdeki sıcaklık değişimi.

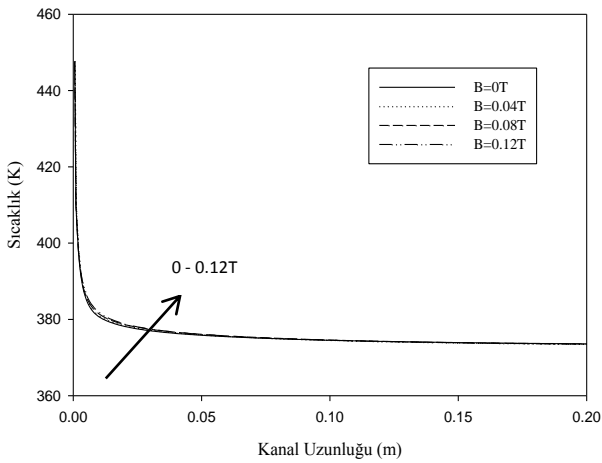
Şekil 6, kanalın merkezi ile cidarın tam ortasında kanal uzunluğu boyunca sıcaklık değişimini ifade etmektedir. Şekilden anlaşıldığı üzere kanalın hemen girişinde sıcaklığın biraz sabit kaldığı daha sonra sıcaklık değerlerinin azaldığı görülmektedir. Yaklaşık  $X=0.06$  m uzunluğa kadar manyetik alanın artmasıyla sıcaklığın arttığı, bu noktada sıcaklık değerlerinin eşitlendiği ve bu noktadan sonra da daha büyük manyetik alan kuvvetinin sıcaklığı daha fazla düşürdüğü tespit edilmiştir.





Şekil 6: Kanal merkezi ile cidar ortasındaki sıcaklık değişimi.  
( $Y = 0.00375 \text{ m}$ ).

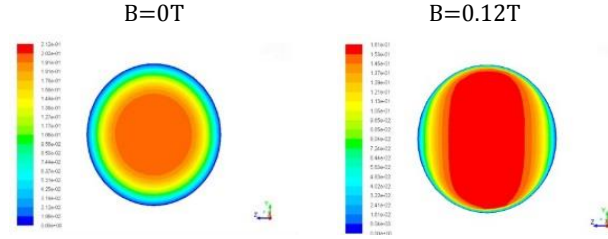
Şekil 7, cidara çok yakın bir bölgede ( $Y=0.0073 \text{ m}$ ) kanal uzunluğu ( $X=0-0.2 \text{ m}$ ) boyunca sıcaklık değişimini temsil etmektedir. Şekil 5'te belirtilen sonucun aksine, burada manyetik alan kuvvetinin artmasıyla sıcaklık değerinin yükseldiği belirlenmiştir. Sıcaklık eğrileri borunun hemen girişinde çok hızlı bir şekilde azalmıştır. Yaklaşık  $0.05 \text{ m}$ 'ye kadar manyetik alan kuvvetinin etkisi daha net görülmekte ve yaklaşık bu değerden sonra tüm manyetik alan şiddetleri için sıcaklık değerlerinin hemen hemen eşit bir şekilde çok az değiştiği gözlemlenmiştir.



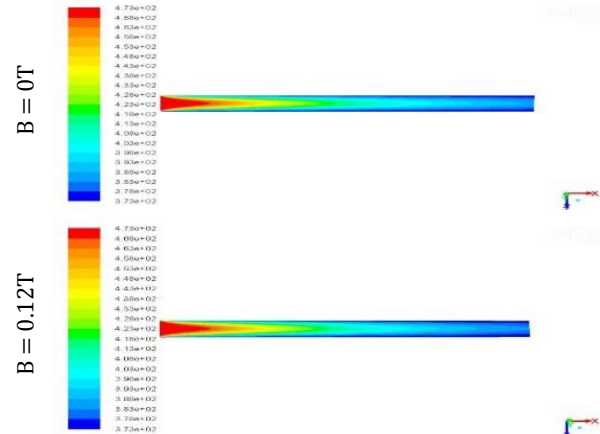
Şekil 7: Duvara yakın bölgedeki sıcaklık değişimi  
( $Y=0.0073 \text{ m}$ ).

