

## BİR UÇAĞIN KANAT HÜCUM KENARININ BUZ ÇÖZME SİSTEMİ ÜZERİNE YENİLİKÇİ YAKLAŞIM

Yusuf Can TURANOĞLU<sup>1,2</sup>, Ahmet PINARBAŞI<sup>2</sup>, Kamil ARSLAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Niğde, Türkiye

<sup>2</sup>Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

### ÖZET

*Jet çarpması ile ısı transferi uygulamaları, uçakların pikolo sıcak hava buzlanma önleyici odalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Nozullardaki yüksek basınç ve haznedeki düşük basınç, nispeten büyük bir basınç oranına yol açarak bir jet durumunu oluşturur. Bu nedenle bu sayısal çalışma, genişlememiş jet çarpmasının akış ve ısı transferi özellikleri üzerine sayısal araştırmalar yürütmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca nozul basınç oranının (NBO) ve boyutsuz çarpma mesafesinin ( $L/d=2.5$ ) olarak dikkate alınmıştır. Bunun yanında, kanat profili içerisine yerleştirilen yenilikçi bir tasarımla daha etkin bir ısı transferi mekanizması sağlanmaya çalışılmıştır. Sayısal sonuçlara göre, çarpan hava serbest jet bölgesinde tam olarak genişlememekte ve duvar jet bölgesine girdikten sonra genişlemeye devam ederek küçük boyutsuz bir çarpma mesafesi altında sıcak hava sıcaklığında ani bir düşüşe neden olmaktadır. Bu durumda yüzey havayı ters yönde ısıtacağından sıcak hava yüzeyi etkili bir şekilde ısıtmayacaktır. Yüksek hızlı jet çarpması için, özellikle de genişlememiş jet durumu için, serbest jet bölgesi ile hazne ortamı arasındaki büyük statik sıcaklık farkından dolayı ortam havası, jet sınırının toplam sıcaklığını etkileyeceği sonucuna varılmıştır.*

*Anahtar Kelimeler: Sıcak hava buzlanma önleme sistemi, Pikolo tüp, Nozul basınç oranı, Çarpan jet, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD)*

## GİRİŞ

Uçak yüksek irtifada bulutların içerisinde uçarken, donma noktasının altındaki sıcaklık düzeylerinde su damlacıkları uçağın kanadına yapışacak ve bu bölgelerde buzlanma meydana gelecektir. Atmosferde bulunan nem içeriği donma koşullarında uçaklarda buzlanmaya neden olabilmektedir. Uçağın kanadında meydana gelen buzlanma havanın düzgün olan akışını bozar, kanadın yüzeyine gelen sürtünmeyi artırır, kontrol yeteneğini ve kanadın kaldırma kabiliyetini azaltır. Bu buzlanma olayının giderilmesine yönelik olarak çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler; buzlanma önleme ve buz çözme sistemleri olarak sınıflandırılabilir. Buzlanmayı önleme, herhangi bir buzlanma başlamadan önce kanata sürekli bir ısı enerjisi sağlayarak donmayı engellemeye çalışmaktır. Buz çözme sistemleri, kanadın hücum açısında meydana gelen orta kalınlıkta bulunan buz birikmesini periyodik olarak kanattan uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Genellikle yağmurlu havalarda, stratüs bulutlarda, donma noktasına yakın düzeylerde oluşmaktadır. 8000 ft yükseklikten daha üst irtifalarda buzlanma olmamaktadır. Yapılan çalışma kapsamında 8000 ft düzeylerinde oluşan donma olaylarını yenilikçi yaklaşımlarla çözülmesi amaçlanmıştır [Nagappan,2013; Khail,2020; Hassani,2013]

### Literatür Taraması

Bu bölümde, jet çarpma tekniği kullanılarak uçaklarda buzlanma önleme sistemleri olarak uçağın ön kenar bölümlerinde oluşan buzlanmayı önleme konusunda deneysel, sayısal ve teorik çalışmalar anlatılmıştır.

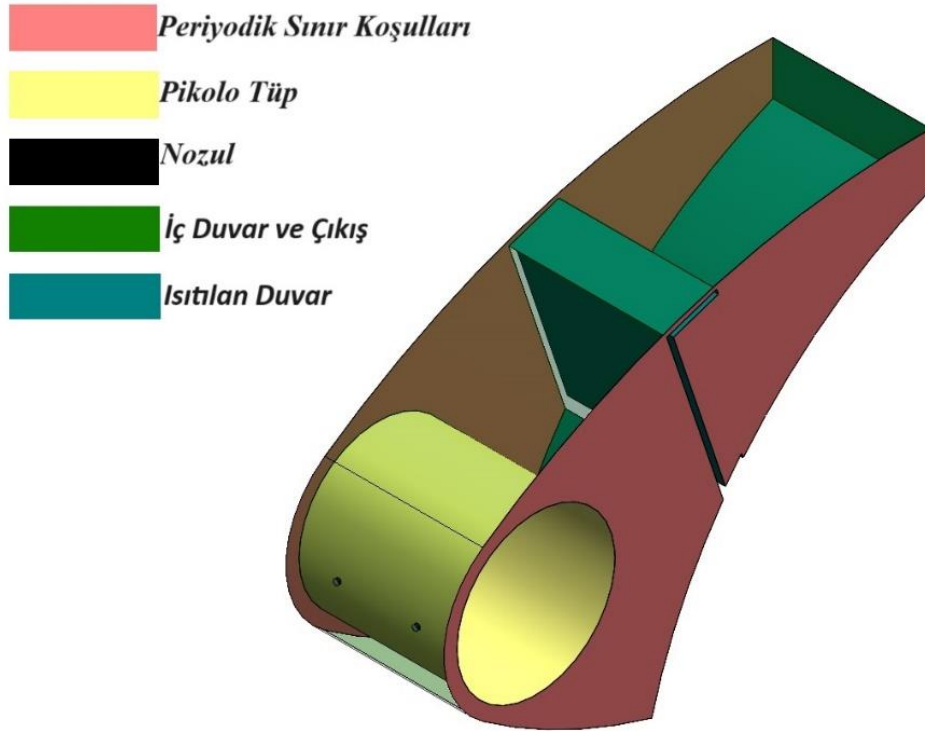
Birçok araştırma sıcak hava buzlanma önleme sistemleri ve jet çarpma yöntemi üzerine yoğunlaşmıştır. [Mattos,2000; Liu,2004] kanat üzerinde oluşan buzlanmayı ısı transferi yardımıyla sayısal olarak çözmüşlerdir. [Papadakis,2007; Santos,2008], sıcak hava buzlanma sistemlerini katı modellemesini deneysel ve sayısal yollarla incelemişler ve pikolo üzerinde bulunan nozulların şekilleri ve konumları buzlanma önleme olayına duyarlı olduğunun kanıtına varmışlardır. [Saeed,2008; Guo,2022] tarafından yapılan çalışmaya göre çeşitli sıcak hava jeti ayarlamalarını araştırma üzere sayısal çalışmalar yapmış ve bulunan sıcak havanın iç tarafta bulunan sıcak astar tarafından donan bölgelere yeniden yönlendirip kullanılması durumunda termal performansını artırdığı gözlemlenmiştir. [Gou,2022] pikolo tüpü üzerinde genleşmemiş jet akışı farklı basınç oranlarıyla incelemiş ve ısı transferi üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. [Yang,2017] NACA 0015 kanat profilinin sıcak jet çarpma olayını sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. [Wright,2004] Buzlanma önleme yazılımı olan LEWICE kooperasyonunun uygulanabilirliğini test etmiştir. [Fregeau,2005; Fregeau,2009] 3 boyutlu bir yüzey üzerinde bulunan deliklere eğimler vererek en optimum eğim açısını bulup Reynolds sayısının ısı transferi üzerindeki etkisini incelemiştir. Metzger ve Bunker [Guo,2022] türbülanslı koşullar altında ( $6750 < Re < 8450$ ) içbükey şeklini olan yüzey üzerinde jet çarpma tekniğini kullanarak ısı transferini deneysel olarak incelemiştir. Jet açıklık açısının ısı transferi üzerinde etkisinin arttığına kanıtına varmıştır.

