KARADENİZ
TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü
FBE

İHA KANAT PROFİLİNDE BUZ BİRİKİMİNİN SAYISAL ANALİZİ

HAJI ABDULLAYEV

TRABZON - MART 2026

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İHA KANAT PROFİLİNDE BUZ BİRİKİMİNİN SAYISAL ANALİZİ

Haji ABDULLAYEV

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : **10 / 02 /2026**
Tezin Savunma Tarihi : **06 / 03 /2026**

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ömer Necati CORA**
ORCID :

Trabzon 2026

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalında
Haji ABDULLAYEV Tarafından Hazırlanan

İHA KANAT PROFİLİNDE BUZ BİRİKİMİNİN SAYISAL ANALİZİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 16 / 10 / 2025 gün ve 2124 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Ömer Necati CORA …...……...……

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Cemalettin AYGÜN …...……...……

Üye : Doç. Dr. Birol ŞAHİN ……...……...……

Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yüksek lisans sürecim boyunca akademik bilgi birikimi, tecrübeleri ve yol gösterici desteği ile bu çalışmanın her aşamasında katkı sağlayan danışmanım Prof. Dr. Ömer Necati CORA'ya teşekkürlerimi sunarım. "İHA Kanat Profilinde Buz Birikiminin Sayısal Analizi" başlıklı tezimin hazırlanmasında, her zaman yanımda olan aileme ve sabırla destek veren arkadaşlarıma da minnettarım. Bu çalışma sürecinde yurt dışında akademik gelişimime fırsat tanıyan Türkiye Cumhuriyeti Yurt Dışı Türkler ve Akraba Toplulukları Başkanlığı'na (YTB) sağladığı burs desteği için içtenlikle teşekkür ederim. Bu çalışma, yalnızca akademik gelişimime değil, aynı zamanda araştırma disiplinine, sabır ve azimle çalışmanın önemine dair kişisel kazanımlarıma da büyük katkı sağlamıştır.

Haji ABDULLAYEV

Trabzon 2026

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek lisans tezim olarak sunduğum "İHA Kanat Profilinde Buz Birikiminin Sayısal Analizi" başlıklı bu çalışmayı danışmanım Prof. Dr. Ömer Necati CORA'nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, ilgili laboratuvarlarda deneyleri/analizleri kendim yaptığımı/yaptırdığımı, metin ve kaynakçada diğer kaynaklardan elde edilen tüm bilgileri eksiksiz olarak alıntıladığımı beyan ederim. Araştırma sürecini bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak yürüttüğümü ve aksi bir bulgu ortaya çıkması durumunda her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. 06/03/2026

Haji ABDULLAYEV

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ IV
ÖZET VII
SUMMARY VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ IX
TABLOLAR DİZİNİ XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ XII
1. GİRİŞ 1
2. GENEL BİLGİLER 2
2.1. İnsansız Hava Araçları 2
2.2. Atmosferik Buzlanma 3
2.3. Buzlanmayı Etkileyen Önemli Parametreler 4
2.3.1. Meteorolojik Parametreler 5
2.3.2. Uçuş ve Aerodinamik Parametreleri 6
2.3.3. Yüzey ve Termodinamik Özellikler 8
2.4. Buzlanmanın Olumsuz Etkileri 9
2.4.1. Kaldırma Kaybı ve Sürükleme Artışı 9
2.4.2. Erken ve Ani Tutunma Kaybı 10
2.4.3. Kütle ve Ağırlık Merkezi Değişimi 10
2.4.4. Kumanda ve Kontrol Yüzeyi Sorunları 11
2.4.5. Motor ve Sensör Arızaları 11
2.5. Buz Türleri 12
2.5.1. Kırağı Buz 12
2.5.2. Sır (Şeffaf) Buz 13

2.5.3. Karışık Buz 14
2.5.4. Buzlanmada Özel Koşullar 14
2.6. Buzlanma Şekilleri 15
2.6.1. Boynuz Buzlanma 15
2.6.2. Akış Doğrultusunda Buzlanma 16
2.6.3. Kanat Doğrultusunda Buzlanma 16
2.7. Buzlanma Önleme Sistemleri 16
3. LİTERATÜR TARAMASI 18
4. METODOLOJİ 22
4.1. NACA 0012 Profilinin Oluşturulması ve Ağ Örgüsü 22
4.2. Akış Analizi 24
4.3. Damlacık Yörünge Tahmini ve Damlacık Çarpma Analizi 29
4.4. Buz Birikim Analizi 33
4.5. Buzlanma Analizi Koşulları 36
4.5.1. Temel Analiz Koşulları 36
4.5.2. Parametrik Analiz Koşulları 38
4.5.3. Çoklu Adım Analizi 38
4.5.4. Damlacık Dağılımının Seçimi 39
4.5.5. Sayısal Analiz Ayarları 39
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 41
5.1. Doğrulama Analizi 41
5.2. Temel Senaryo Analizleri 44
5.3. Akış Hızının Buzlanma Üzerindeki Etkisi 47
5.4. Damlacık Boyutunun Buzlanma Üzerindeki Etkisi 48
5.5. Sıvı Su İçeriğinin Buzlanma Üzerindeki Etkisi 51
5.6. Hücum Açısının Buzlanma Üzerindeki Etkisi 52
5.7. Sıcaklığın Buzlanma Üzerindeki Etkisi 55
5.8. Buz Koruma Sistemi İçin Isı Yükü Gereksinimleri 58
6. SONUÇLAR 61
7. KAYNAKLAR 63
ÖZGEÇMİŞ 68

YÜKSEK LISANS TEZI

ÖZET

İHA KANAT PROFİLİNDE BUZ BİRİKİMİNİN SAYISAL ANALİZİ

Haji ABDULLAYEV

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Ömer Necati CORA

Bu çalışma, insansız hava araçlarında (İHA) atmosferik buzlanma probleminin sayısal analiz yöntemleriyle incelenmesini konu almaktadır. Atmosferik buzlanma, uçak performansını ve güvenliğini ciddi şekilde etkileyen önemli bir havacılık sorunudur. Çalışmada atmosferik buzlanmanın temelleri, farklı buz şekillerinin etkileri ve buzlanma önleme sistemleri detaylı olarak ele alınmıştır. Uçak aerodinamiği ve akış dinamiği prensipleri çerçevesinde, sayısal hesaplama yöntemleri kullanılarak buzlanma süreci modellenmiştir. Tez kapsamında FENSAP-ICE yazılım paketi kullanılarak NACA 0012 kanat profili üzerinde buzlanma analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar literatürdeki deneysel verilerle doğrulanmıştır. Hava akışı analizi, damla yörüngesi analizi ve buz birikimi analizi yapılarak çeşitli koşullar incelenmiştir: -5 °C'de sır buz tipi ve belirgin boynuz oluşumları, -15 °C'de kalın ve pürüzlü kırağı buz yapısı, -2 °C'de ise ince ve düzenli buz tabakası gözlenmiştir. Damlacık boyutu ve sıvı su içeriği artışının çarpma bölgesinde kalınlaşma ve düzensizliğe neden olduğu, k-ω SST türbülans modelinin ise deneysel sonuçları daha doğru yansıttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları, Atmosferik Buzlanma, Sayısal Analiz.

MASTER THESIS

SUMMARY

NUMERICAL ANALYSIS OF ICING ON UAV WING PROFILE

Haji ABDULLAYEV

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Ömer Necati CORA

This study focuses on the numerical analysis of atmospheric icing on unmanned aerial vehicles (UAVs). Atmospheric icing is a significant aviation problem that seriously affects aircraft performance and safety. The fundamentals of atmospheric icing, the effects of different ice shapes, and anti-icing systems are discussed in detail. Within the framework of aircraft aerodynamics and flow dynamics principles, the icing process has been modeled using numerical methods. Within the scope of the thesis, icing analyses were performed on the NACA 0012 airfoil using the FENSAP-ICE software package, and the results were validated with experimental data available in the literature. Airflow analysis, droplet trajectory analysis, and ice accretion analysis were conducted to examine various conditions: glaze ice type with distinct horn formations at -5 °C, thick and rough rime ice structure at -15 °C, and a thin and uniform ice layer at -2 °C. It was determined that an increase in droplet size and liquid water content causes thickening and irregularity in the impingement zone, and the k-ω SST turbulence model more accurately reflects experimental results.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Atmospheric Icing, Numerical Analysis.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Farklı türlerdeki İHA'ların genel sınıflandırması (Saggittarius, 2025) … 2

Şekil 2. a) Sabit kanat ve b) döner kanat İHA …… 3

Şekil 3. a) Sabit kanatlı bir İHA'da, b) döner kanatlı bir İHA kanadında oluşan buz birikimi (Zhou vd., 2023) …… 4

Şekil 4. Buz birikimini etkileyen parametreler (Raj vd., 2018) …… 4

Şekil 5. 300 saniyelik buz birikiminden sonra İHA pervane kanadının çekilen görüntüleri - LWC'nin etkisi: a) LWC 0.3 g/m^3, b) LWC 0.8 g/m^3, c) LWC 1.4 g/m^3 (Muhammed vd., 2025) …… 5

Şekil 6. 300 saniyelik buz birikiminden sonra İHA pervane kanadının çekilen görüntüleri - MVD'nin etkisi: a) MVD 15 μm, b) MVD 25 μm, c) MVD 50 μm (Muhammed vd., 2025)…… 6

Şekil 7. Buz birikimi ve sıcaklık ilişkisi (Shein, 2026)…… 7

Şekil 8. Gerçekçi buz birikimine ve pürüzlülüğe göre değişen ısı taşınım katsayısı (McClain, 2025)…… 8

Şekil 9. Buzlanmaya maruz kalan bölgeler (Raj vd., 2018) …… 9

Şekil 10. Buzlanmanın kaldırma ve sürükleme katsayılarına etkisi (Deiler, 2025) 10

Şekil 11. Buz birikiminin uçak aerodinamiği üzerindeki etkisi (Deiler, 2025)….. 11

Şekil 12. Air France 447 uçağının Atlantik Okyanusu'nda bulunan enkazı …… 12

Şekil 13. a) Kırağı, b) sır ve c,d) karışık buzun karakteristik yapısı (Cheung vd., 2022)…… 13

Şekil 14. Atmosfer sıcaklığına göre buzlanma olasılığı (Airframe Icing, 2025) … 14

Şekil 15. Kanat buz oluşumu (Deiler, 2025) …… 15

Şekil 16. Kanat profili üzerinde farklı buz şekilleri (Wurst, 2023)…… 16

Şekil 17. Çeşitli buzlu kanat akış alanları için aerodinamik etkilerin niteliksel açıklaması (Bragg vd., 2005) …… 17

Şekil 18. NACA 0012 profilinin çözüm bölgesi 23
Şekil 19. NACA 0012 profilinin ağ yapısının genel görünümü 23
Şekil 20. Farklı yoğunluktaki ağ yapıları için kaldırma katsayısı değerleri 24
Şekil 21. Yüzeydeki ısı ve kütle transferi olaylarının şematik gösterimi 33
Şekil 22. Buzlanmış kanat geometrilerinin karşılaştırılması 41
Şekil 23. Kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişimi 42
Şekil 24. Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişimi 43
Şekil 25. Kanat üzerinde oluşan buz birikimi 45
Şekil 26. Kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişimi 46
Şekil 27. Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişimi 46
Şekil 28. Farklı akış hızlarında elde edilen buz birikimleri 48
Şekil 29. Farklı damlacık boyutlarında elde edilen buz birikimi geometrileri 49
Şekil 30. Farklı damlacık boyutları için damla tutma verimliliği dağılımları 50
Şekil 31. Farklı sıvı su içeriğinde elde edilen buz birikimi geometrileri 51
Şekil 32. Farklı sıvı su içeriği için damla tutma verimliliği dağılımları 52
Şekil 33. Farklı hücum açılarında elde edilen buz birikimi geometrileri 53
Şekil 34. Farklı hücum açıları için basınç katsayısı dağılımı 54
Şekil 35. Farklı sıcaklıklarda elde edilen buz birikimi geometrileri 56
Şekil 36. Farklı sıcaklıklar için donma oranı 57
Şekil 37. Farklı sıcaklıklar için damlacık birikme verimliliği dağılımları 57
Şekil 38. Tam buharlaştırma modu için gerekli ısı akısı dağılımı 59
Şekil 39. Islak çalışma modu için gerekli ısı akısı dağılımı 60

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Temel analiz koşulları (A-1) 37

Tablo 2. Tüm analiz senaryolarının koşulları 38

Tablo 3. Sayısal analiz ayarları 40

Tablo 4. Buz koruma sistemi güç gereksinimleri 59

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

İHA	İnsansız Hava Aracı
CFD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
LWC	Sıvı Su İçeriği (Liquid Water Content)
MVD	Ortalama Hacim Çapı (Median Volume Diameter)
IPS	Buz Koruma Sistemi (Ice Protection System)
SST	Kayma Gerilmesi Taşınımı (Shear Stress Transport)
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier–Stokes (Reynolds-Averaged Navier–Stokes)
LES	Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation)
DNS	Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation)
AoA	Hücum Açısı (Angle of Attack)
Mach (M)	Mach Sayısı (Mach Number)
a	İvme (m/s^2)
$c_{d-droplet}$	Damlacık sürükleme katsayısı
g	Yer çekimi ivmesi (m/s^2)
h_f	Su filmi kalınlığı (m)
l	Karakteristik uzunluk (m)
m	Kütle (kg)
$\dot{m}_{evap}$	Konvektif ısının buharlaşma kütlesel debisi (kg/s)
$\dot{m}_{ice}$	Buzun anlık kütlesel debisi (kg/s)
u	Su hızı (m/s)

u_a	Hava hızı (m/s)
u_d	Damlacık hızı (m/s)
u_f	Sıvı filmi hızı (m/s)
$\bar{u}_f$	Ortalama su filmi hızı (m/s)
u_t	Sürtünme hızı (m/s)
u_∞	Serbest akım hava hızı (m/s)
v	Hava hızı (m/s)
x, y, z	Kartezyen koordinatlar
y^+	Boyutsuz duvar mesafesi
A	Alan (m^2)
C_L	Kaldırma katsayısı
C_D	Sürükleme katsayısı
C'_f	Yerel sürtünme katsayısı
C_{ice}	Buzun özgül ısısı (kJ/kg°C)
C_w	Suyun özgül ısısı (kJ/kg°C)
F_D	Sürükleme kuvveti (N)
F_a	Dış kuvvetler (N)
F_G	Ağırlık kuvveti (N)
Fr	Froude sayısı
K	Damlacık eylemsizlik parametresi
F_L	Kaldırma kuvveti (N)
L_{evap}	Suyun gizli buharlaşma ısısı (J/kg)
L_{fusion}	Buzun erime ısısı (J/kg)
L_{subl}	Buzun gizli süblimleşme ısısı (J/kg)

P	Toplam basınç (Pa)
P_S	Statik basınç (Pa)
R	Evrensel gaz sabiti [J/(mol·K)]
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık (K)
$\tilde{T}_{d,\infty}$	Serbest akım damlacık sıcaklığı (K)
$\tilde{T}$	İki arayüz arasındaki denge sıcaklığı (K)
$\dot{Q}_{con}$	Konvektif ısı akısı (W)
β	Damlacık toplama verimi
ε	Emisivite
κ	İzentropik üs
λ	Viskozite katsayısı (kg/m·s)
μ	Dinamik viskozite (kg/m·s)
ν	Kinematik viskozite (m^2/s)
ρ_i	İlgili akışkanın yoğunluğu (kg/m^3)
ρ_w	Suyun yoğunluğu (kg/m^3)
σ	Boltzmann sabiti ($kg \cdot m^2/K \cdot s^2$)
τ	Kayma gerilmesi (N/m^2)
ϕ	Hacim oranı

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçlarının (İHA) lojistikten altyapı denetimine, arama ve kurtarma operasyonlarından çevresel gözlemlere kadar farklı sektörlerde yaygınlaşması, bu araçların giderek daha zorlu çevresel koşullarda, özellikle de soğuk iklimlerde kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. İHA kullanımındaki bu artış, atmosferik buzlanma sorununu önemli bir güvenlik riski haline getirmiştir (Müller vd., 2023; Zhou vd., 2023). Atmosferik buzlanma, uçak yüzeylerinde buz birikimiyle karakterize edilir ve aerodinamik özellikleri değiştirerek uçuş kararlılığını ve kontrolünü tehlikeye sokar (Gusev & Nikolaev, 2021). Geleneksel insanlı uçaklarda buzlanma üzerine önemli çalışmalar yapılmış olsa da, İHA'ların daha küçük ölçekli yapıları ve farklı operasyonel sınırları, bu çalışmalarda tam anlamıyla yansıtılmamış özgün zorluklar ortaya çıkarmaktadır (Muhammed & Virk, 2022). Zhou vd. (2023), özellikle düşük kütleleri ve ataletleri nedeniyle küçük miktardaki buzlanmaların dahi İHA'larda kaldırma kuvvetinde orantısız azalmaya, sürüklenmede artışa ve kontrol otoritesinde bozulmaya yol açarak görev başarısızlığına veya felaketle sonuçlanan kayıplara neden olabileceğini belirtmektedir. Ayrıca, genellikle daha büyük uçaklar için tasarlanmış geleneksel buz önleme ve buz çözme yöntemleri, İHA'larda çoğu zaman pratik olmamakta, verimsiz kalmakta ya da aşırı ağırlığa neden olmaktadır (Li vd., 2024). Bu kırılganlık, buzlanmayı tahmin etmeye ve önlemeye yönelik gelişmiş yöntemlere duyulan kritik ihtiyacı ortaya koymaktadır (Hann vd., 2019). Kuzey kutbuna yakın bölgelerdeki insan faaliyetlerinin artmasıyla birlikte, İHA'ların buz keşfi, deniz buzu kalınlığı ölçümü ve kıyı erozyonu izleme gibi görevlerde kullanımı da yaygınlaşmıştır. Bu nedenle zorlu çevresel koşullar göz önünde bulundurulduğunda güvenilir buzlanma tahminleri her zamankinden daha gerekli hale gelmiştir (Muhammed & Virk, 2022). Soğuk hava koşullarında İHA'ların artan kullanım talebi, aerodinamik yüzeylerde buzlanma durumlarını doğru şekilde simüle edebilecek gelişmiş sayısal modellere duyulan acil ihtiyacı da vurgulamaktadır (Samad vd., 2025).

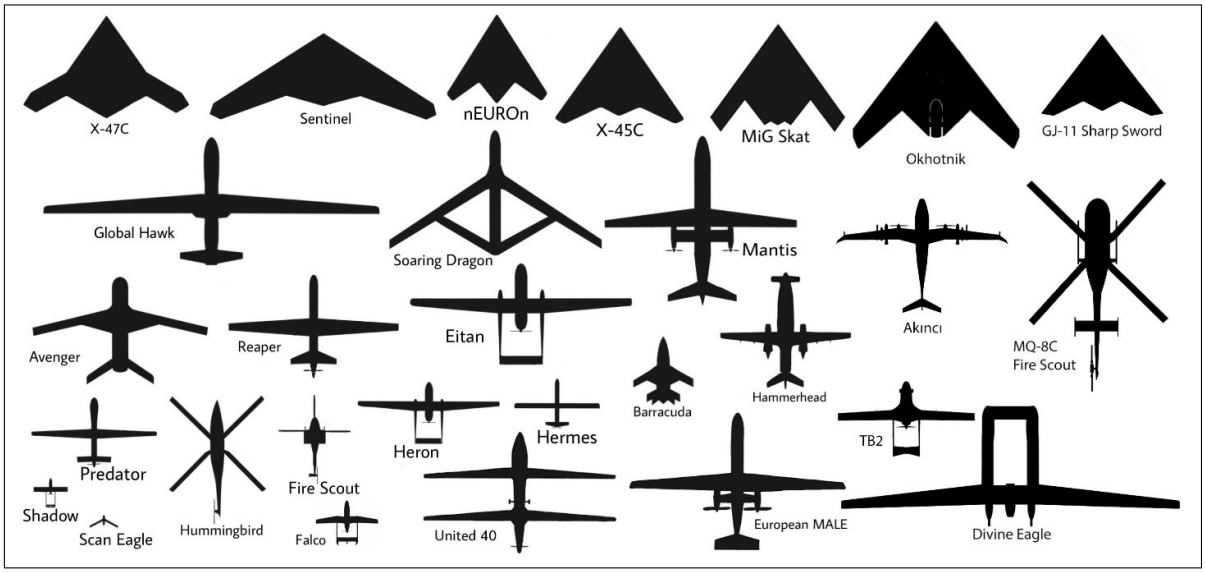
Bu çalışma, mevcut tahmin yeteneklerindeki önemli bir boşluğu doldurmak amacıyla, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemlerinden yararlanarak İHA kanatlarında buzlanmanın hassas şekilde simüle edilmesine odaklanmaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. İnsansız Hava Araçları

İHA'lar, başlangıçta yoğun olarak askeri amaçlı kullanım için düşünülürken, günümüzde artık diğer sanayi dallarında da kullanımları yaygınlaşmaktadır (Han & Guo, 2025; Vedrtnam vd., 2025). Bu süreç, lojistik, tarım, çevresel izleme ve gözetim gibi birçok sektörde tehlikeli ya da tekrarlı görevlerin daha düşük operasyonel maliyetle verimli şekilde yürütülmesini sağlamıştır (Islam, 2023; Vedrtnam vd., 2025). Han ve Guo (2025) enerji yönetimi ve görev atama açısından otonom planlamanın yaygınlaştığını gösterirken, konum ve iz sürme için doğrudan denetleyici olarak yapay sinir ağlarının başarımını ortaya koymaktadır. Başlangıçta askeri amaçlar için geliştirilen İHA'lar, günümüzde dünya genelinde gözetleme, haberleşme ve navigasyon sistemlerinde kritik görevler üstlenmektedir (Harvey vd., 2024; Karar vd., 2021; Mohsan vd., 2023). Bunun ötesinde, otonom arazi çalışmaları, paket teslimatı ve haritalama gibi uygulamalar, teknolojinin uyarlanabilirliğini ve artan önemini vurgular.

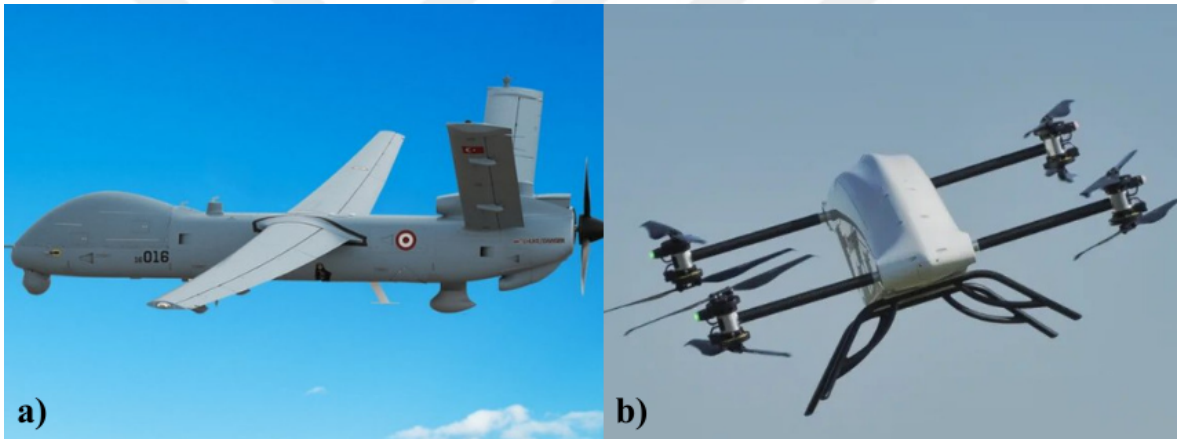
Şekil 1'de farklı türlerdeki İHA'ların (sabit kanat, döner kanat, hibrit, multirotor vb.) genel sınıflandırması verilmiştir. Bu sınıflandırmalar, görev profillerine göre uygun platformun seçilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.



Şekil 1. Farklı türlerdeki İHA'ların genel sınıflandırması (Saggittarius, 2025)

İHA'lar aerodinamik yapı ve tahrik sistemlerine göre genel olarak sabit kanat, döner kanat ve hibrit olarak sınıflandırılır. Sabit kanat İHA'lar ileri hareketle kaldırma kuvveti üretir. Yüksek hız ve uzun havada kalış özellikleri sayesinde geniş alan kapsaması ve uzun menzilli görevler için uygundur (Feng vd., 2025). Döner kanat İHA'lar dönen pervanelerle kaldırma kuvveti üretir. Hassas askıda kalış ve yüksek manevra kabiliyeti ile dar alanlarda sabit kanatlı İHA'lara göre daha iyi performans sergiler (Alharbi vd., 2022). Hibrit platformlar, sabit kanadın verimliliğini döner kanadın dikey manevra yetenekleriyle birleştirerek daha geniş görev profillerine olanak tanır (Losè vd., 2020). Sabit ve döner kanat İHA'ların örnekleri Şekil 2'de gösterilmiştir.

Bu çeşitlilik, görev gereksinimlerine göre dayanım, faydalı yük kapasitesi ve manevra kabiliyeti arasında bilinçli bir denge kurulmasını zorunlu kılar.



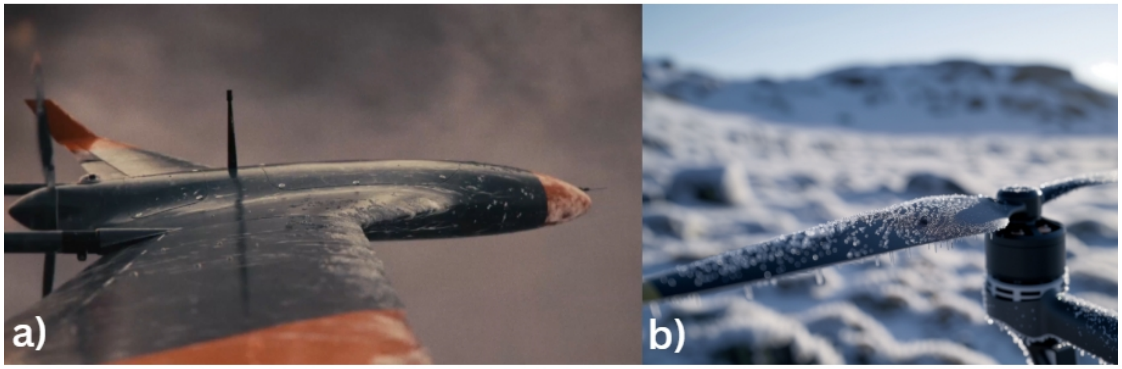
Şekil 2. a) Sabit kanat ve b) döner kanat İHA

2.2. Atmosferik Buzlanma

Atmosferik buzlanma (Şekil 3), belirli meteorolojik koşullara maruz kalan yüzeylerde soğumuş su damlacıklarının kanat yüzeyine çarpıp donmasıyla oluşan buz birikimini ifade eder (Wang, 2008). Bu olgu ortam sıcaklığı, sıvı su içeriği (LWC: Liquid Water Content), damlacık boyut dağılımı ve hava hızı gibi çevresel faktörlerin karmaşık etkileşimiyle belirlenir ve bu faktörler buz birikiminin hızını ve morfolojisini kritik biçimde etkiler (Sørensen, 2016). Buzlanma oranı esas olarak hava sıcaklığı, aracın hızı ve boyutu, sıvı su içeriği ve ortalama hacim çapı (MVD: Median Volume Diameter) tarafından belirlenir (Hann & Johansen, 2020).

En kritik buzlanma biçimi, yüksek hızda aşırı soğumuş su damlacıklarının çarpmasıyla

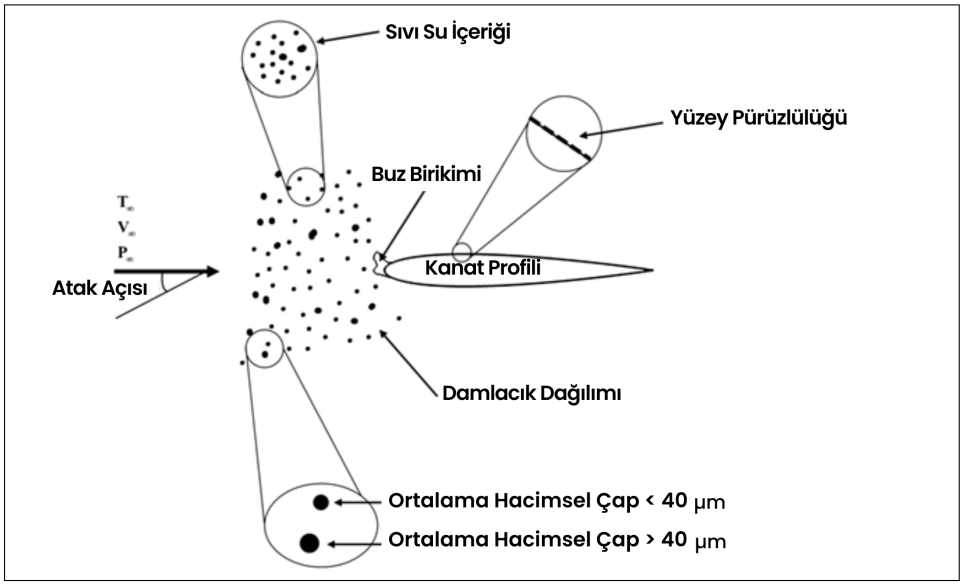
meydana gelir ve bu durum özellikle yüksek irtifadaki bulutlarda yaygındır (Leclerc, 2023). Bununla birlikte, buzlanma daha seyrek görülen dondurucu yağış koşullarında da oluşabilir. Bu durumda damlacık boyutları çok daha büyük olduğundan tehlike daha da artmaktadır (Wurst, 2023).



