



Experimental investigation of heat transfer of multi-row impingement jets in two-pass rectangular channel

Metin Sözbir¹ , Ünal Uysal^{2*} 

¹Sakarya University of Applied Sciences, The Institute of Graduate Programs, 54187, Serdivan, Sakarya, Turkey

²Sakarya University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering, 54187, Serdivan, Sakarya, Turkey

Highlights:

- Designing of gas turbine cooling channel model
- Determination of impingement jet conditions
- Determination of the most efficient jet geometry as circle type with $D_h=2.5$ mm

Keywords:

- Heat convective coefficient
- Impingement jet cooling
- Thermochromic liquid crystal

Abstract

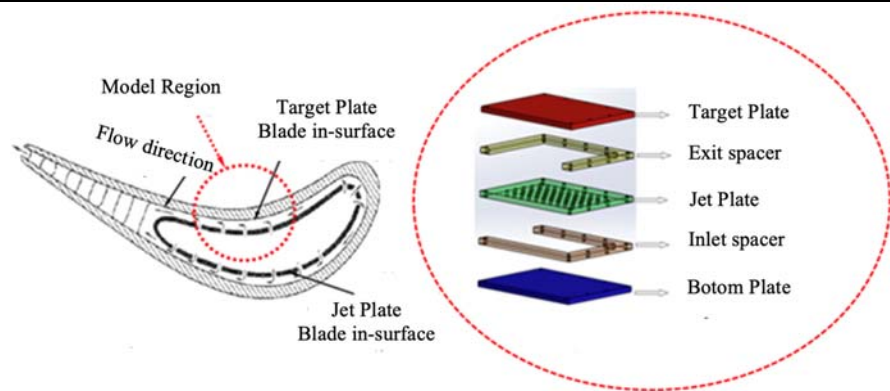


Figure A. Gas turbine blade cooling channel model

Article Info:

Research Article
Received: 24.03.2020
Accepted: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.708122

Correspondence:

Author: Ünal Uysal
e-mail: uysal@sakarya.edu.tr
phone: +90 532 782 4672

Purpose: In this study, the distribution of heat convection coefficient on the channel surface was experimentally investigated by using TLC method for 4 different Reynolds numbers on the channel model by using a total of 50 regularly distributed impingement jets with 5 rows of circle, square and equilateral triangle types. Using the experimental data, the effects of jet geometry, jet diameter, jet-target plate spacing and Re number on the surface heat transfer coefficient were interpreted using iso-curve visuals and graphics. In addition, the effect of the sequential arrangement of the jets on the plate on the surface heat transfer coefficient was investigated. Is to investigate the cooling model with the least pressure loss, homogeneous temperature distribution and the highest heat transfer coefficient.

Theory and Methods: In the experimental study model, a model similar to the intercooling channel of a gas turbine blade was developed. In order to increase the cooling performance of the gas turbine blade channel, two-pass, multistage and sequential circle, square and equilateral triangle type pulse jets are used. The test unit consists of two different channels. The first channel consists of the inlet channel where the pressurized and heated air is directed to the jet plate (jets), the second is the exit channel that directs the air passing through the jets to the target surfaces by rotating 90° .

Results: In comparison of different jet geometries, the highest heat transfer occurred in an equilateral triangle-type impacted jet plate. Heat Transport is more unstable under the influence of jet type in Square and equilateral triangle type impacted jet plates, and more uniform distribution in circle type impacted jet plates.

Conclusion: At the end of the study, it is observed that usage of low Reynolds number with low diameter round jets and high Reynolds number with triangle jet plates are better to obtain a good convection heat transfer.



Çok sıralı çarpmalı jetlerin iki geçişli dikdörtgen kanaldaki ısı taşınımının deneysel incelenmesi

Metin Sözbir¹ , Ünal Uysal^{2*}

¹Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, 54187, Serdivan, Sakarya, Türkiye

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, 54187, Serdivan, Sakarya, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Gaz türbin soğutma kanal modeli tasarımı
- Çarpmalı jet koşullarının sağlanması
- En verimli jet geometrisinin $D_h=2,5$ mm daire olarak bulunması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 24.03.2020
Kabul: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.708122

Anahtar Kelimeler:

Isı taşınım katsayısı,
çarpmalı jet soğutma,
termokromik sıvı kristal

ÖZ

Gaz türbinlerinde verim ve güç; türbin giriş sıcaklığının yükselmesiyle artmaktadır. Giriş sıcaklıkları yükseldikçe ($\approx 2000^\circ\text{C}$); sıcak gaz çıkış yolu üzerinde bulunan ekipmanların maruz kaldığı ısı ve mekanik zorlanmaların olumsuz etkisi görülmekte ve bu zorlanmalar türbin kanatlarında ciddi deformasyonlara yol açmaktadır. Bu deformasyonlar birincil kanatlarda çok hızlı bir şekilde gelişmekte ve kanat kullanım ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan birincil türbin kanatlarının kullanım ömürlerini arttırmak için daha yüksek sıcaklıklarda çalışan malzeme alaşımları ile kanat içi kanallarda ve kanat üstünde ısı taşınımının artırılmasına yönelik çeşitli deneysel çalışmalar literatürde mevcuttur. Bu çalışmalarda, özellikle jet Reynolds sayısı, jet geometrisi, jet büyüklüğü, jet düzeni/dizilimi, jet açısı ve jet konumu gibi farklı yapılarla sahip modeller üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmada; kanat soğutma kanalına geometrik olarak benzer bir model üzerinde; termokromik sıvı kristal tekniğiyle farklı Reynolds sayılarında, hidrolik çapları eşit, daire, kare ve eşkenar üçgen tipli jetler kullanılarak jet geometrisinin, jet-hedef plaka aralığının, jet çapının ve Re sayısının yüzey ısı taşınım katsayısına etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda; düşük Reynolds sayılarında küçük çaplı dairesel jet plakaların, yüksek Reynolds sayılarında ise eşkenar üçgen tipli jet plakaların kullanılması ile ısı taşınımının daha iyi olduğu anlaşılmıştır.

Experimental investigation of heat transfer of multi-row impingement jets in two-pass rectangular channel

H I G H L I G H T S

- Designing of gas turbine cooling channel model
- Determination of impingement jet conditions
- Determination of optimum jet geometry as circle type with $D_h=2.5$ mm

Article Info

Research Article
Received: 24.03.2020
Accepted: 02.08.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.708122

Keywords:

Heat convective coefficient,
impingement jet cooling,
thermochromic liquid crystal

ABSTRACT

As temperature increases in gas turbines, efficiency and power increase. However, when gas turbines are exposed to high temperatures ($\approx 2000^\circ\text{C}$), the negative effect of mechanical and thermal forces on the equipment can be observed and can cause serious deformations. So-called deformations can occur very rapidly on primer blades and cause decreasing life of blades. Usage of alloys for extending the life of heat-affected blades and improving the effect of heat convection of the inside channel and top of blades are studied and admitted in the literature previously. In this study, different models with different jet Reynold numbers, jet geometry, jet size, jet layout, jet angle, and jet placement are studied. During this experimental study, effects of jet geometry, jet-target spacing, jet diameter, and Reynolds number coefficient are studied by using thermochromic liquid crystal method with different Reynolds number, round, square, and triangle type jets with the same hydraulic diameter on geometrically same model of blade cooling channel. At the end of the study, it is observed that usage of low Reynolds number with low diameter round jets and high Reynolds number with triangle jet plates are better to obtain a good convection heat transfer.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan nüfus, genişleyen sanayi ve kentleşme ülke ekonomilerinin büyümesine neden olmaktadır. Ekonomi büyüdükçe enerjiye ihtiyaç artmaktadır. Bu yüzden enerji kullanılan sistemlerin verimli hale getirilmesi için günümüzde çalışmalar yapılmaktadır. Gaz türbinleri birçok sektörde özellikle enerji üretiminde kullanılan son derece modern makinelerdir. Gaz türbininin tercih edilmesinin nedeni verimlerinin yüksek olmasıdır. Yeni nesil gaz türbinleri; sıfıra yakın düşük egzoz gazı emisyonlarına ve verimli elektrik üretim kapasitelerine sahiptir. Gaz türbinlerinde verim ve güç; türbin giriş sıcaklığının yükselmesiyle artmaktadır. Giriş sıcaklıkları yükseldikçe; sıcak gaz yolu üzerindeki ekipmanlarda ısıl ve mekanik zorlanmaların olumsuz etkisi görülmekte ve bu zorlanmalar türbin kanatlarında ciddi deformasyonlara yol açmaktadır. Modern gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklığı yaklaşık olarak 2000°C civarında, bu nedenle özellikle birincil kanatlarda bu deformasyonlar çok hızlı bir şekilde gelişmekte ve kanat kullanım ömürlerinin azalmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklığa maruz kalan birincil türbin kanatlarının kullanım ömürlerini arttırmak için daha yüksek sıcaklıklarda çalışan malzeme alaşımları ve kanat içi kanallarda ve kanat üstünde farklı soğutma yöntemleri geliştirilmiş/geliştirilmektedir. Han çalışmasında; gaz türbini kanatlarındaki temel ısı taşınım problemleri konusunda birçok soğutma teknikleri hakkında genel literatür derlemesi yapmış ve ileride yapılması gerekenler konusunda öneriler vermiştir [1].

Gaz türbin kanat kanallarının ısı taşınım etkisinin artırılması kapsamında jet-hedef plaka aralığı, jet dizilimleri, jet geometrisi ve jet konumu başta olmak üzere düz kanaldan karmaşık geometri kanallara varana kadar çeşitli deneysel çalışmalar literatürde mevcuttur. Genel olarak araştırmacılar iki yüzey arasına çarpmalı jet kullanarak soğutma performanslarının artırılmasına yönelik çalışmalar yapmışlardır. Özellikle jet Reynolds sayısı, jet geometrisi (jet-jet aralığı, jet-hedef plaka aralığı), jet büyüklüğü, jet geometrisi (daire, oval, elips, yarı, ördek adımı, eşkenar dörtgen, kare ve dikdörtgen), jet düzeni/dizilimi (sıralı, karışık ve şaşırtmalı), jet açısı (düz ve açılı) ve jet konumu (normal ve teğet) gibi farklı yapılarla sahip modeller üzerinde araştırmacılar çalışmalar yapmıştır.

