



Numerical optimization of triangular concave edge shaped ramp in film cooling

Ahmet Ümit Tepe*

Sinop University, Faculty of Engineering and Architecture, Energy Systems Engineering Department, Sinop, 57000, Turkey

Highlights:

- Film cooling effectiveness enhances with decreasing ramp angle
- Film cooling effectiveness enhances with increasing ramp height
- Ramp increases lateral spreading of the coolant stream

Keywords:

- Film cooling
- Film cooling effectiveness
- Heat transfer
- Gas turbine blade
- Computational fluid dynamics

Article Info:

Research Article
Received: 26.11.2020
Accepted: 25.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.831511

Acknowledgement:

The authors acknowledge to Scientific and Technological Research Application and Research Center, Sinop University, Turkey, for the support given to this study

Correspondence:

Author: Ahmet Ümit Tepe
e-mail: autepe@sinop.edu.tr
phone: +90 368 271 41 51-4381

Graphical/Tabular Abstract

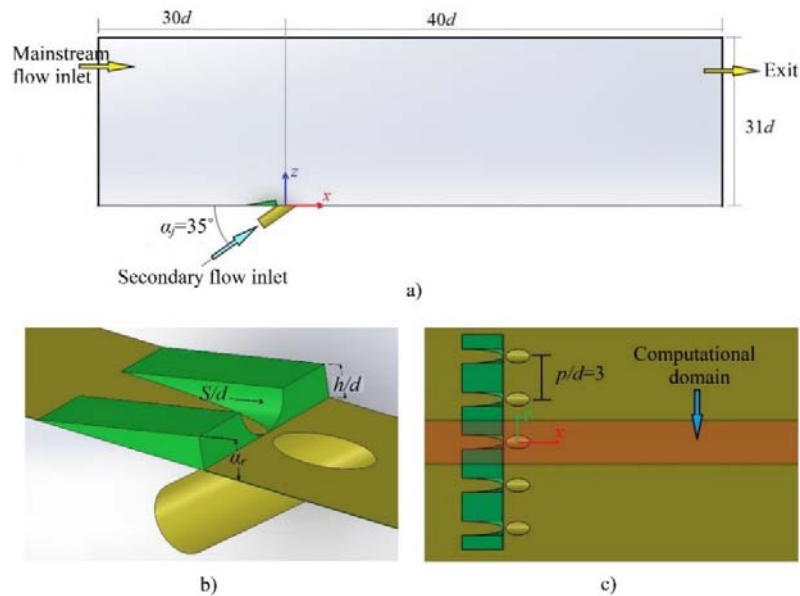


Figure A. Detailed view of the physical model, a) section view, b) location of the ramp on the surface, c) numerical simulation region

Purpose: Purpose of this study is to investigate the optimum design parameter of the triangular concave edge shaped upstream ramp under different flow condition for film cooling effectiveness.

Theory and Methods:

Numerical simulations were conducted using Ansys FLUENT. Performance of most widely used RANS model were compared and *Transition k-kl-omega* was used. Numerical solution procedure was validated with available experimental data in the literature. Area-averaged film cooling effectiveness (*FCE*), laterally-averaged *FCE*, longitudinally-averaged *FCE* and local *FCE* were quantitatively investigated comprehensively. In order to reveal the underlying physics of the influence of ramp on *FCE*, the vortices emerged in the flow field and the velocity profile of the flow were also examined.

Results:

Results showed that lateral spreading of the coolant were increased by locating ramp on the surface. Area-averaged *FCE* is enhanced 305.44% with $h/d=0.50$ and $\alpha_r=10^\circ$ compared to conventional film cooling configuration. While highest area-averaged *FCE* achieved at relatively low blowing ratio ($M=0.60$) for conventional film cooling, increasing blowing ratio also increases area-averaged *FCE* by mounting upstream ramp on the surface.

Conclusion:

Counter rotating vortex (*CRV*) on the coolant flow detaches the coolant from the surface. Ramp creates anti-*CRV* on the coolant flow and prevents the coolant separation. Strength of anti-*CRV* on jet flow increases with decreasing ramp angle and increasing ramp height, therefore *FCE* increases with decreasing ramp angle and increasing ramp height. Furthermore, most feasible design parameters of ramp for film cooling effectiveness are $h/d=0.50$ and $\alpha_r=10^\circ$



Film soğutmada üçgen iç-bükey kenar şekilli rampanın sayısal optimizasyonu

Ahmet Ümit Tepe*

Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 57000, Sinop, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Film soğutma etkinliği rampa açısının azalmasıyla artar
- Film soğutma etkinliği rampa yüksekliğinin artmasıyla artar
- Rampa soğutucu akışın yanıl yayılımını artırır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 26.11.2020
Kabul: 25.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.831511

Anahtar Kelimeler:

Film soğutma,
film soğutma etkinliği,
ısı transferi,
gaz türbin kanadı,
hesaplamalı akışkanlar
dianmiği

ÖZ

Bu çalışmada, film soğutmada üçgen iç-bükey rampanın (ÜİBR) film soğutma etkinliğine (FSE) ve akış karakteristiklerine etkisi sayısal olarak incelenmiştir. ÜİBR, jet akışı ana akışın etkisinden korumak için yüzey üzerinde jet deliğinin yüzey ile birleştiği ve ana akışın geldiği baş tarafa yerleştirilmiştir. ÜİBR'nin en uygun tasarım parametrelerini belirlemek için 10° , 25° ve 45° olmaz üzere üç farklı eğim açısı (α_r), 0,15, 0,30 ve 0,50 olmak üzere üç farklı boyutsuz rampa yüksekliği (h/d) incelenmiştir. Bununla birlikte hesaplamalar 0,30, 0,60, 0,85 ve 1,25 üfleme oranında (M) gerçekleştirilmiştir. Gerçek çalışma şartlarına uygun olarak film soğutmanın fiziksel özelliklerini doğru tespit edebilmek için, hesaplamalarda ana akış için hava, yüzeye enjekte edilen akışkan için ise CO_2 kullanılmıştır. Buna bağlı olarak jet akışı ile ana akış yoğunluk oranı (YO) 1,50'dir. CO_2 yüzeye yüzeye açısı $\alpha_j=35^\circ$ olan ve $d=4$ mm çaplı dairesel kesitli jet deliğinden enjekte edilmiştir. Sayısal çalışmalar Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) için geliştirilen Ansys FLUENT ile Transition $k-k\ell-\omega$ türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar rampanın olmadığı geleneksel düz yüzeye karşılaştırılmıştır. Sayısal sonuçlara göre rampa yüksekliğinin artması ve rampa açısının azalması FSE'ni önemli ölçüde arttırmıştır. Sonuç olarak alan-ortalama FSE'nde geleneksel film soğutmaya göre en yüksek artış $h/d=0,50$ ve $\alpha_r=10^\circ$ olan rampa tasarımında %305,44 olarak elde edilmiştir.

Numerical optimization of triangular concave edge shaped ramp in film cooling

H I G H L I G H T S

- Film cooling effectiveness enhances with decreasing ramp angle
- Film cooling effectiveness enhances with increasing ramp height
- Ramp increases lateral spreading of the coolant stream

Article Info

Research Article
Received: 26.11.2020
Accepted: 25.09.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.831511

Keywords:

Film cooling,
Film cooling effectiveness,
Heat transfer,
Gas turbine blade
computational fluid
dynamics

ABSTRACT

In this study, the effect of triangular concave ramp (UIBR) on film cooling efficiency (FSE) and flow characteristics in film cooling was numerically investigated. In order to protect the jet stream from the effect of the main stream, the UIBR is placed on the surface where the jet hole meets the surface and the main stream comes from. In order to determine the most suitable design parameters of the UIBR, three different inclination angles (α_r) of 10° , 25° and 45° , three different dimensionless ramp heights (h/d) as 0.15, 0.30 and 0.50 examined. However, calculations were performed at blowing ratios (M) of 0.30, 0.60, 0.85 and 1.25. In order to accurately determine the physical properties of the film cooling in accordance with the real operating conditions, air was used for the main flow and CO_2 was used for the fluid injected to the surface in the calculations. Accordingly, the jet stream to main stream density ratio (YO) is 1.50. CO_2 was injected into the surface through a circular jet hole with an angle of $\alpha_j=35^\circ$ with the surface and a diameter of $d=4$ mm. Numerical studies were carried out using Ansys FLUENT developed for Computational Fluid Dynamics (CFD) and the Transition $k-k\ell-\omega$ turbulence model. The results are compared to a conventional flat surface without ramp. According to the numerical results, increasing the ramp height and decreasing the ramp angle significantly increased the FSE. As a result, the highest increase in area-averaged FSE compared to conventional film cooling was obtained as 305.44% in the ramp design with $h/d=0.50$ and $\alpha_r=10^\circ$.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son zamanlarda ulaştırma endüstrisine olan talebin giderek artması ve buna bağlı olarak çevre kirliliğindeki artış araştırmacıları gaz türbinlerinin verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar yapmaya teşvik etmektedir. Termodinamik kanunlara uygun olarak çalışan bir gaz türbininde türbin giriş sıcaklığının artırılması türbin verimini de artırır. Türbin giriş sıcaklığı türbin bileşenlerinin yapısı bozulmadan sürekli olarak çalışabileceği en yüksek sıcaklığa kadar artırılabilir. Ancak kanadın soğutulması ile türbin giriş sıcaklığı malzemenin dayanabileceği en yüksek sıcaklığın da üzerine çıkarılabilir. Böylelikle türbin bileşenlerinin soğutulması, dolaylı olarak türbin veriminin artmasını ve kirlenici emisyonların düşürülmesine katkı sağlar.

Kanat malzemesinin kesitinden dolayı kanat üzerinde farklı soğutma teknikleri uygulanır. Kompresörden temin edilen hava, film soğutma tekniği ile kanat üzerinde açılan bir yarık veya delikten kanadın üzerine enjekte edilir. Böylelikle soğutma havası kanadın dış yüzeyini kaplayarak sıcak akışkana karşı bir termal koruma sağlar.

