



## DİKDÖRTGEN DELİKLİ DÜZ LEVHA ÜZERİNDE FİLM SOĞUTMANIN DENEYSEL İNCELENMESİ

İbrahim KOÇ\*, Yaşar İSLAMOĞLU\*\* ve Cem PARMAKSIZOĞLU\*\*\*

\*Hava Harp Okulu, Havacılık Mühendisliği Bölümü, 34806 Yeşilyurt, İstanbul, i.koc@hho.edu.tr

\*\*Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Müh. Böl., 54187 Esentepe, Adapazarı, yasari@sakarya.edu.tr

\*\*\*İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, 80191 Gümüşsuyu, İstanbul, parmaksizo@itu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 29. 09. 2005)

**Özet:** Gaz türbin kanatlarının soğutulmasında film soğutması yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada dikdörtgen delikli düz levha üzerinde film soğutma karakteristiği deneysel olarak incelenmiştir. Farklı üfleme oranı ve sıcaklıkları için soğutma etkenliği hesaplanmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda üfleme oranının film soğutma etkenliğine etki ettiği belirlenmiştir. İyi bir soğutma için uygun üfleme oranı seçilmelidir. En iyi üfleme oranı 0.5 bulunmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Film soğutma, Soğutma etkenliği, Düz levha, Dikdörtgen delik.

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FILM COOLING ON A FLAT PLATE WITH RECTANGULAR INJECTION HOLES

**Abstract:** Film cooling is commonly used in turbine blades. In this study, the film cooling characteristics were investigated experimentally for a flat plate with rectangular injection holes. The film cooling effectiveness was evaluated using different blowing ratios and temperatures. Results show that blowing ratio of 0.5 provides the highest effectiveness.

**Keywords:** Film cooling, Cooling effectiveness, Flat plate, Rectangular hole.

#### SEMBOLLER

A	Delik kesit alanı [mm <sup>2</sup> ]
Ç	Çevre [mm]
D	Hidrolik çap [mm]
M	Üfleme oranı [-]
V <sub>j</sub>	Enjekte edilen akışkan hızı [m/s]
V <sub>∞</sub>	Ana akış hızı [m/s]
T <sub>adyabatik</sub>	Adyabatik duvar sıcaklığı [K]
T <sub>j</sub>	Enjekte edilen akışkan sıcaklığı [K]
T <sub>∞</sub>	Ana akış sıcaklığı [K]
ρ <sub>j</sub>	Enjekte edilen akışkan yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>∞</sub>	Ana akış yoğunluğu [kg/m <sup>3</sup> ]
η	Film soğutma etkenliği [-]
x	Ana akış doğrultusundaki uzunluk [mm]
z	Yatayda ana akışa dik doğrultudaki uzunluk [mm]

#### GİRİŞ

Gaz türbinlerinden yüksek verim elde etmenin en önemli yollarından biri türbin giriş sıcaklığını yüksek tutmaktır. Türbin giriş sıcaklığını yüksek tutabilmenin iki yolu vardır. Bunlardan birincisi türbin kanat malzemelerinin iyileştirilmesi, ikincisi kanatların soğutulmasıdır. Türbin kanat malzemesinin iyileştirilmesi malzeme teknolojisindeki gelişmeler ve malzeme yüzeyine uygulanan yeni teknikler ile

mümkündür. Çoğu zaman malzeme teknolojisindeki gelişmelerin uzun süre alması ve maliyetlerin yüksek olması sakınca oluşturmaktadır. Soğutma yöntemleri ise daha ucuz olmaktadır. Yüksek türbin verimi için hem malzeme teknolojilerindeki gelişmelerin hem de soğutmanın kullanılması en iyi yoldur.

Kanatlarının soğutulmasında hem hava hem de sıvı kullanılmaktadır. Su ile soğutma etken olmasına rağmen sızıntı ve pas oluşturma gibi olumsuz yönleri vardır. Hava ile soğutma özellikle uçak gaz türbin motorları için uygundur. Soğutma havası kompresör çıkışından alınır.

