VI. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI
28-30 Eylül 2016, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli

UHUK-2016-155

ÇARPMA SOĞUTMASI ÇALIŞMALARI İÇİN BİR DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI, ÜRETİMİ, KURULUMU VE DENEME ÇALIŞMALARI

Yavuzer Karakuş[1] İbrahim Atacan Kılıç[2] Duygu Erdem[3]

İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

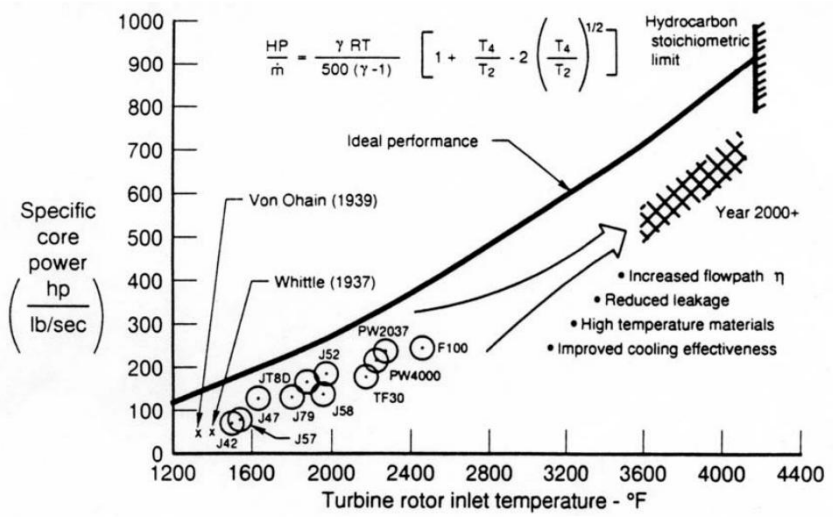
ÖZET

Türbin giriş sıcaklığının artışının gaz türbin motorların performansını artıran önemli bir kriter olması, soğutma teknolojisinin özellikle havacılıkta kullanılan gaz türbin motorlar için çok kritik bir terim haline gelmesine sebep olmuştur. Türbin giriş sıcaklığının ilk etkidiği nokta olan kanat uçlarının soğutulması türbin giriş sıcaklığını artırabilmenin anahtarıdır. Bu sebeple türbin uç kısmının soğutulması ile ilgili çalışmalar havacılık açısından önemlidir. Genellikle türbin rotor ve stator uç bölgesinin soğutulmasında kullanılan yöntemlerden çarpma soğutması ("impingement cooling") çalışmaları bu sebeple ilgi çekmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi Trisonik Araştırma Laboratuvarı bünyesinde kurulmakta olan çarpma soğutma deney düzeneğinin tasarım, üretim ve kurulumu anlatılmaktadır. Kurulum aşamasında yapılacak olan deneme çalışmaları da sunulacaktır.

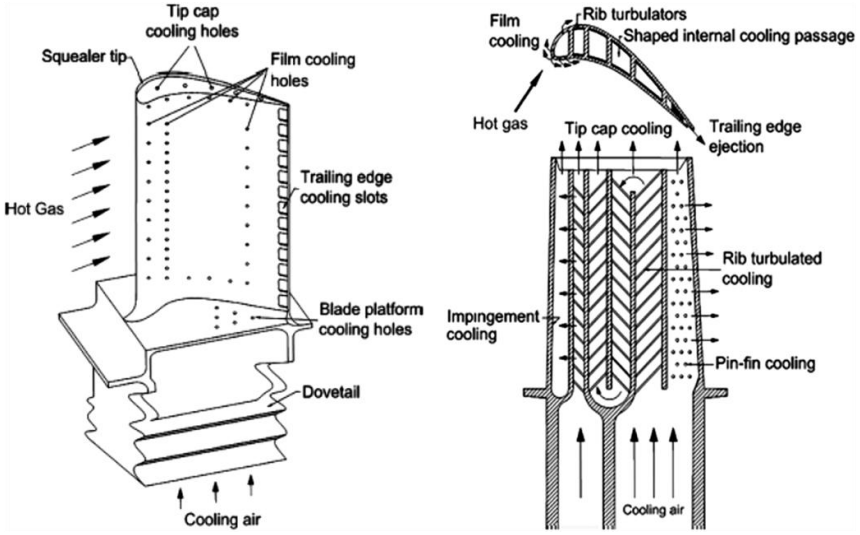
GİRİŞ

Günümüz havacılığında ana itki kaynağı olarak kullanılan gaz türbin motorların performansı bir çok parametreye bağlıdır. Bu parametrelerden önemli olan biri de türbin giriş sıcaklığıdır. Türbin giriş sıcaklığı yükseldikçe motor performansı artmaktadır[Chyu ve Siw, 2013]. Türbin giriş sıcaklığı ile özgül çekirdek gücünün nasıl değiştiği Şekil 1'de gösterilmiştir. Şu an kullanımda olan bir çok motorda türbin giriş sıcaklığı türbin bileşenlerinde kullanılan malzemenin hasar göreceği sıcaklıklara ulaşmış durumdadır, bu sıcaklıklarda yapının korunması iyi bir soğutma sistemi ile gerçekleştirilebilmektedir[Zuckerman ve Lior, 2006]. Türbin soğutması için bir çok yöntem kullanılırken, türbin hücum kenarı bölgesinin dar olması sebebi ile bu bölgede daha çok çarpma soğutması "impingement cooling" kullanılmaktadır. Bunun sebebi yüksek ısı akısı istenen bölgelerde taşınımla soğutmaya göre daha başarılı olmasıdır [Livinghood ve Hrycak, 1973].Çarpma soğutması yöntemi yerel ısı transferini arttırma potansiyeli açısından en fazla potansiyele sahip ısı transferini artırma yöntemlerinden biridir [Han, Dutta ve Ekkad, 2000]. Bu soğutma şeklinde türbin bıçağının içinde bulunan kanalın yüzeyine hızla çarpan jet akışı yüzeyi soğutmakta ve dolayısı ile ısı transferini arttırmaktadır. Türbin soğutmasında kullanılan genel yöntemlerin türbin bileşeni üzerinde gösterimi Şekil 2'dedir.

