



TRABZON İLİ İÇİN DIŞ ORTAM SICAKLIĞININ İÇ ORTAMDAKİ DOĞAL TAŞINIMLA ISI TRANSFERİNE ETKİSİNİN SAYISAL ANALİZİ

BİROLŞAHİN* ve Mehmet Emin ARICI**

*Karadeniz Teknik Üniversitesi Beşikdüzü Meslek Yüksekokulu
61800 Beşikdüzü / Trabzon, birsahin@ktu.edu.tr

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
61080 Trabzon, arici@ktu.edu.tr

Özet: Kapalı bir kare ortamda sıcaklık dağılımı ve buna bağlı olan doğal taşınım mekanizması sınır koşullarına oldukça duyarlıdır. Ortam içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımları iki önemli ısıl konfor parametresidir ve bu parametreler kapalı ortamın düşey duvarlarında tanımlanan ısıl sınır koşulları ile ilgilidir. Bu çalışmada, Trabzon'da aylık sıcaklık değişiminin kare kapalı ortam içerisindeki doğal taşınım üzerine etkisinin sayısal olarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. İki boyutlu kare ortamda doğal taşınımı temsil eden momentum ve enerji denklemleri kontrol hacmi yöntemi ile ayrıştırıldı. Kapalı ortam içerisindeki hız ve sıcaklık dağılımını elde etmek için bu ayrık denklemler SIMPLE algoritması kullanılarak çözüldü. Elde edilen sonuçlar, dışarıdaki aylık sıcaklık değişiminin iç ortamdaki hız ve sıcaklık dağılımını ve bunun sonucu olarak doğal taşınımın önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Buna göre, sıcaklık farkının yüksek olduğu kış aylarındaki doğal taşınımın ısı transferi yaz aylarına göre daha fazla olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğal taşınım, ısı transferi, kare kapalı ortam, Trabzon

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE ON INDOOR NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER FOR TRABZON PROVINCE

Abstract: Temperature distribution and corresponding natural convection mechanism heat transfer within a confined square space are quite sensitive to the boundary conditions. Velocity and temperature distributions within the space are two important thermal comfort parameters and are related with the prescribed thermal boundary conditions on the vertical walls for the enclosure. In the present work, it is aimed to numerically analyze the effect of monthly temperatures variation at Trabzon on natural convection heat transfer in a square enclosure. The momentum and the energy equations representing the natural convection in the two dimensional square domain are discretized via the control volume method. The discretized equations are solved by the SIMPLE algorithm to obtain the velocity and the temperature distribution within the enclosure. The obtained results show that the monthly variation of ambient temperature is significantly affects the velocity and the temperature fields and resulting natural convection within the inner environment. According to this, natural convection heat transfer in winter months which the temperature difference higher is more greater than summer months.

Keywords: Natural convection heat transfer, square enclosure, Trabzon

SEMBOLLER

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

1.GİRİŞ

Kapalı ortamlarda doğal taşınımın ısı transferi, günümüzde pek çok alanda uygulaması olan bir

konudur. Genel olarak elektronik cihazların soğutulmasında, güneş enerjisinden yararlanılan sistemlerde, nükleer reaktörlerin soğutulmasında, kapalı



17. ULUSAL ISI BİLİMİ ve TEKNİĞİ KONGRESİ

24 - 27 HAZİRAN 2009

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ - SIVAS



ortamlarda ısı konforun sağlanması gibi alanlarda doğal taşınım ile ısı transferinden faydalanılmaktadır.

