

Çok Çarpan Jetli Kanalda Isı Geçişinin Sayısal Modellenmesi

*¹Ünal UYSAL and ²A.Hakan HIRCA

*¹ Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 54187 Serdivan/SAKARYA
Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği ABD, 54187 Serdivan/SAKARYA

Özet

Günümüzde, malzeme teknolojisi oldukça ileri düzeylere ulaşmasına rağmen gaz türbinlerinin giriş sıcaklıkları, kanat malzemelerinin dayanma sıcaklıklarından çok daha yüksektir. Bu nedenle, ileri malzeme teknolojisi ile üretilen türbin kanatlarının da mutlak surette soğutulması gerekmektedir. Soğutmanın bu denli önemli olması, gaz türbini üreticilerini özellikle kanat soğutma teknolojileri konusunda yoğun araştırmalar yapmaya yöneltmiştir. Bu konuda konveksiyon yoluyla soğutma ve çarpmalı jet soğutma gibi iç soğutma yöntemleri, film soğutma ve transprasyon soğutma gibi dıştan soğutma yöntemleri başlıca gaz türbin kanatçıklarının soğutulmasında kullanılan metotlardır.

Pittsburgh Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Dr. Al-aqal [1] tarafından Sıvı Kristal Termografisi (TLC) yöntemi kullanılarak yapılan çalışmada 6 sıralı her bir sıra için çapı (D) 9,525 mm olan tek çarpan jetli, 12 sıralı her bir sıra için çapı (D) 4,763 mm olan çift çarpan jetli ve 18 sıralı her bir sıra için çapı (D) 3,18 mm olan üç çarpan jete sahip üç farklı jet tabaka modeli, her bir modeli 12,7 mm, 19,05 mm ve 25,4 mm olan üç farklı jet-hedef plaka açıklığına (H) sahip modellerin her biri 22,2 m/s, 28,5 m/s ve 42,8 m/s olan üç farklı giriş hızında kullanılarak yerel ve ortalama ısı geçiş katsayısının hedef plaka üzerindeki dağılımı deneysel olarak incelemiştir [1].

Bu çalışmada, deneysel çalışmanın yapıldığı model ve sınır şartları, SST (Shear Stress Transport) k- ω türbülans modeli alınarak, ticari hesaplamalı akışkanlar mekaniği programı olan CRADLE Sc/Tetra kullanılarak sayısal modeldeki hedef plaka yüzeylerindeki ısı geçiş katsayısı dağılımı hesaplanmış ve deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanarak modelin ve HAD programının sonuçlara yaklaşımı araştırılmıştır.

Key words: Isı transferi, türbin kanatlarının soğutulması, çarpmalı jet, HAD, zorlanmış ısı geçişi

Numerical Modeling Heat Transfer in Channel with Multi Impinging Jets

Abstract

Nowadays, although the material technology quite reach the inlet temperature of the advanced gas turbine is higher than the withstand temperature of the flap material. Therefore, it is necessary to cool the turbine blades produced in absolute terms of the material technology. This much is important cooling has led to extensive research in gas turbine cooling technology producers, especially the blades. Internal cooling methods such as cooling via convection cooling and impingement, film cooling and external cooling methods such as transpiration cooling methods are mainly used to cool the gas turbine blades.

In this study, University of Pittsburgh's Department of Mechanical Engineering the Thermochromic Liquid Crystals (TLC) thermal method was performed by Dr. Al-aqal [1] and use the experimental jet impingement models in his study; 6 rows with the single jet for each row and jet diameter (D) 9,525 mm for each jet, 12 rows with the double jet for each row and jet diameter (D) 4,763 mm for each jet, 18 rows with the triple jet for each row and jet diameter (D) 3,18 mm for each jet. This each models tested for three different target plate distance (H) 12,7 mm, 19,05 mm and 25,4 mm with three different inlet velocities 22,2 m/s, 28,5 m/s and 42,8 m/s to investigate effects on local and averaged local heat transfer

with experimental method

In this study, experimental models and boundary conditions used same for the numerical modelling study to investigate the heat transfer characteristics on surfaces. Calculation made by SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ turbulence model using CRADLE Sc/Tetra which is commercial computational fluid dynamics program. Then the obtained numerical results are compared with experimental study results and CFD programs approach investigated.