[1] Araştırma görevlisi., Uçak Müh. Böl., E-posta: karakusy@itu.edu.tr
[2] Lisans Öğrencisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: kilicib@itu.edu.tr
[3] Yrd. Doç. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: erdem@itu.edu.tr

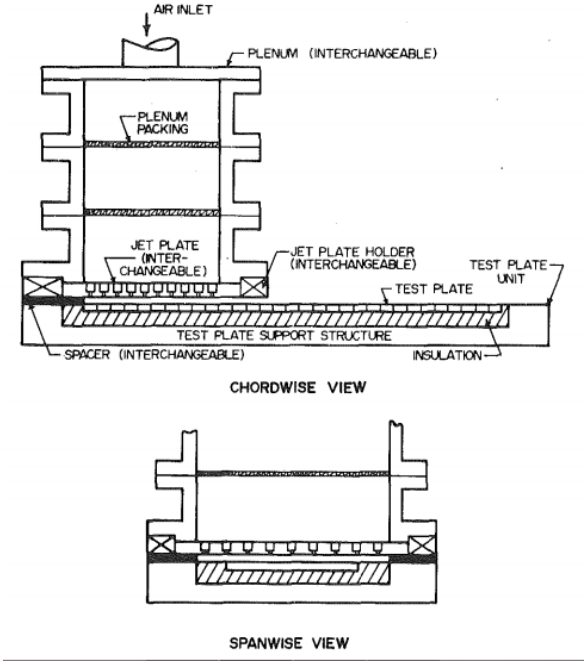


Şekil 1: Türbin giriş sıcaklığı ile özgül güç arasındaki bağıntı [Koff , 1991]



Şekil 2: Türbin soğutma yöntemleri [Han ve Huh, 2009]

Reynolds sayısı 9000-11000 aralığında, çarpma levhası uzaklığı/delik çapı (H/d) oranı 6,8 ve 10 için yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmasında bu iki parametrenin çarpma soğutma sistemindeki akış yapısı ve ısı transferini önemli ölçüde etkilediğini ve H/d=6'da daha yüksek ısı transferi gerçekleştiğini göstermişlerdir [Chougule, Parishwad, Gore, Pagnis ve Sapali, 2011]. Çarpma soğutmasında bir diğer önemli parametre de çapraz akış hızıdır. Genellikle kanal içine akan jetlerden oluşan çapraz akış, jetlerin kaymasına sebep olabilir [Han, Dutta ve Ekkad, 2000]. Barata ve Durao çapraz akışa maruz kalan bir çarpma jetinin nasıl etkilendiğini Lazer Doppler Anemometry tekniği ile akış içindeki hız dağılımını ölçerek göstermişlerdir [Barata ve Durao, 2004]. Florschuetz ve diğerlerinin yaptığı bir çalışmada jet çıkışı ile çarpma levhası arasındaki uzaklığın, jet çıkışları arasındaki mesafenin ve jet deliklerinin düzeninin değişiminin ısı transferini nasıl etkilediği gösterilmiştir [Florschuetz, Berry ve Metzger, 1980]. Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 3'de gösterilmiştir ve örnek bir düzenek olarak alınabilir. Çoğu parçası değiştirilebilir olarak tasarlanmış bu düzenekte hava girişinden giren hava değiştirilebilir bir jet plakasından geçerek uzaklığı değiştirilebilen bir çarpma levhasına çarpmaktadır.



Şekil 3: Florschuetz, Berry ve Metzger'in çalışmasında kullanılan deney düzeneği [Florschuetz, Berry ve Metzger, 1980]

Bu bildiride İstanbul Teknik Üniversitesi Trisonik Araştırma Merkezi bünyesinde kurulmakta olan çarpma soğutması deney düzeneğinin tasarım, üretim ve kurulum aşamaları anlatılmaktadır. Gaz türbin motoraları için kritik bir soğutma teknolojisi olan çarpma soğutması teknolojisi üzerine yapılacak çalışmaların önemli olduğu düşünülmektedir. Bu sistemde gerçekleştirilecek çalışmalar ile konu hakkında tecrübe ve bilgi birikimi elde edilecektir. Ayrıca buradan elde edilecek bilgiler ışığında bu teknoloji ile ilgili yeni tasarım kabiliyetlerine de sahip olunması hedeflenmektedir. Üniversitemizin bu alanda elde edeceği tecrübenin teknoloji geliştirme projeleri açısından önem arz edeceği öngörülmektedir.

YÖNTEM

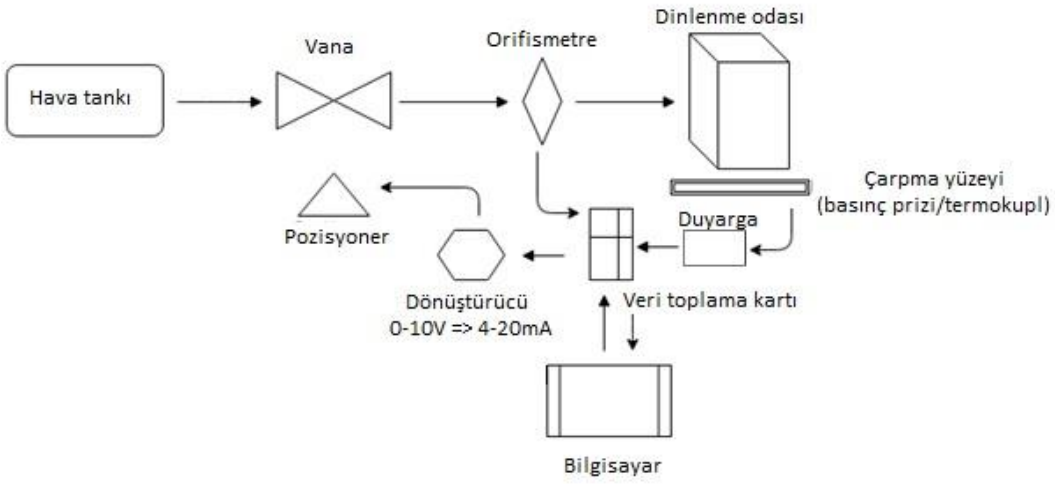
Parametrelerin belirlenmesi

Parametreler mevcut literatürdeki çalışmalar baz alınarak belirlenmiştir. Sistem tasarlanırken değiştirilebilmesi istenen parametreler: jet çıkış çapı, jet aralıkları, jet delik düzeni, jet çıkışı ile çarpma yüzeyi arasındaki mesafe, Reynolds sayısıdır. Diğer tüm parametreler sabitken Reynolds sayısını değiştirebilmek için debinin kontrol edilmesine karar verilmiştir. Aynı zamanda alt tabla üzerinde basınç dağılımı ve ısı transferi ölçümlerinin ayrı ayrı veya aynı anda yapılabilmesi de istenmektedir. Basınç dağılımı ölçümleri için diğer parametrelere bağlı olarak basınç prizi düzeninin değiştirilmesi gerektiği de düşünülmektedir.