Jet açısı, üfleme oranı, delik geometrisi, jet deliklerinin yüzeye yerleşimi, yüzey eğriliği gibi birçok değişken film soğutma etkinliğini (*FSE*) önemli ölçüde etkilemektedir [1, 2]. Jet açısı ile ilgili yapılan çalışmalarda; McGovern ve Leylek [3] yaptıkları çalışmada bileşik açının *FSE*'ni arttırdığını tespit etmişlerdir. Brittingham ve Leylek [4] yaptıkları çalışmada geniş jet açılarını ve şekilli-film soğutma deliğini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlara göre, öne doğru uzatılmış şekilli-film soğutma deliği ile 60° jet açısının jet akışkanı yüzey üzerinde yanal yöne doğru daha fazla yaydığı görülmüştür. Hai-Wang vd. [5] yaptıkları deneysel çalışmada 30°, 45° and 60° jet açısının *FSE*'ne etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada optimum jet açısının $\alpha_j=30^\circ$ olduğunu belirlemişlerdir. Andreini vd. [6] 20°, 30° ve 90° jet açısının *FSE*'ne etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmanın sonuçlarından en yüksek *FSE* $\alpha_j=20^\circ$ 'de elde edildiği görülmüştür. Song vd. [7] 20°, 30° ve 40° jet açılarını incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar, nispeten yüksek üfleme oranında $\alpha_j=40^\circ$ 'nin *FSE*'ni arttırdığını göstermektedir. Jet deliği açısı ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde her ne kadar düşük jet açısı *FSE*'ni arttırsa da, kanadın mekanik dayanımı dikkate alındığında en uygun jet açısı tasarımının 30°-40° aralığında olduğu değerlendirilebilir.

Film soğutmada akışın fiziksel özelliği tipik bir çapraz akışa maruz bırakılmış jet akışını yansıtmaktadır. Yüzeye belirli bir açı ile enjekte edilen Jet akışkan ana akışla doğrudan etkileşime girer. Bu etkileşim sonucu jet akışkan yüzey üzerinde ilerlerken ana akışkan akış alanı üzerinde ters yönde bir çift girdap (*TYG*) oluşturarak jet akışkanın yüzey üzerinden ayrılmasına ve bunun sonucunda *FSE*'nin önemli ölçüde azalmasına neden olur. Son zamanlarda yüzey üzerine rampa yerleştirilerek akış alanı üzerinde *TYG*'ye

karşı ilave bir çift ters yönde girdap oluşturup (*karşı-TYG*) *TYG*'nin olumsuz etkisinin azaltılmasına çalışılmıştır. Bu şekilde rampa sayesinde yüzeyin *FSE* iki üç kat artırılabilir [8]. Zheng vd. [9] gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada jet deliğinden hemen önce (akış-üstü) yüzey üzerine yerleştirilmiş dikdörtgen kesitli rampanın *FSE*'ne etkisini araştırmışlardır. Aralıklı olarak yerleştirilmiş akış-üstü rampaların jet akışı üzerinde *karşı-TYG* oluşturduğu ve akışkanın yüzeyden ayrılmasını önleyerek *FSE*'ni arttırdığı sonucuna varmışlardır. Zheng vd. [9] bir diğer çalışmada film soğutma deliği önüne yerleştirilmiş iç-bükey, dış-bükey, kama şekilli ve dalga şekilli rampaların *FSE*'ne etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. En düşük basınç kaybı dalga şekilli rampada elde edildiği ve merkez çizgi üzerinde ve yanal yönde en yüksek adyabatik film soğutma etkisine dış-bükey rampa ile ulaşıldığı sonuçlarına varmışlardır. Zhang vd. [10] yanal yönde yüksekliği değişken dikdörtgen kesitli akış-üstü rampanın akış dinamiği ve *FSE*'ne etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Sonuçlardan rampanın orta kısmında yüksekliğin azalması akış alanı üzerinde daha güçlü *karşı-TYG* oluşturduğu ve bunun sonucunda *FSE*'ni arttırdığı görülmüştür. Chen vd. [11] yüzey üzerine yerleştirilmiş üçgen kesitli akış-üstü rampaları deneysel olarak araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada rampanın farklı eğim açıları (8,5°, 15°, ve 24°) incelenmiştir. Deneysel sonuçlar geniş açılı rampaların *FSE*'ni arttırdığını göstermiştir. Yüzey üzerinde akış doğrultusunda farklı yerlere yerleştirilen rampaların *FSE* ve akış karakteristiklerine etkisini ortaya çıkarmak için Rallabandi vd. [12] deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Deneysel sonuçları, jet deliğinin yüzeye çıktığı yer ile rampa vasıtasıyla yüzey üzerinden ayrılan ana akışın yüzeye tekrar birleştiği yerde *FSE*'nin tekrar azaldığını göstermektedir.

Uygun geometri ile tasarlanmayan bir rampa, basınç kaybını arttıracığından türbin kanadının soğutulmasında rampanın kullanılabilirliğini kısıtlayabilir. Bu amaçla son zamanlarda uygun ayrodinamik rampa tasarımının araştırıldığı çalışmalar yapılmıştır. Abdala ve Elwekeel [13] farklı kalınlıklardaki normal ve kavisli rampaları incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmanın sonuçları, kalınlığı düşük ve kavisli rampaların film soğutmada daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir. Hammami vd. [14] piramit şekilli rampaların etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar, jet akışın yüzey üzerindeki yanal yayılımının piramit şekilli rampa ile arttığını göstermektedir. Zhou ve Hu [15, 16], Zhou vd. [17] ve Zhang vd. [18] doğal yollarla çölde şekillenmiş kum tepelerin ayrodinamik geometrisinden esinlenerek, Barchan-kum tepesi olarak adlandırılan rampaların *FSE*'ne etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmaların deneysel sonuçları Barchan-kum tepesi şekilli rampaların akış alanı üzerinde güçlü *karşı-TYG* oluşturarak *TYG*'in olumsuz etkisini azalttığını göstermiştir. Bununla birlikte sonuçlar, rampanın jet akışkanın yüzey üzerinde yanal yayılımını arttırarak *FSE*'ni de önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Hyams ve Leylek [19] aralıklı rampanın *FSE*'ne etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmanın sonuçlarına göre aralıklı rampalar *FSE*'ni arttırmaktadır. Montomoli vd. [20] fan-

şekilli film soğutma deliği ile akış-üstü rampanın birlikte tasarımının FSE 'ne etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada rampanın yanal yönde merkez çizgi boyunca yerel basınç farkı yarattığı ve bunun da jet akışkanın yanal yönde daha fazla yayılmasına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir. Böylelikle jet akışkanın yüzeyi daha fazla kapladığı ve FSE 'ni arttırdığı belirtilmiştir.

Atmaca vd. [21], dizel yakıt hücrelerinde bir spiral-borulu ısı değiştirici olan dizel buharlaştırıcı ile ilgili RNG k- ϵ türbülans modeli kullanarak sayısal bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yapılan bu çalışmada sayısal sonuçların genel olarak deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. Atmaca vd. [22] ısı pompasında kullanılan buhar püskürtücü ile ilgili RNG k- ϵ türbülans modeli kullanarak gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada, hız ve statik basıncın sırasıyla %-4,87 ve %-5,00 ortalama hata payı ile hesaplandığı belirtilmiştir.

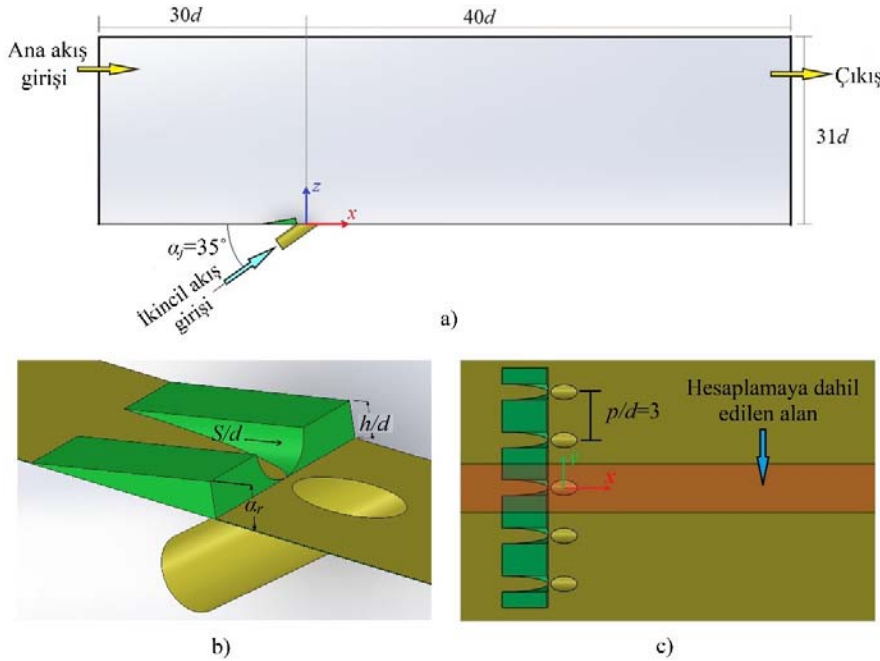
Literatürde yapılan çalışmalar, uygun tasarlanan bir rampanın jet deliğinden yüzeye enjekte edilen jet akışın yanal yönde doğru yayılımını arttıracak ve buna bağlı olarak FSE 'ni de önemli ölçüde iyileştireceğini göstermiştir. Bir önceki çalışmamızda, basınç değişimine maruz kalan düz yüzey üzerinde, yüzey üzerinde farklı konumlara yerleştirilmiş $\dot{U}IBR$ 'nin film soğutma etkinliği ve akış karakteristiklerine etkisi incelenmiş [23], bir diğer çalışmamızda da $\dot{U}IBR$ 'nin geleneksel üçgen rampayla performansı karşılaştırılmıştır [24]. Gerçekleştirdiğimiz bir önceki çalışmalarımızın sonuçlarından yola çıkarak, bu çalışmada asıl odaklanılan nokta ise, $\dot{U}IBR$ 'nin rampa açısı ve rampa yüksekliği gibi tasarım parametrelerinin FSE 'ne ve

akış karakteristiklerine etkisini incelemek ve optimum tasarım parametrelerini ortaya çıkarmaktır. Bu amaçla 10° , 25° ve 45° olmak üzere üç farklı rampa eğim açısı (α_r) ve 0,15, 0,30 ve 0,50 olmak üzere boyutsuz rampa yüksekliği (h/d) incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Fiziksel Model (Physical Model)

