

MANYETİK VE ELEKTRİK ALANLARIN TAŞINIMLA ISI GEÇİŞİNE ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

*Kemal ATİK**
*Ziyaddin RECEBLİ**

Özet: Manyetik alanın etkisiyle akışkanların hızları değişmekte, dolayısıyla ısı taşınımı da etkilenmektedir. Bu çalışmada yatay silindirik bir boruda, ısı taşınımına elektrik ve manyetik alanların birlikte etkileri incelenmiştir. Çalışmada akışkana etkileyen elektromanyetik kuvvet içeren momentum denklemi, süreklilik ve enerji denklemleri kullanılmıştır. Silindirik sistemde yazılan momentum ve süreklilik denklemleri, basınç değişimi ile akışkanın fiziksel özelliklerinin sabit kaldığı kabul edilerek analitik olarak çözülmüş ve hız ifadesi elde edilmiştir. Elde edilen hız ifadesi, enerji denklemi ile birleştirilerek elektrik alan şiddetine, manyetik alan indüksiyonuna ve akışkanın fiziksel özelliklerine göre sayısal olarak çözümlenerek boru kesitindeki sıcaklıklar bulunmuştur.

Yapılan sayısal çözüm sonuçlarına göre akışa ve birbirine dik olarak yöneltilen elektrik ve manyetik alanların etkileri artırıldığında elektrik alanın yönüne bağlı olarak hız ve sıcaklıkların değiştiği görülmüştür. Pozitif yöndeki ($\vec{u} \times \vec{B}$ çarpımının tersi yönde) elektrik alanda soğutulan bir akışkan için hızda, sıcaklıklarda ve Nusselt sayısında artmalar, negatif yöndeki ($\vec{u} \times \vec{B}$ çarpımı yönünde) elektrik alanda hız, sıcaklık ve Nusselt sayılarında azalmalar olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik ve manyetik alan, ısı taşınımı, sıcaklık dağılımı, borularda kararlı akış.

A Numerical Examination of the Effects of Magnetic and Electric Fields on Convection Heat Transfer

Abstract: Flow velocities of fluids change due to the effects of magnetic fields, thus affecting heat convection. This study investigates simultaneous effects of electric and magnetic fields on heat convection inside a horizontal cylindrical pipe. Momentum, continuity and temperature equations, which include electromagnetic forces acting on the fluid, are employed in the study. Momentum and continuity equations, which are written in cylindrical system, are analytically solved assuming that pressure gradient and physical properties of the fluid are constant, and velocity is obtained. The obtained velocity is combined with the energy equation and numerically solved according to electric field intensity, magnetic field induction and physical properties of the fluid; then, temperatures in pipe cross-section are found. Nusselt numbers are calculated by using these temperatures.

According to results of the numerical solution, it is observed that velocities and temperatures change depending on the flow and direction of the electric field when effects of perpendicularly located electric and magnetic fields are increased. It is determined that while velocity, temperature and Nusselt number increase for a fluid that is cooled in a positive electric field and, velocity, temperature and Nusselt number decrease for a negative electric field.

Key Words: Electric and magnetic fields, heat convection, temperature distribution, steady flow inside pipes.

1. GİRİŞ

Manyetik alanın akışkan hareketlerine ve ısı taşınımına etkileri farklı bilim adamları tarafından incelenmiştir.

Mittal (1964), duvarında aksel yönde sabit sıcaklık farkı sağlanan silindirik boruda; elektriksel iletkenlikli akışkanın laminer akışıyla ısı taşınımına radyal yöndeki sabit manyetik alanın etkisini incelemiştir. Küçük Hartman sayıları (Ha) için ortalama sıcaklık değerlerini ve yerel Nusselt sayılarını hesaplamıştır. Hartman sayısının farklı sabit değerlerinde Nusselt sayılarının açıl koordinata

* Karabük Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, 78100, Karabük.

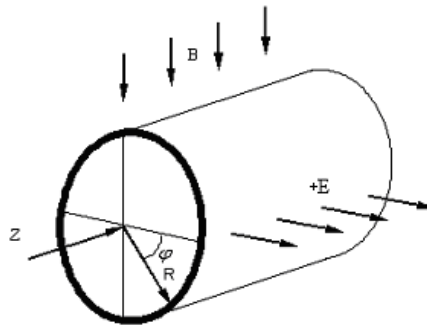
bağlı grafiklerini çizmiştir. Gardner (1967), yatay silindirik boruda akan; elektriksel iletkenlikli akışkanla ısı taşınımına radyal yöndeki sabit manyetik alanın etkisini incelemiştir. Sıcaklık, yerel hız ve yerel Nusselt sayılarını hesaplamıştır.

