

## UÇUŞ SIRASINDA BUZLANMA ANALİZLERİNDE DAMLACIK YÖRÜNGELERİNİN PARALEL HESAPLAMA YÖNTEMİYLE BELİRLENMESİ

Mert TOKEL<sup>1</sup>  
AEROMS A.Ş., ANKARA

Serkan ÖZGEN<sup>2</sup>  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ANKARA

### ÖZET

*Bu makalede, uçak kanatlarındaki sayısal buzlanma hesaplamaları sırasında damlacık yörüngelerinin Lagrange yaklaşımı kullanılarak paralel hesaplama yöntemiyle belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma üç boyutlu geometriler için, uçuş ve meteorolojik veriler kullanılarak yapılmıştır. Kanat üzerindeki buzlanma analizleriyle kanat açıklığı boyunca kullanılan panel sayısının oluşan buz kütesine etkisi incelenmiştir. Paralel hesaplamaların, elde edilen analiz sonuçlarının hızına etkisi araştırılmıştır. Çalışma prosedürü, akış alanı, su damlacıklarının yörüngeleri, birikme etkinlikleri, ısı transfer katsayıları ve buzlanma hızı hesaplarının Genişletilmiş Messinger Modeli kullanılarak modellenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Su damlacıklarının yörünge hesaplamaları Lagrange yaklaşımı ile yapılmıştır. Tek işlemcili çözümler ve paralel çözümler karşılaştırılmış ve doğrusala yakın bir hız artışı elde edilmiştir. Uçak kanadı boyunca kullanılan panel sayısının artışı hesaplanan buz kütesinin artmasını sağlamış, ancak belirli panel sayısından sonra bu artış ihmal edilebilecek seviyelere düşmüştür. Analizler sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırılmış ve oluşan buz şekillerinin deney sonuçları ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.*

### GİRİŞ

Son yıllarda havacılıkta buzlanma nedeniyle uçak üreticilerine getirilen yaptırımlar, uçak tasarımı ve buzlanmayı önleyici/giderici sistemlerinin seçimi aşamasında buzlanma analizlerinin önemini arttırmıştır. Bu nedenle buzlanma alanında yapılan çalışmalara ilgi artmıştır. Araştırmacılar ve üreticiler bu alanda yapılan çalışmalarını hızlandırmış, var olan yöntemleri geliştirmeye yoğunlaşmıştır.

Uçuş sırasındaki buzlanmanın benzetiminin yapılması, herhangi bir buzlanma sırasında uçağın aerodinamik parametrelerindeki değişimini incelemek ve buzlanmayı önleyici/giderici sistem seçimi açılarından çok önemlidir. Ancak buzlanma bir çok farklı şekilde gerçekleşebilir. Olasılıkların tümünün değerlendirilebilmesi ve doğru çözüme erken ulaşmak için, analizlerden olabildiğince hızlı sonuç almak bir ihtiyaçtır. Bu nedenle günümüzün teknolojisinde kullanılan paralel hesaplama yöntemleri buzlanma benzetimi hesaplama araçları içinde kendine yer bulmuştur.

Buzlanma analizleri sırasında işlemci zamanını en çok kullanan kısım, özellikle Lagrange yaklaşımı kullanıldığında su damlacığı hareket yörüngesi hesaplarının yapıldığı kısımdır. Bu nedenle, bu hesapların paralel olarak yapılması ile özellikle üç boyutlu geometrilerin analizlerinde, tek işlemcili çözümlere göre çok daha hızlı sonuç alınması hedeflenmektedir. Üç boyutlu analizde, panel sayısına göre su damlacığı hareket yörüngelerinin değişeceğinden panel sayısının analiz değerlerine etkisi bu çalışmada incelenecektir. İdeal panel sayılarıyla analiz yapmanın, istenilen doğru sonuçlara en kısa sürede erişimde önemli etkisinin olacağı tahmin edilmektedir. Daha önceki

<sup>1</sup> Mühendis, E-posta: mtokel@aeroms.net

<sup>2</sup> Prof. Dr., Havacılık ve Uçak Müh. Böl.; Genel Müdür, AEROMS A.Ş., E-posta: sozgen@ae.metu.edu.tr

çalışmalar göz önünde tutularak, elde edilen analizlerdeki buz şekillerinin deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olacağı düşünülmektedir.

## YÖNTEM

AEROMS A.Ş. tarafından geliştirilen AEROMSICE yazılımı kullanılarak aşağıda belirtilen hesaplamalar gerçekleştirilmiştir:

- Akış alanı çözümü,
- Damlacık yörüngeleri ve damlacık birikme etkinliği hesapları,
- Konvektif ısı transferi katsayıları hesapları,
- Genişletilmiş Messinger yöntemi kullanılarak 2 boyutlu ve 3 boyutlu buz kalınlığı hesapları.

### Akış Alanı Çözümü

Hess-Smith Panel Metodu kullanılarak, akış alanı hızları ve kanat etrafındaki basınç dağılımı belirlenmektedir. Burada elde edilen akış alanı hızları damlacık yörüngelerinin hesaplanması ve konvektif ısı transferi katsayılarının hesaplanması amacıyla sınır tabaka çözümleri sırasında kullanılmaktadır.