Key words: Heat transfer, turbine blade cooling, impingement jets, CFD, forced convection

1. Giriş

Gaz türbinleri üzerinde sınırları zorlayan bilimsel çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Bu çalışmalarda türbin kanatlarında kullanılan geçiş parçaları, geçişli kanalları ve bunlarda kullanılan çarpmalı jet geometrileri, türbin kanat malzemesinin iyileştirilmesi, kanat kaplamaları ve kanat soğutma yöntemleri konuları üzerinde deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı; çoklu çarpan jetli, değişken çaplı çarpan jetli, jet-hedef plaka mesafesi konularında deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda jet çapının etkisi, jet-hedef plaka arasındaki mesafenin etkisi ve jet dizilimi hakkında önemli parametrik değerler bulunmuştur [2,3,4]. Isı geçiş katsayısını arttırmak için kanal içine dikdörtgen ve V rip türbülötör yerleştirilmiş ve bu türbülötörlerin etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Türbülötör boyutları ve V rip açı değerleri konusunda çeşitli önerilerde bulunmuşlardır. [5,6]. Bazı çalışmalarda ise jet ve rip türbülötörlerin yerine ince pin-finlerin kullanılması sonucu ısı geçiş katsayısının artırılması araştırılmıştır [7].

Termal sıvı kristalleri metodu kullanıldığında hacim sıcaklığının bilinmesi gereklidir. Bu sıcaklıktan faydalanarak termal sıvı kristal tekniği kullanılarak bölgesel ısı transferi katsayısı tanımlanmıştır [8,9,10].

Konuyla ilgili yapılan sayısal çalışmalarda, öncelikle jet şekli, tekli ve çoklu çarpan halleri, jet boyutuyla ve jet dizilimi ile ilgili oldukları görülmüştür. Yapılan çalışmalarda deneysel çalışmalara paralel sonuçlar elde edilmiştir [11,12,13,14]. Çalışmalarda çeşitli türbülanslı yarık jetleri standart $k-\epsilon$ ve RMS modelleri kullanarak inceledikleri çalışmada her iki modelinde ısı transferini belirlemede FLUENT programı kullanılmıştır [15,16,17].

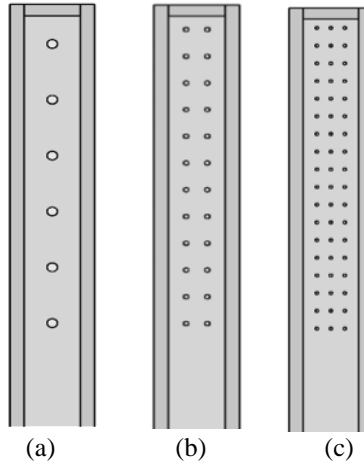
Pittsburgh Üniversitesinde Dr. Osama Al-aqal tarafından Sıvı Kristal Termografisi (TLC) yöntemiyle yapılan deneysel çalışmada, tek sıralı, iki sıralı, üç sıralı çarpmalı jet kullanılarak soğutulan dikdörtgen kesitli dar bir kanalın hedef plakasında meydana gelen ısı geçişi katsayısı dağılımı bulunmuştur [1].

Bu çalışma jet büyüklüğü, jet sayısı, jet ile hedef plaka arasındaki mesafenin çarpaz akışlı çarpmalı jetlerdeki etkisini deneysel sonuçlarla kıyaslayarak görmek için tasarlandı. Yapılan tasarımda jet plakası ile ısı transfer katsayısının incelendiği hedef plaka deney düzeneğindeki gibi birbirine paralel olarak konumlandırılmıştır. Havanın jet nozullarından giriş yaptıktan sonra mevcut olan tek çıkıştan geçişiyle birlikte iki plakanın oluşturduğu akış alanındaki ısı transfer katsayısı değişim etkileri incelenmiştir. TLC metoduyla ölçüm yapılan deney düzenekleri, deneysel yaklaşımdaki

yüzey tekniğini yansıtabilmesi ve duvara yakın bölgelerde daha iyi sonuçlar vermesinden dolayı teorik analizlerinde SST (Shear Stress Transformation) k-omega modeli ile deneysel çalışmada kullanılan model temel alınarak, CRADLE SC/Tetra programı kullanılarak sayısal model oluşturulmuş ve deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır.

2. Problemin Genel Tanımı

Toplam hidrolik çapları eşit olmak şartıyla üç farklı deneysel model oluşturulmuştur. Geometrik modellere ait kesit görünümleri Şekil 1.(a), (b) ve (c)'de gösterilmiştir.



