



Numerical investigation of enhancing mixed convection heat transfer by using semi-cylindrical obstacles in a vertical channel

Sedat Özdemir¹, Mustafa Kılıç², Tamer Çalısır^{1*}, Şenol Başkaya¹

¹Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, 01250, Adana, Türkiye

Highlights:

- Effect of flow obstacles with different geometries on mixed convection heat transfer has been investigated
- Numerical investigations by using FloEFD software
- Verification of numerical results by using experimental data and obtaining a correlation

Keywords:

- Channel flow
- Mixed convection
- Obstacle geometry
- Computational Fluid Dynamics (CFD)

Article Info:

Research Article

Received: 11.10.2021

Accepted: 24.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1008154

Correspondence:

Author: Tamer Çalısır

e-mail:

tamercalisir@gazi.edu.tr

phone: +90 312 582 3440

Graphical/Tabular Abstract

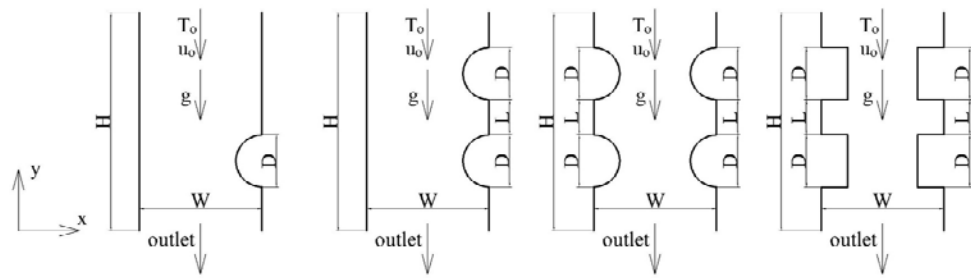


Figure A. CFD model geometry

Purpose: In this study, it was aimed to numerically investigate the effects of the location, number and geometry of obstacles in a vertical channel on mixed convection heat transfer and flow properties for water as working fluid under different Re and Gr numbers.

Theory and Methods:

The FloEFD CFD code has been employed in this study to investigate the effects of semi-cylindrical and rectangular obstacle's location, number and geometry in a vertical channel of height of $H=1.8$ m and width of $W=0.05$ m on the mixed convection heat transfer and fluid flow (Figure.A). The effect of two semi-cylindrical obstacles located one under the other, four semi-cylindrical obstacles located one under the other on opposite sides, four rectangular obstacles located one under the other on opposite sides, on heat transfer and flow properties were investigated numerically. Analysis have been made for different Re numbers, Ri numbers, blockage ratios (BR) and L/D values where water was used as working fluid. The fluid enters the channel with a constant temperature (T_0) and velocity (u_0) from the top of the channel.

Results:

In the present study, it was obtained that Nu number increases with increasing distance between obstacle (L/D) and natural convection effects (Ri number). For both obstacle geometries (two semi-cylindrical and rectangular obstacles), increasing L/D ratio and Ri number causes similar effect on Nu number and enhances heat transfer. It was determined that Nu numbers obtained for semi-cylindrical obstacles are bigger than the Nu numbers of rectangular obstacles. The highest Nu number can be obtained for $L/D=1$ and $Ri=300$ for both obstacle geometries.

Conclusion:

The mixed convection in a vertical channel with obstacles has been investigated numerically. It was observed that Nu number increases with increasing distance between obstacle (L/D) and natural convection effects (Ri number). It can be concluded that, the study could be further continued, and the effects of new types of fluids on heat transfer and flow properties, different channel and obstacle geometries on heat transfer and flow properties could be examined.



Karışık taşınım ile olan ısı transferinin farklı geometrideki akış engelleri kullanılarak iyileştirilmesinin sayısal olarak incelenmesi

Sedat Özdemir¹ , Mustafa Kılıç² , Tamer Çalışır^{1*} , Şenol Başkaya¹ 

¹Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara

²Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 01250, Sarıçam, Adana

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Farklı geometrideki akış engellerinin karışık taşınım ile ısı transferine etkisi incelenmiştir
- FloEFD yazılımı kullanılarak sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir.
- Sayısal sonuçların deneysel veriler ile doğrulanması ve korelasyon elde edilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.10.2021

Kabul: 24.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1008154

Anahtar Kelimeler:

Kanal akışı;
karışık taşınım;
engel geometrisi;
hesaplamalı akışkanlar
dinamiği

ÖZ

Bu çalışmada; içinde ısı akısına sahip, farklı konum ve geometride engeller bulunan dik bir kanaldaki karışık konveksiyonun ısı transferine ve akış özelliklerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Engellerin konumları, sayıları ve geometrileri değiştirilerek ısı transferine ve akış özelliklerine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada, alt alta bulunan iki yarı silindirik engelin, alt alta ve karşılıklı bulunan dört yarı silindirik engelin ve alt alta ve karşılıklı bulunan dört dikdörtgen engelin karışık konveksiyonla olan akış ve ısı transferine etkileri irdelenmiştir. Sonuç olarak; Nusselt sayısının, engellerin birbirine olan uzaklıklarının (L/D oranı) ve doğal taşınım etkilerinin (Ri sayısı) artmasıyla genel olarak arttığı tespit edilmiştir. Her iki engel geometrisinde (yarı silindirik engel ve dikdörtgen engel) L/D oranının ve değiştirilmiş Ri sayısının artırılmasının Nusselt sayısına olan etkisinin benzer olduğu ve ısı transferini artırdığı tespit edilmiştir. Yarı silindirik engeldeki Nusselt değerlerinin dikdörtgen engeldeki Nusselt değerlerine kıyasla daha büyük olduğu belirlenmiştir. Her iki engel geometrisinde de en yüksek Nu sayısının L/D= 1,5 ve Ri=200 olduğu durumda meydana geldiği belirlenmiştir. Sayısal çalışmanın sonuçları literatürde bulunan bir deneysel çalışma ile karşılaştırılarak; sıcaklık dağılımını ve akış özelliklerini iyi şekilde temsil edebildiği görülmüştür.

Numerical investigation of enhancing mixed convection heat transfer by using semi-cylindrical obstacles in a vertical channel

H I G H L I G H T S

- Effect of flow obstacles with different geometries on mixed convection heat transfer has been investigated
- Numerical investigations by using FloEFD software
- Verification of numerical results by using experimental data and obtaining a correlation

Article Info

Research Article

Received: 11.10.2021

Accepted: 24.09.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1008154

Keywords:

Channel flow;
mixed convection;
obstacle geometry;
computational fluid
dynamics

ABSTRACT

In this study; effects of obstacles with heat flux, with different location and geometry in a vertical channel on mixed convection heat transfer and flow was investigated numerically. Effects of location, number and geometry of obstacles on heat transfer and flow properties have been examined. The effect of two semi-cylindrical obstacles located one under the other, four semi-cylindrical obstacles located one under the other on opposite sides, four rectangular obstacles located one under the other on opposite sides, on heat transfer and flow properties were investigated in the study. As a result, it was obtained that Nu number increases with increasing distance between obstacle (L/D) and natural convection effects (Ri number). For both obstacle geometries, increasing L/D ratio and Ri number causes similar effect on Nu number and enhances heat transfer. It was determined that Nu numbers obtained for semi-cylindrical obstacles are higher than the Nu numbers of rectangular obstacles. The highest Nu number can be obtained for L/D=1,5 and Ri=200 for both obstacle geometries. It has also been shown that numerical results can well represent the temperature distribution and flow properties by comparison of these results with an experimental result from the literature.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : ozdemirsedat@gmail.com, mkilic@atu.edu.tr, *tamercalisir@gazi.edu.tr, baskaya@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 582 3440

1. Giriş (Introduction)

Son dönemlerde, akış uygulamalarında daha fazla verim elde etmek için farklı parametrelerin, ısı transferine ve akış karakteristiklerine etkisinin belirlenmesinin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle kanal içi akış uygulamalarında, doğal taşınım ve karışık taşınım son zamanlarda çok büyük bir ilgi çekmektedir. Bu çalışmanın amacı; engellerle sınırlandırılan kanal içi akışlarda farklı parametrelerin ısı transferine ve akış karakteristiklerine etkilerini incelemek, yeni yaklaşımlar yaparak akış uygulamalarında kullanılacak ekipmanların verimlerini arttırmak, maliyetlerini düşürmek, daha güvenli ve çevreye duyarlı ürünler geliştirebilmektir. Bu parametrelerin başında; akışkan tipi, akışım kısıtlandığı engelin geometrisi ve boyutları gelmektedir. Literatürde zorlanmış taşınım ve doğal taşınım ile ilgili çalışmalar yapılmış olsa da, karışık taşınım ısı transferinin artırılmasına yönelik çalışmalar ve karışık taşınım farklı parametrelerin etkisinin incelendiği çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu kapsamda; literatürdeki çalışmalar incelendiğinde; Adache ve Uehara [1] çalışmalarında, ana akış yönünde periyodik olarak sıralanmış oyuklardaki basınç düşümü ve ısı transferi arasındaki ilişkiyi çeşitli kanal konfigürasyonlarıyla tam gelişmiş akış ve sıcaklık bölgelerinde incelemiştir. Kararlı akıştan titreşimli bölgeye geçişte ısı transferinin ve basınç düşümünün arttığını gözlemlemiştir. Auletta vd. [2] dik ve simetrik olarak ısıtılmış aşağı yönlü akışın olduğu kanalda adyabatik genişlemenin etkilerini deneysel olarak inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak; kanalın uzama ve genişleme oranlarına bağlı olarak ısı transfer miktarının %10-20 oranında değiştiğini tespit etmişlerdir. Barletta ve Zanchini [3], çalışmalarında dik bir kanaldaki referans akışkan sıcaklığı seçiminin tam gelişmiş bir akışta, karışık ısı taşınım problemindeki çözüme etkisini sayısal olarak incelemiştir. Referans sıcaklığın seçiminin, hız profilleri ile basınç ve hidrostatik basınç arasındaki farkın eksenel değişimi üzerindeki etkisi ile belirlenebileceğini ortaya koymuşlardır. Boutina ve Bessaih [4], çalışmalarında eğimli bir kanalda ve laminar olarak incelenen bir akıştaki eş iki ısı kaynağının karışık taşınım yoluyla soğutulmasını incelemiştir. Kanalın eğiminin, ısı kaynaklarının boyutlarının ve aralarındaki mesafenin değiştirilmesinin ısı transferine önemli etkileri olduğunu belirlemiştir. Forooghi ve Hooman [5], çalışmalarında iki dalgalı plaka arasında, kaldırma kuvvetlerinin etkisinde türbülanslı bir akıştaki ısı transferini nümerik olarak incelemiştir. Kaldırma kuvvetinin etkisiyle oluşan akışlarda ısı transferinin belli bir noktaya kadar azalırken belli bir noktadan sonra bu durum değiştiğini, kaldırma kuvveti etkisine ters akışlarda ise durum farklı olduğunu tespit etmişlerdir. Buradaki akışlarda ısı transferi ve Grashof sayısının sürekli olarak arttığını ortaya koymuşlardır. Hamouche ve Bessaih [6], çalışmalarında yatay bir kanalda ve laminar bir akışta iki elektronik parçanın temsili olarak konulan çıkıntılı iki ısı kaynağının hava ile soğutulmasındaki karışık ısı taşınımını sayısal olarak ele almışlardır. Yapılan çözümlerde; elektronik parçaların birbirlerine olan uzaklıklarının, genişliklerinin ve yüksekliklerinin değiştiğinde ısı transferinin artırılabilirdiği belirlenmiştir. Jang ve Yan [7], çalışmalarında dik ve dalgalı bir yüzeydeki karışık ısı taşınımını ve kütle transferini sayısal olarak inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Dalgalı yüzey üniform duvar sıcaklığı ve sabit duvar konsantrasyonu ile korunurken bu çevre şartlarından daha yüksek bir değerdir. Asimetrik dalgalı kanaldaki ve laminar akıştaki ısı transferinin artırılmasını sayısal olarak inceleyen bir çalışma Mills vd. [8] tarafından yapılmıştır. Duvarın dalga periyodu ve genişliğinin basınç ve ısı transferi üzerindeki etkileri, kararlı ve kararsız akışlarda incelenmiştir. Sonuç olarak; akım oranlarının düşük olduğu kararlı rejimlerde ısı transferinin zenginliği duvarın dalgalılık büyüklüğüne bağlı iken, akım oranı arttığında ve kararsız rejime geçişte daha çok basınç düşümüne bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu durumun, düz