[Mohammadpour ve Rajabi,2014] Normal akışlı ve darbeli slotjet çarpmasını incelemek için içbükey yüzeylerde farklı hızlarda analizler yapmıştır. Gelen akışın içbükey yüzeye olan mesafesini darbenin derinliğini parametrik olarak incelemiştir. [Ravanji ve Zargarabadi,2020] Darbely akışın normal akışa göre daha iyi ısı transferi oranı yarattığı sonucuna varmıştır. Pim yüzgecinin yüzeyine türbülanslı rejimde akış yollanarak performansı incelenmiştir. Yüzgece gelen akışın çapı ve eğrilik oranı parametrik çalışılmıştır. Yüksek değere sahip eğrilik ve düşük jet çapında daha yüksek ısı transferi sağladığının sonucuna varılmıştır. [ Hadipour, Zargarabadi, Mohammadpour, 2020] Tarafından deneysel ve sayısal olarak yürüttüğü çalışmada içbükey yüzeye türbülanslı akış yollayarak ısı transferi incelenmiştir. Buna ek olarak iç yüzeye gelen akışı yavaşlatmak amacıyla durma noktaları belirlemiştir. Belirlenen noktalara üçgen şeklinde üçgen şeklinde yüzgeç koyarak ısı transferi olayının pozitif etki yarattığı sonucuna varmıştır. Artan Reynolds sayılarında pürüzsüz yüzeylerde ısı transferi olayının daha yüksek olduğunu göstermiştir. [Craft,2008] İçbükey yüzeylerde jet çarpması olayını türbülanslı rejimlerdeki davranışlarını incelemiştir. Ansys Fluent uygulamasında doğrusal ve doğrusal olmayan girdap şemalarını karşılaştırmıştır. Elde edilen verilere göre jet çarpma tekniğinin ısı transferi karakterizasyonu incelemek için yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır.

Makalelerde belirtildiği gibi içbükey veya kanadın uç bölgelerinde sıcak hava buzlanma önleyici uygulamalarda çokça çalışmalar yapılmıştır. Ancak ısı transferi ve akışkan davranış fenomeni derinlemesine anlaşılmamıştır. Yapılan çalışmada gelen sıcak havanın etkili ve verimli kullanmak amacıyla yavaşlatan durma noktaları eklenerek farklı basınçlarda oluşan donma olayı incelenmiştir. Ayrıca gelecek çalışması için fikir verilmiştir.

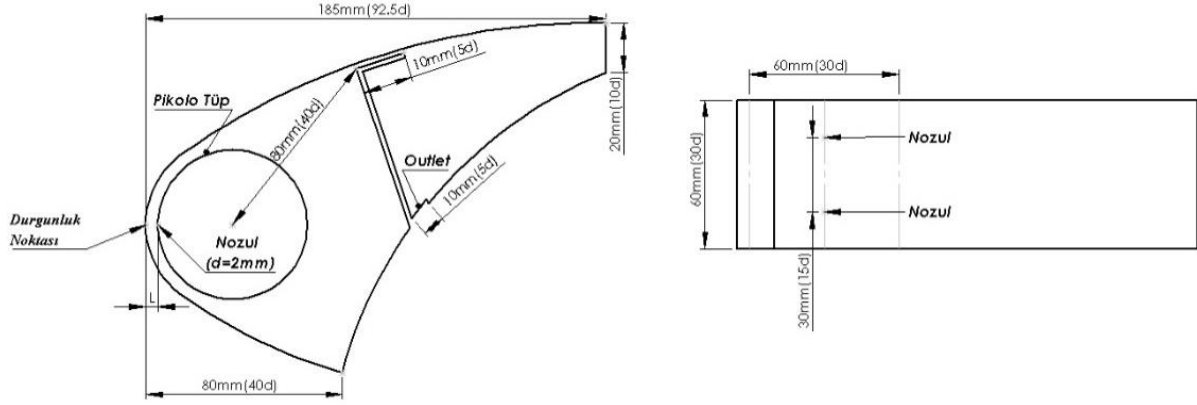
## FİZİKSEL MODEL

Bu çalışmada, kanat profilinin kanat ön kenarının buzlanma önleme problemi, uçaklarda halihazırda kullanılan buzlanma önleme yöntemine jet çarpma yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. NACA0015'in giriş yönünün uzunluğu [Guo,2022] göre 185 mm ve jet deliği oluşturmak için kullanılan pikolo tüpün çapı 60 mm olarak seçilmiştir. NACA 0015'in sol ve sağ tarafı doğrusal periyodik durum olarak sabitlenmiştir. NACA 0015'in içbükey yüzeyi sabit sıcaklık sınır şartı  $T_{yüzey}=263K$  olarak tutulmuştur. Ayrıca çalışma akışkanının giriş sıcaklığı  $T_{inlet}= 460K$  olarak ayarlanmıştır. Jet deliği hidrolik çapı slot jetleri 0.002 mm olarak seçilmiştir. Dikdörtgenel çıkışın hidrolik çapı 0.017 olarak alınmıştır. NACA 0015'in pürüzsüz yüzeyi incelendikten sonra, buzlanma önleme uygulamasında en önemli unsur olan nozula en uzak bölgelerine eklentiler konularak o bölgelerde oluşan buzlanma olayı çözülmeye çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan geometrik yapılar (Şekil 1)'de detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 1 Tasarımı yapılan NACA0015 kanat profilinin izometrik görünüşü

Bu sayısal çalışmanın temel boyutları (Şekil 2)'de gösterilmiştir.