Akış Diyagramı

Sistemin genel yapısı mümkün olduğunca Trisonik Araştırma Laboratuvarının mevcut altyapısının imkanlarını kullanacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4'de sistemin akış diyagramı gösterilmiştir. Trisonik Araştırma Laboratuvarı dahilinde bulunan yüksek basınçlı hava tanklarından gelen hava ile sistem beslenecektir. Basınçlı hava SMS Tork markalı pnömatik kontrollü vana ve ona bağlı pozisyoner tarafından kontrol edilecektir. Vanadan geçen akış tarafımızdan tasarlanan orifismetreden geçerek debi ölçümü yapılacaktır. Bilgisayarda çalışmakta olan Labview programı tarafından debiyi sabit tutmak üzere gönderilen çıkış sinyali National Instruments PCI 6014 veri toplama kartı ile pozisyonere gönderilmektedir. Bu sinyal 0-10V aralığında değişirken vana 4-20mA sinyal kabul etmektedir. Bu sebeple veri toplama kartı ile pozisyoner arasına 0-10V aralığındaki

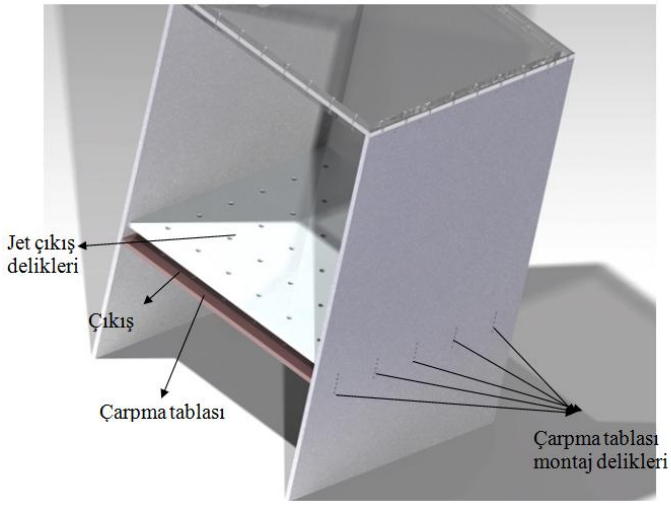
giriş sinyalini 4-20mA aralığında çıkış sinyaline çeviren Gentek marka bir dönüştürücü yerleştirilmiştir. Sabit debide tutulan akış dinlenme odasında dinlendikten sonra delikli plakadan geçerek çarpma jetlerini oluşturacaktır. Jetlerin çarptığı çarpma yüzeyi ya da çarpma plakasında isteğe göre basınç prizi ile yüzey basınç dağılımı alacak basınç prizleri, isteğe göre ısıtıcı ve ısıl çiftler bulunabilecektir. Duyargalardan alınan veriler veri toplama kartı üzerinden bilgisayara aktarılacak ve kullanılmakta olan Labview programı ile işlenerek kayıt edilecektir.



Şekil 4: Kurulacak sistemin akış diyagramı

Dinlenme Odası ve Çarpma Bölümü Tasarımı

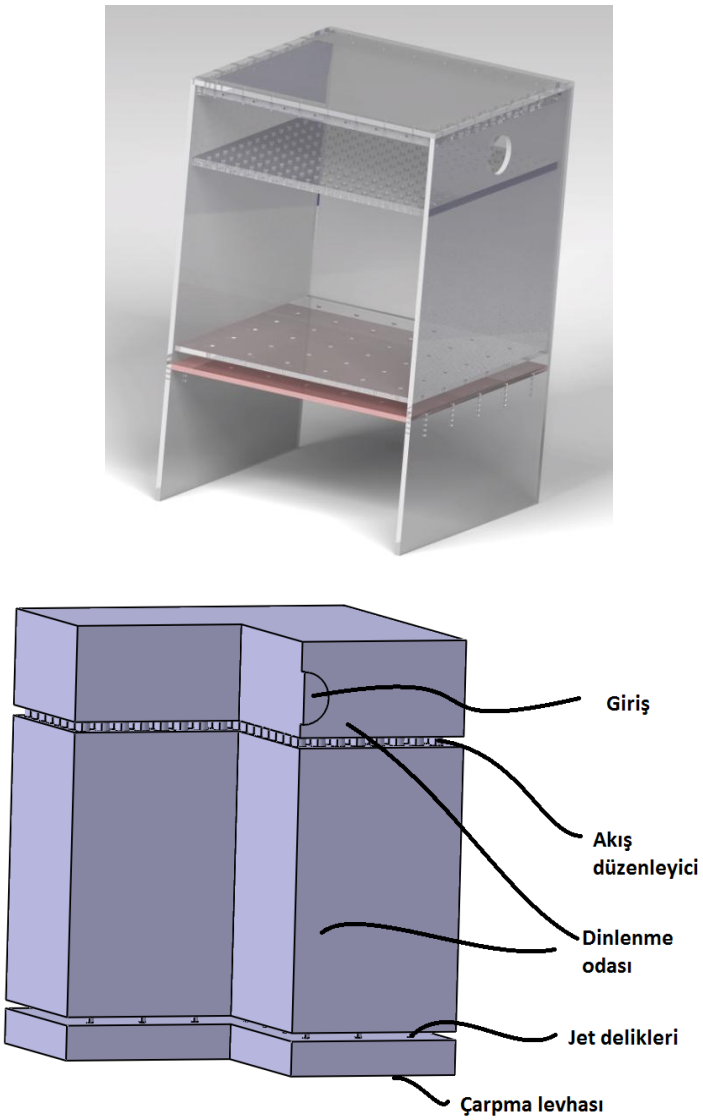
Öncelikli olarak sistemin daha önce belirlenmiş olan parametrelere göre katı modeli oluşturulmuştur. Sistemde dinlenme odası delik geometrisi ve düzeninin değiştirilebileceği şekilde tasarlanmıştır. Çarpma tablasının jet çıkışına olan uzaklığının değiştirilebilmesi için 2 yan duvar daha uzun tasarlanmıştır. Bu duvarlarda çarpma tablasını sabitlemek için kullanılmak üzere montaj delikleri açılmıştır. Şekil 5'te dinlenme odası ve çarpma bölgesinın CAD modeli iç alanın görülebilmesi amacı ile ön kapak gizlenerek gösterilmiştir.