İç soğutmada kanat içine delikler açılır ve kökten uca soğutma havası gönderilir. Bu soğutma en yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir. Kanadın hücum kenarının soğutulması kanat iç yüzeyine daha soğuk jetin çarpması ile gerçekleştirilir. Bu soğutmaya çarptırma soğutması denir. Çarptırma soğutması bölgesel alanlarda çok etkili soğutma yöntemidir. Kanat yüzeylerinin soğutulmasına dış soğutma denilir. Dış soğutma türleri termeme ve film soğutmasıdır. Terleme soğutmasında soğutucu gözenekli duvar içinden geçirilir.

Film soğutmasında, kanat yüzeyine belirli açılarda delikler açılarak soğutma havasının enjekte edilmesi ile yüzeyde film tabakası oluşturularak gerçekleştirilir. Bu

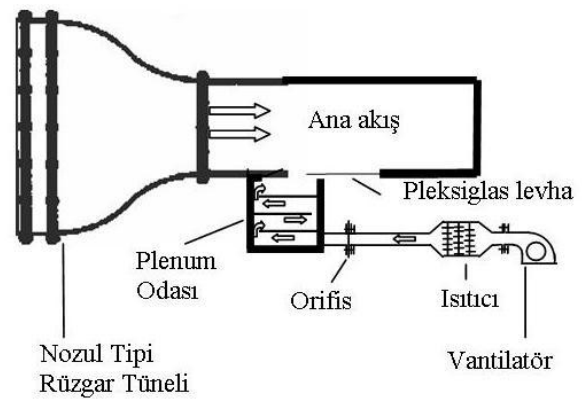
yönteme film soğutması denir. Film soğutması en yaygın olarak kullanılan kanat soğutma yöntemlerinden biridir. Yaygın olarak kullanılmasına rağmen bilinmeyen yönü çok fazladır. Dolayısıyla bu soğutma yöntemi birçok araştırmacının ilgi alanı olmuştur. Örneğin, düz bir plaka üzerinde 30 veya 35° eğimli, tek sıra jetlerle sağlanan film soğutmada maksimum soğutma verimi yaklaşık 0.5 üfleme oranında gözlenmiştir (Bergeles *vd.*, 1977). Petersen *vd.* (1977); Forth *vd.* (1985); Teekaram *vd.* (1990); Pietrzyk *vd.* (1989) ve Sinha *vd.* (1991) yoğunluk oranının film soğutmasına olan etkisini deneysel olarak inceleyerek, yoğunluğun film soğutmasında önemli bir parametre olduğunu belirlemişlerdir. Delik geometrisinin film soğutma etkinliğine etkisi Ou ve Rivir (2001) tarafından incelenmiştir. Enjeksiyon açısı 20°, üfleme oranları 1 ile 2.5 arasında ve Reynolds sayıları 30000 ve 60000 için yaptıkları deneysel çalışmalarda, üfleme oranı 2'ye kadar film soğutma etkinliğinin arttığı, daha büyük üfleme oranı için ise etkinliğin azaldığını belirlemişlerdir. Takahashi *vd.* (2001), yedi farklı delik kesitine sahip dairesel, dikdörtgen, eliptik ve oval deliklerde farklı üfleme oranları kullanarak film soğutma etkinliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Dikdörtgen kesitli deliklerin film soğutma etkinliğinin dairesel kesitli deliklerden daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Ahn *vd.* (2003), iki sıra halinde yerleştirilen enjeksiyon deliklerinin film soğutma etkinliğini deneysel olarak incelemişler, üfleme oranı 0.5 için en iyi etkenlik sağlamışlardır. Yuen ve Martinez-Botas (2003), enjeksiyon açıları 30°, 60° ve 90° olan silindirik enjeksiyon delikleri için film soğutma etkinliğini deneysel olarak incelemişler, enjeksiyon açısı 30° için maksimum etkenlik belirlemişlerdir. Kim ve Kim (2004) tarafından silindirik enjeksiyon deliklerinin akış üzerine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Koc *vd.* (2006), yaptıkları sayısal çalışmalar ile eğrisel yüzeylerin film soğutma etkinliğine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında enjeksiyon açısı 30° ve üfleme oranları 0.5 ile 2 arasında seçmişler ve en yüksek etkenlik, üfleme oranı 0.5 olduğunda belirlemişlerdir.