Şekil 3. a) Sabit kanatlı bir İHA'da, b) döner kanatlı bir İHA kanadında oluşan buz birikimi (Zhou vd., 2023)

2.3. Buzlanmayı Etkileyen Önemli Parametreler

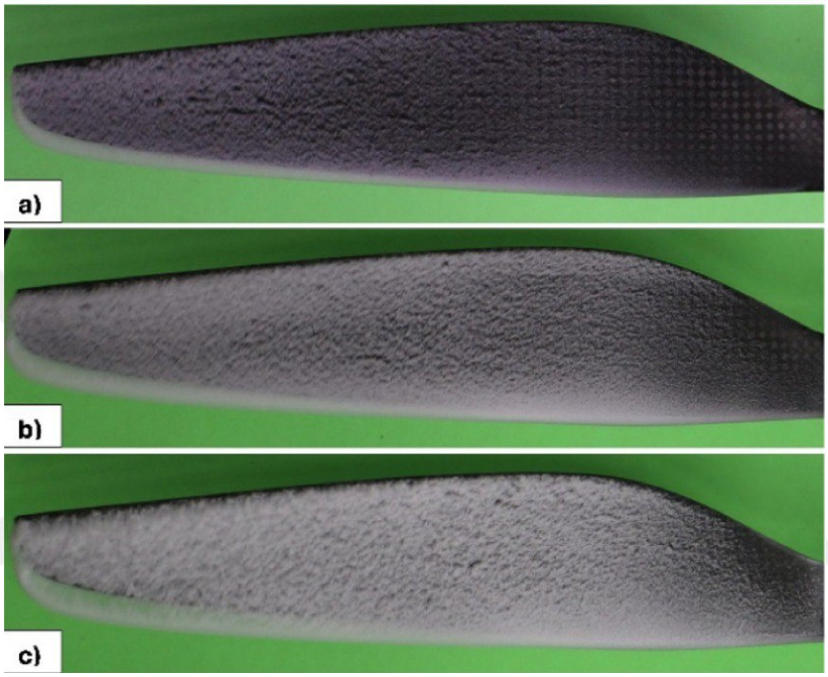
Uçak buzlanması, birçok meteorolojik, aerodinamik ve termodinamik parametrenin karmaşık etkileşimi sonucu ortaya çıkan kritik bir olgudur (Şekil 4). Bu süreci etkileyen en önemli parametreler aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 4. Buz birikimini etkileyen parametreler (Raj vd., 2018)

2.3.1. Meteorolojik Parametreler

Sıvı Su İçeriği: Birim hacimdeki havanın içerdiği aşırı soğumuş su kütlesi miktarıdır ve buzlanma analizlerinde en temel parametrelerden biridir. Genel olarak, LWC arttıkça uçağın yüzeyinde biriken buz miktarı da artar (Şekil 5). LWC, aynı zamanda buzlanma sonucu oluşan yüzey pürüzlülüğünü ve yüzeydeki suyun akış özelliklerini de etkiler (Ozcer vd., 2011).

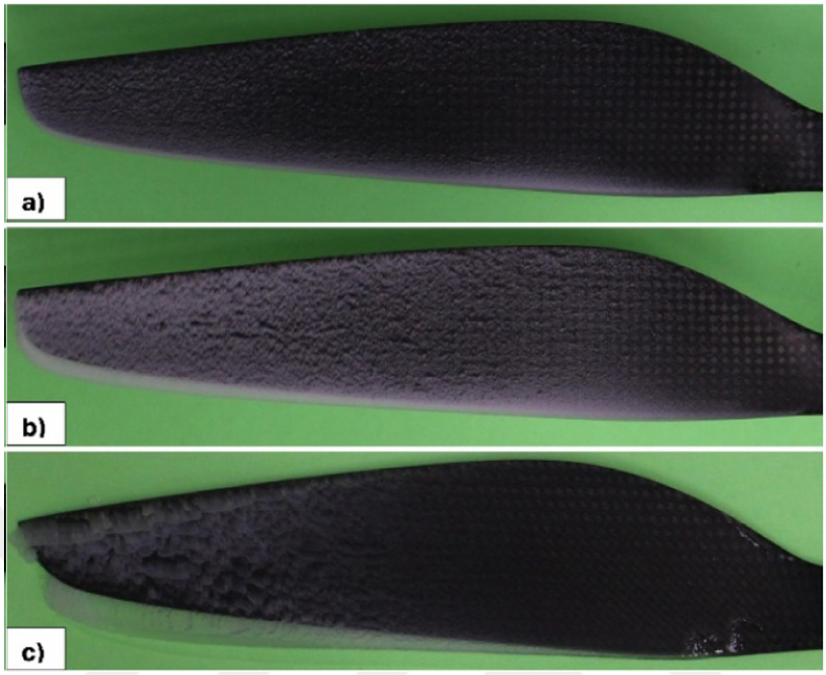


Şekil 5. 300 saniyelik buz birikiminden sonra İHA pervane kanadının çekilen görüntüleri - LWC'nin etkisi: a) LWC 0.3 g/m^3, b) LWC 0.8 g/m^3, c) LWC 1.4 g/m^3 (Muhammed vd., 2025)

Ortalama Hacimsel Çap: Buluttaki su damlacıklarının ortalama boyutunu temsil eden kritik bir parametredir (Şekil 6). Damlacık boyutu, yüzeydeki toplanma verimliliğini (β) etkileyen en önemli faktörlerden biridir (Ozcer, 2022). Büyük damlacıklar daha fazla eylemsizliğe sahip oldukları için hava akımını takip etmek yerine daha balistik bir yörünge izlerler ve bu da daha geniş bir alana çarpmalarına neden olur (Ozcer, 2022).

Damlacık Boyut Dağılımı (PSD: Particle Size Distribution): Bir bulut, aynı MVD değerine sahip olsa bile farklı boyutlarda damlacıklar içerebilir ve bu dağılım, buzlanma sonucunu önemli ölçüde değiştirebilir (Petrosino vd., 2011). Özellikle aşırı soğumuş büyük damlacıklar (SLD) içeren durumlarda, tek bir MVD değeri, bulutu tanımlamak için yetersiz kalır ve tam bir boyut dağılımının kullanılması gerekir (Ozcer, 2022). Bazı durumlarda, tam

bir boyut dağılımı ile yapılan simülasyonlar, tek bir MVD değeriyle yapılanlara göre çok daha yüksek toplanma verimliliği öngörebilir (Petrosino vd., 2011).



Şekil 6. 300 saniyelik buz birikiminden sonra İHA pervane kanadının çekilen görüntüleri - MVD'nin etkisi: a) MVD 15 μm, b) MVD 25 μm, c) MVD 50 μm (Muhammed vd., 2025)

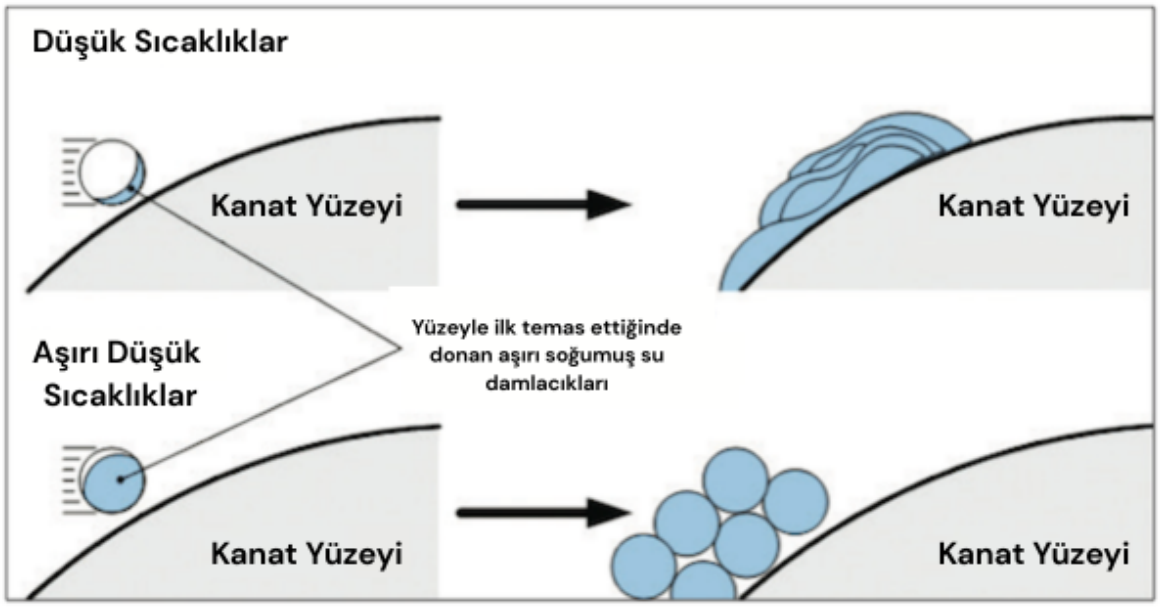
Ortam Sıcaklığı (T_∞): Buzun türünü belirleyen en temel faktördür. Genel olarak, -15 °C'den düşük sıcaklıklarda damlacıklar çarptıkları anda donarak kırağı tipi buz oluşturur (Sznajder vd., 2017). Donma noktasına daha yakın sıcaklıklarda ise damlacıkların sadece bir kısmı donar ve kalan sıvı su yüzeyde akarak şeffaf ve yoğun yapıda cam tipi buz meydana getirir (Lavoie vd., 2018). Sıcaklık, donma oranını, yüzey pürüzlülüğünü ve geri akan suyun davranışını doğrudan etkiler (Şekil 7).

2.3.2. Uçuş ve Aerodinamik Parametreleri

Uçuş Hızı (V_∞): Toplanma verimliliğini etkileyen birincil faktörlerden biridir (Ozcer, 2022). Yüksek hızlar, hava sıkışması ve viskoz sürtünme nedeniyle aerodinamik ısınmayı artırır. Bu ısınma, yüzey sıcaklığını yükselterek donma oranını düşürür ve kırağı tipi buzlanmayı cam tipi buzlanmaya dönüştürebilir veya buz oluşumunu tamamen engelleyebilir.

Uçak Boyutu ve Kanat Profili Kalınlığı: Daha küçük bileşenler (örneğin sensörler, pervaneler, İHA kanatları) daha büyük bileşenlere (örneğin ticari uçak kanatları) göre daha

yüksek toplanma verimliliğine sahiptir ve daha hızlı buz biriktirir (Ozcer, 2022). Daha küçük kanat profili uzunlukları, daha yüksek göreceli buz kalınlıklarına ve dolayısıyla daha ciddi aerodinamik sorunlara yol açar (Habashi, 2023). Bu durum, İHA'ları buzlanmaya karşı özellikle hassas hale getirir.



Şekil 7. Buz birikimi ve sıcaklık ilişkisi (Shein, 2026)

Hücum Açısı (AoA): Uçağın hücum açısı, durma noktasının (stagnation point) ve damlacık çarpma limitlerinin konumunu değiştirir. Bu da buzun kanat profilinin üst veya alt yüzeyinde nerede birikeceğini doğrudan belirler (Lu vd., 2023).

Reynolds Sayısı (Re): Akışın laminer veya türbülanslı doğasını belirler ve özellikle İHA'lar gibi düşük Reynolds sayılarında çalışan araçlar için önemlidir (Habashi, 2023). Laminer-türbülanslı akış geçişini ve ayrılma kabarcıklarının oluşumunu etkiler (Habashi, 2023). Reynolds sayısı şu şekilde tanımlanır:

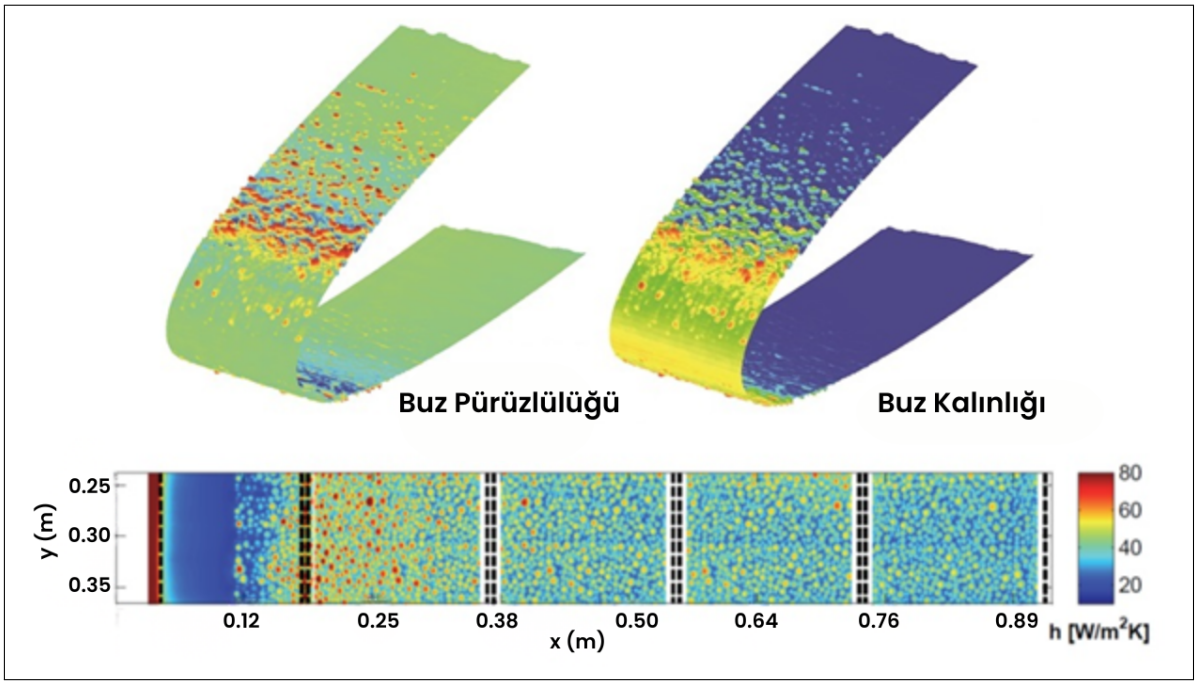
$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu} \tag{2.1}$$

Burada L, karakteristik uzunluk, μ dinamik viskozite, ν ise kinematik viskozitedir.

Dönme Etkileri: Pervaneler ve helikopter rotorları gibi dönen parçalarda, merkezkaç kuvvetleri yüzeydeki su filminin dışa doğru hareket etmesine ve buzun parçalanarak atılmasına (ice shedding) neden olur (Habashi, 2023).

2.3.3. Yüzey ve Termodinamik Özellikler

Yüzey Pürüzlülüğü (k_s): Buzun kendisi pürüzlü bir yapıya sahiptir ve bu pürüzlülük, konvektif ısı transfer katsayısını (HTC) önemli ölçüde artırır (Şekil 8). Artan ısı transferi, donma oranını yükseltir ve özellikle cam tipi buz durumunda oluşan "boynuz" şeklindeki yapıların oluşumunu ve nihai buz şeklini önemli bir şekilde etkiler. Pürüzlülük, zamanla ve yüzeydeki konuma göre değişiklik gösterir (Lavoie vd., 2018).



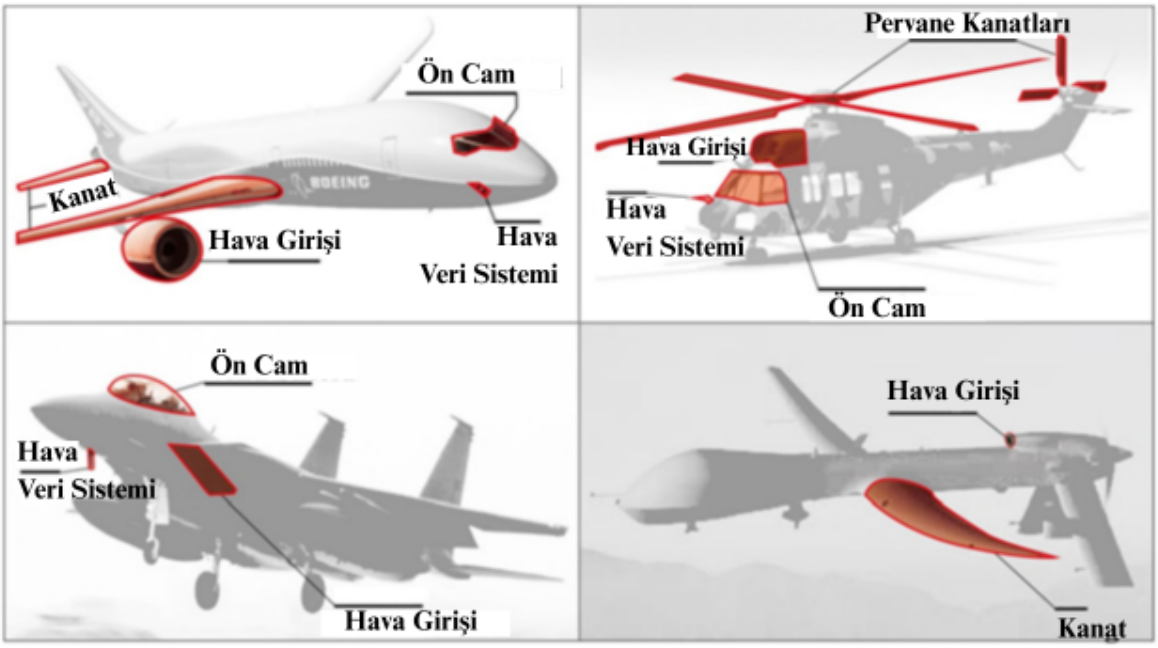
Şekil 8. Gerçekçi buz birikimine ve pürüzlülüğe göre değişen ısı taşınım katsayısı (McClain, 2025)

Donma Oranı (Freezing Fraction): Yüzeye çarpan suyun donan kısmını ifade eder ve buzun türünü belirler. Bu oran, aerodinamik ısınma, damlacıkların kinetik enerjisi, buharlaşma/süblimleşme, konveksiyon ve donmanın gizli ısısı gibi birçok enerji teriminin dengesiyle belirlenir (Lavoie vd., 2018).

Buz Katmanı Boyunca Isı İletimi: Özellikle cam tipi buzlanmada, biriken buz katmanı üzerinden altındaki daha sıcak olan kanat yüzeyine doğru olan ısı iletimi, enerji dengesinde önemli bir rol oynar. Bu etkiyi dikkate alan modeller (örneğin Genişletilmiş Messinger Modeli), donma oranını artırarak daha gerçekçi buz şekilleri tahmin edebilir (Liu vd., 2019).

2.4. Buzlanmanın Olumsuz Etkileri

Uçuş sırasında buzlanma, aşırı soğumuş su damlacıklarının uçağın yüzeylerine çarpıp donmasıyla meydana gelen ve havacılık güvenliği için ciddi bir tehdit oluşturan bir olgudur. Bu tehlike sadece kanatlar ve kuyruk gibi taşıyıcı yüzeylerle sınırlı değildir. Motor girişleri, pervaneler, Pitot tüpleri gibi sensörler ve antenler gibi uçağın kritik tüm bileşenlerini etkiler (Şekil 9).

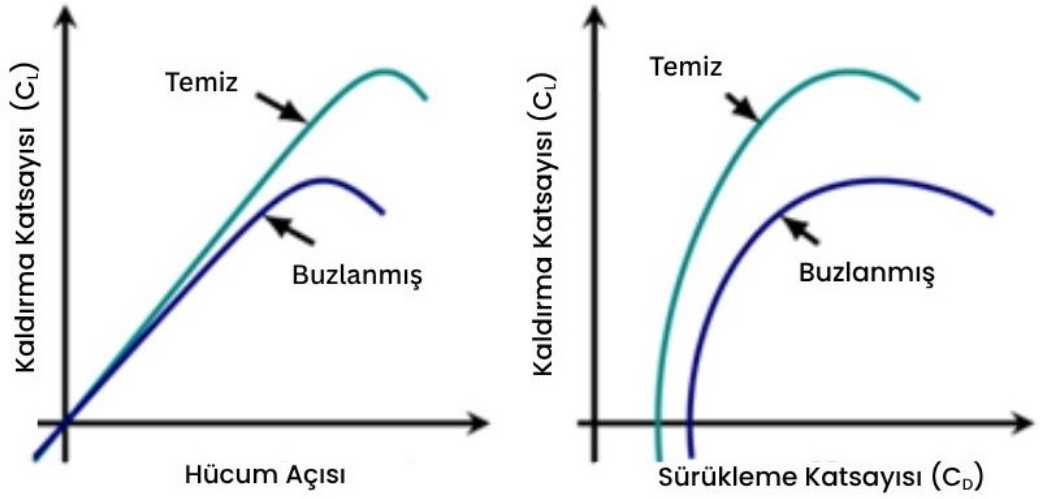


Şekil 9. Buzlanmaya maruz kalan bölgeler (Raj vd., 2018)

2.4.1. Kaldırma Kaybı ve Sürükleme Artışı

Buz birikimi, kanat profilinin aerodinamik şeklini değiştirerek kaldırma kuvvetini azaltır ve sürükleme kuvvetini önemli ölçüde artırır. Literatürdeki çalışmalar, bu etkinin maksimum kaldırma katsayısında (C_{Lmax}) %40 ila %80 arasında kayıplara yol açabildiğini göstermektedir (Costes & Moens, 2019). Örneğin, NACA 23012 kanat profili üzerinde yapılan tam ölçekli testlerde, farklı buz şekilleri temiz kanadın C_{Lmax} değerini 1.85'ten 0.52'ye kadar düşürmüştür (Broeren vd., 2011). Benzer şekilde, MS(1)-0313 kanat profili üzerinde yapılan sayısal analizler, %60'ın üzerinde sürükleme artışı ve %8-10 arasında kaldırma kuvvetinde düşüşü öngörmüştür (Farabello vd., 2025). Bu durum, uçağın havada kalabilmesi için daha fazla

motor gücüne ve daha yüksek hücum açısına ihtiyaç duymasına neden olur (Biancolini vd., 2014). Şekil 10'de buzlanmanın kaldırma ve sürükleme katsayısına etkileri özetlenmiştir.



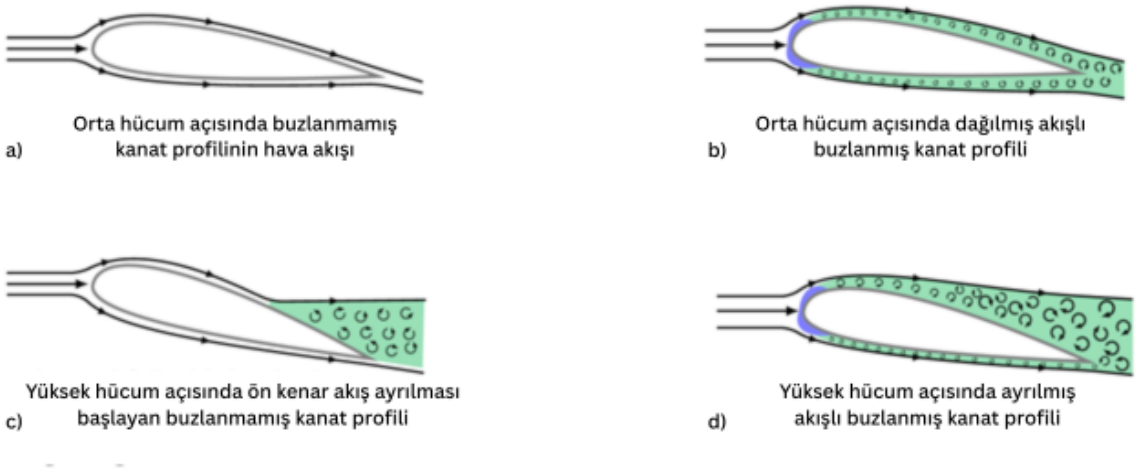
Şekil 10. Buzlanmanın kaldırma ve sürükleme katsayılarına etkisi (Deiler, 2025)

2.4.2. Erken ve Ani Tutunma Kaybı

Buzlanmanın en tehlikeli sonuçlarından biri, normalden çok daha düşük hücum açılarında ani ve beklenmedik bir şekilde tutunamama (stall) meydana gelmesidir (Costes & Moens, 2019). Buz birikintileri, özellikle hücum kenarında oluşan boynuz tipi buzlar, akışın yüzeyden erken ayrılmasına neden olarak geniş ayrılma bölgeleri (separation bubbles) oluşturur (Costes & Moens, 2019). Bu durum, uçağın kontrolünü zorlaştırır ve pilot için çok az uyarı vererek veya hiç vermeyerek ani kontrol kaybına yol açabilir (Şekil 11).

2.4.3. Kütle ve Ağırlık Merkezi Değişimi

Biriken buzun ağırlığı, özellikle küçük hava araçları ve İHA'lar için önemli bir ek yük oluşturur (Habashi vd., 2004). Daha da önemlisi, buzun düzensiz birikmesi uçağın ağırlık merkezini değiştirerek kararlılığını (stabilite) olumsuz etkileyebilir.



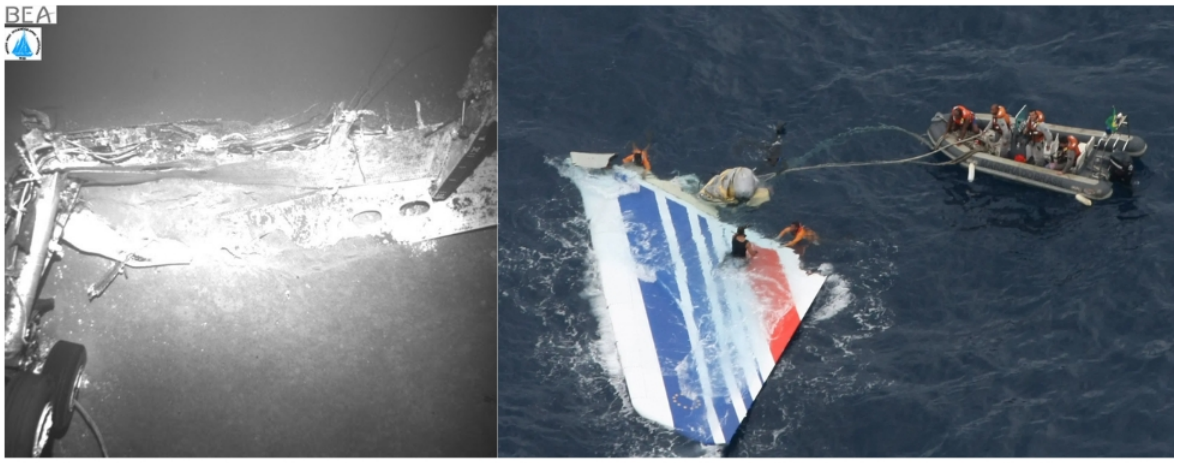
Şekil 11. Buz birikiminin uçak aerodinamiği üzerindeki etkisi (Deiler, 2025)

2.4.4. Kumanda ve Kontrol Yüzeyi Sorunları

Kanatçıklar, dümen ve irtifa dümeni gibi kontrol yüzeylerinde veya menteşelerinde biriken buz, bu yüzeylerin hareketini kısıtlayabilir veya aerodinamik etkinliklerini azaltabilir. Özellikle aşırı soğumuş büyük damlacıkların neden olduğu ve buzdan koruma sistemlerinin arkasında oluşan geri akış buzu, kanatçık menteşe momentlerinde tersine dönmeye yol açarak pilotun kumanda komutlarının tam tersi bir etki yaratmasına neden olabilir. Bu durum, 1994 yılındaki Roselawn ATR-72 kazasının ana nedeni olarak gösterilmektedir (Ghisu vd., 2011).

2.4.5. Motor ve Sensör Arızaları

Motor girişlerinde veya fan pallerinde biriken buz, motorun hava girişini engelleyerek güç kaybına, hatta motorun durmasına neden olabilir (Ozcer, 2022). Kopan buz parçaları ise motorun iç kısımlarına çarparak ciddi hasarlara yol açabilir. Pitot tüpü gibi kritik sensörlerin buzlanması, uçağın bilgisayarlarına yanlış hız ve irtifa bilgisi göndererek kontrol kaybına neden olabilir. 1 Haziran 2009'da Atlantik Okyanusu üzerinde gerçekleşen Air France 447 kazası bu duruma trajik bir örnektir (Şekil 12). Buzlanan pitot tüpleri hız göstergelerinin hatalı çalışmasına, otopilotun devre dışı kalmasına ve uçağın taşıma kaybına girmesine yol açmış ve 228 yolcu hayatını kaybetmiştir.