Şekil 5: Akış düzenleyicisiz dinlenme odası ve çarpma bölgesi (ön kapak iç bölgenin görülmesi için kaldırılmıştır)

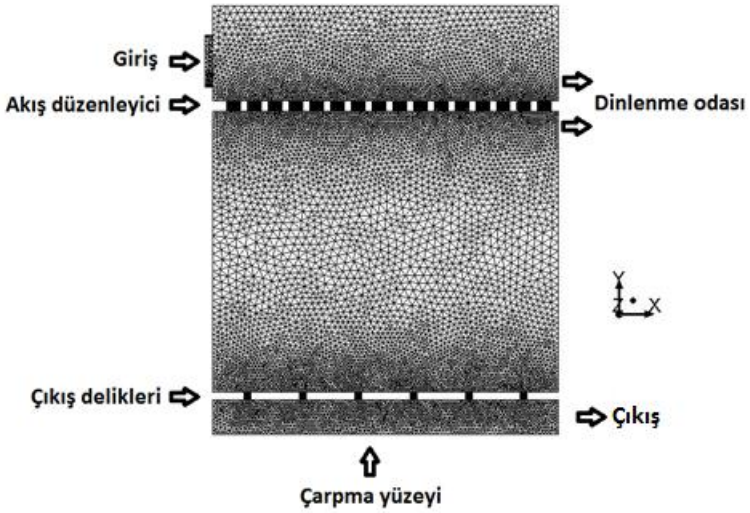
Dinlenme odasındaki akışı düzenlemek için bir akış düzenleyiciye gerek olabileceği öngörülmüştür. Şekil 6'da akış düzenleyici içeren sistemin ve akış alanının katı modeli görülmektedir. Sistem

modelinde iç yapının görülmesi için ön kapak kaldırılırken akış modelinde sistemin sol ön çeyreği ayrıntıların görülmesi için kesit alınmıştır. Akış düzenleyici olmayan geometride boyutlar aynı kalmakta sadece aradaki delikli levha bulunmamaktadır. Akış düzenleyiciye ihtiyacın var olup olmadığını anlamak için iki geometri üzerinde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu analizler sonucunda sayısal olarak modellenmiş iki farklı dinlenme odası bulunmaktadır. Bu sonuçların değerlendirilmesi sonucunda hangi dinlenme odasının daha uygun olduğuna karar verilmiştir.



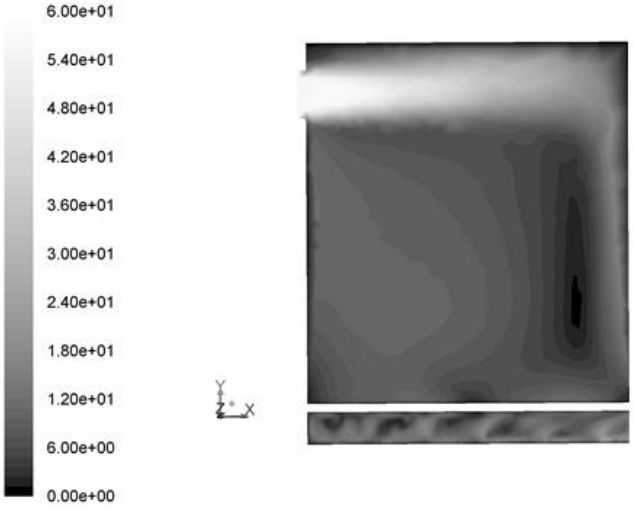
Şekil 6: Akış düzenleyicili dinlenme odasının ve ona ait akış alanının katı modeli

HAD analizi kısmında önce sistemin ağ yapısı hazırlanmıştır. Akış düzenleyicili dinlenme odasına sahip sistemin ağ yapısı Şekil 7.'de görülmektedir. İç bölgede üçgen prizma ağ geometrisi kullanılırken, duvara yakın bölgelerde sınır tabaka ağ yapısı kullanılmıştır. Analizler ise başlangıç koşulu olarak kullanılacak verinin daha hızlı elde edilmesi için laminer model ile başlatılıp daha sonra k-epsilon modeline geçiş yapılmıştır. k-epsilon modelinin standart modeli kullanılmaktadır. Birinci derece ayrıklaştırma yöntemi ile başlanan analizler ikinci dereceden ayrıklaştırma yöntemi ile son halini almaktadır. Sınır koşulu olarak Giriş kısmından belirli bir kütle debisi verilmektedir. En kritik akış durumunu görebilmek için çarpma bölümünün 3 yan sınırı duvar olarak modellenmiş, tek bir çıkış bırakılmıştır.



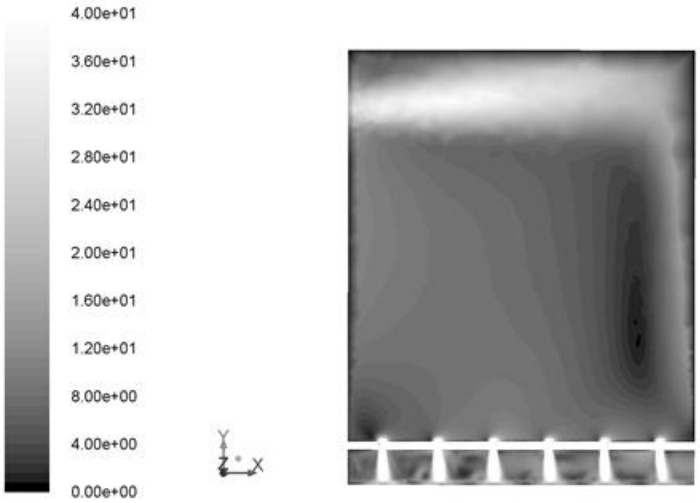
Şekil 7: Örnek HAD ağ yapısı: akış düzenleyicili dinlenme odası ve deney kısmının kesiti

HAD çalışmalarının dinlenme odası ve çarpma bölümünü ilgilendiren kısımları bu bölümde verilmiştir. Şekil 8.'de akış düzenleyicisiz dinlenme odalı sitemin simetri düzlemindeki akış yapısı gösterilmiştir. Burada görüleceği üzere karşı duvara çarpan akış dinlenme odası içinde düzensiz bir hız dağılımına sebep vermektedir.



