

## NACA 0012 KANAT PROFİLİNDE BUZ BİRİKİMİ TAHMİNİ VE PERFORMANS ANALİZİ

Özcan YIRTICI\*, Serkan ÖZGEN† ve İsmail H. TUNCER‡  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, ANKARA

### ÖZET

*Bu çalışmada kanat profilleri için buz birikim şekil tahmini yapabilen bir buzlanma yazılımı XFOIL panel kodu ile birleştirilerek buzlanmış kanat profillerinin aerodinamik yük katsayılarının hesaplanması sağlanmış ve oluşan performans kayıpları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan buzlanma algoritması, farklı hava koşulları altında kanat profilinde meydana gelen karsı ve camısı buz şekillerini başarılı bir şekilde öngörmektedir. Sayısal hesaplamalar sonrasında buzlanmış kanat profilinde gözlenen sürüklenme katsayısındaki artış ile kaldırma katsayısındaki azalış buzlanmanın istenmeyen etkileri olup, başlangıçtaki kanat profilinin aerodinamik performansını azaltmaktadır. Çalışma sonunda, bu performans kayıplarının buzlanma türüne bağlı olduğu ve camısı tipi buzlanma için tahmin edilen performans düşüşünün, karsı tipi buzlanma türü için tahmin edilenden daha fazla olduğu görülmüştür.*

### GİRİŞ

Bulut içerisinde sıvı fazda bulunan suyun hava aracı yüzeyine çarparak katılaşmasına buzlanma denir. Buzlanma uçakların gövde, kanat, kuyruk, burun gibi bileşenleri üzerinde hava akışına doğrudan maruz kalan dış yüzeylerde gerçekleşebilir. Bu yüzeylerde oluşan buz tabakaları uçuş performanslarını olumsuz etkilemekte hatta uçuş güvenliğini tehlikeye atıp kazalara neden olabilmektedir [Pretty, 2000]. Özellikle kanatlarda oluşan buzlanma kanat profilinin aerodinamik karakteristiğini değiştirmekte ve böylece akışı bozarak sürüklenme kuvvetini arttırmakta, kaldırma kuvvetini azaltmaktadır. Bunun yanında buzlanmanın uçağa ek ağırlık getirme, motorun stop etmesi, kumanda karakteristiklerinin bozulması ve iniş takımlarının çalışmaması gibi daha birçok istenmeyen etkileri vardır.

Buzlanma, donma sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bulunan soğumuş su damlalarının boyutuna, miktarına ve dağılımına, dış ortamın sıcaklığı ile nem oranının durumuna göre farklılık göstermektedir. Karsı buzlanma (rime ice), camısı buzlanma (glaze ice) ve karışık tip olmak üzere

\*Araştırma görevlisi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: oyirtici@ae.metu.edu.tr

†Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: sozgen@ae.metu.edu.tr

‡Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Müh. Böl., E-posta: tuncer@ae.metu.edu.tr

üç farklı buzlanma türü vardır. Karşı buzlanma genelde  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  derecenin altında su damlacıklarının hücum kenarına çarpıp anında donmalarıyla oluşan buzlanma türüdür.

Buzun görünümü mat ve oldukça kabadır ayrıca da kolayca ayrışır. Şekli genelde yüzeyin şekli ile uyumlu görünümündedir. Camsı buzlanma  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ile  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  derece arasında soğumuş su damlacıklarının yüzeye çarpıp tamamen donma olmadan çevreye yayılması ve yüzeyin şeklini de alarak yavaş yavaş donmasıyla oluşan buzlanmadır.

Camsı buz şeffaf bir görüntüye sahip olup karşı buza göre çok daha serttir, yüzeye güçlü bir şekilde yapışır, düzgün olmayan şekiller içerir ve kaldırılması oldukça zordur. Son olarak karışık tip buzlanma bu iki türün bir arada olduğu buzlanma çeşididir.