Tipik bir fiziksel modelin kesiti Şekil 1a'da gösterilmiştir. Tam gelişmiş ana akış kanalın sol tarafından akış hacmine girmektedir. Yüzeyin film soğutma ile soğutulması amacıyla jet akışkan eğim açısı $\alpha_j=35^\circ$ olan jet deliğinden yüzeye enjekte edilmektedir. Eksen takımı jet deliğinin yüzeye çıkan merkezi ile kesişmektedir. Jet deliğinin çapı (d) 4 mm'dir. Jet deliğinin uzunluğu (l) ise $4d$ olarak belirlenmiştir. Yan yana sıralanmış jet delikleri arasındaki boşluk (p) $3d$ olarak tasarlanmıştır. Jet deliğinin yüzeye kesiştiği merkezi ile ana akışın akış hacmine girişi arasındaki mesafe $30d$, çıkış ile olan mesafesi ise $40d$ 'dir. Ana akışın içerisinden geçtiği akış hacminin kesiti $50d \times 31d$ 'dir. Rampanın yüzey üzerindeki konumu Şekil 1b'de verilmiştir. Rampanın iç bükey yüzeyinin çapı $s/d=2$ 'dir. Rampa yüksekliğinin FSE 'ne etkisini tespit etmek için 0,15, 0,30 ve 0,50 olmak üzere dört farklı boyutsuz rampa yüksekliği (h/d) incelenmiştir. Bununla birlikte hesaplamalara, 10° , 25° ve 45° olmak üzere üç farklı rampa açısı (α_r) dâhil edilmiştir. Rampa ile jet delik merkezinin yüzeye kesiştiği yer arası $1d$ 'dir. Akış hacmi simetrik olduğundan dolayı, daha yoğun bir ağ yapısı oluşturarak sayısal sonuçların hassasiyetini arttırmak için hesaplama alanı yanal doğrultuda Şekil 1c'de gösterildiği



Şekil 1. Fiziksel modelin detayları, a) kesit görünüşü, b) rampanın yüzey üzerine yerleşimi, c) hesaplama dâhil edilen bölge. (Detail view of the physical model, a) section view, b) location of the ramp on the surface, c) numerical simulation region.)

gibi $-1,5 \leq y/d \leq 1,5$ ile sınırlandırılmıştır. İncelenilen hedef yüzeyin alanı ise akış yönüne doğru $0 \leq x/d \leq 21$ aralığında alınmıştır.

Gerçek bir gaz türbininde sıcak akışkan ile yüzeye enjekte edilen akışkan arasında yoğunluk oranı (YO) yaklaşık 1,5 olduğundan, hesaplamalarda ana akışkan olarak hava, jet akışkan olarak ise CO₂ kullanılmıştır. Ana akışın hızı $U_\infty = 25$ m/s'de sabit tutulmuştur. Buna bağlı olarak kanal içerisindeki akışın Re sayısı $1,8 \times 10^5$ 'dir. Rampanın FSE 'ne etkisini ortaya çıkarmak için hesaplamalar 0,30, 0,60, 0,85 ve 1,25 olmak üzere dört farklı üfleme oranlarında yapılmıştır. Buna bağlı olarak momentum oranı (I_m) ve hız oranı (HO) sırasıyla 0,055 ile 0,961 ve 0,185 ile 0,769 arasında değişmektedir.

2.2. Korunum Denklemleri (Data Reduction)

Yüzey üzerinde ana akış doğrultusunda ve uzunlamasına merkez çizgi üzerinde yerel FSE (η_x), yanal ortalamalı FSE ($\bar{\eta}_y$), uzunlamasına ortalamalı FSE ($\bar{\eta}_x$) dağılımlarının ve alan ortalamalı FSE ($\bar{\eta}_A$) aşağıdaki eşitliklerden hesaplanmıştır (Eş.1-Eş. 4).

$$\eta_x = \frac{(T_{ad} - T_a)}{(T_j - T_a)} \quad (1)$$

$$\bar{\eta}_y = \frac{(\bar{T}_{ad,y} - T_a)}{(T_j - T_a)} \quad (2)$$

$$\bar{\eta}_x = \frac{(\bar{T}_{ad,x} - T_a)}{(T_j - T_a)} \quad (3)$$

$$\bar{\eta}_A = \frac{(\bar{T}_{ad,A} - T_a)}{(T_j - T_a)} \quad (4)$$

Bu eşitliklerde T_{ad} , T_a ve T_j sırasıyla adyabatik duvar sıcaklığı, ana akış sıcaklığı ve yüzeye enjekte edilen jet akış sıcaklığıdır. $\bar{T}_{ad,y}$, $\bar{T}_{ad,x}$ and $\bar{T}_{ad,A}$ ise sırasıyla y -ekseni boyunca ortalama adyabatik duvar sıcaklığı, x -ekseni boyunca ortalama adyabatik duvar sıcaklığı ve alan ortalamalı adyabatik duvar sıcaklığıdır.

Üfleme oranı ise aşağıdaki gibi hesaplanmıştır (Eş. 5):

$$M = \frac{\rho_j U_j}{\rho_\infty U_\infty} \quad (5)$$

Bu eşitlikte ρ_j ve U_j sırasıyla yüzeye enjekte edilen soğuk akışkanın yoğunluğu ve jet deliği girişindeki hızıdır. Benzer şekilde ρ_∞ and U_∞ ise ana akışın yoğunluğu ve kanal girişindeki hızını temsil etmektedir.

Akışkanların momentum oranı I_m , ve hız oranı, HO , aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır (Eş. 6-Eş. 7).

$$I_m = \rho_j U_j^2 / \rho_\infty U_\infty^2 \quad (6)$$

$$HO = U_j / U_\infty \quad (7)$$

Ana akımın kanal girişindeki ve soğuk akışkanın jet deliği girişinde türbülans yoğunluğunun, I , hesaplanmasında Eş. 8 kullanılmıştır.

$$I = 0,16 Re^{-1/8} \quad (8)$$

2.3. Sayısal Yöntem (Numerical Method)

2.3.1. Sonuçların ağdan bağımsızlık çalışması (Grid independence study)

Sayısal çalışmada fiziksel model bir yığın düğüm noktalarından oluşan bir ağ yapısı ile oluşturulur. Oluşturulan bu ağ yapısının düğüm noktalarındaki bilinmeyenlerin çözümü türbülans modelleri olarak adlandırılan matematiksel formüllerle elde edilir. Fiziksel model ne kadar yoğun bir ağ yapısı ile oluşturulursa çözümler de o kadar hassas olur. Ancak ağ yapısında artan düğüm noktası sayısı da çözüm maliyetini artırır. Bu nedenle bu çalışmada, özellikle sıcaklık ve hız farklarının yüksek olduğu bölgelerde diğer bölgelere kıyasla daha yoğun bir ağ yapısı oluşturulmuştur.

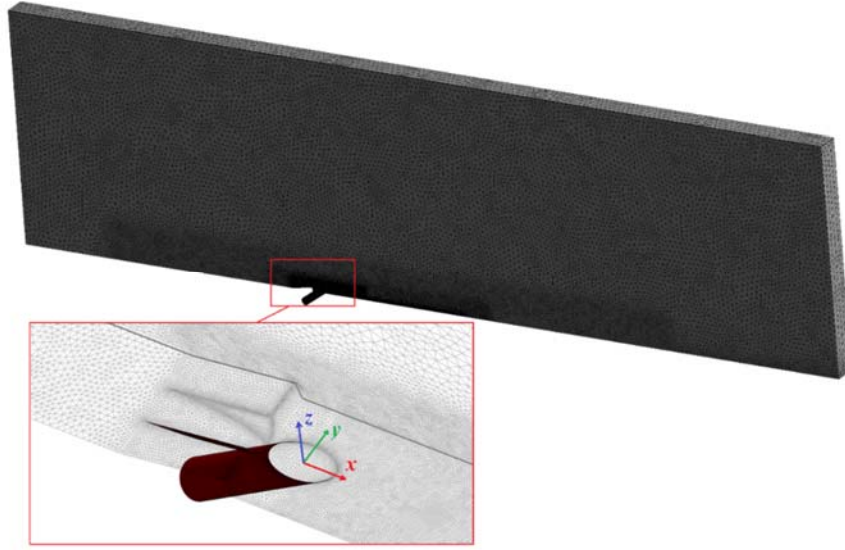
Çözümlerin ağdan bağımsızlığını belirlemek için Tablo 1'den görülebileceği gibi 3 farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Tüm çözümler $M=0,85$ ve rampanın kullanılmadığı (geleneksel) film soğutma ile elde edilmiş ve nicelik olarak alan-ortalama FSE 'leri karşılaştırılmıştır. Ağ yapısı oluşturulurken özellikle hedef yüzey ile rampa yüzeyi ve jet akış ile ana akışın etkileşime girdiği akış alanı bölgesi diğer bölgelere göre nispeten daha yoğun bir ağ yapısı ile oluşturulmuştur. Bununla birlikte sınır tabaka içerisinde akışın hassas modellenebilmesi için tüm yüzeylerde $y^+ \cong 1,0$ olacak şekilde katman (inflation) oluşturulmuş ve hacim elemanlarının uzunluk/yükseklik oranınının 10/1'in altında olması sağlanmıştır [25]. Ağın yoğunluğu artırılırken özellikle rampa yüzeyi ile hedef yüzeyde ve jet akış alanı bölgesindeki hacim elemanlarının boyutu azaltılmıştır. Çözümler her bir ağ yapısı için ayrı ayrı elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 2'de sunulmuştur. Tablodan da görüldüğü gibi AĞ-2 ile elde edilen FSE AĞ-3'den %1 düşüktür. Bu nedenle farkın önemsiz olduğuna karar verilmiş ve ağ yoğunluğunun daha fazla artırılmasına gerek duyulmamıştır. Sonuç olarak yapılan bu çalışmanın tüm hesaplamalarında hesaplama maliyeti de düşünülerek AĞ-2 ağ yapısı kullanılmıştır. Ağdan bağımsızlık çalışmasına uygun olarak oluşturulan tipik bir ağ yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Ağdan bağımsızlık çalışması (Grid independence study)