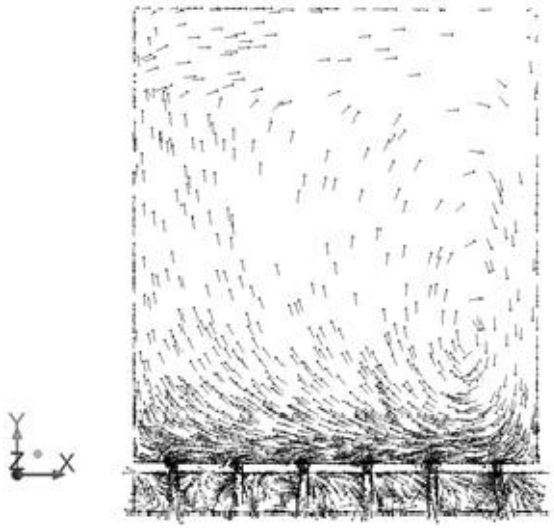
Şekil 8: Akış düzenleyicisiz dinlenme odalı sistemin simetri düzlemindeki hız dağılımı

Bu düzlemde jet delikleri bulunmadığı için Şekil 9'da simetri düzlemine en yakın deliklerin kesitinde oluşan akış verilmiştir. Şekil 9'da dinlenme odasındaki akış yapısının deliklere ulaştığı ve o bölgedeki akışa etki ettiği yorumu yapılabilir.



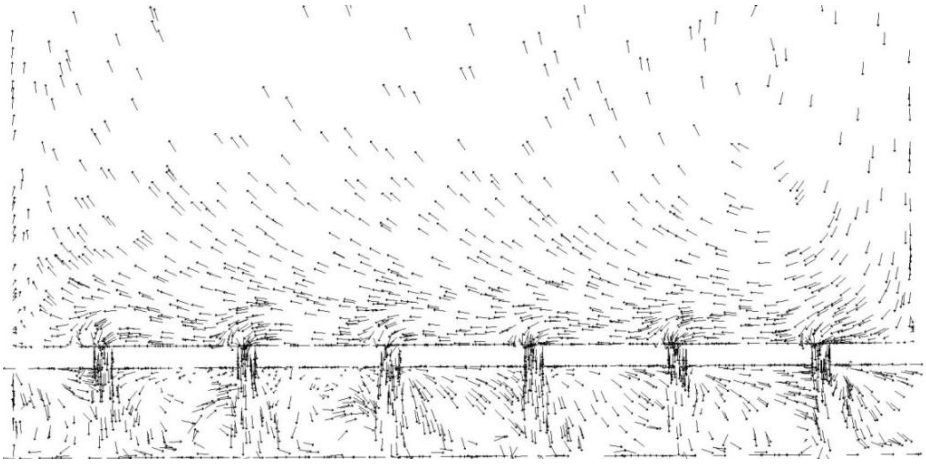
Şekil 9: Akış düzenleyicisiz dinlenme odalı düzeneğin simetri düzlemine en yakın çarpma deliği kesitinde hız dağılımı

Şekil 9'da gösterilen düzlemde oluşan akış yapısının vektör görüntüsü ise Şekil 10.'da verilmiştir. Dinlenme odası içinde oluşan vorteksin jet deliklerine giren akışı etkilediği daha net bir şekilde görülmektedir.



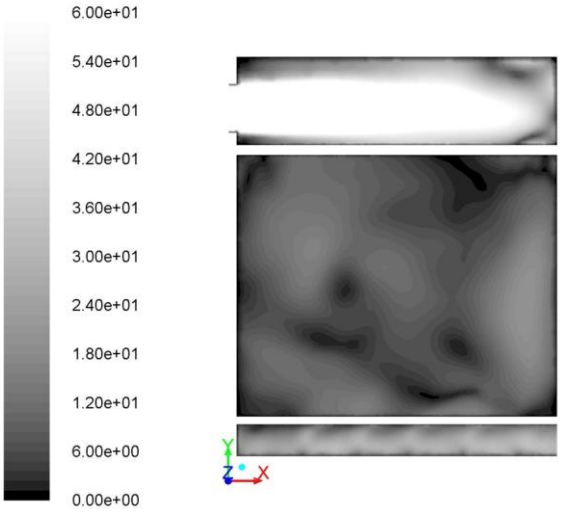
Şekil 10: Akış düzelticisiz dinlenme odalı düzeneğin simetri düzlemine en yakın çarpma deliği kesitinde akış yapısı vektör gösterimi

Deliklerin olduğu bölgedeki akış yapısını incelemek amacıyla Şekil11'da yakın görüntü verilmiştir. Burada görüleceği üzere dinlenme odası içinde oluşan akış yapısından dolayı deliklerdeki akış etkilenmektedir. Deliklere gelen akış delik eksenine paralel olmadığından deliklerden çıkan akış yapısı istenildiği gibi olmayacaktır. Bu sebeple paralelde akış düzenleyicili sistemin HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.



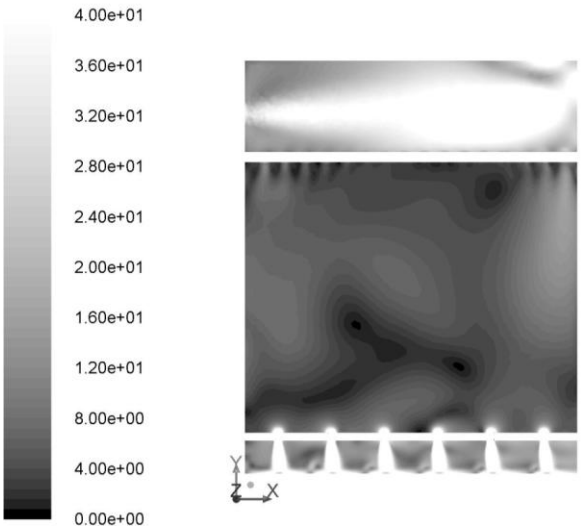
Şekil 11: Şekil 10'daki gösterimin çarpma bölümü ayrıntılı görüntüsü

Akış düzelticili dinlenme odasının HAD analizleri önceki analizlerle aynı koşullarda gerçekleştirildi. Şekil 12'de simetri eksenindeki hız dağılımı görülmektedir. Burada akış düzelticinin aşağısında kalan bölümde hızın daha düzgün dağılımlı olduğu görülmektedir.



