ARAŞTIRMA MAKALESİ

Suyun Maksimum Yoğunluk Civarında Doğal Taşınımının Sayısal İncelenmesi

Çağrı METİN
Mak. Müh.
Ege Üniversitesi
Makine Mühendisliği
İzmir
cagri.metin.ege@gmail.com

Mehmet Akif EZAN
Doç. Dr.
Dokuz Eylül Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği
İzmir
mehmet.ezan@deu.edu.tr
orcid: 0000-0002-5966-9791

ÖZ

Bu çalışma kapsamında doğal taşınım, üç boyutlu kavite içerisinde suyun yoğunluğun maksimum olduğu civarda sayısal yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Sayısal çalışma sonlu-hacimler yöntemi kullanarak PISO algoritması ile uygulanmış, yönetici denklemlerinde yer alan taşınım ve yayınım terimleri ikinci-dereceden merkezi farklar ile ayrıklaştırılmıştır. Üç boyutlu kavite içerisinde meydana gelen girdap yapıları bu çalışma kapsamında incelenmiş ve kararlı girdap yapılarının davranışları ortaya çıkartılmıştır. Ayrıca ısı transferi mekanizması lokal ve global olarak incelenmekte ve yoğunluğun maksimum noktada değişiminin bu büyüklüklere etkisi araştırılmıştır. Bu bağlamda yapılan çalışmanın çıktıları doğal taşınımın önemli olduğu mühendislik uygulamalarında çalışan araştırmacılara yol gösterici olabileceği beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler
Doğal Taşınım, Suyun Yoğunluğunun Maksimum Olduğu Nokta, Girdap Dinamiği.

Numerical Investigation of Natural Convection of Water Near the Density Inversion Point

ABSTRACT

In this study, natural convection of water was examined by using numerical method near the density inversion point of water in the three-dimensional cavity. The numerical study was conducted by the PISO algorithm using finite-volume method. Coherent vertical structures in the three-dimensional cavity were examined in this study and the characteristics of vertical structures was revealed. In addition, the heat transfer mechanism is investigated locally and globally, and the effect of density inversion point examined. It is expected that the results of the study may guide the engineers working in applications of natural convection.

Keywords
Natural Convection; Density Inversion Point, Vorticity Dynamics.

Geliş Tarihi : 04.12.2018
Kabul Tarihi : 04.02.2019

Metin, Ç., Ezan, M. A., Suyun Maksimum Yoğunluk Civarında Doğal Taşınımının Sayısal İncelenmesi, 14. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, sf. 952-966, 17-20 Nisan 2019.

1. GİRİŞ

Doğal taşınım, çevre dostu binalar, elektronik cihazların soğutulması, eşanjörler ve nükleer santraller gibi geniş uygulama alanlarında gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, kapalı kavite içinde doğal taşınım incelemesi gibi temel fizik çalışmaları, bu cihazların veya binaların verimliliğini arttırmaya yardımcı olabilecek akış davranışının anlaşılmasına ve termal mekanizmaların ortaya çıkartılmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca, doğal taşınım doğada da sıkça gözlemlenen bir fiziksel durum olduğundan dolayı yapılacak çalışmalar önem arz etmektedir. Bu sebeplerden dolayı, doğal taşınım, araştırmacılar tarafından uzun yıllarca çalışılmış ve günümüzde de halen ilgi duyulan konular arasındadır [1].

Doğal taşınım çalışmalarının çoğunlukla Bousinesq yaklaşımı kullanılarak yoğunluğun sıcaklıkla lineer değiştiği kabul edilmektedir [1]. Ancak doğada bulunan su, Bismuth, Antimony, and Gallium gibi çeşitli akışkanlar için yoğunluğun sıcaklıkla lineer değişmediği gözlemlenmektedir. Bu akışkanlarda yoğunluk belirli değerlerde maksimum değerine ulaşmakta ve bu sıcaklığın dışında yoğunluk azalmaktadır [2 - 4]. Bu akışkanlar arasında su mühendislik alanlarında bir çok uygulamada karşılaşılmaktadır; ayrıca, yaşam için vazgeçilmezdir. Su için, yoğunluk maksimum noktası atmosfer basıncında 4 °C'de meydana gelmektedir [3, 5, 13]. Yoğunluğun maksimum olduğu nokta, akış yapılarında önemli rol oynamakta ve yoğunluk maksimum noktası bulunmayan akışkanlara göre daha farklı girdap yapıları meydana gelmektedir. Sıcak ve soğuk duvar sıcaklığının yoğunluk maksimum noktasını kapsayacak şekilde çalışılan kapalı kavitelerde iki adet ters yönde dönen girdap çifti meydana gelmektedir [6, 8, 12]. Sıcaklığın yoğunluğun maksimum olduğu noktanın altında olduğu konumda (kavitenin soğuk duvarının civarında) akışkan yoğunluğun maksimum olduğu noktadan düşük olmasından dolayı doğal taşınım etkisiyle sıcaklığı 4 veya 6 °C ulaşana kadar yükselmektedir [6]. Aynı sırada, benzer şekilde, yoğunluğun maksimum olduğu noktanın üstünde olduğu konumda (kavitenin sıcak duvarının civarında) akışkan kavite içerisinde yer çekimi yönünün tersine kavite içerisinde yukarı doğru hareket etmektedir. Sonuç olarak iki jet akışkanı kavitenin üst duvarında birleşmekte ve yoğunluğun maksimum değere ulaşması ile kavitenin orta bölmesi civarında yer çekimi yönünde aşağı doğru hareket etmektedir [7]. Aşağı yönde serbest düşüşünü gerçekleştiren jetin ilk aşamalarında dalgalı hareket gösterdiği gözlemlenmiştir [7]. Birbirinin tersi yönde dönen girdap çifti sıcak ve soğuk yüzey sıcaklığının sırasıyla T_H = 0 °C ve T_C = 8 °C olduğu durumda simetrik olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, birbirinin tersi yönde dönen girdap çiftinin simetriği yoğunluk dönüşüm parametresine bağlı olarak bozulmaktadır [5, 9]. Yoğunluk dönüşüm parametresi (R) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır;

