



## JET MOTORLARINDA UYGULANAN EFÜZYON FİLM SOĞUTMA AKIŞ KARAKTERİSTİKLERİNİN PIV YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

Sinan Eren YALÇIN<sup>1</sup>, Evren Yılmaz YAKIN<sup>2</sup>, Melih Cemal KUŞHAN<sup>3</sup>, Tahir Hikmet KARAKOÇ<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Işık Üniversitesi, İstanbul, Türkiye- [eren.sinan.yalcin@gmail.com](mailto:eren.sinan.yalcin@gmail.com)

<sup>2</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, [evrenykn@gmail.com](mailto:evrenykn@gmail.com)

<sup>3</sup> Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, [mkushan@ogu.edu.tr](mailto:mkushan@ogu.edu.tr)

<sup>4</sup> Uçak Gövde Motor Bakım Programı, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, [hikmetkarakoc@gmail.com](mailto:hikmetkarakoc@gmail.com)

DOI: [10.23890/SUHAD.2018.0207](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2018.0207)

### ÖZET

Efüzyon soğutma tekniği, modern yanma odalarında kullanılan en gelişmiş soğutma teknolojisidir. Bu çalışmada 1/9 ölçekte boyutlandırılmış bir yanma odası cidarında, efüzyon film soğutmanın ana akım üzerine etkileri Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) yöntemi kullanılarak deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla bu çalışmada, ana akım Reynolds (Re) sayısı 15000 değerine sabitlenmiş, 2.25 mm delik çaplı efüzyon plakası için, delik açıları 30° ve 45° değişiyor iken, efüzyon plakasından 7 farklı üfleme debisi için testler gerçekleştirilmiş ve soğutma filmi oluşumu incelenmiştir. PIV deneylerinden elde edilen veriler incelenerek, çapraz akışta jet karışımlarında meydana gelen akış haritası çıkarılmıştır ve film oluşma karakteristiği belirlenmiştir. Akış haritası sonuçlarına göre, soğutucu deliklerden düşük debili üflemlerde jetler ana akıma yenik düşmekte, tam tersine yüksek debilerde jetler ana akımla eş baskın özellikte olduğu için, film oluşumu gözlemlenmiştir. Ayrıca soğutma deliklerinin açılarının artışının film oluşumuna olumsuz etkisi gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Efüzyon soğutma, Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV), jet akışı, film formation.

### INVESTIGATION of EFFUSION COOLING FLOW CHARACTERISTICS in JET ENGINES via PIV METHOD

#### ABSTRACT

Effusion cooling technology is the most advanced cooling technology used in modern combustion chambers. In this study, the effects of effusion film cooling on the main stream in a 1/9 scaled combustion chamber walls were investigated experimentally using Particle image velocimetry (PIV) method. For this purpose, the main stream Reynolds number (Reynolds number) was fixed to 15000. For the 2.25mm hole diameter effusion plate, the hole angles were changed by 30° and 45°, and for 7 different effusion flow rates, tests were done, and the cooling film formation was examined. By examining the data obtained from the PIV experiments, the flow map in the cross-flow jet blends was obtained and the film formation characteristics were determined. According to the results of the flow map, during the low flow rate coolant flow, coolant jets were defeated by the main flow, but instead at high coolant flow rate, coolant jets became dominant and coolant film formation was observed. Furthermore, the increase in the cooling holes angles has been shown to have a negative effect on the cooling film formation.

**Keywords:** Effusion cooling, Particle Image Velocimetry (PIV), jet flow, film formation.

#### 1. GİRİŞ

Gaz türbinleri, günümüzde havacılık endüstrisinde, tanklarda, askeri gemilerde ve elektrik üretim tesisi gibi tesislerde çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Thole ve Knost 2005; Shine, Sunil Kumar, ve Suresh, 2012). Fakat gaz türbinleri yüksek gaz sıcaklıklarında çalışmaktadır. Bu nedenle, film

soğutma, efüzyon soğutma, konveksiyon (taşınım) soğutma, çarpma soğutma, rejeneratif soğutma, sprey soğutma, terleme soğutma ve sıvı enjeksiyonla film soğutma gibi soğutma teknikleri ile gaz türbinlerinin sıcak parçalarını soğutmada kullanılan soğutma tekniklerindedir (Krewinkel 2013; Huang vd. 2015). Günümüzde, modern gaz türbinlerinin sıcak gaza maruz kalan kısımlarında, film soğutma

ve film soğutmanın başka bir versiyonu olan efüzyon soğutma en çok kullanılan yöntem olmasına rağmen (Singh, Premachandran, ve Ravi, 2017; Xiao-ming, Jing-zhou, ve Hua-sheng, 2015), efüzyon soğutmanın temelleri 1970'lere dayanmaktadır (Goldstein, R. J., Eckert ve Burggraf 1974; Goldstein vd. 1977; Ito, Goldstein, ve Eckert 1978; Kadotani ve Goldstein, 1979).