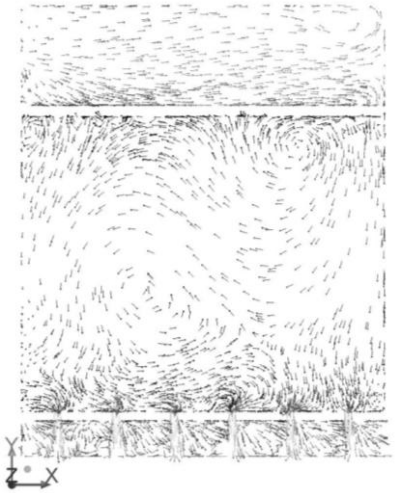
Şekil 12: Akış düzenleyicili dinlenme odalı düzeneğin simetri düzlemindeki hız dağılımı

Simetri düzlemine en yakın deliklerin merkezinden geçen düzlemde oluşan hız dağılımı Şekil 13'de gösterilmiştir. Giriş borusundan giren havanın dinlenme odasının karşı duvarına çarparak orada yüksek hız bölgesi oluşturduğu ama bu etkinin akış düzenleyici tarafından aşağı bölgeye sönümlenerek gönderildiği görülmektedir.

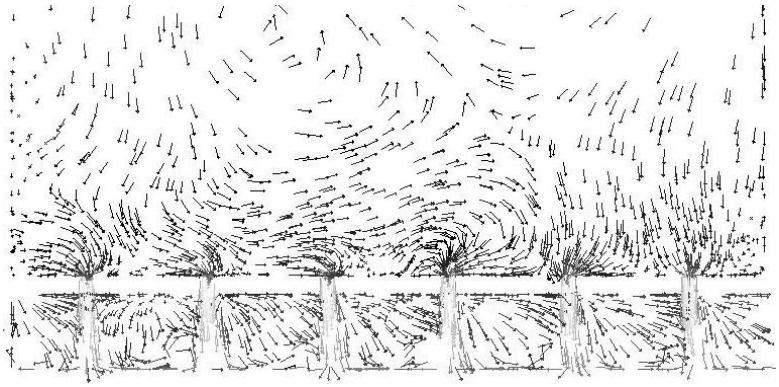


Şekil 13: Akış düzenleyicili dinlenme odalı düzeneğin simetri düzlemine en yakın çarpma jet deliği kesitindeki hız dağılımı

Şekil 14'te akış alanının vektör gösterimi bulunmaktadır. Akışın düzgün dağılımlı bir şekilde deliklere ulaştığı görülmektedir. Şekil 15'te ise delik bölgesinde akışın daha yakın ve ayrıntılı bir görüntüsü bulunmaktadır. Genel olarak sağlıklı bir jet giriş koşulundan bahsedilebilir.



Şekil 14: Akış düzenleyicili dinlenme odalı düzeneğin düzlemine en yakın çarpma jet deliği kesitindeki akışın vektör gösterimi

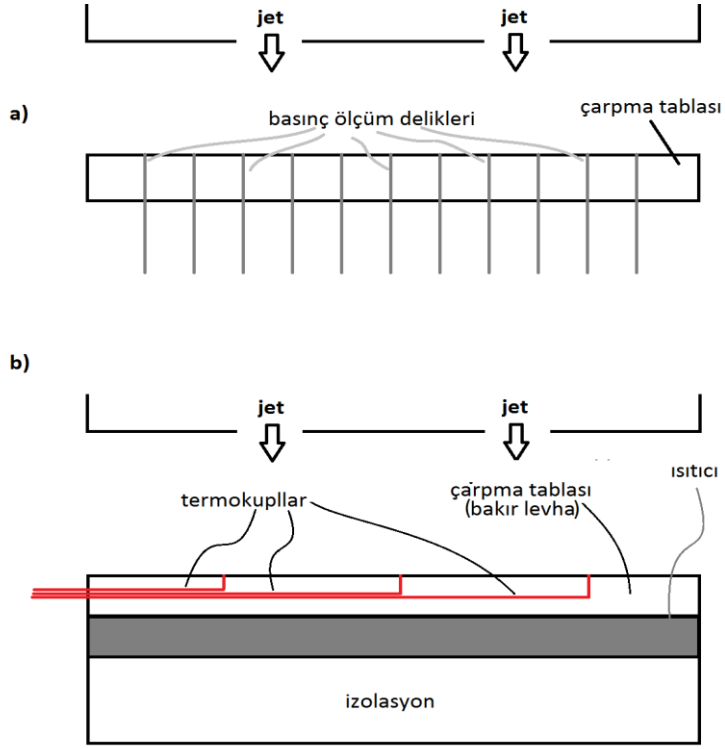


Şekil 15: Şekil 14'deki gösterimin çarpma bölümü ayrıntılı görüntüsü

Yapılan HAD analizleri sonucunda dinlenme odası içinde bir akış düzenleyicinin bulunmasının daha sağlıklı bir ölçüm düzeneği sağlayacağına karar verilmiştir. Bu doğrultuda tasarım sonuçlandırılarak teknik çizimler hazırlanmıştır.