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. (a).tek sıralı jet plakalı, (b). İki sıralı jet plakalı (c). üç sıralı jet plakası

Bu çalışmada, TLC yöntemiyle yapılan deneysel çalışmada kullanılan fiziksel model geometrisi esas alınmıştır. Deneysel çalışmada çarpmalı jet soğutma tekniğinin kullanılması ile elde edilen hedef plaka üzerindeki ısı geçiş katsayısı dağılımları CRADLE Sc/Tetra programı kullanılarak sayısal olarak yeniden hesaplanmıştır. Bulunan ısı geçişi katsayısı dağılımları deneysel olarak elde edilen ısı geçiş katsayısı dağılımları ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada üç farklı geometrik model, üç farklı Reynolds sayısı ve üç farklı kanal aralığı için yapılan deneysel çalışma sonuçları ile sayısal çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır.

Sayısal çalışma kısmında, çarpan akışkan jetleriyle oluşturulan ısı transferini ve akışı etkileyen, jet çıkış hızı, jet ile plaka arasındaki mesafe, jet çıkış geometrisi ve özellikle düşük jet hızları ve plaka ile jet arasındaki sıcaklık farklarının yüksek olduğu durumlarda ortaya çıkan doğal taşınım etkileri incelenmiştir. Çarpma ve jet plakalarının boyutları 495.30x50,8 mm'dir. Kullanılan Reynolds sayıları, jet-plaka mesafeleri ve uygulanan ısı akıları çözülen probleme bağlı olarak değişiklikler göstermiştir. Doğal taşınım etkilerinin incelendiği simülasyonlar dışında ısı akıları, her şart altında jet ile plaka arasındaki sıcaklık farkını sabit tutacak şekilde uygulanmıştır. Böylece termofiziksel özelliklerdeki değişim ve doğal taşınım etkileri ihmal edilebilir boyutlara indirgenmiştir. Sayısal çözüm alanındaki Şekil 3.1.'de gösterilen çözüm alanı kullanılarak elde edilmiştir. Girişteki hava jetinin sıcaklığı bütün çözümlerde 20 °C olarak alınmış ve girişte bu sıcaklıktaki termofiziksel özellikler kullanılmıştır. Buna göre yoğunluk $\rho = 1,189 \text{ kg/m}^3$, özgül ısı $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$, ısı

iletkenlik katsayısı $k = 0,0258 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, kinematik viskozite $\nu = 1,544 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, genleşme katsayısı $\beta = 0,003410 \text{ 1/K}$ ve Prandtl sayısı $Pr = 0,712$ olarak alınmıştır.

Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği ve CRADLE Paket Programı

Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği akıştaki diferansiyel denklemlerin analitik veya sayısal çözümlerini tanımlamaktadır. Akışa ait, akım çizgileri, ısı transfer katsayısının dağılımı, hız ve basınç dağılımı gibi ayrıntılı bileşenleri elde etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılmaktadır.

Analizlerde CRADLE programına ait SC/Tetra paketinden kullanılmıştır. SC/Tetra yapılandırılmamış çözüm ağı (tetrahedron, pentahedron ve hexahedron) kullanan ve hepsi bir arada özelliğine sahip bir genel amaçlı Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yazılımıdır.

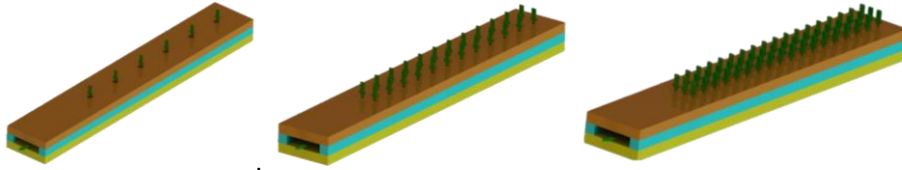
SC/Tetra karmaşık geometrilerin kolay hesaplanabilmesini özel hedef olarak gören bir kullanılabilirlik odaklı yazılımdır. Bu program hem otomatik çözüm ağı oluşumu hem de kurulum işlemini adım adım gösteren Wizard tabanlı bir ara yüz sağlamaktadır. Standart akışkan akışı ve ısı transferi uygulamaları simülasyonlarına ek olarak, SC/Tetra yazılımı ile Kimyasal Reaksiyon, hareket eden ve dönen sınırlar (ALE) için "Arbitrary Lagrangian Eulerian" ve Akustik gibi çeşitli olayların hesaplamaları da yapılabilmektedir. Otomotiv aerodinamiği, kanal ve tesisat, fan, pompa, turbo makineler ve termal/akışkan uygulamalarında sıkça kullanılmaktadır.

