Farklı Atak Açılarında NACA 0012 Kanat Profili Üzerindeki Buzlanmanın İncelenmesi

Artunç OĞUZATA [1,2*], Duygu İPCİ[3]

[1] *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 06500, Türkiye*
[2] *TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., Ankara, 06980, Türkiye*
[3] *Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Ankara, 06500, Türkiye*

Özet

Uçaklarda buzlanma, uçuş performansını ve güvenilirliğini tehdit eden en önemli faktörlerden biridir. Atmosferde, sıfır derecenin altında farklı sıcaklıklarda ve boyutlarda su damlacıkları bulunur ve bu damlacıklar uçak yüzeyinde farklı şekillerde ve yoğunluklarda buzlanmaya yol açar. Buzlanma sonucunda artan sürüklenme kuvveti ve azalan kaldırma kuvveti, uçağın performansını olumsuz etkiler ve yakıt tüketiminin artmasına neden olur. Aynı zamanda uçak kontrol yüzeylerinde oluşan buzlanma, uçuş güvenliği için risk oluşturur. Bu çalışmada iki boyutlu NACA 0012 kanat profili üzerindeki buz birimi farklı atak açıları için incelenmiştir. Analizler, Ansys FENSAP-ICE yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Türbülans modeli olarak k-w SST kullanılmıştır. Buz birikim hesapları boncuk modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buzlanma; FENSAP-ICE; NACA 0012, Boncuk model

Investigation of Icing on NACA 0012 Airfoil at Different Attack Angles

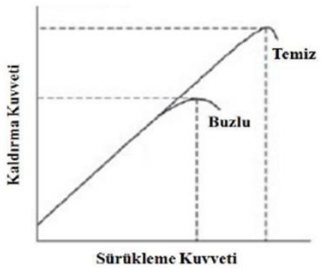
Abstract

Icing on aircraft is one of the most significant factors that jeopardize flight performance and reliability. In the atmosphere, under sub-zero temperatures, water droplets of various sizes exist, leading to ice formation on aircraft surfaces in different shapes and densities. As a consequence of icing, the increased drag force and reduced lift force negatively affect the aircraft's performance and contribute to higher fuel consumption. Additionally, icing on aircraft control surfaces poses a risk to flight safety. In this study, ice accumulation on a two-dimensional NACA 0012 airfoil was investigated for different angles of attack. The analyses were conducted using Ansys FENSAP-ICE software, employing the k-w SST turbulence model. Ice accretion calculations were performed using the beading model

Keywords: Icing; FENSAP-ICE; NACA 0012, Beading model

1. Giriş (Introduction)

Buzlanma, uçuş performansını ve uçuş emniyetini engelleyen önemli bir meteorolojik olaydır. Uçaklarda buzlanma, hava sıcaklığının sıfır derecenin altına düşmesiyle havada bulunan nemin ya da su parçacıklarının uçak üzerinde yoğunlaşarak buz haline gelmesiyle oluşur. Uçağın kanatları üzerinde oluşan buzlanma sürüklenme kuvvetini artırarak kaldırma kuvvetini olumsuz etkilemektedir. Aynı zamanda havada tutunma (stall) hızını artırır. Bu durum uçağın havada kalabilmesi için daha fazla güç harcamasına neden olur.



Şekil 1. Kaldırma ve sürüklenme kuvveti arasındaki ilişki [1]

Şekil 1 ‘de buzlanmanın kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri üzerindeki etkisi görülmektedir. Buzlanma uçuş performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Sürüklenme kuvvetinin artmasına ve kanat üzerindeki kaldırma kuvvetinin azalmasına neden olur. Azalan kaldırma kuvvetini telafi edebilmek için uçağın daha yüksek hızda seyahat etmesi gerektiğinden bu durum yakıt sarfiyatının da artmasına neden olmaktadır. Bahsedilen bu durumların meydana gelmemesi için pilotlar uçuş öncesi ve uçuş süresince güncel meteorolojik durum hakkında bilgilendirilir.

