



**BİR KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE CAMSI TİPTE BUZLANMANIN
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİYLE
İNCELENMESİ**

Artunç OĞUZATA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığımız bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığımız eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Artunç OĞUZATA

17/07/2024

BİR KANAT PROFİLİ ÜZERİNDE CAMSI TİPTE BUZLANMANIN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YÖNTEMİYLE İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Artunç OĞUZATA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Gelişen teknolojiyle beraber daha güçlü motorlara sahip olan uçaklar, artan hız ve irtifa nedeniyle buzlanma problemiyle yüzleşmek zorunda kalmıştır. Uçuş güvenliğini tehlikeye atan bu sorun, ciddi mal ve can kayıplarına neden olmuş, mühendislerin ve tasarımcıların üstesinden gelmek zorunda oldukları bir probleme dönüşmüştür. Bu çalışmada, kanat profilleri üzerinde boynuz şeklinde buzlanmaya neden olan ve kaldırma katsayısını en çok etkileyen camsı tipte buzlanmanın oluşumu, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Araştırmada, NACA 23012 kanat profili kullanılmıştır. Literatürde, NACA 23012 kanat profili için gerçekleştirilen camsı buzlanma deney şartlarından biri seçilerek analizler bu şartlar için gerçekleştirilmiş ve analiz doğrulanmıştır. Buzlanma analizi: kanat etrafında akış alanının hesabı, kanat üzerinde damlacık çarpması ve buz birikim hesapları ile üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Kanat etrafındaki akış alanı Ansys Fluent yazılımı ile SST k-w türbülans modeli kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen bu veriler Fensap-ICE yazılımı ortamına aktarılarak kanat üzerindeki damlacık dağılımı ve damlacık birikme verimi DROP3D çözücüsü ile hesaplanmıştır. Son olarak buzlanma birikimi, ICE3D çözücü ile çok adımlı çözüm yaklaşımı kullanılarak elde edilmiştir. Farklı atak açıları, farklı sıvı su içeriğine sahip ortamlar ve farklı medyan hacim çaplarındaki damlacık boyutları için kanat üzerindeki buzlanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizin doğrulanmasında kullanılan şartlar altında, kanat için tutunma kaybının 9° atak açısında başladığı belirlenmiş ve deneysel çalışma sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Damlacık çaplarının camsı tipte buzlanmaya etkisi, süper soğutulmuş büyük damlacık boyutunun altındaki değerler için incelenmiş olup, çapın artması ile kanat yüzeyi üzerinde buzlanmanın daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiş ve buz yüksekliğini etkilemediği belirlenmiştir. Sıvı su içeriğinin artması ile kanat üzerinde buzlanmanın oluştuğu alanın büyüklüğünün genişlemesi ile buz yüksekliğinin de çok az arttığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 93107
Anahtar Kelimeler : NACA 23012, Camsı buzlanma, Fensap-ICE, Ansys Fluent
Sayfa Adedi : 63
Danışman : Doç. Dr. Duygu İPCİ

INVESTIGATION OF GLAZE ICE FORMATION ON AN AIRFOIL USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

(M. Sc. Thesis)

Artunç OĞUZATA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

With advancing technology, aircraft equipped with more powerful engines have been forced to confront the issue of icing due to increased speed and altitude. This problem, which jeopardizes flight safety, has led to significant material and human losses, turning into a challenge that engineers and designers must overcome. In this study, the formation of glaze ice, which causes horn-shaped icing on wing profiles and most significantly affects the lift coefficient, was numerically investigated using computational fluid dynamics (CFD). The NACA 23012 wing profile was employed in the research. One of the icing conditions for NACA 23012 wing profile available in the literature was selected for analysis to validate the results. The icing analysis was conducted in three stages: calculation of flow field around the wing, droplet impingement on the wing, and accumulation of ice. The flow field around the wing was determined using the Ansys Fluent software with the SST k-w turbulence model. These data were then transferred to the Fensap-ICE software environment to calculate droplet distribution and droplet collection efficiency on the wing using the DROP3D solver. Finally, icing accumulation was obtained using the ICE3D solver with a multi-shot solution approach. Icing analyses on the wing were conducted for different angles of attack, environments with varying liquid water content, and droplet sizes with different median volume diameters. Under the conditions used for validation, it was determined that the onset of stall for the wing occurred at 9° degree angle of attack, which was found to be consistent with experimental results. The effect of droplet sizes on glaze icing was examined for values below the size of supercooled large droplets, revealing that an increase in droplet size led to a wider spread of icing on the wing surface without significantly affecting ice height. An increase in liquid water content resulted in an expansion of the area where icing occurred on the wing, with a minimal increase in ice height.

Science Code : 93107

Key Words : NACA 23012, Glaze Ice, Fensap-ICE, Ansys Fluent

Page Number : 63

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Duygu İPCİ

TEŞEKKÜR

Tüm eğitim hayatımda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen annem ve babama minnet ve Őükran borçluyum. Aynı zamanda bu tez konusunu seçmemde bana yardımcı olan, katkı ve birikimlerini paylaşıp her zaman yanımda olup desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Duygu İPCİ' ye en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3. BUZLANMA FİZİĞİ	11
3.1. Buzlanma Tipleri	13
3.1.1. Kırağı buzlanma	13
3.1.2. Şeffaf (Camsı) buzlanma.....	14
3.1.3. Karışık buzlanma.....	15
3.2. Buzlanma Şekilleri	16
3.2.1. Pürüzlü buzlanma	17
3.2.2. Boynuz şekilli buzlanma	17
3.2.3. Akış doğrultusunda buzlanma.....	18
3.2.4. Kanat doğrultusunda buzlanma.....	18
3.3. Buzlanmaya Etki Eden Faktörler	20
3.3.1. Sıcaklık.....	20
3.3.2. Sıvı su içeriği.....	21
3.3.3. Damlacık boyutu	22

	Sayfa
3.3.4. Sıvı su içeriği ve damlacık boyutu arasındaki ilişki.....	24
4. MATERİYAL METOD	29
4.1. Çözüm Bölgesi ve Ağının Oluşturulması	30
4.2. Akış Analizi.....	34
4.3. Damlacık Yörünge Tahmini ve Damlacık Çarpma Analizi	38
4.4. Buz Birikim Analizi	41
4.4.1. Boncuklanma modeli.....	43
4.4.2. Buzlanma hava sıcaklığı ve buz yoğunluğu	44
4.5. Çoklu Adım.....	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	47
5.1. Boncuk Modelinin Buzlanmaya Etkisi	47
5.2. Çoklu Adımda Damlacık Birikme Verimi	48
5.3. Simülasyonun Doğrulanması	48
5.4. Farklı Atak Açılarında Kanat Üzerinde Görülen Buzlanma	49
5.5. Farklı Atak Açılarındaki Film Kalınlığı.....	50
5.6. Farklı Sıvı Su İçeriği Değerlerinde Kanat Üzerinde Görülen Buzlanma	51
5.7. Farklı Damlacık Boyutlarında Kanat Üzerinde Görülen Buzlanma	52
5.8. Kaldırma ve Sürüklenme Katsayılarının Deneysel Çalışmalar ile Kıyaslanması	53
5.9. Farklı Atak Açısı Değerlerindeki Basınç Katsayıları.....	55
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	63

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Bulut tipi ve sıcaklığın buzlanma oluşumuna etkisi.....	12
Çizelge 4.1. Buzlanma Deney Şartları.....	29
Çizelge 4.2. Havanın Özellikleri.....	35



ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Buzlanmanın uçuş performansına etkisi	1
Şekil 1.2. Bir uçak üzerindeki buz birikimi giderme işlemi	2
Şekil 1.3. Bir uçağa uygulanan buzlama önleyici işlem	3
Şekil 3.1. Atmosfer sıcaklığına göre buzlanma potansiyelleri	11
Şekil 3.2. Bir kanadın basınç yüzeyi, ön kenarı ve emme yüzeyi üzerindeki kırağı buzlanma	14
Şekil 3.3. Bir kanadın basınç yüzeyi, ön kenarı ve emme yüzeyi üzerindeki camsı buzlanma sonucu oluşan boynuz tipi buzlanma	15
Şekil 3.4. Bir kanadın basınç yüzeyi, ön kenarı ve emme yüzeyi üzerindeki karışık buzlanma	16
Şekil 3.5. Buzlanma şekillerinin uçuş aerodinamiğine etkisi	16
Şekil 3.6. Pürüzlü buzlanma	17
Şekil 3.7. Boynuz şekilli buzlanma.....	18
Şekil 3.8. Akış doğrultusunda buzlanma	18
Şekil 3.9. Kanat doğrultusunda buzlanma	19
Şekil 3.10. Kanadın alt ve üst yüzeyinde yeniden buzlanma birikimi.....	19
Şekil 3.11. Sıvı su içeriğinin kırağı tipte buzlanmaya etkisi.....	21
Şekil 3.12. FENSAP programında verilen Langmuir D dağılımı	23
Şekil 3.13. Aşırı soğuk büyük damlacıklar	24
Şekil 3.14. Sıvı su içeriği ve damlacık boyutu arasındaki ilişki (FAR-25 Ek-C).....	25
Şekil 3.15. Yükseklik-ortam sıcaklığı grafiği (FAR-25 Ek C)	26
Şekil 4.1. Buzlanma simülasyonu iş akışı.....	30
Şekil 4.2. Çözüm bölgesi	31
Şekil 4.3. Basınç katsayıları.....	32
Şekil 4.4. Çözüm bölgesinin ağ yapısı.....	32
Şekil 4.5. Skew ağ kalitesi	33

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Genel ağ kalitesi.....	34
Şekil 4.7. Orthogonal ağ kalitesi	34
Şekil 4.8. DROP3D çözücüsü model ayarları	39
Şekil 4.9. Su filmi tabakası ve enerji transferi	41
Şekil 4.10. Otomatik ağ adaptasyonu.....	45
Şekil 5.1. Boncuk modelin buzlanmaya etkisi	47
Şekil 5.2. 5° atak açısı için çoklu adımda damlacık birikme verimi.....	48
Şekil 5.3. Analiz sonucunun deneysel verilerle kıyaslanması	49
Şekil 5.4. Farklı atak açılarında buz birikim profillerinin karşılaştırılması	50
Şekil 5.5. Farklı atak açlarındaki film kalınlığı.....	51
Şekil 5.6. Sıvı su içeriğinin kanat üzerinde oluşan buzlanmaya etkisi	52
Şekil 5.7. Damlacık çapının kanat üzerinde oluşan buzlanmaya etkisi	53
Şekil 5.8. Kaldırma katsayısı.....	54
Şekil 5.9. Sürüklenme katsayısı	55
Şekil 5.10. 2°, 4°, 6°, 8° ve 10° atak açılarında buzlanma sonrası basınç katsayısı	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

km	Kilometre
T_t	Toplam Sıcaklık (K)
T_s	Statik Sıcaklık (K)
C	Kanat Veter Uzunluğu (m)
C_p	Özgül Isı (J/kgK)
γ	Adyabatik Üs
M_∞	Mach Sayısı
g	Gram
m³	Metreküp
m	Metre
s	Saniye
k_∞	Ortam Akışkanı Termal İletkenlik (W/mK)
T_∞	Ortam Akışkanı Mutlak Sıcaklığı (K)
k_s	Kum-Tane Pürüzlülük Yüksekliği (m)
μ_∞	Ortamın Dinamik Viskozitesi (kg/ms)
μ	Dinamik Viskozite (kg/ms)
μ_t	Türbülans Dinamik Viskozitesi (kg/ms)
ρ	Yoğunluk (g/m ³)
k	Türbülans Kinetik Enerji (J/kg)
u_j	Akışkan Hız Bileşenleri (m/s)
ω	Özgül Enerji Kaybı (1/s)
σ_k	Deneysel Sabit
σ_ω	Deneysel Sabit
β*	Deneysel Sabit
Ω	Deneysel Sabit
a₁	Deneysel Sabit

Simgeler**Açıklamalar**

ν	Kinematik Viskozite (m^2/s)
ν_t	Türbülans Kinematik Viskozitesi (m^2/s)
F_1	Türbülans Model Sınırlayıcısı
F_2	Türbülans Viskozitesi Sınırlayıcısı
d	Ağ Merkezi ile Duvar mesafesi/Damlacık Çapı (m)
α	Damlacık/Kristal Konsantrasyonu (kg/m^3)
\vec{V}_a, V_∞	Hava Hızı (m/s)
\vec{V}_d	Parçacık Hızının Ortalama Alan Değeri (m/s)
C_D	Damlacık/Kristal Sürüklenme Katsayısı
Re_d	Damlacık/Kristal Reynolds Sayısı
K	Damlacık/Kristal Atalet Parametresi
ρ_a	Hava Yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_d	Damlacık/Kristal Yoğunluğu (g/m^3)
V_d	Parçacık Hızının Ortalama Alan Değeri
L_∞	Karakteristik uzunluk (m)
μ_a	Havanın Dinamik Viskozitesi (g/m^3)
$V_{a,\infty}$	Ortam Havaasının Hızı (m/s)
g_∞	Yerçekimi İvmesi (m/s^2)
Fr	Yerel Froude Sayısı
\vec{V}_f	Su Filmi Hızı (m/s)
$\vec{\tau}_{a,wall}$	Hava Akışının Oluşturduğu Kayma Gerilmesi (N/m^2)
μ_f	Su Filminin Viskozitesi (m^2/s)
y	Su Filminin y doğrultusundaki yüksekliği (m)
\vec{V}_f	Su Filmi İçerisindeki Ortalama Hız (m/s)
h_f	Su Filmi Kalınlığı (m)
β	Yerel Damlacık Birikme Verimliliği
\dot{m}_{evap}	Buharlaştırma Kütle Akısı (kg/s)

Simgeler \dot{m}_{ice} ρ_f L_{evap} T_{rec} T_f T_{ice} c_{ice} L_{fus} e_d c_f **Açıklamalar**

Anlık buz kütlesi birikimi (kg/s)

Akışkan Filmi Yoğunluğu (kg/m³)

Buharlaştırma gizli ısı (J/kg)

Geri Kazanım Sıcaklığı (K)

Akışkan Sıcaklığı (K)

Buz Sıcaklığı (K)

Buzun Özgül Isısı (J/kgK)

Füzyon gizli ısı (J/kg)

Damlacık Enerjisi (m²/s²)

Akışkanın Özgül Isısı (J/kgK)

Kısaltmalar**LWC****MVD****NACA****RANS****SA****SLD****WA****Açıklamalar**

Damlacık Yoğunluğu (Liquid Water Content)

Medyan Damlacık Çapı (Median Volume Diameter)

Ulusal Havacılık Danışma Komitesi

Reynolds ortalımalı Navier-Stokes hesaplamaları

Spalart Almaras Türbülans Modeli

Aşırı Soğumuş Büyük Damlacıklar

Wray-Agarwal Türbülans Modeli

1. GİRİŞ

Uçaklardaki buzlanma sorunu, havacılık tarihinde uzun bir geçmişe sahiptir ve uçuş güvenliğini etkileyen ciddi bir konudur. Bu sorun, uçak yüzeylerinde atmosfer koşulları nedeniyle oluşan buz tabakalarının birikmesi sonucu ortaya çıkar. İlk motorlu uçuşlardan itibaren, buzlanma sorunu uçakların performansını olumsuz etkilemiş ve kazalara neden olmuştur.

Buzlanmanın uçuş emniyetine etkisi

Uçağın kanatları üzerinde biriken buz miktarı, hareketli kanatçıkların performansı üzerinde doğrudan etkilidir. Oluşan buz kanatçıkların hareketini kısıtlayarak kazalara neden olabilir. Yükseklik dümeni, kanatçık ve istikamet dümeni üzerinde oluşan buzlanma uçağın kontrol edilebilirliğini ciddi biçimde zorlaştırır. Uçakların kanatları ve gövdesi aerodinamik açıdan pürüzsüz tasarlanır. Hava, uçağın kanatlarının altından ve üstünden engelsiz bir şekilde akıp gider. Buzlanma, uçağın kanatlarındaki pürüzsüzlülüğü bozarak, kanat üzerindeki sürüklenme kuvvetinin artmasına kaldırma kuvvetinin azalmasına neden olur. Böylece uçağın havada tutunma hızı (stall) artmış olur. Aerodinamik açıdan yüksek verimli imal edilmiş olan kanat yüzeyleri buzlanmadan dolayı pürüzlülüklerini kaybeder, Bu durum uçağın performansını olumsuz yönde etkiler. Aynı zamanda uçağın kütlelerini arttırarak uçak motorlarının harcadığı gücü ve yakıt sarfiyatını artırır. Hava alıklarında biriken buzlar motorun ihtiyacı olan hava miktarını azalttığı gibi içeriye girmesi durumunda motora zarar verebilir. Son olarak uçağın dışında bulunan pitot tüplerinin tıkanması hız göstergesi, altimetre gibi cihazların pilota yanlış bilgi vermesine neden olur.



Şekil 1.1. Buzlanmanın uçuş performansına etkisi

Buz giderici ve önleyici sistemler

Uçağın kanat gövde motor gibi ana komponentleri üzerinde meydana gelen buzlanma uçuş güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Oluşan bu tehlikeyi en aza indirmek için buz giderici (De-icing) ve önleyici (Anti-icing) işlemler uçuş öncesi uçak üzerine uygulanmaktadır. Bu işlemler uçak kaptanının vereceği karara istinaden uygulanır.

Buz giderici (De-Icing) işlemler

Bu işlem uçağın dış yüzeyinde biriken buz ve karın, buz çözücü bir sıvı yardımıyla temizlenmesi yöntemidir. Şekil 1.2' de bir uçağa uygulanan buz giderici işlem görülmektedir. Buz çözücü sıvı olarak genellikle sıcak su veya sıcak su ile buz giderici alkol bazlı bir sıvı kullanılır. Buz giderme yöntemi uçak yüzeyinde belirli miktarda bir buzlanma meydana geldikten sonra uygulanır. Genel olarak yüzeyi temizleme amaçlı mekanik yöntemleri içeren buz giderici ekipmanlarından oluşur. Uçak yüzeyine sıcak hava uygulamak, suyun donma derecesini düşürmek için kuru/sıvı kimyasallar kullanmak ya da bu iki yöntemi karışık olarak kullanmak tipik buz giderme usullerindedir.



Şekil 1.2. Bir uçak üzerindeki buz birikimi giderme işlemi [1]

Buz önleyici (Anti-Icing) işlemler

Şekil 1.3' de bir uçağa uygulanan buzlanma önleyici işlem görülmektedir. Bu işlem buzlanma önleyici uygulamadan sonra buzlanmaya karşı uçak üzerine buz önleyici bir sıvı sıkılması yöntemidir. Yalnız bu işlem belirli bir süre uçağı korumaktadır. Özellikle uçuş

yoğunluğu yüksek havalimanlarında bekleme süresinin uzaması sonucunda buzlanma tekrar görülebilir. Bu durumda pilot motordan gelen sıcak havanın dolaşımı ya da uçaktaki komponentler arasındaki elektrik tellerinden geçen akım ile buzlanmanın önüne geçebilir. Kanatları üzerindeki buzlanma mekanik olarak ta engellenebilir. Kanat üzerine kauçuk bir kaplama yapılır. Bu kaplamanın içerisine hava ile şişirilebilen yassı keseler yerleştirilir. Bu keseler motor tahrikli hava pompası ile ya da jet motor kompresörlerinden alınan hava ile şişirilir. Şişirme sırası bir dağıtıcı valf ya da seçici valflerle yapılır. Basınçlı hava ile kaplama gerilir, böylece yüzeydeki buz kırılıp rüzgar ile sürüklenir.



Şekil 1.3. Bir uçağa uygulanan buzlanma önleyici işlem [2]



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Uçaklarda buzlanma uçak teknolojisinin gelişmesiyle birlikte 1920'lerden itibaren üzerinde çalışılmaya başlanan ve halen çalışılmaya devam eden bir araştırma konusudur. Uçaklarda özellikle kanatlar üzerinde oluşan buz birikimi uçağın aerodinamik performansı ve çalışma sınırları üzerinde oldukça olumsuz etkilere neden olmaktadır. Buzlanma üzerine yapılan ilk ciddi çalışmalar 2. Dünya Savaşı esnasında buzlanma rüzgar tüneli inşaatı ile başlamıştır. Buzlanma rüzgar tünelleri ile 1940 ve 1950' li yıllarda gerçekleştirilen bu çalışmalar günümüzde halen etkisini sürdürmekte ve uçaklarda yaygın olarak kullanılan buzlanma önleyici sistemlerin temelini oluşturmaktadır.

Buzlanma konusundaki önemli ilerlemelerin gerçekleşmesi matematiksel modellerin oluşturulmasıyla sağlanmıştır. Hardy (1946) [3], Messinger (1953) [4] ve Langmuir ve Blodgett (1946) [5] tarafından yapılan araştırma ve çalışmalar sayesinde sayısal modeller oluşturulmuş ve buz birikimi tahminleri ilk kez ortaya çıkmıştır. 1970'lerin sonlarına doğru modern bilgisayarların kullanılmasıyla yapılan sayısal simülasyonlar buzlanma konusunda detaylı çalışmaların önünü açmıştır. Maliyet ve kaza riskinin azalmasını sağlayan bu çalışmalar rüzgar tüneli deneyleriyle beraber daha doğru sonuçlar vermek için kullanılmıştır [6].

1970'lerin sonundan 90'lara kadar yeni bilgisayarlı akışkanlar dinamiği (CFD) metotlarının rüzgar tüneli testleriyle doğrulanması üzerinde duruldu. Bu çalışmalar genellikle NACA 0012 kanat profili ile yapılmış olup farklı sıcaklık, hız, damlacık çapı koşullarında deneyler yapılmıştır.

