

Kapalı Kare Ortamlarda Periyodik Olarak Değişen Sıcaklığa Sahip Duvara Konulan Engelin Doğal Taşınım ile Isı Transferi Üzerine Etkilerinin Sayısal İncelenmesi

B.Şahin¹

¹University of Gumushane, Gumushane/Turkey, bsahin@gumushane.edu.tr

Numerical Investigation of Effect of Square Enclosures Having Horizontally Positioned Obstacle on One of the vertical Wall on Natural Convection Heat Transfer

Abstract—Natural convection heat transfer in square enclosures having a horizontally positioned obstacle on one of the vertical wall is numerically investigated. The obstacle included wall has periodically varying temperature profile and the other vertical wall boundary condition is constant temperature. The horizontal walls of the enclosure are assumed to be insulated. The numerical results obtained for the prescribed cases are comparatively presented as distribution of streamlines and isotherms and average Nusselt numbers. Navier-Stokes equations given with the Boussinesq approximation are used to solve natural convection heat transfer problem in a square enclosure. The equations are discretized by finite volume method and the discretized equations solved via SIMPLE algorithm. The fluid in enclosure is assumed to be air and Prandtl number is taken as 0.71. Numerical analysis is performed for a range of Rayleigh number from 10^4 to 10^6 . The obtained results show that the location of the obstacle on the vertical wall has noticeable effect on the heat transfer and the flow.

Keywords—Natural convection heat transfer, obstacle, periodically varying temperature profile.

I. GİRİŞ

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

Doğal taşınım ile ısı transferinin öneminin artması sonucu 20. yy ortalarından itibaren konuyla ilgili çalışmalar başlamıştır. Doğal taşınım ile ısı transferi ile ilgili sayısal çalışmalar ise daha çok 1980 yılı ve sonrasında, bilgisayarların hızına ve kapasitesine bağlı olarak artmıştır. Değişik parametre ve geometriler için çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğu

ısı transferini artırıcı veya azaltıcı yönde olmuştur.

Antohe ve Lage [1], bir yüzeyinden aralıklı olarak ısıtılan ortam içerisindeki doğal taşınım akışına Prandtl sayısının etkisini sayısal olarak çalışmışlardır. Aydın [2], iki boyutlu ortamlarda zaman bağımlı doğal taşınım ile ısı transferi olayını tek fazlı akışkan için Prandtl sayısının 0.71 ve 7.1, Rayleigh sayısının 10^3 - 10^7 değerleri için akım fonksiyonu-vortisite formülasyonunu kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Altan 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. [3] tarafından sayısal olarak çalışılmıştır. Baytas [4], kare ortamlarda sinüzoidal olarak değişen ısı kaynağının akış ve ısı transferi üzerine etkisini sayısal olarak çalışmıştır. De la Cruz ve Ramos [5], zaman bağımlı doğal taşınım olayını akış oluşturacak şekilde değişken sıcak ve soğuk sıcaklıklara sahip olan iki boyutlu kapalı ortamlarda incelemiştir. Corcione [6], alttan ısıtılmış, üstten soğutulmuş, yan duvarları farklı sınır şartlarındaki iki boyutu kapalı ortamlarda meydana gelen doğal taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Vahl Davis [7], 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. Yüzey sıcaklığı zamanla periyodik olarak değişen düşey bir duvara sahip kapalı kare ortamdaki laminer doğal taşınım ile ısı transferi olayı Kazmierczak ve Chinoda [8] tarafından sayısal olarak incelenmiştir. Kwak vd. [9], yan duvarlarından biri düşük sıcaklıkta, karşısındaki sıcak duvarın sıcaklığı sinüzoidal olarak değişen, sıkıştırılamaz akışkanla dolu kare ortamdaki doğal taşınım ile sayısal olarak çalışmışlardır. Ostrach [10], kapalı ortamlardaki doğal taşınım problemi için geniş bir literatür araştırması vermiş olup problemlerin çözümü için önerilerde bulunmuştur. Roy ve Basak [12], kare ortamdaki doğal taşınım ile ısı transferini duvarların uniform veya uniform olmayan bir şekilde ısıtılması durumu için incelemiştir.