Tashtoush ve Al- Odat (2004), dalgalı bir yüzeydeki zorlanmış ısı ve akışkan akışına manyetik alan etkisini sayısal olarak (sonlu farklar metoduyla) incelemiştir. Manyetik alanın Nusselt sayısını azaltarak ve yüzey sıcaklığını arttırarak ısı transferini azalttığını bulmuşlardır. Umeda ve Takahashi (2000), bir nükleer santral için; dikdörtgen kanaldaki lityum akışı ile ısı transferine yatay manyetik alan etkisini sayısal olarak incelemiştir. Sonlu fark eşitlikleri ve Gauss- Seidel yöntemini kullandıkları analizde farklı ebatlar ve farklı ağ sayıları kullanmışlardır. Buldukları sayısal sonuçlarla daha önceden buldukları deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır. Hartman sayısının artması ile Nusselt sayısı arttığını görmüşlerdir. Mahmud ve Fraser (2007), farklı geometri ve farklı akış türlerindeki ısı transferi problemlerinde; hız, sıcaklık, elektrik alan, manyetik alan ve akış özelliklerine bağlı olarak enerji akışını görüntülemiştir. Ghaddar (1999), alttan ısıtılmalı kapalı termosifonik sistemde türbülanslı manyetohidrodinamik akışı incelemiştir. Akış hızını zamana, geometrik parametrelere ve Hartman sayısına bağlı olarak ifade etmiştir. Smolentsev ve diğ. (2004), serbest yüzeylerde ergimiş tuzlar gibi düşük elektriksel ve ısı iletkenlikli akışkanların değişken manyetik alan içerisindeki türbülanslı akışlarını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Ji ve Gardner (1996), yatay silindirik boruda türbülanslı akışta sabit manyetik alanın ısı taşınımına etkisini incelemiştir. Hartman sayısının artması ile Re sayısının dolayısıyla Nu sayısının azaldığını göstermişlerdir. Damseh ve diğ. (2006) gözenekli bir duvarda zorlanmış konveksiyonlu akışa manyetik alan ve radyasyon etkisini incelemiştir. Racabovadioloğlu ve Atik (2005), silindirik yatay bir boruda zorlanmış konveksiyon ile ısı transferine manyetik alanın etkisini sayısal yöntemlerle incelemiştir. Akış yönüne dik olarak yerleştirilen manyetik alanın şiddeti artırıldığında sıcaklık dağılımında azalmalar olduğunu tespit etmişlerdir.

Literatürde ısı taşınımına manyetik alan etkisi ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen manyetik ve elektrik alanların birlikte etkileri ile ilgili çalışma fazla bulunmamaktadır. Bu çalışmada; diğer çalışmalardan farklı olarak birlikte uygulanan manyetik ve elektrik alanların ısı taşınımına etkisi sayısal olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

Şekil 1’de birbirine dik yöneltilen elektrik ve manyetik alan içerisine yerleştirilen R yarıçaplı silindirik boru gösterilmiştir. Boru boyunca hareket eden akışkanın boru girişindeki sıcaklığı T_0 ve boru etrafındaki ortamın sıcaklığı T_a sabittir.



Şekil 1:
Elektrik ve Manyetik alan etkisinde kalan yatay boruda koordinat sisteminin yerleştirilmesi

Elektrik ve manyetik alanların ısı taşınımına etkilerinin incelenmesinde, elektromanyetik kuvvet içeren momentum denklemi, süreklilik denklemi ve enerji denklemleri kullanılacaktır. Bu denklemlerin vektör şeklinde yazılımı aşağıda verilmiştir (Bird ve diğ., 2002).

Momentum denklemi:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \nabla) \vec{U} \right) = -\nabla P + \eta \Delta \vec{U} + \sigma \left(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B} \right) \times \vec{B} \quad (1)$$

Manyetik alan içerisinde bulunan hareketli akışkanlarda elektrik akımının meydana geldiği ve bu akımın da kendi manyetik alanını oluşturduğu bilinmektedir. Makalede akışkan olarak kullanılan suyun manyetiklenme katsayısının ve kenardan uygulanan manyetik alan indüksiyonu değerlerinin çok küçük olmaları nedeniyle akışkanda indükte olunacak manyetik alanı da çok zayıf olacaktır. Bu nedenle momentum denkleminde akışkanda indükte olunan manyetik alanın etkisi dikkate alınmamıştır.