Şekil 2 Kanat profilinin detaylı boyutlandırılması

Bu çalışmada türbülanslı akış koşullarında korunum denklemleri çözülmüştür. ANSYS Fluent versiyon çözücünde kullanılan her koruma formülasyonunun yakınsama kriterleri  $10^{-3}$ 'e kadar ulaşılmıştır. Hesaplama kararlı durum altında 3 boyutlu olarak uygulanmıştır. Ayrıca sıcaklık değişimlerinin küçük olması nedeniyle ışıınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir.

Süreklilik Denklemi [Pazarlioğlu,2021]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x} = 0 \quad (2.1)$$

Burada t [s] zamanı temsil eder ve u [m/s] sıvının hız bileşenidir

Momentumun Korunumu [Pazarlioğlu,2021]:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + i \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u'_i u'_j) \quad (2.2)$$

P [Pa] basınçtır,  $\mu$  [kg/m.s] akışkanın dinamik viskozitesidir ve  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] akışkanın yoğunluğudur.

Enerjinin Korunumu [Pazarlioğlu,2021]:

$$\frac{\partial}{\partial t} + (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} + [u_i (\rho E + Pr)] = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( k + \frac{C \mu_i}{Pr_t} \right) \right] \frac{\partial T}{\partial x_j} + \mu_i (\tau_{ij})_{eff} \quad (2.3)$$

Burada T [K] akışkanın belirli bir konumdaki sıcaklığıdır, Pr akışkanın Prandtl sayısıdır, E [J] iç enerjidir, k [W/m.K] ısı iletkenliğidir ve  $\tau_{ij}$  [Pa] viskoz gerilim tensör bileşenleridir.

Kayma Gerilme Aktarımı (SST) k-w türbülans modeli, akışın çarptığı yüzey üzerinde oluşan etkileri doğru bir şekilde tahmin özelliğine sahip olduğundan NACA 0015 kanat profilinin hücum kenarında oluşan donma olayını incelemek için iyi bir seçenektir. Reynolds gerilimi ve türbülanslı viskozite olayları dikkate alınması durumunda türbülanslı akışları daha iyi simüle edilebilir. Bu tür donma olayı çözücülerinde bu tip denklemler kullanılır. [Pazarlioğlu,2021] Diğer denklemler kullanılması durumunda karmaşık modeller oluşabilmektedir. K ve w denklemleri 2.4 ve 2.5'te verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) \right] + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2.5)$$

Burada:

$\tilde{G}_k$ : Ortalama hız gradyanlarından dolayı türbülans kinetik enerjisinin (k) üretilmesi.

$Y_k$ : Türbülans kaynaklı kinetik enerjinin (k) dağılım oranı.

$\omega$ : Spesifik dağılım oranı.

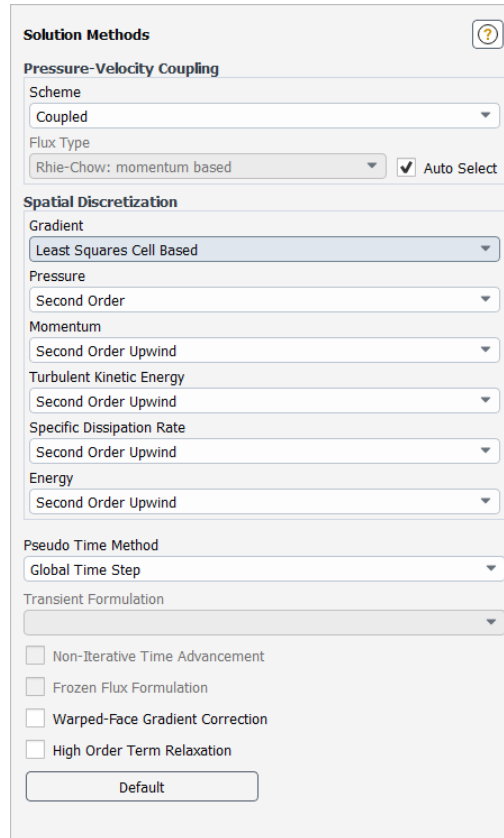
$S_k$  and  $S_\omega$ : Kullanıcı tanımlı kaynak terimleri.

$G_\omega$ : Spesifik dağılım oranının üretilmesi ( $\omega$ ).

$Y_\omega$ : Türbülans kaynaklı  $\omega$  dağılım oranı.

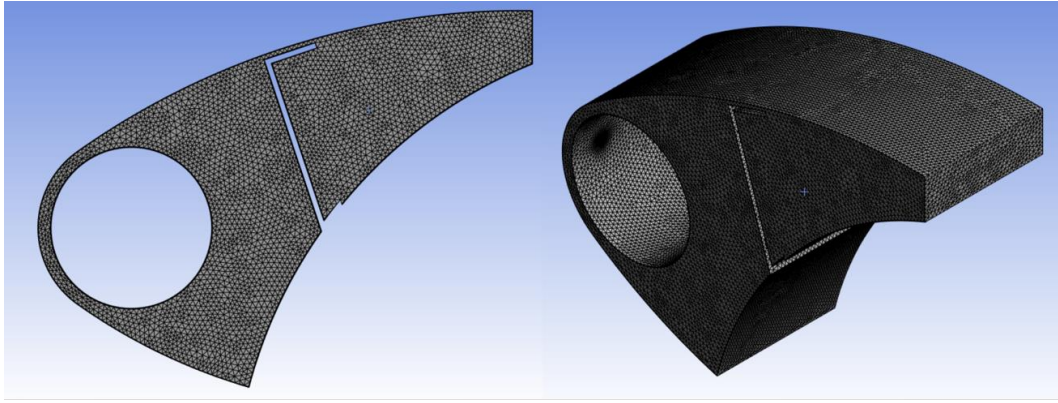
$D_\omega$ : Çapraz difüzyon terimi.