Modern gaz türbini kanatlarında çok sık kullanılan film soğutma ile karşılaştırıldığında, efüzyon soğutmada yoğun aralıklı yerleştirilmiş ardışık sıralı çok fazla soğutma deliği bulunmaktadır (Gustafsson ve Johansson, 2001; Cho, Rhee, ve Goldstein 2008; Krewinkel, 2013; Huang vd., 2015). Film soğutmada, ikincil sıvı veya soğutucu akışkanın enjekte edildiği delikler, soğutulacak yüzeye belirli açılarda yerleştirilmektedir (P. M. Ligrani, Wigle, ve Jackson, 1994; Schmidt, Sen, ve Bogard, 1996; L. Zhang, Yin, ve Moon, 2009; Singh, Premachandran, ve Ravi, 2017). Efüzyon deliklerinin çaplarına, açılmasına ve yerleşimlerine göre, ana akıma enjekte edilen ikincil akışkan değişen ebatlarda ters dönüşlü kidney vorteksleri üretmektedir (Singh, Premachandran, ve Ravi, 2017). Bu vorteksler enjekte edilen akışın ana akım ile karışımını arttırmaktadır. Bu nedenle üfleme deliklerinin açısı, oryantasyonu, şekli ve malzeme yüzey pürüzlülüğü, bu vorteksleri minimize etmede veya tamamen ortadan kaldırarak yüzeyin ikincil akışkanla maksimum seviyede temas etmesini sağlayıp daha yüksek performanslı film soğutma elde etmede kritik rol oynamaktadır (Singh, Premachandran, ve Ravi, 2017; Krewinkel, 2013).

Efüzyon deliklerinden üflenen soğutucu akışkanın ana sıcak akışkan debisine oranına üfleme oranı adı verilmektedir. Literatürde değişik üfleme oranına göre film soğutma performansını içeren çok sayıda çalışma bulunmaktadır, fakat bu çalışmalarda sonuçlar zıtlıklar içermektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, değişik üfleme oranlarında yapılan testlerin sonucunda, üfleme oranının artmasıyla film soğutma veriminin arttığı belirtilmektedir (P. Ligrani vd., 2012; Ji vd., 2018). Buna karşın, Andrei ve arkadaşları (Andrei vd., 2014), 1 ile 3 arası değişen üfleme oranları için bir dizi deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda, efüzyon plakasının ön kısımlarında düşük üfleme oranının daha verimli soğutma sağladığını, plakanın arkasına doğru ise yüksek üfleme oranının soğutma performansının daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Huang ve arkadaşları (Huang vd., 2015), 0.5 ve 1 mm çaplı efüzyon deliği çapları için yaptıkları testlerin sonucunda 0.5 mm çaplı efüzyon deliklerinde üfleme oranının artması ile soğutma performansının arttığını, 1 mm çaplı efüzyon delikli plakada ise üfleme oranının azalması ile soğutma performansının arttığını göstermişlerdir. Bulgularını da efüzyon deliği çapı arttıkça üflenen soğuk hava ile ana sıcak hava akımının daha fazla

karışması nedeni ile soğutma verimi düşer diye açıklamışlardır.

Son yıllarda yapılmış derleme çalışmasında üfleme delik açısı, oryantasyonu ve şeklinin film soğutma verimini etkileyen temel faktörler olduğu belirtilmiş ve bu konuda çok çeşitli literatür çalışmalarının özeti derlenmiştir (Krewinkel, 2013). Delik üfleme açıları üzerine Forter ve Lampard (Foster ve Lampard, 1980) tarafından yapılan ilk çalışmalarda 35°, 55° ve 90° üfleme açıları test edilmiştir. Bu çalışmada düşük üfleme oranlarında düşük açılarda daha verimli soğutma sağladığını, buna rağmen yüksek üfleme oranlarında yüksek açılarda daha verimli soğutma sağladığını göstermişlerdir. Bir başka çalışmada (Gustafsson ve Johansson, 2001), değişken delik aralıklarında ve 15°, 20° ve 30° üfleme delikleri eğimlerinde efüzyon soğutma performansını incelemişlerdir. Üfleme açıları birbirine yakın değerler olsada, 15°, 20°'lik düşük üfleme açılarında soğutma performansının daha iyi olduğunu gösterebilmişlerdir. Andreini ve arkadaşları (Andreini vd., 2017), soğutucu akışkanın ana akışkana enjekte edildiği delik açılarının üç farklı oryantasyonu için (20°, 30° ve 90°), adyabatik film soğutma üzerine etkisini gerçek bir yanma odası ortamında deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında daha düşük eğim açılarında, soğutma jetlerinin ana akımın içine penetrasyonunun azaldığını, arzu edilen en düzgün soğutucu film yapısının oluştuğunu ve soğutma veriminin dahada arttığını göstermişlerdir.