Doğal taşınım ile ısı transferinin önemini kavranması sonucu, bu alanda yapılan çalışmalar artmıştır. Daha çok 1980 yılı ve sonrasında bilgisayarların hızına ve kapasitesine bağlı olarak değişik parametre ve geometriler için çalışmalar yapılmıştır. Davis (1983), 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. Bir tarafı yüksek sıcaklıkta, tavan kısmı düşük sıcaklıkta olan ve diğer yüzeyleri yalıtılmış iki boyutlu kapalı ortam için doğal taşınım problemi, akım fonksiyonu -vortisit formülasyonu kullanılarak değişik en/boy oranlarında ve Rayleigh sayısının 10^3-10^7 aralığında olması durumları için Aydın vd. (1999) tarafından çalışılmıştır. Kare geometrisine sahip kapalı bir ortamdaki laminer doğal taşınım problemi çözümleri Davis ve Jones (1983) tarafından karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Karşılaştırma, değişik Rayleigh sayılarında elde edilen sonuçlar için yapılmıştır. De la Cruz ve Ramos (2006), 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. Shi ve Khodadadi (2003), 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. Corcione (2003), alttan ısıtılmış, üstten soğutulmuş, yan duvarları farklı sınır şartlarındaki iki boyutlu kapalı ortamlarda meydana gelen doğal taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Antohe ve Lage (1997), bir yüzeyinden aralıklı olarak ısıtılan ortam içerisindeki doğal taşınım akışına Prandtl sayısının etkisini sayısal olarak çalışmışlardır. Sistemin farklı Prandtl sayılarındaki rezonans frekansları belirlenerek test edilmiştir. Yüzey sıcaklığı zamanla periyodik olarak değişen düşey bir duvara sahip kapalı kare ortamdaki laminer doğal taşınım ile ısı transferi olayı Kazmierczak ve Chinoda (1992), 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. Zaman bağımlı çözümler bütün periyodik zamanlar için gösterilmiştir. Ostrach (1988), kapalı ortamlardaki doğal taşınım problemi için geniş bir literatür araştırması vermiş olup problemlerin çözümü için önerilerde bulunmuştur. Alttan uniform olmayan bir sıcaklık profiliyle ısıtılan, üstten yalıtılmış, diğer yüzeyleri düşük sıcaklıkta tutulan kare geometrisine sahip ortam içerisinde meydana gelen zaman bağımsız doğal taşınım