1994 yılında meydana gelen ATR-72 kazası uçaklardaki buzlanma probleminde önceden fark edilmeyen bir ayrıntının görülmesini sağladı. Kaza sonrası yapılan araştırmada büyük süper soğuk su damlacıklarının kanadın ön ucunda ve firar kenarı üzerinde hızla yayılarak kanadın kaldırma kuvvetini azalttığı sonucuna varılmıştır. Kanadın hücum kenarında bulunan buz kırıcılar sadece ön taraf için etkili olmasına rağmen kanadın arka taraflarındaki buzlanma için ne yazık ki etkili olamamışlardır. Azalan kaldırma kuvveti ve hidrolik olmayan buzlanmış kanat hareketli yüzeyleri pilotların gerektiği şekilde uçağa müdahale edememesine neden olmuş, uçak yere yüksek süratle çakılmıştır.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, buz oluşumuna neden olan fiziksel süreçlerin anlaşılması üzerine yoğunlaşmıştır. Bununla beraber buz birikiminin uçak performansı üzerindeki etkileriyle beraber kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri incelenmektedir. Yapılan araştırmalar hesaplamalı akışkanlar dinamiği tabanlı denklemler kullanılarak aerodinamik yüzey üzerinde buzlanmanın simülasyonu ve uçak performansına etkilerini görmek üzerine yoğunlaşmıştır. Örneğin NASA Lewice buz birikimi modelini geliştirmiştir.

Garcia yaptığı çalışmada airfoil ya da silindirik veya düz yüzeyler üzerinde buz birikiminin detaylı bir analizini yapmıştır [7]. Bu analiz akış hızı, sıcaklık gibi parametrelerin değişimine dayanarak, buz oluşumunun davranışını karakterize etmeyi amaçlamaktadır. Bu amaçla FENSAP-ICE programını kullanmıştır. Havacılıkta aerodinamik yüzeylerde buzlanmanın uçağın performansını olumsuz etkileyebileceğini göstermek ve buzlanmanın önemine dikkat çekmeye çalışmıştır.

Boduroğlu literatüre sunduğu çalışmasında Boeing 737-800 uçağının kanatları için uygulanan termal buz önleme sistemi üzerinde çalışmıştır [8]. Termal buz önleme sistemi sıcak havayı, buzlanmaya maruz kalmış ya da kalacak olan kanat üzerine belli miktarda püskürtmektedir. Farklı uçuş yüksekliklerinde, kabul edilmiş hava şartlarına göre, sınır tabaka denklemlerini kullanmış, buzlanmaya karşı gerekli olan ısı ihtiyaçları hesap edilerek, termal buz önleme sisteminin sıcak hava üfleme kapasitesini elde etmiştir.

Uğur, motor hava alığı geometrisi üzerinde buzlanma simülasyonu yapacak olan bir hesaplama aracı geliştirmeyi amaçlamıştır [9]. Bunun için Fortran dilinde bir kod yazmıştır. Geliştirilen bu hesaplama aracı ile iki boyutlu kanat ve hava alığı geometrileri üzerinde buzlanma hesaplamaları yapmış bulduğu sonuçları literatürde yer alan deneysel ve sayısal veriler ile doğrulamıştır. Mevcut çalışmada elde edilen buz şekli tahminleri, toplanma etkinliği ve ısı transferi katsayıları sonuçları, kanat profili ve eksenel simetrik hava alığı geometrilerinde referans veriler ile çoğunlukla uyumludur. Ancak, eksenel simetrik olmayan hava alığı buzlanma sonuçları iki boyutlu yaklaşımın, buz şekli ve buzlanma limitleri göz önünde bulundurulduğunda yeterli doğrulukta sonuçlar vermediğini göstermiştir. Eksenel simetrik olmayan hava alığı geometrilerinde daha doğru buzlanma sonuçları elde etmek için uzun hesaplama süresine rağmen üç boyutlu bir yaklaşım tercih edilmesi sonucuna varmıştır.

Özcan yaptığı çalışmada, yatay eksenli rüzgar türbinlerinde farklı buzlanma koşulları altında buz birikim tahmini ve buna bağlı güç kayıplarını efektif ve doğru bir şekilde sayısal bir yöntem geliştirerek hesaplamaya çalışmıştır [10]. Rüzgar hızı, sıcaklık ve sıvı su içeriği gibi kritik parametrelerin buzlanma boyut ve şekilleri üzerindeki rolü detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Değişik kanat profilleri üzerinde tahmin edilen buz şekilleri literatürde bulunan deneysel ve sayısal veriler karşısında doğrulanmıştır.

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 amaçlanmıştır [11]. 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 edilmesinden 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 [12]. 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 [13]. Aynı zamanda iki türbülans modelinin (Spalart-Allmaras ve 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 çarpma 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 [14].

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 katsayısını 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 [15].

Özcer ve arkadaşları, Fensap-ICE çözücüsünün boncuklanma ve çoklu adım yöntemlerinin NACA0012 ve SC1095 kanat profilleri üzerinde oluşan camsı buz yapısını nasıl etkilediğini incelemiştir. Çoklu adımın tekli adımdan daha doğru sonuçlar verdiğini görmüşlerdir. Boncuklanma modelininse buz birikim şekli üzerinde önemli bir etkiye sebep olduğu sonucuna varmışlardır [16].

Crocoe ve arkadaşları Ansys Fensap-ICE çözücüsü kullanarak NACA0012 kanat profili üzerinde bir buzlanma analizi gerçekleştirmişlerdir. Buzlanma oluşumuna neden olan boncukların hareketini incelemek için lagranian yaklaşımı kullanmışlardır. Analizler 0° derece atak açısında, çok büyük su damlacıkları kullanılarak, camsı buzlanma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmayı literatürde yer alan buzlanma rüzgar tüneli test sonuçlarıyla doğrulamış, oldukça yakın sonuçlar bulmuşlardır [17].

Ayan yaptığı doktora tezinde öz kaynaklarla geliştirilmiş TAICE buzlanma tahmini aracına sürüklenme katsayısı, ısı transferi, faz değişimi, çarpma, erozyon ve buz birikimi modelleri ekleyerek yeni kabiliyetler kazandırmış, kanat profili, motor hava alığı ve pitot tüpü gibi bazı 2-B ve 3-B parçalar üzerinde farklı buzlanma tipleri için buz birikimi hesaplamaları yapmıştır [18].

Fenar yapay sinir ağı kullanarak uçaklar üzerinde meydana gelebilecek buzlanmayı tahmin etmeye çalışmıştır. Bu amaç doğrultusunda buzlanmaya neden olabilecek parametreleri bulup insan beyninin bilgi işleme yöntemine benzeyen yapay sinir ağını eğitmiştir. Farklı ağ yapılarını deneyerek bulduğu sonuçları literatüre sunmuş bu yöntemin buzlanma tahmini için kullanabileceğini göstermiştir [19].

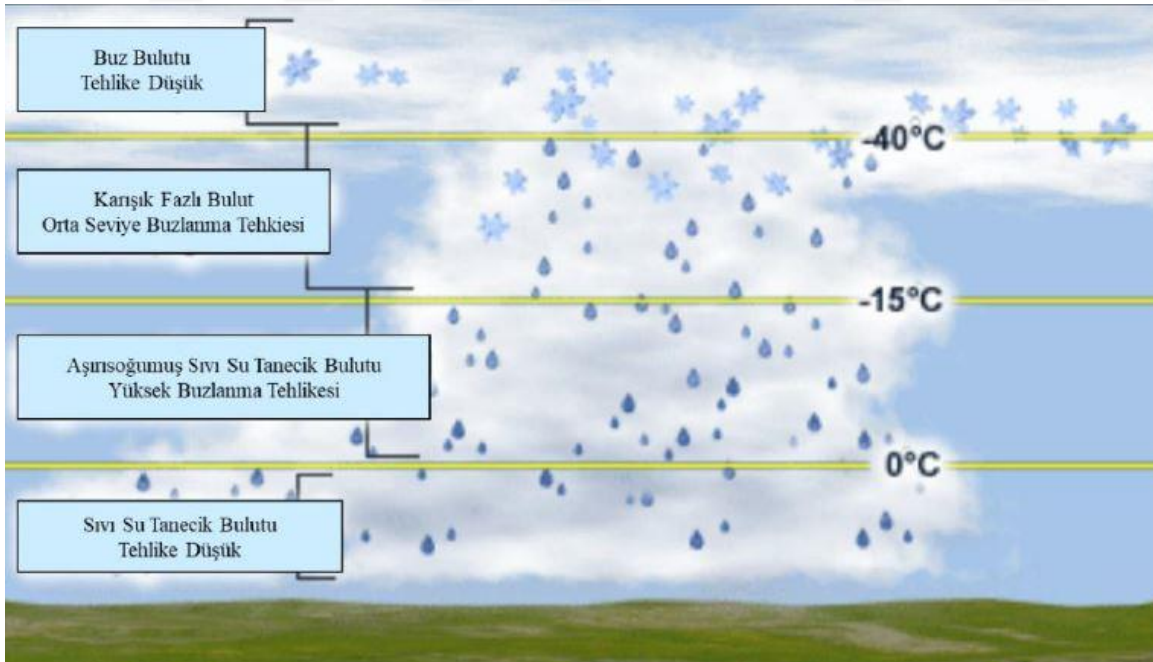
Akbal ve arkadaşları buzlanmayı etkileyen tanecik çapı ve sıvı su içeriği faktörlerinin buzlanma üzerindeki etkisini literatür de bulunan çalışmaları kullanarak doğrulamış, seçilen atmosferik değişkenler ile oluşan buz birikimleri arasında bir ilişkinin kurulabilmesini amaçlamışlardır. Bu çalışma ile buzlanma riskinin görülebileceği hava koşullarında gerçekleştirilen uçuş esnasında oluşan buz birikiminin alanı, çevresi ve aerodinamik performansa olan etkisi ikinci dereceden polinom denklemi ile belirli limitler altında tahmini yapılabilmektedir [20].

Bu çalışmada Fluent yazılımı kullanılarak akış alanı, damlacıkların yörünge denklemlerinin çözümü, çarpma verimi ile buz oluşumu hesaplamaları Fensap-ICE yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Tezin temel amacı literatürde yer alan buzlanma rüzgar tüneli testlerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği denklemlerini temel alan bir program kullanarak doğrulamak ve farklı şartlar altında kanat üzerinde oluşacak buzlanmanın tahmin edilmesini sağlamaktır. Bu hesaplamalar sonucunda buzlanma oluşumunun kanadın aerodinamik özelliklerine etkisi, kanadın sürüklenme ve kaldırma kuvvetlerinde meydana gelecek değişikliklerin incelenmesi amaçlanmıştır.



3. BUZLANMA FİZİĞİ

Havacılık sektöründe buzlanma, atmosferik koşulların ortaya çıkardığı ve uçuş emniyetini tehlikeye sokan önemli problemlerden biridir. Buzlanma havadaki buhar veya sıvı haldeki nemin herhangi bir nedenle soğuyup, yüzeyler üzerinde donarak katılaşmasıdır. Buzlanma, uçakların performansına ve uçuşuna etki eden belli başlı meteorolojik olaylardan biridir [21]. Uçuş yüksekliği, hava koşulları, nem ve sıcaklık gibi çevresel faktörler buzlanmayı önemli ölçüde etkiler. Buzlanmanın oluşması için hava sıcaklığının sıfırın altında olmasına her zaman gerek yoktur. Uçak kanat yüzeyinin sıfırın birkaç derece üzerinde olması çığ, yağmur, kar taneciklerinin kanat üzerinde buz oluşturması için yeterlidir. Aynı zamanda buzlanma sisin yoğunlaşması sonucunda da oluşabilir. Buzlanma uçak havada seyir halinde olabileceği gibi, uçak yerdeyken de meydana gelebilir. Şekil 3.1’ de uçağın bulunduğu irtifaya bağlı atmosfer sıcaklığına göre buzlanma potansiyelleri hakkında bilgiler bulunmaktadır. Buzlanma riskinin en yüksek olduğu sıcaklık aralığı 0 ve -15 derece aralığıdır. -40 derecenin altındaki sıcaklıklarda buzlanma görülme olasılığı oldukça düşüktür. Bunun nedeni havada buz oluşumu için yeterli nemin bulunmamasıdır.






Şekil 3.1. Atmosfer sıcaklığına göre buzlanma potansiyelleri [22]

Çizelge 3.1’ de bulut tipi ve sıcaklığının buzlanma oluşumuna etkisi verilmiştir. Uygun şartlar sağlandığı takdirde uçak kontrol yüzeyleri (dönüş, yükselme dümeni, flaplar), uçuş

ekipmanları ve uçak üzerinde farklı fiziksel yapılarda buzlanma meydana gelir. Buzlanma yoğunluğu, buzun miktarı ve şekli, yüzeyin geometrik özelliği, uçuş hızı gibi aerodinamik parametrelerle birlikte hava sıcaklığına, su damlacık çapına, sıvı su içeriği ve bulutlarda maruz kalınan süre gibi meteorolojik parametrelere de bağlıdır.

Çizelge 3.1. Bulut tipi ve sıcaklığın buzlanma oluşumuna etkisi

Bulut Tipi	Sıcaklık (°C)	Buzlanma Seviyesi
Kümülüs 	$-20^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$	Yüksek
	$-40^{\circ}\text{C} < T < -20^{\circ}\text{C}$	Orta
	$T < -40^{\circ}\text{C}$	Düşük
Stratüs 	$-15^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$	Yüksek
	$-30^{\circ}\text{C} < T < -15^{\circ}\text{C}$	Orta
	$T < -30^{\circ}\text{C}$	Düşük
Yağmur ve çiselti 	$T < 0^{\circ}\text{C}$	Yüksek

Kümülüs tipi bulutlar, genellikle kararsız hava şartlarında oluşan, dikey yönde gelişim gösteren soğuk bulutlardır. Bu bulutların, taban seviyeleri stratüs bulutları kadar alçak

olabilir, ancak bazen düşey yönde stratosfere kadar yükselebilirler (10-15 km). Gökyüzünde pamuk şeklinde belirgin bir görünüme sahiptirler. Kümülüs tipi bulutlar genellikle soğuk cephe geçişleriyle ilişkilendirilirler. Bu bulutların içerisindeki sıcaklık dağılımı nedeniyle, alt kısımlarında sıvı su damlaları, orta kısımlarında aşırı soğumuş sıvı su damlaları ve buz kristalleri bir arada bulunabilir. Üst kısımlarında ise genellikle buz kristalleri hakimdir.

Stratüs tipi bulutlar, genellikle kararlı atmosferik koşullarda oluşan alçak seviyeli sıcak bulutlardır. Bu bulutlar, düşey yönde fazla gelişme göstermeyen, geniş alanlara yayılan, kalın ve koyu renkli yapılara sahiptir. Stratüs bulutları genellikle sağanak yağmur getirir. Sıcak cephe geçişleriyle ilişkilendirilirler. Bu bulutların alt seviyelerinde meydana gelen donan yağmur ve çisenti, buzlanma riski oluşturabilir, bu nedenle bu durumlarda dikkatli olunmalıdır. Ayrıca, bulutun içindeki sıcaklığın sıfırın altına düştüğü durumlarda, buzlanma riski artar, bu nedenle bulutun üstünden veya altından geçerken buzlanmayı önlemek önemlidir [23].

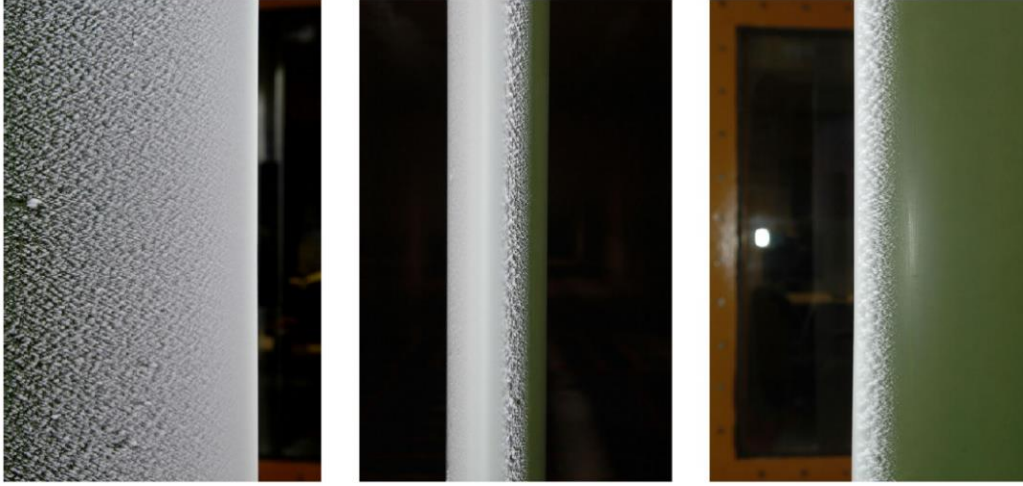
3.1. Buzlanma Tipleri

Buzlanma, uçak kazalarına neden olan en ölümcül nedenlerden biridir. Buzlanma genellikle uçağın aşırı soğuk bulutlar içinden geçtiği esnada oluşur. Sıfır derece altında aşırı soğuk bulutlar yapılarında sıvı halde bulunan aşırı soğuk su damlacıklarını taşır. Bu damlacıklar uçak yüzeyine çarptıkları esnada hızlı biçimde katılarak donmaya başlar [24]. Uçaklarda buzlanma temel olarak kırağı, şeffaf ve karışık tipte buzlanma olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Görünüşleri, sıvı su içerikleri ve yoğunlukları bakımından birbirinden ayrılan bu buzlanma tiplerinin oluşum koşulları da farklı özellikler göstermektedir. Ayrıca buzlanma oluşumundan sonra ortamdaki değişimlerden veya buz giderici sistemlerden kaynaklı olarak gaga tipi buzlanma, geri dönen buzlanma, döngüler arası buzlanma oluşabilmektedir. Buzlanma şekilleri hakkındaki detaylı bilgi bir sonraki başlık altında açıklanmıştır.

3.1.1. Kırağı buzlanma

Çizelge 3.1' de verilen stratüs tipi bulut ortamında kırağı buzlanma oluşumu gözlemlenmektedir. Aşırı soğutulmuş küçük su damlacıkları sıfırın altındaki sıcaklıkta bir

yüzeyle temas ettiğinde hızla donarsa kırağı buz oluşur. Donan damlacıkların küçük olması ve neredeyse anında olan buzlanma, küçük buz parçacıkları ve sıkışmış hava karışımının oluşmasına yol açmaktadır. Genellikle düşük hava hızı, sıcaklık ve sıvı su içeriği olan küçük boyutlu damlacıklar olduğunda görülür. Oluşan buzlanma kaba kristalli (kristalin yapısı nedeniyle kırılmalıdır) ve mattır. Şekil 3.2’ de bir kanat üzerindeki kırağı buzlanmanın oluşumu görülmektedir. Uzaktan bakıldığında beyaz renkte görünür. Yüzeyle çok fazla tutunamayan kırağı buz, kanatlar üzerine yayılamaz ve dışa doğru keskin çıkıntılar halinde birikir. Buzlanmayı önleyici veya giderici sistemler kullanılarak giderilebilir.



Şekil 3.2. Bir kanadın basınç yüzeyi, ön kenarı ve emme yüzeyi üzerindeki kırağı buzlanma [25]

3.1.2. Şeffaf (Camsı) buzlanma

Camsı buz, sadece küçük bir kısmı hemen donan daha büyük aşırı soğutulmuş su damlacıkları ile oluşur. Geri kalan sıvı su ise geri akış (runback) hareketi yapar ve kademeli olarak donar. Daha ılık hava sıcaklığı, yüksek sıvı su içeriği ve yüksek hava hızı su damlacıklarının hemen donmasını zorlaştırmaktadır. Sonuçta oluşan buzlanma, nispeten az hava kabarcığı içerdiğinden şeffaf veya yarı saydamdır. Donma, suyun eşit bir şekilde dağılabileceği kadar yavaşsa, elde edilen şeffaf buz tabakasının saptanması zor olabilir çünkü damlacıklar büyüdükçe ve donma hızı yavaşladıkça, buzun şeffaflığı artar. Bazen, belirli sıcaklık ve damlacık boyutu kombinasyonları, hem üst hem de alt ön kenar yüzeylerinden çıkıntılarla birlikte ön kenarda çift koçboynuzu şeklinde buzlanma oluşmasına neden olabilir. Şekil 3.3’ te bir kanadın üzerinde boynuz tipi buzlanma

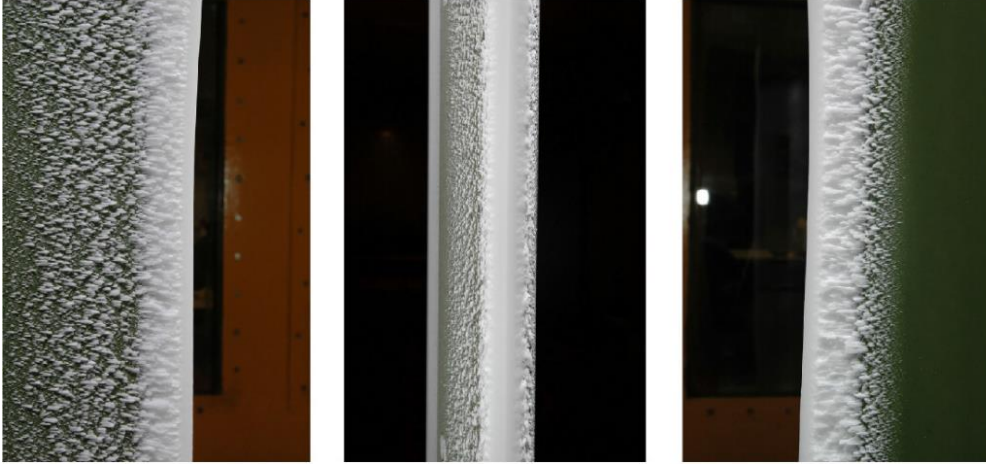
görülmektedir. Bu boynuzların, bir ön kenar boyunca geniş bir aralıkta çeşitli formlarda meydana geldiği gözlenmiştir ve camsı buzun kırağı buzdan daha sağlam ve yoğun bir yapıya sahip olması nedeniyle, daha büyük boyutlara ulaşabilir ve giderilmeleri oldukça zordur. Oluşturdukları şekil ve içerikleri sebebiyle deneysel olarak matematik modellerinin oluşturulması veya simüle edilmesi, kırağı buza göre daha zordur [26].