Yao ve arkadaşları (Yao, Zhang, ve Wang, 2013; Yao, Zhang, ve Tan, 2014), deneysel ve sayısal olarak çıkışa doğru daralan efüzyon deliklerinin film soğutma performansını arttırdığını deneysel olarak göstermişlerdir. Buna ek olarak sayısal çözümleme ile çıkışa doğru daralan efüzyon delikleri sayesinde kidney vortekslerinin efüzyon delikleri yerine deliklerin kenarlarında olduğunu ve dönme yönlerinin ters yönde olduğunu göstermişlerdir. Bu nedenle film soğutmanın daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Zhang ve arkadaşları (J. Zhang vd., 2017) girişi ve çıkışı silindirik ve girişte silindirik olup çıkışa doğru dikdörtgen şeklini alan efüzyon deliklerinin soğutma performansına etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, girişte silindirik olup çıkışa doğru daralan dikdörtgen kesitli deliklerin soğutma performansının daha iyi olduğunu deneysel olarak ispatlamışlardır. Bu çalışmada, literatürde de belirtildiği gibi günümüz gaz türbinlerinde en çok kullanılan soğutma tekniği olan efüzyon soğutma tekniği Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) tekniği kullanılarak incelenmiştir. Ana akım Reynolds (Re) sayısı 15000 değerine sabitlenmiş, ve efüzyon plakası için delik çapı 2.25 mm değerinde sabitlenmiş olup delik açıları 30° ve 45° değişiyor iken, efüzyon plakasından 7 farklı üfleme debisi için testler gerçekleştirilmiş ve soğutma filmi oluşumu incelenmiştir. Bu sayede değişik üfleme açısı ve

değişik üfleme debileri için film soğutma performansının karakterize edilmesi sağlanmıştır.

## 2. YÖNTEM

Araştırma çerçevesi kapsamında oluşturulan deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 1a ve görsel şekli Şekil 1b' de gösterilmiştir. Şekil 1a ve Şekil 1b'de, 1 numara ile gösterilen 2.2 Kw gücünde bir fan ve fan sürücü sayesinde sisteme kontrollü bir hava debisi girişi (ana akım) sağlanmaktadır. Fandan çıkan sabit debideki ana akım havasının sıcaklığı, fandan sonra 2 numara ile belirtilen 5.5 kW gücündeki ısıtıcı sayesinde istenilen sıcaklık değerine getirilebilmektedir. Fakat bu çalışmada ısıtıcı kullanılmamış ve ortam sıcaklığında testler gerçekleştirilmiştir. Isıtıcıdan çıkan ana akım havası, görüntü alabilmek amacıyla pleksiglas malzemeden yapılmış 14x14cm kesit alanında ve toplam 1.2 m uzunluğunda, 3 ve 4 numara ile belirtilen tünele yönlendirilmektedir. Efüzyon soğutma test plakaları,

test düzeneğinin 4 numara ile belirtilen test odası kısmının altına yerleştirilmişlerdir.

Soğutucu akışkan test plakalarına ayrı bir hattan beslenmektedir. Soğuk hava beslemesi, kompresörden beslenen 7 numara ile belirtilen basınçlı hava tankı vasıtası ile yapılmaktadır. Basınçlı hava tankından çıkan hava, 2 ayrı hatta bölünmekte ve 8 ile 9 numara ile belirtilen akış kontrollü debimetrelerden geçirilmek kaydıyla hava tüneli altında film ve efüzyon için bölünmüş, 5 ile 6 numaralı ayrı dinlenme odalarına girişi sağlanmaktadır. Dinlenme odasının görevi soğutucu akışkan havasının jet etkilerinden ve türbülansın arınmasını sağlamak ve dinlenme odasının özellikle üst bölgesinde üniform bir akış alanı sağlayarak üniform şekilde tünele soğuk hava beslemesi temin etmektedir.

Tablo 1'de bütün testlerin yapıldığı ortam koşulları hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