Deneysel çalışmalarda model levha üzerinde silindirik delik açmak daha kolay olduğundan, literatürde daha çok silindirik delikler için etkenlik çalışmalarına rastlanmaktadır. Bu çalışmada, akış yönünde 30° eğimli tek sıra dikdörtgen şeklinde deliklere sahip düz levha kullanarak, farklı üfleme oranının film soğutmasına olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

## DENEYSEL ÇALIŞMA

Yapılan deneyleri iki kısımda incelemek mümkündür. Birincisi rüzgar tüneli içinde belirli bir hızda akmakta olan havaya belirli hızda, belirli açı ve debide daha sıcak havanın enjeksiyonu ile levha yüzeyindeki sıcaklıkların ölçülmesi. İkincisi ise karışım bölgesinde hızın ölçülmesi. Deneysel çalışmalarda, çevre havası ısıtılarak plenum odasına gönderilmekte, bu odada sıcak hava basınçlandırılarak ana akış yönü ile 30° açı yapan deliklerden ana akışa enjekte edilmektedir. Deliklerden

enjekte edilen hava ile ana akış sıcaklıklarının bilinmesi film soğutma etkinliği hesaplamaları için gerekmektedir. Bu sıcaklıkları ölçmek için plexiglas girişi ve rüzgar tüneli içine birer adet termoeleman yerleştirilmektedir. Ana akış hızı hem 55P11 model sıcak tel probu hem de pitot tüpü kullanılarak ölçülmekte, deliklerden enjekte edilen akışkan hızları ise orifis kullanarak ölçülen debi ile hesaplanmaktadır. Enjeksiyon deliklerinden hava ile ana akışın karışım bölgesindeki hız değerleri sıcak tel anemometresi kullanılarak ölçülmektedir. Bu ölçümlerde 55P15 model sınır tabaka probu kullanılmaktadır. Deney düzeneğinin şematik resmi Şekil 1'de verilmektedir. Deneyler, 0.46 m x 0.57 m x 0.46 m test odası boyutlarına sahip, maksimum 30.5 m/s hızı ulaşılabilen subsonik rüzgar tüneline yapılmıştır



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

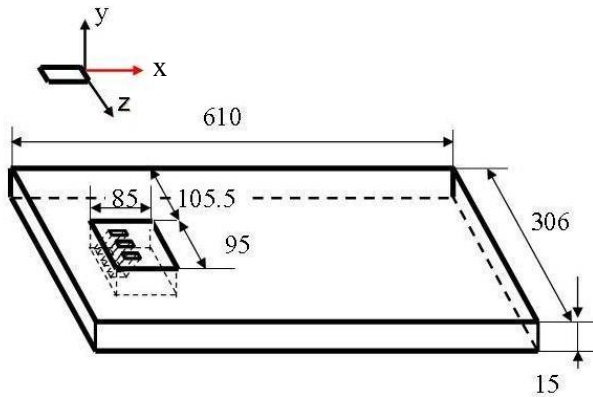
Düzgün ve kararlı bir enjeksiyon için, ısıtıcıda ısıtılan hava ana akışa enjekte edilmeden önce plenum odasından geçirilmektedir. Enjekte edilen hava debisi, plexiglas malzemeden yapılmış ve TS 1423 (1975)'e uygun orifis ile ölçülmüştür.