kanallarla karşılaştırıldığında Reynolds sayısının %50 daha az olduğu durumlarda bile daha fazla ısı transferi sağladığını tespit etmişlerdir. Zhang vd. [9] daralan ve genişleyen dik bir kanalda karışık konveksiyonu akışa yardımcı ve akışa ters yöndeki akış için sayısal olarak irdelemiştir. Lee vd. [10] doğal ve karışık konveksiyon şartlarında eğik kanatçıklara sahip dik bir kanaldaki ısı kuyusunun çeşitli tasarım parametreleri için sayısal olarak incelemiştir. Wetzel ve Wagner [11] doğrudan sayısal simülasyon gerçekleştirerek dik bir kanal içindeki karışık konveksiyonu farklı Grashof sayıları için irdelemiştir. Farklı akışkanlar konusunda da çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, You ve Li [12] hibrid nanoakışkanlar kullanarak eğik kanaldaki karışık konveksiyonu eşit ısı akısı verilmiş duvarlar bulunduğu geometri için sayısal olarak incelemiştir. Bir diğer çalışmada, Al-Obaidi vd. [13] tek bir yüzeye ısı akısı verilmiş dik bir kanaldaki nanoakışkanların karışık konveksiyonunu incelemiştir. Çalışmalarında, farklı nanoakışkanlar, Re sayıları ve geometrik boyutlar için sayısal incelemeler yapmışlardır. Moukalled vd. [14] eğimli yüzeylerin ısıtıldığı ve duvarların adyabatik olarak sınırlandırıldığı dik bir kanaldaki karışık ısı taşınımını sayısal olarak inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Konveksiyon yüzeyin ısıtıldığı kanalda kesit alanı artarken, akış hızının azaldığı ve buna bağlı olarak kaldırma kuvvetinin arttığı, ısıtılan yüzeylerin yakınlarında düşük Richardson sayıları sayıları görülürken karşı dik duvarda yüksek Ri sayıları olduğunu belirlemiştir. Rao ve Narasimham [15] çalışmalarında yatay ve dik bir kanalda, tabaka üzerinde birbirine yatay olarak sıralanmış ısı üretimi olan parçalardan oluşan duvarın ortaya çıkardığı bileşik karışık konveksiyonu sayısal olarak irdelemiştir. Akışkanın iletim yoluyla tabakaya geçen ısı transferinin %41-%47 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Tanda [16] çalışmasında tekrar edilen engellerin kullanıldığı bir ısı değiştiricide türbülans ile birlikte ısı transferinin iyileştirilmesini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmasında yerel ısı transferi katsayıları türbülanslı akış rejimi için farklı engel şekilleri ve engelsiz durumlar açısından karşılaştırmıştır. Kılıç ve Başkaya [17] çalışmalarında sabit ısı akılı yüzeyde ısı transferinin, farklı geometride akış yönlendiriciler ve çarpan akışkan jetin birlikte kullanılması sonucu iyileştirilmesini sayısal olarak incelemiştir. Çalışmada, akış yönlendirici kullanılarak ve kullanılmayarak kanal içindeki akış ve ısı transferi farklı Reynolds sayıları ve kanal yüksekliği jet hidrolik çapı (H/D_h) oranları için incelenmiştir. Sonuç olarak; çarpan akışkan jet ile farklı geometride akış yönlendiricilerin birlikte kullanılarak; ısı transferinde akış yönlendirici kullanılmaması durumuna göre %28'e kadar bir artış sağlanabildiğini gözlemlemiştir. Re sayısının artması ile ısı transferinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Çarpan akışkan jetlerin akış yönlendiricilerle ve kanatçıklı yüzeylerle kullanılması (Çalışır vd. [18]) kullanılması diğer önemli ısı transferini artırma yöntemleridir. Wahba [19] çalışmasında akışın dik olarak yönlendirildiği bir kanalda ani genişlemenin akış yapısındaki ve ısıtma soğutma üzerindeki etkilerini sayısal olarak inceleyen bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında, simetrik olarak ısıtılan kanalda duvarın yakınlarından akış ayrılırken merkezde ters bir akış yapısı oluştuğu, simetrik soğutmada ise dalgalı bir yapı oluşurken ısı transferi jet eksiyle önemli bir şekilde arttığı tespit etmiştir. Rosas vd. [20] çalışmalarında; dik bir kanalda bir tarafı adyabatik ve izole edilmiş bir duvar ile sınırlandırılan diğer tarafında ise belli bir ısı akısına sahip yarı silindirik bir engel bulunan sistemdeki karışık konveksiyon ile elde edilen ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Sonuçlarında, yerel sıcaklık dağılımlarını yarı silindirik engelin açıl pozisyonlarına göre ve kanal içindeki uzunlukları boyunca gösterirken onların 3D vorteks yapılarla ilişkileri ve engele yakın yerdeki gelişimlerini incelemiştir. Kilic vd. [21] tek bir çarpan jet ve akış yönlendiriciler kullanarak, elektronik sistemlerden olan ısı transferinin iyileştirilmesini hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Farklı Re sayıları, farklı ısı akıları,

farklı jet-çarpma noktası uzaklıkları çalışmada kullanılan parametrelerdir. Sonuç olarak yerel ve ortalama Nu sayıları, akış yönlendiriciler arası mesafe, jet hidrolik çapı-çarpma noktası uzaklığı oranı ve akış yönlendirici yüksekliği-kanal yüksekliği oranının bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Isı transferinin, akış yönlendiricilerin uzunluğu, konumu ve açılmal pozisyonlarına göre hassas bir şekilde değiştiğini görmüşlerdir. Öztürk ve Demircan [22] sabit ısı akısına sahip elektronik bir elemanın çarpan hava ve çarpaz akış kombinasyonu ile soğutulmasını sayısal olarak irdelemişlerdir. Sözbir ve Uysal [23] kanat soğutma kanalına geometrik olarak benzer bir model üzerinde; farklı Reynolds sayılarında, daire, kare ve eşkenar üçgen tipli jetler kullanılarak jet geometrisinin, jet-hedef plaka aralığının, jet çapının ve Re sayısının ısı transferine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Young ve Vafai [24], çalışmalarında zorlanmış taşınım ısı transferinin sayısal olarak incelemiştir. Kanal içinde sıkıştırılmaz akış ile birlikte tek duvara sıralanmış ve ısıtılmış engeller akış geometrisini oluşturmuştur. Engellerin yüksekliği, genişliği, aralarındaki boşluklar, sayıları, ısı iletim katsayıları, ısıtılma metotları ve akışkanın akım oranının değiştirilmesinin ısı transferine etkilerini irdelemişlerdir. Kilic [25, 26] akış geometrisinin ağ yapılı geçirgen (poros) bir plaka olduğu bir sistemde ısı transferi ile hem akışkanın hem de havanın (sıcak gaz) soğutulmasını incelemiştir. Re sayısının artırılmasının sistem soğutma verimini azalttığı, akışkan giriş sıcaklığındaki bir artışın sistem veriminde belirgin bir artışa sebep olmadığı, su debisindeki artışın ise sistem verimini önemli ölçüde arttırdığını tespit etmiştir. Young ve Vafai [27] çalışmalarında bir kanaldaki ısıtılmış engellerin taşınım ile soğutulmasını sayısal olarak incelemişlerdir. Engel yüksekliğinin, genişliğinin, ısı iletkenliğinin, akış özelliklerinin ısı transferini önemli ölçüde etkilediğini tespit etmişlerdir. Umar vd. [28] laminar akış şartlarında dik bir kanal içindeki ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda, yeni bir korelasyon oluşturmayı hedeflemişlerdir. Jha ve Sani [29] sayısal ve analitik çalışmalarında termoforez bulunan dik bir kanaldaki karışık konveksiyonu irdelemişlerdir.

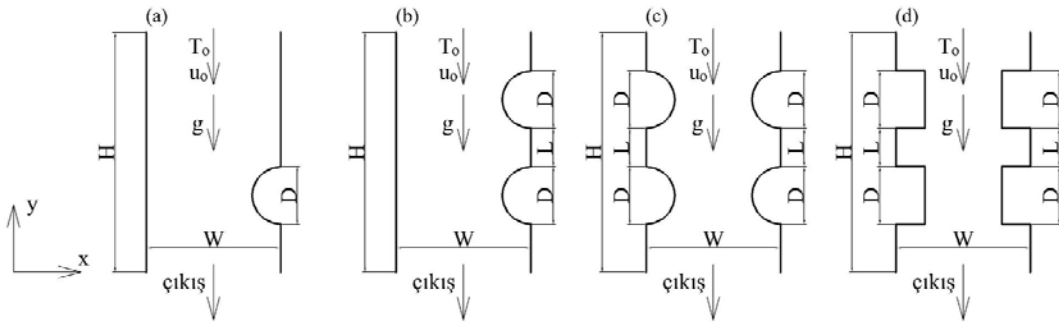
Literatürdeki çalışmalarda, genellikle zorlanmış ve doğal konveksiyon ayrı ayrı incelenirken, bu çalışmada; literatürdeki çalışmalardan farklı olarak karışık konveksiyon incelenmiştir. Bunun yanı sıra; literatürdeki çalışmalar incelenirken genellikle Reynolds ve Grashof sayılarının belli değerlerinin ısı transferi ve akış dinamikleri üzerindeki etkileri incelenirken Richardson sayısının etkilerinin incelenmediği görülmüştür. Bu çalışmada; Richardson sayısındaki değişimin ısı transferine olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca literatürde kanal genişliklerinin, engellerin boyutlarının ve geometrilerinin ısı transferine olan etkileri detaylı olarak incelenmemiştir. Bu çalışmada; engellerin konumunun, sayısının ve geometrisinin ısı transferine ve akış özelliklerine etkileri incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda; Reynolds sayıları genellikle 2300-25900 arasında zorlanmış taşınımın

etkin olduğu çalışmalar incelenirken, bu çalışmada Reynolds sayıları 100-200 arasında alınarak karışık konveksiyonun etkilerinin yoğun olduğu bir çalışma ele alınmıştır. Ayrıca literatürdeki çalışmalarda Grashof sayısı 10-1000 aralığında incelenirken bizim çalışmamız kapsamında 10^3-10^7 aralığında incelenmiştir. Grashof sayısının bu aralıkta incelenmesiyle kaldırma kuvvetlerinin, akış dinamikleri ve ısı transferi üzerindeki etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Bununla birlikte, mevcut çalışmada incelenen problem ve elde edilen sonuçlar; doğal taşınımın zorlanmış taşınımın birlikte meydana geldiği karışık taşınım ile ısı transferinde ve akış geometrisinin oluşmasında önemli olduğu değerlendirilmektedir.

2. Sayısal Model ve Matematiksel Formülasyon (Numerical Model and Mathematical Formulation)

Bu bölümde, oluşturulan sayısal model, korunum denklemleri ve sınır şartları sunulmuştur. Bu çalışmada bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kodu olan FloEFD paket programı kullanılmıştır [30]. FloEFD, kütle, momentum ve enerji korunumu denklemlerini ihtiva eden Navier-Stokes denklemlerini çözmektedir. Bu denklemler, akışkanın özelliğini tanımlayan hal denklemleri ile desteklenmektedir. FloEFD, verilen sınır şartlarını kullanarak gerekli korunum denklemlerini sonlu hacimler yöntemini kullanarak çözmektedir. Şekil 1'de sayısal çalışma kapsamında incelenmiş olan sayısal modeller yer almaktadır. Dik bir kanalda, engellerin bulunduğu, diğer taraflarının ise adyabatik bir duvar ile sınırlandırıldığı, engellerin ise ısı akısına sahip olduğu sayısal modeldeki karışık konveksiyon incelenmiştir. Analiz edilen modelde farklı Reynolds ve Richardson sayılarındaki ısı transferi ve akış karakteristikleri incelenmiştir. Sayısal modelde akışkan olarak su kullanılmıştır. Kanaldaki akış $Pr=7$ sayısında analiz edilmiş olup akış laminar olarak kabul edilmiştir. Su kanalın üst noktasından belli bir hız ile giriş yapmakta ve yer çekimi etkisiyle hareket etmektedir. Akışkanın giriş sıcaklığı $T_o = 20^\circ\text{C}$ 'dir. Akışkanın giriş sıcaklığı referans sıcaklıktır ve sabit olarak alınmıştır. Akışkanın giriş hızı u_o olarak gösterilmiştir. Yarı silindirik engellerden üstteki engel kanalın girişinden itibaren 1 m alta konumlandırılmıştır, Kanalın genişliği $W=0,05$ m'dir. Kanalın uzunluğu $H=1,8$ m'dir. Kanaldaki yarı silindirik engelin hidrolik çapı D olarak gösterilmiştir. Akış oranı (engelin yarıçapının kanal genişliğine oranı) BR olarak gösterilmiştir. Hesaplanan model iki boyutlu olarak incelenmiştir. Problemin sayısal çözümünde x-y koordinat sistemi kullanılmıştır. Her bir parametrenin değişiminin ısı transferine ve akış dinamiklerine olan etkisi incelenmiştir. Sayısal modelde kullanılan hücre yapısı Şekil 2'de sunulmuştur.

Yarı silindirik akış yönlendiriciye yakın yerlerdeki hız ve sıcaklık dağılımlarını daha iyi görmek için bu bölgelere daha yoğun hücre



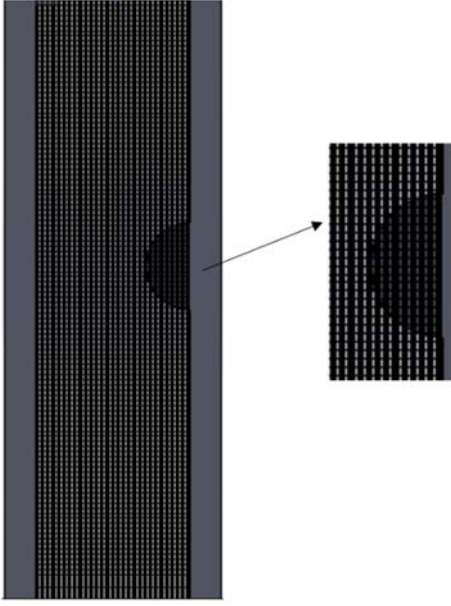
Şekil 1. HAD Model Geometrisi, (a) Tek yarı-silindirik engelin kanal geometrisi, (b) İki yarı silindirik engelin kanal geometrisi, (c) Alt alta ve karşılıklı bulunan dört yarı silindirik engelin kanal geometrisi, (d) Alt alta ve karşılıklı bulunan dört dikdörtgen engelin kanal geometrisi (CFD model geometry, (a) channel geometry of single semi-cylindrical obstacle, (b) Channel geometry of two semi-cylindrical obstacles, (c) Channel geometry of four semi-cylindrical obstacles (d) Channel geometry of four rectangular obstruction)

oluşturulmuştur. Bunun sebebi; akış yönlendiriciye yakın yerdeki ısı transferi ve akış değişimlerinin daha fazla olmasıdır.

Sayısal çalışma kapsamında iki boyutlu, sürekli, laminar, sıkıştırılmaz akış incelenmiştir. Çalışmada yer çekimi kuvveti aşağı yönlü olarak modellenmiş ve kaldırma kuvvetlerinin etkisi sayısal çalışmada hesaba katılmıştır.

Kartezyen koordinatlarda kararlı halde sıkıştırılmaz akışlar için süreklilik, x ve y yönlerindeki momentum ve enerjinin korunum denklemleri aşağıda verilmiştir. (Eş. 1-Eş. 4)

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



Şekil 2. Hücre Yapısı (Mesh structure)

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla^2 v - \rho g \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

Sayısal modelin karşılaştırılmasında kullanılan boyutsuz sayılardan, değiştirilmiş Grashof sayısı Eş. 5'te sunulmuştur.

$$Gr^* = \frac{g \beta q D^4}{k \nu^2} \quad (5)$$

Değiştirilmiş Richardson sayısı aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir. (Eş. 6)

$$Ri^* = \frac{Gr^*}{Re^2} \quad (6)$$

Reynolds sayısı Eş. 7 ile hesaplanmıştır. Burada görülen u_0 hızı modelde giriş sınır şartı olarak tanımlanmıştır. Mevcut çalışmada,

incelemeler $Re = 200$ değeri için gerçekleştirilmiştir. İlgili Re sayısına karşılık gelen u_0 hızı Eş. 7 ile hesaplanmış ve sınır şartı olarak tanımlanmıştır.

$$Re = \frac{u_0 D}{\nu} \quad (7)$$

Prandtl sayısı Eş. 8'de sunulmuştur.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (8)$$

Nusselt sayısı ise Eş. 9 ile hesaplanmıştır:

$$Nu = \frac{q D}{k(T_w - T_o)} \quad (9)$$

Burada q ısı akısı, T_w yarı silindirik engelin ortalama sıcaklığı, k ısı iletim katsayısı ve D yarı silindirik akış yönlendiricinin hidrolik çapıdır. Duvarlarda kayma gerilmesi ve hız sıfır olarak alınmıştır. Akış yönlendiricilerde sabit ısı akısı uygulanmıştır. Problemde akış dinamikleri ve ısı transferi sürekli akış koşullarında çözümlenmiştir. Radyasyon etkisi dikkate alınmamıştır. Kanal girişindeki suyun sıcaklığı $T_o = 20^\circ C$ olarak alınmıştır. Problemin çözülmesinde uygulanacak sınır şartları Tablo 1. de sunulmuştur.