Uçaklarda meydana gelen buzlanmayı engellemek için buz giderici ve önleyici sistemler mevcuttur. Buz giderici (de-icing) işlemler, uçağın dış yüzeyinde biriken buzlanmayı çözmek için sıcak su ve/veya hava ile buz giderici bir sıvının kullanılmasıyla yapılır. Buz önleyici işlemler (anti-icing) buz giderici işlemlerden sonra uçak üzerinde buzlanmayı önleyen kimyasal bir sıvının sıkılmasıyla yapılır. Resim 1’de buz giderici ve önleyici işlemler görülmektedir. Bunun dışında pilot motordan gelen sıcak havadan veya uçak üzerine döşenmiş elektrik tellerinden de faydalanabilir. Uçuş yoğunluğu yüksek havalimanlarında kalkış için sıra bekleyen uçaklar üzerinde buzlanma tekrar görülebileceğinden buz önleyici sistemler önemli bir rol teşkil etmektedir. Bu işlemler için mekanik ekipmanlar kullanılır.



Resim 1: Buz giderici ve önleyici işlemler

Uçaklarda buzlanma temel olarak üç gruba ayrılır. Bunlar kırağı buzlanma, camsı buzlanma ve karışık buzlanmadır. Kırağı buzlanma, aşırı soğuk su damlacıklarının uçak yüzeyinde hızla donması sonucu oluşur. Donmanın çok çabuk gerçekleşmesi, buzun yapısında hava kabarcıklarının oluşmasına neden olur. Kırılgan yapısından dolayı buz giderici sistemler yardımıyla rahatlıkla temizlenebilmektedir. En az zararlı buzlanma türüdür. Camsı buzlanma, iri yapıdaki ve yüksek hızdaki su damlacıklarının uçağın yüzeyinde bölgesel olarak donmasıyla meydana gelir. Camsı buzlanma uçağın yüzeyine daha güçlü tutunması ve daha yoğun bir yapıya sahip olmasından dolayı temizlenmesi zordur. Fiziksel yapısı genellikle kanadın hücum kenarında tek veya çift boynuz şeklindedir. Uçağın aerodinamik özelliklerini kırağı buzlanmaya kıyasla çok daha olumsuz yönde etkilemektedir. Karışık buzlanma, camsı ve kırağı buzlanmanın ortak karakteristik özelliklerini yansıtan bir buzlanma şeklidir. Atmosferde değişen su damlacıklarının boyutu ve hızından dolayı uçaklar üzerinde yaygın olarak görülen buzlanma şeklidir.

Dökme‘nin yaptığı yüksek lisans tez çalışmasında iki boyutlu kanat profili ve silindir geometrileri üzerinde serbest akış içindeki su damlacıklarının çarpması sonrasında oluşacak buzun miktarının ve şeklinin hesaplanması amaçlamıştır[2]. Bu amaçla akış alanı çözümünün ardından buzlanma çeşitlerine göre termodinamik denklemler elde etmiştir. İki boyutta damlacıkların takip ettiği yol, çarpma verimi ve sınır tabaka denklemlerinin elde edilişinden sonra uygun sayısal yöntemlerle ve FORTRAN programlama dili kullanılarak, daha önceki çalışmalarla ve test uçuşlarındaki durumlarla ilgili buz şekilleri, kütlesi ve sıcaklık profilleri grafikler halinde sunulmuştur.

Wang yaptığı araştırmada ticari CFD çözücüsü ANSYS Fluent kullanarak NACA 23012 profilinin temiz yüzey ile önde buz birikmesi durumlarında aerodinamik simülasyonunu gerçekleştirmiştir [3]. Yapılan çalışma, Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) hesaplamaları, Spalart-Allmaras (SA) ve Wray-Agarwal (WA) türbülans modelleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mesh yapısı Ansys ICEM programı kullanılarak yapılmış olup 0, 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 derece atak açılarında deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. 1.8 milyon Reynold sayısı ve 0.18 Mach hızında çalışılmıştır.