Tablo 1. Analizi koşturulacak modeller

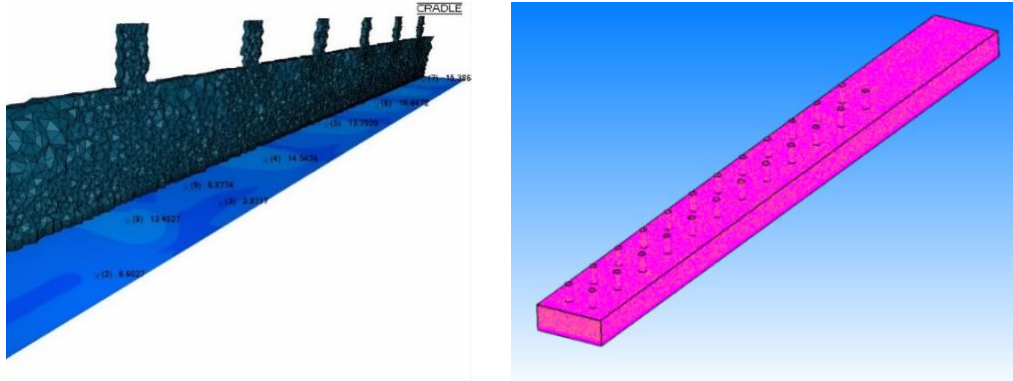
Hat Açıklığı	6 Sıralı Model	12 Sıralı Model	18 Sıralı Model
12,7 mm	Reynolds: 14×10^3	Reynolds: 7×10^3	Reynolds: 5×10^3
12,7 mm	Reynolds: 18×10^3	Reynolds: 9×10^3	Reynolds: 6×10^3
12,7 mm	Reynolds: 27×10^3	Reynolds: 14×10^3	Reynolds: 9×10^3
19,05 mm	Reynolds: 14×10^3	Reynolds: 7×10^3	Reynolds: 5×10^3
19,05 mm	Reynolds: 18×10^3	Reynolds: 9×10^3	Reynolds: 6×10^3
19,05 mm	Reynolds: 27×10^3	Reynolds: 14×10^3	Reynolds: 9×10^3
25,4 mm	Reynolds: 14×10^3	Reynolds: 7×10^3	Reynolds: 5×10^3
25,4 mm	Reynolds: 18×10^3	Reynolds: 9×10^3	Reynolds: 6×10^3
25,4 mm	Reynolds: 27×10^3	Reynolds: 14×10^3	Reynolds: 9×10^3

Genel olarak, CRADLE kullanılarak sonlu elemanlar analizleri üç kademe gerçekleştirilir: Preprocessing, solution ve postprocessing.

Bu çalışmada, önce Şekil 3.4., Şekil 3.5. ve Şekil 3.6'da yer alan modellere ait Solidworks programında geometri oluşturulmuştur. Şekil 3.4.'de Solidworks programında çizilen, üzerinde altı adet hava girişi ve tek bir hava çıkışı bulunan dikdörtgenler prizması şeklindeki model ve boyutları görülmektedir. Burada iki plaka arasındaki mesafe (G) 12,7 mm, iki jet merkezi arasındaki mesafe ise $S1 = 4D_{jet}$ 'tir. Diğer iki geometride de iki plaka arasındaki mesafe 19,05 mm ve 25,4 mm'dir. İki jet merkezi arasındaki boylamasına mesafe ise $S2 = 6,5D_{jet}$ 'tir.



Şekil 2 (a). Tek sıralı 6 jetli model (b). İki sıralı 12 jetli model (c) üç sıralı 18 jetli model



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Modelin çözüm ağı yapısı ve meshlenmiş model ve mesh kalitesi görülmektedir.

Sınır Şartlar

Bu çalışmada giriş sınır şartları için hız giriş sınır şartı ve basınç giriş şartı, çıkış sınır şartı olarak basınç çıkış şartı seçilmiştir. Giriş şartları için seçilen hız giriş sınır şartında girişlerdeki mutlak hızın büyüklüğü, türbülans yoğunluğu ve sıcaklık parametreleri girilmiştir. Oluşturulan modeldeki eleman sayısını azaltmak ve iterasyonlardaki geçen süreyi azaltmak için simetri düzlemi oluşturulmuştur. Tablo 1’de 6 sıralı model için giriş sınır şartları hız bileşenleri ve Reynolds sayıları gösterilmektedir. Modelde ortalama eleman boyutu 0,289’dur.