Tablo 1. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

	u	v	T
Giriş	$u = 0$	$v = u_o$	$T = T_o$
Duvar	$u = 0$	$v = 0$	$\partial T / \partial n = 0$
Akış yönlendirici	$u = 0$	$v = 0$	$q'' = \text{ısı akısı}$
Çıkış	$\partial u / \partial y = 0$	$\partial v / \partial y = 0$	$\partial T / \partial y = 0$

2.1. Sayısal Sonuçların Doğrulanması (Verification of Numerical Results)

Bu bölümde FloEFD yazılımı [28] ile gerçekleştirilen sayısal çalışmanın referans olarak alınan çalışmayla karşılaştırılması ve doğrulanması yapılmıştır. Referans olarak Rosas vd. [20] çalışması alınmıştır. Yazılımda korunum denklemleri sonlu hacimler yöntemine dayalı bir sayısal yöntem ile çözdürülmektedir. Yazılımda kartezyen koordinatlar kullanılmaktadır. Kontrol hacimleri (hücre yapıları) dikdörtgen paralel yüzlüdür. Geometri sınırlarında kartezyen “cut cell” yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu yaklaşıma göre, sınır yüzeylerine yakın hücreler geometriyi kesmektedir. Dolayısıyla, sınıra yakın hücreler çökgendirel ve gelişigüzel yönde yüzeylere sahiptirler. Bu nedenle, FloEFD dikdörtgen hücrelerin avantajları ile yüksek doğruluğa sahip geometri sınır hücrelerini birleştirmektedir. Bununla birlikte, yerel sıkılaştırmalar yapılarak geometrik ve nümerik çözüm özelliklerini dikkate alınmaktadır. Bu genelde, katı/akışkan ara yüzeylerinde, yüksek gradyanlar söz konusu olduğunda, vb. durumlarda kullanılmaktadır. Tüm fiziksel parametreler hücre merkezlerinde depolanmaktadır. Kontrol hacmi yaklaşımı bir önceki bölümde sunulan korunum denklemlerini cebrik ayrıklaştırılmış denklemlere dönüştürmekte ve denklemlerin iteratif olarak çözümünü gerçekleştirilmektedir. Uzaysal türevler implicit sonlu fark operatörleri ile ikinci mertebe doğrulukta elde edilmektedir. Zamansal türevler ise implicit birinci mertebe doğrulukta Euler tekniği ile elde edilmektedir. Konvektif akılar için upwind yaklaşımı kullanılmaktadır. Difüzyon terimleri için merkezi farklar yöntemi kullanılmaktadır. Süreklilik ve konveksiyon/difüzyon denklemleri için time-implicit yaklaşımı ile operatör ayrıklaştırma tekniği ile birlikte kullanılmaktadır. Bu yöntem ile basınç-hız bağlantısı çözümü mümkün hale gelmektedir. Bu işlemi SIMPLE benzeri bir yaklaşımı

izleyerek, cebrik işlemler ile eliptik tip ayırık basınç denklemi elde edilmektedir. Çözümlerde öncelikle çözümün doğruluğu araştırılmıştır. Artık değerlerin süreklilik, momentum ve hız için 10^{-3} oranından daha düşük olması durumunda çözümün yakınsadığı kabul edilmiştir. Bunun için öncelikle çözümün yakınsamış olduğu irdelenmiştir. Sayısal çalışma kapsamında çözümün yakınsayıp yakınsamadığı da araştırılmıştır. Çözümün yakınsamasından sonra korunum denklemlerinin sağlanmış olması kontrol edilmiştir. Bu kapsamda hem kütlelerin hem de enerjinin korunumunun sağlandığı gözlemlenmiştir.

Çözümün doğruluğunun araştırılması kapsamında gerçekleştirilen bir diğer çalışma çözümünün hücre sayısından bağımsızlaştırılmasıdır. Bu kapsamda; x ve y koordinat sistemlerinde olmak üzere, $30 \times 145 - 140 \times 475$ aralığında 13 farklı hücre yapısı oluşturulmuş ve bu hücre sayılarında simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve çözümlerin hücre sayılarından bağımsız hale getirilmesi sağlanmıştır. Şekil 3a'da Nusselt sayısının hücre sayısı ile değişimi sunulmuştur. Çözüm; 12 numaralı hücre sayısı olan 120×415 'den sonra yaklaşık olarak sabit hale gelmekte ve hücre sayısından bağımsızlaşmaktadır. Bu nedenle, 120×415 hücre sayısı tüm çözümlerde kullanılmıştır.

Sayısal çalışma sonuçları; literatürde, birden çok engelin olduğu, farklı parametrelerin karışık taşınım ile ısı transferine etkisinin incelendiği deneysel sonuçlar bulunamadığından, sayısal model geometrisine en yakın olan tek silindirik engelin olduğu Rosas vd. [20] deneysel çalışması ile de karşılaştırılmıştır. Bu çözümlerde, 120×415 hücre sayısı kullanılmıştır. Şekil 3b'de sayısal sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve deney sonuçları ile model sonuçları arasındaki farkın ($Re=50-200$ aralığında) %5,3 olduğu belirlenmiştir. Böylece sayısal sonuçların deney sonuçlarını oldukça doğru bir şekilde temsil edebildiği görülmüştür. Re sayısı; doğal taşınım etkilerini karakterize eden Gr sayısının, zorlanmış taşınım etkilerini karakterize eden Re sayısının karesine oranıdır. Dolayısı ile, Düşük Re sayılarında ($Re=50$) geometriye uygun olarak doğal taşınımın, zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisi daha az olduğundan sayısal sonuçlar bir değere kadar deney sonuçları ile uyum göstermiştir. Ancak, yüksek Re sayılarında ($Re>200$) doğal taşınım etkileri zorlanmış taşınım etkilerine baskın gelmeye ve zorlanmış taşınım etkilerini belirgin şekilde azaltmaya başlamıştır. Bu durum, engellerin yüzeyine yakın bölgelerdeki vorteks oluşumundaki belirsizliği arttırmıştır. Bu sebeple, sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla uyumluluğu azalmıştır. Buna rağmen, deneysel ile sayısal sonuçların oldukça tutarlı olduğu söylenebilir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

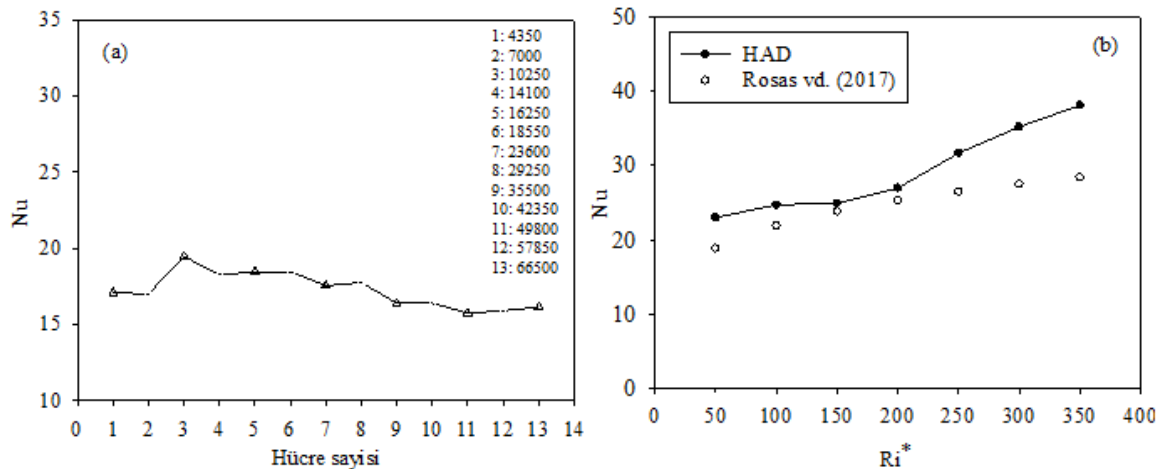
Bu bölümde parametrik sayısal çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen analiz sonuçları ayrıntılı olarak izah edilmiş ve bulgular tartışılmıştır. Çalışmalar kapsamında, alt alta bulunan iki yarı silindirik engeldeki karışık taşınım, alt alta ve karşılıklı bulunan dört yarı silindirik engeldeki karışık taşınım, alt alta ve karşılıklı bulunan dört dikdörtgen engeldeki karışık taşınım, dikdörtgen ve yarı silindirik engellerin karışık taşınım etkileri incelenmiştir. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar ile alt alta ve karşılıklı konumlandırılmış yarı silindirik engeller bulunan dik bir kanaldaki sayısal çalışmalar için korelasyon oluşturulmuş ve sunulmuştur.

3.1. Alt alta bulunan iki yarı silindirik engeldeki karışık taşınımın incelenmesi

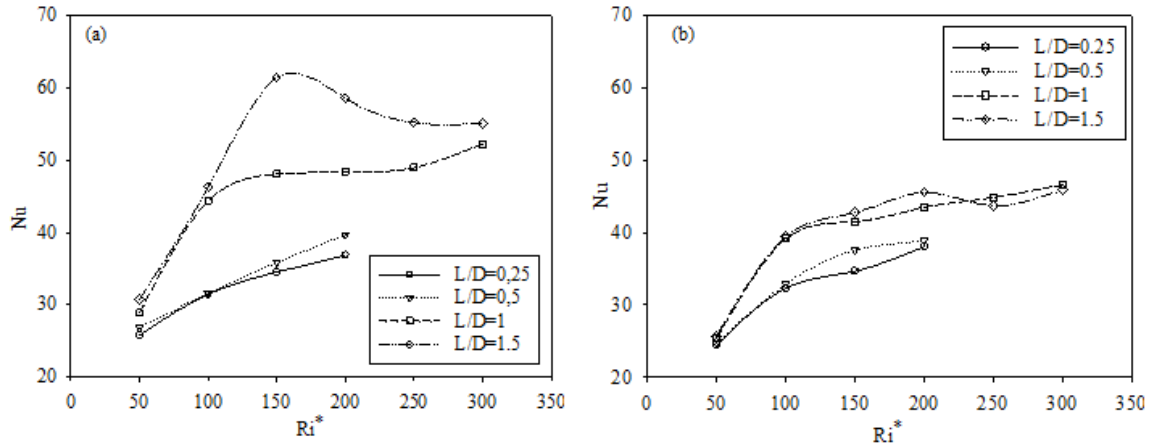
(Investigation of mixed convection in two semi-cylindrical obstacles for one below the other)

Bu bölümde; dik ve iki tarafı adyabatik duvarlarla sınırlanmış ve yüzeyinde ısı akısı olan, alt alta bulunan iki yarı silindirik engelin bulunduğu bir kanaldaki ısı transferine ve akış dinamiklerine farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir. İncelenen problemin kanal geometrisi Şekil 1b'de sunulmuştur. Yarı silindirik engeller aynı çaptadır ve hidrolik çapları D olarak gösterilmektedir. Yarı silindirik engellere sabit ısı akısı verilmektedir. Kanal girişindeki akışkanın sıcaklığı sabit $T_0 = 20^\circ\text{C}$ 'dir. Engellerin birbirine olan uzaklıkları L , kanalın genişliği W , kanalın uzunluğu H , engellerin birbirine uzaklığının kanal çapına oranı (L/D) olarak gösterilmiştir. Bu bölümde $Re=200$ için, $BR=0,5$ değerinde L/D oranının ve Re sayısının değiştirilmesinin Nusselt sayısına olan etkisi incelenmiştir. Çalışmada, akışkan kanalın girişinden belli bir u_0 hızıyla girmekte ve yerçekiminin etkisiyle hareket etmektedir. Dolayısıyla; zorlanmış taşınım etkileri, doğal taşınım etkileri ile ters yönde bir etkiye sahiptir.

Üst engel için Nusselt sayısının farklı L/D oranına ve farklı Re sayılarına göre değişimi, Şekil 4a'da sunulmuştur. Sonuç olarak; Nusselt sayısının engellerin birbirine olan uzaklıkları yani L/D oranlarının artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. $L/D = 0,25-0,5$ aralığında engellerin birbirine çok yakın olması sebebiyle, akışkan hızı azalmakta ve kaldırma kuvvetlerinin etkisi daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu durum Re sayısı arttıkça Gr sayısının artışına bağlı olarak, Nu sayısının da artmasına sebep olmaktadır. Bu aralıkta $Re=150$ değerine kadar L/D oranındaki artış Nu sayısında belirgin bir artışa sebep olmaz iken, $Re=200$ değerinden sonra



Şekil 3. Sayısal sonuçların doğrulanması (a) Hücre sayısından bağımsızlaştırma, (b) Sonuçların deneysel veriler ile doğrulanması (Verification of numerical results, (a) Independency of mesh number, (b) Verification of the results with experimental data)



Şekil 4. Nu sayısının Ri sayısı ve farklı L/D değerlerine göre değişimi, Re=200, BR=0,5; (a) Üst engelde, (b) alt engelde (Variation of Nu number with Ri number at different L/D, Re=200, BR=0.5; (a) upper obstacle, (b) lower obstacle)

kaldırma kuvvetlerinin etkisi daha da belirginleşmekte ve Nu sayısı artmaktadır. L/D=0,5-1 aralığında engellerin arasındaki mesafenin artışına bağlı olarak, düşük Ri sayılarında (Ri=50-150 aralığında) hem yerçekimi yönündeki zorlanmış taşınım etkileri hem de yerçekiminin aksi yönünde oluşan kaldırma kuvvetlerinin etkisi sebebiyle engellerin arasında oluşan girdapların büyümesine bağlı olarak, Nu sayısı belirgin bir şekilde artmıştır. Ancak, Ri=150-300 aralığında Gr sayısının artışına bağlı olarak artan kaldırma kuvvetleri etkisi, zorlanmış taşınım etkilerine baskın gelmeye başlamış ve Nu sayısındaki artışı azaltıcı bir etki göstermiştir. Bu aralıkta; L/D=1,5 değerinde Ortalama Nu sayısındaki azalışın %11,3 olduğu tespit edilmiştir. Ri=300 değerinde kaldırma kuvvetleri etkisinin belirgin bir şekilde baskın olması sebebiyle, engeller arasındaki mesafe artırılırsa dahi (L/D=1-1,5 aralığında), Nu sayısında belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. L/D=0,25-1,5 aralığında artırıldığında; üst engelde ortalama Nu sayısında %59,4'lük bir artış olduğu, en yüksek Nu sayısının L/D=1,5 ve Ri=150 olduğu durumda meydana geldiği tespit edilmiştir.

