

SINIR ŞARTLARININ KAPALI ORTAMLARDAKİ DOĞAL TAŞINIMLA ISI TRANSFERİ VE SICAKLIK DAĞILIMINA ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZİ

Birol ŞAHİN

ÖZET

Kapalı kare ortamlardaki doğal taşınım, ortamın düşey duvarlarından birine farklı sınır koşulu uygulanması durumu için sayısal olarak incelendi. İncelenen kapalı ortamın yatay duvarlarının yalıtılmış, düşey duvarlarından birinin ise sabit sıcaklığa sahip olduğu kabul edildi. Diğer duvarın sıcaklığı ise konuma bağlı olarak artan veya azalan yönde bir özellik göstermektedir. Belirlenen durumların her biri için elde edilen sayısal bulgular, çözüm bölgesi içerisindeki akım çizgileri, eş sıcaklık eğrileri ve ortalama Nusselt sayıları olarak sunuldu. Doğal taşınım probleminin çözümü için geçerli olan Navier-Stokes denklemleri ve enerji denklemi boyutsuzlaştırılmış olup sonlu kontrol hacmi metodu kullanılarak SIMPLE algoritmasına göre çözüldü. Çalışma, laminar doğal taşınım ile ısı transferinin gerçekleştiği Rayleigh sayısının 10^4 - 10^6 aralığındaki değerleri için yapıldı. Kapalı ortam içerisinde kullanılan akışkanın hava olduğu kabulüyle Prandtl sayısı 0.71 alındı. Uygulanan sınır şartlarının kare geometrisindeki kapalı ortamlarda ısı transferi ve sıcaklık dağılımını önemli bir şekilde etkilediği sonucuna varıldı.

Anahtar Kelimeler: Kare kapalı ortam, doğal taşınım ile ısı transferi, sınır şartı.

ABSTRACT

Natural convection heat transfer in a square enclosure one of the vertical walls having different boundary conditions has been numerically analyzed. Horizontal walls were insulated and one of the vertical wall had a constant temperature. The other wall's temperature is depending on the direction of increasing or decreasing from location. Results of the prescribed cases are presented in terms of stream functions, isotherms and average Nusselt numbers. Navier-Stokes and energy equations valid to solve the natural convection problem have been non-dimensionalized and discretized by finite volume method. Discretized equations solved by well known SIMPLE algorithm. Analysis for the current problem is performed for 10^4 to 10^6 range of Rayleigh number. Fluid used in enclosure is air and Prandtl number is accepted 0.71 for air. As a result, applied boundary conditions in square enclosures have significant effect on heat transfer and temperature distribution.

Key Words: Square enclosure, natural convection heat transfer, boundary condition

1. GİRİŞ

Doğal taşınım ile ısı transferi, pek çok alanda uygulaması olan ve sıklıkla karşımıza çıkan bir konudur. Bu nedenle özellikle kapalı ortamlarda ısı konforunun sağlanmasında, elektronik cihazların soğutulmasında, güneş enerjisi sistemlerinde, nükleer reaktörlerin soğutulmasında, damıtma işlemleri gibi alanlarda doğal taşınım ile ısı transferinden faydalanılmaktadır.

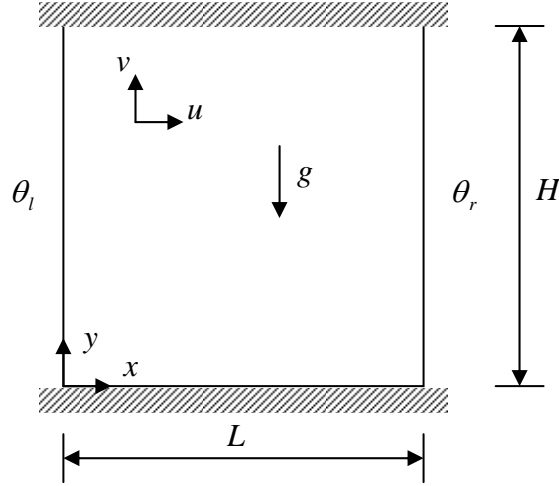
Genel olarak taşınım ile ısı transferi doğal ve zorlanmış taşınım olarak ikiye ayrılır. Zorlanmış taşınım, bir fan, vantilatör, pompa, vb. dış etkiler sonucu meydana gelirken doğal taşınım da akışı zorlayıcı dış etkiler yoktur. Doğal taşınım ile ısı transferi yoğunluk farkından kaynaklanmaktadır. Isınan molekülün yoğunluğu azalacağından dolayı yer çekiminin tersi yönünde hareket eder, böylece bir kaldırma kuvveti meydana gelir. Genelde akışkanlar hem sıcak, hem de soğuk yüzeylerle temasta buldukları için, sınır şartlarına bağlı olarak yer çekimi yönünde veya buna ters yönde akışkan hareketleri eş zamanlı olarak oluşur. Doğal taşınım ile ısı transferi, Rayleigh sayısına bağlı olarak laminer ve türbülanslı doğal taşınım olarak ikiye ayrılmaktadır. Kullanılan akışkana ve sınır şartlarına göre Rayleigh sayısının 10^3 - 10^7 aralığındaki değerleri için laminer doğal taşınım, Rayleigh sayısının 10^9 dan büyük olması durumunda ise türbülanslı doğal taşınım geçerlidir.