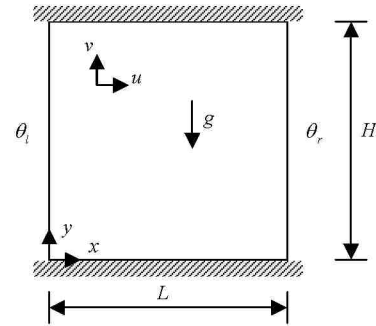
problemi Basak vd. (2006) tarafından sayısal olarak çalışılmıştır. Rayleigh sayısının 10^3-10^5 aralığındaki değerleri ile Prandtl sayısının 0.7 ve 10 değerleri için çalışma yapılmıştır. Uniform olmayan ısıtmada, uniform ısıtmaya göre alt yüzey merkezinde daha fazla ısı transferinin meydana geldiği belirlenmiştir. Roy ve Basak (2005), kare ortamdaki doğal taşınım ile ısı transferini duvarların uniform veya uniform olmayan bir şekilde ısıtılması durumu için incelemiştir. Yapılan çalışmada düşey bir duvar ve alt duvar uniform veya uniform olmayan bir şekilde ısıtılırken diğer düşey duvar düşük sıcaklıkta olup üst duvar ise yalıtılmıştır. Rayleigh sayısının geniş bir aralığı için farklı Prandtl sayılarında ısı transferi karakteristikleri incelenmiştir. Kapalı bir ortam içerisindeki doğal taşınım olayını Dalal ve Das (2006) incelemiştir. Alt kısımdaki duvar trigonometrik olarak değişen sıcaklık değerine sahip olup, diğer duvarlar düşük sıcaklıkta sabit tutulmuştur. İntegral formda geliştirilen eşitlikler, sonlu kontrol hacmi metoduyla sayısal olarak çözülmüştür. SIMPLE algoritması yüksek dereceden upwind yöntemiyle çözülmüştür. Yerel ve ortalama Nusselt sayıları, Rayleigh sayısının 10^0-10^6 , en/boy oranının 0.5-2 aralığında olması durumları için elde edilmiştir. Prandtl sayısı 0.71 olan bir akışkan için farklı Rayleigh sayılarındaki akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri verilmiştir. Sathiyamoorthy vd. (2007), alttan uniform, düşey duvarlarından lineer olarak ısıtılan, üstten yalıtılmış kare geometrisine sahip ortam içerisinde meydana gelen zaman bağımsız doğal taşınım problemini sayısal olarak çalışmışlardır. Rayleigh sayısının 10^3-10^5 aralığındaki değerleri ile Prandtl sayısının 0.7 ve 10 değerleri için çalışma yapılmıştır. Sayısal sonuçlar, eş sıcaklık eğrileri, yerel Nusselt sayıları ve Rayleigh sayısının fonksiyonu olan ortalama Nusselt sayıları cinsinden gösterilmiştir. Hyun ve Lee (1989), kare ortamda zamana bağlı gelişen doğal taşınım yüksek Rayleigh sayılarında kapsamlı bir şekilde sayısal olarak incelemiştir. Karşılıklı duvarlarda aniden yükselen ve düşen sıcaklıklar akışı oluşturmaktadır. Çalışmada sıcaklık ve hızın zamana göre değişiminin bulunmasına odaklanılmıştır. Ayrıca zaman bağımlı Nusselt sayıları da elde edilmiştir. Yatay duvarları farklı ısıtma modellerine sahip kare oyuklardaki doğal taşınım olayını sonlu farklar yöntemini kullanarak Abourida vd. (1999) çalışmışlardır. Yüksek sıcaklığa sahip alt yüzey zaman bağımlı sinüzoidal olarak değişmekte olup, üst yüzeyin sıcaklığı ise sabit veya sinüzoidal olarak değişmektedir. Düşey duvarlar ise yalıtılmıştır. Çalışma farklı zaman periyotları ve Rayleigh sayıları için yapılmış olup bu parametrelerin ısı transferi ve akışa etkileri çalışılmıştır. Yatay yüzeyleri yalıtılmış, düşey olan bir yüzeyi soğuk ve izotermal, diğer yüzeyi değişken ısı akısıyla ısıtılan kare ortamlardaki doğal taşınım, sayısal ve teorik olarak Lage ve Bejan (1993) tarafından incelenmiştir. Belirli bir frekanstaki değişken ısı girişinin kaldırma kuvveti etkili akış üzerindeki etkileri sayısal olarak gösterilmiştir.



Literatürde kare geometriye sahip kapalı ortamlarda doğal taşınım ile ısı transferi konusunda değişik çalışmalar mevcuttur. Daha önce yapılan bu çalışmalar boyutsuz büyüklüklerle yapılmıştır. Yapılan çalışmada verilen sınır koşullarında elde edilen boyutsuz veriler boyutlu hale getirilerek ortam içerisindeki sıcaklık dağılımı incelenmiştir.

2. TEORİK ÇALIŞMA

Çalışılan problem geometrisi Şekil 1 de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi çalışılan geometri kare olup sol ve sağ duvarlarına farklı sınır koşulları uygulanmaktadır. Sol duvarın yüksek sıcaklıkta, sağ duvarın ise düşük sıcaklıkta olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. İncelenen kapalı ortam geometrisi.