**Sayısal yöntem:** Bu bölümde olgulara ilişkin bilgiler ve genel performans metrikleri anlatılmaktadır. Bu çalışmada buzlanmayı önlemek amacıyla farklı parametrelerin performansını değerlendirmek için sayısal yöntem seçilmiştir. Doğrulaması yapılan kanat profiline 2 farklı eklenti yapılarak hidrotermal performansı incelenmiştir. Farklı jet açılarının ve sistem geometrisinin hidrotermal performansı araştırılmıştır. Jet akışının kanat hücumunda sıcaklık dağılımını etkisini içerdiğinden, ANSYS Fluent versiyonundaki Hız ve basınç çiftinin ayrılması için ise SIMPLE şeması kullanılmıştır. (Şekil 3)'de çözüm yöntemlerinin özellikleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

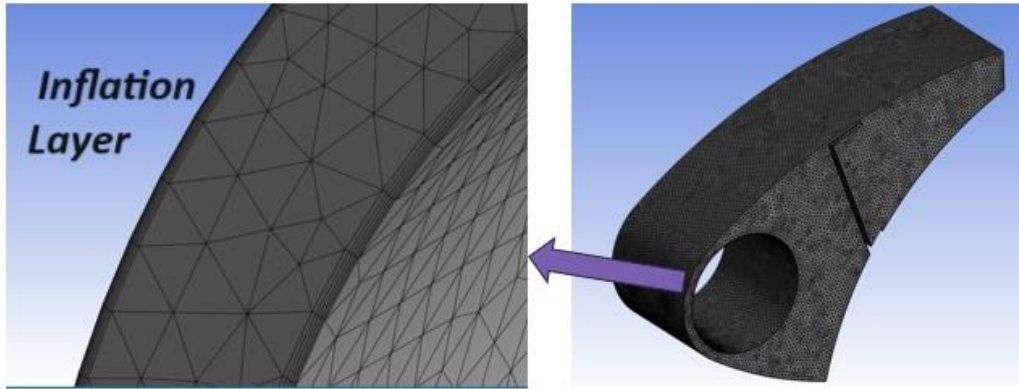


Şekil 3 Çözüm yöntem özellikleri

**Ağ bağımsızlığı testi:** Ağ bağımsızlığı çalışması sayısal hesaplamalarda en önemli konudur. Mesh yapısı sayısal sonuçları doğrudan etkilediği için analize başlamadan önce mesh bağımsızlık çalışmasının uygulanması gerekmektedir. Ayrıca ağ çalışmasında daha doğru sonuç alınabilmesi için önemli bölgeye daha yoğun mesh uygulanması gerekmektedir. Mevcut çalışmada ise jet çarpma çalışmalarında (Şekil 4)'de görülebileceği gibi hedef duvara ve jet deliğine daha yoğun ve daha küçük ağ yapısı uygulanmıştır. (Şekil 5)'de görülebileceği gibi duvar bölgelerinde daha doğru çözümler alınabilmesi için inflation tabakası uygulanmıştır. Optimum ağ yapısı bulunması amacıyla 6 farklı ağ boyutunda statik sıcaklık değerleri karşılaştırılıp birbirleri arasında kıyaslanmış ve (Çizelge 1)'de verilmiştir. Buna göre M4 ağ yapısının analizler için uygun olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 4 NACA0015 kanat modelinin mesh yapısı



Şekil 5 NACA0015 kanat modelinin inflation tabaka yapısı

Çizelge 1 Ağ bağımsızlığı testi

NO	Ağ	Statik Sıcaklık	%
M1	309000	320.88	-
M2	385000	319.7	0.36
M3	446000	320.79	0.34
M4	580000	322.77	0.36
M5	675000	322.9	0.29
M6	918000	322.47	-0.13

Tasarımı yapılan NACA0015 kanat profilinin sınır detaylı olarak (Çizelge 2)'de verilmiştir.

Çizelge 2 Sınır Koşulları

Sınır Koşulları	Parametre	Değerler	
pressure_Inlet	Nozul Basınç Oranı İle Birlikte Toplam Basınç (Pa)	4.14	259785
		3	188250
		2.01	126127.5
		1.59	99772.5
		1.3	81575
		1.15	72162.5
		1.05	65887.5
		1.02	64005
	Sıcaklık (K)	460	
	Türbülans Yoğunluğu (%)	5	
Hidrolik Çap(m)	0.002		
pressure_Outlet	Basınç (Pa)	0	
	Hidrolik Çap (m)	0.017	
wallheated	Isı Transfer Katsayısı[W/(m <sup>2</sup> K)]	285.88	
	Sıcaklık (K)	264	

### Doğrulama

Kabul edilen sayısal hesaplama yöntemlerinin geçerliliğini doğrulamak için, boyutsuz çarpma mesafesi  $L/d$  2.5 ve NBO değerleri 4.14, 3 2.01,1.59,1.3,1.15,1.05 ve 1.02 alınarak sayısal analizler gerçekleştirilmiş ve literatürde var olan [Guo,2022] çalışması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları (Çizelge 3)'de verilmiştir. Bu tabloya göre basınç değerleri azaldıkça kanadın uç bölgesinde donma olaylarının arttığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında sayısal çalışma sonuçlarının Guo vd. [16] çalışması sonuçları ile uyumlu olduğu ve mevcut hesaplama sisteminin doğru olduğu saptanmıştır.

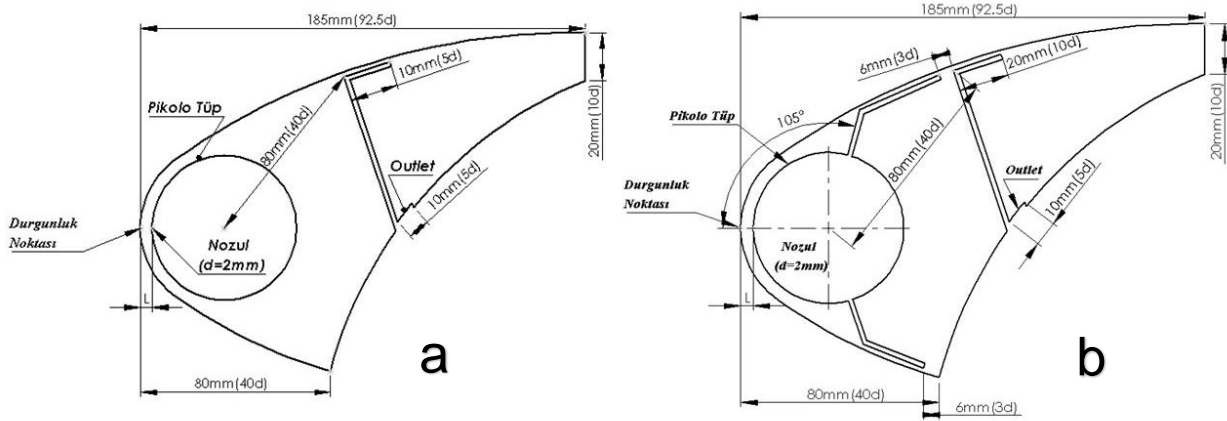
Çizelge 3 Statik Sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

NBO	Pressure_Inlet	Yayınlanan Makale	Statik Sıcaklık	y+	%
4.14	259785	331.5	322.77	2.07	2.78
3	188250	323	317.33	1.76	1.75
2.01	126127.5	312	311.53	1.48	0.15
1.59	99772.5	306.5	308.24	1.31	0.56
1.3	81575	300.2	305.41	1.2	1.73
1.15	72162.5	292.6	303.87	1.12	3.85
1.05	65887.5	283.5	303.1	1.1	6.91
1.02	64005	277.7	302.89	1.06	9.02

Elde edilen bu verilere göre nozul konumuna uzak bölgelerinde donma olaylarının olabileceği anlamına gelmektedir. Kanada donma olması durumunda uçağın aerodinamiği kötü etkilenecektir ve ölümlü kazalarla sonuçlanabilecektir. Bu sebeple kanadın pikolo tüpüne 105 derecelik açılarla yeni eklentiler konulması planlanmıştır. Çalışma kapsamında eklentili ve eklentisiz pikolo tüpünün statik sıcaklık değerleri karşılaştırılmış ve en optimum koşullar elde edilmiştir. Konulan bu eklentilerin verimliliği detaylı olarak incelenmiştir.

