



GÖZENEKLİ ORTAMLA DOLU YATAY BİR KANALDA BİRLEŞİK TAŞINIMIN SAYISAL ANALİZİ

Filiz ÖZGEN*, Yasin VAROL** ve Hakan Fehmi ÖZTOP***

*Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü 23119, Elazığ, fozgen@gmail.com

**Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü 23119, Elazığ, yvarol@gmail.com

***Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 23119, Elazığ, hfoztop1@gmail.com

(Geliş Tarihi: 01. 11. 2011, Kabul Tarihi: 04. 01. 2012)

Özet: Bu çalışmada, içerisi gözenekli ortamla dolu yatay bir kanalda, birleşik taşınım ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Gözenekli ortamla dolu kanal üzerindeki birleşik taşınım, jeotermal kaynaklardaki akışkan akışı, kimyasal endüstrilerdeki oluşumlar, radyoaktif nükleer atık maddelerinin depolanması, soğutma gibi teknik uygulamalarda geniş bir yere sahiptir. Boyutsuz formda yazılan denklemler, parametrelerin farklı değerleri için, sonlu farklar metodu kullanılarak çözülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, akım çizgileri, eş sıcaklık eğrileri, yerel ve ortalama Nusselt sayıları şeklinde verilmiştir. Rayleigh sayısı ve Peclet sayısı gibi parametrelerin akış ve sıcaklık dağılımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Birleşik ısı transferi, Kanal, Gözenekli ortam.

NUMERICAL STUDY OF MIXED CONVECTION IN A HORIZONTAL CHANNEL FILLED WITH A FLUID-SATURATED POROUS MEDIUM

Abstract: In this study, mixed convection heat transfer has been investigated in a horizontal plate filled with porous media. Mixed convection flow over a heated plate in a saturated porous medium is widely used due to a large number of technical applications, such as fluid flow in geothermal reservoirs, separation processes in chemical industries, storage of radioactive nuclear waste materials, and cooling. Governing equations, written in dimensionless form, have been solved for a range of values of the governing parameters using the finite element method. In the present study, results were presented with streamlines, isotherms, local and mean Nusselt numbers. According to the obtained data, Rayleigh number and Peclet number were important parameters on flow and temperature fields.

Keywords: Mixed convection, Channel, Porous medium.

SEMBOLLER

β	Isıl genişleme katsayısı (K^{-1})
g	Yerçekimi ivmesi (m^2/s)
H^*	Kanalın boyutsuz yüksekliği
K	Gözenekli ortamın geçirgenlik katsayısı
L^*	Kanalın boyutsuz uzunluğu
Nu_x	Yerel Nusselt sayısı
Nu_{ort}	Ortalama Nu sayısı
Pe	Peclet sayısı ($v L^*/\alpha$)
Ra	Rayleigh sayısı ($g \beta (T_h - T_c) L^{*3} / \nu \alpha$)
T	Akışkan sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T_h	Kapalı hacmin taban sıcaklığı ($^{\circ}K$)
T_c	Kapalı hacmin üst yüzey sıcaklığı ($^{\circ}K$)
u	x yönündeki akış hızı (m/s)
U	x yönündeki boyutsuz akış hızı
v	y yönündeki akış hızı (m/s)
V	y yönündeki boyutsuz akış hızı
x, y	Kartezyen koordinatlar (m)
X, Y	Boyutsuz kartezyen koordinatlar

W^*	Isı kaynağının boyutsuz genişliği
α	Isıl difüzyon katsayısı (m^2/s)
ν	Kinematik viskozite (m^2/s)
θ	Boyutsuz sıcaklık
ψ	Akım fonksiyonu
Ψ	Boyutsuz akım fonksiyonu

GİRİŞ

Gözenekli ortamlarda ısıtılmış bir düz tabaka üzerindeki doğal ya da birleşik taşınım, son zamanlarda sıkça incelenen konulardandır. Jeotermal kaynaklardaki akışkan akışı, kimyasal endüstrilerdeki oluşumlar, radyoaktif nükleer atık maddelerin depolanması ve soğutma gibi geniş teknik uygulamalar yüzünden bu çalışmalara öncelik verilmiştir.

Jang ve Chen (1993), gözenekli bir ortamda, yatay birleşik taşınım akışının, girdap kanalı üzerindeki ısı dağılımını ve iç etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sayısal sonuçlar ısı dağılım etkilerinin, ısı transfer oranını ve kararlı akışı arttırdığını göstermiştir.

Aydın ve Kaya (2007), ısıtılmış/soğutulmuş bir düşey düz tabakanın sabit ve laminar karmaşık konveksiyon ısı transferi durumunda viskoz dağılımın etkilerini incelemişlerdir. Dış akış alanı laminar kabul edilerek, sistemin denklemleri sonlu farklar metodu kullanılarak çözülmüştür. Sürtünme ve ısı transferi katsayılarının yanı sıra, hız ve sıcaklık profilleri üzerinde karmaşık konveksiyon parametresi olarak bilinen Richardson sayısı ve Eckert sayılarının etkileri incelenmiştir.

Aldoss vd. (1993), gözenekli bir ortamda, su geçirmeyen yatay bir yüzey üzerindeki birleşik taşınımı, değişik ısı akısı durumları için incelemişlerdir. Doğal taşınım ve zorlanmış taşınımı içeren birleşik taşınım rejiminin çözümü için iki farklı denklem kullanılmış ve sayısal sonuçlar verilmiştir. Aldoss vd. (1993), farklı duvar sıcaklığına sahip yatay bir yüzeyden olan birleşik taşınımın farklı çözümlerini, gözenekli bir ortamda incelemişlerdir.

Jang ve Chen (1993), gözenekli bir ortamdaki birleşik taşınımın yatay bir yüzey üzerinde, farklı gözeneklilik etkilerini incelemişlerdir. Temel akışta, sabit ısı akısı durumları için benzer çözümler elde edilmiştir. Farklı gözeneklilik etkilerinin ısı transfer oranını arttırmaya eğilimli olduğu görülmüştür.

Kumar vd. (2010), gözenekli bir ortamla dolu düşey bir kanal içerisindeki birleşik taşınımın etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Dört farklı model denenmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Basak vd. (2011) duvarları farklı ısıtılmış, gözenekli ortam ile dolu kare bir oyuk içerisindeki birleşik taşınım ile ilgili bir çalışma yapmışlardır.