### Damlacık Yörüngeleri ve Damlacık Birikme Etkinliği Hesapları

Matematik model kapsamında damlacık yörüngelerinin hesaplanması sırasında, damlacıkların küçük ve küresel yapıda oldukları, akış alanının damlacıkların varlığından etkilenmediği ve damlacıklara aerodinamik sürüklenme ve yerçekimi kuvveti dışında başka bir kuvvetin etki etmediği kabulleri yapılmıştır. Bu kabuller damlacık çapının 500 µm'den küçük olduğu durumlarda geçerlidir. Damlacıkların üç boyutlu hareket denklemleri aşağıda belirtilmiştir:

$$m\ddot{x}_p = -D\cos\gamma_1 \quad (1)$$

$$m\ddot{y}_p = -D\cos\gamma_2 \quad (2)$$

$$m\ddot{z}_p = -(D\cos\gamma_3 + mg) \quad (3)$$

$$\gamma_1 = \tan^{-1} \frac{\dot{x}_p - V_x}{V_{rel}}, \gamma_2 = \tan^{-1} \frac{\dot{y}_p - V_y}{V_{rel}}, \gamma_3 = \tan^{-1} \frac{\dot{z}_p - V_z}{V_{rel}} \quad (4)$$

$$V_{rel} = \sqrt{(\dot{x}_p - V_x)^2 + (\dot{y}_p - V_y)^2 + (\dot{z}_p - V_z)^2} \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{2} V_{rel}^2 C_D A_p \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $V_x$ ,  $V_y$  ve  $V_z$  damlacığın bulunduğu konumdaki akış alanı hız bileşenlerini,  $\dot{x}_p$ ,  $\dot{y}_p$ ,  $\dot{z}_p$  damlacığın hız vektörü bileşenlerini ve  $\ddot{x}_p$ ,  $\ddot{y}_p$ ,  $\ddot{z}_p$  damlacığın ivme vektörü bileşenlerini ifade etmektedir. Damlacıkların kesit alanını  $A_p$ , göreceli hızları  $V_{rel}$  ve damlacıkların sürüklenme katsayısı  $C_D$  ile gösterilmektedir. Damlacık sürüklenme katsayısı, damlacığın Reynolds sayısına bağlı olarak ampirik modellerle hesaplanmaktadır.

Damlacıkların kanat yüzeyine yapıştığı bölge, buzlanmanın gerçekleştiği bölgeyi belirlemektedir. Damlacık birikme etkinliği ( $\beta$ ), damlacık yörüngelerinin hesaplamalarının başlandığı ilk konumda sahip oldukları kesit alanının ( $\Delta y_0$ ), yüzeyde damlacıkların yapıştığı yüzey alanına ( $\Delta s$ ) oranı hesaplanarak elde edilir:

$$\beta = \frac{\Delta y_0}{\Delta s} \quad (7)$$

### Konvektif Isı Transferi Katsayıları Hesapları

Akış alanı ve damlacık yörüngelerinin hesaplamalarının tamamlanmasının ardından kanat açıklığı boyunca seçilen kanat profilleri için 2 boyutlu sınır tabaka analizleri ve buzlanma hesaplamaları yapılmaktadır. Sınır tabaka hesaplamalarında iki boyutlu İntegral Sınır Tabaka Denklemi çözülmekte ve ihtiyaç duyulan durumlarda ampirik bağıntılardan faydalanılmaktadır. Hesaplamalarda laminar- türbülanslı akış geçişi dikkate alınarak, akışın laminar veya türbülanslı olmasına bağlı olarak farklı eşitlikler kullanılmaktadır. Akışın laminar bölgesi için Thwaites, türbülanslı bölgesi için ise Head yöntemi kullanılmaktadır. Ayrıca, buzlanma sonucu oluşan yüzey pürüzlülükleri sınır tabaka hesaplamalarına dahil edilmektedir.

### Genişletilmiş Messinger Modeli Kullanılarak Buz Kalınlığı Hesapları

Buzlanma, camısı buz ve karşı buz olarak iki farklı şekilde modellenmektedir. Orijinal Messinger Modelinde iki buz tipi arasındaki geçiş bir anda olmasına rağmen, genişletilmiş Messinger Modelinde bu geçiş süreklilik arz edecek şekilde modellenmektedir. Karşı buzdan camısı buza geçiş, damlacık birikme etkinliği ve sıcaklık parametrelerine bağlı olarak buzun kalınlığı belli bir eşik değere ulaştığında gerçekleşir. Buz kalınlığı hesaplamaları camısı buz ve karşı buz için farklılık göstermektedir [Myers, 2001]. Karşı buz için cebirsel bir denklem elde edilip çözülmürken, camısı buz için birinci dereceden bir adi diferansiyel denklem çözülmelidir.

Genişletilmiş Messinger Modelinin kabulleri:

- Buz ve suyun fiziksel özellikleri sıcaklık ile değişmez. Buzun yoğunluğu, camısı ya da karşı buz olmasına bağlı olarak iki ayrı değeri alabilir,  $\rho_r$  ve  $\rho_g$ .
- Yüzey sıcaklığı ( $T_s$ ) sabit ve bilinen bir değerdir. Yüzeyin yüksek iletkenliğe ve buz oluşumundan daha fazla termal kütleyle sahip olduğu kabul edilmektedir.
- Damlacık sıcaklığı dış ortam sıcaklığına eşit olarak kabul edilmektedir.
- Faz değişimi tek bir sıcaklıkta ( $T_f$ ) gerçekleşir.

Buna göre, karşı buzlanma sırasında buz kalınlığının zamana göre değişimi denklem (8) ile ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{\rho_a \beta V_\infty}{\rho_r} \quad (8)$$

Bu denklemde buz kalınlığı  $B$ , zaman  $t$ , havanın yoğunluğu  $\rho_a$ , serbest akış hızı  $V_\infty$  ile gösterilmiştir.