Tablo 2. Altı sıralı model için sınır şartları

Re	D(m)	v (m ² /sn)	V (m/sn)	H (mm)
14x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	22,20	12,7
18x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	28,55	12,7
27x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	42,82	12,7
14x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	22,20	19,05
18x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	28,55	19,05
27x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	42,82	19,05
14x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	22,20	25,4
18x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	28,55	25,4
27x10 ³	9,526 x10 ³	1,511 x10 ⁴	42,82	25,4

Kabuller

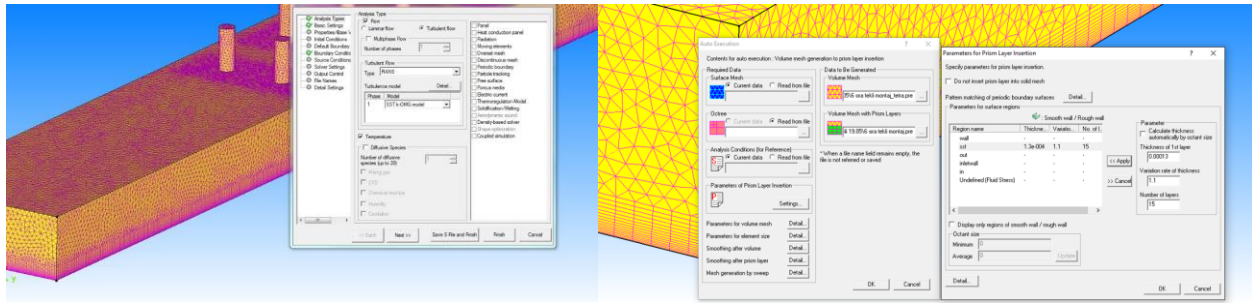
Akış daimidir, Akış üç boyutludur, Akış türbülanslıdır ve zamana bağlı olarak değişmektedir, Akışkan giriş ve çıkış sıcaklığı zamana bağlı olarak değişmektedir, Akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiştir, Giriş ve çıkış türbülans yoğunluğu %5 kabul edilmiştir, Model içinde herhangi bir ısı üretici yoktur, Isı transferinin çeperlerden yapıldığı kabul edilmiştir.

Yapılan çalışmada türbülans modelinin seçimi

Mevcut çalışmada kullanılmak üzere, gerek bugüne kadar birçok alanda tatminkâr sonuçlar verdiği ispatlanmış olması, gerekse CRADLE programında uzun süredir kullanılan bir model olması ve gerekse önceden jetlerle ilgili uygulamalarda kısmen iyi sonuçlar vermesi sebebiyle $k-\omega$ modeli seçilmiştir.

Teorik Analizin Uygulanması

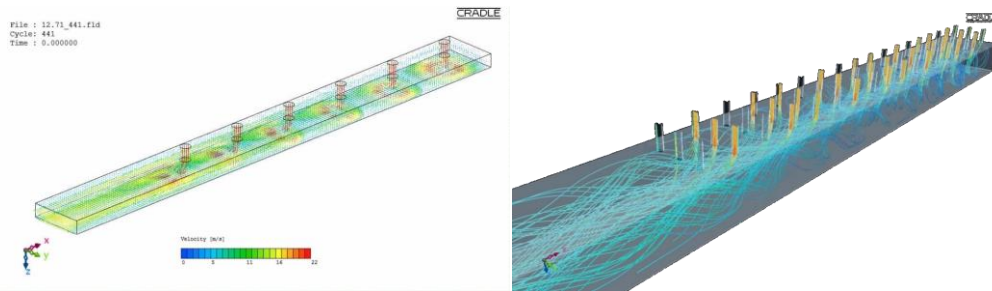
Üç boyutlu ve daimi akışın olduğu kanalda; arka duvar, inlet (giriş), jet duvar, kanat default (yan duvarlar), ön duvar ve outlet (çıkış) olmak üzere altı adet bölüm oluşturulmuştur. Şekil 3.9.'da oluşturulan bölümler ile birlikte hava giriş ve çıkış yerleri de görülmektedir. Daha sonra oluşturulan her bir alan için giriş, çıkış ve duvar olmak üzere domain (alan) tipi belirlenmiştir. Ardından ilk olarak benzetim tipi (simulation type) tanımlanmıştır. Bunun için öncelikle uygulanacak çözüm şekline (kararsız (transient)/kararlı (steady state)) karar verilmiştir. Akışkan giriş sıcaklıklarının zamana bağlı olarak değiştiği kabulü yapıldığı için kararsız (transient) çözüm yapılmıştır. Şekil 4.10.'da benzetim şartları ve türbülans modeli olarak SST $k-\omega$ modeli tanımlanmıştır. Simülasyon tipi tanımlandıktan sonra kanalın (kanat) genel özellikleri ve akışkan modeli tanımlanmıştır. Şekil 3.10.'da kanada ait tanımlamalar ve arka duvar olarak tanımlanmış olan jet plaka için tanımlanmış sınır şartları görülmektedir.