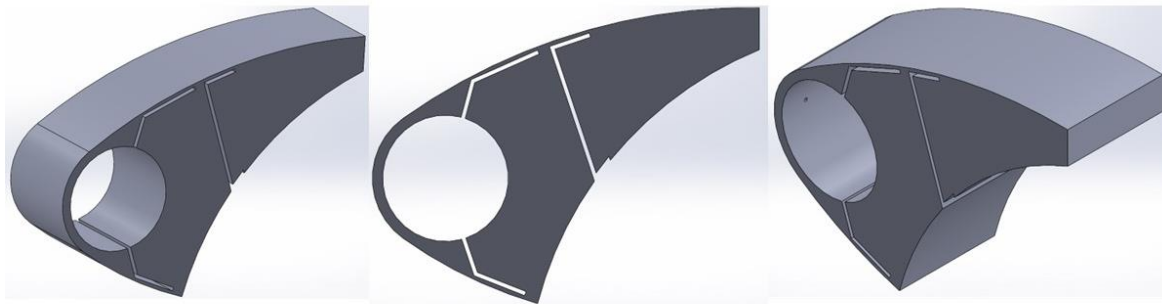
### YENİLİK ÇALIŞMASI

Uçak yüksek irtifada uçarken çevre sıcaklıkları çok düşük düzeylerde olmaktadır. Bu düşük sıcaklıklar da uçağın 4 farklı bölümünde donmalar meydana getirmektedir. Bu bölümler, kokpit camı, pitot tüpü, uçak motoru ve uçak hücum kenarıdır. Kokpit camındaki donma termal ve elektriksel akımlarla çözülebilirken, pitot tüpünün bulunduğu yerdeki donmalar sürekli olarak elektrik akımları verilerek bu donma olayı çözülebilmektedir. Motorun giriş bölümünde meydana gelen donmalar motor ısısı, gibi termal hareketler ile çözülebilmektedir. Buzlanan bölüm çözülebilmektedir. Son olarak kanadın uç bölgelerinde yüksek irtifalarda oluşan donmalar uçuşun kararlılığı bozacaktır. Burada oluşan donmayı çözmek için ise motordan elde edilen yüksek ısıyı pikolo tüpe verip kanadın ucuna jet akış yöntemiyle püskürtme yapılarak buzlanma olayı çözülmeye çalışılmaktadır. Ancak bu durumda donma yine yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple pikolo eklentiler eklenerek donma olayını Ansys Fluent versiyon programında analizleri yapılarak çözülmüştür. Mevcut geometri ve eklenen eklentiler (Şekil 6)'te detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 6 Mevcut çalışma (a), Yenilenen çalışma (b)

Çizilen tasarımının 3 boyutlu modellemesi (Şekil 7)'de verilmiştir.



Şekil 7 Yenilik çalışması

Tasarımı yapılan yeni modelin ağ bağımsızlığı testi yapılmış ve (Çizelge 4)'te sunulmuştur. Bu verilere göre optimum ağ M2 seçilerek analizler yapılmıştır.



Çizelge 4 Eklentili yapının ađ bağımsızlığı testi

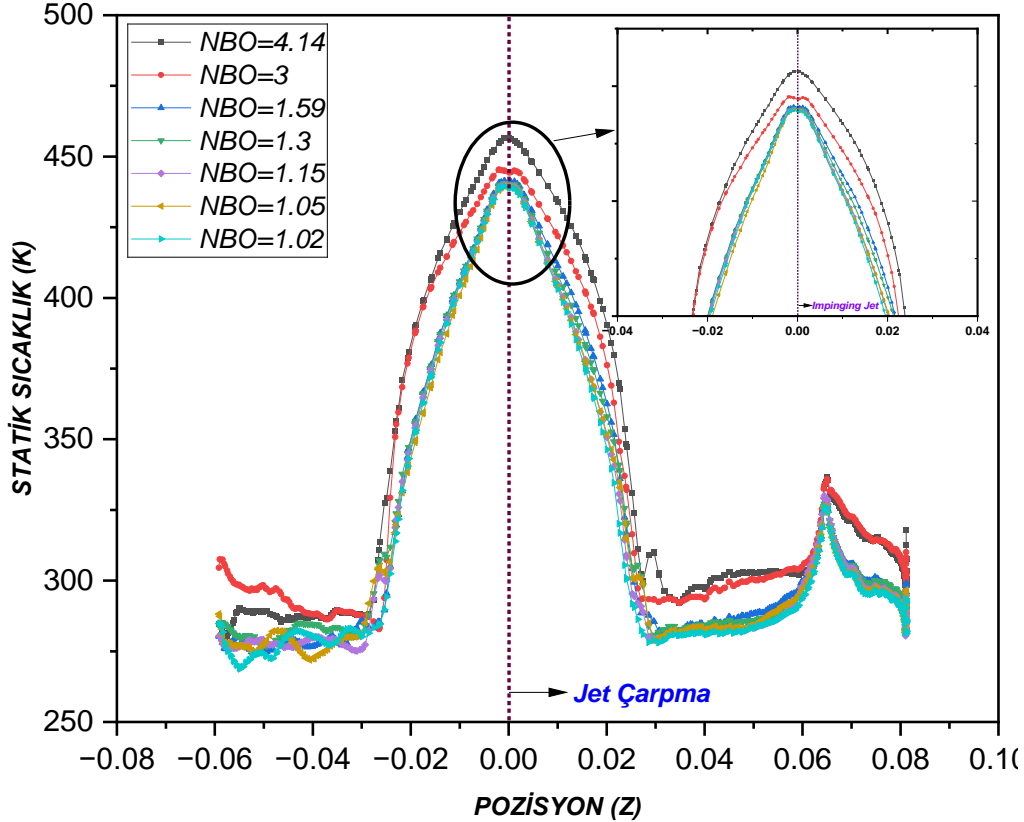
<b>NO</b>	<b>Ađ</b>	<b>Statik Sıcaklık</b>	<b>%</b>
M1	328429	328.9516	-
M2	425000	330.0716	-0.33
M3	521947	330.2384	-0.05
M4	655929	330.9379	-0.21
M5	964103	331.11096	-0.05

## SONUÇLAR

Bu bölümde, NACA0015 kanat hücum kenarında uçuş sırasında biriken buzlanma olayını önleme performansı açısından eklentisiz ve eklentili pikolo tüp yardımıyla farklı parametrelerin etkisini ayrıntılı olarak analiz edilmiştir.