Karşı buz ile camısı buz arasındaki geçişin meydana geleceği eşik buz kalınlığı ( $B_g$ ) ise denklem (9)'da gösterilmiştir:

$$B_g = \frac{k_i(T_f - T_s)}{\rho_a \beta V_\infty L_f + [(Q_a + Q_k) - (h_c + \rho_a \beta V_\infty c_{pw} + X_e \epsilon_0)(T_f - T_a)]} \quad (9)$$

Camsı buzlanma sırasında su tabakası kalınlığının ( $h$ ) herhangi bir  $t$  anında aldığı değer ise denklem (10)'da gösterilen şekilde ifade edilmektedir:

$$h = \frac{\rho_a \beta V_\infty}{\rho_w} (t - t_g) - \left( \frac{\rho_g}{\rho_w} \right) (B - B_g) \quad (10)$$

Son olarak, denklem (11) camısı buzlanma sırasında buz kalınlığının zamana göre değişimini ifade etmektedir.

$$\rho_g L_F \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right) = k_i \frac{T_f - T_s}{B} - k_w \left( \frac{(Q_a + Q_k) - (h_c + \rho_a \beta V_\infty c_{pw} + X_e \epsilon_0)(T_f - T_a)}{k_w + h(h_c + \rho_a \beta V_\infty c_{pw} + X_e \epsilon_0)} \right) \quad (11)$$

### Paralel Hızlanma Katsayısı

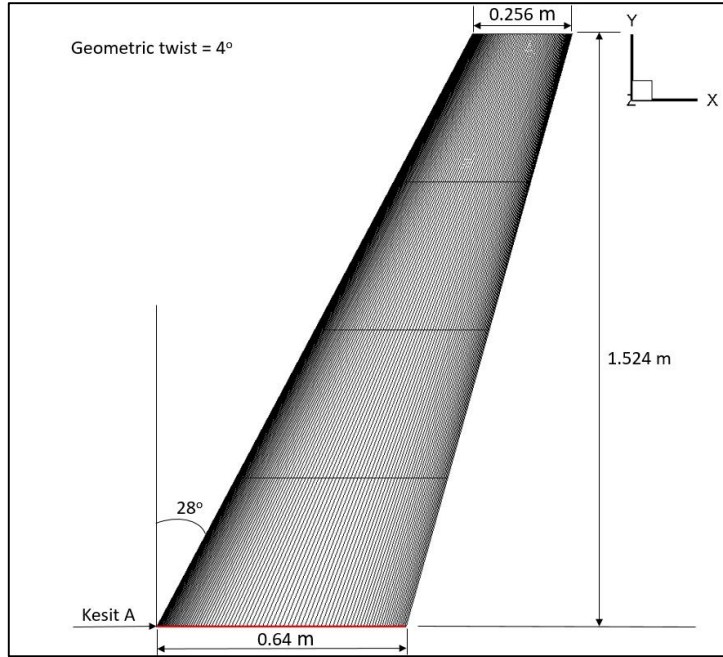
Hızlanma katsayısı ( $S$ ), kodun tek çekirdekli çalışma süresinin ( $T_s$ ), çok çekirdekli çalışma süresine ( $T_p$ ) oranına eşittir. Verim ( $E$ ) ise, hızlanma katsayısının işlemci sayısına ( $NP$ ) oranına eşittir.

$$S = T_s/T_p \quad (12)$$

$$E = \frac{S}{NP} * 100 \quad (13)$$

### UYGULAMALAR, SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Geliştirilen buzlanma hesaplama programının doğrulanması amacıyla [Papadakis, 2003] tarafından verilen üç boyutlu kanat geometrisi için deneysel buz şekilleri kullanılmıştır. Bahsi geçen deneysel çalışmada kullanılan geometri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bir yolcu uçağı kanadının ölçekli modeli olan bu geometride süpürme açısı 28 derece, kanat açıklığı 1.524 m, bükülme açısı ise 4 derece olarak belirtilmektedir. Kanat profili ise GLC-305'tir. Mevcut çalışmada, IRT-CS2, IRT-IS10 ve IRT-CS10 olmak üzere toplam üç test koşulu incelenmiştir. Bu koşulların uçuş ve meteorolojik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir.



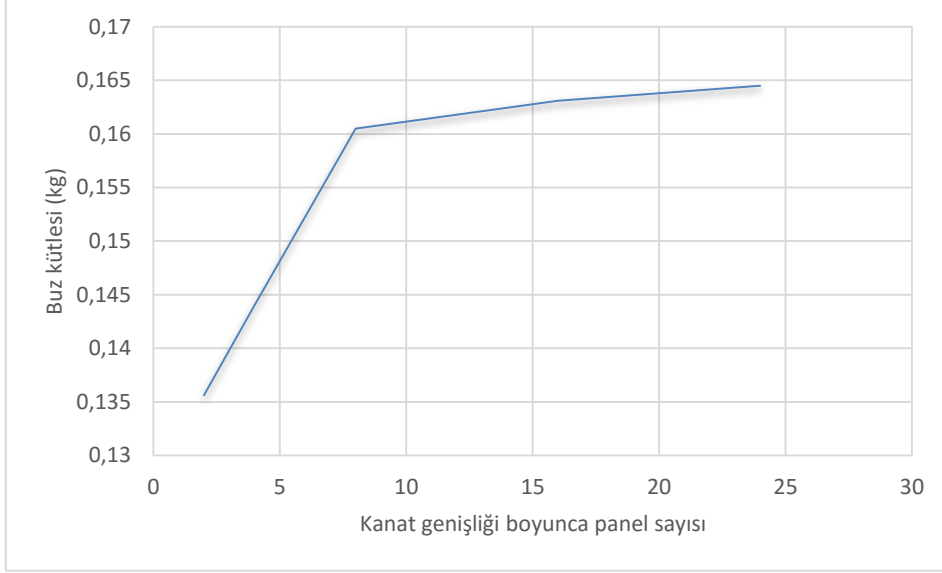
Şekil 1: Kanat geometrisi [Papadakis, 2003]

IRT-CS2 [Papadakis, 2003] için kullanılan parametreler Tablo 1'de gösterilmiştir:

Tablo 1: Çalışılan test koşulu parametreleri

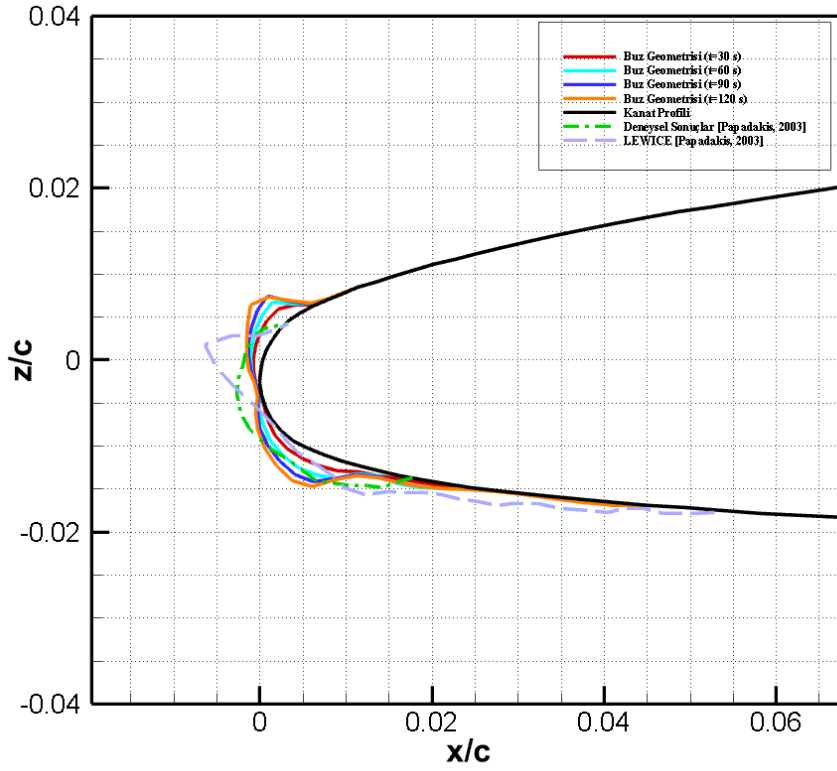
	IRT-CS2	IRT-IS10	IRT-CS10
$\alpha$ , Hücüm açısı (°)	4	4	4
$T_t$ , Toplam sıcaklık (°F)	25	25	25
$V_\infty$ , Serbest akış hızı (mph)	250	150	250
$\rho_a$ , sıvı su içeriği (g/m <sup>3</sup> )	0.68	0.65	0.68
$d_p$ , damlacık çapı (µm)	20	20	20
$t_{exp}$ , maruz kalma süresi (s)	120	600	600

IRT-CS2 için her hesaplamada kanat genişliği boyunca panel sayısı artırılmış ve Şekil 1'deki grafik elde edilmiştir. Düşük panel sayıları kullanıldığında, panel sayısını arttırmanın oluşan buz kütlelerine etkisi çok belirgindir ve panel sayısı arttıkça tahmin edilen buz kütlesi artmaktadır. Ancak yaklaşık 8 panelden sonra panel sayısındaki artışın buz kütlelerinde yarattığı değişim azalmaktadır. Bu noktadan sonra artan panel sayısı ile yapılan hesaplamalar sonucundaki buz kütlesi farkı, panel sayısını arttırmayla harcanan CPU zamanını haklı çıkarmayacaktır.

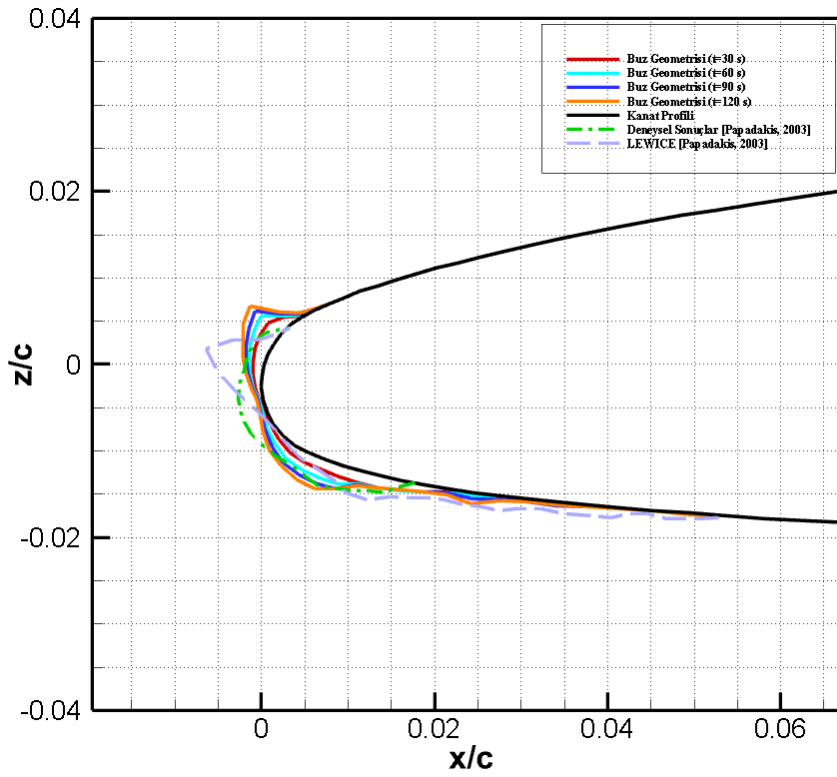


Şekil 2: IRT-CS2 için kanat genişliği boyunca kullanılan panel sayısının hesaplanan buz kütlelerine (kg) etkisi

Şekil 3'de açıklık boyunca 24'e bölünmüş kanadın ilk panelinin y eksenine dik kesitinde (Şekil 1 – Kesit A) orijinal geometri ve buzlanmış geometri gösterilmiştir. Şekil 4'te açıklık boyunca 4'e bölünmüş kanadın ilk panelinin y eksenine dik kesitinde orijinal geometri ve buzlanmış geometri gösterilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4 incelendiğinde oluşan buz geometrileri arasında farklılıklar gözlenmektedir. Panel sayısının azaltılması hesaplanan buz kütlelerinin azalmasına neden olmaktadır.