Martini ve arkadaşları buz varlığında yüzey pürüzlülüğü dağılımının etkisini değerlendirmek için sayısal bir çalışma yapmıştır [4]. Aynı zamanda iki türbülans modelinin (Spalart–Allmaras and k-w SST) etkisini de değerlendirmişlerdir. Analizler Ansys Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiş, buz birikimi ise Ansys Fensap-Ice kullanılarak simüle edilmiştir. Kabul edilen modelleme yaklaşımları ve simülasyon araçları kullanılarak elde edilen sonuçlar, başka bir sayısal çalışma ile karşılaştırılmış ve deneysel verilere göre doğrulanmıştır.

Pepeç yaptığı çalışmada kanat yüzeyine çarpmak suretiyle kanatçık yüzeyinde donan ve buzlanmaya sebep olan su damlacıklarının yörüngeleri hesaplanarak değişen hız, damlacık çapı, hücum açısı, veter uzunluğu gibi değer kombinasyonları ile toplama verimi hesaplanarak buzlanma riskini artıran durumları incelemiştir [5].

Akbal yaptığı çalışmada, uçak kanadı üzerinde buz birikiminin nümerik olarak çözümleme sürecinde, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi olan OpenFoam ile hava hızı ve taşınımlı ısı transfer katsayısı hesaplamıştır. Kanat yüzeyi ile havada bulunan su damlacığı arasında termodinamik ve enerji dengesi genişletilmiş messinger modeli kullanılarak yüzey üzerinde maksimum hava hızı görülen bölgede buz birikim kalınlığı hesaplayıp, buzun çeşidi belirlemiştir[6].

Bu çalışmada kullanılan simülasyon ayarlarını doğrulamak amacıyla Shin ve Bond’un NACA0012 kanat profilinin farklı sıcaklıklar için gerçekleştirmiş oldukları buzlanma deney sonuçları kullanılmıştır [7]. Doğrulanan simülasyon ayarı ile NACA0012 kanadın farklı atak açılarında buz birikimi incelenmiştir.

2. Metod (Method)

Farklı atak açıları için NACA 0012 kanat profili üzerinde buzlanma oluşumu ANSYS Fluent ve FENSAP-ICE 22.1 ticari yazılımları kullanılarak incelenmiştir. Kanat üzerindeki buzlanmanın nümerik analizi; kanadın etrafındaki akış alanının çözümü, damlacık çarpmasının çözümü ve buzlanma birikiminin hesaplanması ile üç aşamada yapılmaktadır. Şekil 2'de analiz esnasında her aşama için kullanılan giriş verileri ve analiz sonucunda alınan çıkış verileri görülmektedir.



Şekil 2. Buz birikim simülasyonu için iş akışı

Analiz girdileri olarak Shin ve Bond'un gerçekleştirmiş olduğu çalışmanın deney verileri kullanılmış olup Tablo 1'de bu değerler verilmiştir.

Tablo 1. Buzlanma deney şartları [7]

Atak açısı (AOA) (deg.)	Hava hızı (m/s)	LWC (g/m^3)	MVD (µm)	Total Sıcaklık (K)	Statik Sıcaklık (K)	Buzlanma süresi (dk.)
4	67.056	1	20	270,92778	268,69	6

Akış alanının çözümü Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Analizde hava için kullanılan özellikler statik sıcaklık dikkate alınarak belirlenmiştir. Havanın iletim katsayısı ve dinamik viskozitesi Sutherland formülü kullanılarak hesaplanmıştır[8]. Tablo 2'de analizde kullanılan değerler verilmiştir.

Tablo 2. Havanın özellikleri

Akışkan	Hava
Yoğunluk	İdeal gaz
P_∞	101325 Pa
C_p	1004.6882 J/kg-K
Termal iletkenlik	0.023504 W/m-K
Dinamik viskozite	1.679412×10^{-5} Ns/m^2

Türbülans modeli olarak RANS tabanlı k-w SST türbülans modeli seçilmiş ve viskoz ısınma seçeneği etkinleştirilmiştir. Buzlanma analizleri için kanat profili üzerinde duvar sınır koşulunu belirlemek amacıyla Shin ve arkadaşlarının geliştirdiği ampirik denklem kullanılmış ve bu denklemle pürüzlülük değeri tanımlanmıştır [8,9]. Bu ampirik denklem, statik sıcaklık, sıvı su içeriği (LWC) ve damla grubunun medyan hacim çapı (MVD) verilerini içermektedir. Bu nedenle, deneysel bir çalışmayı doğrulamak için kullanılabilecek en uygun pürüzlülük değeri hesaplama yöntemi olduğu gözlemlenmektedir.