Süreklilik denklemi:

$$\text{div} \vec{U} = 0 \quad (2)$$

Enerji denklemi (Bird ve diğ., 2002; Targ, 1951):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \nabla T = \frac{\lambda}{\rho c_p} \Delta T + \frac{J^2}{\sigma \rho c_p} + \frac{W_s}{\rho c_p} \quad (3)$$

Burada, $\frac{J^2}{\sigma \rho c_p}$ akışkanın ısıtılması için harcanan enerji, $\frac{W_s}{\rho c_p}$ sürtünmeyi yenmek için harcanan enerjidir. Boru girişinde akışkan sıcaklığının sabit kaldığı, yani tekrar ısıtılmadığı ve borunun iç yüzeyinin pürüzsüz olması nedeniyle enerji denklemindeki $\frac{J^2}{\sigma \rho c_p}$ ve $\frac{W_s}{\rho c_p}$ terimleri çözümde dikkate alınmamıştır.

Akışkanın fiziksel özelliklerinin sabit kalacağı, akışın kararlı ve simetrik olacağı varsayılarak:

$$u_r = u_\varphi = 0; u_z = u_z(r) = u; \frac{\partial u}{\partial z} = 0; \frac{\partial P}{\partial r} = 0; \frac{\partial P}{\partial \varphi} = 0; \frac{\partial P}{\partial z} = N = \text{sabit} \quad (4)$$

yazılabilecektir.

Bu şartlarda momentum ve süreklilik denklemleri birleştirilerek silindirik koordinat sisteminde tek boyutlu kararlı akış için aşağıda verilen denkleme dönüştürüleceklerdir.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - m^2 u = \frac{N - \sigma E B}{\mu} \quad (5)$$

$$\text{Burada, } m^2 = \frac{\sigma}{\mu} B^2 \text{ dir.} \quad (6)$$

(5) eşitliği enerji denklemi olmadan da çözülebilir. Bu denklem için sınır şartı:

$$r=R \text{ olduğunda } u=0 \text{ olacaktır.} \quad (7)$$

Denklem (5)'in (7) deki sınır şartını sağlayan çözümü,

$$u = \frac{N - \sigma E B}{\sigma B^2} \cdot \left(\frac{I_0(mr)}{I_0(mR)} - 1 \right) \quad (8)$$

şeklinde olacaktır.

Burada sıcaklığın yalnızca radyal ve eksenel yönlerdeki değişimi inceleneceği için silindirik koordinatlarda enerji denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} + u \frac{\partial T}{\partial z} = a \cdot \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

Akışın kararlı olduğunu ve boru eksene göre simetrikliği dikkate alınarak t 'ye ve φ 'ye göre türevli terimler (9) nolu eşitlikten çıkartılabilir. Bu kabullerden sonra (9)'nolu denklem aşağıdaki şekli alacaktır.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{u}{a} \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (10)$$

(8) nolu denklemdeki yerel hız ifadesi denklem (10)'da yerine yazılırsa:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{N - \sigma EB}{a \sigma B^2} \left(\frac{I_0(mr)}{I_0(mR)} - 1 \right) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (11)$$

eşitliği elde edilir. Burada, $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} (m^2 / s)$ dir.

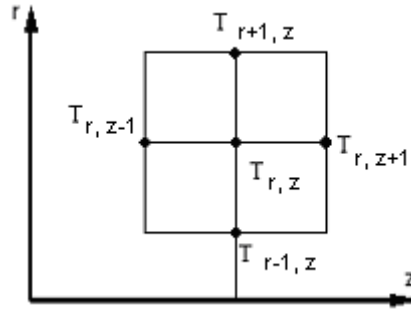
(11) no'lu denklemin çözümü için sınır şartları;

$$z = 0 \text{ 'da, } T_0 = 100^\circ \text{ C ; } r = R \text{ 'de } T_d = 0^\circ \text{ C ; } r = 0 \text{ 'da, } \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \text{ olacaktır.} \quad (12)$$

(11) eşitliği iki değişkenli (r, z) kısmi diferansiyel denklemdir. Bu denklem ‘‘Sonlu Farklar’’ yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür.

3. SAYISAL ÇÖZÜM

Elde edilen (11) nolu denklemin çözümü sonlu fark eşitlikleri kullanılarak Gauss-Seidel yöntemiyle iteratif olarak yapılmıştır. Çözüm bölgesi Şekil 2'de görüldüğü gibi küçük parçalara (sonlu farklar) ayrılmakta, her bir nokta için diferansiyel denklemini sağlaması istenmektedir (Adlaş ve Karabulut, 2001). Sınır şartları başlangıçta belirlenmiş olup, çözümde bunlara uyularak her bir nokta için hız ve sıcaklık hesaplanmaktadır. Her iterasyon işleminde bir önceki iterasyon sonuçları kullanılmakta; böylece gerçeğe daha yakın değerler elde edilmektedir. Belirli tekrarlamadan sonra sonuçlar değişmez olmakta, yani gerçek değerlere ulaşılmış olup işlem bitirilmektedir.