Doğal taşınım ile ısı transferi ile ilgili sayısal çalışmalar daha çok 1980 yılı ve sonrasında, bilgisayarların hızına ve kapasitesine bağlı olarak artmıştır. Bir tarafı yüksek sıcaklıkta, tavan kısmı düşük sıcaklıkta olan ve diğer yüzeyleri yalıtılmış iki boyutlu kapalı ortam için doğal taşınım problemi, akım fonksiyon-vortisite formülasyonu kullanılarak değişik en/boy oranlarında ve Rayleigh sayısının 10^3 - 10^7 aralığında olması durumları için Aydın vd. [1] tarafından çalışılmıştır. De la Cruz ve Ramos [2], zaman bağımlı doğal taşınım olayını akış oluşturacak şekilde değişken sıcak ve soğuk sıcaklıklara sahip olan iki boyutlu kapalı ortamlarda incelemiştir. Böylece üst ve alt duvarları periyodik olarak ısıtılan ve soğutulan iki boyutlu kapalı ortamlar için geliştirilen doğal taşınım eşitlikleriyle sayısal bir çözüm yapılmıştır. Corcione [3], alttan ısıtılmış, üstten soğutulmuş, yan duvarları farklı sınır şartlarındaki iki boyutlu kapalı ortamlarda meydana gelen doğal taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Davis [4], iki boyutlu geometriye sahip alttan ve üstten yalıtılmış, farklı sıcaklıklara sahip yan duvarlar arasındaki doğal taşınım ile ısı transferi olayını Grashoff sayısının 10^3 - 10^6 aralığında değişmesi durumu için incelemiştir. Kare geometrisine sahip kapalı bir ortamdaki laminer doğal taşınım problemi çözümleri Davis ve Jones [5] tarafından karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma, değişik Rayleigh sayılarında elde edilen sonuçlar için yapılmıştır. Moukalled ve Acharya [6], eğimli yüzeylerine engeller yerleştirilmiş trapezoidal geometrideki kapalı ortam için ortamdaki akış ve ısı transferine Rayleigh sayısının ve ortam içine yerleştirilen engellerin etkisini sayısal olarak incelemişler ve eğimli yüzeylerin değişik sınır koşullarına sahip olmaları durumundaki sonuçları elde etmişlerdir. Yüzey sıcaklığı zamanla periyodik olarak değişen düşey bir duvara sahip kapalı kare ortamdaki laminer doğal taşınım ile ısı transferi olayı Kazmierczak ve Chinoda [7] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Sıcak olan yüzeyin sıcaklığı sinüzoidal şekilde değişmekte olup ortalama bir sıcaklık değeri civarında salınım yapmaktadır. Soğuk olan karşı duvar ise sabit bir sıcaklığa sahiptir. Kapalı ortam boyunca yüzey sıcaklığındaki değişimin akış ve ısı transferine etkisini farklı durumlar için elde etmişlerdir. Ostrach [8], kapalı ortamlardaki doğal taşınım problemi için geniş bir literatür araştırması vermiş olup problemlerin çözümü için önerilerde bulunmuştur. Şahin ve Arıcı [9], yaptıkları çalışmalarda kapalı ortamların değişik konfigürasyonları ve farklı sınır şartları için sayısal çalışmalar yapmışlardır. Salmun [10], üçgen geometriye sahip tabanı yüksek sıcaklıkta, eğimli yüzeyi düşük sıcaklıkta ve diğer yüzeyi yalıtılmış olan kapalı ortam için en/boy oranının 0.1-1.0 ve Rayleigh sayısının 10^2 - 10^5 aralığında değişmesi durumlarındaki ısı transferi olayını incelemiştir. Shi ve Khodadadi [11], kapalı kare ortamın sıcak olan sol yüzeyine yerleştirilen kanatçığın ısı transferi üzerine etkisini, laminer doğal taşınım için sonlu kontrol hacmi metodunu kullanarak sayısal olarak çözmüşlerdir.