Şekil 3.3. Bir kanadın basınç yüzeyi, ön kenarı ve emme yüzeyi üzerindeki camsı buzlanma sonucu oluşan boynuz tipi buzlanma [25]

3.1.3. Karışık buzlanma

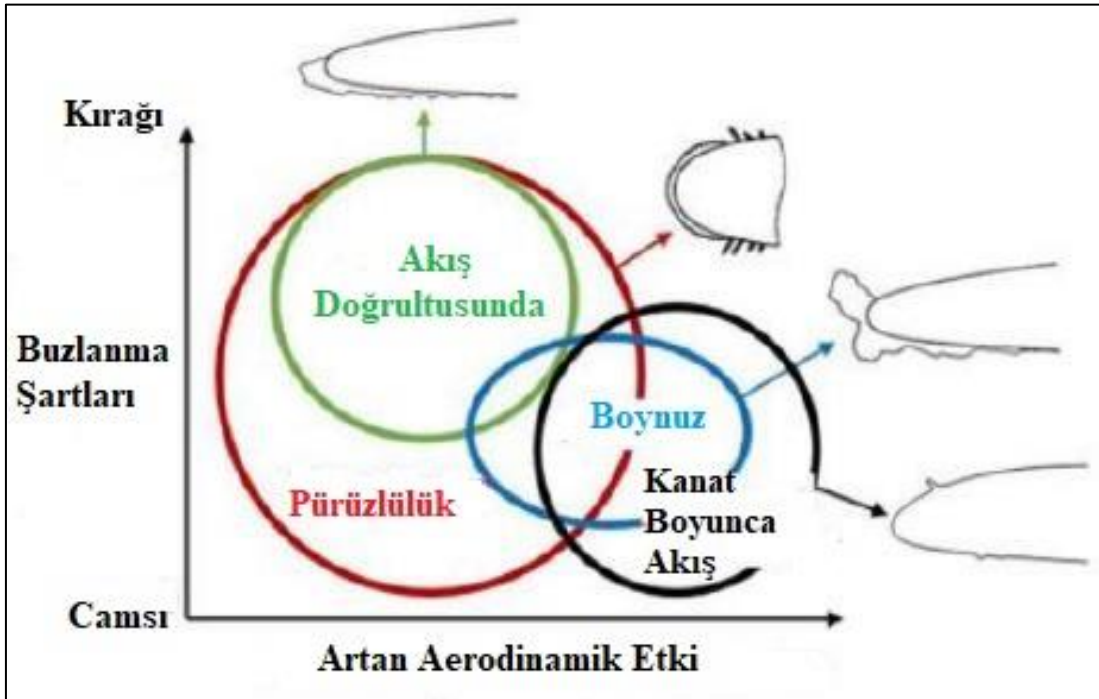
Karışık buzlanma -8°C ile -15°C arasında meydana gelir ve kırağı ve camsı buz görünümünün eşzamanlı bir karışımıdır. Şekil 3.4' te bir kanat üzerinde oluşan karışık tipte bir buzlanma görülmektedir. Buzun berraklığı, rengi ve şekli, kırağı ve şeffaf buzlanma özelliklerinin bir karışımı olacağından, karışık buzun kokpitten doğru şekilde tanımlanması zor olabilmektedir.



Şekil 3.4. Bir kanadın basınç yüzeyi, ön kenarı ve emme yüzeyi üzerindeki karışık buzlanma [25]

3.2. Buzlanma Şekilleri

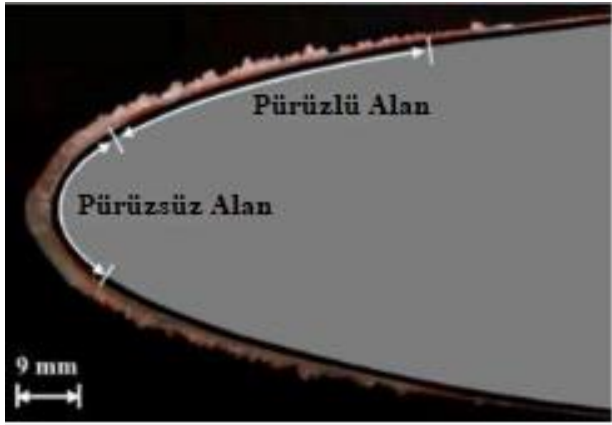
Uçak kanatlarında buzlanma birikimi 4 farklı buzlanma geometrisi şeklinde görülmektedir. Bunlar, pürüzlü, boynuz (gaga) şekilli, akış doğrultusunda ve kanat doğrultusunda buzlanmadır. Daha fazla bilgi için Bragg ve diğerlerinin yaptığı çalışmadan faydalanılabilir [27]. Şekil 3.5’ te görüleceği üzere buzlanma geometrisini uçuş aerodinamiğine etkisi görülmektedir.



Şekil 3.5. Buzlanma şekillerinin uçuş aerodinamiğine etkisi [27]

3.2.1. Pürüzlü buzlanma

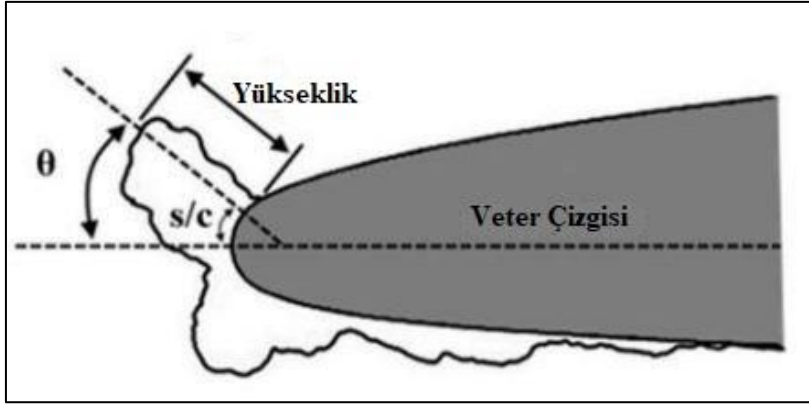
Buz birikiminin başlangıç aşamasında veya kısa süreli buzlanma oluşumunda görülen bu buzlanma şekli diğer geometrilere dönüşme eğilimindedir. Hem şeffaf hem de kırağı buzlanma şekillerinde oluşabilir. Şekil 3.6' da pürüzlü buzlanma yapısı görülmektedir. Bu buzlanma türünün en belirleyici özelliği kanat yüzeyindeki sürtünmeyi büyük ölçüde arttırmasıdır. Bundan dolayı yüzey performansı direkt olarak etkilenir.



Şekil 3.6. Pürüzlü buzlanma [28]

3.2.2. Boynuz şekilli buzlanma

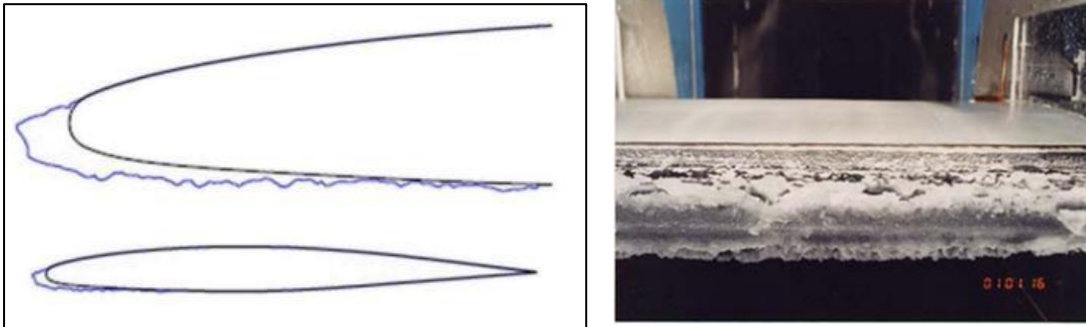
Boynuz şekilli buzlanma şeffaf ve karışık buzlanma şekillerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.7' de görüleceği üzere şeklinin boynuz yapısına benzemesinden dolayı bu adı almıştır. Kanadın hücum kenarında tek veya çift boynuz şeklinde görülebilmektedir. Uçak hızının yüksek olduğu durumlarda görülme olasılığı artmaktadır. Kanat yüzey sıcaklığının donma noktasına yakın olduğu ve damlacık boyutlarının büyük olması durumunda damlacıkların bir kısmı donarken bir kısmı da akış yönünde ilerleyip donmaktadır. Bu duruma geri akış denilmektedir. Uçak kanadı hücum kenarında çift boynuzlu bir buz tabakasının görülmesinin ana sebeplerinden biri budur.



Şekil 3.7. Boynuz şekilli buzlanma [28]

3.2.3. Akış doğrultusunda buzlanma

Bu buzlanma genellikle pürüzlü buzlanma ve kırağı buzlanma koşullarında özellikle düşük sıcaklıklarda oluşmaya meyillidir. Kanat yüzeyine çarparak donan su damlacıkları yüzey profilini takip ederek yayılırlar. Bu durum buzlanma şeklinin kanat şekline benzemesine neden olarak aerodinamik akış üzerinde en az etkiye sahiptir. Bununla beraber buzlanma süresi arttıkça buz kalınlığı artar ve buzlanma şekli boynuz tipine benzer bir geometri oluşturabilir. Şekil 3.8’ de su damlacıklarının akış doğrultusunda donarak oluşturduğu form görülmektedir.

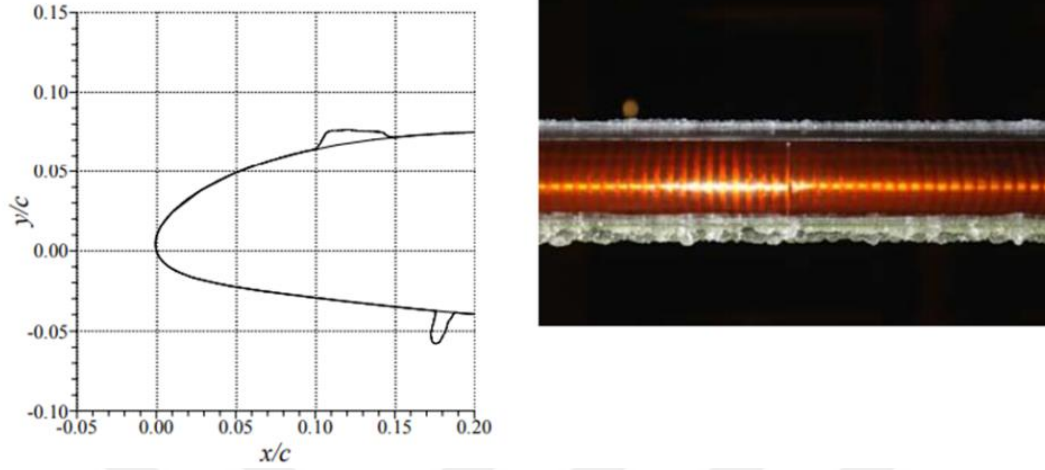


Şekil 3.8. Akış doğrultusunda buzlanma [28]

3.2.4. Kanat doğrultusunda buzlanma

Şekil 3.9’ da gösterildiği üzere bu buzlanma şekli uçağın aerodinamiği üzerinde en fazla etkiye sahiptir. Bu nedenle en zararlı olan buzlanma türüdür. Genellikle büyük su

damlacıkları (super large droplet) tarafından oluşturulmasına rağmen diğer damla boyutlarında da görülebilmektedir.



Şekil 3.9. Kanat doğrultusunda buzlanma [28]

Kanat doğrultusunda buzlanma kanadın alt ve üst yüzeylerindedir. Bu buz şekli genellikle ön kenara monte edilen buz önleyici sistem ve cihazlar nedeniyle oluşmaktadır. Buzlanma önleyici sistemler, kanatların ön kenarında oluşan buzu çözerek veya çarpan tüm damlacıkları buharlaştırmak ısıtır, ancak bazen bu cihazlar tüm suyu buharlaştıramaz. Kalan su kanadın arkasına doğru akar ve eriyen buz kanadın geri kısımlarında yeniden oluşur. Bu durumda kanat üzerinde kalıcı bir buzlanma oluşur. Şekil 3.10'da bir kanadın alt ve üst yüzeyindeki buzlanma görülmektedir.



Şekil 3.10. Kanadın alt ve üst yüzeyinde yeniden buzlanma birikimi [29]

3.3. Buzlanmaya Etki Eden Faktörler

Buzlanma miktarı ve şekli, sıcaklık, sıvı su içeriği, damlacık boyutu ve hız gibi meteorolojik ve aerodinamik etkenlere bağlıdır. Bununla beraber uçağın uçtuğu yükseklik, içinden geçtiği bulut türü ve hücum açısı buzlanmayı dolaylı olarak etkileyen diğer faktörlerdir.

3.3.1. Sıcaklık

Buzlanma en sık statik hava sıcaklığının $+2^{\circ}\text{C}$ ile -20°C arasında olduğunda görülür, ancak buz bu aralığın dışında da birikebilir. Ortamdaki nemi oluşturan sıvı su içeriği, teorik sınır olan -40°C 'ye kadar aşırı soğuk bir sıvı olarak mevcut olabilir ancak daha düşük sıcaklıklarda sıvı olarak gözlemlenmez. Bu sebepten dolayı -40°C 'nin altındaki sıcaklıklarda buzlanma meydana gelmez. Uçak yüzeyi donma noktasının altındaysa, statik hava sıcaklığı 0°C 'nin üzerinde olduğunda uçakta buz oluşabilir. Bu durum, uçak donma noktasının altındaki sıcaklıklara indiğinde meydana gelebilir. Yerel akışın hızlanması nedeniyle yerel sıcaklığın donma noktasının altına düştüğü bölgelerde de meydana gelebilir.

Sıcaklığın uçak üzerinde görülen buzun miktarı, şekli ve türü üzerinde de önemli bir etkisi vardır. Buz oluşumu sürecinde ortam sıcaklığı, gelen su damlacıklarının konvektif soğumasında rol oynar. Daha tehlikeli buz şekilleri donma noktasına yakın sıcaklıklarda oluşma eğilimindedir. Ayrıca sıvı su içeriğine bağlı olarak sıcaklığın ikincil bir etkisi de vardır. Ortam sıcaklığı ne kadar düşük olursa atmosferdeki ısı da o kadar az olur, dolayısıyla atmosfer daha fazla su buharı tutabilir böylece uçak yüzeyi daha fazla aşırı soğuk su buharı ile karşılaşır.

Buzlanma hava sıcaklığı

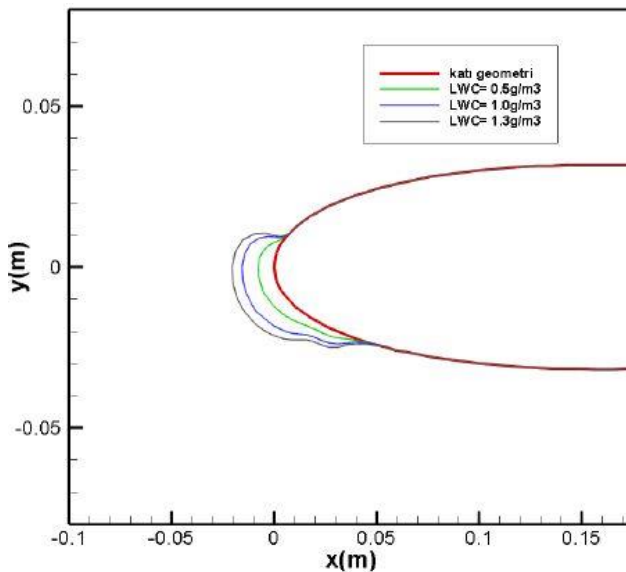
Buzlanma havası sıcaklığı, buz birikiminin hesaplandığı statik sıcaklıktır. Genel durumlarda bu kanat üzerine gelen damlacıkların sıcaklığıdır. Damlacıklar kanat yüzeyine çarptığında üzerlerindeki kinetik enerji ısıya dönüşür ve sıcaklık artar. Kanat üzerindeki toplam sıcaklık

$$T_t = T_s + \frac{c^2}{2C_p} \quad \vee \quad T_t = T_s \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_\infty^2 \right] \quad (3.1)$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Eşitlik 3.1' de verilen ilk eşitlikte T_t toplam (durma) sıcaklığı, T_s çevre havasının statik sıcaklığı, C_p özgül ısı, c ortam sıcaklığındaki havanın ses hızı, alternatif olarak verilen ikinci eşitlikte ise γ adyabatik sabit, M_∞ Mach sayısıdır.

3.3.2. Sıvı su içeriği

Sıvı su içeriği (Liquid Water Content: LWC), birim hacimdeki bulutun içinde bulunan suyun miktarı veya toplam kütlesi olarak tanımlanmaktadır. Sıvı su içeriğinin birimi genellikle 1m^3 bulutun içindeki suyun gram cinsinden kütlesidir (g/m^3). Sıvı su içeriği diğer parametrelerle kıyaslandığında buzlanma üzerinde daha önemli bir etkiye sahiptir. Sıvı su içeriğinin miktarı sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın düşük olduğu durumlarda bulut içindeki buhar kırağı haline gelerek buz kristalleri halini almaktadır. Bu nedenle ortamdaki buz kristali sayısı artarken, soğuk damlacık sayısı azalmakta ve bunun sonucunda da sıvı su içeriği azalmaktadır. Ortam sıcaklığı arttığında ise karışım oranı (buhar/hava oranı) yükseleceğinden sıvı su içeriği de artmaktadır [30]. Yüzeyde maksimum sıvı toplanması için gerekli kombinasyon, yüksek damlacık boyutu ve sıvı su miktarıdır [31]. Şekil 3.11' de sıvı su içeriğinin buzlanma üzerindeki etkisi görülmektedir.



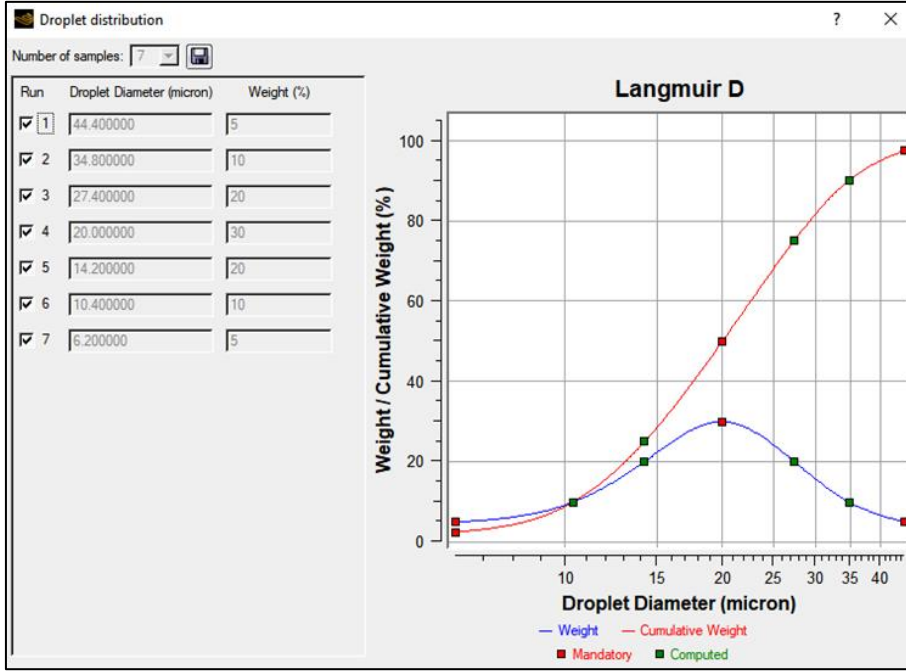
Şekil 3.11. Sıvı su içeriğinin kırağı tipte buzlanmaya etkisi [30]

3.3.3. Damlacık boyutu

Bulut içinde damlacıkların boyutu yükseklikle artma eğilimi göstermektedir [33]. Damlacıkların boyutu arttıkça uçak yüzeyine çarpıp buz oluşturma olasılığı artarken, küçük boyuttaki damlacıkların yüzeye çarpıp sekme ihtimali yüksektir. Bir damlacığın kanat profiline çarpması atalet kuvvetinin büyüklüğü ile orantılıdır. Düşük atalet kuvvetli yani küçük damlacıklar aerodinamik kuvvetlerden daha fazla etkilenirler bu sebeple kanada çarpmayabilirler. Fakat yüksek atalet kuvvetine sahip büyük damlacıkların yörüngeleri düz çizgiler halindedir ve çarpma ihtimali daha fazladır [34].

Sayısal olarak damlacık çarpma analizlerinde temel olarak monodisperse damlacık yaklaşımı kullanılır. Bu yöntemde, uçağın uçtuğu buzlanma bulutunu temsil etmek için tek bir damlacık çapı kullanılır. Gerçekte, buzlanma bulutları yalnızca tek boyutta damlacık içermez; bir bulutta her zaman farklı boyutlarda damlacıklar vardır. Damlacık çapının tek bir değeri yerine, buluttaki damlacıkların medyan hacim çapı (MVD) monodisperse bir değer olarak seçilir. Daha kesin bir damlacık çözümü gerekiyorsa, damlacık boyutlarının bir dağılımı çözülebilir ve bu dağılımın medyan hacim çapı bulutunkiyle eşleştirilir.

Medyan hacim çapından daha büyük boyutlu damlacıklar, kanadın üst ve alt kısımlarında daha geriye çarparak ince fakat pürüzlü bir buz tabakası oluşturabilirler. Büyük boyutlu damlacıkların etkilerini hesaba katmak için damlacık dağılımını dikkate alarak analizler yapılabilmektedir. Langmuir, farklı uçuş irtifalarında çeşitli çap büyüklüklerine sahip damlacıkların kümülatif ağırlık dağılımı bulunma yüzdelerini ve çap değerlerini veren damlacık dağılımı modelleri geliştirmiş ve 4 farklı damlacık dağılımı önermiştir; bunlar Langmuir B, C, D ve E olarak adlandırılmaktadır [5].