Kulacki ve Choi (1992), gözenekli bir ortamda bulunan, düşey halka kesitli bir bölgede oluşan birleşik taşınımı, sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Moutsoglou vd. (1981), yatay bir düz tabaka üzerindeki birleşik taşınımın etkilerini analitik olarak incelemişlerdir. Yatay yüzey, ya alttan ısıtılmıştır ya da üstten soğutulmuştur. Gelişen denklemler boyutsuz forma getirildikten sonra, sonlu farklar metodu ile çözülmüştür.

Kang vd. (1990), yatay bir plaka üzerinde, yalıtılmış bir ısı kaynağı modülünden olan birleşik taşınımı incelemişlerdir. Bu problem özellikle elektronik bileşenlerin soğutulması ve aynı zamanda fırın ve ocak gibi farklı imal sistemleri ile de ilgilidir. birleşik taşınım parametresi üzerindeki ısı transfer oranı ve ısıtılmış element ya da kaynağın kalınlığı, özellikle kaynağın çevresinde incelenmiştir. Saeid and Mohamad (2006), içerisi gözenekli ortam ile dolu, alttan ısıtılmış yatay bir kanal içerisindeki birleşik taşınımı sayısal olarak incelemişlerdir. Peclet sayısının yüksek değerlerinde ya Rayleigh sayısının ya da ortalama Nusselt sayısının arttığını görmüşlerdir.

Baytaş (2006), yaptığı çalışmada gözenekli ortamlarda ısı geçişi ve akışın matematiksel ve fiziksel temelleri, bu

konuda iyi bilinen Darcy yasasından başlayarak ve onun yıllar içerisinde yeni düzenlemeleri de geliştirerek anlatmıştır. Ayrıca çalışmasında gözenekli ortam içinde kütle, momentum ve enerji geçişinin sürekli ortamlar yaklaşımını yaparak modellenmesini açıklamıştır. Saeid ve Pop (2005), alttan ısıtılmış, yatay bir gözenekli ortamdaki karma taşınımı sayısal olarak incelemişlerdir. Peclet sayısının, akım ve sıcaklık profilleri üzerine olan etkisini ortaya koymuşlardır. Peclet sayısının küçük değerleri için doğal taşınımın, yüksek değerleri için de zorlanmış taşınımın baskın olduğu görülmüştür.

Kumari ve Nath (2004), gözenekli bir ortamda bulunan yatay bir yüzey üzerinden olan birleşik taşınım üzerine, radyasyonun etkilerini incelemişlerdir. Duvar sıcaklığının, tabakanın kenarından ölçülen mesafe ile değiştiği farz edilmiştir. Gelişen parabolik diferansiyel denklemler, sonlu farklar metodu kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Isı transferinin güçlü bir şekilde radyoaktif akı sayısı, duvar sıcaklığının değişimi, boyutsuz Darcy parametresi ve serbest akım hızından etkilendiği ortaya koyulmuştur.

Pop vd. (2004), gözenekli bir ortam ile doldurulmuş, dar bir düşey borudaki birleşik taşınımı teorik olarak incelemişlerdir. Sayısal sonuçlar, analitik ve asimptotik çözümlerin çok iyi uyduğunu göstermiştir. Nazar vd. (2003), gözenekli bir ortamdaki, yatay dairesel bir silindir üzerindeki birleşik taşınım sınır tabaka akışı için Brinkman modelini kullanmışlardır. Sabit yüzey sıcaklığına sahip yatay dairesel silindir, gözenekli bir ortama gömülmüştür.

Khanafar ve Chamkha (2003), gözenekli ısı üreten yatay bir halka içerisindeki birleşik taşınımı sayısal olarak incelemişlerdir. Dış silindir soğuk iken, iç silindir ısıtılmıştır. Sabit açılı hızda, soğuk dış silindir tarafından zorlanmış taşınım oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar, Richardson sayısının halka içindeki bu tür akışlarda etkili olduğunu göstermiştir.

Elbashbeshy (2001), gözenekli bir ortama gömülmüş yatay bir düz tabaka üzerindeki, laminar birleşik taşınımın ısı transfer karakteristikleri ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Üniform yüzey sıcaklığına sahip yatay plaka üzerine olan üniform emme ve püskürtmenin etkileri sayısal olarak incelenmiş ve Keller Metodu kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki püskürtme, ısı transferinde azalmaya neden olurken, emme ısı transfer katsayısını arttırmaktadır.

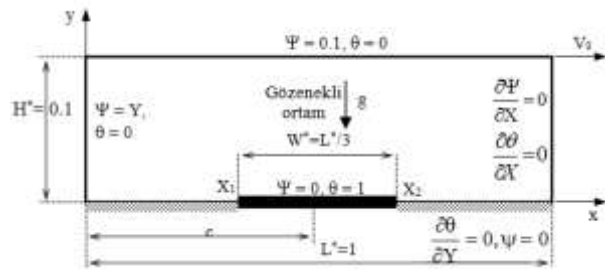
Kumari (2001), gözenekli bir ortamda bulunan yatay bir yüzeydeki doğal ya da birleşik taşınım üzerinde farklı viskozitelerin etkilerini incelemiştir. Akışkan viskozitesinin sıcaklığın ters bir lineer fonksiyonu olduğu farz edilmiştir. Kullanılan diferansiyel denklemler Keller metodu kullanılarak sayısal olarak çözülmüştür. Sonuçlar parametrelerin farklı değerleri için sunulmuştur. Oosthuizen (1988), su geçirmeyen bir yüzey yanındaki gözenekli bir ortamda bulunan ısıtılmış yatay bir tabakadan olan birleşik taşınım ısı transferini

incelemiştir. Tabaka akışkan akışının sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılmıştır. Kullanılan denklemler boyutsuz formda yazılarak, sonlu fark metodu yardımıyla çözülmüştür. Tabakadan olan ısı transfer oranının, hem yüzey altındaki tabakanın boyutsuz derinliğinden hem de su üzerinde durabilme gücünden etkilendiği görülmüştür.

Bu çalışmada, içerisi gözenekli ortamla dolu, alt ve üst cidarının kalınlığı ihmal edilebilen bir kanalda, birleşik taşınım ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Literatürden farklı olarak kanalın tabanının 1/3'ü ısıtılmış, eşit oranda sağa ve sola kaydırılarak kanal içerisindeki ısı transferi incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken Rayleigh sayısının ve Peclet sayısının farklı değerleri kullanılarak akım ve sıcaklık grafikleri çizilmiştir. Rayleigh ve Peclet sayılarının doğal ve zorlanmış taşınım arasındaki geçiş üzerinde nasıl etkili oldukları görülmüştür. Akışkanın giriş sıcaklığı ve kanalın üst cidar sıcaklığı birbirine eşit olup, ısıtılan cidara göre sıcaklıklar daha düşüktür. Akışkan kanala üniform hızda girmekte ve çıkışta ise hidrodinamik ve ısı tam gelişme sağlanmaktadır. Kanal uzunluğu, bu şartları sağlayacak şekilde seçilmiş olup, kanal uzunluğunun kanal yüksekliğine oranı yaklaşık 10 kat daha fazladır. Kanal boyunca akışın ve ısı transferinin analizi için kullanılan denklemler, sonlu farklar metodu yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür.