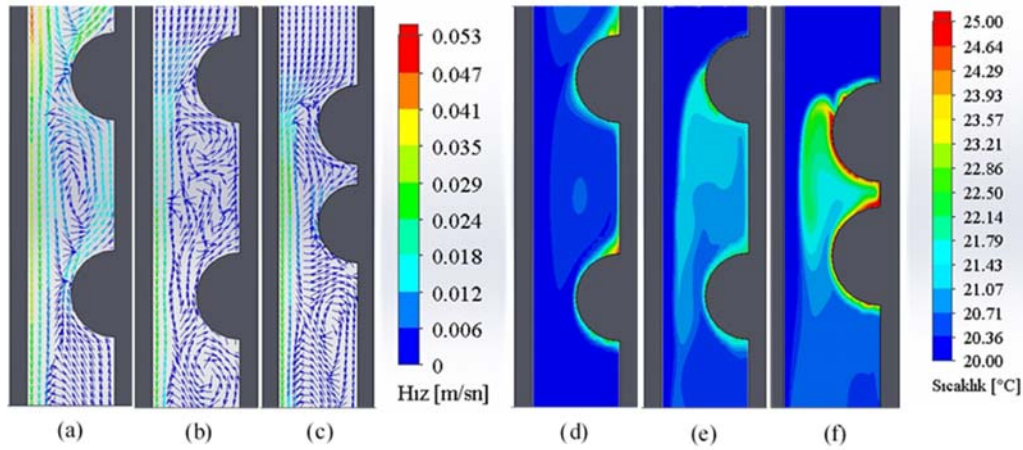
Alt engel için Nusselt sayısının farklı L/D oranına ve farklı Ri sayılarına göre değişimi, Şekil 4b'de sunulmuştur. Alt engelde de üst engeldeki duruma benzer şekilde, L/D oranı arttıkça ortalama Nu sayısında artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak tüm L/D oranları için Nu sayısındaki artış üst engelde göre daha az gerçekleşmiştir. Bunun sebebinin; alt engel çevresinde doğal taşınım sonucu oluşan akışkan hareketinin üst engel tarafından engellenmesi ve doğal taşınım etkilerinin tam olarak görülememesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

L/D=0,25-0,5 aralığında engellerin birbirine çok yakın olması sebebiyle, akışkan hızı azalmakta ve kaldırma kuvvetlerinin etkisi düşük Ri sayılarında (Ri=50-100 aralığında) daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu durumun sebebinin; Ri sayısı arttıkça, Gr sayının artışına bağlı olarak, Nu sayısının da artması olduğu değerlendirilmiştir. Bu aralıkta; Ri=150 değerinde L/D oranındaki artış Nu sayısında belirgin bir artışa sebep olmamıştır. Bunun sebebinin; kaldırma kuvvetlerinin etkisinin Ri sayısındaki artışa bağlı olarak artmasına rağmen üst engelin, bu etkiyi azaltıcı bir etki göstererek yer çekimine zıt yöndeki akışkan hızını azalması olarak değerlendirilmiştir.

L/D=0,5-1 aralığında engellerin arasındaki mesafenin artışına bağlı olarak, düşük Ri sayılarında (Ri=50-100 aralığında) hem yerçekimi yönündeki zorlanmış taşınım etkileri hem de yerçekiminin aksi

yönünde oluşan kaldırma kuvvetlerinin etkisi sebebiyle engellerin arasında oluşan girdapların büyümesine bağlı olarak, Nu sayısı belirgin bir şekilde, üst engelde olduğu gibi artmıştır. Ancak, bu artış bu bölgede oluşan kaldırma kuvvetlerinin sebep olduğu yer çekimine aksi yöndeki akışkan hareketine bağlı hızın yüksek değerlere çıkamaması sebebiyle Nu sayısı üst engelden farklı olarak belirgin bir şekilde artış göstermemiştir. Bunun sebebi üst engelin kaldırma kuvvetleri sebebiyle oluşan akışkan hareketini engellemesidir. Ri=150-300 aralığında Gr sayısının artışına bağlı olarak artan kaldırma kuvvetleri etkisi, zorlanmış taşınım etkilerine, üstteki engelin akışkan hareketini engellemesi sebebiyle kısmen baskın gelmeye başlamış ve Nu sayısındaki artışı azaltarak devam etmiştir. Ancak doğal taşınımın Nu sayısını azaltıcı etkisi üstteki engel sebebiyle yüksek değerlere ulaşmadığından, Nu sayısında yerel olarak bir düşüşe sebep olmamıştır. Ri=300 değerinde kaldırma kuvvetleri etkisinin kısmen zorlanmış taşınım etkisine baskın olması sebebiyle, engeller arasındaki mesafe artırılırsa dahi (L/D=1-1,5 aralığında), Nu sayısında belirgin bir değişim olmadığı tespit edilmiştir. L/D=0,25-1,5 aralığında artırıldığında; alt engelde ortalama Nu sayısında %25,2'lik bir artış olduğu, en yüksek Nu sayısının L/D = 1 ve Ri=300 olduğu durumda meydana geldiği tespit edilmiştir.

Farklı L/D oranının; Re=200, Ri=200 ve BR=0,5 değerlerinde; kanal içerisinde oluşan hız vektörlerinin dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 5a-Şekil 5c'de gösterilmiştir. Richardson sayısının artmasıyla birlikte, kaldırma kuvvetlerinin etkisi artmakta ve bu durumun vorteks oluşumunun artmasına sebep olduğu görülmektedir. Girdap oluşumunun artması, hidrodinamik sınır tabakanın artmasına ve ısı sınır tabakanın azalmasına sebep olmakta ve bu durum ısı transferini arttırmaktadır. L/D oranının artmasıyla birlikte engeller arası mesafe artmaktadır. L/D=0,5 durumunda; doğal taşınımdan kaynaklanan kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle oluşan yerçekiminin aksi yönündeki akışkan hareketi hızlanmaktadır. Bu akışkan hareketi zorlanmış taşınımdan kaynaklanan ve yer çekimi yönündeki akışkan hareketiyle etkileşerek, iki engel arasında belirgin girdaplar oluşturmaktadır ve bu girdaplar engellere yakın bölgelerde hidrodinamik sınır tabakanın kalınlaşmasına sebep olmaktadır. L/D= 0,25 değerinde engeller arasındaki mesafenin azalmasına bağlı olarak, engellerin arasında doğal taşınımdan kaynaklanan akışkan hareketi yavaşlamakta ve buna bağlı olarak hız azalmaktadır. Üstteki engelin de doğal taşınımdan kaynaklanan yerçekiminin aksi yönündeki bu akışı engellemesi sebebiyle bu akış, zorlanmış taşınımdan kaynaklanan akışa baskın gelememekte ve ısınan akışkan bölgeden uzaklaştırılmamaktadır. Bu durumda üst engelin alt bölgesine ve alt engelin üst bölgesinde küçük girdaplar oluşmakta ve hız sınır tabaka kalınlığı azalmaktadır. L/D=



Şekil 5. Hız vektörlerinin ve sıcaklık konturlarının dağılımı, $Re=200$, $Ri=200$, $BR=0,5$ (a) $L/D=0,5$ için hız vektörleri (b) $L/D=0,25$ için hız vektörleri (c) $L/D=0,15$ için hız vektörleri, (d) $L/D=0,5$ için sıcaklık konturları (e) $L/D=0,25$ için sıcaklık konturları (f) $L/D=0,15$ için sıcaklık konturları (Distribution of velocity vectors and temperature contours, $Re=200$, $Ri=200$, $BR=0.5$ (a) Velocity vectors for $L/D=0.5$ (b) Velocity vectors for $L/D=0.25$ (c) Velocity vectors for $L/D=0.15$, (d) Temperature contours for $L/D=0.5$ (e) Temperature contours for $L/D=0.25$ (f) Temperature contours for $L/D=0.15$)

0,15 değerinde; engeller arasındaki mesafenin daha da azalmasına bağlı olarak, engeller arasındaki akışkan hızı azalmakta ve burada oluşan hidrodinamik hız sınır tabaka kalınlığı daha da azalmaktadır. Bu durumda zorlanmış taşınımından kaynaklanan akışkan hareketi, engeller arasındaki bölgede oluşan doğal taşınımından kaynaklanan akışkan hareketine tamamen baskın geldiğinden, yüzeye yakın bölgede oluşan sıcak akışkan bölgeden uzaklaştıramamaktadır.

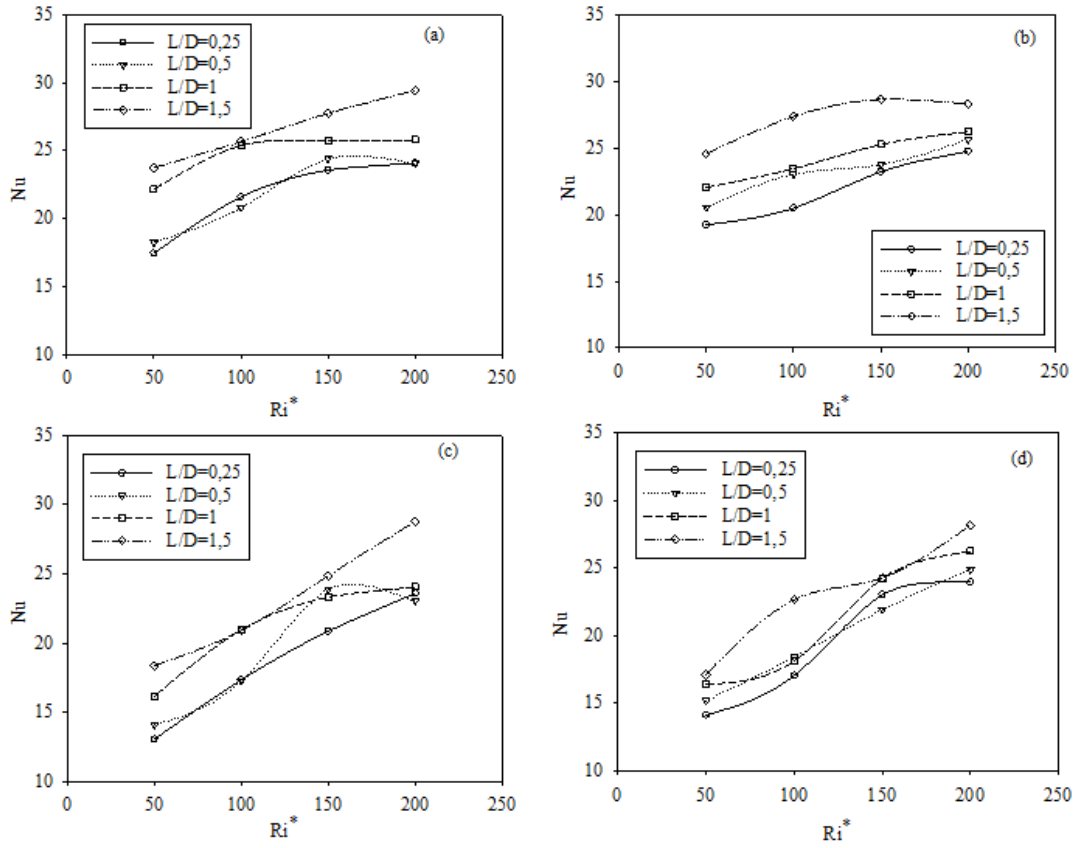
Farklı L/D oranında; $Re=200$, $Ri=200$ ve $BR=0,5$ değerlerinde; kanal içerisinde oluşan sıcaklık konturlarının dağılımı Şekil 5d-Şekil 5f'de gösterilmiştir. $L/D=0,5$ durumunda; engeller arasındaki mesafe en fazladır. Bu sebeple doğal taşınımından kaynaklanan akışkan hareketine bağlı akışkan hızı bu durumda en yüksek değerindedir. Zorlanmış taşınımından kaynaklanan akışkan hareketi, engellerin zıt yönündeki duvar boyunca yerçekimi yönünde devam etmektedir. Engele yakın bölgelerdeki doğal taşınımından kaynaklanan akışkan hareketi, hız sınır tabakayı kalınlaştırmakta ve ısı sınır tabakayı azaltmakta, ve bu durum ısı transferini artırarak iyi bir soğutma sağlamaktadır. $L/D=0,25$ değerinde engeller arasındaki mesafenin azalmasına bağlı olarak, engellerin arasında doğal taşınımından kaynaklanan akışkan hareketi yavaşlamakta ve buna bağlı hız azalmaktadır. Bu durum, hız sınır tabaka kalınlığının azalmasına ve ısı sınır tabaka kalınlığının artmasına ve ısı transferinde azalmaya sebep olmaktadır. Bu sebeple, engeller arasındaki bölgede akışkan sıcaklık değerleri yükselmektedir. $L/D=0,15$ değerinde; engeller arasındaki mesafenin daha da azalmasına bağlı olarak, engeller arasındaki akışkan hızı azalmakta ve burada oluşan hidrodinamik hız sınır tabaka kalınlığı daha da azalmakta ve ısı sınır tabaka kalınlığı artmaktadır. Bu durum ısı transferini daha da azaltmakta ve engeller arasındaki bölgede ve engellerin birbirine bakan yüzeylerinde sıcaklıkların, sıcak akışkanın yüzeye yakın bölgelerden uzaklaştıramaması sebebiyle, belirgin bir şekilde artmasına sebep olmaktadır.

3.2. Alt alta ve karşılıklı bulunan dört yarı silindirik engeldeki karışık konveksiyonun incelenmesi (Investigation of mixed convection for four opposing semi-cylindrical obstacles)

Dik ve iki tarafı adyabatik duvarlarla sınırlı, içerisinde ısı akısına olan alt alta ve karşılıklı 4 yarı silindirik engelin bulunduğu bir kanaldaki karışık konveksiyonun incelendiği kanal geometrisi Şekil 1c'de sunulmuştur. Sayısal çalışmada akış laminar ve akışkan olarak kullanılan suyun özellikleri $Pr=7$ olarak incelenmiştir. Sayısal 1812

çalışmalar $Re=200$ için, iki boyutlu olarak yapılmış ve x-y koordinatlarında analiz edilmiştir. Kanalin uzunluğu H ve genişliği W olarak alınmıştır. Kanaldaki engellerin birbirine olan uzaklığı L ve engellerin hidrolik çapı D olarak alınmıştır. Kanala giren suyun sıcaklığı (T_0) ve (u_0) hızı sabittir. Su kanalın girişinden belli bir u_0 hızıyla girmekte olup yerçekiminin etkisiyle hareket etmektedir. Çalışmada değiştirilmiş Richardson sayısı ve BR oranlarında farklı parametreler için analizleri yapılmış ve bu parametrelerin değişiminin, akıştaki ısı transferine ve akış dinamiklerine etkisi incelenmiştir.