Şekil 3.12. FENSAP programında verilen Langmuir D dağılımı [32]

Şekil 3.12' de Langmuir D dağılımı görülmektedir. Langmuir dağılımları maksimum 0,5 mikron çap büyüklüğüne sahip olan damlacık dağılımları için kullanılmaktadır. Verilen grafikte damlacık çapları yatay eksen, bulutta bulunan belirli bir çapta bulunan damlacıkların yüzdesi (ağırlık yüzdesi) ise dikey eksen tanımlanmıştır. Mavi eğri bireysel ağırlık yüzdesini, kırmızı eğri ise kümülatif ağırlık yüzdesini gösterilmektedir. Kırmızı eğri üzerindeki veri noktaları ise, kümülatif ağırlık aralıklarının orta aralığında çizilmiştir. Örneğin, medyan hacim çapı 20 mikronluk damlacık, %35 ile %65' lik kümülatif ağırlık aralığını kapsamakta ve bu nedenle kırmızı eğri üzerinde %50 kümülatif ağırlıkta çizilmektedir.

Ancak buzlanma rüzgar tüneli koşullarında damlacık çapı gerçek ortam şartlarında dağılımla eşleşmediğinden ve Langmuir dağılımının kullanımı uygun olmamaktadır. Bu yüzden rüzgar tüneli işletme verilerinin bir parçası olarak kendi dağılımlarını listelemektedir. Bu dağılımlar dikkate alınarak sayısal analizleri gerçekleştirmek uygun olacaktır.

Aşırı soğuk büyük damlacıklar

Buzlanma olaylarının çoğu, çapı 10 ila 50 mikron (yaklaşık ince insan saçı boyutunda) olan damlacıklar tarafından meydana gelir. Çapı 50 mikrondan büyük olan damlacıklar aşırı soğuk büyük damlacıklar (SLD) olarak adlandırılırlar ve 100 kata kadar daha büyük çaplara sahip olabilirler (1000 mikron=1 mm). Şekil 3.13'te bu boyuttaki damlacıkların oluşturduğu buzlanma görülmektedir.



Şekil 3.13. Aşırı soğuk büyük damlacıklar

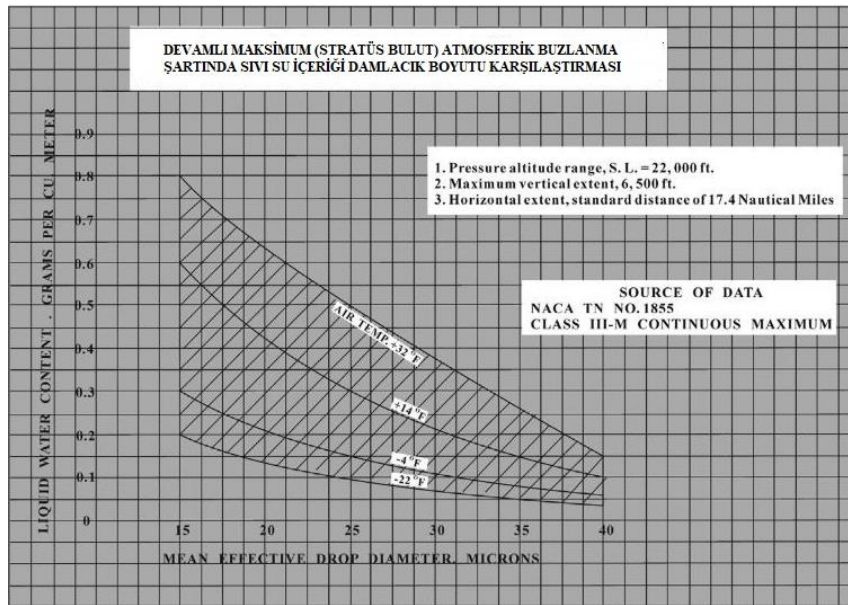
Buzlanma giderici ve önleyici korumaya sahip bir uçakta büyük damlacıklar korunan bölgelerin oldukça gerisine isabet edebilirler. İsbet eden bu büyük damlacıklar buz koruma sisteminin arkasında buz oluşumuna sebep olur ve bu buz birikimi yalnızca eritme veya aşamalı süblimasyon işlemiyle giderilebilir. Buz koruma sistemi çalışırken ve uçağın ön kenarındaki buzu giderirken, koruma sisteminin arkasındaki buz hızla bir çıkıntıya dönüşebilir. Böyle bir çıkıntı, kanat profili üzerindeki akışı önemli ölçüde bozmamaktadır ve kullanım sorunlarına ve/veya performans düşüşüne yol açmaktadır.

3.3.4. Sıvı su içeriği ve damlacık boyutu arasındaki ilişki

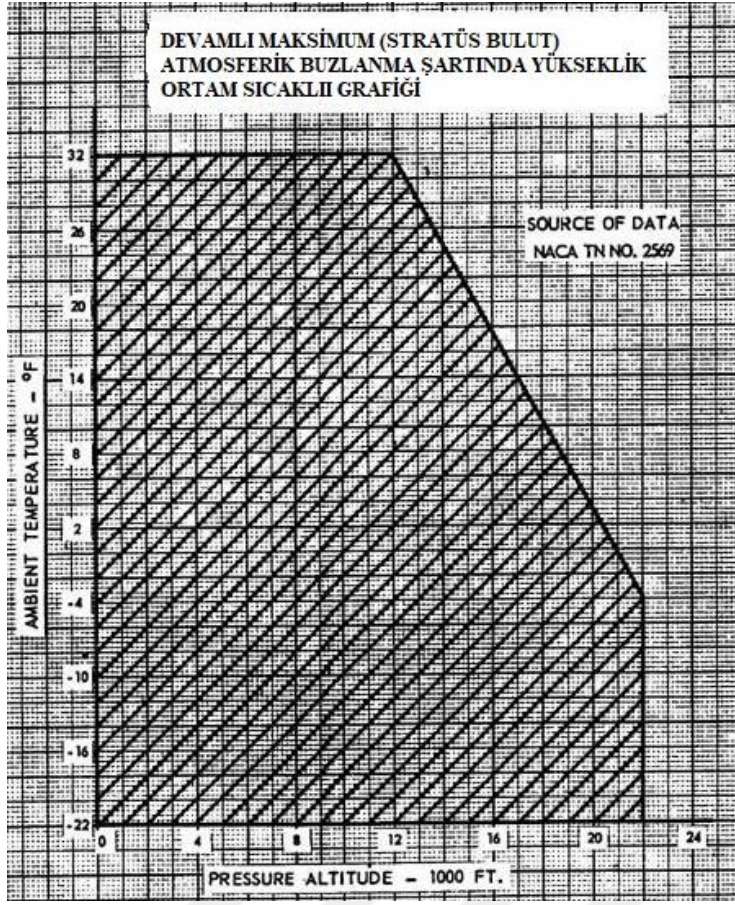
Atmosferdeki buzlanma oluşumu, buluttaki sıvı su içeriği, su damlacıklarının boyutu ve ortam sıcaklığı ile ilişkilidir. Sıvı su içeriği bulut türleriyle yakından ilgilidir. Su içeriği farklı bulut türlerine göre büyük ölçüde değişir.

LWC, uçak buzlanmasını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Belirli bir hava kütleğinde bir uçağın çarpabileceği aşırı soğumuş su damlacıklarının miktarını yansıtır. LWC ne kadar yüksek olursa buzlanma riski de o kadar artar. Hava kütleğinde (veya bulutta) bulunan sıvı su miktarı, mevcut enerjiye ve sıcaklığa bağlı olduğundan, en ciddi buzlanma riski, -15°C (stratüs tipi bulut) veya -20°C 'nin (kümülüs tipi bulut) üzerindeki ortam sıcaklıklarında meydana gelme eğilimindedir. Kümülüs tipi bulut genellikle stratüs tipi bulutlara göre kararsızdır. Kümülüs tipi bulutun iç hava akışı nispeten yoğundur, bu da onu içeride daha enerjik hale getirir ve aynı zamanda daha fazla aşırı soğutulmuş su damlacıklarını barındırır, bu da daha yüksek sıvı su içeriğine neden olur.

Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (NACA) tarafından yayımlanan Federal Havacılık Düzenlemeleri raporunun 25. bölümü (FAR 25) Ek C'de, stratüs tipi bulutlar için sürekli maksimum buzlanma koşullarına ait üç parametrenin ilişkisini gösteren grafik Şekil 3.14'te yer almaktadır. Bu grafikte sıcaklık değerleri -30°C ile 0°C arasında, sıvı su içerik değerleri $0,2\text{ g/m}^3$ ile $0,8\text{ g/m}^3$ arasında ve medyan damlacık çapları 15μ ile 40μ arasında değişmektedir. Medyan hacim çapları Langmuir dağılımları kullanılarak belirlenen değerlerdir. Bu grafik ile herhangi iki parametrenin bilinmesi durumunda diğer parametrenin değeri tahmin edilebilmektedir.



Şekil 3.14. Sıvı su içeriği ve damlacık boyutu arasındaki ilişki (FAR-25 Ek C) [32]



Şekil 3.15. Yükseklik-ortam sıcaklığı grafiği (FAR-25 Ek C) [32]

Şekil 3.15'te basınç yüksekliği ile çevre sıcaklığı arasındaki ilişki görülmektedir. Basınç yüksekliği, uçağın performans hesaplamalarında büyük rol oynamaktadır. Alçak basınçlı havada hava molekülleri dağınıktır ve ortamda fazla hava bulunmaz. Hava basıncı yüksek olduğunda ise, bu hava molekülleri daha sıkı bir şekilde toplanır ve hava daha yoğun hale gelir. Uçak performansı bu yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir. Pervane, itme kuvveti üretmek için daha fazla hava molekülünü ittiğinde daha etkilidir. Kanat, daha fazla hava molekülünü aşağı doğru ittiğinde daha fazla kaldırma kuvveti üretir ve motor, silindirlere yanmak üzere daha fazla hava molekülü gönderdiğinde daha fazla güç üretir. Atmosferde yukarıya doğru çıkıldıkça havanın basıncı değişir. Daha düşük irtifalarda, uçak, üzerindeki tüm hava moleküllerinin sıkıştırma kuvveti nedeniyle aşağıya doğru baskı yaptığından daha yüksek basınçla karşılaşır. Daha yüksek irtifalarda, bu havanın basıncı daha az olduğundan moleküller daha fazla yayılır ve basınç daha düşük olur. Yüksek irtifalarda uçak performansı daha zayıftır.

Bir hava kütlesi ısıtıldığında, molekülleri daha hızlı hareket eder ve daha geniş bir alana yayılır. Bu durum, daha yüksek sıcaklıkların daha düşük basınçlı hava oluşturmasına neden

olur. Yüksek sıcaklıklarda uçak performansı genellikle daha zayıf olur. Hava koşullarındaki değişiklikler, farklı günlerde yüksek ve alçak basınçlı hava sistemlerinin oluşmasına yol açar. Düşük basıncın olduğu günlerde uçak performansı yine zayıflar. Örneğin, atmosfer basıncı deniz seviyesindeki standart 76 cm cıva seviyesinin altına düştüğünde, uçak 244 metre yükseklikteymiş gibi değil, 355 metre yükseklikteymiş gibi performans gösterir. Bu duruma, ortamın basınç yüksekliği denir. Şekil 3.15 farklı basınç yüksekliklerinde ortamda olabilecek sıcaklık değerleri hakkında yorum yapılabilmesine olanak tanır. Bu grafik, uçak performansını etkileyen basınç ve sıcaklık ilişkilerini daha iyi anlamamıza yardımcı olur.





4. MATERYAL METOD

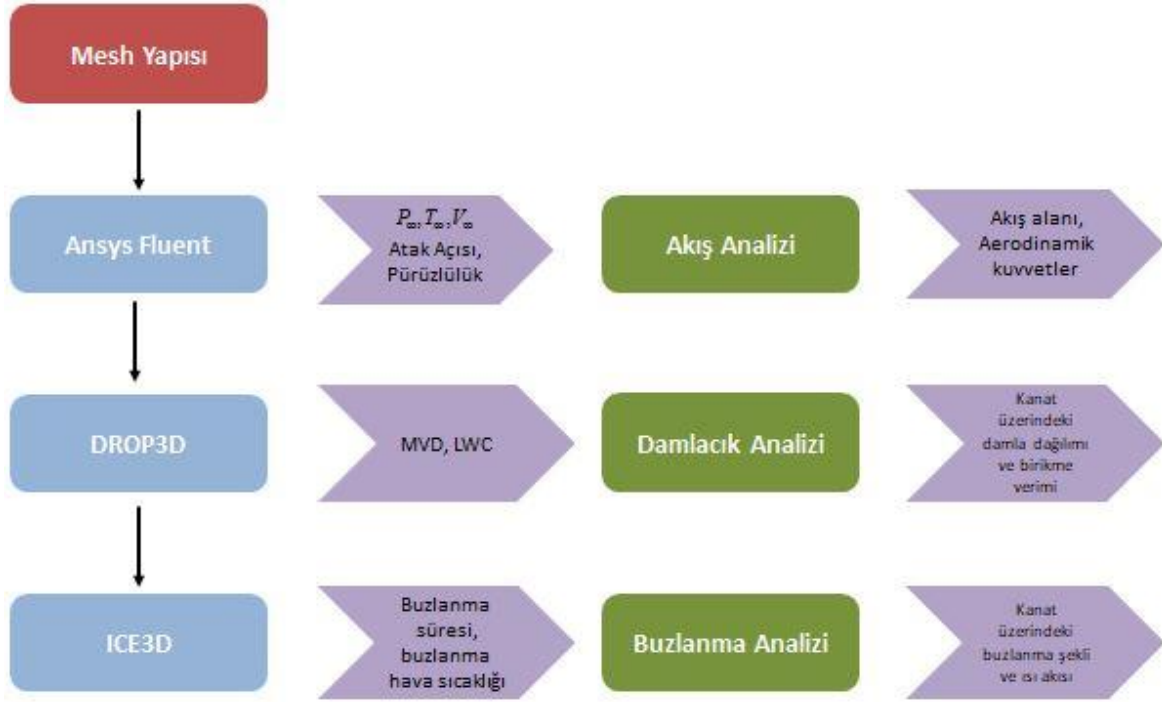
Bu tez kapsamında, buzlanma simülasyonuna başlamadan önce simülasyon sonuçlarının deney verileri ile doğrulanabilmesi için belirli bir kanat profilinin seçilmesi hedeflenmiştir. Addy ve ekibi, NACA23012 kanat profilini kullanarak bir dizi buzlanma testi gerçekleştirmiş ve bu test sonuçlarını 2016 yılında NASA raporu olarak yayınlamıştır [25]. Yaptıkları çalışma, literatüre 120 farklı deney şartı için NACA23012 kanat profilinin buzlanmasıyla ilgili veriler kazandırmıştır.

Bu nedenle, simülasyon sonuçlarını doğrulayabilmek amacıyla NACA23012 kanat profili seçilmiştir. Ayrıca, simülasyon giriş verileri olarak Addy ve ekibinin çalışmasında kullanılan EG1164 kodlu test verileri tezde kullanılmıştır ve bu giriş verileri Çizelge 4.1' de detaylı bir şekilde sunulmaktadır [25].

Çizelge 4.1. Buzlanma Deney Şartları [25]

Atak Açısı	Hız	MVD	LWC	Toplam Sıcaklık	Statik Sıcaklık	Buzlanma Süresi
5°	90,03 m/s	20 µm	0,85 g/m ³	-2,2 °C	-7,5 °C	11,25 dk

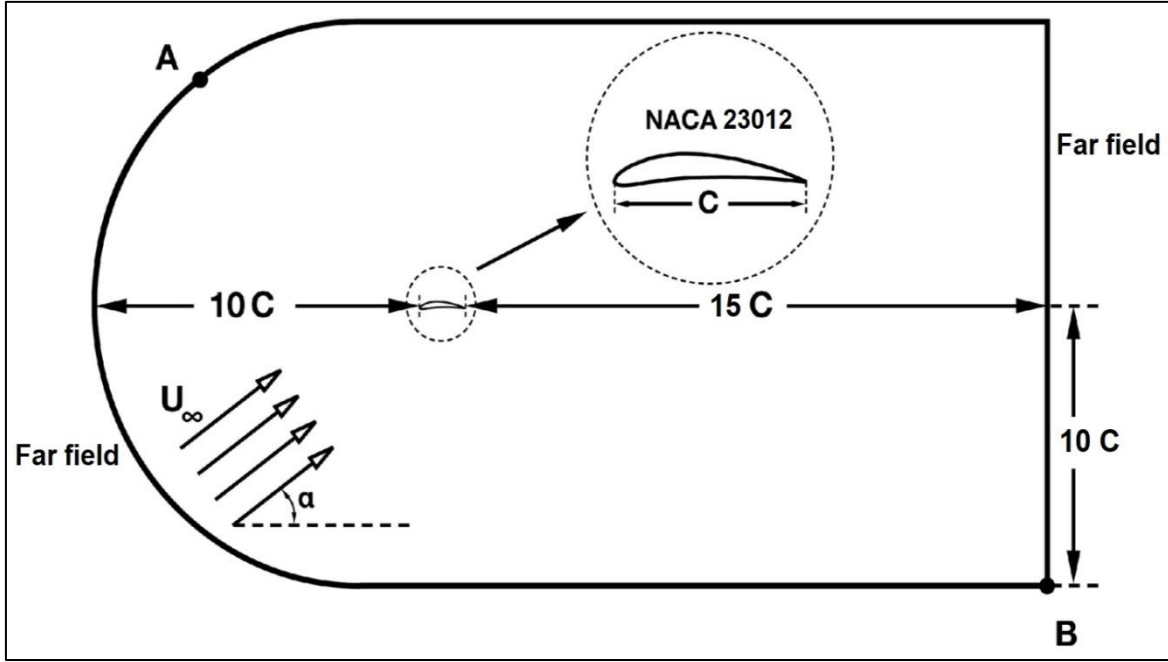
Kanat profili seçiminden sonra buzlanma simülasyonu üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1' de buzlanma analizinin iş akışı verilmiştir. İlk olarak Ansys FLUENT yazılımı ile kanat etrafındaki akış hareketi elde edilmiştir. İkinci aşamada FENSAP yazılımının DROP3D çözücüsü kullanılarak kanat üzerindeki damlacık dağılımı ve birikme verimi hesaplanmıştır. Son aşamada ise FENSAP yazılımının ICE3D çözücüsü kullanılarak kanat üzerindeki buzlanma birikimi ve verimi simüle edilmiştir.



Şekil 4.1. Buzlanma simülasyonu iş akışı

4.1. Çözüm Bölgesi ve Ağın Oluşturulması

Bu tezde 2 boyutlu olarak NACA 23012 kanat profilinin buzlanma birikiminin incelenmesi hedeflenmiştir. Ancak damlacık dağılımı ve buz birikimi hesabında kullanılacak olan FENSAP yazılımının DRO3D ve ICE3D çözümleri 3 boyutlu ortamda çözüm yapabilmektedir. Bu sebepten dolayı 2 boyutlu ortamdaki ağ yapısını kanadın boyu doğrultusunda tek bir hücre kullanarak 3 boyutlu hale getirmek için çözüm bölgesinin ağ yapısı ICFM CFD yazılımıyla oluşturulmuştur. Şekil 4.2’de çözüm bölgesinin boyutları ve sınır şartları gösterilmiştir. Tüm akış bölgesinin sınırında “far field” sınır şartı kullanılmıştır. Bu sınır şartı üzerinde havanın serbest akış hızı Mach cinsinden 0,314 olarak tanımlanmış ve sıcaklık statik sıcaklık olarak girilmiştir. Kanat yüzeyinde sınır şartı kaymaz duvar şartı ve duvar sıcaklığı ise $T_{toplam} + 10 K$ olarak tanımlanmıştır.