Bilindiği gibi doğal taşınım olayı sıcaklık farkına bağlı olarak meydana gelen kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanmaktadır. İki boyutlu zaman bağımlı doğal taşınım için geçerli olan momentum denklemleriyle enerji denklemi kaldırma kuvvetlerini de ihtiva edecek şekilde boyutsuz olarak Eş. 1,2 ve 3 te verilmiştir:

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

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

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

Denklemlerde kullanılan boyutsuz büyüklükler şu şekildedir:

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

$$P = \frac{\rho L^2}{\rho \alpha^2}, \tau = \frac{t \alpha}{L^2}$$

Şekil 1 deki geometri için sınır koşulları,

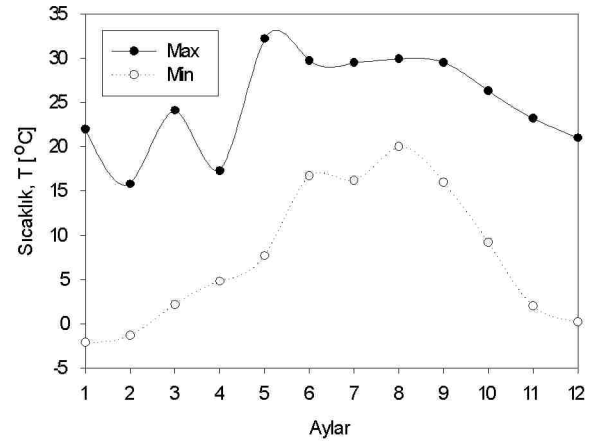
$$X=0 \text{ da } \theta = \theta_l$$

$$X=L \text{ de } \theta = \theta_r$$

$$Y=0 \text{ da ve } Y=H \text{ de } \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

şeklinde verilmiştir. Çözüm bölgesi içerisinde duvar yüzeylerinde kaymama sınır koşulu geçerli olup akışkan özellikleri sabit alınmıştır.

Şekil 1 de verilen problem geometrisinde θ_l ve θ_r değerleri Trabzon ilinde 2007 yılına ait her ay için maksimum ve minimum sıcaklık değerleri alınarak elde edilmiştir. Bu amaçla öncelikle 2007 yılına ait maksimum ve minimum sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu sıcaklık değerlerine göre boyutsuzlaştırma yapılarak her aya ait maksimum sıcaklık değeri sol duvar için, minimum sıcaklık değeri ise sağ duvar için elde edilmiştir. 2007 yılına ait sıcaklık verileri Şekil 2 de verilmiştir.



Şekil 2. 2007 yılına ait maksimum ve minimum sıcaklık değerleri.

Taşınım ile ısı transferinin göstergesi olarak kabul edilen Nusselt sayısının yüksek sıcaklıktaki sol duvar boyunca yerel ve ortalama değerleri Eş. 4 ve 5 te verilmiştir:

$$\dot{Nu}_h = -\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} \quad (4)$$

$$\overline{Nu}_h = \frac{1}{H} \int_0^H \dot{Nu}_h dY \quad (5)$$

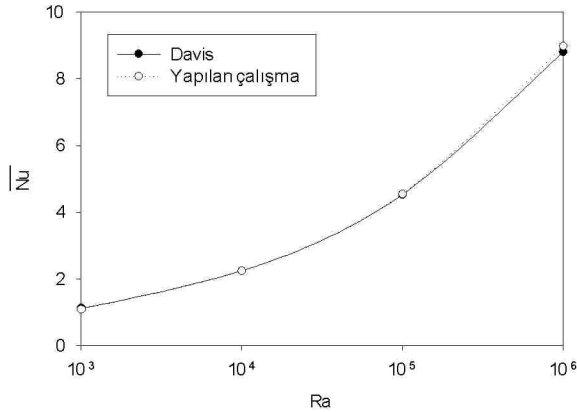
Çözüm için eliptik bir FORTRAN programı problemi çözecek şekilde geliştirilmiştir. Sayısal çalışma, iki boyutlu kare ortamın 120x120 uniform ağ yapısına bölünmesiyle yapılmıştır. Eş. 1, 2 ve 3 te verilen iki momentum ve bir enerji denklemi sonlu kontrol hacmi (FVM) yöntemiyle ayrıklaştırılmıştır. Ayrıklaştırılmış denklemler iteratif olarak Patankar (1980) tarafından verilen SIMPLE algoritması ile çözülmüştür. Momentum denklemleri için sınır koşulları olarak duvarlarda kaymama sınır koşulu için sıfır hız, enerji denklemi için üst ve alt duvarda yalıtım sınır koşulu, diğer duvarlarda ise sabit sıcaklık sınır koşulu verilmiştir. Çözüm, boyutsuz denklemlerle gerçekleştirildiği için sınır koşulları da boyutsuz sınır koşulu olarak verilmiştir. Boyutsuz sıcaklık değerleri Şekil 2 de verilen minimum ve maksimum