Çapraz akışın ısı geçiş katsayısının ve basınç kayıplarının artmasına, jet-hedef plaka aralığının artması ısı geçiş katsayısının azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir [2-4]. Viskanta; daire tipli çarpmalı jetlerinin Re sayısına bağlı olarak sınıflandırılmasını yapmıştır. Daire tipli jetleri, Reynolds sayılarına göre; laminer ($Re < 300$); tam laminer ($300 < Re < 1000$); geçişli veya yarı türbülanslı ($1000 < Re < 3000$) ve tam türbülanslı ($Re > 3000$) jet olarak sınıflandırmıştır [5]. Çapraz akışta jet dizilimleri, jet-plaka mesafesi ve jet çapı gibi parametrelerin [6, 7]; jet şeklinin, çapraz akışın ve iki plaka aralığının ısı taşınım katsayısına etkileri araştırılmıştır [8]. Dikdörtgen kesitli kanalda düz ve

şaşırtmalı olarak dizilmiş baklava şeklindeki kanatçıklarla basınç kaybı karakteristikleri ve kanatçık diziliminin yerel ısı taşınım katsayısına etkileri incelenmiştir [9]. Üç farklı çarpmalı jet şekli ve iki farklı püskürtme oranı ile jet geometrisinin [10]; çapları aynı olan hava jetleri ile kanal içine ısıtılmış hava gönderilerek kanal yüzeylerinin film katsayıları, çapraz akışın ısı taşınım katsayısı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır [11].

Dairesel ve iki boyutlu jetler ile eliptik geometriye sahip jetlerde, özellikle serbest jetlerin durma noktasındaki ısı taşınımını incelenmiştir [12-14]. Eliptik jetlerin dairesel jetlere göre daha iyi ısı taşınımını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır [15, 16]. Kanat üzerinde farklı bölgelerde jet soğutma uygulamaları yapılarak jet büyüklüklerinin, jetler arasındaki mesafenin, jet-hedef plaka aralığının ve iki veya daha çok sıralı jet kullanılarak farklı Reynolds sayılarında deneysel ve teorik uygulamalar yapılmıştır [17, 18]. Jet konfigürasyonların [19-21]; jet aralıklarındaki değişikliklerin ısı taşınım katsayısına etkileri deneysel olarak incelenmiştir [22].

TLC metodu yöntemiyle U şeklinde 180° dönüşlü kanalın alt ve üst yüzeylere 30°, 45°, 60° ve 90° türbülötörler (ripler) yerleştirilerek, farklı Reynolds sayılarında yüzey ısı taşınım katsayısının değişimi deneysel olarak araştırılmıştır. Türbülötörlerin ısı taşınımını arttırdığı ancak aynı zamanda akış yönünün değişmesine neden olduğu anlaşılmıştır [23-25]. Jet plakadan hedef plakaya doğru uzatılmış jet kullanılarak düz ve türbülötörlü hedef plakası yüzeyindeki ısı geçiş taşınım karakteristiklerinin etkisi sayısal ve deneysel olarak araştırılmıştır. Türbülötörlerin ve uzatılmış jetlerin ısı taşınımını arttırdığı görülmüştür [26].

TLC metoduyla; üç geçişli bir kanat modeli üzerinde kare ve daire deliklerin olduğu iki geçiş parçası kullanılarak, farklı Reynolds sayıları için kanal yüzeyindeki ısı taşınım katsayısı değişimi deneysel olarak araştırılmış ve ikinci geçiş bölgesinde daha homojen bir ısı taşınım dağılımı olduğu görülmüştür. Ayrıca daire ve kare tipli jetlerin etkilerinin birbirinden farklı oldukları, daire tipli jetin kare tipli jete göre daha düşük ısı taşınımına neden olduğu anlaşılmıştır [27].

TLC metoduyla çapraz akışa maruz kalan pürüzlü plaka ile kademeli dizilmiş çarpmalı jetlerin ısı taşınım üzerindeki etkileri, $1,5 \times 10^4$ ile $3,5 \times 10^4$ arasındaki Re sayılarında deneysel olarak incelenmiştir. En iyi ısı taşınım performansının, düz veya pürüzlendirilmiş bir plaka üzerinde minimum çapraz akış ve dar jet-plaka aralığı ile elde edildiği sonucuna varılmıştır [28].

Sabit aralıklı çok sıralı çarpma deliğinden oluşan dar kanalda ısı taşınımını [29, 30]; düşük Re sayılarındaki basınç kayıpları; soğutma performansı [31, 32] deneysel olarak incelenmiştir. Çok sıralı jet konfigürasyonların jet-hedef plaka aralığının kanal içindeki çapraz akışa ve ısı taşınımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir [33-35].

Literatürde düz hedef plaka yerine iç bükey hedef yüzeylerin kullanıldığı deneysel ve teorik çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda jet çapı, konumu ve açısının ısı taşınım performansını etkilediği tespit edilmiştir [36]. Çarpmalı jet kullanılarak, 4 farklı Re sayısı ve 4 farklı hacim ile 4 farklı çapta oluşan ısı taşınımı iyileştirmeleri araştırılmıştır [37]. Sabit ısı akısında düz yüzeyde ısı taşınımı ve jet eğimlerinin akışı karakteristiklerine etkisi araştırılmıştır. Jet eğim açısı ile ısı taşınımı arasında doğrusal orantı olduğu görülmüştür [38]. Çapraz akışta eğimli bir jet için hız ve türbülans değişiklikleri deneysel olarak araştırılmış ve türbülans yoğunluğunun delik geometrisine göre değiştiği tespit edilmiştir [39].

Savunma sanayiinde kullanılan silah sistem ve dizaynlarında esas parça olan elektronik kartların soğutulmasına benzer oluşturulan modele, 4 farklı Re sayısının ve çapraz akışın farklı jetlerdeki ısı taşınım etkileri araştırılmıştır [40]. Jet açısı ($45^\circ < \alpha < 90^\circ$), nozul-plaka mesafesi ($2 < H/D < 8$) ve Re sayısı ($1500 < Re < 30000$) aralıklarındaki modelin ısı taşınım etkileri araştırılmıştır [41].

Bu çalışmada bir gaz türbini kanadının iç soğutma sistemine uygun bir model oluşturulmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan kanal soğutması bir gaz türbin kanat boyutlarına benzer şekilde dizayn edilmiştir. Soğutma kanalı kanat dibinden aldığı havayı, kanat içindeki jet plakasından geçirerek kanat iç yüzeyinin soğutulması sağlanacaktır. Kanat, kuyruk kenarından çıkacak şekilde çoklu ve düzgün sıra dizimli çarpmalı jet dizilimine sahiptir. Jet geometrisi olarak daire, kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet kullanılmıştır. Çalışmada jet-hedef plaka aralığı, jet geometrisi ve jet hidrolik çapının soğutma performansına etkileri araştırılmıştır. Literatürde farklı jet geometrileriyle deneysel ve teorik çalışmaların yapıldığı, ancak eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet geometrisi ile çalışma yok denecek kadar azdır. Bu çalışmanın amacı; en az basınç kaybına, homojen sıcaklık dağılımına ve en yüksek ısı taşınım katsayısına sahip olan soğutma modelinin araştırılmasıdır.

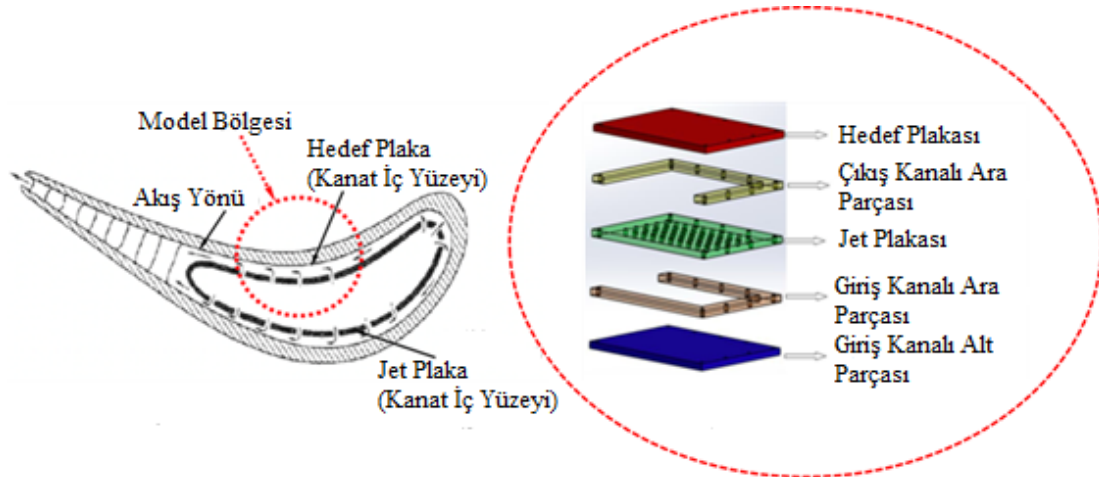
2. DENEY MODELİ (MODEL OF EXPERIMENT)

Deneysel çalışma modelinde, bir gaz türbin kanat iç soğutma kanalını ele alan bir model geliştirilmiştir. Gaz türbin kanat iç soğutma kanalına benzeyen model Şekil 1’de gösterilmiştir. Gaz türbin kanat iç soğutma kanalının performansını artırmak amacıyla akış ve ısı taşınım etkisi araştırılmıştır. Çalışmada giriş ve çıkış kanalı ara parça aralıkları, jet plakası değiştirilerek iki geçişli, hidrolik çapları aynı olan çoklu ve düzgün sıra dizimli daire, kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetler kullanılmıştır.