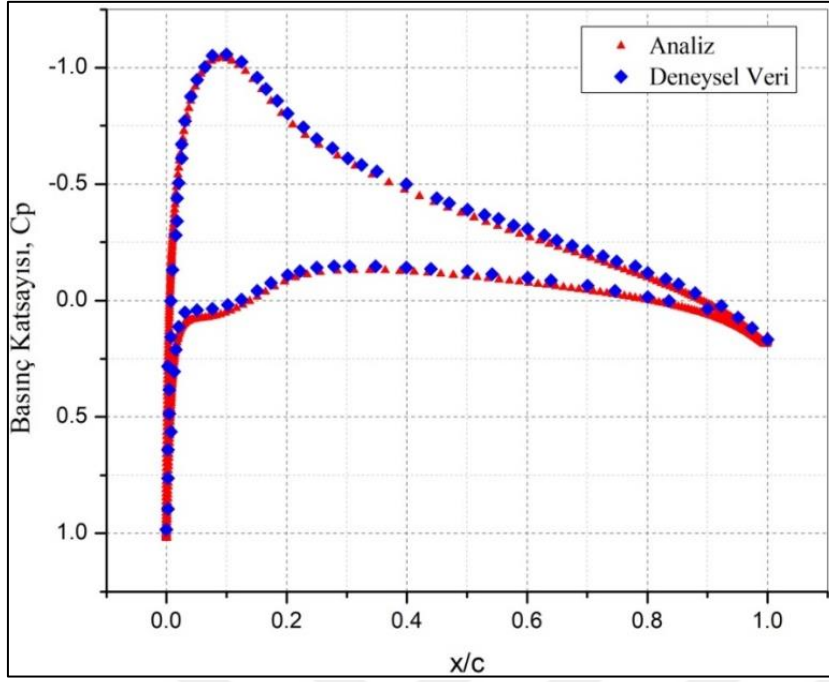


Şekil 4.2. Çözüm bölgesi

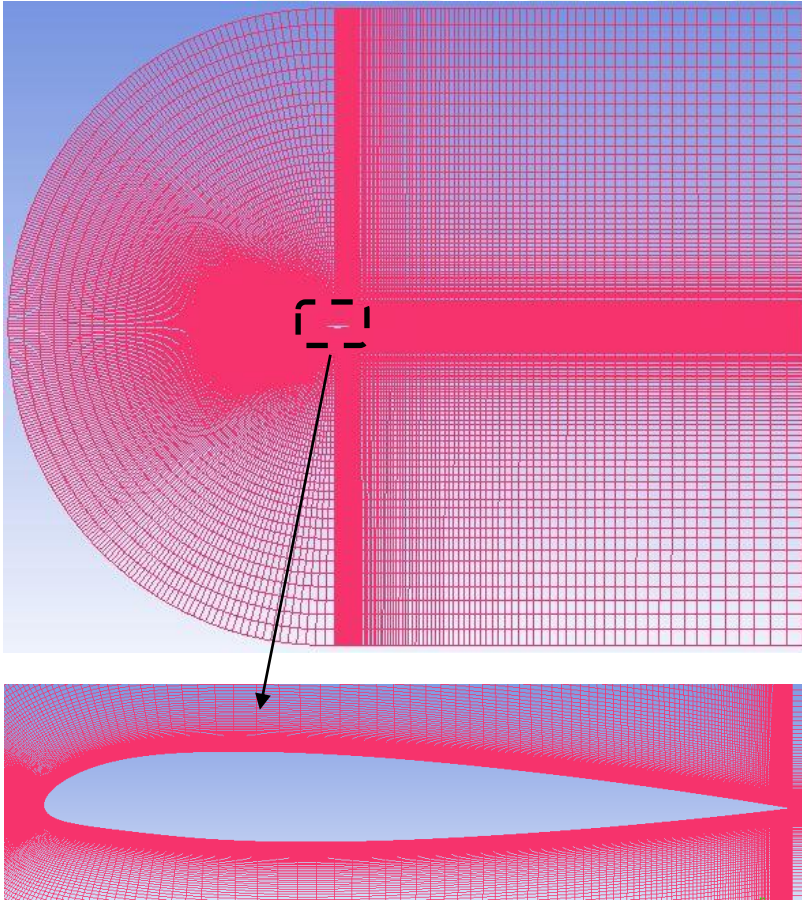
Hesaplama alanındaki havanın akış hareketini doğru bir şekilde belirlemek için kanat etrafındaki viskoz etkilerin dikkate alınması gerekmektedir. Bu amaçla, akış analizinde kullanılan türbülans modeline uygun olacak şekilde bir Y^+ değeri belirlenmiştir. Y^+ değeri 1 alındığında, ağın hücre yüksekliği $3,354 \times 10^{-6}$ m olarak hesaplanmıştır.

Ağ yapısının doğrulanması

Buzlanma analizlerine başlamadan önce çözüm bölgesinin ağ yapısı literatürde yayınlanan [25] bir raporun 35. sayfasında verilen deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Doğrulama için seçilen deneysel çalışma, pürüzsüz yüzeyli bir NACA23012 kanat profili için 2 derece atak açısı, 102.8 m/s akış hızı ve 21°C durma sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısı doğrulama çalışmasında, raporda belirtilen deneysel çalışmanın parametreleri kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucunda kanat profili üzerinde elde edilen basınç katsayısı dağılımları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 4.3' te deneysel veriler ile analiz sonuçları görülmekte olup sonuçların uyumlu olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.4' te ise doğrulanan ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 4.3. Basınç katsayıları [25]



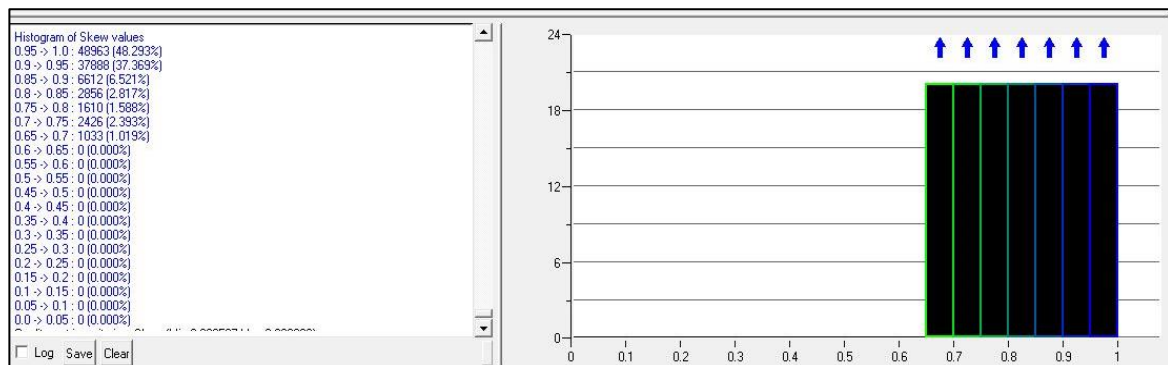
Şekil 4.4. Çözüm bölgesinin ağ yapısı

Ağ kalitesi

Ağ yapısının kalitesi, yapılacak analizler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hücrelerin boyutu, şekli ve sıklığı, ağ yapısının kalitesini belirleyen faktörlerden bazılarıdır. Bu başlıkta analiz için oluşturulan ağ kalitesini belirlemek için skew, orthogonal ve genel ağ kalitesi ölçütleri üzerinde durulacaktır.

Skew bir elemanın maksimum kayma açısı değerini hesaplar. Skewness, hacim ve yüzey elemanları için farklı şekilde tanımlanır. Tüm durumlarda, 1 ideal ve 0 en kötü olasılık olacak şekilde normalize edilir. Hexahedral bir eleman için skewness, her bir yüzey normali ile hexahedralin ağırlık merkezi ve yüzey merkezi tarafından tanımlanan vektör arasındaki en kötü açının normalize edilmiş hali olarak tanımlanır. Üçgen elemanlar için skewness, elemanın alanının, aynı çevre çemberine sahip eşkenar üçgenin alanına oranı olarak tanımlanır. Dörtgenel elemanlar için skewness, önce her bir kenarın orta noktalarını karşı kenarın orta noktasıyla birleştirilerek hesaplanır ve bu kesişim noktasında α açısı bulunur.

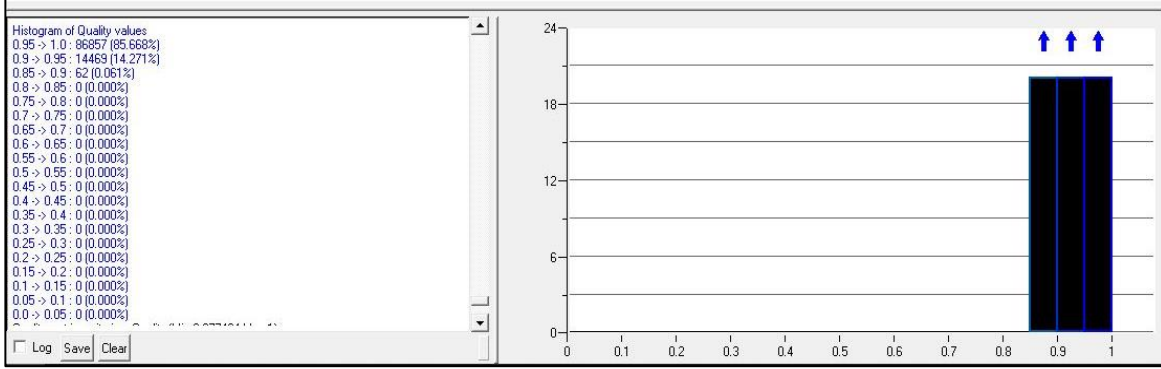
Şekil 4.5' ten görüleceği üzere analiz için oluşturulan ağın skew ağ kalitesi 1 değerine oldukça yakın çıkmıştır. Mesh hücrelerinin en az yüzde sekseni 0,9 değerinin üzerindedir [32].



Şekil 4.5. Skew ağ kalitesi

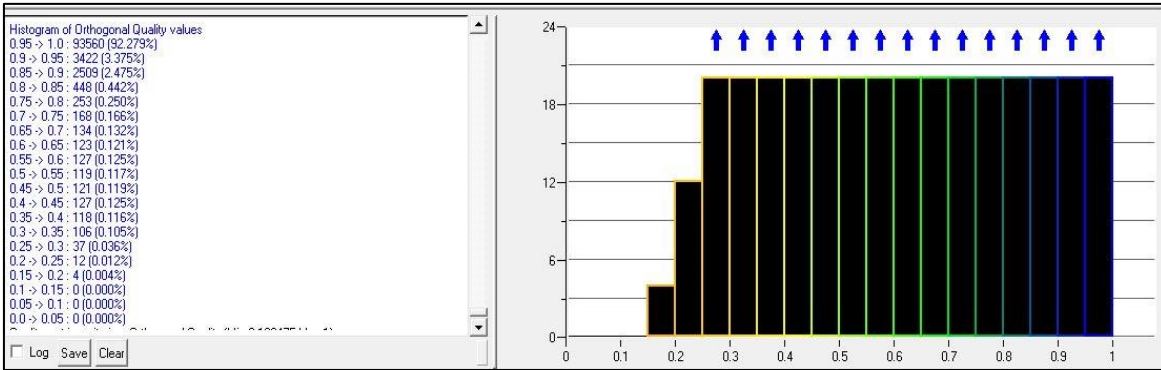
Genel ağ kalitesi değerinin sıfırla bir arasında aldığı değerlere göre belirlenir. Sıfır değeri en kötü mesh kalitesini gösterirken bir değeri en yüksek kalite değerine sahip hücreleri gösterir. Şekil 4.6' dan görüleceği üzere bütün hücrelerin yüzde yüzüne yakını 0,9' la 1

arasında değere sahiptir. Bu ağ yapısının genel ağ kalitesinin oldukça büyük bir değere sahip olduğunu göstermektedir [32].



Şekil 4.6. Genel ağ kalitesi

Orthogonal ağ kalitesinde en iyi hücreler bire yakın değerler alırken en kötü hücreler sıfıra yakın mesh kalitesine sahiptir. Şekil 4.7' den görüleceği üzere hücrelerin % 95'nin orthogonal ağ kalitesi 0,9'dan büyüktür. Bu da ağ yapısının kaliteli mesh hücrelerinden oluştuğunu göstermektedir [32].



Şekil 4.7. Orthogonal ağ kalitesi

4.2. Akış Analizi

Kanat etrafındaki akış analizi Ansys Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Buzlanmanın gerçekleştiği ortamdaki havanın özellikleri statik sıcaklık dikkate alınarak belirlenmiştir. Havanın termal iletkenliği ve dinamik viskozitesi Eş. 4.1 ve Eş. 4.2 de verilen Sutherland eşitlikleriyle hesaplanmıştır [34].

$$\frac{k_{\infty}}{0,0241} = \left(\frac{T_{\infty}}{273} \right)^{3/2} \left(\frac{467}{T_{\infty} + 194} \right) \quad (4.1)$$

$$\frac{\mu_{\infty}}{1,716 \times 10^{-5}} = \left(\frac{T_{\infty}}{273} \right)^{3/2} \left(\frac{384}{T_{\infty} + 111} \right) \quad (4.2)$$

Havanın termal iletkenliği ve dinamik viskozitesi hesapları sonucunda elde edilen veriler ile birlikte analizde kullanılan havanın diğer özellikleri Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Havanın Özellikleri

Yoğunluk	Basınç	Özgöl ısı	Termal İletkenlik	Dinamik Viskozite
İdeal Gaz	101325 Pa	1004,6882 J/kgK	0,023606 W/mK	$1,68567 \times 10^{-5}$ Ns/m ²

Bir yüzey üzerindeki buz birikimi sürecini doğru bir şekilde simüle etmek ve tahmin etmek için buz birikimi sonucunda oluşturulan doğal pürüzlülüğü hesaba katmak hayati önem taşır. Bu pürüzlülüğün uygun bir şekilde modellenmesi, gerçekçi buz şekillerini elde etmek ve yüzeyin üzerindeki aerodinamik ve termal etkileri anlamak için gereklidir.

Ansys FLUENT yazılımında sunulan SST k- ω (Shear Stress Transport) türbülans modelinde buzlanma uygulamaları için ek pürüzlülük modelleri bulunmaktadır. Modeller, sınır koşullarını değiştirerek ve sonunda sınır tabakasındaki eddy (türbülans) viskozitesinin yoğunluğunu artırarak kum tanesi boyutlarında pürüzlülük etkisini taklit edebilir. Mikro ölçekli pürüzlülük genellikle 0.1 ve 3.0 mm arasındadır. Bu, her yüzeyde sabit bir değer olarak, deneysel yöntemler aracılığıyla dağılımlar veya bir interpolasyon dosyası aracılığıyla bir dağılım olarak belirtilebilir. Pürüzlülük değeri, nihai buz şeklini büyük ölçüde etkiler; bu nedenle, uygun şekilde seçilmelidir. Modeller, sabit ve değişken kum-tanesi pürüzlülüğü dağılımlarını simüle edebilmektedir. Yüksek hızlarda buzlanma simülasyonlarında buzlanma pürüzlülük değerlerini kullanabilmek için duvara yakın ince ağlara ihtiyaç vardır [35].

Bu tezde kanat üzerinde kum-tanesi pürüzlülüğü dağılımlarını simüle etmek için Shin ve arkadaşlarının pürüzlülük ampirik korelasyonları kullanılmıştır. Shin ve arkadaşları kum-tane modelinde, yüzey kum-tane pürüzlülüğü için deneysel ilişki,

$$k_s = 0,6839 \left[\frac{k_s / c}{(k_s / c)_{base}} \right]_{T_s} \left[\frac{k_s / c}{(k_s / c)_{base}} \right]_{LWC} \left[\frac{k_s / c}{(k_s / c)_{base}} \right]_{MVD} (k_s / c)_{base} c \quad (4.3)$$

formülü ile hesaplanmaktadır [30]. Eş. (4.3)'te verilen $(k_s / c)_{base}$ terim grubu 0,001177 sabit değerine eşittir ve statik sıcaklık T_s , sıvı su içeriği LWC ve medyan damlacık çapı (MVD) tabanlı ifadeler sırası ile,

$$\left[\frac{k_s / c}{(k_s / c)_{base}} \right]_{T_s} = 0,047T_s - 11,27 \quad (4.4)$$

$$\left[\frac{k_s / c}{(k_s / c)_{base}} \right]_{LWC} = 0,5714 + 0,2457(LWC) + 1,2571(LWC)^2 \quad (4.5)$$

$$\left[\frac{k_s / c}{(k_s / c)_{base}} \right]_{MVD} = \begin{cases} 1 & MVD \leq 20 \\ 1,667 - 0,0333(MVD) & MVD \geq 20 \end{cases} \quad (4.6)$$

eşitlikleri kullanılarak hesaplanmaktadır [32]. Bu çok kullanışlı korelasyon, çok sayıda deneysel buz şeklinin analiziyle ampirik olarak çıkarılmıştır, ancak yalnızca kord uzunluğu 14 inçten büyük kanatlar için doğrulanmıştır. Ampirik korelasyonlar, tek bir sabit değer sağlayarak ve HAD hesaplamalarından elde edilen yerel akış detaylarının zenginliğinden yararlanarak, gerçek fiziksel olgunun karmaşıklığını basitleştirmek zorundadır. Ayrıca, çoğu ampirik korelasyonda olduğu gibi, sonuçlarını güvenli bir şekilde orijinal uygulama alanı dışında genişletmek kolay değildir ve bu nedenle, pervaneler ve motor kaplamaları gibi buz birikim özellikleri daha önce ölçülmemiş geometriler için pürüzlülük tahmininde bulunmak zorlaşır. Bu tür tamamen deneysel temelli korelasyonlar, buz tüneli için bir Azaltılmış Düzen Modelleme olarak görülebilir.

Akış simülasyonunda, Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) tabanlı bir türbülans modeli olan SST $k-\omega$ seçilmiştir ve hesaplamalar kararlı rejimde gerçekleştirilmiştir. SST $k-\omega$ türbülans modelinde "Viscous Heating" ve "Production Limiter" seçenekleri aktif hale getirilmiştir. Bu model, hem serbest akış bölgesini hem de duvar türbülansını etkili bir şekilde modellemektedir. SST $k-\omega$ türbülans modeli, 2 denklemlili Eddy viskozite yaklaşımıyla geliştirilmiş yarı analitik bir modeldir. Bu model, kinetik enerji (k) ve özgül

enerji kaybı (ω) denklemleri ile bu denklemlerde kullanılan deneysel sabitlerden oluşmaktadır. Kinetik enerji ve özgül enerji kaybı denklemleri aşağıda sırasıyla verilmiştir [35].

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4.8)$$

Eşitlik 4.7 ve 4.8 da verilen $v_t = \mu_t / \rho$ türbülans kinematik viskozitesi, μ molekül dinamik viskozitesi, ρ yoğunluğu göstermektedir [35]. β^* , σ_k , σ_ω deneysel sabitlerdir. Burada F_1 sembolü skaler bir değeri göstermekte olup türbülanslı akışın duvara yakın ya da uzak olduğu konumdaki durumuna göre çözümün gerçekleşmesini sağlamaktadır. F_1 değeri 0-1 arasında değişmekte olup

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \right\}^4 \quad (4.9)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [35]. Eşitlik 4.8' de verilen türbülans dinamik viskozitesi μ_t

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (4.10)$$

olarak tanımlanmaktadır. Son eşitlikte verilen a_1 ve Ω deneysel sabitlerdir. F_2 ise çözüm esnasında türbülans kaynaklı oluşan viskoziteyi dengelemek için kullanılan sınırlayıcı skaler bir değerdir. F_2 değeri

$$F_2 = \tanh \left[\max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right) \right]^2 \quad (4.11)$$

ile hesaplanmaktadır [35]. Eşitlik 4.9 ve 4.11’ da bulunan d sembolü çözümün gerçekleştiği mesh elemanının duvardan olan uzaklığını temsil etmektedir. F_1 ve F_2 sınırlayıcıları sayesinde türbülansı yöneten denklemler viskozite değişimlerini de dikkate alarak türbülanslı akışın duvardan uzak ve yakın olması durumuna göre yönetici denklemleri güncellemektedir.

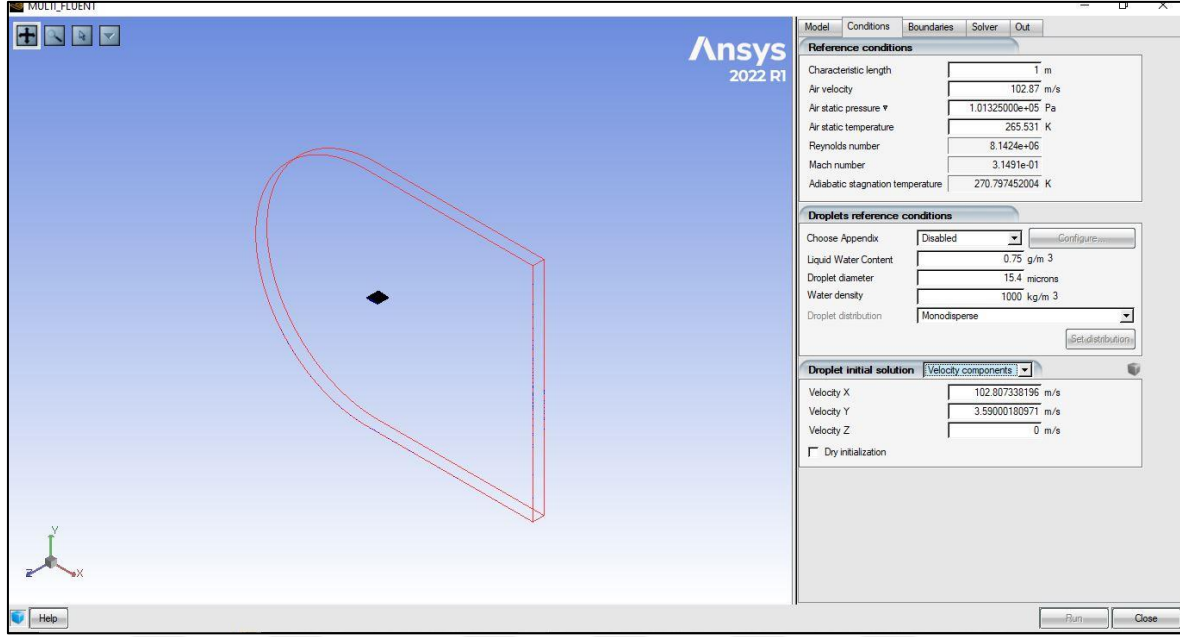
Ayrıca türbülans modeli seçiminde SST $k-\omega$ modelinin yanında “heat dissipation” ve “production limiter” seçenekleri aktif hale getirilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

4.3. Damlacık Yörünge Tahmini ve Damlacık Çarpma Analizi

Çözüm bölgesindeki hava akış analizi tamamlandıktan sonra, bu veriler ile Medyan Hacim Çapı (MVD) ve Sıvı Su İçeriği (LWC) değerleri girilerek damlacık yörünge tahmini ve damlacık verimi hesaplanmıştır. Damlacık ile ilgili hesaplamalar, FENSAP yazılımının DROP3D çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DROP3D, su damlacığı/buz kristalinin çarpmasını 3 boyutlu olarak Eulerian yaklaşım kullanan bir sonlu elemanlar çözücüsüdür [32].

DROP3D çözücüsü, ortamdaki su konsantrasyonu ve su damlacığı/buz kristalinin hızı için tanımlanan kısmi diferansiyel denklemleri ayrıntılı bir şekilde çözer. Bu çözümler sonucunda su konsantrasyonunu, damlacık hızı vektörlerini, su yakalama verimlilik dağılımını, çarpma paternini ve damlacıktan etkilenmeyen bölgeleri belirler. DROP3D çözücüsü kullanılarak, tek bir damlacık çap değeri için monodisperse yaklaşımı ile çözümler gerçekleştirilebilir. Ayrıca, Langmuir ve arkadaşları tarafından belirlenen Langmuir B, C, D ve E damlacık dağılımları için de damlacık yoğunluğu ve verimi hesaplanmaktadır.