Şekil 2:
Sonlu farklar ağı

Eşitlikleri sayısalılaştırmada kullanılan sonlu fark denklemleri aşağıdadır.

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{T_{r+1, z} - T_{r-1, z}}{2\Delta r} \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{T_{r+1, z} - 2T_{r, z} + T_{r-1, z}}{\Delta r^2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{r, z+1} - 2T_{r, z} + T_{r, z-1}}{\Delta z^2} \quad (15)$$

Sayısalılaştırmada kullanılan sonlu fark denklemleri yerlerine yazıldığında denklem (11) aşağıdaki hale gelecektir.

$$\frac{T_{r+1,z} - 2T_{r,z} + T_{r-1,z}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{T_{r+1,z} - T_{r-1,z}}{2\Delta r} = \frac{N - \sigma EB}{\alpha \sigma B^2} \left(\frac{I_0(mr)}{I_0(mR)} - 1 \right) \frac{T_{r,z+1} - T_{r,z-1}}{2\Delta z} - \frac{T_{r,z+1} - 2T_{r,z} + T_{r,z-1}}{\Delta z^2} \quad (16)$$

Nusselt sayısı, ortalama hız ve ortalama sıcaklık değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda}; \quad (17)$$

$$\alpha = -\frac{\lambda}{T^* - T_d} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (18)$$

$$T^* = \frac{1}{AU^*} \int_A uT dA \quad (19)$$

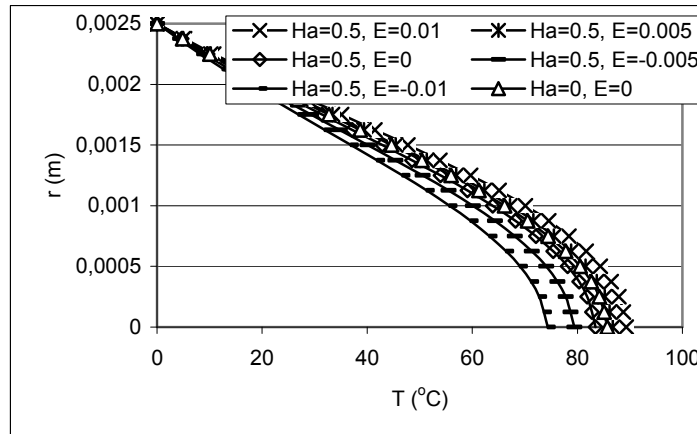
$$U^* = \frac{1}{A} \int_A u dA \quad (20)$$

Her bir kesit için, sayısal çözümle elde edilen sıcaklık değerleri denklem 19 ve denklem 20 kullanılarak ortalama hız ve ortalama sıcaklık değerleri; denklem 17 ve denklem 18 kullanılarak yerel Nusselt sayıları hesaplanmıştır. Boru boyunca hesaplanan yerel Nusselt sayılarının ortalaması alınarak ortalama Nusselt sayısı elde edilmiştir.

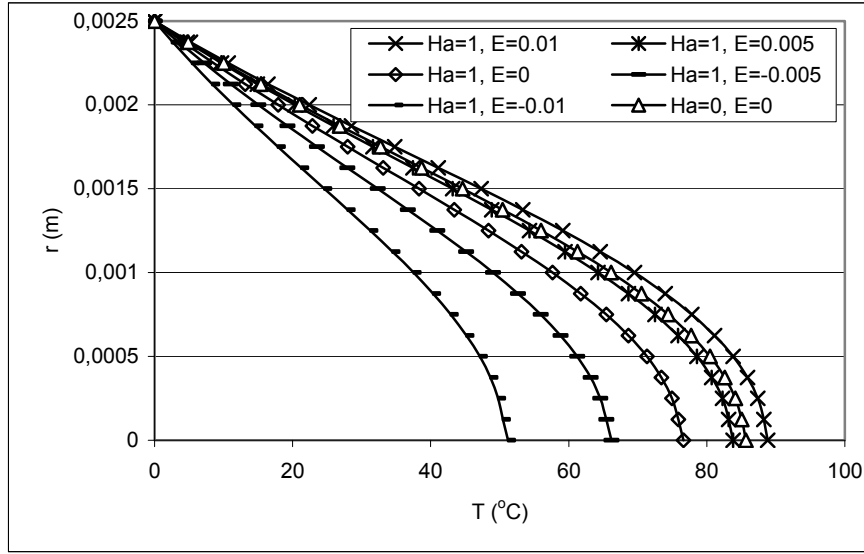
4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Hesaplama kullanılan borunun çapı $D=0.0050$ m, uzunluğu $z = 0.0085$ m; basınç değişimi $N=-0.6$ N/m²; uygulanan manyetik alan induksiyonu $B=0 \div 2$ T ($Ha=0 \div 1$); elektrik alan şiddeti ise $E=-0.01 \div +0.01$ V/m olmuştur. Akışkan olarak % 10 tuz içeren su kullanılmıştır. Akışkanın boruya giriş sıcaklığı (T_0) 100 °C, boru yüzey sıcaklığı (T_d) sabit ve 0 °C olarak alınmıştır. Akışkanın fiziksel özellikleri olarak 100 °C'deki değerler alınmıştır: $\sigma = 12[Ohm.m]^{-1}$; $\rho = 958$ kg / m³; $\mu = 282.10^{-6}$ kg.s/m².