sıcaklıklardan elde edilmiştir. Kapalı ortam içerisinde bulunan hava için Prandtl sayısı 0.71 olarak alınmıştır.

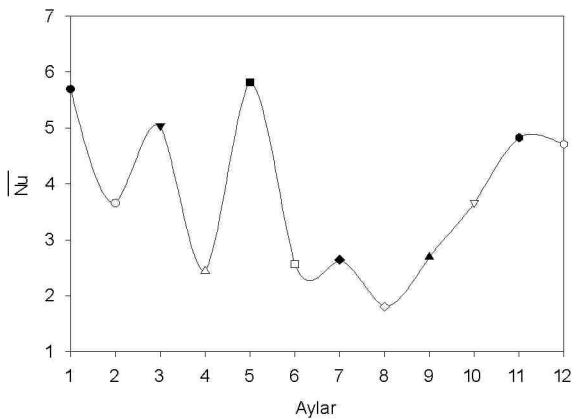
3.BULGULAR

Verilen sınır şartları altında elde edilen bulgular, Rayleigh sayısının 10^6 değeri için ortalama Nusselt sayıları, akım çizgileri, eş sıcaklık eğrilerinin değişimleri Şekil 4 ve Şekil 5 te sunulmuştur. Karşılaştırma yapmak amacıyla sol duvarı yüksek sıcaklıkta, sağ duvarı düşük sıcaklıkta olan boş kare ortam için elde edilen ortalama Nusselt sayıları, Davis (1980) tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ten de görüleceği gibi elde edilen sonuçlarla literatürde verilen sonuçlar benzerlik göstermektedir.



Şekil 3. Yapılan çalışma ile Davis (1983) tarafından elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Doğal taşınım ile ısı transferinin maksimum olacağı sınır koşulları dikkate alınarak her ay için minimum ve maksimum sıcaklık farkları göz önüne alınmıştır. Şekil 4 ten görüldüğü gibi doğal taşınım ile ısı transferi, sıcaklık farkının yüksek olduğu aylarda diğerleri ne göre daha fazla olmuştur. Maksimum ve minimum sıcaklık farkının az olduğu yaz aylarında ise ısı transferi de daha az olmaktadır.



Şekil 4. Farklı aylar için Rayleigh sayısının 10^6 değerinde elde edilen ortalama Nusselt sayıları.

