



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Hava araçları kanatlarında oluşan buzlanmayı önleme ve buz-çözme yöntemleri

## *Anti-icing and de-icing methods used for icing at wings of aircrafts*

Yazar(lar) (Author(s)): Osman AKGÜN<sup>1,2</sup>, Nimeti KALAYCI<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-8414-564X

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0001-8963-2829

**To cite to this article:** Akgün O., Kalaycı N., “Hava Araçları Kanatlarında Oluşan Buzlanmayı Önleme ve Buz-çözme Yöntemleri”, *Journal of Polytechnic*, 29(4):290404:1-12 (2026).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Akgün O., Kalaycı N., “Hava Araçları Kanatlarında Oluşan Buzlanmayı Önleme ve Buz-çözme Yöntemleri”, *Politeknik Dergisi*, 29(4):290404:1-12 (2026).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1496353

# Hava Araçları Kanatlarında Oluşan Buzlanmayı Önleme ve Buz-çözme Yöntemleri

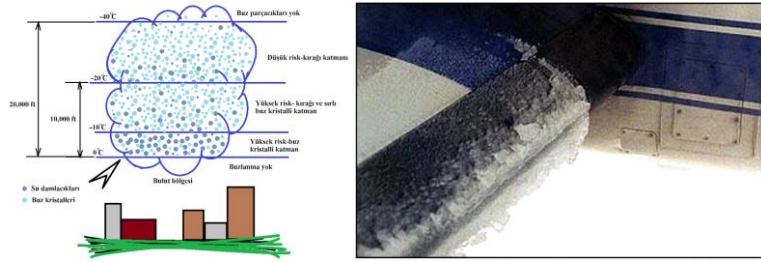
## Anti-icing and De-icing Methods used for Icing at Wings of Aircrafts

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Hava araçları kanatları (Wings of aircraft)
- ❖ Buzlanmayı önleme ve buz çözme yöntemleri (Anti-icing and de-icing methods)
- ❖ Aktif, pasif ve kompozit buz çözme yöntemleri (active, passive and composite de-icing methods)
- ❖ Isı transferinin modelleme çalışmaları (Simulation studies in heat transfer inside wings of aircraft)

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

İnsanlı veya insansız hava araçlarında uçuş esnasında kanatlardaki buz oluşumu ve önlenmesine yönelik uygulanan yöntemler anlatılmaktadır. Çalışmamız bu konuda yayınlanmış kapsamlı açıklamaları içeren ilk Türkçe makaledir. (To explain the formation of ice on the wings during flight in manned or unmanned aircraft and the methods used to prevent it, and to explain the subject with studies that have made important contributions in this field. Our study is the first Turkish study that provides comprehensive explanations on this subject).



Şekil. Yüksekliğe göre bulut içindeki su ve buz parçacıkları. /Figure. Liquid water and ice particles in a cloud depend on heights from ground.

### Amaç (Aim)

Bu çalışmada araştırmacılara detaylı bir kaynak sağlamak amaçlanmıştır. (In this study, it is aimed to provide a detailed resource for researchers).

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Goggle Akademik literatür taraması sonucunda elde edilen önemli çalışmalara yer verilmiştir. (In this study, important studies as a result of Goggle Scholar literature survey is highlighted).

### Özgünlük (Originality)

Uçuş esnasında hava araçlarının kanatlarında oluşan buzlanma ve önleme yöntemlerini inceleyen kapsamlı bir ulusal çalışma yoktur. (There is no Turkish study that examines the anti-icing and de-icing methods on wings of aircrafts during flight).

### Bulgular (Findings)

Bu konudaki çalışmalar yenilikçi ve yeşil enerji uygulamalarına dikkat edilerek her yıl artmaktadır. (Studies about anti-icing and de-icing on wings increase every year, with focus on innovative and green energy applications).

### Sonuç (Conclusion)

Aktif ve pasif buzlanmayı önleme ve çözme yöntemleri ısıl etkinlik durumlarına göre geliştirilmeye çalışılmaktadır. (Active and passive anti-icing and de-icing methods are being developed according to their thermal effectiveness).

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Hava Araçları Kanatlarında Oluşan Buzlanmayı Önleme ve Buz-çözme Yöntemleri

*Derleme Makalesi / Review Article*

Osman AKGÜN<sup>1,2</sup>, Nimeti KALAYCI<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>TÜBİTAK İLTAREN Araştırma Merkezi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 05.06.2024 ; Kabul/Accepted : 20.10.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 02.11.2024 )

## ÖZ

Günümüzde uçak buzlanması üzerine yapılan araştırmalar, önemli ve ölümcül kötü sonuçlarına sebep olması nedeniyle, kanatlarda oluşan buzlanma üzerine yoğunlaşmaktadır. Kanat buzlandığında, kanat aerodinamik özelliklerinde değişim oluşmakta ve bu değişim kazaya sebebiyet verebilecek şekilde, kaldırma kuvvetlerinde azalma ve iniş durumunda artışa neden olmaktadır. Bu nedenle, uçakta buz önleme sisteminin araştırılması uçak dizaynı araştırma ve iyileştirme konularında düşünülmesi gereken önemli bir konudur. Çalışmamızda insanlı yada insansız hava araçlarında oluşan buzlanma nedenleri ve buz önleme yöntemlerinin çeşitleri, uygulama avantaj ve dezavantajları bakımından ayrıntılı anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Buzlanmayı önleme, buzlanma çözme, uçak aerodinamiği, kanat aerodinamiği, uçuş emniyeti.

## Anti-icing and De-icing Methods used for Icing at Wings of Aircrafts

### ABSTRACT

Research on aircraft flight safety has especially focused on wing icing because it has significant and fatal consequences. When the wing is iced, the aerodynamic shape of the wing changes, and this change leads to a reduction in lift force and an increase in landing force, which can lead to an accident. Therefore, the study of the anti-icing system of aircraft is an important issue to be considered in the research and improvement of aircraft design. In our study, the causes of icing on aircraft wings (unmanned or manned), the types of icing, and the advantages and disadvantages of anti-icing methods are explained in detail.

**Keywords:** Anti-icing, de-icing, aircrafts aerodynamics, wing aerodynamics, flight safety.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde hava araçlarının uçuş güvenliği buzlanma nedeniyle tehlikeye atılmaktadır ve bu nedenle, buzlanma işlemi önemli bir meteorolojik olaydır. Uçuş güvenliğini etkileyen faktörler aşağıdaki sonuçlara sebep olurlar [1]:

- Uçuş güvenliğini azaltmak (yani uçağın maksimum kaldırma kuvvetinin ve kaldırma eğrisi eğiminin azalması ile)
- Uçuş performans ve kararlılığını bozmak (yani azalan kanat stall açısı nedeniyle yükselmede bozulma olması)
- Beklenmedik manevralara neden olmak (Buz önleme sisteminin arkasında su damlacıkları nedeniyle oluşan buzlanmanın neden olduğu yuvarlanma ve aşağı yönlü hareket)
- Kontrol etkinliğini azaltmak (kuyruktaki buzlanma nedeniyle artan yapışma kuvveti ve akabinde hareket kabiliyetinde zorluk)

Sıralanan bu etkiler geçmiş on yılda pek çok araştırmacı tarafından incelenmiş ve hala çalışılmaktadır. Havacılık alanında yukarıda bahsedilen olumsuz etkiler nedeniyle uçakların anti-buzlanma ve buz çözme yöntemleri

yaklaşık yarım asırdır önemli bir araştırma konusu olmuştur.

Buz topaklanmasının erimesi katı-sıvı faz değişimi işlemidir. Bu işlemde buz ısıyı absorbe eder ve ısıyı sıvı suya transfer eder. Bu süreç Stefan problemi olarak adlandırılır [2, 3]. Böylece ısı iletim denklemleri, sistemin çözümü için kullanılacak denklem olarak düşünülebilir. Bu denklemlerin çözümünde bazı analitik yöntemler veya çeşitli sayısal modelleme yöntemleri kullanılmaktadır.

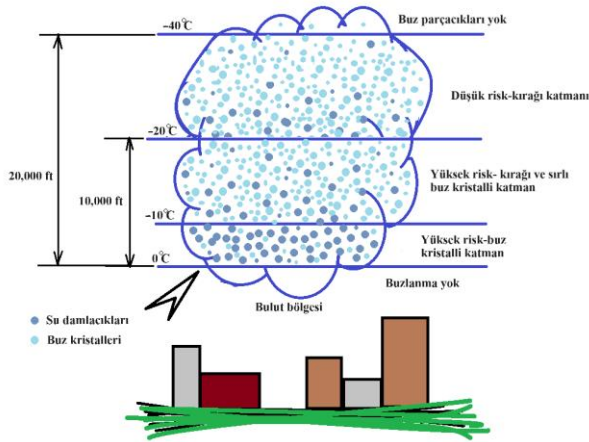
Bu çalışmanın amacı, insanlı veya insansız hava araçlarında uçuş esnasında kanatlarda oluşan buz oluşumu ve önlenmesine yönelik uygulanan yöntemleri açıklamak ve bu alanda önemli katkı sağlamış çalışmalar ile konuyu anlatmaktır. Çalışmamız bu konuda yayınlanmış kapsamlı açıklamaları içeren ilk Türkçe makaledir.

### 2. BUZLANMA KOŞULLARI (ICING CONDITIONS)

Bir uçak aşırı soğutulmuş su damlacıklarından oluşan bulut içinden geçerken, su damlacıkları uçak yüzeyinde birikir. Bu duruma sebep olan metalürjik hava olayları ve buzlanma tipleri Çizelge 1'de ve bulut içindeki

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta: nimetidoner@gazi.edu.tr

yükseklığe bağlı buz-su parçacıklarının durumları Şekil 1'de gösterilmiştir. Buzlanma önleme yöntemlerinin çeşitleri ve uygulama şekilleri de Şekil 2'de verilmiştir.



**Şekil 1.** Yüksekliğe göre bulut içindeki su ve buz parçacıkları. (Liquid water and ice particles in a cloud depend on heights from ground).

Bir uçak uçuş esnasında 0°C ile -20°C sıcaklıklar arasında aşırı soğutulmuş su damlacıkları içeren bir bulut tabakası ile karşılaştığında, su damlacıkları uçağın gövdesi üzerinde buz formunda toplanır ve bu durum uçağın aerodinamik karakteristiğini etkileyerek, uçuş güvenliğini tehlikeye sokabilmektedir [5].

Buz oluşumu genellikle uçağın ön yüzünde oluşur iken kanatlar, rotorlar, motorlar ve diğer cihazları da içeren kısımlar da daha çok etkilenmektedir [6, 7]. Son yıllarda oluşan uçak kazalarının sebeplerinin analizlerine göre, uçak buzlanması uçak kazalarının birincil dış sebebidir. Bu nedenle bazı önemli uçak projelerinde özellikle uçak buzlanmasını önleyici çalışmalar yapılmaktadır [8-12].

### 3. BUZLANMA ÖNLEME ve ÇÖZME YÖNTEMLERİ (ANTI-ICING and DE-ICING METHODS)

Modern uçak teknolojisinin hızlı gelişimi ile aşırı soğutulmuş buz parçacıklarını içeren bulut tabakasındaki uçağın uçuş emniyetini sağlamak amacıyla, araştırmacılar hem nümerik modelleme çalışmaları hem

de kanat üzerindeki buzlanmayı, rüzgar tüneline deneysel olarak analiz etmişler ve bazı önemli buz önleme sistemlerini geliştirmişlerdir [16, 17]. Yapısal yöntemlerine göre, buz önleme sistemleri üç ana grupta sınıflandırılabilir. Bunlar:

- Aktif buz önleme ve buz çözme sistemi (Active Anti-icing and De-icing (AAD) system)
- Pasif buz önleme ve buz çözme sistemi (Passive Anti-icing and De-icing (PAD) system)
- Kompozit buz önleme ve buz çözme sistemi (Composite Anti-icing and De-icing (CAD) system)

Uçaktaki buzlanmayı önleme ve buz çözme sistemleri için mevcut teknolojiler; elektriksel pulse çözücüler [18], düşük frekanslı piezoelektrik çözücüler [19], pnömatik çözücüler [20], ultrasonik çözücüler [21, 22], sıcak hava ile buz önleme ve çözme [23], elektriksel-ısıl buz önleme ve çözme [24, 25] ile hidrofobik malzemelerin kullanılması gibi buzlanmanın önlenmesi [26] için bazı sistemleri içermektedir.

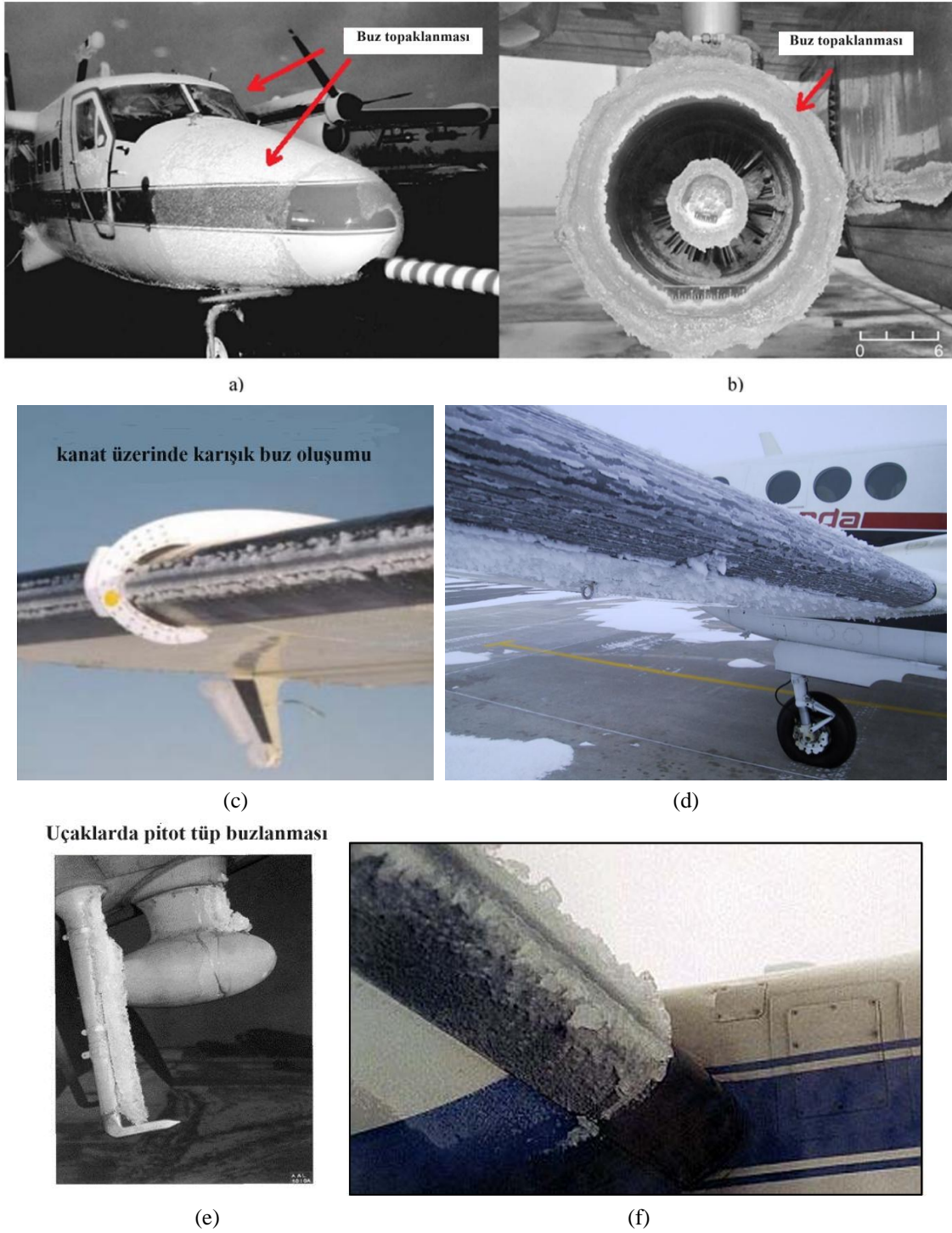
Kanat üzerindeki buz oluşumunu tanımlamak için Weber sayısı kullanılır. Weber sayısı ( $We$ ) aşağıda Eşitlik (1)'de verilmektedir [5].

$$We = \frac{\rho U^2 L}{\sigma} \quad (1)$$

Burada  $\rho$  havanın yoğunluğunu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\sigma$  yüzey gerilim kuvvetini (N) ve  $L$  karakteristik uzunluğu (m) göstermektedir. Woldman ve Hu [5] yüksek hızlı kamera sistemi ile NACA 0012 kanat yüzeyi üzerinde oluşan buz topaklanmasını parçacık düzeyinde hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle analiz etmişlerdir. Deneyler hava sıcaklığı -8 °C ve hava akış hızı 20, 40 ve 60 m/s hızlarda ve buzlanma oluşumu -5 derecelik bir hücum açısı ile gözlemlenmiştir. Bu açıda kanadın üzerinde su filminin geri akışı ve küçük buz sarkıtları (rivulet) oluşumunun en belirgin olduğu yer olan kanadın ön tarafında buz oluşumunu gözlemlemek için önemlidir. Bu çalışma ile küçük buz sarkıtlarının belirtilen uçuş şartlarında oluşum süreleri ve buz topaklanma alanları tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, artan rüzgâr hızıyla küçük buz sarkıt alanlarının azaldığı ve kanat üzerinde suyun geri akış hızının arttığı görülmüştür.

**Çizelge 1.** Uçak üzerinde buzlanma tipleri, metalürjik hava koşulları ve oluşum yerleri (Icing types on aircraft, meteorological causes and icing locations) [4]

Buz tipi	Özellikleri	Oluştugu bölge
Yumuşak kırağı	Büyük parçacıklı/ pürüzlü yüzeyli/ düşük yapışkanlık	Düşük uçuş hızı/ Park halindeki bir uçak yüzeyi
Donmuş	Kaba yüzeyli/ mat/ düşük yoğunluk ve sertlikli	Uçağın park edilmesinde yüksek ısı yalıtım yüzeyleri
Kırağı	Beyaz opak yüzeyli/ kaba yama şekilli/ düşük yoğunluk ve sertlikli	Uçak uçarken rüzgara karşı olan yüzeyler
Buz	Pürüzsüz yüzeyli/ şeffaf/ kapalı yapı/ yavaş donma	Kanat/ kanat uçları
Karışık buz	Kaba yüzeyli/ şekilsiz/ katı	Uçak uçarken rüzgara karşı olan yüzeyler
Kırağı buz	İnce kalınlıkta	Kokpitin rüzgar kalkanı/ kanat

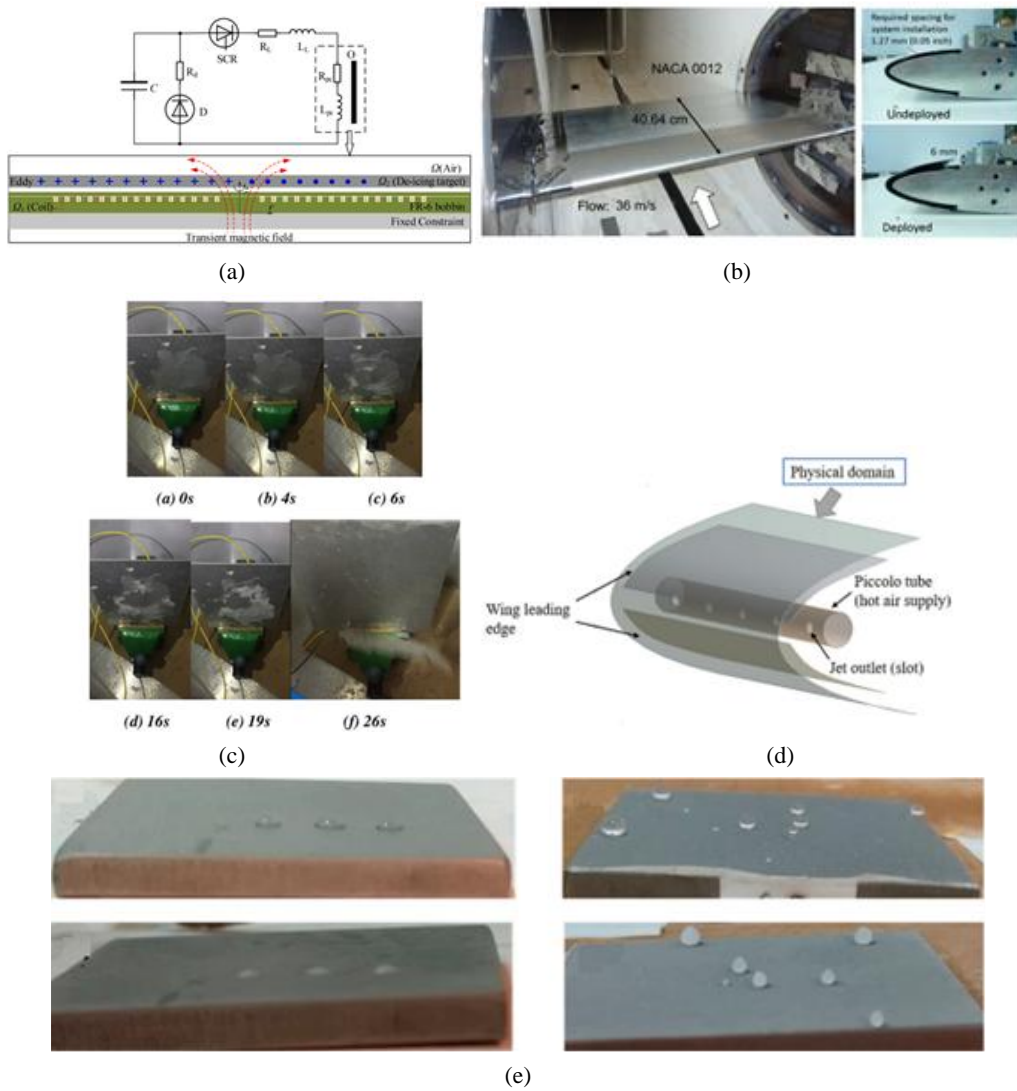


**Şekil 2.** a) Uçak burun ve rüzgar koruyucuda buzlanma ve b) motor girişinde buzlanma [13], c) kanat uçlarında buzlanma [14], (d) tüm kanat yüzeyde buzlanma, (e) uçak pitot tüp buzlanma ve (f) kanatta buz topaklanması [15] (Ice accretion on (a) windshield and nose (b) engine inlet, (c) mixed ice formation on wing leading edge, (d) ice accumulation on the wing, (e) ice accretion on pitot tube and (f) glaze ice on leading edge)

### 3.1. Aktif Buz Önleme ve Buz Çözme Sistemleri (Active Anti-Icing and De-Icing Methods)

Uçağın güvenli uçuşu amacıyla dış sistemlerden enerji alan ve ısıtıcı metotlar kullanılan bir önlem ve çözüm yöntemidir. Bu sistemde buz eritmek ve buzlanmayı

önlemek için yüzey sıcaklıkları ısı kullanılarak yükseltilir. Isı motordaki sıcak havadan veya kanat yüzeyleri altına gömülü olan ısıtıcılardan alınır. Bu yöntem buzlanma şartlarında uçuş güvenliğini sağlar iken enerji tüketimi bakımından önemli bir tartışma konusudur.



**Şekil 3.** Buzlanma önleme yöntemleri: (a) elektro-manyetik pulse [18], (b) pnömatik metod [20], (c) ultrasonik metod [21], (d) sıcak hava ile önleme [23] ve (e) hidrofobik malzeme ile kaplama metodu [26] (Anti icing methods: (a) electro-magnetic pulse, (b) pneumatic method, (c) ultrasonic method, (d) hot-air anti-icing and (e) cover with hydrophobic material method)

Papadakis vd. [27] bir iş jeti kanat ölçülerinde hazırlanmış alüminyum 6061 malzemeli numunenin yüzey sıcaklığı, çevre havası, hava hızı ve yapışma (attach) açısının enerji tüketimi üzerine etkilerini deneysel olarak ayrıntılı incelemişlerdir. İki boyutlu bir kanat modelinin üzerine 76 yüzey basınç noktası ve 205 sıcaklık ve basınç sensörleri kullanılarak kanat-hava sistem performansını iki piccolo (küçük delikli) akış sistemi kullanılarak deneysel incelemişlerdir. Bu çalışmaları ile özellikle simülasyon modellerinin karşılaştırabileceği deneysel veriler elde edilmiştir. Pourbagian ve Habashi [28, 29] yaptıkları nümerik modelleme çalışmalarında dış hava akışını FENSAP-ICE modülü ile su akışı ve buzlanmayı ICE3 modülü ile ve katı yüzeylerdeki ısı transferini CHT3D modülü ile zamana bağlı sistem ve sınır şartlarının uygulandığı kanat sistemi için çözümlenmişler ve böylece uçuş esnasındaki enerji tüketimini parametrik olarak analiz etmişlerdir.

Mekanik kuvvet uygulayarak gerçekleşen aktif buz önleme ve buz çözme sistemlerinde en yaygın kullanılan metod pnömatik buz çözme sistemidir.

Buz önleme sistemlerinin karmaşık olması nedeniyle, basit, yüksek verimli, çevreye duyarlı, düşük enerji tüketimli, çok fonksiyonlu ve istikrarlı bir uçak buz önleme ve buz çözme sistemin geliştirilmesi özellikle önem kazanmaktadır.

### 3.2. Pasif Buz Önleme ve Buz Çözme Sistemleri (Passive Anti-Icing and De-Icing Methods)

Bu sistemde uçak yüzeyinin hidrofobisi değiştirilerek yüzeyin üzerindeki buz yapışkanlığı azaltılmış olur ya da buz tabakasını kırmak için şekil bellekli alaşımlar kullanılır. Li vd. [30] kendi kendini temizleyen ve buzlanmayı önleyen süper hidrofobik kompozit membranın özellikleri üzerine çalıştılar. Farklı

sıcaklıklar ( $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $20$  ve  $40^{\circ}\text{C}$ ) ve farklı yüzeylerde zamana bağlı olarak yüzeye yapışma özelliklerini incelediler. Deneysel çalışma sonuçlarına göre  $\text{ZuO/SiO}_2$  içerikli kompozit membranın buzlanmayı önleme performansında güzel sonuçlar verdiği görülmüştür.

Xu vd. [31] hazırladıkları hidrofobi örneklerini kumlu kağıdın üzerine düz bir şekilde yerleştirdiler ve 100 gramlık bir numunenin bu kumlu kağıda yapışmaya karşı direncini test ettiler. Bu testlerin sonuçlarına göre, ultraviyole güneş ışınlarına dayanımlarının yüksek olduğunu tespit ettiler.

Hidrofobik yüzey anti-buzlanma ve buz çözme işlemini gerçekleştirmek için buzun yapışmasını önemli derecede azaltır. Ancak, buzlanma yapışmasını etkileyen faktörler sadece çevresel faktörler değil yüzey pürüzlülüğü ve buzlanma taşıyıcılığının özellikleri gibi iç faktörler de hidrofobik yüzeylerin dayanıklılık çalışması gibi yüzey mikro yapılarının kararsızlıkları nedeniyle özellikle önemlidir. Hidrofobik kaplama uçak yüzeyi üzerinde buzlanmayı engellemek için uçak yüzeyi ile buz arasında bir yağlayıcı olarak işlev görür. Yin vd. [32] dayanıklı bir yağlama etkisini elde etmek için  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nano parçacıklarının kullanıldığı ve böylece oluşan foto-termal etkiyi kullanarak gözenekli yüzey üzerine pürüzsüz bir şekilde uygulayarak, anti-buzlanma ve buz çözme işlevli kendi kendine yağlayıcılığı olan bir kaplama hazırlamış ve uygulamışlardır. Ancak buharlaşma ya da tüketim ile yağlayıcı tükenirse, yağlı gözenekli hidrofobik kaplamanın kullanım süresi kısalmaktadır. Dayanıklılığı iyileştirmek için Wang ve arkadaşları [22] katı bir organik jel malzemeli yenilenebilir alkan yüzey tabakasının uygulanabilirliğini göstermişlerdir. Bu kaplama ile 20 anti-buzlanma ve buz çözme çevrimi ya da kumlu kağıt yıkama çevrimi gerçekleştirilmiştir. Böylece iyi bir kalitede anti-buzlanma ve buz çözme özelliği ile mükemmel dayanıklılık özelliğine sahip olduğu testler ile görülmüştür.

Pasif anti-buzlanma ve buz önleme sistemi, buz çözme işlemi esnasında ilave enerji tüketimi gerektirmeden kimyasal ya da fiziksel özellikler kullanılarak buzlanmayı önler. Hidrofobik malzemeler ile kaplı uçak yüzeyindeki su damlacıkları dış kuvvetlerin etkisi altında kolayca yuvarlanır. Böylece donmaya başlamadan önce suyun akışı büyük çoğunlukla azalır ve uçak yüzeyi üzerinde buzlanma oluşumu kısıtlanmış olur. Ancak, hidrofobik kaplamalı yüzey üzerinde donma oluşup arttığında, hidrofobik kaplamanın anti-buzlanma performansındaki ciddi azalmanın sonucu olarak buzun yapışma özelliği büyük çoğunlukla artacaktır. Bununla birlikte, pasif anti-buzlanma ve buz önleme sistemi genellikle deneysel araştırma aşamasındadır ve henüz bir uçak üzerinde uygulanmamıştır. Hidrofobik kaplamanın uçak yüksek hızda uçarken bazı parçacıklarının uçuş etkisi altında birbirleriyle çarpışmalarının etkisiyle zarar göreceği düşünülmektedir.

### 3.3. Kompozit Buz Önleme ve Buz Çözme Sistemleri (Composite Anti-Icing and De-Icing Methods)

Hidrofobik malzemeler düşük enerji tüketimleri nedeniyle ideal anti buzlanma teknolojisi olarak adlandırılırlar. Çeşitli hidrofobik malzemeler geliştirilmesine rağmen, kaplama malzemelerinden hiç biri uçak sanayi uygulamaları için çok uygun değildir [33]. Bu sebeple, hidrofobi malzemelerinin pasif anti buzlanma ve buz önleme işlemlerinde kullanımında, kompozit malzemeler elektriksel ısıtma ve dışarıdan az miktarda enerji kullanarak uygulanmaları sebebiyle, yeni bir anti-buzlanma ve buz önleme sistemi olarak kullanılabilirler. Böylece ısıl metodun güç tüketiminin %30–%70'ini ısıl metot ile hidrofobik kaplamanın birleşimi için kullanılır ve güç tüketimi önemli derecede azalmış olur.

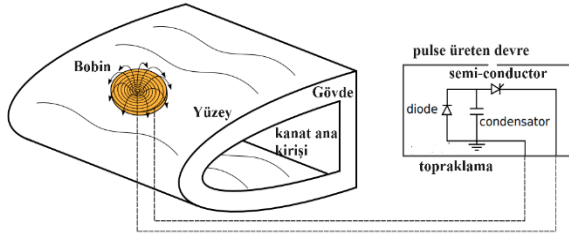
Aktif ve Pasif buzlanma önleme ve buz çözme sistemleriyle karşılaştırıldığında, kompozit anti-buzlanma ve buz önleme sisteminin yeşil (çevre ile dost), yüksek verimlilikte ve hızlı cevap veren sistemler olması sebebiyle bazı avantajlara sahip olduğu görülür. Ancak, kompozit anti-buzlanma ve buz önleme sisteminin tüm özelliklerini etkileyen bazı önemli parametreler nedeniyle kaplamanın pratik uygulamalarının daha fazla çalışılması gerekmektedir [4].

### 3.4. Elektriksel Pulse ile Buz Önleme ve Buz Çözme (Electrical-Pulse Anti-Icing and De-Icing Method)

Elektriksel pulse ile buz çözme teknolojisi temelde Dr. Levin [34] tarafından 1972'de yayınlanan elektrik pulse sistemine benzer olarak tasarlanmıştır. Temel prensip bobinde güçlü bir manyetik alan oluşturmak ve buzlara kırmak ve düşürmek için kanat yüzeyine kısa süreli ve yüksek genlikli bir mekanik kuvvet uygulamaya dayanır. Bu sistemde bobin ateşlemesi için kapasitör kullanılmaktadır. Elektriksel pulse ile buz çözmenin büyük avantajları vardır. Bu yöntemde, buz çözümü için gerekli enerji az miktardadır ve motorun parametrelerine negatif bir etkisi yoktur. Ayrıca buz çözme için hava sıcaklık aralığı  $-50^{\circ}\text{C}$  ye kadar genişletilebilir ve sistem kolayca yerde test edilebilmektedir.

Endres vd. [35] bobinler ve kanat yüzeyi çevresinde zamana göre değişen manyetik alanları üretmek için uçak kanadının eğimli kısmında alüminyum yüzeyin altına yerleştirilmiş kısa ve yüksek akım pulselerini bobinlere uyguladılar. Sommerwerk ve arkadaşları [36] Şekil 4'de gösterilen elektriksel pulse yöntemi ile buz önleme ve çözme deneylerini, hava şartları  $-10^{\circ}\text{C}$  ile  $-20^{\circ}\text{C}$  arasında gerçekleştirmişler ve elektriksel pulse buz eritme sistemi çalışmaya başladığında kanat uçlarındaki buz tabakasının hemen düştüğünü gözlemlemişlerdir. Bu çözümün güç tüketiminin mevcut buz önleme sisteminin güç tüketiminden daha az olduğu Tian vd. [37] tarafından tespit edilmiştir. Sommerwerk vd. ikinci çalışmalarında [38], buzlanma rüzgâr tüneli deneylerinde ilk yedi pulsedan sonra kanat üzerindeki buz miktarının hızlıca eridiğini, başlangıçtaki buz miktarının %5'inin kanat üzerinde kaldığını göstermişlerdir. Elektriksel pulse ile buzlanmayı önlemek için deneysel ve nümerik

çalışmalar, Zhang ve arkadaşları [39] tarafından yapılmış ve bobin yüzeyine etki eden akım kuvvetinin etkisiyle farklı büyüklüklerde elektrik akımları elde edilmiştir. Bu çalışmada, pulseler dışarıdaki bir elektrik devresinden üretilmektedir. Böylece kanatlardaki çift bobinlerin elektrik pulse buz önleme sistemi etkilerini geliştirdiği ve güvenli-dayanıklı kanat uç yapısının elde edildiği görülmektedir. Buz önlemek için gerekli zaman 100 µs olarak ölçülmüştür [40].



Şekil 4. Elektriksel pulse ile buz çözme ve önleme metodu (Electrical-pulse anti/deicing method, [36])

Başka bir deneysel ve modelleme çalışmasında kuru buz kullanılmış ve kuru buz gözenekliliğine bağlı olarak toplam buz boşluğu şeklinde yeni bir parametre tanımlanmıştır. Bu ifadelerde,  $P$  kuru buz gözenekliliği,  $m_{buz}$  buz tabakasındaki toplam buz kütlesi,  $\rho_{buz}$  paket buzun yoğunluğu olmak üzere

$$P = \frac{V_{boşluk}}{V_{karışım}} = \frac{V_{boşluk}}{V_{buz} + V_{boşluk}} \quad (2)$$

$$V_{boşluk} = \left[ \frac{P}{1-P} \right] V_{buz} = \left[ \frac{P}{1-P} \right] \frac{m_{buz}}{\rho_{buz}} \quad (3)$$

Eşitlik (2) ve Eşitlik (3) ifadeleri yazılabilir [41].

### 3.5. Ultrasonik Buz Önleme ve Buz Çözme Yöntemi (Ultrasonic Anti-Icing and De-Icing Method)

Ultrasonik buz önleme metodu, ısıl etki ve ses dalgalarının mekaniksel etkilerini kullanır. Bir çalışmada 5–15 Mhz'lik ses hızlarının uygulandığı bir deney düzeneğinde kırığı ve parlak buz oluşumunda buz çözümü için gereken akustik hız değerlerini ölçmüşlerdir [42]. Akustik hız formülü  $U = 2h/\Delta t$  şeklinde ifade edilmektedir [43]. Burada  $U$  buz tabakasındaki ses hızı,  $h$  buzun kalınlığı ve  $\Delta t$  buzun üst ve alt iki arayüzü arasında yansıyan ekolar arasındaki zaman değeri olarak tanımlanmaktadır. Bu deneyler ile kırığı buzu eritmek için gereken akustik hızın parlak buzun akustik hızından bir miktar daha hızlı olduğu tespit edilmiştir. Buzun yoğunluğunun buzun yapısal değişiminden çok etkilenmediği sonucu ile, buzdaki ses hızının sıcaklığa bağlı olduğu ve düşük sıcaklıkta daha hızlı bir buz hızı oluştuğu görülmüştür [44].

### 3.6. Pnömatik Buz Önleme

(Pneumatic Anti-Icing Method)

Pnömatik buz çözme yöntemi uçaklara uygulanan ilk mekanik buz çözme ve önleme yöntemidir. Çalışma prensibi kanat yüzeylerine açılabilir tüplerden oluşan aerodinamik bir katmanın kaplamasına dayanır. Buz çözme gerekli olduğunda, sistem açılabilir tüpleri sıkıştırılmış hava ile şişirir ve buz tabakasına bir kuvvet uygulanır. Bu sistemde açılabilir tüp, basınç düzenleyici ve vakum kaynağı önemli parçalardır. Basınç düzenleyici sıkıştırılmış hava giriş miktarını kontrol eder böylece açılabilir tüplerin genişleme derecesi farklı buz kalınlıklarına göre ayarlanır. Vakum kaynağı ise genişleme tüpünün uçağın aerodinamik yapısına mümkün olduğu kadar az etkileyecek ve yüzeyinde buzlanma olmadan pürüzsüz bir şekilde, kontrollü geri çekilmesini sağlamaktadır. Kanat üzerine aerodinamik kaplamanın yapılması, uçağın uçuş esnasında aerodinamik karakteristiklerinin ciddi şekilde etkilenmesini ve bu nedenle kanat şeklinin değişmesini sağlar. Bu konu ilk deneysel olarak Bowden [45] tarafından çalışılmıştır. Broeren vd. [46] NACA3012 kanat modelini rüzgâr tüneli deney düzeneğinde döngüsel aerodinamik buz önleme sistemini incelemek için kullanmışlardır. Bu çalışma ile döngü esnasında çatlaklar arasındaki buz oluşumunun aerodinamik performansta önemli bir azalmaya sebep olduğu ve maksimum kaldırma katsayısının %60 azaldığı tespit edilmiştir. Pnömatik buz çözme sisteminde, çevrim döngüsü her zaman için aşılması gereken, zor bir konu olmuştur. Sıkıştırılmış hava kaynağındaki nem pnömatik başlıkta birikir ve hortum performansında ciddi bir etkiye sebep olur.

### 3.7. Elektro-Isıl Buz Önleme ve Buz Çözme (Electro-Thermal Anti-Icing And De-Icing Method)

Elektro-ısııl buz önleme ve buz çözme sistemi için bir elektrikli ısıtıcı gereklidir. Elektrik enerjisi ısıl enerjiye dönüştürülür ve bu ısıl enerji kanat yüzeyine transfer edilir. Sürekli ısıtma sayesinde kanat yüzeyi ile buz tabakası arasındaki yapışma azaldığından, alttaki buz tabakası erir. Böylece merkezi kuvvet ya da aerodinamik kuvvetin etkisiyle buz tabakası kanattan uzaklaştırılmış olur. Bu yöntem uçaklarda uygulanan ve bilinen en eski buz önleme ve buz çözme yöntemlerinden birisidir. Bu sistem çok elektrik harcadığından, sistemin gücü uçağın ağırlığını oldukça etkilemektedir.

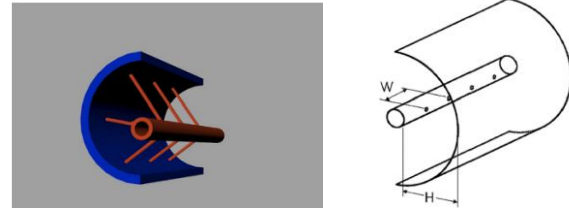
Elektro-ısııl buz önleme ve buz çözme yöntemi 36 inch uzunluğu ve 6 feet açıklığı sahip bir NACA0012 kanat modelinde onbeş farklı çevre durumuna göre deneysel olarak test edilmiş ve deneysel sonuçlar NASA'nın ANTICE programı ile karşılaştırılmıştır [47]. Böylece bu programın buharlaşma durumunda yüzey sıcaklıklarını doğru hesapladığı ancak ısıtılmış bölgelerdeki geriye doğru akışı tam olarak dikkate alamadığı görülmüştür. Al-Khalil ve arkadaşları benzer bir çalışmalarında, bir iş jeti kanadını aşırı ıslak hava şartlarında ısıl gücün yeterliliğini test etmişlerdir [48].

Elektro-ısl buz önleme teknolojisi uzun yıllar boyunca üzerinde araştırmalar yapılmış bir yöntem olup, son dönemde sadece Boeing 787 gibi sivil uçaklarda bu yöntem uygulanmaktadır. Bu en son modelinde Boeing 787 daha önceden uygulanan tasarım fikirlerini değiştirmiştir. Motor hava besleme sistemi iptal edilerek çoklu elektrik çevresel kontrol sistemi uygulanmıştır. Böylece buz önleme sistemi esnasında uçağın kararlılığı artırılmıştır. Ayrıca Boeing 787 üzerindeki elektrikli ısıtma ile buz önleme ve buz çözme sisteminde kısmi ısıtma pedleri kullanılır ve uçağın aerodinamik kararlılığını devam ettirmek için uçak kanatlarının her iki tarafında simetrik olarak akıllı kontrol sistemleri kullanılmıştır. Hatta uçağın bir tarafındaki kanadın ısıtma pedi arızalanırsa, uçağın buzlu hava koşullarında uçuş emniyetini devam ettirebilmek için, sistem otomatik olarak diğer kanadın elektriğini keser. Bilinen elektro-ısl buz önleme ve buz çözme yöntemlerinde, buz topaklanmasını önlemenin elektriksel ısıtıcı elemanı olarak metal direnç kablosu kullanılır. Metal ısıtıcı elemanlar düşük ısıtma etkinliği ve düzensiz ısı dağılımı gibi bazı kusurlara sahiptirler. Uçak tasarım şartlarının sınırlamaları nedeniyle güç yükü mümkün olduğu kadar küçük olmak zorundadır. Pourbagian vd. [49] ıslak ve buharlaşma durumlarında, kanat elektro-ısl buz önleme ve buz çözme yönteminin çeşitli kısıtları için optimizasyon çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada, on örnek durum dokuz farklı sınır şartlarında, akışkan ve katı yüzeyler arasındaki birleşik ısı transferinin çözümüne göre değerlendirilmiştir. İnsansız hava araçlarında (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) bu yöntemin kullanıldığı ve bu sistem ile buzlanma rüzgar tüneline, düşük Reynolds sayılarına sahip hava akışı ve sıfır attak açısı durumunda yapılan deneysel çalışmalarda, maksimum buzlanma topaklanmasının  $-10^{\circ}\text{C}$ 'de olduğu görülmüştür [50]. Son yıllardaki yüksek teknolojik ürün ve üretim yöntemleri sayesinde, bazı yeni uygulamalar bu konuda test edilmektedir. Vertuccio vd. uçaklarda buz çözme operasyonu için grafit temelli film ısıtıcı uygulaması üzerine deneysel çalışmaları yapmışlar ve sıcaklık analizlerini değerlendirmişlerdir [51]. Yazarlar %60 ilave grafit katkılı film ile yüksek elektriksel ve ısl iletkenlik performansı elde etmişler ve böylece buzlanmayı önlemek için düşük elektriksel güç uygulandığını tespit etmişlerdir.

### 3.8. Sıcak Hava ile Buz Önleme ve Buz Çözme (Hot Air Anti-Icing and De-Icing Method)

Sıcak hava ile buz önleme ve buz çözme sisteminde, boru hattı vasıtasıyla hava, flüt şeklindeki bir borudan buz önleme kısımlarının uçlarına dağıtılır. Motordan alınan havayı kullanan, bu tarz aktif buz önleme ve çözme yöntemi, uçak yakıt tüketiminde önemli rol oynamaktadır. Enerji tüketimini azaltmaya yönelik olarak, basınç düzenleyici bir valfin kullanıldığı sistem, Zilio ve Patricelli [52] tarafından hem deneysel hem de dinamik modelleme çalışması yapılarak test edilmiştir. Motordan beslenen havanın  $25-650^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda ve motor basıncının 0.2'den 1değerleri arasında olması

durumunda, uçağın hız ve irtifa gibi performans değerlerine göre değerlendirilmiştir. Böylece uygulanan sistem ile bir uçağın rutin uçuşunda kalkış ve iniş esnasında %30'luk bir enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir. Sıcak hava ile buz önleme ve buz çözme sisteminin genel şematik resmi ile geometrik özellikleri Şekil 5'de görülmektedir. Aynı zamanda "piccola tube" sistemi olarak da adlandırılan flüt şeklindeki boru, çok küçük bir delik vasıtasıyla yüzeyin uç kısımlarını ısıtabilmektedir [53].



Şekil 5. (a) Sıcak hava ile buz önleme sistemi besleme hattının şematik gösterimi (hot-air impingement system), (b) hava jeti uygulamasındaki geometrik parametreler (parameters of the hot-air impingement system) (W: iki jet arasındaki mesafe (jet-to-jet spacing), H: jet ile uygulanan yüzey arasındaki mesafe (jet-to-impingement surface distance) ve d: jet çapı (jet diameter), [53]).

Salcedo vd. bu çalışmalarında konkav yüzeylere uygulanan hava jeti Mach sayısının ısı transferi üzerine etkisini ayrıntılı incelemişlerdir [53]. Düşük  $H/d$  olduğunda, daha büyük Nusselt Sayısı değerleri olduğundan, konkav bölge içinde sıcaklık alanı daha efektif bir ısıtma işlemi gerçekleştirmektedir. Yine bu çalışmada, 96 farklı test durumu birlikte değerlendirilerek konkav yüzeylerdeki sıcak hava jetleri için parametrik bir ortalama Nusselt sayısı tanımlanmıştır.

### 4. MODELLEME ÇALIŞMALARI (MODELING STUDIES)

Havacılık alanında uçak kanatlarındaki buzlanma üzerine ilk nümerik çalışma 1972 yılında Stallabrass tarafından elektro-ısl alıcının modellenmesi olarak yapılmıştır [54]. Daha sonra bir boyutlu [55, 56] ve iki boyutlu [57, 58] analizler şeklinde incelenmiştir. Burada Wright vd. tarafından yapılan çalışmada, iki boyutlu zamana bağlı ısı iletimi denklemleri ve elektro-ısl ped kullanılan bir uçak kanadındaki buz topaklanması, buz kalınlığı ve buz erime durumları dikkate alınarak analizler yapılmıştır [58]. Böylece elektro-ısl pedlerin uzunluğunun uygulama boşluğuna oranının 2.5'dan daha az olması gerektiği tespit edilmiştir. Wright vd. [59] tarafından yapılan ikinci çalışmada, havada buz parçacıklarının geliş açısı ve yapışma/birikme özellikleri ile ilgili matematiksel denklemler ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bahsedilen her iki çalışmada, Alternating Direction Implicit Method kullanılarak ve buz ile su arasındaki faz değişimi de iteratif hesaplanarak iki buzlanma durumu değerlendirilmiştir. Böylece, analizler ile doğruluğu

ispatlanan program NASA'nın akış programı ile entegre edilmiştir. Üç boyutlu anti buzlanma problemi Yaslik ve arkadaşları tarafından 1992'de zamana bağlı olarak Douglas sonlu fark metodu kullanılarak analiz edilmiştir [60]. Bu çalışmada, uçak kanadının altına yerleştirilmiş elektro-ısıtıcının bulunduğu ve üzeri buz tabakası ile kaplı hacim, farklı ısıtıcı güçleri (30 ve 60 W/inc<sup>2</sup>) ve  $x$ - $y$  koordinatlarına göre sıcaklık değişimleri bakımından incelenmiş ve bazı deneysel veriler ile buz erime süresi bakımından karşılaştırılmıştır. Aktif buz önleme yöntemini kullanarak yüzey sıcaklığı ve buzun geri akışını üç boyutlu nümerik modelleme ile inceleyen Zhou vd. sıvı su içeriği ve Mach sayısı etkisinin dış akış sıcaklığının etkisinden daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir [61]. Hem iki boyutlu hem de üç boyutlu buzlanma ve buz tabakasının oluşumunu incelemek için, NACA0012 (iki boyutlu analizde) ve GLC-305 (üç boyutlu modellemede) kanatları kullanılarak, buz miktarı ve dış ortam sıcaklıkları farklı değerler alınarak, analizler yapılmıştır [62]. Bu çalışmaya göre, üç boyutlu bir kontrol hacimdeki buz miktarı aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir.

$$V_{buz} = LWC \cdot v_{\infty} \cdot \beta \cdot A' \cdot \Delta T / \rho_i \quad (4)$$

Burada  $A'$  üç boyutlu kontrol hacminde buz parçacıklarının çarpma alanını göstermektedir.

Anti buzlanma durum tespiti, çeşitleri, deneysel çalışmalara dayanan veriler ve uçuş üzerindeki olumsuz etkileri konusunda yapay sinir ağları (NN), En küçük karaler algoritması, Kalman filtre (KF), birleşik NN/KF ve  $H_{\infty}$  parametre tanıma teknikleri kullanılarak kanatçık üzerindeki buz kalınlığını tespit etme konusunda ayrıntılı bir derleme çalışması Caliskan ve Hajiyev tarafından yapılmıştır [63]. Bu analizlerde A340-300 ile F16 uçak modellerinin buzlanma önleme ve kontrol deneysel verileri karşılaştırma için kullanılmıştır.  $H_{\infty}$  parametre tanıma tekniği ile hızlı ve doğru bir hesaplama yapılabildiği görülmüştür. Anti-buzlanma sistemi olan ve olmayan kanatlar üzerindeki birikmiş buzların doğal erime davranışını anlamak için kanatçık yüzeyinin ısı transfer katsayısı ve Mach sayısı etkileri, Cao ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [64]. Sistem zamana bağlı olarak sıcaklık ve entalpi temelli sayısal modelleme şeklinde analiz edilmiştir. Ortam sıcaklığı 10°C ve buzlanma acısı 4 derece iken iki tip buzlanma durumu, Mach sayısının 0.2 ve 0.3 olması durumuna göre analizler yapılmıştır. Buz erime alanları farklı Mach sayıları ile değişmektedir. Büyük Mach sayısında büyük buz erime alanları oluşmakta ve daha da önemlisi buz şekil değişimleri görülmektedir.

İlk olarak buz-su şeklindeki iki fazlı problemin matematiksel ifadesi olan, daha sonrasında katı-sıvı malzemelerin etkileşimde olduğu ara yüzeylerin ısı transferi problemi şeklinde tanımlanan Stefan problemi, havacılık uygulamaları için Myers [65] tarafından genişletilmiş Messinger buz modeli ile çözülmüştür. Bu çalışmada, Myers buz-su maddesini buzun kırağı halinden parlak buz haline geçişini tam olarak

hesaplamıştır. Ayrıca, Myers uçak yüzeyindeki ısı transferini dikkate alarak buz ve su tabakaları arasındaki difüzyon ile ısı geçişini de hesaplamıştır. Başka bir önemli çalışmada, Bragg vd. buzlanma etkilerinin uçağın aerodinamik parametreleri üzerine etkilerini araştırmışlar ve bir model oluşturarak "buzlanmış uçak aerodinamik parametresi" tanımlamışlardır [66].

Fortin vd. kanat üzerindeki buzlanma, toplanan su fazındaki kütlelerin buza dönmesi ve geriye doğru akmasının kütle dengesine göre ve faz değişimi esnasında sudan salınan gizli ısı ile taşınım ve iletim şeklinde gerçekleşen ısı işlem neticesindeki ısı dengeye göre analizler yapmışlardır [67]. Bu durum bir termodinamik model kullanılarak simüle edilmiş ve altı farklı sıcaklık durumları için incelenmiştir. Bu analizlerde toplanan buz miktarı gövdenin büyüklüğü ile ilgili olup, topaklanma parametresi ( $a$ ) ile tanımlanan yeni bir parametre şeklinde ifade edilmiştir. Bu parametre Eşitlik (5) ile verilmektedir.

$$a = LWC \cdot U \cdot \tau / L \quad (5)$$

Burada  $LWC$  sıvı suyun miktarı (g/m<sup>3</sup>),  $\tau$  su ve buzun topaklanma süresi,  $L$  gövdenin karakteristik uzunluğu ve  $U$  buz topaklanma hızını (m/s) göstermektedir.

Helikopter rotorları üzerindeki buz topaklanması Xi ve Qi-Jun tarafından analiz edilmiştir [68]. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metotlarından zamana bağlı ortalanmış Reynolds Navier Stokes denklemleri kullanılarak helikopter rotorunun akış alanı hesaplanmıştır. Analizlerde merkezi kuvvet, su filmi hareketi ile azimutal açının etkileri de düşünülerek yeni bir üç boyutlu buzlanma modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada, her azimutal açı için kanat üzerindeki toplam buz miktarının, ileri doğru uçuşta sinüzoidal olarak değiştiği tespit edilmiştir. Sayısal modelleme çalışmalarında farklı bir analiz Deiler ve Kilian [69] tarafından yapılmıştır. Alman araştırma merkezinin (DLR) araştırma uçak modeli (VFW 614 ATTAS) kullanılarak  $\Delta$ -model yaklaşımıyla üç boyutlu analizleri çalışılmıştır. Kanattaki farklı buz şekillerinin uçak dinamik yapısına etkilerini incelemişlerdir. Uçağın hareketi altı serbestlik dereceli kinematik model oluşturularak yazılmış ve temel uçak aerodinamiği, kanat ve yatay kuyruk düzlemi boyunca etkileyen iki nokta modeli ile modellenmiştir.  $\Delta$ -model açılımı ile kanat üzerinde 20 bölgedeki yerel buzlanma etkileri değerlendirilmiştir. Mach sayısı 0.3 ve 10,000 ft uçuş yüksekliğinde olan uçağın buz çarpma açıları -5 ile 17 dereceler arasında iken kaldırma kuvvetleri tespit edilmiştir. Kanat üzerindeki buzlanmanın simetriye göre de kaldırma kuvvetinin değişimi incelenmiştir.

Farklı bir çalışma olarak Feng ve arkadaşları [10], buz kalınlığı parametresini kullanarak optimizasyon çalışması yapmışlar ve deneysel verilere dayanan örnek bir çalışma ile sonuçlarını karşılaştırmalı değerlendirmişlerdir. Li vd. tarafından yapılan diğer bir optimizasyon çalışmasında atmosferik uçuş koşullarında insansız bir hava aracının kanadında oluşan buzlanma

çok noktali-çok amaçlı optimizasyon metodu kullanılarak performans değerlendirilmesi ve iyileştirme analizleri şeklinde incelenmiştir [70]. Çalışmada buz oluşumu Eulerian yaklaşımı ile üç boyutlu Myers modeli kullanılarak hazırlanmıştır. Modelleme çalışmalarında kullanılan buzun yoğunluğu ve hava koşullarına (hava sıcaklığı, nem ve basınç) ait sabit değerlerin doğru tanımlanması uçuş emniyeti ve modelleme çalışmalarının hassasiyeti için önemlidir. Örneğin buzun yoğunluğu ve yüzeye yapışma kuvveti buz-su karışımına ve atmosferdeki yüksekliğe göre farklı değerlerdedir ve bu değerler deneysel çalışmalar ile yaklaşık olarak tespit edilmiştir [71–73]. Rakamsal olarak örnek verilirse, buz-su karışımının yoğunluğu 850–950 kg/m<sup>3</sup> ve buna göre buz yapışma kuvveti ~(0.2–0.45) MPa aralığında iken bulut içindeki buzun yoğunluğu 750–1050 kg/m<sup>3</sup> ve yapışma kuvveti ~(0.35–0.70) MPa değerlerindedir.

Gori ve arkadaşları, PoliMIce olarak adlandırılan buz topaklanma simulasyon programını geliştirmişler ve bazı test problemlerini diğer LEWICE, ONERA ve TRAJICE simulasyon program sonuçları ile karşılaştırmışlardır [74]. Bu çalışmada aynı buz kalınlığı (0.02 m) için, dört farklı zamanda (100–400 saniye aralığında) ve ortalama topaklanma hızlarında simulasyon yapılmış ve sonuçları değerlendirilmiştir. Buzun 40 saniyelik topaklanma zamanında, ısı akıları ve buz kalınlıkları bakımından Meyrs ve PoliMIce program sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada Myers'in hesaplama sonuçlarına göre sıcaklık ve kütle akışını daha doğru hesapladığı tespit edilmiştir. Bir diğer çalışma da, Kim ve Yee ısı-buzlanma önleme sistemini simulasyon analizleri ile değerlendirmişlerdir [75]. Bunun için kanat uzunluğu 0.9144 mm, atak açısı 0 ve dış ortam sıcaklığı –6.65°C olan sınır şartlarında beş farklı kanat uç malzemesi, yedi farklı ısıtma pedinin konum ve ısı akısı durumları ayrı ayrı incelenerek sonuçları yorumlanmıştır.

Böylece, yukarıda bahsedilen modelleme çalışmalarına dayanarak, buzlanmayı önlemek ve buz çözme sistemlerinin geliştirilmesi amacıyla, yeni tasarımlar konusunda modelleme çalışmalarının önemli katkıları olduğu görülmektedir. Yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarının anlatıldığı ayrıntılı derleme çalışmasında, makina öğrenme (machine learning) tekniklerinin bu alana uygulanması durumunda, performans iyileştirme ve optimizasyon konusunda önemli katkılar sağlayacağı gösterilmektedir [76].

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Pasif metotlar buz oluşumunu yada büyümesini geciktirmek ve buz ile yüzey arasındaki yapışma kuvvetini azaltmak için kullanılırlar. Özel amaçlar için küçük alanlara uygulanırlar. Isıl buz çözme yöntemlerinde, sıcak hava, elektriksel ısıtma, mikro dalga ve infrared metotlar kullanılmaktadır. Bu ısıl yöntemler çok fazla enerji harcamakta ve düşük verimliliğe sahiptirler. Mekanik buz çözme metotları;

basit yapıları, düşük maliyetleri, çevreyle dost ve yüksek verimlilikleri gibi bazı avantajlara sahiptirler. Ancak bu metotların yorulma performansı ve rüzgar türbini kanatları ve uçak kanadı yüzeyleri ile ilgili yeterli araştırma çalışmaları bulunmamaktadır. Ultrasonik buz çözme metotları, düşük enerji tüketimi, düşük maliyet ve hafif olması, kolay yerdeğişikliği ve bakımı gibi avantajlara sahiptir. Ancak bu yöntemde, hala sınırlı olup, laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmektedir.

Özetle, buzlanmayı önlemek ve buz çözme için kullanılan ve geliştirilen yöntemler anlatılmıştır. Bu yöntemlerin uygulama biçimleri, avantaj ve dezavantajları ile modelleme çalışmaları hakkında bahsedilmiştir. Uçak uçuş dinamik karakteristikleri ve bazı karakteristik tanımlama parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir. Havacılık sektöründe zaman içinde araştırma sonuçlarından elde edilen faydalı bilgilere göre gelişmeler ve değişimler yaşanmaktadır. Çalışmamız bu konuda hazırlanmış ilk kapsamlı Türkçe çalışmadır.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Osman AKGÜN:** Konunun araştırmasını yapmış ve makaleyi yazmıştır.

**Nimeti KALAYCI:** Makalenin yazımını ve düzenlemesini yapmıştır.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cao YH., Tan WY., Wu ZL., "Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety", *Aerospace Science and Technology*, 75: 353–385, (2018).
- [2] Roh W., Kikuchi N., "Analysis of Stefan problem with level set method", 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, St. Louis, Missouri, USA, June 24–26 (2002).
- [3] Gori G., Zocca M., Guardone A., "A model for in-flight ice accretion based on the exact solution of the unsteady Stefan problem", 7th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, Dallas, TX, USA, June 22–26, (2015).
- [4] He Q., Li KS., Xu Z., Wang JW., Wang XS., Li AL., "Research progress on construction strategy and technical evaluation of aircraft icing accretion protection system", *Chinese Journal of Aeronautics*, 36(10): 1–23 (2023).
- [5] Waldman RM., Hu H., "High-speed imaging to quantify transient ice accretion process over an airfoil", *Journal of Aircraft*, 53(2): 369–377, (2016).

- [6] Thomas S.K., Cassoni R.P., MacArthur C.D., “Aircraft anti-icing and de-icing techniques and modeling”, *Journal of Aircraft*, 33(5): 841–854, (1996).
- [7] Chen X., Zhao Q.J., “Numerical simulations for ice accretion rotors using new three-dimensional icing model”, *Journal of Aircraft*, 54(4): 1428–1442, (2017).
- [8] Potapezuk MG., “Aircraft icing research at NASA Glenn Research Center”, *Journal of Aerospace Engineering*, 26(2): 260–276, (2013).
- [9] Zheng DS., Li ZY., Du ZY., Ma Y., Zhang L., Du C., Li ZJ., Cui LQ., Zhang L., Xuan XG., Deng X., “Design of capacitance and impedance dual-parameters planar electrode sensor for thin ice detection of aircraft icing mitigation”, *IEEE Sensors Journal*, 22(11): 11006–11015, (2022).
- [10] Feng KX., Lu ZZ., Yun WY., “Aircraft icing severity analysis considering three uncertainty types”, *AIAA Journal*, 57(4): 1514–1522, (2019).
- [11] Cao YH., Wu ZL., Su Y., Xu Z., “Aircraft flight characteristics in icing conditions”, *Progress in Aerospace Sciences*, 74: 62–80, (2015).
- [12] Zhou WW., Liu Y., Hu H., Hu HY., Meng XS., “Utilization of thermal effect induced by plasma generation for aircraft icing mitigation”, *AIAA Journal*, 56(3): 1097–1104, (2018).
- [13] Wang YB., Xu YM., Huang Q., “Progress on ultrasonic guided waves de-icing techniques in improving aviation energy efficiency”, *Renewable Sustainable Energy Review*, 79: 638–645, (2017).
- [14] [http://www.weather.gov/ZHU\\_Training\\_Page/icing.htm](http://www.weather.gov/ZHU_Training_Page/icing.htm).
- [15] Leader R., Takahashi T., “Frosty Weather: The regulatory history of aircraft design and operations in icing conditions”, AIAA Scitech Forum, January 7-11, San Diego, California, (2019).
- [16] Addy Harold E. Jr., “Ice accretions and icing effects for modern airfoils”, NASA/TP–2000–210031, (2000).
- [17] Ernez S., Morency F., “Eulerian-Lagrangian CFD model for prediction of heat transfer between aircraft deicing liquid sprays and a surface”. *International Journal of Numerical Methods Heat Fluid Flow*, 29 (7) 2450–2475, (2019).
- [18] Chen Y., Jiang XL., Liao Y., Chen Q., Wang M., Li T., Hu Q., “Influence of structural parameters on the pulse effect of pulsed coils”. *Results in Physics*, 43: 106128, (2022).
- [19] Villeneuve F., Volat C., Ghinet S., “Numerical and experimental investigation of the design of a piezoelectric de-icing system for small rotorcraft part 1/3: Development of a flat plate numerical model with experimental validation”, *Aerospace*, 7(5) : 62 (2020).
- [20] Palacios J., Wolfe D., Bailey M., Szefti J., “Ice testing of a centrifugally powered pneumatic deicing system for helicopter rotor blades”, *Journal of the American Helicopter Society*, 60: 032014, 1–12, (2015).
- [21] Wang ZJ., “Recent Progress on ultrasonic de-icing technique used for wind power generation, high-voltage transmission line and aircraft”, *Energy Build*, 140: 42 (2017).
- [22] Wang YL., Yao X., Wu SW., Li QY., Lv JY., Wang JJ., Jiang L., “Bioinspired Solid Organogel Materials with a Regenerable Sacrificial Alkane Surface Layer”, *Advanced Materials*, 29(26): 1700865, (2017).
- [23] Saeed F., Ahmed KZ., Owes AO., Paraschivoiu I., “Anti-icing hot air jet heat transfer augmentation employing inner channels”, *Advances in Mechanical Engineering*, 13(12): (2021).
- [24] Zhao ZH., Chen HW., Liu XL., Wang ZL., Zhu YT, Zhou YP., “Novel sandwich structural electric heating coating for anti-icing/de-icing on complex surfaces”, *Surface and Coating Technology*, 404: 126489, (2020).
- [25] Shen X, Wang H, Lin G, Bu X, Wen D. “Unsteady simulation of aircraft electro-thermal deicing process with temperature-based method”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 234 (2): 388–400, (2020).
- [26] Piscitelli F., Chiariello A., Dabkowski D., Corrado G. Marra F., Di Palma L., “Superhydrophobic Coatings as Anti-Icing Systems for Small Aircraft”, *Aerospace*, 7(2): (2020).
- [27] Papadakis M., Wong SH., Yeong HW., Wong SC., Vu GT., “Icing tests of a wing model with a hot-air ice protection system”, Proceedings of the AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, Toronto, Ontario, Canada, (2010).
- [28] Pourbagain M., Habashi WG., “Parametric analysis of energy requirements of in-flight ice protection systems”, Proceedings of the 20<sup>th</sup> Annual conference of the CFD society of Canada, Canmore, Canada, (2012).
- [29] Pourbagain M., Habashi WG., “CFD-based optimization of electro-thermal wing ice protection systems in de-icing mode”, 51<sup>st</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Grapevine, Texas, USA, (2013).
- [30] Li AL, Li KS, Zhang FY, Ren SY, Zhang FW, He Q, “Research on low temperature performance of ZnO/SiO<sub>2</sub> composite superhydrophobic paper mulch”, *Journal of Materials Research and Technology*, 14: 851–863, (2021).
- [31] Xue CH., Tian QQ., Jia ST., Zhao LL., Ding YR., Lia HG., An QF., “The fabrication of mechanically durable and stretchable superhydrophobic PDMS/SiO<sub>2</sub> composite film”, *RSC Adv.*, 10, 19466–19473, (2020).
- [32] Yin XY., Zhang YE., Wang DA., Liu ZL., Liu YP., Pei XW., Yu B., Zhou F., “Integration of Self-Lubrication and Near-Infrared Photothermogenesis for Excellent Anti-Icing/Deicing Performance”, *Advanced Functional Materials*, 25(27): 4237–4245, (2015).
- [33] Huang X., Nick Tepylo N., Pommier-Budinger V., Budinger M., Bonaccorso E., Villedieu P., Bennani L., “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, (2019).
- [34] Levin IA., “USSR electric impulse de-icing system design”, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 44(7): 7–10, (1972).
- [35] Endres M., Sommerwerk H., Mendig C., Sinapius M., Horst P., “Experimental study of two electro-mechanical de-icing systems applied on a wing section tested in an icing wind tunnel”, *CEAS Aeronautical Journal*, 8: 429–439, (2017).

- [36] Sommerwerk H., Horst P., Bansmer S., “Studies on Electro Impulse De-Icing of a Leading-Edge Structure in an Icing Wind Tunnel”, 8th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, Washington, D.C., AIAA 2016–3441, (2016).
- [37] Tian YQ., Zhang ZK., Cai JS., Yang LL., Kang L., “Experimental study of an anti-icing method over an airfoil based on pulsed dielectric barrier discharge plasma”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(7): 1449–1460, (2018).
- [38] Sommerwerk H., Luplow T., Horst P., “Numerical simulation and validation of electro-impulse de-icing on a leading-edge structure”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 105: 102392, (2020).
- [39] Zhang Y.J., Liang K., Lan H., Falzon B.G., “Modelling electro-impulse de-icing process in leading edge structure and impact fatigue life prediction of rivet holes in critical areas”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 234(5): 1117–1131, (2020).
- [40] Wang YY., Jiang XL., “Design Research and Experimental Verification of the Electro-Impulse De-Icing System for Wind Turbine Blades in the Xuefeng Mountain Natural Icing Station”, *IEEE Access*, 8: 28915–28924, (2020).
- [41] Zhang Y., Narayanasamy K., Sandel W., Nilamdeen S., Ozcer I., “A Three-Layer Model for Ice Crystal Icing in Aircraft Engines”, *SAE Technical Paper* 01-1481, (2023).
- [42] Liu Y., Bond L., Hu H., Ultrasonic-attenuation-based technique for ice characterization pertinent to aircraft icing phenomena”, *AIAA Journal*, 55(5): 1602–1609, (2017).
- [43] Svilainis L., “Review of high resolution time of flight estimation techniques for ultrasonic signals”, International Conference NDT, Telford, England, (2013).
- [44] Vargas M., Broughton H., Sims JJ., Bleeze B., Gaines V., “Local and total density measurements in ice shapes”, *Journal of Aircraft*, 44(3): 780-789, (2007).
- [45] Bowden D., “Effect of pneumatic de-icers and ice formations on aerodynamic characteristics of a airfoil”, Washington, D.C., NACA-TN-3564, (1956).
- [46] Broeren AP., Bragg MB., Addy HE., “Effect of intercycle ice accretions on airfoil performance”, *Journal of Aircraft*, 41(1): 165–174, (2004).
- [47] Al-Khalil K., Horvath C., Miller D.R., Wright W., “Validation of thermal ice protection computer codes: III- the validation of ANTICE”, Proceedings of the 35<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 97-0051, Nevada, U.S.A, (1997).
- [48] Al-Khalil K., Ferguson TW., Phillips D.M., “A hybrid anti-icing ice protection system”, Proceedings of the 35<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 97-0302, Nevada, U.S.A, (1997).
- [49] Pourbagian M., Talgorn B., Habashi WG., “Constrained problem formulations for power optimization of aircraft electro-thermal anti-icing systems”, *Optimization and Engineering*, 16(4): 663–693, (2015).
- [50] Hann R., Enache A., Nielsen M.C., Stovner B.N., van Beeck J., Johansen T.A., Borup K.T., “Experimental heat loads for electrothermal anti-icing and de-icing on UAVs”, *Aerospace*, 8: 83, (2021).
- [51] Vertuccio L., Foglia F., Pantani R., Guadagno L., “New Aircraft Anti/de-Icing Technologies”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1024: 012012, (2021).
- [52] Zilio C., Patricelli L. “Aircraft anti-ice system: Evaluation of system performance with a new time dependent mathematical model”, *Applied Thermal Engineering*, 63: 40-51, (2014).
- [53] Salcedo S. A.G., Da Silva A.F., Andrade C.R., “Turbulent impingement jet heat transfer on concave surfaces for aeronautical applications”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40: 545, (2018).
- [54] Stallabrass JR., “Thermal aspects of deicer design”, in: 1st International Helicopter Icing Conference, Ottawa, Canada, May (1972).
- [55] Marano JJ., “Numerical simulation of an electrothermal deicer pad”, Toledo, Ohio, USA, NASA-CR-168097, (1983).
- [56] Roelke R.J., Keith TG., De Witt KJ., Wright WB., “Efficient numerical simulation of a one-dimensional electrothermal deicer pad”, *Journal of Aircraft*, 25(12): 1097–1105, (1988).
- [57] Chao DF., “Numerical simulation of two-dimensional heat transfer in composite bodies with application to de-icing of aircraft components”, Toledo, Ohio, USA, NASA-CR-168283, (1983).
- [58] Wright WB., Keith TG., De Witt KJ., “Two-dimensional simulation of electrothermal deicing of aircraft components”, *Journal of Aircraft*, 26(6): 554–562, (1989).
- [59] Wright W., Dewitt K., Keith J.T., “Numerical simulation of icing, deicing, and shedding”, Proceedings of the 29<sup>th</sup> Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, USA, (1991).
- [60] Yaslik AD., De Witt KJ., Keith Jr. TG., Boronow W., “Three-dimensional simulation of electrothermal deicing systems”, *Journal of Aircraft*, 29(6): 1035–1042, (1992).
- [61] Zhou Y., Lin GP, Bu XQ., Mu ZD., Pan R., Ge Q., Qiao XD., “Temperature and runback ice prediction method for three-dimensional hot air anti-icing system”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 187, 012017, (2017).
- [62] Cao Y., Ma C., Zhang Q., Sheridan J., “Numerical simulation of ice accretions on an aircraft wing”, *Aerospace Science and Technology*, 23: 296–304, (2012).
- [63] Caliskan F., Hajiyev C., “A review of in-flight detection and identification of aircraft icing and reconfigural control”, *Progress in Aerospace Sciences*, 60: 12-34, (2013).
- [64] Cao Y., Li G., Song D., “Numerical simulation of melting of ice accreted on an airfoil”, *Aerospace Science and Technology*, 119: 107223, (2021).
- [65] Myers T.G., “Extension to the Messinger Model for aircraft icing”, *AIAA Journal*, 39(1): 211-218, (2001).
- [66] Bragg MB., Hutchison T., Merret J., Oltman R., Pokhariyel D., “Effect of ice accretion on aircraft flight dynamics”, *AIAA Paper*, 2000–0360, (2000).
- [67] Fortin G., Laforte J.-L., Ilinca A., “Heat and mass transfer during ice accretion on aircraft wings with an improved

- roughness model”, *International Journal of Thermal Sciences*, 45(6): 595–606, (2006).
- [68] Xi C., Qi-Jun Z., “Numerical simulations for ice accretion on Rotors using new three-dimensional icing model”, *Journal of Aircraft*, 54(4): (2017).
- [69] Deiler C., Kilian T., “Dynamic aircraft simulation model covering local icing effects”, *CEAS Aeronautical Journal*, 9(3): 429–444, (2018).
- [70] Li HR., Zhang YF., Chen HX., “Optimization design of airfoils under atmospheric icing conditions for UAV”, *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(4):118–133, (2022).
- [71] Currie T.C., Struk P.M., Tsao J-C., Fuleki D., Knezevici D.C., “Fundamental study of mixed-phase icing with application to ice crystal accretion in aircraft jet engines”, 4<sup>th</sup> AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, AIAA 2012-3035, (2012).
- [72] Ronneberg S., Laforte C., Volat C., He J., Zhang Z., “The effect of ice type on ice adhesion”, *AIP Advances*, 9: 055304, (2019).
- [73] Long C., Jinghang X., Xichun L., Liu Z., Bing W., Qinghua S., Yukui C., Yi W., Xiangyu G., Chunlong L., “Micro/nano manufacturing aircraft surface with anti-icing and deicing performances: An overview”, *Nanotechnology Reviews*, 12: 20230105, (2023).
- [74] Gori G., Parma G., Zocca M., Guardone A., “Local solution to the unsteady Stefan Problem for in-flight ice accretion modeling”, *Journal of Aircraft*, 55(1): 251–262, (2018).
- [75] Kim Y. Yee K., “Target temperature-based simulation method for predicting performance and design aircraft thermal anti-icing systems”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 229: 125688, (2024).
- [76] Rekuviene R., Saeidiharzand S., Mažeika L., Samaitis V., Jankauskas A., Sadaghiani A.K., Gharib G., Munganlı Z., Koşar A., “A review on passive and active anti-icing and de-icing technologies”, *Applied Thermal Engineering*, 250: 123474, (2024).