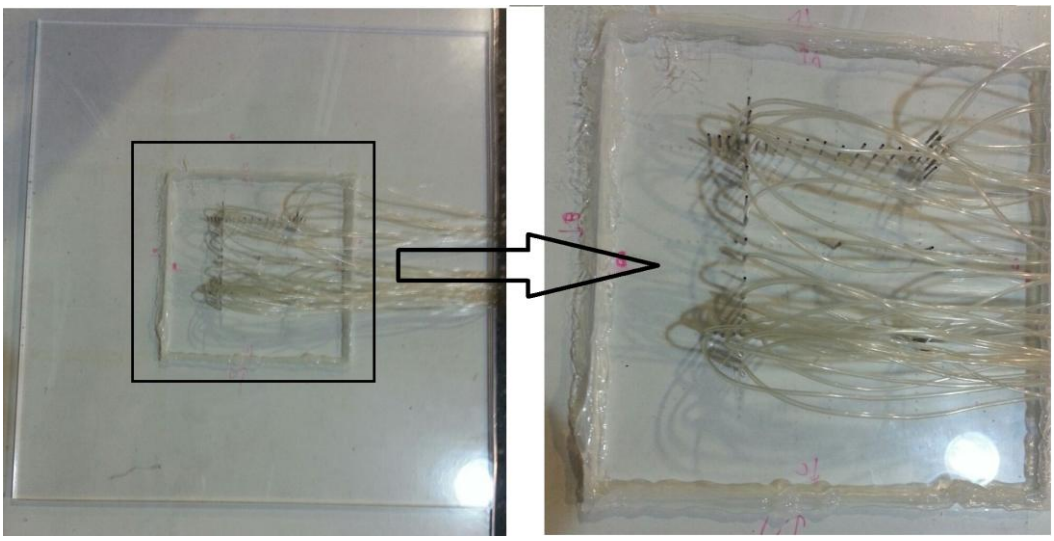
Çarpma Levhası Tasarımı

Deneysel çalışmalarda ilk etapta çarpma yüzeyinden basınç prizleri yardımı ile basınç dağılımı ve yine aynı yüzeyden sıcaklık dağılımı ölçülecektir. Sıcaklıklar termokupllar ile ölçülecektir. Bu sebeple iki ölçüm iki ayrı çarpma levhası ile gerçekleştirilecektir, basınç prizli çarpma levhası ve termokupllu çarpma levhası. Bu levhaların temsili görselleri Şekil 16.'de verilmiştir.



Şekil 16: Deneysel çalışmalarda kullanılacak çarpma levhaları

Basınç prizli levhada ölçüm bölgesindeki basınç prizi dağılımının değiştirilebilmesi için bölmeli bir tasarım yapılmıştır. Orta bölgeden alınan bir bölüm üzerine basınç prizleri açılacak ve böylece o bölge değişik dağılımlar ile üretilerek kullanılabilecektir.



Şekil 17: Çarpma Levhası

Orifismetre Tasarımı

Orifismetrenin tasarımı BS EN ISO 5167-2:2003 standardına göre yapılmıştır [BSI, 2003]. Tasarım sürecinde BS EN ISO 5167-1 standardındaki genel bilgiler de kullanılmıştır. D ve D/2 basınç prizli orifismetre tasarımı, üretimi ve kalibrasyonu laboratuvar olanakları ile gerçekleştirilmiştir. Basınç prizlerinden gelen verilere bağlı olarak kütlesel debi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır.

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_1} \quad (1)$$

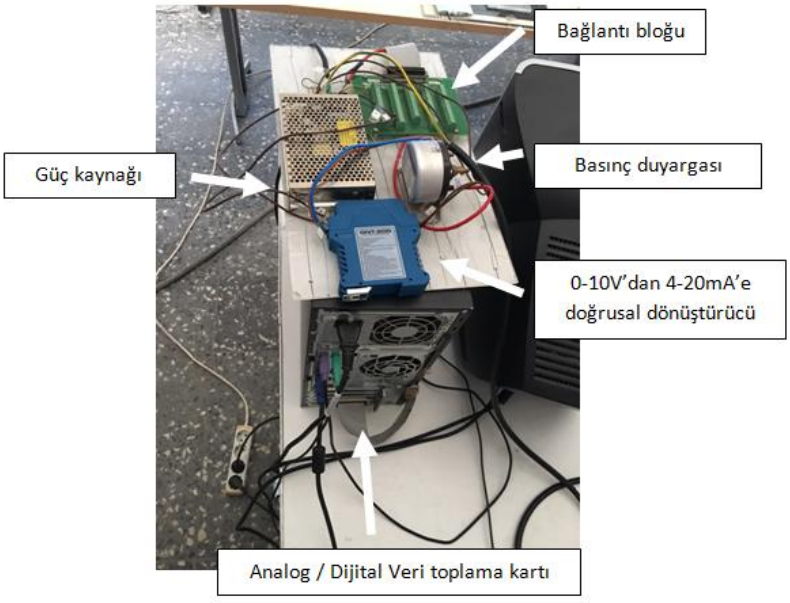
Şekil 18'de ise üretilen orifismetrenin parçaları gösterilmiştir.



Şekil 18: Orifismetre

Veri Toplama ve Akış Kontrol Sistemi

Veri toplama ve kontrol sistemi PC üzerinde bulunan bir NI PCI 6014 kart, bu karta bağlı CP 68LP bağlantı bloğu, bu blok üzerinde bağlı olan 2 adet basınç duyargası ve bir adet 0-10V'dan 4-20mA'e lineer dönüştürücüden oluşmaktadır. Sistem PC üzerinde koşan bir Labview programı vasıtası ile kontrol edilmekte ve gelen veriler işlenmektedir. Şekil 19'da sistemin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 19: Veri toplama ve kontrol sistemi

Üretim ve Montaj

Sistemin üretim aşamaları Trisonik Araştırma Laboratuvarının sahip olduğu üretim alt yapısı ile gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar atölyelerinde lazer kesim, 3 eksen CNC freze, manuel freze, torna, ahşap kesim tezgahları bulunmaktadır. Nihai tasarım belirlenen malzeme ve üretim yöntemleri ile imal edilip yine laboratuvar imkanları ile kurulmuştur.