Sayısal problemlerin çözümünde BR oranı 0,25 olarak alınmıştır. Şekil 6a'da üst sol engeldeki değiştirilmiş Richardson sayısının ve L/D oranının Nusselt sayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. L/D oranının artırılmasının, değiştirilmiş Richardson sayısı sabit tutulduğunda, genel olarak Nusselt sayısını arttırdığı belirlenmiştir. Doğal taşınım etkilerinin az olduğu $Ri=50$ için; engeller arası mesafe arttırıldığında, $L/D=0,25-0,5$ için ortalama Nu sayısının %7,4 oranında artış gösterdiği, $L/D=0,5-1,0$ için ortalama Nu sayısının %20,8 oranında artış gösterdiği ve $L/D=1,0-1,5$ için ortalama Nu sayısının %7,5 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Doğal taşınım etkisinin yüksek olduğu $Ri=200$ için ise; engeller arası mesafe $L/D=0,25-0,5$ aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısında belirgin bir artış meydana gelmediği, $L/D=0,5-1,0$ aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısında %7,1 oranında artış gösterdiği ve $L/D=1,0-1,5$ aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısında %14,1 oranında artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin; doğal taşınım etkilerinin az olduğu düşük Ri sayılarında, doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin engeller arası mesafe azaldıkça azalması ve $L/D=0,25-1,0$ aralığında ortalama Nusselt sayısının artmasıdır. $L/D=1,0-1,5$ aralığında ise, doğal taşınımın ortalama Nusselt sayısını azaltıcı etkisi akışkan hızının artışına bağlı olarak artmakta ve ortalama Nusselt sayısındaki artış azalmaktadır. Doğal taşınım etkilerinin çok olduğu yüksek Ri sayılarında ($Ri=200$ için) ise; doğal taşınımın azaltıcı etkisi $L/D=0,25-0,5$ aralığında en yüksek değerinde gerçekleşmiş ve ortalama Nusselt sayısında bir artma tespit edilmemiştir. $L/D=1,0-1,5$ aralığında ise, doğal taşınım etkileri daha da azalmış ve ortalama Nusselt sayısındaki artış artmıştır. Engeller arası mesafe sabit tutulup (L/D oranı), Ri sayısı $Ri=50-200$ aralığında arttırıldığında; $L/D=0,25$ için ortalama Nu sayısının % 41 oranında artış gösterdiği, $L/D=0,5$ için ortalama Nu sayısının %31,2 oranında artış gösterdiği, $L/D=1,0$ için ortalama Nu sayısının %15,5 oranında artış gösterdiği ve $L/D=1,5$ için ortalama Nu sayısının %21,7 oranında



Şekil 6. Nu sayısının Ri sayısı ve farklı L/D değerlerine göre değişimi; Re=200, D=0,0285 m, BR=0,25, (a) Üst sol engelde, (b) üst sağ engelde, (c) alt sol engelde, (d) alt sağ engelde
(Variation of Nu number with Ri number for different L/D; Re=200, D=0.0285 m, BR=0.25, (a) upper left obstacle, (b) upper right obstacle, (c) lower left obstacle, (d) lower right obstacle)

artış gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak; engeller arası mesafe L/D=0,25-1,0 aralığında arttırıldığında ve doğal taşınım etkileri (Ri sayısı) arttırıldığında, kaldırma kuvvetleri etkisi ile doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisi kademeli olarak artmakta ve ortalama Nusselt sayısındaki artış kademeli olarak azalmaktadır. L/D=1,5 değerinde ise, engeller arasındaki mesafenin artışına bağlı olarak, akışkan hızı artmış, doğal taşınımın azaltıcı etkisi azalmış ve ortalama Nusselt sayısındaki artış artmıştır.

Şekil 6b'de üst sağ engel için farklı L/D oranlarının ve Ri sayılarının ortalama Nusselt sayısına etkisi sunulmuştur. Üst sol engelde görülen akış özelliklerinin ve ısı transferi etkilerinin, üst sağ engelde de benzer şekilde meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak; doğal taşınım etkilerini az olduğu düşük Ri sayılarında (Ri=50 için) L/D=0,25-1,5 aralığında arttırıldığında, ortalama Nusselt sayısındaki artışın %27,7 iken, doğal taşınım etkilerini çok olduğu yüksek Ri sayılarında (Ri=200 için) L/D=0,25-1,5 aralığında arttırıldığında, ortalama Nusselt sayısındaki artışın %14,4 olduğu belirlenmiştir. Bu durumun doğal taşınımın, zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin yüksek Ri sayılarında daha belirgin olarak görülmesi olarak değerlendirilmiştir. Doğal taşınım etkilerinin Ri=50-200 aralığında arttırılması durumunda ise; L/D=0,25 için ortalama Nusselt sayısındaki artış %28,7, L/D=0,5 için ortalama Nusselt sayısındaki artış %24,9; L/D=1,0 için ortalama Nusselt sayısındaki artış %19, L/D=1,5 için ortalama Nusselt sayısındaki artış %15,3 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak doğal taşınımın ısı transferini azaltıcı etkisi (buradaki geometri için) arttıkça, engeller arası mesafe arttırılsa da ortalama Nusselt sayısındaki artışın azaldığı tespit edilmiştir.

Şekil 6c ve Şekil 6d'de alt sol ve alt sağ engeller için değiştirilmiş Richardson sayısının ve L/D oranının Nusselt sayısına olan etkileri incelenmiştir. Bu engellerde, üst bölgede bulunan iki engelden farklı olarak, engeller arasında oluşan mikro vortekslerin, akış karakteristiği ve ısı transferinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Oluşan mikro vortekslerin, engeller arasındaki akışkan hızını azalttığı ve hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının azalmasına ve ısı sınır tabaka kalınlığının artmasına sebep olduğu, böylece artan ısı direncin ısı transferini azalttığı tespit edilmiştir. Böylece bütün L/D oranlarında ve Ri sayılarında ortalama Nu sayısının değerinin düştüğü belirlenmiştir. Her iki alt engelde de, L/D oranının artması ile birlikte değiştirilmiş Ri sayısının artması, ortalama Nusselt sayısını arttırmıştır. Doğal taşınım etkilerinin az olduğu Ri=50 için; L/D=0,25-1,5 aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısındaki artış %40,8 değerinde oluşurken, doğal taşınım etkilerinin fazla olduğu Ri=200 için; L/D =0,25-1,5 aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısındaki artış %22 olarak meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, Gr sayısının artışına bağlı olarak artan kaldırma kuvvetleri etkisinin zorlanmış taşınımın etkisini azaltması ve azalan karışık taşınım etkisi ile Ortalama Nu sayısının değerinin düşmesi olarak değerlendirilmiştir. Alt engeller için engeller arası mesafenin etkisi incelendiğinde, Ri= 50-200 aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısındaki artış; L/D=0,25 için %80,8, L/D=0,5 için %63,7, L/D=1,0 için %51,7 ve L/D=1,5 için %56,7 olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebinin; engeller arası mesafe arttıkça, belirli bir mesafeye kadar (L/D=0,25-1,0 aralığında) doğal taşınım etkisinin artmasının, engeller arasındaki akışkanın hızının azalmasına katkıda bulunduğu karışık taşınım etkisinin (Nu sayısının değerini) belirgin şekilde

azalmasına sebep olması olduğu ancak, $L/D=1,5$ değerinde ise; oluşan mikro vortekslerin etkisinin azalmasına bağlı olarak doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin de azaldığı ve bunun Nu sayısındaki artışın artmasına sebep olduğu değerlendirilmiştir. Her iki şekilde de en yüksek ortalama Nusselt sayısı $Ri=200$ ve $L/D=1,5$ değerlerinde elde edilmiştir.

Şekil 7'de $Re=200$, $BR=0,25$ için değiştirilmiş Richardson sayısının ve L/D oranının hız vektörleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan doğal taşınım etkilerinin hız vektörleri üzerindeki etkisi Şekil 7a'da ve Şekil 7b'de, engeller arasındaki mesafenin değişiminin hız vektörleri üzerindeki etkisi Şekil 7a ve Şekil 7c'de sunulmuştur. Grashoff sayısının artmasına bağlı olarak artan kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle üst engellerin yere bakan yüzeylerinde mikro vortekslerin oluştuğu, bu durumun akışın ayrılma noktasının engelin yüzeyinin daha ileri bir noktasında (yerçekiminin aksi yönünde) meydana gelmesine sebep olduğu ve bu bölgede hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının azalmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Engeller arasındaki bölgede, doğal taşınım etkilerinin artması (Ri sayısının artışı) duvar yüzeyine yakın bölgelerde oluşan vortekslerin büyümesine ve zorlanmış taşınım akışının etkisinin azalmasına sebep olduğu, bu durumun bu bölgede akışkan hızının azalmasına sebep olduğu belirlenmiştir. Engeller arası bölgede, doğal taşınım etkilerinin, zorlanmış taşınım etkilerine göre yüksek Ri sayılarında daha belirgin şekilde oluştuğu tespit edilmiştir. Alt engellerin bulunduğu bölgede; yer istikametinin zıt yönündeki yüzeylerinde, engeller arasında oluşan vortekslerin etkisi ile akışkan hızının azaldığı belirlenmiştir. Engellerin yere bakan yüzeylerinde ise, doğal taşınımından kaynaklanan akışkan hareketinin çok daha belirgin şekilde oluştuğu ve yer çekimi yönündeki akışkan hareketini sağ alt engele doğru sürüklediği ve bu durumun sağ alt engelin yere bakan yüzeylerinde, akışkan hızının belirgin şekilde azalmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Düşük Ri sayılarında alt engellerin yere bakan yüzeylerinde oluşan vortekslerin, kanalın orta hattına göre simetrik şekilde oluştuğu belirlenmiştir. Yüksek Ri sayılarında ise, sol engelin alt bölgesinde oluşan vortekslerin, sağ engelin alt bölgesinde oluşan vorteklere göre çok daha büyük olması sebebiyle; akışım simetrik olmayan bir şekilde sağ engelin alt bölgesine doğru sürüklendiği tespit edilmiştir. Engeller arası mesafe azaltıldıkça (L/D oranı azaldıkça) üst engellerin yer çekiminin aksi yönündeki yüzeylerinde akışkan hareketinde belirgin bir farklılaşma oluşmadığı, yere bakan yüzeylerinde ise; engeller arasında oluşan vortekslerin etkisinin artması ile akışkan hızında belirgin bir azalma olduğu belirlenmiştir. Engeller arası mesafenin az olduğu durumda; daha belirgin şekilde meydana gelen vortekslerin, zorlanmış taşınımından kaynaklanan akışkan hareketinin kanalın orta noktasına doğru

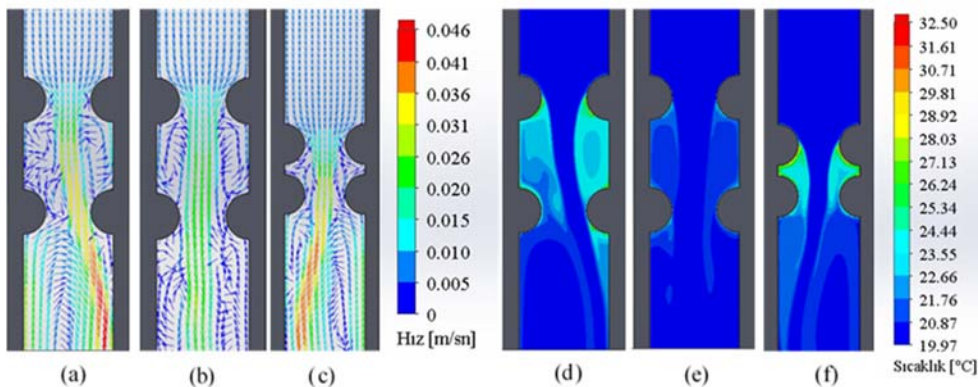
ötenmesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Alt sağ engelin yere bakan yüzeyinde kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile oluşan vortekslerin, sol engelin alt bölgesinde oluşan vorteklere göre daha belirgin şekilde oluştuğu ve bu durumun akışımın asimetrik bir şekilde sol engelin alt bölgesindeki duvara doğru ötenmesine sebep olduğu belirlenmiştir.

Şekil 7'de $Re=200$, $BR=0,25$ için değiştirilmiş Richardson sayısının ve L/D oranının sıcaklık konturu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan doğal taşınım etkilerinin sıcaklık konturları üzerindeki etkisi Şekil 7d'de ve Şekil 7e'de, engeller arasındaki mesafenin değişiminin sıcaklık konturları üzerindeki etkisi Şekil 7d ve Şekil 7f'de sunulmuştur. Doğal taşınım etkileri arttığında ($Ri=50-200$) engeller arasında oluşan vortekslerin büyümesine bağlı olarak, zorlanmış taşınım akışımın engellerden ötenerek uzaklaştığı, bu durumun hidrodinamik sınır tabakanın azalmasına ve ısı sınır tabakanın artmasına sebep olduğu, böylece artan ısı direncin ısı transferini azalttığı ve yüzeylerde sıcaklığın artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Üst engellerin yüzeyinde akış ayrılma noktası daha ileri bir noktada meydana geldiğinden, bu bölgede akış hızının azaldığı ve yüzey sıcaklığının arttığı belirlenmiştir. Yüksek Ri sayılarında; doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisi daha belirgin şekilde görüldüğünden yüzeylerde akış hızının azalmasına bağlı olarak, ısı sınır tabakanın arttığı ve yüzey sıcaklıklarının yükseldiği tespit edilmiştir. Engeller arasındaki mesafe azaltıldıkça ($L/D=1,5-0,25$); engeller arasında oluşan vortekslerin etkisinin artmasına bağlı olarak hızın oldukça azaldığı ve bu durumun ısı sınır tabakayı arttırdığı, böylece ısı direncin artarak, yüzey sıcaklıklarını arttırdığı tespit edilmiştir. $L/D=0,25$ durumunda; alt sağ engelin yer çekimi yönündeki yüzeyinde doğal taşınım etkisi ile oluşan vortekslerin büyümesine bağlı olarak daha iyi bir soğuma sağladığı (diğer alt engele göre) ve yüzey sıcaklığının bu bölgede belirgin bir şekilde azaltılabildiği tespit edilmiştir. $L/D=1,5$ durumunda ise; alt sol engelin yerçekimi yönündeki yüzeyinde oluşan vortekslerin daha belirgin şekilde oluştuğu (diğer alt engele göre), buna bağlı olarak daha iyi bir soğutma sağladığı ve yüzey sıcaklığını azaltılabildiği tespit edilmiştir.