Kullanılan ağlar	AĞ-1	AĞ-2	AĞ-3
Eleman sayısı	1,71x10 ⁶	2,85x10 ⁶	4,89x10 ⁶
$\bar{\eta}_A$	0,2074	0,2105	0,2117

2.3.2. Sayısal çözüm yöntemi (Numerical solution procedur)

Sayısal çözümler bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kodu olan ANSYS Fluent ile gerçekleştirilmiştir. *Pressure-velocity coupling* için Patankar [26]'ın önerdiği



Şekil 2. Tipik bir üst rampalı film soğutmanın ağ detayları (Typical grid detail of a film cooling with upstream ramp)

SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Türbülans denklemleri, süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin çözümü için *Second order upwind* şeması seçilmiştir. Tablo 2’de sayısal çalışmanın sınır şartları gösterilmektedir. Ana akış olarak hava kullanılmıştır. Ana akış kanalın sol tarafından $U_{\infty} = 25$ m/s hız ve 300 K sıcaklıkta girmektedir. Ana akışın Re sayısına bağlı olarak girişte türbülans yoğunluğu 3,53% olarak hesaplanmıştır. Jet deliğinden yüzeye enjekte edilen akışkan olarak CO_2 kullanılmıştır. Bu nedenle gerçek bir gaz türbininin çalışma şartlarında olduğu gibi akışkanların yoğunluk oranı yaklaşık $YO=1,50$ ’dir. Duvarlarda adyabatik ve kaymazlık sınır şartları uygulanmıştır. Ana akışın Re sayısından dolayı akışın türbülanslı akış olduğu kabul edilmiştir [27]. Enerji denkleminde yakınsama kriteri 10^{-7} , süreklilik, momentum ve türbülans denklemlerinde ise 10^{-5} olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte alan ortalamalı *FSE* ve y^+ gibi önemli değişkenler hesaplamalar sırasında takip edilmiş ve iterasyondan bağımsız olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 2. Sınır şartları (Boundary conditions)

Ana akış sıcaklığı,	300 K
Ana akış hızı, U_{∞}	25 m/s
Ana akış çıkışında mutlak basınç	1 atm
Ana akışın girişinde türbülans yoğunluğu	3,53%
Jet akışı sıcaklığı	310 K
Üfleme oranları, M	0,30, 0,60, 0,85, 1,25
	6,2%, $M=0,30$
Jet deliği girişinde türbülans yoğunlukları	5,7%, $M=0,60$
	5,3%, $M=0,85$
	5,2%, $M=1,25$

2.3.3. Türbülans modelinin seçimi ve çözüm yönteminin doğruluğu

(Turbulence model selection and verification of the solution procedure)

Bir sayısal çalışmada çözümlerin elde edilmesi için farklı türbülans modelleri geliştirilmiştir. Ancak akışın fiziksel

karmaşıklığı nedeniyle belirli bir fiziksel modelin çözümünü hassas bir şekilde tahmin edebilen bir türbülans modeli farklı bir fiziksel modelde aynı performansı göstermeyebilir. Bu nedenle bu çalışmanın fiziksel modelinin çözümünde en yüksek performansı gösteren türbülans modelini belirlemek için *Enhanced Wall Treatment (EWT)* duvar fonksiyonu ile Standart $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ (*EWT*), Realizable $k-\epsilon$ (*EWT*), v^2-f , *Transition k-kl- ω* ve *Transition SST* olmak üzere yaygın olarak kullanılan beş farklı Reynolds-averaged Navier–Stokes (*RANS*) türbülans modellerinin performansları karşılaştırılmıştır.

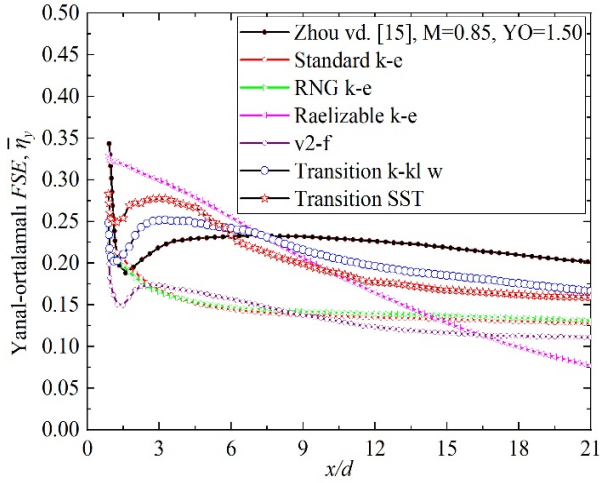
Sayısal yöntemin doğruluğu için geleneksel film soğutma modeli $M=0,85$ üfleme oranında çözümlenmiş ve sonuçlar literatürde benzer geometriye sahip Zhou vd. [15]’nin deneysel çalışmasının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Zhou vd. [15]’nin çalışmalarında olduğu gibi hesaplamalara dahil edilen yüzeyin alanı $-1,5 \leq y/d \leq 1,5$ ve $0 \leq x/d \leq 21$ aralığı ile sınırlandırılmıştır. Nicelik olarak Şekil 3’de yanal-ortalama *FSE* ve Tablo 3’de gösterildiği gibi alan-ortalama *FSE* karşılaştırılmıştır.

Film soğutmada ana akışla jet akışın sürekli olarak etkileşimi sonucu akış alanı içerisinde ortaya çıkan girdaplar sınır tabakanın düzenini devamlı olarak bozmaktadır. Bu durum, akışın yoğun olarak laminer akıştan türbülanslı akışa geçtiği bir akış durumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, türbülans modelinin film soğutmadaki performansı önemli ölçüde akışın laminer akıştan türbülanslı akışa geçişinin ve akış alanı içerisinde ortaya çıkan girdapların doğru modellenebilmesine bağlıdır. Şekil 3’den görüldüğü gibi Standart $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ ve v^2-f türbülans modelleri benzer performans göstermişler ve yüzey üzerinde yanal-ortalama *FSE* dağılımı deneysel sonucun oldukça altında hesaplanmıştır. Realizable $k-\epsilon$ türbülans modeli ise yüzey üzerindeki yanal-ortalama *FSE* dağılımını deneysel sonuca göre oldukça hatalı hesaplamıştır. Bununla birlikte,

Tablo 3. $M=0,85$ 'de Alan-ortalama FSE 'nin literatürle karşılaştırılması
(Comparison of area-averaged FCE with the literature at $M=0.85$)

Türbülans modelleri	Standart $k-\varepsilon$	RNG $k-\varepsilon$	Realizable $k-\varepsilon$	v^2-f ,	Transition $k-kl-\omega$	Transition SST	Zhou vd. [15]
$\bar{\eta}_A$	0,1425	0,1449	0,1875	0,1336	0,2125	0,1926	0,2196
Sapma [%]	-35,10	-34,00	-14,58	-39,14	-3,19	-12,25	

Transition k-kl- ω ve *Transition SST* türbülans modelleri de benzer performan göstermiştir. Transition k-kl- ω türbülans modeli, Walters ve Cokkijat [28] tarafından, özellikle sınır tabaka içerisinde akışın laminar akıştan türbülanslı akış rejime geçişinin hassas bir şekilde modellenmesi için geliştirilen üç denklemlilik bir *RANS* modelidir. Şekilden de görüldüğü gibi *Transition k-kl- ω* türbülans modeli diğer türbülans modellerine kıyasla yüzeydeki yanal-ortalama FSE dağılımını daha hassas hesaplamıştır. Alan-ortalama FSE 'nin hesaplanmasında da yine *Transition k-kl- ω* türbülans modeli diğer türbülans modellerine kıyasla daha iyi performans göstermiş ve Tablo 3.den de görüldüğü gibi deneysel sonucu %3,19 sapma ile hassas bir şekilde hesaplamıştır. Bu nedenle hesaplamalarda diğer *RANS* modellerine kıyasla daha iyi performans göstermesi nedeniyle *Transition k-kl- ω* türbülans modeli kullanılmıştır.



Şekil 3. Farklı türbülans modelleri ile elde edilen yanal-ortalama FSE 'nin literatürle karşılaştırılması
(Comparison of the laterally-averaged FCE obtained by various turbulence model with the literature)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada üst akış rampa ile film soğutma etkinliğinin artırılması amaçlanmıştır ve öne sürülen rampa tasarımının optimum tasarım parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca uygun olarak rampa, yüzeyin ana akış doğrultusuna göre jet deliğinin $1d$ mesafe gerisine yerleştirilmiştir. Böylelikle ana akışın jet akışı ile etkileşime girmeden hemen önce rampa sayesinde akış alanı üzerinde bir çift *karşı-TYG* oluşturularak jet akışın yüzeye tutunması ve geleneksel film soğutmaya göre yüzey üzerinde daha yüksek