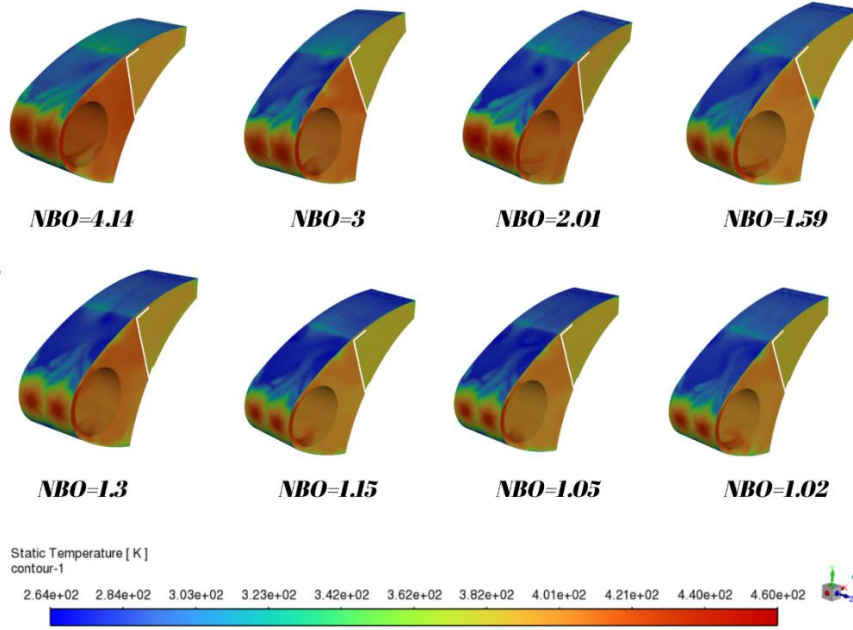
### Jetin ve eklentili pikolo tüpünün buzlanma önleme uygulamasına etkisi

Bu bölümde eklentisiz pikolo tüpe etki eden 8 farklı olayın ve eklentili bir şekilde kanata etki eden donma olayı incelenerek yapılan yeniliğin verimliliği incelenecektir. Eklentisiz ve [Guo,2022] tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçları karşılaştırması (Şekil 8)'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kanadın merkezinden uzak bölgelerinde sıcaklık 270 K düzeylerine düşmüştür. Bu durum bölgelerde donma olayları meydana geldiğini ifade etmektedir. Jet çarpma bölgesinde donma olayı görülmemiştir.



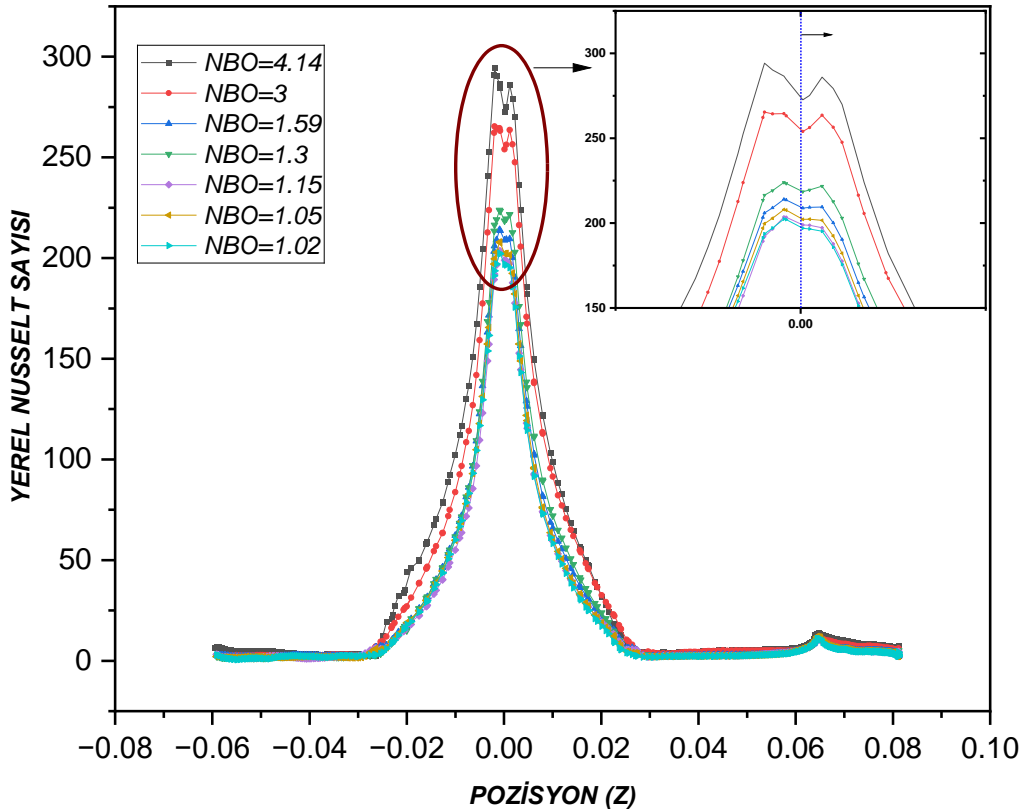
Şekil 8 Eklentisiz pikolo tüp sıcaklık dağılımı

Donma olayının daha ayrıntılı göstermek amacıyla sayısal çalışmalardan ısıtılan duvar ve pikolo tüpü içeren sıcaklık dağılımı alınmıştır. Bu dağılımlara göre jet hücum bölgesine en uzak bölgelerde donma olayları gözlemlenmiştir. Bu bölgeler uçuş sırasında kanadın aerodinamiğini kötü etkileyebilir ve kazalarla sonuçlanabilir. (Şekil 9)'de ortalama statik sıcaklık değerleri ısıtılan duvar, periyodik sınır koşulları ve pikolo tüpünün basınç dağılımları verilmiştir. Nozuldan kanadın hücum kenarına etki eden basınç oranları azaldıkça genel olarak yüzey sıcaklığı da azalır. Bunun nedeni nozul basınç oranlarındaki azalmanın buzlanma önleme odasındaki sıcak hava akışında bir azalmaya yol açmasıdır bu durumda da kanadın hücum açısında buzlanma olayı kaçınılmazdır.