Kanat çevresinde su damlalarının çarpma etkisini modellemek için Fensap DROP3D çözücüsü kullanıldı. Akış analizinden elde edilen çıkış verileri, DROP3D çözücüsüne aktarılarak analizler yapıldı. DROP3D çözücüsünde, damla tipi olarak 'damla' seçildi ve damla sürüklemesi modeli olarak, küresel damlacıkların etrafındaki akış için ampirik bir korelasyona dayalı su sürükleme katsayısı modeli tercih edildi [9]. Analizde, deneysel çalışmada kullanılan damlacıkların çaplarının homojen bir şekilde üretilebileceği göz önüne alındığından tek dağılımlı hesaplama yöntemi kullanıldı. Hesaplamaların sonucunda, kanat etrafındaki damlacık dağılımı ve damlacık birikme verimi belirlendi.

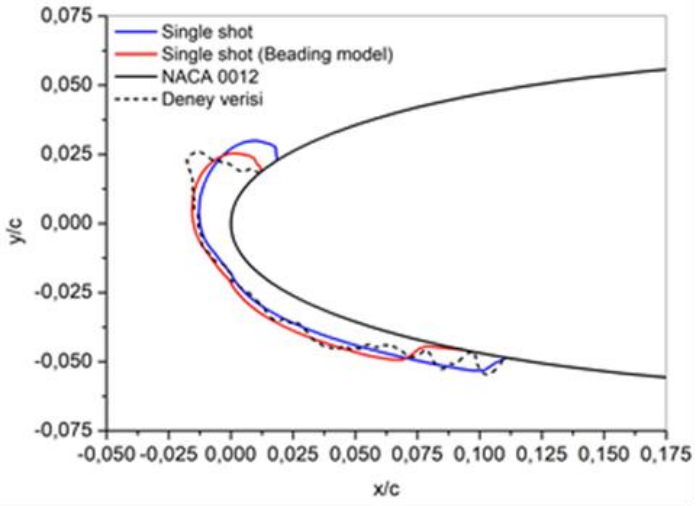
Kanat üzerinde buz birikimi, su damlası çarpması analizinden elde edilen veriler Fensap ICE3D çözücüsüne aktarılarak hesaplanmıştır. Buzlanma modeli olarak ortam sıcaklığına uygun olması açısından "glaze" tipi buzlanma seçilmiştir. ICE3D, kontamine olan yüzeyde camsı (glaze) tipte buzlanma koşulları mevcut olduğundan sürekli bir su filminin varlığını varsaymaktadır. Bu varsayım; gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda gözlemlenen, damlacıkların bir yüzeye çarptığında, damla geri akışı ve neredeyse yarım küre şeklindeki buz yapılarının donmadan önce zamanla büyüyen boncuklar oluşturma eğilimi gösterdiğinden yapılmaktadır. Bu çalışmada boncuk modeli (beading model) aktif edilerek

buzlanma birikimi hesaplanmıştır.

Nümerik sonuçların deneysel verilerle uyumu incelemek için FENSAP-ICE yazılımının tek adımlı (single shot) ve çok aşamalı (multi shot) hesaplama yaklaşımları kullanılmıştır. Çok aşamalı yaklaşımda buzlama simulasyonu buzlanma süresi belirli zaman aralıklarına ayrılarak gerçekleştirilmektedir. Tek adımlı çözümden farklı olarak çok aşamalı yaklaşımda belirlenen zaman adımı tamamlandıkça yeni bir ağ yapısı, ağ kalitesi ve ağ miktarı değişmeden 3B ağ adaptasyonu sağlayan OptiGrid katı model yapılandırma aracı ile oluşturulmaktadır.

3. Bulgular ve Tartışma (Results and Discussions)

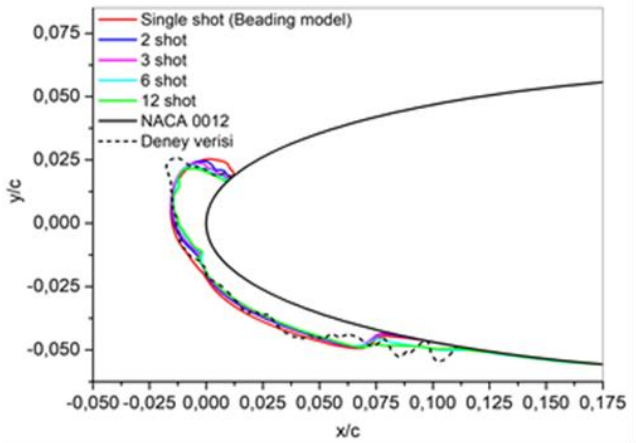
Tek adımlı çözüm yaklaşımı kullanılarak camsı tipte buzlanmada boncuk modeli kullanımının buzlanma oluşumu hesabına etkisi literatürde verilen deney verisi ile kıyaslanarak incelenmiştir. Şekil 3'te 6 dakika sonunda kanat üzerinde oluşan buzlanmalar görülmektedir. Şekil 3'teki sonuçlara göre, boncuk modeli kullanıldığında kanadın üst bölgesindeki buzlanma oluşumunun gerçek buzlanma durumuyla aynı yerden başladığı gözlemlenmiştir. Ancak boncuk modeli kullanılmadığında, kanadın üst bölgesindeki buzlanmanın başlangıcının deneysel verilere kıyasla daha yukarıda olduğu görülmüştür. Boncuk modeli kullanıldığında, kanadın üst bölgesindeki buzlanma sınırının deneysel verilere daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Kanadın alt bölgesindeki buz birikimi incelendiğinde ise boncuk modelinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Boncuk modeli kullanılmadığı analizde, kanadın alt bölgesinde buz birikimi daha iyi sonuçlar vermiştir.



Şekil 3. Tek adımlı buzlanma yaklaşımında boncuk modeli kullanımının karşılaştırılması

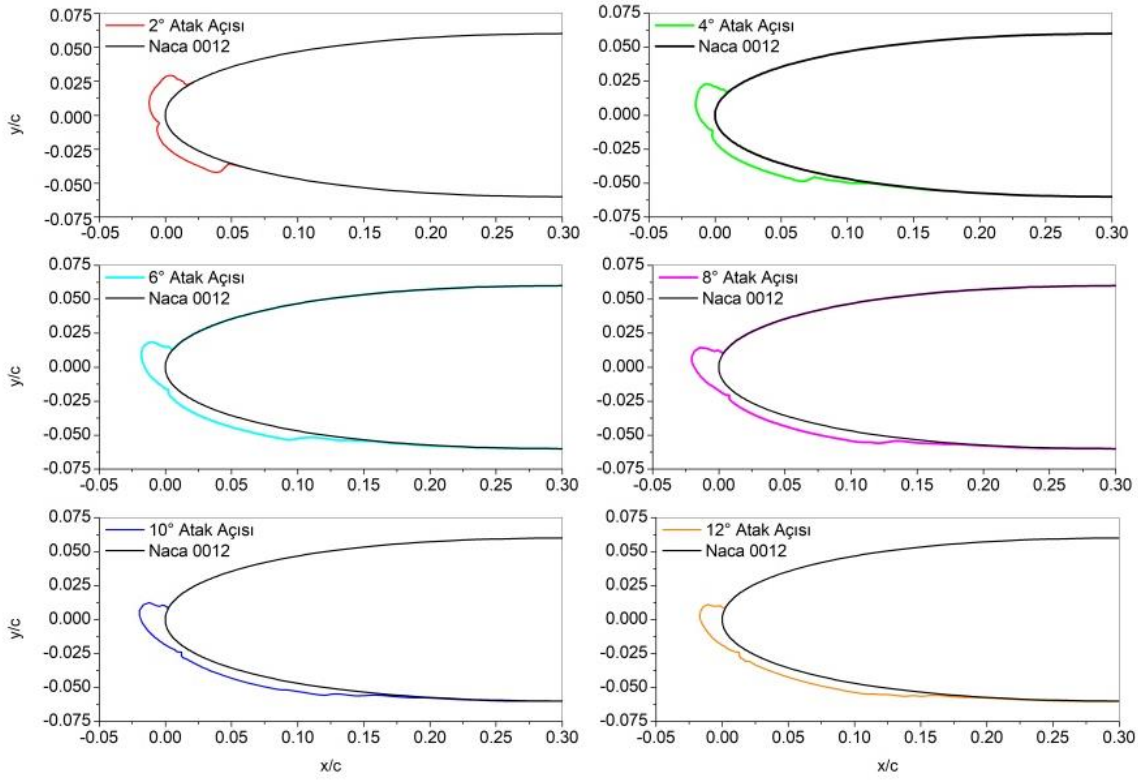
Şekil 4'te, hem çok aşamalı hem de tek adımlı yaklaşımlar kullanılarak hesaplanan buz birikimi sonuçları gösterilmektedir. Her iki yaklaşımda da boncuk modeli kullanılmıştır. Çok aşamalı modelde, toplamda 6 dakika boyunca meydana gelen buz birikimi hesaplamaları için 30 saniye, 1 dakika, 2 dakika ve 3 dakika zaman adımlarıyla analizler yapılmıştır.

