

**YILDIRIMIN UÇAKLARA ETKİLERİ
VE
KORUNMA YÖNTEMLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Servet İNCE**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

MAYIS 2003

**YILDIRIMIN UÇAKLARA ETKİLERİ
VE
KORUNMA YÖNTEMLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Servet İNCE

504931335

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2003

Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Kevork MARDİKYAN

Doç. Dr. Cevdet IŞIK

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında, lisans ve yüksek lisans eğitimi boyunca, değerli yardımlarını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Sayın Doç. Dr. Özcan Kalenderli'ye, tüm yüksek lisans çalışmalarım sırasında maddi, manevi desteğini her zaman yanımda hissettiğim değerli arkadaşım Elk. Müh. Dr. Ömer Gül'e, sevgi ve destekleriyle her zaman yanımda olan, bu çalışmanın asıl sahibi sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2003

Servet İNCE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Yıldırım Bulutunda Yüklerin Oluşumu	1
1.2. Atmosferik Elektrik Alanı	4
1.3. Yıldırım Olayı	5
1.4. Yıldırım Akımı ve Yıldırım Boşalması	7
1.4.1. Boşalmanın oluşumu	7
1.4.2. Bulut-toprak arası yıldırım boşalması	9
1.4.2.1. Toprağa negatif kutbiyetli yıldırım boşalması	10
1.4.2.2. Toprağa pozitif kutbiyetli yıldırım boşalması	11
1.4.3. Bulut içinde ve bulutlar arası yıldırım boşalmaları	12
1.5. Yıldırım Düşmesi ile İlgili Olaylar	13
1.6. Yıldırımın Etkileri	14
2. UÇAKLARA YILDIRIMIN ETKİLERİ	15
2.1. Uçakların Karşılaştığı Elektriksel Etkiler	15
2.1.1. Çarpma olasılığı	15
2.1.2. Uçakların yıldırıma rastlaması	16
2.1.3. Uçakların tetiklediği yıldırım	18
2.1.4. Süpürme kanalı oluşumu	18
2.1.5. Uzaktaki bir yıldırımın etkisi	19
2.1.6. Yıldırımın çarpma bölgeleri	20
2.1.7. Statik elektriklenme	20
2.2. Atmosferik Elektriksel Olayların Uçağa Etkileri	21
2.2.1. Doğrudan etkiler	21
2.2.2. Dolaylı etkiler	22
2.3. Kokpitteki Etkiler	23
2.4. Motordaki Etkileri	24
2.5. Personel	26
3. YILDIRIMIN ETKİLERİNDEN KORUNMA YÖNTEMLERİ	28
3.1. Doğrudan Etkilerden Korunma Yöntemleri	28
3.1.1. Yönlendirme çubukları	28
3.1.2. Boşalma uçları	30
3.1.3. Topraklama iletkenleri	33
3.2. Dolaylı Etkilerden Korunma Yöntemleri	34

3.2.1. Tasarım ölçütleri	36
3.2.2. Donanımların konumu sayesinde korunma	36
3.2.3. Kabloların konumu sayesinde korunma	37
3.2.4. Korumasız bir kablolama sisteminde endüklenen gerilim ve Akımlar	37
3.2.5. İletim hattı etkileri	39
3.2.6. Manyetik alan bölgeleri	40
3.2.7. Gerilim ve akımın hesaplanmasındaki temel noktalar	41
3.3 Ekranlama	42
3.3.1. Ekranların topraklanması	42
3.3.2. Ekran transfer işlevleri	44
3.4 Koruma Elektrotu	47
3.5 Zener Diyotlar	48
3.6 İleri Geçirgen Diyotlar	48
3.7 Lineer Olmayan Dirençler	49
4. UÇAK SİSTEMLERİNE UYGULANAN YILDIRIM DENEYLERİ	50
4.1 Yıldırım Etki Bölgeleri	50
4.2 Yıldırım Etki Bölgelerinin Belirlenmesi	51
4.3 Yıldırım Deneyi Darbe Şekilleri	52
4.3.1 Akım dalga şekilleri	52
4.3.1.1 A akım bileşeni	54
4.3.1.2 B akım bileşeni	55
4.3.1.3 C akım bileşeni	56
4.3.1.4 D akım bileşeni	58
4.3.1.2 E akım bileşeni	60
4.3.2 Gerilim dalga şekli	60
4.3.2.1 A gerilim dalga şekli	60
4.3.2.2 B gerilim dalga şekli	61
4.3.2.3 C gerilim dalga şekli	62
4.3.2.4 D gerilim dalga şekli	62
4.4 Dalga Şekillerinin Uygulama Bölgeleri	63
4.5 Deney Donanımı	64
4.6 Uçak Elektronik Sistemlerine Yönelik Yıldırım Deneyleri	65
4.6.1 Doğrudan ve dolaylı yıldırım etkileri	66
4.6.2 Nitelik deneyleri	66
4.7 Yüksek Gerilim Deneyi	67
4.8 Yüksek Akım Deneyi	68
4.8.1 Yüksek akımın doğrudan etkileri (nitelik deneyleri)	70
4.8.2 Yüksek akımın dolaylı etkileri (nitelik deneyleri)	71
4.8.3 Gerçek uçaklarda dolaylı etkilere yönelik deneyler	72
4.9 Yıldırım Elektromanyetik Darbe (LEMP) Deneyi	73
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	76
EK A	78