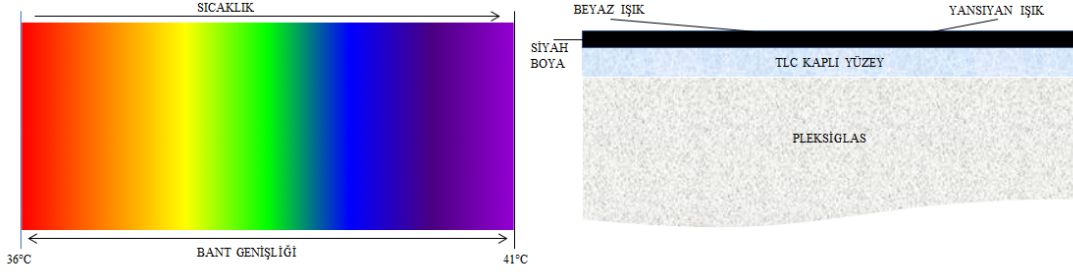
3. TERMOKROMİK SIVI KRİSTAL (TLC) METODU (METHOD OF THERMOCHROMIC LIQUID CRYSTAL)

Isı taşınımı uygulamalarında yüzey sıcaklıklarının dağılımını tespit için termokromik sıvı kristal (TLC) metodu kullanılmaktadır. TLC’nin sıcaklık ölçümündeki kesinliği, sıcaklıkla renk değiştirme özelliği, tersinir ve tekrarlanabilir olması gibi özellikleri nedeniyle araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Sıvı kristalin termokromik özelliği sayesinde, farklı sıcaklıklarda beyaz ışık altında aydınlatıldığında renk (kırmızı, yeşil ve mavi) geçişleri görülmektedir. TLC renkleri ile sıcaklık değişim aralığı üretici firma tarafından isteğe bağlı olarak ayarlanabilir. Deneysel çalışmada kullanılan termokromik sıvı kristal “R36C5W” kodlu üründür. Burada R36C; 36°C ’de renk değişiminin başladığı sıcaklığı, “5W” ise 5°C sıcaklık aralığında renk değişiminin tamamlanacağını ifade etmektedir. Sıcaklığa bağlı renk değişim göstergesi ve TLC kaplı yüzey şematik görüntüleri Şekil 2’de sunulmuştur.

TLC metodu hem kararlı ve hem kararsız ısı taşınımında kullanılabilir. Yapılan çalışmada kullanılan test modelinde yarı sonsuz katı bir cisimde kararsız bir boyutlu ısı taşınımını araştırılmıştır. Chyu ve arkadaşları tarafından hesaplanan, yarı sonsuz katı cisim yüzeyindeki taşınım sınır şartı altındaki sıcaklık dağılımı Eş. 1 ile ifade edilmiştir [42].

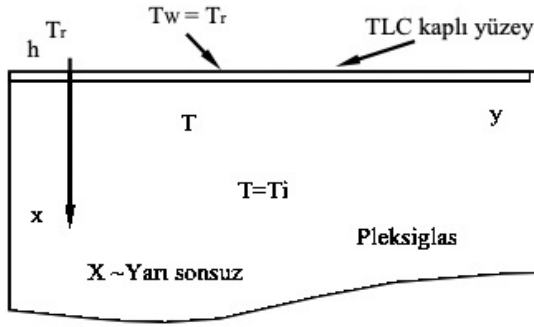


Şekil 1. Gaz türbin kanat iç soğutma kanalı modeli
(Model of internal cooling channel of gas turbine wing)



Şekil 2. Sıcaklığa bağlı renk değişim göstergesi ve TLC kaplı yüzey şematik görüntüleri [23]
(Temperature related color changing indicator and scheme of TLC layered surface).

$$\frac{T-T_i}{T_r-T_i} = \text{erfc} \left(\frac{y}{\sqrt{4\alpha t}} \right) - \exp \left(\frac{h}{k} y + \frac{h^2 \alpha t}{k^2} \right) \text{erfc} \left(\frac{y}{\sqrt{4\alpha t}} + \frac{h\sqrt{\alpha}}{k} \right) \quad (1)$$



Şekil 3. Uç sıcaklık teorisi (Theory of edge temperature) [23].

Başlangıç sınır şartı $y=0$ da; (T_w) duvar sıcaklığını, (T_i) katı malzemenin ilk sıcaklığını; (T_r) yüzeydeki konveksiyon sıcaklığını; (h) zorlanmış ısı taşınım katsayısını; (k) ve (α) katı malzemenin ısı iletim katsayısını ve difüzyon katsayısını; (t) ise zamanı ifade etmektedir (Şekil 3). Yüzeydeki taşınım sınır şartları uygulandığında yarı sonsuz katı cismin yüzey sıcaklığı (T_w), Eş. 2 ile ifade edilmiştir. Eşitlik düzenlenirse;

$$\frac{T_w-T_i}{T_r-T_i} = \exp \left(\frac{h^2 \alpha t}{k^2} \right) \text{erf} \left(\frac{h\sqrt{\alpha t}}{k} \right) \quad (2)$$

Güneş ışığı etkisi altında sıvı kristal renk değişimi kırmızı, yeşil ve mavi olarak sıralı değişir, üretici firma tarafından renk değişim sıcaklık değerleri kullanılarak zorlanmış ısı taşınım katsayısı (h) her bir nokta için LCIA görüntü işleme programı yardımıyla kolaylıkla hesaplanabilir [42].

3.1. LCIA Görüntü İşleme Bilgisayar Programı (Liquid Crystal Imaging Analyser Programme)

Bu çalışmada; LCIA görüntü işleme bilgisayar programı, yüzeylerde zorlanmış ısı taşınım katsayısı (h) dağılımını elde etmek için kullanılmıştır. Bu bilgisayar programı sıvı kristalin renk değişimlerinden faydalanarak yüzey ısı taşınım katsayılarını hesaplamak için geliştirilmiş paket programdır. Bu program dijital video kamera tarafından hedef plaka yüzeyinde oluşan görüntü üzerindeki renk değişimlerini [kırmızı, yeşil ve mavi (RGB)] analiz ederek sayısal forma dönüştüren ve bu sayısal verilerle zorlanmış ısı taşınım katsayısını hesaplayan bir bilgisayar yazılımıdır.

4. DENEY DÜZENİĞİ VE DENEYİN YAPILIŞI (EXPERIMENT EQUIPMENTS AND METHODS)

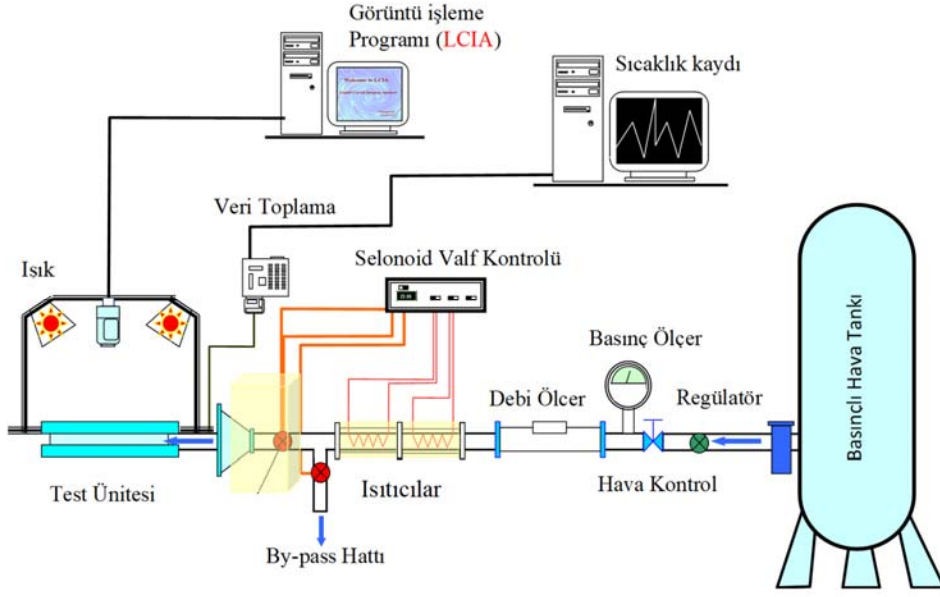
4.1. Denei Düzenegi (Experiment Equipments)

Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında TLC test deney düzenegi kurulu bulunmaktadır. Deney uygulamaları esnasında laboratuvarın ortam sıcaklığı bir klima ile sabit tutulmakta, laboratuvar ışıklandırması, giriş ve çıkışlar kontrol altında tutulmaktadır. Deney düzeneginin şematik gösterimi Şekil 4'de sunulmuştur.