$$R = [(T_m - T_H)/(T_H - T_C)] \quad (1)$$

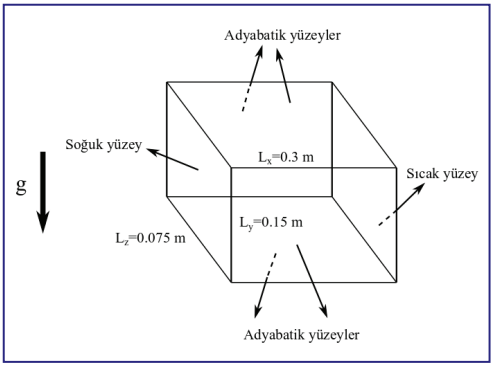
denklemde yer alan T_m yoğunluğun maksimum olduğu sıcaklığı, T_H ve T_C ise sırasıyla kapalı kavitenin sıcak ve soğuk olduğu yüzeyleri ifade etmektedir. Birbiri tersine dönen girdaplar yoğunluk dönüşüm parametresine bağı olarak sıcak ya da soğuk duvar civarına yaklaşmaktadır [5, 8, 9]. Sıcak ve soğuk duvar sıcaklığının yoğunluğun maksimum olduğu noktanın dışında kalması durumunda kavite içerisinde tek bir girdap meydana geldiği gözlemlenmiştir [8]. Meydana gelen bu tek girdabın yönü; sıcak duvar sıcaklığının maksimum yoğunluk sıcaklığından büyük olması durumunda saat yönünün tersi yönde hareket etmektedir. Sıcak duvar sıcaklığı maksimum yoğunluğun altında kaldığı durumda ise girdap saat yönünde hareket etmektedir [8]. Ayrıca kapalı kavite içerisinde sabit ve üniform sıcaklık yerine araştırmacılar ısı üretim kaynağı kullanarak da doğal taşınım davranışını incelemişlerdir. Isı kaynağı kullanılarak modellenen suyun maksimum yoğunluk civarında doğal taşınımının incelendiği çalışmada ısı üretim parametresi ile akış yapılarının doğrudan ilişkili olduğu ortaya çıkartılmıştır [10]. Benzer şekilde yoğunluk dönüşüm parametresinin 0.5 değerinde girdap yapılarının simetrik gözlemlendiği ve bu değerinde altında ya da üstünde simetrik yapıların bozulduğu gibi ısı üretim parametresine bağlı olarak oluşan girdapların simetrik yapıda oluştuğu ya da bu yapıların simetriğinin ısı üretim parametresi ile değiştiği gözlemlenmiştir [10]. Ayrıca ısı üretim katsayısının belli değerlerinde meydana gelen girdapların tersi yönde hareket ettiği gözlemlenmiştir. Kavitenin boyunun enine oranının 8 değeri gibi yüksek olduğu durumlarda ise suyun yoğunluğunun maksimum olduğu durumda zamana bağlı olarak düzensiz yapıların oluşmaya başladığı ve girdap davranışlarında kararsızlıkların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Laminer akış rejiminden

türbülanslı rejime geçiş belirtilerinin görüldüğü ve düzensizliklerin kavitenin alt kısmından başladığı gözlemlenmiştir [11]. Ayrıca birbirini tekrarlayan girdap yapılarının meydana geldiği ve düzensiz yapıların saat yönünün tersi yönde hareket ederek geçiş rejimini oluşturduğu elde edilmiştir [11]. Isı transferi kare kavite için yoğunluk değişim parametresinin 0,5 değerinde olduğu durumda maksimum değerine ulaşmakta ve yoğunluk değişim parametresine bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir [14].

Gerçekleştirilen bu çalışmanın ana amacı suyun yoğunluğunun maksimum olduğu civarda kapalı kavite içerisinde meydana gelen girdap yapılarının incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda sayısal çalışmalar üç boyutlu kavite için sıcak yüzeyi 2 °C, 4 °C, 6 °C, 8 °C ve 10 °C olacak şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda anlık sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgileri yardımıyla termal davranışın ortaya çıkartılması amaçlanmıştır. Ayrıca meydana gelen düzenli girdaplar yapıları, gidap yakalama kriteri ile belirlenmiş ve davranışları çalışılmıştır.

2. SAYISAL METHOD

Bu çalışma kapsamında üç boyutlu kapalı kavite içerisinde suyun yoğunluğunun maksimum olduğu civarda sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Akışkan başlangıçta hareketsiz durumda kavitenin sol yüzeyi sabit ve üniform sıcaklıkta 0 °C'e aniden soğutulmaktadır (Şekil 1). Kavitenin sıcak yüzey sıcaklığı üniform olarak bu çalışmada 2 °C, 4 °C, 6 °C, 8 °C ve 10 °C olarak atanmıştır. Üç boyutlu kavitenin alt, üst, ön ve arka yüzeyleri adyabatik olduğu kabulü yapılarak sıcaklığın konuma bağlı gradyeni olmadığı varsayılmaktadır. Kapalı kavitenin tüm yüzeylerinde kaymama sınır koşulu uygulanmaktadır.



Şekil 1. Hesaplama alanının şematik gösterimi

Kütlenin, momentumun ve enerjinin korunum denklemleri düşük Mach sayısında (Ma < 0,3) sıkıştırılabilir akışkanlar için zamana bağlı olarak çözülmüştür. Kütlenin korunumu denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \qquad (2)$$

Momentumun korunumu denklemleri aşağıda verilmiştir:

x-yönündeki momentum,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vu) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wu) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\mu u)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial}{\partial y}(\mu u)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial}{\partial z}(\mu u)\right) + \rho g_x \qquad (3)$$

y-yönündeki momentum,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wv) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\mu v)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial}{\partial y}(\mu v)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial}{\partial z}(\mu v)\right) + \rho g_y \qquad (4)$$

z-yönündeki momentum,

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uw) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vw) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho ww) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\mu w)\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial}{\partial y}(\mu w)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial}{\partial z}(\mu w)\right) + \rho g_z \qquad (5)$$

Momentum denkleminde yer alan kayma gerilmeri terimi Stokes Hipotezine dayanarak bulk viskozitenin sıfır olduğu kabul edilmekte ve akışkan parçacıkları strain rate karşısında izotropik davranış gösterdiği düşünülmektedir. Ayrıca, Newtonian akışkan yaklaşımı ile gerilmenin viskozite ile lineer değiştiği kabulu yapılmıştır.

Enerjinin korunumu denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial(\rho cT)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho cuT)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho cvT)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho cwT)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial}{\partial x}(kT)\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial}{\partial y}(kT)\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial}{\partial z}(kT)\right) \quad (6)$$

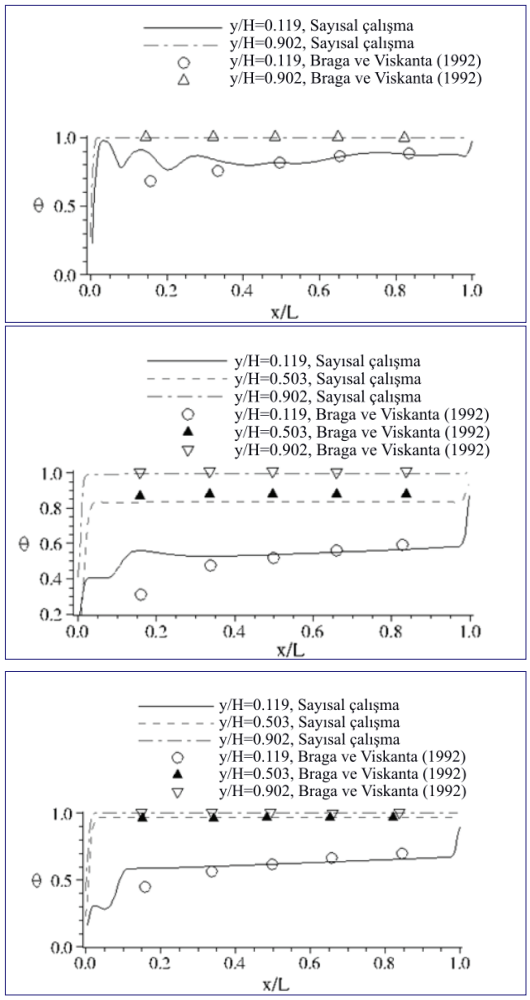
Suyun özelliklerinden, ısı kapasitesi (C), ısı iletim katsayısı (k), yoğunluk ve viskozitesi sıcaklığın fonksiyonu olarak Tablo 1'de belirtildiği gibidir.