Şekil 4. Analiz tipinin seçilmesi ve alan tanımlamaları yapılması

Jet duvar için kenar kısımlar adyabatik olarak verilmiştir. Giriş için hız sınır şartı ve %5 türbülans yoğunluğu (giriş türbülans yoğunluğu hakkında bilgi sahibi olunmadığından) şartı tanımlanarak Şekil 3.11.'da gösterilmiştir.

Akışkan sıcaklığı zamanla değişkenlik gösterdiği için kararsız (transient) çözüm seçilmiştir. Toplam zaman değeri isteğe göre seçilmektedir.



Şekil 5. Sınır şartları ve tanımlamaları yapılmış modelden benzetim görüntüsü ve Çözüm hacmindeki akışın gösterimi

Basınç, çıkış sınır şartı kabul edilmiştir. Akışın olabilmesi için çıkış basıncı 0 psi olarak alınmıştır. Şekil 4.13.'de görülebileceği gibi jetlerden hava girişi olmakta ve serbest akışla kanal ön tarafından çıkış yapmaktadır.

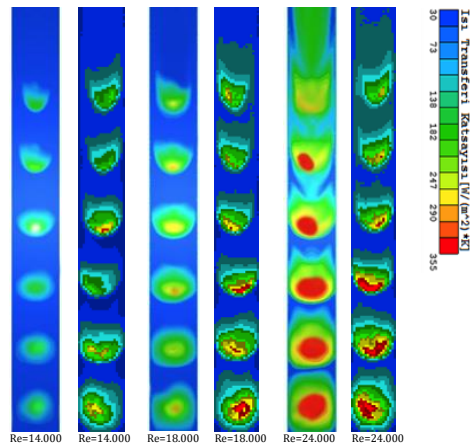
SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Her jet plakası için 3 farklı Reynolds sayısında yapılan teorik analiz sonuçları ile aynı değerlere sahip modellerle ile gerçekleştirilmiş olan deneysel sonuçları ile karşılaştırmıştır. Deneysel çalışma sonucu elde edilen sonuçlar ile teorik analizden elde edilen sonuçların yapısal olarak benzerlik taşıdığı görülmüştür.

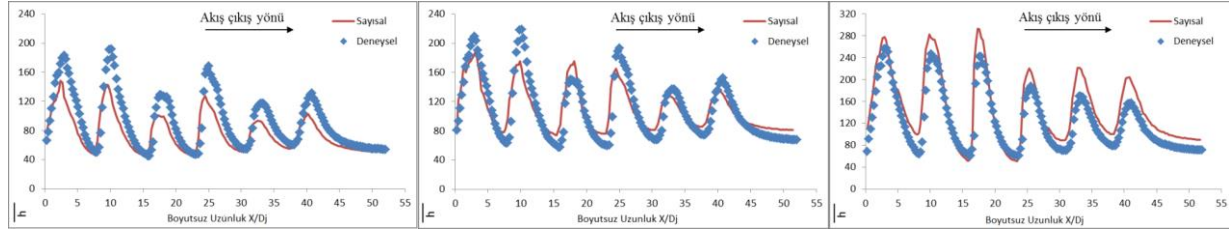
Şekil 3, 4 ve 5'de aynı geometri için yapılan sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçların LCIA (Liquid Crystal Imaging Analyser) programına aktarılmasıyla elde edilen ısı transfer katsayısının hedef plaka üzerindeki değişimi görülmektedir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen verilere göre en homojen ısı geçiş katsayısı dağılımının 3 sıra jetli çalışmada olduğu, ancak en düşük ortalama ısı geçiş katsayısına sahip olduğu görülmüştür. Reynolds sayısının artmasıyla ısı geçiş katsayısının arttığı tespit edilmiştir. Jet sayısının artırılması homojenliğin artmasına neden olurken ısı geçiş katsayısının azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