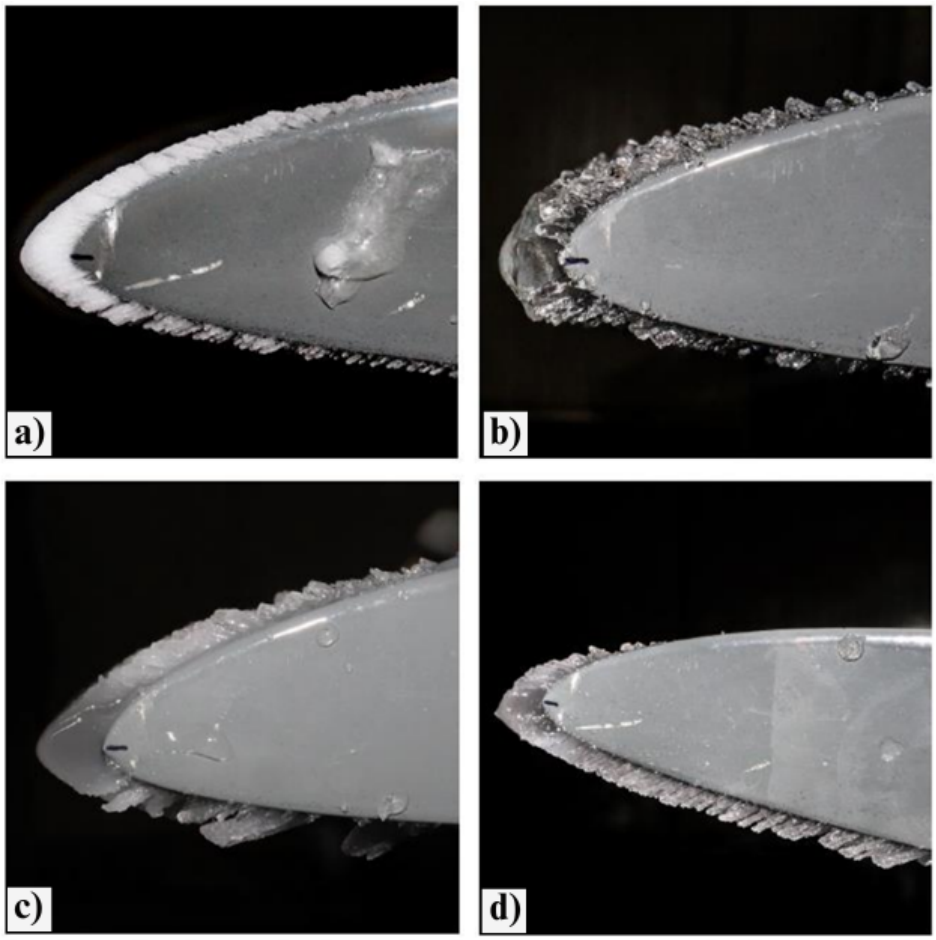
Şekil 12. Air France 447 uçağının Atlantik Okyanusu'nda bulunan enkazı

2.5. Buz Türleri

Atmosferik koşullara bağlı olarak farklı buz türleri oluşabilir. Bu türlerin anlaşılması, aerodinamik etkilerini ve alınacak önlemleri belirlemek için temeldir.

2.5.1. Kırağı Buz

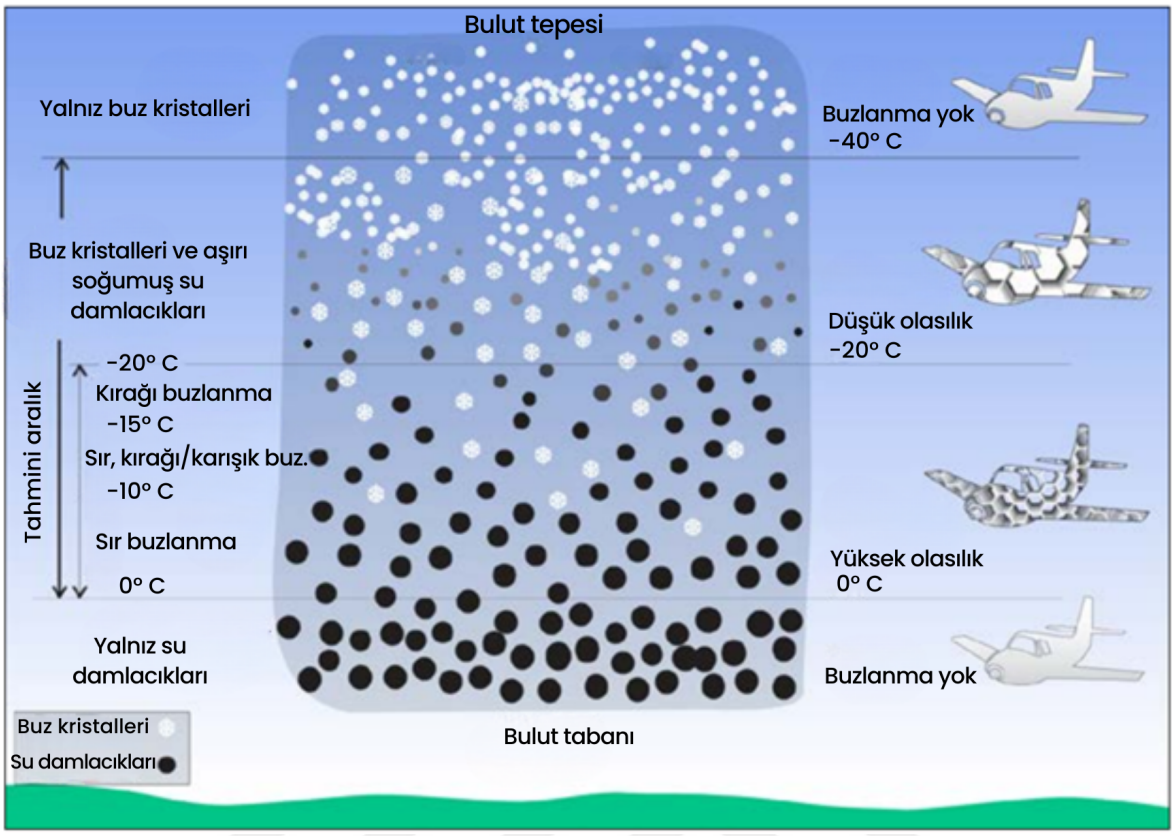
Kırağı buz, aşırı soğumuş küçük damlacıkların çok düşük sıcaklıklarda yüzeye çarpıp anında donmasıyla oluşur ve bu da kanat yapısında hava kabarcıklarının hapsolması nedeniyle opak, süt beyazı ve kırılgan bir yapı meydana getirir (Huang vd., 2019; Rekuviene vd., 2024). Bu hızlı donma süreci genellikle düşük sıvı su içeriği ve düşük ortalama hacim çapı koşullarında ortaya çıkar. Kırağı buzun yüzeyi pürüzlüdür, çoğu zaman tüy benzeri yapılar içerir. Ancak aerodinamik açıdan, diğer buz tiplerine göre nispeten daha az bozucu etki yaratır (Şekil 15). Bununla birlikte, kırağı buz birikimi kanat profillerinde kaldırmayı azaltıp sürüklemeyi artırarak uçuş performansını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, düşük yapışma mukavemeti nedeniyle uçuş sırasında parçalanarak motorlara girebilir veya yapısal hasara yol açabilir. Kırağı buz genellikle -15 °C altındaki sıcaklıklarda ve düşük sıvı su içeriklerinde gözlemlenir (Fortin & Perron, 2009). Kırağı buzun karakteristik yapısı Şekil 13(a)'da görülmektedir.



Şekil 13. a) Kırağı, b) sır ve c,d) karışık buzun karakteristik yapısı (Cheung vd., 2022)

2.5.2. Sır (Şeffaf) Buz

Donma noktasına yakın, -10 °C ila 0 °C arası sıcaklıklarda ve genellikle daha büyük damlacıkların bulunduğu ortamlarda meydana gelir (Şekil 15). Bu koşullarda, çarpan damlacıkların sadece bir kısmı anında donar ve donmayan kısım yüzeyde bir su filmi oluşturarak geriye doğru akar ve yavaş yavaş donar. Bu süreçte açığa çıkan gizli ısı, daha sağlam ve hava kabarcığı daha az olan bir buz yapısının oluşmasına katkı sağlar (Dhyani vd., 2022). Bu süreç, şeffaf, yoğun ve düzensiz buz şekillerinin oluşmasına yol açar (Şekil 13.b). Özellikle, boynuz olarak adlandırılan ve aerodinamik performansı ciddi şekilde bozan sivri çıkıntılar bu tür buzlanmanın tipik bir özelliğidir.



Şekil 14. Atmosfer sıcaklığına göre buzlanma olasılığı (Airframe Icing, 2025)

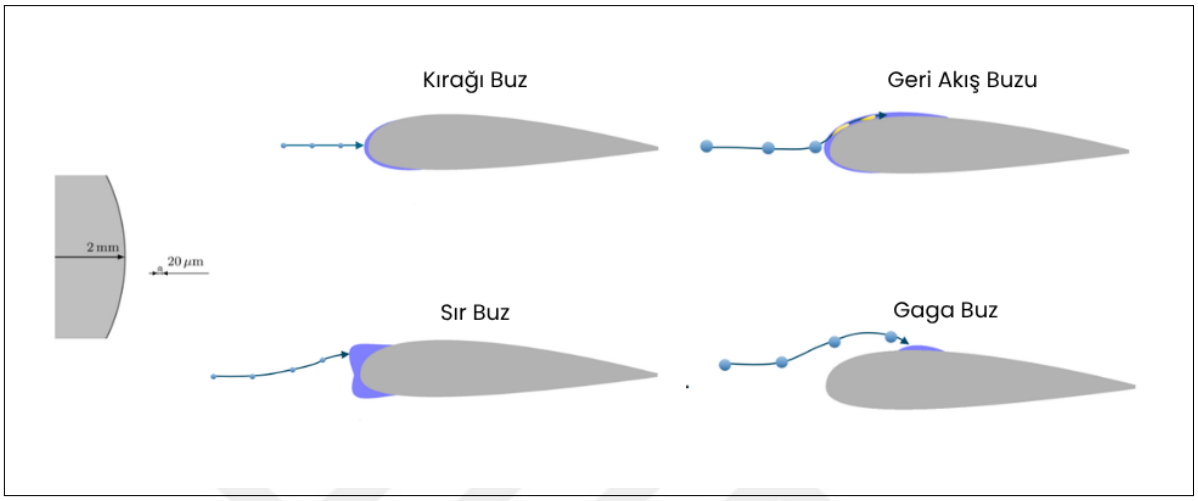
2.5.3. Karışık Buz

Karışık buz, kırağı ve sır buzlarının özelliklerini bir arada taşır. Genellikle ara sıcaklıklarda ve değişken çevresel koşullarda oluşur (Leclerc, 2023; Zhou vd., 2018). Görünümü kırağı buz kadar donuk, sır buz kadar saydam değildir. Genellikle beyaz, pürüzlü ve içinde şeffaf damarlar bulunan bir yapıdadır. Bu buz türü, aerodinamik performans üzerindeki olumsuz etkisi bakımından kırağı buzdan daha şiddetli, ancak sır buzdan daha az zararlıdır. Karışık buzun yapısı Şekil 13(c,d)'de gösterilmiştir.

2.5.4. Buzlanmada Özel Koşullar

Aşırı Soğumuş Büyük Damlacıklar (SLD: Supercooled Large Droplets): Çapı 50 µm'yi aşan bu damlacıklar özellikle tehlikelidir, çünkü yüksek kütle ve ataletleri nedeniyle genellikle kanadın önde korunmayan bölgelerine çarpabilir ve korunan alanların arkasında tehlikeli geriye akış buzu oluşturabilirler (Şekil 14). Bu durum genellikle dondurucu çise veya dondurucu

yağmurla ilişkilidir ve geleneksel buz koruma sistemleri için ciddi bir tehdit oluşturur (Cao vd., 2018; Sørensen vd., 2015). Bu damlacıkların aerodinamik ve çarpışma dinamikleri küçük damlacıklardan belirgin biçimde farklıdır, bu da özel buz koruma stratejileri gerektirir (Şekil 15).



Şekil 15. Kanat buz oluşumu (Deiler, 2025)

Buz Kristali Buzlanması (ICI: Ice Crystal Icing): Yüksek irtifalarda karşılaşılan ve aşırı soğumuş su damlacıklarından ziyade, katı buz kristallerinin neden olduğu farklı bir mekanizmadır. Kristaller soğuk gövde yüzeylerinden sekse de, jet motorlarının içindeki gibi sıcak bileşenlere yapışıp eriyerek buz birikimine yol açabilir ve motor güç kaybına neden olabilir.

2.6. Buzlanma Şekilleri

2.6.1. Boynuz Buzlanma

Boynuz buzlanma, aerodinamik performansı en fazla etkileyen buzlanma tipidir. Geniş hücum açısı aralıklarında uzun kabarcıklı akış ayrılması oluşturarak maksimum kaldırma katsayısında ciddi düşüş ve sürüklemede büyük artışa yol açar. Örneğin, yapılan araştırmalar 10° hücum açısındaki buzlanmada, sürükleme katsayısında %575 artış meydana gelebildiğini göstermektedir (Cao vd., 2018). Boynuzların konumu ve morfolojisi kritik öneme sahiptir, çünkü bu parametreler akış alanını, durma noktalarını ve ısı transferi katsayılarını değiştirerek buz birikiminin öngörülmesini doğrudan etkiler (Fortin & Perron, 2009).

2.6.2. Akış Doğrultusunda Buzlanma

Akış yönünde buzlanma, akışa paralel uzanan daha düzgün bir yapıya sahiptir. Bu buz tipi, daha çok yüzey pürüzlülüğünü artırarak performansı olumsuz etkiler (Cao vd., 2018). Yüzey pürüzlülüğü, sınır tabakanın erken türbülans geçişine yol açar ve bu da laminer bölgelerin kısalmasına, sürtünme direncinin artmasına neden olur. Bu tür buzlanma doğrudan büyük ölçekli ayrılma yapmasa da, basınç gradyanlarını bozarak sürtünmeyi arttırabilir (Şekil 16).



Şekil 16. Kanat profili üzerinde farklı buz şekilleri (Wurst, 2023)

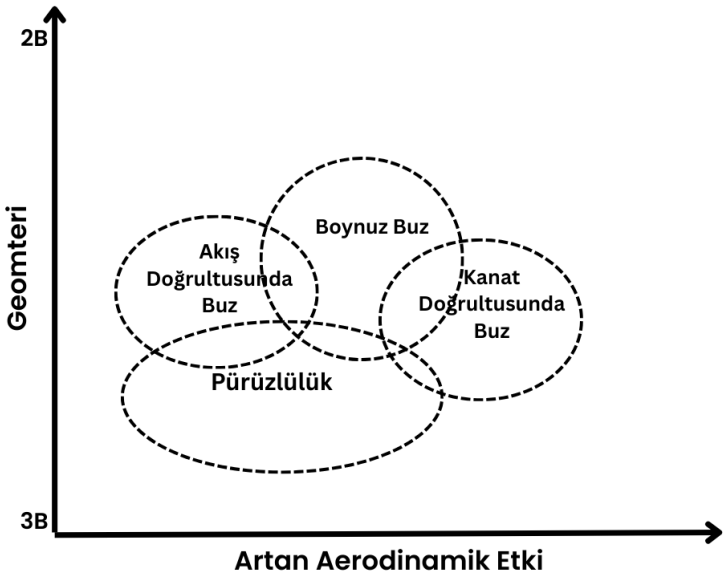
2.6.3. Kanat Doğrultusunda Buzlanma

Kanat açıklığı boyunca sırt oluşturan bu buz tipi, genellikle kısmi buz koruma sistemlerinin uygulandığı veya eriyen buzun daha geri bölgelerde yeniden donduğu durumlarda ortaya çıkar. Bu sırtlar, akış için önemli engeller yaratarak yerel akış ayrılması, girdap bölgeleri ve ciddi basınç sürüklemesi artışına neden olur. Ayrıca, kanat boyunca kaldırma dağılımını bozarak istenmeyen yuvarlanma momentlerine yol açabilir ve kontrol edilebilirliği azaltabilir (Şekil 17).

2.7. Buzlanma Önleme Sistemleri

Bu sistemler, özellikle soğuk hava koşullarında görev yapan İHA'ların aerodinamik bütünlüğünü ve operasyonel güvenliğini korumak için kritik öneme sahiptir. Temel amaç, kritik yüzeylerde buz birikimini önlemek veya oluşan buzu gidermektir. Buz koruma sistemleri

genel olarak buzlanma önleme (anti-icing) ve buz çözme (de-icing) olarak iki ana kategoriye ayrılır. Buz önleme sistemleri buzu oluşmadan engellemeyi, buz çözme sistemleri ise biriken buzu ortadan kaldırmayı hedefler (Hann vd., 2021; Sørensen, 2016).



Şekil 17. Çeşitli buzlu kanat akış alanları için aerodinamik etkilerin niteliksel açıklaması (Bragg vd., 2005)

İHA'larda buz koruma sistemlerinin uygulanması görece yeni bir araştırma alanıdır. Bu platformların düşük Reynolds sayılı uçuş rejimleri, buzlanma süreçlerini büyük ölçüde etkilediğinden özel çalışmaları gerekli kılmaktadır (Hann vd., 2021). Küçük hava girişleri, sınırlı boyutları ve düşük enerji depolama kapasiteleri nedeniyle İHA'lar buz birikimine karşı daha hassastır. Bu nedenle buz koruma sistemlerinin seçim ve optimizasyonu görev başarısı açısından hayati önem taşımaktadır. Bu sınırlamaları aşmak için hafif ve enerji verimli çözümler geliştirilmektedir. Çoğunlukla piyasada mevcut bileşenlerden ve yeni kontrol stratejilerinden yararlanılmaktadır (Sørensen vd., 2015). Günümüzde buz koruma teknolojileri alanında gelişmeler devam etmekte olup, özellikle elektrotermal sistemler ve nano-kaplama teknolojileri araştırılmaktadır.

Güncel buz koruma yöntemleri arasında en yaygın olanlardan biri, termal buz koruma sistemleridir. Burada kanat yüzeyine gömülü veya eklenmiş ısıtıcı elemanlar kullanılır. Bu elemanlar sürekli çalışarak buzu oluşmadan önleyebilir veya periyodik olarak çalışarak mevcut buzu eritip dökülmesini sağlayabilir (Hann & Johansen, 2020; Stoyanov vd., 2021).

3. LİTERATÜR TARAMASI

Uçuş sırasında buzlanma, hava araçlarının aerodinamik performansını ve kontrolünü olumsuz etkileyerek uçuş güvenliği için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Bu tehlikeli olguyu analiz etmek için sayısal analizler, yüksek maliyetli deneysel testlere kıyasla verimli ve düşük maliyetli bir alternatif olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Habashi, 2023). Bu alanda, LEWICE, FENSAP-ICE, ONERA kodları, Multi-ICE ve NSCODE-ICE gibi birçok buzlanma tahmin kodu geliştirilmiştir (Wright, 2008). Bu bölümde, literatürde yer alan temel buzlanma analizi metodolojileri, modelleri ve uygulama çalışmaları incelenmiştir.

Buzlanma analizinin temelleri, 1950'li yıllarda atılmıştır. Bu alandaki en temel ve öncü çalışma, Messinger (1953) tarafından geliştirilen ve bir kontrol hacmi için kütle ve enerji dengesine dayanan klasik cebirsel modeldir. Bu model, LEWICE ve ONERA gibi birçok birinci nesil simülasyon kodunun temelini oluşturmuştur. Ancak, sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda bu modelin bazı önemli sınırlılıkları ortaya konmuştur. Özellikle Lavoie vd. (2018) ile Myers (2001), Messinger modelinin buz katmanı boyunca ısı iletimini ihmal ettiğini, bu durumun donma oranını olduğundan düşük tahmin etmeye yol açtığını belirtmiştir (Sznajder vd., 2017). Modelin bir diğer zayıflığı ise, yüzeydeki suyun akış yönünü yalnızca akışın durma noktasının konumuna göre belirlemesidir ki bu yaklaşım, karmaşık akış yapılarında yetersiz kalmaktadır.

1980'ler ve 1990'larda, LEWICE (NASA), TRAJICE (DRA) ve ONERA gibi "birinci nesil" olarak adlandırılan buzlanma kodları geliştirilmiştir. Bu kodlar genellikle, akış alanını hesaplamak için potansiyel akış çözücüleri (panel metodu), damlacık yörüngelerini belirlemek için ise Lagrangian yaklaşımını kullanmıştır (Nishio & Kato, 2004). Lagrangian metodunda, her bir su damlacığı veya damlacık grubu, üzerine etkiyen sürüklenme ve yerçekimi gibi kuvvetlere dayalı hareket denklemleri çözülerek ayrı ayrı takip edilir. Bu yaklaşım, basitliği ve esnekliğiyle öne çıksa da, özellikle çok elemanlı kanat profilleri gibi karmaşık geometrilerde veya damlacık yörüngelerinin kesiştiği durumlarda verimliliğini yitirmektedir (Liu vd., 2019). Bu sınırlılıkları aşmak amacıyla 1990'ların sonlarında Habashi, Bourgault ve arkadaşları tarafından geliştirilen FENSAP-ICE gibi "ikinci nesil" kodlar, damlacık çarpmasını modellemek için Eulerian yaklaşımını benimsemiştir (Habashi, 2023).

Bu modern yaklaşımda, su damlacıkları ayrı parçacıklar olarak değil, hava ile iç içe geçmiş sürekli bir faz veya "sözde-akışkan" olarak ele alınır. Bu sayede, karmaşık üç boyutlu geometrilerde tüm yüzeylerdeki toplanma verimliliği tek bir seferde ve verimli bir şekilde hesaplanabilmektedir (Habashi, 2023).

Termodinamik modelleme alanındaki en önemli gelişmelerden biri, Myers'ın Messinger modelini Stefan problemini temel alarak genişletmesiyle gerçekleşmiştir (Sznajder vd., 2017). Myers, buz ve su katmanları boyunca gerçekleşen ısı iletimini denklemlere dahil ederek modelin fiziksel temelini güçlendirmiştir. Bu yaklaşım, buz tabanı ile yüzey arasındaki sıcaklık profilini lineer kabul ederek ısı iletimini modeller ve bu durumun donma oranı ile nihai buz şekli üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir; genellikle de donma oranını artırır (Sznajder vd., 2017). Yüzeydeki suyun hareketi konusunda ise Bourgault ve arkadaşları, FENSAP-ICE için geliştirdikleri Sığ Su Buzlanma Modeli (SWIM: Shallow Water Icing Model) ile çığır açmıştır (Lavoie vd., 2018). Bu Kısmi Diferansiyel Denklem (PDE: Partial Differential equations) tabanlı model, su filmi hareketinin temel olarak hava akışının yüzeyde oluşturduğu kayma gerilmesi tarafından yönlendirildiğini varsayar. Lavoie vd. (2018) yaptığı karşılaştırmalı çalışmalar, bu yaklaşımın, akış ayrılması ve resirkülasyon bölgelerinde suyun ters yönde akmasını durma noktası temelli modellere kıyasla çok daha doğru bir şekilde modelleyebildiğini göstermiştir (Liu vd., 2019).

Buz birikimi yavaş bir süreç olduğundan, araştırmacılar genellikle toplam buzlanma süresini kısa zaman aralıklarına bölen yarı-kararlı (quasi-steady) veya çoklu-adım (multi-shot) yaklaşımını benimsemektedir (Ozcer vd., 2011). Bu yöntemde, her bir adımın sonunda oluşan buz şekliyle geometri güncellenir ve hesaplama ağı yeniden oluşturulur. Yüzey pürüzlülüğü de buzlanma sürecinde önemli bir rol oynar. Shin vd. (1991) tarafından geliştirilen ve ortam koşullarına dayanan ampirik pürüzlülük modeli literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak Ozcer vd. (2011), sabit bir pürüzlülük değeri kullanmak yerine, FENSAP-ICE içinde yerel akış koşullarına dayalı olarak pürüzlülük dağılımını dinamik bir şekilde hesaplayan fiziksel bir "boncuklanma modeli" (beading model) önermiştir. Bu modelin, özellikle sır tipi buzun üzerindeki boynuz yapılarını daha doğru tahmin ettiği gösterilmiştir.

Buz biriktikçe değişen geometriyi sayısal ortamda yönetmek, buzlanma simülasyonlarındaki en büyük zorluklardan biridir. Bu soruna yönelik olarak farklı araştırmacılar tarafından çeşitli ağ örgüsü yönetimi stratejileri geliştirilmiştir. Groth vd. (2019) her adımda yeni bir ağ oluşturmanın getirdiği yüksek hesaplama maliyetinden kaçınmak

için mevcut ağı buz şekline göre esneten Radyal Bazlı Fonksiyonlar (RBF: Radial Basis Functions) ile ağ deformasyonu yöntemini önermişlerdir. Benzer şekilde, FENSAP-ICE'da Keyfi Lagrangian-Eulerian (ALE: Arbitary Lagrangian-Eulerian) gibi ağ hareket ettirme teknikleri kullanılmaktadır (Habashi, 2023). Liu vd. (2019), sadece buzlanan yüzey etrafındaki iç ağın her adımda yeniden oluşturulduğu ve arka plandaki sabit dış ağın içine yerleştirildiği hiyerarşik üst üste binen ağ stratejisi ile iş yükünü azaltmayı hedeflemiştir. Farklı bir yaklaşım olarak, Aksenov vd. (2019) tarafından geliştirilen IceVision yazılımı, buz büyümesini sürekli bir süreç olarak modellemek için Hacim Oranı (VOF: Volume of Fluid) tekniğini kullanır ve bu süreçte sadece buz yüzeyini içeren hücrelerde yerel olarak ağ yeniden yapılandırılır.

Buz şeklini tahmin etmenin yanı sıra, buzlanmanın aerodinamik performans üzerindeki etkilerini doğru bir şekilde öngörmek de büyük önem taşımaktadır. Costes ve Moens (2019) buzlu kanat profilleri üzerindeki akışı analiz etmek için farklı Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) türbülans modellerini ve daha gelişmiş hibrit RANS/LES (Large Eddy Simulation) yöntemlerini karşılaştırmıştır. Çalışmaları, Spalart-Allmaras (SA) modelinin sayısal olarak en sağlam ve kararlı model olduğunu, Bölgesel Ayrılmış Girdap Simülasyonu (ZDES: Zonal Detached Eddy Simulation) gibi kararsız çözümler üreten yöntemlerin ise girdap dökülmesi (vortex shedding) gibi karmaşık akış yapılarını yakalayabildiğini, ancak bu olguları abartma eğiliminde olabileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, Stebbins ve Loth (2023) RANS yaklaşımının, özellikle yüksek hücum açılarında süpürme açılı bir kanat üzerindeki ayrılmış akış bölgelerini tahmin etmede Ayrılmış Girdap Simülasyonu (DES: Detached Eddy Simulation) ve Geliştirilmiş Gecikmeli Ayrılmış Girdap Simülasyonu (IDDES: Improved Delayed Detached Eddy Simulation) gibi hibrit yöntemlerden şaşırtıcı bir şekilde daha iyi sonuçlar verebildiğini ortaya koymuştur.

Son yıllardaki çalışmalar, termodinamik modellerin daha da geliştirilmesi ve özel buzlanma koşullarının incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Lavoie vd. (2018) farklı termodinamik modelleri sistematik olarak karşılaştırarak kayma gerilmesi ile yönlendirilen geri akış modellerinin resirkülasyonlu akışlardaki üstünlüğünü ve ısı iletimi teriminin önemini bir kez daha teyit etmiştir. Liu vd. (2019) ise, Myers modelini iyileştirmek için kullanılan ampirik düzeltme faktörlerinden (α) kaçınmak amacıyla, buz katmanındaki geçici ısı iletimini sayısal olarak çözen ve kararsız Stefan problemine dayalı daha fiziksel bir model önermiştir. Araştırmaların odaklandığı diğer önemli alanlar ise, sıçrama ve geri sekme gibi karmaşık etkileşimleri içeren aşırı soğumuş büyük damlacıklar ve özellikle jet motorlarının sıcak iç

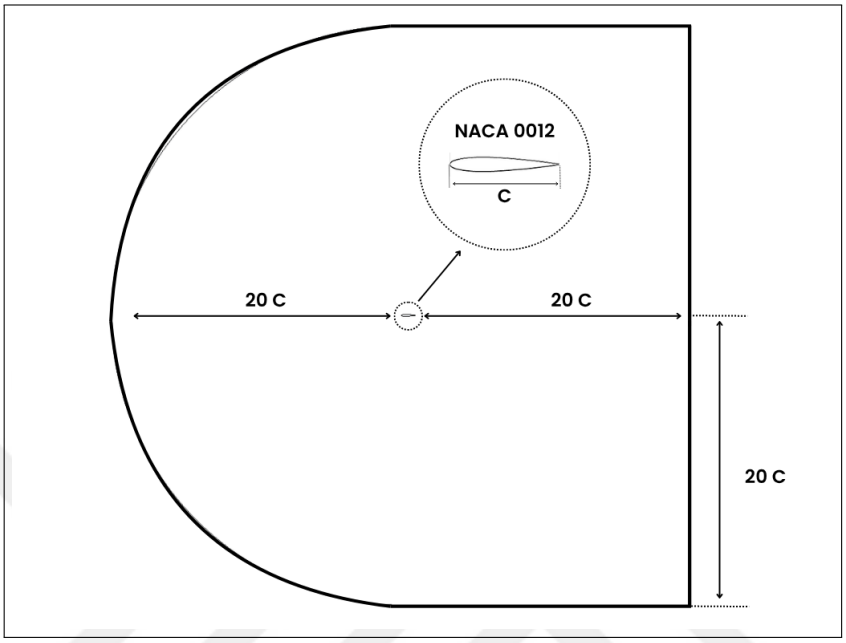
kısımlarında bir erime problemi olarak ortaya çıkan buz kristali buzlanmasıdır (Habashi, 2023). Bu alandaki farklı bir yaklaşım ise Szilder ve Lozowski (2023) tarafından geliştirilen ve parçacıkların çarpma, hareket etme ve donma süreçlerini taklit eden parçacık tabanlı morfogenetik modellerdir. Bu yöntem, kırağı tüyleri gibi karmaşık, gözenekli veya süreksiz buz yapılarının analizinde sürekli ortam modellerine göre üstünlük sağlamaktadır.