Tablo 1. Suyun Termal Özellikleri [5]

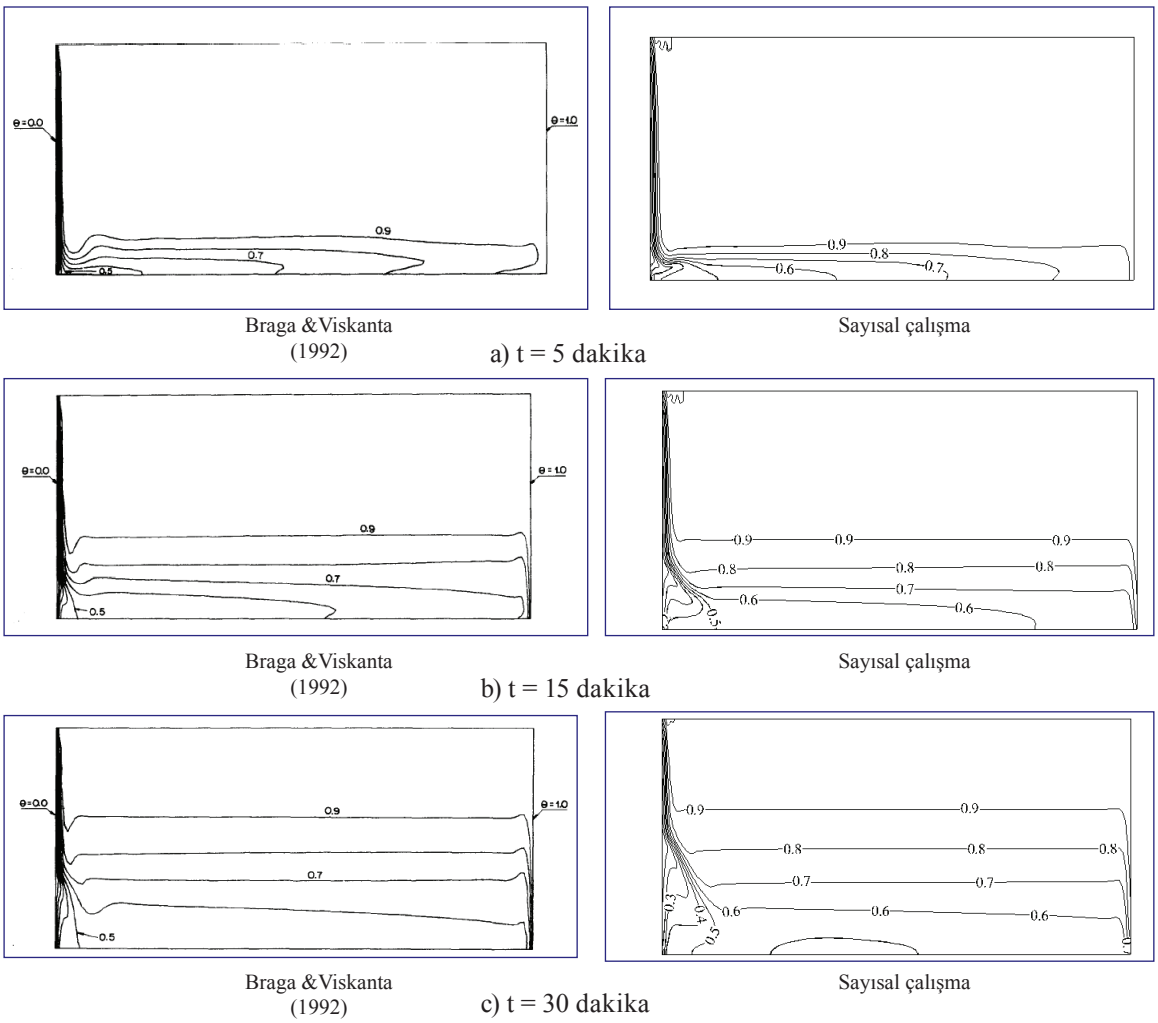
Termal Özellik	Foksiyon ya da değeri
Yoğunluk (kg/m^3)	$456{,}49 + 3{,}925T + 0{,}007085T^2$
Isı iletim katsayısı (W/mK)	$-0{,}63262 + 7{,}1959\times10^{-3}T + 1{,}144\times10^{-5}T^2$
Isı kapasitesi (J/kgK)	4204
Viskozite (Ns/m^2)	$8{,}90\times10^{-4}$

Sayısal çalışmada çözülen yönetici denklemler Sonlu Hacimler Yöntemi kullanılarak OpenFOAM programı yardımı ile çözülmüştür. Denklemlerde yer alan iletim ve taşınım terimleri ikinci dereceden merkezi farklar yardımı ile ayrıklaştırılmıştır. Zamana bağlı terimler ise ikinci dereceden geri farklar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmıştır. Basınç ve hız bileşenleri coupled olarak PISO algoritması yardımıyla Courant sayısı 0,5 değerinden düşük olacak şekilde çözülmüştür. Zaman adımı gerçekleştirilen çalışmalarda $\Delta t = 0{,}5$ s olacak şekilde sabit tutulmuştur. Sonlu hacme sahip kontrol hacimleri duvar civarında sınır tabakayı çözmek amacıyla daha yoğun olacak şekilde oluşturulmuştur ve duvar normali yönünde %10 artış oranı ile kapalı kavitenin merkezinde duvara göre daha seyrek kontrol hacimleri yer almaktadır.