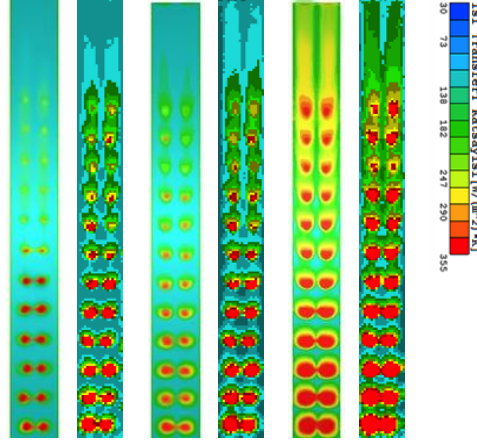
Jet merkezlerinin olduğu hedef plaka yüzeyinde kanal eni boyunca lokal ısı geçiş ortalamasının katsayısının maksimum değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Tek sıralı, iki sıralı ve üç sıralı jetlerin üç farklı Reynolds sayısında yapılan deneysel çalışmaları sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlarla Şekil 6,8 ve 10 da karşılaştırılmıştır. Ayrıca Şekil 7,9 ve 11'de kanal eni boyunca ortalamaları alınmış ısı geçiş katsayılarının kanal boyunca değişimi gösterilmiştir. Sayısal çalışmalarla deneysel çalışmalarının yapısal olarak uyumlu olduğu görülmektedir.



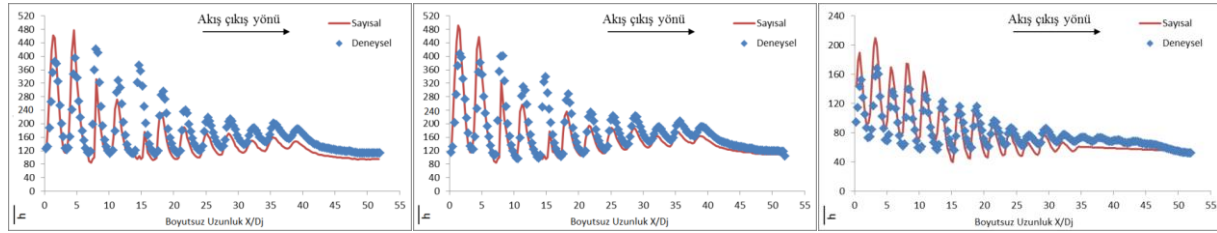
Şekil 6. Farklı Re. sayılarında ve farklı jet sayılarında yapılan sayısal ve deneysel çalışma eş eğrileri



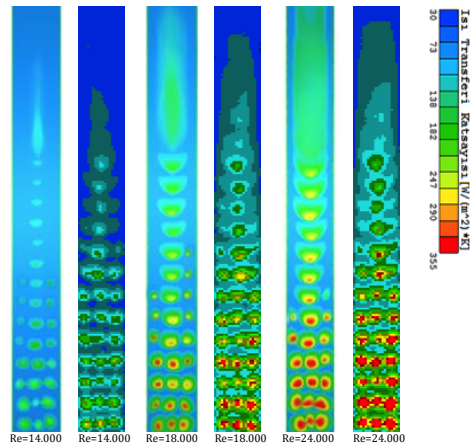
Şekil 7. Sayısal model ve deneysel model üzerinde ortalama ısı transferi katsayısı dağılımı grafiği



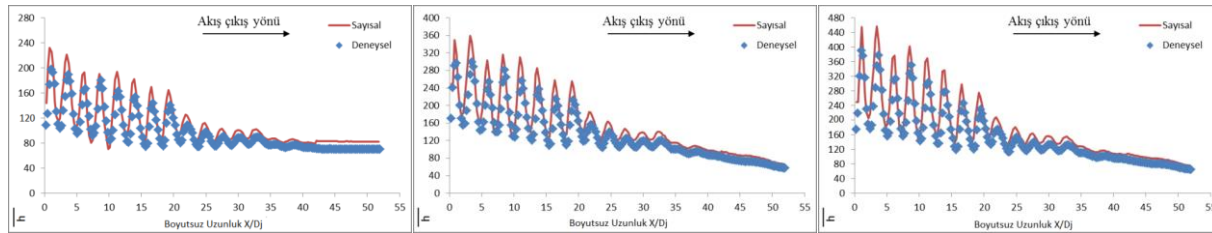
Şekil 8. farklı Re. sayılarında ve farklı jet sayılarında yapılan sayısal ve deneysel çalışma eş eğrileri



Şekil 9. Sayısal model ve deneysel model üzerinde ortalama ısı transferi katsayısı dağılımı grafiği



Şekil 10. farklı Re. sayılarında ve farklı jet sayılarında yapılan sayısal ve deneysel çalışma eş eğrileri



Şekil 11. Sayısal model ve deneysel model üzerinde ortalama ısı transferi katsayısı dağılımı grafiği