Şekil 8, kanalın farklı bölgelerinde farklı manyetik alan şiddetleri için bazı hız ve sıcaklık değerlerine ait kontörleri göstermektedir. Şekil 8(a)'da görüldüğü gibi manyetik alan şiddeti  $B=0 \text{ T}$ 'dan  $B=0.12 \text{ T}$ 'ya çıkarıldığında akışkan hızının bastırıldığı görülmektedir. Rakamları gösteren sütunda görüldüğü gibi hız değerleri  $V=0.212$  den  $V=0.161$ 'e düştüğü açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Bu değerlerin değişimi Şekil 2'den de anlaşılmaktadır. İki farklı manyetik alan kuvvetleri için borunun uzunluğu boyunca, ortasından kesilmiş sıcaklık kontörleri Şekil 8(b)'de verilmiştir. Şekilden manyetik alan kuvvetinin merkezdeki sıcaklık değerini düşürdüğü görülmektedir. Ancak bu değişim, hızlardaki kadar belirgin

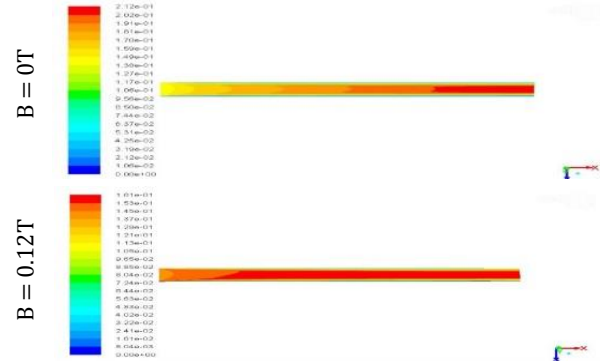
değildir. Şekil 8(c), borunun uzunluğu boyunca hız kontörlerini göstermektedir. Şekilden de açık bir şekilde görüldüğü gibi uygulanan dış manyetik alan kuvveti akışkan hızını önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir.



(a): Kanal çapı hız kontörleri.



(b): Kanal boyunca ortadan kesilen sıcaklık kontörleri.



(c): Borunun ortasından kesilmiş hız kontörleri.

Şekil 8: Farklı manyetik alan şiddetleri için hız ve sıcaklık kontörleri.

## 4 Sonuç

Bu çalışma, üç-boyutlu dairesel bir boruda sabit akışkan giriş hızı fakat farklı manyetik alan şiddetleri için sıvı lityum akışının MHD akış ve ısı karakteristiklerini içermektedir. ANSYS-Fluent ticari yazılımı yardımıyla nümerik olarak çözülen modelden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

- ✓ Manyetik alan kuvvetinin artmasıyla akışkanın yerel hız profilleri düşmüştür.
- ✓ Boru çapı boyunca, manyetik alanın artması sıcaklık değerlerini düşürmüştür.
- ✓ Kanalın merkez uzunluğu boyunca basınç değerleri, manyetik alan şiddetinin artmasıyla artmaktadır.

- ✓ Boru uzunluğu boyunca, manyetik alan kuvvetinin artması; boru merkezindeki sıcaklık değerlerini düşürdüğü, cidara çok yakın bölgelerde sıcaklığı arttırdığı ve kanalın merkezi ile cidarın ortasındaki bölgede önce sıcaklığı arttırdığı sonra da azalttığı tespit edilmiştir.

Sonuç olarak üç boyutlu bir kanalda, manyetik alan kuvvetinin sıvı lityum akışı ve ısı transferi karakteristikleri üzerinde çok etkili olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ışığında sıvı lityum için soğutma uygulamalarında manyetik alan etkisinin soğutmayı iyileştirdiği belirlenmiştir.

## 5 Teşekkür

Yazarlar, TEKF.15.01 No.lu projeye desteklerinden dolayı Firat Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje (FUBAP) koordinasyon birimine teşekkür eder.