Yapılan çalışmanın doğrulanması ve sayısal metodun kalibrasyonu amacıyla sayısal çözücü literatürde yer alan deneysel ve sayısal çalışmalar ile karşılaştırılmıştır [2]. Şekil 2'de görüldüğü gibi Bragave ve Viskanta'nın çalışmasında yer alan R = 0,5 durumunda suyun doğal taşınımı anlık olarak t = 300 s, t = 900 s ve t = 1800 s kavite içerisinde 3 farklı yükseklikte karşılaştırılmıştır. Sıcaklığın kavitenin genişliği boyunca değişiminin deneysel çalışma ile örtüştüğü ve sayısal çalışmada meydana gelen hatanın ihmal edilebilir mertebede olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 2. Sayısal çalışmanın yatay hız bileşeni ile doğrulanması [2]



Braga &Viskanta (1992) — Sayısal çalışma

a) t = 5 dakika

Braga &Viskanta (1992) — Sayısal çalışma

b) t = 15 dakika

Braga &Viskanta (1992) — Sayısal çalışma

c) t = 30 dakika

Şekil 3. Sıcaklık eş eğrileri a) t = 5 dakika, b) t = 15 dakika ve c) t = 30 dakika

Şekil 3'de elde edilen sıcaklık eş eğrilerinin referans çalışma ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen sıcaklık eş eğrilerinin anlık olarak 5., 15. ve 30. dakikalarda referans çalışma ile örtüştüğü görülmektedir. Şekil 2'de ve Şekil 3'de elde edilen sonuçlar doğrultusunda sayısal çalışmanın kalibrasyonu gerçekleştirilmiş ve bu çalışma doğrultusunda termal ve akış yapılarının ihmal edilebilecek mertebede hata ile yakalanabileceği düşünülmektedir.

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

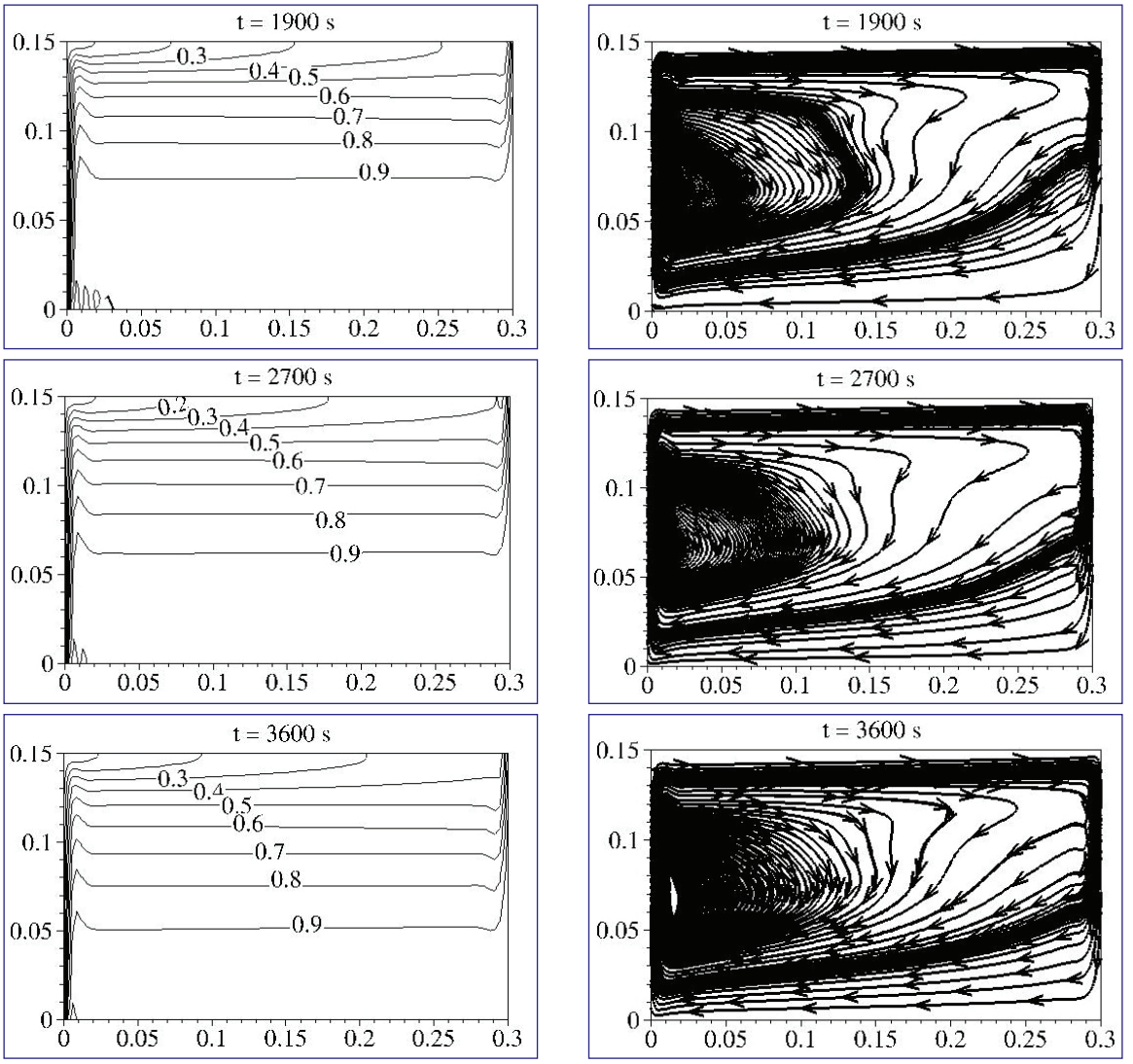
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal çalışma farklı dönüşüm parametreleri, R, için kapalı kavitenin sıcak yüzeyinin değeri değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Değiştirilen sıcak yüzeyleri ile farklı senaryolar oluşturulmuş ve T_H = 2 °C Durum 1, T_H = 4 °C Durum 2, T_H = 6 °C Durum 3, T_H = 8 °C Durum 4 ve T_H = 10 °C Durum 5 şeklinde isimlendirilmiştir. Elde edilen bulgular sıcak eş eğrileri ve akış çizgileri ile görselleştirilmiştir. Ayrıca girdap yakalama kriterlerinden Q-kriteri kullanılarak anlık olarak girdap davranışlarının ortaya çıkartılması amaçlanmıştır.