Tablo 1: Test ortamı koşulları

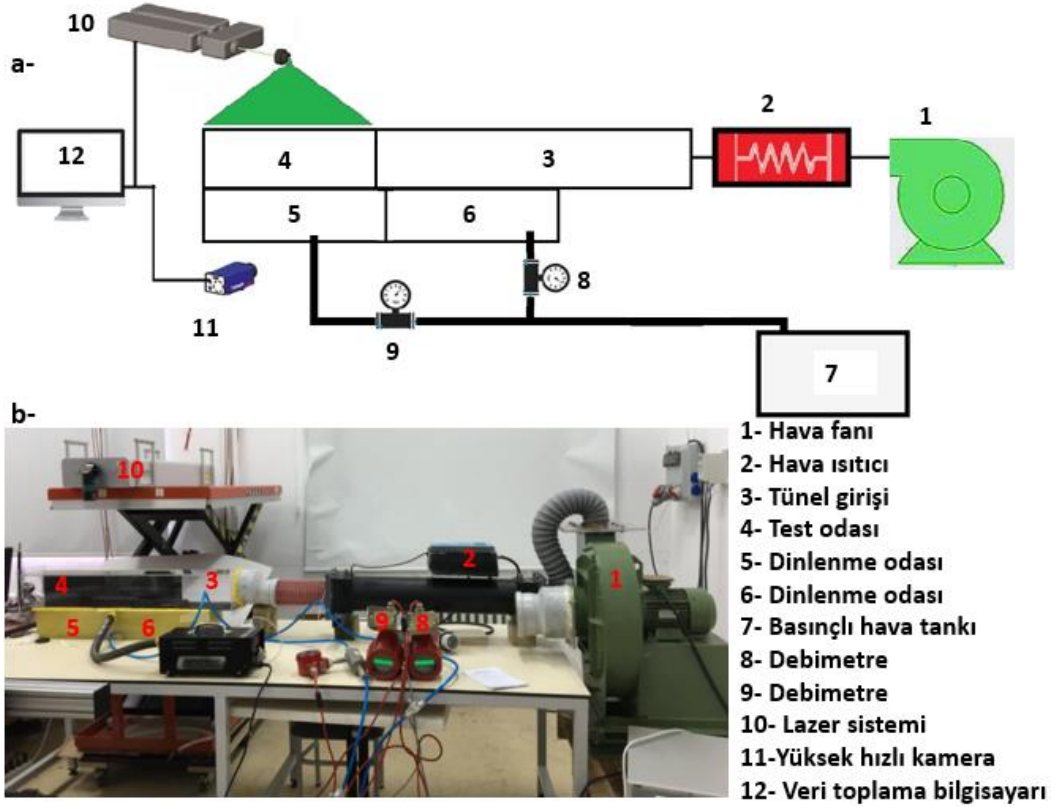
| Parametre  | Değer         |
|--|---------------|
| Test Tüneli Kesit Alanı (mm <sup>2</sup> )                   | 140 x 140     |
| Test Plakası Uzunluğu (mm)                                   | 400           |
| Test Tüneli Giriş Uzunluğu (mm)                              | 800           |
| Ana Akım Sıcaklığı (K)                                       | 293           |
| Soğutucu Akışkan Sıcaklığı (K)                               | 293           |
| Ana Akım Hızı (m/s)  | 2             |
| Ana Akım Yoğunluğu ( $\rho_{aa}$ ) (kg/m <sup>3</sup> )      | 1.19 – 0.99   |
| Ana Akım Reynolds (Re)                                       | 15850 – 13150 |
| Soğutucu Hava Yoğunluğu ( $\rho_{sa}$ ) (kg/m <sup>3</sup> ) | 1.19          |

Test edilen efüzyon soğutma plakalarının üstten (yandan) geometrik karakteristiği Şekil 2a (Şekil 2b)'de ve test edilen efüzyon soğutma plakalarının boyutsal detayları Tablo 2'de gösterilmiştir. Burada

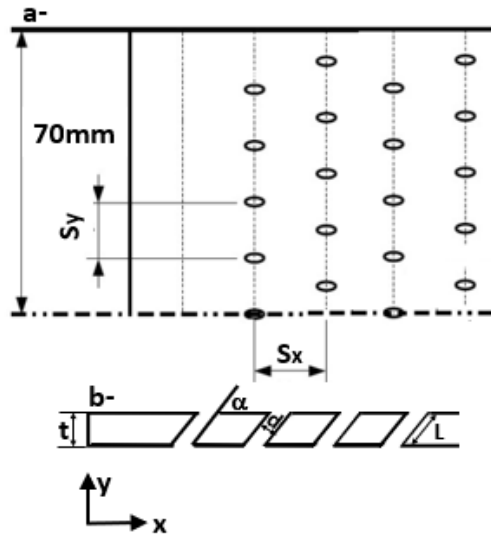
t: test plakası kalınlığını (mm), d: delik çapını (mm), L: efüzyon delik uzunluğunu (mm),  $S_x$ : eksenel delik adımını (mm),  $S_y$ : yanal delik adımını (mm) ve  $\square$  delik açısını ifade eder.

