




Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Kaldırma Kuvveti ve Yüzey Işınımının Eğik Bir Plakanın Çarpan Jet ile Soğutulmasına Etkilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

 Buğra SARPER^{a,*}

^a Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Tarsus Üniversitesi, Mersin, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: bugrasarper@tarsus.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1280558

Öz

Bu çalışmada, eğik bir plakanın tek bir slot jet ile soğutulmasında kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınımın taşınım ısı transferine etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma jet Reynolds sayısının (Re_j) 100 ile 1000 değerleri arasında gerçekleştirilmiş olup Richardson sayısı (Ri) ise 0.1 ile 10 arasında değişmektedir. Yüzeyler arası ışınım ısı transferinin genel ısı transfer performansına etkileri hedef plaka ve sınırlandırıcı yüzeylerin üç farklı yayıcılık ($\epsilon=0.05-0.5-0.95$) değeri ve üç farklı eğim açısı ($\alpha=0^\circ-5^\circ-10^\circ$) için analiz edilmiştir. Boyutsuz hedef plaka-nozul çapı mesafesi (H/D_j) 4'e eşit olup havanın ($Pr=0.71$) ışınım açısından katılımcı olmadığı kabulüyle hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek Richardson sayılarında kaldırma kuvvetinin akış ve ısı transfer karakteristiklerinin üzerindeki etkisinin ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu, yüzey yayıcılığının artışının ise genel ısı transfer performansını iyileştirdiği ve plaka eğiminin ısı transferini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çarpan jet, Taşınım, Işınım, Yüzey yayıcılığı, Kaldırma kuvveti, Eğim

Numerical Investigation of the Effects of Buoyancy and Inter-Surface Radiation on Jet Impingement Cooling of an Inclined Plate

ABSTRACT

In this study, effects of buoyancy and inter-surface radiation on convective heat transfer from an inclined plate cooled by a slot jet are numerically investigated. The study is carried out between the values of jet Reynolds number (Re_j) 100 and 1000, and the Richardson number (Ri) varies between 0.1 and 10. Impact of inter-surface radiation on the overall heat transfer performance is analyzed for three emissivity ($\epsilon=0.05-0.5-0.95$) values of the target plate and confined surfaces and three different inclination angles ($\alpha=0^\circ-5^\circ-10^\circ$) of the target plate. The dimensionless nozzle-to-target plate spacing (H/D_j) equals to 4, and computations are performed assuming that air ($Pr=0.71$) is not participating for radiation. As a result of the study, it is determined that effect of buoyancy on the flow and heat transfer characteristics at high Richardson numbers cannot be neglected, while the increase in surface emissivity improves the overall heat transfer performance and inclination of the target plate significantly affects the heat transfer.

Keywords: Jet impingement, Convection, Radiation, Surface emissivity, Buoyancy, Inclination

I. GİRİŞ

İmalat süreçleri içerisinde malzemelerin soğutulması ve ısı işleme tabi tutulması [1], elektronik bileşenlerin soğutulması, optik yüzeylerde oluşan buğunun çözülmesi amacıyla yüzeylerin ısıtılması, türbin bileşenlerinin soğutulması, kritik makine elemanlarının soğutulması gibi birçok endüstriyel proseste çarpan jetler yoğun şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kurutma ve küçük partiküllerin yüzeyden temizlenmesi gibi kütle transferi uygulamaları da çarpan jetlerin kullanıldığı alanlardır [2]. Faz değişimi bulunmayan diğer ısı transferi metotları ile karşılaştırıldığında çarpan jetler daha yüksek ısı transferi vadetmektedir. Örneğin, çapraz akışın kullanıldığı konvansiyonel taşınım ile karşılaştırıldığında jet akışında ısı sınır tabakanın çapraz akışa oranla daha ince olması ve akışın daha erken türbülansa geçmesi ısı transfer katsayısında üç kata kadar artışı beraberinde getirir [2]. Dolayısıyla, yüksek ısı transfer hızlarının elde edilebilmesi ve akış karakteristiklerinin karmaşık doğası çarpan jetleri ilgi çekici bir araştırma alanı kılmaktadır [3].

Literatürde çarpan jetler ile akış ve ısı transfer karakteristiklerini araştıran çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Gardon ve Akfırat [4], Reynolds sayısının 450 ile 22000 aralığında farklı jet-plaka açıklıkları için hız, türbülans ve ısı transfer karakteristiklerini araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirdiler. Cadek [5] düz bir hedef plakanın çarpan jet ile soğutulmasında yerel ve ortalama ısı transfer karakteristiklerini deneysel ve teorik olarak inceledi. Araştırmacı, Reynolds sayısının 4500 ile 100000 değerleri arasında hız, basınç ve ısı transfer ölçümleri gerçekleştirmiştir. Miyazaki ve Silberman [6] laminer çarpan jet ile akış ve ısı transferini teorik olarak ele aldılar. Araştırmacılar ilk olarak potansiyel akım teorisi ile hız alanını incelediler, sonrasında ise sonlu fark yöntemi ile hedef plaka üzerinde sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısı değişimini belirlediler. Sparrow ve Wong [7] farklı hedef plaka-jet mesafelerinde laminer jet için durma noktasındaki ısı transferini ve hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimini deneysel olarak incelediler. Heiningen [8] düz bir levhanın slot jet ile soğutulmasını geniş bir Reynolds sayısı aralığında deneysel ve sayısal olarak araştırdı. Garg ve Jayaraj [9] jet çarpma açısının yerel ısı transferi ve sürtünme katsayısı değişimine etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Yuan vd. [10] laminer çarpan jet ile ısı transferine jet mesafesi, Reynolds sayısı, Grashof sayısı ve Richardson sayısının etkilerini sayısal olarak ele aldılar. Çalışmada, belirtilen parametrelerin yüzey sürtünme katsayısı, sıcaklık değişimi ve ısı taşınım katsayısının değişimine olan etkileri değerlendirilmiş olup durma bölgesinden uzaklaştıkça kaldırma kuvvetinin etkisinin arttığını belirlemişlerdir. Lytle ve Webb [11] düz bir yüzeyin çarpan jet ile soğutulmasını Reynolds sayısının 3600 ve 27600 değerleri arasında incelemişlerdir. Çalışmada yerel ısı transferi ve yüzey sürtünme katsayısı değişimi üzerinde durulmuş olup düşük jet-levha açıklıklarında türbülans şiddetinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Lin vd. [12] laminer-geçiş rejimi ve türbülanslı rejimde çarpan jet ile ısı transferini deneysel olarak ele almışlardır. Çalışmada iki farklı deney koşulu çalışılmıştır: (i) yüksek güç yoğunluklu elektronik çiplerin soğutulması, (ii) sabit yüzey ısı akısına sahip düz bir yüzeyin soğutulması. Araştırmacılar jet karakteristiklerinin ortam havasından büyük ölçüde etkilendiğini, Reynolds sayısının 1226'dan küçük değerlerinde türbülans şiddetinin %5'ten küçük olduğunu ve türbülans başlangıcının $Re \geq 1226$ 'da gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Yang vd. [13] farklı nozul tipleri ve nozul-hedef plaka mesafeleri için Reynolds sayısının 5920 ve 25500 değerleri arasında, çarpan jet ile soğutulan bir yüzeyin ısı transfer karakteristiklerini incelemişler ve nozul tipinin ısı transferi üzerinde önemli etkisinin bulunduğunu, konkav yüzeyden olan ısı transferinin ise düz yüzeye oranla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Cornaro vd. [14] bağıl eğriliğin (0.18-0.38) yarı silindirik içbükey bir yüzeyin ısı transfer davranışına etkilerini deneysel olarak sıvı kristal yöntemi ile incelemişlerdir. Chiriac ve Ortega [15] sabit sıcaklıktaki düz bir yüzeyin çarpan jet ile soğutulmasını Reynolds sayısının 250 ile 750 değerleri arasında sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar jet Reynolds sayısının 250 ile 500 değerleri arasında akışın sürekli rejimde olduğunu, jet Reynolds sayısının 585 ve 610 aralığında ise akışın zamana bağlı karakteristik sergilemeye başladığını belirlemişlerdir. Sahoo ve Sharif [16] farklı jet-levha mesafeleri (4-10), Richardson sayıları (0-10) ve Reynolds sayıları (100-500) için düz bir yüzeyden çarpan jet ile ısı transferini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Çalışma kapsamında iki farklı konfigürasyon üzerinde durulmuş olup ilkinde jet nozulu aşağı yönlü iken ikincisinde nozul yukarı bakmaktadır. Araştırmacılar, çalışma sonucunda belirtilen Richardson sayısı aralığında kaldırma kuvvetinin akış karakteristiklerine etki etmediğini ve nozul konfigürasyonunun da akış ve ısı transferi