Daha önceden yapılan çalışmalarda, sınır şartlarının ve geometrinin doğal taşınım ile ısı transferi üzerine etkisi incelenmiş olup, isteğe göre doğal taşınım ile ısı transferinin artırılması veya azaltılması amacıyla değişik yöntemler kullanılmıştır. Yapılan çalışmada ise lineer olarak artan veya azalan yöndeki sıcaklık profilinin doğal taşınım ile ısı transferi ve dolayısıyla kapalı ortamdaki akım ve sıcaklık dağılımı üzerine etkileri incelenmiştir.

2. TEORİK ÇALIŞMA

İncelenen problem geometrisi kare olup Şekil 1 de verilmiştir. Verilen geometri için kapalı ortamın sağ düşey duvarı düşük sıcaklıkta olup, sol düşey duvarının sıcaklığı ise y yönünde lineer olarak artmakta veya azalmaktadır. Kapalı ortamın yatay duvarlarının ise yalıtıldığı kabul edilmiştir. Çözüm bölgesi içerisinde duvar yüzeylerinde kaymama sınır koşulu geçerli olup akışkan özellikleri sabit alınmıştır.



Şekil 1. Kare Geometriye Sahip Kapalı Ortam.

Doğal taşınım ile ısı transferi, sıcaklık farkından dolayı meydana gelen kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. İki boyutlu sürekli rejimde doğal taşınım için geçerli olan momentum denklemleriyle enerji denklemi kaldırma kuvvetlerini de ihtiva edecek şekilde boyutsuz olarak aşağıda verilmiştir:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (1)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + Ra \text{Pr} \theta + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \quad (3)$$

Denklemlerde kullanılan boyutsuz büyüklükler şu şekildedir:

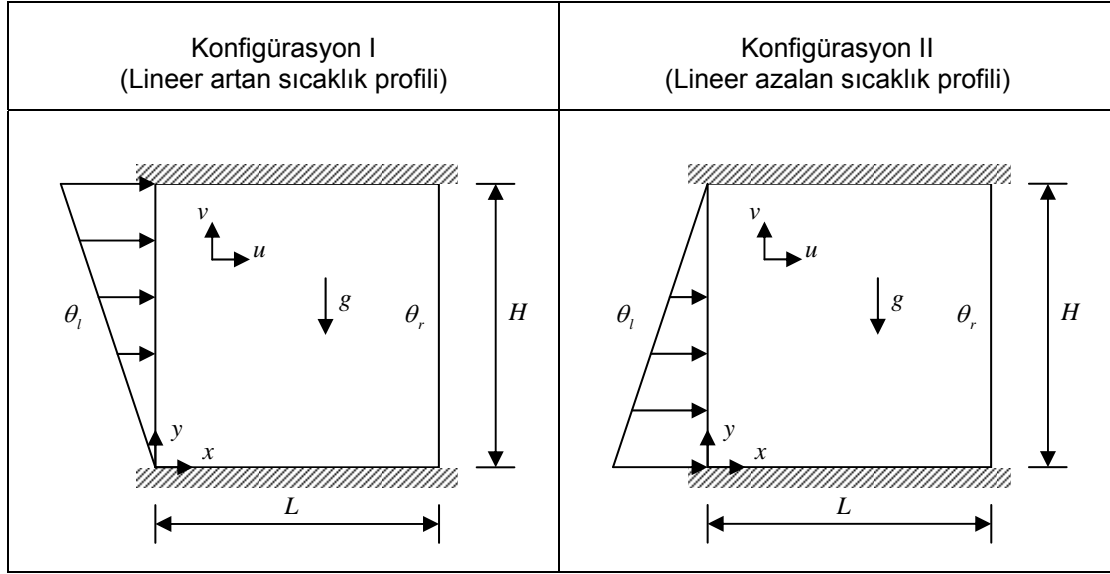
$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{uL}{\alpha}, V = \frac{vL}{\alpha}, \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, P = \frac{\rho L^2}{\rho \alpha^2}$$