Eşitlik (16)'dan sıcaklığın çekilmesiyle elde edilen ifade, bilgisayar programıyla tüm noktalar için sıcaklıkların hesaplanmasında kullanılmıştır. Sonuçlar değişmez oluncaya kadar bu işleme devam edilmiştir. Yaklaşık 12000 tekrar sonucunda bütün noktaların sıcaklığı değişmez olmuş ve bu değerler grafikleri çizilmek üzere dosyalara kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçların doğruluğu, elektrik ve manyetik alan olmadığı halde elde edilen sıcaklıkların, literatürdeki aynı şartlarda elde edilen sıcaklıklara eşit olmasından anlaşılmıştır (Targ, 1951). Ayrıca sadece manyetik alan etkisi olduğunda ($E=0$) elde edilen sıcaklıklar da daha önce aynı şartlar için yapılan çözümlerdeki sıcaklıklarla aynı olmuştur (Racabovadiloğlu ve Atik, 2005). Şekil 3 ve Şekil 4'te borunun sonunda ($z=0.0085$ m) farklı Hartman sayıları (Ha) ve elektrik alan şiddeti değerleri için radyal yöndeki sıcaklıklar verilmiştir. Ha sayısı manyetik kuvvetin sürtünme kuvvetine oranı olan boyutsuz bir sayıdır.



Şekil 3:
Boru sonunda $Ha=0.5$ için farklı E değerlerinde radyal yönde sıcaklıklar.



Şekil 4:

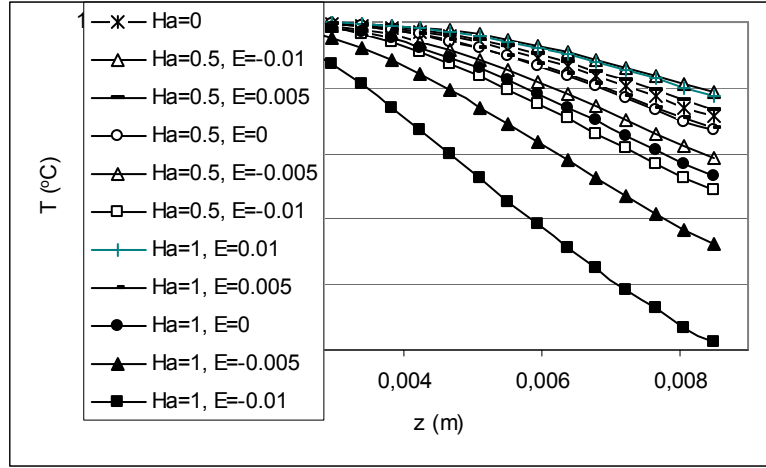
Boru sonunda $Ha=1$ için farklı E değerlerinde radyal yönde sıcaklıklar.

Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü gibi, daha önceki çalışmamızda elde edilen sonuçlara uygun olarak sadece manyetik alan etkisinin artması ile borudaki akışkanın sıcaklıklarında azalma olmuştur. Hartman sayısı, $Ha = 0.5$ olduğunda bu azalma borunun sonunda eksen üzerindeki noktada % 2.61'e, $Ha = 1$ olduğunda ise %10.85'e ulaşmıştır. Sıcaklık dağılımındaki bu tür değişimin nedeni momentum denklemindeki (Denklem 1) $\sigma(\vec{U} \times \vec{B} \times \vec{B})$ ifadesinden kaynaklanan kuvvetin her zaman akışa karşı yönelmesidir.