4. METODOLOJİ

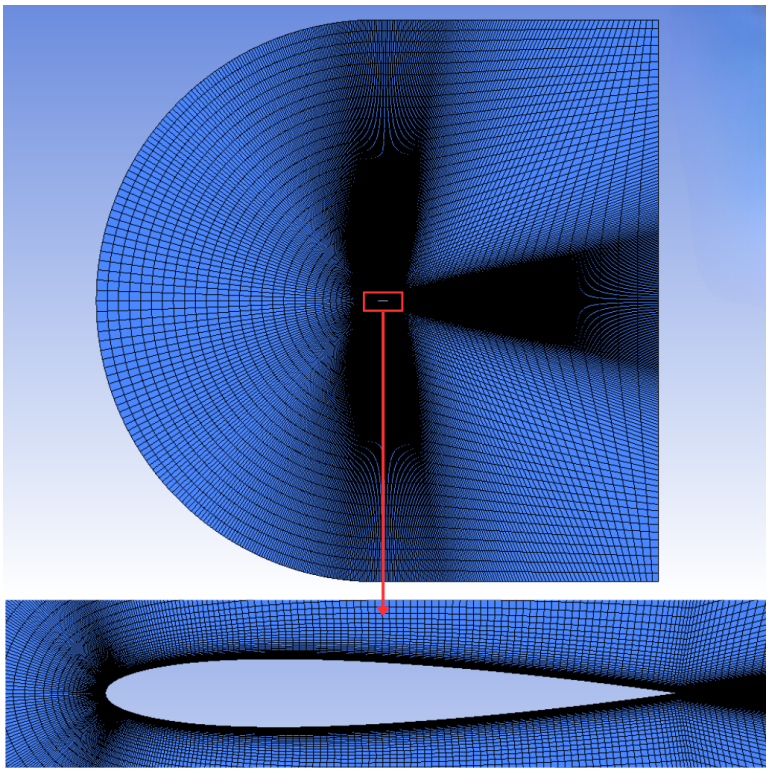
4.1. NACA 0012 Profilinin Oluşturulması ve Ağ Örgüsü

Bu çalışmada buzlanma davranışının incelenmesi amacıyla NACA 0012 kanat profili kullanılmıştır. NACA 0012 profilinin seçilmesinin birkaç önemli nedeni bulunmaktadır. İlk olarak, bu profil simetrik bir geometriye sahip olduğundan, buzlanma analizlerinde üst ve alt yüzey etkilerinin karşılaştırılmasına olanak sağlamaktadır. İkinci olarak, NACA 0012 profili buzlanma araştırmalarında en yaygın kullanılan standart profillerden biridir ve NASA Buzlanma araştırma tüneli (Icing Reseacrh Tunnel: IRT) başta olmak üzere pek çok deneysel tesiste geniş bir veri tabanı mevcuttur. Bu durum, sayısal sonuçların deneysel verilerle doğrulanması açısından kritik öneme sahiptir. Üçüncü olarak, literatürde NACA 0012 profili ile gerçekleştirilmiş çok sayıda buzlanma çalışması bulunmaktadır ve bu çalışmalarla karşılaştırma yapılabilmektedir. Hesaplama alanının boyutlandırılmasında uzak alan sınır koşulunun çözüm üzerindeki etkisini en aza indirmek amacıyla alan sınırları kanat kirişi uzunluğunun 20 katı olarak belirlenmiştir. Bu mesafe, hem önde gelen akışın sınır koşulundan bağımsız biçimde gelişebilmesi hem de kanat arkasında oluşan iz bölgesinin yeterince çözümlenebilmesi açısından literatürde yaygın olarak benimsenen bir yaklaşımdır. Damlacık dağılımı ve buz birikimi hesabında kullanılan FENSAP-ICE yazılımının DROP3D ve ICE3D çözücüleri 3 boyutlu ortamda çözüm yaptığından, 2 boyutlu ortamdaki ağ yapısı kanat boyu doğrultusunda tek bir hücre kullanılarak 3 boyutlu hale getirilmiştir. Oluşturulan hesaplama ağı 114700 düğüm noktası ve 56810 altıyüzlü (hekzahedral) hücreden oluşmakta olup kanat açıklığı (Z) yönünde tek bir hücre katmanı kullanılmış, her iki yanda simetri sınır koşulu uygulanmıştır. Kanat kirişi uzunluğu 0.5334 m , kanat açıklığı yönündeki eleman derinliği ise 0.1 m olarak belirlenmiştir. Kanat yüzeyine kayma olmayan duvar sınır koşulu uygulanmış; akışın viskoz ve türbülanslı yapısı göz önünde bulundurularak sınır tabakası ve iz bölgesinin yeterli çözünürlükle yakalanabilmesi amacıyla ağ noktaları kanat çevresinde yoğunlaştırılmıştır. İlk hücre yüksekliği 2.5×10^{-6} kanat kirişi uzunluğu olarak ayarlanmış ve maksimum Y^{+} değerinin ilk katmanda 1'in altında kalması sağlanmıştır. Normal yönde genişleme oranı 1.14 olarak belirlenmiş olup ağ yapısı orta yoğunlukta kabul edilmektedir.

Dış yüzeylere serbest akış sınır koşulu uygulanmıştır. Şekil 18'de NACA 0012 profilinin çözüm bölgesinin görünümü verilmiştir. Şekil 19'da ağ yapısının farklı açılardan görünümleri sunulmuştur. Hesaplama süresini azaltmak için yalnızca dörtgen elemanlar tercih edilmiştir.

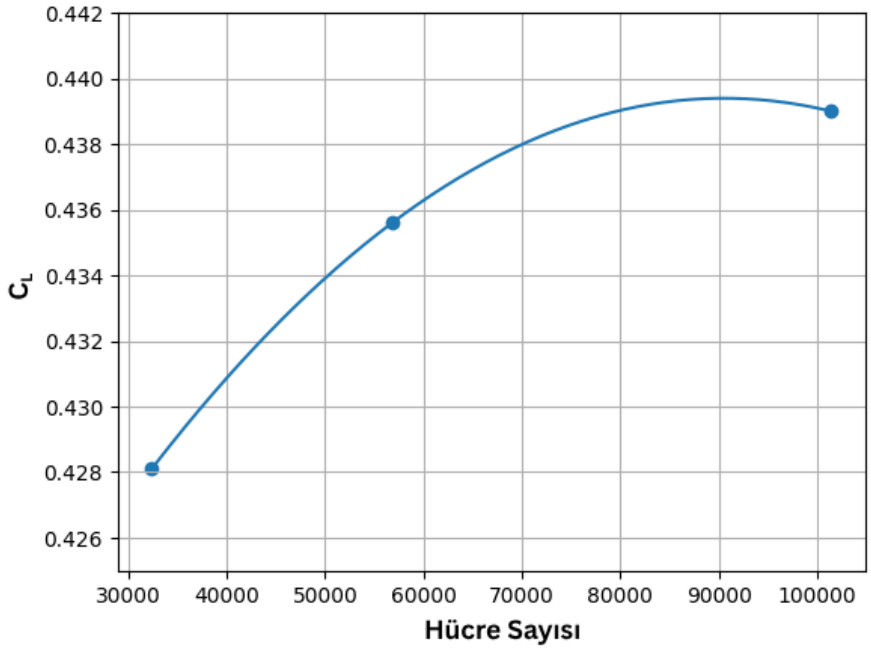


Şekil 18. NACA 0012 profilinin çözüm bölgesi



Şekil 19. NACA 0012 profilinin ağ yapısının genel görünümü

Kanadın ön kenar bölgelerindeki ağ örgüsünde çözüm kalitesini artırmak amacıyla bağlantı noktaları daha sık yerleştirilmiş ve eleman boyutları küçültülmüştür. Sayısal analizlerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla, çözümün ağ yapısından bağımsız olduğunu doğrulayan bir ağ bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, 32364, 56810 ve 101428 hücreden oluşan üç farklı ağ yapısı üzerinde kaldırma katsayısı (C_l) değerleri incelenmiştir. Şekil 20'de görüldüğü üzere, ağ yoğunluğu arttıkça C_l değerlerinin belirli bir sayısal değere yakınsadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 20. Farklı yoğunluktaki ağ yapıları için kaldırma katsayısı değerleri

Orta yoğunluklu ağ ile en yüksek yoğunluklu ağ arasındaki bağıl fark yaklaşık %2.5 olarak hesaplanmıştır. Bu, çözümün ağ yapısından yeterince bağımsızlaştığını ve sonuçların kabul edilebilir sınırlar dahilinde olduğunu göstermektedir. Bu doğrultuda, hem hesaplama hassasiyeti hem de işlem maliyeti dengesi gözetilerek, analizlerin geri kalanında 56810 hücreden oluşan orta yoğunluklu ağ yapısının kullanılması uygun görülmüştür.

4.2. Akış Analizi

Uçak buzlanması problemlerinin analizi, temelde üç temel fiziksel sürecin birbirleriyle etkileşimini gerektirmektedir: hava akışı, su damlacıklarının hareketi ve buz oluşumu. Bu süreçlerin ilki ve en temeli, kanat profili etrafındaki hava akışının doğru bir şekilde

modellenmesidir. Hava akış alanının hassas olarak belirlenmesi, hem damlaların yörüngelerinin hesaplanması hem de ısı transferinin modellenmesi için kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, NACA0012 kanat profili etrafındaki akış alanının analizinde FENSAP-ICE yazılım paketinin FENSAP akış çözücüsü kullanılmıştır.

FENSAP, sonlu elemanlar yöntemine dayalı gelişmiş bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) çözücüsüdür. Bu çözücü, özellikle havacılık uygulamaları için geliştirilmiş olup, karmaşık geometriler etrafındaki sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz akışları yüksek doğrulukla analiz edebilme kabiliyetine sahiptir. FENSAP, laminer, geçiş ve tam türbülanslı akış rejimlerini modelleyebilmekte ve çeşitli türbülans kapatma modelleri sunmaktadır. Özellikle uçak buzlanması analizlerinde, akış alanının doğru belirlenmesi hayati önem taşımaktadır, çünkü akış alanındaki küçük hatalar, damla yörüngelerinde ve dolayısıyla buz oluşumunda önemli sapmalara yol açabilmektedir. FENSAP, yapılandırılmamış ağlar üzerinde çalışabilmesi ve karmaşık geometrilere kolay adapte olabilmesi sayesinde, gerçek uçak bileşenlerinin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Akış alanı, kütle, momentum ve enerji korunumunu ifade eden kısmi diferansiyel denklemlerle modellenmektedir. Sıkıştırılabilir bir akış için kütle korunumu denklemi, akışkanın yoğunluğunun hem basınca hem de hıza bağlı olarak değişebildiği durumlar için:

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho_a \vec{V}_a \right) = 0 \tag{4.1}$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde ρ_a hava yoğunluğunu ve $\vec{V}_a$ hız vektörünü göstermektedir. Alt indis a hava fazına ait çözümü belirtmektedir. Bu denklem, süreklilik denklemi olarak da bilinmektedir ve akış alanında kütlenin korunumunu ifade etmektedir (ANSYS, 2026b).

Newton'un ikinci hareket yasası, bir akışkan parçacığına etki eden toplam kuvvetin, momentumunun zamana göre değişim hızına eşit olduğunu belirtir. Bu durum, 3 boyutlu uzayda 3 doğrusal olmayan denklem seti ile vektör formunda şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial \rho_a \vec{V}_a}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho_a \vec{V}_a \vec{V}_a \right) = \vec{\nabla} \cdot \sigma^{ij} + \rho_a \vec{g} \tag{4.2}$$

Bu denklemler Navier-Stokes denklemleri olarak bilinir. Burada σ^{ij} gerilme tensörü olup:

$$\sigma^{ij} = -\delta^{ij} p_a + \mu_a \left[\delta^{jk} \nabla_k v^i + \delta^{ik} \nabla_k v^j - \frac{2}{3} \delta^{ij} \nabla_k v^k \right] = -\delta^{ij} p_a + \tau^{ij}$$
$$\tau^{ij} = \mu_a \left[\delta^{jk} \nabla_k v^i + \delta^{ik} \nabla_k v^j - \frac{2}{3} \delta^{ij} \nabla_k v^k \right] \tag{4.3}$$

şeklinde tanımlanır. Bu ifadede p_a statik basıncı, μ_a dinamik viskoziteyi, δ^{ij} Kronecker delta fonksiyonunu ve τ^{ij} viskoz gerilme tensörünü göstermektedir. Dinamik viskozitenin sıfıra eşitlendiği özel durum, viskozitesiz (inviscid) akışlara karşılık gelir ve Euler denklemlerini ifade eder (ANSYS, 2026b).

Viskoz laminer akışlar için, viskozite ve sıcaklık ilişkisi Sutherland yasası ile ampirik olarak tanımlanır:

$$\frac{\mu_a}{\mu_\infty} = \left(\frac{T}{T_\infty} \right)^{3/2} \left(\frac{T_\infty + 110}{T + 110} \right) \tag{4.4}$$

Burada T Kelvin cinsinden statik hava sıcaklığını ifade eder ve alt indis ∞, hava için referans değerlerlerini ifade eder: $T_\infty = 288$ K ve $\mu_\infty = 17.9 \times 10^{-6}$ Pa·s. Laminer akışıtaki viskozite, FENSAP-ICE'nin koşullar panelindeki referans hava statik sıcaklığı kullanılarak hesaplanmakta ve sabit olarak kabul edilmektedir.

Üçüncü temel fiziksel prensip, enerji korunumunu ele almaktadır ve sistemin toplam enerjisinin korunması gerektiğini ifade etmektedir:

$$\frac{\partial \rho_a E_a}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho_a \vec{V}_a H_a \right) = \vec{\nabla} \cdot \left(\kappa_a \left(\vec{\nabla} T_a \right) + v_i \tau^{ij} \right) + \rho_a \vec{g} \cdot \vec{V}_a \tag{4.5}$$

Burada E_a ve H_a, sırasıyla toplam iç enerji ve entalpiyi temsil etmektedir. γ özgül ısılar oranı olup hava için (mükemmel gaz) 1.4 değerini almaktadır. κ_a ısıl iletkenlik katsayısı olup, laminer dinamik viskoziteye benzer şekilde hesaplanır:

$$k = C_1^* \left(T^{3/2} \right) / (T + 133.7) \tag{4.6}$$

Burada T, Kelvin cinsinden statik hava sıcaklığını göstermekte ve $C_1 = 0.00216176$ W/(m·K$^{3/2}$) değerini almaktadır. Laminer dinamik viskozite sabit olup, FENSAP-ICE'nin

sınır koşulları panelindeki referans hava statik sıcaklığı kullanılarak hesaplanmaktadır.

Sekiz akış denklemi ve dokuz bilinmeyenden oluşan sistem, ilkel değişken formunda $(\rho_a, p_a, T_a, H_a, u_a, v_a, w_a, \mu_a, \kappa_a)$ kararlı laminer (viskoz, türbülanssız) akışı tanımlamaktadır. Sistemi tamamlamak için gereken denklem, ideal gaz hal denklemidir:

$$p_a = \rho_a R_a T_a \tag{4.7}$$

Burada $R_a = 287.053763$ J/(kg·K) hava için gaz sabitidir. İdeal gaz seçeneği seçildiğinde (varsayılan), akışkanın özellikleri referans statik sıcaklık kullanılarak tanımlanır ve her yerde sabit kalır. Gerçek gaz seçeneği seçildiğinde ise, akışkan özellikleri yerel statik sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişir ve çözüm alanı boyunca farklılık gösterir (ANSYS, 2026b).

Türbülanslı akışların modellenmesi için, FENSAP çeşitli türbülans modelleri sunmaktadır. Bu çalışmada, Menter'in kayma gerilmesi taşıma (Shear Stress Transport: SST) k-ω modeli kullanılmıştır. SST modeli, sınır tabakası içinde k-ω modelinin avantajlarını, serbest akış bölgesinde ise k-ε modelinin üstünlüklerini birleştiren hibrit bir yaklaşımdır. Bu model, ters basınç gradyanlarına ve akış ayrılmasına karşı yüksek hassasiyet göstermesi nedeniyle, bu çalışmada tercih edilmişdir.

SST k-ω modelinin taşınım denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho U_j k\right)}{\partial x_j} = \rho\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^*\rho k\omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_k\mu_t\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \tag{4.8}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial\left(\rho U_j \omega\right)}{\partial x_j} = \rho\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\frac{\rho\alpha}{\mu_t} - \beta\rho\omega^2 + \frac{2\left(1-F_1\right)\rho\sigma_{w2}}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial\omega}{\partial x_i} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \sigma_\omega\mu_t\right)\frac{\partial\omega}{\partial x_j}\right]\end{aligned} \tag{4.9}$$

şeklinde verilmektedir. Burada k türbülans kinetik enerjisini, ω özgül ısı yayınım oranını ve μ_t türbülans eddy viskozitesini göstermektedir. Harmanlama fonksiyonu F_1:

$$F_1 = \tanh\left\{\left\{\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\mu}{y^2\omega\rho}\right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^2}\right]\right\}^4\right\} \tag{4.10}$$

şeklinde tanımlanır. Burada:

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10}\right) \tag{4.11}$$

ve y en yakın duvara olan mesafedir. F_1 fonksiyonu, yüzeyden uzakta sıfır değerini alarak k-ε modelini aktive eder ve sınır tabakası içinde bir değerine geçerek k-ω modelini devreye sokar. Bu yumuşak geçiş mekanizması, SST modelinin temel özelliğidir ve modelin farklı akış bölgelerinde en uygun türbülans yaklaşımını kullanmasını sağlar (ANSYS, 2026b).

Türbülans Eddy viskozitesi:

$$\mu_t = \rho\frac{a_1 k}{\max\left(a_1\omega, SF_2\right)} \tag{4.12}$$

olarak tanımlanır. Burada S birim şekil değiştirme hızının invaryant ölçüsü olup ($S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$), F_2 ikinci harmanlama fonksiyonudur:

$$F_2 = \tanh\left[\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^*\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2\omega}\right)\right]^2\right] \tag{4.13}$$

SST modelinde, durgunluk bölgelerinde türbülansın aşırı artmasını önlemek için bir üretim sınırlayıcısı kullanılmaktadır:

$$\rho\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \min\left(\rho\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^*\rho k\omega\right) \tag{4.14}$$

Model sabitleri, k-ε ve k-ω modellerinin karşılık gelen sabitleri arasında $\alpha = \alpha_1 F_1 + \alpha_2\left(1 - F_1\right)$ ilişkisi ile harmanlanarak hesaplanmaktadır. Bu model için sabitler:

$$\begin{gathered}\beta^* = 0.09, \quad a_1 = 0.31, \quad \alpha_1 = 5/9, \quad \alpha_2 = 0.44 \\ \beta_1 = 3/40, \quad \beta_2 = 0.0828, \quad \sigma_{k1} = 0.85, \quad \sigma_{k2} = 1 \\ \sigma_{\omega 1} = 0.85, \quad \sigma_{\omega 2} = 1\end{gathered} \tag{4.15}$$

değerlerini almaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünün modellenmesi, özellikle buz oluşumu sonrası akış karakteristiklerinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. FENSAP, Nikuradse eşdeğer kum tanesi pürüzlülüğü (k_s) kavramını kullanarak yüzey pürüzlülüğünü modellemektedir. Bu çalışmada, ek olarak NASA tarafından geliştirilen ampirik buzlanma korelasyonu kullanılmıştır. NASA pürüzlülük modelinde, yüzey kum tanesi pürüzlülüğü aşağıdaki katsayıların çarpımından hesaplanmaktadır (ANSYS, 2026b):

$$\left[\frac{k_s/c}{(k_s/c)_{\text{base}}}\right]_{V_\infty} = 0.4286 + 0.0044139V_\infty \tag{4.16}$$

$$\left[\frac{k_s/c}{(k_s/c)_{\text{base}}}\right]_{LWC} = 0.5714 + 0.2457(LWC) + 1.2571(LWC)^2 \tag{4.17}$$

$$\left[\frac{k_s/c}{(k_s/c)_{\text{base}}}\right]_{T_s} = 0.047T_s - 11.27 \tag{4.18}$$

Burada, LWC sıvı su içeriği ve $(k_s/c)_{\text{base}} = 0.001177$ temel pürüzlülük oranıdır. Karşılık gelen kum tanesi pürüzlülük değeri:

$$k_S = \left[\frac{k_s/c}{(k_s/c)_{\text{base}}}\right]_{T_s}\left[\frac{k_s/c}{(k_s/c)_{\text{base}}}\right]_{LWC}\left[\frac{k_s/c}{(k_s/c)_{\text{base}}}\right]_{V_\infty}(k_s/c)_{\text{base}}\ c \tag{4.19}$$

formülünden elde edilmektedir. Bu ampirik korelasyon, uçuş hızı, sıvı su içeriği ve yüzey sıcaklığının pürüzlülük üzerindeki etkilerini hesaba katmakta ve buz oluşumu sırasında değişen yüzey pürüzlülüğünün akış alanı üzerindeki etkisini modellemektedir (ANSYS, 2026b).

4.3. Damlacık Yörünge Tahmini ve Damlacık Çarpma Analizi

Uçak buzlanması problemlerinde, kanat profili etrafındaki su damlacıklarının hareketi ve yüzeye çarpma karakteristikleri, buz oluşumunun başlangıç aşamasını oluşturmaktadır. Su damlacıklarının hangi bölgelerde ve ne miktarda kanat yüzeyine çarptığının belirlenmesi, oluşacak buzun şekli ve kalınlığının tahmin edilmesinde kritik öneme sahiptir. Bu

çalışmada, NACA0012 kanat profili etrafındaki damla davranışlarının modellenmesi amacıyla FENSAP-ICE yazılım paketinin DROP3D çözücüsünden yararlanılmıştır.

DROP3D modülü, geleneksel Lagrange yaklaşımından farklı olarak, su damlacıklarını sürekli bir ortam olarak ele alan Euler formülasyonunu kullanmaktadır. Lagrange yönteminde her bir damlanın yörüngesi ayrı ayrı takip edilirken, Euler yaklaşımında damla fazı bir alan değişkeni olarak tanımlanmakta ve akış alanının tamamında çözülmektedir. Bu yaklaşımın en önemli avantajı, özellikle yoğun damlacık bulutları ve karmaşık geometriler için hesaplama maliyetini önemli ölçüde azaltmasıdır. Ayrıca, Euler yöntemi damla-damla etkileşimlerinin modellenmesine de olanak sağlamakta ve çok fazlı akışların daha gerçekçi simülasyonuna imkan vermektedir. DROP3D, damlacık fazı için kütle ve momentum korunum denklemlerini çözerek, damlacıkların akış alanındaki dağılımını ve hareketini belirlemektedir (ANSYS, 2026c).

Euler iki-akışkan modelinde, hava fazı için çözülen Navier-Stokes denklemlerine ek olarak, damlacık fazı için de ayrı korunum denklemleri tanımlanmaktadır. Damlacık fazının kütle korunumu denklemi:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\alpha \vec{V}_d \right) = 0 \tag{4.20}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklemde α damlacık fazının hacimsel konsantrasyonunu (damlacıkların kapladığı hacim oranını) ve $\vec{V}_d$ damlacık fazının ortalama hız vektörünü göstermektedir. Süreklilik denklemi, damlacık fazının akış alanında nasıl taşındığını ve korunduğunu tanımlamaktadır.

Damlacık fazının momentum korunumu denklemi ise:

$$\frac{\partial \left(\alpha \vec{V}_d \right)}{\partial t} + \vec{\nabla} \left[\alpha \vec{V}_d \otimes \vec{V}_d \right] = \frac{C_D \, \mathrm{Re}_d}{24K} \alpha \left(\vec{V}_\mathrm{a} - \vec{V}_d \right) + \alpha \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_d} \right) \frac{1}{Fr^2} \tag{4.21}$$

olarak verilmektedir. Bu denklemin sol tarafı damlacık elenmesini temsil ederken, sağ taraftaki terimler damlacıklar üzerine etki eden kuvvetleri göstermektedir.

Momentum denkleminin sağ tarafındaki ilk terim, hava ile damlacıklar arasındaki göreceli hızdan kaynaklanan aerodinamik sürükleme kuvvetini ifade etmektedir. Bu sürükleme kuvveti, ortalama çapa d sahip damlacıklar için tanımlanmakta olup, damlacık ile hava

arasındaki hız farkı ($\vec{V}_\mathrm{a} - \vec{V}_d$), sürükleme katsayısı C_D ve damlacık Reynolds sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Damlacık Reynolds sayısı:

$$\mathrm{Re}_d = \frac{\rho_a d V_{a,\infty} \left\| \vec{V}_\mathrm{a} - \vec{V}_d \right\|}{\mu_a} \tag{4.22}$$

şeklinde tanımlanır. Burada ρ_a hava yoğunluğunu, $V_{a,\infty}$ referans hava hızını, μ_a havanın dinamik viskozitesini ve $\left\| \vec{V}_\mathrm{a} - \vec{V}_d \right\|$ hava ile damlacık arasındaki göreceli hızın şiddetini göstermektedir. Damlacık Reynolds sayısı, damla etrafındaki akışın laminer veya türbülanslı karakterini belirlemekte ve sürükleme katsayısının hesaplanmasında kullanılmaktadır.

Sürükleme kuvvetinin büyüklüğünü etkileyen bir diğer önemli parametre, ataletsel zaman parametresi K olup:

$$K = \frac{\rho_d d^2 V_{a,\infty}}{18 L_\infty \mu_a} \tag{4.23}$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu ifadede ρ_d damlacık yoğunluğunu (su için yaklaşık 1000 kg/m^3), d damlacık çapını, $V_{a,\infty}$ referans hava hızını, L_∞ karakteristik uzunluğu ve μ_a hava viskozitesini temsil etmektedir. Ataletsel parametre K, damlacıkların akış değişikliklerine ne kadar hızlı tepki verebildiğini gösteren bir zaman ölçeğidir. Büyük ve ağır damlacıklar daha yüksek K değerine sahip olup, ataletleri nedeniyle akış yönü değişikliklerine daha yavaş cevap vermektedirler. Küçük damlacıklar ise düşük K değerine sahip olduklarından, hava akışını daha yakından takip ederler.

Momentum denklemindeki ikinci terim, kaldırma ve yerçekimi kuvvetlerini temsil etmekte olup, Froude sayısı ile ilişkilendirilmektedir:

$$Fr = \frac{\left\| V_{a,\infty} \right\|}{\sqrt{L_\infty g_\infty}} \tag{4.24}$$

Burada, $V_{a,\infty}$ serbest akış hızını, L_∞ karakteristik uzunluğu ve g_∞ yerçekimi ivmesini göstermektedir. Froude sayısı, atalet kuvvetlerinin yerçekimi kuvvetlerine oranını ifade eder. Yüksek hızlı uçuş koşullarında Froude sayısı büyük değerler alır ve yerçekimi etkisi ihmal edilebilir hale gelir. Ancak düşük hızlarda veya büyük damlalar için yerçekimi etkisi önemli

olabilmektedir (ANSYS, 2026c).

Bu temel denklemler, Lagrange kodlarında kullanılan fiziksel prensiplerle aynı damlacık taşınım parametrelerini tanımlamaktadır. Aralarındaki temel fark, matematiksel formülasyondur. Lagrange yaklaşımı Adi Diferansiyel Denklemler (ODE) kullanırken, Euler yaklaşımı Kısmi Diferansiyel Denklemler (PDE) ile çözüm yapmaktadır. Her iki yöntem de fiziksel olarak eşdeğer sonuçlar vermekle birlikte, Euler yöntemi özellikle yoğun damlacık bulutlarının ve karmaşık geometrilerin analizinde hesaplama verimliliği açısından üstünlük sağlamaktadır (ANSYS, 2026c).