Şekil 1: Camsı buzlanma (sol) ve karşı buzlanma (sağ) [LLC, 2014]

Buzlanmış hava taşıtlarının kaza yapma olasılıkları fazla olduğundan buzlanmanın aerodinamik etkilerini incelemek için deneysel çalışmalardan ziyade sayısal çalışmalar tercih edilmektedir. Buz birikimi tahmini için kullanılan sayısal hesaplamalar dış akışın çözümlenmesini, su taneciklerinin yörüngelerinin bulunmasını ve termodinamik analizi gerektirmektedir. Akış çözümlenmesi için RANS, LES gibi yöntemler de kullanılmasına rağmen daha çok panel metodu ile eşleştirilmiş sınır tabakası denklemleri kısa sürede çözüm vermesinden dolayı tercih edilmektedir. Buzlanma ise genişletilmiş Messinger modeli (extended Messinger model) yardımıyla tahmin edilir [Myers, 2001]. Literatürde buzlanma şekli tahmininde kullanılan ve yaygın olarak kullanılan yazılımların bazıları LEWICE, TRAJICE ve ONERA olup, ortak bir çalışmada bu yazılımlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır [Wright, 1997]. Kind ve arkadaşları [Kind, 1998] literatürdeki buzlanma ile ilgili deneysel ve sayısal çalışmaları özetleyen bir çalışma yapmıştır.

Özgen ve Canıbek[Özgen, 2008, 2010] genişletilmiş Messinger modeli ile tek ve çok elemanlı kanat profilleri üzerinde başarılı bir şekilde buz birikim tahmini yapabilen bir yazılım geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, verilen hava koşulları altında karşı ve camsı buzlanmayı doğru bir şekilde tahmin edebilen bu buzlanma tahmin yazılımı XFOIL ile birleştirilmiştir. Buzlanma yazılımı ile elde edilen buzlanmış kanat profili üzerindeki vizkoziteli akış alanı XFOIL ile çözülerek buzlu kanadın kaldırma katsayısı ( $C_L$ ), sürüklenme katsayısı ( $C_D$ ), moment katsayısı ( $C_M$ ) hesaplanmıştır. Daha sonra bu aerodinamik yükler temiz ve buzlanmış NACA 0012 kanat profilleri için karşılaştırılarak performans kayıpları incelenmiştir.

## YÖNTEM

Bu çalışmada daha öne geliştirilen buzlanma tahmin yazılımının açık kaynak kodlu XFOIL panel yazılımı ile birlikte çalışması sağlanmıştır.

Buzlanma tahmin yöntemi verilen başlangıç kanat profili ve hava koşulları altında su taneciklerinin yörüngelerini Lagrangian bir yaklaşım ile hesaplamakta ve konvektif ısı transferi katsayıları için

integral sınır tabakası denklemlerini kullanmaktadır. Buzlanmış kanat profilini tahmin etmek için ise genişletilmiş Messinger modeli uygulanır. Bu model standart faz değişim yöntemine dayanır. Faz değişim problemi; buz ve su tabakalarının enerji denklemleri, kütle korunumu denklemi ve buz/su arayüzündeki faz değişim koşulu olmak üzere dört denklem ile belirlenir [Myers, 2001]. Program, verilen hava şartlarına bağlı olarak karsı ve camısı buz birikim tahmini yapabilmektedir, ayrıca su taneciklerinin kanat yüzeyine çarptıktan sonra bunların kopma ve sıçramadan kaynaklı etkilerinin de hesaba katabilmektedir. Bu modül ile ilgili daha ayrıntılı bilgi [Özgen, 2008, 2010] referanslarında bulunabilir.

Toplam buzlanma zamanına erişilip son buzlanmış kanat profili elde edildikten sonra, bu buzlanmış kanat profili üzerinde oluşan aerodinamik yükler XFOIL panel kodu [Drela, 1980] ile hesaplanmıştır. XFOIL yazılımı, panel tabanlı ve sınır tabaka denklemleri ile etkileşimli olarak vizkositeli akış alanlarını ve aerodinamik yükleri hesaplayabilen bir dizayn ve analiz aracı olup, kanat üzerindeki akışın toptan ayrılmadığı düşük hücum açılarında oldukça başarılı sonuçlar vermektedir. XFOIL açık kaynaklı bir yazılım olup 1986 yılında Mark Drela tarafından geliştirilmiş, yıllar içerisinde çeşitli modifikasyon ve düzeltmelere uğramıştır. Bu çalışmada en son sürüm olan XFOIL-6.99 kullanılmıştır.

## SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, ilk olarak buzlanma şekil tahmini yapan buzlanma modülünün doğrulanmasından sonra karsı ve camısı tipi buzlanma için buzlanmış kanat profili şeklinin tahmini ve buna bağlı olarak gerçekleşen aerodinamik performans kayıpları incelenmiştir.

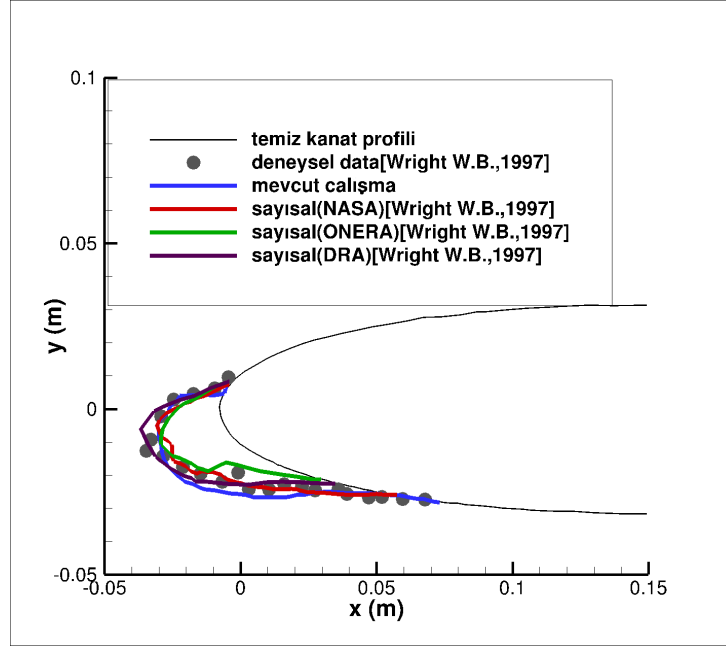
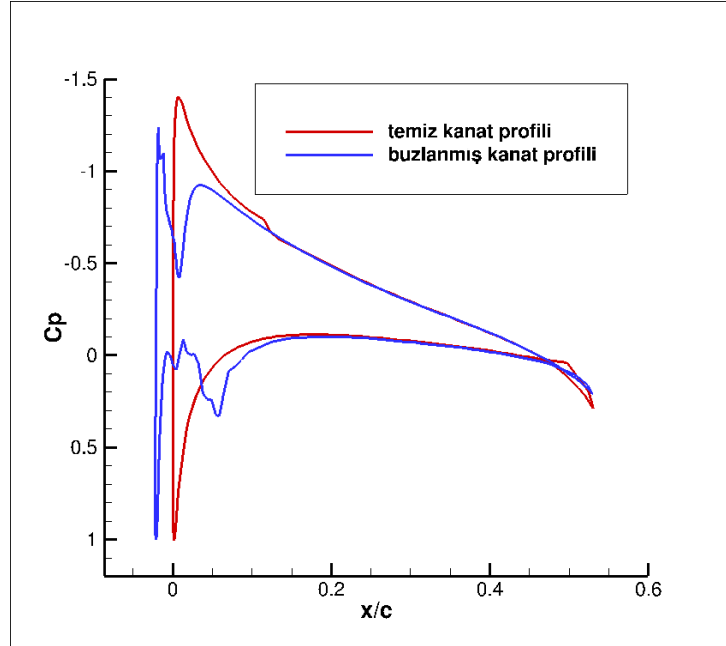
### Doğrulama Çalışması

DRA [Wright, 1997] raporunda bulunan NACA 0012 kanat profili için buzlanma şekil tahmini (27 nolu durum) geliştirilen yöntemin doğrulanması için kullanılacaktır. Bu durum için hava koşulları Tablo 1' de verilmektedir.

Tablo 1: Akış koşulları.