KISALTMALAR

FAA	: Federal Aviation Administration
AMM	: Aircraft Maintenance Manual
EMP	: Elektromanyetik Darbe
LEMP	: Yıldırım Elektromanyetik Darbesi
NEMP	: Nükleer Elektromanyetik Darbe

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Uçak bölgelerine uygulanan darbe şekilleri.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Farklı uzay yönlerinde meydana gelen yıldırımlı havalarda yıldırım olaylarının yüzde olarak miktarı.....	3
Şekil 1.2 : Bir rüzgarlı havada atmosferik alan şiddetinin değişimi.....	4
Şekil 1.3 : Apsis üzerindeki alan şiddeti değerlerinin aşıldığı süre.....	5
Şekil 1.4 : Öncü boşalmada yıldırım ucunun incelenmesi.....	6
Şekil 1.5 : Yıldırım akımının zamana göre değişimi.....	8
Şekil 1.6 : Yıldırım akımının (tepe değerinin) sıklık derecesi.....	9
Şekil 1.7 : Ard arda birkaç yıldırım darbesinin akım dalga şekli.....	11
Şekil 1.8 : Pozitif kutbiyetli yıldırım darbesi.....	12
Şekil 1.9 : Bir uçağa etki eden bulutlar arası yıldırım boşalmaları.....	13
Şekil 1.10 : Yıldırımlı havalarda elektrik alan şiddetinin değişimi.....	14
Şekil 2.1 : Uçağın kılavuz kanala yaklaşması.....	16
Şekil 2.2 : Kılavuz kanalın uçağa doğru yön değiştirmesi.....	17
Şekil 2.3 : Uçak üzerinden tamamlanan geri dönüş çarpması.....	17
Şekil 2.4 : Tetiklenmeye hazır bir alan gelişimi.....	18
Şekil 2.5 : Süpürme kanalı oluşumu.....	19
Şekil 2.6 : Bir uçak kanadındaki statik boşalma uçları (static discharger) ...	22
Şekil 2.7 : Yıldırım çarpmasının motorun alevlenmesine neden oluşu.....	25
Şekil 2.8 : Olası çift motor alevlenmesi.....	25
Şekil 2.9 : Kokpit bölgesine çarpan yıldırım.....	26
Şekil 3.1 : Radom bölgesi yönlendirme çubukları.....	29
Şekil 3.2 : Yönlendirici çubuk yıldırım deneyi.....	29
Şekil 3.3 : Yönlendirici çubuk bulunmayan radomdaki yıldırım hasarı.....	30
Şekil 3.4 : Uçak kanatlarında kullanılan boşalma ucu (static wick) fotoğrafları.....	31
Şekil 3.5 : Boşalma uçları ve bağlantı yerleri.....	32
Şekil 3.6 : Örnek bir topraklama iletkeni bağlantı detayı.....	34
Şekil 3.7 : Yakıt tankındaki topraklama noktaları.....	35
Şekil 3.8 : Bir kabloda değişen manyetik alanda endüklenen gerilim.....	38
Şekil 3.9 : A ile D bölümleri arasında yıldırım arkı olasılığının en yüksek olduğu bölgeler.....	40
Şekil 3.10 : Ekranın iki uçtan da topraklanmadığı durumda endüklenen gerilimler.....	42
Şekil 3.11 : Ekranın bir uçtan topraklandığı durumda endüklenen gerilimler.....	43
Şekil 3.12 : Çeşitli ekranlama tipleri.....	46
Şekil 4.1 : Çarpma evreleri ile yıldırım akımları.....	53
Şekil 4.2 : Akım dalga şeklinin bileşenleri.....	53
Şekil 4.3 : A akım bileşeni dalga şekli.....	55