Sarris vd. [13], üst duvarı zaman bağımsız sinüzoidal olarak ısıtılan, adyabatik alt ve yan duvarlara sahip bir ortamdaki doğal taşınım ile ısı transferini sayısal olarak çalışmışlardır. Shi [14], içerisinde sabit veya hareketli kanatçık bulunan ortamlardaki doğal ve zorlanmış taşınım ile ısı transferini incelemiştir. Shi ve Khodadadi [15], kapalı kare ortamın sıcak olan sol yüzeyine yerleştirilen kanatçığın ısı transferi üzerine etkisini, laminar doğal taşınım için sonlu kontrol hacmi metodunu kullanarak sayısal olarak çözmüşlerdir. Şahin ve Arıcı [16], kapalı ortamların değişik konfigürasyonları ve farklı sınır şartları için sayısal çalışmalar yapmışlardır. Kare ortamın sıcak duvarına yüksek iletim katsayısına sahip ince bir engel yerleştirilmesinin etkisi Tasnim ve Collins [17] tarafından sonlu kontrol hacmi metodu kullanılarak sayısal olarak çalışılmıştır. Xu vd. [18], farklı sıcaklıklarda ısıtılan kapalı ortamın kenar duvarlarından birinin ince bir kanatçık içermesi durumundaki periyodik akışı sayısal olarak incelemiştir. Varol vd. [19] alt duvarından sinüzoidal olarak ısıtılan, diğer duvarları yalıtılmış kapalı kare ortam için farklı parametrelere bağlı olarak doğal taşınım ile ısı transferini incelemiştir. Zhu ve Yang [20], uzun kapalı ortamlardaki zaman bağımlı laminar doğal taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemiştir.

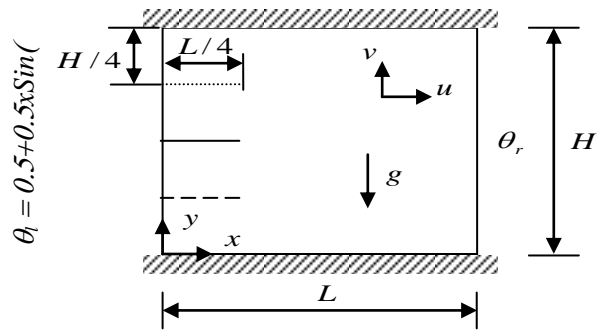
Literatürdeki çalışmalarda, sınır şartlarının, geometrinin, kullanılan engellerin doğal taşınım ile ısı transferi üzerine etkisi incelenmiş olup, isteğe göre doğal taşınım ile ısı transferinin artırılması veya azaltılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada, sinüzoidal olarak ısıtılan düşey duvara engel konularak kapalı kare ortamlarda meydana gelen ısı transferinin azaltılması amaçlanmıştır.

II. TEORİK ÇALIŞMA

İncelenen problem geometrisi kare olup Şekil 1 de verilmiştir. Verilen geometri için kapalı ortamın sağ düşey duvarı düşük sıcaklıktadır. Sol duvarı ise periyodik olarak değişen bir sıcaklık profiline sahip olup, bu duvar üzerine ortam uzunluğunun 1/4 ü kadar uzunluğa sahip bir engel yerleştirilmiştir. Kare ortam içerisine yerleştirilen engelin kalınlığı ihmal edilmiş olup, ısı akılarını geçirdiği, momentum akılarını ise geçirmediği kabul edilmiştir. Sol düşey duvar üzerine yerleştirilen engel üç farklı konuma sahiptir. Engelin yerleştirildiği her bir konum arasındaki mesafe, kapalı ortam yüksekliğinin 1/4 ü kadardır. Kapalı ortam içerisinde engel olmaması durumu (boş ortam) 0 nolu konfigürasyon (C0), engelin üst tarafta bulunması durumu 1 nolu konfigürasyon (C1), ortada bulunması durumu 2 nolu konfigürasyon (C2), altta bulunması durumu ise 3 nolu konfigürasyon (C3) olarak adlandırılmıştır. Kapalı ortamın yatay duvarlarının ise yalıtıldığı kabul edilmiştir. Çözüm bölgesi içerisinde kalan