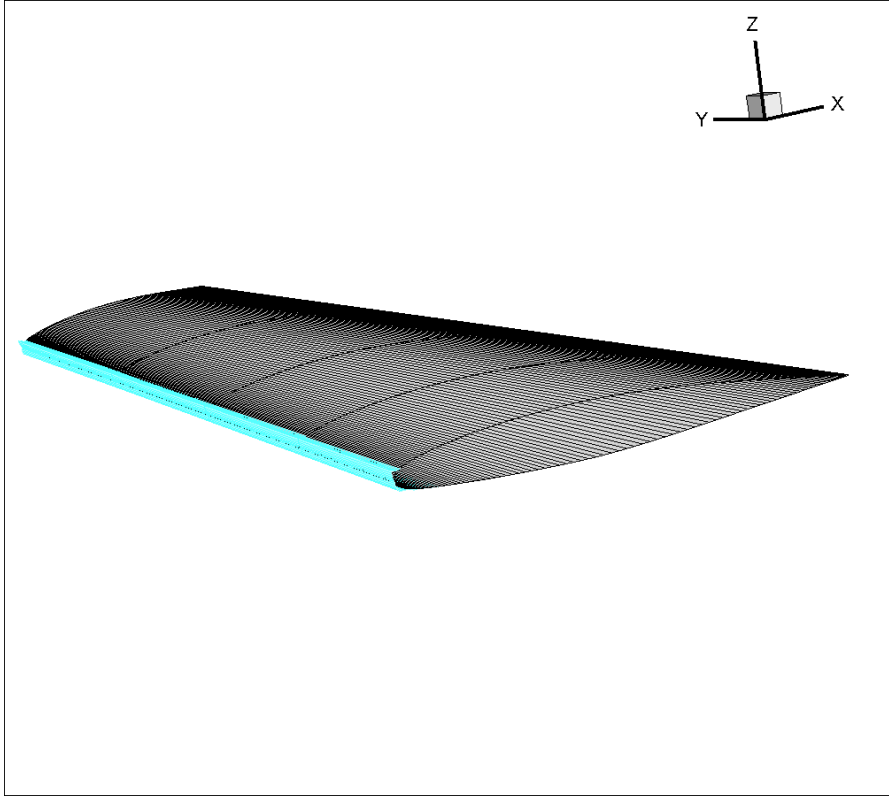
Şekil 3: IRT-CS2'de kanat açıklığı boyunca 24 panele bölünmüş orijinal kanat geometrisinin ve hesaplanan buzlanmış geometrinin ilk panelinin y eksenine dik kesiti



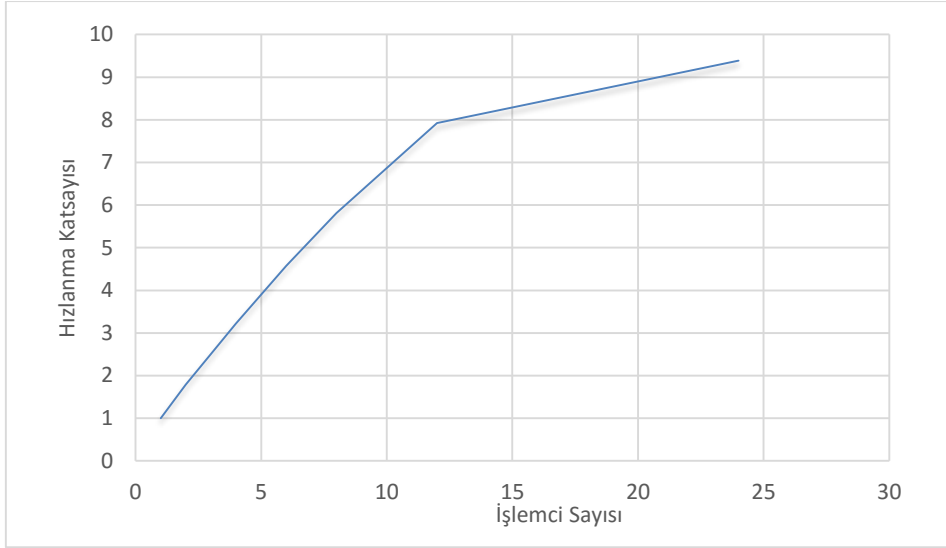
Şekil 4: IRT-CS2'de kanat açıklığı boyunca 4 panele bölünmüş orijinal kanat geometrisinin ve hesaplanan buzlanmış geometrinin ilk panelinin y eksenine dik kesiti

IRT-CS2 için kanat genişliği boyunca 4 panel sayısını sabit tutarak Şekil 1'de gösterilen geometride yapılan paralel hesaplamaların sonuçları Şekil 5'de gösterilmiştir. Şekil 4 ve 5'te gösterilen buz şekilleri üst yüzeydeki boynuzumsu şekil dolayısıyla camsı buz karakteristikleri taşımaktadır. Şekil 5'te oluşan buzun şeklinin ve karakteristiğinin kanat açıklığı boyunca büyük bir değişim göstermediği gözlenmektedir.