üzerinde etki göstermediğini belirlemişlerdir. Angioletti vd. [17] çarpan jet ile ısı transferini Reynolds sayısının 1000 ile 4000 aralığında deneysel olarak incelemişler ve verilerini farklı türbülans modelleri kullanılarak sayısal olarak hesaplanan sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Hu ve Zhang [18] Reynolds sayısının 1947 ile 19478 aralığında su jeti ile soğutulan düz ve yarı silindirik yüzeylerden ısı transferini farklı jet-levha mesafeleri için incelemişler ve dışbükey yüzeyin ısı transfer performansının düz yüzeye oranla daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Lemos ve Fischer [19] düz bir yüzey üzerinde konumlandırılan gözenekli malzemenin kalınlık, ısıl iletkenlik ve gözeneklilik gibi karakteristik özelliklerinin akış ve ısı transferine etkilerini sayısal olarak analiz etmişlerdir. Abishek ve Narayanaswamy [20] yüzeyler arası ışınlım ve kaldırma kuvvetinin düz bir yüzeyin slot jet ile soğutulmasına etkilerini sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışmada Reynolds ve Richardson sayıları, yüzeylerin yayıcılıkları, kanal yüksekliği ve ışınlım etkileşim parametresinin etkileri üzerinde durulmuş ve ışınlım etkileşim parametresinin artışıyla birlikte ışınlımın toplam ısı transfer hızı içerisindeki payının arttığı belirlenmiştir. Cavadas vd. [21] sınırlandırıcı yüzeyi 12° 'lik eğime sahip akış bölgesinde tam gelişmiş sıvı jetinin akış karakteristiklerini laminer rejimde ($Re=275$) deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Öztekin vd. [22,23] konkav yüzeylerin slot jet ile soğutulmasında Reynolds sayısı, hedef plakanın boyutsuz bağıl eğriliği ve boyutsuz jet mesafesinin hidrodinamik ve ısıl etkilerini deneysel ve sayısal olarak analiz etmişlerdir. Yousefi-Lafouraki vd. [24] daralan bir kanalda sınırlandırılmış çarpan jet ile ısı transferini laminer rejimde farklı daralma açıları ($0^\circ-5^\circ$) için sayısal olarak incelemişler ve artan daralma açısının ortalama Nusselt sayısı ve yüzey sürtünme katsayısını artırdığını belirlemişlerdir. Sharif [25] bir çift eğimli jet ile soğutulan bir yüzeyden taşınım ile ısı transferini sayısal olarak incelemiş ve jet açısının ısı transfer karakteristikleri üzerindeki etkisinin yadsınamaz olduğunu belirlemiştir. Ying vd. [26] hedef plakanın eğriliğinin yerel ve ortalama ısı transfer karakteristiklerine etkilerini Reynolds sayısının 27000 ile 130000 aralığında incelemişlerdir. Ekiciler vd. [27] düz ve üçgen forma sahip dalgalı bir plakaların nanoakışkan (Al_2O_3) jeti ile soğutulmasında nanoparçacık şekli ve nanoparçacık hacim oranının ısı transferine etkilerini Reynolds sayısının 100 ile 500 değerleri arasında sayısal olarak incelediler. Pulat ve Beyazoğlu [28] Reynolds sayısının 10200 değerinde sınırlandırıcı plakanın farklı eğim açıları ($-2^\circ, 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ$ and 8°) slot jet ile ısı transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Araştırmacılar plaka eğiminin 8° 'ye artışıyla birlikte ısı transferinde %18'e varan bir iyileşme ortaya çıktığını belirlemişlerdir. Han vd. [29] jet mesafesi ve yüzey geometrisinin (düz, içbükey ve dışbükey) çarpan jet ile soğutmaya etkilerini Reynolds sayısının 120 ile 600 aralığında deneysel olarak incelemişlerdir. Albayrak vd. [30] içbükey yarı silindirik bir yüzeyin slot jet ile soğutulmasında yüzeyler arası ışınlımın etkilerini farklı yayıcılık değerleri ($\epsilon=0.05, 0.45, \text{ and } 0.90$) için Reynolds sayısının 1185, 2370, 3555 ve 4740 değerlerinde sayısal olarak analiz etmişlerdir. Araştırmacılar, çalışma sonucunda Reynolds sayısının artışının yüzeyler arası ışınlımı zayıflattığını belirlemişlerdir. Singh vd. [31] spiral jet nozulu ile soğutulan bir levhadan taşınım ile ısı transferini farklı jet-plaka mesafeleri, jet Reynolds sayıları ve jet açıları için deneysel olarak incelemişlerdir.

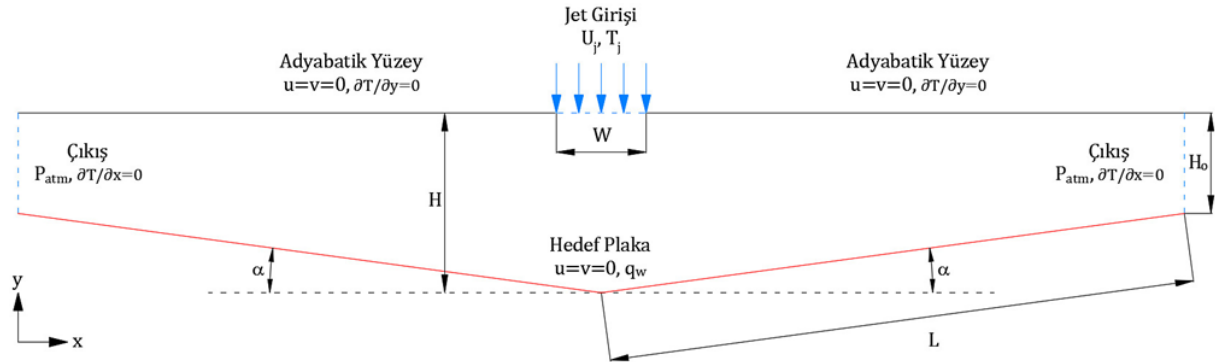
Literatür özetinden görüldüğü gibi, çarpan jetler üzerine yürütülen çalışmaların çoğunluğu düz, içbükey ya da dışbükey yüzeylerin ısı transfer davranışlarının türbülanslı rejimde farklı Reynolds sayıları ve farklı jet-plaka mesafeleri için incelenmesine yöneliktir. Bununla birlikte, az sayıda çalışma düşük Reynolds sayılarında-laminer rejimde kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınlımın akış ve ısı transfer karakteristiklerine etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmanın amacı ise, eğim açısı değişen bir hedef plakanın tek bir slot jet ile soğutulmasında kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınlım ile ısı transferinin genel soğutma performansına olan etkilerini incelemektir.

II. MATERYAL VE METOT

A. PROBLEM GEOMETRİSİ

Bu çalışmada, sabit ısı akışı ile ısıtılmakta olan ve eğim açısı değişken olan düz bir hedef plakanın slot jet ile soğutulmasında kaldırma kuvveti ve yüzeyler arası ışınlımın akış ve ısı transfer karakteristiklerine olan etkileri analiz edilmektedir. Ele alınan problemin geometrisi ve kullanılan sınır koşulları Şekil 1'de

verilmiştir. Hava, akış bölgesine W genişliğindeki slot jet nozulundan girmekte olup nozul genişliği 10 mm'dir. Eğimli hedef plakasının x -ekseni ile arasındaki eğim açısı α , levhanın toplam uzunluğu ise 400 mm'dir. Hedef plaka ile jet nozulu arasındaki en geniş bölge (H) 40 mm olup çıkış genişliği (H_o) hedef plaka ile x -ekseni arasındaki eğim açısına bağlı olarak farklı değerler almaktadır.



Şekil 1. Problemin şematik gösterimi ve sınır koşulları

B. SAYISAL METOT VE SINIR KOŞULLARI

Problem ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak 2-boyutlu ve zamana bağlı olarak analiz edilmiştir. Çalışmanın amacı yüzeyler arası ışıma ve kaldırma kuvvetinin eğik plakanın genel ısı transfer performansına etkilerini incelemek olduğundan dolayı taşınım ile ısı transferine ek olarak yüzeyler arası ışıma ile ısı transferi (S2S) ışıma modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Kaldırma kuvvetinin akış ve ısı transferine etkisi ele alınırken havanın yoğunluğundaki değişim sıkıştırılamaz ideal gaz modeli kullanılarak modellenmiştir [32]. SIMPLE algoritması hız-basınç çiftinin çözümü amacıyla kullanılırken, momentum ve enerji denklemleri 2. dereceden akış yönlü fark şeması ile ayrıklaştırılmış, basınç interpolasyonu ise kaldırma kuvveti etkisindeki akışlar için önerilen PRESTO algoritması ile gerçekleştirilmiştir [33].

Yukarıda belirtildiği gibi, problem 2-boyutlu olarak zamana bağlı ve laminer rejimde incelenmiştir. Lin vd. [12] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada Reynolds sayısının 1500 altındaki değerlerinde türbülans şiddetinin oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Abishek ve Narayanaswamy [20] $Re_j \leq 1000$ iken akışın laminer olduğunu, Chiriac ve Ortega [15] ise $Re_j \geq 500$ iken akış dinamiğinin zamana bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu sebeple, $100 \leq Re_j \leq 1000$ aralığında akışın laminer ve zamana bağlı olduğu kabulüyle hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Laminer rejimde zamana bağlı akış için Navier-Stokes ve enerji denklemleri aşağıda verilmiştir:

Süreklilik denklemi:

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

x-doğrultusundaki momentum denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

y-doğrultusundaki momentum denklemi:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g\beta(T - T_j) \quad (3)$$

Enerji denklemi:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinde u ve v terimleri x ve y -doğrultularındaki hız bileşenlerini; T ve p terimleri sıcaklık ve basıncı; ρ , k , v ve c_p ise havanın yoğunluğunu, ısı iletkenliğini, kinematik viskozitesini ve özgül ısısını temsil etmektedir.