Isıtılmış hava orifise gelmeden önce 600 mm uzunluğunda 100 mm iç çapında çelik borudan geçirilmiş ve sonra aynı iç çapa sahip 300 mm uzunluğunda ikinci bir çelik borudan plenum odasına gönderilmiştir. 600 mm'lik boruda orifisten 100 mm mesafede, 300 mm boruda orifisten 63 mm mesafede basınç ölçüm delikleri yerleştirilmiştir. Basınç ölçme delik çapları ve diğer ölçüler TS 1423 (1975) uygundur. Orifiste basınç farkından, enjekte edilen hava debisini hesaplayabilmek için eğik manometre kullanılmıştır. Manometre için yoğunluğu 800 kg/m<sup>3</sup> olan alkol seçilmiştir.

Vantilatör tarafından gönderilen çevre havasını 52-77 °C'de düz levha üzerine enjekte etmek için 2 adet 1000 W gücünde ısıtıcı ve ısıtıcı gücünü kontrol etmek için reosta kullanılmıştır. Havayı enjekte etmek için 150 W gücünde 870 m<sup>3</sup>/h debide hava akışı sağlayan merkezkaç vantilatör kullanılmıştır. Değişik debilerde hava enjeksiyonu sağlamak için vantilatör girişine değişik delik çaplarında karton şablonlar yerleştirilmiştir.

Sıcaklık ölçümlerinde K(Kromel-Alumel) tipi termoelemanlar kullanılmıştır. Termoelemanların uçları cıva kullanılarak kaynak edilerek birleştirilmiştir. Sıcaklık ölçümleri FLUKE 52 II termometre ile yapılmıştır.

Şematik görünümü Şekil 2’de verilen 15 mm kalınlığındaki plexiglass levha içine 85x95 mm boyutlarında açılan deliğe aynı kalınlıkta polyester levha yerleştirilmiştir. Polyester levhaya ana akış yönü ile 30° açı yapan 9x6.5 mm delik kesit boyutlarında 3 enjeksiyon deliği açılmıştır. Plexiglas veya herhangi başka bir malzemeyi 30° açı ile delerek dikdörtgensel delik oluşturmak oldukça zor olduğu için dikdörtgensel enjeksiyon delikleri polyester reçine kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 2. Tek sıra dikdörtgen kesitli deliklerin şematik görünümü.

Sıcaklık ölçümleri ikinci delik çıkışında levha yüzeyine ana akış ve yatay yönlere akışı bozmayacak şekilde termoelemanlar yerleştirilerek yapılmıştır. Termoelemanların levha üzerine yerleştirilme konumları Şekil 3’de verilmiştir.

Şekil 3 ’de D hidrolik çap olup  $D = 4A/\zeta$  eşitliğinden hesaplanır. Burada A dikdörtgen deliğin kesit alanını,  $\zeta$  ıslak çevresini ifade eder. Seçilen dikdörtgen delik için  $D=7.55$  mm dir.

Deneysel çalışmalar süresince deliklerden enjekte edilen havanın debisi ve sıcaklığı değiştirilmiştir. Debi değişimi üfleme oranı (kütle akısı) ile ifade edilir. Üfleme oranı veya kütle akısı oranı aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$M = (\rho_j V_j) / (\rho_\infty V_\infty) \quad (1)$$

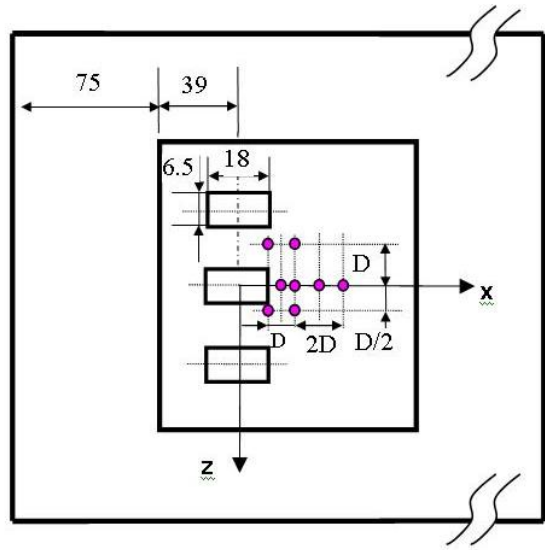
Burada M üfleme oranı,  $\rho_j$  enjekte edilen akışkan yoğunluğu,  $V_j$  enjekte edilen akışkan hızı,  $\rho_\infty$  ana akış yoğunluğu,  $V_\infty$  ana akış hızıdır.