3.3 Alt alta ve karşılıklı bulunan dört dikdörtgen engeldeki karışık konveksiyonun incelenmesi

(Investigation of mixed convection in four rectangular obstacles located one below the other and opposite each other.)

Dik bir kanalda ısı akısına sahip alt alta ve karşılıklı dört dikdörtgen engel bulunan bir akıştaki karışık konveksiyonun incelendiği kanal geometrisi Şekil 1d'de sunulmuştur. Sayısal çalışmada akış laminar



Şekil 7. Hız vektörlerinin ve sıcaklık konturlarının dağılımı, $Re=200$, $BR=0,25$ (a) $L/D=1,5$, $Ri=200$ için hız vektörleri, (b) $L/D=1,5$, $Ri=50$ için hız vektörleri, (c) $L/D=0,25$, $Ri=200$ için hız vektörleri, (d) $L/D=1,5$, $Ri=200$ için sıcaklık konturları, (e) $L/D=1,5$, $Ri=50$ için sıcaklık konturları, (f) $L/D=0,25$, $Ri=200$ için sıcaklık konturları

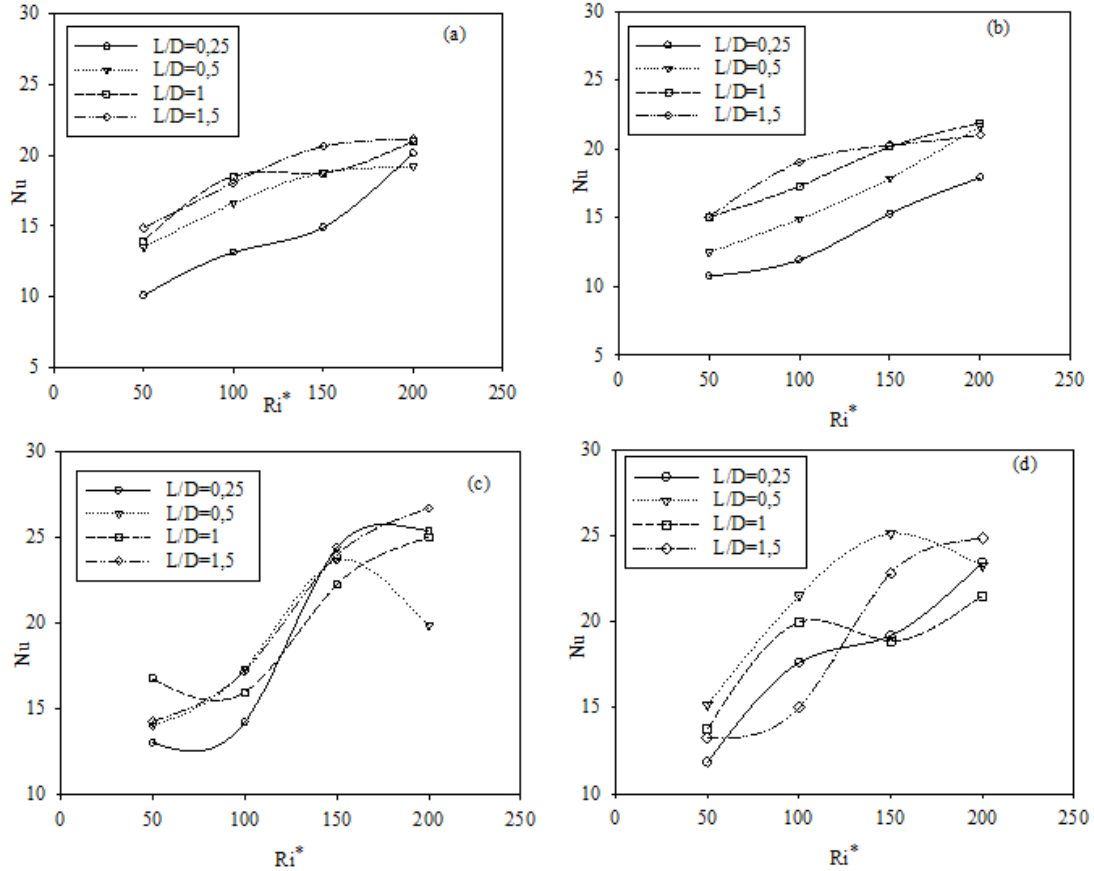
(Distribution of velocity vectors and temperature contours, $Re=200$, $BR=0,25$ (a) Velocity vectors for $L/D=1,5$, $Ri=200$, (b) Velocity vectors for $L/D=1,5$, $Ri=50$, (c) Velocity vectors for $L/D=0,25$, $Ri=200$, (d) Temperature contours for $L/D=1,5$, $Ri=200$, (e) Temperature contours for $L/D=1,5$, $Ri=50$, (f) Temperature contours for $L/D=0,25$, $Ri=200$)

ve akışkan olarak kullanılan suyun özellikleri $Pr=7$ olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalar $Re=200$ için, iki boyutlu olarak yapılmış ve x-y koordinatlarında analiz edilmiştir. Kanalin uzunluğu H ve genişliği W olarak alınmıştır. Kanaldaki engellerin birbirine olan uzaklığı L olarak alınmıştır. Kanaldaki engellerin uzun kenarlarının uzunluğu $D_u=D$, kısa kenarların uzunluğu ise uzun kenarın yarısı kadar olan $D_k=D/2$ olarak alınmıştır. Kanala giren suyun sıcaklığı (T_0) ve hızı (u_0) sabittir. Su kanalın girişinden belli bir u_0 hızıyla girmekte olup yerçekiminin etkisiyle hareket etmektedir. Çalışmada değiştirilmiş Richardson sayısı ve L/D oranlarında farklı parametreler için analizleri yapılmış ve bu parametrelerin değişiminin, akıştaki ısı transferine ve akış dinamiklerine etkisi incelenmiştir.

Şekil 8'a'da üst sol engeldeki Nusselt sayısının L/D oranı ve değiştirilmiş Richardson sayısına göre değişimi gösterilmektedir. Doğal taşınım etkilerinin az olduğu düşük Ri sayılarında ($Ri=50$); engeller arası mesafe arttıkça genel olarak ortalama Nusselt sayısının da arttığı, ancak $L/D=0,5-1,5$ aralığında belirgin bir artış olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumda, $Ri=50$ için engeller arası mesafe $L/D=0,25-1,5$ aralığında artırıldığında, ortalama Nu sayısının %46,9 oranında arttığı tespit edilmiştir. Doğal taşınım etkilerinin çok olduğu yüksek Ri sayılarında ($Ri=200$); engeller arası mesafe arttıkça $L/D=0,25-1,5$ aralığında artırıldığında, ortalama Nusselt sayısının %5 artığı belirlenmiştir. Bunu sebebinin; Grashof sayısının artışına bağlı olarak artan kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle, doğal taşınımın, zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin artması ve engel yüzeyinde ısıl direncin artmasına sebep olarak ısı transferini azaltmasıdır. Engeller arası mesafe (L/D oranı) sabit tutulup, doğal taşınım etkisi

arttırıldığında ($Ri=50-200$) ortalama Nu sayısının; $L/D=0,25$ için %99, $L/D=0,5$ için %42,3, $L/D=1,0$ için %50,6 ve $L/D=1,5$ için %42,4 oranında arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak; engeller arası mesafe arttıkça, doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin daha belirgin hale geldiği, ortalama Nu sayısındaki artışın azalarak devam ettiği ve $L/D=1,0-1,5$ aralığında artışın belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

Şekil 8b'da üst sağ engeldeki Nusselt sayısının; değiştirilmiş Richardson sayısı ve L/D oranına göre değişimi göstermektedir. Doğal taşınım etkilerinin az olduğu düşük Ri sayılarında ($Ri=50$); engeller arası mesafe arttıkça genel olarak ortalama Nusselt sayısının da arttığı, ancak $L/D=1,0-1,5$ aralığında belirgin bir artış olmadığı tespit edilmiştir. Bu durumda, $Ri=50$ için ortalama Nu sayısındaki artış; $L/D=0,25-0,5$ aralığında %15,7, $L/D=0,5-1,0$ aralığında %20,8 olduğu, $L/D=1,0-1,5$ aralığında ise belirgin bir artış olmadığı belirlenmiştir. Doğal taşınım etkilerinin çok olduğu yüksek Ri sayılarında ($Ri=200$); engeller arası mesafe arttıkça $L/D=0,25-1,0$ aralığında ortalama Nusselt sayısının da arttığı, ancak $L/D=1,0-1,5$ aralığında doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin artışına bağlı olarak ortalama Nu sayısının %3,9 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Engeller arası mesafe (L/D oranı) sabit tutulup, doğal taşınım etkisi artırıldığında ($Ri=50-200$) ortalama Nu sayısının; $L/D=0,25$ için %66,2, $L/D=0,5$ için %73,5, $L/D=1,0$ için %45,3 ve $L/D=1,5$ için %39,5 oranında arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak; engeller arası mesafe arttıkça, doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin daha belirgin hale geldiği ve ortalama Nu sayısındaki artışın azalarak devam ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 8. Nu sayısının Ri sayısı ve farklı L/D değerlerine göre değişimi; $Re=200$, $D=0,0285$ m, $BR=0,25$, (a) Üst sol engelde, (b) Üst sağ engelde, (c) Alt sağ engelde, (d) Alt sol engelde

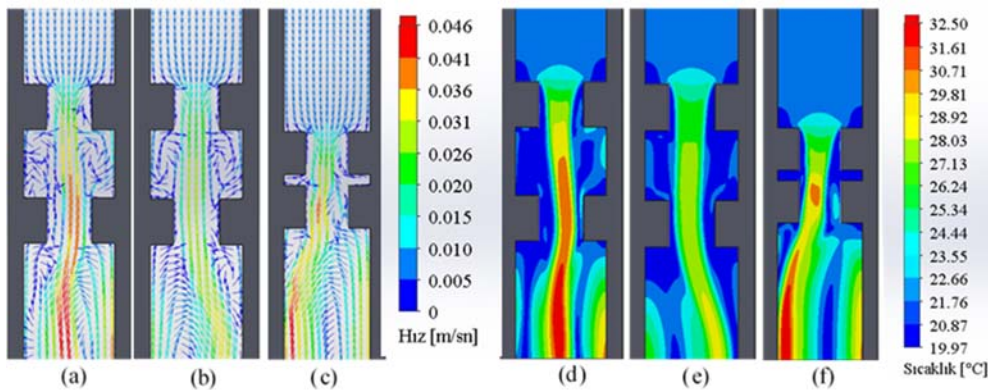
(Variation of Nu number with Ri number for different L/D : $Re=200$, $D=0,0285$ m, $BR=0,25$, (a) upper left obstacle, (b) upper right obstacle, (c) lower right obstacle, (d) lower left obstacle)

Şekil 8c ve Şekil 8d'de alt sol ve alt sağ engeller için değiştirilmiş Richardson sayının ve L/D oranının Nusselt sayısına olan etkileri incelenmiştir. Bu engellerde de, üst bölgede bulunan iki engelden farklı olarak, engellerin köşelerinde oluşan akış ayrılmalarının, engeller arasında oluşan mikro vortekslerin, akış karakteristiği ve ısı transferinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Yüzeğe yakın bölgelerde oluşan akış ayrılmalarının ve mikro vortekslerin, engeller arasındaki akışkan hızını azalttığı ve hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının azalmasına ve ısı sınır tabaka kalınlığının artmasına sebep olduğu, böylece artan ısı direncin ısı transferini azalttığı tespit edilmiştir. Böylece, yarı silindirik engellere göre dikdörtgen engellerde, bütün L/D oranlarında ve Ri sayılarında ortalama Nu sayısının değerinin düştüğü belirlenmiştir. Her iki alt engelde de, L/D oranının artması ile birlikte değiştirilmiş Ri sayısının artması, ortalama Nusselt sayısını arttırmıştır. Doğal taşınım etkilerinin az olduğu $Ri=50$ için; $L/D=0,25-1,5$ aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısındaki artış %9,7 değerinde oluşurken, doğal taşınım etkilerinin fazla olduğu $Ri=200$ için; $L/D=0,25-1,5$ aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısındaki artış %5,1 olarak meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun sebebinin, Gr sayısının artışına bağlı olarak artan kaldırma kuvvetleri etkisinin zorlanmış taşınımın etkisini azaltması ve azalan karışık taşınım etkisi ile ısı direncin artması ve ortalama Nu sayısının değerinin düşmesi olarak değerlendirilmiştir. Alt engeller için engeller arası mesafenin etkisi incelendiğinde, $Ri=50-200$ aralığında arttırıldığında ortalama Nu sayısındaki artış; $L/D=0,25$ için %94,8, $L/D=0,5$ için %41,6; $L/D=1,0$ için %49,2 ve $L/D=1,5$ için %86,6 olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebinin; engeller arası mesafe artıkça, belirli bir mesafeye kadar ($L/D=0,25-1,0$ aralığında) doğal taşınım etkisinin artmasının, engeller arasındaki akışkanın hızının azalmasına katkıda bulunduğundan karışık taşınım etkisinin (Nu sayısının değerini) belirgin şekilde azalmasına sebep olması olduğu ancak, $L/D=1,5$ değerinde ise; oluşan mikro vortekslerin etkisinin artmasına bağlı olarak doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisinin de azaldığı ve bunun Nu sayısındaki artışına sebep olduğu değerlendirilmiştir. Her iki şekilde de en yüksek ortalama Nusselt sayısı $Ri=200$ ve $L/D=1,5$ değerlerinde elde edilmiştir.