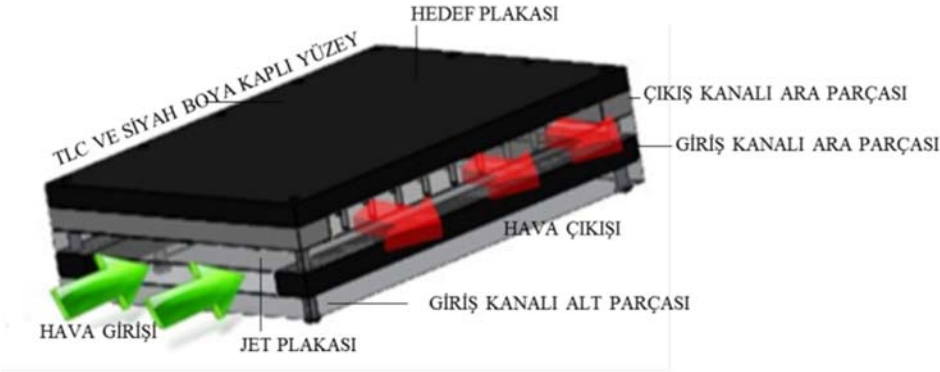
Deney düzenegi dört ana bölümden meydana gelmektedir. Birinci bölümde kompresör, basınçlı hava tankı, hava filtresi, regülatör, basınç ölçer, debimetre, havayı ısıtmak için boru tipi ısıtıcılar, sıcaklığın ayarlanması için kullanılan gerilim ayarlayıcı, by-pass ve selenoid valfler ve difüzör bulunmaktadır. İkinci bölümde model hedef plaka yüzeyinde oluşan TLC'lerin renk değişimlerini kaydedeceğimiz bir adet Sony marka dijital video kamera, iki adet ışık kaynağı (floresan) bulunmaktadır. Üçüncü bölümde ise, hava giriş/çıkış sıcaklıklarını ve ortam sıcaklığını deney süresince bilgisayara kaydeden veri toplama sistemi ile sisteme bağlı termopiletler bulunmaktadır. Ayrıca kaydedilen görüntünün işlenmesinde kullanılan LCIA programı bulunmaktadır. Dördüncü bölüm ise test ünitesidir. Test ünitesinin modüler yapıdaki tüm parçaları şeffaf renkli 10 mm kalınlığında pleksiglasdan imal edilmiştir. Sızdırmazlık için plakalar arasında çift taraflı conta kullanılmıştır. Test ünitesinin hedef plaka yüzeyi sprej boya tabancası yardımıyla TLC'nin renk değişimini görüntüleyebilmek için özel siyah boya ile kaplanmıştır. Test ünitesinin üç boyutlu katı resmi Şekil 5'de sunulmuştur. Test ünitesi iki farklı kanaldan meydana gelmektedir. Birinci kanal şartlandırılmış havanın jetlere yönlendirildiği giriş kanalı; ikincisi ise jetlerden gelen havanın çarptırıldığı hedef plakası ve çıkış kanalıdır.

4.1.1. Test modellerinin kodlaması (Coding of test models)

Yapılan deneylerin birbirleri ile karışmaması için her modele farklı bir kod verilmiştir. Kodlamada jet-hedef plaka aralığını "G..", sırasıyla daire, kare ve eşkenar üçgen jet geometrisini "D..", "K.." ve "U.." ve deney debilerini (20 m³/h; 30 m³/h; 40 m³/h; 50 m³/h) "Q.." ile göstermektedir.



Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Scheme of experiment equipments).

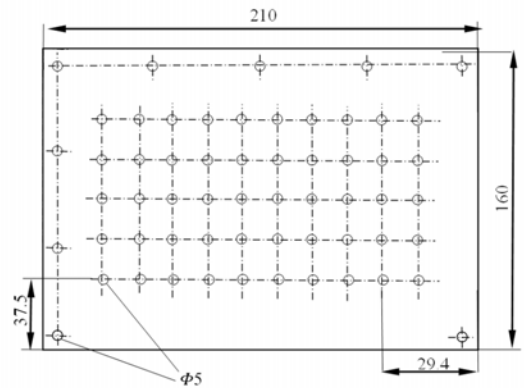


Şekil 5. Test ünitesi üç boyutlu katı resmi (3D Solid Picture of test unit).

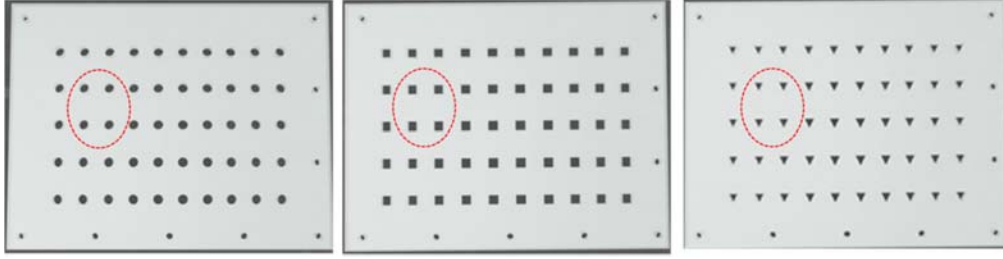
4.1.2. Jet plaka geometrisi (Geometry of jet plate)

Test ünitesi jet plakaları üzerinde çok sıra dizilimli daire, kare ve eşkenar üçgen geometrili üç farklı çarpmalı jet kullanılmıştır. Jet plakası üzerinde kullanılan jetler farklı geometrilerde olmasına rağmen 2,5 mm ve 5,0 mm olacak şekilde iki farklı hidrolik çapta tasarlanmıştır. Her jet plakası üzerinde beş sıra ve her sırada on adet düzgün dizilimle yerleştirilmiş elli adet çarpmalı jet bulunmaktadır. Jet plakasına ait ölçüler Şekil 6'da gösterilmiştir. Çalışmalarda kullanılan daire, kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetlerin görüldüğü jet plakalarının şematik resmi Şekil 7'de, çarpmalı jetlerin yerleşim ölçüleri ve çarpmalı jetlerin birbirlerine göre ölçüleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Çalışmalarda; üç farklı jet geometrisi, iki farklı jet hidrolik çapı, iki farklı jet-hedef plaka aralığı ve dört farklı Re sayısı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Jet boyutlarına bağlı olarak hesaplanan Re sayıları Tablo 1'de sunulmuştur. Debiler sırasıyla 20 m³/h; 30 m³/h; 40 m³/h ve 50 m³/h şeklindedir. Kanal girişi boşluk alanı ile kanal çıkış boşluk alanı bölgelerindeki Reynolds sayıları Tablo 1'de verilmemiştir.

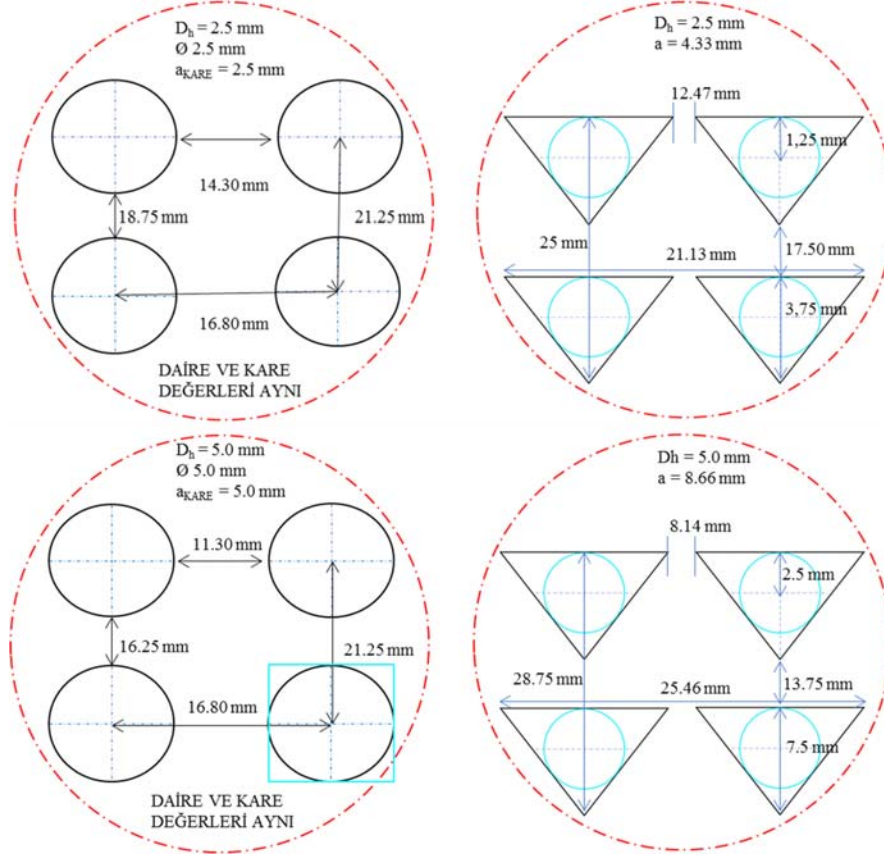
Tablo 1'de verilen Reynolds sayıları simetrik geometrik yapıya sahip daire, kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetlere aittir. Farklı geometrik yapıya sahip çarpmalı jetlerin hidrolik çapları (2,5 mm ve 5,0 mm) aynıdır. Plaka aralıkları ise iki farklı (10 mm ve 15 mm) ölçüdedir.



Şekil 6. Jet plakasının ve jetlere ait konum belirleme değerleri (Values of jet plates and places determination).



Şekil 7. Çalışmalarda kullanılan jet plakalarının şematik resmi (Scheme of jet plates used in experiments).



Şekil 8. Jet plakasında bulunan çarpmalı jetlerin birbirlerine göre ölçüleri (Position measurements of the impact jets on the jet plate relation to each other).

Tablo 1. Re sayıları (Reynolds numbers).

Jet Geometrisi	D _{hjet} (mm)	Plaka Aralığı (mm)	Re Sayısı Debi 20 m ³ /h	Re Sayısı Debi 30 m ³ /h	Re Sayısı Debi 40 m ³ /h	Re Sayısı Debi 50 m ³ /h
Daire Kare Eşkenar Üçgen	2,5	10	2,8x10 ³	4,3x10 ³	5,7x10 ³	7,1x10 ³
	5,0	10	1,4x10 ³	2,1x10 ³	2,8x10 ³	3,6x10 ³
	2,5	15	2,8x10 ³	4,3x10 ³	5,7x10 ³	7,1x10 ³
	5,0	15	1,4x10 ³	2,1x10 ³	2,8x10 ³	3,6x10 ³

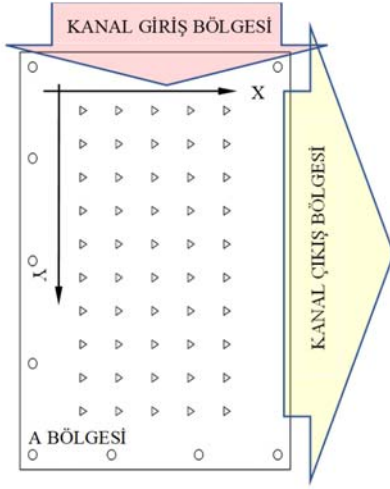
4.1.3. Deneyin belirsizlik analizi (Uncertainty analysis of experiment)

Yerel ısı taşınım katsayısı Eş. 2 ile elde edilebilir. Isı taşınım katsayısının belirsizliği Kine ve McClintock metoduna göre Eş. 3 ile hesaplanabilir [43]. Ölçüm belirsizlikleri termociflerde 0,5°C, sıvı kristal renk tepkisi için 0,2°C ve video görüntü işleme için 0,1 saniye olarak bulunmuştur. Eş.