Hesaplanan sıcaklık değerleri kullanılarak aşağıda verilen denklem ile adyabatik film soğutma etkenliği hesaplanmıştır.

$$\eta = \frac{T_{adyabatik} - T_\infty}{T_j - T_\infty} \quad (2)$$

Burada  $\eta$  film soğutma etkenliğini,  $T_{adyabatik}$  adyabatik duvar sıcaklığını,  $T_\infty$  ana akış sıcaklığını,  $T_j$  enjekte edilen akışkan sıcaklığını belirtir. Levha üzerine açılan dikdörtgen deliğin çıkış bölgesine Şekil 3’de gösterildiği gibi termoelemanlar yerleştirilerek ölçülen sıcaklıklar, adyabatik duvar sıcaklığını ifade etmektedir.

Ortalama belirsizlik değerleri debi için % 6.3, enjeksiyon hızı için % 6.6, üfleme oranı ve film soğutma etkenliği için ise %7.5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Termoelemanların levha üzerine yerleştirilme konumları.

## DENEYSEL SONUÇLAR

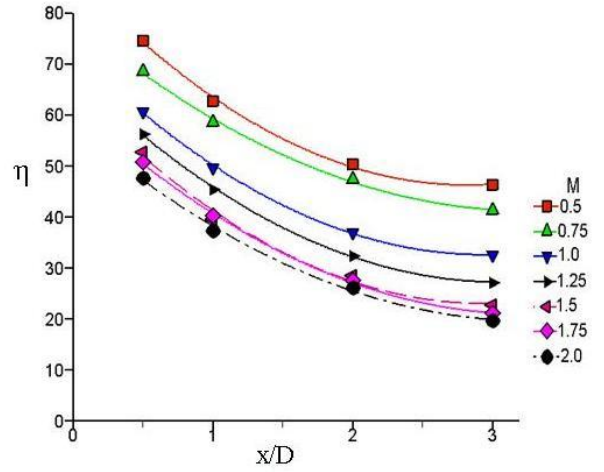
Tek sıralı dikdörtgen deliklerde yapılan deneylerin sonucunda elde edilen film soğutma etkenliklerini, üfleme oranlarına göre ana akış doğrultusunda karşılaştırdığımızda elde edilen sonuçlar Şekil 4-6’da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde düşük üfleme oranlarında etkenlikler daha yüksek değerlerdedir. Mevcut üfleme oranları içinde en iyi üfleme oranı 0.5’dir. Ana akış sıcaklığı ile enjeksiyon sıcaklığı arasındaki fark artırıldığında aynı üfleme oranları için ana akış doğrultusunda etkenliğin arttığı görülür. Örneğin enjeksiyon sıcaklığı  $T_j = 330$  K,  $x/D = 3$  ve üfleme oranı 2 iken etkenlik değeri %7.19 olmakta Şekil 4; fakat ana akış sıcaklığı ile enjeksiyon sıcaklığı arasındaki farkın artırılması ile (enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=340$  K) aynı konum ve üfleme oranı için % 21.11 olmaktadır, Şekil 6.