Şekil 9'da $Re=200$, $BR=0,25$ için değiştirilmiş Richardson sayısının ve L/D oranının hız vektörü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan doğal taşınım etkilerinin hız vektörleri üzerindeki etkisi Şekil 9a'da ve Şekil 9b'de, engeller arasındaki mesafenin değişiminin hız vektörleri üzerindeki etkisi Şekil 9a ve Şekil 9c'de sunulmuştur. Doğal taşınım etkisini artışına bağlı olarak değiştirilmiş Richardson sayısının artmasının ($Ri=50-200$) engeller arası vorteks oluşumunun

aratmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun; engeller arası bölgede akışkan hızının azalmasına ve hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının azalmasına sebep olduğu görülmüştür. Böylece, yer çekimi istikametindeki akışkan hareketinin, kanalın orta hattına doğru ötelenmekte olduğu belirlenmiştir. Kaldırma kuvvetleri etkisinin, alt engellerin yer çekimi yönündeki alt yüzeylerinde daha belirgin şekilde görülebildiği, artan akışkan hızının bu bölgede (oluşan vortekslerin büyüklüğüne bağlı olarak) hız sınır tabaka kalınlığı azalttığı tespit edilmiştir. L/D oranının artmasıyla ($L/D=0,25-1,5$); engeller arasındaki mesafenin artışına bağlı olarak akışkan hızının arttığı belirlenmiştir. Böylece, engeller arası mesafenin az olduğu çözümlerde, akışkan hızının oldukça azaldığı tespit edilmiştir. Bu engeller arası mesafenin az olduğu (L/D oranının küçük değerleri için) uygulamada; engeller arasındaki bölgede belirgin şekilde hızın azalmasına rağmen bu bölgede vorteks oluşumunun sınırlı olması sebebiyle alt engellerin bulunduğu bölgede hız azalmasına sebep olmadığı, doğal taşınımın akışkan hızını azaltıcı etkisinin sol alt engelde daha belirgin şekilde olduğu görülmüştür.

Şekil 9d-f'de $Re=200$, $BR=0,25$ için değiştirilmiş Richardson sayısının ve L/D oranının sıcaklık konturu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan doğal taşınım etkilerinin sıcaklık konturları üzerindeki etkisi Şekil 9d'de ve Şekil 9e'de, engeller arasındaki mesafenin değişiminin sıcaklık konturları üzerindeki etkisi Şekil 9d ve Şekil 9f'de sunulmuştur. Kare engellerde keskin kenarlardan itibaren akış ayrılması başladığından engellerin yüzeylerinde hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının azaldığı, ısı sınır tabakanın kalınlığının arttığı, böylece ısı direncin artışına bağlı olarak ısı transferinin azaldığı ve engellerin yüzey sıcaklıklarının yükseldiği tespit edilmiştir. Doğal taşınım etkileri arttığında ($Ri=50-200$) engeller arasında oluşan vortekslerin büyümesine bağlı olarak, zorlanmış taşınım akışının engellerden ötelenerek uzaklaştığı, bu durumun hidrodinamik sınır tabakanın azalmasına ve ısı sınır tabakanın artmasına sebep olduğu, böylece artan ısı direncin ısı transferini azalttığı ve yüzeylerde sıcaklığın artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Yüksek Ri sayılarında; doğal taşınımın zorlanmış taşınımı azaltıcı etkisi daha belirgin şekilde görüldüğünden yüzeylerde akış hızının azalmasına bağlı olarak, ısı sınır tabakanın arttığı ve yüzey sıcaklıklarının yükseldiği tespit edilmiştir. Engeller arasındaki mesafe azaltıldığında ($L/D=1,5-0,25$); akışkanın engellerin arasında yeterince girememesine bağlı olarak hızın oldukça azaldığı ve bu durumun ısı sınır tabakayı arttırdığı, böylece ısı direncin artarak, yüzey sıcaklıklarını arttırdığı tespit edilmiştir. $L/D=0,25$ durumunda; alt sağ engelin yer çekimi yönündeki yüzeyinde doğal taşınım etkisi



Şekil 9. Hız vektörlerinin ve sıcaklık konturlarının dağılımı, $Re=200$, $BR=0,25$ (a) $L/D=1,5$, $Ri=200$ için hız vektörleri, (b) $L/D=1,5$, $Ri=50$ için hız vektörleri, (c) $L/D=0,25$, $Ri=200$ için hız vektörleri, (d) $L/D=1,5$, $Ri=200$ için sıcaklık konturları, (e) $L/D=1,5$, $Ri=50$ için sıcaklık konturları, (f) $L/D=0,25$, $Ri=200$ için sıcaklık konturları

(Velocity vector and temperature contour distributions, $Re=200$, $BR=0,25$ (a) Velocity vectors for $L/D=1,5$, $Ri=200$, (b) Velocity vectors for $L/D=1,5$, $Ri=50$, (c) Velocity vectors for $L/D=0,25$, $Ri=200$, (d) Temperature contours for $L/D=1,5$, $Ri=200$, (e) Temperature contours for $L/D=1,5$, $Ri=50$, (f) Temperature contours for $L/D=0,25$, $Ri=200$)

ile oluşan vortekslerin büyümesine bağlı olarak daha iyi bir soğuma sağladığı (diğer alt engele göre) ve yüzey sıcaklığının bu bölgede belirgin bir şekilde azaltılabildiği tespit edilmiştir. Bu oluşana vorteksin etkisi diğer engel yüzeyindeki akışkanın hızının azalmasına sebep olduğundan, diğer alt engelde yüzey sıcaklığının artmasına sebep olduğu belirlenmiştir. $L/D=1,5$ durumunda ise; alt sol engelin yerçekimi yönündeki yüzeyinde oluşan vortekslerin daha belirgin şekilde oluştuğu (diğer alt engele göre), buna bağlı olarak bu bölgede daha iyi bir soğutma sağladığı ve yüzey sıcaklığını azaltılabildiği tespit edilmiştir. Dolayısı ile kaldırma kuvvetleri etkisi ile oluşan doğal taşınım etkilerinin; üst engellerde bölgesinde akışkan hızını azaltmasına bağlı olarak ısı transferini azalttığı ve alt engeller bölgesinde vorteks oluşumunu arttırdığından ısı transferini arttırdığı belirlenmiştir.

3.4. Dikdörtgen ve yarı silindirik engellerin karışık konveksiyona olan etkilerinin incelenmesi ve sonuçların karşılaştırılması (Investigation of the effects of rectangular and semi-cylindrical obstacles on mixed convection and comparison of the results)

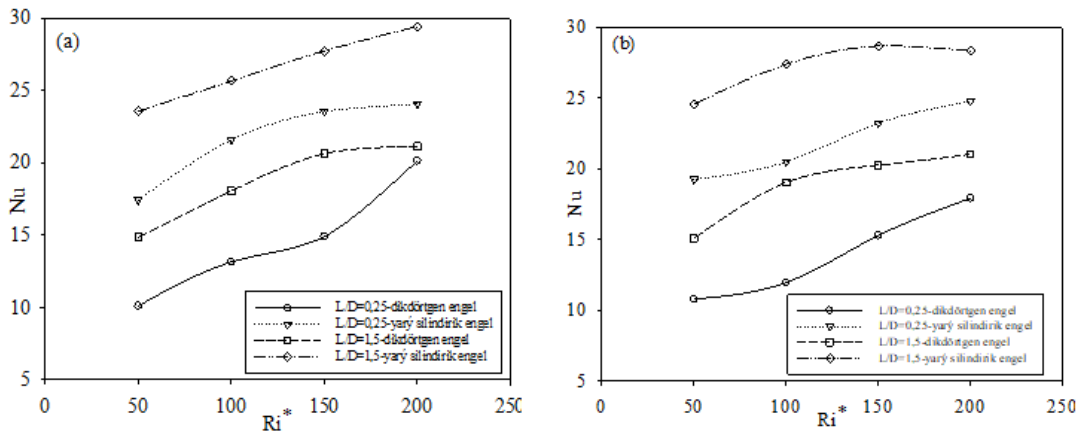
Bu bölümde; engel geometrisinin, akış dinamiklerine ve ısı transferine olan etkisini incelemek amacıyla, dik bir kanalda ısı akısına sahip alt alta ve karşılıklı olarak yerleştirilen yarı silindirik ve dört dikdörtgen engellerden karışık konveksiyonla oluşan ısı transferi incelenmiştir. Karşılaştırma yapılan kanalların geometrisi Şekil 1c ve Şekil 1d'de gösterilmiştir. Sayısal çalışmada akış laminar ve akışkan olarak kullanılan suyun özellikleri $Pr=7$ olarak incelenmiştir. Sayısal çalışmalar $Re=200$ için, iki boyutlu olarak yapılmış ve x-y koordinatlarında analiz edilmiştir. Kanalın uzunluğu H ve genişliği W olarak alınmıştır. Kanaldaki engellerin birbirine olan uzaklığı L olarak alınmıştır. Kanaldaki engellerin uzunluğu D olarak alınmıştır. Kanala giren suyun sıcaklığı (T_0) ve hızı (u_0) sabittir. Su kanalın girişinden belli bir u_0 hızıyla girmekte olup yerçekiminin etkisiyle hareket etmektedir. Çalışmada değiştirilmiş Richardson sayısı ve L/D oranlarında farklı parametreler için analizleri yapılmış ve bu parametrelerin değişiminin, akıştaki ısı transferine ve akış dinamiklerine etkisi incelenmiştir.

Sol üst ve sağ üstte bulunan dikdörtgen ve yarı silindirik engeldeki, L/D oranlarının ve değiştirilmiş Ri sayısının Nusselt sayısına olan etkisi Şekil 10'da sunulmuştur. Her iki engel geometrisinde de L/D oranının ve değiştirilmiş Ri sayısının artırılmasının Nusselt sayısına olan etkisinin benzer olduğu ve ısı transferini arttırdığı tespit

edilmiştir. Yarı silindirik engeldeki Nusselt değerlerinin dikdörtgen engeldeki Nusselt değerlerine kıyasla daha büyük olduğu belirlenmiştir. Yarı silindirik engeldeki Nusselt değerlerinin dikdörtgen engeldeki Nusselt değerlerinden farkının; engeller arası mesafenin az olduğu ($L/D=0,25$) değer için; düşük Ri sayılarında ($Ri=50$) %72,5 iken yüksek Ri sayılarında ($Ri=200$) %19,6 olduğu tespit edilmiştir. Bu fark; engeller arası mesafenin çok olduğu ($L/D=1,5$) değer için; düşük Ri sayılarında ($Ri=50$) %58,6 iken yüksek Ri sayılarında ($Ri=200$) %39,1 olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin; yarı silindirik engelin eğimli yüzeyinin, engellerin arasına akışın daha fazla girmesine ve akışkan hızının engeller arasında daha az azalmasına sebep olması olarak belirlenmiştir. Ayrıca yarı silindirik engellerde kaldırma kuvvetlerinin etkisiyle oluşan vorteksler yüzeyle daha fazla temas etmekte ve sınır tabakayı daha fazla değiştirmektedir. Dikdörtgen engel bulunan kanaldaki akışta ise; keskin kenarlı, dik yüzeylerden dolayı akışın yüzeyden ayrılması daha erken oluşmakta, basınç düşümü ve akışkan hızındaki azalmanın, yarı silindirik engel bulunan kanala göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 11a ve Şekil 11b'de $Re=200$ sayısında $BR=0,25$ ve $L/D=1,5$ oranında, dikdörtgen ve yarı silindirik engel bulunan kanaldaki hız vektörlerinin dağılımı sunulmuştur. Akışkan temas yüzeyinde oluşan akış ayrılmasının, keskin kenarlı olması sebebiyle dikdörtgen engelde yarı silindirik engele göre daha erken başladığı, bu durumunun yüzeyde hidrodinamik sınır tabaka kalınlığının azalmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Vorteks oluşumlarının da silindirik yüzeylerde dikdörtgen yüzeylere oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Yarı silindirik engelin konveks yüzeylerinden akışkanın temasını, dikdörtgen engelin dik yüzeyine oranla daha fazla olduğu ve bu durumun da ısı transferini arttırdığı belirlenmiştir. Doğal taşınım etkisinden kaynaklanan vorteks oluşumunun yarı silindirik engelde (eğimli yüzeylere bağlı olarak) daha belirgin şekilde oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 11b'de dikdörtgen engeller arasındaki bölgede (özellikler keskin kenarlı köşe noktalarında) akışkan hızının daha belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Dikdörtgen engel bulunan kanalda dik yüzeylerden dolayı engel geçişlerinde basınç düşüşlerinin ve akışkanın hızlarının yarı silindirik engele oranla daha fazla olduğu görülmüştür.

Şekil 11c ve Şekil 11d'de $Re=200$ sayısında $BR=0,25$ ve $L/D=1,5$ oranında, dikdörtgen ve yarı silindirik engel bulunan kanaldaki sıcaklık konturunun dağılımı sunulmuştur. Üst engellerin



Şekil 10. Dikdörtgen ve yarı silindirik engelin Nu sayısının Ri sayısı ve farklı L/D değerlerine göre değişimi: $Re=200$, $D=0,0285m$, $BR=0,25$, (a) Sol üst engelde, (b) Sağ üst engelde

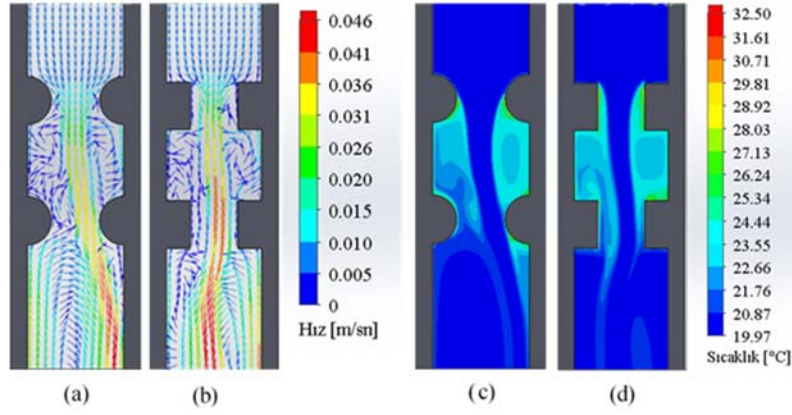
(Variation of Nu number at the rectangular and semi-cylindrical obstacle with Ri number for different L/D : $Re=200$, $D=0.0285$ m, $BR=0.25$, (a) upper left obstacle, (b) upper right obstacle)

yüzeylerinde, dikdörtgen engelde yarı silindirik engelle göre akış ayılmasının daha önce başlaması ve yüzey boyunca ısıl sınır tabakanın artışına bağlı olarak ısıl direncin artması sebebiyle sıcaklık artışının daha fazla olduğu görülmüştür. Engeller arasındaki bölgede; dikdörtgen engelde yarı silindirik engelle göre akışkan hızı daha fazla azaldığından, ısınan akışkanın yüzeyden uzaklaştırılmadığı ve bu durumun ısıl direnci ve yüzey sıcaklıklarını artırdığı tespit edilmiştir. Alt engeller bölgesinde; kaldırma kuvvetlerinin etkisi ile yer çekiminin zıt yönünde oluşan vortekslerin yarı silindirik engelde daha belirgin şekilde oluşması sebebiyle dikdörtgen engelle göre yüzeydeki sıcak akışkanı yüzeyden daha iyi uzaklaştırabildiği ve daha iyi ısı transferi sağlayabildiği tespit edilmiştir.