Bu tezde gerçekleştirilen simülasyonu doğrulamak için buzlanma rüzgar tüneline elde edilen deney sonuçları kullanıldığından damlacık çapı veri girişi tek bir değer olarak girilmiştir.



Şekil 4.8. DROP3D çözücüsü model ayarları

Şekil 4.8’ te simülasyonda kullanılan model ayarları görülmektedir. Fiziksel model ve parçacık tipi olarak “droplets” seçilmiştir.

DROP3D parçacıkların hareketini tek tek çözmek yerine belirli bir kontrol hacmine giren ve çıkan parçacığın hareketini inceler. Bu yöntem Navier-Stokes denklemleri olarak bilinen akışkan içerisindeki parçacıkların sürekliliğini ve momentumunu hesaba katacak ek denklemler ile genişletilen bir dizi denklemden oluşur. Parçacık akışının (damlacık/kristal) süreklilik denklemi.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha V_d)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha V_d)}{\partial y} + \frac{\partial(\alpha V_d)}{\partial z} = 0 \quad (4.12)$$

olarak ifade edilir [32]. Eşitlik 4.12’ da verilen α parçacık konsantrasyonunun ortalama alan değeri, V_d parçacık hızının ortalama alan değerini göstermektedir. Parçacık akışının momentum denklemleri

$$\frac{\partial(\alpha \vec{V}_d)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [\alpha \vec{V}_d \otimes \vec{V}_d] = \frac{C_D \text{Re}_d}{24K} \alpha (\vec{V}_a - \vec{V}_d) + \alpha \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_d} \right) \frac{1}{Fr^2} \quad (4.13)$$

şeklinde tanımlanır. Son denkleminde verilen denklemin sağ tarafındaki ilk terim grubu ortalama çapı d olan parçacıkların üzerine etkiyen sürüklenme değerini, ikinci terim grubu ise yerel Froude Sayısıyla orantılı olarak kaldırma ve yerçekimi kuvvetinin damlacık hareketine etkisini göstermektedir. Eşitlik 4.13' de verilen denkleminde \vec{V}_a hava hızını, C_D parçacık sürüklenme değerini, K atalet değerini, Re_d damlacıkların Reynolds sayısını göstermektedir. Parçacıkların Reynolds sayısı

$$Re_d = \frac{\rho_a d V_{a,\infty} \|\vec{V}_a - \vec{V}_d\|}{\mu_a} \quad (4.14)$$

eşitliği ile hesaplanır. Atalet parametresi K

$$K = \frac{\rho_a d^2 V_{a,\infty}}{18 L_\infty \mu_a} \quad (4.15)$$

ile hesaplanır. Yerel Froude Sayısı

$$Fr = \frac{\|V_{a,\infty}\|}{\sqrt{L_\infty g_\infty}} \quad (4.16)$$

ile hesaplanır. Parçacık sürüklenme değeri C_D ise farklı korelasyonlar kullanılarak hesaplanmaktadır. Bunlar damlacık tipi parçacıklar için 4 farklı yöntem ile belirlenebilmektedir. Bu çalışmada sürüklenme katsayısı modeli su olarak adlandırılan yaklaşım seçilmiştir. Bu yaklaşım küresel damlacıklar etrafındaki akışın sürüklenme katsayısını modelleyen ampirik bir korelasyona dayanmaktadır. Sürüklenme katsayısı C_D değeri aşağıda verilen denklemler ile hesaplanmaktadır.

$$C_D = (24 / Re_d) (1 + 0,15 Re_d^{0,687}) \quad Re_d \leq 1300 \quad (4.17)$$

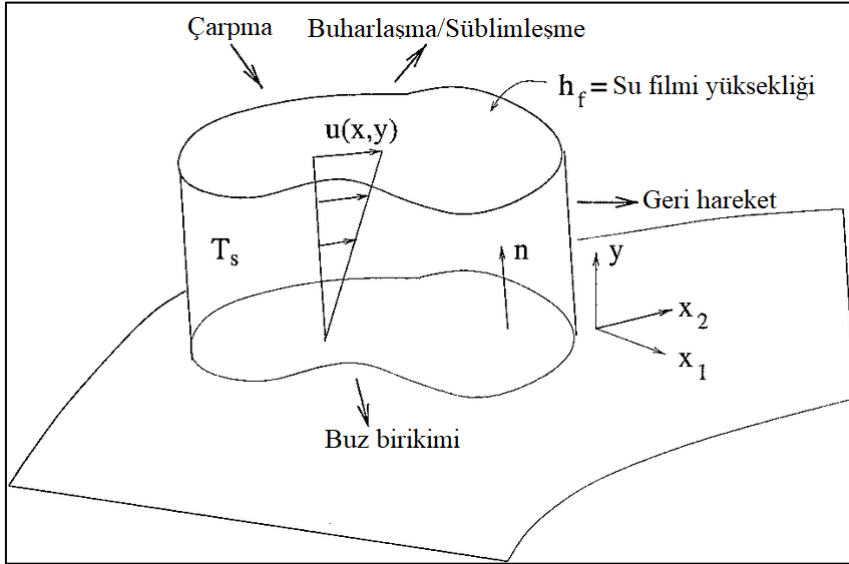
$$C_D = 0,4 \quad Re_d > 1300$$

Bu model herhangi bir Re_d değeri için sınırlandırılmamıştır. Fakat 250'nin üzerindeki değerlerde su damlacıkları deforme olmaya başlamaktadır.

4.4. Buz Birikim Analizi

Buzlanma analizi FENSAP yazılımının ICE3D çözücüsü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. ICE3D çözücüsü Messinger modelinden türetilen bir ısı ve kütle denge modülüdür. Bu çözücü kanatçık üzerinde donacak, akacak veya buharlaşacak su miktarını ve suyun sıcaklığını belirlemektedir. Su tabakası hesaplaması, hava/katı kontrol hacmi ayrıklaştırma yoluyla hava/katı ara yüzünde 2 boyutlu kavisli bir yüzey üzerinde gerçekleştirilir.

Çizelge 4.1’ de verilen ortam sıcaklığı değeri için buzlanma oluşumu dikkate alındığında camsı tipte bir buzlanmanın oluşacağı öngörülmektedir. Bu sebepten ICE3D çözücüsünün buzlanma modeli altındaki buz-su modeli için camsı buz (Glaze-Advanced) seçilmiştir. ICE3D çözücüsü, camsı buzlanma koşulları oluştuğunda damlacıkların çarptığı yüzeyde sürekli bir su filmi varlığı olduğunu varsayar. Bu ince su tabakası yer çekimi, merkezkaç kuvveti veya hava akışının oluşturduğu kayma gerilmesi kuvvetleri tarafından geriye doğru akabilir. Sıvı filmin yüksekliği katı yüzey üzerindeki tüm noktalarda tanımlanmalıdır. Yüzeydeki termodinamik şartlar dikkate alındığında bu filmin bir kısmı donabilir, buharlaşabilir veya süblimleşebilir.



Şekil 4.9. Su filmi tabakası ve enerji transferi [32]

Şekil 4.9’ da görüldüğü gibi ince su filmi tabakası üzerinde bir hava akışı meydana gelmektedir. Hava akışının etkisiyle birlikte su filmi içerisinde lineer değişimli bir hıza sahip olmaktadır. Su filminin hız değerini veren eşitlik

$$\vec{V}_f = \frac{y}{\mu_f} \vec{\tau}_{a,wall} \quad (4.18)$$

şeklinde tanımlanır. Son denklemden μ_f su filminin viskozitesi, $\vec{\tau}_{a,wall}$ hava akışının oluşturduğu kayma gerilmesini temsil etmektedir. Su filmi içerisindeki ortalama hız

$$\bar{V}_f = \frac{1}{h_f} \int_0^{h_f} \vec{V}_f dy = \frac{h_f}{2\mu_f} \vec{\tau}_{a,wall} \quad (4.19)$$

ile hesaplanır. h_f su filmi kalınlığıdır.

ICE3D çözücüsünde buzlanma modeli olarak seçilen camsı buz modeli üç adet yönetici denklemini çözer ve zamanla buz birikimini hesaplar. Bu durumda hem kayma gerilmesi hem de havadan ısı akısı sağlanmalıdır. FENSAP ısı akılarını 2 farklı yolla hesaplamaktadır. Bu simülasyonda ısı akısı tipi olarak klasik yaklaşım kullanılmıştır. Klasik yaklaşım duvar üzerindeki sıcaklık gradyanını kullanmaktadır. Isı akısı hesabı dışında diğer iki yönetici denklem katı yüzey üzerinde çözülmektedir. Bu denklemlerden ilki kütle korunumunu ifade eder ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\rho_f \left[\frac{\partial h_f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{V}_f h_f \right) \right] = V_\infty LWC \beta - \dot{m}_{evap} - \dot{m}_{ice} \quad (4.20)$$

Eşitlik 4.20' nin sağ tarafındaki terimler sırasıyla su damlacığının çarpması, buharlaşma ve buz birikimi tarafından meydana gelen kütle transferini tanımlamaktadır. Buharlaşma ve buz birikimi su filmi için kütle kaybetmesine sebep olurken su damlacığının çarpması su filminin kütesinin artmasına sebep olur. Buharlaşma kütle akısı \dot{m}_{evap} ısı taşınım katsayısı kullanarak hesaplanır. Son yönetici denklem ise enerjinin korunumunu ifade etmektedir. Bu denklem,

$$\rho_f \left[\frac{\partial h_f c_f T_f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{V}_f h_f c_f T_f \right) \right] = \left\{ \begin{array}{l} \left(e_d + \frac{1}{2} V_d^2 \right) V_\infty LWC \beta - \dot{m}_{evap} (L_{evap}) \\ + \dot{m}_{ice} (L_{fus} - c_{ice} T_{ice}) - c_h (T_f - T_{rec}) \end{array} \right\} \quad (4.21)$$

olarak tanımlanır [32]. Eşitlik 4.21' de enerji transferi su damlacıklarının çarpması, buharlaşması ve buz birikimiyle oluşmaktadır. Denklemin sağ tarafındaki son terim grubu taşınım ile olan ısı transferini ifade eder. Alt simgeler f ve d, sırasıyla su filmi ve çarpan damlacıklara atıfta bulunmaktadır. ρ_f , c_f , L_{evap} , c_{ice} , L_{fus} katsayıları su ve buzun fiziksel özellikleridir. Hava akış hızının değeri V_∞ akış analizinden alınırken, V_d damlacık çarpma hızı, e_d damlacık enerjisi ve β damlacık birikim verimi ise DROP3D çözücüsünden sağlanır. Son denklemden h_f su filmi kalınlığı, T_f hava/su filmi/buz/duvar ara yüzündeki denge sıcaklığı ve \dot{m}_{ice} anlık buz kütlesi birikimini ifade etmektedir.

4.4.1. Boncuklanma modeli

Uçağın hareketi esnasında havanın içerisinde bulunan sıvı su uçağın yüzeyine çarptığında yüzeyde damlacık veya boncuk şeklinde kümelenmeye sebep olmaktadır. Sıfırın altındaki sıcaklıklarda yüzeyde oluşan bu damlacık kümelerinin donması ile yüzey üzerinde pürüzlü bir yapı meydana gelmektedir. Bu pürüzlü yapı sınır tabakasını kalınlaştırarak momentum eksikliğini artırmaktadır. Bu durum hem basınç sürüklenmesini hem de yüzey sürtünmesini ve dolayısıyla konvektif ısı akısını veya soğutma etkilerini artırmaktadır. Ayrıca pürüzlülük yüzey gerilimlerini oldukça etkilemekte ve nihai buz şeklinin hesabı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir.

Isı transferinin yüksek olduğu kırığı buzlanma şartlarında kanat üzerine çarpan su damlacıkları çarpma anında donar ve boncuk yapıları meydana gelir. Daha yüksek sıcaklıklarda oluşan camsı buzlanma için buzlanma akış hızının sıfır olduğu noktaya yakın pürüzsüz bir bölgeden veya pürüzsüz ve pürüzlü yüzeyler arasındaki geçişte boncuklardan oluşur. Su filmi yapısı pürüzsüz bir bölgeyi temsil ederken boncuklu yapılar ise pürüzlü bir bölgeyi temsil eder. Bu şekilde bir buzlanma boncuk yapının bir kısmının donması ve sıvı halde kalmasıyla oluşur.

ICE3D çözücüsü camsı tipte buzlanma koşulları varken, kontamine yüzeyde sürekli bir su filmi varlığının olduğunu varsaymaktadır. Ancak damlacıkların bir yüzeye çarptığında zamanla büyüyen ve geriye doğru akarak yarı küresel buz şeklinde donan boncuk yapıları oluşturmaktadır. Hareket eden ve donan boncuk şekilli su damlacıkları tarafından yüzeyde oluşturulan kum tanesi pürüzlülük yüksekliğini tahmin etmek için “boncuklanma modeli” geliştirmiştir. Bu modelde buzlanma yüksekliği yalnızca konuma değil zamana da bağlı olarak değişmektedir. Bu sebepten dolayı boncuk modeli yarı kararlı ve kararsız simülasyon modellerinde iyi sonuç vermektedir.

4.4.2. Buzlanma hava sıcaklığı ve buz yoğunluğu

Çoğu simülasyonda buzlanma hava sıcaklığı olarak genellikle havanın statik sıcaklığı kullanılır. Farklı buzlanma koşullarında buzlanma hava sıcaklığı farklı olabilir. Statik hava sıcaklığı genellikle kanat üzerindeki taşınım katsayısının hesabında kullanılır.

Simülasyon esnasında buz yoğunluğunun sabit kaldığı kabul edilerek 917 kg/m^3 değeri kullanılmıştır. Bunun dışında daha gerçekçi bir simülasyon için 1990 yılında Jones'un gerçekleştirdiği bir çalışmada buz birikim yoğunluğunu tahmin eden bir ampirik denklem seti oluşturmuştur. Bu çalışmaya göre buz birikim yoğunluğu

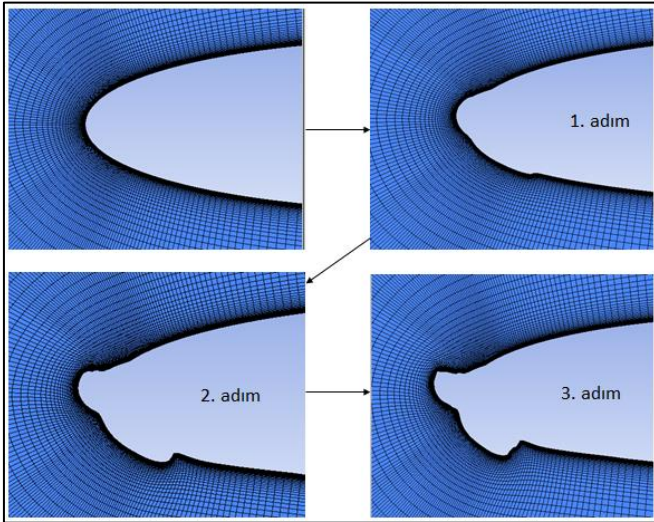
$$\rho_{ice} = \left\{ \begin{array}{ll} 0,21R_M^{0.53} & R_M \leq 10 \\ R_M / (1,15R_M + 2,94) & 10 \leq R_M \leq 60 \\ 0,84 & R_M \geq 60 \end{array} \right\} g / cm^3 \quad (4.22)$$

ile hesaplanmaktadır [31]. Son eşitlikte verilen R_M Macklin buz yoğunluk parametresidir ve aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$R_M = - \frac{d \|V_d\|}{2T_{wall}} \quad (4.23)$$

4.5. Çoklu Adım

Kanat üzerinde buz oluşumu başladıktan sonra kanadın geometrik şekli değişmeye başlar. Bununla beraber yüzey üzerindeki hava ve su damlacıklarının hareketinde de değişiklik görülür. Kanat üzerinde zamanla oluşan buz birikimini daha gerçekçi bir şekilde hesaplayabilmek için ağın buz birikimi ile birlikte yeni oluşan kanat profili yapısına uyarlanması gerekmektedir. FENSAP yazılımı buz birikimi analizlerini tek bir adımda veya çoklu adımda gerçekleştirilmesine imkan sağlamaktadır. Çoklu adım toplam buz birikimi süresini kullanıcı tarafından belirlenen daha küçük zaman aralıklarına böler. Her bir zaman aralığı sonunda oluşan yeni buz şekli hesaba katılarak mesh yapısı güncellenir. Kanadın yüzeyinde artan buzun hacmine bağlı olarak yüzeye yakın bulunan hücrelerin boyutları ve şekilleri değişir. Eğer başlangıçta oluşturulan mesh hücreleri yeterince ince değilse (doğru bir Y^+ değeri verilmemişse) hücre genişliği program tarafından azaltılabilir. Suyun geri akışı, yüzey yer değiştirmesi ve buz pürüzlülüğü gelişimi büyük ölçüde zamana bağlı olduğundan, buzlanma simülasyonları her zaman zamana duyarlıdır. Buzlanma simülasyonu tamamlandıktan sonra hava akış alanı, bu yeni mesh yapısı dikkate alınarak yeniden oluşturulur.



Şekil 4.10. Otomatik ağ adaptasyonu

Şekil 4.10' da 3 adımlı bir simülasyon esnasında otomatik olarak değişen ağ yapısı görülmektedir. Oluşan yeni ağ yapısı sonraki adımda kullanılır. Bu işlemler gerçekleştirilirken ağ yapısını oluşturan toplam hücre sayısı sabit kalır. Literatürdeki çalışmalar dikkate alındığında zaman aralıklarının azaltılması, analiz sonuçlarının

literatürde yer alan deneysel verilere oldukça benzer sonuçlar verdiğini göstermiştir. Yalnız şu durum göz ardı edilmemelidir. Çok küçük zaman adımları için belirli bir adımda çözümler yakınsarken bir sonraki adımda yeni ağ yapısında negatif hacim oluşumları sebebiyle tam bir çözüm gerçekleştirilememektedir. Bu durumda ileri aşamalar için kullanıcı tarafından yeniden ağ yapılandırılması program tarafından önerilmektedir. Sonuç olarak zaman aralığının çok çok küçük olması programın yakınsayacağını garantilememektedir.



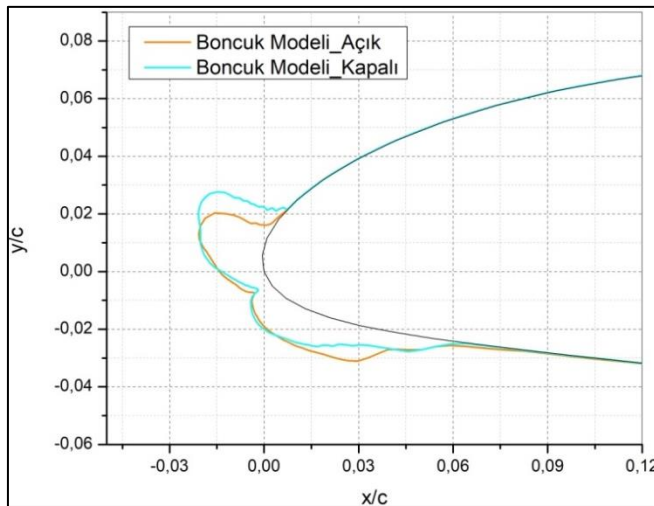
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde literatürde yapılan deney sonuçlarının doğrulanması ve farklı parametreler kullanıldığında kanat üzerinde meydana gelen buzlanma incelenmiştir.

Uçuş ve hava şartlarının değişmesine bağlı olarak uçak kanadı üzerinde görülen buzlanma şeklinde de değişiklik gözlemlenir. İlk kısımda kanat üzerindeki buzlanma şeklinin değişen atak açılara göre nasıl değiştiği üzerinde durulacak, ikinci kısımda ise farklı sıvı su içeriğinin (LWC) buzlanma profili üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulacaktır.