DROP3D modülü, farklı damlacık tipleri ve bunlarla ilişkili sürükleme korelasyonlarını desteklemektedir. Bu çalışmada, küresel su damlacıkları için ampirik olarak elde edilmiş varsayılan sürükleme korelasyonu (Water - default) kullanılmıştır. Bu korelasyon, küresel damlacıklar etrafındaki akış için deneysel verilerle doğrulanmış olup:

$$C_D = (24/\mathrm{Re}_d)\left(1 + 0.15\mathrm{Re}_d^{0.687}\right) \quad \mathrm{Re}_d \leq 1300 \quad \text{için} \tag{4.25}$$

$$C_D = 0.4 \quad \mathrm{Re}_d > 1300 \quad \text{için} \tag{4.26}$$

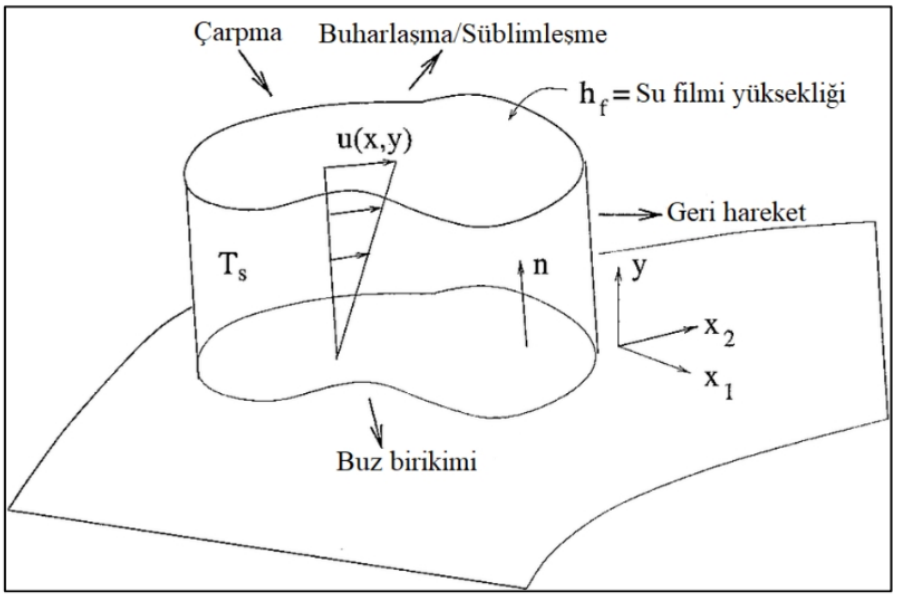
şeklinde tanımlanmaktadır. Bu sürükleme katsayısının geçerlilik aralığı Reynolds sayısı ile doğrudan sınırlı olmamakla birlikte, deneysel gözlemler su damlacıklarının $\mathrm{Re}_d > 250$ değerlerinin üzerinde deformasyona uğramaya başladığını göstermektedir (ANSYS, 2026c). Damlacıkların deformasyonu, sürükleme karakteristiklerini değiştirebilmekte ve daha karmaşık modellerin kullanılmasını gerektirebilmektedir. Ancak genel uçak buzlanması koşullarında, damlacık çapları ve hız değerleri göz önüne alındığında, çoğu damlcıka için Reynolds sayısı bu kritik değerin altında kalmakta ve küresel damlacık varsayımı geçerliliğini korumaktadır.

Bu çalışma, İHA kanat profili üzerinde buzlanma davranışını incelemek için sayısal analizleri kullanmaktadır. Bu bölümde kullanılan yazılıma, incelenen geometrilere, bunlara ait ağ yapılarına ve genel analiz kurulumuna ilişkin bilgiler sunulmaktadır.

4.4. Buz Birikim Analizi

Uçak buzlanması simülasyonlarının son ve en karmaşık aşaması, kanat yüzeyindeki buz oluşum ve büyüme süreçlerinin modellenmesidir. Bu aşamada, hava akış alanı ve damla çarpma bilgileri kullanılarak, yüzeyde oluşan sıvı su filminin davranışı, buharlaşma, donma ve geri akma süreçleri analiz edilmektedir. Bu çalışmada, NACA0012 kanat profili üzerindeki buz oluşumunun modellenmesinde FENSAP-ICE yazılım paketinin ICE3D modülünden faydalanılmıştır.

ICE3D, termo-dinamik prensiplere dayalı gelişmiş bir buz oluşum çözücüsüdür. Bu modül, katı yüzeyler üzerindeki ısı ve kütle transferi olgularını çözerek, buz tabakasının kalınlığını, şeklini ve termodinamik özelliklerini belirlemektedir. ICE3D'nin temel yaklaşımı, yüzeye çarpan su damlacıklarının oluşturduğu ince sıvı su filmini modellemektir (Şekil 21). Bu film, hava akışının oluşturduğu kayma gerilmeleri, yerçekimi veya merkezkaç kuvvetleri etkisiyle yüzey üzerinde hareket edebilmekte, yüzey termodinamik koşullarına bağlı olarak kısmen donabilmekte, buharlaşabilmekte veya süblimleşebilmektedir. ICE3D, tüm katı yüzeyler üzerinde ağ noktalarında su filmi kalınlığını, sıcaklığını ve buz birikim oranını hesaplamaktadır. Model, kırağı buz, sır buz ve karışık buz gibi farklı buz türlerini otomatik olarak tespit edebilmekte ve simüle edebilmektedir (ANSYS, 2026a).



Şekil 21. Yüzeydeki ısı ve kütle transferi olaylarının şematik gösterimi

Sıvı su filminin yüzey üzerindeki hızı V_f, yüzey koordinatları $\vec{x} = (x_1, x_2)$ ve yüzeye

dik yön y'nin bir fonksiyonudur. Problem, film hızı için yüzeye dik doğrultuda doğrusal bir profil varsayılarak basitleştirilmektedir. Duvarda hız sıfır olacak şekilde:

$$\vec{V}_f(\vec{x}, y) = \frac{y}{\mu_f}\vec{\tau}_{a,\text{wall}}(\vec{x}) \tag{4.27}$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Burada μ_f su filminin dinamik viskozitesi ve $\vec{\tau}_{a,\text{wall}}$ duvar üzerindeki hava kayma gerilmesidir. Hava kayma gerilmesi, filmin hareket etmesini sağlayan ana itici kuvvettir. Bu varsayım, film kalınlığının genellikle 10 μm'den küçük olması nedeniyle buzlanma ve buzlanma önleme analizlerinde geçerlidir (ANSYS, 2026a).

Film hızının film kalınlığı boyunca ortalaması alınarak, ortalama bir hız türetilebilir:

$$\bar{V}_f(\vec{x}, y) = \frac{1}{h_f}\int_0^{h_f} \vec{V}_f(\vec{x}, y)dy = \frac{h_f}{2\mu_f}\vec{\tau}_{a,\text{wall}}(\vec{x}) \tag{4.28}$$

Bu ifadede h_f su filminin kalınlığını ve $\bar{V}_f$ ortalama film hızını göstermektedir. Ortalama hız, film kalınlığı ile doğru orantılıdır; daha kalın filmler daha hızlı hareket eder.

ICE3D, tüm katı yüzeyler üzerinde iki kısmi diferansiyel denklem sistemini çözmektedir. İlk denklem, kütle korunumunu ifade eder:

$$\rho_f\left[\frac{\partial h_f}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\left(\bar{V}_f h_f\right)\right] = V_\infty LWC\beta - \dot{m}_{\text{evap}} - \dot{m}_{\text{ice}} \tag{4.29}$$

Burada ρ_f su filminin yoğunluğu (yaklaşık 1000 kg/m^3), h_f film kalınlığı, $\bar{V}_f$ ortalama film hızı, V_∞ serbest akış hızı, LWC sıvı su içeriği (Liquid Water Content), β toplama verimi (collection efficiency), $\dot{m}_{\text{evap}}$ buharlaşma kütle akısı ve $\dot{m}_{\text{ice}}$ buz oluşum kütle akısıdır.

Eşitliğin sol tarafı, su filminin zamanla değişimini ve yüzey boyunca taşınımını temsil etmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki üç terim ise sırasıyla su damlacıklarının çarpması ile filme eklenen kütleyi (kaynak), buharlaşma ile kaybedilen kütleyi ve donma ile filmden uzaklaştırılan kütleyi (kuyu) göstermektedir.

İkinci kısmi diferansiyel denklem, enerjinin korunumunu ifade eder:

$$\rho_f \left[\frac{\partial h_f c_f T_f}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{V}_f h_f c_f T_f \right) \right] =$$
$$\left(e_d + \frac{1}{2} \vec{V}_d^2 \right) V_\infty LWC\beta - \dot{m}_{\text{evap}} \left(L_{\text{evap}} \right) + \dot{m}_{\text{ice}} \left(L_{\text{fus}} - c_{\text{ice}} T_{\text{ice}} \right) \tag{4.30}$$
$$-c_h \left(T_f - T_{\text{rec}} \right) + \sigma\varepsilon \left(T_\infty^4 - T_f^4 \right) + Q_{\text{anti-icing}}$$

Bu kapsamlı enerji denkleminde, c_f su filminin özgül ısısı, T_f film sıcaklığı, e_d damla iç enerjisi, $\vec{V}_d$ damla hızı, L_{evap} buharlaşma gizli ısısı, L_{fus} erime gizli ısısı, c_{ice} buzun özgül ısısı, T_{ice} buz sıcaklığı, c_h konvektif ısı transfer katsayısı, T_{rec} toparlanma sıcaklığı, σ Stefan-Boltzmann sabiti, ε yüzey yayma katsayısı, T_∞ ortam sıcaklığı ve $Q_{\text{anti-icing}}$ buzlanma önleme sistemi tarafından sağlanan ısı akısıdır (ANSYS, 2026a).

Eşitliğin sol tarafı, su filmindeki ısıl enerjinin zamansal değişimini ve uzaysal taşınımını göstermektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki terimler ise sırasıyla: aşırı soğutulmuş su damlacıklarının çarpmasıyla filme iletilen enerjiyi (kinetik ve iç enerji), buharlaşma ile kaybedilen enerjiyi, donma ile açığa çıkan gizli ısıyı, konvektif ısı transferini, radyatif ısı transferini ve buzlanma önleme sistemi tarafından sağlanan ısıyı temsil etmektedir.

Sistemdeki katsayılar ρ_f, c_f, L_{evap}, c_{ice}, L_{fus}, σ ve ε su ve buzun fiziksel özellikleridir ve kullanıcı arayüzünde ayarlanabilir durumdadır. Referans koşullar T_∞, V_∞ ve LWC ise hava akışı ve damla parametreleridir ve akış ve damla analizlerinde kullanılan değerlerle uyumlu olmalıdır.

Yerel duvar kayma gerilmesi $\vec{\tau}_{a,\text{wall}}$ ve konvektif ısı akısı Q_h akış çözücüsü (FENSAP) tarafından sağlanmaktadır. DROP3D ise yerel toplama verimi β, damla enerjisi e_d ve damla çarpma hızı $\vec{V}_d$ değerlerini sağlamaktadır. Buharlaşma kütle akısı $\dot{m}_{\text{evap}}$, konvektif ısı transfer katsayısından parametrik bir model kullanılarak elde edilmektedir. $Q_{\text{anti-icing}}$ terimi, ıslak hava hesaplamaları için C3D modülünden elde edilen buzlanma önleme ısı akısıdır.

Sistemde hesaplanması gereken üç bilinmeyen bulunmaktadır: film kalınlığı h_f, hava/su filmi/buz/duvar arayüzündeki denge sıcaklığı T_f ve anlık buz birikim kütle akısı $\dot{m}_{\text{ice}}$. Denklem sistemini tamamlamak için uyumluluk bağıntılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Fiziksel gözlemlere dayalı olarak, bu bağıntılar şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{cases} h_f \geq 0 \\ \dot{m}_{\text{ice}} \geq 0 \\ h_f \tilde{T}_f \geq 0 \\ \dot{m}_{\text{ice}} \tilde{T}_f \leq 0 \end{cases} \tag{4.31}$$

Burada $\tilde{T}_f = T_f - T_{\text{freeze}}$ donma noktasından sapma sıcaklığıdır ($T_{\text{freeze}} = 0\ ^\circ C$). Bu eşitsizlikler, modelin donma noktasının altındaki sıcaklıklarda sıvı su öngörmemesini ve $0\ ^\circ C$'nin üzerindeki sıcaklıklarda buz oluşmamasını garanti etmektedir (ANSYS, 2026a).

İlk eşitsizlik ($h_f \geq 0$), film kalınlığının fiziksel olarak pozitif veya sıfır olması gerektiğini belirtir. İkinci eşitsizlik ($\dot{m}_{\text{ice}} \geq 0$), buz oluşum oranının negatif olamayacağını (buz sadece oluşabilir, kendiliğinden erimez) ifade eder. Üçüncü eşitsizlik ($h_f \tilde{T}_f \geq 0$), sıvı film ancak sıcaklık donma noktasının üzerinde ise var olabileceğini gösterir. Dördüncü eşitsizlik ($\dot{m}_{\text{ice}} \tilde{T}_f \leq 0$), buz oluşumunun sadece donma noktasında veya altında gerçekleşebileceğini belirtir.

Önemli bir not olarak, yerel yüzey sıcaklığı donma noktasının üzerinde olsa bile, buz/su karışımının buharlaşmalı soğuması nedeniyle buz oluşumu gerçekleşebilmektedir. Bu durum, özellikle glaze ice oluşum koşullarında gözlemlenmekte ve modelin termodinamik doğruluğunu göstermektedir.

4.5. Buzlanma Analizi Koşulları

Bu çalışmada, NACA0012 kanat profili üzerindeki buz oluşumu, çeşitli atmosferik ve uçuş parametrelerinin etkilerini incelemek amacıyla farklı koşullar altında analiz edilmiştir. Analizler, temel bir referans koşul belirlenerek gerçekleştirilmiş ve ardından parametrik çalışmalar ile farklı değişkenlerin buzlanma üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.

4.5.1. Temel Analiz Koşulları

Temel analiz koşulları (A-1), insansız hava araçları için tipik uçuş parametreleri ve kritik buzlanma ortam koşulları göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Temel analizde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Temel analiz koşulları (A-1)

Parametre	**Değer**
Uçuş Hızı (V)	50 m/s
Ortam Sıcaklığı (T)	-5°C
Reynolds Sayısı (Re)	2.074×10^6
Mach Sayısı (M)	0.152
Ortalama Hacimsel Çap (MVD)	30 μm
Sıvı Su İçeriği (LWC)	1.0 g/m^3
Hücum Açısı (α)	4°
Buzlanma Süresi (t)	660 s (11 dk)

Uçuş hızının 50 m/s olarak seçilmesinin temel nedeni, İHA'ların düşük hızlarda uçması ve bu hız değerinin Türk Silahlı Kuvvetleri envanterinde bulunan İHA'ların tipik seyir hızlarını temsil etmesidir. Bayraktar TB2 ve ANKA gibi taktik İHA'ların seyir hızı yaklaşık 40 m/s, azami hızı ise 60 m/s civarındadır. Seçilen 50 m/s hız değeri, bu araçların operasyonel uçuş şartlarının ortasında yer almakta ve yaygın kullanılan seyir koşulunu temsil etmektedir.

Atmosferik buzlanma koşulları, Federal Havacılık Yönetmeliğinin (FAR) 25. Bölüm Ek C'de yayımlanan standart atmosferik buzlanma koşullarına uygun olarak belirlenmiştir. Ek C, uçak sertifikasyonunda kullanılan standart buzlanma zarfını tanımlar ve farklı sıcaklık aralıklarında karşılaşılabilecek sıvı su içeriği, damlacık boyutu ve buzlanma süresi değerlerini belirtir. Bu standart, sürekli maksimum (Continuous Maximum) ve aralıklı maksimum (Intermittent Maximum) olmak üzere iki farklı buzlanma ortamı tanımlamaktadır. Kritik buzlanmayı öngörebilmek adına, aralıklı maksimum buzlanma ortamında -5°C sıcaklık ve 30 μm ortalama hacimsel damlacık çapı seçilmiştir. Ek C buzlanma şartlarına göre, -5°C sıcaklıkta aralıklı maksimum ortamda belirtilen LWC değeri düzeltme ile beraber 1.0 g/m^3 civarındadır ve bu değer çalışmada temel koşul olarak kullanılmıştır. Buzlanma süresi toplam 660 saniye (11 dakika) olarak belirlenmiştir.

Hücum açısı 4° olarak seçilmiştir. Bu değer, İHA'ların seyir uçuşu sırasında tipik olarak karşılaşılan bir hücum açısıdır ve kanat profilinin aerodinamik açıdan verimli çalıştığı, kaldırma kuvvetinin yeterli olduğu ancak sürüklemenin minimum seviyede kaldığı bir koşulu temsil etmektedir.

4.5.2. Parametrik Analiz Koşulları

Temel analiz koşullarına ek olarak, farklı parametrelerin buzlanma üzerindeki etkilerini sistematik olarak incelemek amacıyla parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda, bir parametre değiştirilirken diğer tüm parametreler sabit tutulmuştur. Gerçekleştirilen tüm analizlerde Reynolds sayısı, dış akışta laminar-türbülanslı geçiş için kabul edilen kritik değer olan $Re = 5 \times 10^5$'in üzerinde kalmaktadır. Bu nedenle tüm analizlerde tam gelişmiş türbülanslı akış koşulları esas alınmıştır. Gerçekleştirilen tüm analizler ve koşulları Tablo 2'de özetlenmiştir.

Tablo 2. Tüm analiz senaryolarının koşulları

No	**Senaryo**	**V [m/s]**	**T [°C]**	**Re [×10^6]**	**M**	**MVD [μm]**	**LWC [g/m^3]**	**α [°]**
A-1	Temel	50	-5	2.074	0.152	30	1.0	4
A-2	Düşük Hız	40	-5	1.659	0.122	30	1.0	4
A-3	Yüksek Hız	60	-5	2.489	0.183	30	1.0	4
A-4	Düşük Sıcaklık	50	-2	2.033	0.151	30	1.0	4
A-5	Aşırı Düşük Sıcaklık	50	-15	2.221	0.155	30	1.0	4
A-6	Küçük Damlacık	50	-5	2.074	0.152	20	1.0	4
A-7	Büyük Damlacık	50	-5	2.074	0.152	40	1.0	4
A-8	Düşük LWC	50	-5	2.074	0.152	30	0.5	4
A-9	Yüksek LWC	50	-5	2.074	0.152	30	1.5	4
A-10	Düşük Hücum Açısı	50	-5	2.074	0.152	30	1.0	0
A-11	Yüksek Hücum Açısı	50	-5	2.074	0.152	30	1.0	8
A-12	Doğrulama Çalışması	102.8	-5.6	4.4	0.32	30	1.8	4

4.5.3. Çoklu Adım Analizi

Uçak buzlanması fiziksel olarak kararsız bir süreçtir. Yüzeyde buz birikimi başladıkça, geometri değişmekte ve bu değişiklik akış alanını, damla yörüngelerini ve dolayısıyla buz oluşum sürecini etkilemektedir. Bu nedenle, gerçekçi buz şekillerinin elde edilmesi için buzlanma sürecinin zamana bağlı olarak simüle edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, buz oluşum sürecinin modellenmesinde çoklu adım (multi-shot) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yöntemi, toplam buzlanma süresini daha küçük zaman aralıklarına bölerek, her adımda akış analizi, damla analizi ve buz birikim hesaplamalarını sırayla gerçekleştirmektedir. Her adımın sonunda oluşan buz geometrisi, bir sonraki adım için yeni başlangıç geometrisi olarak kullanılmaktadır.

Çoklu adım yaklaşımı, tam zamana bağlı simülasyonlara göre önemli ölçüde daha az hesaplama kaynağı gerektirmekte, ancak buz şeklinin evrimini ve nihai geometriyi yüksek doğrulukla tahmin edebilmektedir. Her adımda yüzey pürüzlülüğü, ICE3D'nin boncuklaşma (beading) modeli kullanılarak otomatik olarak güncellenmekte ve sonraki adımın akış çözümünde dikkate alınmaktadır.

4.5.4. Damlacık Dağılımının Seçimi

Bu çalışmada, damlacık dağılımının etkisini değerlendirmek amacıyla, aynı koşullarda hem tekdüze dağılım hem de Langmuir D dağılımı ile ön analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda, iki farklı dağılım arasında damla toplama verimliliği açısından keskin bir fark gözlemlenmemiştir. Bu gözlem ışığında, hesaplama süresini optimize etmek amacıyla, tüm analizlerde tekdüze damla dağılımı kullanılmasına karar verilmiştir.

4.5.5. Sayısal Analiz Ayarları

Sayısal analizlerde kullanılan ayarlar ve seçimler Tablo 3'te verilmiştir. Doğrulama çalışması için bazı parametreler deneysel koşullarla uyumlu olacak şekilde ayarlanmış ve bu farklılıklar tabloda belirtilmiştir.

Tablo 3. Sayısal analiz ayarları

FENSAP	
Enerji denklemi	Kısmî Diferansiyel Denklem
Türbülans modeli	k-ω SST
Yüzey pürüzlülüğü	Belirtilmiş kum tanesi pürüzlülüğü (0.0005 m)
	Doğrulama çalışması: NASA kum-tanesi (0.0037 m)
Duvar koşulları	Durma sıcaklığı + 10 K
Courant–Friedrichs–Lewy sayısı	50
Maks. zaman adımı sayısı	100
Yapay viskozite	Yukarı doğru akış
DROP3D	
Fiziksel model	Damlacıklar
Parçacık türü	Damlacıklar
Damlacık sürükleme modeli	Su (varsayılan)
Parçacık ısıl denklemi	-
Damlacık dağılımı	Tekdüze
Courant–Friedrichs–Lewy sayısı	20
Maks. zaman adımı sayısı	100
ICE3D	
Buz - Su modeli	Sır buz (gelişmiş)
Isı akışı tipi	Klasik
Pürüzlülük çıktısı	Boncuklaşma kum tanesi
Boncuklaşma	Aktif
EID hesaplama	Devre dışı
Zaman adımı	Otomatik zaman adımı
Toplam buzlanma süresi	660 s (Parametrik analizler A-1 ile A-11)
	360 s (Doğrulama çalışması A-12)
Çoklu adım sayısı	10

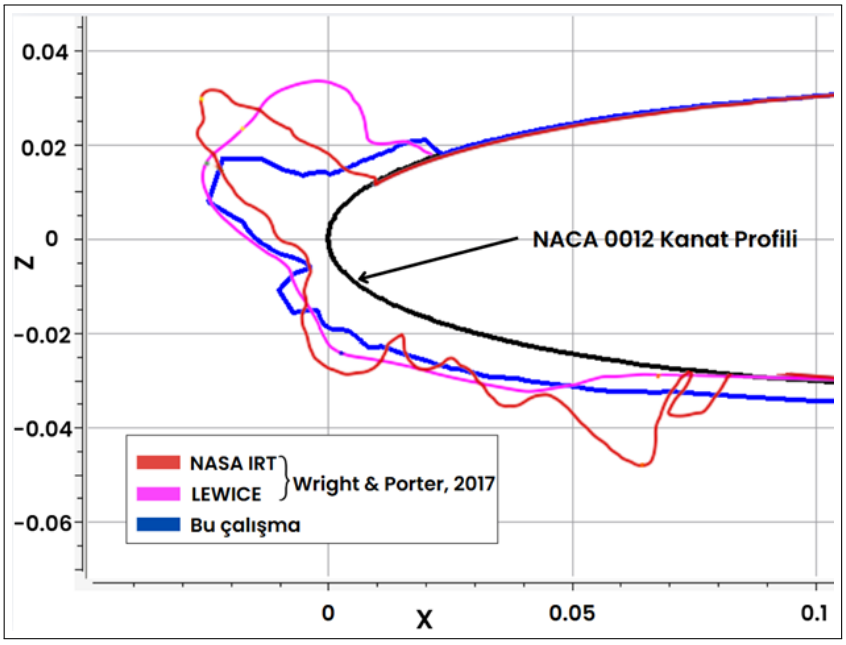
5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Doğrulama Analizi

Gerçekleştirilen buzlanma analizlerinin güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla, elde edilen sonuçlar, NASA Buzlanma Araştırma Tüneli deneysel verileri ve LEWICE yazılımı ile elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Wright & Porter, 2017). Karşılaştırma, $-6°$ ile $8°$ hücum açısı aralığında, kaldırma katsayısı (C_L) ve sürükleme katsayısı (C_D) değerleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Doğrulama çalışması için analiz koşulları şu şekildedir: $V = 102.8$ m/s, $T = -5.6$ °C, $Re = 4.4 \times 10^6$, $M = 0.32$, $MVD = 30$ μm, $LWC = 1.8$ g/m^3, $\alpha = 4$ ° ve $t = 360$ saniye.

Şekil 22, buzlanmış kanat geometrilerini göstermektedir. Karşılaştırmadan görüldüğü üzere, bu çalışmada elde edilen buz geometrisi NASA IRT deneysel sonuçları ile genel hatlarıyla uyumludur. Kanat hücum kenarındaki buz oluşumu ve buz boynuzlarının konumları benzer bölgelerde yer almaktadır. LEWICE sonuçları, kanat hücum kenarında daha geniş bir buz birikimi öngörmüştür.

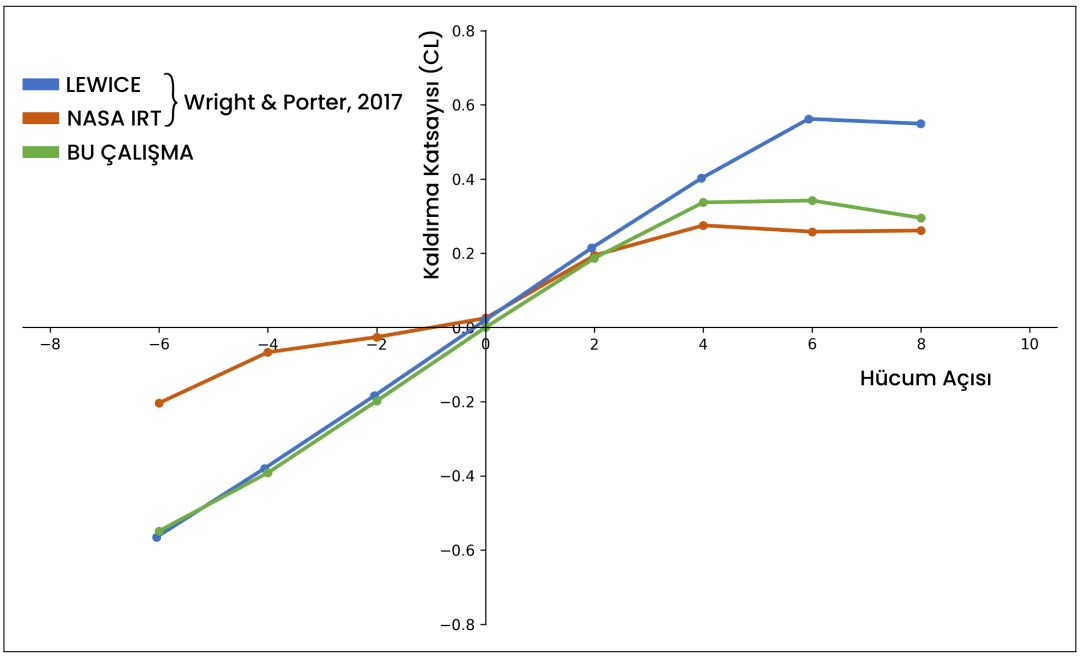


Şekil 22. Buzlanmış kanat geometrilerinin karşılaştırılması

Gözlenen geometrik farklılıkların birkaç faktörden kaynaklandığı öngörülmektedir. İlk

olarak, buzlanma modellerindeki damlacık birikim verimliliği hesaplamalarındaki farklılıklar ve yüzey ısı transferi modellemesindeki yaklaşımlar sonuçları etkilemektedir. Özellikle, kanat hücum kenarındaki durma noktası civarında akış alanının farklı şekilde çözülmesi bu tür sapmalara yol açabilmektedir. İkinci önemli faktör ise yüzey pürüzlülüğü modellemesidir. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü NASA kum tanesi modeli kullanılarak $LWC = 1.8$ g/m^3 için $k_s = 0.0037$ m olarak belirlenmiştir. Ancak, NASA IRT tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada ve LEWICE sayısal analizlerinde yüzey pürüzlülüğünün hangi değerde olduğu bilgisi verilmemiştir (Wright & Porter, 2017). Yüzey pürüzlülüğü, buzun yüzeye yapışma özellikleri ve ısı transfer katsayısını doğrudan etkilediğinden, bu parametredeki belirsizlik geometrik farklılıklara önemli katkıda bulunabilmektedir.

Şekil 23, hücum açısına bağlı olarak C_L değişimini göstermektedir. Bu çalışmanın sonuçları $-6° \leq \alpha \leq -2°$ hücum açılarında NASA deneysel verileri ile belirgin farklılıklar göstermektedir. Bu farklılığın temel nedeninin, negatif hücum açılarında akışın laminere dönmesi nedeniyle sayısal çözüm prosedürünün değişmesi olduğu değerlendirilmektedir. LEWICE sonuçları ile bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar arasında yüksek uyum (yaklaşık %7.6 fark) gözlenmiştir. Bu da kurulan model ve kullanılan sayısal analiz parametrelerinin güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.