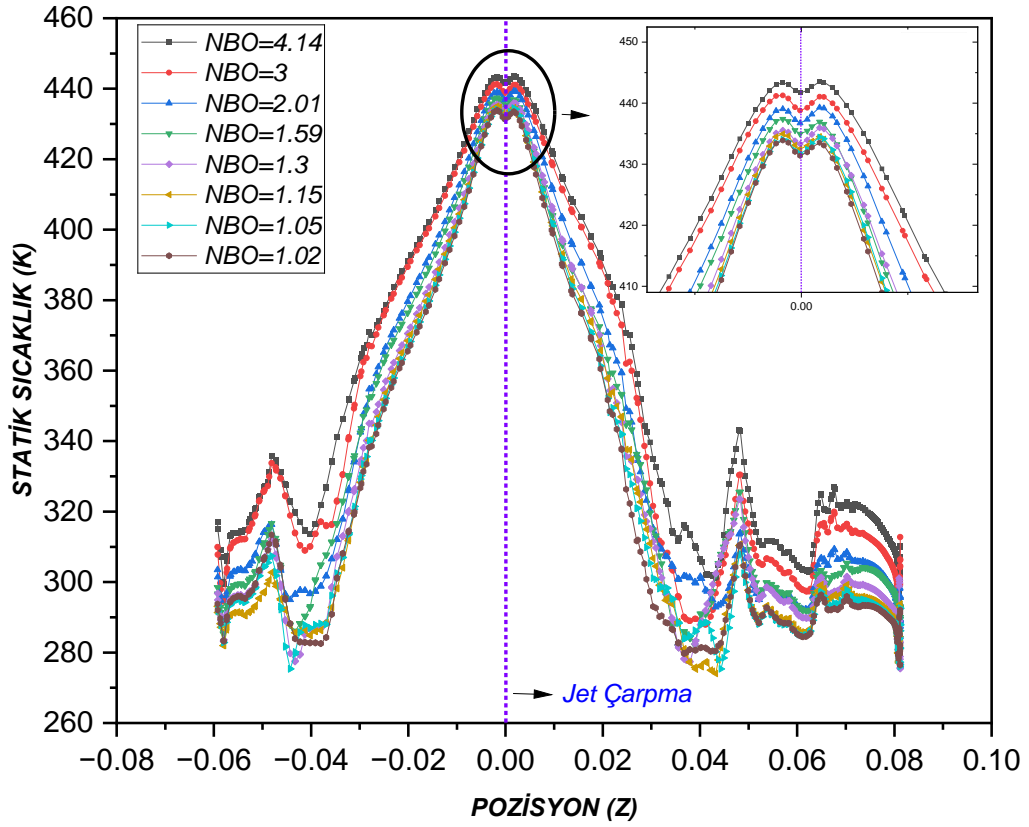
Şekil 9 Eklentisiz Pikolo tüpünün farklı nozul basınç oranlarında sıcaklık dağılımı

(Şekil 10)'da yerel farklı basınç oranlarında yerel Nusselt sayısı verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere nozulun basınç oranı azaldığı da dairesel jetin yerel buzlanma önleme performansını tanımlayan yerel Nusselt sayısı da önemli ölçüde azalmaktadır. En iyi performans NBO=4.14 kullanılarak sağlanmaktadır.



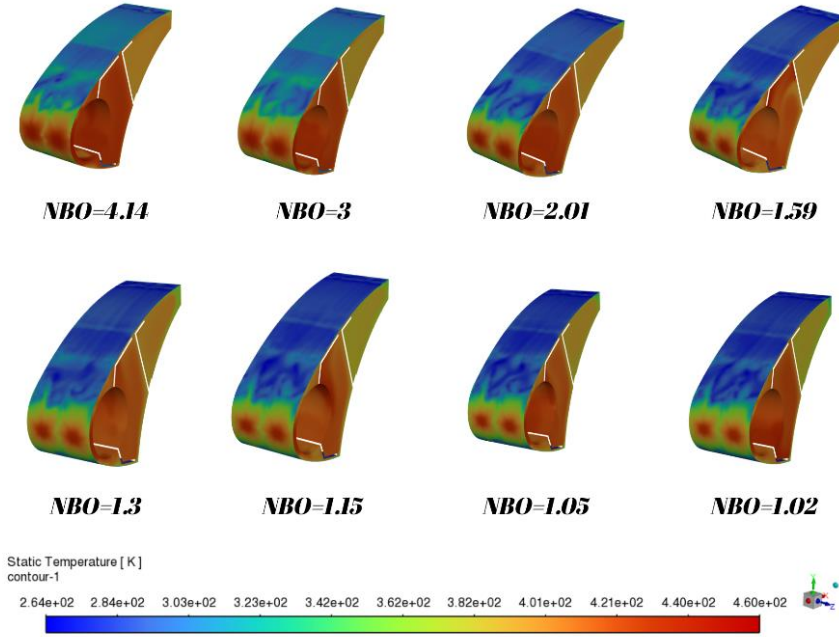
Şekil 10 Eklentisiz pikolo tüpünün yerel Nusselt sayısı

ANSYS Fluent versiyonundan veriler alındıktan sonra yenilik çalışmasının analizleri yapılmıştır. (Şekil 11)'da yenilikçi çalışmanın ortalama statik sıcaklık dağılımı verilmiştir. Buzlanma olayının en fazla olan bölgelerinde sıcaklık değerlerinde 10 K düzeyinde artış olduğu görülmektedir. Bu durumda donma olayı oluşan bölgelerde sıcaklık yükseldiği için bu durum gerçekleşmeyecek ve kanat aerodinamik açıdan olumsuz koşullar oluşmayacaktır.