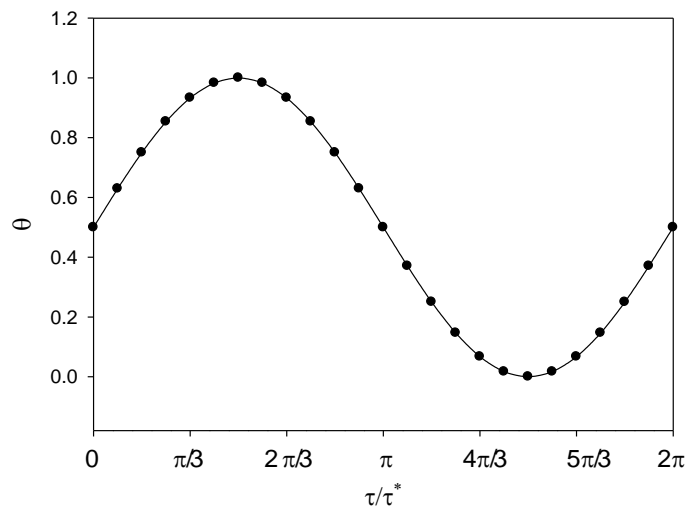
duvar ve engel yüzeylerinde kaymama sınır koşulu geçerli olup akışkan özellikleri sabit alınmıştır.

Kaldırma kuvvetlerinden kaynaklanan doğal taşınım ile ısı transferini ihtiva eden iki boyutlu zaman bağımlı Navier-Stokes denklemleri ile enerji denklemi boyutsuz olarak aşağıda verilmiştir:



Şekil 1. İçerisine engel yerleştirilen kapalı ortam geometrisi.

Kapalı ortamın sol duvarına ait zaman bağımlı sıcaklık değişimi Şekil 2 de verilmiş olup, sıcaklığın bir periyodu tamamlama süresi 24 olarak alınmıştır.



Şekil 2. Sol duvar sıcaklığının her bir periyot için değişimi.

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

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

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

Denklemlerde kullanılan boyutsuz büyüklükler şu şekildedir:

$$X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, U = \frac{uL}{\alpha}, V = \frac{vL}{\alpha},$$

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, P = \frac{\rho L^2}{\rho \alpha^2}, \tau = \frac{t \alpha}{L^2} \quad (4)$$

Yapılan çalışmada sol duvara konulan engelin ve konumunun, sol duvardaki ısı transferi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bu nedenle taşınım ısı transferinin göstergesi olarak kabul edilen Nusselt sayısı, kapalı ortamın sol ve sağ duvarı için yerel ve ortalama değerleri elde edilecek şekilde aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

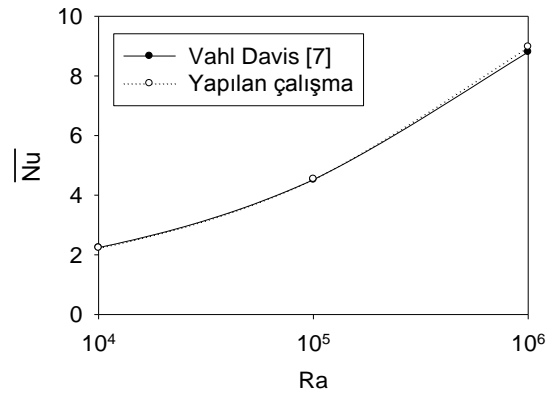
$$Nu_l = - \left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{x=0} \quad \overline{Nu}_l = \int_0^H Nu_l dY \quad (5)$$

$$Nu_r = - \left. \frac{\partial \theta}{\partial X} \right|_{x=L} \quad \overline{Nu}_r = \int_0^H Nu_r dY \quad (6)$$