Şekil 1 de verilen problem geometrisi için sol düşey duvarın sıcaklığının lineer olarak artması durumu konfigürasyon I, lineer olarak azalması durumu ise konfigürasyon II olarak adlandırılmıştır.

$$\theta_l = \frac{y}{H} \quad (\text{Lineer olarak artan sıcaklık profili})$$

$$\theta_l = 1 - \frac{y}{H} \quad (\text{Lineer olarak azalan sıcaklık profili})$$

Çalışılan sınır şartları ve konfigürasyonlar Şekil 2 de gösterilmiştir:



Şekil 2. Kış Sınır Şartları Altında Çalışılan Konfigürasyonlar.

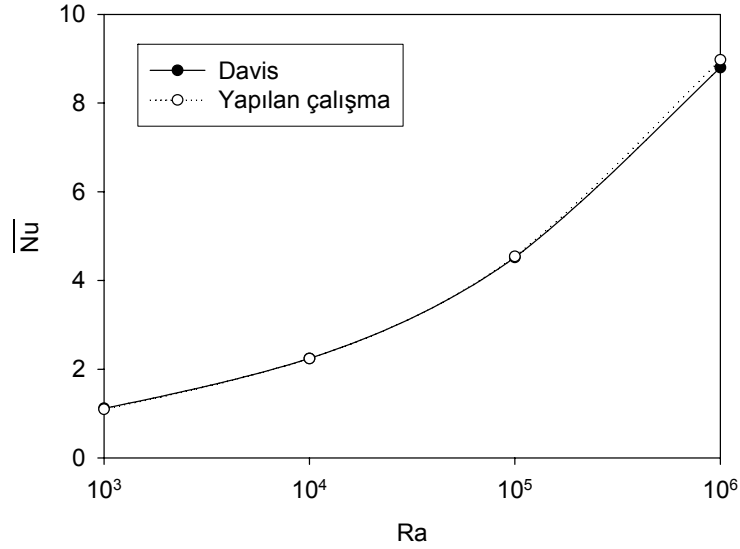
Taşınım ile ısı transferinin göstergesi olarak kabul edilen Nusselt sayısı, sıcaklığı lineer olarak değişen sol duvar için yerel ve ortalama değerleri elde edilecek şekilde aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Nu_l = -\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} \quad \overline{Nu}_l = \int_0^1 Nu_l dY$$

Eliptik bir FORTRAN programı, problemi çözecek şekilde geliştirilmiştir. Sayısal çalışma, iki boyutlu kare ortamın 120x120 uniform ağ yapısına bölünmesiyle yapılmıştır. Problemi temsil eden iki momentum ve bir enerji denklemi sonlu kontrol hacmi yöntemiyle ayrıklaştırılmış ve ayrık denklemler iteratif olarak Patankar [12] tarafından verilen SIMPLE algoritması ile çözülmüştür. Momentum denklemleri için duvarlarda kaymama sınır koşulu olarak sıfır hız, enerji denklemi için yatay duvarlarda yalıtım sınır koşulu, sağ duvarda sabit sıcaklık sınır koşulu, sol duvarda ise lineer olarak değişen sıcaklık sınır koşulu verilmiştir. Çözüm, boyutsuz denklemlerle gerçekleştirildiği için sınır koşulları da boyutsuz sınır koşulu olarak; soğuk olan duvar için 0 değeri, sol duvar için ise maksimum sıcaklık değeri olarak 1 verilmiştir. Kapalı ortamda bulunan akışkanın hava olduğu kabulüyle Prandtl sayısı 0.71 alınmıştır.