Hesaplamalar, farklı Rayleigh ve Peclet sayıları için yapılmıştır. Peclet sayısının katı cisim içerisindeki sıcaklık dağılımına etkileri ortaya konmuştur. Cidar boyunca yerel Nusselt sayısının değişimi hesaplanmıştır. Ayrıca, yerel ve ortalama Nusselt sayısının değişimi ile akım ve sıcaklık profilleri farklı parametreler için verilmiştir.

FİZİKSEL MODEL



Şekil 1. Fiziksel model.

Bu çalışmada, içerisi gözenekli ortamla dolu bir kanalda, birleşik taşınım ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Kanalın tabanının 1/3'ü sabit sıcaklıkta ısıtılmaktadır. İlgili geometri, sınır şartları ve koordinatlar Şekil 1' de verilmiştir.

DİFERANSİYEL DENKLEMLERİN ÇÖZÜMÜ

Kapalı hacimlerde akışkan hareketi ve ısı transferi probleminin çözümü için boyutsuz hale dönüştürülen süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin eş

zamanlı olarak çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemlerin lineer olmayan kısmi diferansiyel denklemler olduğu görülmektedir ve analitik olarak çözülmesi mümkün değildir. Bu türden diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılan çeşitli metotlar vardır. Kontrol hacim ve Sonlu Farklar en sık kullanılan çözüm metotlarıdır.

Genel olarak kısmi diferansiyel denklemler üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar eliptik, parabolik ve hiperbolik denklemlerdir. Bu çalışmada kullanılan denklemler eliptik tip denklemlerdir. Denklemler öncelikle Taylor Serisi ile cebirsel denklemlere dönüştürülmüştür. 1. ve 2. derece denklemlerin Taylor Serisi ile açılımında ileri, geri ve merkezi farklar kullanılmıştır.

Elde edilen cebirsel denklemlerin çözümü için de iteratif yöntemlerden "Ardışık Alt rahatlama" metodu kullanılmıştır. Yakınsama kriteri olarak, tüm bağımlı değişkenler için 10^{-5} seçilmiş ve rahatlama parametresi 0.1 alınmıştır. X ve Y yönünde 301x31 eşit adımlı grid dağılımı kullanılmıştır.

Akışı ve ısı transferini yöneten kısmi diferansiyel denklemler:

- Sürekli rejimde ve iki boyutlu akış için yazılmıştır.
- Akışkanın ve gözenekli ortamın özektikleri sabit kabul edilmiştir.
- Yerçekimi ve radyasyon etkileri ihmal edilmiştir.

Gözenekli bir ortamda, iki boyutlu birleşik taşınım için gelişen süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{g\beta K}{\nu} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

(1)-(3) denklemlerini boyutsuz formda yazabilmek için, aşağıda verilen boyutsuz ifadeler kullanılmıştır:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{u}{V_0} = \frac{\partial \psi}{\partial Y}, V = \frac{v}{V_0} = -\frac{\partial \psi}{\partial X}$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, Ra = \frac{g\beta K(T_h - T_c)L}{\nu\alpha}, Pe = \frac{v_0 L}{\alpha} \quad (4)$$

İncelediğimiz model için kullanılan boyutsuz momentum ve enerji denklemleri;

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} = -\frac{Ra}{Pe} \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (5)$$

$$Pe \left[\frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial \theta}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right] = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (6)$$

şeklinde elde edilmiştir. Bu denklemlerin çözümü için sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Çalışmada, katı cidar ve akışkan ara yüzeyi için gerekli olan sınır şartlarını aşağıdaki gibi verebiliriz:

$$\psi(X,1) = 0.1, \theta(X,1) = 0 \quad (7)$$

$$\psi(0,Y) = Y, \theta(0,Y) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \psi(L,Y)}{\partial X} = 0, \frac{\partial \theta(L,Y)}{\partial X} = 0 \quad (9)$$

Isı kaynağının olduğu kısım boyunca;

$$0 \leq X \leq X_1: \frac{\partial \theta(X,0)}{\partial Y} = 0, \psi(X,0) = 0 \quad (10)$$

$$X_2 \leq X \leq L: \frac{\partial \theta(X,0)}{\partial Y} = 0, \psi(X,0) = 0 \quad (11)$$

$$X_1 < X < X_2: \theta(X,0) = 1, \psi(X,0) = 0 \quad (12)$$

şeklinde. Yerel ve ortalama Nu sayıları aşağıdaki gibi verilebilir:

$$Nu_x = \left(-\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Y=0}, Nu = \int_0^L Nu_x dx \quad (13)$$

Hesaplamalar, farklı Peclet sayıları ve Rayleigh sayıları için yapılmıştır. Peclet sayısının ve Rayleigh sayısının katı cisim içerisindeki sıcaklık dağılımına etkileri ortaya konmuştur. Gerekli incelemeler yapılırken, ısı kaynağı 1/3 oranında eşit olarak sağa ve sola doğru kaydırılmıştır. Farklı Peclet ve Rayleigh sayıları için, ısı kaynağının sola yakın, ortada ve sağa yakın olması durumlarında, akım ve sıcaklık profilleri verilmiştir.

Sayısal çözümün geçerliliği için mevcut programdan elde edilen sonuçlar ile literatürden temin edilmiş sonuçlar Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 1'de Ra=100 için Pe sayısının 1, 5 ve 10 değerine bağlı olarak Nusselt sayısının değerleri literatür ile kıyaslanmıştır. Tablo 2'de ise Pe=1 için Rayleigh sayısının 10, 30, 50, 70 ve 90 değeri için Nusselt sayısının değerleri literatür ile kıyaslanarak sunulmuştur.

Sonuçların literatürdeki değerlerle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 1. Ra=100 için ortalama Nu sayısının karşılaştırılması.