Sıcaklık ve Akış Yapıları

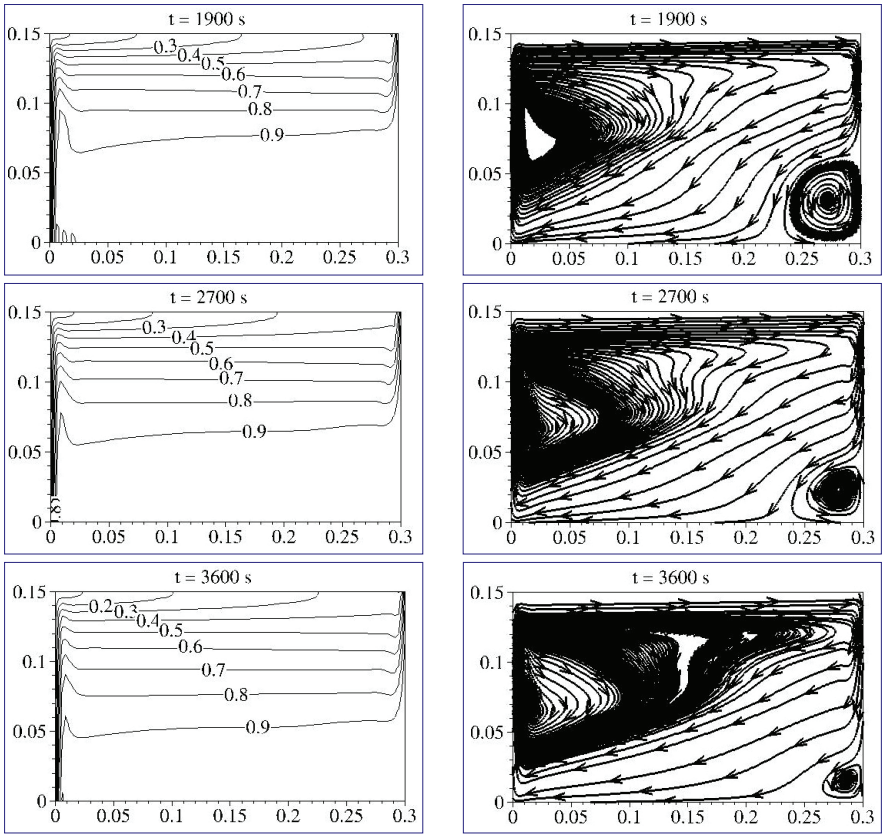
Şekil 4'de Durum 1 için sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgileri görülmektedir. Durum 1 için kavitenin sıcak ve soğuk yüzeyleri suyun maksimum yoğunluk değerinin dışında kalmaktadır. Bu durumdaki davranış maksimum yoğunluk değerinin olmadığı akışkanlardaki yapılarla benzerlik göstermektedir. Şekil 4'de t = 900 s'de görüldüğü üzere kapalı kavitenin aniden soğutulması ile yoğunluğu düşük olan soğuk akışkan kavitenin üst bölgesine hareket

etmektedir. Aynı zamanda sıcak yüzeye yakın olan ağır akışkan kavitenin alt kısmını doldurmaktadır. Zamanla sıcak akışkanın kavitenin alt kısmında yer aldığı görülmektedir. Şekil 4'de görüldüğü üzere zamanla kavitenin soğuk yüzeyinde saat yönünde hareket eden tek bir girdap meydana gelmektedir. Durum 1'de olduğu gibi kavitenin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıklarının maksimum yoğunluk noktasının altında kalması durumunda saat yönünde girdap oluştuğu literatürde de gözlemlenmektedir [8].

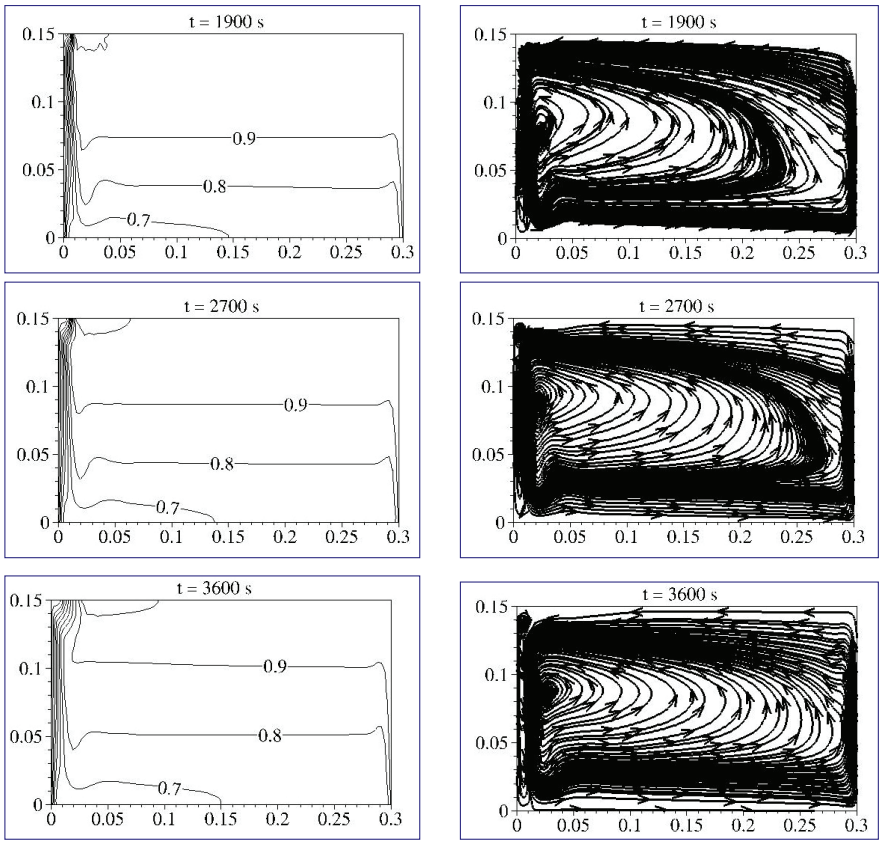
Durum 2'de kavitenin sıcak yüzeyi suyun yoğunluğunun maksimum olduğu noktadaki sıcaklığa karşılık gelmektedir. Bu durumda akışkan hareketi Durum 1 ile benzerlik gösterdiği görülmektedir (Şekil 4). Yoğunluk daha büyük olan soğuk akışkanın kavitenin sol yüzeyine temas etmesi ile doğal taşınım etkisiyle kapalı kavitenin alt kısmına hareket etmektedir (Şekil 5). Bu sırada sıcak yüzeydeki soğuk yüzeye göre düşük yoğunluktaki akışkan kavitenin üst kısmını doldurmaktadır. Meydana gelen büyük girdap merkezi Durum 1 ve Durum 2'de soğuk yüzeye yakın konumda yer aldığı görülmektedir. Ancak Durum 2'de Durum 1'e göre farklı olarak kapalı kavitenin sağ alt kısmında ikinci bir girdabın oluştuğu gözlemlenmektedir. Ancak bu küçük girdap yoğunluk maksimum noktası sonucu oluşan iki çift girdaptan farklı olarak düşük yoğunlukta akışkanın sıcak yüzeyin yakınında yukarı doğru hareketi ile kavitenin sağ alt kısmında meydana gelen akış ayrılması sonucu oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 4. Durum 1 için anlık sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgiler



Şekil 5. Durum 2 için anlık sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgileri

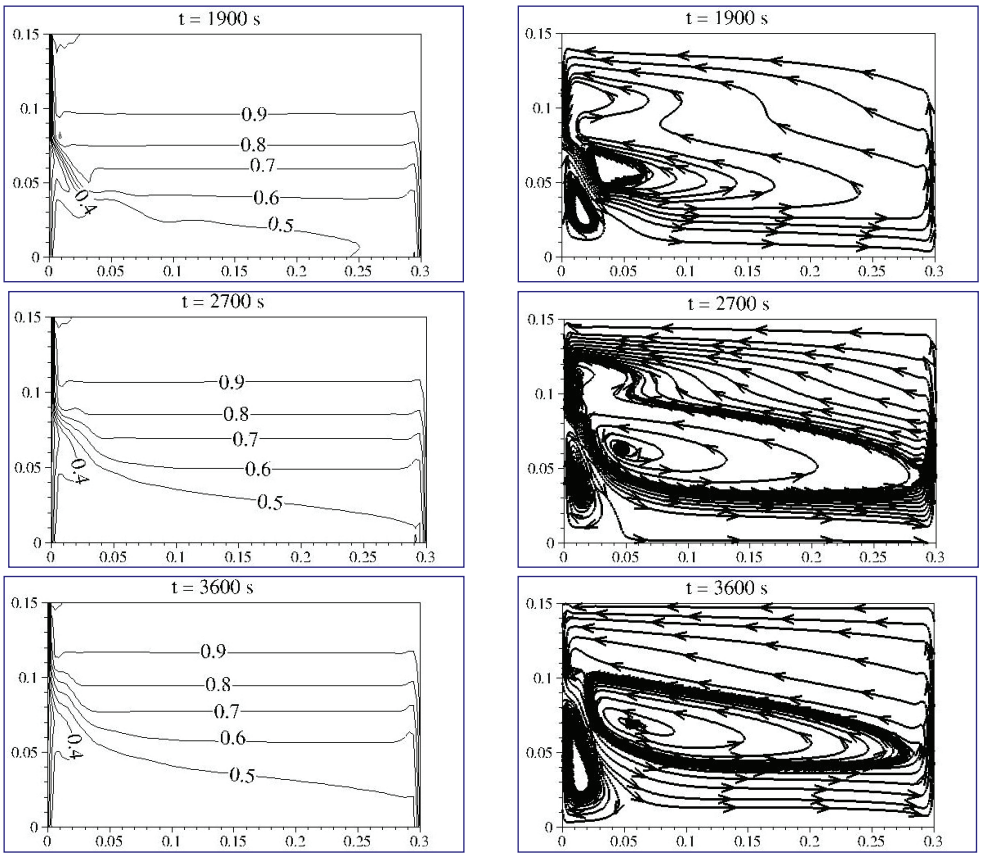


Şekil 6. Durum 3 için anlık sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgileri

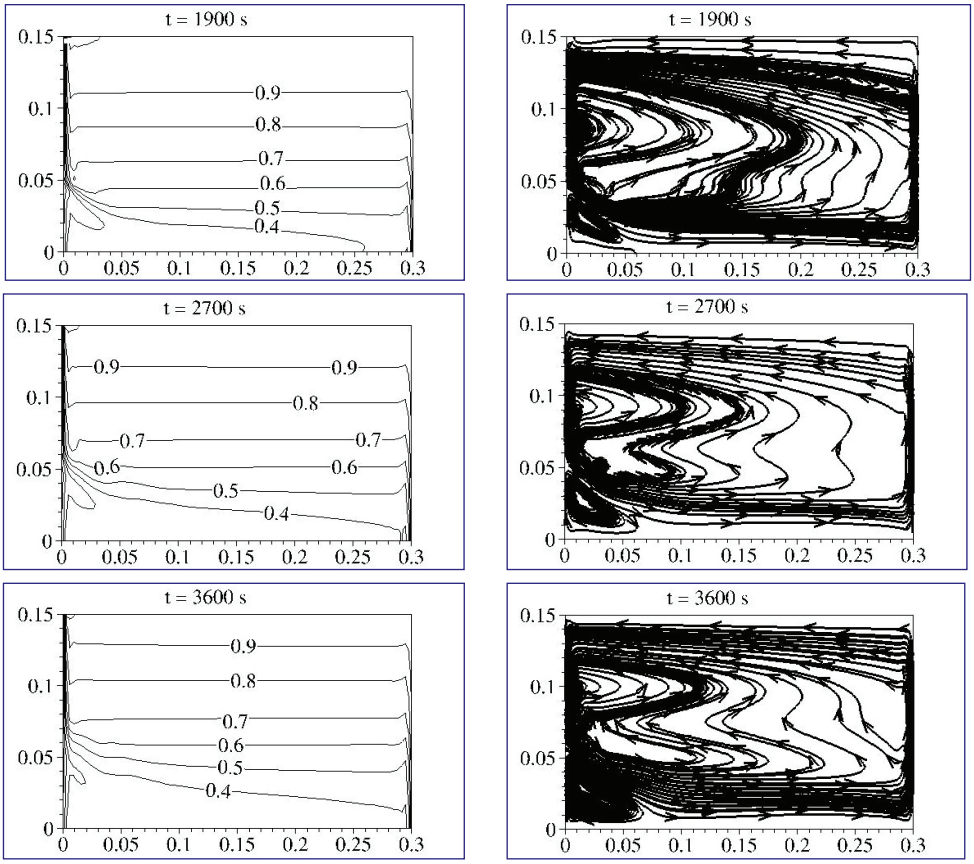
Durum 3'de suyun maksimum yoğunluk noktası kapalı kavitenin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları arasında kalmaktadır (Şekil 6). Bu durumda yoğunluk değişim parametresi R = 0,67 değerindedir. Sıcak ve soğuk yüzeyin sıcaklığı 6 °C ve 0 °C olacak şekilde sabit tutulmuştur. Bu durumdaki yapılar, Durum 1 ve 2'ye göre farklılık göstermekte ve kavite içerisinde meydana gelen girdap saat yönünün tersinde hareket etmektedir. Benzer şekilde kavite içerisinde sıcaklık dağılımı da akışkan hareketi ile etkilenmekte ve sıcak akışkan bu durumda kavitenin üst bölmesini doldurmaktadır. Kavitenin sıcak sağ yüzeyinde bulunan akışkanın yukarı doğru hareketi ile oluşan girdabın merkezi benzer şekilde Durum 1 ve Durum 2'deki gibi soğuk yüzeye yakın olmaktadır.

Şekil 7'de görüldüğü gibi Durum 4'de yoğunluk değişim parametresi R = 0,5 değeri için anlık sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgileri görülmektedir. Durum 4'de sol yüzeyin aniden soğutulması ile yoğunluğu kavite içerisinde daha düşük akışkan sıcak yüzeyden soğuk yüzeye doğru kavitenin üst kısmında hareket etmektedir. Bu sebepten dolayı kavitenin üst kısmı sıcak yüzeyin sıcaklığına ulaşmakta ve alt kısım da ise akışkan sıcak yüzeyden soğuk yüzeye hareket ederek kavitenin alt kısmında sıcaklık soğuk yüzey sıcaklığını almaktadır. Ayrıca kavitenin solt alt kısmında oluşan göreceli küçük girdap Durum 3'de meydana gelen girdabın aksine yoğunluğun maksimum değere ulaşması ile ulaşmaktadır. Durum 3'de akış ayrılması ile oluşan girdabın zamanla sirkülasyonunu yitirdiği görülmektedir. Ancak Durum 4'de kavitenin sol alt kısmında meydana gelen girdabın sirkülasyonu zamanla artmakta ve girdap alanı genişlemektedir. Zamanla sol alt kısımda meydana gelen girdabın genişleyerek kavite içerisinde saat yönünde dönen bir girdap oluşturulduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca sağ sıcak yüzeyde oluşan girdap saat yönünün tersi yönde hareket ederek ikili girdap çifti Durum 4 için zamanla meydana gelmesi beklenmektedir.