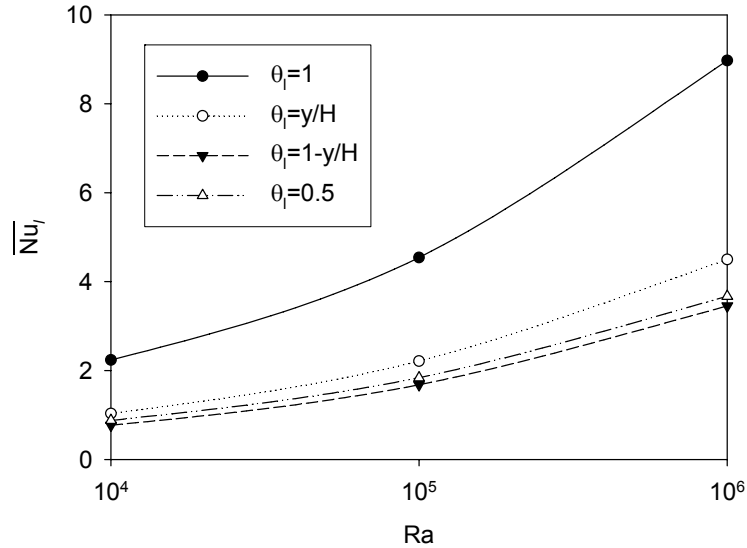
3. BULGULAR

Verilen sınır şartları altında elde edilen bulgular, Rayleigh sayısının 10^4 - 10^6 değerlerinde kare ortam için ortalama Nusselt sayıları, akım çizgileri, eş sıcaklık eğrilerinin değişimleri Şekil 3-5 te sunulmuştur. Karşılaştırma yapmak amacıyla sol duvarı yüksek sıcaklıkta ($\theta=1$), sağ duvarı düşük sıcaklıkta ($\theta=0$) olan geleneksel doğal taşınım problemi için boş kare ortamda elde edilen ortalama Nusselt sayıları, Davis [4] tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ten de görüleceği gibi elde edilen sonuçlarla literatürde verilen sonuçlar benzerlik göstermektedir.



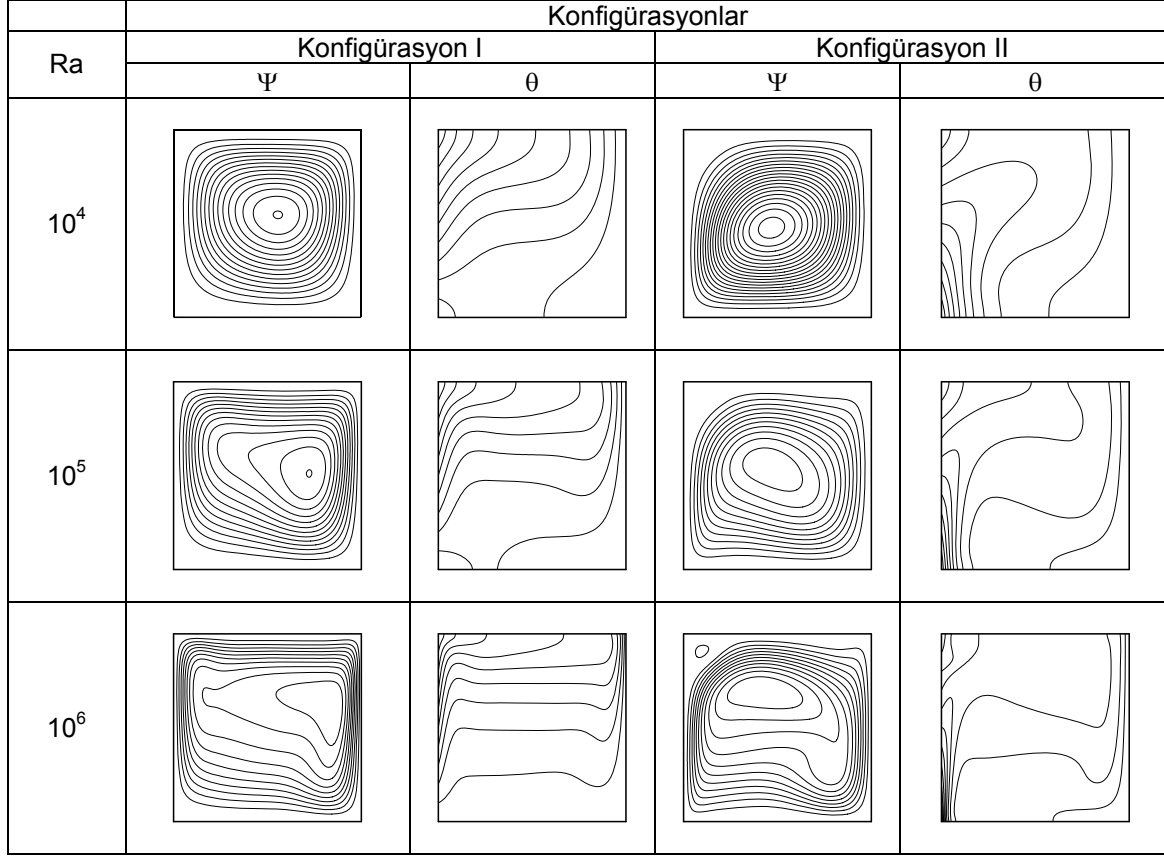
Şekil 3. Yapılan Çalışma İle Davis [6] Tarafından Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.