Şekil 4.4	: B akım bileşeni dalga şekli.....	56
Şekil 4.5	: Doğrudan etki deneyleri için kullanılan örnek dalga şekli.....	56
Şekil 4.6	: Doğrudan etki deneyleri için kullanılan örnek dalga şekli.....	56
Şekil 4.7	: Analiz amaçlı kullanılan bir kare dalga.....	57
Şekil 4.8	: Örnek dalga şekli.....	57
Şekil 4.9	: Örnek dalga şekli.....	57
Şekil 4.10	: C* bileşeninin uygulandığı akım dalga şekli.....	58
Şekil 4.11	: Sönümlü salınımlı dalga şekli.....	59
Şekil 4.12	: Tek kutuplu darbe şekli.....	59
Şekil 4.13	: Analiz ve dolaylı etki deneyler için kullanılan D akım bileşeni dalga şekli.....	60
Şekil 4.14	: A gerilim darbe şekli.....	61
Şekil 4.15	: B gerilim darbe şekli.....	61
Şekil 4.16	: C gerilim darbe şekli.....	62
Şekil 4.17	: D gerilim darbe şekli.....	62
Şekil 4.18	: Marx tipi darbe gerilimi üretici.....	67
Şekil 4.19	: Gerçek uçak üzerinde 4,2 MV'luk atlamanın görüntüsü.....	68
Şekil 4.20	: Yüksek darbe akımı üretici.....	69
Şekil 4.21	: Darbe akımı üretici eşdeğer devresi.....	69
Şekil 4.22	: Gerçek uçak üzerinde darbe akımı deneyi için kurulacak düzenler.....	73
Şekil A.1	: Düzgün bir alanda yalıtkan silindirin alan hesabı.....	78

SEMBOL LİSTESİ

H	: Manyetik alan şiddeti (A/m)
I	: Yıldırım akımının tepe değeri (kA)
I₀	: Ortalama yıldırım akımı (kA)
e	: Endüklenen gerilim (V)
E	: Elektrik alanı (V/m)
V	: Potansiyel (V)
r	: Yıldırım kanalına olan uzaklık (m)
α	: Zaman sabiti (s^{-1})
β	: Zaman sabiti (s^{-1})
ε	: Dielektrik sabiti
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği (H/m)
t	: Zaman (s)
l	: Kablo uzunluğu (m)
h	: Kablonun zeminden yüksekliği (m)

YILDIRIMIN UÇAKLARA ETKİLERİ VE KORUNMA YÖNTEMLERİ

ÖZET

Yıldırım kaçınılmaz bir doğa olayıdır. Hava taşımacılığının başladığı ilk yıllardan beri hem uçakların hem de içindeki uçuş ekibi ve yolcuların yıldırımın etkilerinden korunması önemli bir sorun olarak ele alınmıştır.

Son yıllardaki hava taşımacılığı sektöründeki hızlı büyüme, uçak üretiminde geliştirilen tekniklerle uçakların maliyetlerinin düşmesi ve taşımacılığın ekonomik bir düzeye gelmesiyle mümkün olmuştur. Ekonomi ve güvenlik her endüstri alanında olduğu gibi havacılıkta da önemli bir optimizasyon sorunudur.

Uçaklar insan emniyetini ve konforunu tam karşılayabilecek şekilde üretilebilir. Ancak bunun maliyeti hava taşımacılığını ekonomik olmaktan çıkartır. Önceki yıllarda daha kalın metallerden yapılmış, kontrol ve kumanda sistemleri mekanik olan ağır gövdeli uçaklar, yapım ve malzeme teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak hafiflemiş, üretim maliyetleri oldukça düşmüştür. Kullanılan yalıtkan özellikli fiber-karbon kompozit malzemeler ve elektronik kontrol sistemleri, uçaklardaki doğrudan ve dolaylı yıldırım etkilerinin önemini arttırmıştır.

Yıldırımın doğrudan etkileri daha çok yıldırım akımının termik etkisi nedeniyle uçak malzemelerinde meydana getirdiği bozulmalar biçiminde ortaya çıkar. Yıldırım akımının geçişini kolaylaştıran yönlendirme çubukları, topraklama bağlantıları ve uçakta biriken statik yüklerin boşalmasını kolaylaştıran boşalma uçları en etkin koruma yöntemleridir.

Yıldırımın dolaylı etkileri, uçağa çarpan ya da uzakta gerçekleşen bir yıldırım olayının manyetik alanının uçak elektronik sistemlerinde oluşturacağı istenmeyen akımların, sistemlerin devre dışı kalmasına veya görevlerini tam olarak yerine getirememesine neden olması şeklinde ortaya çıkar. Ekranlama ve topraklama bu etkilerin azaltılmasında kullanılan en önemli koruma yöntemidir. Kullanılan elektronik malzemelerin çalışma frekanslarının yıldırım darbesinin oluşturduğu frekanslardan etkilenmeyecek şekilde seçilmesi de dolaylı etkilerden korunmak için alınabilecek tedbirlerden biridir.

Bu koruma yöntemlerinin etkinliği , yıldırım darbesinin benzeri darbelerin, uçakların modelleri üzerindeki deneyleri ile belirlenir. Malzemelerin ve sistemlerin hangi şartlarda deneneceği ve yeterlilikleri sivil havacılık kuralları ve standartlarıyla belirlenmiştir.