Değişken	27 nolu durum
Ortam sıcaklığı, $T_a$	-27.8 °C
Serbest akış hızı, $V_\infty$	58.1 m/s
Profil veter uzunluğu, $c$	0.53 m
Sıvı su içeriği, $\rho_a$	1.3 g/m <sup>3</sup>
Damlacık çapı, $d_p$	20 $\mu$ m
Toplam buzlanma zamanı, $t_{exp}$	480 s
Çevre basıncı, $p_\infty$	95610 Pa
Hücum açısı, $\alpha$	4.0°
Nemlilik	100 %

Bu çalışmada kullanılan buzlanma yazılımı Şekil 2' de görüldüğü gibi kanat profilinin hücum kenarında oluşan buz formasyonunu başarılı bir şekilde tahmin etmektedir. Temiz ve buzlanmış kanat profili üzerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 3'de, ve bu profiller üzerinde XFOIL ile hesaplanan aerodinamik yükler ise Tablo 2 de karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi buzlanma sonrasında sürüklenme katsayısında iki kattan fazla bir artış ve kaldırma katsayısında ise az bir düşüş gözlenmiştir.

Şekil 2: Buz formasyonu ( 27 nolu durum ) ( $T_a = -27.8 \text{ }^\circ\text{C}$ )Şekil 3: Basınç katsayısı dağılımı ( 27 nolu durum ) ( $T_a = -27.8 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Tablo 2: Aerodinamik yükler.

	$C_L$	$C_D$	$C_M$
<b>Temiz kanat profili</b>	0.2163	0.00356	0.0287
<b>Buzlanmış kanat profili</b>	0.2150	0.00930	0.0271

### Karsı Tipi Buzlanma Uygulaması

Bu uygulamada, karşı tip buzlanma koşulları altında NACA 0012 kanat profili için buzlanmış kanat profili tahmini yapılmıştır. Karşı tip buzlanma için kullanılan hava koşulları Tablo 3' te verilmiştir. Elde edilen buzlanmış kanat şekli, Silveira ve arkadaşlarının [da Silveira , 2004] çalışmasından alınan deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 4' te görüldüğü gibi sayısal olarak hesaplanan buzlanmış kanat profilleri deneysel veri ile uyum göstermektedir.

Tablo 3: Karşı tipi buzlanma için akış koşulları.

Değişken	
Ortam sıcaklığı, $T_a$	-30.5 °C
Serbest akış hızı, $V_\infty$	93.8 m/s
Profil veter uzunluğu ,c	0.5334 m
Sıvı su içeriği, $\rho_a$	1.05 $g/m^3$
Damlacık çapı, $d_p$	20 $\mu m$
Toplam buzlanma zamanı, $t_{exp}$	372 s
Çevre basıncı, $p_\infty$	92060 Pa
Hücum açısı, $\alpha$	4.0°
Nemlilik	100 %