Her bir sıralı model sisteminde tüm Reynolds sayıları için ve en homojen yapıyı veren jet plakası-hedef plaka mesafesi irdelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına büyük ölçüde benzetim sağlanarak teorik incelemede ölçüm ve analiz tekniği doğrulanmıştır. $k-\omega$ türbülans modelinin bu tip bir çalışma için doğruluğu kanıtlanmıştır. Duvara yakın bölgelerde yakın sonuçlar göstermiştir. Genel olarak sayısal analiz sonuçları, deneysel sonuçlardan daha yüksek çıkmıştır. Yapılan kabuller ve deney ortamındaki fiziksel koşulların (dış ortamla ısı akışı, gerçek basınç, dış ortam akışı vb.) sayısal modelde tam olarak yansıtılmamasından kaynaklanmaktadır. Yerel ısı transfer katsayısı düşük hedef plaka mesafelerinde, geniş mesafede olanlarına göre daha uniform bir yapı göstermektedir. Deneysel çalışma sonuçlarının sayısal model çalışmalar ile doğrulanması ile birlikte deneysel çalışmalarda elde edilen bulgu ve değerlendirmelerin, sayısal modeller içinde geçerli olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

- 1- Osama, M.A., Heat transfer distributions on the walls of a narrow channel with jet impingement and cross flow. University of Pittsburgh, PhD. 2003.
- 2- Uysal, U., Li, P.-W., Chyu, M.K., Cunha, F.J., (2006), Heat Transfer on Internal Surfaces of A Duct Subjected To Impingement of A Jet Array with Varying Jet Hole-Size and Spacing, Journal of Turbomachinery, 128,158-165
- 3- Brevet, P., Heat Transfer to a row of impinging jets in consideration of optimization. Heat and Mass Transfer Dergisi 2002; Volume 45, Sayfa 4191-4200.
- 4- Ekkad, V., Jet impingement heat transfer on dimple target surfaces. International Journal Of Heat and Fluid Flow, 2001; 23 (2002) 22-28.
- 5- Giovanni, N., Heat transfer in rectangular channels with transverse and V shaped broken ribs. Heat and Mass Transfer 2004; Vol.47, pp:229-243
- 6- Tanda, G., ve Cavallero, D., (2001), An Experimental Investigation of Forced Convection Heat Transfer in Channel with Rib Turbulators By Mean of Liquid Crystal Thermography, Experimental Thermal Fluid Science, 26, 15-121.
- 7- Hong, S.K., Heat/Mass transfer with circular pin fins in impingement/effusion cooling system with crossflow. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, October/December 2006; Vol.20, No.4.
- 8- Chyu, M.K., Determination of local heat transfer coefficient based on bulk mean temperature using transient liquid crystal technique. Experimental Thermal and Fluid Science 1998; V.18, pp: 142-149.
- 9- Ekkad, S.V., Gas turbine film cooling and heat transfer measurement using transient liquid crystal technique. Texas University, PhD, 1995.
- 10- Lim, K.B., An experimental study on the characteristics of heat transfer on the turbulent round impingement jet according to the inclined angle of convex surface using the liquid crystal

- transient method. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006; 31 (2007) 711-719.
- 11- Şahin, F., Jet çarpmalı dikdörtgen kesitli bir kanalın ısı transferi büyüklüklerinin deneysel (TLC metodu ile) ve teorik analizi. Doktora tezi, Şubat-2008.
 - 12- Sang, J.Y., Impingement heat transfer of staggered arrays of air jets confined in a channel. *International Heat And Mass Transfer*, 2007; 50 (2007) 3718-3727.
 - 13- Zecchi, S., Bacci, A., Numerical analysis of crossflow and single jet impinging on a heated surface with shaped groove. 2004, ASME paper no: GT2004-53549
 - 14- Craft, T. J., Graham, L. J. W., Launder, B. E., Impinging jet studies for turbulence model assessment-II. An examination of the performance of four turbulence models, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 36(10): 2685-2697 (1993).
 - 15- Wang, S. J., Muşumdar, A. S., A comparative study of five low Reynolds number $k-\epsilon$ models for impingement heat transfer, *Applied Thermal Engineering*, 25: 31-44 (2005).
 - 16- Menter, F.R., 1992a. Influence of Freestream Values on $k-\omega$ Turbulence Model Predictions, *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal: Technical Notes*, 30(6), 1657-1659
 - 17- Wilcox, D. C., *Turbulence Modeling for CFD*, 3rd edition, DCW Industries, Inc., La Canada CA, 2006.