İncelenen korunma yöntemleri yıldırımın doğrudan ve dolaylı etkilerini tamamen ortadan kaldırmamakla birlikte uçuş güvenliğinin sağlanması için yeterli korumayı

sağlamaktadır. Ancak uçak teknolojisi sürekli bir gelişim içindedir. Kullanılan malzemelerdeki gelişmeler, uçuş güvenliğini ve konforunu arttırıcı yeni sistem tasarımları, yıldırım etkilerine karşı yeni koruma önlemlerinin bulunması sorununu da beraberinde getirecektir.

LIGHTNING EFFECTS IN AIRCRAFTS AND PROTECTION METHODS

SUMMARY

Lightning is an unavoidable natural phenomenon. Protection of both the aircraft and crew and passengers inside has been most important concern since aviation started.

High rate increase in air transportation in recent years has become possible with fast developments in aircraft production technology reduced the cost of product which brings high economic conditions down. Economy and security is one of the most important optimization subjects in aviation as in most other sectors.

Aircrafts are able to manufacture in excellent condition to cover all security and passenger comfort requirements. This makes production inefficient and uneconomical. Aircraft weight been reduced as we compared with former heavy mechanic aircrafts due to developments in production technologies and materials. Nonconductive materials such as carbon fiber composites and sensitive avionic systems used in aircrafts have increased the importance of the protection problem.

Direct effects of lightning strike to the aircrafts exist as some damages because of high lightning current thermal effects. Most effective protection methods for direct effects are using diverter strips which guides to lightning current to travel over the fuselage, installing bonding straps which provides available roots for lightning current and installing static dischargers which makes easier current and static electric charges dissipate from aircraft.

Indirect effects of lightning exist as effect of electromagnetic field formation because of direct lightning current to the aircraft or lightning strike occurred in somewhere close. This effects cause inefficient performance of aircraft avionic systems. Grounding and bonding are the most effective protection way to reduce indirect effects of this kind of electromagnetic field effects. Another protection method is using suitable electronic devices in avionic components which are not affected by high lightning strike frequency.

Efficiency of protection method has to be tested on aircraft proportional models under lightning pulses simulated in high voltage laboratory. Standards and requirements are determined by aviation authority.

Protection methods considered in this study do not completely prevent aircrafts from direct and indirect effects of lightning but these methods obtain safe flight operation. Aeronautical engineering is in continuous improvement. New improvements in materials used in aircraft or new systems used for better flight safety and passenger comfort are going to be faced with new lightning protection problems in the future.

1. GİRİŞ

Yıldırım, en bilinen ve en tanınmış doğal bir elektriksel boşalmadır. Yüksek akım ve yüksek gerilimli yani büyük güçlü fakat kısa süreli bu boşalma çevresi için zararlı olmaktadır. Yıldırımlar, bulut içinde, bulutlar arasında veya bulutla yer arasında olur. Yıldırım, başta uçaklar olmak üzere tüm hava taşıtları için tehlikedir. Uçakları yıldırımın doğrudan ve dolaylı etkilerinden korumak gerekir. Bunun için yıldırım, uçağı, etkilerini ve davranışlarını bilmek, incelemek amacıyla çokça araştırma yapılmaktadır [1-4].

Uçaklar kompleks yapılı araçlardır. Bu nedenle bazı yaklaşımlar yaparak yıldırımın uçağı etkilerini incelemek çok kolay değildir. İncelemelerde genelde üç temel yaklaşım benimsenmiştir. Bunlar;

1. Yıldırım arkının uçakla bağlantısı ve ilerleyişi,
2. Yer istasyonlarında ve laboratuvarlarda yapılan yıldırım deneyleri,
3. Elektromanyetik dalgaların uçağın elektronik donanımları ile etkileşimidir.

Bu tez çalışmasında yıldırım, uçak yıldırım ilişkisi, yıldırımın uçaklara etkileri, uçakların yıldırımdan korunması ve konuyu araştırmak ve geliştirmek için yapılan deneyler araştırılmış, incelenmiş ve sunulmuştur. Bu bölümde öncelikle kısaca yıldırım boşalması hakkında bilgiler verilmiştir.

1.1 Yıldırım Bulutunda Yüklerin Oluşumu

Yıldırım, yıldırım bulutu ile yeryüzü arasında, bulutun içindeki yük merkezleri arasında veya buluttan buluta olan bir elektriksel boşalmadır. Yıldırım, doğanın en heyecan verici ve en şaşırtıcı olaylarından biridir. Dünyanın çeşitli bölgelerine düşen yıldırım sayısı atmosferik koşullara bağlı olarak değişiklik gösterir. Dünyaya dakikada yaklaşık 1800 civarında yıldırım düşmektedir. Kuzey ve Güney kutuplarına hemen hemen hiç yıldırım düşmezken Ekvator bölgesine sıklıkla yıldırım düşmektedir (örneğin Uganda Kumpala'da yıldırımlı gün sayısı yılda 242 dir) [5, 6].