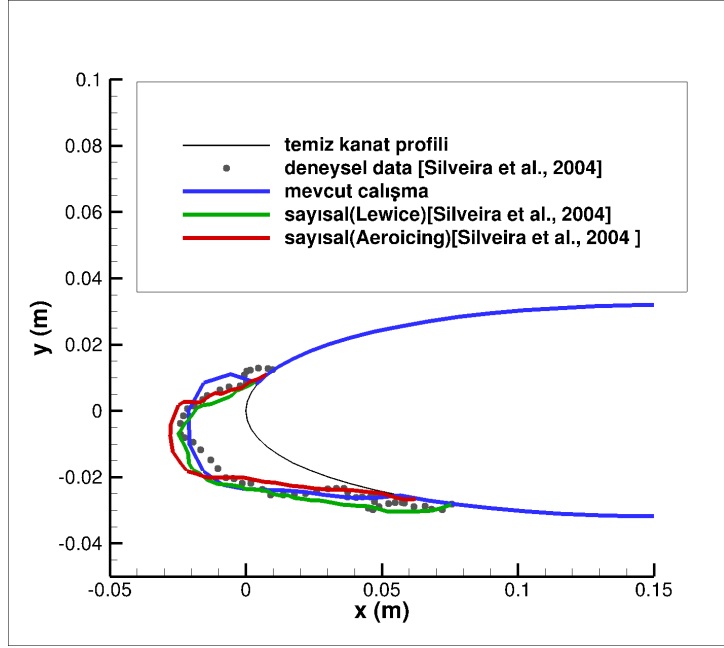
Şekil 5'te temiz ve buzlanmış NACA 0012 kanat profili için basınç katsayısı dağılımı verilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi özellikle hücum kenarında buzlanmadan kaynaklı basınç dalgalanmaları oluşmaktadır. Bu basınç dalgalanmaları sürüklenme katsayısında belirgin bir artışa neden olmaktadır. Aerodinamik yükler Tablo 4' te verilmektedir. Tablo 4'de bakıldığında buzlanmış kanat profili için kaldırma katsayısında az da olsa bir artışın gerçekleştiği görülmektedir. Bunun nedeni hücum kenarında oluşan buz şeklinin kanat için bir hücum kenarı flap etkisi yaratmış olmasıdır. İlk bakışta kaldırma katsayısındaki artış olumlu gözüksede sürüklenme katsayısını daha fazla arttırdığı için karşı tipi buzlanmada performans olumsuz bir şekilde etkilenir. Moment katsayısında ise belirgin bir değişim gözlenmemiştir.

### Camsı Tipi Buzlanma Uygulaması

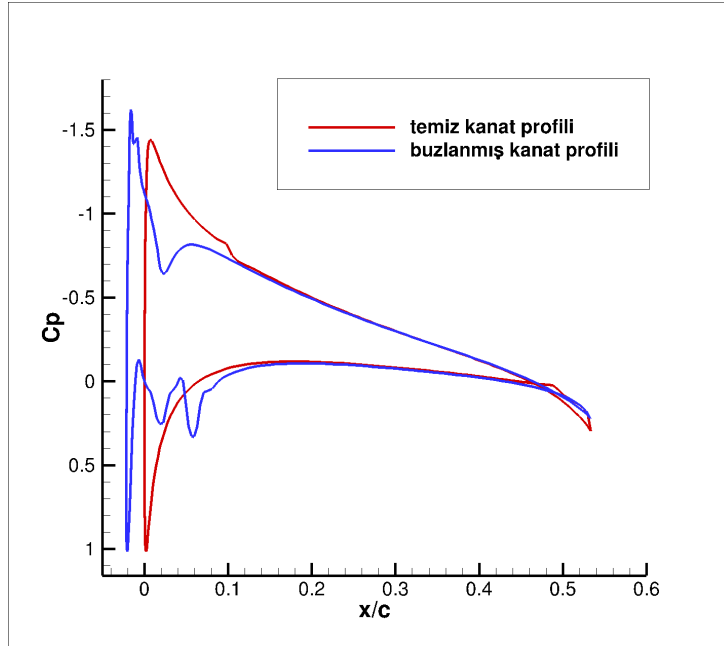
Bu uygulamada, camsı tip buzlanma koşulları altında NACA 0012 kanat profili için buzlanmış kanat profili tahmini yapılmıştır. Camsı tip buzlanma için kullanılan hava koşulları Tablo 5' te verilmiştir. Elde edilen buzlanmış kanat şekli, Silveira ve arkadaşlarının [da Silveira , 2004] çalışmasından alınan deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Şekil 6' ta görüldüğü gibi sayısal olarak hesaplanan buzlanmış kanat profilleri deneysel veri ile uyum göstermektedir. Bu çalışmada üst kenarda oluşan

Tablo 5: Camsı tipi buzlanma için akış koşulları.