Eliptik problemleri çözebilen FORTRAN kodunda yazılmış bir program geliştirilmiştir. Sayısal çalışma, iki boyutlu kare ortamın 120x120 uniform ağ yapısına bölünmesiyle yapılmıştır. Sonlu kontrol hacmi yöntemi kullanılarak iki momentum ve bir enerji denklemi ayrıştırılmış olup ve ayrık denklemler Patankar [11] 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 periyodik olarak değişen sıcaklık sınır koşulu verilmiştir. Çözüm, boyutsuz denklemlerle gerçekleştirildiği için sınır koşulları da boyutsuz sınır koşulu olarak; soğuk olan sağ duvar için 0 değeri, sol duvarın sıcaklık değeri ise Şekil 2 de verildiği gibi 0 ile 1 arasında sinüs fonksiyonuna bağlı olarak zamanla değişmektedir. Kapalı ortamda bulunan iş akışkanı olarak hava kullanıldığından Prandtl sayısı 0.71 alınmıştır.

III. BULGULAR

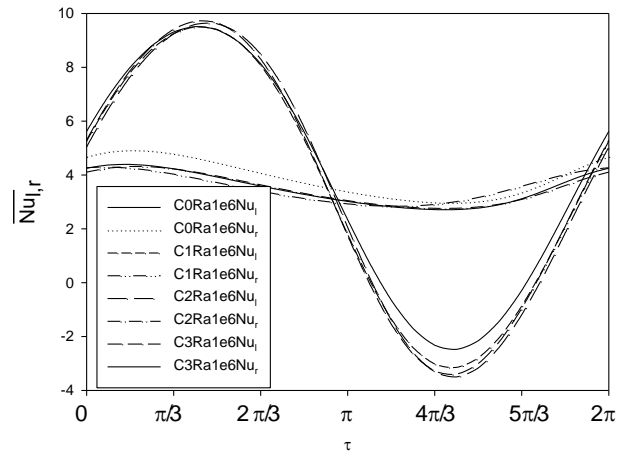
Kapalı kare ortamda verilen sınır şartları altında, sağ duvarın farklı konumlarına yerleştirilen engel için elde edilen bulgular, Rayleigh sayısının 10^4 - 10^6 değerlerinde ortalama Nusselt sayıları, akım çizgileri, eş sıcaklık eğrilerinin değişimleri şeklinde Şekil 3-7 de sunulmuştur. Geleneksel doğal taşınım problemini ihtiva eden, sol duvarın yüksek sıcaklıkta, sağ duvarın düşük sıcaklıkta olması durumu için boş kare ortamda elde edilen zaman bağımsız ortalama Nusselt sayıları, Vahl Davis [7] tarafından yapılan çalışma ile karşılaştırılmıştır. Şekil 3 ten de görüleceği gibi elde edilen sonuçlarla literatürde verilen sonuçlar benzerlik göstermektedir.



Şekil 3. Yapılan çalışma ile literatürde elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

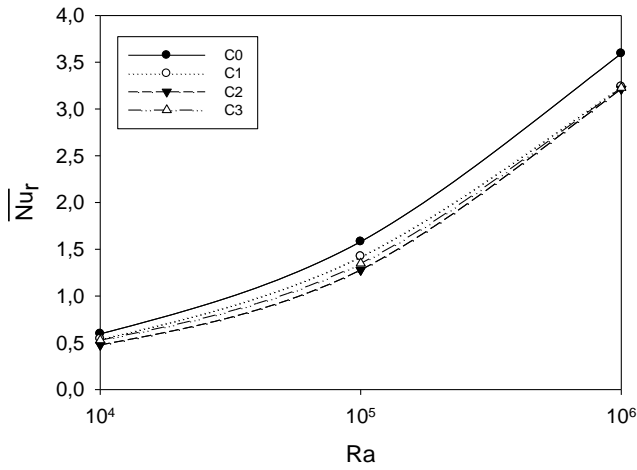
Kapalı ortamın sağ ve sol duvarı için ortalama Nusselt sayılarının değişimi Şekil 4 te verilmiştir. Şekil 4 te görüldüğü gibi ortalama Nusselt sayılarında periyodik bir değişim gözlenmekte olup sağ duvara ait Nusselt sayılarında periyodik değişimin genliği (salınımı) de artmaktadır.