5.1. Boncuklanma Modelinin Buzlanmaya Etkisi

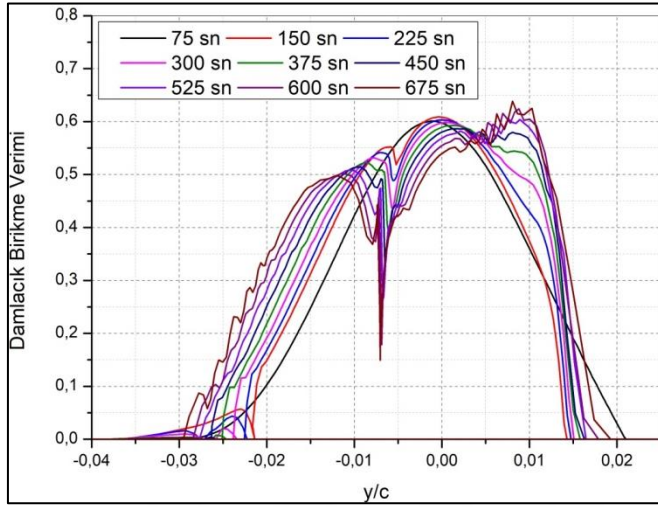
Boncuklanma modelinin kanat üzerindeki camsı buzlanma oluşumuna etkisi Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Boncuklanma modeli kullanılmadığında yüzey üzerinde damlacıkların çarpmasıyla bir su filmi tabakası oluştuğu kabul edilir ve bu su filmi tabakasının donmasıyla birlikte buz birikimi hesabı yapılır. Boncuklanma modeli kullanıldığında yüzeye çarpan damlacıklar yüzey üzerinde boncuk şeklinde bir yapı oluşturur ve donma esnasında bu boncuklu yapının bir kısmı donar bir kısmı da sıvı halde kalır. Sıvı kısım havanın hareketiyle birlikte yüzey üzerinde kayarak zamanla buz birikimini meydana getirir. Şekil 5.1’de görüldüğü üzere buzlanma, boncuklanma modeli yaklaşımı sayesinde boynuz formuna daha yakındır. Bu sebepten dolayı sonraki analizlerde boncuklanma modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.1. Boncuk modelin buzlanmaya etkisi

5.2. Çoklu Adımda Damlacık Birikme Verimi

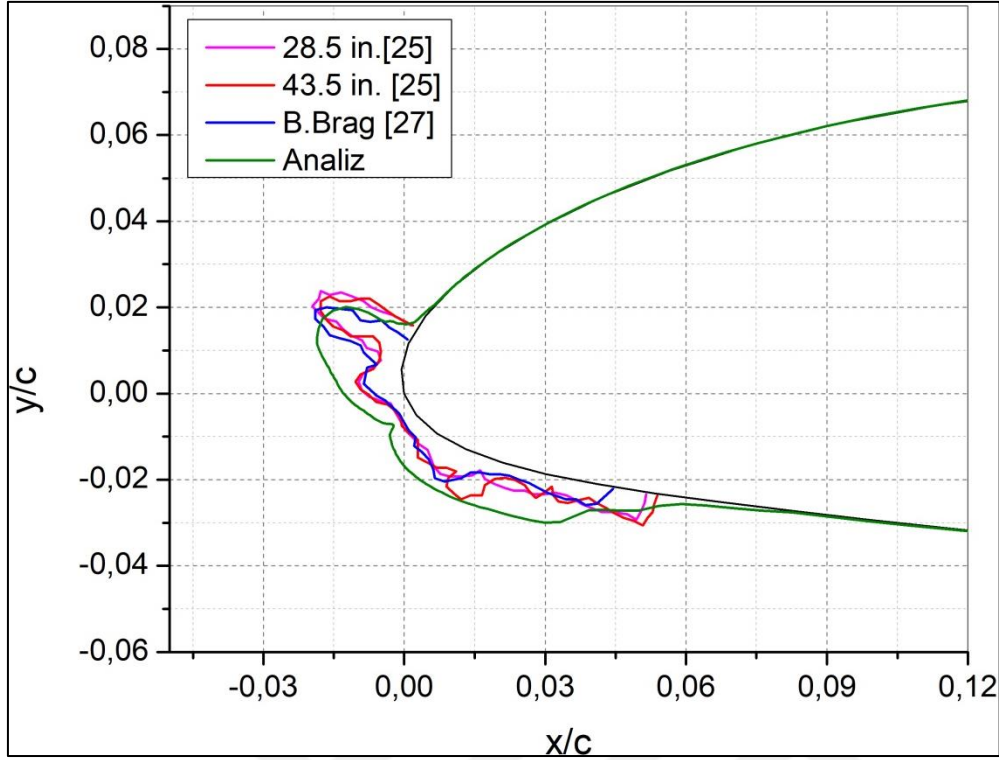
Şekil 5.2’de 75 saniye zaman aralığı ile damlacık çarpma analizlerinden elde edilen damlacık birikme verimleri (Beta eğrileri) görülmektedir. Analizin sonuna yaklaştıkça buzlanmanın zamanla boynuz tipine uygun olacak şekilde kanat profili üzerinde damlacık birikme verim dağılımının benzer şekilde olduğu görülmüştür. Kanat üzerindeki buz birikim verimi dağılımı değerlendirilerek buzun geometrisi hakkında yorum yapılabilir.



Şekil 5.2. 5° atak açısı için çoklu adımda damlacık birikme verimi

5.3. Simülasyonun Doğrulanması

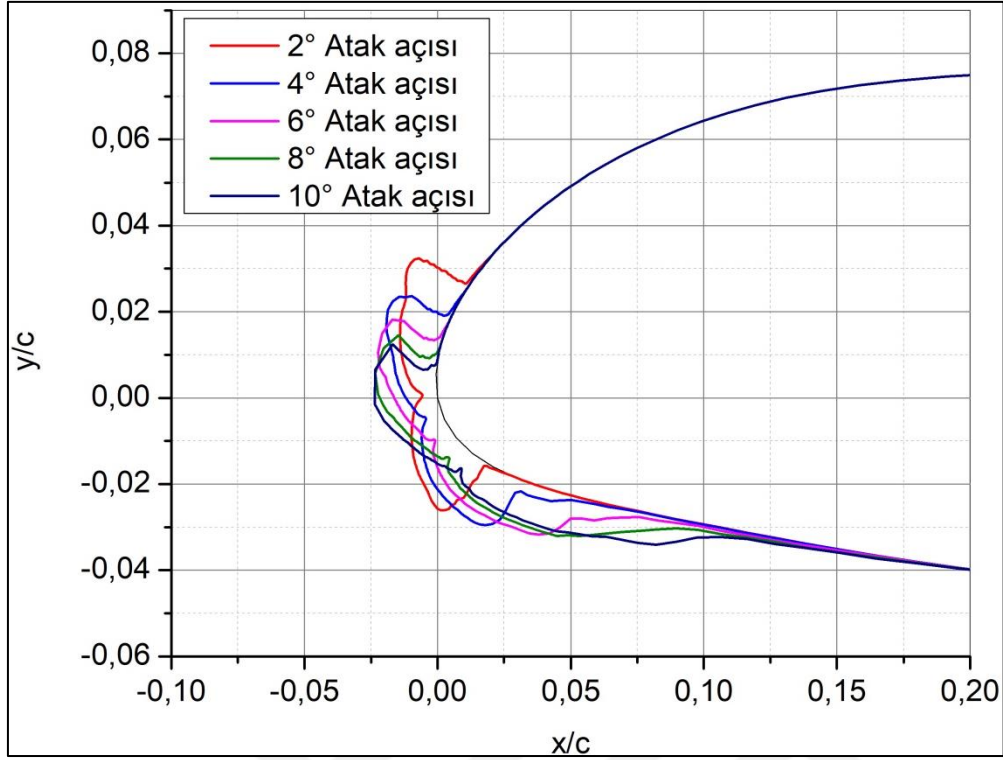
Çizelge 4.1’ de verilen deney şartları kullanılarak çok aşamalı buzlanma simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Toplamda 11,25 dakika süresince meydana gelen buz birikimi hesaplaması 75 saniye zaman aralıkları ile 9 adımda yapılmıştır. Analizin üçüncü adımı olan buz birikimi hesabının gerçekleştirildiği ICE3D çözücüsünde buzun yoğunluğu değişken kabul edilmiş ve Jones (Glaze) seçeneği seçilmiştir. Elde edilen sonuçlar 2 farklı çalışmanın deneysel verileriyle kıyaslanmıştır. Şekil 5.2’ de deneysel verilerle analiz verisi sonuçları gösterilmiştir. Kanat üzerinde oluşan buzlanmanın başlangıç ve bitiş noktaları deneysel verilerle uyumluluk göstermektedir. Deneysel çalışmalarda verilen buz profili üzerindeki girinti ve çıkıntıları yakalayabilmek için daha fazla adımlı bir çözüm gerçekleştirilebilir. Adım sayısının artması bilgisayar donanımı üzerindeki iş yükünü arttıracığından bu seçenek üzerinde durulmamıştır.



Şekil 5.3. Analiz sonucunun deneysel verilerle kıyaslanması

5.4. Farklı Atak Açılarında Kanat Üzerinde Görülen Buzlanma

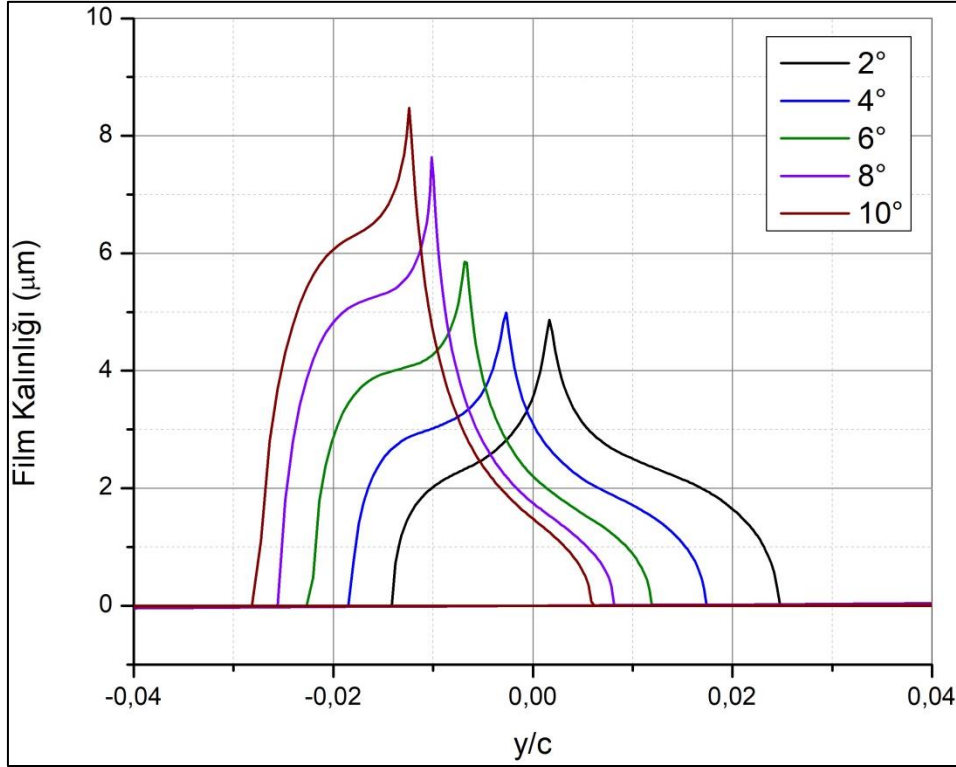
Analizi doğrulamada kullanılan analiz ayarları ile 2° , 4° , 6° , 8° ve 10° atak açılarında kanadın buzlanma analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4' de analizden elde edilen buzlanma profilleri görülmektedir. Atak açısı arttıkça, kanadın üst yüzeyindeki buzlanma profilinin boynuz benzeri bir hal aldığı gözlemlenmiştir. Atak açısı 2° den 10° ye kadar artarken, kanadın alt yüzeyindeki buzlanmanın sona erdiği nokta kanadın ön kenarından, kordun $0,025c$ den başlayarak $0,125c$ ye kadar yayıldığı görülmüştür. Artan atak açısıyla beraber buz birikiminin başlangıç noktası kanadın hücum kenarının alt noktasına doğru yavaşlayan bir ilerleme göstermiştir. Bununla birlikte atak açısının artmasıyla buz birikiminin bittiği bölge kanadın altına doğru genişleyerek ilerlemektedir. 2° ve 4° gibi küçük atak açılarında buz profilinin şeklindeki değişim çok belirgin olmasına rağmen atak açıları büyüdükçe bu değişimin giderek azaldığı ve benzer yapıda buz profili oluşumu görülmektedir.



Şekil 5.4. Farklı atak açılarında buz birikim profillerinin karşılaştırılması

5.5 Farklı Atak Açılarındaki Film Kalınlığı

Damlacıkların kanat üzerine çarpmasından sonra bir su filmi yüksekliğinin bulunması buzlanmanın camsı tipte olacağını göstergesidir. Şekil 5.5' te farklı atak açılarında buz birikim profillerinin film kalınlıkları gösterilmiştir. Su filmi kalınlıklarının değeri kanat üzerindeki buz birikim yüksekliğiyle doğru orantılı değildir. Kanat profili üzerindeki su filmi yüksekliği dağılımı buz birikiminin kanat üzerindeki buz yüksekliğiyle ilişkilidir. 2° atak açısı için su filmi yüksekliği dağılımı incelendiğinde kanadın alt ve üst yüzeylerinde dengeli bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Şekil 5.4' te 2° atak açısı için verilen buz profili film kalınlığıyla benzer olduğu görülmüştür. 10° atak açısı için verilen film kalınlığı profilinde kanadın üst yüzeyinde düşük değerlerde alt yüzeyinde ise yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Bu durum Şekil 5.4' te 10° atak açısı için verilen buz profiliyle kıyaslandığında, düşük film kalınlığının yüksek buzlanma yüksekliğine, yüksek film kalınlığının ise düşük buzlanma yüksekliğine neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Farklı atak açıları için elde edilen maksimum su filmi yüksekliği buz birikim yükseklikleriyle kıyaslandığında buz birikme yüksekliğini değiştirmedeği görülmüştür.

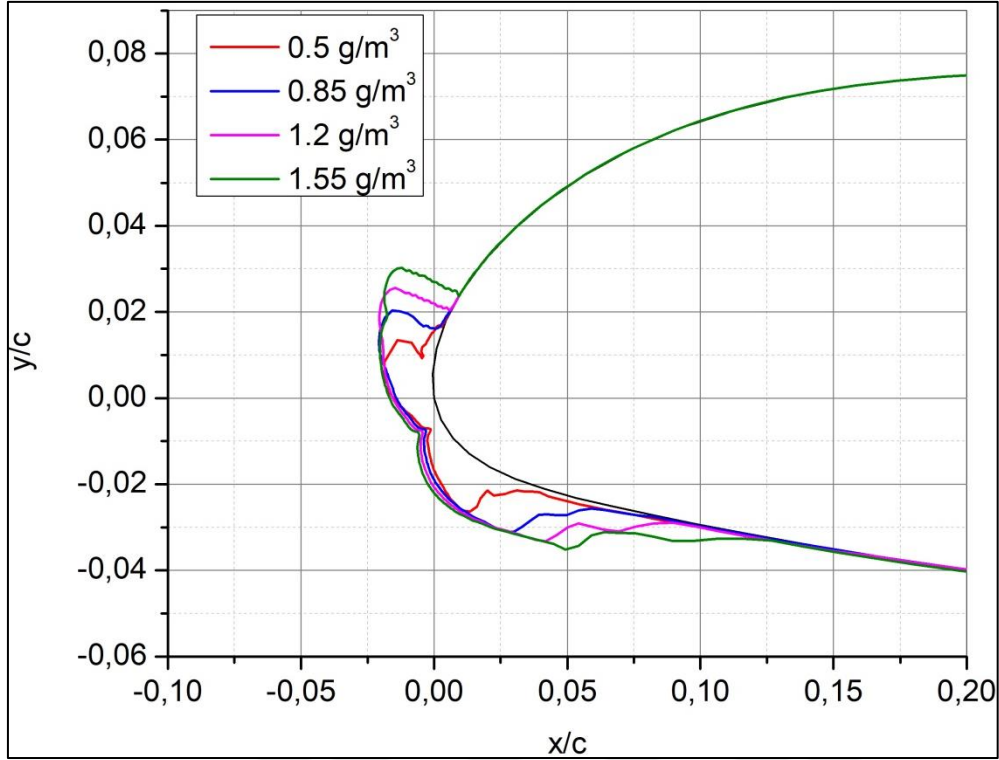


Şekil 5.5. Farklı atak açılarındaki film kalınlığı

5.6. Farklı Sıvı Su İçeriği Değerlerinde Kanat Üzerinde Görülen Buzlanma

Sıvı su içeriği 1 m^3 hacmindeki bulutta bulunan gram cinsinden su kütlesi miktarıdır. Sıvı su miktarının artışı sıcaklığa bağlıdır [35]. Belli sıcaklık ve damlacık boyutlarında sıvı su içeriğindeki artış kırağı (rime) oluşumundan camsı (glaze) buz oluşumuna geçişe neden olmaktadır [36].

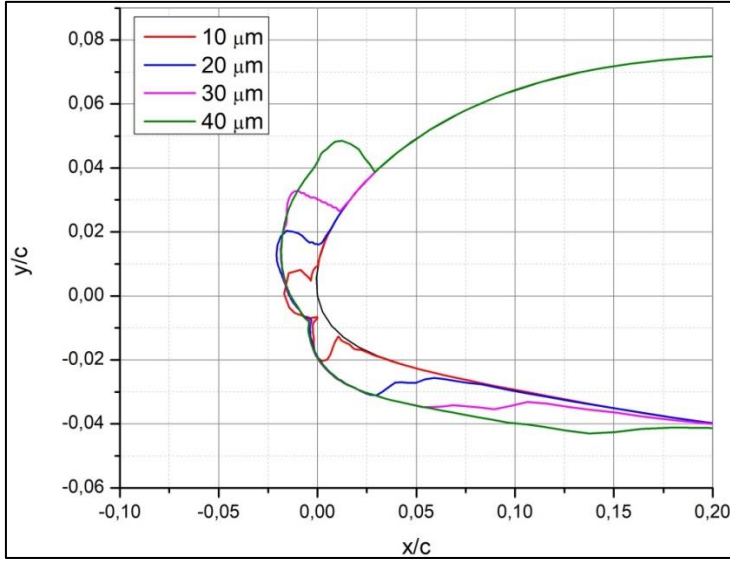
Kanadın 5° atak açısı için doğrulamada kullanılan analiz ayarları ve beş farklı değerdeki ($0,5 \text{ g/m}^3$, $0,85 \text{ g/m}^3$, $1,2 \text{ g/m}^3$, $1,55 \text{ g/m}^3$) sıvı su içeriği (LWC) değerleri için analizler yapılmıştır. Şekil 5.6' da değişen sıvı su içeriğinin, kanat üzerinde oluşan buzun şekline olan etkisi gözlemlenmiştir. Sıvı su içeriği arttıkça buz profilinin kanadın alt ve üst yüzeyinde kapladığı alanda artmıştır.



Şekil 5.6. Sıvı su içeriğinin kanat üzerinde oluşan buzlanmaya etkisi

5.7. Farklı Damlacık Boyutlarında Kanat Üzerinde Görülen Buzlanma

Su damlacıklarının ortalama hacim çapı (MVD) buzlanmaya neden olan her bir su damlacığının çapını aynı kabul ederek ortalama bir değere sahip olduğunu ifade eder [37]. Bu bölümde yapılan analizlerde su damlacıklarının çapı sırasıyla $10 \mu m$, $20 \mu m$, $30 \mu m$, $40 \mu m$ olarak belirlenmiş ve analizler 5° atak açısı için tekrarlanmıştır. Şekil 5.7' de görüleceği üzere MVD değeri büyüdükçe kanat üzerinde oluşan buz daha geniş bir alana yayılmıştır. Buz profilinin kanadın hem alt hem de üst yüzeyindeki kapladığı alan artmıştır. Bu durum büyük damlacık çaplarının daha kolay yakalanarak kanat üzerindeki buzlanma miktarını arttırdığını göstermiştir. Bu durumun bir diğer açıklaması da daha büyük boyuttaki su damlacıklarının daha büyük bir ataletle sahip olmasıdır.

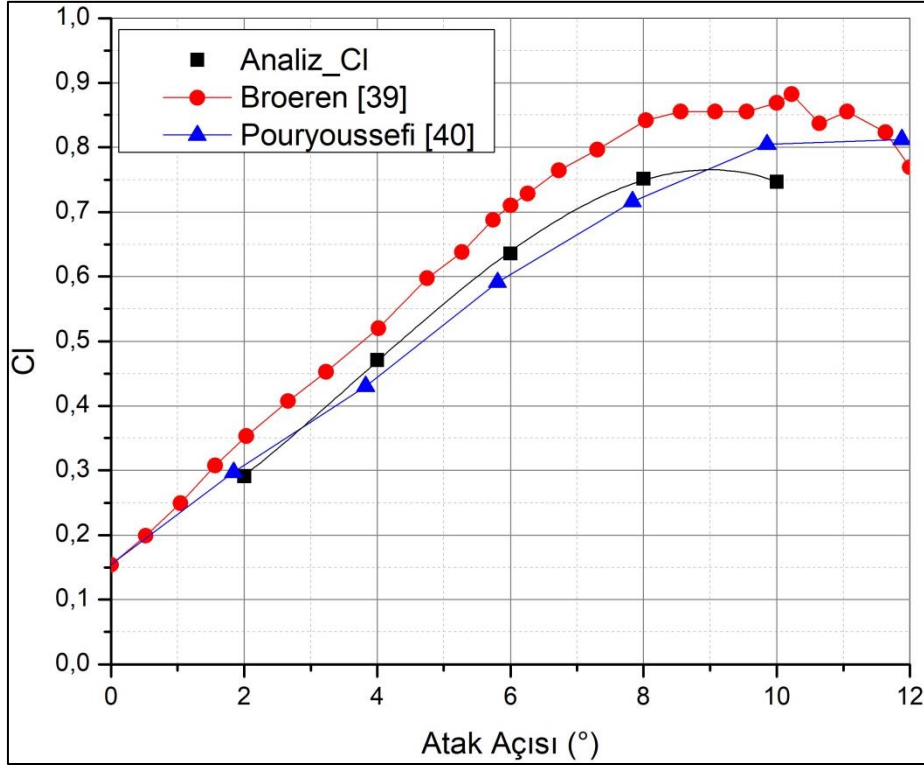


Şekil 5.7. Damlacık çapının kanat üzerinde oluşan buzlanmaya etkisi

5.8. Kaldırma ve Sürüklenme Katsayılarının Deneysel Çalışmalar ile Kıyaslanması

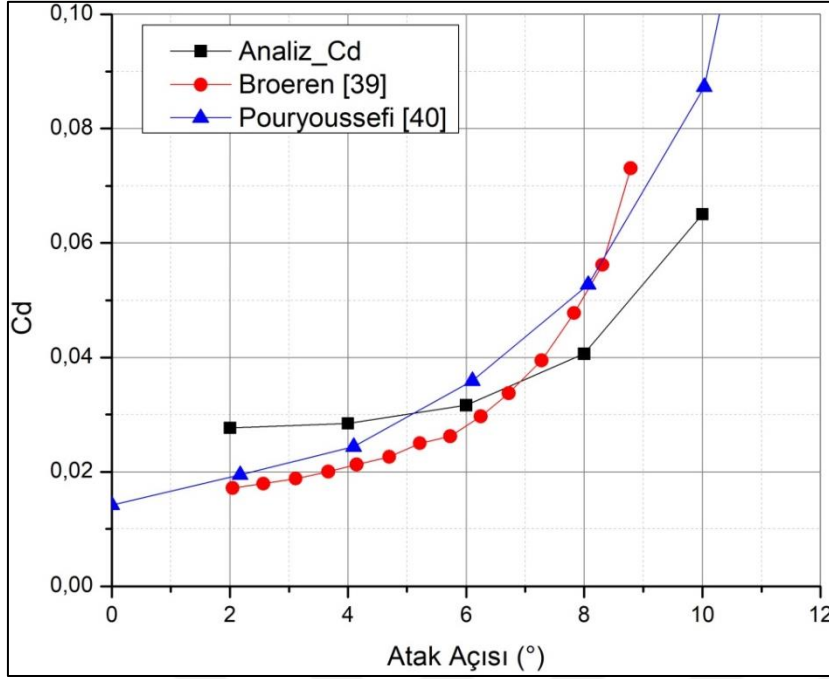
Bu başlık altında, EG1164 test şartlarına bağlı olarak, farklı atak açlarına göre kaldırma ve sürüklenme katsayılarının değişimlerini inceleyen literatürdeki iki farklı deneysel çalışmanın sonuçları, tezde elde edilen bulgularla karşılaştırılmıştır. İlk çalışmada, Broeren ve arkadaşları, 0,2 Mach ve 15.9×10^6 Reynolds sayısı için 1,828 m kanat uzunluğuna sahip bir kanadın boynuz tipi buzlanma deneylerini gerçekleştirmiş ve buzlanma sonrası kaldırma ve sürüklenme katsayılarını rapor etmişlerdir [39]. İkinci çalışmada ise Pouryoussefi ve arkadaşları, 0,075 Mach sayısı, 6×10^5 Reynolds sayısı ve $0,5 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü için 0,354 m kanat uzunluğuna sahip bir kanadın boynuz tipi buzlanma deneylerini gerçekleştirmiş, buzlanma sonrası kaldırma ve sürüklenme katsayılarını ve kanat üzerindeki basınç katsayısı değişimlerini yayınlamışlardır [37].