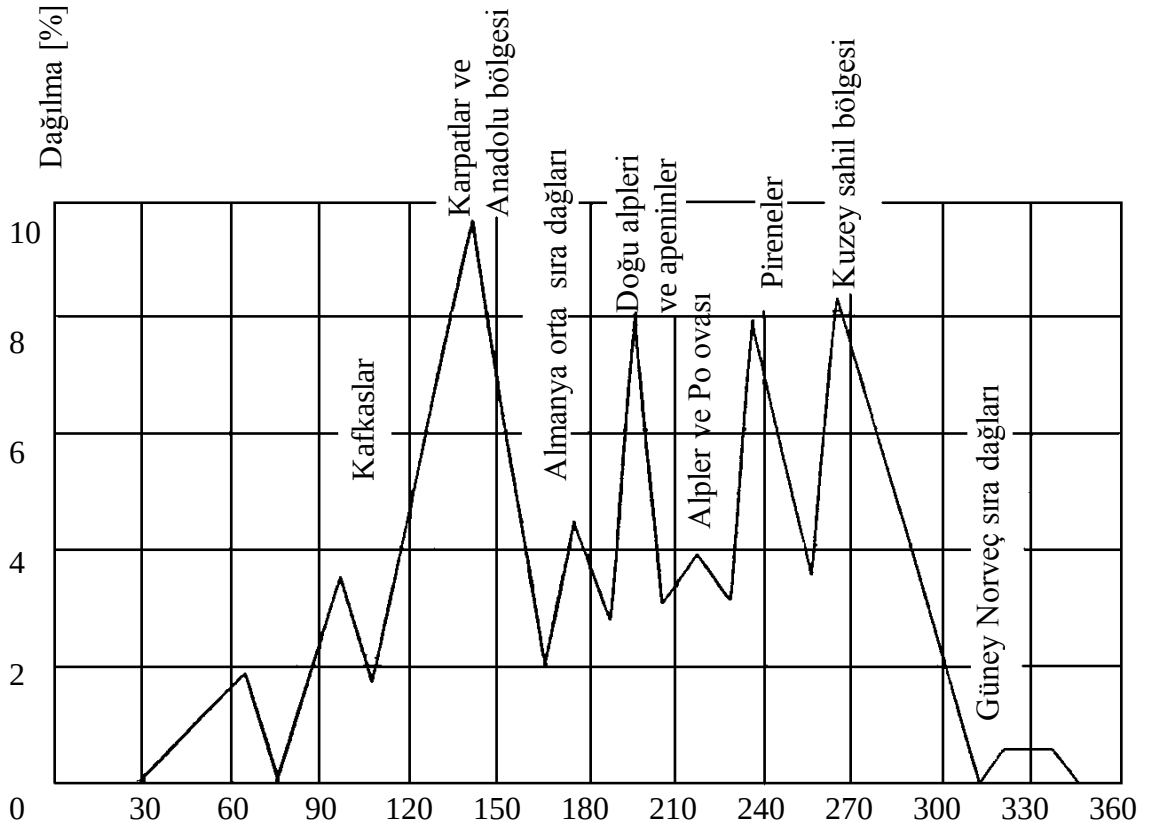
Eski Yunanlılar, yıldırım boşalmalarının Zeus'un silahı olduğuna inanırlardı. Romalılar ise yıldırımın Jupiter'in Vulcan tarafından yapılan silahı olduğuna inanıyorlardı. İskandinavlıların Thor adını verdikleri bir yıldırım tanrısı vardı. Bunların dışında da yıldırım ve gök gürültüsü pek çok eski uygarlıkta ve mitolojide yer almaktadır. Aristo, yıldırım olayını dünya ile ay arasındaki boşlukta, ateş ile hava arasındaki dengenin değişimi olarak açıklamaya çalışmıştır. Uzun yıllar sonra, Leonardo da Vinci, yıldırımın bulutların çarpışmasının bir sonucu olduğunu söylemiştir [5].