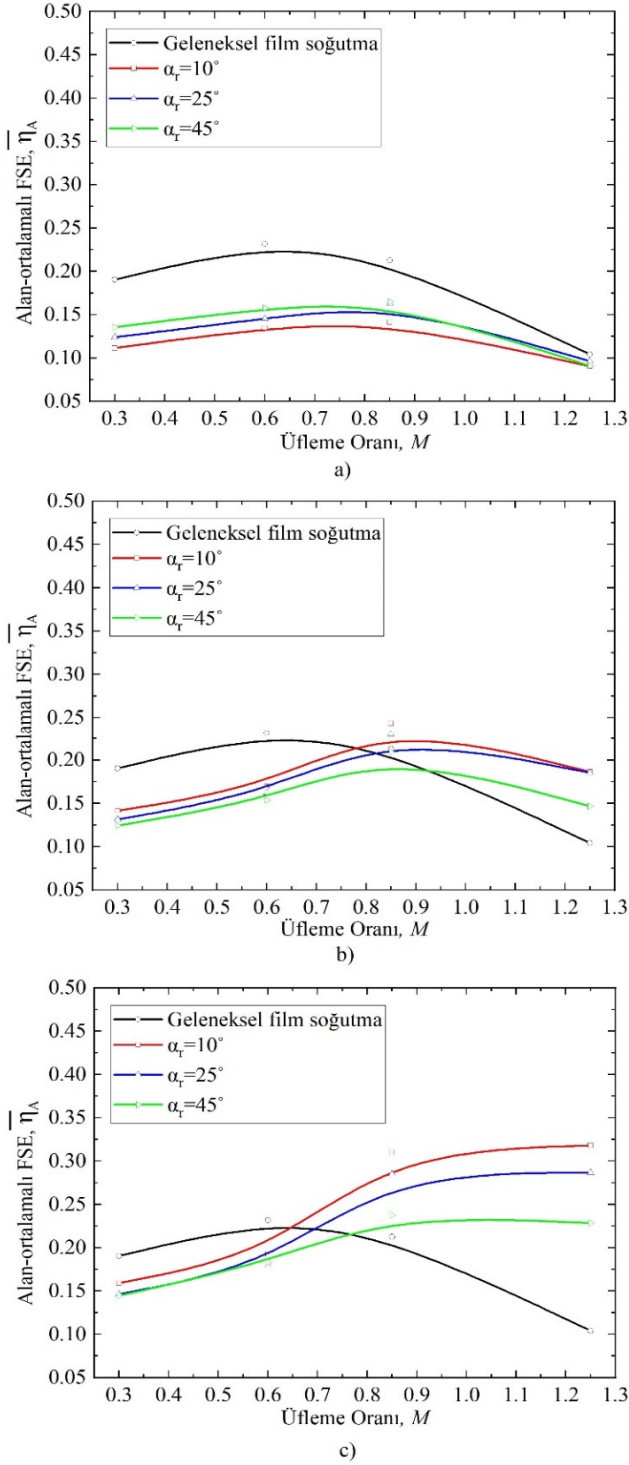
termal koruma sağlanması amaçlanmıştır. Rampanın farklı üfleme oranlarına göre en uygun tasarım parametresini belirlemek için 10° , 25° ve 45° olmak üzere üç farklı rampa eğim açısı (α_r) ve 0,15, 0,30 ve 0,50 olmak üzere üç farklı boyutsuz rampa yüksekliği (h/d) incelenmiştir. Nicelik olarak alan-ortalama, yanal-ortalama ve uzunlamasına-ortalama FSE incelenmiştir.

3.1. Rampanın Alan-Ortalama FSE 'ne Etkisi (Effect Of Ramp On Area-Averaged FCE)

Rampanın yüzey üzerinde genel performansını göstermek için yüzey üzerinde alan-ortalama FSE araştırılmıştır. Sonuçlar geleneksel film soğutma ile karşılaştırılmıştır. Alan-ortalama FSE 'nin hesaplanmasında hesaplamalara dahil edilen yüzeyin alanı $-1,5 \leq y/d \leq 1,5$ ve $0 \leq x/d \leq 21$ aralığı ile sınırlandırılmıştır. Şekil 4'te rampa yüksekliğine göre rampa açısının alan-ortalama FSE 'ne etkisi gösterilmiştir. Şekil 4a'dan da görülebileceği gibi, yüzeye yerleştirilen $h/d=0,15$ olan rampa'da tüm üfleme oranında FSE geleneksel film soğutmaya göre azalmıştır. Şekil 4b incelendiğinde $h/d=0,30$ rampa yüksekliğinde nispeten yüksek üfleme oranında ($M=1,25$) FSE 'nin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte rampa yüksekliği $h/d=0,50$ 'e çıktığında Şekil 4c'den de görüldüğü gibi FSE 'nde geleneksel film soğutmaya göre $M=0,85$ üfleme oranından itibaren artış olmuştur.

Sonuçlar rampa yüksekliğinin artmasının FSE 'ni arttırdığını, rampa açısının artmasının ise FSE 'ni düşürdüğünü göstermiştir. Yüzey üzerinde geleneksel FSE 'deki en fazla artış $h/d=0,50$ ve $\alpha_r=10^\circ$ olan rampa tasarımında ve $M=1,25$ üfleme oranında tespit edilmiştir. Dahası $M=1,25$ 'de geleneksel film soğutmaya göre FSE $h/d=0,50$ ve $\alpha_r=10^\circ$ olan rampa tasarımında %305,44 artarak 0,3182'ye yükselmiştir.

Üçgen iç-bükey rampanın film soğutmada uygulanmasındaki temel amaç, akış alanı içerisinde, jet akışın yüzeyden kalkmasına neden olan *TYG*'ların olumsuz etkisini azaltacak ilave bir çift *karşı-TYG* üretmektir. Ancak düşük üfleme oranları ve düşük rampa yüksekliği akış alanı içerisinde ortaya çıkan *karşı-TYG*'nin gücünü azaltmaktadır. Dahası nispeten düşük üfleme oranında düşük rampa yüksekliği tasarımıyla yüzeye yerleştirilen rampa, akış alanı içerisinde akışın türbülansını arttırarak sıcak akışkanın yüzeye daha fazla etkileşime girmesine ve FSE 'nin geleneksel film soğutmaya göre daha fazla kötüleşmesine neden olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.



Şekil 4. Rampa açısının (α_r) alan-ortalamalı FSE 'ne etkisi, a) $h/d=0,15$, b) $h/d=0,30$, c) $h/d=0,50$
(Effect of ramp angle (α_r) on area-averaged FCE , a) $h/d=0.15$, b) $h/d=0.30$, c) $h/d=0.50$)

3.2. Rampa'nın Yanal-Ortalamalı FSE 'ne Etkisi (Effect Of Ramp On Laterally-Averaged FCE)

Yanal-ortalamalı FSE 'nin akış doğrultusunda değişimi, yüzey üzerinde yanal doğrultuda oluşturulan çizgi üzerinden

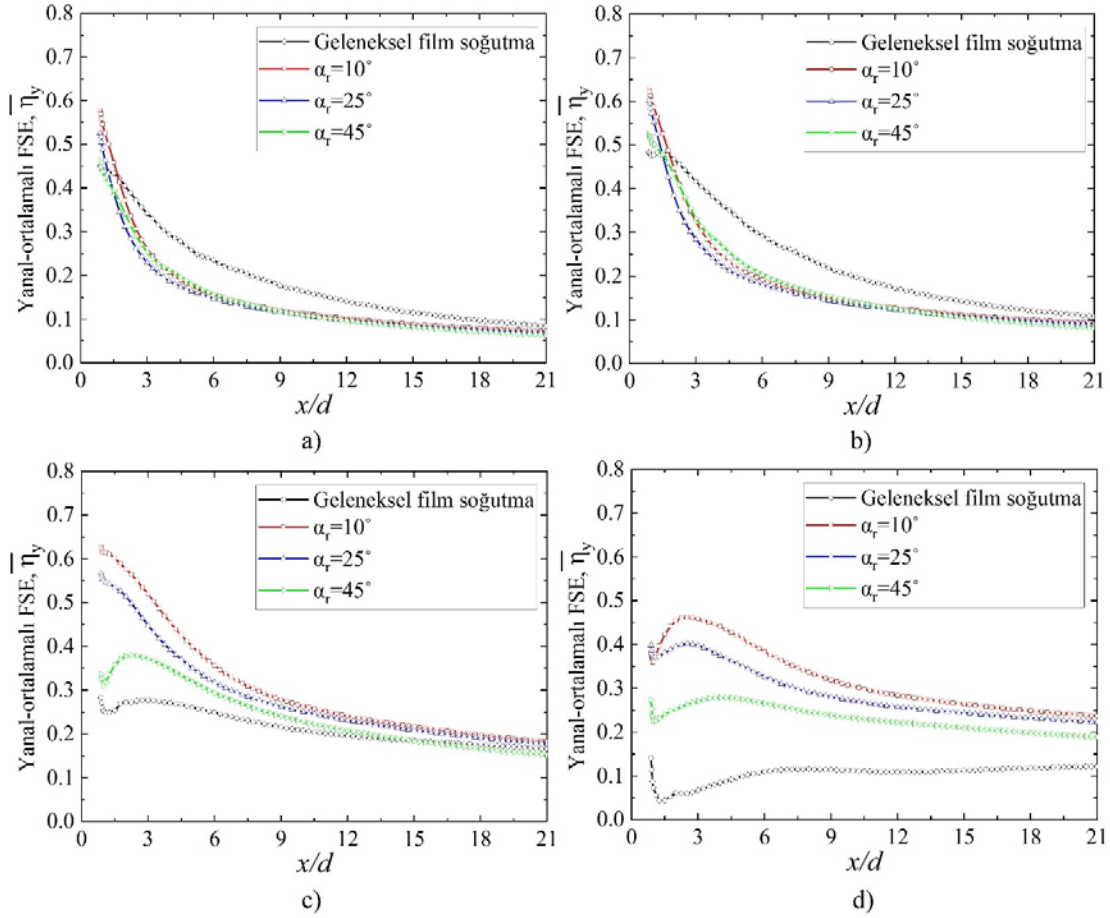
alınan yerel film soğutma etkinliklerinin ortalamasının akış boyunca değişimi ile elde edilmiştir. Bir önceki bölümde Şekil 4'den de görülebileceği gibi alan-ortalamalı FSE en yüksek $h/d=0,50$ olan rampa yüksekliğinde hesaplanmıştır. Bu nedenle bu bölümde $h/d=0,50$ olan rampa yüksekliğinde farklı üfleme oranlarının ve rampa açılarının yanal-ortalamalı FSE 'ne etkisi Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geleneksel film soğutmada jet akışı jet deliğinden ayrıldıktan sonra yanal-ortalamalı FSE akış doğrultusunda hızlıca düşüşe geçmiştir. Bu durum özellikle düşük üfleme oranlarında daha belirgin olmuştur. Yüzeyle rampanın yerleştirilmesi nispeten düşük üfleme oranında ($M \leq 0,60$) yüzeyin akış doğrultusunda yanal-ortalamalı FSE 'ni ise düşürmüştür. Buna karşın nispeten yüksek üfleme oranında ise ($M \geq 0,85$) rampa, yüzeyin akış doğrultusunda yanal-ortalamalı FSE 'ni arttırmıştır. Geleneksel film soğutma tasarımına göre yanal-ortalamalı FSE 'ndeki en yüksek artış $M=1,25$ üfleme oranında ve $\alpha_r=10^\circ$ rampa açısında hesaplanmıştır. Ayrıca, sonuçlara göre üfleme oranı arttıkça yüzey üzerinde akış doğrultusunda daha dengeli bir yanal-ortalamalı FSE dağılımı elde edilmiştir.