Şekil 5.8.'de literatürde yayınlanan iki farklı deneysel çalışmanın kaldırma katsayısı değerleri ile yapılan analizlerden elde edilen kaldırma katsayısı değerleri karşılaştırılmıştır. Broeren ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği deneysel çalışmada kanadın 8.8° atak açısında tutunma kaybına uğradığı belirtilmiştir. Pouryoussefi ve arkadaşları ise kanadın yaklaşık 10° atak açısında tutunma kaybı başladığını rapor etmişlerdir. Bu tezde farklı atak açıları için elde edilen kaldırma katsayısı değişimlerinin bu iki çalışma ile benzer şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Yapılan analiz sonucunda, tutunma kaybının başladığı atak açısı derecesinin bu iki deney çalışmasının sonuçlarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.8. Kaldırma katsayısı [39, 40]

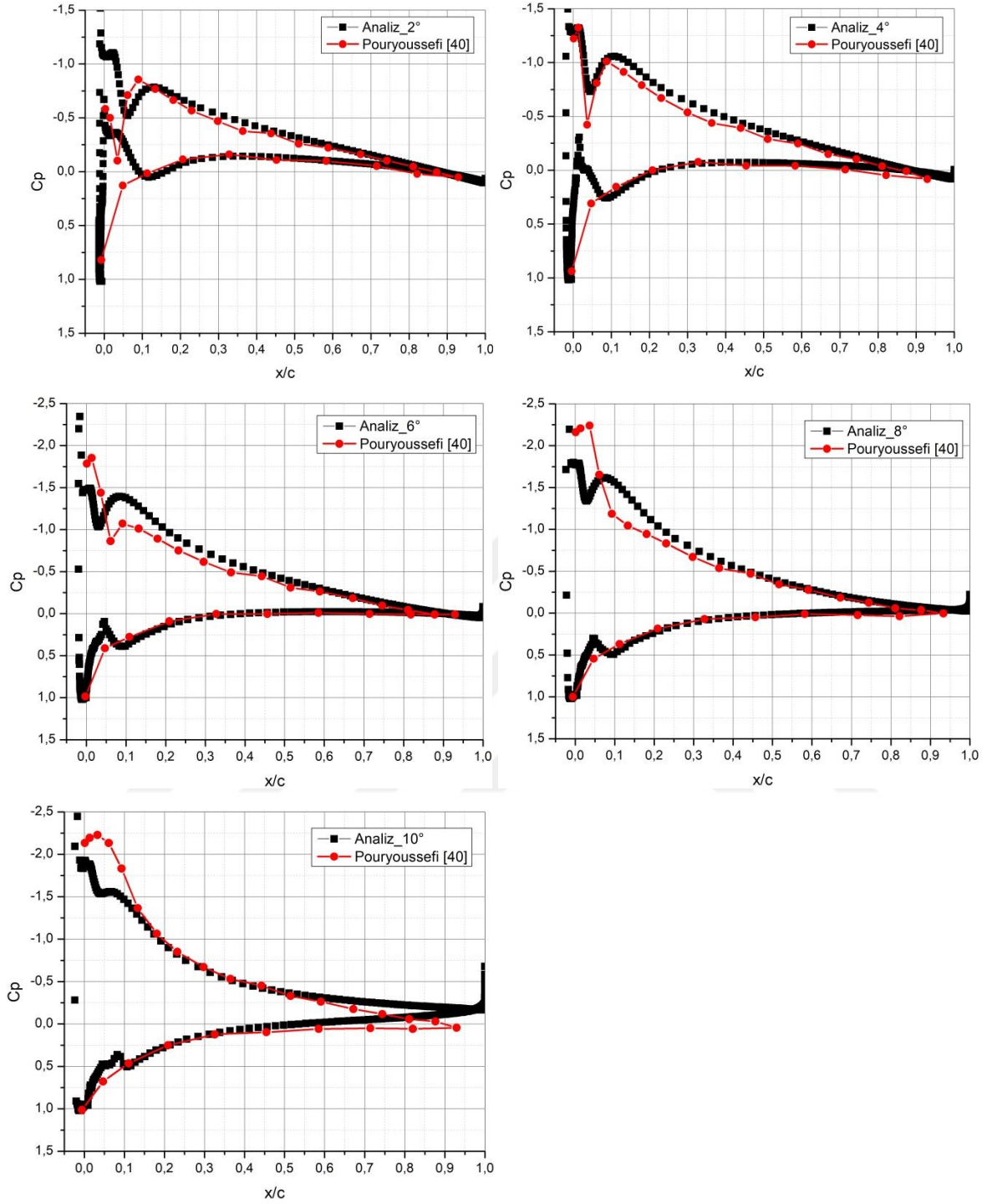
Şekil 5.9' de bahsedilen deneysel çalışmaların farklı atak açıları için elde ettikleri sürüklenme katsayıları ile bu çalışmada hesaplanan sürüklenme katsayıları değerleri kıyaslanmıştır. Atak açısı 9° dan sonra tutunma kaybının yaşanmasıyla birlikte akış ayrılmaları sonucunda sürüklenme katsayısı deneysel çalışmalarla uyumlu olarak hızlı bir şekilde artış göstermiştir. Düşük atak açılarında yazılım ile hesaplanan sürüklenme katsayısı değerlerinin deneysel değerlerden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi diğer çalışmalarda deneylerin daha düşük hızlarda gerçekleştirilmiş olmasıdır. Atak açısının artışıyla birlikte deneysel verilere göre sürüklenme katsayısının daha az değiştiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin de akış analizinde kullanılan türbülans modelinin akış ayrılması sonrası oluşan girdapları çok iyi modelleyememesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.9. Sürüklenme katsayısı [39, 40]

5.9. Farklı Atak Açısı Değerlerindeki Basınç Katsayıları

Şekil 5.10' da bu çalışmadan 2° , 4° , 6° , 8° ve 10° atak açıları için elde edilen kanat üzerindeki basınç katsayısı profili, Pouryoussefi ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri deneysel çalışmanın verileri ile kıyaslanmıştır [40]. Pouryoussefi ve arkadaşları, EG1164 test şartlarını kullanarak deneylerini, boyutları 1,2 m genişliğinde, 1 m yüksekliğinde ve 3 m uzunluğunda olan dikdörtgen bir test bölümüne sahip düşük hızlı, açık devreli bir rüzgar tüneline gerçekleştirmişlerdir. Rüzgar tünelinin üniform akış koşulları altında, serbest akış türbülans yoğunluğunun %0,15'ten düşük, test bölümü boyunca hızdaki düzensizliğinin $\pm 0,5$ civarında ve kullandıkları model boyutları dikkate alındığında maksimum blokaj oranının yaklaşık %8 olduğunu belirtmişlerdir. Kanat üzerindeki basıncı ölçmek için kanadın tam ortasında seçilen bir profili üzerinden her biri 0,6 mm çapında olan basınç sensörlerinden üst tarafa 18, alt tarafa ise 10 adet yerleştirilmiştir. Sınırlı sayıda sensör kullanımı nedeniyle kanat profili üzerinde basınç katsayısı değişimleri detaylı bir şekilde ölçülememektedir. Deneysel çalışmadan elde edilen basınç katsayıları ile bu çalışmada hesaplanan basınç katsayıları kıyaslandığında özellikle buzlanmanın olduğu bölgelerde ani basınç değişimleri tam olarak kıyaslanamamıştır. Şekil 5.10' da 2° atak açısı haricinde 4° , 6° , 8° ve 10° atak açılarındaki basınç katsayılarının benzer şekilde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10. 2°, 4°, 6°, 8° ve 10° atak açılarında buzlanma sonrası basınç katsayısı [40]

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında ilk olarak uçaklardaki buzlanma sorunu detaylı biçimde ele alınmıştır. Günümüzde uçaklar üzerinde kullanılan buz giderici ve önleyici sistemler hakkında bilgi verilmiştir. İkinci bölümde literatür araştırması yapılarak buzlanma ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar ele alınmış ve buzlanma sonucunda meydana gelen uçak kazalarından bahsedilmiştir. Bununla beraber literatürde bu konu ile ilgili yapılan çalışmalara değinilmiştir. Üçüncü bölümde uçaklarda görülen buzlanma fiziği üzerinde durulmuş, buzlanma türleri ve buzlanmanın nasıl oluştuğu açıklanmıştır. Dördüncü bölümde yapılan analiz hakkında detaylı bilgi verilmiş, analizin mesh yapısı, doğrulanması ve analizin hangi şartlarda yapıldığı anlatılmıştır. Son olarak beşinci bölümde yapılan analizlerin sonuçları grafikler halinde sunulmuştur.

Ansys Fluent' te yapılan akış analizinde Reynolds Ortamalı Navier Stokes (RANS) tabanlı bir türbülans modeli olan $k-\omega$ SST seçilmiştir. Bu türbülans modeli hem sınır tabakada hem de serbest akış bölgesinde daha iyi sonuçlar verdiği için tercih edilmiştir. Kanat üzerindeki buzlanmayı simüle etmek için Shin ve arkadaşlarının pürüzlülük modeli kullanılmıştır. FENSAP-ICE programı içerisinde çalışan DROP3D çözücüsü, buzlanmaya neden olan buz kristallerinin hareketini sonlu elemanlar metodu ile çözmektedir. DROP3D çözücüsü buz kristallerinin hareketini ve kanat üzerindeki davranışını Eulerian metodu ile modellemektedir. Buzlanma analizi, FENSAP yazılımının ICE3D çözücüsü kullanılarak camsı buzlanma şartlarında yapılmıştır. Daha gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için Boncuklanma Modeli seçeneği aktif hale getirilmiştir. Bu model yarı kararlı ve kararsız simülasyonlarda daha iyi sonuçlar vermektedir. Buzlanma başladıktan sonra kanat üzerinde artmaya başlayan buzlanmayı daha iyi tahmin edebilmek için çoklu adım yaklaşımı kullanılmıştır. Kanat çevresindeki mesh yapısının oluşan buzlanma şekline göre tekrar hesaplanması gerekmektedir. Çoklu adım yaklaşımı hücre sayısını sabit tutarak mesh yapısını güncellemekte ve gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir.

İlk olarak Bölüm 4.4.1' de bahsedilen boncuklanma modelinin, analize etkisi grafik olarak sunulmuştur. Literatürde yer alan doğrulama amacıyla kullanılan çalışma ile karşılaştırıldığında Boncuklanma Modelinin gerçeğe daha yakın sonuç verdiği görülmüş ve kalan analizler Boncuklanma Modeli kullanılarak yapılmıştır. İkinci bölümde çoklu

adımda damlacık birikme verimi gösterilmiştir. Sonuçların buzlanmanın zamanla boynuz tipine uygun olacak kanat üzerinde biriktiği görülmüştür. Üçüncü analiz simülasyonun literatürde yer alan çalışma ile doğrulanması için gerçekleştirilmiştir. Daha sonra değişen atak açıları için analizler tekrarlanmış ve buz şeklinin artan atak açılarıyla kanadın alt yüzeyine doğru genişleyerek ilerlediği ve boynuz benzeri bir yapıya kavuştuğunu göstermiştir. Beşinci analizde farklı atak açılarında kanat üzerindeki film kalınlığının gösterilmiştir. Su filmi kalınlığı artan atak açılarıyla beraber artma eğilimi göstermiştir. Sonraki kısımda sıvı su içeriği değerleri değiştirilmiş ve diğer parametreler sabit bırakılmıştır. Buzlanmanın hem kanadın üst bölgesinde hem de at bölgesinde arttığı görülmüştür. Damlacık boyutlarının değiştirilerek tekrarlandığı analizlerde yine benzer sonuçlarla karşılaşılmış, kanadın hücum kenarındaki buzlanma bölgesinin genişlediği sonucuna ulaşılmıştır. Değişen atak açılarının kaldırma ve sürüklenme katsayılarına etkisi incelenmiş grafikler halinde sunulmuştur. Artan atak açılarıyla kaldırma katsayısının 9° ye kadar arttığı, 9° den sonra azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür. Bu durum kanat üzerinde sekiz derece atak açısından sonra tutunma kaybı meydana geldiğini göstermektedir. İncelenen sürüklenme katsayısı artan atak açılarıyla beraber parabolik bir artış göstermiştir. 9° dereceden sonra sürüklenme katsayısının sert bir yükseliş ile artacağı öngörülebilir. Gözlemlenen iki durumda literatürde yer alan çalışmalarla doğrulanmış, benzer sonuçların çıktığı görülmüştür. Son olarak değişen atak açıları için bulunan basınç katsayıları grafikler halinde sunulmuştur. Atak açısının artması kanadın hücum kenarında görülen boynuz tipi buzlanmanın kanadın üst yüzeyinde azaldığını, alt yüzeyine doğru yayılarak arttığını göstermektedir. Basınç katsayılarındaki değişim bu yargıyı desteklemektedir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Ram, A. (2024). Aircraft De-Icing Market Growth Will Be Extreme in the Next Years. Web: <https://www.linkedin.com/pulse/aircraft-de-icing-market-growth-extreme-next-years-ambarish-ram-xdade/>, Son Erişim Tarihi: 15.07.2024
2. İnternet: Baker, R. (2012). Measuring Snowfall Intensity using LWE (Liquid Water Equivalent). A4A Meteorology Work Group. Web: <https://fpaw.aero/sites/default/files/128/baker-snowfall-intensity-table-a4a-fpaw-summer-brief-v3-0.pdf>, Son Erişim Tarihi: 15.07.2024
3. Hardy, J. K. (1946). Protection of aircraft against ice. *British R.A.E.*, Report No. 3380.
4. Messinger, B. L. (1953). Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of air speed. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 20, 29–41.
5. Langmuir, I., Blodgett, K. B. (1946). A mathematical investigation of water droplet trajectories. *Oxford Pergamon Press*, 10, 335-393.
6. Yamazaki, M., Jemcov, A., Sakaue, H. (2021). A review on the current status of icing physics and mitigation in aviation, *Aerospace*, 8(7), 188.
7. Garcia, D. (2023). *On the influence of ice accretion over the aerodynamic performance of airfoils*. Universidad de Sevilla, Sevilla
8. Boduroğlu, K. (2014). *Uçaklarda aerodinamik yapısal ve sistemsel problemlere yol açan donma probleminin irdelenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
9. Uğur, N. (2017). *In-flight icing simulation on engine nacelles*. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
10. Özcan, Y. (2018). *Rüzgar türbin pallerinde buz birikim tahmini ve güç üretim kayıplarını düşürmek için aerodinamik şekil eniyilemesi*. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
11. Ramazan, D. (2019). *Kanat profili üzerinde oluşan buzun iki boyutta matematiksel modellenmesi ve sayısal çözümü*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
12. Wang, B., Ramesh, K. A. (2021). Numerical simulation of flow past an airfoil with ice accretion on leading edge. *AIAA AVIATION 2021 FORUM*, 2583.
13. Martini, F., Ibrahim, H., Contreras Montoya, L. T., Rizk, P., Ilinca, A. (2022). Turbulence modeling of iced wind turbine airfoils. *Energies*, 15(22), 8325.
14. Pepeç, S. E. (2021). *Kanat kesiti etrafında hava akımı ve damlacık yörüngelerinin hesaplanması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.

15. Akbal, Ö. (2019). *Uçaklarda buzlanmanın nümerik olarak incelenmesi ve uçuş profili boyunca hava tahmin modeli uygulaması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
16. Özcer, A. I., Baruzzi, S. G., Reid, T. (2011). FENSAP-ICE: Numerical prediction of ice roughness evolution, and its effects on ice shapes. *SAE Technical Paper*, 2011-38-0024.
17. Croce, G., De Candido, E., Habashi, W. G., Munzar, J., Aubé, M. S., Baruzzi, G. S., Aliaga, C. (2010). FENSAP-ICE: Analytical model for spatial and temporal evolution of in-flight icing roughness. *Journal of Aircraft*, 47(4), 1283-1289.
18. Ayan E. (2017). *Ice accretion prediction with mixed phase cloud particles*. Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi.
19. Fenar S. (2016). *Uçaklarda uçuş esnasında meydana gelebilecek buzlanma risk derecesinin YSA kullanılarak tahmin edilmesi*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
20. Akbal, Ö., Ayan E., Kaya, M. O. (2022). *Atmosferik Koşullar Altında Uçak Kanat Profilinde Buz Birikim ve Performans Kestirimi*. 9. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı
21. Çamalan, İ. (2011). *JAA ATPL eğitimi (Meteoroloji)*, Havacılık Meteorolojisi Şube Müdürlüğü.
22. İnternet: Huttner, P. (2020). Winter magic: Stunning rime ice decorates trees Monday morning. Web: <https://www.mprnews.org/story/2020/02/10/winter-magic-stunning-rime-ice-decorates-trees-this-morning>
23. Kaymaz, Z., Usanmaz, Ö. (2016). Buzlanma giderici ve önleyici sistemler. *Eskişehir Anadolu Üniversitesi Yayınları*.
24. Truffer, M. (2013). *Ice physics*. University of Alaska Fairbanks, Alaska.
25. Addy Jr, H. E., Broeren, A. P., Potapczuk, M. G., Lee, S., Guffond, D., Montreuil, E., and Moens, F. (2016). *Ice accretions and full-scale iced aerodynamic performance data for a two-dimensional NACA 23012 airfoil*. Report no: NASA/TP-2016-218348.
26. Özbek Yanmaz, G. (2019). *Scaling for icing wind tunnel tests and validation with numerical simulations*. Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
27. Bragg, M. B., Broeren, A. P., Blumenthal, L. A. (2005). Iced-airfoil aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 41(5), 323-362.
28. Stebbins, S. J., Loth, E., Broeren, A. P., and Potapczuk, M. (2019). Review of computational methods for aerodynamic analysis of iced lifting surfaces. *Progress in Aerospace Sciences*, 111, 100583.
29. Broeren, A. P., Whalen, E. A., Busch, G. T., & Bragg, M. B. (2010). Aerodynamic simulation of runback ice accretion. *Journal of Aircraft*, 47(3), 924-939.

30. Dökme, R. (2019). *Kanat profili üzerinde oluşan buzun iki boyutta matematiksel modellenmesi ve sayısal çözümü*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi.
31. Gent, R. W., Dart, N. P., Cansdale, J. T. (2000). Aircraft Icing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2873-2911.
32. Ansys FENSAP-ICE User Manual, v22R1. (2022). ANSYS, Inc.
33. Ansys ICEM CFD Help Manual, v22R1. (2022). ANSYS, Inc.
34. White, F. M., and Majdalani, J. (2006). *Viscous fluid flow*. New York: McGraw-Hill, 3, 433-434.
35. Ansys Ansys Fluent Theory Guide, v22R1. (2022). ANSYS, Inc.
36. Kollar, L. E., Farzaneh, M., & Karev, A. R. (2006). Modeling droplet size distribution near a nozzle outlet in an icing wind tunnel. *Atomization and Sprays*, 16(6).
37. Olsen, W., Shaw, R. ve Newton, J. (1984). Ice shapes and the resulting drag increase for a NACA 0012 airfoil. *22nd Aerospace Sciences Meeting*, 109.
38. Liu, C. (2023). *Numerical simulation of in-flight icing effect on aerodynamic characteristics of airfoils*. Politecnico Milano, Milano.
39. Broeren, A.P.,Brag, M.B., Addy, H.E., Lee, S., Moens, F, and Guffond, D. (2010). Effect of High-Fidelity Ice Accretion Simulations on the Performance of a Full Scale Airfoil Model. *AIAA Journal of Aircraft*, 47 (1), Nasa-TM-2010-216344.
40. Pouryoussefi, S.G., Mirzaei, M., Nazemi, M.M., Fouladi, M., & Doosmahmoudi, A. (2016). Experimental Study of Ice Accretion Effects on Aerodynamic Performance of an NACA23012 Airfoil. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29(3), 585-595.





Gazili olmak ayrıcalıktır