## 6 Referanslar

- [1] Salman BH, Mohammed HA, Kherbeet ASh. "Heat transfer enhancement of nanofluids flow in microtube with constant heat flux". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(8), 1195-1204, 2012.
- [2] Gajbhiye NL, Eswaran V. "Numerical simulation of MHD flow and heat transfer in a rectangular and smoothly constricted enclosure". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 441-449, 2015.
- [3] Sun ZHI, Zhang X, Guo M, Pandelaers L, Vleugels J, Van der Biest O, Van Reusel K. and Blanpian B. "Strong magnetic field effects on solid-liquid and particle-particle interactions during the processing of a conducting liquid containing non-conducting particles". *Journal of Colloid and Interface Science*, 375(1), 203-212, 2012.
- [4] Öztöp HF, Rahma MM, Ahsan A, Hasanuzzaman M, Saidur R, Al-Salem K, Rahim NA. "MHD natural convection in an enclosure from two semi-circular heaters on the bottom wall". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55 (7), 1844-1854, 2012.
- [5] Di Piazza I, Ciofalo M, "MHD free convection in a liquid-metal filled cubic enclosure. I. Differential heating". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(7), 1477-1492, 2002.
- [6] Pekmen B, Tezer-Sezgin M. "Numerical solution of buoyancy MHD flow with magnetic potential". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 172-182, 2014.
- [7] Mejri I, Mahmoudi A, Abbasi MA, Omri, A. "Magnetic field effect on entropy generation in a nanofluid-filled enclosure with sinusoidal heating on both side walls". *Powder Technology*, 266, 340-353, 2014.
- [8] Recebli Z, Selimli, S, Gedik, E. "Three dimensional numerical analysis of magnetic field effect on convective heat transfer during the MHD steady state laminar flow of liquid lithium in a cylindrical pipe". *Computers & Fluids*, 88, 410-417, 2013.
- [9] Kim CN, "Liquid metal magnetohydrodynamic flows in an electrically conducting rectangular duct with sudden expansion". *Computers & Fluids*, 89, 232-241, 2014.
- [10] Ke Y, Wang HY, Wu YC. "MHD simulation of the liquid metal/helium gas dual-cooled waste transmutation blanket for FDS". *Fusion Engineering and Design*, 69(1), 431-435, 2003.
- [11] Zaloğlu A, Yalçinkaya G. "Paralel iki levha arasındaki viskoz akışkanın MHD radyal titreşimli akışı". *İTÜ dergisi/d*, 2(5), 53-60, 2003.
- [12] Kumar A, Singh AK. "Unsteady MHD free convective flow past a semi-infinite vertical wall with induced magnetic field". *Applied Mathematics and Computation*, 222, 462-471, 2013.
- [13] Gedik E. Silindirik Borularda Manyetohidrodinamik Akışın Deneysel Olarak İncelenmesi ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Sayısal Analizi. Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye, 2012.
- [14] Aoyagi M, Ito S, Hashizume H, Muroga, T. "MHD pressure drop characteristics in a three-surface-multi-layered channel under a strong magnetic field". *Fusion Engineering and Design*, 85 (7), 1181-1184, 2010.
- [15] Ellahi R. "The effects of MHD and temperature dependent viscosity on the flow of non-Newtonian nanofluid in a pipe: Analytical solutions". *Applied Mathematical Modelling*, 37(3), 1451-1467, 2013.
- [16] Nasrin R, Alim MA. "Control volume finite element simulation of MHD forced and natural convection in a vertical channel with a heat-generating pipe". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(11), 2813-2821, 2012.
- [17] Malvandi A, Safaei MR, Kaffash MH, Ganji DD. "MHD mixed convection in a vertical annulus filled with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid considering nanoparticle migration". *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 382, 296-306, 2015.
- [18] Sheikholeslami M, Hatami M, Ganji DD. "Analytical investigation of MHD nanofluid flow in a semi-porous channel". *Powder Technology*, 246, 327-336, 2013.
- [19] Kiyasatfar M, Pourmahmoud N. "Laminar MHD flow and heat transfer of power-law fluids in square microchannels". *International Journal of Thermal Sciences*, 99, 26-35, 2016.
- [20] Sheikholeslami M, Vajravelu K, Rashidi MM. "Forced convection heat transfer in a semi annulus under the influence of a variable magnetic field". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 339-348, 2016.
- [21] Karimipour A, D'Orazio A, Shadloo MS. "The effects of different nano particles of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Ag on the MHD nano fluid flow and heat transfer in a microchannel including slip velocity and temperature jump". *Physica E*, 86, 146-153, 2017.
- [22] Davison HW. "Compilation of thermophysical properties of liquid lithium". *National Aeronautics and Space Administration*, Washington, USA, 4, 1968.