Akış bölgesini çevreleyen hedef plaka ve adyabatik yüzeyler arasındaki ışıınım etkileşimi S2S ışıınım modeli kullanılarak modellenirken yüzeylerin difüz ve gri olduğu kabul edilmiştir. Havanın ise ışıınım açısından katılımcı olmadığı kabul edilmiştir. Bu kabuller doğrultusunda S2S model denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilir [33,34]:

$$q_{in,k} = \sum_{j=1}^n F_{kj} q_{out,j} \quad (5)$$

$$J_k = E_k + \rho k \sum_{j=1}^n F_{kj} J_j \quad (6)$$

(5) numaralı denklem k yüzeyine gelen ışıınım akısını hesaplamak için kullanılırken, (6) numaralı denklem ise k yüzeyinin yaptığı ışıınımı hesaplamak için kullanılır. (5) ve (6) numaralı denklemlerde E_k ve F_{kj} , terimleri sırasıyla k yüzeyinin ışıınım yayma gücünü ve k ve j yüzeyleri arasındaki şekil faktörünü temsil etmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi, akışkanın yoğunluğundaki değişim sıkıştırılmaz ideal gaz modeli kullanılarak modellenmiştir [32,33]:

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_w} T} \quad (7)$$

Burada, p_{op} çalışma basıncını, R evrensel gaz sabitini, M_w havanın molekül ağırlığını temsil etmektedir.

Kullanılan sınır koşulları, problem geometrisi ile birlikte Şekil 1'de verilmiştir. Hava, akış bölgesine uniform hız (U_j) ve sıcaklıkta (T_j) girmekte olup jet sıcaklığı 300 K'dir. Akış bölgesinin çıkışında ise basınç çıkışı sınır koşulu kullanılmış olup akışkan basıncı atmosfer basıncına eşit alınmıştır. Eğimli hedef plaka sabit ısı akısı ile ısıtılırken akış bölgesini sınırlandıran üst yüzeyler ise adyabatiktir. Bununla birlikte, her iki yüzeyde de hidrodinamik olarak kaymama sınır koşulu kullanılmıştır. Yüzeyler arası ışıınımla ısı transferi hesaplanırken giriş ve çıkış sınırlarının yayıcılıkları (ϵ) 1'e eşit alınmış olup hedef plaka ve adyabatik yüzeylerin yayıcılıkları ise 0.05, 0.5 ve 0.95 olmak üzere farklı değerler almaktadır.

C. KULLANILAN PARAMETRELER

Çalışmada düşük akışkan hızlarında, yüzeyler arasındaki ışıınım ve kaldırma kuvvetinin genel soğutma performansına etkileri analiz edilmektedir. Bu doğrultuda, farklı Richardson sayıları ve plaka eğimlerinde hedef plaka yüzeyinde taşınım Nusselt sayısı (Nu_c), ışıınım Nusselt sayısı (Nu_r) ve toplam Nusselt sayısının (Nu_t) değişimi hesaplanmıştır.

Akış bölgesinin girişinde jet Reynolds sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Re_j = \frac{\rho U_j W}{\mu} \quad (8)$$

Burada, U_j ve μ terimleri sırasıyla jet hızı ve havanın dinamik viskozitesini temsil etmektedir.

Hedef plaka sabit ısı akısı ile ısıtılmakta olup Grashof sayısı ısı akısının fonksiyonudur. Düzeltilmiş Grashof sayısı hesaplamalar boyunca sabit tutulmuş olup 10^5 'e eşit alınmış ve aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$Gr^* = \frac{g\beta\Delta T_{ref}W^3}{\nu^2} \quad (9)$$

Burada, g ve β terimleri sırasıyla yerçekimi ivmesi ve havanın hacimsel genişleme katsayısını temsil etmektedir. ΔT_{ref} terimi ise referans sıcaklık farkını temsil etmekte olup aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\Delta T_{ref} = \frac{qW}{k} \quad (10)$$

Burada, q terimi hedef plaka yüzeyindeki toplam ısı akısını temsil etmektedir.

Yukarıda belirtildiği gibi, düzeltilmiş Grashof sayısı toplam ısı akısının fonksiyonu olup hesaplamalar boyunca sabit tutulmuştur. Dolayısıyla, Richardson sayısı jet Reynolds sayısına bağlı olarak değişmektedir. Richardson sayısı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$Ri = \frac{Gr^*}{Re_j^2} \quad (11)$$

Hedef plaka yüzeyindeki taşınım ve ışınlım Nusselt sayıları sırasıyla aşağıdaki şekilde hesaplanır [20,35]:

$$Nu_c = \frac{q_c}{k \Delta T/W} \quad (12)$$

$$Nu_r = \frac{q_r}{k \Delta T/W} \quad (13)$$

Toplam Nusselt sayısı ise aşağıdaki şekilde hesaplanır [20,36]:

$$Nu_t = Nu_c + Nu_r \quad (14)$$

D. AĞ YAPISI VE ÇALIŞMANIN DOĞRULANMASI

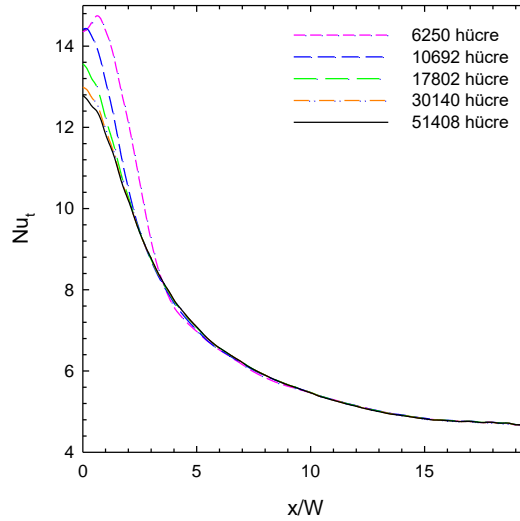
Sayısal hesaplamalarda dikdörtgen ağ yapısı kullanılmıştır. Şekil 2'de verilen ağ yapısı, akış bölgesini sınırlandıran hedef plaka ve adyabatik yüzeylere doğru yoğunlaşırken akış bölgesinin merkezinde ağ yoğunluğu daha düşüktür. Ağ bağımsızlık çalışmaları 6250 ile 51408 hücre sayısı aralığında gerçekleştirilmiş ve her bir hücre sayısında hedef plaka yüzeyindeki toplam Nusselt sayısının ortalama değeri hesaplanarak ardışık hücre sayıları için hesaplanan değerler karşılaştırılmıştır. Tablo 1'de görüldüğü gibi 17802 ile 30140 hücre sayılarında hesaplanan ortalama Nusselt sayıları arasındaki farkın %1'in altına inmesinden dolayı nihai çözümlere 30140 hücre sayısı ile devam edilmiştir.

Şekil 2. Analizlerde kullanılan ağ yapısı

Tablo 1. Ağ bağımsızlık çalışmasına ait sonuçlar

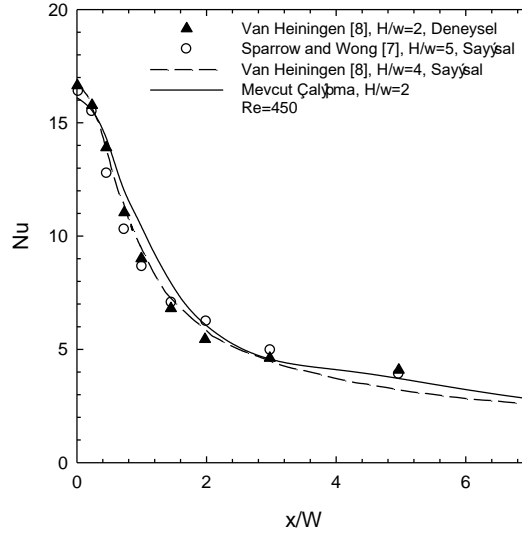
Hücre Sayısı	$Nu_{t,ave}$	% Bağıl Hata
6250	6.712	-
10692	6.563	2.220
17802	6.495	1.046
30140	6.467	0.427
51408	6.458	0.143

Ayrıca, seçilen her bir hücre sayısında referans durum ($\alpha=0^\circ$) için, $Ri=0.1$ ve $\varepsilon=0.95$ değerlerinde hedef plaka yüzeyinde toplam Nusselt sayısının (Nu_t) değişimi Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3'te görüldüğü gibi hücre sayısının görece düşük olduğu ilk üç ağ sıklığı için durma noktasında yerel Nusselt sayısı değişiminde belirgin farklar ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, duvar jeti bölgesinde tüm ağ sıklıkları için hesaplanan Nu_t değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Son iki ağ sıklığında ise hem durma noktasında hem de duvar jeti bölgesinde Nu_t değerleri birbirleri ile oldukça uyumludur. Dolayısıyla, Çizelge 1'de belirtildiği gibi nihai hesaplamalar için 30140 hücre kullanımının yeterli olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 3. Farklı hücre sayıları için hedef plaka yüzeyinde Nu_t değişimi

Çözüm algoritmasının güvenilirliğini test etmek amacıyla mevcut çalışmaya ait sonuçlar literatürdeki deneysel ve sayısal verilerle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla $Re_j=450$ 'de hedef plaka yüzeyindeki yerel Nusselt sayısı değişimi Sparrow ve Wong [7] ile Van Heiningen [8]'e ait deneysel ve sayısal veriler ile karşılaştırılmış ve sonuçların literatürdeki sonuçlar ile iyi bir uyum yakaladığı görülmüştür.