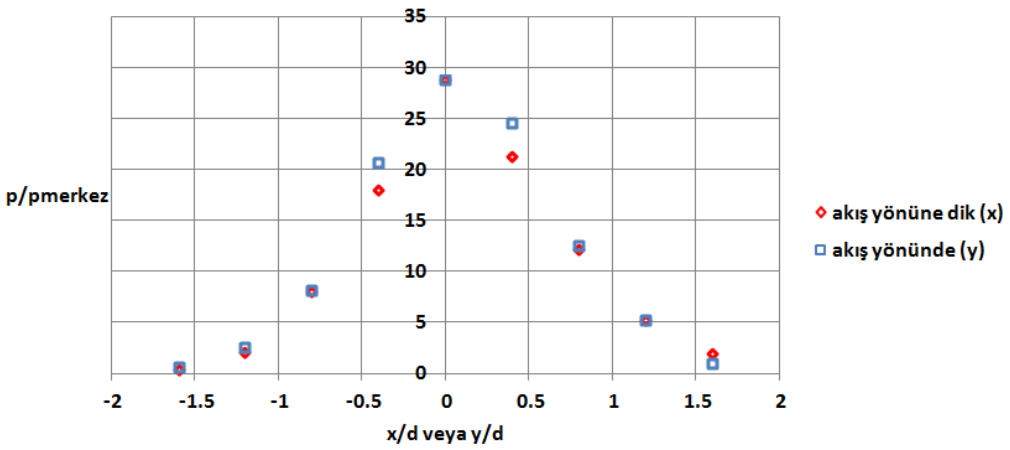
UYGULAMALAR

Montajı yapılmış olan sistem Şekil 20'de gösterilmektedir. Sistemin montajı ile birlikte ilk deneme çalışmaları yapılarak sistem devreye alınmıştır. Sistem çalışır durumda ve gelecek çalışmalarda kullanıma hazır durumdadır. Labview kodu üzerinden sisteme girilen debi değeri sabit tutularak farklı çarpma levhaları üzerinden veya çarpma bölgesinde farklı ölçüm sistemleri ile ,örn. pitot tüpü, sıcak tel anemometresi, lazer doppler anemometresi, akış yapısı incelenebilecektir.



Şekil 20: Trisonik Araştırma Laboratuvarı çarpma soğutması deney düzeneği

Örnek deneme çalışmasında basınç prizli levha çarpma bölgesine jet çıkışından $5d_{delik}$ uzaklıkta yerleştirilmiş ve merkez bölgedeki bir deliğin altında oluşan basınç dağılımı ölçülmüştür. Reynolds sayısı 20000 olarak belirlenmiştir. Delikler arası mesafe 8 delik çapıdır ve eşit aralıklı dağılım göstermektedir. Sabit debi orifismetre yardımı ile sağlanarak ölçümler alınmıştır. Bu ölçüm sonucunda elde edilen basınç dağılımı Şekil 21'de gösterilmiştir. Ölçülen basınçlar alt tablanın merkezinde bulunan basınç prizinden alınan basınç değeri (p_{merkez}) ile boyutsuzlaştırılmıştır. Merkez bölgede olması sebebiyle çapraz akış etkisi çok az görülmektedir.



Şekil 21: Çarpma tablasından alınan basınç dağılımı

DEĞERLENDİRME

Çarpma soğutması havacılık gaz türbin motorları için önemli bir soğutma teknolojisidir. Bu teknoloji ile ilgili çalışmaların İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde yapılması için bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneği ile yapılacak çalışmaların çarpma soğutma teknolojisi ile ilgili gelişmelere destek vereceği düşünülmektedir. Aynı zamanda üniversitemize bu alanda bir bilgi birikimi kazandırılacaktır.

Sistemin genel yapısı kararlaştırıldıktan sonra tasarım aşamasına geçilmiştir. Öncü katı modeller oluşturulmuştur. Dinlenme odası içinde akış düzenleyicili ve düzenleyicisiz iki seçenek oluşturulmuştur. Dinlenme odasındaki akış yapısı HAD analizleri ile incelenmiştir. Dinlenme odası içinde bir akış düzenleyici delikli levha bulunmasının akışa olan etkisinin olumlu olduğu görülerek bu geometri ile tasarıma devam edilmiştir. Akış kontrol ve veri toplama sistemi kurulmuştur. Bu noktadan sonra sistemin laboratuvarda bulunan üretim altyapısı ile üretimine geçilerek kurulum işlemleri tamamlanmıştır. Kurulumun bitmesi ile HAD çalışmalarında elde edilen sonuçlar yapılacak deneysel çalışma ile karşılaştırılarak sistemin çalışması ile ilgili bir deneme yapılmıştır. Çarpma soğutma teknolojisine dair ayrıntılı çalışmalar için uygun bir deney/test sistemi ortaya çıkarılmıştır.

Yukarıda bahsedilmeyen fakat planlanmasının teknolojinin yönelimine uygun düşeceği konulardan biri jet çıkış geometrisinin dairsel olmayan geometriler olması olabilir. Üç boyutlu yazıcı teknolojisinin artık metallere de uygulanmaya başladığı dünyamızda çarpma jetlerinin soğutulacak geometriye uygun şekilde dairesel olmayan şekiller de alabileceği düşünülmektedir. Bu geometrik değişimin akış ve ısı transferi üzerine etkisinin detaylı incelenmesinin gelecek bilgi birikimi açısından önem arz ettiği düşünülmektedir.

Kaynaklar

[1] Barata, J. M. M., Durao, D. F. G., 2004. *Laser-Doppler Measurements of Impinging Jet Flows Through a Crossflow*, Experiments in Fluids, Cilt 36, s. 665-674

[2] British Standards Institution, 2003. *BS EN ISO 5167-2: 2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full*

[3] Chougule, N.K., Parishwad, G.V., Gore, P.R., Pagnis, S. ve Sapali, S.N., 2011. CFD Analysis of Multi-jet Air Impingement on Flat Plate, World Congress on Engineering, London, U.K.

[4] Chyu, M., K. ve Siw, S., C., 2013. *Recent Advances of Internal Cooling Techniques for Gas Turbine Airfoils*, Journal of Thermal Science and Engineering Applications, Cilt. 1

[5] Florschuetz, L. W., Berry, R. A. ve Metzger, D. E., 1980. *Periodic Streamwise Variations of Heat Transfer Coefficients for Inline and Staggered Arrays of Circular Jets with Crossflow of Spent Air*, Journal of Heat Transfer, Cilt 102, s. 132-137

[6] Han, J., C., Dutta, S. ve Ekkad, S., 2000. *Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology*, Taylor & Francis, New York

[7] Han, J. C. ve Huh, M., 2009. *Recent Studies in Turbine Blade Internal Cooling*, International Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine Systems, Antalya, Turkey.

[8] Koff, B., 1991. *Spanning the globe with jet propulsion*, 21st Annual Meeting and Exhibit, AIAA, VA,USA

[9] Livinghood, J., N., B. ve Hrycak, P., 1973. *Impingement Heat Transfer from Turbulent Air Jets to Flat Plates*, NASA, s.1

[10] Zuckerman, N. ve Lior, N, 2006. *Jet Impingement Heat Transfer: Physics, Correlations, and Numerical Modeling*, Advances in Heat Transfer, Cilt 39, s. 565-631.