30 saniye (12 shot) ve 1 dakika (6 shot) zaman aralıkları kullanılarak elde edilen sonuçların, deneysel verilere oldukça benzer olduğu belirlenmiştir. Zaman aralığı giderek azaldıkça, analiz sonuçlarının deney sonuçlarına daha yaklaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum, hesaplamaların zaman aralığının azalmasıyla birlikte daha doğru sonuçlar elde edilmeye başlandığını göstermektedir.



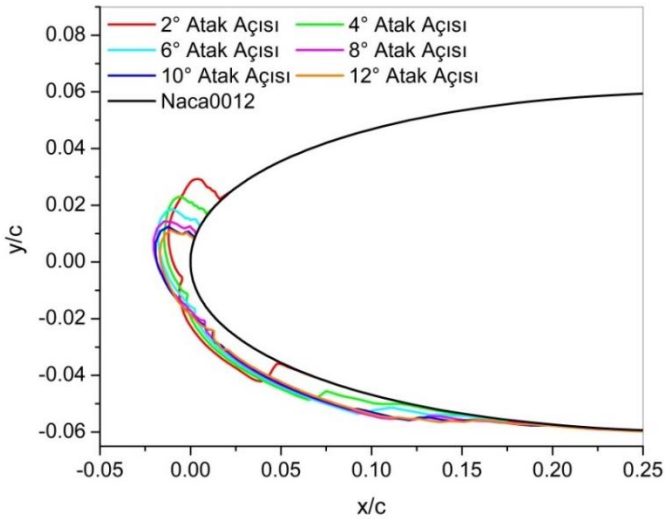
Şekil 4. Tek adımlı ve çok aşamalı yaklaşımların karşılaştırılması

Şekil 5'te verilen grafiklerde, farklı atak açılarında (2, 4, 6, 8, 10 ve 12 derece) kanadın üzerindeki camsı tipte buz birikimleri görülmektedir. Belirtilen atak açıları için çok aşamalı buzlanma yaklaşımı kullanılarak kanadın üzerindeki buzlanma birikimleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar 1 dakikalık zaman aralıkları ile toplamda 6 dakikalık buz birikimi için yapılmıştır. Atak açısı arttıkça, kanadın üst yüzeyindeki buzlanma profilinin boynuz benzeri bir hal aldığı gözlemlenmiştir. Atak açısı 2 dereceden 12 dereceye kadar artarken, kanadın alt yüzeyindeki buzlanmanın sona erdiği nokta kanadın ön kenarından kordun %5 uzunluğundan başlayarak %20 uzunluğuna kadar yayıldığı görülmüştür.