İngiliz bilim adamı William Wall “elektrik boşalmasının kıvılcım ve sesi ile yıldırıma benzediğini söyleyen ilk kişi olmuştur (1708). 18. yüzyıldan beri yıldırım olayı üzerinde çalışan pek çok araştırmacı bulunmaktadır. Benjamin Franklin, 1749'da, çalışmaları sonunda elektrik akımı ile yıldırım boşalması arasındaki benzerliği söylediği çalışmalar yapmıştır. Franklin, 1760'ta Philadelphia'da Mr. West binasına yıldırım çarparken etkinliğini kanıtladığı "yıldırım yakalama çubuğu (bugün Franklin çubuğu veya yakalama ucu olarak söylenen koruma elemanı)" ile bir yıldırımdan koruma sistemi tasarlamıştır. Ayrıca, yıldırım boşalmaları üzerine çalışan ve 1753 yılında yıldırım çarpması sonucu ölen St. Petersburg'lu Profesör Richmann, sonradan Lichtenberg şekilleri olarak adlandırılan şekilleri keşfeden Lichtenberg, ilk Klidonografi yapan Peters, yıldırım boşalmalarının fotoğrafını çekmek için dönen kamerayı geliştiren Boys, ilk yıldırım boşalması simülatörünü yapan Steinmetz, darbe generatörünü (üreticini) geliştiren Marx ve daha pek çok kişi bu konuda çalışmalarda bulunmuştur [5].

Yıldırımın büyük bir elektrik boşalması olduğu, uzun yıllardan beri bilinmektedir. Yıldırımlı hava genellikle atmosferde ancak meteorolojinin “kararsız” diye adlandırdığı bir durumun meydana gelmesi halinde oluşur. Böyle bir durum, toprağa yakın yüksekliklerdeki sıcak ve nemli hava tabakalarının üstteki bir soğuk hava tabakasının altına girmesi halinde kendini gösterir. Bu durum ya yazın fırtınalı havalarda (hava kütlesi orajı), ya da soğuk bir hava kütesinin bir önceki hava durumundan arta kalan sıcak nemli hava kütesinin üzerine kayması ile meydana gelir (cephe orajı) [7].

Rüzgar kanallarında sıcak nemli hava, bulut oluşması sonucunda hızlı akımlar halinde yukarı doğru yükselir. Bu rüzgar kanalları nispeten keskin şekilde sıralanmış

olan toplam oraj bölgesine göre oldukça küçük bir saha kaplarlar. Bunların genişliği birkaç kilometre kadardır. Kararsız durumun ana koşulu mevcut olduğu sürece sönen her rüzgar kanalının ardından yakınında bir yenisi oluşur. Rüzgar kanalları içersinde meydana gelen şiddetli hava akımları sonucunda bir elektrik yük ayrışması, yani pozitif ve negatif yüklerin ayrılması olayı meydana gelir. Elektriksel olayların en fazla meydana geldiği bölgelerin daha çok izotermi civarında yani yükselen hava kütlelerinin donma noktasının altındaki derecelere denk geldiği bilinmektedir.



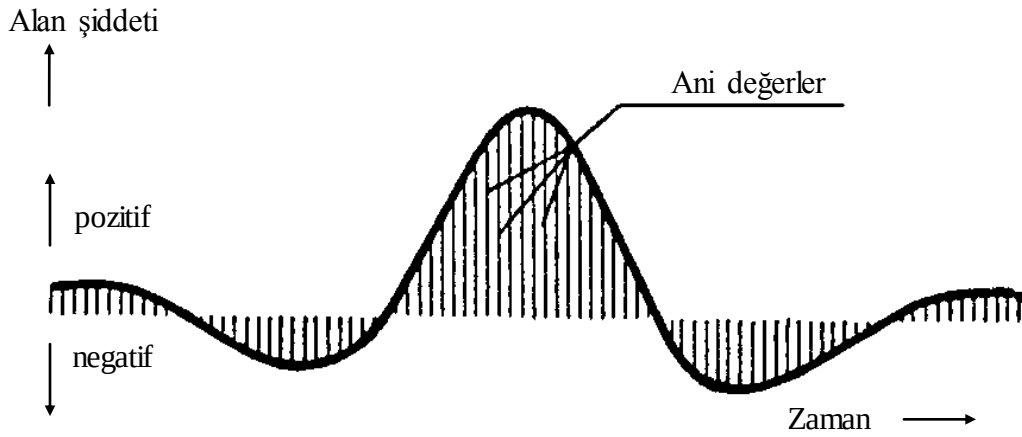
Şekil 1.1 Farklı uzay yönlerinde meydana gelen yıldırımlı havalarda yıldırım olaylarının yüzde olarak miktarı [6].

Negatif yüklü ince su taneciklerinin “sisin” pozitif yüklü büyük su damlacıklarından ayrılması olayının (Leonard şelale elektriklenmesi olayının) burada büyük önem taşımaya rağmen yüklerin ayrılmasında tek olay olmayacağı sonucu çıkarılabilir. Rüzgar kanallarının oluşumunda dağlık arazi koşulları kolaylaştırıcı etki yapar. Yön tayin edebilen cihazlar yardımıyla saptanan yıldırımlı havaların daha çok belli başlı dağ sıraları yönlerinde olduğu tespit edilmiştir. Yıldırımlı hava olaylarının sayısı genellikle kuzeyden güneye gidildikçe azalmakta denizlerden uzaklaştıkça

artmakta, orta ve yüksek dağ sıraları boyunca düz araziye göre belirgin bir şekilde fazlaşmaktadır [6].