Kapalı ortamın sol duvarına ait sınır koşullarına karşılık gelen ortalama Nusselt sayılarının değişimi farklı Rayleigh sayıları için Şekil 4 te verilmiştir. Daha sağlıklı bir karşılaştırma yapmak amacıyla sol duvara ait boyutsuz sıcaklık değeri için 1 ve 0.5 gibi sabit sıcaklık sınır şartları da verilmiştir. Şekil 4 te görüldüğü gibi kapalı ortamın sol duvarı için lineer olarak artan sıcaklık değerine sahip profilde (konfigürasyon I) diğer sıcaklık profillerine göre daha fazla ısı transferi olmaktadır. Benzer şekilde, en az ısı transferinin ise lineer olarak azalan sıcaklık değerine sahip profilde (konfigürasyon II) olduğu görülmektedir. Kullanılan sınır koşulları için elde edilen akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri, akış alanının sıcaklık alanı üzerindeki etkisini açık olarak göstermektedir. Akış ve sıcaklık alanları üzerinde hem Rayleigh sayısı hem de uygulanan sınır koşulu önemli birer parametredir. Şekil 4 te görüldüğü gibi artan Rayleigh sayısı ile birlikte doğal taşınım ile ısı transferi de artmaktadır.



Şekil 4. Farklı Sınır Koşullarında Rayleigh Sayısının 10⁴ –10⁶ Değerleri İçin Elde Edilen Ortalama Nusselt Sayılarının Değişimi.

Akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerinin Rayleigh sayısı ve konfigürasyonlara göre değişimi Şekil 5 te verilmektedir. Şekil 5 te verilen konfigürasyon I için y yönünde artan sıcaklık profiline bağlı olarak kapalı ortam içerisinde tek bir akım hücresinin oluştuğu ve bu akım hücresinin merkezinin artan Rayleigh sayısı ile birlikte sağ duvara doğru kaydığı görülmektedir.



Şekil 5. Farklı Sınır Koşulları İçin Rayleigh Sayısının $10^4 - 10^6$ Değerlerinde Elde Edilen Akım Çizgileri ve Eş Sıcaklık Eğrileri.

Konfigürasyon I için eş sıcaklık eğrilerinin artan Rayleigh sayısıyla birlikte sol duvara yakın üst bölgede sıklaştığı görülmektedir. Konfigürasyon II de ise yüksek Rayleigh sayılarında artan kaldırma kuvvetlerine ve akım hızına bağlı olarak ikincil akım hücrelerinin oluştuğu görülmektedir. Buna rağmen akım hücrelerinin merkezi yaklaşık olarak kapalı ortamın ortasında olmaktadır. Eş sıcaklık eğrileri açısından incelenecek olursa konfigürasyon II de, konfigürasyon I e göre daha uniform dağılımlı bir yapı görülmektedir. Konfigürasyon II de eş sıcaklık eğrileri, sıcaklık farkının yüksek olduğu kapalı ortamın sol alt bölgesinde sıklaşmaktadır.