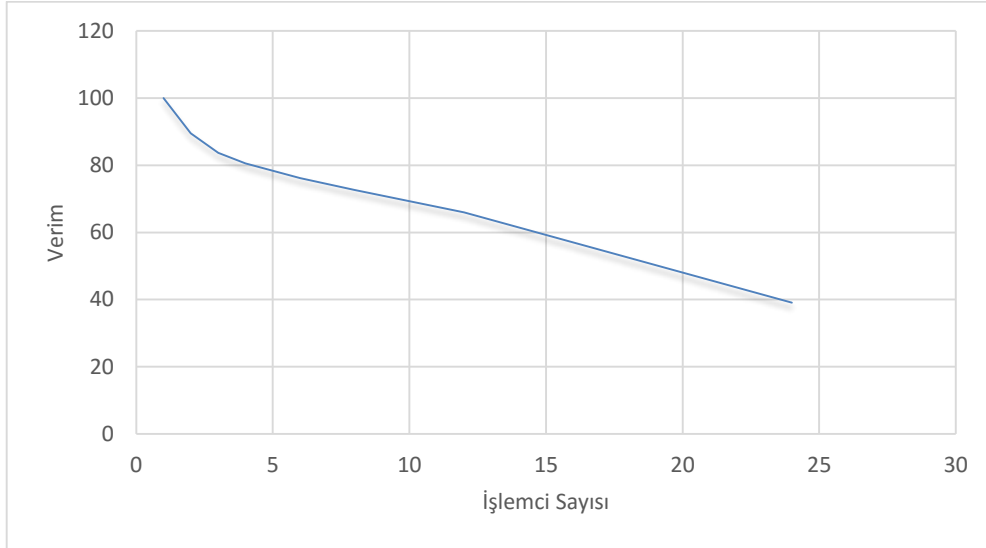
Şekil 6'da kullanılan işlemci sayısının programın çalışma hızına olan etkisi gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi hesaplama hızı belirli işlemci sayısına kadar önemli performans artışı sağlamış fakat ardından hız artışı azalmaya başlamıştır. Hız artışındaki azalmanın sebebi, işlemci sayısı artışıyla birlikte işlemciler arasında artan haberleşme süresinin artmasıdır. Yapılan çözümlerin işlemciler arasında iletilmesi, işlemci sayısının artmasıyla birlikte daha çok zaman alan bir süreç olmuştur. Daha da fazla işlemciyle çözüm aramaya çalışmak, bir noktadan sonra çözüm hızını azaltacaktır. Bu çıkarım Şekil 7'de verilen işlemci sayısına göre verimin değişimini gösteren grafik tarafından da doğrulanmaktadır. 12 işlemci kullanıldığında %70 civarında olan verim, 24 işlemci kullanıldığında %40'a kadar düşmektedir. Daha fazla yorum yapabilmek için farklı panel sayılarında aynı sayıda işlemciler kullanılarak hesaplamalar yapılmalıdır.



Şekil 5: IRT-CS2'de kanat açıklığı boyunca 4 panele bölünmüş orijinal kanat geometrisi ve hücum kenarı çevresinde oluşan buzlanmış geometri



Şekil 6: IRT-CS2'de kanat açıklığı boyunca 24 panel kullanılarak yapılan paralel hesaplamalar için kullanılan işlemci sayısının hızlanma katsayısına etkisi

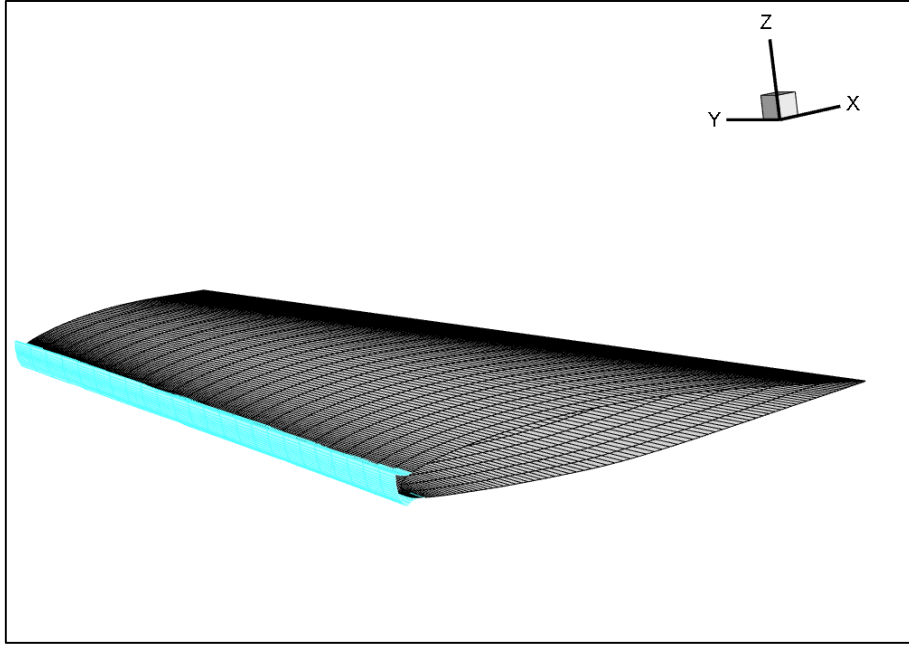


Şekil 7: IRT-CS2'de kanat açıklığı boyunca 24 panel kullanılarak yapılan paralel hesaplamalar için elde edilen verime etkisi