1.2 Atmosferik Elektrik Alanı

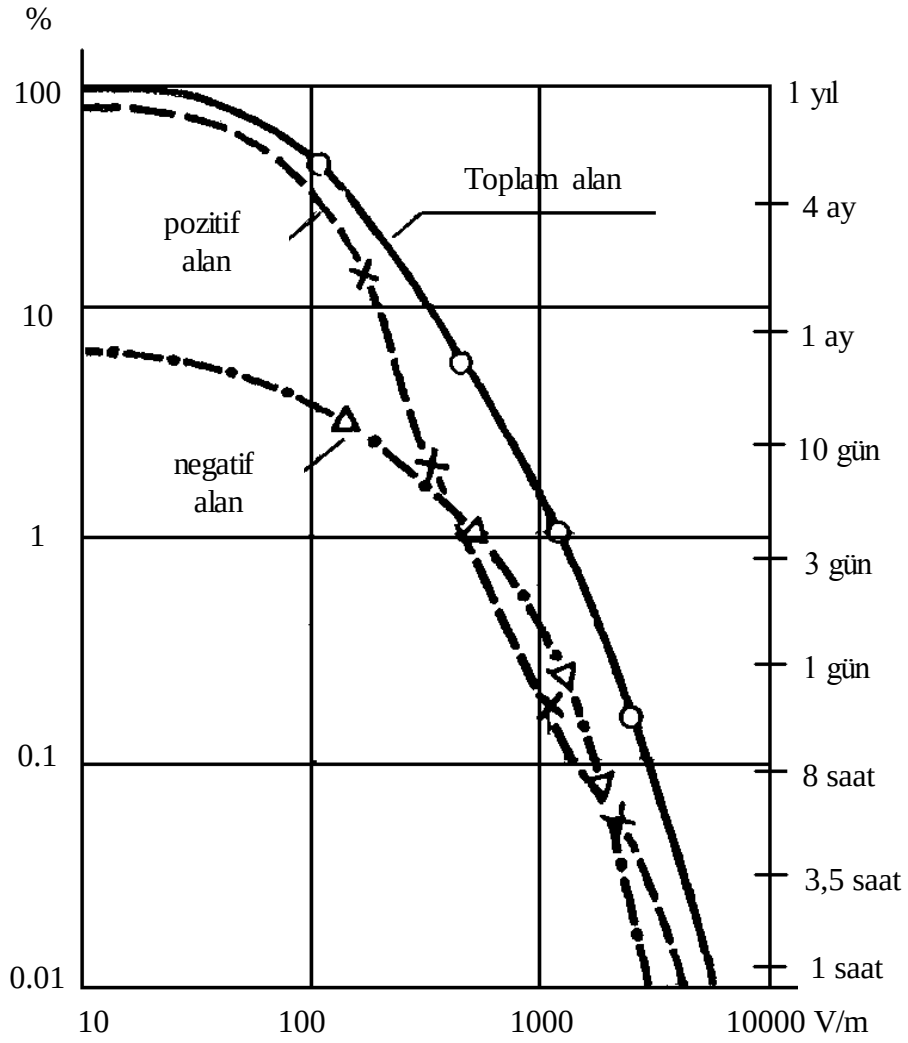
Yıldırımlı hava olaylarının başlangıç aşaması olarak kabul edilebilecek ve yıldırımlı hava olayları bakımından tam olgunlaşmamış sayılabilecek fırtınalı, sağanaklı havalar gibi nispeten önemsiz atmosferik olaylar sadece arazi üzerinde daima mevcut olan atmosferik alanın değişmesine ve yükselmesine sebep olurlar.



Şekil 1.2 Bir rüzgarlı havada atmosferik alan şiddetinin değişimi [6].

Şekilde atmosferik olaydan önce alan şiddetinin yeryüzüne yönelmiş olduğu ve yaklaşık 150-200 V/m mertebesinde olan güzel hava alan şiddetinin, atmosferik olayın yaklaşması ile işaretini (yönünü) nasıl değiştirdiği ve tekrar pozitif tarafa yönelerek atmosferik olayın en şiddetli durumunda nasıl pozitif ve büyük değerler aldığı görülmektedir. Alan şiddetinde meydana gelen bu değişimler olayın geçişinden sonra hiç beklenmedik şekilde ters yönde ve simetrik olarak tekrar eder.