Ana akışın rampanın üst yüzeyine çarpmasından hemen sonra, hedef yüzeyin kenarı boyunca jet deliği merkezi doğrultusuna göre nispeten daha düşük bir basınç alanı ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu basınç farkı ise jet akışı yanal yöne doğru daha fazla yayarak yüzey üzerinde daha iyi bir termal korumanın sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Benzer şekilde rampa tasarımının doğası gereği ana akışın rampanın iç-bükümlü kenarına çarpması ile birlikte ortaya çıkan karşı-TYG, jet akışı yüzeye bastırarak yüzeyden ayrılmasına engel olmaktadır. Rampa açısının azalması ise yüzey üzerinde ortaya çıkan basınç farkının yüzey üzerinde daha uzun süreli olmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak bu iki durum, özellikle nispeten yüksek üfleme oranında diğer rampa tasarımlarına göre yüksek rampa ve düşük açılı rampa tasarımı ile yüzey üzerinde daha yüksek FSE 'nin elde edilmesinin altında yatan fiziksel nedeni açıklamaktadır.

3.3. Rampa'nın Uzunlamasına-Ortalamalı FSE 'ne Etkisi (Effect of Ramp on Streamwise-Averaged FCE)

Dairesel jet deliği tasarımına sahip geleneksel film soğutmada FSE akış boyunca yüzeyin merkez çizgisi üzerinde yüksek değerlere çıkarken yanal doğrultuda FSE 'nde hızlı bir düşüş yaşanır. Bu durum özellikle akış alanı içerisinde oluşan TYG'in akışkanın yüzeyden ayrılmasına ve sonuç olarak akışkanın yanal istikamete yayılımını azaltmasından kaynaklanmaktadır. Rampa tasarımı ile akış alanı içerisinde TYG'ye karşı ayrıca bir çift karşı-TYG oluşturularak TYG'nin etkisi nispeten azaltılabilir.

Yüzey üzerinde yanal doğrultuda FSE 'nin artması jet akışının yanal doğrultuda yüzeye daha fazla yayıldığına bir göstergesidir. Bu nedenle rampanın yanal doğrultuda FSE 'ne etkisini incelemek anlamlı olacaktır. FSE 'nin yanal doğrultuda değişimi, yüzey üzerinde uzunlamasına oluşturulan çizgi üzerindeki yerel film soğutma

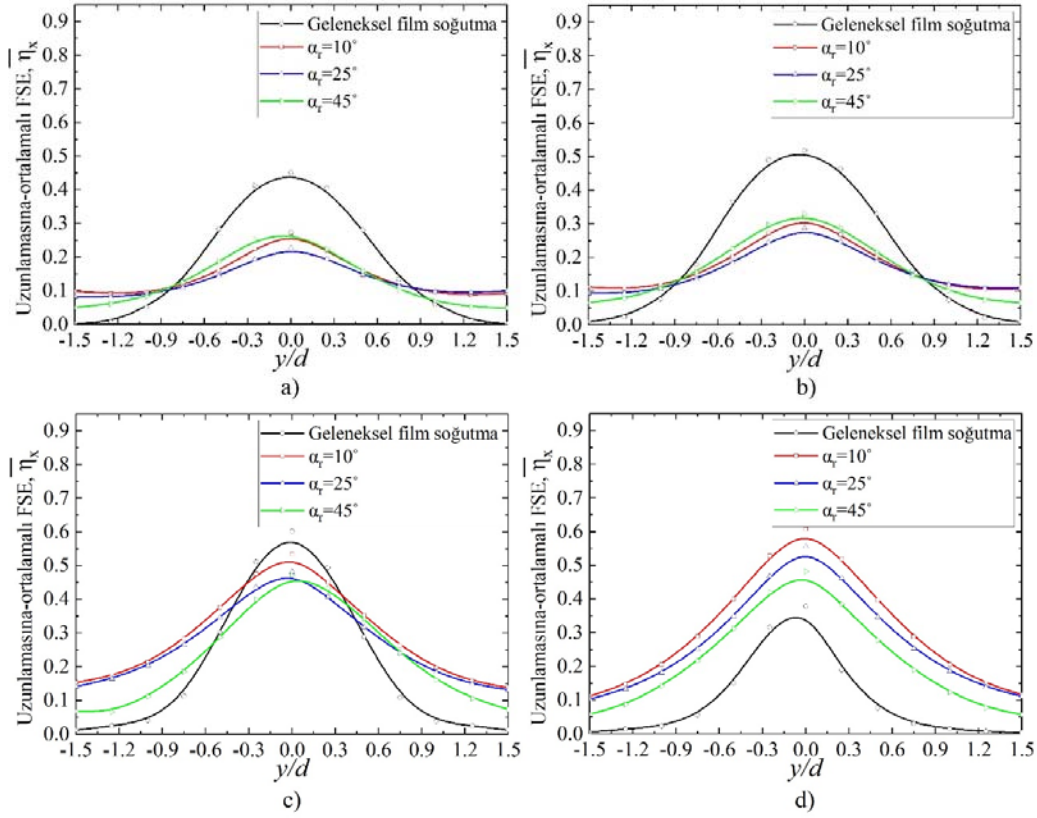


Şekil 5. Rampa açısının (α_r) yanal-ortalamalı FSE_y 'ne etkisi, a) $M=0,30$, b) $M=0,60$, c) $M=0,85$, d) $M=1,25$
(Effect of ramp angle (α_r) on laterally-averaged FCE , a) $M=0.30$, b) $M=0.60$, c) $M=0.85$, d) $M=1.25$)

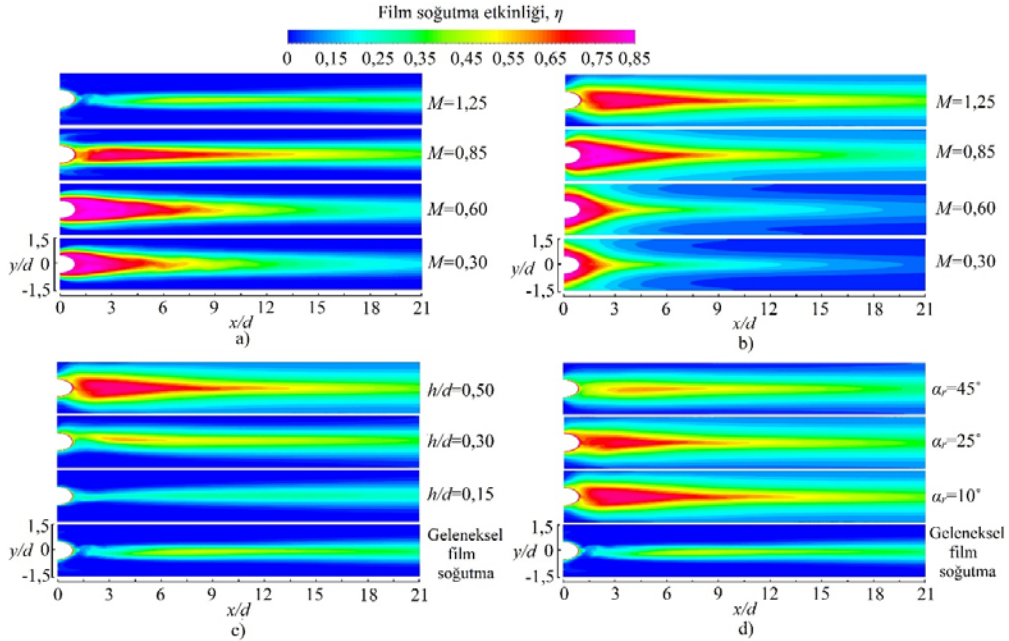
etkinliklerinin ortalaması alınarak oluşturulmuştur. Bir önceki bölümlerden alan-ortalamalı ve yanal-ortalamalı FSE sonuçlarına bakıldığında geleneksel film soğutmaya göre FSE 'ndeki en yüksek artış - özellikle nispeten yüksek üfleme oranında ($M \geq 0,85$) - rampa yüksekliği $h/d=0,50$ olan tasarımda elde edilmiştir. Bu nedenle rampa yüksekliği $h/d=0,50$ olan tasarımda farklı üfleme oranlarında rampa açısının uzunlamasına-ortalamalı FSE dağılımına etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi merkez çizgi üzerinde ($y/d=0$) nispeten düşük üfleme oranında ($M \leq 0,85$) en yüksek FSE geleneksel film soğutmada hesaplanmışken, yanal doğrultuda geleneksel film soğutmada FSE hızlı bir şekilde azalmıştır. Buna karşın yüzeye rampa yerleştirilmesi merkez çizgi üzerinde FSE 'ni azaltmasına neden olmuş, buna karşın yanal doğrultuda FSE geleneksel film soğutmaya göre önemli ölçüde artmıştır. Bunun sebebi rampanın jet akışı yanal doğrultuda yüzeye geleneksel film soğutmaya göre daha fazla yaymasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca yüzeye rampa yerleştirilmesi, yanal doğrultu boyunca yüzey üzerinde daha dengeli bir FSE dağılımının elde edilmesini sağlamıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere nispeten yüksek üfleme oranında ($M=1,25$) yanal doğrultuda en yüksek FSE dağılımı $\alpha_r=10^\circ$ rampa açısında elde edilmiştir.