Her bir konfigürasyon için farklı Rayleigh sayılarında elde edilen ortalama Nusselt sayıları karşılaştırıldığında, ısı transferindeki en büyük düşüşün C2 de, daha sonra sırasıyla C3 ve C1 de meydana geldiği Şekil 5 te görülmektedir.



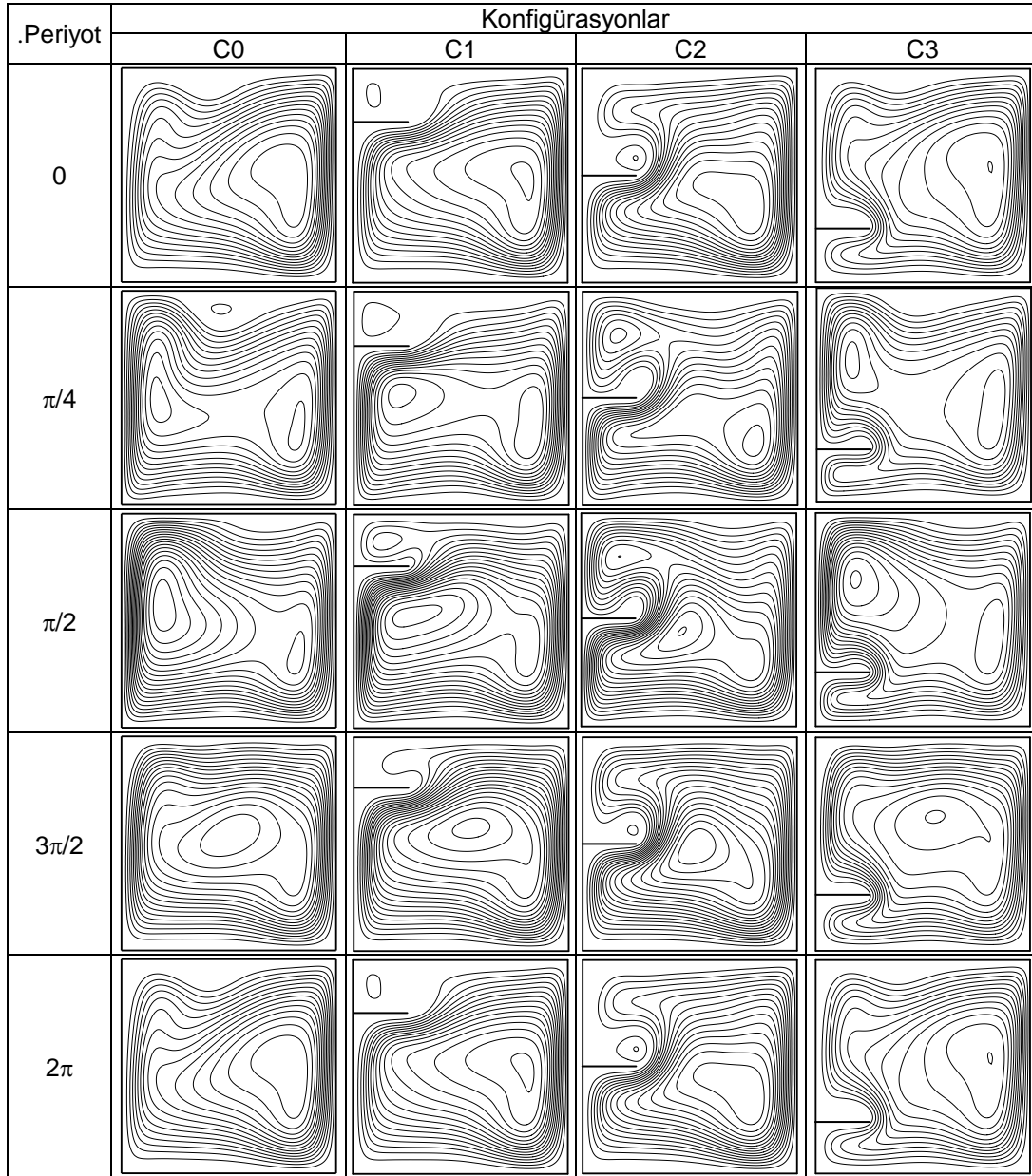
Şekil 4. Ra=10⁶ için farklı konfigürasyonlarda elde edilen ortalama Nusselt sayıları