Tablo.2: Test edilen efüzyon soğutma test plakaları boyutları

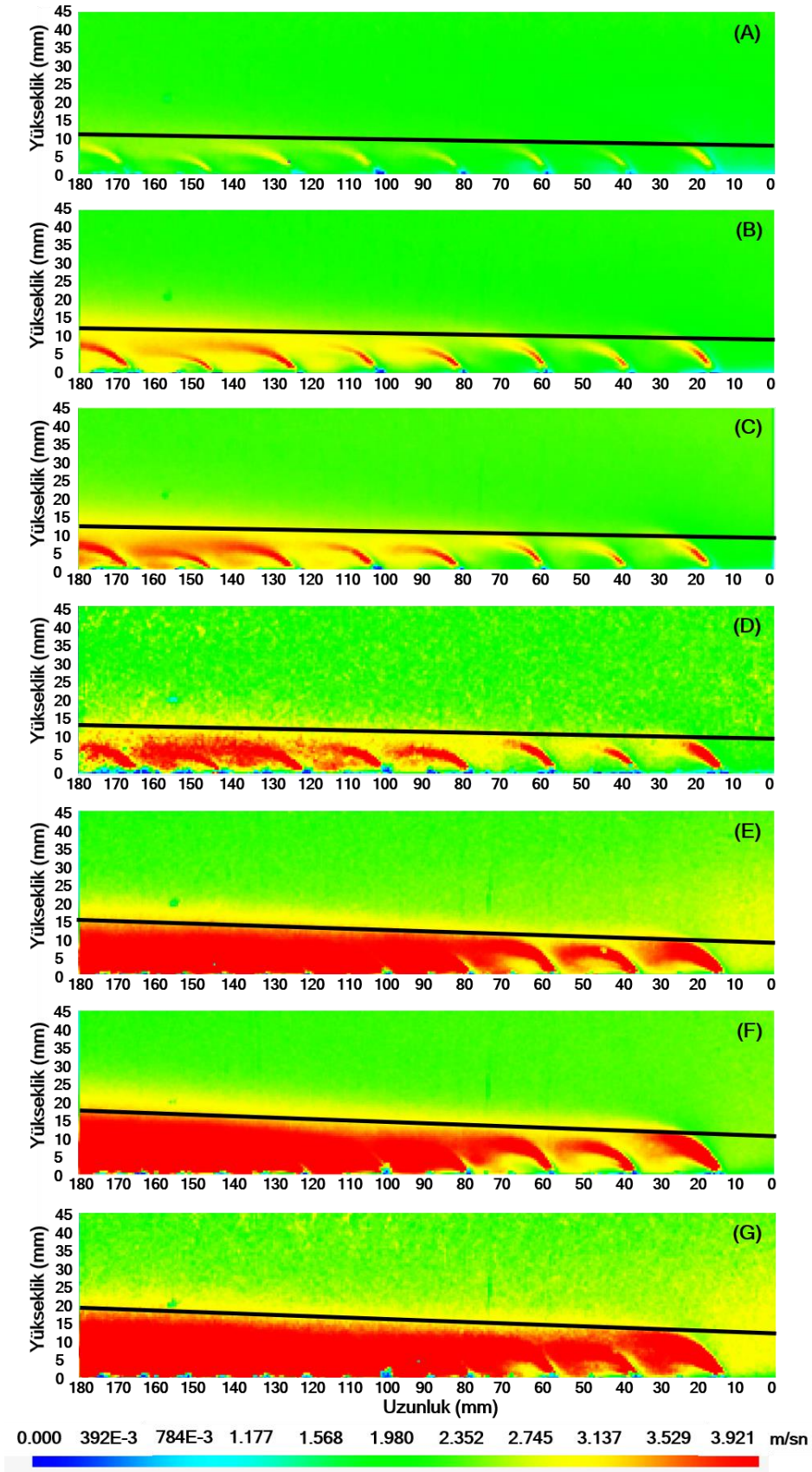
| Test Plakası | t (mm) | d (mm) | $\square$ | L/d | $S_x$ (mm) | $S_y$ (mm) | $S_x/d$ | $S_y/d$ |
|--------------|--------|--------|-----------|-----|------------|------------|---------|---------|
| 1            | 10     | 2.25   | 30        | 8.9 | 11         | 11         | 4.9     | 4.9     |
| 2            | 10     | 2.25   | 45        | 6.3 | 11         | 11         | 4.9     | 4.9     |



Şekil.1: Efüzyon soğutma test düzeneği şematik gösterimi (a) ve test düzeneği fotoğrafı (b).



Şekil.2: Efüzyon soğutma test plakası geometrik karakteristiği. (a) Üstten görünüş ve (b) yandan görünüş.



Şekil.3: 2.25 mm efüzyon delik çapı (d) ve 30° üfleme açısında ana akım Reynolds sayısı 15000 iken, A) 0.24 kg/dk (Re=520), B) 0.35 kg/dk (Re=750), C) 0.48 kg/dk (Re=1000), D) 0.70 kg/dk (Re=1500), E) 1.05 kg/dk (Re=2250), F) 1.40 kg/dk (Re=3000), G) 1.65 kg/dk (Re=3500) soğutucu akışkan üfleme debilerinde PIV sonuçlarında elde edilen skaler hız haritası ve film oluşumu

### 3. BULGULAR

Deneyler ana akım sıcaklığı 293K ve ana akım Reynolds sayısı 15000 değerine sabitlenmiş iken, 7 farklı efüzyon debisinde gerçekleştirilmiştir ve film oluşumunun debi değişimine göre etkisi

incelenmiştir. Tablo 3, sabitlenmiş 2.25mm efüzyon soğutma deliği çapı için efüzyon debisi ve efüzyon debisine karşılık gelen Reynolds sayısı, üfleme oranı ve hız oranını göstermektedir.