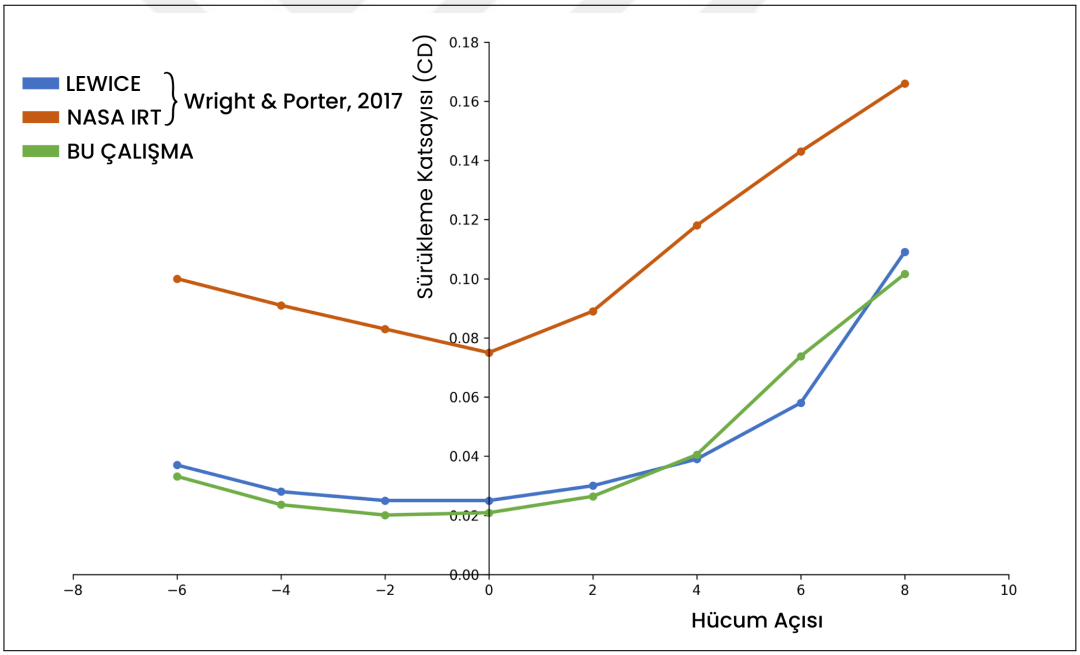
Şekil 23. Kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişimi

Bu çalışma, $2° \leq \alpha \leq 8°$ hücum açılarında NASA deneysel verileri ile %22.5'in

altında bir farkla uyum içindedir. 6° ve 8° açılarında LEWICE sonuçları daha yüksek kaldırma değerleri öngörmüştür. Bu farklılık, türbülans modellerindeki veya akış ayrılmasının tahminindeki yaklaşımlardan kaynaklanabilir.

Şekil 24, hücum açısına bağlı olarak C_D değişimini göstermektedir. Düşük hücum açılarında ($-6° \leq \alpha \leq 4°$), bu çalışma ve LEWICE sayısal verileri %15'in altında farkla uyumlu sonuçlar vermektedir. Bu bölgede her iki yöntem de minimum sürükleme değerlerini benzer şekilde tahmin etmektedir. NASA IRT sonuçları belirgin şekilde daha yüksek sürükleme değerleri vermektedir.

Yüksek hücum açılarında ($6° \leq \alpha \leq 8°$), tüm yöntemlerde sürükleme katsayısında belirgin bir artış gözlenmiştir. Bu, akış ayrılmasının başladığını göstermektedir. Hücum açısının 6° olduğu durumda LEWICE sayısal sonuçlarına göre %27.2 daha yüksek değer elde edilmiştir. $\alpha = 8°$'de ise bu fark %6.8 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 24. Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişimi

Nicel karşılaştırma sonuçları, ortalama mutlak yüzde hataları üzerinden değerlendirilmiştir. negatif hücum açıları hariç maksimum %18, LEWICE analiz sonuçları ile maksimum %25.9 olarak gerçekleşmiştir. Sürükleme katsayısı için ise bu çalışma ve LEWICE sayısal verileri arasındaki fark %14.7 olarak gerçekleşmiştir. Deneysel veri (NASA IRT) ile fark, daha yüksek oranda gerçekleşmiştir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen buzlanma analizleri, özellikle sürükleme katsayısı

tahmininde literatürdeki sayısal veriler ile uyumlu sonuçlar göstermektedir. Kaldırma katsayısı tahminlerinde pozitif hücum açılarında NASA deneysel sonuçları ile büyük ölçüde uyum sözkonusudur. LEWICE sonuçları ile karşılaştırma, farklı çözücülerdeki sayısal yaklaşımların farklı sonuçlar verebileceğini ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, bu çalışmada gerçekleştirilen buzlanma analizleri NASA deneysel verileri ve LEWICE sayısal verileri ile kapsamlı şekilde karşılaştırılmıştır. Özellikle $2^\circ \leq \alpha \leq 4^\circ$ hücum açıları bölgesinde elde edilen sonuçların literatürdeki mevcut veriler ile uyum içinde olduğu görülmüştür.

5.2. Temel Senaryo Analizleri

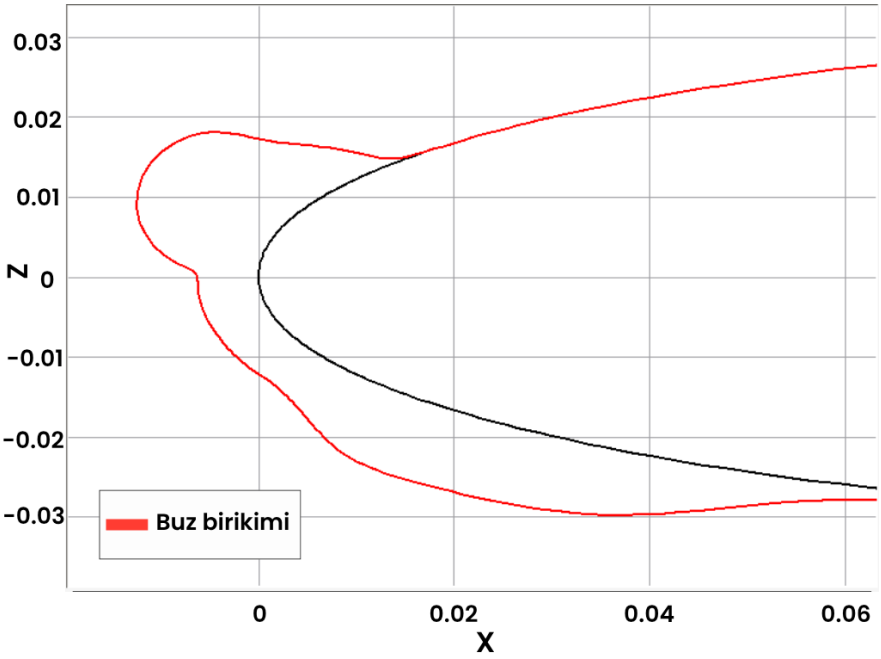
Bu bölümde, A-1 temel senaryo koşullarında gerçekleştirilen buzlanma analizleri ve elde edilen buz geometrilerinin aerodinamik etkileri incelenmiştir. Temel senaryo için test koşulları şu şekildedir: akış hızı $V = 50$ m/s, sıcaklık $T = -5$ °C, Reynolds sayısı $Re = 2.074 \times 10^6$, Mach sayısı $M = 0.152$, ortalama damla çapı $MVD = 30$ μm, sıvı su içeriği $LWC = 1.0$ g/m^3, hücum açısı $\alpha = 4^\circ$ ve buzlanma süresi $t = 660$ saniye. Bu koşullar, orta hızda ve orta şiddette buzlanma oluşumunu temsil eden değerlerdir.

Şekil 25, A-1 temel senaryo koşullarında elde edilen buz birikimi geometrisini göstermektedir. Buz birikimi, kanat hücum kenarında yoğunlaşmıştır. Buz geometrisi incelendiğinde, sır buz oluşumu karakteristik özellikleri gözlenmektedir. Kanat hücum kenarının üst ve alt yüzeylerinde buz boynuzları oluşmuştur. Üst yüzeydeki buz boynuzu daha belirgin ve kanat yüzeyinden daha fazla uzaklaşmış konumdadır. Alt yüzeydeki buz birikimi ise nispeten daha düz bir profil sergilemektedir. Buzun yüzeye yapışma bölgesi, durma noktası civarında yoğunlaşmıştır ve bu bölgede buz kalınlığı maksimum değere ulaşmıştır. Kanat yüzeyinin geri kalan bölgelerinde ise buz birikimi belirgin bir farkla azdır.

Şekil 26, temiz kanat, pürüzlü kanat ve buzlanmış kanat için kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişimini göstermektedir. Temiz kanat ve pürüzlü kanat profilleri, çalışılan hücum açılarında birbirine oldukça yakın değerler sergilemektedir. Bu durum, $k_s = 0.0005$ m yüzey pürüzlülüğünün 10° hücum açısına kadar kaldırma üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Her iki profil de lineer bir kaldırma eğrisi göstermekte ve 10° hücum açısına kadar akış ayrılması gözlenmemektedir.

Buzlanmış kanat ise belirgin şekilde farklı bir davranış sergilemektedir. Düşük hücum

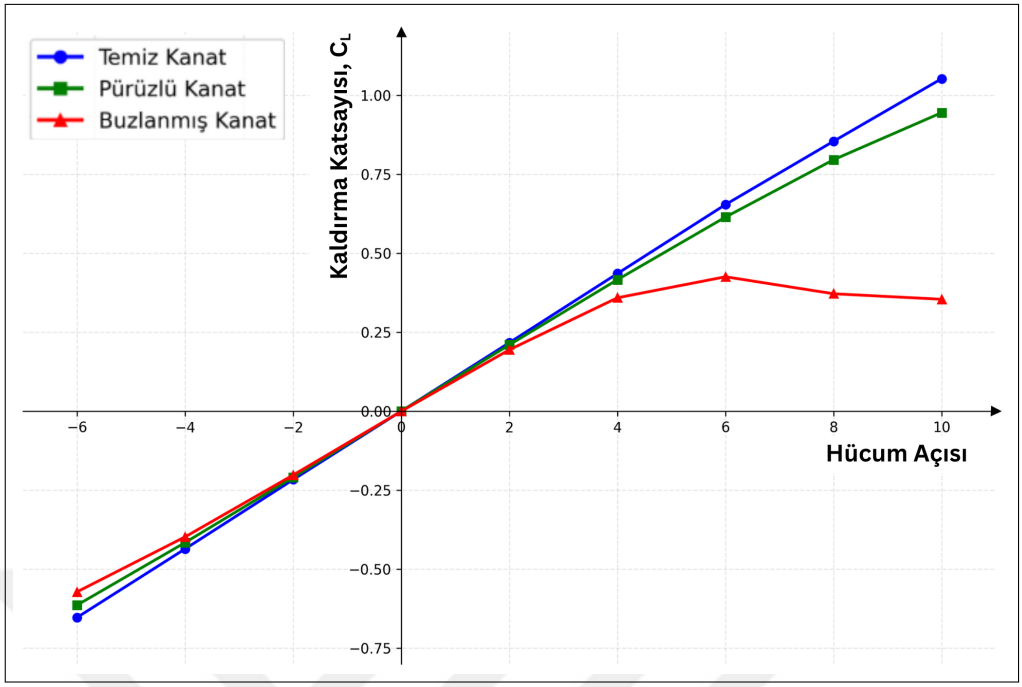
açılarında ($-6° \leq \alpha \leq 4°$), buzlanmış kanat temiz kanada kıyasla daha düşük kaldırma katsayıları elde edilmiştir. Kritik nokta, $\alpha = 4°$ civarında ortaya çıkmaktadır. Bu açıdan sonra, buzlanmış kanatta erken akış ayrılması başlamaktadır. Kaldırma katsayısı $\alpha = 6°$'de maksimum değerine ($C_L = 0.425$) ulaşmakta ve daha yüksek hücum açılarında belirgin şekilde düşmektedir. Temiz kanat için $\alpha = 10°$'de $C_L = 1.05$ değerine ulaşılırken, buzlanmış kanat sadece $C_L = 0.354$ değerine ulaşmaktadır. Bu, yaklaşık %66'lık bir kaldırma kaybına karşılık gelmektedir.



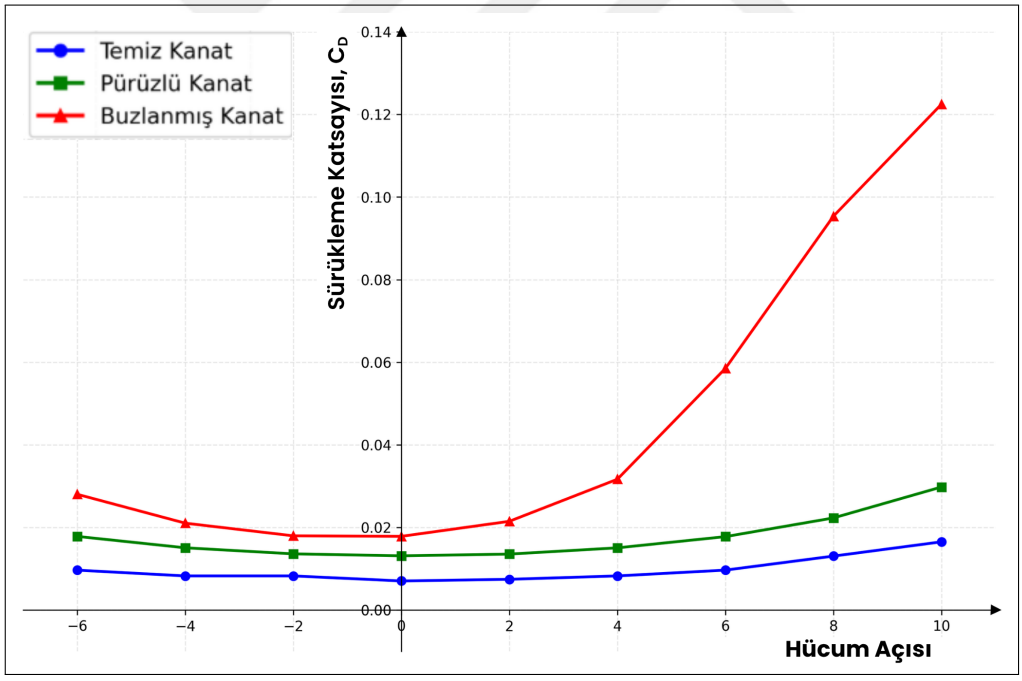
Şekil 25. Kanat üzerinde oluşan buz birikimi

Şekil 27, sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişimini göstermektedir. Sürükleme üzerindeki etkiler, kaldırmaya göre çok daha belirgindir. Temiz kanat, tüm hücum açısı aralığında en düşük sürükleme değerlerini göstermektedir. Minimum sürükleme katsayısı $\alpha = 0°$'de $C_{D,min} = 0.0070$ olarak elde edilmiştir. Hücum açısı arttıkça sürükleme kademeli olarak artmaktadır ve $\alpha = 10°$'de $C_D = 0.0165$ değerine ulaşmaktadır.

Pürüzlü kanat, temiz kanada kıyasla tüm hücum açılarında daha yüksek sürükleme değerleri göstermektedir. Minimum sürükleme katsayısı $\alpha = 0\,°$'de $C_{D,min} = 0.0131$ olarak elde edilmiştir. Bu, temiz kanada göre yaklaşık %85'lık bir artışı temsil etmektedir. Düşük hücum açılarında ($-6° \leq \alpha \leq 4°$), pürüzlü kanat sürükleme değerleri temiz kanat sürükleme değerlerinin yaklaşık 1.5 katı seviyesindedir. Bu durum, yüzey pürüzlülüğünün viskoz sürüklemeyi önemli ölçüde artırdığını göstermektedir.



Şekil 26. Kaldırma katsayısının hücum açısına göre değişimi



Şekil 27. Sürükleme katsayısının hücum açısına göre değişimi

Buzlanmış kanat ise en yüksek sürükleme değerlerini sergilemektedir. Minimum sürükleme katsayısı $\alpha = 0$ °'de $C_{D,min} = 0.0178$ olarak elde edilmiştir. Bu, temiz kanada göre yaklaşık %153 artışı, pürüzlü kanada göre ise %36 artışı temsil etmektedir. Düşük hücum açılarında ($-6° \leq \alpha \leq 2°$), buzlanmış kanat sürükleme değerleri temiz kanatın yaklaşık 2 katı seviyesindedir. Kritik nokta yine $\alpha = 4°$ civarında ortaya çıkmaktadır. Bu

açıdan sonra, akış ayrılmasının başlaması ile birlikte basınç sürüklemesi hızla artmaktadır. $\alpha = 6^\circ$ durumunda buzlanmış kanat $C_D = 0.0585$ değerine ulaşırken, temiz kanat sadece $C_D = 0.0097$ değerindedir. Bu, yaklaşık 6 kat farkı temsil etmektedir. $\alpha = 10$ °'de buzlanmış kanat $C_D = 0.122$ değerine ulaşmakta ve temiz kanattan yaklaşık 7.4 kat daha yüksek sürükleme göstermektedir.

5.3. Akış Hızının Buzlanma Üzerindeki Etkisi

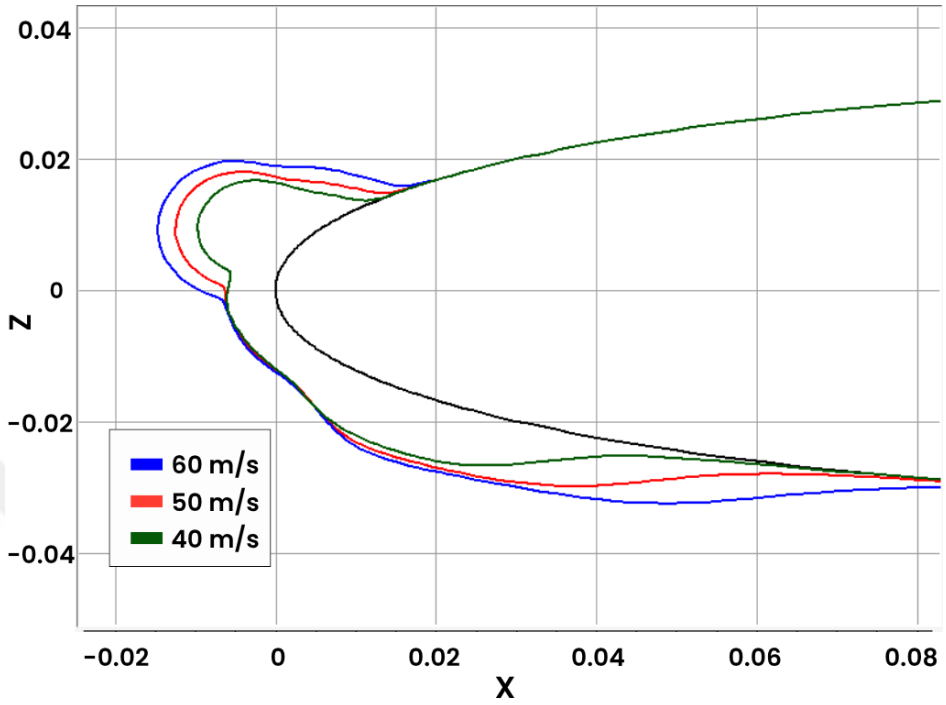
Bu bölümde, akış hızının buz oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. A-1 temel senaryodaki diğer tüm koşullar sabit tutularak ($T = -5^\circ$ C, $MVD = 30$ μm, $LWC = 1.0$ g/m^3, $\alpha = 4$, $t = 660$ s), 3 farklı akış hızında analizler gerçekleştirilmiştir: $V = 40$ m/s (seyir hızı), $V = 50$ m/s (ortalama hız), ve $V = 60$ m/s (azami hız). Bu hızlar, Reynolds sayılarının sırasıyla $Re = 1.66 \times 10^6$, $Re = 2.07 \times 10^6$ ve $Re = 2.49 \times 10^6$ değerlerine karşılık gelmektedir.

Şekil 28, üç farklı akış hızında elde edilen buz birikimi geometrilerini göstermektedir. Görsel inceleme ve kütle hesaplamaları, akış hızının hem buz miktarı hem de buz geometrisi üzerinde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Farklı hızlarda oluşan buz kütleleri şu şekildedir: $V = 40$ m/s için $m_{buz} = 0.055$ kg, $V = 50$ m/s için $m_{buz} = 0.076$ kg, ve $V = 60$ m/s için $m_{buz} = 0.099$ kg. Akış hızı 40 m/s'den 60 m/s'ye çıkarıldığında, toplam buz kütlesi yaklaşık %80 artmaktadır. 40 m/s'den 50 m/s'ye geçişte %38 artış, 50 m/s'den 60 m/s'ye geçişte ise %30 artış gözlenmektedir. Bu durum, buz kütlesinin akış hızı ile doğrusal olmayan bir ilişki sergilediğini göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi, her üç hıza ait buz birikimi profilleri hücum bölgesinde büyük ölçüde çakışmaktadır. Bu durum, durma noktasının hız değişiminden bağımsız olarak sabit hücum açısı ($\alpha = 4^\circ$) koşulunda aynı konumda kalmasından kaynaklanmaktadır. Durma noktasında yerel hız sıfır olduğundan basınç maksimuma ulaşmakta ve damlacık birikimi bu bölgede her hız için benzer bir başlangıç geometrisi sergilemektedir.

Akış hızının artması ile buz kütlesinin artmasının temel nedenleri şunlardır: Yüksek akış hızlarında, su damlacıklarının ataleti artmakta ve bu durum, damlacıkların akış çizgilerini daha az takip etmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, damla toplama verimliliği (β) yüksek hızlarda artmaktadır.

Artan damla ataleti nedeniyle, damlacıkların kanat yüzeyine çarptığı bölge genişlemekte ve buz daha geniş bir alana yayılmaktadır. Konvektif ısı transfer katsayısı akış hızıyla doğru

orantılı artmakta, ancak bu artış damla tutma verimliliğindeki değişime göre daha zayıf kalmaktadır.



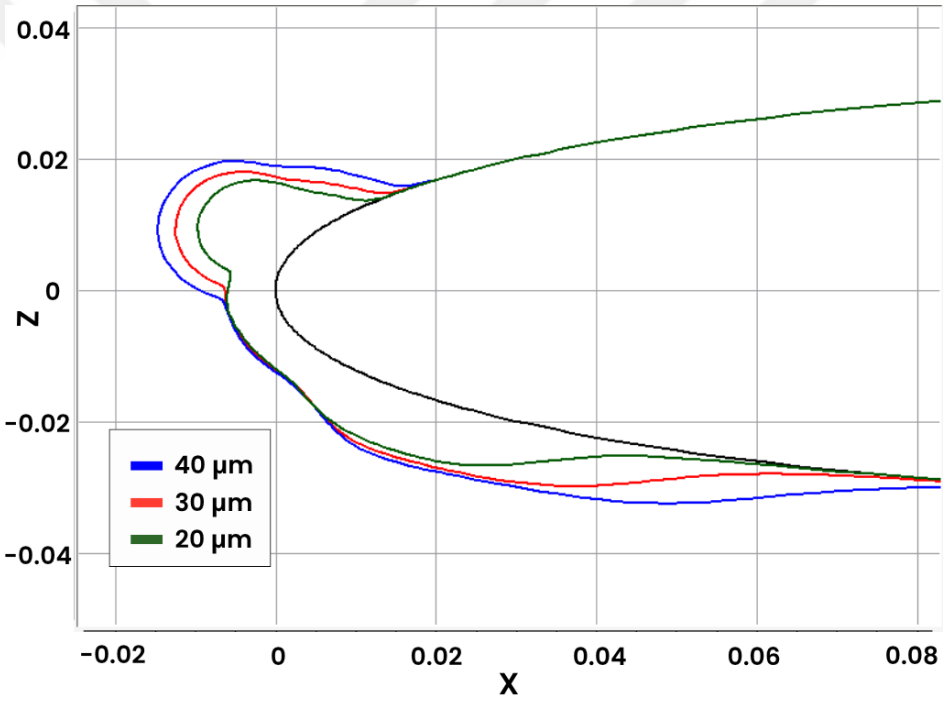
Şekil 28. Farklı akış hızlarında elde edilen buz birikimleri

5.4. Damlacık Boyutunun Buzlanma Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, su damlacığı boyutunun buz oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm koşullar sabit tutularak ($V = 50$ m/s, $T = -5°$C, $LWC = 1.0$ g/m^3, $\alpha = 4°$, $t = 660$ s), üç farklı damlacık boyutunda analizler gerçekleştirilmiştir: $MVD = 20$ μm, $MVD = 30$ μm, ve $MVD = 40$ μm. Bu değerler, atmosferik buzlanma koşullarında karşılaşılan tipik damla boyutu aralığını temsil etmektedir.

Şekil 29, üç farklı damlacık boyutunda elde edilen buz birikimi geometrilerini göstermektedir. Damlacık boyutunun buz oluşumu üzerinde hem miktar hem de dağılım açısından belirgin etkileri bulunmaktadır. Farklı damlacık boyutlarında oluşan buz kütleleri şu şekildedir: 20 μm için $m_{buz} = 0.051$ kg, 30 μm için $m_{buz} = 0.076$ kg, ve 40 μm için $m_{buz} = 0.102$ kg. Damlacık boyutu 20 μm'den 40 μm'ye artırıldığında, toplam buz kütlesi %100 artmaktadır. 20 μm'den 30 μm'ye geçişte %49 artış, 30 μm'den 40 μm'ye geçişte ise %34 artış gözlenmektedir.

Buz geometrileri incelendiğinde, 20 μm gibi küçük damlacık boyutlarında buz birikiminin kanat hücum kenarına çok yakın bir bölgede yoğunlaştığı görülmektedir. Buz boynuzları küçük ve kompakt yapıdadır. Buzun yüzeye yapışma bölgesi dar bir alan kaplamaktadır. Temel senaryoyu temsil eden 30 μm damlacık boyutunda, buz birikimi hem miktar hem de yayılım açısından orta seviyededir. Buz boynuzları daha belirgin hale gelmiş ve buz birikimi kanat yüzeyinde daha geniş bir alana yayılmıştır. Damlacık boyutu 40 μm olarak seçildiğinde ise en fazla buz kütlesi oluşmuştur. Buz boynuzları en büyük boyutlara ulaşmış ve buz birikimi kanat hücum kenarından daha gerilere kadar uzanmıştır. Özellikle dikkat çeken nokta, büyük damlacıkların kanat yüzeyinin daha geniş bir bölümünde buz oluşturmasıdır.

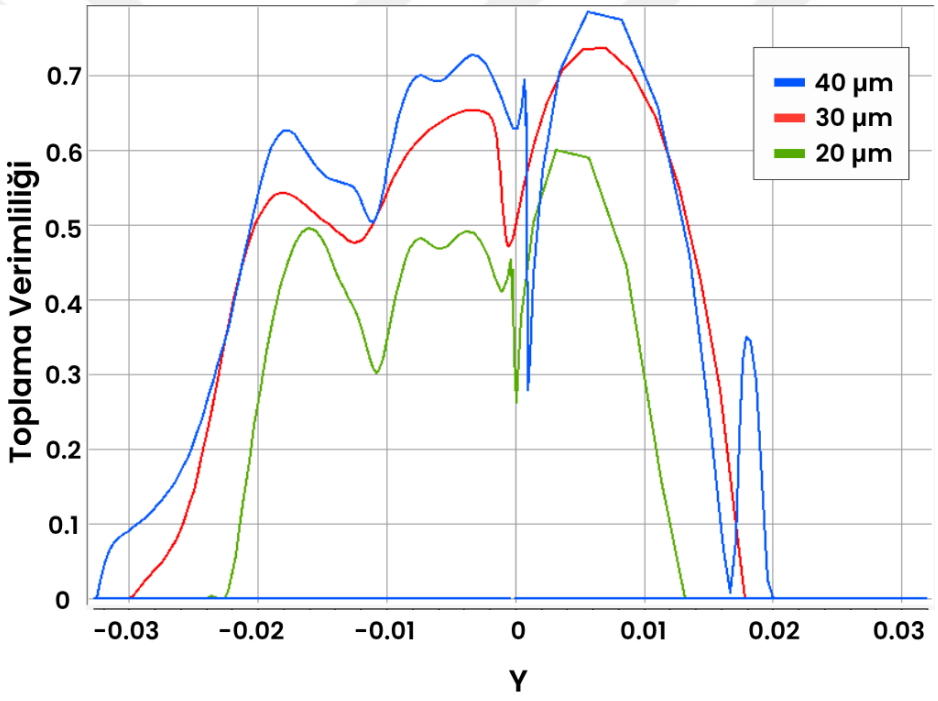


Şekil 29. Farklı damlacık boyutlarında elde edilen buz birikimi geometrileri

Şekil 30, farklı damlacık boyutları için kanat yüzeyi boyunca damla tutma verimliliği (β) dağılımını göstermektedir. Damla tutma verimliliği, akış alanındaki damlacıkların kanat yüzeyine çarpma olasılığını ifade eden boyutsuz bir parametredir. Bu grafik, damlacık boyutunun buz dağılımı üzerindeki etkisini anlamak için kritik öneme sahiptir. Küçük damlacıklar (μm) akış çizgilerini daha iyi takip etmekte ve durma noktası civarında dar bir bölgede yüksek tutma verimliliği göstermektedir. Maksimum β değeri yaklaşık 0.6 civarındadır ve keskin bir şekilde sıfıra düşmektedir. Bu durum, küçük damlacıkların sadece

kanat hücum kenarının çok yakınında yüzeye ulaşabildiğini göstermektedir.