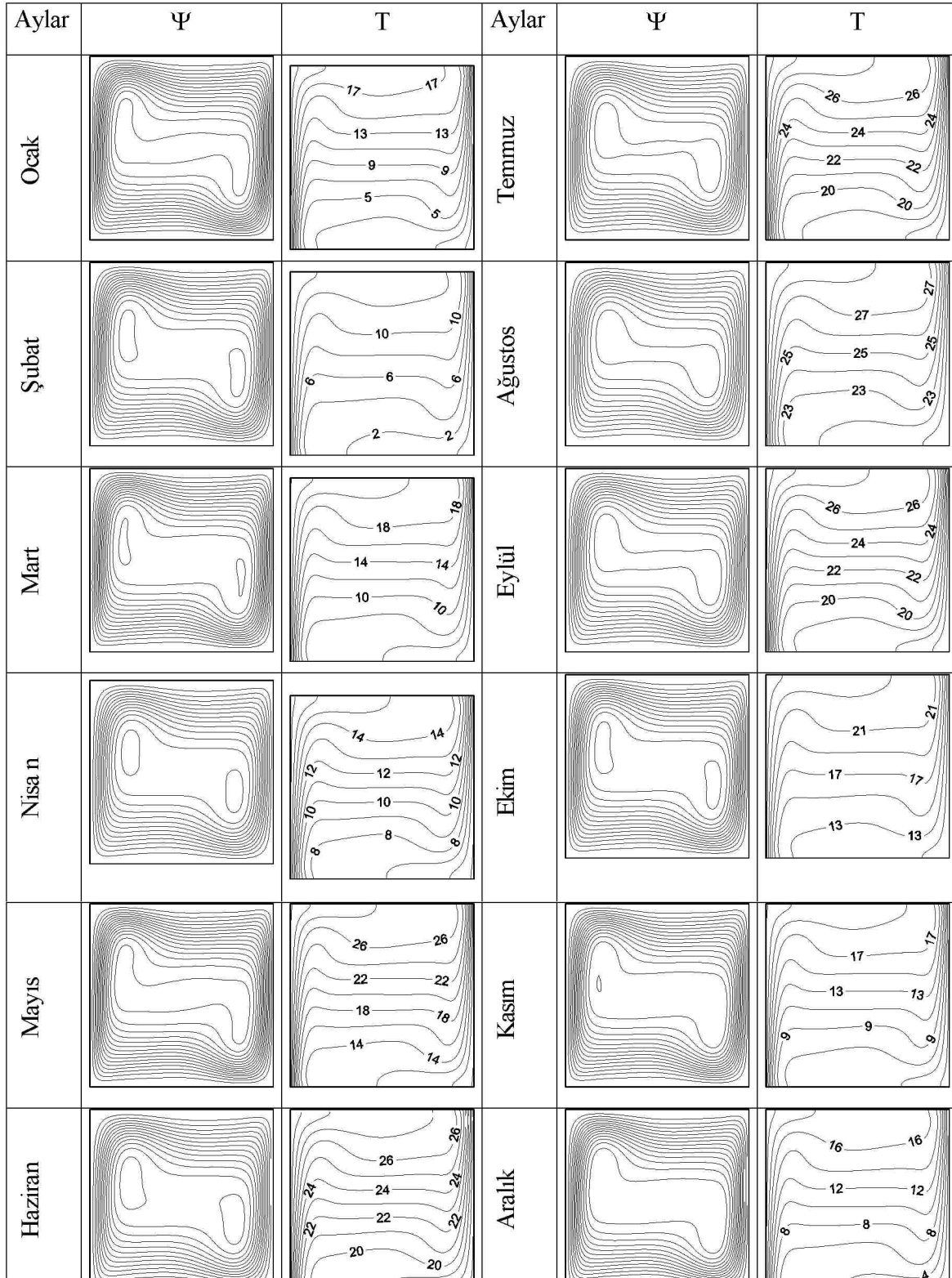
Mayıs ayı içerisindeki sıcaklık farkı diğer aylardan daha fazla olduğu için ısı transferinin de maksimum değer aldığı görülür. Ağustos ayı içerisindeki maksimum ve minimum sıcaklıklar arasındaki fark en az seviyede olduğu için bu ayda taşınım ile ısı transferi en az seviyeye inmektedir.