Pe	1	5	10
Saeid and Mohamad (2006)	5.7	5.8	5.85
Saeid and Pop (2005)	4.1	4.5	5.8
Mevcut Çalışma	4.23	4.27	4.8

Tablo 2. Pe=1 için ortalama Nu sayısının karşılaştırılması.

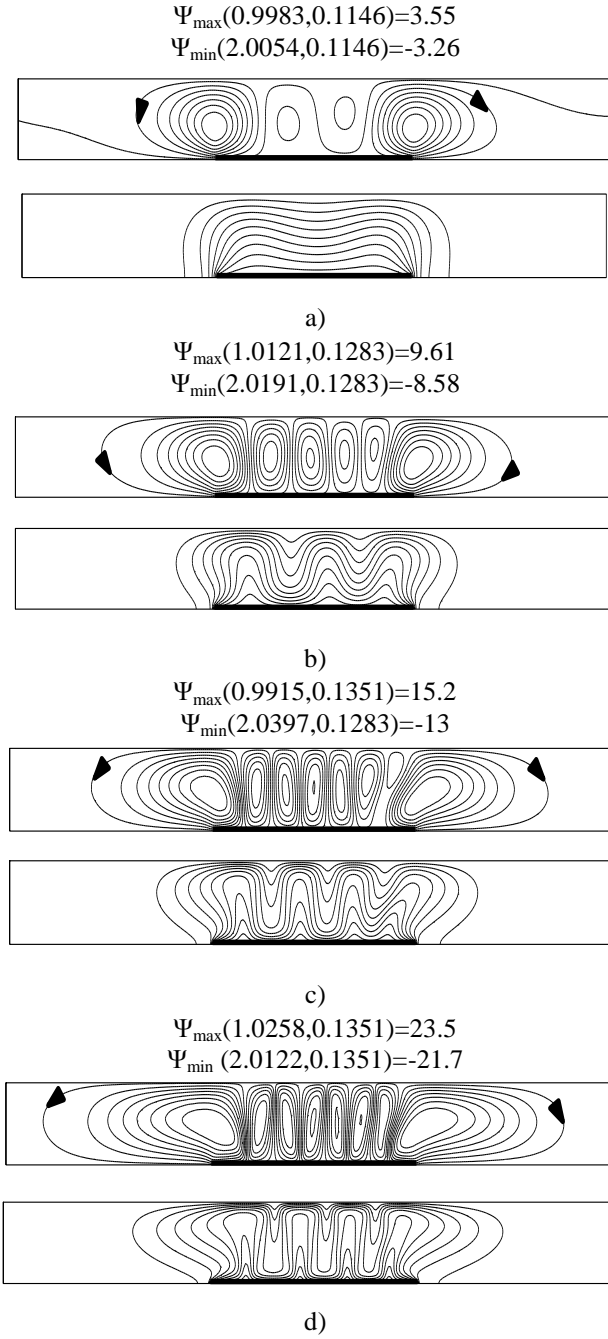
Ra	10	30	50	70	90
Saeid and Mohamad (2006)	1.75	2	3.7	4.8	5.5
Mevcut Çalışma	2.9	3.8	4.01	4.07	4.18

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, içerisi gözenekli ortamla dolu, alt ve üst cidarının kalınlığı ihmal edilebilen bir kanalda, birleşik taşınım ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, akım çizgileri, eş sıcaklık eğrileri, yerel Nusselt sayıları ve ortalama Nusselt sayıları olarak verilmiştir. Hesaplamalar, farklı Rayleigh ve Peclet sayıları için yapılmıştır. Rayleigh sayısı ve Peclet sayısının akış ve ısı transferi üzerindeki etkin parametreler olduğu görülmüştür.

Şekil 2' de Pe=0.5 için Rayleigh sayısının farklı değerlerinde, kapalı hacim içerisinde oluşan akım çizgileri (üstte) ve eş sıcaklık eğrileri (altta) görülmektedir. Şekil 2 (a)' da, Ra=100 için ısıtıcının üst tarafında birkaç dönme merkezi görülmektedir. Rayleigh sayısının düşük olması sıcaklık eğrilerinin de düzgün dağılmasını sağlamıştır. Şekil 2 (b)' de, Ra=250 değerine yükselmesi, dönme merkezlerinin sayısını artırarak sıcaklık eğrilerinin de hareketlenmesine neden olmaktadır. Şekil 2 (c)' de Rayleigh sayısının artması ile birlikte, alt yüzeyde ısınan akışkan kapalı hacim içerisine daha fazla nüfuz ederek yayılmaktadır. İlgili sıcaklık eğrilerinden de görüldüğü gibi iletim yoluyla olan ısı transferi azalarak, taşınım yoluyla olan ısı transferi baskın olmaya başlamıştır. Bu durum Şekil 2 (d)' de daha da açıktır. Rayleigh sayısının artması akışı şiddetlendirerek, hacim içerisindeki dönme merkezlerinin artmasına ve sıcaklık eğrilerinin yüzeyin kenarlarına daha fazla nüfuz etmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte minimum ve maksimum akım değerinin mutlak değerlerinde artış görülmektedir.