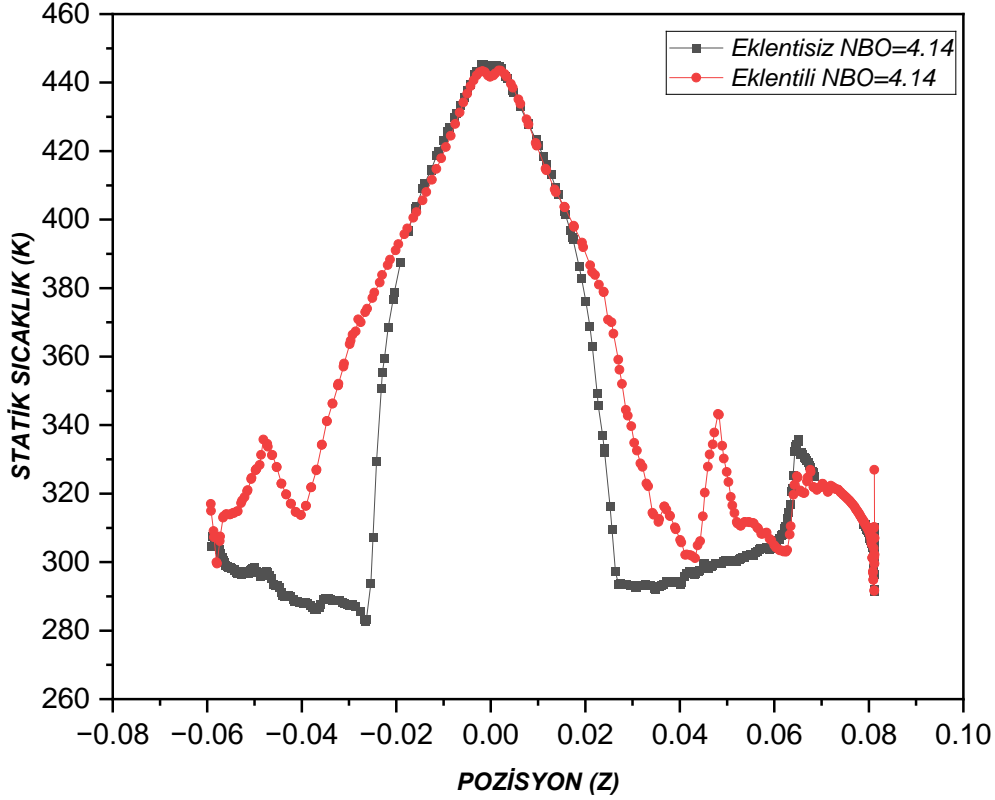
Şekil 11 Eklentili pikolo tüp sıcaklık dağılımı

(Şekil 12)'de eklentisiz pikolo tüpünün farklı nozul basınç oranlarında sıcaklık dağılımı Eklentili pikolo tüp sıcaklık dağılımında düşük basınç oranlarında eklentisize göre sıcaklık daha fazla yükseliyor ve donma olayını minimum düzeye indirmektedir. Ayrıca eklentiler basıncı yüksek sıcak havanın kanadın hücum açısında daha uzun süre maruz olmaktadır.



Şekil 12 Eklentili pikolo tüpünün farklı nozul basınç oranlarında sıcaklık dağılımı

(Şekil 13)'de Eklentisiz ve Eklentili pikolo tüpünün statik sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Grafikten anlaşılacağı üzere eklentisiz olan pikolo tüpünde sıcaklık değerleri düşük olduğundan donma olayları meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu bölgelere eklentiler konularak sıcaklık değerleri yükseltilip donma olayına yenilikçi bir yaklaşım yapılmıştır.



Şekil 13 Eklentisiz ve Eklentili pikolo tüpünün statik sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması

Eklentiler kanadın iç yüzeyine konulduğunda sıcaklık değerleri yaklaşık 10 K düzeyinde arttığı görülmektedir. Buna ek olarak ileride yapılacak çalışma deneysel olarak incelenebilir veya kanadın iç yüzeyindeki pikolo tüpünde bulunan nozul sayısı artırılabilir. Eklenen nozullar farklı açılarda konulabilir. 15-30-45-60-75-90°'lik konumlarda 2 farklı nozul daha eklenebilir ve kanadın donma olayı incelenebilir. En uygun olan açı bulunarak deneysel olarak çalışılabilir.

**Kaynaklar**

- El-Sayed, A. F. (2022). *Foreign object debris and damage in aviation*. CRC Press. Mattos, Bento,
- Fregeau, M., Gabr, M., Paraschivoiu, I., & Saeed, F. (2009). Simulation of heat transfer from hot-air jets impinging a three-dimensional concave surface. *Journal of Aircraft*, 46(2), 721-726.
- Fregeau, M., Saeed, F., & Paraschivoiu, I. (2005). Numerical heat transfer correlation for array of hot-air jets impinging on 3-dimensional concave surface. *Journal of Aircraft*, 42(3), 665-670.
- Guo, Z., Guo, X., Yang, Q., & Dong, W. (2022). Heat transfer characteristics of unexpanded jet impingement in piccolo hot air anti-icing chamber. *Applied Thermal Engineering*, 200, 117540.
- Liu H T, Hua J, et al. Three-dimensional integrated thermodynamic simulation for wing anti-icing system. *Journal of Aircraft*, Vol.41, No.6 pp1291-1297, 2004.
- Nagappan, N. M. (2013). Numerical modeling of anti-icing using an array of heated synthetic jets. Khalil, E. E., Said, E., AlSaheh, A., & ElHarriry, G. (2020). Effect of hot air jet arrangement from a piccolo tube in aircraft wing anti-icing system. In *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum* (p. 3952).
- Oliveira, Guilherme. Three-dimensional thermal coupled analysis of a wing slice slat with a piccolo tube. 18th Applied Aerodynamics Conference, pp 3921, 2000.
- Papadakis, M., Wong, S. H., Yeong, H. W., Wong, S. C., & Vu, G. T. (2007). Experimental investigation of a bleed air ice protection system. *SAE Transactions*, 643-663.
- Pazarlioğlu, H. K., Ekiciler, R., & Arslan, K. (2021). Numerical analysis of effect of impinging jet on cooling of solar air heater with longitudinal fins. *Heat Transfer Research*, 52(11).
- Saeed, F. (2008). Numerical simulation of surface heat transfer from an array of hot-air jets. *Journal of Aircraft*, 45(2), 700-714.
- Santos, L., Domingos, R., Maria, R., & Leal, M. (2008). Sensitivity analysis of a bleed air anti-ice thermal model to geometrical and operational parameters. In *46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 445).
- Wright, W. (2004, April). An evaluation of jet impingement heat transfer correlations for piccolo tube application. In *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (p. 62).
- Yang, B., Chang, S., Wu, H., Zhao, Y., & Leng, M. (2017). Experimental and numerical investigation of heat transfer in an array of impingement jets on a concave surface. *Applied Thermal Engineering*, 127, 473-483.
- Mohammadpour, J., Rajabi-Zargarabadi, M., Mujumdar, A. S., and Ahmadi, H., "Effect of intermittent and sinusoidal pulsed flows on impingement heat transfer from a concave surface", *International Journal Of Thermal Sciences*, 76: 118–127 (2014).
- Ravanji, A. and Zargarabadi, M. R., "Effects of elliptical pin-fins on heat transfer characteristics of a single impinging jet on a concave surface", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 152: 119532 (2020)
- Hadipour, A., Rajabi Zargarabadi, M., and Mohammadpour, J., "Effects of a triangular guide rib on flow and heat transfer in a turbulent jet impingement on an asymmetric concave surface", *Physics Of Fluids*, 32 (7): (2020).
- Craft, T. J., Iacovides, H., and Mostafa, N. A., "Modelling of three-dimensional jet array impingement and heat transfer on a concave surface", *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 29 (3): 687–702 (2008).