3 kullanılmasıyla, tek boyutlu bir model için deneysel belirsizlik %5,52 olarak hesaplanmıştır.

$$W_h = \left\{ \left(\frac{\partial W_h}{\partial T_i} W_{T_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_h}{\partial T_r} W_{T_r} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_h}{\partial T_w} W_{T_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial W_h}{\partial t} W_t \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

5. DENEYSEL SONUÇLARIN İNCELENMESİ (ANALYSING OF THE RESULTS)



Şekil 9. Jet-hedef plaka üzerindeki kanal giriş ve çıkış bölgeleri ile özel bölge isimleri
(Names of channel entry and exit and special zone on the jet-target plate).

Deneysel sonuçları, jet-hedef plaka aralığı, jet geometrisi, çapraz akış, Reynolds sayısı ve basınç kayıp etkileri bakımından değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçların anlaşılabilmesi için model üzerinde gösterilen kanal giriş ve çıkış bölgeleri ile özel bölge isimleri Şekil 9'da verilmiştir.

5.1. Jet-Hedef Plaka Aralığının Etkisinin İncelenmesi (Effect of Jet-Target Plate Distance Analysing)

$G=10$ mm jet-hedef plaka aralığına sahip $D_h=2,5$ mm olan daire, kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetlerin dört farklı Reynolds sayısındaki h yüzey ısı taşınım katsayısı dağılımının deneysel sonuçları aşağıda verilmiştir.

$G=15$ mm jet-hedef plaka aralığına sahip $D_h=2,5$ mm olan daire, kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetlerin dört farklı Reynolds sayısındaki, h yüzey ısı taşınım katsayısı dağılımının deneysel sonuçları aşağıda verilmiştir.

Deneysel $G=10$ mm ve $G=15$ mm olan iki jet-hedef plaka aralığında yapılmıştır. Deneysel model üzerinde hava akışı birinci kanala dik olarak girmekte ve 90° hedef plaka yönüne jet plaka üzerindeki çarpmalı jetler yardımıyla yönlendirilmektedir. Sonrasında 90° çıkış yönünde akış gerçekleşmektedir. Bu nedenle jet-hedef plaka aralığının artması, hedef plaka üzerinde akışın yön değişimleri sonucu oluşan durağan bölgenin (A) genişlemesine ve aynı zamanda bu bölgelerde hedef plaka üzerinde ısı taşınımının %40-50 oranında azalmasına neden olduğu anlaşılmıştır.

5.2. Reynolds Sayısının Etkisinin İncelenmesi (Analysis of Reynold Number Effect)

Reynolds sayısı arttıkça; özellikle X doğrultusunda (kanal çıkışı/akış yönünde) ısı taşınım katsayısı sayısal değerleri çok hızlı bir değişim göstermektedir. Y doğrultusunda (kanal

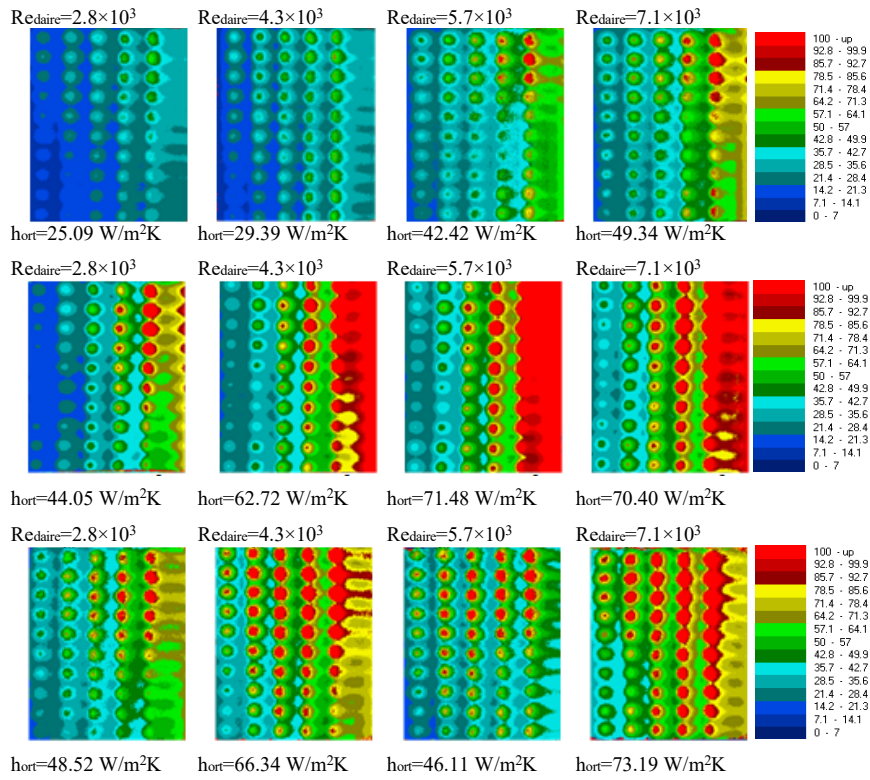
eni boyunca) ise kanal giriş bölgesinden uzaklaştıkça yüksek olan ısı taşınım katsayısı sayısal değerlerinin düştüğü görülmektedir. Kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetli plakalarda meydana gelen ısı taşınım katsayısı sayısal değerlerinin daire tipli çarpmalı jetlere göre daha yüksek olduğu ancak daire tipli çarpmalı jetlerin homojen dağılım gösterdiği görülmüştür (Şekil 12).

Şekil 13'deki grafiklere bakıldığında literatüre uygun şekilde jet merkezine gelen bölgelerde ısı taşınım katsayısının hedef plaka yüzeyi üzerinde en yüksek değerlere ulaştığı ve diğer bölgelerde daha düşük değerlerde olduğu görülmektedir.

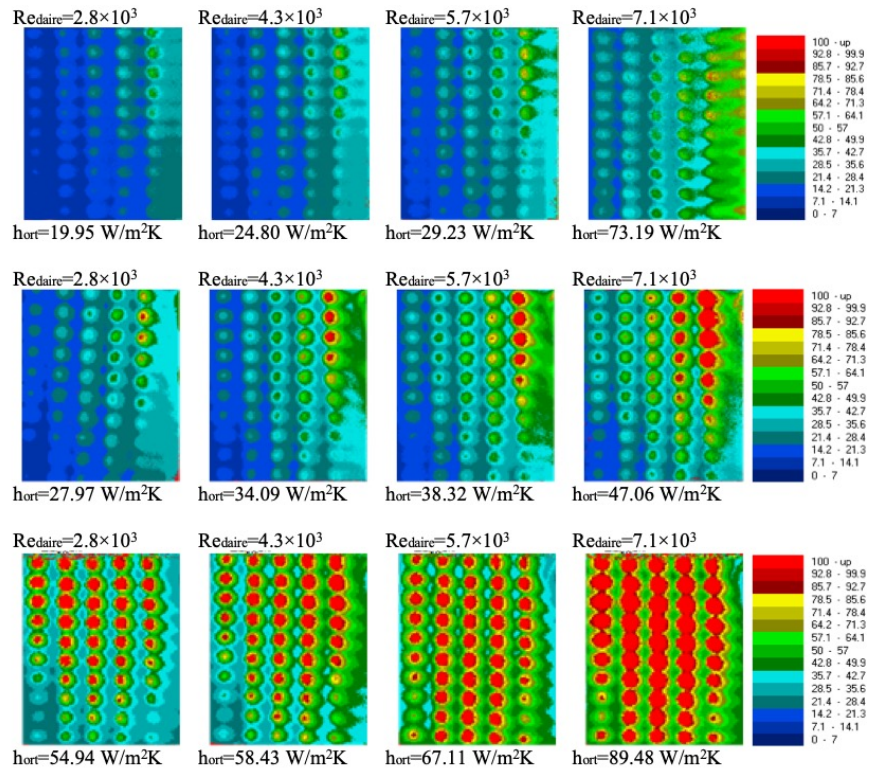
Jetlerin akış doğrultusunda meydana getirdiği ısı taşınım katsayısının; X eksenine akış doğrultusunda arttığı, Y eksenine akış doğrultusunda ise azaldığı görülmektedir. Çarpmalı akışın; X eksenine akış doğrultusunda arttığı ve buna bağlı olarak kanal içerisinde türbülans meydana geldiği ve oluşan türbülans etkisiyle literatüre uygun şekilde ısı taşınım katsayısının yükseldiği anlaşılmaktadır. Y eksenine akış doğrultusunda boyunca akışkan çıkışı olmadığı için ısı taşınım katsayısının azaldığı görülmektedir. X ve Y eksenleri akış doğrultusunda jet tiplerine göre karşılaştırma yapılırsa; en yüksek ısı taşınım katsayısının eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet plakasında meydana geldiği görülmektedir. Jet-hedef plaka aralığının artmasıyla jet merkezlerinde meydana gelen ısı taşınım katsayısı değeri %100'e yakın artmıştır.