Damlacık boyutu 30 μm olarak seçildiğinde, daha geniş bir bölgede tutunma gözlemlenmiştir. Maksimum β değeri 0.75'e ulaşmaktadır. Durma noktasından önceki ve sonraki bölgelerde tutma verimliliği daha yavaş azalmakta ve daha geniş bir alanda damlacık çarpması gerçekleşmektedir. Boyutu 40 μm olan damlacıklar ise en geniş tutma verimliliği dağılımını göstermektedir. Maksimum β değeri 0.95'e ulaşmaktadır, bu da neredeyse tüm damlacıkların yüzeye çarptığı anlamına gelmektedir. Ayrıca, tutma verimliliği kanat yüzeyinin çok daha geniş bir bölümünde sıfırdan farklı değerler almaktadır. Bu durum, büyük damlacıkların yüksek ataleti nedeniyle akış çizgilerinden ayrılıp kanat yüzeyinin daha geniş bölgelerine ulaşabildiğini göstermektedir.



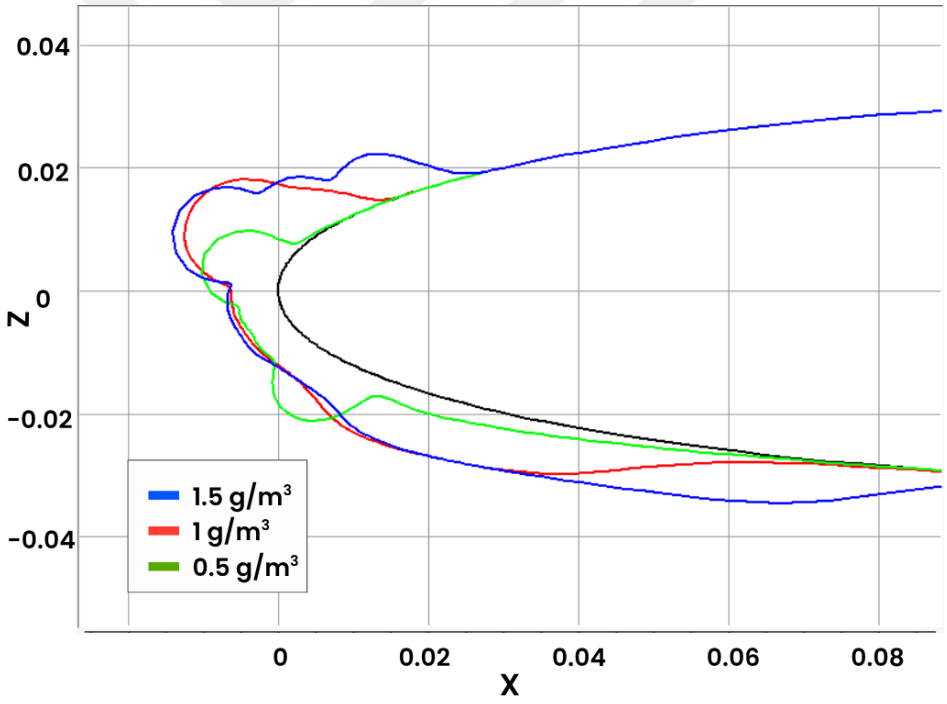
Şekil 30. Farklı damlacık boyutları için damla tutma verimliliği dağılımları

Sonuç olarak, damlacık boyutu arttıkça toplam buz kütlesi önemli ölçüde artmaktadır. Büyük damlacıklar, yüksek ataletleri nedeniyle kanat yüzeyinin daha geniş bölgelerine ulaşabilmekte ve bu durum hem buz miktarını hem de buz dağılımını etkilemektedir. Damla tutma verimliliği dağılımları, damlacık boyutunun buz geometrisi üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır (Şekil 30).

5.5. Sıvı Su İçeriğinin Buzlanma Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, sıvı su içeriğinin buz oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm koşullar sabit tutularak (V = 50 m/s, T = −5°C, MVD = 30 μm, α = 4°, t = 660 s), üç farklı sıvı su içeriğinde analizler gerçekleştirilmiştir: LWC = 0.5 g/m^3, LWC = 1.0 g/m^3, ve LWC = 1.5 g/m^3.

Şekil 31, üç farklı sıvı su içeriğinde elde edilen buz birikimi geometrilerini göstermektedir. Oluşan buz kütleleri şu şekildedir: 0.5 g/m^3 için m_{buz} = 0.037 kg, 1.0 g/m^3 için m_{buz} = 0.076 kg ve 1.5 g/m^3 için m_{buz} = 0.111 kg. Sıvı su içeriği 0.5 g/m^3'den 1.5 g/m^3'ye artırıldığında, toplam buz kütlesi %200 artmaktadır, yani üç katına çıkmaktadır. 0.5 g/m^3'den 1.0 g/m^3'ye geçişte %105 artış, 1.0 g/m^3'den 1.5 g/m^3'ye geçişte ise %46 artış gözlenmektedir.

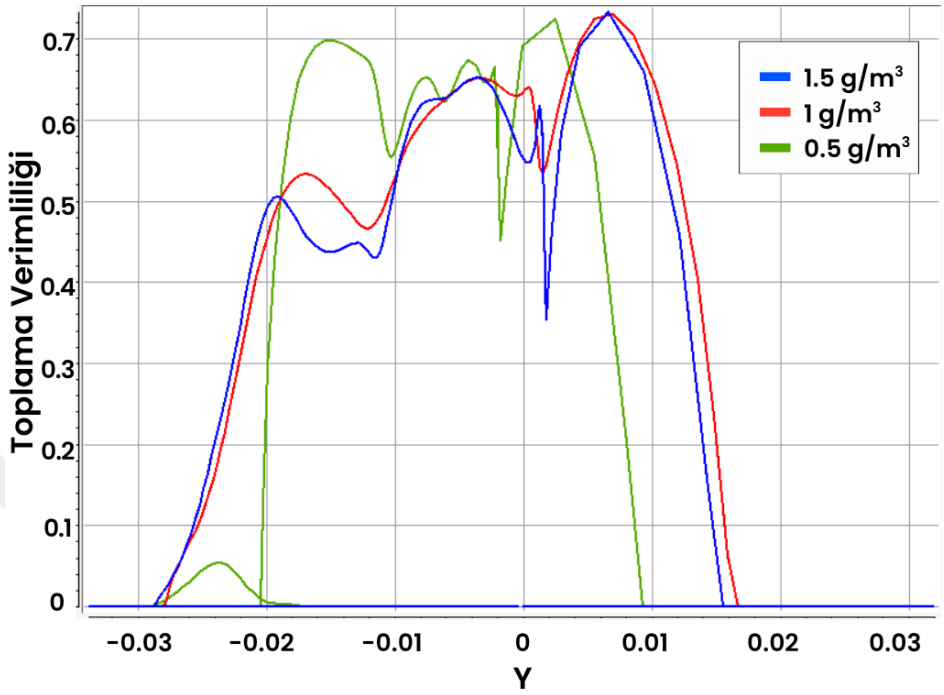


Şekil 31. Farklı sıvı su içeriğinde elde edilen buz birikimi geometrileri

Geometriler incelendiğinde, farklı LWC değerlerinde, buz birikiminin kanat yüzeyinde kapladığı alan ve genel formu oldukça benzerdir. Düşük LWC değerinde (0.5 g/m^3) buz tabakası daha incedir, orta LWC değerinde (1.0 g/m^3) buz kalınlığı artmıştır, yüksek LWC değerinde (1.5 g/m^3) ise buz tabakası en kalın hale gelmiştir.

Şekil 32, farklı sıvı su içeriği değerleri için damla tutma verimliliği (β) dağılımlarını

göstermektedir. Maksimum değerler, incelenen her bir farklı sıvı su içeriği için yaklaşık $\beta_{max} \approx 0.75$ civarındadır.



Şekil 32. Farklı sıvı su içeriği için damla tutma verimliliği dağılımları

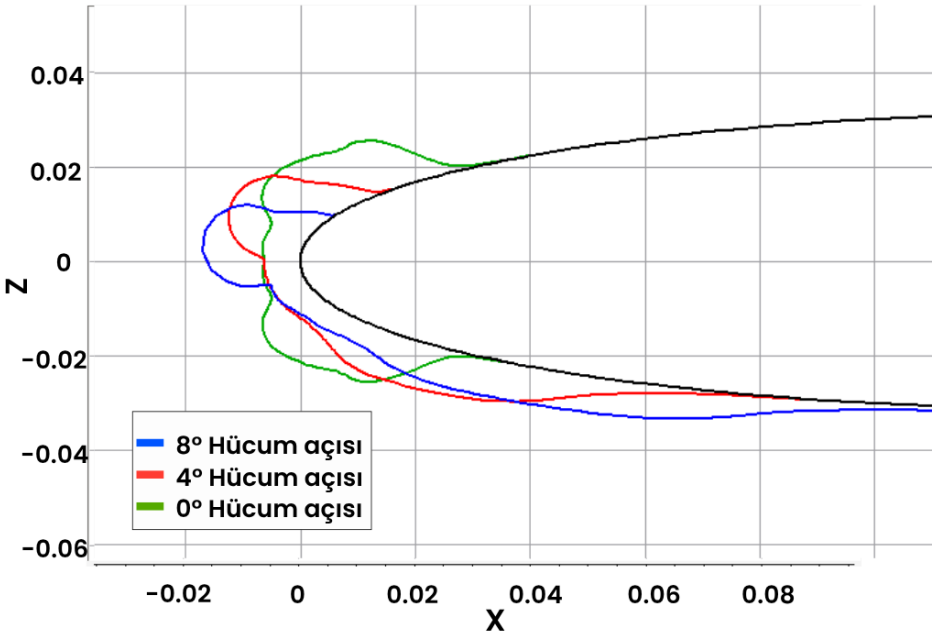
5.6. Hücum Açısının Buzlanma Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, hücum açısının buz oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üç farklı hücum açısında analizler gerçekleştirilmiştir: $\alpha = 0°$, $\alpha = 4°$, ve $\alpha = 8°$.

Şekil 33, üç farklı hücum açısında elde edilen buz birikimi geometrilerini göstermektedir. Oluşan buz kütleleri şu şekildedir: $\alpha = 0°$ için $m_{buz} = 0.073$ kg, $\alpha = 4°$ için $m_{buz} = 0.076$ kg, ve $\alpha = 8°$ için $m_{buz} = 0.087$ kg. Buz kütlelerindeki değişim nispeten küçük olmakla birlikte, buz geometrisinde belirgin farklılıklar gözlenmektedir.

Hücum açısının artması ile buz geometrisinde sistematik değişimler ortaya çıkmaktadır. Sıfır hücum açısında, buz birikimi kanat hücum kenarında simetrik bir dağılım sergilemektedir. Üst ve alt yüzeylerde buz boynuzları neredeyse eşit konumlardadır. Hücum açısı 4° olduğunda, buz boynuzlarının konumları değişmeye başlamaktadır. Üst yüzeydeki buz boynuzu kanat hücum kenarına daha yakın bir konuma kaymaktatır. Alt yüzeyde ise buz birikimi daha geriye doğru uzanmaktadır. Hücum açısı 8° olduğunda, bu eğilim daha belirgin hale gelmektedir.

Üst yüzeyde buz boynuzu hücum kenarına çok yakın bir konuma gelmiş ve buz birikiminin başlangıç noktası önemli ölçüde öne kaymıştır. Alt yüzeyde ise buz boynuzu kanat alt yüzeyine doğru ilerlemekte ve buzun bitiş noktası daha geriye uzanmaktadır.



Şekil 33. Farklı hücum açılarında elde edilen buz birikimi geometrileri

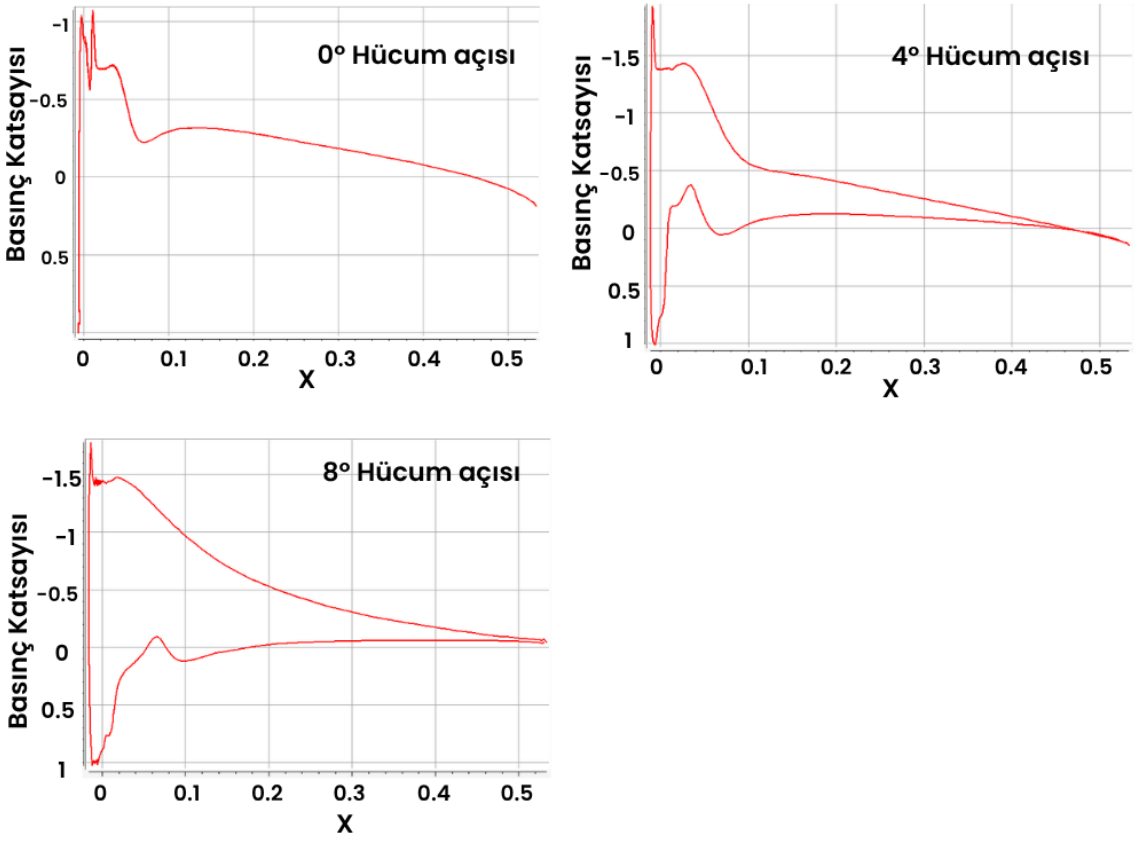
Bu geometrik değişimlerin temel nedeni, hücum açısının kanat etrafındaki akış alanını ve dolayısıyla durma noktası konumunu değiştirmesidir. Hücum açısı arttıkça, durma noktası kanat alt yüzeyine doğru kaymaktadır. Bu kayma, üst yüzeyde akış hızının artmasına ve alt yüzeyde ise akış karakteristiğinin değişmesine neden olmaktadır.

Şekil 34, sırasıyla $\alpha = 0°$, $4°$ ve $8°$ hücum açıları için buzlanmış kanat üzerindeki basınç katsayısı (C_p) dağılımlarını göstermektedir. Bu grafikler, hücum açısının basınç dağılımı üzerindeki etkilerini ve dolayısıyla buz geometrisi ile aerodinamik performans arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktadır. Sıfır hücum açısında, kanat hücum kenarında (durma noktası civarında, $X \approx 0$) basınç katsayısı maksimum değere ($C_p \approx 1$) ulaşmaktadır. Hücum kenardaki buz geometrisi nedeniyle, bu bölgede basınç dağılımında keskin dalgalanmalar gözlenmektedir. Üst ve alt yüzeylerde basınç dağılımları nispeten simetrik bir özellik göstermektedir. Kanat yüzeyi boyunca ($X > 0.05$ m) basınç katsayısı kademeli olarak azalmakta ve negatif değerlere yaklaşmaktadır.

Hücum açısı $4°$ olarak seçildiğinde, basınç dağılımında belirgin değişimler ortaya

çıkmaktadır. Durma noktası civarında maksimum basınç değeri korunmakla birlikte, üst yüzeyde basınç katsayısı daha düşük değerlere inmektedir. Bu, üst yüzeyde akış hızının arttığını göstermektedir. Hücum kenarındaki buz geometrisi nedeniyle, üst yüzeyde $X \approx 0.01$ m civarında basınç katsayısında bir tepe noktası gözlenmektedir. Alt yüzeyde ise basınç katsayısı pozitif değerlerde kalmakta ve daha yavaş azalmaktadır. Buz boynuzunun konumuna karşılık gelen bölgelerde ($X \approx 0.005$ - 0.01 m) basınç dağılımında yerel maksimum ve minimum noktaları görülmektedir.

Hücum açısı 8°'ye ayarlandığında, basınç dağılımındaki farklılaşma daha belirgin hale gelmektedir. Üst yüzeyde basınç katsayısı daha da düşük değerlere ($C_p \approx -1.5$ civarına) inmektedir, bu da bu bölgede akış hızının önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Hücum kenarına çok yakın konumdaki buz boynuzu nedeniyle, basınç dağılımında keskin bir tepe noktası oluşmaktadır. Alt yüzeyde ise basınç katsayısı daha yüksek pozitif değerlerde kalmaktadır. Buz boynuzunun alt yüzeyde daha geriye uzanması nedeniyle, basınç dağılımındaki dalgalanmalar daha geniş bir bölgeye yayılmıştır.



Şekil 34. Farklı hücum açıları için basınç katsayısı dağılımı

Basınç katsayısı dağılımlarındaki bu değişimler, buz geometrisinin aerodinamik performans üzerindeki etkisini göstermektedir. Üst yüzeydeki düşük basınç bölgeleri kaldırma üretiminde önemli rol oynamakla birlikte, buz boynuzları bu bölgelerde akış ayrılmasına neden olabilmektedir. Alt yüzeydeki yüksek basınç bölgeleri ise sürükleme artışına katkıda bulunmaktadır. Hücum açısının artması ile birlikte, bu etkilerin şiddeti artmaktadır.Sonuç olarak, hücum açısı buz kütlesinde küçük değişikliklere neden olmakla birlikte, buz geometrisini ve basınç dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir.

5.7. Sıcaklığın Buzlanma Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, ortam sıcaklığının buz oluşumu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tüm koşullar sabit tutularak (V = 50 m/s, MVD = 30 μm, LWC = 1.0 g/m^3, $\alpha = 4°$, t = 660 s), üç farklı sıcaklıkta analizler gerçekleştirilmiştir: $T = -2°$C, $T = -5°$C, ve $T = -15°$C.

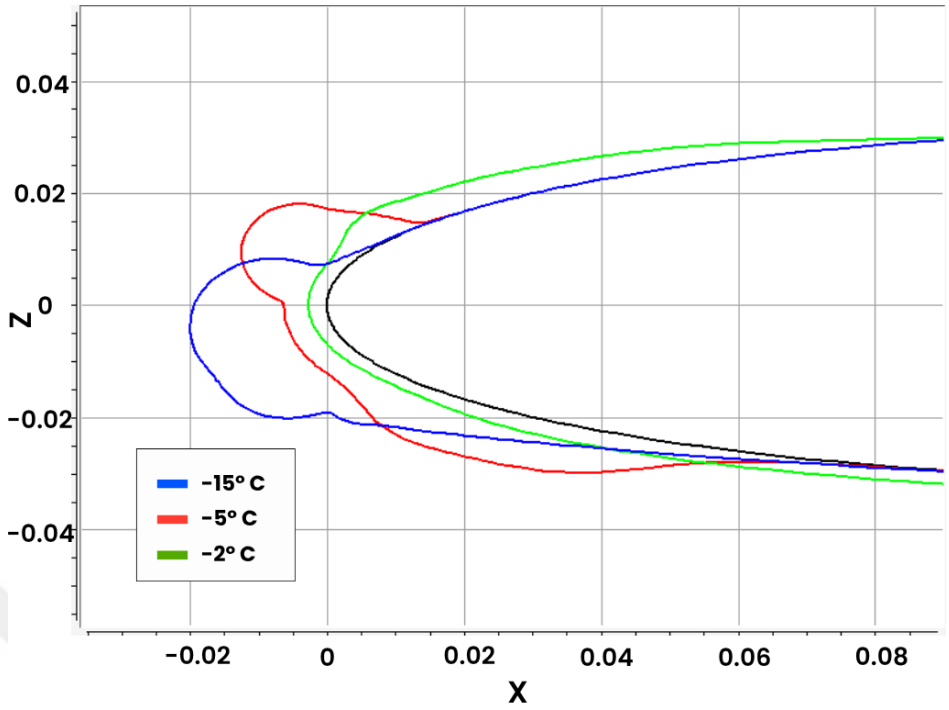
Şekil 35, üç farklı sıcaklıkta elde edilen buz birikimi geometrilerini göstermektedir. Oluşan buz kütleleri şu şekildedir: $T = -2°$C için m_{buz} = 0.080 kg, $T = -5°$C için m_{buz} = 0.076 kg, ve $T = -15°$C için m_{buz} = 0.079 kg. Buz kütlelerindeki değişim %5'in altında fakat, buz geometrilerinde belirgin farklılıklar gözlenmektedir.

$-2°$C sıcaklıkta, sır buz oluşmaktadır. Ancak düşük donma oranı nedeniyle, buz boynuzları daha az belirgindir ve buz geometrisi nispeten düz bir profil sergilemektedir. $T = -5°$C sıcaklıkta, sır buz karakteristiği devam etmektedir. Bu sıcaklıkta, belirgin buz boynuzları oluşmuştur ve buz birikimi daha kompakt ve yoğun bir yapıya sahiptir. $T = -15°$C sıcaklıkta ise kırağı/karışık buz karakteristiği hakimdir. Buz birikimi, akış doğrultusunda uzanmakta ve kanat yüzeyine daha yakın bir form almıştır.

Şekil 36, farklı sıcaklıklar için kanat yüzeyi boyunca donma oranı dağılımlarını göstermektedir. Donma oranı, yüzeye çarpan suyun ne kadarının anında donduğunu ifade eden boyutsuz bir parametredir. Değer 0 ise, tüm su sıvı halde kalmakta, değer 1 ise tüm su anında donmaktadır.

Düşük sıcaklıkta ($T = -15°$C), donma oranı kanat yüzeyinin neredeyse tamamına yayılmıştır. Bu durum, çarpan tüm damlacıkların anında donduğunu göstermektedir. Sadece durma noktası civarında çok küçük bir bölgede donma oranı düşmektedir. Yüzeyde sıvı su filmi oluşmadığından, buz kuru ve akış doğrultusunda büyümektedir.

Orta sıcaklıkta ($T = -5°$C), donma oranı dağılımı karmaşık bir özellik göstermektedir.

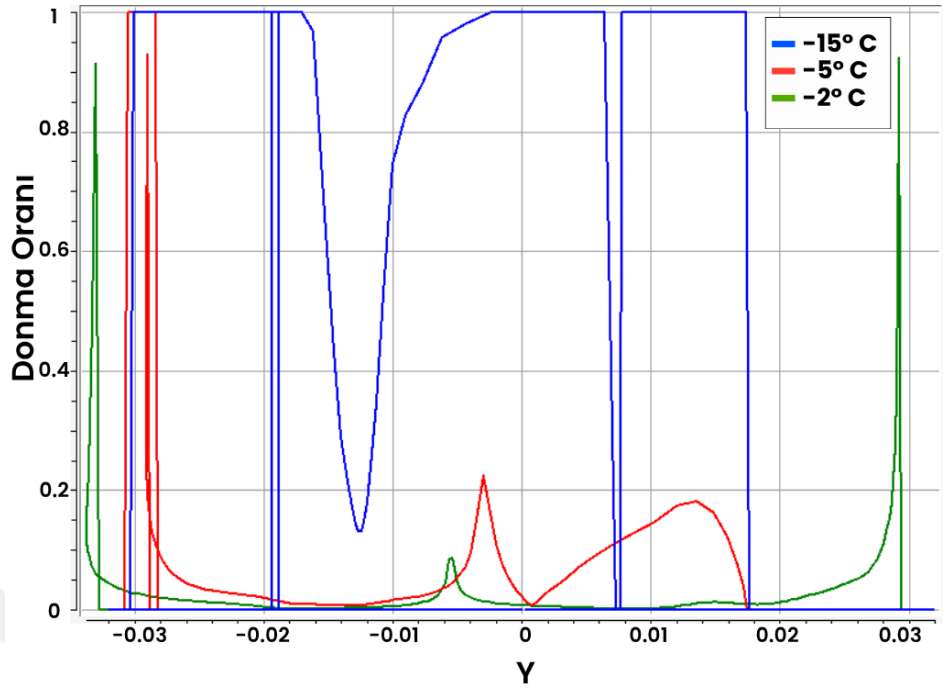


Şekil 35. Farklı sıcaklıklarda elde edilen buz birikimi geometrileri

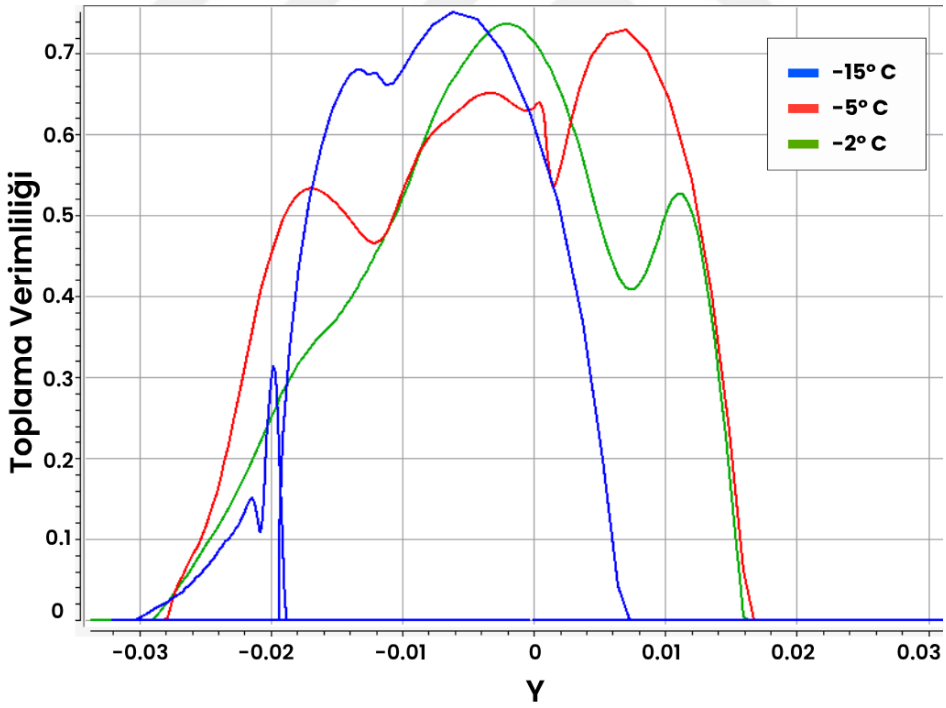
Kanat yüzeyinin bazı bölgelerinde donma oranı 1 seviyesindeyken, bazı bölgelerde 0.2 - 0.6 arasında değişmektedir. Özellikle, buz boynuzlarının oluştuğu bölgelerde donma oranında yerel tepe noktaları gözlenmektedir. Bu kısmi donma, sır ve karışık buz geometrilerinin karakteristik özelliğidir.

Yüksek sıcaklıkta ($T = -2°\text{C}$), donma oranı dağılımı daha da düşük değerler almaktadır. Bu durum, çarpan suyun yarısından fazlasının sıvı halde kaldığını göstermektedir. Sıvı su filmi yüzeyde akarken, donma bölgesel olarak gerçekleşmekte ve bu da sır buz boynuzlarının oluşumuna neden olmaktadır. Durma noktası civarında, donma oranı sıfıra yaklaşmaktadır; bu bölgede su filmi en kalın haldedir.

Şekil 37, farklı sıcaklıklar için damlacık birikme verimliliği dağılımlarını göstermektedir. Üç sıcaklık için beta eğrileri genel olarak benzer bir form sergilemektedir, maksimum değer yaklaşık $\beta_{max} \approx 0.75$ civarındadır. Ancak dikkat çekici olan, düşük sıcaklıkta ($T = -15°\text{C}$) durma noktası civarında ($Y \approx -0.02$ m bölgesinde) keskin bir tepe noktasının bulunmasıdır. Bu tepe, diğer iki sıcaklıkta çok daha az belirgindir. Bu durum, düşük sıcaklıkta oluşan kuru buzun yüzey geometrisini değiştirmesi ve yerel olarak damlacık birikme verimliliğini artırmasına neden olmuştur.