Ana akışa yüzeyde dik yönde (z yönü),  $z/D=1$  de film soğutma etkenliği incelendiğinde (Şekil 7-9) düşük üfleme oranlarında film soğutma etkenliği daha büyüktür. Ana akış sıcaklığı ile enjeksiyon sıcaklığı arasındaki fark artırıldığında aynı üfleme oranları için x yönü gibi z yönünde etkenliğin arttığı görülür. Özellikle

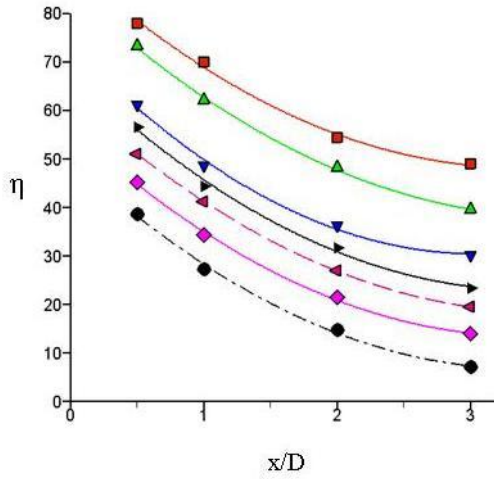
bu durum Şekil 7-9 'da gösterildiği gibi yüksek üfleme oranlarında görülmektedir. Örneğin enjeksiyon sıcaklığı 330 K 'de üfleme oranı 2.0 için maksimum etkenlik değeri %25 dolaylarında iken enjeksiyon sıcaklığı 340 K'de etkenlik değeri %35 mertebelerindedir.

Düşük üfleme oranlarında ana akış, jeti daha kolay bükebilmekte ve böylece jet yüzey üzerine yapışabilmektedir. Yüksek üfleme oranlarında (jetin momentumunun ana akışın momentumundan daha iyi olduğunda) jetin ana akış içine girmesi daha iyi olmaktadır. Böyle durumda yüzeyden ayrılmalar olmaktadır.

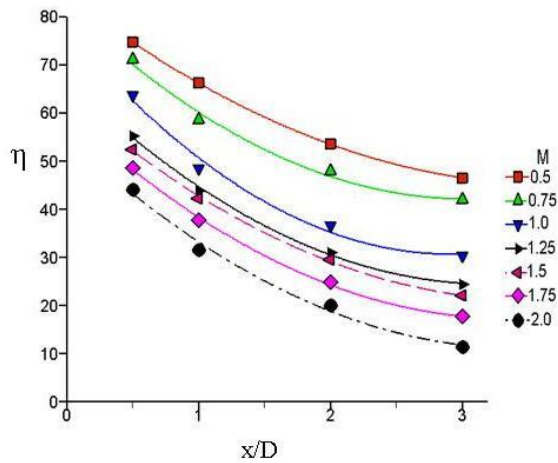
Etkenlik için deneysel sonuçlar, sayısal olarak hesaplanmış değerler ile de karşılaştırılmaktadır. Şekil 10'da, en iyi üfleme oranı  $M=0.5$  ve enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=330$  K için soğutma etkinliğinin değişimi verilmektedir. Deneysel ve sayısal sonuçlar uyumlu çıkmakta, ortalama bağıl hata %11 çıkmaktadır.



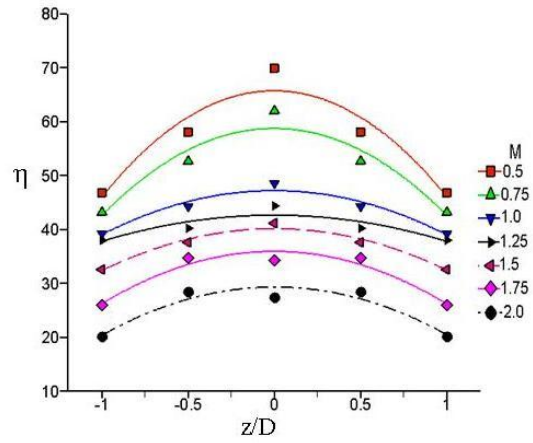
Şekil 6. Soğutma etkinliğinin değişimi (Enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=340$  K).