Yapılan çalışmada kapalı ortama konulan engelin konumunun ısı transferini önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Konfigürasyona göre ısı transferinde sol duvar için %6 ile %16, sağ duvar içinse %9 ile %20 ye yakın bir azalma görülmüştür. Elde edilen değerler enerjinin etkin kullanımı açısından büyük bir önem arz etmektedir.



Şekil 5. Farklı konfigürasyonlar için ortalama Nusselt sayıları.

Akım çizgilerinin verildiği Şekil 6 dan görüldüğü gibi ortam içerisinde bir tane akım hücresi varken sol duvarın sıcaklığı artmaya başladıkça bu duvara yakın bir bölgede ikinci bir akım hücresi oluşmaktadır. Sol duvarın sıcaklığı düştükçe kapalı ortam içerisindeki akım hücresi sayısı yine bire düşmekte ve bu akım hücresinin merkezi zamanla soğuk olan sağ duvara doğru kaymaktadır. Sol duvara bir engel yerleştirilmesi durumunda ise akım hücrelerinin sayısı artmakta ve kapalı ortam içerisinde zıt yönlü akımlar meydana gelmektedir. Zıt yönlü bu akımlar genellikle engelin üst kısmında oluşmaktadır. Özellikle 2 nolu konfigürasyonda akım çizgilerinde önemli değişiklikler görülürken, diğer iki konfigürasyonda engelsiz duruma göre fazla bir değişim olmadığı görülmektedir.



Şekil 6. Farklı konfigürasyonlarda Rayleigh sayısının 10^6 değeri için elde edilen akım çizgileri.