Şekil 36. Farklı sıcaklıklar için donma oranı



Şekil 37. Farklı sıcaklıklar için damlacık birikme verimliliği dağılımları

Sonuç olarak, sıcaklık buz kütlesinde küçük farklılıklara neden olmakla birlikte, buz tipini ve geometrisini önemli ölçüde etkilemektedir. $T = -2°C$ ve $T = -5°C$ sıcaklıklarında sır buz oluşmaktadır, ancak $T = -2°C$'de düşük donma oranı nedeniyle buz boynuzları daha az belirgindir. $T = -5°C$'de ise belirgin buz boynuzları ile karakterize edilen

tipik sır buz geometrisi oluşmaktadır. Bu durum, $T = -5°C$ civarının kritik sıcaklık bölgesi olduğunu göstermektedir. Daha düşük sıcaklıklarda ($T = -15°C$) kırağı/karışık buz oluşumu gözlenmekte ve buz akış doğrultusunda uzanmaktadır. Donma oranı dağılımları, bu farklılığın temel nedenini ortaya koymaktadır.

5.8. Buz Koruma Sistemi İçin Isı Yükü Gereksinimleri

Buzlanmış kanat yüzeyinin korunması için gerekli ısı akısı gereksinimleri, FENSAP-ICE yazılım paketinin ICE3D modülü kullanılarak hesaplanmıştır. ICE3D modülü, buz koruma sistemi (IPS) tasarımı için gerekli ısıl yükleri belirleyebilmektetir. Bu analizlerde, A-1 temel senaryo koşullarında oluşan buzlanmış kanat geometrisi üzerinde iki farklı koruma modu için gerekli ısı akıları hesaplanmıştır. Bunlar, tam buharlaştırma (fully evaporative) ve ıslak çalışma (running wet) modlarıdır.

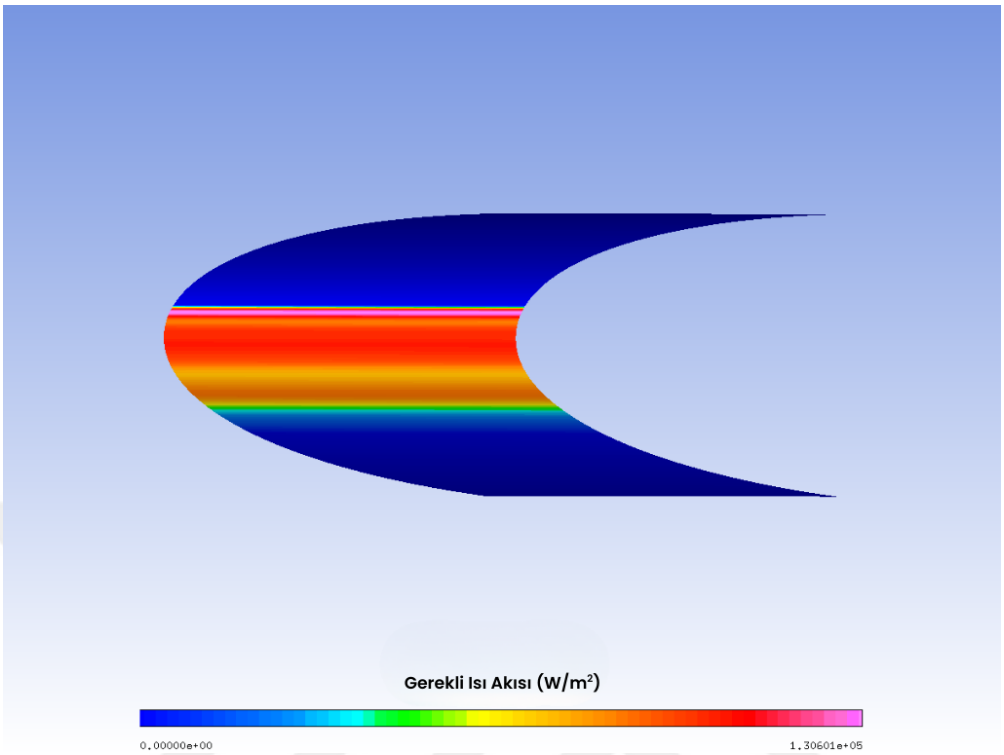
Tam buharlaştırma modunda, yüzeye çarpan tüm su damlacıklarının buharlaştırılması hedeflenmektedir. Bu mod, en yüksek ısı gereksinimini temsil etmektedir ancak yüzeyde hiçbir suyun kalmadığı garanti edilmektedir. Islak çalışma modunda ise, yüzeydeki suyun bir kısmının sıvı film halinde akmasına izin verilmekte ve sadece buzlanmanın önlenmesi için gerekli ısı sağlanmaktadır. Bu mod, daha düşük enerji tüketimi ile çalışmaktadır.

Şekil 38, tam buharlaştırma modu için kanat yüzeyinde gerekli ısı akısı dağılımını göstermektedir. Isı akısı, kanat hücum kenarında en yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bu yüksek değer, durma noktası civarında yoğun damlacık çarpması ve yüksek konvektif ısı transferi nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Kanat hücum kenarından geriye doğru gidildikçe, gerekli ısı akısı kademeli olarak azalmakta ve kanat yüzeyinin büyük bölümünde çok düşük seviyelere inmektedir. Bu asimetri, hücum açısı nedeniyle üst ve alt yüzeylerdeki farklı akış karakteristiklerinden ve damla tutma verimliliği dağılımlarından kaynaklanmaktadır.

Toplam ısıl yük açısından, tam buharlaştırma modu için gerekli toplam ısı gücü $Q_{required} = 300.9$ W olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Bu değer, 0.0238 m^2 alana dağıtıldığında ortalama ısı akısı $Q_{ave} = 12{,}660$ W/m^2 olmaktadır. Enerji dengesinde, çarpan damlacıkların getirdiği enerji $Q_{impinge} = -21.67$ W, buharlaşma için gerekli enerji $Q_{evap} = 216.5$ W, konvektif ısı transferi $Q_{conv} = 62.72$ W olarak hesaplanmıştır. Radyasyonla olan ısı transferi ise, $Q_{rad} = 1.353 \times 10^{-8}$ W seviyesinde olup, ihmal edilebilir düzeydedir.

Şekil 39, ıslak çalışma modu için gerekli ısı akısı dağılımını göstermektedir. Isı akısı

dağılımının genel karakteristiği tam buharlaştırma moduna benzemektedir.



Şekil 38. Tam buharlaştırma modu için gerekli ısı akısı dağılımı

Hücum kenarda yüksek, geriye doğru azalan bir profil görülmektedir. Üst yüzeyde, hücum kenara yakın bölgede orta seviye ısı akısı gerekliliği bulunmaktadır. Alt yüzeyde ise ısı gereksinimi daha da düşük seviyelerdedir. Bu dağılım, ıslak çalışma modunda sadece yüzeyin donma noktasının üzerinde tutulması gerektiğini ve tüm suyun buharlaştırılmasına gerek olmadığını göstermektedir.

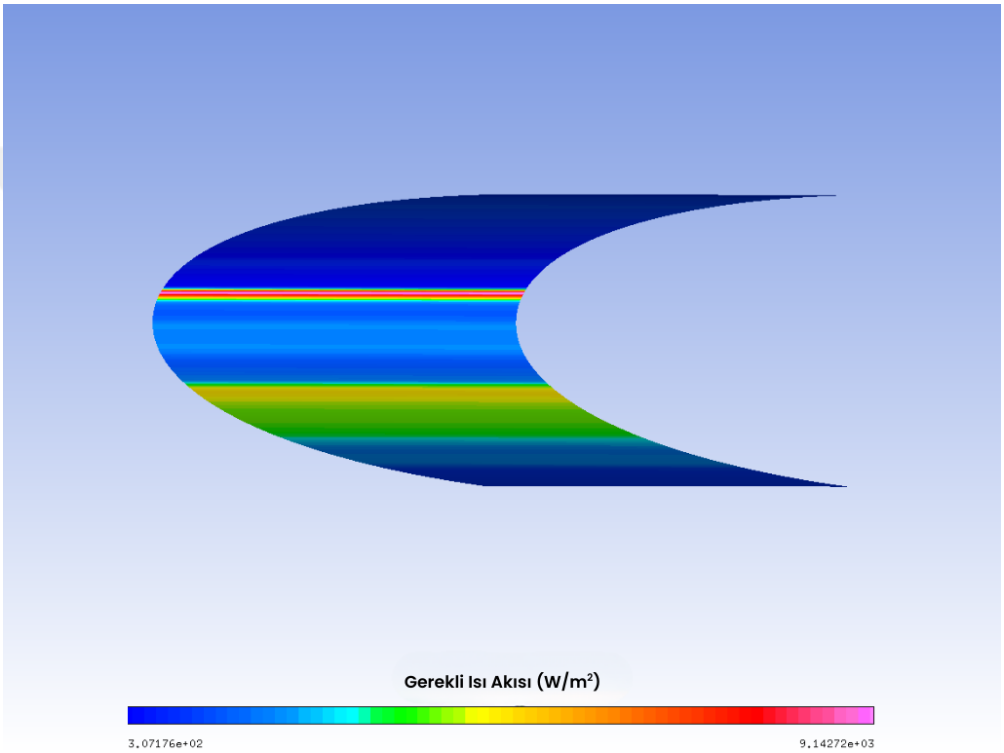
Toplam ısıl yük açısından, ıslak çalışma modu için gerekli toplam ısı gücü $Q_{required} = 42.0$ W olarak hesaplanmıştır (Tablo 4). Bu değer, tam buharlaştırma moduna göre yaklaşık 7.2 kat daha düşüktür. Aynı alan üzerinde, ortalama ısı akısı $Q_{ave} = 1{,}767$ W/m^2 olmaktadır. Enerji dengesinde, çarpan damlacıkların getirdiği enerji $Q_{impinge} = -1.788$ W, buharlaşma için gerekli enerji $Q_{evap} = 13.24$ W, konvektif ısı transferi $Q_{conv} = 26.96$ W olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4. Buz koruma sistemi güç gereksinimleri

Mod	$Q_{impinge}$ (W)	Q_{evap} (W)	Q_{rad} (W)	Q_{conv} (W)	$Q_{required}$ (W)	$Q_{req,ave}$ (W/m^2)	$Q_{req,max}$ (W/m^2)	**Alan** (m^2)
Tam Buharlaştırma	−21.67	216.5	1.35×10^{-8}	62.72	300.9	12660	130600	0.0238
Islak Çalışma	−1.79	13.24	5.34×10^{-9}	26.96	42.0	1767	9143	0.0238

İki mod arasındaki bu belirgin fark, buz koruma sistemi tasarımında önemli sonuçlar

doğurmaktadır. Tam buharlaştırma modu, maksimum güvenlik sağlamakla birlikte yüksek enerji tüketimi gerektirmektedir. Ortalama ısı akısının 12.66 kW/m^2 seviyesinde olması, özellikle elektrikli ısıtma sistemleri için önemli bir güç ihtiyacını gerektirmektedir. Islak çalışma modu ise, 1.77 kW/m^2 seviyesindeki ortalama ısı akısı ile çok daha düşük enerji tüketimi sunmaktadır. Ancak bu modda, yüzeyden akan suyun buzlanmış kanat bölgesinin gerisinde yeniden donma riski bulunmaktadır ve bu nedenle ek koruma bölgeleri gerekebilmektedir.



Şekil 39. Islak çalışma modu için gerekli ısı akısı dağılımı

Maksimum ısı akısı değerleri de tasarım açısından kritik öneme sahiptir. Tam buharlaştırma modunda 130.6 kW/m^2, ıslak çalışma modunda ise 9.14 kW/m^2 olan maksimum değerler, ısıtma elemanlarının yerel kapasitelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Özellikle hücum kenarı bölgesinde, bu yüksek ısı akılarını sağlayabilecek ısıtma sistemi tasarımı gerekmektedir.

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, NACA 0012 kanat profili üzerinde buzlanma oluşumu ve buzlanmanın aerodinamik performans üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. FENSAP-ICE yazılım paketi kullanılarak gerçekleştirilen analizler, farklı atmosferik koşullar ve uçuş parametrelerinin buz geometrisi üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar NASA Buzlanma Araştırma Tüneli deneysel verileri ve LEWICE yazılımı ile doğrulanmıştır. Kaldırma katsayısı tahminlerinde, orta hücum açıları bölgesinde ($2° \leq \alpha \leq 4°$) NASA deneysel verileri ile kabul edilebilir uyum sağlanmıştır (maksimum %18 hata). Sürükleme katsayısı tahminlerinde, düşük hücum açılarında LEWICE sayısal verileri ile %14.7 fark oluşmuştur. Gerek LEWICE yazılımı, gerekse de FENSAP-ICE ile elde edilen çözümlerde deneysel veriler deneysel verilere yeterli bir doğruluk seviyesinde yaklaşılamamıştır. Temel senaryo koşullarında ($V = 50$ m/s, $T = -5°$C, $MVD = 30$ μm, $LWC = 1.0$ g/m^3, $\alpha = 4°$, $t = 660$ s) buzlanmanın aerodinamik performans üzerindeki olumsuz etkileri detaylı şekilde incelenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ($k_s = 0.0005$ m), kaldırma üzerinde sınırlı etki gösterirken, sürüklemeyi %86 oranında artırmıştır. Buzlanma, kritik hücum açısını belirgin şekilde düşürmüş ve $\alpha = 6°$ civarında erken akış ayrılmasına neden olmuştur. Maksimum kaldırma katsayısı buzlanma nedeniyle yaklaşık %66 azalmıştır. Sürükleme artışı, buzlanmanın en belirgin etkisi olarak ortaya çıkmış ve düşük hücum açılarında 2-3 kat, yüksek hücum açılarında ise 6-7 kat artış gözlenmiştir.

Akış hızının artması ile buz kütlesi önemli ölçüde artmaktadır. 40 m/s'den 60 m/s'ye artış, buz kütlesinde yaklaşık %80 artışa neden olmuştur. Yüksek akış hızlarında su damlacıklarının ataleti artmakta ve damla tutma verimliliği yükselmektedir.

Damlacık boyutunun artması, hem buz miktarını hem de dağılımını önemli ölçüde etkilemektedir. $MVD = 20$ μm'den 40 μm'ye artış, buz kütlesini iki katına çıkarmıştır. Damla tutma verimliliği analizleri, büyük damlacıkların yüksek ataletleri nedeniyle yüzeyden ayrılamayarak kanat yüzeyinde yayındıklarını göstermiştir.

Sıvı su içeriğinin artması, buz kütlesinde önemli bir artışa neden olmuştur. Ancak dikkat çekici olan, farklı LWC değerlerinde buz geometrilerinin genel formunun benzer kalmasıdır. LWC artışı esas olarak buz kalınlığını etkilemekte, buz boynuzlarının konumlarını önemli

ölçüde değiştirmemektedir.

Hücum açısının artması, buz kütlesinde küçük değişikliklere neden olurken, buz geometrisini ve basınç dağılımını önemli ölçüde etkilemiştir. Hücum açısı arttıkça, üst yüzeyde buz boynuzu hücum kenarına yaklaşmakta, alt yüzeyde ise buz birikimi geriye doğru uzanmaktadır.

Ortam sıcaklığı, buz tipini ve geometrisini belirleyen en kritik parametrelerden biridir. $T = -2°\text{C}$ ve $T = -5°\text{C}$ sıcaklıklarında sır buz oluşurken, $T = -15°\text{C}$'de kırağı/karışık buz gözlenmiştir. Donma oranı analizleri, düşük sıcaklıklarda ($T = -15°\text{C}$) neredeyse tüm suyun anında donduğunu gösterirken, yüksek sıcaklıklarda ($T = -2°\text{C}$) kısmi donma ve sıvı su filmi akışı gözlenmiştir. $T = -5°\text{C}$ civarı, belirgin buz boynuzları ile karakterize edilen tipik sır buz geometrisinin oluştuğu kritik sıcaklık bölgesi olarak belirlenmiştir.

ICE3D modülü kullanılarak iki farklı buz koruma modu için ısı yükü gereksinimleri hesaplanmıştır. Tam buharlaştırma modu, ortalama 12.66 kW/m^2 ve maksimum 130.6 kW/m^2 ısı akısı gerektirmekte ve toplam 300.9 W güç tüketmektedir. Islak çalışma modu ise, ortalama 1.77 kW/m^2 ve maksimum 9.14 kW/m^2 ısı akısı ile çok daha düşük enerji tüketimi (42.0 W) sunmaktadır. İki mod arasındaki yaklaşık 7 kat fark, buz koruma sistemi tasarımında enerji verimliliği ile güvenlik arasındaki dengenin önemini ortaya koymaktadır.

7. KAYNAKLAR

Aksenov, A., Byvaltsev, P., Zhluktov, S., Sorokin, K., Babulin, A., & Shevyakov, V. (2019). Numerical simulation of ice accretion on airplane surface. *AIP Conference Proceedings*, *2125*(1), 030013.

Alharbi, H. A., Yosuf, B. A., Aldossary, M., Almutairi, J., & Elmirghani, J. M. (2022). Energy Efficient UAV-Based Service Offloading Over Cloud-Fog Architectures. *IEEE Access*, *10*, 89598–89613.

ANSYS, I. (2026a, Nisan 26). *Governing Equations*. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/fensap_manual/section_hgl_nkf_2w.html

ANSYS, I. (2026b, Nisan 26). *The Physical Model*. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/fensap_manual/section_fpr_5jf_2w.html

ANSYS, I. (2026c, Nisan 26). *The Physical Model*. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/fensap_manual/section_aq5_lkf_2w.html

Biancolini, M. E., Groth, C., & Haji, A. (2014). An efficient approach to simulating ice accretion on 2D and 3D airfoils. *Advanced Aero Concepts, Design and Operations*.

Bragg, M. B., Broeren, A. P., & Blumenthal, L. A. (2005). Iced-airfoil aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, *41*(5), 323–362.

Broeren, A. P., Addy Jr, H. E., Bragg, M. B., Busch, G. T., & Montreuil, E. (2011). *Aerodynamic simulation of ice accretion on airfoils* (technical report).

Cao, Y., Tan, W., & Wu, Z. (2018). Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace science and technology*, *75*, 353–385.

Cheung, M., Hann, R., & Johansen, T. A. (2022). UAV icing: a unified icing severity index derived from performance degradation. *AIAA AVIATION 2022 Forum*, 3906.

Costes, M., & Moens, F. (2019). Advanced numerical prediction of iced airfoil aerodynamics. *Aerospace Science and Technology*, *91*, 186–207.

Deiler, C. (2025, Kasım 20). *Facing the challenges of aircraft icing* [Hamburg Aerospace Lectures, DLR – German Aerospace Center, Institute of Flight Systems]. https://elib.dlr.de/189269/1/Facing%20the%20Challenges%20of%20Aircraft%20Icing.pdf

Dhyani, A., Choi, W., Golovin, K., & Tuteja, A. (2022). Surface design strategies for mitigating ice and snow accretion. *Matter*, *5*(5), 1423–1454.

Farabello, L., Scarabino, A., & Bacchi, F. (2025). Numerical analysis of ice accretion on an airfoil: A case study. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (116), 100–109.

Feng, C., Fan, J., Liu, Z., Jin, G., & Chen, S. (2025). Unmanned Aerial Vehicle Anomaly Detection Based on Causality-Enhanced Graph Neural Networks. *Drones*, *9*(6), 408.

Fortin, G., & Perron, J. (2009). Wind turbine icing and de-icing. *AIAA Journal*.

Ghisu, T., Jarrett, J. P., & Parks, G. T. (2011). Robust design optimization of airfoils with respect to ice accretion. *Journal of Aircraft*, *48*(1), 287–304.

Groth, C., Costa, E., & Biancolini, M. E. (2019). RBF-based mesh morphing approach to perform icing simulations in the aviation sector. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, *91*(4), 620–633.

Gusev, S. A., & Nikolaev, V. N. (2021). Numerical and statistical simulation technique for the aircraft wing thermal state in icing conditions. *AIP Conference Proceedings*, *2351*(1), 030049.

Habashi, W. G., Aubé, M., Baruzzi, G., Morency, F., Tran, P., & Narramore, J. C. (2004). FENSAP-ICE: a fully-3D in-flight icing simulation system for aircraft, rotorcraft and UAVS. *24th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 1–10.

Habashi, W. G. (2023). *Handbook of Numerical Simulation of In-Flight Icing*. Springer Nature.

Han, Z., & Guo, W. (2025). Dynamic UAV Task Allocation and Path Planning with Energy Management Using Adaptive PSO in Rolling Horizon Framework. *Applied Sciences*, *15*(8), 4220.

Hann, R., Müller, N. C., Løw-Hansen, B., Borup, K. T., vd. (2019). Experimental Investigations of an Icing Protection System for UAVs. *SAE Technical Papers*.

Hann, R., Enache, A., Nielsen, M. C., Stovner, B. N., van Beeck, J., Johansen, T. A., & Borup, K. T. (2021). Experimental Heat Loads for Electrothermal Anti-Icing and De-Icing on UAVs. *Aerospace*, *8*(3).

Hann, R., & Johansen, T. A. (2020). *Unsettled topics in unmanned aerial vehicle icing*. SAE International.

Harvey, D., Villeneuve, É., Béland, M., & Lapalme, M. (2024). Wind Tunnel Investigation of the Icing of a Drone Rotor in Forward Flight. *Drones*, *8*(8), 380.

Huang, X., Tepylo, N., Pommier-Budinger, V., Budinger, M., Bonaccurso, E., Villedieu, P., & Bennani, L. (2019). A survey of icephobic coatings and their potential use in a hybrid coating/active ice protection system for aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*, *105*, 74–97.

Islam, S. M. R. (2023). Drones on the Rise: Exploring the Current and Future Potential of UAVs.

Karar, M. E., Alotaibi, F., Rasheed, A. A., & Reyad, O. (2021). A Pilot Study of Smart Agricultural Irrigation using Unmanned Aerial Vehicles and IoT-Based Cloud System. *Information Sciences Letters*, *10*(1), 131.

Lavoie, P., Pena, D., Hoarau, Y., & Laurendeau, E. (2018). Comparison of thermodynamic models for ice accretion on airfoils. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, *28*(5), 1004–1030.

Leclerc, Z. (2023). *Anti-Icing Coatings Manufactured by Cold Gas Dynamic Spray and Icephobic Performance Evaluation*. University of Ottawa, Facult of Engineering, Master's Thesis, Ottawa, Canada.

Li, Q., Chai, Z., Yao, R., Bai, T., & Zhao, H. (2024). Investigation into UAV Applications for Environmental Ice Detection and De-Icing Technology. *Drones*, *9*(1), 5.

Liu, T., Qu, K., Cai, J., & Pan, S. (2019). A three-dimensional aircraft ice accretion model based on the numerical solution of the unsteady Stefan problem. *Aerospace Science and Technology*, *93*, 105328.

Losè, L. T., Chiabrando, F., & Tonolo, F. G. (2020). Boosting the Timeliness of UAV Large Scale Mapping. Direct Georeferencing Approaches: Operational Strategies and Best Practices. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *9*(10), 578.

Lu, H., Xu, Y., Li, H., & Zhao, W. (2023). Numerical study on glaze ice accretion characteristics over time for a NACA 0012 airfoil. *Coatings*, *14*(1), 55.

McClain, S. T. (2025, Ekim 10). *Convective Heat Transfer from Realistic Ice Accretion Roughness*. https://web.ecs.baylor.edu/faculty/mcclain/

Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Li, Y., Alsharif, M. H., & Khan, M. A. (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. *Intelligent Service Robotics*, *16*(1), 109–137.

Muhammed, M., & Virk, M. S. (2022). Ice Accretion on Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicle—A Review Study. *Drones*, *6*(4), 86.

Muhammed, M., Harvey, D., Khawaja, H. A., Virk, M. S., & Momen, G. (2025). In-cloud ice accretion and performance degradation of UAV propellers in forward flight: An experimental study. *Cold Regions Science and Technology*, *239*, 104599.

Müller, N. C., Løw-Hansen, B., Borup, K. T., & Hann, R. (2023). UAV icing: Development of an ice protection system for the propeller of a small UAV. *Cold Regions Science and Technology*, *213*, 103938.

Myers, T. G. (2001). Extension to the messinger model for aircraft icing. *AIAA Journal*, *39*(2), 211.

Nishio, S., & Kato, S. (2004). Development of ice accretion and anti-icing system simulation code. *ICAS 2004-7.5. R. 2, 24th International Congress of the Aeronautical Sciences*.

Ozcer, I. (2022, Aralık 5). *CFD Methods in Aircraft Icing Simulations, AMS Series, NASA Advanced Supercomputing (NAS) Division*. https://www.nas.nasa.gov/assets/nas/pdf/ams/2022/AMS_20220929_Ozcer.pdf

Ozcer, I. A., Baruzzi, G. S., Reid, T., Habashi, W. G., Fossati, M., & Croce, G. (2011). *FENSAP-ICE: Numerical prediction of ice roughness evolution, and its effects on ice shapes* (technical report). SAE Technical Paper.

Petrosino, F., Mingione, G., Carozza, A., Gilardoni, T., & D'Agostini, G. (2011). Ice accretion model on multi-element airfoil. *Journal of Aircraft*, *48*(6), 1913–1920.

Raj, L. P., Lee, J. W., & Myong, R. S. (2018). Ice accretion and aerodynamic effects on a multi-element airfoil under SLD icing conditions. *Aerospace Science and Technology*, *85*, 320–332.

Rekuviene, R., Saeidiharzand, S., Mažeika, L., Samaitis, V., Jankauskas, A., Sadaghiani, A. K., Gharib, G., Muganlı, Z., & Koşar, A. (2024). A review on passive and active anti-icing and de-icing technologies. *Applied Thermal Engineering*, *250*, 123474.

Saggittarius, A. (2025, Kasım 5). *A comparison of many unmanned aerial vehicles*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/3b/UAV_Comparison.jpg/1024px-UAV_Comparison.jpg

Samad, A., Dhulipalla, A., & Hu, H. (2025). Comparative Study of Various Strategies for Multirotor UAV Propeller Icing Mitigation. *AIAA Journal*, *63*(7), 2892–2907.

Shein, A. (2026, Ocak 5). *Ice accretion vs. temperature*. https://code7700.com/images/weather/ice_temperatures_icing_propilot_oct_2014.png

Shin, J., Berkowitz, B., Chen, H., & Cebeci, T. (1991). Prediction of ice shapes and their effect on airfoil performance. *29th Aerospace Sciences Meeting*, 264.

Sørensen, K. L. (2016). *Autonomous Icing Protection Solution for Small Unmanned Aircraft: An Icing Detection, Anti-Icing and De-Icing Solution*. NTNU, Doctoral Thesis, Trondheim, Norway.

Sørensen, K. L., Helland, A. S., & Johansen, T. A. (2015). Carbon nanomaterial-based wing temperature control system for in-flight anti-icing and de-icing of unmanned aerial vehicles. *2015 IEEE Aerospace Conference*.

Stebbins, S., & Loth, E. (2023). Numerical Simulation of Iced Swept Wing Aerodynamics with RANS, DES, and IDDES. *Handbook of Numerical Simulation of In-Flight Icing*, 1–22.

Stoyanov, D. B., Nixon, J. D., & Sarlak, H. (2021). Analysis of derating and anti-icing strategies for wind turbines in cold climates. *Applied Energy*, *288*, 116610.

Szilder, K., & Lozowski, E. P. (2023). Numerical Simulation of In-Flight Icing via a Particle-Based Morphogenetic Method. *Handbook of Numerical Simulation of In-Flight Icing*, 323–359.

Sznajder, J., Sieradzki, A., & Stalewski, W. (2017). Determination of ice deposit shape and ice accretion rate on airfoil in atmospheric icing conditions and its effects on airfoil characteristics. *Journal of KONES*, *24*(2), 271–278.

Vedrtnam, A., Negi, H., & Kalauni, K. (2025). Materials and Energy-Centric Life Cycle Assessment for Drones: A Review. *Journal of Composites Science*, *9*(4), 169.

Wang, X. (2008). *Convective heat transfer and experimental icing aerodynamics of wind turbine blades*. University of Manitoba, Department of Mechanical and Manufacturing Engineering, Doctoral Dissertation, Winnipeg, Canada.

Wright, W. (2008). *User's Manual for LEWICE Version 3.2* (technical report Number E-15537). NASA Glenn Research Center.

Wright, W. B., & Porter, C. E. (2017). *A Revised Validation Process for Ice Accretion Codes* (technical report). NASA Glenn Research Center.

Wurst, L. (2023). *CFD icing simulations on a fixed-wing UAV engine inlet*. NTNU, Institute of Aerodynamics, Master's Thesis, Stuttgart, Germany.

Zhou, L., Yi, X., & Liu, Q. (2023). A Review of Icing Research and Development of Icing Mitigation Techniques for Fixed-Wing UAVs. *Drones*, *7*(12), 709.

Zhou, Y., Niu, S., Gao, Z., Zhou, Y., & Yang, J. (2018). Research to the influence factors on shedding processes of three-types icing. *Cold Regions Science and Technology*, *155*, 300.

ÖZGEÇMİŞ

Haji ABDULLAYEV, 2018 yılında Azerbaycan'ın Kebele bölgesindeki Ş. Eyvazov adına Yemişanlı Köy Tam Ortaokulu'nu onur derecesiyle tamamladı. 2018 yılında Hazar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı ve 2022 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans programına başladı. İyi derece İngilizce bilmektedir.