Durum 5'de yoğunluk değişim parametresi R = 0,4 durumu için analizler gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Durum 4'de meydana gelen akış yapılarına benzer girdapların meydana geldiği görülmektedir. Sıcak yüzey civarında düşük yoğunlukta akışkan kavite-



Şekil 7. Durum 4 için anlık sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgileri



Şekil 8. Durum 5 için anlık sıcaklık eş eğrileri ve akış çizgileri

nin üst kısmında soğuk yüzeye doğru hareket ederken soğuk yüzeyde akışkan kavitenin alt kısmından sıcak yüzeye doğru hareket etmektedir. Şekil 8'de sıcaklık eş eğrilerinden yola çıkarak anlık olarak kavite içerisinde meydana gelen sıcak dağılımı görülmektedir. Ayrıca Durum 5'de, Durum 4'de benzer şekilde kavitenin sol alt kısmında girdap oluşmakta ve zamanla meydana gelen girdabın genişliğinin arttığı bu durum da gözlemlenmektedir.

Düzenli Girdap Yapıları

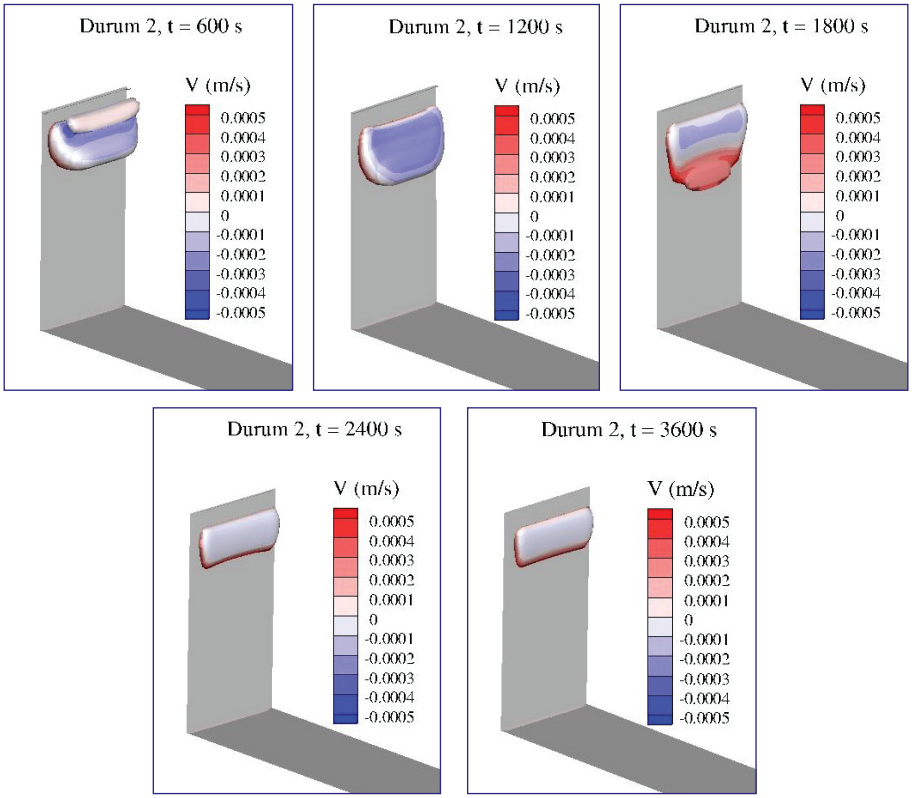
Soğuk yüzeyde doğal taşınım ile meydana gelen girdap davranışlarının ortaya çıkartılması amacıyla girdap yakalama kriterlerinden Q-kriteri ile görselleştiriliştir. Tüm hesaplama alanı boyunca Q-kriteri aşağıda belirtildiği gibi hesaplanmıştır;

$$Q = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i^2}{dx_j} - \frac{\partial u_i}{dx_j}\frac{\partial u_j}{dx_i} \right) \qquad (7)$$

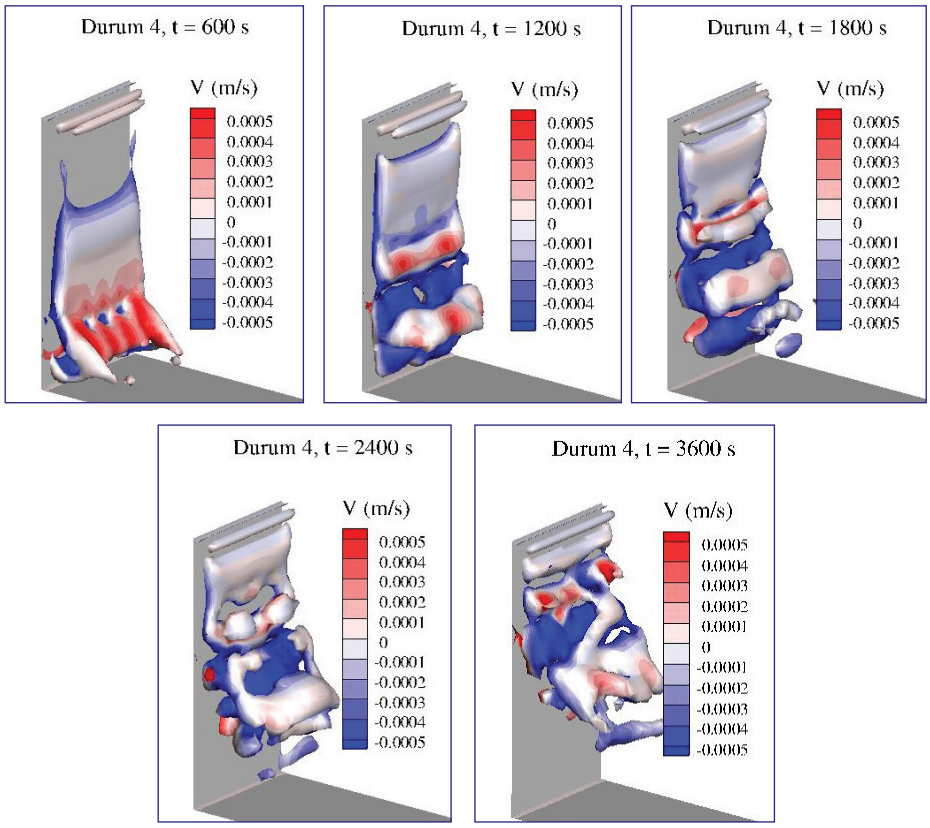
denklemde yer alan alt indeksler Einstein toplamı olarak gösterilmiştir.