Şekil 3 ve Şekil 4'ten görüldüğü gibi, manyetik alan ile birlikte akışa dik uygulanan elektrik alanının bulunması da borudaki sıcaklık dağılımını etkilemektedir. Elektrik alanın yönüne göre de sıcaklıkların değiştiği şekillerde görülmektedir. Bu değişim ise momentum denkleminin sonuncu terimindeki $\sigma(\vec{E} \times \vec{B})$ ifadesinden kaynaklanan kuvvetin, uygulanan elektrik alanının yönüne bağlı olarak, akışa karşı veya akış yönünde olmasıyla açıklanmaktadır. Manyetik alan olmadığı durumda elektrik alanının da akışa etkisi olmamaktadır.

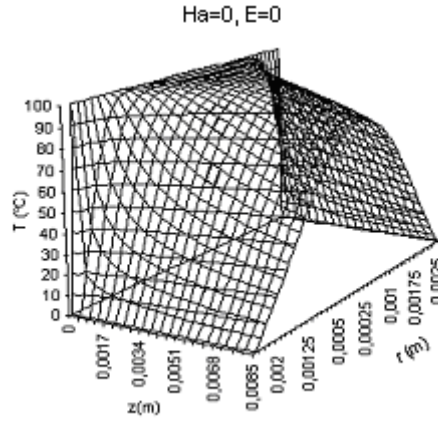
Yine Şekil 3 ve Şekil 4'te görüleceği gibi; elektrik alan pozitif yönde (Şekil 1.'e göre) yöneldiği halde, $Ha= 0.5$, $E=5.10^{-3}$ (V/m) olduğunda borunun sonundaki sıcaklık değerlerinde %3.76, $Ha= 0.5$, $E= 1.10^{-2}$ (V/m) olduğunda %6.57, $Ha= 1$, $E= 5.10^{-3}$ (V/m) olduğunda %8.60, $Ha=1$, $E=1.10^{-2}$ (V/m) olduğunda ise %13.73 artış olmaktadır. Elektrik alanın negatif yönde olduğunda ise $Ha=0.5$, $E=-5.10^{-3}$ (V/m) olduğunda borunun sonundaki sıcaklıklarda %4.85, $Ha=0.5$, $E= -1.10^{-2}$ (V/m) olduğunda %10.89, $Ha=1$, $E= -5.10^{-3}$ (V/m) olduğunda %14.61, $Ha=1$, $E= -1.10^{-2}$ (V/m) olduğunda ise %33.17 azalmalar olmaktadır.

Şekil 5'te farklı Ha sayıları ve elektrik alan şiddeti değerlerinde boru boyunca eksendeki sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'ten çıkartılan sonuçlar bu grafikte de görülmektedir.

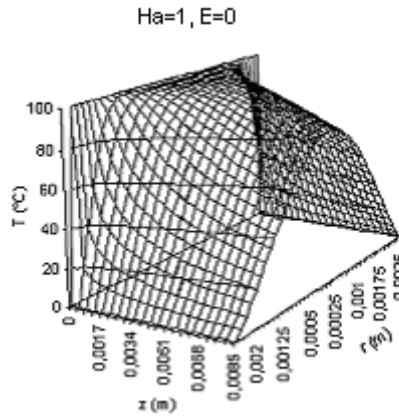


Şekil 5:
Sıcaklığın boru eksenini boyunca değişimi

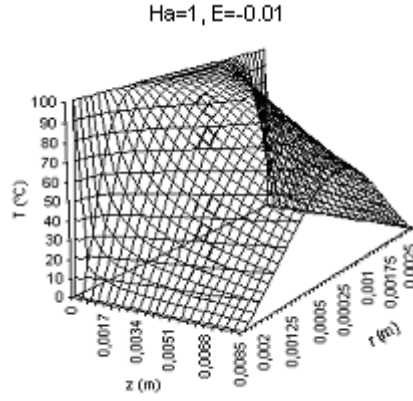
Şekil 6 - Şekil 9'da Ha sayısı ve elektrik alan şiddetinin farklı değerleri için boru eksenini boyunca alınan kesitte sıcaklıklar üçboyutlu grafiklerle verilmiştir. Bu grafiklerde de manyetik alan etkisiyle sıcaklıkların azalması; elektrik alanın negatif yöndeki etkisiyle yine sıcaklıkların azaldığı; pozitif yöndeki etkisiyle sıcaklıkların arttığı görülmektedir.