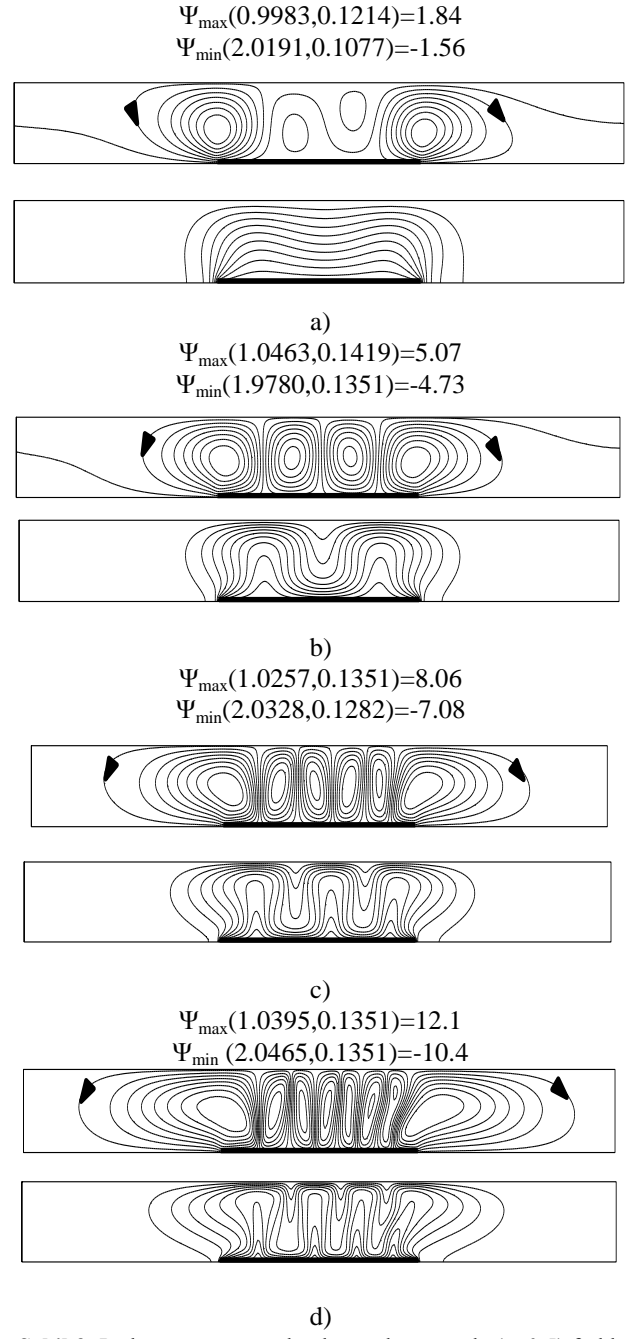
Şekil 3'te Pe=1 için farklı Rayleigh sayılarına bağlı olarak akım-sıcaklık profilleri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi akış, ısı kaynağı etrafında yoğunlaşmıştır ve tüm Rayleigh sayıları için birden fazla dönme merkezi meydana gelmiştir, ayrıca minimum ve



Şekil 2. Isı kaynağının ortada olması durumunda ($c=0.5$) farklı Ra sayıları ve $Pe=0.5$ için sabit akım (üstte) ve eş sıcaklık (altta) profilleri, a) $Ra=100$, b) $Ra=250$, c) $Ra=500$, d) $Ra=1000$.

maksimum akım fonksiyonu değerleri de verilmiştir. Tüm Rayleigh sayılarında, ısıtıcı üzerinde iki veya daha fazla dönme merkezi elde edilmiştir. Isıtıcılar üzerinde oluşan hücrelerden bir kısmı saat ibresi yönünde, diğerleri ise saat ibresinin tersi yönünde dönmektedir. Eş sıcaklık eğrilerine bakıldığında iletimle ısı transferinin etkin olmasından dolayı, düşük Rayleigh sayılarında çok aşırı bir değişim olmamakta, yüksek Rayleigh sayılarında yatay ısıtıcı üzerinde mantar şeklinde dağılan eş sıcaklık eğrileri görülmektedir.

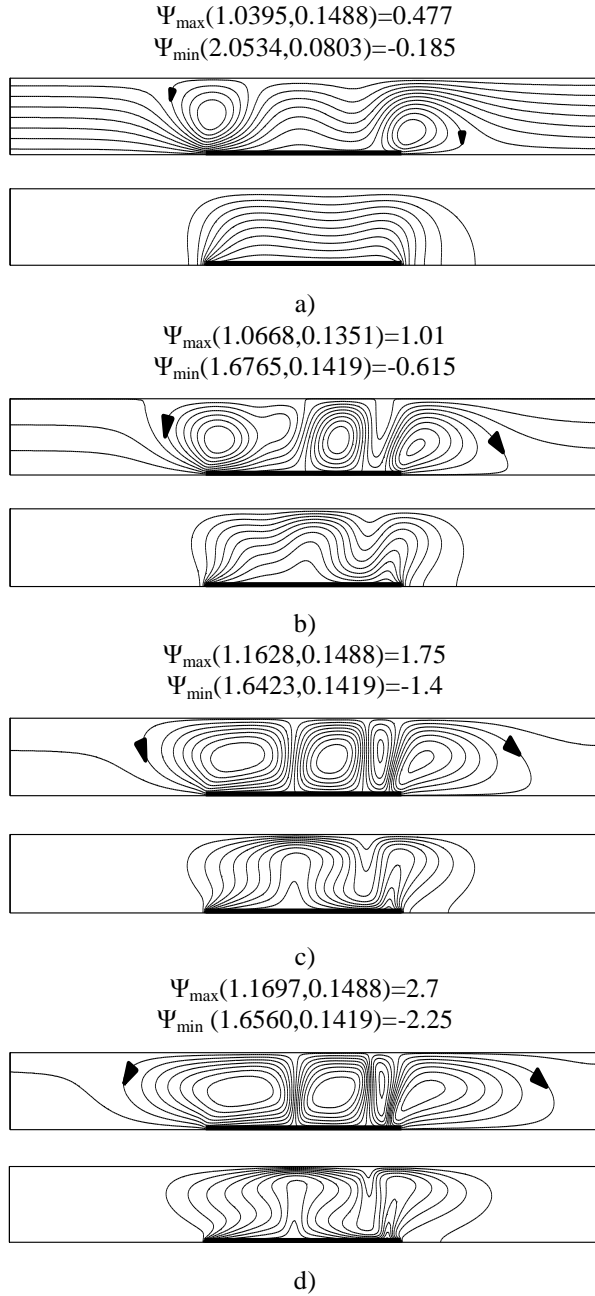
Şekil 4'te $Pe=5$ için farklı Rayleigh sayılarına bağlı olarak akım-sıcaklık profilleri verilmiştir. Peclet sayısının küçük değerleri için akışkanın sakin olduğu



Şekil 3. Isı kaynağının ortada olması durumunda ($c=0.5$) farklı Ra sayıları ve $Pe=1$ için sabit akım (üstte) ve eş sıcaklık (altta) profilleri, a) $Ra=100$, b) $Ra=250$, c) $Ra=500$, d) $Ra=1000$.

ancak büyük değerleri için akış alanında salınımların mevcut olduğu gözlenmiştir. Bu salınımlar, Peclet sayısının artmasından dolayı oluşan zorlanmış taşınımın baskın hale gelmeye başlamasındandır. Şekillerde de görüldüğü gibi akış sırasında oluşan salınım, ısı kaynağı etrafında daha yoğundur.