Şekil 9'da soğuk yüzey ve sıcak yüzey sıcaklığı 0 °C ve 4 °C olan Durum 2 için meydana gelen girdap merkezleri görülmektedir. Şekil 5'de incelenen akış çizgilerinde de görüldüğü üzere soğuk yüzeyin yakınında saat yönünde hareket eden girdabın merkezi görülmektedir. Şekil 9'da da görüldüğü üzere girdap kavitenin sol üst yüzeyine yakın konumda t = 600 s'de oluştuğu görülmektedir. Ayrıca soğuk yüzeyin bitişiğinde yoğunluğu düşük olan akışkanın kavite içerisinde yer çekiminin tersi yönde yukarı doğru hareket ettiği görülmektedir. Şekil 9'da soğuk yüzeyin bitişiğinde hızın y-yönde bileşeninin pozitif olduğu gözlemlenmiştir. Zamanla oluşan girdap t = 1200 s genişleyerek kavitenin alt noktasına doğru uzanmaktadır. Girdabın genişlemesi t = 1800 s kadar devam etmekte ve sonrasında düzenli girdab yapısını t = 2400 – 3600 s arasında koruduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 10'da görüldüğü üzere girdap yakalama kriterinden Q-kriteri Durum 4 için elde edilmiştir. Durum 4'de soğuk yüzeyin sıcaklığı 0 °C sabit tutulurken sıcak yüzeyin sıcaklığı 8 °C olmaktadır.



Şekil 9. Durum 2 için Q= 0,001 değeri ile girdapların görselleştirilmesi



Şekil 10. Durum 4 için Q= 0,001 değeri ile girdapların görselleştirilmesi

Bu durumda yoğunluk değişim parametresi, R, 0.5 değerini almaktadır. Durum 2'nin aksine soğuk yüzeyin bitişiğinde düşey yönde y-hız bileşeninin negatif değeri aldığı görülmektedir. Soğuk yüzeyin aniden soğutulması ile yoğunluk, başlangıç yoğunluğundan daha büyük değere ulaşmakta ve kavitenin sol alt kısmına doğru hareket etmektedir. Bu bölgede t = 600 s'de düzenli yapıda girdabın meydana geldiği gözlemlenmektedir. Zamanla oluşan girdabın merkezi t = 1200 s'de kavitenin üst bölmesine doğru hareket etmektedir. Bu süreçte sol duvar civarında meydana gelen girdab daha küçük girdabları meydana getirerek Durum 2'nin aksine türbülanslı akışa geçiş belirtisi göstermektedir. Zaman adımının t = 2400 – 3600 s arasına ulaşması ile büyük girdablar daha küçük girdabları oluşturmakta ve zamana bağlı düzensizlikler meydana gelmektedir.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında kapalı kavite içerisinde suyun maksimum yoğunlukta olduğu civarda sıcak yüzeyin değeri değiştirilerek farklı senaryolar incelenmiştir. Elde edilen çıktılar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yoğunluk maksimum noktasının kavitenin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları dışında kalması ile kavite içerisinde meydana gelen yapılar yoğunluğu maksimum noktası olmayan sıvılar ile benzerlik göstermektedir. Bu durumda akışkan sol yüzeyin aniden soğutulması ile sol yüzeyden doğal taşınımın etkisi ile yukarı doğru hareket etmektedir.
- Yoğunluk maksimum noktasının kavitenin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları arasında kalması ile sol yüzeyde akışkan kavitenin alt bölmesine doğru hareket etmektedir. Doğal taşınımın etkisiyle hareket eden akışkan saat yönünün tersi yönde dönen girdabı meydana getirmektedir. Aynı sırada zamanla kavitenin sol alt kısmında yoğunluğun etkisiyle saat yönünde dönen ikinci bir girdap oluşmakta ve girdabın boyutu zamanla artmaktadır.
- Suyun yoğunluğunun maksimum olması ile kavite içerisinde meydana gelen girdabın merkezi zamanla kavitenin yüksekliği boyunca artmakta ve laminar rejimden türbülanslı rejime geçiş davranışı göstererek daha küçük ve kararsız gidapları meydana getirmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Miroshnichenko, I. V., & Sheremet, M. A., (2018), Turbulent Natural Convection Heat Transfer in Rectangular Enclosures Using Experimental and Numerical Approaches: A Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 40-59.

[2] Braga, S. L., & Viskanta, R., (1992), Transient Natural Convection of Water Near Its Density Extremum in a Rectangular Cavity, International Journal of Heat and Mass Transfer, 35(4), 861-875.

[3] Lankford, K. E., & Bejan, A., (1986), Natural Convection in a Vertical Enclosure Filled With Water Near 4 C, Journal of Heat Transfer, 108(4), 755-763.

[4] Lin, D. S., & Nansteel, M. W., (1987), Natural Convection in a Vertical Annulus Containing Water Near The Density Maximum, Journal of Heat Transfer, 109(4), 899-905.

[5] Ezan, M. A., & Kalfa, M., (2017), Natural Convection of Water Near 4° C Inside Partially Heated and Cooled Vertical Walls, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 38(1), 1-12.

[6] Inaba, H., & Fukuda, T., (1984), Natural Convection in an Inclined Square Cavity in Regions of Density Inversion of Water, Journal of Fluid Mechanics, 142, 363-381.

[7] Lankford, K. E., & Bejan, A., (1986), Natural Convection in a Vertical Enclosure Filled With Water Near 4 C, Journal of Heat Transfer, 108(4), 755-763.

[8] Lin, D. S., & Nansteel, M. W., (1987), Natural Convection in a Vertical Annulus Containing Water Near The Density Maximum, Journal of Heat Transfer, 109(4), 899-905.

[9] Lin, D. S., & Nansteel, M. W., (1987), Natural Convection Heat Transfer in a Square Enclosure Containing Water Near Its Density Maximum, International Journal of Heat and Mass Transfer, 30(11), 2319-2329.

[10] Hossain, Md Anwar, and DA S. Rees, Natural Convection Flow of Water Near Its Density Maximum in a Rectangular Enclosure Having Isothermal Walls With Heat Generation, Heat and Mass Transfer, 41.4 (2005), 367-374.

[11] Ho, Ching-Jenq, and F. J. Tu., Visualization and Prediction of Natural Convection of Water Near Its Density Maximum in a Tall Rectangular Enclosure at High Rayleigh Numbers, Journal of Heat Transfer 123.1 (2001): 84-95.

[12] McDonough, M. W., and A. Faghri, Experimental and Numerical Analyses of the Natural Convection of Water Through Its Density Maximum in a Rectangular Enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer 37.5 (1994): 783-801.

[13] Seki, N., S. Fukusako, and H. Inaba, Free Convective Heat Transfer With Density Inversion in a Confined Rectangular Vessel, Wärme- und Stoffübertragung, 11(3), 145-156.

[14] Wei, Tong, and Jean N. Koster, Density Inversion Effect on Transient Natural Convection in a Rectangular Enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer 37.6 (1994), 927-938.