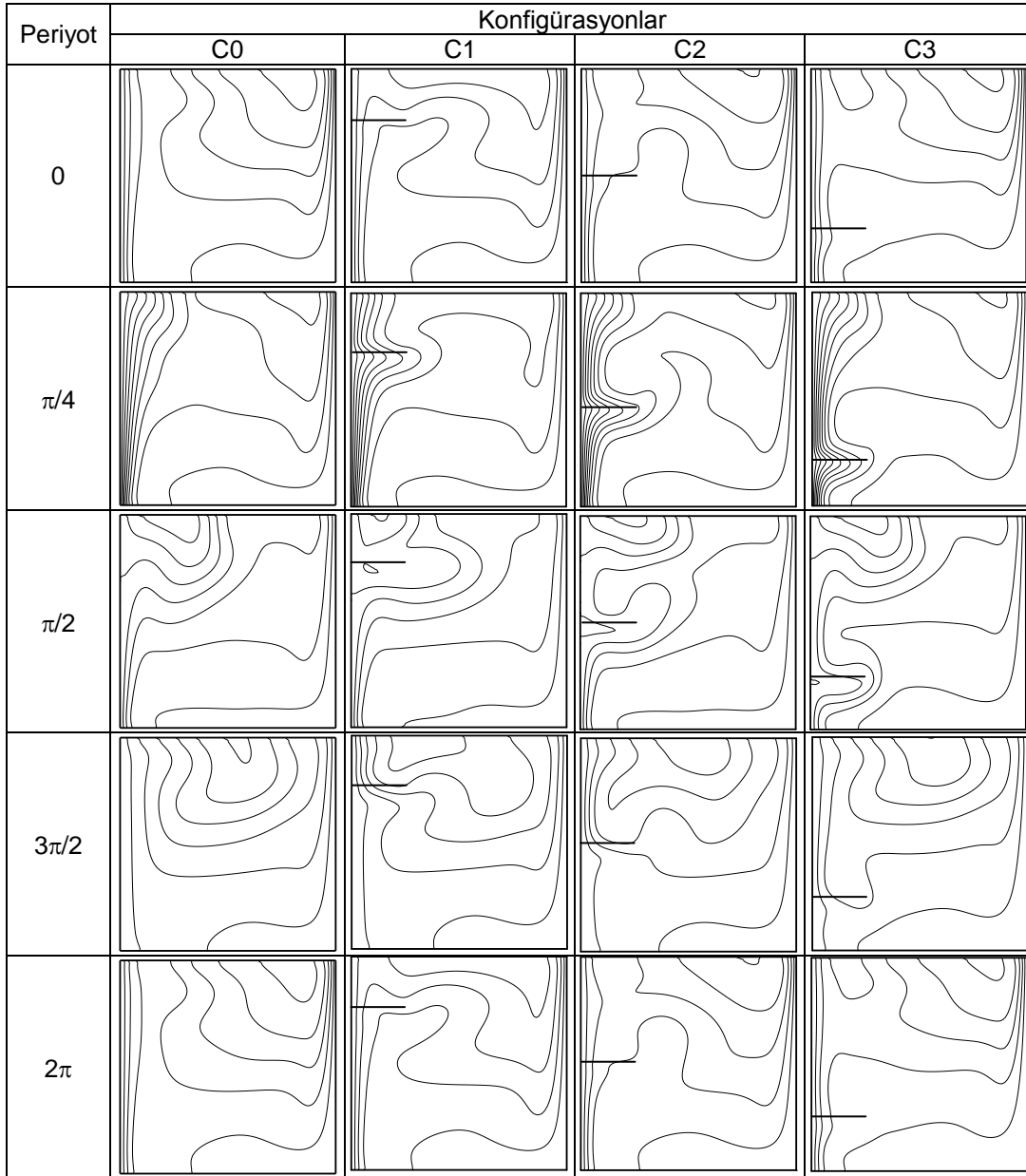
Aynı durum eş sıcaklık eğrileri açısından değerlendirilecek olursa Şekil 7 de görüldüğü gibi sol duvarın ısınmasıyla birlikte bu duvara yakın bölgede eş sıcaklık eğrileri sıklaşmakta, zamanla bu sıcaklık eğrileri sağ duvara doğru kaymaktadır.

Ortam içerisine konulan engelin sadece momentum akılarını geçirmediği göz önünde bulundurulursa, eş sıcaklık eğrilerinde çok büyük farklılıklar meydana gelmediği görülmektedir. Eş sıcaklık eğrilerindeki en büyük değişim sırasıyla 2 ve 1 nolu konfigürasyonlarda meydana gelmektedir.

IV. SONUÇLAR

Bulguların karşılaştırmalı analizinden, ortam içerisine konulan engelin konumunun ısı transferini önemli ölçüde etkilediği sonucu çıkarılmıştır. Engelin konumuna ve Rayleigh sayısına bağlı olarak ısı transferinde %6 ile %20 arasında bir düşüş görülmüştür. Ortam içerisine engel konulması durumunda ısı transferindeki en büyük düşüş 2 nolu konfigürasyonda meydana gelmiştir. Bunu sırasıyla 3 ve 1 nolu konfigürasyonlar takip etmektedir. Elde edilen sonuçlardan, bir duvarından periyodik olarak ısıtılan kare ortamlarda ısı transferini azaltmak için 2 nolu konfigürasyonun, yani engelin ortada konumlandırılmasının uygun olduğu görülmüştür.