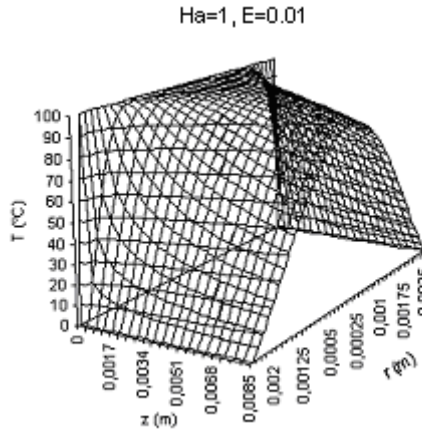
Şekil 6:
Manyetik ve elektrik alan yokken boru aksel kesitinde sıcaklığın değişimi



Şekil 7:
Sadece manyetik alan varken boru aksel kesitinde sıcaklığın değişimi

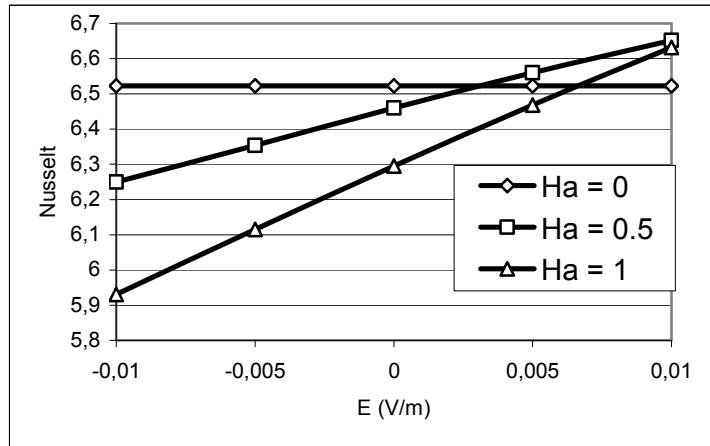


Şekil 8:
Manyetik alan ve negatif yönde elektrik alanının bulunduğu durum için boru kesitinde sıcaklığın değişimi



Şekil 9:
Manyetik alan ve pozitif yönde elektrik alanının bulunduğu durum için boru kesitinde sıcaklığın değişimi.

Farklı Ha sayıları ve elektrik alan şiddetlerine göre Nusselt sayısının değişimi Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10:
Farklı Ha sayılarında Nusselt sayısının elektrik alan şiddetine göre değişimi.

Şekil 10'da görüldüğü gibi, sabit Ha sayıları için, elektrik alanın pozitif yönde artmasıyla Nusselt sayısı artmakta, elektrik alanın negatif yönde artmasıyla da Nusselt sayısı azalmakta; borularda tam gelişmiş laminer akış için verilen Nusselt sayısı değerine yaklaşmaktadır (Yüncü ve Kakaç, 1999; Halıcı ve Gündüz, 1998). $Ha=1$ için elektrik alan yokken $Nu=6.295$ olmakta; elektrik alan şiddeti $E= -0.01$ V/m iken $Nu= 5.931$, $E=0.01$ V/m iken $Nu= 6.632$ olmaktadır. Ayrıca, elektrik alan olmadığı durumlarda Ha sayısının artmasıyla da Nusselt sayısı azalmaktadır.

5. SONUÇ

Silindirik yatay bir boruda zorlanmış konveksiyon ile soğutulan bir akışkan için, ısı transferine manyetik ve elektrik alanların birlikte etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çözüm sonucunda borunun radyal ve eksenel yönlerdeki akışkan sıcaklıkları, akışkan ve borunun fiziksel parametrelerine, manyetik alan indüksiyonuna ve elektrik alanın şiddetine bağlı olarak hesaplanmıştır. Sadece manyetik alan etkisi olduğunda, Ha sayısı artırıldığında, literatürdeki çalışmalarda elde edilen sonuçlara uygun olarak, sıcaklıkların ve Nu sayısının azaldığı tespit edilmiştir. Sadece elektrik alanın ısı taşınımına bir etkisinin olmadığı ortaya çıkarılmıştır. Elektrik ve manyetik alanların birlikte etkilediği durumlarda, elektrik alanın uygulama yönüne bağlı olarak, sıcaklık ve Nusselt sayılarının değiştiği tespit edilmiştir. Elektrik alanın pozitif yönde artmasıyla sıcaklıkların ve Nusselt sayısının arttığı; elektrik alanın negatif yönde artmasında ise bunun tam tersi olduğu görülmüştür.