5.3. Jet Geometrisinin Etkisinin İncelenmesi (Analysis of Jet Geometry Effect)

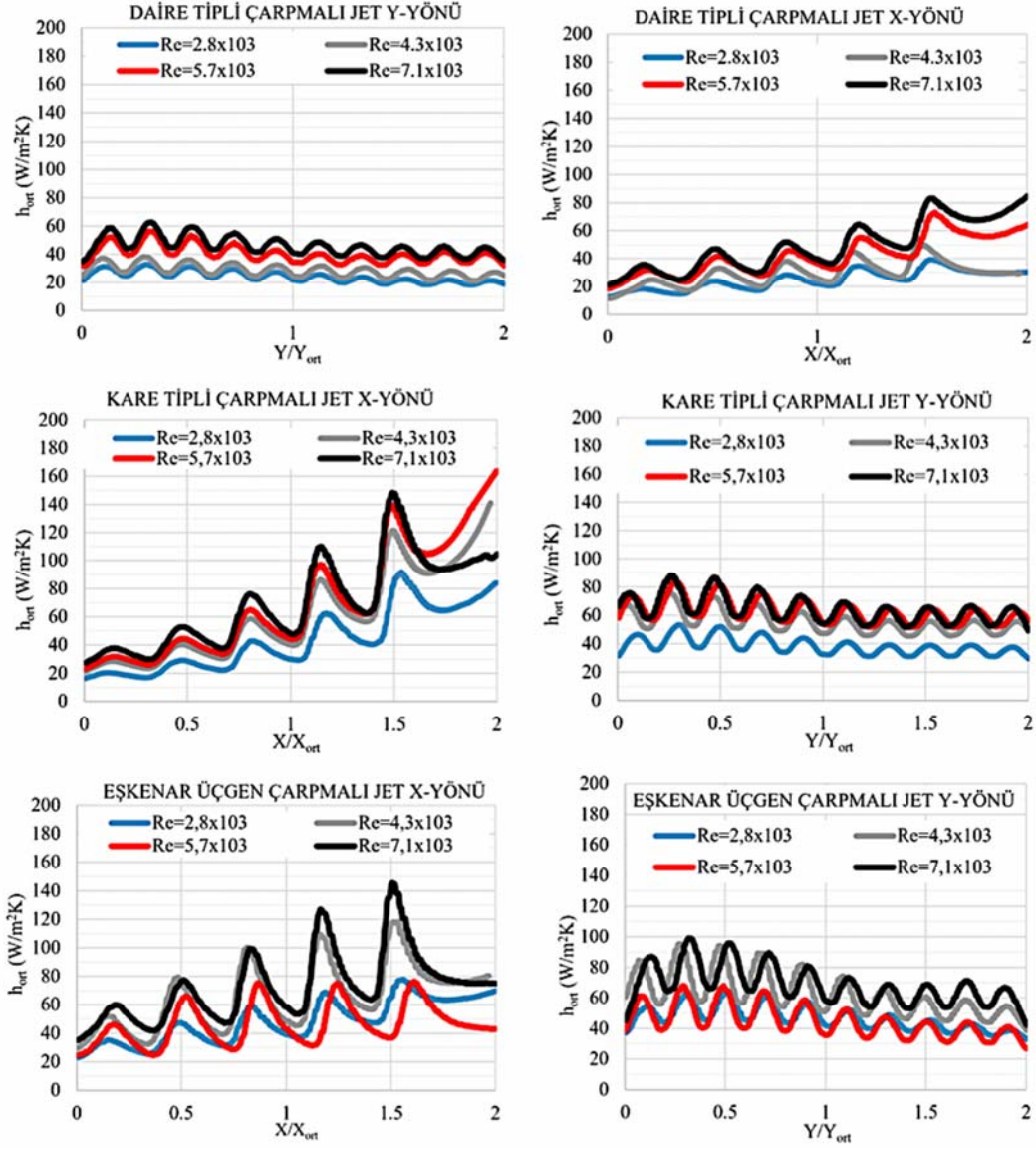
Deneysel çalışmada daire, kare ve eşkenar üçgen (simetrik geometriye sahip) çarpmalı jetler kullanılmıştır. Eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetli plakada daha homojen bir ısı taşınımının meydana geldiği görülmüştür. Bunun nedeni eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetin geometrik yapısı nedeniyle akışın üç ana kola ayrılması ve kanal içerisinde daha düzgün çapraz akışların meydana gelmesidir. Şekil 10 ve Şekil 11'de görülebileceği gibi; eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet geometride ortalama ısı taşınım katsayısının $73,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $89,48 \text{ W/m}^2\text{K}$ olduğu ve diğer jet tiplerinin h_{ort} üstünde meydana geldiği ve bunun da eşkenar üçgenin uç tarafının akış doğrultusunda olmasından kaynaklandığı görülmektedir. Daire ve kare tipli çarpmalı jet geometrilerinde akış yönünde kademeli; genel olarak literatüre uygun şekilde Re sayısının artması ile %25 oranında, ısı taşınım katsayısının arttığı görülmüştür. Şekil 14'de görüldüğü gibi; farklı jet geometrilerinin karşılaştırılmasında, en yüksek ısı taşınımının eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet plakasında meydana geldiği anlaşılmaktadır. ısı taşınımının; kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet plakalarında jet tipinin etkisiyle daha kararsız, daire tipli çarpmalı jet plakasında ise daha homojen dağılım meydana getirdiği görülmektedir. Jet-hedef plaka aralığının artması ile jet tipinin etkisi azalmış ve ısı taşınım değerlerinin homojenliği artmıştır. Hedef plaka yüzeyi üzerindeki ısı taşınım katsayısı eş eğrisi görsellerine göre; türbülanslı akış ile çok sıralı çarpmalı jetlerden gelen çapraz akış etkisinin, jet kaymalarına sebep olduğu görülmektedir.



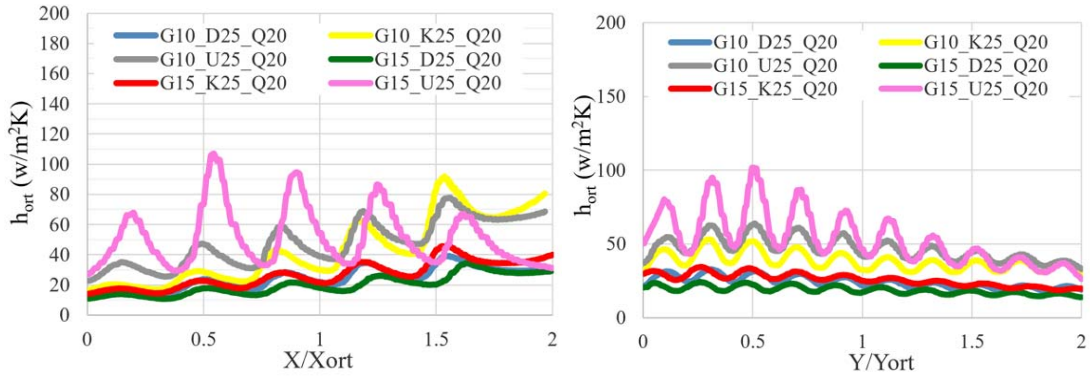
Şekil 10. $G=10$ mm ve $D_h=2,5$ mm olan farklı jet geometrisi ile Re sayılarının hedef plaka yüzündeki h_{ort} dağılımı (h_{ort} distribution of Re numbers on the target plate surface with different jet geometry $G=10$ mm and $D_h=2.5$ mm).



Şekil 11. $G=15$ mm ve $D_h=2,5$ mm olan farklı jet geometrisi ile Re sayılarının hedef plaka yüzündeki h_{ort} dağılımı (h_{ort} distribution of Re numbers on the target plate surface with different jet geometry $G=15$ mm and $D_h=2.5$ mm).



Şekil 12. $G=10$ mm ve $D_h=2,5$ mm olan farklı jet geometrilerin Re sayılarında hedef plaka yüzeyindeki h_{ort} dağılımı (h_{ort} distribution of Re numbers on the target plate surface with different jet geometry $G=10$ mm and $D_h=2.5$ mm).



Şekil 13. 2,5 mm çap, farklı geometri ve plaka aralığında $2,8 \times 10^3$ Re sayısındaki X ve Y doğrultu yönü h_{ort} etkisi (h_{ort} effect on X and Y direction at 2.8×10^3 Re number in 2.5 mm diameter, different geometry and plate range).

Şekil 15’de gösterilen bir jet sırasında meydana gelen ısı taşınım katsayısı değişimi incelendiğinde, kanal çıkış bölgesinde X eksenı yönünde (akış doğrultusunda) arttığı, Y eksenı yönünde (akış doğrultusunda) ise azaldığı görülmektedir.

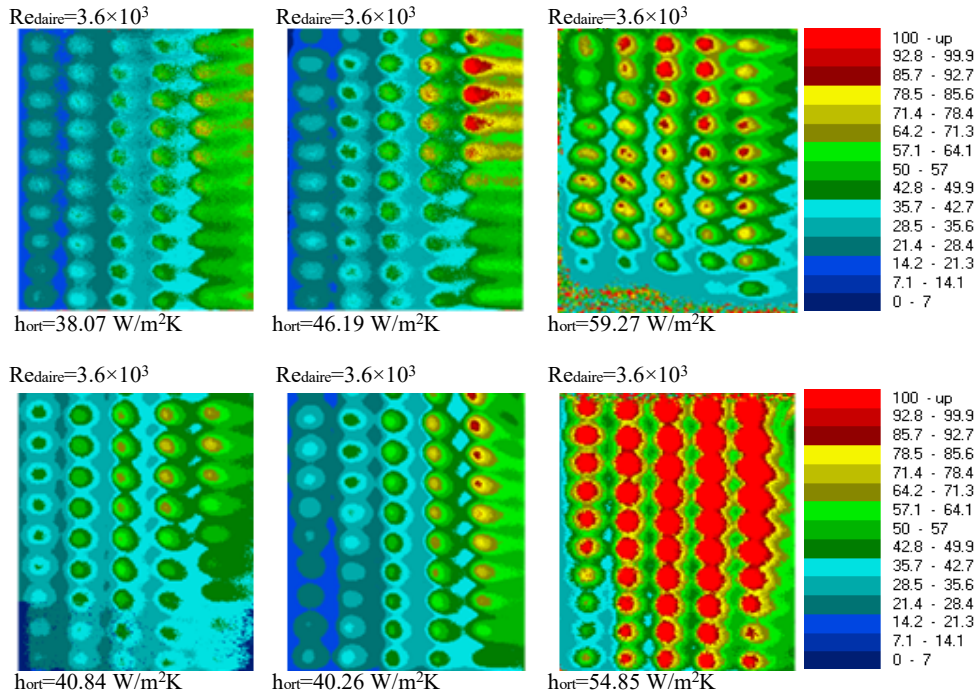
5.4. Çarpaz Akış Etkisi (Effect of Cross Flow)