Bütün konfigürasyonlar için sıcaklık farkına bağlı olarak ısı transferinin de arttığı görülmüştür.



Şekil 7. Farklı konfigürasyonlarda Rayleigh sayısının 10^6 değeri için elde edilen eş sıcaklık eğrileri.

KAYNAKLAR

- [1] B.V. Antohe, J.L. Lage, "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, pp. 1313-1323, 1997.
- [2] O. Aydın, "Transient Natural Convection in Rectangular Enclosures Heated from One Side and Cooled from Above," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 26, 1, pp. 135-144, 1999.
- [3] T. Basak, S. Roy, A.R. Balakrishnan, "Effects of Thermal Boundary Conditions on Natural Convection Flows within a Square Cavity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, pp. 4525-4535, 2006.
- [4] A.C. Baytas, "Buoyancy-Driven Flow in an Enclosure Containing Time Periodic Internal Sources", *Heat and Mass Transfer*, 31, pp. 113-119, 1996
- [5] L.M. De La Cruz, E. Ramos, "Mixing with Time Dependent Natural Convection", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 33, pp. 191-198, 2006.
- [6] M. Corcione, "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, pp. 199-208, 2003.
- [7] G.de.Vahl Davis, "Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Benchmark Numerical Solution", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 3, pp. 249-264, 1983.
- [8] M. Kazmierczak, Z. Chinoda, "Buoyancy-Driven Flow in an Enclosure with Time Periodic Boundary Conditions", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35, 6, pp. 1507-1518, 1992
- [9] H.S. Kwak, K. Kuwahara, J.M. Hyun, "Resonant Enhancement of Natural Convection Heat Transfer in a Square Enclosure", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41, pp. 2837-2846, 1998.
- [10] S. Ostrach, "Natural Convection in Enclosures", *Journal of Heat Transfer*, 10, pp. 1175-1190, 1988.
- [11] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw Hill, New York, 1980.
- [12] S. Roy, T. Basak, "Finite Element Analysis of Natural Convection Flows in a Square Cavity with Non-Uniformly Heated Wall(s)", *International Journal of Engineering Science*, 43, pp. 668-680, 2005.
- [13] I.E. Sarris, I. Lekakis, N.S. Vlachos, "Natural Convection in a 2D Enclosure with Sinusoidal Upper Wall Temperature", *Numerical Heat Transfer, Part A*, 42, pp. 513-530, 2002.
- [14] X. Shi, Forced and Natural Convection Heat Transfer Within Enclosures with Fixed and Moving Fins and Partitions, PhD. Thesis, Auburn University, Alabama, 2003.
- [15] X. Shi, J.M. Khodadadi, "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, pp. 624-634, 2003.
- [16] B. Şahin, M.E. Arıcı, "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.
- [17] S.H. Tasnim, M.R. Collins, "Numerical Analysis of Heat Transfer in a Square Cavity with a Baffle on the Hot Wall", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 31, 5, pp. 639-650, 2004.
- [18] F. Xu, J.C. Patterson, C. Lei, "Transition to a Periodic Flow Induced by a Thin Fin on the Sidewall of a Differentially Heated Cavity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, pp. 620-628, 2009.
- [19] Y.Varol, H.F.Oztop, I.Pop, "Numerical Analysis of Natural Convection for a Porous Rectangular Enclosure with Sinusoidally Varying Temperature Profile on the Bottom Wall", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, pp.56-64, 2008.
- [20] Z.J. Zhu, H.X. Yang, "Numerical Investigation of Transient Laminar Natural Convection of Air in a Tall Cavity", *Heat and Mass Transfer*, 39, pp.579-587, 2003.