3.4. Rampanın Yerel FSE 'ne Etkisi (Effect Of Ramp On Local FCE)

Rampanın yüzey üzerinde hangi bölgelerde FSE 'ni geleneksel film soğutmaya göre arttırdığını ortaya çıkarmak için yüzeyin yerel FSE araştırılmıştır. Şekil 7'de yüzey üzerinde yerel FSE 'nin dağılımı gösterilmiştir. Şekil 7a'dan görüldüğü gibi geleneksel film soğutmada nispeten düşük üfleme oranında ($M \leq 0,60$) jet deliğine yakın bölgede FSE daha yüksek değer almıştır. Nispeten yüksek üfleme oranında ise akışkanın yanal yayılımı azalmış ve FSE merkez çizgi üzerinde dar bir alanda yüksek değer almışken yanal doğrultuda önemli ölçüde azalmıştır. En yüksek FSE ise $M=0,60$ üfleme oranında ortaya çıkmıştır. Şekil 7b'de görüldüğü gibi yüzeye yüksekliği $h/d=0,50$ ve rampa açısı $\alpha_r=10^\circ$ olan üçgen iç-bükey rampanın yerleştirilmesi nispeten düşük üfleme oranında ($M \leq 0,60$) yüzeyin yerel FSE 'ni düşürse de, üfleme oranının artmasıyla yüzeyin hem yanal hem de uzunlamasına FSE etkinliğini arttırdığı görülmüştür. Bunun nedeni, rampanın jet akışı ana akışın etkisinden korumasına bağlanmıştır. Şekil 7c incelendiğinde nispeten düşük rampa yüksekliğinin ($h/d=0,15$) yüzeyin yerel FSE 'ni azalttığı görülmektedir. Rampa yüksekliğinin $h/d \geq 0,30$ olması durumunda ise geleneksel film soğutmaya



Şekil 6. Rampa açısının (α_r) uzunlamasına-ortalama FSE'ne etkisi, a) $M=0,30$, b) $M=0,60$, c) $M=0,85$, d) $M=1,25$
(Effect of ramp angle (α_r) on longitudinally-averaged FCE, a) $M=0.30$, b) $M=0.60$, c) $M=0.85$, d) $M=1.25$)



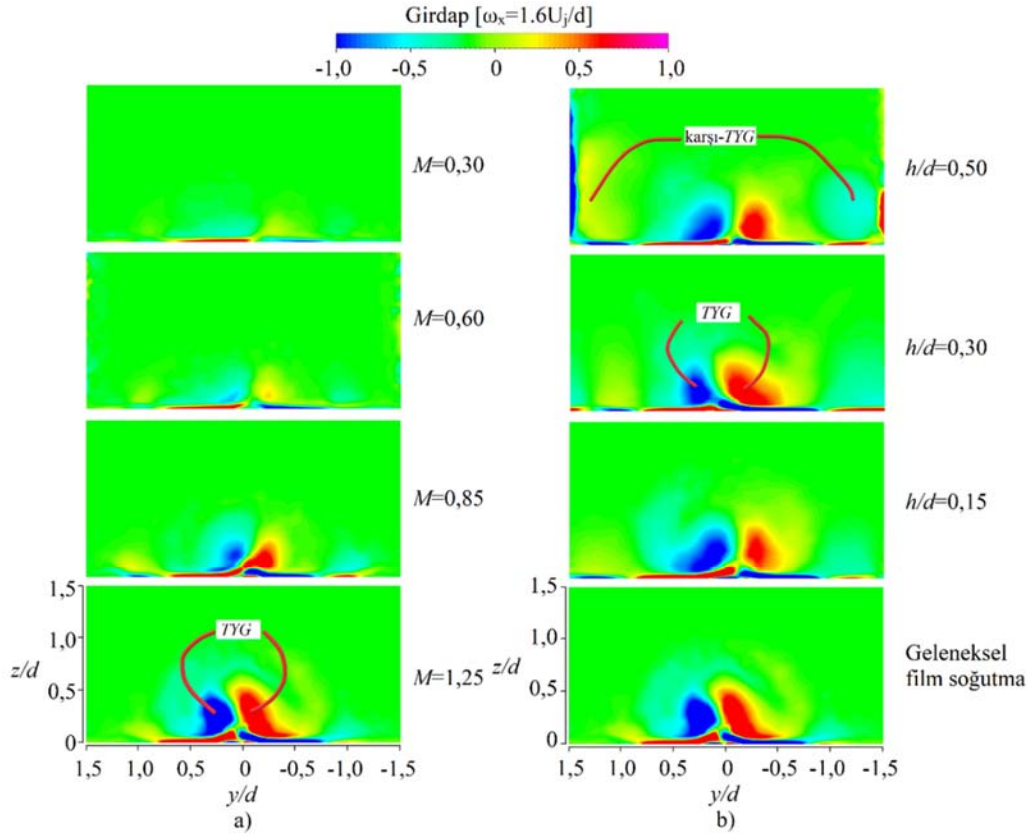
Şekil 7. Yüzey üzerinde yerel FSE dağılımı, a) geleneksel film soğutma, b) $h/d=0,50$, $\alpha_r=10^\circ$, c) $M=1,25$, $\alpha_r=10^\circ$, d) $M=1,25$, $h/d=0,50$ (Variation of local FCE, a) conventional film cooling, b) $h/d=0.50$, $\alpha_r=10^\circ$, c) $M=1.25$, $\alpha_r=10^\circ$, d) $M=1.25$, $h/d=0.50$)

göre yüzey üzerinde yerel FSE'ni arttırdığı tespit edilmiştir. Şekil 7d'de ise rampa açısının, α_r , yüzey üzerinde yerel FSE'ne etkisi sunulmuştur. Hesaplamalardan düşük rampa

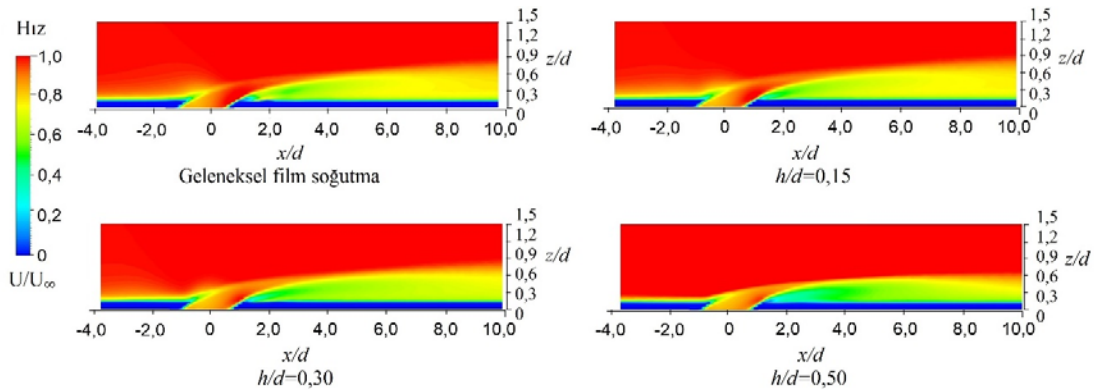
açısının yüzeyin yerel FSE'ni arttırdığını ortaya koymuştur. Bir önceki bölümlerde özellikle nispeten yüksek üfleme oranında ($M \geq 0,85$) ve rampa yüksekliğinde

($h/d \geq 0,30$) geleneksel film soğutmaya göre yüzeyin FSE 'nin arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte yüzeyin FSE rampa açısının azalmasıyla arttığı belirlenmiştir. Bu nedenle bu durumun altında yatan nedeni tespit etmek amacıyla akış alanı üzerinde ortaya çıkan girdaplar incelenmiştir. Şekil 8'de $x/d=3,0$ düzlemi üzerinde akış alanı içinde ortaya çıkan girdaplar gösterilmiştir. Şekil 8a'da görüldüğü gibi geleneksel film soğutmada üfleme oranı arttıkça akış alanı içerisinde daha güçlü TYG ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan Şekil 8b'de görüldüğü gibi yüzeye rampa yerleştirilmesi akış alanı içerisinde ilave bir çift $karşı-TYG$ ortaya çıkarmıştır.

Ayrıca şekilden de görüldüğü gibi rampa yüksekliğinin, h/d , artması daha güçlü $karşı-TYG$ oluşmasına neden olmuştur. Şekil 9'da yüzeyin merkezinden akış doğrultusu boyunca oluşturulan düzlem üzerinde ($y/d=0$) akışın hız profili gösterilmiştir. Geleneksel film soğutmada yüzeye enjekte edilen akışkan jet akışın momentumundan ve akış alanı içerisinde ortaya çıkan TYG nedeniyle rampanın olduğu durumlara göre ana akıma nispeten daha fazla nüfus ettiği görülmektedir. Buna karşın rampa yüksekliğinin $h/d=0,50$ 'ye çıkmasıyla birlikte Şekil 8'den de görülebileceği gibi akış alanı içerisinde ortaya çıkan TYG 'a



Şekil 8. $x/d=3,0$ 'deki düzlem üzerinde oluşan girdaplar, a) geleneksel film soğutma, b) $M=1,25$, $\alpha_r=10^\circ$ (Vortices formed on the plane at $x/d=3.0$, a) conventional film cooling, b) $M=1.25$, $\alpha_r=10^\circ$)



Şekil 9. $M=1,25$ ve $\alpha_r=10^\circ$ 'de yüzeyin merkezindeki düzlemde ($y/d=0$) akışın hız profili (Velocity profile on central plane at $M=1.25$ and $\alpha_r=10^\circ$)

karşı ilave *karşı-TYG*, akışkanın tekrar yüzeye tutunmasını sağlamıştır. Bu durum sonuç olarak, yüzeye rampa yerleştirilmesinin *FSE*'nin artmasının altında yatan nedeni açıklamaktadır.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

ρ	: Havanın yoğunluğu	[kg/m ³]
μ	: Dinamik viskozite	[Pa.s]
η	: Yerel film soğutma etkinliği	
$\bar{\eta}_A$: Alan-ortalamalı film soğutma etkinliği	
$\bar{\eta}_y$: Yanal-ortalamalı film soğutma etkinliği	
$\bar{\eta}_x$: Uzunlamasına-ortalamalı film soğutma etkinliği	
α_c	: Jet deliği açısı	
α_r	: Rampa açısı	