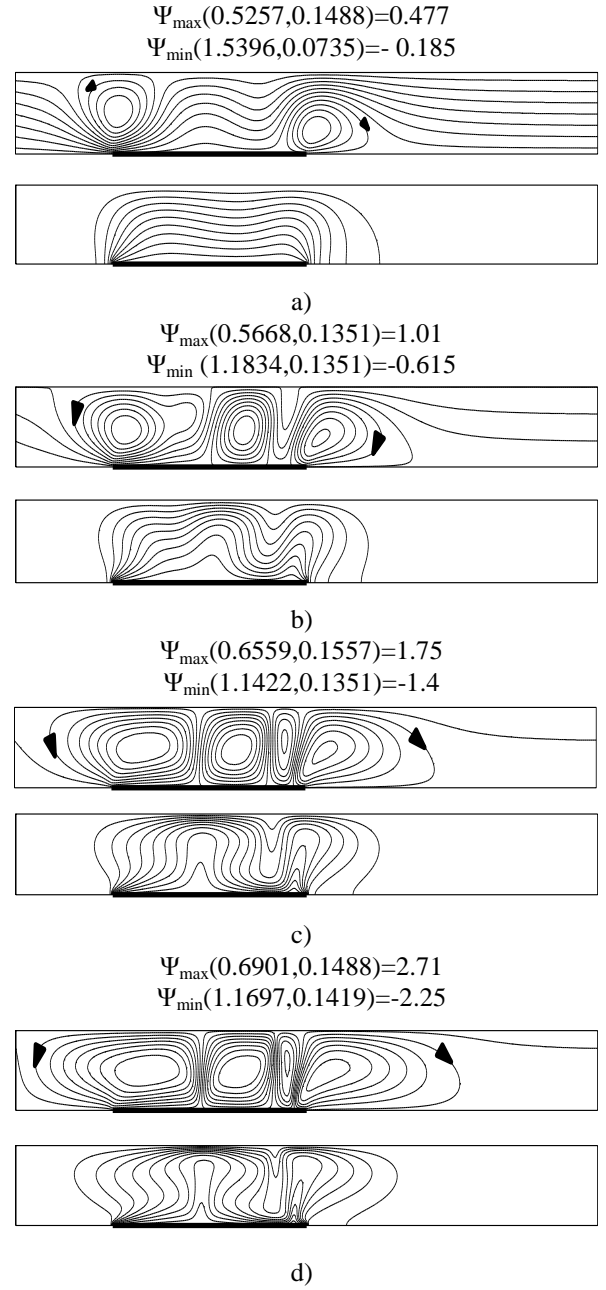
Şekil 5'te ısı kaynağının sola yakın olması durumu için, $Pe=5$ değerine bağlı olarak farklı Rayleigh sayıları için akım-sıcaklık profilleri görülmektedir. Ayrıca minimum ve maksimum akım fonksiyonu değerleri de verilmiştir. Rayleigh sayısının artışı ile birlikte mutlak değer olarak akım fonksiyonu değerleri de artmakta, bu da akışın şiddetindeki artışı ifade etmektedir. Tüm Rayleigh



Şekil 4. Isı kaynağının ortada olması durumunda ($c=0.5$) farklı Ra sayıları ve $Pe=5$ için sabit akım (üstte) ve eş sıcaklık (altta) profilleri, a) $Ra=100$, b) $Ra=250$, c) $Ra=500$, d) $Ra=1000$.

sayıları için birden fazla dönme merkezi meydana gelmekte, ancak dönme merkezi yönü sağ tarafta saat ibresi yönünde iken, sol tarafta saat ibresinin tersi yönünde oluşmaktadır.

Şekil 6'da ısı kaynağının sağa yakın olması durumu için, $Pe=5$ değerine bağlı olarak Rayleigh sayısının farklı değerleri için akım-sıcaklık profilleri verilmiştir. Isı kaynağının diğer konumlarına benzer şekilde, akış ısı kaynağı etrafında yoğunlaşmıştır ve tüm Rayleigh sayıları için birden fazla dönme merkezi meydana gelmiştir. Rayleigh sayısının artmasına bağlı olarak özellikle ısıtıcı üzerinde alev şeklinde sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Rayleigh sayısının düşük olduğu durumlarda ise genellikle mantar biçimli sıcaklık



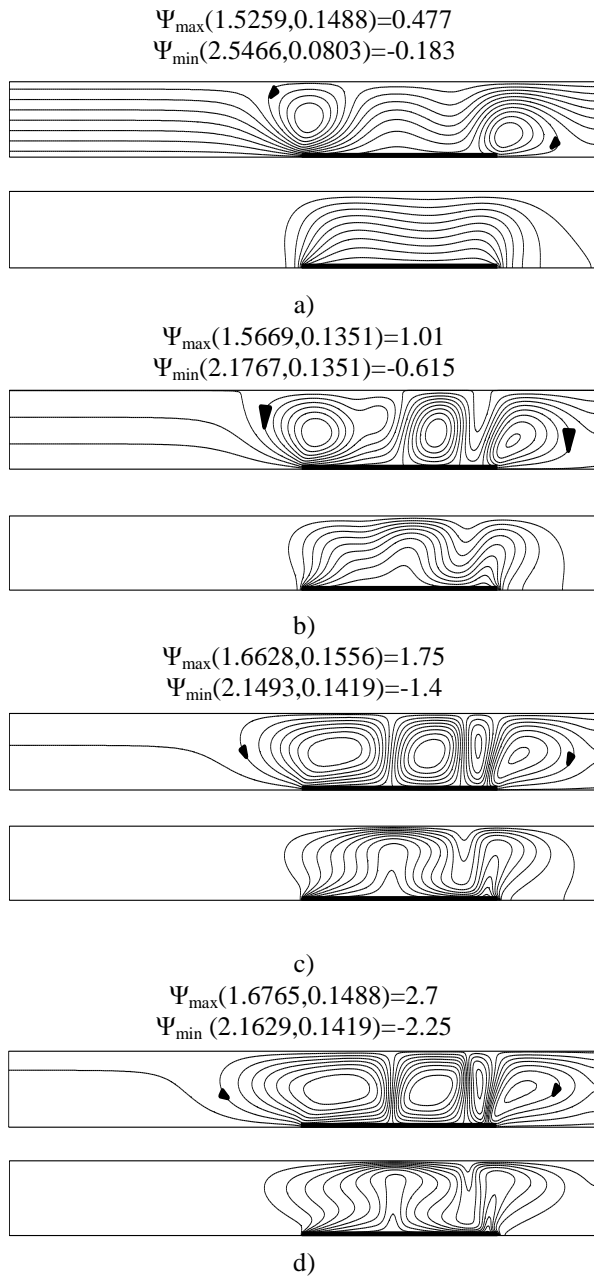
Şekil 5. Isı kaynağının sola yakın olması durumunda ($c=0.33$) farklı Ra sayıları ve $Pe=5$ için sabit akım (üstte) ve eş sıcaklık (altta) profilleri, a) $Ra=100$, b) $Ra=250$, c) $Ra=500$, d) $Ra=1000$

dağılımının olduğu gözlenmiştir. Alev şeklinde dağılan sıcaklık daha yüksek taşınım ısı transferini işaret etmektedir. Ayrıca düşük Rayleigh sayılarında iletimle, yüksek Rayleigh sayılarında ise taşınım ile ısı transferinin baskın olduğu görülmektedir.