Kanal içinde meydana gelen çarpaz akış sonucunda tüm jet geometrilerinde Şekil 9’da gösterilen (A) durağan bölgede ısı taşınımının diğer bölgelere göre çok düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun en çok daire tipli çarpmalı jetli çalışmalarda olduğu görülmüştür. Daire tipli çarpmalı jetlerin yüzey üzerinde homojen bir dağılım meydana getirdiği bilinmektedir. Bu durum her yönde çarpaz

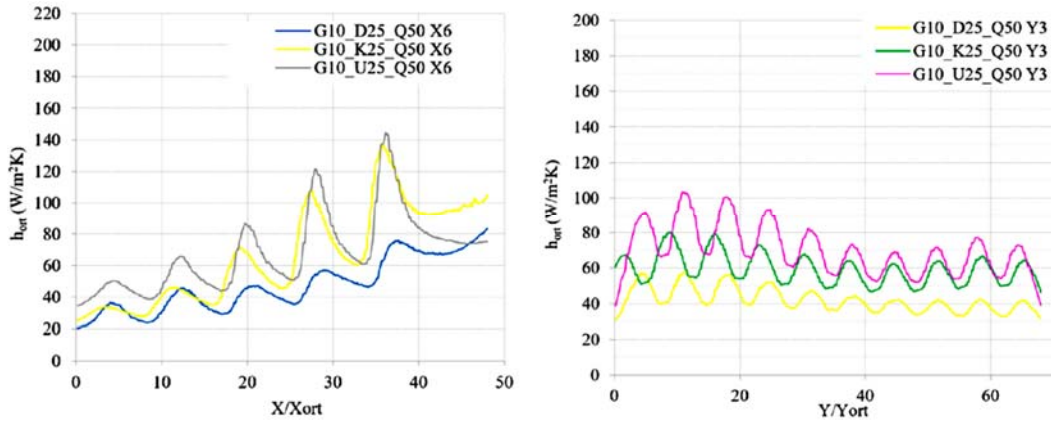
akışın artmasına ve ısı taşınımının homojenleşmesine neden olmaktadır. Jet şekillerine göre inceleme yapıldığında en homojen ısı taşınımının daire tipli çarpmalı jet plakada ancak en yüksek ısı taşınımının eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet plakada meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 16’dan anlaşılacağı gibi çarpaz akış, jet-hedef plaka aralığının artması ile bir farklılık göstermemektedir. Tüm çarpmalı jetlerin hızı kanal boyunca logaritmik olarak azalmaktadır. Hızın azalması ile ısı taşınım katsayısı da azalmaktadır.

5.5. Basınç Kayıp Etkisi (Effect of pressure loss)

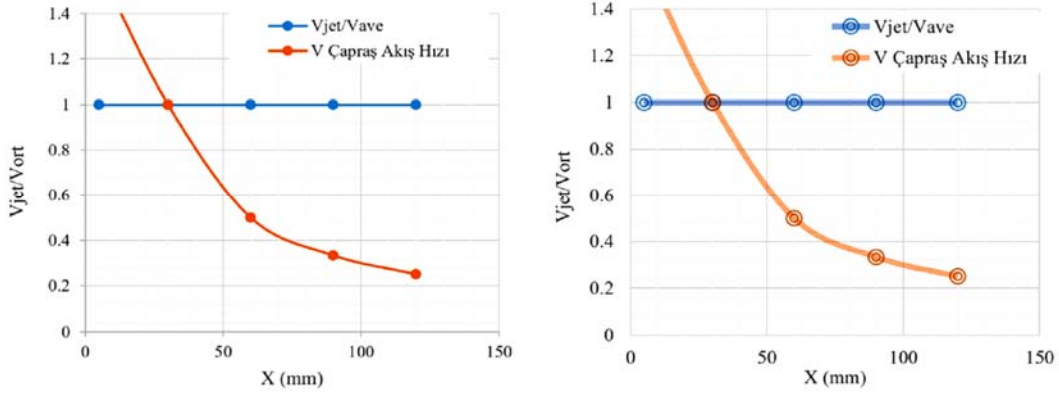
Şekil 17’deki grafiklerden anlaşılacağı gibi daire tipli çarpmalı jetlerdeki kayıplar diğer jet tiplerine göre daha azdır. Jet çapı ve jet-hedef plaka aralığı arttığında basınç



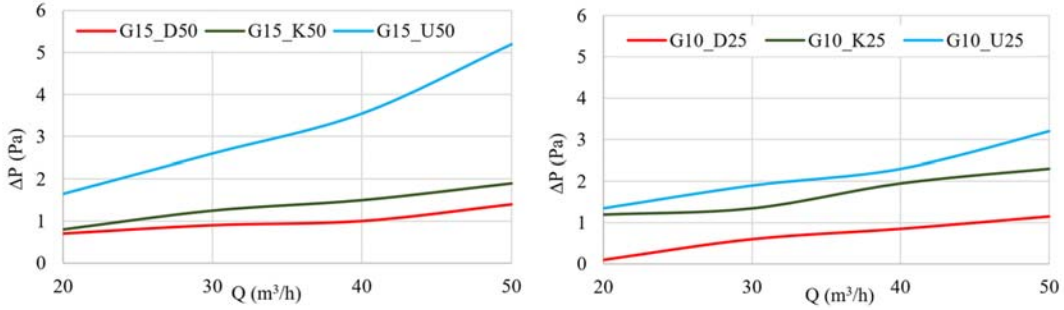
Şekil 14. $G=10$ mm ve 15 mm aralıklarında $D_h=5,0$ mm çap ve $3,6 \times 10^3$ Re sayısında, hedef plaka yüzeyindeki h_{ort} dağılımı (h_{ort} distribution on the target plate surface at $G = 10$ mm and 15 mm intervals, $D_h = 5.0$ mm diameter and 3.6×10^3 Re).



Şekil 15. Bir jet sırasında meydana gelen ısı taşınım katsayısının değişimi (Changing of heat transfer coefficient during jet).



Şekil 16. G10 ve G15'deki hedef-jet plaka aralığında çapraz akışın h_{ort} dağılımına etkisi (Effect of cross flow on h_{ort} distribution in G10 and G15 target-jet plate distance).



Şekil 17. İki farklı jet-hedef plaka aralığında ve üç farklı jet geometrisindeki basınç kaybı grafikleri (Graphs of pressure loss in two target-jet plate distances and three different jet geometry).

kayıpları da artmaktadır. Her iki grafikte görüldüğü gibi; daire tipli çarpmalı jetlerin basınç kayıpları homojen ve birbirine çok yakındır. Debi veya Re sayısı arttıkça basınç kayıpları da artmaktadır. Diğer çarpmalı jet tipleri daire tipli çarpmalı jetler kadar istikrar göstermemektedir. Jet-hedef plaka aralığının 15 mm olduğu grafikte (solda) görüldüğü gibi eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetlerde debi (Re sayısı) artınca basınç kayıplarının %100'e yakın arttığı görülmektedir.

6. SİMGELER (SYMBOLS)

D_{jet}	: Jet çapı, (mm)
D_h	: Jet hidrolik çapı, (mm)
h	: Isı taşınım katsayısı, $W/(m^2K)$
h_{ort}	: Yerel ortalama ısı taşınım katsayısı, W/m^2K
k	: Havanın ısı iletkenlik katsayısı, W/mK
Q_{jet}	: Jet debisi, (m^3/h)
T_i	: Katının ilk sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_r	: Konveksiyon sisteminin referans sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
T_w	: Yarı sonsuz bir katının yüzey sıcaklığı, ($^{\circ}C$)
α	: Isı yayılma katsayısı
V_{jet}	: Jet hızı, (m/h)
W_h	: Isı taşınım katsayısının belirsizliği.

6.1. Kısaltmalar (Abbreviations)

LCIA : Liquid Crystal Imaging Analyser

RGB : Red/Green/Blue (kırmızı, yeşil ve mavi)
TÇS : Türbin çıkış sıcaklığı ($^{\circ}C$)
TGS : Türbin giriş sıcaklığı ($^{\circ}C$)
TLC : Termokromik Sıvı Kristal.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND CONCLUSIONS)

Yapılan deneysel çalışma sonucunda;

- Debi veya Reynolds sayısının artması ile ısı taşınım katsayısı artmaktadır.
- Jet hidrolik çapları büyüdükçe kanal içinde çapraz akışın azaldığı, hedef plaka yüzeyi üzerinde durağan bölge alanlarının arttığı tespit edilmiştir.
- Jet-hedef plaka aralığının artması ile ısı taşınım katsayısının azaldığı ve durağan bölge alanlarında ise arttığı gözlenmiştir. Jet-hedef plaka aralığının artması ile ısı taşınım katsayısı dağılımının daire tipli çarpmalı jetlerde kare ve eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetlere göre daha homojen olduğu görülmektedir. Kanal içindeki çapraz akışta, jet-hedef plaka aralığının artırılmasıyla birlikte ısı taşınımının azaldığı ancak genel olarak tüm jet geometrilerinde kanal çıkışına doğru ısı taşınımının düştüğü anlaşılmıştır.
- Jet çapı, jet-hedef plaka aralıkları ve Reynolds sayısının artması, basınç kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Minimum basınç kaybının daire tipli çarpmalı jet

çalışmalarında meydana geldiği görülmüştür. Hedef plakadaki homojenliğe göre; genel olarak en verimli jet geometrisinin 2,5 mm çaplı daire tipli çarpmalı jetlerde olduğu görülmüştür.