6. SEMBOLLER

A	: Isı akımına dik sınır yüzey alanı (m^2),
B	: Manyetik alan indüksiyonu (T),
c_p	: Akışkan özgül ısınma ısısı (kJ/kgK),
D	: Borunun çapı (m),
E	: Elektrik alan şiddeti (V/m),
Ha	: Hartman sayısı, $Ha = BR\sqrt{\sigma/\mu}$,
N	: Basınç değişimi (N/m^2),
Nu	: Nusselt sayısı, $Nu = \alpha D / \lambda$,
P	: Basınç (N/m^2),
R	: Borunun yarıçapı (m),
Re	: Reynolds sayısı $Re = \rho UD / \mu$,
t	: Zaman (s),
T_d	: Boru yüzeyi sıcaklığı ($^{\circ}C$),
T_0	: Boru girişindeki akışkan sıcaklığı ($^{\circ}C$),
T^*	: Akışkanın ortalama sıcaklığı ($^{\circ}C$),
U^*	: Akışkanın ortalama hızı (m/s),
u	: Akışkanın yerel akış hızı (m/s),
W_s	: Sürtünmeyi yenmek için harcanan enerji (J/m^3s).
α	: Yüzey ısı taşınım katsayısı (W/m^2K),
λ	: Akışkanın ısı iletkenlik katsayısı (W/mK),
ν	: Akışkanın kinematik viskozite (m^2/s),
η	: Akışkanın dinamik viskozitesi ($kg.s/m^2$),
ρ	: Akışkanın yoğunluğu (kg/m^3),
σ	: Akışkanın özgül elektriksel iletkenliği ($1/Ohm.m$),

u_r, u_φ, u_z : Hız bileşenleri (m/s),

φ, z, r : Silindirik sistemin koordinatları,

$\frac{J^2}{\sigma}$: Akışkanın ısıtılması için harcanan enerji (J/m^3s).

7. KAYNAKLAR

1. Aldaş, K. ve Karabulut, H. (2001) Yatay bir boru Üzerindeki Laminer Film Yoğuşmasının Silindirik ve Kartezyen Sınır Tabaka Denklemleriyle Simülasyonu, *Politeknik Dergisi*, 4 (2), 53-60.
2. Bird, R. B., Stewart, W. E., ve Lightfoot, E. N., (2002) *Transport Phenomena*, John Wiley, New York.,
3. Damseh, R.A., Duwairi, H.M. and Al-odat, M. (2006) Similarity Analysis of Magnetic Field and Thermal Radiation Effects on Forced Convection Flow, *Turkish J. Eng. Env. Sci.*, 30, 83-89.
4. Ghaddar, N. (1999) Turbulent hydromagnetic Flow in bottom-heated thermosiphonic closed loop, *Energy Conversion & Management*, 40, 1341-1356.
5. Gardner, R.A. 1968 Laminar pipe flow in a transverse magnetic field with heat transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 11 (6), 1076-1081.
6. Halıcı, F., Gündüz, M. (1998) *Örneklerle Isı Geçişi*, Sakarya Üniversitesi.
7. Ji, H.C. and Gardner, R.A. (1996) Numerical Analysis of Turbulent Pipe Flow in a Transverse Magnetic Field, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40 (8), 1839-1851.
8. Mahmud, S. and Fraser, R.A. (2007) Visualizing energy flows through energy streamlines and pathlines, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50 (19-20), 3990-4002.
9. Mittal, M.L. (1964) Heat transfer by laminar flow in a circular pipe under transverse magnetic field, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 7 (2), 239-246.
10. Racabovadioloğlu, Z. ve Atik, K. (2005) Isı Taşımına Manyetik Alanın Etkisinin Sayısal İncelenmesi, *KSÜ. Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2), 43-47.
11. Smolentsev, S., Morley, N., Freeze, B., Miraghaie, R., Nave, J.C., Banerjee, S., Ying, A. and Abdou, M. (2004) Thermofluid modeling and experiments for free surface flows of low-conductivity fluid in fusion systems, *Fusion Engineering and Design*, 72, 63-81.
12. Targ, S.M. (1951) Laminer akışların temel problemleri (Rusça), Moskova.
13. Tastoush, B. and Al- Odat, M. (2004) Magnetic Field Effect on Heat and Fluid Flow Over a Wavy Surface With a Variable Heat Flux, *J. Of Magnetism and Magnetic Materials*, 268, 357-363.
14. Umeda, N. and Takahashi, M. (2000) Numerical analysis for heat transfer enhancement of a lithium flow under a transverse magnetic field, *Fusion Engineering and Design*, 51-52, 899-907.
15. Yüncü, H. ve Kakaç, S. (1999) *Temel Isı Transferi*, Ankara.