Değişken	
Ortam sıcaklığı, $T_a$	-6.7 °C
Serbest akış hızı, $V_\infty$	58.1 m/s
Profil veter uzunluğu ,c	0.5334 m
Sıvı su içeriği, $\rho_a$	1.3 $g/m^3$
Damlacık çapı, $d_p$	20 $\mu m$
Toplam buzlanma zamanı, $t_{exp}$	480 s
Çevre basıncı, $p_\infty$	95610 Pa
Hücum açısı, $\alpha$	4.0°
Nemlilik	100 %



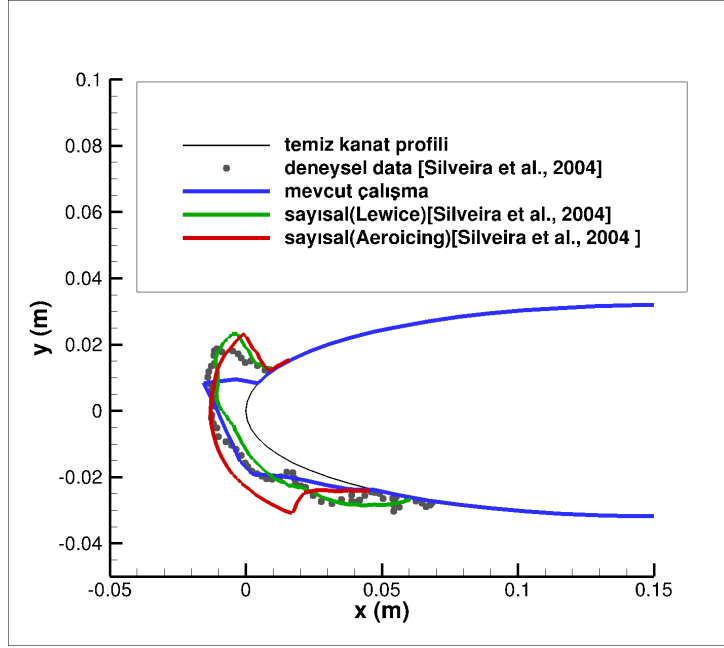
Şekil 4: Buzlanma formasyonu ( Karsı tipi buzlanma ) ( $T_a = -30.5 \text{ }^\circ\text{C}$ )



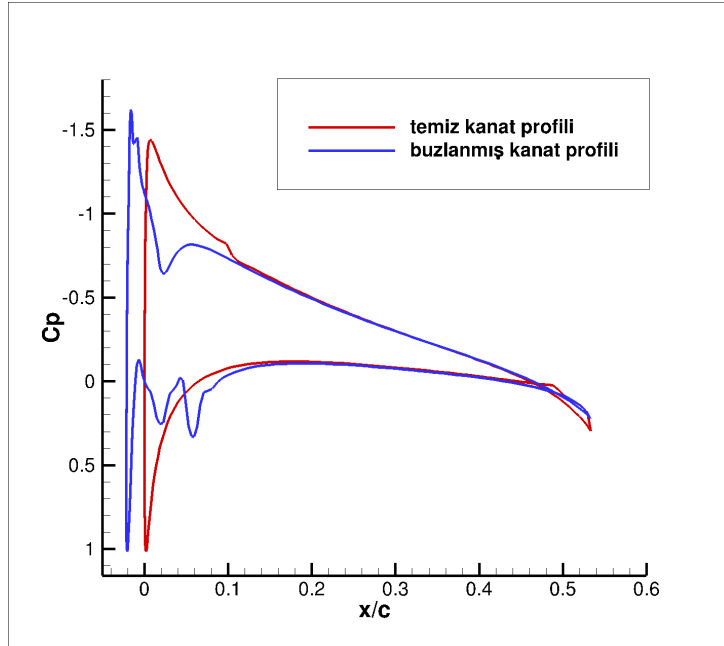
Şekil 5: Basınç katsayısı dağılımı ( Karsı tipi buzlanma ) ( $T_a = -30.5 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Tablo 4: Karsı tipi buzlanma için Aerodinamik yükler.

	$C_L$	$C_D$	$C_M$
<b>Temiz kanat profili</b>	0.2206	0.00349	0.0296
<b>Buzlanmış kanat profili</b>	0.2244	0.01070	0.0294



Şekil 6: Buzlanma formasyonu ( Camsı tipi buzlanma ) ( $T_a = -6.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ )



Şekil 7: Basınç katsayısı dağılımı ( Camsı tipi buzlanma ) ( $T_a = -6.7 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

Tablo 6: Camsı tipi buzlanma için Aerodinamik yükler.