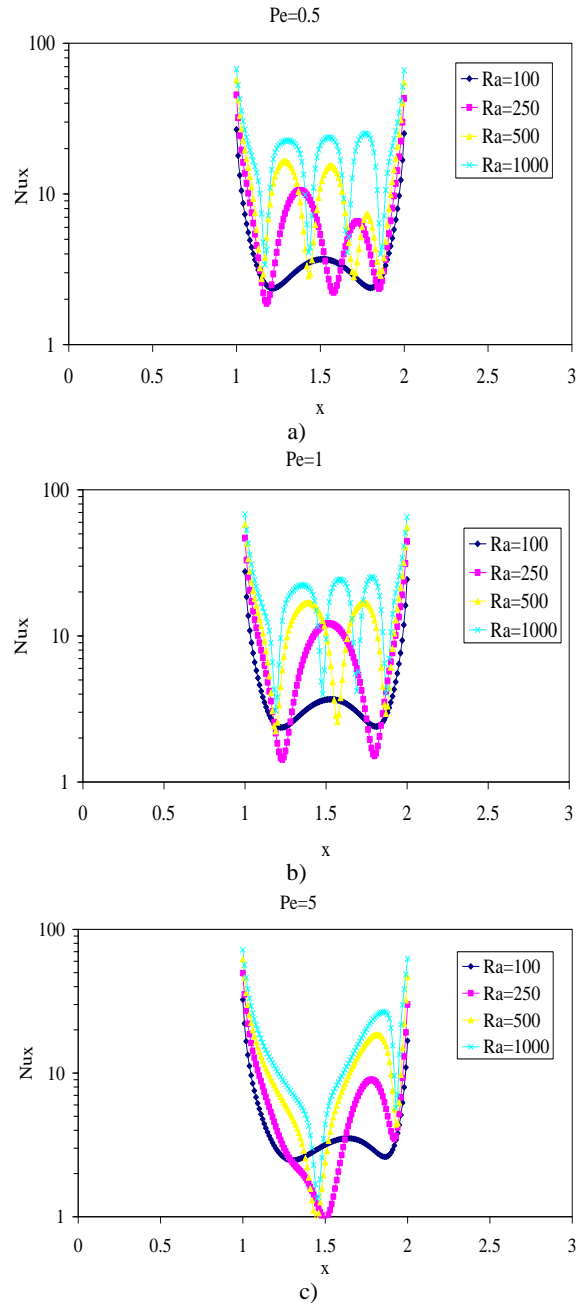
Şekil 7'de ısı kaynağının ortada olması durumu için farklı Peclet ve Rayleigh sayılarına bağlı olarak, yerel Nusselt sayısının değişimi görülmektedir. Tüm parametreler için yerel Nusselt sayıları sinüsoidal bir dağılım arz etmektedir. Şekillerde de görüldüğü üzere sinüsoidal değişimde en üst değerdeki noktaların yeri akım ve sıcaklık profillerinde verilen akım çizgilerinin değişimi ile ilişki kurularak açıklanabilir. Dönme merkezinin olduğu noktalar, akıştan etkilenir ve dönme

merkezinin olduğu yerde yerel Nusselt sayısında en yüksek değerler elde edilir. Düşük Rayleigh sayılarında, iletimle ısı transferinin taşınımıyla ısı transferine göre daha baskın olduğu söylenebilir. İletimle ısı transferinin etkili olmasından dolayı akış hareketsizdir. Rayleigh sayısının artışı ile birlikte kapalı hacim içerisindeki simetrik davranış bozulmaktadır. Bu durumda akışın kapalı hacim içerisine daha fazla nüfuz ettiği ve akışın hareketlendiği görülmektedir. Rayleigh sayısının artması yerel Nusselt sayısının da artması anlamına gelmektedir.

Şekil 8’ de ısı kaynağının ortada olması durumunda, farklı Peclet sayıları için ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi verilmiştir ve bu değişim lineerdir. Peclet sayısının yüksek değerlerinde



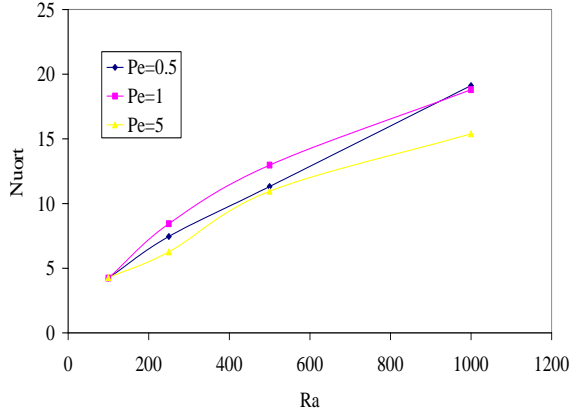
Şekil 6. Isı kaynağının sağa yakın olması durumunda ($c=0.66$) farklı Ra sayıları ve $Pe=5$ için sabit akım (üstte) ve eş sıcaklık (altta) profilleri, a) $Ra=100$, b) $Ra=250$, c) $Ra=500$, d) $Ra=1000$.



Şekil 7. Isı kaynağının ortada olması durumunda ($c=0.5$), yerel Nusselt sayısının kanal boyunca değişimi, a) $Pe=0.5$, b) $Pe=1$, c) $Pe=5$.

ısı transferinin azaldığı ve zorlanmış taşınımın baskın olmaya başladığı görülmektedir. Rayleigh sayısının düşük değerlerinde iletimle ısı transferinin baskın olmasından dolayı ortalama Nusselt sayısının değerinde çok fazla değişim olmamakta, Rayleigh sayısının artması ile birlikte taşınım ile ısı transferinin baskın olması sebebiyle ortalama Nusselt sayısında artış gözlenmektedir. İletimle ısı transferinin baskın olduğu düşük Rayleigh sayılarında Nusselt sayısının değerleri birbirine oldukça yakındır. Rayleigh sayısının artmaya başlaması, özellikle ısı kaynağı etrafında daha fazla dönme merkezi meydana getirerek, maksimum ve minimum akım fonksiyonu değerlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum taşınım yoluyla olan ısı transferini arttırarak, ortalama Nusselt sayısının artmasını

sağlamaktadır. Peclet sayısının artması, zorlanmış taşınım parametresi olan Reynolds sayısının artması anlamına geldiği için ($Pe=Re.Pr$), taşınım yoluyla olan ısı transferi baskın hale gelmekte ve Nusselt sayısının değeri $Pe=5$ için yüksek iken, $Pe=0.5$ için düşük değerdedir.