- Tasarım bakımından; düşük Reynolds sayılarında küçük çaplı daire tipli çarpmalı jetlerin, yüksek Reynolds sayılarında ise eşkenar üçgen tipli çarpmalı jetlerin kullanılmasının uygun olacağı tespit edilmiştir.
- Deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarla; en verimli çarpmalı jet geometrisinin, en az basınç kaybının ve çapraz akış etkisinin ez az olduğu $D_h=2,5$ mm daire tipli çarpmalı jet çalışmalarında meydana geldiği görülmüştür. Eşkenar üçgen tipli çarpmalı jet çalışmalarında, jet-hedef yüzey aralığı 10 mm olan modelde çapraz akışın etkisi nedeniyle en yüksek yüzey ısı taşınımının meydana geldiği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Han, J. C., Advanced Cooling in Gas Turbines 2016 Max Jakob Memorial Award Paper, Journal of Heat Transfer, 140 (11), 113001, 2018.
2. Bouchez, J. P., Goldstein, R. J., Impingement Cooling From a Circular Jet in a Cross Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 18 (6), 719-730, 1975.
3. Florschuetz, L. W., Berry, R. A., Metzger, D. E., Periodic Streamwise Variations of Heat Transfer Coefficients for Inline and Staggered Arrays of Circular Jets with Crossflow of Spent Air, Journal of Heat Transfer, 102 (1), 132-137, 1980.
4. Goldstein R. J., Behbahani A. I., Impingement of a Circular Jet with and Without Cross Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, 25 (9), 1377-1382, 1982.
5. Viskanta, R., Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets, Experimental Thermal and Fluid Science, 6 (2), 111-134, 1993.
6. Lytle, D., Webb, B. W., Air Jet Impingement Heat Transfer at Low Nozzle-Plate Spacings, International Journal of Heat Mass Transfer, 37 (12), 1687-1697, 1994.
7. Yan, X., Saniei, N., Heat Transfer From an Obliquely Impinging Circular Air Jet to a Flat Plate, International Journal of Heat and Fluid Flow, 18 (6), 591-599, 1997.
8. Azad, G. S., Huang, Y., Han, J. C., Impingement Heat Transfer on Dimpled Surfaces Using a Transient Liquid Crystal Technique, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 14 (2)186-193, 2000.
9. Tanda, G., Heat Transfer and Pressure Drop in a Rectangular Channel with Diamond-Shaped Elements, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (18), 3529-3541, 2001.
10. Yu, Y., Yen, C. H., Shih, T. P., Chyu, M. K., Gogineni, S., Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer Coefficient Distributions Around Diffusion Shaped Holes, Journal of Heat Transfer, 124 (5), 820-827, 2002.
11. Al-aqal, O. M., Heat Transfer Distributions on the Walls of a Narrow Channel with Jet Impingement and Cross Flow, Doctoral Dissertation, University of Pittsburgh, USA, 2003.
12. Ho, C. M., Gutmark, E., Vortex Induction and Mass Entrainment in a Small-Aspect-Ratio Elliptic Jet, Journal of Fluid Mechanics, 179, 383-405, 1987.
13. Hussain, F., Husain, H. S., Elliptic Jets Part I Characteristics of Unexcited and Excited Jets, Journal of Fluid Mechanics, 208, 257-320, 1989.
14. Sang-Joon, L., Jung-Ho, L., Dae-Hee, L., Local Heat Transfer Measurements From an Elliptic Jet Impinging on a Flat Plate Using Liquid Crystal, International Journal Heat Mass Transfer, 37 (6), 967-976, 1994.
15. Lee, J., Lee, S. J., The Effect of Nozzle Aspect Ratio on Stagnation Region Heat Transfer Characteristics of Elliptic Impinging Jet, International Journal Heat Mass Transfer, 43, 555-575, 2000.
16. Yan, W. M., Mei, S. C., Liu, H. C., Soong, C. Y., Yang, W. J., Measurement of Detailed Heat Transfer on a Surface Under Arrays of Impinging Elliptic Jets By a Transient Liquid Crystal Technique, International Journal Heat Mass Transfer, 47 (24), 5235-5245, 2004.
17. Albeirutty, M. H., Alghamdi, A. S., Najjar, Y. S., Heat Transfer Analysis for a Multistage Gas Turbine Using Different Blade-Cooling Schemes, Applied Thermal Engineering, 24 (4), 563-577, 2004.
18. Wang, S. J., Mujumdar, A. S., A Comparative Study of Five Low Reynolds Number $k-\epsilon$ Models for Impingement Heat Transfer, Applied Thermal Engineering, 25 (1), 31-44, 2005.
19. San, J. Y., Lai, M. D., Optimum Jet-to-Jet Spacing of Heat Transfer for Staggered Arrays of Impinging Air Jets, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44 (21), 3997-4007, 2001.
20. San, J. Y., Shiao, W. Z., Effects of Jet Plate Size and Plate Spacing on the Stagnation Nusselt Number for a Confined Circular Air Jet Impinging on a Flat Surface, International Journal of Heat and Mass Transfer, 49 (19-20), 3477-3486, 2006.
21. San, J. Y., Tsou, Y. M., Chen, Z. C., Impingement Heat Transfer of Staggered Arrays of Air Jets Confined in a Channel, International Journal of Heat and Mass Transfer 50 (19-20), 3718-3727, 2007.
22. Uysal, U., Li, P. W., Chyu, M. K., Cunha, F. J., Heat Transfer on Internal Surfaces of a Duct Subjected to Impingement of a Jet Array With Varying Jet Hole-Size and Spacing, In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, 47268, 141-150, 2005.
23. Uysal, U., Effect of Jet Diameter on Heat Transfer in a Two-Pass Channel, Journal of Enhanced Heat Transfer, 20 (3), 277-287, 2013.
24. Uysal, Ü., Korkmaz, Y., Sözbir, N., Hırca, A. H., Gaz Türbini Kanatları Kanallarında Soğutma Performansının Araştırılması, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 7 (2), 1-8, 2014.
25. Uysal, Ü., Sözbir, M., Çoklu Çarpan Jetli Dikdörtgen Kanalda Yüzey Isı Geçişinin Deneysel Araştırılması, Academic Perspective Procedia, 1 (1), 852-861, 2018.
26. Tepe, A. Ü., Arslan, K., Yetişken Y., Uysal, Ü., Effects of Extended Jet Holes to Heat Transfer and Flow

- Characteristics of the Jet Impingement Cooling, *Journal of Heat Transfer*, 141 (8), 2019.
27. Uysal, U., Taymaz, I., Experimental Investigation of Heat Transfer on Trapezoidal Channel with Three Passes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 140 (3), 953-964, 2020.
 28. Xing, Y., Weigand, B., Experimental Investigation on Staggered Impingement Heat Transfer on a Rib Roughened Plate with Different Crossflow Schemes, In *Turbo Expo, Power for Land, Sea, and Air*, 43994, 1-11, 2010.
 29. Lamont, J. A., Ekkad, S. V., Alvin, M. A., Effects of Rotation on Heat Transfer for a Single Row Jet Impingement Array With Crossflow, *J. Heat Transfer* 134 (8), 2012.
 30. Levy, Y., Rao, A. G., Erenburg, V., Sherbaum, V. Gaissinski, I., Krapp, V., Pressure Losses for Jet Array Impingement With Crossflow, In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 44700, 139-149, 2012.
 31. Miller, N., Siw, S. C., Chyu, M. K., Alvin, M. A., Effects of Jet Diameter and Surface Roughness on Internal Cooling with Single Array of Jets, In *Turbo Expo, Power for Land, Sea, and Air*, 55140, V03AT12A038, 2013.
 32. Terzis, A., Wagner, G., von Wolfersdorf, J., Ott, P., Weigand, B., Hole Staggering Effect on the Cooling Performance of Narrow Impingement Channels Using the Transient Liquid Crystal Technique, *Journal of Heat Transfer*, 136 (7), 2014.
 33. Tan, X. M., Zhang, J. Z., Yong S., Xie, G. N., An Experimental Investigation on Comparison of Synthetic and Continuous Jets Impingement Heat Transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 227-238, 2015.
 34. Lucìa, S., Terzis, A., Ott, P., Cochet, M., Heat Transfer Characteristics of High Crossflow Impingement Channels: Effect of Number of Holes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A, Journal of Power and Energy*, 229 (5), 560-568, 2015.
 35. Singh, P., Ravi, B. V., Ekkad, S. V., Experimental and Numerical Study of Heat Transfer Due to Developing Flow in a Two-Pass Rib Roughened Square Duct, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 1245-1256, 2016.
 36. Zhou, J., Wang, X., Li, J., Influences of Effusion Hole Diameter on Impingement/Effusion Cooling Performance at Turbine Blade Leading Edge, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 134, 1101-1118, 2019.
 37. Lak A., Çalışır T., Bařkaya ř., Numerical Investigation of Flow and Heat Transfer on Smooth Surface Using Inclined Impinging Jet, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 165-176, 2019.
 38. Lak, A., Çalışır T., Bařkaya ř., Flow and Heat Transfer Characteristics of Inclined Jet Impingement on a Flat Plate, *Politeknik Dergisi*, 23 (3), 697-706, 2020.
 39. Koç İ., Experimental Investigation of Velocity and Turbulence Variations in Inclined Jet in Cross-Flow, *Gazi University Journal of Science*, GUJ Sci 30 (3), 63-77, 2017.
 40. Demircan, T., Özdemir E., Askeri Sistemlerin Yüksek Sıcaklıklara Çıkan Devre Elemanlarının Etkin Olarak Soğutulması, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 18, 1, 2019.
 41. Kılıç M., Ozcan O., A Numerical Investigation of Combined Effect of Nanofluids and Impinging jets for Different Parameter, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (3), 1501-1515, 2019.
 42. Chyu, M. K., Ding, H., Downs, J. P., Soechting, F. O., Determination of Local Heat Transfer Coefficient Based on Bulk Mean Temperature Using a Transient Liquid Crystals Techniques, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 18, 142-149, 1998.
 43. Kline, S. J., McClintock, F. A., Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, *Mechanical Engineering (Am. Soc. Mech. Eng.)*, V75 (1), 3-8, 1953.