4. SONUÇLAR

Elde edilen bulgular incelenecek olursa, ortalama değeri aynı olan sıcaklık profilleri karşılaştırıldığında düşey duvar boyunca lineer olarak artan sıcaklık değerine sahip konfigürasyonda, doğal taşınım ile ısı transferinin diğerlerine göre daha fazla olduğu sonucu elde edilmiştir. Doğal taşınım ile ısı transferinin en az olduğu konfigürasyon ise sıcaklık değeri lineer olarak azalan konfigürasyondur. Sabit sıcaklık sınır şartına sahip profilde meydana gelen doğal taşınım ile ısı transferi ise bu iki konfigürasyonun değerleri arasında kalmaktadır. Ortam içerisinde daha uniform bir sıcaklık dağılımının istendiği durumlarda değeri lineer olarak azalan sınır şartı kullanılmalıdır. Bütün konfigürasyonlar için artan sıcaklık farkına bağlı olarak ısı transferinin de arttığı görülmüştür.

KULLANILAN SEMBOLLER

H	kapalı ortamın düşey kenar yüksekliği,
L	kapalı ortamın uzunluğu
Nu_l	yerel Nusselt sayısı
\overline{Nu}	ortalama Nusselt sayısı
P	boyutsuz basınç
Pr	Prandtl sayısı, ν / α
Ra	Rayleigh sayısı, $\rho g \beta (T_h - T_c) L^3 / (\mu \alpha)$
T, θ	sıcaklık, boyutsuz sıcaklık
u, U	yatay hız bileşeni, boyutsuz yatay hız bileşeni
v, V	düşey hız bileşeni, boyutsuz düşey hız bileşeni
x, X	yatay koordinat, boyutsuz yatay koordinat
y, Y	düşey koordinat, boyutsuz düşey koordinat
ψ	akım çizgisi

ALT İNDİSLER

l	Sol duvar
r	Sağ duvar

KAYNAKLAR

- [1] AYDIN, O., ÜNAL, A., AYHAN, T., Natural Convection in Rectangular Enclosures Heated From One Side and Cooled from the Ceiling, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42, 2345-2355, 1999.
- [2] DE LA CRUZ L.M. and RAMOS, E., Mixing with Time Dependent Natural Convection, International Communications in Heat and Mass Transfer, 33 (2006) 191-198.
- [3] CORCIONE, M., Effects of the Thermal Boundary Conditions at the Sidewalls upon Natural Convection in Rectangular Enclosures Heated from Below and Cooled from Above, International Journal of Thermal Sciences, 42, 199-208, 2003.
- [4] DAVIS, G.de.V., Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Benchmark Numerical Solution, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 3, 249-264, 1983.
- [5] DAVIS, G.de.V. and JONES, I.P., Natural Convection in a Square Cavity: A Comparison Exercise, International Journal for Numerical Methods in Fluids, 3, 227-248, 1983.
- [6] MOUKALLED, F., ACHARYA, S., Natural Convection in Trapezoidal Cavities with Baffles Mounted on the Upper Inclined Surfaces, Numerical Heat Transfer, Part A, 37, 545-565, 2000.
- [7] Kazmierczak, M. and Chinoda, Z., Buoyancy-Driven Flow in an Enclosure with Time Periodic Boundary Conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 35, 6 (1992) 1507-1518.
- [8] OSTRACH, S., Natural Convection in Enclosures, Journal of Heat Transfer, 10, 1175-1190, 1988.
- [9] ŞAHİN, B., Arıcı, M.E., "Kapalı Kare Ortamlarda Yatay, Düşey ve Eğik İç Bölmelerin Doğal Taşınım İle Isı Transferine Etkisinin Sayısal İncelenmesi", 15.Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi ULIBTK, Trabzon, 2005
- [10] SALMUN, H., Convection Patterns in a Triangular Domain, International Journal of Heat Mass Transfer, 38, 351-368, 1995.
- [11] SHI, X., Khodadadi, J.M., Laminar Natural Convection Heat Transfer in a Differentially Heated Square Cavity Due to a Thin Fin on the Hot Wall, Journal of Heat Transfer, 125, 624-634, 2003.
- [12] PATANKAR, S. V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw Hill, New York, 1980.

ÖZGEÇMİŞ**Birol ŞAHİN**

1977 yılında Trabzon ilinin Arsin ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Erzurum ilinde, lise öğrenimini Denizli ilinde tamamladı. 1998 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde lisans, 2002 yılında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans, 2008 yılında ise Doktora eğitimini tamamladı. 2000-2007 yılları arasında K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 2007 yılından itibaren KTÜ Beşikdüzü Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Doğal taşınım ile ısı transferi ve birleşik ısı transferi konularında çalışmaktadır.