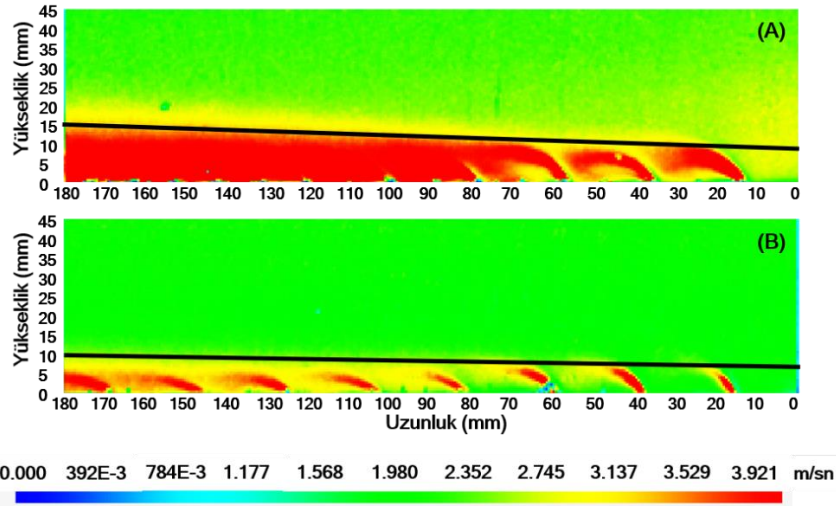
Tablo.3: 2.25 mm delik çaplı efüzyon test plakası için test koşulları

| Efüzyon Debisi (kg/dk) | Delik Alanı (m <sup>2</sup> ) | Re <sub>D</sub> | Üfleme Oranı (BR) | Hız Oranı (VR) |
|------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------|----------------|
| 0.24                   | 83*10 <sup>-5</sup>           | 520             | 2.42              | 5.17           |
| 0.35                   |                               | 750             | 3.52              | 7.52           |
| 0.48                   |                               | 1000            | 4.74              | 10.11          |
| 0.70                   |                               | 1500            | 6.94              | 14.82          |
| 1.05                   |                               | 2250            | 10.35             | 22.11          |
| 1.40                   |                               | 3000            | 13.88             | 29.64          |
| 1.65                   |                               | 3500            | 16.30             | 34.80          |

2.25 mm delik çaplı efüzyon soğutma plakası için 30° üfleme açısında film oluşumu Şekil 3'te gösterilmiştir. Ana akım sağdan sola akmaktadır. Film oluşumunun gözlemlenebilmesi amacıyla, üfleme debisi değişse dahi, akış hız dağılımı sabit bir aralıkta tutulmuştur. Bu sayede film kalınlığının değişimi de gözlemlenebilmektedir. Şekil 3'deki (0,0) koordinatları, Şekil 2'deki (x=0, y=0) koordinatlarını ifade etmektedir. Şekil 3'ten anlaşıldığı gibi, düşük üfleme debilerinde (düşük Reynolds sayılarında) film tabaka oluşmamakta, üflenen soğutma havası ana akıma karışmaktadır. Üfleme debisi arttıkça, film oluşumu gözlemlenebilmektedir.

Şekil 3 üzerinde bulunan siyah çizgi, film tabaka oluşumunu ve oluşan film tabakanın yüksekliğinin

üfleme debisinin artışı ile değişimini göstermektedir. Düşük üfleme debilerinde film oluşmamaktadır. Üflenen soğutma havası ana akıma karışmaktadır. Şekil 3 A, B ve C'de görüldüğü gibi, düşük üfleme debilerinde efüzyon soğutma deliklerinden üflenen hava ana akıma karışmaktadır. Şekil 3 A, B, C ve D'de bulunan siyah çizgi tam olarak oluşan filmi ifade etmemekte, fakat film oluşumunun nasıl geliştiğini göstermektedir. Debi artışı ile beraber soğutma film tabakası belirginleşmeye başlamaktadır. Şekil 3 D, E ve F'de bulunan siyah çizgi oluşmuş soğutma film tabakasını ifade etmektedir. Üfleme debisi artışı ile birlikte soğutma film tabakası kalınlığı 20 mm'nin üzerine çıkmaktadır.



Şekil.4: 2.25 mm efüzyon delik çapı için ana akım Re sayısı 15000 iken A)30° ve B)45° üfleme açısında 1.05 kg/dak (Re=2250) soğutucu akışkan üfleme debisinde PIV sonuçlarından elde edilen skaler hız haritası ve film oluşumu

Şekil 4'te 2.25mm üfleme delik çaplı plaka için, 30° ve 45° üfleme açılarındaki 1.05 kg/dakika efüzyon soğutma debisi sisteme verilirken film oluşumu incelenmiştir. Şekil 4'ten de görüldüğü gibi aynı çalışma şartlarında üfleme açısının artışı ile birlikte

film oluşumunun bozulduğu gözlemlenmektedir. Buda beklenen bir sonuçtur. Üfleme açısı arttıkça üflenen hava ana akıma daha hızlı karışmakta ve film oluşumu olumsuz etkilenmektedir. Üfleme açısı azaldıkça, ana akıma karışım azaldığı için daha belirgin film oluşu gözlemlenebilmektedir.

2.25 mm üfleme delik çaplı plaka için 45° üfleme açısında da Şekil 3'te olduğu gibi debi artışı ile film oluşumu gözlemlenmiştir. Bu nedenle film oluşumunun debi artışı ile değişimi Şekil 3'te olduğu gibi ayrıntılı olarak gösterilmemiştir. Ancak, Sekil 4'ten de anlaşıldığı gibi 45° üfleme açısında oluşan film 30° üfleme açısında oluşan film gibi etkin değildir.

