



Uçak - Yıldırım Etkileşimi*

Eren Can Kişeci^{1**}, Elmas Salamcı²

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0002-0388-5575)

² Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0000-0003-2856-9402)

(Konferans Tarihi: 5-7 Mart 2020)

(DOI: 10.31590/ejosat.araconf23)

ATIF/REFERENCE: Kişeci, E. C. & Salamcı, E. (2020). Uçak - Yıldırım Etkileşimi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 177-187.

Öz

Yıldırım doğal bir elektriksel boşalma olayıdır. Yüksek akım ve gerilimin ani boşalması çevresi için tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Genellikle yıldırımlar bulutlar arasında, bulutun kendi içinde veya bulutla yeryüzü arasında gerçekleşir. Seyir halindeki hava araçları da yıldırım çarpma riskiyle karşı karşıyadır. Ticari havayolu uçakları kabaca her yıl iki defa yıldırım çarpmasına maruz kalmaktadır. Dolayısıyla yıldırım çarpması uçaklar için alışılmamış bir tehlike değildir ve uçuş güvenliğini hissedilebilir derecede tehlikeye sokabilmektedir. İletkenliği geleneksel metallere göre çok daha az olan yada iletkenlik özelliği bulunmayan karbon elyaf, cam elyaf, aramid elyaf gibi malzemelerin takviye olarak kullanıldığı kompozit malzemelerin havacılık sektöründe kullanımının artması, yıldırım kaynaklı hasarların riskini ve şiddetini arttırmaktadır. Uçakları yıldırım çarpması kaynaklı yanma, erime, patlama, delinme, delaminasyon, yakıt buharının alev alması vb. doğrudan etkilere ve aviyoniklerde bozulma ve hasarlara neden olan dolaylı etkilere karşı korumak gerekmektedir. Bu nedenle, yıldırım çarpma mekanizmasını ve uçakla yıldırım arasındaki etkileşimi anlamak gerekmektedir. Günümüze kadar bu konuda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada yıldırım-uçak etkileşimini anlamak amacıyla uçaklarda yıldırım çarpma vakalarıyla ilgili istatistiksel verilere değinilmiştir. Ek olarak, yıldırım çarpma mekanizmasının uçakta nasıl meydana geldiği ve uçak yapısalıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uçakların yıldırımdan korunması amacıyla belirlenen ve evrensel olarak da kullanılan yıldırım parametreleri ve uçakların yıldırım bölgelerinin belirlenme süreçleri ve kıstaslarına değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yıldırım Çarpması, Uçak Yıldırım Etkileşimi, Yıldırım Parametreleri, Yıldırım Bölgeleri, Yıldırım Kaynaklı Hasarlar.

Aircraft – Lightning Interaction

Abstract

Lightning is a natural electrical discharge phenomenon. Sudden discharge of high current and voltage can have dangerous consequences for the environment. Usually lightning strikes between clouds, inside the cloud itself, or between the cloud and the earth. On board aircraft are also at risk of lightning strikes. Commercial airline planes are exposed to lightning strikes roughly twice a year. Therefore, lightning strike is not an unusual danger for aircrafts and can endanger the flight safety. The increase in the use of composite materials in reinforcing compositions of materials such as carbon fiber, glass fiber, aramid fiber, whose conductivity is much less than conventional metals, or which do not have conductivity, increases the risk and severity of damage due to lightning. It is necessary to protect aircrafts against direct effects such as combustion, melting, explosion, puncture, delamination, ignition of fuel vapors etc. caused by lightning strikes and indirect effects that cause disruption and damage in avionics. It is necessary to protect the aircraft against the direct and indirect effects of lightning strike. Therefore, it is necessary to understand the lightning strike mechanism and the interaction between aircraft and lightning. To date, many studies have been done on this subject and in this study, statistical data on lightning strikes of aircrafts have been mentioned in order to understand the lightning-aircraft interaction. In

* Bu makale *International Conference on Access to Recent Advances in Engineering and Digitalization (ARACONF 2020)* de sunulmuştur.

** Eren Can Kişeci: Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye, ORCID: 0000-0002-0388-5575, eren.kiceci@gmail.com

addition, how the lightning strike mechanism occurred on the aircraft and its effects on aircraft structures were examined. Lightning parameters, which are determined to protect the aircraft from lightning and used universally, and the determination processes and criteria of the lightning zones of the aircraft are mentioned.

Keywords: Lightning Strike, Aircraft Lightning Interaction, Lightning Parameters, Lightning Zones, Lightning Damages.

1. Giriş

Yıldırım atmosferdeki ya da yeryüzündeki iki elektriksel olarak yüklü bölgenin geçici olarak yüklerinin eşitlendiği, doğal olarak gerçekleşen bir elektrostatik boşalmadır. Yıldırım anlık olarak gigajoule mertebesinde enerji bırakılmasına neden olur. Yıldırım çarpması esnasında boşalmanın yakınında gazlar genişler ve şok dalgası nedeniyle basınçta ani bir artış yaşanır. Yıldırımların çarptığı nesnelere büyük boyutta ısıya ve manyetik kuvvetlere maruz kalırlar. Yüklü bir alana yakın geçen uçak elektriksel bir boşalma başlatabilir. Yıldırım, bir ışık parıltısı, genellikle yanma kokusu ve gürültü ile birlikte görülür. Yıldırım çarpması yolcular ve mürettebat için korkutucu olabilir, ancak bir uçağa önemli fiziksel hasar nadirdir. Hasar genellikle antenlere, pusulalara, aviyoniklere ve kabuklarda meydana gelir. Alüminyum alaşımının iletken özellikleri nedeniyle, gövde Faraday kafesi gibi davranır ve yıldırım akımının uçağın iç bölgelerine girmesini engeller. Bununla birlikte, uçağın radom ve kuyruk dengeleyicilerine ve kontrol mekanizmalarına ve yüzeylerine zarar veren çok sayıda yıldırım çarpması olayı olmuştur [1], [2]. Boeing 787 ve Airbus A350 gibi daha yeni uçaklar, karbon elyaf gibi daha yüksek oranda kompozit malzemelerden üretildiğinden gövde ve kanatların elektriksel iletkenliğini düşmüştür. Üreticiler ayrıca, uçağın dış kısmında iyi iletkenlik sağlamak için kompozit malzemeye daha iletken metal medya ekleyerek bir çözüm geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada uçaklarla-yıldırım etkileşiminin anlaşılması amacıyla; havacılıkta yıldırım çarpma olayları, yıldırım oluşma mekanizmaları, yıldırımdan korumanın sağlanmasında kullanılan kritik yıldırım parametreleri ve yıldırım bölgelerinin tanımları, ayrıca yıldırım çarpmasının uçak yapılarında meydana getirdikleri hasar tiplerine değinilmiştir.

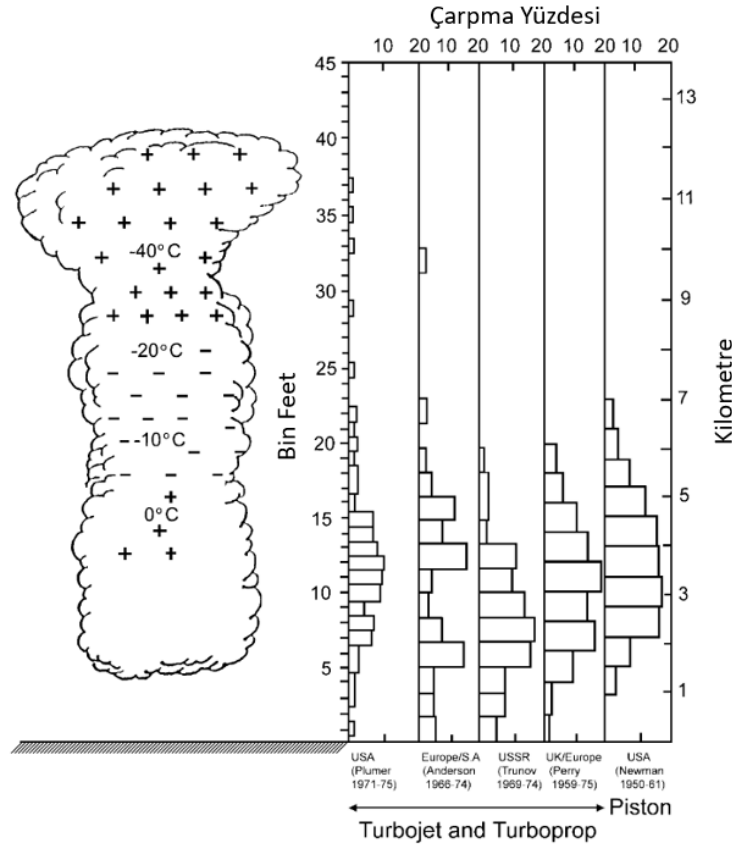
2. Havacılıkta Yıldırım Çarpma İstatistikleri

İstatistiksel değerler incelendiğinde, yaklaşık olarak yılda iki kere ticari uçaklara yıldırım çarptığı görülmektedir [3-5]. Tablo 1'de, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) ticari uçaklarının 1950 ve 1974 yılları arasında maruz kaldıkları yıldırım çarpma vakalarına ait çalışmalar verilmiştir. Bu çalışmalarda, toplam uçuş süreleri için uçakların farklı kısımlarına çarpan yıldırım sayıları görülmektedir. Görüldüğü üzere, yıldırım çarpma sıklığı yaklaşık olarak her 3000 uçuş saatinde bir gerçekleşmektedir. Uçuş irtifası, yıldırım çarpma olaylarında önemli bir parametredir. Ayrıca, kötü hava koşulları ve uçuş rotaları da yıldırım çarpması olaylarını etkilemektedir. Bu nedenle, askeri uçaklar güvensiz hava koşulları ve değişen uçuş rotalarından dolayı sivil uçaklara göre yıldırım çarpması olaylarına daha çok maruz kalmaktadır.

Şekil 1'de, irtifaya bağlı olarak uçakların maruz kaldığı yıldırım çarpma vakalarıyla ilgili beş çalışma verilmiştir. Görüldüğü üzere, yıldırım çarpma vakaları sıklıkla bulut seviyesi veya daha altı seviyelerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, uçaklar daha çok kalkış ve iniş sırasında yıldırıma maruz kalmaktadır. Pistonlu uçaklar, turbojet ve turboprop uçaklara göre daha düşük irtifalarda (10,000 ~ 15,000 feet) seyretmektedir ve bundan dolayı yüzdesel olarak daha fazla çarpmaya maruz kalmaktadır [6].

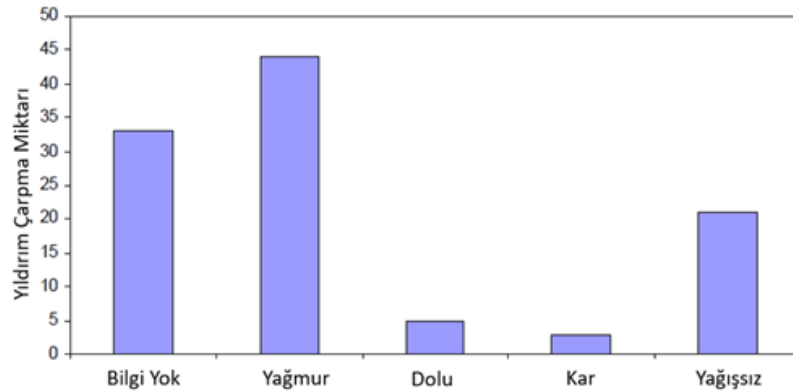
Tablo 1. ABD ticari uçaklarının 1950 - 1974 yılları arasında maruz kaldığı yıldırım çarpma vakaları [6]

	Newman (1950-1961)		Perry (1959-1974)		TOPLAM		
	Çarpma	Saat	Çarpma	Saat	Çarpma	Saat	Ortalama
Piston	808	2000000	-	-	808	2000000	2475
Turboprop	109	415000	280	876000	389	1291000	3320
Jet	41	427000	480	1314000	521	1741000	3340
Tümü	958	2842000	760	2190000	1718	5032000	2930



Şekil 1. Uçakların irtifaya bağlı olarak maruz kaldıkları yıldırım çarpması vakaları [6]

Yıldırımlar genellikle yağmurlu havalarda görülen bir olaydır. Şekil 2’de verildiği üzere, yağış olmadığı durumlarda da sıklıkla yıldırım çarpmalarının gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca kar veya dolu yağışı olduğu günlerde de yıldırım çarpmalarına rastlanmaktadır [7].



Şekil 2. Yıldırım Çarpması Hava Koşulları İlişkisi [7]

Şekil 3’te Lufthansa filosunun kompozit parçalarının tecrübe ettiği hasarlar gösterilmiştir. Verilen istatistikte Lufthansa’nın toplam filosunun 2006 yılında aldığı hasarların nedenleri belirtilmiştir ve yıldırım vakaları bakım-onarım bakış açısıyla ele alınmıştır [8]. Uçaklarda kaydedilen hasarların %17’den fazlasının yıldırım kaynaklı olduğu görülmektedir. Bu nedenle, yıldırım kaynaklı hasarlar bakım-onarım maliyetlerinin önemli bir parçasıdır.

İncelenen Lufthansa verileri 2006 yılına aittir ve bu filoda ağırlıklı olarak alüminyum gövde yapıları kullanılmaktaydı. Uçaklarda sadece dengeleyiciler, hareketli yüzeyler gibi bazı kısımlarda kompozit yapılar yer almaktaydı. Ancak buna rağmen kompozitlerin kullanıldığı bileşenlerde, yıldırımdan kaynaklı hasarların arttığı görüldü. All Nippon Havayolları’nın 767 uçağının saha tecrübelerindeki raporlarına göre, yıldırımdan dolayı oluşan hasarların yaklaşık olarak %70’inin onarıma ihtiyacı olanlar hasarlar olduğu görülmüştür [9]. Bakım - onarım masraflarını azaltmak uçak endüstrisi için önemli bir ihtiyaçtır. Bu nedenle, uçak gövdelerinde tamamıyla kompozit malzemelerin kullanılması yıldırım kaynaklı hasarları arttıracaktır [10].



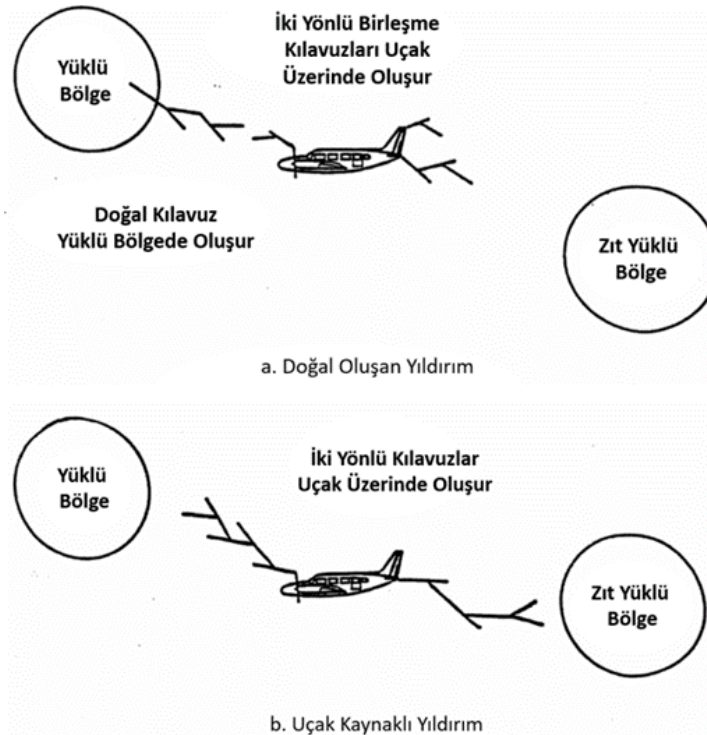
Şekil 3. Lufthansa filosunun kompozit parçalarının tecrübe ettiği hasarlar [8]

3. Uçak Yıldırım Arayüzü

Birbirine zıt polariteye sahip iki yüklü bölgenin, yüksek iletken bir hat boyunca elektriksel olarak boşalmasıyla yıldırım oluşur. Genellikle yıldırım, aşağı-yukarı yönlü hareket eden ve kılavuz adım olarak adlandırılan kıvılcımların şarjlı bölgeden yollanmasıyla başlar. Bu kılavuz adım, bir hava aracından, buluttan veya yeryüzündeki bir yapıdan kaynaklı olabilmektedir.

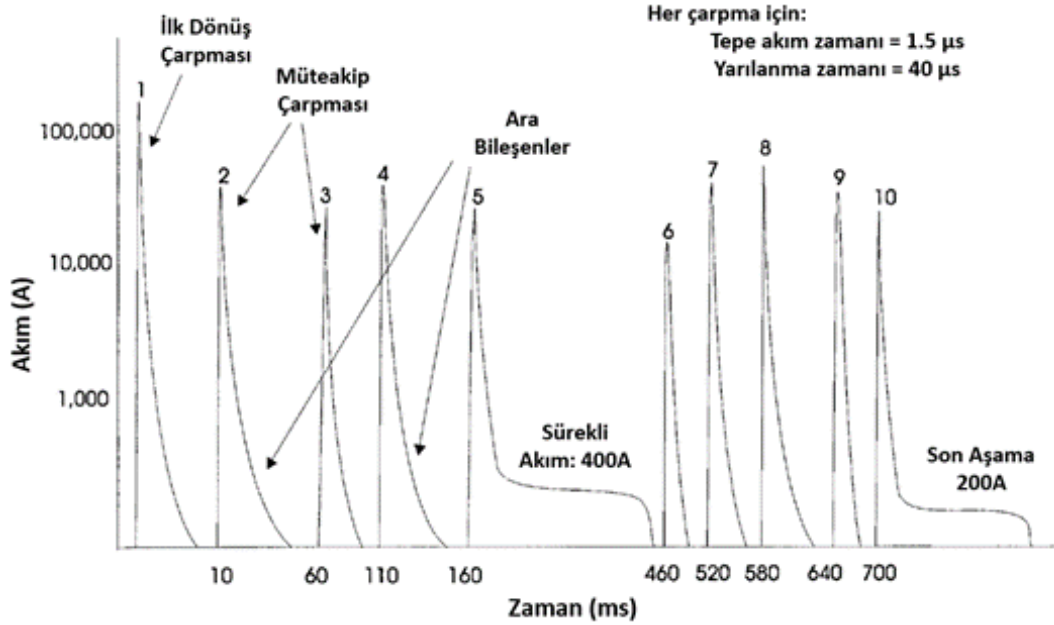
Çevredeki gazların termal olarak iyonlaşmasının sonucunda havada kılavuz oluşur. İki yüklü alanın arasındaki boşluğu bir araya getirerek doldurduktan sonra kılavuz nötralize olur. Bu olay geri dönüş çarpması olarak isimlendirilir. Bu süreçte kılavuz kanal çok yüksek elektrik akımının geçtiği iyonize bir patikaya dönüşür [11]. Bu enerji havanın ani genişlemesine ve akabinde geri dönüş çarpması formunda yoğun şimşek ve akustik şok meydana getirir. Bu mekanizma pozitif ve negatif yükler için gerçekleşebilir. Yıldırım deşarjı pozitif yükler gönderirse pozitif yıldırım, negatif yükler yollar ise negatif yıldırım olarak nitelenir. Eldeki verilere göre negatif yıldırımlar daha sık görülmektedir. Negatif yani elektron iyonlarının daha hızlı olması, fiziksel hasarı daha fazla ve müdahalesi daha zor sonuçlar meydana getirir [3], [6].

Yıldırım çarpması uçaklarda iki farklı mekanizma sonucu meydana gelir. Bunlar doğal yıldırımlar ve uçakla tetiklenen yıldırımlar şeklindedir. Şekil 4'te iki etkileşim mekanizması da tasvir edilmiştir. Uçakla tetiklenen etkileşimde, iki zıt yüklü bölge arasında uçmakta olan uçak etrafında elektrik alanı etkileyerek yıldırımın kendi üzerinde başlamasına neden olmasıyla meydana gelir. Uçak zıt yüklü bölgeler arasında seyir halinde iken normalde oluşan bir yıldırıma denk gelerek yıldırım çarpmasına da maruz kalabilir. Her iki yıldırım oluşma mekanizmasında da uçak sınır bölgelerinin şekilleri ve malzemeleri önemli rol oynamaktadır. Hava deniz seviyesinde ve yağışsız koşullarda 3×10^3 kV/m bozulma dayanımına sahiptir. Uçağın gökyüzünde bulunması bu bozunma değerinin düşürür. Radom, kanat uçları, motor kapakları, dikey ve yatay dengeleyiciler yıldırım çarpma ihtimalinin yüksek olduğu uçak bölümleridir. Yıldırım kanalının uçakla buluştuğu noktaya bağlanma noktası adı verilir. Bu nokta yüklü bulutla yüksüz yeryüzü arasında geçiş noktası görevini yerine getirir.



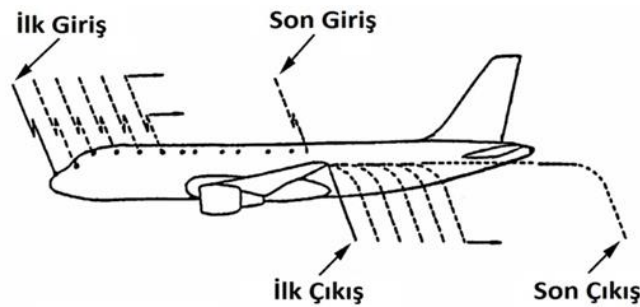
Şekil 1. Yüklü bölgeler arasında uçağa çarpan yıldırımın oluşma mekanizmaları [12]

Yüklü bölge ve uçak arasında yıldırım kanalı kurulduğunda yüksek miktarda enerji uçağa doğru akar. Elektriksel akım dalga formları özellikle girişim enerjisinin temsili için kullanılır. Yıldırım akım miktarının belirlenmesi bulut – bulut arasındaki etkileşimlerin ölçülmesinin zorluğu nedeniyle bulut – yeryüzü arasındaki yıldırımlardan elde edilir. Şekil 5'te tipik bir yıldırım akım dalga formu görülmektedir [4]. Yıldırım darbe akımları itici ve sürekli olarak iki sınıfa ayrılabilir. Yıldırım çarpması genellikle 1-11 arası itici çarpmaların meydana gelmesiyle sonlanır. İlk çarpma 200kA kadar yüksek olabilir. İlk çarpmayı takip eden geri dönüş çarpmaları genellikle 100kA'dan daha düşük amperlerde gerçekleşir. Çarpmalar 0-500 μ sn arasında bir sürede sonlanır. Müteakip çarpmalar daha yüksek yükselme oranına ve daha düşük tepe değerlerine eğilimlidir. Bazı çarpmaların devamında sürekli akım transferi gerçekleşebilir. 100-400 A gibi görece düşük olan bu akım değerleri 100msn uzun sürmesi nedeniyle göz ardı edilemeyecek miktarda enerjinin aktarılmasına neden olur.



Şekil 5. Yıldırım akım dalga formu modeli [4]

Uçak seyir halindeyken yıldırım çarptığında, çarpma bölgesi uçağın hızı nedeniyle sabit kalmayıp sürekli kayabilir. Bu kayma olayına süpürülme kanalı denir ve Şekil 6'da görüldüğü gibi birden fazla noktada çarpma meydana gelebilir. Bu kanalda yıldırım çarpması düzenli hareket etmez daha çok ayırık düzensiz adımlar halinde ilerler. Şekil 7'de metalik yüzeyde süpürülme kanalı nedeniyle oluşan bağımsız yanık izleri görülmektedir. Süpürülme kanalı, yıldırımın sadece uçağın sınır bölgelerine çarpmasına rağmen geride kalan bölgeleri de tehlikeye sokması nedeniyle korunması gereken yüzeylerin artmasına neden olur.



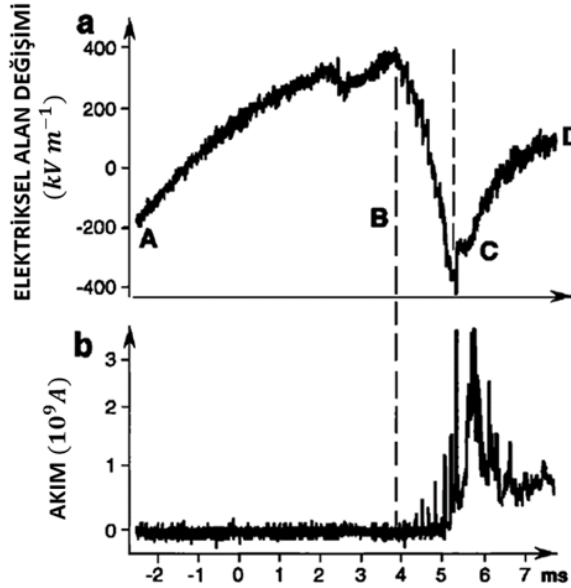
Şekil 6. Süpürülme kanalı bağlantı noktalarının karakteristik patikası [12]



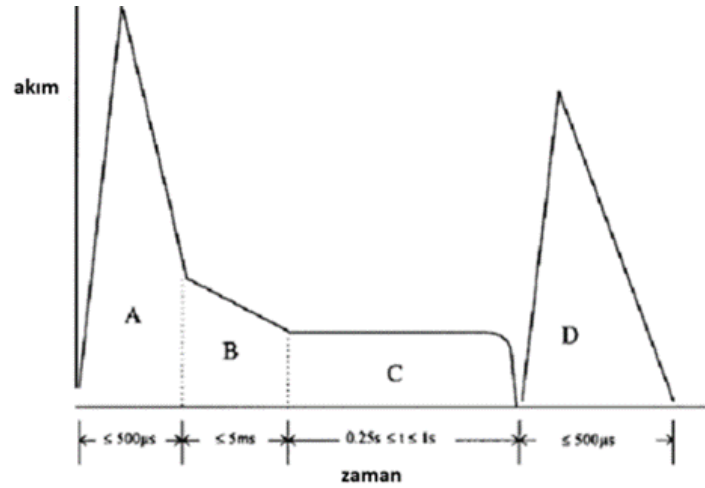
Şekil 7. Metalik uçak kabuğu üzerinde süpürülme kanalı kaynaklı yıldırım çarpması hasarları [9]

4. Yıldırım Dalga Şekilleri ve Etki Bölgelerinin Belirlenmesi

Yıldırım çarpmalarını anlamak ve çarpmalara karşı önlem almak amacıyla kritik dalga formu parametreleri denilen özellikler sınıflandırılmıştır. Uzun bina yapılarının çatılarına yerleştirilen dirençli paralel devreler yardımıyla yıldırım kaynaklı voltaj ve akım değerleri ölçülür. Elde edilen veriler üzerinde çeşitli sadeleştirmeler yapılarak yıldırım kaynaklı tepe akımı ve verilen enerji gibi çeşitli parametreler hesaplanabilir. Bu konuda yapılan çalışmalara ve sonuçlarına birçok farklı kaynaktan ulaşılabilmektedir [3], [13-15]. Seyir halinde bulunan bir hava aracında ise bu işlem daha zordur. 1960'lardan bu zamana kadar birçok araştırmada uçak özelinde meydana gelen yıldırım çarpma verileri toplanmaya çalışılmıştır [5]. Bu kapsamda uçaklar elektriksel alan değişimini kayıt eden, manyetik alan yoğunluğunu ölçen, akımı miktarını kayıt altına alan çeşitli ekipmanlar ve özel kameralarla donatılıp yıldırımların çokça meydana geldiği fırtına bulutlarına doğru uçurulmuşlardır. Şekil 8'de tipik olarak bu uçuşlarda elde edilen elektriksel alan değişimi ve akım grafikleri gösterilmektedir [16]. Elde edilen ölçüm verileri kullanılabilir hale getirilmesi amacıyla Şekil 9'da gösterilen ideal dalga ve dalga parametrelerine indirgenir.



Şekil 8. C-160 uçağında ölçülen yıldırım kaynaklı veriler; elektrik alan değişimi (a), akım miktarı (b) burunda akım verisi [16]



• A BİLEŞENİ (İlk Geri Dönüş Çarpması)

Tepe Değer	: 200kA (±10%)
Verilen Enerji	: $2 \times 10^6 A^2s$ (±20%)(in 500μs)
Toplam Süre	: ≤ 500μs

• B BİLEŞENİ (Yarı Değerli Akımı)

Maks. Yük Aktarımı	: 10 Coulombs (±10%)
Ortalama Genlik	: 2kA (±20%)
Toplam Süre	: ≤ 5ms

• C BİLEŞENİ (Sürekli Akım)

Genlik	: 200 – 800A
Yük Aktarımı	: 200 Coulombs (±20%)
Toplam Süre	: 0.25s – 1s

• D BİLEŞENİ (Müteakip Geri Dönüş Çarpması)

Tepe Değer	: 100kA (±10%)
Verilen Enerji	: $0.25 \times 10^6 A^2s$ (±20%)(in 500μs)
Toplam Süre	: ≤ 500μs

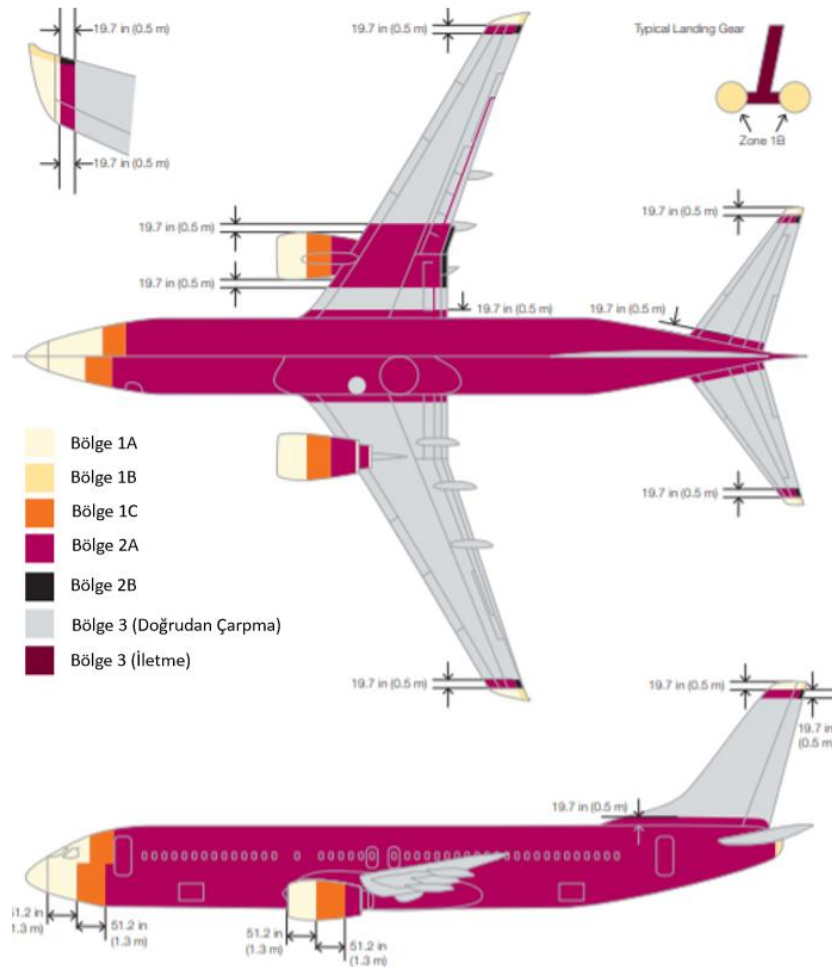
Şekil 9. Yıldırım testleri için dalga form bileşenleri [4]

Yıldırımın uçak üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkilerinin incelenmesi için gerçekleştirilecek şiddetli doğal yıldırım çarpmalarını temsil edebilecek ideal akım bileşenlerinin belirlenmesi gerekir. Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE) havacılık sektörüyle ilgili yayınladığı ARP yayın serisinde yıldırım çarpması ile ilgili uygulamalara yer vermiştir. ARP5412 ile yıldırımların etkilerinin testlerle anlaşılabilmesi amacıyla gerekli olan yıldırım dalga form parametrelerini yayınlamışlardır [4]. Bu veriler voltaj dalga formları ve akım dalga form bilgilerini içermektedir. İdeal voltaj dalga formlarının kullanılması yıldırım bağlantısının anlaşılması konusunda kullanılacak olan elektrik alanın ifade edilmesi için kullanılır. Voltaj yükseldikçe, elektriksel alan elektriksel kırılıma uğrayacağı ana kadar artmaktadır. Kırılma, cam elyaf gibi yalıtkan bir kabuğun açılması ya da yalıtkan bir yüzeyde patlama olarak gerçekleşebilir. Genel olarak, voltaj dalga formları dielektrik kırılmaların çalışmasında tercih edilir. Akım dalga formları ise, direnç ısınması gibi akım baskın olguların değerlendirilmesi için gereklidir. Doğal bir yıldırımın hem voltaj hem akım özelliklerinin test laboratuvarlarında aynı anda simüle edilebilmesi oldukça zordur. Bu nedenle test amacına göre iki olgudan birinin seçilmesi gerekmektedir. Metal/kompozit malzemeler üzerindeki fiziksel hasarı görmek için, akım kaynaklı direnç ısınmalarına sebep olan akım dalga formları uygulanmalıdır. Tablo 2’de A, B, C ve D ideal akım bileşenlerini yıldırımın doğrudan etkilerinin çalışılması konusunda kullanılmaktadır.

Tablo 2. Dolaylı yıldırım etkilerinin testi için kullanılan akım bileşenlerinin tanımları [12]

Parçalar	Tanımlar
Parça A	200kA'lık yüksek akımlı ilk geri dönüş çarpması, $2 \times 10^6 A^2 s$ değerinde verilen enerji, düşük irtifalarda daha sık rastlanan $50 \mu s$ 'den düşük yükseliş zamanı ve kısa süreli ($< 500 \mu s$)
Parça A _h	150kA tepe akımı değerinde geçiş bölgesinin ilk geri dönüş çarpması, $2 \times 10^6 A^2 s$ değerinde verilen enerji, $37.5 \mu s$ 'den düşük yükseliş zamanı ve kısa süreli ($< 500 \mu s$)
Parça B	2kA değerinde orta değer akımlı, ilk geri dönüş çarpması ve/veya yeniden çarpmalar
Parça C	200A ve 800A arasında akım genliği olan sürekli akım, 0.25 ve 1.0s arasında sürer, 200 coulomb yük transferi, büyük yük aktarımını temsil eder
Parça C*	C bileşeninin modifiye edilmiş hali, ortalama 400A'dan daha fazla akım taşır.
Parça D	100kA değerinde yüksek akımlı mütakip çarpma, $25 \mu s$ 'e kadar yükseliş zamanı ve kısa süreli

Yıldırımın yoğunluğu ve oluşum sıklığı uçak yüzeyinde çarptığı yere bağlıdır. Dolayısıyla, tasarımcılar ilk çarpma ve ikinci çarpma arasındaki yoğunluk, olası yerler, süpürülmüş çarpma etkilerinin farkında olmalıdırlar Voltaj değişimi üzerinde yapılan araştırmalar sayesinde hava araçlarının hangi bölgelerinin hangi yıldırım çarpmalarına maruz kalabileceği tahmin edilebilmektedir. ARP5414 ile yardımıyla tipik bir hava aracı için yıldırım bölgeleri çıkarılabilir. Şekil 10'da örnek bir taşıma uçağı için yıldırım bölgeleri tasvir edilmiştir [1]. Tablo 3'de yıldırım bölgelerinin kısa tanımları verilmiştir. Yüksek çarpılma ihtimali olan burun, dikey dengeleyici gibi uçak uç bölgeleri Bölge 1 olarak ifade edilir ve bu bölgelerde şiddeti en fazla olan A yıldırım dalgası dikkate alınır. Daha az riskli bölgeler, Bölge 2 olarak sınıflandırılır ve şiddeti daha az olan D yıldırım dalgaları bu bölgelerin değerlendirilmesi için tercih edilir. Bölge 1 ve Bölge 2 gibi yıldırım çarpmasının olası olduğu bölgeler arasında kalan kısımlar Bölge 3 olarak sınıflandırılır ve çarpma yaşanmasa da yıldırım kaynaklı yüksek akımların taşınma olasılığı bölgelerdir.



Şekil 10. Tipik bir yolcu uçağının yıldırım bölgeleri [1]

Tablo 3. Yıldırım bölgeleri ve kısa tanımları [12]

Yıldırım Bölgesi	Tanım
1A	İlk geri dönüş çarpması bölgesi
1B	Uzun tutunmalı ilk geri dönüş çarpması bölgesi
1C	İlk geri dönüş çarpması için geçiş bölgesi
2A	Süpürülmüş çarpma bölgesi
2B	Uzun flaş tutunmalı süpürülmüş çarpma bölgesi
3	1A, 1B, 1C, 2A veya 2B bölgesine dahil olmayan ve yıldırım kanalı ile buluşması olası olmayan bölgeler

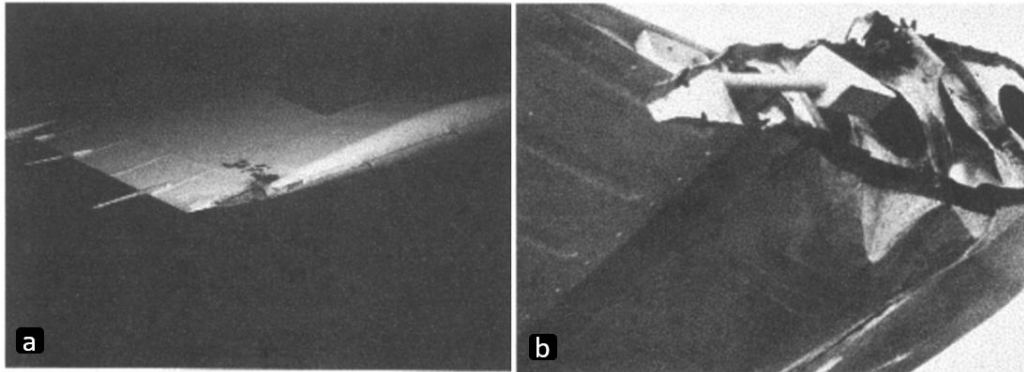
Tablo 4. Yıldırım bölgeleri ve bu bölgelerde kullanılacak test dalga form takımları [12,17]

Yıldırım Bölgesi	Akım Bileşenleri
1A	A, B, C*
1B	A, B, C, D
1C	A _h , B, C*, D
2A	D, B, C*
2B	D, B, C
3 [†]	A, B, C, D
† Akım katı bir bağlantı ile uygulanır, ark kullanılmaz	

5. Uçak Yapılarında Yıldırım Kaynaklı Hasarlar

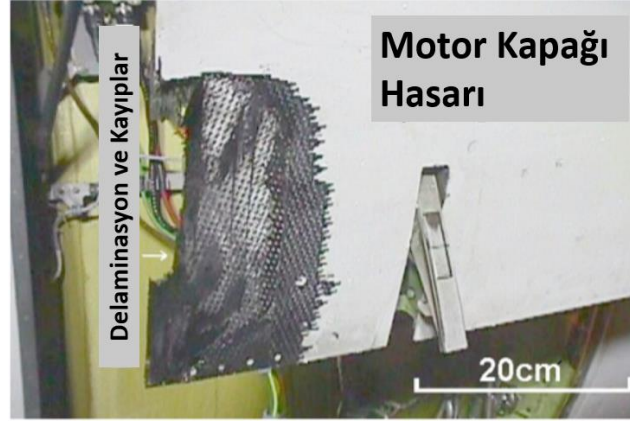
Yıldırım çarpmalarının uçakta oluşturduğu etkiler iki başlık altında toplanır. Bunlar dolaylı ve doğrudan etkilerdir. Doğrudan etkiler uçak yapılarında ve/veya uçak ekipmanlarında fiziksel hasarlara neden olan etkilerdir. Yüksek akım nedeniyle uçak parçalarında buharlaşma, yanma, erime, havaya uçuş, ayrışma vb. etkiler doğrudan etkilere örnek olarak verilebilir. Ayrıca uçak içerisinde geçmekte olan borulama ve kablaj benzeri iletken sistemlerde yüksek akım geçmesi kaynaklı hasarlarda doğrudan etkiler altında incelenmektedir. Ekipman ve elektriksel devrelerde meydana gelen süreksizlikler ve dalgalanma kaynaklı sorunlar ise dolaylı etkiler altında işlenir.

Uçak yapıları düşünülürken, doğrudan etkiler daha fazla önem arz etmektedir. Hem geleneksel metalik yapılarda hem de kompozit malzemeden üretilen parçalarda ciddi hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu hasarlar; direnç ısınması, çarpma noktasında süblimleşme, erime, bağlantı noktalarında ark atlaması, manyetik kuvvet kaynaklı etkiler, çarpma esnasında oluşan şok dalgası ve yakıt tankının patlaması gibi farklı formlarda ayrı ayrı ya da aynı çarpmada topluca gerçekleşebilir [6], [18-20]. Şekil 11.'de yıldırım çarpmasının metalik uçak parçaları üzerinde oluşturduğu örnek bir hasar görülmektedir. Şekil 11a'da uçak kabuğu üzerine takılan bir saptırıcıda meydana gelen hasar, Şekil 11b'de ise cam elyaftan üretilen kanat ucunun yıldırım çarpması sonucu oluşturduğu şok dalgası kaynaklı hasar bariz biçimde görülmektedir [21].



Şekil 11. Yıldırım çarpması kaynaklı hasar alan metalik uçak parçaları; saptırıcı hasarı (a), kanat ucu hasarı (b) [21]

Şekil 12. ve Şekil 13.'de ise kompozit malzemelerden üretilen uçak parçalarında meydana gelen hasarlar görülmektedir [10]. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozitlerden oluşan parçalarda, yüksek yıldırım akımı kaynaklı; ayrışma, delaminasyon, reçinenin yanması ve parça köşelerinin yok olması söz konusudur. Bu tip hasarlarda klasik kompozit tamir yöntemlerinin kullanılmaması sonucu parçaların tamamen değiştirilmesi gerekmektedir.



Şekil 12. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit motor kapağında yıldırım kaynaklı hasar [10]



Şekil 13. Karbon elyaf takviyeli polimer kompozit kanatçık parçasında yıldırım kaynaklı hasarlar [10]

4. Sonuç

Yüksek akım ve gerilimin ortaya çıktığı yıldırım olayı çevresine zarar verdiği gibi seyir halindeki bir uçağa da çarparak ciddi hasarlara neden olabilir. Yıldırımlar uçakları doğrudan ve dolaylı birçok etki altında bırakır. Bu etkilerden korunmak amacıyla yıldırımın uçakla olan etkileşimini anlamak gerekir. Yıldırım mekanizmasının uçakla olan etkileşimini, uçakta meydana gelen yıldırım kaynaklı hasarları, uçakların yıldırımdan korunması için oluşturulan yıldırım parametreleri ve parametrelerin kullanım esaslarına bu çalışma kapsamında değinilmiştir. Tüm bu bilgilerin farkındalığında uçakların yıldırıma karşı optimum şekilde korunmasının geliştirilmesi ve yıldırım çarpmasının uçaklar için bir risk olmaktan çıkması için gerekli çalışmalara devam edilmesi havacılık sektörü için son derece önem arz etmektedir.

Kaynakça

- [1] Sweers, G., Birch, B., & Gokcen, J. (2012). Lightning strikes: protection, inspection, and repair. *Aero Magazine*, 4, 19-28.
- [2] Maggio, Christopher R.; Marshall, Thomas C.; Stolzenburg, Maribeth (2009). "Estimations of charge transferred and energy released by lightning flashes". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 114 (D14): D14203.
- [3] Gabrielson, B. C. (1988). *The aerospace engineer's handbook of lightning protection*. Interference Control Technologies.
- [4] ARP5412, S. A. E. (2005). Aircraft lightning environment and related test waveforms. *Society of Automotive Engineers, Aerospace Recommended Practice, PA, Revised, 2*.
- [5] Uman, M. A., & Rakov, V. A. (2003). The interaction of lightning with airborne vehicles. *Progress in Aerospace Sciences*, 39(1), 61-81.
- [6] Fisher, F. A., Plumer, J. A., & Perala, R. A. (1989). *Aircraft lightning protection handbook*. LIGHTNING TECHNOLOGIES INC PITTSFIELD MA.
- [7] O'Loughlin, J. B., & Skinner, S. R. (2004). *General aviation lightning strike report and protection level study*. Office of Aviation Research, Federal Aviation Administration.
- [8] Blohm, H. (2007). *Lufthansa Perspectives on Safe Composite Maintenance Practices*. Presented at the FAA Damage Tolerance and Maintenance Workshop, May 9th – 11th, 2007, Amsterdam.
- [9] Nakayama, N. (2009, June). Field experience: Lightning strike damage of ANA B767. In *4th FAA/EASA/Boeing/Airbus Joint Workshop on Safety and Certification, Tokyo*.
- [10] Yamanaka, J. (2009, June). JAL Perspective on Application & Field Experiences for Composite Structure. In *3rd FAA/EASA/Industry Composite Damage Tolerance and Maintenance Workshop*.
- [11] Bazelyan, E. M., & Raizer, Y. P. (1997). *Spark discharge*. CRC press.

- [12] ARP5414, S. A. E. (2018). Aircraft Lightning Zoning. *Society of Automotive Engineers, Aerospace Recommended Practice, PA, Revised*
- [13] Uman, M. A. (2001). *The lightning discharge*. Courier Corporation.
- [14] Heidler, F., Zischank, W., Flisowski, Z., Bouquegneau, C., & Mazzetti, C. (2008, June). Parameters of lightning current given in IEC 62305-background, experience and outlook. In *29th International Conference on Lightning Protection* (Vol. 23, p. 26).
- [15] Rachidi, F. (2004). The quandary of direct measurement and indirect estimation of lightning current parameters. *Impulse*, 7(24), 11.
- [16] Moreau, J. P., Alliot, J. C., & Mazur, V. (1992). Aircraft lightning initiation and interception from in situ electric measurements and fast video observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 97(D14), 15903-15912.
- [17] ARP5416, S. A. E. (2005). Aircraft Lightning Test Methods. *Society of Automotive Engineers, Aerospace Recommended Practice, PA*
- [18] Plumer, J. A. and Robb, J. D. (1982). The Direct Effects of Lightaing on Aircraft. *IEEE Transactions on Electromagnetic Comptability*, EMC-24(2), pp. 158-172.
- [19] Reid, G. W. (1993). Mechanical damage to aircraft structures from lightning strikes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 207(1), 1-14.
- [20] Rupke, E. (2002). Lightning direct effects handbook. *Lightning Technologies Inc., Pittsfield*.
- [21] Tudor, D. (2001). *A review of the severe lightning threat* (No. 2001-01-2888). SAE Technical Paper.