4.1. Kısaltmalar (Nomenclature)

I	: Türbülans yoğunluğu	
M	: Üfleme oranı	
Re	($Re = \frac{\rho U_{orth}}{\mu}$): Reynolds sayısı	
U	: Anlık hız	[m/s]
U_j	: Jet akış hızı	[m/s]
U_{ort}	: Ortalama hız	[m/s]
U_∞	: Ana akış hızı	[m/s]
d	: Jet deliği çapı	[m]
h	: Karakteristik uzunluk	
h/d	: Boyutsuz rampa yüksekliği	
I_m	: Akışkanların momentum oranı	
p/d	: Boyutsuz jet deliği aralığı	
s/d	: Boyutsuz üçgen iç-bükey rampanın iç-bükey çapı	
x	: Ana akış yön eksenini	[m]
x/d	: boyutsuz ana akış yönü mesafesi	
y	: Yanal eksen	[m]
y+	: Duvarın boyutsuz mesafe	
y/d	: Boyutsuz yanıl mesafe	
z	: Ana akışa dik eksen	[m]

4.2. Alt Simgeler ve Üst Simgeler (Subscripts and Superscript)

ad	: adyabatik duvar
a	: ana akış
j	: jet

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan bu çalışmada üçgen iç-bükey rampanın (*ÜİBR*) düz yüzey üzerinde film soğutma etkinliğine (*FSE*) etkisi sayısal olarak incelenmiş ve *ÜİBR*'nin farklı üfleme oranlarında optimum tasarım parametreleri tespit edilmiştir. Hesaplamalar 0,30, 0,60, 0,85 ve 1,25 olmak üzere dört farklı üfleme oranında (*M*) gerçekleştirilmiştir. Rampa iç bükey çapı $s/d=2$ 'de sabit tutulmuş, akış yönüne göre 10°, 25° ve 45° rampa açısı (α_r) ve 0,15, 0,30 ve 0,50 boyutsuz rampa yüksekliği (h/d) incelenmiştir. Sonuçlar dairesel kesitli jet deliğine sahip geleneksel film soğutma (rampasız yüzey) ile

karşılaştırılmıştır. Hesaplamalarda akış alanında türbin kanadının gerçek çalışma koşullarını modellemek için ana akış olarak hava, jet akışı olarak CO₂ kullanılmıştır. Buna bağlı olarak akışkanların yoğunluk oranı YO=1,50'dir.

Yapılan bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Ana akış ile jet akışın etkileşimi sonucunda akış alanı içerisinde bir çift ters yönde girdap (*TYG*) ortaya çıkmıştır. Üfleme oranının artması daha güçlü *TYG*'nin oluşmasına neden olmuştur. *TYG* jet akışkanını yüzeyden kaldırarak ana akışın yüzeyi kaplamasına sebep olmuş ve buna bağlı olarak *FSE*'nin azalmasına neden olmuştur.

Yüzeye rampa yerleştirilmesi akış alanı içerisinde *TYG*'nin tersi yönde *karşı-TYG* oluşturarak *TYG*'nin akış üzerindeki etkisini azaltarak jet akışın yüzeye tutunmasını sağlamıştır. Böylelikle jet akışın yüzey üzerinde daha iyi bir termal koruma sağlamasına katkıda bulunmuştur.

Nispeten düşük üfleme oranında ($M=0,30$) yeterince güçlü *karşı-TYG* oluşmadığı için rampanın varlığı, yüzeyin *FSE*'nin düşmesine neden olmuştur. Buna karşın üfleme oranı arttıkça ($M \geq 0,85$) ve rampa yüksekliğinin artmasıyla artan *karşı-TYG*'in gücü ile birlikte *FSE* geleneksel film soğutmaya göre önemli miktarda artmıştır. Rampa açısının azalması da bu etkinin yüzey üzerinde daha uzun süreli olmasını sağlamıştır. Sonuç olarak alan-ortalamalı *FSE*'nde geleneksel film soğutmaya göre en yüksek artış $h/d=0,50$ ve $\alpha_r=10^\circ$ olan rampa tasarımında %305,44 olarak elde edilmiştir.

Türbin kanadının yapısal bütünlüğü dikkate alındığında ve akış üzerinde ortaya çıkabilecek ayrodinamik kayıpları en aza indirmek için, rampa yüksekliğinin $h/d=0,50$ ile sınırlandırılması ve daha fazla artırılmasına gerek duyulmadığı değerlendirilmiştir.

Film soğutmada yüzeye yerleştirilen *ÜİBR*'nin, yüzeydeki termal korumayı artırarak türbin kanadı malzemesinde sıcak akışkanın sebep olduğu termal gerilmeleri en aza indirilmesine katkıda bulunacağı değerlendirilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, bu çalışmaya verilen destekten dolayı Türkiye Sinop Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (SÜBİTAM)'ne teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Bogard D.G., Thole K.A., Gas turbine film cooling, J. Propuls. Power, 22 (2), 249-270, 2006.
2. Bogard D.G., Airfoil Film Cooling, Gas Turbine Handbook, New York, A.B.D., 2006.
3. McGovern K.T., Leylek J.H., A detailed analysis of film cooling physics: Part II- Compound-angle injection with

- cylindrical holes, *J. Turbomach.*, 122 (1), 113-121, 2000.
4. Brittingham R.A., Leylek J.H., A detailed analysis of film cooling physics: Part IV- Compound-angle injection with shaped holes, *J. Turbomach.*, 122 (1), 133-145, 2000.
 5. Wang L.H., Han F., Zhou Z., Ma Y., Tao Z., Experimental investigations of the effects of the injection angle and blowing ratio on the leading-edge film cooling of a rotating twisted turbine blade, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 127, 856–869, 2018
 6. Andreini A., Becchi R., Facchini B., Picchi A., Peschiulli A., 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, *Int. J. Therm. Sci.*, 121, 75–88, 2017.
 7. Song L., Zhang C., Song Y., Li J., Feng Z., Experimental investigations on the effects of inclination angle and blowing ratio on the flat-plate film cooling enhancement using the vortex generator downstream, *Appl. Therm. Eng.*, 119, 573–584, 2017.
 8. Na S., Shih T.I.P., Increasing adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream ramp, *J. Heat Transfer*, 129 (4), 464-471, 2007.
 9. Zheng D., Wang X., Zhang F., Yuan Q., Numerical investigation on the effects of the divided steps on film cooling performance, *Appl. Therm. Eng.*, 124, 652–662, 2017.
 10. Zhang F., Wang X., Li J., The effects of upstream steps with unevenly spanwise distributed height on rectangular hole film cooling performance, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 102, 1209–1221, 2016.
 11. Chen S.P., Chyu M.K., Shih T.I.P., Effects of upstream ramp on the performance of film cooling, *Int. J. Therm. Sci.*, 50 (6), 1085–1094, 2011
 12. Rallabandi A.P., Grizzle J., Han J.C., Effect of Upstream Step on Flat Plate Film-Cooling Effectiveness Using PSP, Proceedings of the ASME 2008 Summer Heat Transfer Conference, Florida-USA, August 10-14, 2008.
 13. Abdala A.M.M., Elwekeel F.N.M., An influence of novel upstream steps on film cooling performance, *Int. J. Heat Mass Transf.* 93, 86–96, 2016.
 14. Hammami Z., Dellil Z.A., Nemdili F., Azzi A., Improving adiabatic film-cooling effectiveness by using an upstream pyramid, *Comput. Therm. Sci. An Int. J.*, 8 (2) 135–146, 2016.
 15. Zhou W., Hu H., Improvements of film cooling effectiveness by using Barchan dune shaped ramps, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 103, 443–456, 2016.
 16. Zhou W., Hu H., A novel sand-dune-inspired design for improved film cooling performance, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 110, 908–920, 2017.
 17. Zhou W., Peng D., Wen X., Liu Y., Hu H., Unsteady analysis of adiabatic film cooling effectiveness behind circular, shaped, and sand-dune-inspired film cooling holes: Measurement using fast-response pressure-sensitive paint, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 125, 1003–1016, 2018.
 18. Zhang S.C., Zhang J.Z., Tan X.M., Numerical investigation of film cooling enhancement using an upstream sand-dune-shaped ramp, *Computation*, 6 (3), 43-56, 2018.
 19. Hyams D.G., Leylek J.H., A detailed analysis of film cooling physics: Part III- Streamwise injection with shaped holes, *J. Turbomach.*, 122 (1), 122-132, 2000.
 20. Montomoli F., D’Ammaro A., Uchida S., Numerical and experimental investigation of a new film cooling geometry with high P/D ratio, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 66, 366-375, 2013.
 21. Atmaca M., Girgin I., Ezgi C., CFD modeling of a diesel evaporator used in fuel cell systems, *Int. J. Hydrogen Energy*, 41 (14), 6004–6012, 2016.
 22. Atmaca M., Ezgi C., Three-dimensional CFD modeling of a steam ejector, *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, 7036, 1-12, 2019.
 23. Tepe A.Ü., Improvement of film cooling effectiveness on a flat surface subjected to streamwise pressure gradient by using ramp, *Int. J. Therm. Sci.* 163, 106846, 2021.
 24. Tepe A.Ü., Enhancement of film cooling effectiveness using upstream vortex generator, *Heat Mass Transf.*, 57 (11), 1815-1828, 2021.
 25. ANSYS Inc., ANSYS Fluent, Release 19.1, Help System, Theory Guide, 2018.
 26. Patankar S., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Taylor & Francis, New York, A.B.D., 1990.
 27. Çengel Y.A., Ghajar A.J., Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications, McGraw-Hill Education, New York, A.B.D., 2015.
 28. Walters D.K., Cokljat D., A three-equation eddy-viscosity model for reynolds-averaged navier-stokes simulations of transitional flow, *J. Fluids Eng. Trans. ASME.*, 130 (12), 121401, 2008.