#### 4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışma ile gaz türbinlerinde kullanılan efüzyon soğutmanın deneysel olarak incelenmesi ve 1/9 oranında ölçeklendirilmiş bir soğutma odası için akış haritasının çıkarılması sağlanmıştır. Bu bağlamda, 2.25 mm delik çaplı efüzyon plakası için delik açıları 30° ve 45° değişiyor iken, efüzyon plakasından 7 farklı üfleme debisi için film tabaka oluşumu incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir. Efüzyon debisi ile film oluşumu birbiri ile orantılıdır. Düşük debilerde film oluşumu gözlenmezken/zayıfken, yüksek debilerde film oluşumu belirginleşmektedir. Efüzyon deliklerinin üfleme açısının azalması ile birlikte film oluşumu belirginleşmektedir. Buda efüzyon debisinin ve delik açısının film oluşumundaki önemini ifade etmektedir.

Bundan sonraki çalışmada, görüntü alınan test bölgesinin daha da daraltılması (sadece 2-3 sıra deliğin gözlemlenmesi) ile vortekslerin oluşumunun detaylı incelenmesi ve akım haritasının daha küçük bir alanda çıkarılması, efüzyon soğutma fiziği ve akımların birbirine karışması ile ilgili daha detaylı sonuçlar verecektir. Böylece optimize edilmiş parametrelerin elde edilmesi ve türbin kanadı, yanma odası yüzeyi gibi eğimli yüzeylerinde daha detaylı incelenmesi yapılabilecektir. Bunlara ek olarak ana akım sıcaklığını arttırarak sistemin soğutma verimi incelenebilecektir.

#### YAZAR KATKILARI

Sinan Eren Yalçın, efüzyon soğutma testlerinin yapılmasında, deney datalarının analizinde, grafiklerin hazırlanmasında, taslak yazımında katkıda bulunmuştur. Evren Yılmaz Yakın, efüzyon soğutma test plakalarının basılmasında, testlerin yapılmasında, tabloların hazırlanmasında ve deney datalarının analizinde katkıda bulunmuştur. Melih Cemal Kuşhan, taslak yazımında katkıda bulunmuştur. Tahir Hikmet Karakoç, testlerin organize edilmesinde, PIV laboratuvarının kullanılmasında, sonuçların incelenmesinde ve taslak yazımında katkıda bulunmuştur.

#### SEMBOLLER DİZİNİ

|    |   |
|----|---|
| BR | Üfleme oranı (Efüzyon debisi/Ana Akım Debisi) (-) |
| d  | : Efüzyon delik çapı (mm)                         |
| t  | : Test plakası kalınlığı (mm)                     |
| L  | : Efüzyon delik uzuluğu (mm)                      |

|                  |   |
|------------------|---|
| Re               | Reynolds sayısı (-)                             |
| S <sub>x</sub> : | : Eksenel delik adımı (mm)                      |
| S <sub>y</sub>   | : Ydelik adımı (mm)                             |
| □                | : Efüzyondelik açısı (-)                        |
| ρ <sub>aa</sub>  | Ana akım yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )         |
| ρ <sub>sa</sub>  | Soğutucu akışkan yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> ) |

#### KAYNAKLAR

- Andrei, Luca, Antonio Andreini, Cosimo Bianchini, Gianluca Cacioli, Bruno Facchini, Lorenzo Mazzei, Alessio Picchi, and Fabio Turrini. 2014. "Effusion Cooling Plates for Combustor Liners: Experimental and Numerical Investigations on the Effect of Density Ratio." *Energy Procedia* 45. Elsevier B.V.: 1402–11. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.147>.
- Andreini, Antonio, Riccardo Becchi, Bruno Facchini, Alessio Picchi, and Antonio Peschiulli. 2017. "The Effect of Effusion Holes Inclination Angle on the Adiabatic Film Cooling Effectiveness in a Three-Sector Gas Turbine Combustor Rig with a Realistic Swirling Flow." *International Journal of Thermal Sciences* 121 (x). Elsevier Masson SAS: 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.07.003>.
- Cho, Hyung Hee, Dong Ho Rhee, and R. J. Goldstein. 2008. "Effects of Hole Arrangements on Local Heat/Mass Transfer for Impingement/Effusion Cooling With Small Hole Spacing." *Journal of Turbomachinery* 130 (4): 041003. <https://doi.org/10.1115/1.2812325>.
- Goldstein, R. J., Eckert, E. R G, and F. Burggraf. 1974. "Effects of Hole Geometry and Density on Three-Dimensional Film Cooling." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17 (5): 595–607. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(74\)90007-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(74)90007-6).
- Goldstein, R. J., D.R.Pedersen, E.R.G. R. G. Eckert, R. J. Goldstein, D. R. Pedersen, E.R.G. R. G. Eckert, and R. J. Goldstein. 1977. "Film Cooling With Large Density Differences Between the Mainstream and the Secondary Fluid Measured by the Heat-Mass Transfer Analogy." *ASME Journal of Heat Transfer* 99 (November): 620–27. <https://doi.org/10.1115/1.3450752>.
- Gustafsson, K. M. Bernhard, and T. Gunnar Johansson. 2001. "An Experimental Study of Surface Temperature Distribution on Effusion-Cooled Plates." *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 123 (2): 308. <https://doi.org/10.1115/1.1364496>.
- Huang, Zheng, Yan Bin Xiong, Yuan Qing Liu, Pei Xue Jiang, and Yin Hai Zhu. 2015. "Experimental Investigation of Full-Coverage