Şekil 8. Isı kaynağının ortada olması durumunda ($c=0.5$) ortalama Nusselt sayısının Rayleigh sayısı ile değişimi.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, içerisi gözenekli ortamla dolu, alt ve üst cidarının kalınlığı ihmal edilebilen bir kanalda, birleşik taşınım ısı transferi sayısal olarak incelenmiştir. Hesaplamalar sonucunda aşağıdaki genel sonuçlar elde edilmiştir:

- Tüm Rayleigh sayıları için, hacim içerisinde, ısıtıcının etrafında bir dönme merkezi oluşmaktadır.
- Rayleigh sayısının artışı ile birlikte mutlak değer olarak akım fonksiyonu değerleri de artmakta, bu da akışın şiddetindeki artışı ifade etmektedir.
- Farklı Rayleigh sayılarında farklı ısıtıcı pozisyonları için Nusselt sayısının etkilerine bakıldığında, sinüsoidal şeklinde bir dağılım görülmektedir. İletim ısı transferinin baskın olduğu düşük Rayleigh sayılarında Nusselt sayısı değerleri birbirine oldukça yakın olmaktadır.
- Peclet sayısı büyük değerlere sahip iken ısı geçişinin azaldığı görülmektedir. Fakat Peclet sayısının küçük değerlerinde ise akış ortamında ısı taşınımından daha çok ısı iletimi hakimdir.

KAYNAKLAR

Aldoss, T. K., Chen, T. S. and Armaly, B. F., Nonsimilarity solution for mixed convection from horizontal surfaces in a porous medium-variable surface heat flux, *International Journal Heat Mass Transfer* 36, 463-470, 1993.

Aldoss, T. K., Chen, T. S. and Armaly, B. F., Nonsimilarity solution for mixed convection from

horizontal surfaces in a porous medium-variable wall temperature, *International Journal Heat Mass Transfer* 36, 471-477, 1993.

Aydın, O. and Kaya, A., Mixed convection of a viscous dissipating fluid about a vertical flat plate, *Applied Mathematical Modelling* 31, 843-853, 2007.

Basak, T., Krishna Pradeep P. V., Roy, S. and Pop, I., Finite element based heatline approach to study mixed convection in a porous square cavity with various wall thermal boundary conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54, 1706-1727, 2011.

Baytaş, A. C., Gözenekli ortamlarda taşınım olayı, *İTÜ Dergisi Fen Bilimleri Enstitüsü* 4, 1, 3-13, 2006.

Elbashbeshy, E. M. A., Laminar mixed convection over horizontal flat plate embedded in a non-Darcian porous medium with suction and injection, *Applied Mathematics and Computation* 121, 123-128, 2001.

Jang, J. and Chen, J., Thermal dispersion and inertia affects on vortex instability of a horizontal mixed convection flow in a saturated porous medium, *Int. J. Heat Mass Transfer* 36, 383-389, 1993.

Jang, J. Y. and Chen, J. L., Variable porosity effect on vortex instability of a horizontal mixed convection flow in a saturated porous medium, *International Journal Heat Mass Transfer* 36, 1573-1582, 1993.

Kang, B. H., Jaluria, Y. and Tewari, S. S., Mixed convection transport from an isolated heat source module on a horizontal plate, *Journal of Heat Transfer* 112, 653-661, 1990.

Khanafar, K. and Chamkha, A. J., Mixed convection within a porous heat generating horizontal annulus, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 1725-1735, 2003.

Kulacki, F. A. and Choi, C. Y., Mixed convection through vertical porous annuli locally heated from the inner cylinder, *Journal of Heat Transfer* 114, 143-151, 1992.

Kumar, J., Bera, P. and Khalili, A., Influence of inertia and drag terms on the stability of mixed convection in a vertical porous-medium channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53, 5261-5273, 2010.

Kumari, M. and Nath, G., Radiation effect on mixed convection from a horizontal surface in a porous medium, *Mechanics Research Communications* 31, 483-491, 2004.

Kumari, M., Variable viscosity effects on free and mixed convection boundary-layer flow from a horizontal surface in a saturated porous medium variable heat flux, *Mechanics Research Communications* 28, 339-348, 2001.

Moutsoglou, A., Chen, T. S. and Cheng, K. C., Vortex instability of mixed convection flow over a horizontal flat plate, *Journal of Heat Transfer* 103, 257-261, 1981.

Nazar, R., Amin, N., Filip, D. and Pop, I., The Brinkman model for the mixed convection boundary layer flow past a horizontal circular cylinder in a porous medium, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 3167-3178, 2003.

Oosthuizen, P. H., Mixed convective heat transfer from a heated horizontal plate in a porous medium near an impermeable surface, *Journal of Heat Transfer* 110, 390-394, 1988.

Pop, I., Rees, D. A. S. and Egbers, C., Mixed convection flow in a narrow vertical duct filled with a porous medium, *International Journal of Thermal Sciences* 43, 489-498, 2004.

Saeid, N. H. and Mohamad, A. A., Jet impingement cooling of a horizontal surface in a confined porous medium: Mixed convection regime, *International Journal Heat Mass Transfer* 49, 3906-3913, 2006.

Saeid, N. H. and Pop, I., Transient mixed convection in a horizontal porous layer heated from below: 4. *International Conference on Computational Heat and Mass Transfer*, 6s.



Filiz ÖZGEN, 1976 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 1997 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde açılan Araştırma Görevliliği sınavını kazandı. 2011 yılında doktora eğitimini tamamladı. Halen aynı bölümde görevini sürdürmektedir.



Yasin VAROL, 1968 yılında Elazığ' da doğdu. 1989 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1996 yılında Çukurova Üniversitesinde doktora eğitimini tamamladı. 2001 yılında Doçent, 2007 yılında Profesör ünvanı aldı. Halen Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.



Hakan Fehmi ÖZTOP, 1973 yılında Elazığ' da doğdu. 1996 yılında Elazığ Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2003 yılında Fırat Üniversitesinde doktora eğitimini tamamladı. 2007 yılında Doçent ünvanı aldı. Halen Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.