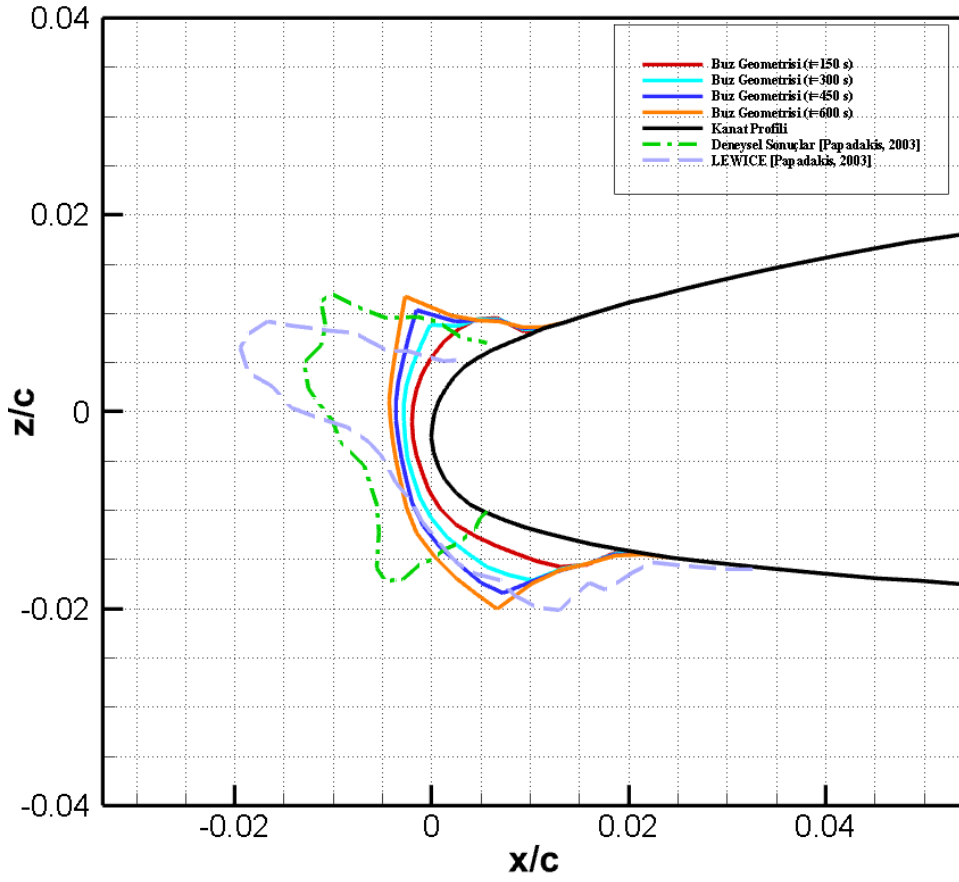
Yazılımın doğrulanması amacıyla yukarıda çalışılan maruz kalma süresi 2 dakika olan test koşuluna ek olarak maruz kalma süreleri 10 dakika olan iki koşul daha incelenmiştir. Bu koşulların özetleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu test koşulları için elde edilen buz şekilleri Şekil 8, 9, 10 ve 11'de sunulmuştur. Bu iki test koşulunda da, ilk test koşulunda olduğu gibi oluşan buz camsı buz özellikleri taşımaktadır. IRT-IS10 ve IRT-CS10 koşullarında kanadın üst yüzeyinde belirgin bir boynuzumsu şekil görülmektedir. Hatta IRT-IS10 koşulunda alt yüzeyde de benzer bir oluşum göze çarpmaktadır. Çalışılan her iki buzlanma koşulunda da oluşan buzun özelliklerinin kanat açıklığı boyunca belirgin bir değişim göstermediği görülmektedir.

Geliştirilen yazılım ile elde edilen sonuçlar maruz kalma süresinin düşük olduğu durumlarda deneysel buz şekilleriyle hayli uyumludur. Buzun şekli, buz kütlesi ve buzun kapladığı alan kabul edilebilir ölçüde doğru tahmin edilmektedir. Ancak, maruz kalma süresinin yüksek olduğu durumlarda bu uyumdan bahsetmek zordur. Camsı buz koşullarında oluşan buzun şeklini ve kütlesini tahmin etmek için en önemli kavramlardan birisi de yüzeye çarptığı anda donmayıp geriye doğru akan suyun doğru modellenmesi ve tahmin edilmesidir. Elde edilen sonuçlarla deneysel sonuçlar arasındaki uyumsuzluğun nedeninin büyük ölçüde bu olayın modellenmesindeki ve hesaplanmasındaki eksiklikler olduğu düşünülmektedir. Çalışmalar mevcut yazılımda bu yöndeki iyileştirmeleri, sadece sıvı fazlı değil katı fazlı bulutlarda da buzlanma analizi yapılabilmesine olanak sağlayacak şekilde mevcut yazılımın yükseltilmesi konularına odaklanmış durumdadır.