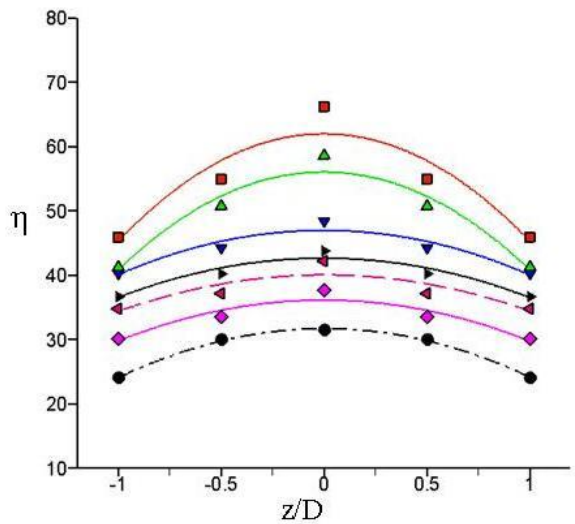
Şekil 4. Soğutma etkinliğinin değişimi (Enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=330$  K).



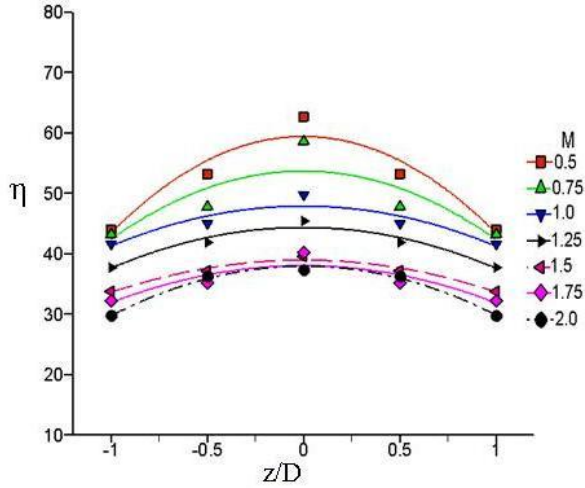
Şekil 5. Soğutma etkinliğinin değişimi (Enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=335$  K).



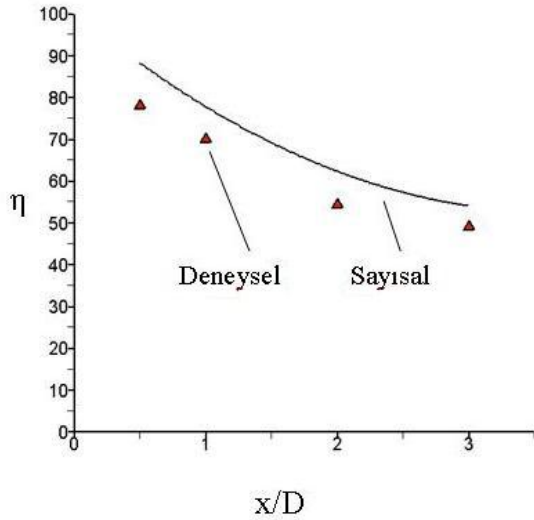
Şekil 7. Soğutma etkinliğinin değişimi (Enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=330$  K).



Şekil 8. Soğutma etkinliğinin değişimi (Enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=335$  K).



Şekil 9. Soğutma etkinliğinin değişimi (Enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=340$  K).



Şekil 10. Üfleme oranı  $M=0.5$  ve Enjeksiyon sıcaklığı  $T_j=340$  K için deneysel ve sayısal olarak hesaplanan soğutma etkinliğinin karşılaştırılması.

## SONUÇLAR

Dikdörtgen delikli düz levha üzerinde film soğutma karakteristiği deneysel olarak incelemek amacıyla yapılan bu çalışma ile, farklı üfleme oranı ve sıcaklıkları için soğutma etkinliği hesaplanmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda üfleme oranının film soğutma etkinliğine etki ettiği belirlenmiştir. İyi bir soğutma için uygun üfleme oranı seçilmelidir. En iyi üfleme oranı 0.5 bulunmuştur.