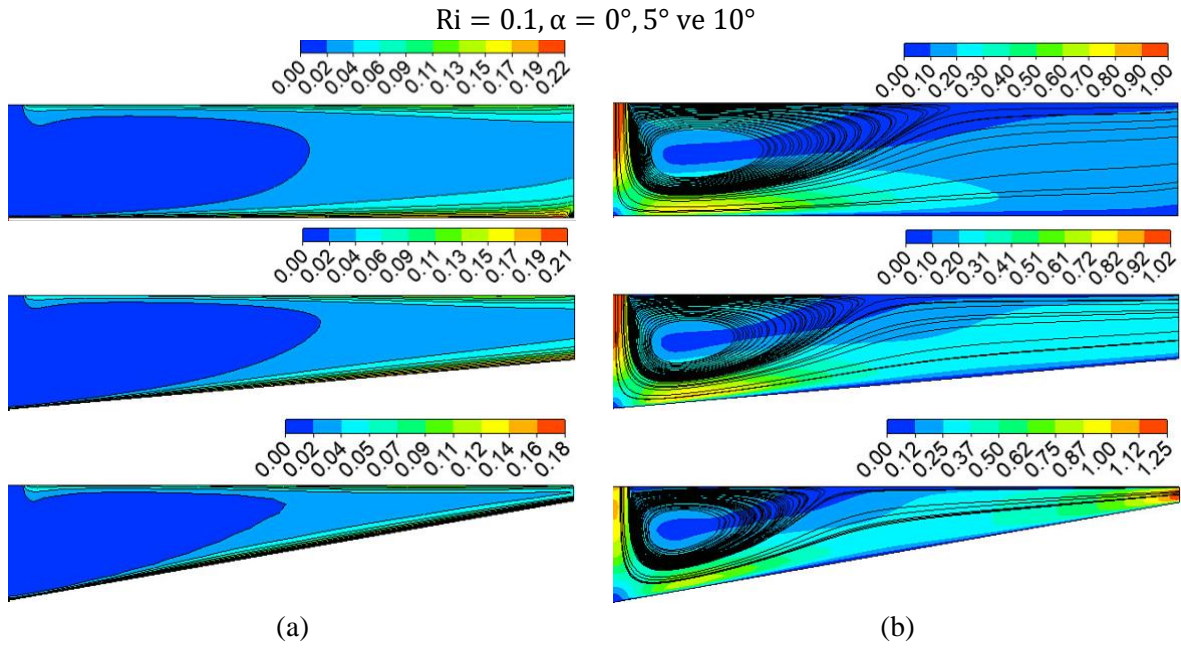
Şekil 4. Mevcut çalışmaya ait sonuçları literatürdeki veriler ile karşılaştırılması

III. BULGULAR

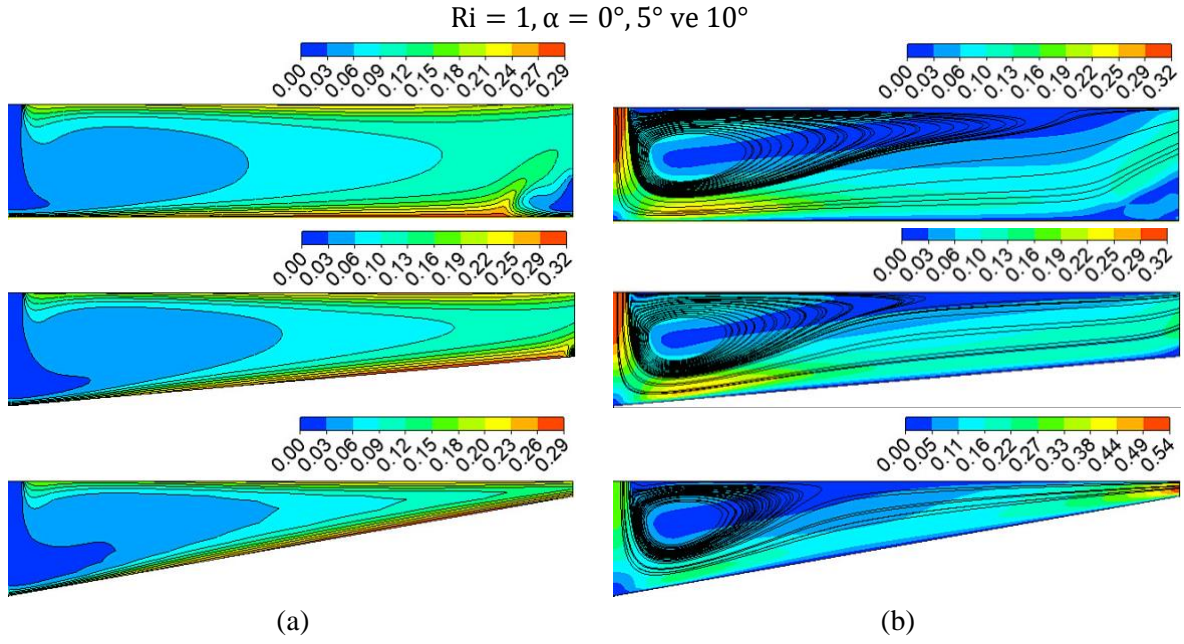
Bu çalışmada, sabit yüzey ısı akısı ile ısıtılan ve değişken eğime sahip bir levhanın tek bir slot jet ile soğutulmasında yüzeyler arası ışınlama ile ısı transferi ve kaldırma kuvvetinin genel ısı transfer performansına etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla, farklı Richardson sayıları ($Ri=0.1, 1$ ve 10), yüzey yayıcılığı ($\epsilon=0.05, 0.5$ ve 0.95) değerleri ve eğim açıları ($\alpha=0^\circ, 5^\circ$ ve 10°) için çalışmalar gerçekleştirilmiş olup ilgili parametrelerin sıcaklık ve hız bölgeleri ile yerel ve ortalama ısı transfer karakteristiklerine etkileri değerlendirilmiştir.

Şekil 5, 6 ve 7’de sırasıyla $Ri=0.1, 1$ ve 10 için farklı eğim açılarında boyutsuz sıcaklık ve hız konturları sunulmuştur. Kontur grafikleri hedef plaka ve adyabatik yüzeylerin yüzey yayıcılığının $\epsilon=0.95$ ’e eşit olduğu durumlar için elde edilmiştir. $Ri=0.1$ değerinde, viskoz kuvvetler kaldırma kuvvetlerine baskın olduğundan dolayı zorlanmış taşınım akışı domine etmektedir. Bu sebeple, jet nozulunun çıkışında jet akışı ve durgun akışkan arasındaki kayma sınır tabakasına bağlı olarak gelişen ikincil akışın dışında akış bölgesinde başka bir noktada kuvvetli bir ikincil akış meydana gelmemektedir. Ancak, çıkışta akım çizgileri hafifçe yukarı yönelmekte ve hedef plakanın hemen üstünde zayıf bir ters akış oluşmaya başlamaktadır. Jet nozulunun çıkışında, jetin sağında ortaya çıkan ikincil akış hücresi ise hedef plakanın eğim açısının artışıyla küçülmektedir. Hız konturlarından görüldüğü gibi, jetin gelişme bölgesi ile duvar jeti bölgesinin başlangıcında hava hızı oldukça yüksektir. Sonrasında ise, hedef plaka ile hava arasındaki kayma gerilmesinin sonucunda hava hızı çıkışa doğru azalmaktadır. Ancak, $\alpha=10^\circ$ iken çıkış kesitinin oldukça daralmasından dolayı en yüksek hız bu bölgede görülmekte ve çıkıştaki hava hızı jet hızının yaklaşık olarak 1.25 katına çıkmaktadır. $Ri=0.1$ ’deki sıcaklık konturları incelendiğinde, yüzeyler arasındaki ışınlama ile ısı transferinin sonucunda adyabatik yüzey ısınmakta ve bu bölgede ısıl sınır tabaka oluşumu gözlemlenmektedir. $Ri=0.1$ ’de hava hızının yüksek olmasından dolayı ısıl sınır tabaka kalınlıkları oldukça düşüktür. Bu durum eğim açısının artışıyla belirginleşir. Şekil 6’da viskoz kuvvetler ile kaldırma kuvvetinin dengede olduğu $Ri=1$ ’de elde edilen sıcaklık ve hız konturları sunulmuştur. Hız konturları incelendiğinde, $\alpha=0^\circ$ ’de kaldırma kuvvetinin etkisiyle hava yukarı doğru yönelmekte, akış bölgesinin çıkışında hedef plaka yakınında ters akış meydana gelmektedir. Plaka eğiminin artışıyla birlikte çıkışta oluşan ters akış zayıflamakta ve $\alpha=10^\circ$ ’de tamamen ortadan kalkmaktadır. Sıcaklık konturları incelendiğinde kaldırma kuvvetinin akış bölgesi içerisindeki sıcaklık değişimine etkileri $Ri=1$ ’de daha belirgindir. $\alpha=0^\circ$ ’de çıkıştaki ters akış soğuk havanın akış bölgesine girmesine sebep olurken akışkanın yukarı yönlü hareketine bağlı olarak ısıl sınır tabaka da yukarı yönde genişlemektedir. Şekil 7’de kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere baskın olduğu $Ri=10$ ’daki sıcaklık ve hız konturları sunulmuştur. Hız konturları incelendiğinde, $\alpha=0^\circ$ ’de jetin komşuluğundaki ve çıkıştaki ters akışa bağlı

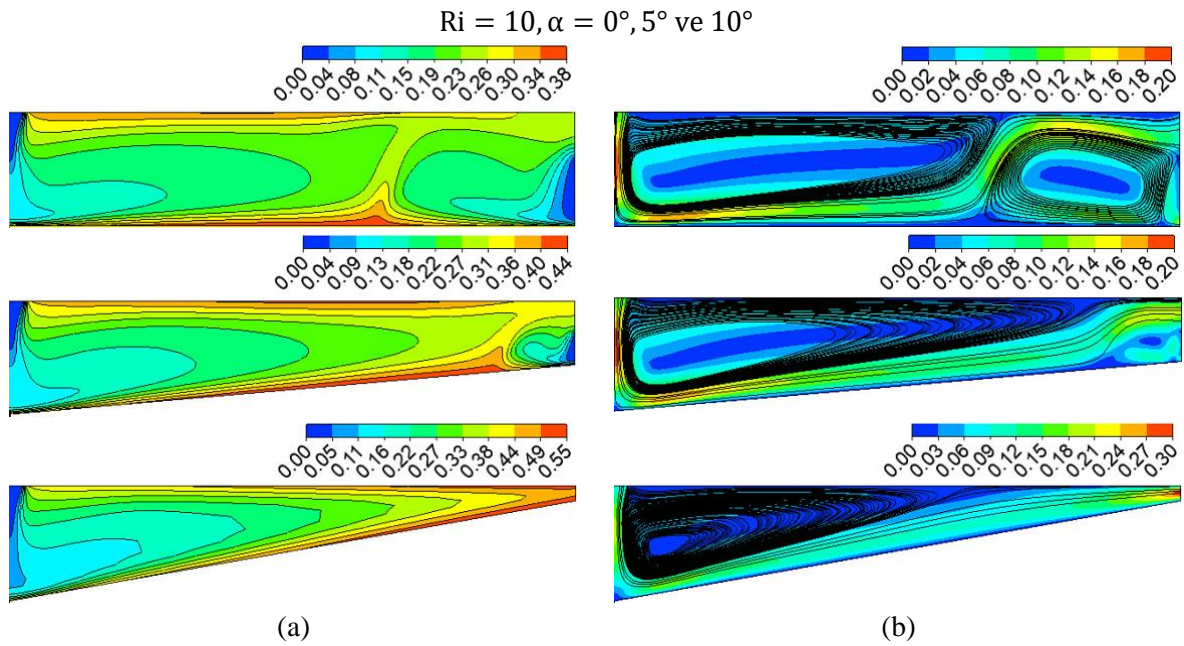
olarak ortaya çıkan resirkülasyon hücrelerinin akışı domine ettiği görülmektedir. Bu durum, $Ri=10$ 'da doğal taşınımın zorlanmış taşınımına baskın geldiğini kanıtlamaktadır. $Ri=0.1$ ve 1 için elde edilen bulgular $Ri=10$ için de geçerli olup plaka eğiminin artışı çıkışa yakın bölgede oluşan resirkülasyonu zayıflatmakta ve bu bölgede özellikle $\alpha=10^\circ$ 'de ana akışın momentumu çıkıştaki ikincil akış hücresine baskın gelmektedir. Sıcaklık konturları incelendiğinde, $Ri=10$ 'da $Ri=0.1$ ve 1 'e oranla ısıl sınır tabaka kalınlığının daha fazla olduğu ve akış bölgesi içerisindeki hava sıcaklığının çok daha yüksek olduğu görülmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, $Ri=10$ 'da ikincil akışların baskın olmasından dolayı hedef plaka ile etkileşimde olan soğuk hava ısınarak ikincil akış hücreleri ile adyabatik yüzeye taşınmaktadır. Bu durum $\alpha=10^\circ$ 'de ortadan kalkmaktadır. $Ri=10$ 'da jet hızı oldukça düşük olduğundan dolayı $\alpha=10^\circ$ 'de daralan çıkış kesiti blokaj etkisi yaratmakta ve akış bölgesinin çıkışında hava sıcaklığı incelenen diğer çalışma durumlarına oranla çok daha yüksek olmaktadır.



Şekil 5. $Ri = 0.1, \theta = 0^\circ, 5^\circ$ ve 10° için elde edilen (a) boyutsuz sıcaklık konturları, (b) üst üste bindirilmiş boyutsuz hız konturları ve akım çizgileri ($\epsilon=0.95$)



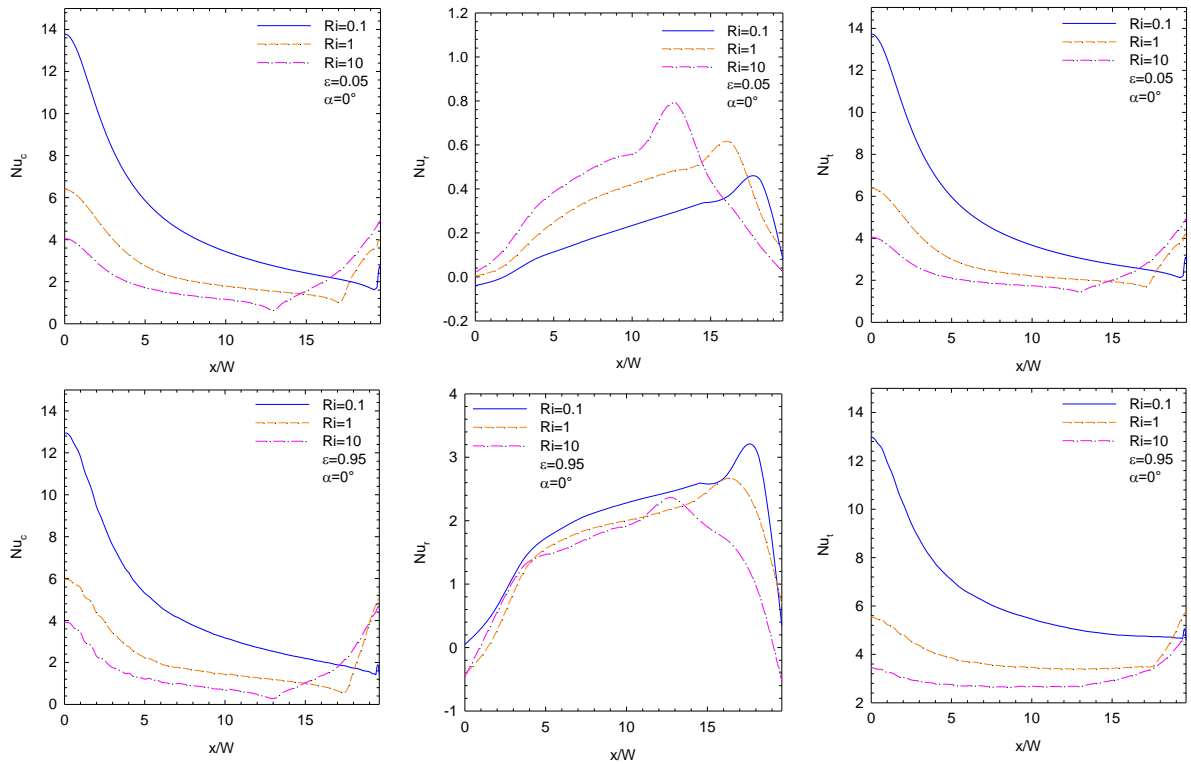
Şekil 6. $Ri = 1, \alpha = 0^\circ, 5^\circ \text{ ve } 10^\circ$ için elde edilen (a) boyutsuz sıcaklık konturları, (b) üst üste bindirilmiş boyutsuz hız konturları ve akım çizgileri ($\epsilon=0.95$)



Şekil 7. $Ri = 10, \alpha = 0^\circ, 5^\circ \text{ ve } 10^\circ$ için elde edilen (a) boyutsuz sıcaklık konturları, (b) üst üste bindirilmiş boyutsuz hız konturları ve akım çizgileri ($\epsilon=0.95$)

Şekil 8’de $\alpha=0^\circ$ için $Ri=0.1-1-10$ ve $\epsilon=0.05-0.95$ değerlerinde hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimi sunulmuştur. $Ri=0.1$ ve $\epsilon=0.05$ için hedef plaka boyunca Nu_c değişimi incelendiğinde yüksek jet hızına bağlı olarak çarpma bölgesinde taşınım ile ısı transferinin oldukça yüksek olduğu, çıkışa doğru Nu_c değerlerinin azaldığı ve çıkıştaki zayıf ters akışa bağlı olarak ani bir artış sergilediği görülmektedir. Yüzeydeki Nu_r değişimi incelendiğinde çarpma bölgesi ve duvar jeti bölgesinin başlangıcında yüksek hava hızına bağlı olarak yüzeyler arası ışınlama ile ısı transferinin zayıf olduğu, duvar jeti bölgesinde hava hızının azalmasına bağlı olarak Nu_r değerlerinin arttığı görülmektedir. Ancak, çıkış bölgesindeki zayıf ikincil akış Nu_c ’nin aksine Nu_r ’nin azalmasına sebep olmaktadır. Hedef plaka

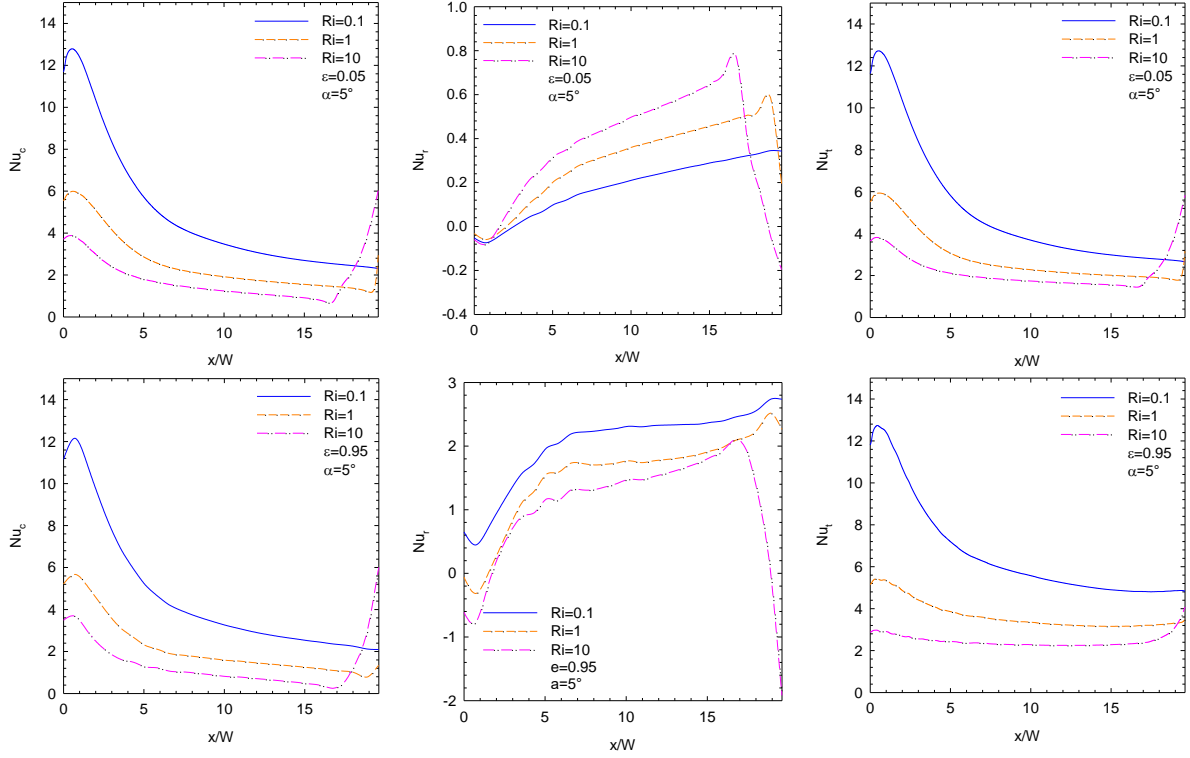
boyunca Nu_t değişimi incelendiğinde, yüzeydeki toplam ısı transferindeki (taşınım ve ışıınım) değişim trendinin Nu_c ile benzer olduğu görülmekte olup bu durum yüzeyler arası ışıınımın $Ri=0.1$ ve $\varepsilon=0.05$ 'te oldukça zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. $Ri=1-10$ ve $\varepsilon=0.05$ 'te ise çarpma bölgesinde düşük jet hızına bağlı olarak Nu_c ve Nu_t 'nin $Ri=0.1$ 'e oranla daha düşük olduğu, kaldırma kuvvetinin akışı domine etmesine bağlı olarak çıkıştaki ters akış bölgesinin genişlediği ve zayıf ikincil akışların görüldüğü bu bölgede Ri 'nin artışıyla birlikte Nu_t 'nin da arttığı görülmektedir. $\varepsilon=0.95$ değerinde ise yüzeyler arası ışıınım etkileşimi çok daha belirgin olduğundan dolayı Nu_r değerleri $\varepsilon=0.05$ 'teki değerlere oranla çok daha yüksektir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, Şekil 6 ve 7'de görüldüğü gibi hedef plaka ile temas eden akışkanın kaldırma kuvvetinin etkisiyle adyabatik yüzeye doğru yükselmesidir. Akış bölgesi içerisindeki saat yönünün tersi yönde dönmekte olan ana resirkülasyon hücresinin varlığına bağlı olarak jet nozulu yakınında adyabatik yüzey üzerindeki ısıl sınır tabaka kalınlığı artmaktadır. Benzer bir durum çıkışa yakın bölgede de geçerlidir. Saat yönündeki resirkülasyonla birlikte, ısınan hava adyabatik yüzeye doğru yükselmekte ve akış bölgesini terk etmektedir. Dolayısıyla, her iki bölgede de adyabatik yüzeyin sıcaklığı hedef plaka sıcaklığından fazladır. Sonuç olarak, ışıınımla ısı transferinin yönüne bağlı olarak her iki bölgede de Nu_r negatif olup bu durum Nu_c ve Nu_t değişim trendlerinin birbirlerinden farklılaşmasına sebep olur. ışıınımla ısı transferinin yönü durma bölgesi ve akış bölgesinin çıkışında hedef plakadan olan toplam ısı transferini zayıflatmaktadır.



Şekil 8. $\alpha = 0^\circ$ ve farklı Ri değerlerinde hedef plaka üzerinde Nu_c , Nu_r ve Nu_t değişimi

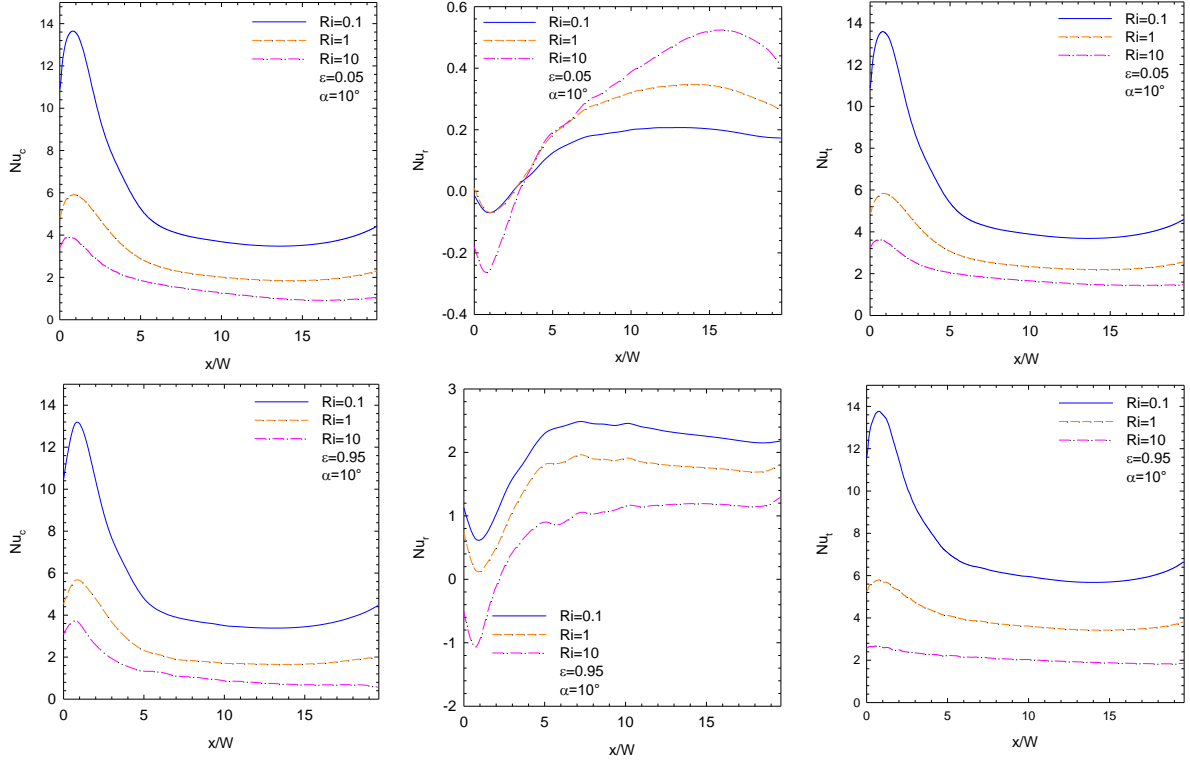
Şekil 9'da $\alpha=5^\circ$ için $Ri=0.1-1-10$ ve $\varepsilon=0.05-0.95$ değerlerinde hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimi sunulmuştur. Yukarıda belirtildiği gibi hedef plakanın eğiminin artışı ile ana akışın momentumundaki artışa bağlı olarak çıkıştaki ters akış zayıflamakta ve resirkülasyon hücresi küçülmektedir. $\varepsilon=0.05$ 'te hedef plaka boyunca Nu_c değişimi incelendiğinde $\alpha=0^\circ$ 'ye benzer şekilde $Ri=0.1$ 'de taşınım ile ısı transferinin çarpma bölgesinde oldukça yüksek olduğu, çıkışa doğru ise Nu_c 'nin azaldığı görülmektedir. $Ri=1$ ve 10 'da ise kaldırma kuvvetinin artan etkisi çıkıştaki ters akışın şiddetini artırmaktadır. Buna bağlı olarak, $Ri=10$ 'da çıkış bölgesindeki Nu_c çarpma bölgesinden daha yüksektir. Bu bölgede taşınım ile ısı transferinin artışına bağlı olarak ışıınımla ısı transferinde keskin bir azalma görülür. Çarpma bölgesinde, her üç Ri değeri için de Nu_r değerleri sıfıra oldukça yakınken duvar jeti bölgesinde artış meydana gelmektedir. Toplam ısı transferinin değişimi incelendiğinde ise yüzeydeki

değişimin taşınım ile ısı transferine benzer olduğu, ancak çıkış bölgesinde Nu_r değişiminin özellikle $Ri=10$ 'da toplam ısı transferini az da olsa zayıflattığı görülür. $\varepsilon=0.95$ 'te ise yüzeyler arası ışınlama ile ısı transferi etkisini artırmakta olup çarpma bölgesi ve çıkış bölgesi haricinde hedef plakadan ışınlama ile ısı transferinin toplam ısı transferini iyileştirdiği görülür. ε değerinin artışı yüzeyler arası ışınlama ile toplam ısı transferine etkisini artırırken bu katkı Nu_t değişiminden de net şekilde görülür. Durma bölgesi ve çıkışta yüzeyler arası ışınlama yukarıda belirtildiği gibi toplam ısı transferini zayıflatırken duvar jeti bölgesinde toplam ısı transferinde iyileşmeye sebep olur.



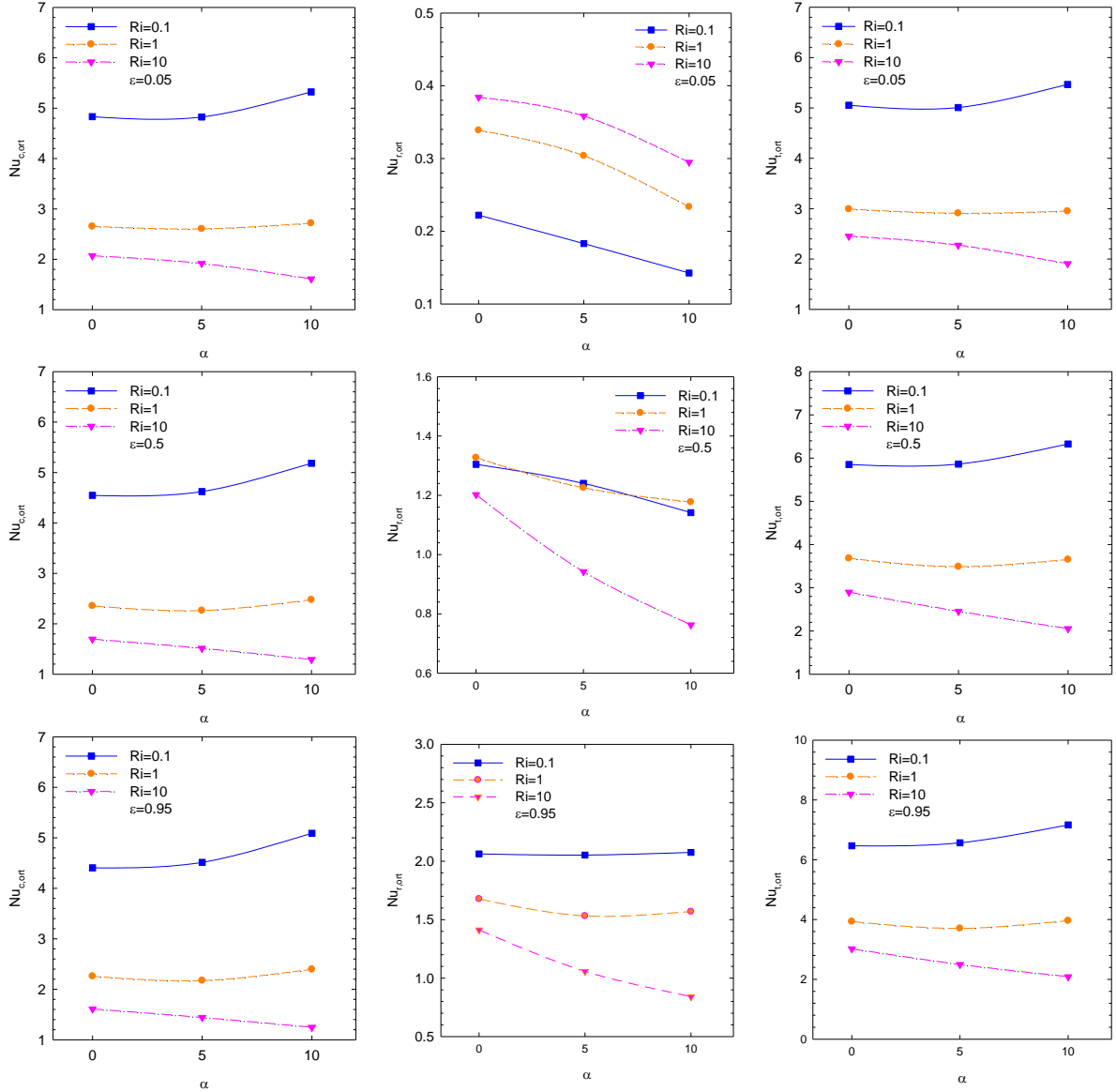
Şekil 9. $\alpha = 5^\circ$ ve farklı Ri değerlerinde hedef plaka üzerinde Nu_c , Nu_r ve Nu_t değişimi

Şekil 10'da $\alpha=10^\circ$ için $Ri=0.1-1-10$ ve $\varepsilon=0.05-0.95$ değerlerinde hedef plaka üzerindeki yerel Nusselt sayısı değişimi sunulmuştur. $\alpha=10^\circ$ 'de çıkış kesitindeki daralmanın çok belirgin olmasından dolayı çıkışta ana akışın momentumu artmakta olup $\alpha=0^\circ$ ve 5° 'de görülen ters akışı engellemektedir. Bunun sonucunda, akış bölgesinin çıkışında Nu_c ve Nu_t bir miktar artarken keskin artışlar meydana gelmemektedir. $Ri=0.1$ 'de hava hızının diğer Ri değerlerine göre oldukça yüksek olması çıkışta taşınım ile ısı transferi ve toplam ısı transferini az da olsa iyileştirmektedir. Ancak, $Ri=1$ ve 10 'da çıkış bölgesinde ısı transferinde belirgin bir iyileşme yoktur. Işınlama ile ısı transferi ise hem $\varepsilon=0.05$ 'te hem de $\varepsilon=0.95$ 'te çarpma bölgesinde sifira oldukça yakın olup duvar jeti bölgesi ve çıkışa yakın bölgede ise toplam ısı transferini iyileştirmektedir. $\alpha=10^\circ$ 'de Nu_t 'nin değişim trendi $\alpha=0^\circ$ ve 5° 'de ortaya çıkan değişim trendinden oldukça farklıdır. Ana akışın momentumundaki artış çıkış bölgesinde ters akış oluşumunu engellerken bu bölgede sıcaklık gradyanlarının ani değişiminin önüne geçmektedir. Bu durum Nu_c ve Nu_t 'nin çıkış bölgesinde keskin şekilde artmasını ya da azalmasını engellemektedir.



Şekil 10. $\alpha = 10^\circ$ ve farklı Ri değerlerinde hedef plaka üzerinde Nu_c , Nu_r ve Nu_t değişimi

Şekil 11’de farklı plaka eğimleri, Richardson sayıları ve yüzey yayıcılık değerleri için ortalama Nusselt sayısı değişimi karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Grafiklerden görüldüğü üzere, çalışılan tüm ε değerlerinde $Ri=0.1$ ’de $Nu_{c,ort}$ ve $Nu_{t,ort}$ hedef plakanın eğiminin artışıyla birlikte artmaktadır. Bu durum, yukarıda belirtildiği gibi $Ri=0.1$ ’de viskoz kuvvetlerin kaldırma kuvvetlerine baskın olmasından dolayı kesit daralmasına bağlı olarak çıkış bölgesinde ana akışın momentumunun artışından kaynaklanmaktadır. Benzer bir çıkarım $Ri=1$ için de yapılabilir. Ancak, kaldırma kuvvetleri ve viskoz kuvvetlerin dengede olduğu $Ri=1$ ’de $Nu_{c,ort}$ ve $Nu_{t,ort}$ ’nun α ile değişimi $Ri=0.1$ ’e kıyasla daha sınırlıdır. $Ri=10$ ’da ise plaka eğiminin artışı tüm ε değerlerinde $Nu_{c,ort}$ ve $Nu_{t,ort}$ ’yu azaltır. $Ri=10$ ’da kaldırma kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere baskın olmasından dolayı akış bölgesinde ikincil akışlar etkindir. Ancak, plaka eğiminin artışı çıkışta taşınım ile ısı transferinin artışını sınırlandırmaktadır. $Nu_{r,ort}$ ’nun α ve ε ile değişimi incelendiğinde, $\varepsilon=0.05$ iken Richardson sayısının artışının yüzeyler arasındaki ışınım ile ısı transferini zayıflattığı görülmektedir. Bununla birlikte, $\varepsilon=0.5$ iken $Ri=0.1$ ve 1 için farklı plaka eğimlerinde $Nu_{r,ort}$ değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu ve tüm Ri değerlerinde plaka eğiminin artışı ile ışınım ile ısı transferinin zayıfladığı görülür. $\varepsilon=0.95$ ’te ise $Ri=0.1$ değerinde $Nu_{r,ort}$ ’nun plaka eğiminden neredeyse etkilenmediği, $Ri=1$ ve 10 ’da ise plaka eğimindeki artışın yüzeyler arası ışınım ile ısı transferini zayıflattığı görülmektedir.



Şekil 11. Farklı α , ε ve Ri değerleri için ortalama Nusselt sayısı değişimi

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, eğim açısı değişken olan bir levhanın çarpan jet ile soğutulmasında plaka eğimi ($\alpha=0^\circ$, 5° ve 10°), kaldırma kuvveti ($Ri=0.1$, 1 ve 10) ve yüzeyler arası ışınlama ile ısı transferinin akış ve ısı transfer karakteristiklerine etkileri farklı yüzey yayıcılıklarında ($\varepsilon=0.05$, 0.5 ve 0.95) sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Richardson sayısının ikincil akışlar ve sıcaklık dağılımı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. $Ri=0.1$ 'de akış bölgesi içerisinde kuvvetli ikincil akışlar oluşmazken, $Ri=1$ ve 10 'da ise kaldırma kuvvetinin etkisinin artışıyla çıkış bölgesindeki ters akışın kapsadığı bölge genişlemektedir.
- Richardson sayısı arttıkça kaldırma kuvvetinin etkisi arttığından dolayı akış bölgesi içerisinde oluşan resirkülasyon hücreleri akışı domine etmektedir.
- Hedef plaka eğiminin artışı ile ana akışın artan momentumu çıkışta ters akış oluşumunu engellemektedir.

- Çarpma bölgesi ve çıkışta taşınım ile ısı transferi duvar jeti bölgesine oranla daha yüksektir.
- Yüzeyler arası ışınım ile ısı transferi yüzey yayıcılığının artışıyla artmakta olup ışınımın toplam ısı transferi içerisindeki payı da artmaktadır.
- Taşınım ile ısı transferinin yüksek olduğu bölgelerde ışınım ile ısı transferi daha zayıftır.
- Isıl sınır tabaka gelişimine bağlı olarak durma bölgesi ve çıkışa yakın bölgelerde ışınım ile ısı transferi adyabatik yüzeyden hedef plakaya doğru gerçekleşmektedir.
- $Ri=0.1$ 'de toplam ısı transferi plaka eğimi ile artmakta, $Ri=1$ 'de belirgin bir artış meydana gelmemektedir. $Ri=10$ 'da ise plaka eğiminin artışı toplam ısı transferini zayıflatmaktadır.

V. KAYNAKLAR

- [1] J. Ferrari, N. Lior, and J. Slycke, "An evaluation of gas quenching of steel rings by multiple-jet impingement", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 136, pp. 190-201, 2003.
- [2] N. Zuckerman and N. Lior, "Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling", *Advances in Heat Transfer*, vol. 39, pp. 565-631, 2006.
- [3] M. Albayrak, B. Sarper, M. Saglam, S. Birinci, and O. Aydin, "The role of jet-to-crossflow velocity ratio on convective heat transfer enhancement in the cooling of discrete heating modules", *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 37, 101549, 2023.
- [4] R. Gardon and J.C. Akfirat, "The role of turbulence in determining the heat transfer characteristics of impinging jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 8, pp. 1261-1272, 1965.
- [5] F.F. Cadek, "A fundamental investigation of jet impingement heat transfer", Ph.D. thesis, University of Cincinnati, 1965.
- [6] H. Miyazaki and E. Silberman, "Flow and heat transfer on a flat plate normal to a two-dimensional laminar jet issuing from a nozzle of finite height", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 2097-2107, 1972.
- [7] E.M. Sparrow and T.C. Wong, "Impingement transfer coefficients due to initially laminar slot jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 597-605, 1975.
- [8] A.R.P. Van Heiningen, "Heat transfer under an impinging slot jet", Ph.D. Thesis, McGill University, Montreal, Quebec, 1982.
- [9] V.K. Garg and S. Jayaraj, "Boundary layer analysis for two-dimensional slot jet impingement on inclined plates", *Journal of Heat Transfer*, vol. 110, pp. 577-582, 1988.
- [10] T.D. Yuan, J.A. Liburdy, and T. Wang, "Buoyancy effects on laminar impinging jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 31, pp. 2137-2145, 1988.
- [11] D. Lytle and B.W. Webb, "Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1687-1697, 1994.
- [12] Z.H. Lin, Y.J. Chou, and Y.H. Hung, "Heat transfer behaviors of a confined slot jet impingement", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 40, pp. 1095-1107, 1997.
- [13] G. Yang, M. Choi, and J.S. Lee, "An experimental study of slot jet impingement cooling on concave surface: effects of nozzle configuration and curvature", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, pp. 2199-2209, 1999.

- [14] C. Cornaro, A.S. Fleischer, M. Rounds, and R.J. Goldstein, "Jet impingement cooling of a convex semi-cylindrical surface", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 40, pp. 890-898, 2001.
- [15] V.A. Chiriac and A. Ortega, "A numerical study of the unsteady flow and heat transfer in a transitional confined slot jet impinging on an isothermal surface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 45, pp. 1237-1248, 2002.
- [16] D. Sahoo and M.A.R. Sharif, "Mixed-convective cooling of an isothermal hot Surface by confined slot jet impingement", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 45, pp. 887-909, 2004.
- [17] M. Angioletti, E. Nino, and G. Ruocco, "CFD turbulent modelling of jet impingement and its validation by particle image velocimetry and mass transfer measurements", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 44, pp. 349-356, 2005.
- [18] G. Hu and L. Zhang, "Experimental and numerical study on heat transfer with impinging circular jet on a convex hemispherical surface", *Heat Transfer Engineering*, vol. 28, pp. 1008-1016, 2007.
- [19] M.S.J. De Lemos and C. Fischer, "Thermal analysis of an impinging jet on a plate with and without a porous layer", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, vol. 54, pp. 1022-1041, 2008.
- [20] S. Abishek and R. Narayanaswamy, "Coupled effects of surface-radiation and buoyancy on jet-impingement heat transfer", *Journal of Heat Transfer*, vol. 39, pp. 1631-1638, 2012.
- [21] A.S. Cavadas, F.T. Pinho, and J.B.L.M. Campos, "Laminar flow field in a viscous liquid impinging jet confined by inclined plane walls", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 59, pp. 95-110, 2012.
- [22] E. Oztekin, O. Aydin, and M. Avci, "Hydrodynamics of a turbulent slot jet impinging on a concave surface", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 1631-1638, 2012.
- [23] E. Oztekin, O. Aydin, and M. Avci, "Heat transfer in a turbulent slot jet flow impinging on concave surfaces", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 44, pp. 77-82, 2013.
- [24] B. Yousefi-Lafouraki, A. Ramiar, and, A. Ranjbar, "Laminar forced convection of a confined slot impinging jet in a converging channel", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 77, pp. 130-138, 2014.
- [25] M.A.R. Sharif, "Heat transfer from an isothermally heated flat surface due to confined laminar twin oblique slot-jet impingement", *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 7, pp. 1-11, 2015.
- [26] Z. Ying, L. Guiping, B. Xueqin, B. Lizhan, and W. Dongsheng, "Experimental study of curvature effects on jet impingement heat transfer on concave surfaces. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 30, pp. 586-594, 2017.
- [27] R. Ekiciler, M. Samet, A. Cetinkaya, and K. Arslan, "Effect of shape of nanoparticle on heat transfer and entropy generation of nanofluid-jet impingement cooling", *International Journal of Green Energy*. vol. 17, pp. 555-567, 2020.
- [28] E. Pulat and E. Beyazoglu, "Computational investigation of confined wall inclination effects on

impinging jet fluid flow and heat Transfer”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 163, pp. 106749, 2021.

[29] S.H. Han, H.J. Park, Y.H. Kim, and D.H. Lee, “The effects of thermal boundary conditions on the heat transfer characteristics of laminar flow in mili-scale confined impinging slot jets”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 168, 120865, 2021.

[30] M. Albayrak, B. Sarper, S. Birinci, M. Saglam, and O. Aydin, “Effect of surface radiation on jet impingement cooling of a concave surface”, *International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer*, June 5-10 2022, Izmir-Turkey.

[31] P. Singh, Y. Aider, and I. Kaur, Swirl jet impingement heat transfer: effect of jet-to-target spacing, jet Reynolds number and orientation with flat target”, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 184, 107993, 2023.

[32] Y. Zhou, M. Wang, M. Wang, and Y. Wang, “Predictive accuracy of Boussinesq approximation in opposed mixed convection with a high-temperature heat source inside a building”, *Building Environment*, vol. 144, pp. 349-356, 2018.

[33] Ansys Inc., “Ansys Fluent, Release 21 R2, Theory Guide”, 2021.

[34] B. Sarper, M. Saglam, and O. Aydin, “Constructal placement of discrete heat sources with different lengths in vertical ducts under natural and mixed convection”, *Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 140, 121401, 2018.

[35] M.A. Gad and C. Balaji, “Effect of surface radiation RBC in cavities heated from below”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1459-1464, 2010.

[36] C. Balaji, M. Hölling, and H. Herwig, “Combined laminar mixed convection and surface radiation using asymptotic computational fluid dynamics (ACFD)”, *Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 567-577, 2007.