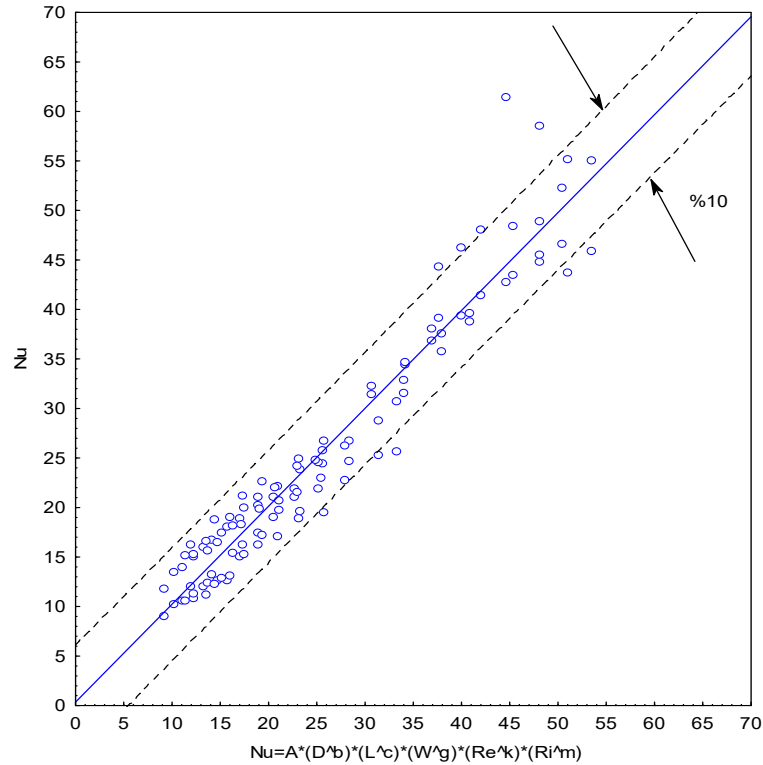
3.5 Alt alta ve karşılıklı konumlandırılmış yarı silindirik engeller bulunan dik bir kanaldaki sayısal çalışmalar için korelasyon denkleminin oluşturulması

(Correlation obtained from the numerical study for semi-cylindrical obstacles in a vertical channel below and opposite of each other)

Parametrik çalışmanın tamamlanmasıyla birlikte incelenen parametreleri kapsayan bir korelasyon oluşturulmuştur. Eş. 10'da korelasyon denklemi sunulmuştur. Şekil 12'de korelasyon denklemi ile yarı silindirik engel bulunan kanallar için yapılan sayısal analiz sonucunun karşılaştırılması sunulmuştur. Şekil 12'deki grafikte X eksenini korelasyon denklemi ile elde edilen Nu değerlerini ve Y eksenini ise, sayısal analiz sonucunda elde edilen Nu değerlerini



Şekil 11. Hız vektörlerinin ve sıcaklık konturlarının dağılımı, $Re=200$, $Ri=200$, $BR=0,25$, $L/D=1,5$ (a) yarı silindirik engel (b) dikdörtgen engel (Velocity vector and temperature contour distribution, $Re=200$, $Ri=200$, $BR=0,25$, $L/D=1,5$, (a) velocity vectors for semi-cylindrical obstacle, (b) velocity vectors for rectangular obstacle, (c) temperature contours for semi-cylindrical obstacle, (d) temperature contours for rectangular obstacle)



Şekil 12. Yarı silindirik engel bulunan kanallar için korelasyon denklemi ile sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of correlation equation and numerical analysis results for channels with semi-cylindrical obstruction)

göstermektedir. Korelasyon sonuçları ile simülasyon sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu ve $\pm\%10$ aralığında birbirini sağladığı görülmüştür.

$$Nu = A \left(D^{0,837542} \right) \left(L^{0,701978} \right) \left(W^{0,148061} \right) \left(Re^{-0,049686} \right) \left(Ri^{0,962036} \right)$$

$$A = 0,837542 / m^{1,687581}; 0,015m \leq D \leq 0,05m; \quad (10)$$

$$0,007125m \leq L \leq 0,05m; 0,05 \leq W \leq 0,01425m;$$

$$50 \leq Ri \leq 200; Re = 200$$

4. Semboller (Symbols)

BR	: Engel çapının kanal genişliğine oranı [D/W]
C_p	: Özgül Isı [J/kgK]
D	: Silindirik engelin hidrolik çapı [m]
D/W	: Engel çapının kanal genişliğine oranı
g	: Yer çekimi ivmesi [m/s^2]
Gr	: Grashof Sayısı [$Gr = g\beta(T_s - T_{bulk})L_c^3/\nu^2$]
H	: Kanal uzunluğu [m]
k	: Isı iletim katsayısı [W/mK]
L	: Engellerin birbirine olan uzaklıkları [m]
L/D	: Engellerin birbirine uzaklığının kanal çapına oranı [L/D]
Nu	: Nusselt Sayısı [$Nu = Q \cdot D_h / \Delta T \cdot k$]
P	: Basınç [Pa]
Pr	: Prandtl Sayısı [$Pr = \mu \cdot C_p / k$]
q	: Isı akısı [W/m^2]
$Q_{ışınım}$: Işınım ile olan ısı transferi
Re	: Reynolds Sayısı [$Re = V \cdot \rho \cdot D_h / \mu$]
Ri	: Richardson Sayısı [$Ri = Gr / Re^2$]
T	: Sıcaklık [$^{\circ}C$]
T_o	: Kanal girişindeki su sıcaklığı [$^{\circ}C$]
T_w	: Yarı silindirik engelin ortalama sıcaklığı [$^{\circ}C$]
u, v	: Hız bileşenleri [m/s]
u_o	: Akışkan hızı [m/s]
W	: Kanal genişliği [m]

4.1. Yunan Harfleri (Greek symbols)

α	: Isıl yayılım katsayısı [m^2/s]
ρ	: Yoğunluk [kg/m^3]
μ	: Dinamik Viskozite [Pa.s]
v	: Kinematik Viskozite [m^2/s]

4.2. Kısaltmalar (Abbreviations)

HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
-----	-----------------------------------

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada; dik ve içinde ısı akısına sahip farklı konum ve geometriye sahip engeller bulunan bir kanaldaki karışık konveksiyonun ısı transferine ve akış özelliklerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada; alt alta ve karşılıklı bulunan yarı silindirik ve dikdörtgen engellerdeki karışık taşınımın ısı transferi ve akış özelliklerine olan etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada incelenen parametreler; alt alta bulunan iki yarı silindirik engeldeki karışık konveksiyonun incelenmesi, alt alta ve karşılıklı bulunan dört yarı silindirik engeldeki karışık konveksiyonun incelenmesi, alt alta ve karşılıklı bulunan dört dikdörtgen engeldeki karışık konveksiyonun incelenmesi, dikdörtgen ve yarı silindirik engellerin karışık konveksiyona olan etkilerinin incelenmesi ve sonuçların karşılaştırılmasıdır. Sonuç olarak;

- Alt alta bulunan iki yarı silindirik engeldeki karışık konveksiyon incelendiğinde Nusselt sayısının, engellerin birbirine olan

uzaklıklarının (L/D oranı) ve doğal taşınım etkilerinin (Ri sayısı) artmasıyla genel olarak arttığı görülmüştür. Ancak, belirli bir Ri değerinden sonra Nu sayısındaki artış azalarak devam etmektedir.

- Alt alta ve karşılıklı bulunan dört yarı silindirik engeldeki karışık konveksiyonun incelenmesi durumunda; Ri sayısı sabit tutulması durumunda, L/D oranının artırılması ile birlikte genel olarak Nusselt sayısının arttığı görülmüştür.
- Alt alta ve karşılıklı bulunan dört dikdörtgen engel olması durumunda düşük Ri sayılarında engeller arası mesafe arttıkça genel olarak ortalama Nusselt sayısının da arttığı, ancak L/D=1,0-1,5 aralığında belirgin bir artış olmadığı tespit edilmiştir.
- Ri sayılarının artması durumunda engeller arası mesafe arttıkça ortalama Nusselt sayısının da arttığı, ancak belirli bir mesafe azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek Nu sayısının L/D= 1,5 ve Ri=200 olduğu durumda meydana geldiği belirlenmiştir.
- Dikdörtgen ve yarı silindirik engeller incelendiğinde engel geometrisinde de L/D oranının ve Ri sayısının artırılmasının Nusselt sayısına olan etkisinin benzer olduğu ve ısı transferini arttırdığı tespit edilmiştir.
- Yarı silindirik engeldeki Nusselt değerlerinin dikdörtgen engeldeki Nusselt değerlerine kıyasla daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Her iki engel geometrisinde de en yüksek Nu sayısının L/D= 1,5 ve Ri=200 olduğu durumda elde edildiği görülmüştür.
- Bu alanda yapılacak karışık konveksiyonun incelendiği gelecek çalışmalarda; Reynolds sayıları ve değiştirilmiş Ri sayısının aralıkları artırılarak çözümler yapılmasının, yeni tip akışkanların ısı transferine ve akış özelliklerine etkisinin (nanoakışkanlar vb.) incelenmesinin, farklı kanal ve engel geometrisinin ısı transferine ve akış özelliklerine etkisinin, farklı parametreler için incelenmesinin faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Kaynaklar (References)

1. Adachi T., Uehara H., Correlation between heat transfer and pressure drop in channels with periodically grooved parts, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (22), 4333-4343, 2001.
2. Auletta A., Manca O., Morrone B., Naso V., Heat transfer enhancement by the chimney effect in a vertical isoflux channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (22), 4345-4357, 2001.
3. Barletta A., Zanchini E., On the choice of the reference temperature for fully developed mixed convection in a vertical channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 42 (16), 3169-3181, 1999.
4. Boutina L., Bessaih R., Numerical simulation of mixed convection air-cooling of electronic components mounted in an inclined channel, Applied Thermal Engineering, 31 (11-12), 2052-2062, 2011.
5. Forooghi P., Hooman K., Effect of buoyancy on turbulent convection heat transfer in corrugated channels a numerical study, International Journal of Heat and Mass Transfer, 64, 850-862, 2013.
6. Hamouche A., Bessaih R., Mixed convection air cooling of protruding heat sources mounted in a horizontal channel, International Communications in Heat and Mass Transfer, 36 (8), 841-849, 2009.
7. Jang J.H., Yan W.M., Mixed convection heat and mass transfer along a vertical wavy surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47 (3), 419-428, 2004.
8. Mills Z.G., Warey A., Alexeev A., Heat transfer enhancement and thermal-hydraulic performance in laminar flows through asymmetric wavy walled channels, International Journal of Heat and Mass Transfer, 97, 450-460, 2016.
9. Zhang W., Wei Y., Yu P., Zhu Z., Numerical investigation on buoyancy-driven flow over a circular cylinder in a channel with nonparallel walls, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 82 (6), 299-316, 2022.
10. Lee J.S., Ha M.Y., Min J.K., Numerical study on the mixed convection around inclined-pin fins on a heated plate in vertical channels with various bypass ratios, Case Studies in Thermal Engineering, 27, 101310, 2021.
11. Wetzel T., Wagner C., Buoyancy-induced effects on large-scale motions in differentially heated vertical channel flows studied in direct numerical simulations, International Journal of Heat and Fluid Flow, 75, 14-26, 2019.

12. You X., Li S., Fully Developed Opposing Mixed Convection Flow in the Inclined Channel Filled with a Hybrid Nanofluid, *Nanomaterials*, 11, 1107, 2021.
13. Al-Obaidi A.A., Salman A.J., Yousif A.R., Al-Mamoori D.H., Mussa M.H., Gaaz T.S., Kadhum A.A. H., Takriff M.S., Al-Amiery A.A., Characterization the effects of nanofluids and heating on flow in a baffled vertical channel, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 14, 11, 2019.
14. Moukalled F., Doughan A., Acharya S., Parametric study of mixed convection in channels with concave and convex surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, 1947-1963, 2000.
15. Rao G., Narasimham G., Laminar conjugate mixed convection in a vertical channel with heat generating components, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 3561–3574, 2007.
16. Tanda G., Heat transfer in rectangular channels with transverse and v-shaped broken ribs, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (2), 229–243, 2004.
17. Kilic M., Baskaya Ş., Improvement of heat transfer from high heat flux surfaces by using vortex promoters with different geometries and impinging jets, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (3), 693-707, 2017.
18. Çalışır T., Çalışkan S., Kilic M., Başkaya S., Numerical investigation of flow field on ribbed surfaces using impinging jets, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (1), 119-130, 2017.
19. Wahba E., Mixed convection flows in a vertical plane duct preceded by a sudden expansion, *International Journal Numeric Method Heat Fluid Flow*, 21, 399–417, 2011.
20. Rosas I.Y., Treviño C., Suástegui L., Experimental study of mixed convection heat transfer in a vertical channel with a one-sided semi cylindrical constriction with prescribed heat flux, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 67, 155-167, 2017.
21. Kilic M., Calisir T., Baskaya Ş., Experimental and numerical investigation of vortex promoter effects on heat transfer from heated electronic components in a rectangular channel with an impinging jet, *Heat Transfer Research*, 48 (5), 435-463, 2017.
22. Öztürk M.S., Demircan T., Numerical analysis of the effects of fin angle on flow and heat transfer characteristics for cooling an electronic component with impinging jet and cross-flow combination, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (1), 57-74, 2022.
23. Sözbir M., Uysal Ü., Experimental investigation of heat transfer of multi-row impingement jets in two-pass rectangular channel, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37 (2), 671-684, 2022.
24. Young T., Vafai K., Experimental and numerical investigation of forced convective characteristics of arrays of channel mounted obstacles, *ASME Journal Heat Transfer*, 121, 34–42, 1999.
25. Kilic M., A numerical analysis of transpiration cooling as an air cooling mechanism, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 54 (12), 3647–3662, 2018.
26. Kilic M., Numerical investigation of heat transfer from a porous plate with transpiration cooling, *Journal of Thermal Engineering*, 4 (1), 1632-1647, 2018.
27. Young T., Vafai K., Convective cooling of a heated obstacle in a channel, *International Journal Heat and Mass Transfer*, 41 (20), 3131–3148, 1998.
28. Umar E., Tandian N. P., Syuryavin, A. C., Ramadhan, A. I., Prayitno, J. H., CFD Analysis of Convective Heat Transfer in a Vertical Square Sub-Channel for Laminar Flow Regime, *Fluids*, 7, 207, 2022.
29. Jha B.K., Sani H.N., Role of thermophoresis on unsteady/steady mixed convective flow in a vertical channel having convective boundary conditions, *SN Applied Sciences*, 4, 131, 2022.
30. Simcenter FLOEFD, Technical Reference Software Version 2020, 2020.