	$C_L$	$C_D$	$C_M$
<b>Temiz kanat profili</b>	0.2214	0.00378	0.0288
<b>Buzlanmış kanat profili</b>	0.2168	0.01675	0.0315

buz boynuzu diğer sayısal çalışmalara göre daha küçük olarak tahmin edilmiştir. Bu uyumsuzluk Silveira ve arkadaşlarının [da Silveira , 2004] çalışmasında camsı tip buzlanma birikimi modellenmesi sırasında yüzeye çarpan su taneciklerinin sıçrama, ayrılma etkilerinin dikkate alınıp alınmadığı ve toplam buzlanma zamanına kaç adımda yaklaşıldığı konularındaki belirsizliklerle açıklanabilir.

Tablo 6'da camsı tipi buzlanma için aerodinamik yüklerin değerleri verilmiştir. Beklenildiği gibi sürüklenme katsayısında artış ve kaldırma katsayısında azalış gözlenmiştir. Moment katsayısında belirgin bir değişim olmamıştır. Kanat profilinde ki değişim, sürüklenme katsayısında dört katından fazla bir artışa neden olmuş ve bu artış aerodinamik performans kayıplarının ana unsurunu oluşturmuştur.

## SONSÖZ

Bu çalışmada, panel tabanlı XFOIL akış çözücüsü buz birikim tahmini yapabilen bir yazılımla birlikte başarılı bir şekilde çalıştırılarak aynı akış koşulları için temiz ve buzlanmış kanat profilleri üzerinde oluşan vizkositeli akış alanları hesaplanmış ve aerodinamik performans kayıpları incelenmiştir. Bu amaçla farklı buzlanma koşulları altında NACA 0012 kanat profili için, karsı ve camsı tipi buzlanmaya uğrayarak deforme olmuş kanat profilleri tahmin edilmiş ve aerodinamik yükler XFOIL yardımıyla hesaplanmıştır. Sonuçta her iki buzlanma türünün sürüklenme kuvvetini artırarak aerodinamik performansı azalttığı ama camsı tipi buzlanmanın performansı daha fazla düşürdüğü görülmüştür.

## Kaynaklar

High Performance Aviation, LLC internet sitesi, 2014.

<http://www.flyhpa.com/2013/01/identifying-and-avoiding-ice/>, siteyi son ziyaret 11.03.2014 tarihinde yapıldı.

XFOIL resmi internet sitesi, 2014. <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>, siteyi son ziyaret 05.08.2014 tarihinde yapıldı.

Kind R.J., Potapczuk, M.G., Feo, A, Golia, C. and Shah, A.D., 1998, *Experimental and Computational Simulation of in-flight Icing Phenomena*, Progress in Aerospace Sciences vol. 34. pp 257-345

Myers Tim G., 2001. *Extension to the Messinger Model for Aircraft Icing*, AIAA Journal, Vol. 39, No.2

Özgen S., Canıbek M.,2008, *Ice Accretion Simulation on Multi-Element Airfoils using Extended Messinger Model* , Heat Mass Transfer, Volume 45, Issue 3, pp 305-322

Özgen S., Canıbek M., 2010 *In Flight Icing Simulation with Supercooled Large Droplet Effects* , 7<sup>th</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Antalya, Turkey

Pretty K.R., Floyd C.D.J., 2000. *A Statiscal Review of Aviation Airframe Icing Accidents in the U.S.*, National Transportation Safety Board, Washington, DC 20594

da Silveira Rafael A., Maliska Clovis A., Estivam Diego A. *Aircraft Icing Simulation using Navier-Stokes and Potential Flow Simulation for the External Aerodynamics* , Proceedings of the 10<sup>th</sup> Brazilian Congress of the Thermal Sciences and Engineering, Rio de Janerio, Brazil.

Wright WB, Gent RW, Guffond D., 1997. *Part II. Prediction of Airfoil Ice Accretion*, DRA/NASA/ONERA Collaboration on icing research, NASA CR-202349