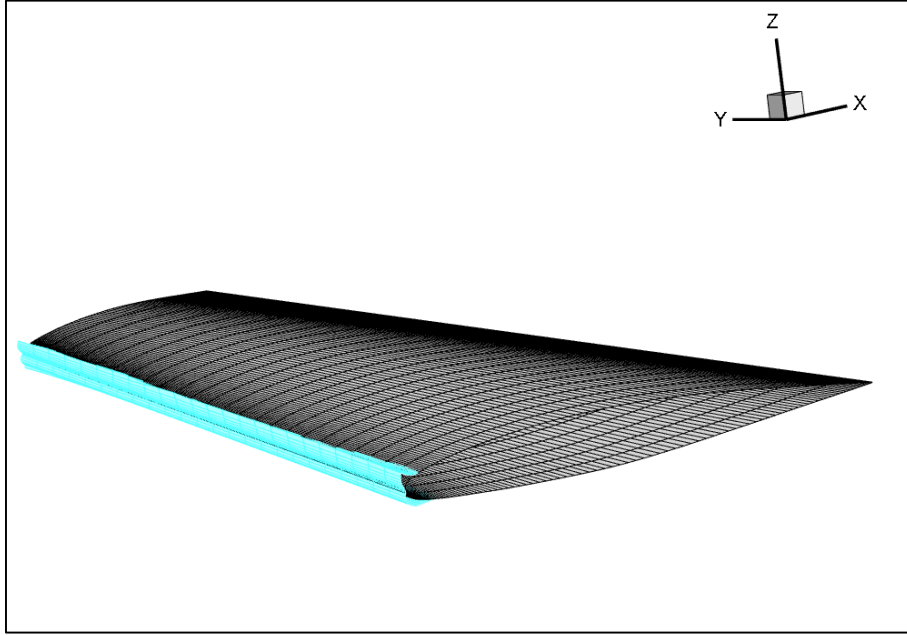




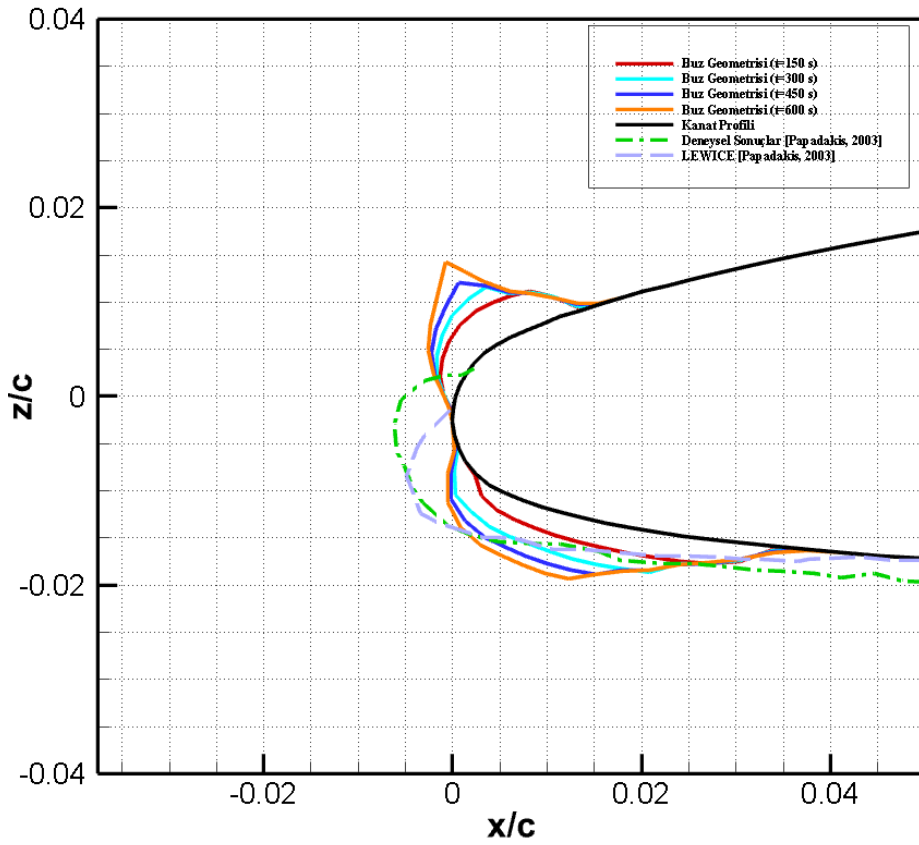
Şekil 8: IRT-IS10'de kanat açıklığı boyunca 24 panele bölünmüş orijinal kanat geometrisi ve hücum kenarı çevresinde oluşan buzlanmış geometri



Şekil 9: IRT-IS10'da kanat açıklığı boyunca 24 panele bölünmüş orijinal kanat geometrisinin ve hesaplanan buzlanmış geometrinin ilk panelinin y eksenine dik kesiti



Şekil 10: IRT-CS10'de kanat açıklığı boyunca 24 panele bölünmüş orijinal kanat geometrisi ve hücum kenarı çevresinde oluşan buzlanmış geometri



Şekil 11: IRT-CS10'de kanat açıklığı boyunca 24 panele bölünmüş orijinal kanat geometrisinin ve hesaplanan buzlanmış geometrinin ilk panelinin y eksenine dik kesiti

## SONUÇ

Mevcut çalışmada kanat açıklığı boyunca kullanılan kanat kesit sayısının buzlanma hesaplarına etkisi incelenmiş ve bu etkinin, belli bir kesit sayısına kadar, oluşan buz kütlesine önemli bir etkisinin olduğu gösterilmiştir. Kanat boyutlarına göre değişkenlik gösterebilecek olan optimum kanat kesit sayısına ulaşıldıktan sonra kanat kesit sayısının artırılması, buzlanma hesaplarında elde edilen buz kütlesinde belirgin bir değişim göstermemiştir ve harcanan CPU zamanını önemli şekilde arttırmıştır. Kanat kesit sayısı arttıkça damlacık yörüngesi hesapları için harcanan zaman CPU zamanının büyük bir kısmını kaplamaktadır. Bunun nedeni, damlacık yörüngesi hesaplarının 3 boyutlu denklemlerin çözümünü gerektirmesi ve kesit sayısı arttıkça yörünge sayısının artmasıdır. Bu nedenle paralel çözüm yöntemlerine başvurmak gerekmiştir. Paralel olarak yapılan hesaplamalarda, optimum işlemci sayısına kadar önemli derece hızlanma görülmüştür. İşlemci sayısındaki artışın hızlanmaya etkisi azalarak artış göstermiştir. Donanımsal olarak çalışmaların yapılabileceği maksimum işlemci sayısına kadar yapılan analizlerden elde edilen sonuçlarda, işlemci sayısının artışının paralel hesaplamalar için gerekli olan haberleşme zamanının harcanan CPU zamanının önemli bir kısmını kapsadığı ve hesaplamaları yavaşlattığı tespit edilmiştir. İşlemci sayısının daha da artırılması durumunda, CPU zamanındaki hızlanmanın CPU zamanında azalmaya dönüşeceği öngörülmektedir. Bu nedenle test durumları göz önünde bulundurularak, en uygun işlemci sayısı ve kanat kesit sayılarıyla analizler yapmak deney sonuçlarına yakın sonuçların kabul edilebilir düzeyde elde edilmesini sağlayacaktır.

### Kaynaklar

- Myers, T.G., 2001. *Extension to the Messinger Model for Aircraft Icing*, AIAA JOURNAL, Vol. 39, No. 2
- Papadakis, M., Yeong, H.-W. And Wong, S.-C., *Aerodynamic performance of a swept wing with ice accretions*, AIAA Paper 2003-0731, 2003.
- Özgen, S., Canıbek, M., Tarhan, E., Ceyhan, Ö., 2002. *Sayısal Buzlanma Analizleri ve Buzlanma Sertifikasyonu*, SAVTEK - SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ KONGRESİ
- Özgen, S., Canıbek, M., Tarhan, E., Ceyhan, Ö., 2011. *3-D In-Flight Icing Simulations and Use of Parallel Computing in Lagrangian Droplet Trajectory Calculations*, 6. ANKARA INTERNATIONAL AEROSPACE CONFERENCE, AIAC-2011-126
- Yırtıcı, Ö., Özgen, S., Tuncer, İ.H., 2014. *NACA 0012 Kanat Profilinde Buz Birikimi Tahmini ve Performans Analizi*, V. ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI, UHUK-2014-095