- Effusion Cooling through Perforated Flat Plates.” *Applied Thermal Engineering* 76. Elsevier Ltd: 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.11.056>.
- Ito, S, R Goldstein, and E Eckert. 1978. “Film Cooling of a Gas Turbine Blade.” *J. Eng. Power* 100 (July 1978): 476–81. <https://doi.org/10.1115/1.3446382>.
- Ji, Yongbin, Bing Ge, Zhongran Chi, and Shusheng Zang. 2018. “Overall Cooling Effectiveness of Effusion Cooled Annular Combustor Liner at Reacting Flow Conditions.” *Applied Thermal Engineering* 130. Elsevier Ltd: 877–88. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.11.074>.
- Kadotani, K., and R. J. Goldstein. 1979. “On the Nature of Jets Entering A Turbulent Flow: Part B—Film Cooling Performance.” *Journal of Engineering for Power* 101 (3): 466. <https://doi.org/10.1115/1.3446602>.
- Krewinkel, R. 2013. “A Review of Gas Turbine Effusion Cooling Studies.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 66. Elsevier Ltd: 706–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.071>.
- Lampard, D. 1980. “Effectiveness Following Injection through a Row of Holes” 102 (July): 584–88.
- Ligrani, P. M., J. M. Wigle, and S. W. Jackson. 1994. “Film-Cooling From Holes With Compound Angle Orientations: Part 2—Results Downstream of a Single Row of Holes With 6d Spanwise Spacing.” *Journal of Heat Transfer* 116 (2): 353. <https://doi.org/10.1115/1.2911407>.
- Ligrani, Phil, Matt Goodro, Mike Fox, and Hee-Koo Moon. 2012. “Full-Coverage Film Cooling: Film Effectiveness and Heat Transfer Coefficients for Dense and Sparse Hole Arrays at Different Blowing Ratios.” *Journal of Turbomachinery* 134 (6): 061039. <https://doi.org/10.1115/1.4006304>.
- Schmidt, D. L., B. Sen, and D. G. Bogard. 1996. “Film Cooling With Compound Angle Holes: Adiabatic Effectiveness.” *Journal of Turbomachinery* 118 (4): 807. <https://doi.org/10.1115/1.2840938>.
- Shine, S. R., S. Sunil Kumar, and B. N. Suresh. 2012. “A New Generalised Model for Liquid Film Cooling in Rocket Combustion Chambers.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (19–20). Elsevier Ltd: 5065–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.006>.
- Singh, Kuldeep, B. Premachandran, and M. R. Ravi. 2017. “Experimental and Numerical Studies on Film Cooling with Reverse/Backward Coolant Injection.” *International Journal of Thermal Sciences* 111. Elsevier Masson SAS: 390–408. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.09.027>.
- Thole, Karen A., and Daniel G. Knost. 2005. “Heat Transfer and Film-Cooling for the Endwall of a First Stage Turbine Vane.” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48 (25–26): 5255–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.036>.
- Xiao-ming, Tan, Zhang Jing-zhou, and Xu Hua-sheng. 2015. “Experimental Investigation on Impingement/Effusion Cooling with Short Normal Injection Holes.” *International Communications in Heat and Mass Transfer* 69. Elsevier Ltd: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.09.005>.
- Yao, Yu, Jing zhou Zhang, and Xiao ming Tan. 2014. “Numerical Study of Film Cooling from Converging Slot-Hole on a Gas Turbine Blade Suction Side.” *International Communications in Heat and Mass Transfer* 52. Elsevier Ltd: 61–72. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.01.008>.
- Yao, Yu, Jing Zhou Zhang, and Li Ping Wang. 2013. “Film Cooling on a Gas Turbine Blade Suction Side with Converging Slot-Hole.” *International Journal of Thermal Sciences* 65. Elsevier Masson SAS: 267–79. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.10.004>.
- Zhang, Jing-zhou, Xing-dan Zhu, Ying Huang, and Chun-hua Wang. 2017. “Investigation on Film Cooling Performance from a Row of Round-to-Slot Holes on Flat Plate.” *International Journal of Thermal Sciences* 118. Elsevier Masson SAS: 207–25. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.04.029>.
- Zhang, Luzeng, Juan Yin, and Hee Koo Moon. 2009. “The Effect of Compound Angle on Nozzle Pressure Side Film Cooling.” *ASME Conference Proceedings* 2009 (48845): 53–62. <https://doi.org/10.1115/GT2012-68357>.