Daha sonra;

- Eğrisel yüzeyde film soğutmanın deneysel incelenmesi,
- Düz ve eğrisel yüzeylerde ısı taşınım katsayısının bulunması,
- Ana akışa karışan jet akışları için daha uygun türbülans modellerinin geliştirilmesi ve
- Film soğutmanın uygulama koşullarının araştırılması konularında araştırmalar yapılmalıdır.

## KAYNAKLAR

Ahn, J., Jung, S.I. and Lee, J.S., Film Cooling From Two Rows of Hoes with Opposite Orientation Angles: Injectant Behavior and Adiabatic Film Cooling Effectiveness, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 24, 91-99, 2003.

Bergeles, G., Gosman, A.D and Launder, B.E., The Near-Field Character of a Jet Discharged Through a Wall at  $30^\circ$  to a Main Stream, *AIAA Journal*, 15, 1977.

Forth, C.J.P., Loftus, P.J. and Jones, T.V., The Effect of Density Ratio on the Film Cooling of a Flat Plate, AGARD CP-390, 1985.

Kim Y.J. and Kim, S.-M., Influence of Shaped Injection Holes on Turbine Blade Leading Edge Film Cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 47, 245-256, 2004.

Koç, İ., Gaz Türbin Kanadı Üzerinde Film Soğutmanın Sayısal ve Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

Ou, S. and Rivir, R.B., Leading Edge Film Cooling Heat Transfer with High Free Stream Turbulence Using a Transient Liquid Crystal Image Method, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 22, 614-623, 2001.

Pedersen, D.R., Eckert, E.G.R. and Goldstein, R.J., Film Cooling with Large Density Differences Between the Mainstream and the Secondary Fluid Measured by the Heat-Mass Transfer Analogy, *Journal of Heat Transfer* 99, 620-627, 1977.

Pietrzyk, J.R., Bogard, D.G. and Crawford, M.E., Effects of Density Ratio on the Hydrodynamics of Film Cooling, *ASME Paper* 89-GT-175, 1989.

Sinha, A.K., Bogard, D.G. and Crawford, M.E., Film Cooling Effectiveness Downstream of a Single Row of Holes with Variable Density Ratio, *Journal of Turbomachinery* 113, 442-449, 1991.

Takahashi, H., Nuntadusit, C., Kimoto, H., Ishioe, H., Ukai, T., and Takeishi, K., Characteristics of Various Film Cooling Jets Injected in Conduit, *Annals of the New York Academy of Sciences, Heat Transfer in Gas Turbine Systems* 934, 345-352, 2001.

Teekaram, A.J.H., Forth, C.J.P. and Jones, T.V., Film Cooling in the Presence of Mainstream Pressure Gradients, *ASME Paper* 90-GT-8, 1990.

TS-1423, Akışkan Verdisinin Orifis Plakalar ve Lüleler(Nozul) ile Ölçülmesi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 1975.

Yuen, C.H.N. and Martinez-Botas, R.F., Film Cooling Characteristics of a Single Round Hole at Various Streamwise Angles in a Crossflow: Part I Effectiveness, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 46, 221-235, 2003.





### **İbrahim KOÇ**

İTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'nden 1991 yılında mezun oldu. 1991–1994 yılları arasında İTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisan eğitimini tamamladı. 1993 yılında Türk Hava Kuvvetleri Komutanlığına katıldı. İTÜ Makina Mühendisliği Bölümü'nde 1999 yılında başladığı doktora eğitimini 2006 yılında tamamlamıştır. Gaz Türbin Motorları, Türbin Soğutma, Isı Transferi ve Termodinamik Uygulamaları konuları ile ilgilenmektedir. Halen Yüzbaşı rütbesinde olup Hava Harp Okulu Dekanlığı, Havacılık Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır.