Ticari Yolcu Uçaklarındaki Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi Arızalarının Örnek Uçuş Kazaları Bağlamında İncelenmesi

İlker İnan[1*] (ORCID: 0000-0001-6151-6690)

[*1]Maltepe Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Uçak Teknolojisi Programı, İstanbul, Türkiye.

*Sorumlu Yazar e-posta: ilkerinan@maltepe.edu.tr

Özet

Atmosfer havası içindeki buhar veya sıvı haldeki nemin herhangi bir nedenle soğuyarak yüzeyler üzerinde katılaşmasına buzlanma denir. Hava araçları üzerinde buzlanmanın birçok olumsuz etkisi mevcuttur. Örneğin; kanatlar üzerinden düzgün akan havayı engelleyerek stol (tutunma kaybı) hızını artırması, kanatların taşıma kuvvetini yaklaşık %30 oranında azaltıp sürükleme kuvvetini yaklaşık %40 oranında artırarak ağırlık artışı oluşturması, uçuş kontrol yüzeyleri üzerindeki buz birikiminin uçuş kontrolünü etkilemesi, yakıt buzlanmasına neden olması, vb. sayılabilir. Uçuş sırasındaki buzlanma durumunda dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, buzlanmanın başlamadan önlenmesidir; çünkü buzlanmanın önlenemeyecek miktara ulaşması durumunda, Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi'nin de (IPS: Ice Protection System) pek bir fayda sağlamadığı görülmüştür. Dolayısıyla öncelikle uçak üzerinde buzlanma potansiyeli en yüksek olan bölgeler için gerekli önlemler alınmaktadır. Bu sistemin kullanılmamasından ya da arızalanmasından kaynaklanan kazaların istatistiksel değerlendirmesine bakıldığında, buzlanma kazalarının ölümlü sonuçlanma oranı, diğer kategorilerin yaklaşık üç katı olduğundan bu sistemin kritik öneme sahip olduğu anlaşılmaktadır. Tarihsel süreç içinde ticari yolcu uçaklarında bu sistemin kullanılmaması, sistemin tamamen çalışmaması ya da yetersiz çalışması, birçok uçuş kazasının oluşmasına neden olmuştur. Bu bildiri çalışmasında incelenen uçuş kazası vakaları, American Eagle Uçuş 4184 (1994), Comair Uçuş 3272 (1997), Air France Uçuş 447 (2009), Colgan Air Uçuş 3407 (2009) ve Voepass Uçuş 2283'ü (2024) kapsamaktadır. Bu vakalardan elde edilen bulgular, korunma sisteminin teknik başarısızlığının, mürettebat hatası ve sertifikasyon yetersizlikleriyle birleştiğinde çok katmanlı bir uçuş emniyeti riski oluşturduğunu ortaya koymaktadır. İncelenen vakaların tamamında bu sistemin teknik arızası tek başına nadiren yeterli kazaya neden olmaktadır. Uçuş kazalarının büyük çoğunluğu; teknik arıza, mürettebat yanıt hatası ve sertifikasyon/düzenleyici yetersizliğin bileşiminden kaynaklanmaktadır. Günümüzde yakın tarihte yaşanan Voepass uçuş kazası (2024), 30 yıl önce yaşanan Roselawn uçuş kazasını çağrıştırmasıyla, buzlanma probleminin günümüz tarihine kadar tam anlamıyla giderilemediğini göstermektedir. Uluslararası ve Ulusal Sivil Havacılık Otoriteleri'nin süregelen teknik iyileştirmeleri, kapsamlı mürettebat eğitimini ve hızlı düzenleyici adaptasyonu bir araya getiren bütünleşik bir uçuş emniyeti yaklaşımını uygulamaya geçirerek Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi'nden kaynaklı uçuş kazalarının en aza indirilmesini ya da tamamen olmamasını sağlayacak adımlar atması, uçuş emniyetine önemli katkılar sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Buzlanmaya Bağlı Uçuş Kazaları, Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi Arızaları, De-Icing ve Anti-Icing Sistemleri, Aerodinamik Performans Kaybı.

Investigation of Ice and Rain Protection System Failures In Commercial Transport Aircraft Through Selected Accident Cases

Abstract

Icing is defined as the solidification of water vapour or liquid-phase moisture present in the atmospheric air on surfaces as a result of cooling due to various causes. Icing on aircraft has numerous adverse effects. For example, it can hinder the smooth airflow over the wings and increase the stall speed, reduce wing lift by approximately 30% while increasing drag by about 40%, thereby effectively increasing the aircraft's weight, cause ice accretion on flight control surfaces and thus impair flight controllability, and lead to fuel system icing, among others. The most critical point in managing inflight icing is to prevent ice accretion before it begins; once icing reaches a level at which it can no longer be controlled, the Ice and Rain Protection System (IPS: Ice Protection System) is often found to provide limited benefit. Consequently, priority is given to implementing protective measures for the aircraft regions with the highest icing potential. Statistical evaluations of accidents arising from the non-use or malfunction of this system indicate that the fatality rate of icing-related accidents is approximately three times higher than that of other categories, underscoring the critical importance of the system. Historically, in commercial transport aircraft, the absence, complete failure or inadequate performance of this system has contributed to numerous accidents. This paper examines the accident cases of American Eagle Flight 4184 (1994), Comair Flight 3272 (1997), Air France Flight 447 (2009), Colgan Air Flight 3407 (2009) and Voepass Flight 2283 (2024). The findings derived from these cases show that technical failure of the protection system, when combined with crew error and certification deficiencies, creates a multi-layered flight safety risk. In all of the investigated cases, technical malfunction of the system alone rarely constituted a sufficient cause of the accident. The majority of accidents resulted from a combination of technical failure, inappropriate crew response and certification/regulatory shortcomings. The recent Voepass accident (2024), which echoes the Roselawn accident that occurred 30 years earlier, demonstrates that the icing problem has not been completely resolved up to the present day. By implementing an integrated flight safety approach that combines ongoing technical improvements, comprehensive crew training and rapid regulatory adaptation, international and national civil aviation authorities can take steps to minimise, or ideally eliminate, accidents arising from Ice and Rain Protection System failures, thereby making a significant contribution to flight safety.

Keywords: Flight Accidents due to Icing, Ice and Rain Protection System Failures, De-icing and Anti-icing Systems, Aerodynamic Performance Degradation.

GİRİŞ

Atmosfer havası meteorolojik olaylarından buzlanma, gerek sivil gerekse askeri havacılıkta uzun yıllardır bilinen ancak etkileri bakımından hâlen tam olarak kontrol altına alınamamış kritik meteorolojik tehlikelerden biridir (Civil Aviation Authority, 2000), (Federal Aviation Administration, 1997). Özellikle görünür nem, uygun sıcaklık aralığı ve aşırı soğumuş su damlacıkları birlikte bulunduğunda, hava aracı yüzeylerinde çok kısa sürede buz birikimi oluşabilmekte ve bu durum hava aracının öngörülen performans sınırlarını değiştirebilmektedir (Civil Aviation Authority, 2000), (Federal Aviation Administration, (1975). Uçuş esnasında meydana gelen bu tür birikimler, ilk bakışta sınırlı görünse de, uçuş süresince taşıma-sürükleme dengesi, stol (tutunma kaybı) hızı, uçuş kontrol yüzeyi etkinliği ve uçuş kararlılığı ve dinamiği üzerinde kritik seviyede tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir (BEA, 2012).

Havacılıkta buzlanma ile mücadelede temel yaklaşım, buzlanmanın başlamadan önlenmesidir; çünkü buzlanmanın önlenemeyecek miktara ulaşması durumunda, Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi'nin de etkili olmadığı belirlenmiştir (Federal Aviation Administration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000). Dolayısıyla anti-icing (buzdan korunma) ve de-icing (buzlanmayı giderici) sistemleri, kanat ön kenarları, kuyruk yüzeyleri, motor girişleri, pitot-statik sistemleri ve cam yüzeyleri gibi buzlanmaya hassas bölgelere yerleştirilmektedir (Federal Aviation Administration, 2000), (Civil Aviation Authority, 2000). Ancak geçmiş kazalar göstermiştir ki bu sistemin mevcut olması tek başına yeterli değildir; çünkü

sistemin doğru zamanda çalışması, uçuş mürettebatının buzlanma koşullarını tanıması ve sertifikasyon dokümanlarının gerçek operasyonel riski doğru yansıtması da en az sistem donanımı kadar önemlidir (Federal Aviation Administration, 2000), (National Transportation Safety Board, 2010).

Bu çalışmada, buzlanma kaynaklı kazaların çoğu zaman sadece "teknik arıza" başlığı altında değil, uçuş mürettebatının da yanlış kararlar vererek uçuşa müdahale etmesi sonucu kazaların meydana geldiği vurgulanmıştır (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012). Çünkü bazı vakalarda buzlanma doğrudan aerodinamik bozunuma neden olurken, bazı vakalarda pitot problarının buz kristalleriyle tıkanması gibi dolaylı mekanizmalar zincirleme insan-makine etkileşim sorunlarını tetiklemiştir (BEA 2012). Diğer bazı olaylarda ise hava aracı kontrol edilebilir durumda kalmış, ancak mürettebatın uygunsuz stol tepkisi veya yanlış hız yönetimi kazanın asıl belirleyicisi olmuştur (National Transportation Safety Board, 2010), (Kreindler & Kreindler LLP., 2026).

Bu nedenle çalışma kapsamında, buzlanmaya bağlı kazaları yalnızca meteorolojik bir olay olarak değil; teknik tasarım, operasyonel prosedür, insan faktörü ve düzenleyici gözetimin kesiştiği çok katmanlı bir emniyet problemi olarak incelenmiştir (Federal Aviation Administration, 2000), (European Union Aviation Safety Agency, 2012).

Bildirinin ilerleyen bölümlerinde önce buzlanmanın aerodinamik ve sistemsel etkileri açıklanmakta, ardından Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi'nin mantığı ve sınırlılıkları tartışılmakta, sonrasında seçilmiş beş kaza vakası karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Son bölümde ise sivil havacılık otoriteleri, üreticiler ve işletmeler açısından çıkarılması gereken dersler değerlendirilmekte ve emniyet odaklı öneriler sunulmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Buzlanmanın Uçuşa Etkileri

Sabit ya da döner kanatlı hava araçlarında oluşan buzlanma kanatlar üzerinden düzgün akan havayı engelleyerek sınır tabaka gelişimini değiştirmekte ve hava akışının yüzeyin tamamından geçmeden ayrılmasına neden olabilmektedir (Civil Aviation Authority, 2000), (Federal Aviation Administration, 2000). Bu durum, özellikle taşıma kuvvetinin azalması ve sürükleme kuvvetinin artması şeklinde iki temel aerodinamik sonuca yol açmakta; aynı zamanda stol hızını yükselterek pilotun uçuş kararlılığını sürdürmesini zorlaştırmaktadır (Civil Aviation Authority, 2000), (Federal Aviation Administration, 2000). Dolayısıyla buzlanma, yalnızca performans kaybı değil, uçağın kumanda karakteristiğinde ve kararlılığında da bozulmaya neden olan kritik bir etkendir (Federal Aviation Administration, 2000), (Flight Safety Foundation, 2017).

Hava araçlarında buzlanmanın etkisi yalnızca kanat bölgeleriyle sınırlı değildir. Kanat bölgelerinin dışında yatay ve düşey stabilize yüzeyleri, uçuş kontrol yüzeyleri, motor hava girişleri, pitot tüpleri, statik portlar ve algılayıcılar da bu süreçten etkilenmektedir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012). Özellikle pitot tüplerinin buz kristalleriyle geçici olarak tıkanması, güvenilmez hava hızı verisi üreterek otomatik pilotun devreden çıkmasına, uçuş zarfı korumasının değişmesine ve mürettebatın yanlış durumsal farkındalık geliştirmesine neden olabilmektedir (BEA, 2012), (Skybrary, 2013). Air France 447 kazasında görüldüğü üzere, doğrudan bir yapısal buz yükünden ziyade ölçüm sistemindeki buzlanma kaynaklı veri bozulması da ölümcül zincirleme olaylara yol açabilmektedir (BEA, 2012).

Buzlanma ayrıca ağırlık artışı ve titreşim gibi ikincil etkiler de oluşturur (Civil Aviation Authority, 2000), (Flight Safety Foundation, 2017). Her ne kadar bazı kazalarda temel problem birkaç milimetre kalınlığında pürüzlü buz tabakası olsa da, bu ince tabakanın dahi taşıma kuvveti üretimini düşürdüğü ve düşük hızlarda kontrol kaybını tetikleyebildiği raporlanmıştır. Bu açıdan bakıldığında buzlanmanın tehlikesi, yalnızca kalın buz tabakalarında değil, pilot tarafından görsel olarak önemsiz kabul edilebilecek ince ve düzensiz buz birikimlerinde de oluşabilir (Flight Safety Foundation, 2017), (Aircraft Owners and Pilots Association, 2015).

Meteorolojik bakımdan en riskli durumlar arasında süper soğumuş büyük damlacıklı donan çiseleme (freezing drizzle) ve donan yağmur (freezing rain) koşullarıdır (Flight Safety Foundation, 2017), (Civil Aviation Authority, 2000). Donan çiseleme, çapları 0.5 mm'den daha küçük olan birbirlerine yakın su damlacıklarının uçak üzerindeki yüzeylere değmesi ile oluşur. Donan yağmur ise, hafif donan ve yoğun donan yağmur olmak üzere iki gruba ayrılır. Hafif donan yağmur, çiselemekte olan yağmurda, çapları 0,5 mm'den küçük olan su taneciklerinin bir yüzeye rastlayıp yayılarak donmasıdır. Yoğun donan yağmur, çiselemekte olan yağmurda, çapları 0,5 mm'den büyük olan su taneciklerinin bir yüzeye rastlayıp yayılarak donmasıdır. Roselawn kazası sonrasında yapılan incelemeler, klasik sertifikasyon zarfının dışında kalan bu çevresel koşulların özellikle bazı turboprop platformlarda beklenenden daha ağır kontrol problemlerine yol açabileceğini göstermiştir (Flight Safety Foundation, 2017). Bu bulgu, buzlanma riskinin yalnızca "bilinen buzlanma koşullarında uçuşa sertifikalı" olmakla tam olarak yönetilemeyeceğini ortaya koymuştur (Federal Aviation Administration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000).

Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemleri

Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi, sabit ve döner kanatlı hava araçlarının buzlanmaya karşı en hassas bölgelerinde buz oluşumunu önlemek veya oluşan buzu uzaklaştırmak amacıyla geliştirilen sistem olup kendi içinde alt gruplara ayrılmaktadır Total Training Support Ltd., 2016). Anti-icing (buzdan korunma) sistemi, buzlanmaya karşı en hassas bölgelerin yüzeylerinde buz oluşumunu baştan engellemeyi amaçlarken; de-icing (buzlanmayı çözücü) sistemi ise, belirli bir miktar buz oluştuktan sonra oluşan buzu kırarak veya çözerek yüzeyden uzaklaştırmayı amaçlamaktadır (Federal Aviation Administration, 2000), (Civil Aviation Authority, 2000). Ticari ve bölgesel uçaklarda bu koruma, pnömatik kauçuk botlar, sıcak hava bleed sistemleri, elektrikli ısıtma elemanları veya algılayıcı bazlı otomatik aktivasyon mantıklarıyla sağlanabilmektedir (Federal Aviation Administration, 2000), (Federal Aviation Administration, 1997).

Embraer EMB-120 örneğinde olduğu gibi bazı uçaklarda kanat ve kuyruk ön kenarlarının pnömatik botlarla korunduğu, pitot/statik ve diğer algılayıcıların ise elektriksel anti-icing ile güvence altına alındığı görülmektedir (Federal Aviation Administration, 2000). Ancak sistem tasarımı kadar, bu sistemin hangi koşulda ve ne zaman kullanılacağına ilişkin prosedür de kritik önem taşımaktadır (Federal Aviation Administration, 2000), (Federal Aviation Administration, 1997). Comair 3272 incelemesi, geçmişte yaygın olan "botları belli bir buz kalınlığına ulaşmadan çalıştırmama" yaklaşımının modern veriler ışığında güvenli olmadığını ve ilk buz belirtisinde aktivasyonun daha doğru bir emniyet yaklaşımı olduğunu göstermiştir (Federal Aviation Administration, 2000).

Bu bağlamda "ice bridging" (de-icing botlarının erken çalıştırılması durumunda buz tabakasının kırılmadan köprüleşerek yüzeyde kalması varsayım) kavramı tarihsel olarak önemli bir tartışma alanıdır (Federal Aviation Administration, 2000). Uzun süre sektörde, botların çok erken çalıştırılması halinde ince buzun kırılmak yerine köprüleşerek daha tehlikeli bir profil oluşturabileceğine inanılmış; bu nedenle birçok işletme bot aktivasyonunu geciktiren prosedürler benimsemiştir (Federal Aviation Administration, 2000). Ancak kaza sonrası testler ve sonraki düzenleyici yaklaşım, modern pnömatik bot sistemlerinde bu varsayımın genellenebilir olmadığını ve erken aktivasyonun çoğu durumda daha güvenli olduğunu ortaya koymuştur (Federal Aviation Administration, 2000).

Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi'nin uçuş emniyetindeki rolü oldukça fazladır; ancak sistemin varlığı her zaman mutlak koruma sağlamaz (Federal Aviation Administration, 1997), (Civil Aviation Authority, 2000). Sistem arızası, yanlış kullanım, sensör verisinin yanlış yorumlanması, uygunsuz hız yönetimi veya sertifikasyon zarfı dışındaki meteorolojik koşullar nedeniyle IPS aktif olsa dahi kazalar meydana gelebilmektedir (Flight Safety Foundation, 2017), (National Transportation Safety Board, 2010), (Mercopress, 2024). Bu nedenle modern yaklaşım, Buz ve Yağmurdan Korunam Sistemleri'ni bağımsız bir çözüm değil; meteorolojik farkındalık, prosedür uyumu, eğitim ve düzenleyici denetimle birlikte çalışan çok katmanlı bir emniyet bariyeri olarak değerlendirmektedir (Federal Aviation Admisinstration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000), (European Union Aviation Safety Agency, 2012).

Yöntem ve Vaka Seçimi

Bu çalışma, nitel vaka analizi yaklaşımıyla hazırlanmıştır (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012). Seçilen kazalar, buzlanmanın doğrudan aerodinamik etki yarattığı, buz koruma sisteminin yetersiz kaldığı veya buzlanma ile ilişkili teknik problemlerin insan faktörü ve sertifikasyon eksikleriyle birleştiği olaylar arasından belirlenmiştir (Flight Safety Foundation, 2017), (Federal Aviation Administration, 2000), (National Transportation Safety Board, 2010), (Mercopress, 2024). Vaka kümesi, zamansal sürekliliği gösterecek biçimde 1994–2024 aralığını kapsayacak şekilde oluşturulmuştur (Flight Safety Foundation, 2017), (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (Mercopress, 2024).

İncelenen olaylar American Eagle Uçuş 4184, Comair Uçuş 3272, Air France Uçuş 447, Colgan Air Uçuş 3407 ve Voepass Uçuş 2283'tür (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010), (Mercopress, 2024). Bu kazalar arasında platform, operasyon tipi ve buzlanma mekanizması bakımından farklılıklar bulunmasına rağmen, tümü uçuş emniyeti açısından buzlanmanın çok katmanlı risk doğasına ilişkin anlamlı ortaklıklar sunmaktadır (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010). Özellikle iki bölgesel turboprop kazası olan American Eagle 4184 ve Comair 3272, yapısal buzlanma ile kontrol kaybı arasındaki ilişkiyi; Air France 447, sensör buzlanmasının dolaylı sonuçlarını; Colgan Air 3407 ve Voepass 2283 ise buzlanma koşullarında hız yönetimi ve mürettebat tepkisinin önemini göstermektedir (Flight Safety Foundation, 2017), (Federal Aviation Admisintration, 2000), (BEA, 2012), (National Safety Board, 2010), (Mercopress, 2024).

Veri kaynağı olarak kaza araştırma otoritelerinin yayımladığı raporlar, otorite özetleri ve buzlanma el kitapları esas alınmıştır (Federal Aviation Administration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012). Değerlendirme kriterleri dört başlık altında yapılandırılmıştır: buzlanma mekanizması, Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemleri veya ilgili teknik sistemin durumu, mürettebatın operasyonel tepkisi ve düzenleyici/sertifikasyon bağlamı (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Safety Board, 2010), (Mercopress, 2024). Böylece her vaka yalnızca "neden düştü" sorusuyla değil, emniyet bariyerlerinin hangi aşamalarda zayıfladığı sorusuyla birlikte analiz edilmiştir (Federal Aviation Administration, 2000), (European Union Aviation Safety Agency, 2012).

Vaka İncelemeleri

1. American Eagle Uçuş 4184 (1994)

American Eagle Uçuş 4184, 31 Ekim 1994 tarihinde ATR 72 tipi uçakla buzlanma koşullarında bekleme ve alçalma sırasında kontrol kaybı yaşayarak Roselawn yakınlarında düşmüş ve uçaktaki 68 kişinin tamamı yaşamını yitirmiştir. Kazaya ilişkin değerlendirmeler, uçuş kontrol yüzeylerinden aileronların (kanatçıkların) önünde ve de-icing botlarının gerisinde oluşan buz sırtının kanat akışını bozduğunu, bunun da ani ve beklenmedik aileron menteşe momenti değişimi ile kontrol kaybına yol açtığını ortaya koymuştur. İncelemelerde, uçağın donan çiseleme ortamında uzun süre kalmasının, sertifikasyon zarfının ötesinde bir buzlanma etkisi doğurduğu vurgulanmıştır (Flight Safety Foundation, 2017).

Bu kazada dikkat çeken nokta, teknik sorunun yalnızca buz birikimi değil, aynı zamanda üretici, işletmeci ve otorite arasında buzlanma tehlikesine ilişkin bilginin yeterince açık aktarılmamış olmasıdır. NTSB değerlendirmelerinde, ATR'nin daha önce bilinen bazı buzlanma etkilerini operatör dokümantasyonuna ve eğitim içeriğine yeterli şekilde yansıtmadığı; FAA'nin ise freezing rain ve benzeri Appendix C dışı koşullara ilişkin sertifikasyon ve operasyonel gereksinimleri yeterince kapsamadığı belirtilmiştir. Dolayısıyla American Eagle 4184, yapısal buzlanmanın tek başına değil, sınırlı sertifikasyon yaklaşımı ve eksik tehlike iletişimiyle birleştiğinde ölümcül hâle geldiğinin tarihsel açıdan en önemli örneklerinden biridir (Flight Safety Foundation, 2017).

2. Comair Uçuş 3272 (1997)

Comair Uçuş 3272, 9 Ocak 1997 tarihinde Embraer EMB-120RT tipi uçakla yaklaşma safhasında komutsuz yuvarlanma ve hızlı alçalma sonrasında Monroe yakınlarında düşmüş, uçaktaki 29 kişi yaşamını kaybetmiştir (Federal Aviation Administration, 2000). FAA (Federal Aviation Administration: Federal Havacılık İdaresi) raporuna göre, kanatlar üzerinde biriken ince ve pürüzlü buz tabakası ile flapların toplu durumda ve düşük hava hızında bulunmasının taşıma ve sürükleme üzerinde olumsuz birleşik etki yarattığını; otomatik pilot ayrılmasından sonra uçağın kurtarılamayan kontrol kaybına girdiğini belirlemiştir (Federal Aviation Administration, 2000).

Bu olay, buz koruma sistemi prosedürlerinin yanlış varsayımlara dayanmasının ne kadar kritik sonuçlar doğurabileceğini göstermiştir. Kaza öncesinde sektörde ve işletmede yaygın olan anlayış, de-icing botlarının belirli bir buz kalınlığına ulaşmadan çalıştırılmaması yönündeydi; ancak kazadan sonra yapılan çalışmalar, EMB-120 üzerinde modern bot sistemlerinde "buz köprüsü" riskinin düşünüldüğü kadar belirleyici olmadığını ve ilk buz belirtisinde aktivasyonun daha güvenli olduğunu ortaya koymuştur (Federal Aviation Administration, 2000). NTSB (National Safety Board: Ulusal Ulaşım Güvenliği Kurulu) ayrıca FAA'nin yeterli buzlanma sertifikasyon standartlarını oluşturmaması, üretici tarafından yayımlanan revize prosedürlerin operatör uygulamasına zorunlu biçimde aktarılmaması ve minimum hız gerekliliklerinin netleştirilmemesini kazanın oluşmasına neden olan temel nedenler olarak açıklamıştır (Federal Aviation Administration, 2000).

3. Air France Uçuş 447 (2009)

Air France Uçuş 447, 1 Haziran 2009 tarihinde Airbus A330-203 tipi uçakla Atlantik üzerinde seyir sırasında düşmüş ve uçaktaki 228 kişinin tamamı hayatını kaybetmiştir (BEA, 2012), (European Union Aviation Safety Agency, 2012). BEA nihai raporuna göre olay zincirinin başlangıcında, pitot tüplerinin buz kristalleri nedeniyle geçici olarak tıkanması sonucu ölçülen hava hızlarında tutarsızlık oluşmuş, bunun ardından otomatik pilot ve bazı koruma mantıkları devre dışı kalmıştır. Bu olay, klasik kanat buzlanmasından farklı olarak algılama ve uçuş verisi sistemlerindeki buzlanmanın insan-makine etkileşimi üzerinden ölümcül sonuç üretebileceğini göstermesi bakımından özgündür (BEA, 2012), (Skybrary, 2013).

Air France Uçuş 447 vakasında doğrudan ağır yapısal buz yükü kazanın nihai sebebi olarak öne çıkmasa da, buz kristali kaynaklı pitot tıkanması zincirleme karar hatalarını tetiklemiştir (BEA, 2012). Mürettebatın güvenilmez hız göstergesi sonrasında yüksek irtifa stol durumunu doğru teşhis edememesi ve uygun toparlama girdilerini sürdürememesi, teknik sorunun insan faktörü boyutuyla birleşerek kazaya dönüşmesine neden olmuştur (BEA, 2012). Bu yönüyle Air France Uçuş 447, buzlanma riskinin yalnızca dış yüzey koruma sistemleriyle sınırlı olmadığını, aynı zamanda sensör tasarımı, uçuş ekibi eğitimi ve anormal durum yönetiminin de buzlanma emniyeti kapsamında değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (BEA, 2012), (European Union Aviation Safety Agency, 2012).

4. Colgan Air Uçuş 3407 (2009)

Colgan Air Uçuş 3407, 12 Şubat 2009 tarihinde Bombardier DHC-8-400 tipi uçakla Buffalo yaklaşmasında düşmüş ve uçaktaki 49 kişi ile yerdeki 1 kişi olmak üzere toplam 50 kişi yaşamını yitirmiştir (National Transportation Safety Board, 2010). NTSB, kazanın muhtemel nedenini kaptanın stick shaker (levye sarsıcı) aktivasyonuna uygunsuz tepki vermesi ve bunun sonucunda gelişen aerodinamik stolden (tutunma kaybından) toparlanamaması olarak açıklamıştır (National Transportation Safety Board, 2010). Ayrıca mürettebatın hava hızını yeterince izlememesi, steril kokpit kurallarına uymaması, kaptanın etkili uçuş yönetimi sağlayamaması ve işletmenin buzlanma koşullarındaki yaklaşmalarda hava hızı seçimi ile yönetimine ilişkin yetersiz prosedürleri katkı faktörleri arasında sayılmıştır (National Transportation Safety Board, 2010).

Bu vaka, buzlanmanın doğrudan ana neden olup olmadığı tartışmalı olsa da, yaklaşma sırasında kar, hafif-orta buzlanma ve muhtemel buz birikiminin operasyonel bağlamın önemli bir parçası olduğunu göstermektedir (National Transportation Safety Board, 2009), (Kreindler & Kreindler LLP, 2026). NTSB sunum içeriğinde, buz birikiminin uçağın kontrol edilebilirliğini belirleyici ölçüde bozmadığı yönünde değerlendirmeler bulunmakla birlikte, şirket prosedürlerinin buzlanma koşullarında hız yönetimi açısından yetersizliği açık biçimde vurgulanmıştır (National Transportation Safety Board, 2009), (National Transportation Safety Board, 2010), (Kreindler & Kreindler LLP, 2026). Bu nedenle Colgan 3407, Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemi'nin veya hava koşullarının tek başına değil, uygunsuz stol tepkisi ve yetersiz operasyonel disiplinle birlikte kazaya zemin hazırladığını göstermektedir (National Transportation Safety Board, 2010).

5. Voepass Uçuş 2283 (2024)

Voepass Uçuş 2283, Ağustos 2024'te Brezilya'da ATR 72-500 tipi uçakla meydana gelen ve 62 kişinin ölümüyle sonuçlanan güncel bir kazadır (Mercopress, 2024). Ön rapor ve kamuya yansıyan soruşturma bulguları, uçuş sırasında ciddi buz birikimi yaşandığını, kokpit kayıtlarında "çok fazla buz" ifadesinin geçtiğini ve de-icing sisteminde arıza veya yetersiz performansa işaret eden bulgular bulunduğunu göstermektedir (Mercopress, 2024). Ayrıca meteorolojik bilgilerin kalkış öncesinde rota üzerinde şiddetli buzlanma ihtimalini gösterdiği de bildirilmiştir (Mercopress, 2024).

Bu kaza henüz nihai raporla sonuçlanmamış olsa da, mevcut bulgular tarihsel benzerlikler nedeniyle önem taşımaktadır (Mercopress, 2024). Buzlanma koşulları, sistem yönetimi ve performans bozulması başlıklarının American Eagle 4184 ile benzer çağrışımlar yaratması, buzlanma konusunda otuz yıllık emniyet gelişimine rağmen bazı temel risklerin sürdüğünü düşünülmektedir (Flight Safety Foundation, 2017), (Mercopress, 2024). Mürettebatın acil durum ilan etmemesi, buzlanma uyarılarının operasyonel kararlara ne ölçüde yansıdığı ve sistem arızasının bakım kayıtlarıyla ilişkisi gibi noktalar, bu vakanın nihai emniyet derslerini belirleyecek temel alanlar olarak öne çıkmaktadır (Mercopress, 2024).

BULGULAR VE TARTIŞMA

İncelenen beş vaka birlikte ele alındığında, buzlanmaya bağlı kazalarda tek bir baskın nedenden çok, birbirini güçlendiren emniyet zafiyetleri zincirinin rol oynadığı görülmektedir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010), (Mercopress, 2024). American Eagle 4184 ve Comair 3272'de yapısal buzlanma doğrudan aerodinamik kontrol kaybı üretmiş; Air France 447'de sensör buzlanması yanlış uçuş verisi üzerinden zincirleme insan hatalarını tetiklemiş; Colgan 3407'de ise buzlanma bağlamı içinde insan performansı ve prosedür yetersizliği belirginleşmiştir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010). Voepass 2283 ise, bu tarihsel örüntünün günümüzde de geçerliliğini koruduğunu düşündüren güncel bir örnek sunmaktadır (Mercopress, 2024).

Bu olaylar, Buz ve Yağmurdan Korunma Sistemleri arızasının veya yetersizliğinin çoğu zaman tek başına kazayı açıklamadığını göstermektedir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010). Asıl belirleyici unsur, teknik sınırlılık ile mürettebatın durumsal farkındalığı, eğitim seviyesi, hız yönetimi ve düzenleyici çerçeve arasındaki etkileşimdir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (European Union Aviation Safety Agency, 2012). Sertifikasyonun yalnızca bilinen belirli buzlanma zarflarına dayanması, üretici bilgisinin operatöre eksik veya gecikmeli aktarılması ve uçuş prosedürlerinin modern test sonuçlarına göre yeterince güncellenmemesi, ortak emniyet zafiyetleri olarak öne çıkmaktadır (Flight Safety Foundation, 2017), (Federal Aviation Administration, 2000).

Bir diğer ortak bulgu, erken önlemenin geç müdahaleden daha etkili olmasıdır (Federal Aviation Administration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000). Comair 3272 sonrası değişen bot aktivasyon yaklaşımı, buzlanmaya girdikten sonra belirli kalınlık beklemenin riskli olduğunu göstermiş; güncel düzenleyici eğilimler ise buz koruma sistemlerinin erken veya otomatik aktivasyonunu teşvik etmiştir (Federal Aviation Administration, 2000). Bu açıdan operasyonel felsefe, "buzu yönetmekten" çok "buzun etkili şekilde oluşmasını önlemek" yönünde şekillenmiştir (Federal Aviation Administration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000).

Buzlanma kaynaklı kazalar üzerine yapılan bu inceleme, havacılık emniyetinde teknik başarısızlıkların nadiren tek başına ölümcül sonuç yarattığını bir kez daha göstermektedir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010). Sistem mühendisliği bakış açısından değerlendirildiğinde, kazaların büyük kısmında ilk bariyer meteorolojik farkındalık ve

erken tanıma, ikinci bariyer doğru sistem aktivasyonu, üçüncü bariyer uygun hız ve uçuş zarfı yönetimi, dördüncü bariyer ise etkili eğitim ve düzenleyici gözetimdir (Federal Aviation Administration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000), (National Transportation Safety Board. (2010). Bu bariyerlerden birkaçının aynı olay içinde zayıflaması durumunda kaza olasılığı dramatik biçimde artmaktadır (Federal Aviation Administration, 2000), (Mercopress, 2024).

American Eagle 4184 ve Comair 3272 vakaları, sertifikasyon standardı ile gerçek atmosferik koşullar arasındaki farkın ölümcül olabileceğini göstermiştir (Flight Safety Foundation, 2017), (Federal Aviation Administration, 2000). Özellikle FAR Part 25, Ek C (Appendix C) dışı ortamların, geçmişte tasarım ve eğitim süreçlerinde yeterince temsil edilmemesi, hem üretici hem otorite hem de işletmeci seviyesinde güvenlik açıkları üretmiştir. Bu nedenle modern havacılıkta yalnızca mevzuata uygunluk değil, operasyonel gerçekliğe uygunluk da emniyet performansının temel ve esas ölçütü olarak değerlendirilmelidir (Federal Aviation Administration, 2000).

Air France 447 ve Colgan 3407 ise buzlanma bağlamında insan faktörünün merkezi rolünü daha görünür hâle getirmektedir (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010). Sensör verisinin bozulması veya levye sarsıcı aktivasyonu gibi yüksek iş yükü oluşturan durumlarda, mürettebatın temel aerodinamik kavrayışı, görev paylaşımı ve anormal durum yönetimi performansı kazanın seyrini belirlemektedir (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010). Dolayısıyla buzlanma emniyetinin sadece bakım ve donanım meselesi olarak görülmesi eksik kalmakta; eğitim felsefesinin de olumsuz hava şartlarında karar verme ve enerji yönetimini merkeze alacak şekilde geliştirilmesi gerekmektedir (European Union Aviation Safety Agency, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010).

Voepass 2283'ün güncel bir örnek olarak bu literatüre eklenmesi, özellikle bölgesel turboprop operasyonlarında buzlanma riskinin hâlen güncelliğini koruduğunu göstermektedir (Mercopress, 2024). Ön rapor düzeyindeki bilgiler bile, buzlanma uyarılarının, sistem performansının ve pilot kararlarının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır (Mercopress, 2024). Bu yönüyle kaza, geçmiş derslerin tamamen içselleştirilmediği veya operasyonel uygulamaya tam yansımadığı ihtimalini gündeme getirmektedir (Flight Safety Foundation, 2017), (Mercopress, 2024).

SONUÇ

Bu çalışmada incelenen American Eagle 4184, Comair 3272, Air France 447, Colgan Air 3407 ve Voepass 2283 vakaları, buzlanmaya bağlı uçuş kazalarının çoğunlukla çok faktörlü yapıda olduğunu göstermektedir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010), (Mercopress, 2024). İncelenen olaylarda teknik sistem arızası veya buz koruma yetersizliği çoğu zaman başlangıç tetikleyicisi olsa da, ölümcül sonucun ortaya çıkması genellikle mürettebat yanıt hataları, yetersiz hız yönetimi, eksik prosedürler ve sertifikasyon/düzenleme boşluklarıyla birlikte gerçekleşmiştir (Federal Aviation Administration, 2000), (BEA, 2012), (National Transportation Safety Board, 2010). Bu nedenle buzlanma emniyeti, yalnızca ekipman güvenilirliği üzerinden değil; insan, prosedür ve otorite üçgeni içinde değerlendirilmelidir (Federal Aviation Administration, 1997), (European Union Aviation Safety Agency, 2012).

Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki öneriler ön plana çıkmaktadır (Federal Aviation Administration, 1997), (Federal Aviation Administration, 2000), (European Union Aviation Safety Agency, 2012):

- Buz koruma sistemlerinin mümkün olan en erken aşamada, tercihen algılayıcı destekli veya otomatik mantıkla devreye girmesini sağlayacak tasarım yaklaşımları yaygınlaştırılmalıdır (Federal Aviation Administration, 2000).

- Mürettebat eğitimlerinde sadece buzlanmayı tanıma değil, buzlanma koşullarında enerji yönetimi, yaklaşma hızı disiplini, stol toparlama ve otomasyon dışı uçuş becerileri daha yoğun biçimde ele alınmalıdır (National Transportation Safety Board, 2010), (European Union Aviation Safety Agency, 2012).

- Sertifikasyon süreçlerinde supercooled large droplet, freezing drizzle ve freezing rain gibi Appendix C dışı veya sınır koşullar daha güçlü şekilde temsil edilmelidir (Flight Safety Foundation, 2017), (Federal Aviation Administration, 2000).

- Üretici tarafından yayımlanan kritik operasyonel revizyonların operatör prosedürlerine gecikmeden ve zorunlu biçimde yansıtılması için ulusal ve uluslararası otoriteler arası koordinasyon artırılmalıdır (Federal Aviation Administration, 2000), (European Union Aviation Safety Agency, 2012).

- Bakım kayıtları, arıza bildirimi kültürü ve operasyon öncesi meteorolojik risk değerlendirmesi, özellikle bölgesel turboprop filolarda daha sıkı denetlenmelidir (Mercopress, 2024), (Federal Aviation Administration, 2000).

Sonuç olarak, tüm bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, buzlanma problemi modern havacılıkta çözümlenmiş bir konu değil, sürekli güncellenmesi gereken değişken bir emniyet alanıdır. Teknik iyileştirme, eğitim, sertifikasyon ve düzenleyici çevikliğin birlikte ele alındığı bütünleşik yaklaşım benimsenmediği sürece benzer olayların tekrarlanma riski devam edecektir.

KAYNAKLAR

Aircraft Owners and Pilots Association. (2015, March). *WX watch: Lessons from Roselawn*. AOPA Pilot. https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2015/march/pilot/pe_wx

Civil Aviation Authority. (2000). Aircraft icing handbook (Version 1). Civil Aviation Authority, New Zealand.

Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile (BEA). (2012, July 5). Final report: Accident on 1st June 2009 to the Airbus A330-203 operated by Air France flight AF447, Rio de Janeiro–Paris (presentation).

European Union Aviation Safety Agency. (2012, July 4). *EASA welcomes the publication of the final report on the safety investigation into the accident of flight AF447*. Retrieved June 17, 2026, from https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/press-releases/easa-welcomes-publication-final-report-safety-investigation

Federal Aviation Administration. (1975). Aviation weather for pilots and flight operations personnel (AC 00-6A, Chapters 10–12: Icing, Turbulence, Thunderstorms). U.S. Department of Transportation.

Federal Aviation Administration. (1997, April). Inflight aircraft icing plan. United States Department of Transportation.

Flight Safety Foundation. (2017, October 18). *Hazardous ice*. Flight Safety Foundation, Aerosafety World. Retrieved June 18, 2026, from https://flightsafety.org/asw-article/hazardous-ice/

Federal Aviation Administration. (2000). *Embraer EMB-120RT, N265CA – Monroe, Michigan, 9 January 1997 (Transport Airplane Accident Lessons Learned)*. Lessons Learned from Civil Aviation Accidents. https://www.faa.gov/lessons_learned/transport_airplane/accidents/N265CA

Kreindler & Kreindler LLP. (2026, February 13). *Continental Connection/Colgan Air Flight 3407 crash – Buffalo, New York* (case summary). Retrieved June 17, 2026, from https://www.kreindler.com/cases/colgan-flight-3407-crash-buffalo-new-york

Mercopress. (2024, September 7). *Problem with anti-icing system detected in Voepass crash probe*. Retrieved June 18, 2026, from https://en.mercopress.com/2024/09/07/problem-with-anti-icing-system-detected-in-voepass-crash-probe

National Transportation Safety Board. (2010). *Loss of control on approach, Colgan Air, Inc., operating as Continental Connection Flight 3407, Bombardier DHC-8-400, N200WQ, Clarence Center, New York, February 12, 2009* (Aircraft Accident Report NTSB/AAR-10/01). https://www.ntsb.gov/investigations/Pages/DCA09MA027.aspx

National Transportation Safety Board. (2009, May 12). *Clarence Center, New York – Colgan Air Flight 3407 accident investigation update* (investigator-in-charge presentation). https://www.ntsb.gov/news/events/Documents/Clarence_center_ny-IIC-presentation.pdf

Skybrary. (2013, January–March). *Aircraft performance and handling characteristics in icing conditions* (Safety briefing). SKYbrary. https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3337.pdf

Total Training Support Ltd. (2016). *Module 11A: Turbine aeroplane, aerodynamics, structures and systems (Vol. 4, Issue 1, March 2016)*. Total Training Support Ltd.