Kapalı ortam içerisindeki akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrilerinin değişimi Şekil 5 te verilmiştir. Şekil 5 teki eğriler genel itibariyle benzer olup aralarında küçük farklar vardır. Eş sıcaklık eğrileri genel olarak sıcaklık farkının yüksek olduğu sol ve sağ duvar boyunca yoğunlaşmaktadır. Doğal taşınım ile ısı transferinin özelliğinden dolayı kapalı ortamın tabanına yakın yerlerde düşük sıcaklıklar, tavanına yakın yerlerde ise yüksek sıcaklıklar görülmektedir. Bu sıcaklık değerleri incelenen aya göre değişkenlik göstermektedir. Akım çizgileri incelenecek olursa kapalı ortamın sol üst ve sağ alt duvarı civarında akımların yoğun olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklıktaki sol duvara yakın bölgede akışkanların yoğunluğu azalacağından dolayı akım merkezi yukarıda, düşük sıcaklıktaki sağ duvara yakın bölgedeki akışkanların yoğunluğu artacağından dolayı akım merkezi aşağıda yer almaktadır. Şubat, Mart, Nisan, Haziran ve Ekim aylarında ortam içerisinde birbirinden bağımsız iki akım merkezi oluşmaktadır. Diğer aylarda ise birbiriyle bağlantılı akım hücreleri oluşmaktadır.

4.SONUÇLAR

Elde edilen bulgulardan, farklı aylar için kapalı ortam içerisinde meydana gelen doğal taşınım ile ısı transferinin yaz aylarında daha az, diğer aylarda ise yaz aylarına nazaran daha fazla olduğu görülmüştür. Buna rağmen, 2007 yılı verileri için en yüksek ısı transferi Mayıs ayında, en düşük ısı transferi ise Ağustos ayında elde edilmiştir. Eş sıcaklık eğrilerinde ise sıcaklık farkının yüksek olduğu duvarlara yakın yerlerde bir yoğunluk görülmüştür. Kapalı ortam içerisinde akım yönleri sıcak duvara yakın bölgelerde yukarıya doğru, soğuk duvara yakın bölgelerde ise aşağıya doğrudur. Verilen sınır koşullarına bağlı olarak ortam içerisinde birbirine bağımlı veya bağımsız akım hücreleri meydana gelebilmektedir.

Elde edilen sonuçlar 2007 yılı için geçerli olup diğer yılları kapsamamaktadır.



Şekil 5. Farklı aylar için elde edilen akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri



5.KAYNAKLAR

Abourida, B., Hasnaoui, M. ve Douama, S., Transient Natural Convection in a Square Enclosure with Horizontal Walls Submitted to Periodic Temperatures, *Numerical Heat Transfer*, Part A, 36, 737 -750, 1999.

Antohe, B.V. and Lage, J.L., The Prandtl Number Effect on the Optimum Heating Frequency of an Enclosure Filled with Fluid or with a Saturated Porous Medium, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40, 6, 1313 -1323, 1997).

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.

Basak, T., Roy, S. and Balakrishnan, A.R., Effects of Thermal Boundary Conditions on Natural Convection Flows within a Square Cavity, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 45 25-4535, 2006.

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.

Dalal, A. and Das, M.K., Natural Convection in a Rectangular Cavity Heated from Below and Uniformly Cooled from the Top and both Sides, *Numerical Heat Transfer*, Part A, 49, 301 -322, 2006.

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.

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.

De La Cruz L.M. and Ramos, E., Mixing with Time Dependent Natural Convection, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, 191 -198, 2006.

Hyun, J.M. and Lee, J.W., Numerical Solutions for Transient Natural Convection in a Square Cavity with Different Sidewall Temperatures, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 10, 2, 146 -151, 1989.

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, 1507 -1518, 1992.

Lage, J.L. and Bejan, A., The Resonance of Natural Convection in an Enclosure Heated Periodically from the Side, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, 8, 2027 -2038, 1993.

Ostrach, S., Natural Convection in Enclosures, *Journal of Heat Transfer*, 10, 1175 -1190, 1988.

Patankar, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, New York, 1980.

Roy, S. and Basak, T., Finite Element Analysis of Natural Convection Flows in a Square Cavity with Non - Uniformly Heated Wall(s), *International Journal of Engineering Science*, 43, 668 -680, 2005.

Sathiyamoorthy, M., Basak, T., Roy, S. and Pop, I., Steady Natural Convection Flows in a Square Cavity with Linearly Heated Side Wall(s), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 766 -775, 2007.

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.