Şekil 5. 2,4,6,8,10 ve 12 derece atak açılarında boncuk modeli ile buzlanma

Şekil 6' da gerçekleştirilen analiz sonuçları üst üste yerleştirilerek buzlanmanın atak açılarına bağlı olarak kanat üzerindeki dağılımı incelenmiştir. Kanadın hücum kenarında buzlanmanın başladığı kısım artan atak açılarıyla beraber aşağıya kanadın simetri merkezine doğru yavaşlayan bir ilerleme ile kaymaktadır. Atak açısının artması ile buz birikim başlangıcı kanadın basınç durma noktasına yaklaştıkça tutunma kaybı yaşayacağı kabul edilebilir. Atak açısı 2 dereceden 4 dereceye arttığında kanat üzerinde buzlanma dağılımının hızlı bir şekilde değiştiği, büyük atak açılarında ise çok fazla değişmediği ve benzer bir buzlanma profili olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 2, 4, 6, 8,10 ve 12 derece atak açılarında buz birikim profillerinin karşılaştırılması

3. Sonuç (Conclusions)

Yapılan çalışmada akış analizleri için k-w SST türbülans modeli kullanılmış, buzlanma analizleriyse FENSAP yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Naca0012 kanat profili üzerinde tek adımlı, çok aşamalı ve boncuk modeli yaklaşımları kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve en uygun analiz yaklaşımı bulunmuştur. Camsı tipte bir buzlanma için 1 dakika zaman aralığı ile çok aşamalı çözüm yaklaşımı ve boncuk model kullanımının deneysel veriye en yakın sonucu verdiği tespit edilmiştir. Bu analiz yaklaşımı kullanılarak 2, 4, 6, 8, 10 ve 12 derece atak açılarında buzlanma analizleri gerçekleştirilmiş, kanat profili üzerinde oluşan buzlanma formları incelenmiştir. Atak açısı artışı ile birlikte boynuz tipi buzlanmada, buzlanma ucunun uzadığı ve kanadın alt yüzeyindeki buzlanmanınsa kanat veter uzunluğunun %20 ilerisine kadar genişlediği görülmüştür.

Kaynaklar (References)

[1] Parachivoiu, I., and Saeed, F., Aircraft Icing, Wiley, New York, 2004; 1–24.
[2] Ramazan D. Kanat profili üzerinde oluşan buzun iki boyutta matematiksel modellenmesi ve sayısal çözümü, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, İstanbul, 2019.
[3] Wang, Boyu, Numerical Simulation of Flow past an Airfoil with Ice Accretion on Leading Edge. AIAA AVIATION 2021 FORUM. 2021. p. 2583.
[4] Martini, F., Ibrahim, H., Contreras Montoya, L. T., Rizk, P., & Ilinca, A. Turbulence Modeling of Iced Wind Turbine Airfoils. Energies, 2022; 15(22), 8325.
[5] Safa Eren Pepeç, Kanat Kesiti Etrafında Hava Akımı ve Damlacık Yörüngelerinin Hesaplanması, Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, İstanbul, 2021.
[6] Ömer Akbal, Uçaklarda Buzlanmanın Nümerik Olarak İncelenmesi ve Uçuş Profili Boyunca Hava Tahmin Modeli Uygulaması, Yüksek Lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, İstanbul, 2019.
[7] Shin, J., & Bond, T. H. Experimental and Computational Ice Shapes and Resulting Drag Increase for a NACA 0012 Airfoil. NASA technical memorandum, 1992; 105743.
[8] https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.cfd/cfd_ug_fluidflow_high_mach.08.27.html
[9] Ansys_FENSAP-ICE_User_Manual, 2022R1.
[10]Greg T. Busch, Michael B. Bragg, Experimental Study of Full-Scale Iced-Airfoil Aerodynamic Performance Using Sub-scale Simulations, University of Illinois, Urbana, 2009.