Yeryüzüne yakın yüksekliklerde atmosferik alan şiddetini kaydetmek suretiyle yapılan ölçmeler alan şiddetinde meydana gelen büyük artışların sadece kısa bir süre olduğunu ve düz arazide gözlenen en yüksek alan şiddetinin ise, havanın 30 kV/cm olarak bilinen istatistiksel delinme dayanımının (her metreye 3 milyon Volt) çok altında olduğunu göstermiştir [6].

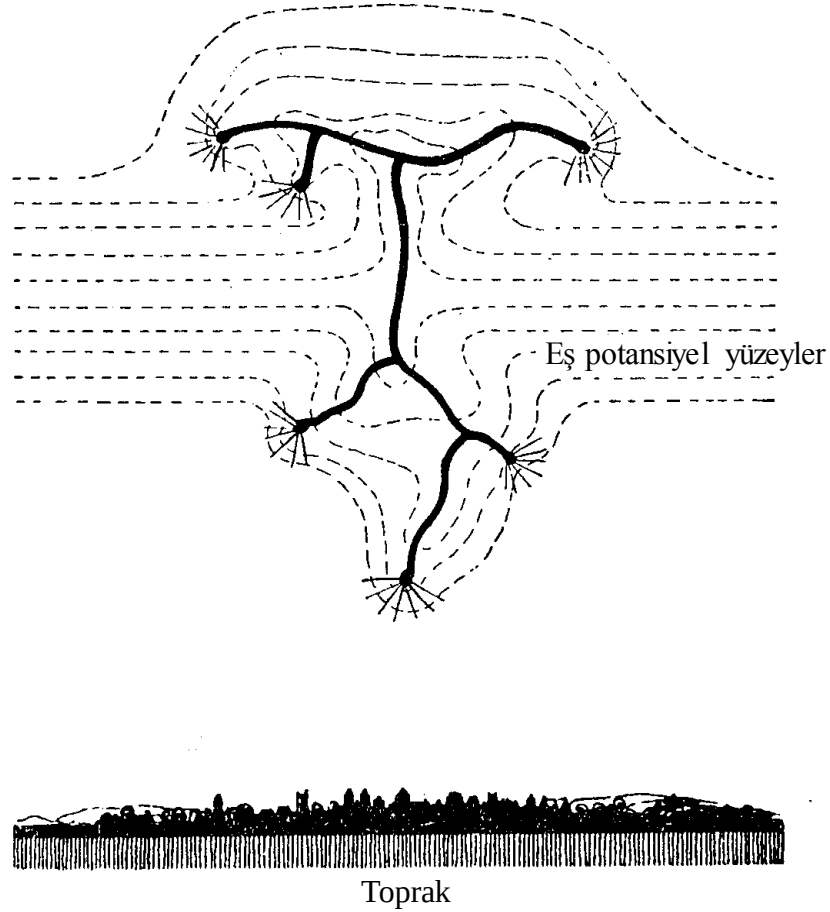


Şekil 1.3 Apsis üzerindeki alan şiddeti değerlerinin aşıldığı süre [6].

1.3 Yıldırım Olayı

Yıldırımlı bulutların (oraj bulutlarının) içinde aktif rüzgar kanallarında yer üzerindeki orana daha büyük alan şiddetleri meydana gelir. Buralarda alan şiddeti yaklaşık 500 kV/m yi aştığı zaman iletken kanalların oluşumuna yol açan yüzeysel boşalmalar meydana gelir. Bunlar yıldırımın ucunda hüküm süren yüksek alan şiddetini başlangıçta alan şiddeti küçük olan bölgelere doğru kaydırır ve yıldırımın ucunu aşağıya ve yukarıya doğru her iki yönde iletir. Yıldırımın alt ucu elektrostatik şebekelerden dolayı yere doğru ilerler, yukarı ucu ise bulut içersinde yatay yönde gelişir. Fakat genellikle yıldırımın, izlediği yol daha çok uzay elektrik yüklerinin mevcut olup olmaması gibi olası bir duruma göre değişir [7].

Bu gibi uzay yükler yağmur damlacıkları üzerinde bulunacağı gibi, serbest havada bir önceki yıldırım kanallarından arta kalan yükler halinde de bulunabilir. Yerin radyoaktif etkisi altında meydana gelen iyonlaşmalar oldukça zayıf olduğundan, bu gibi olaylar yıldırımın izleyeceği yolun ve yerde düşeceği noktanın seçilmesinde hemen hemen hiç rol oynamaz.



Şekil 1.4 Öncü boşalmada yıldırım ucunun incelenmesi.

Yıldırım başının buluttan dışarı çıktıktan sonraki ilerlemesi sürekli bir şekilde devam etmez. Bu ilerleme daha çok kısa veya uzun süreli duraklamalarla ve kademeli sıçramalar halinde olur. Yıldırım her ileri sıçrayışta 10-100 m kadar yol alır ve yaklaşık 50 000 km/s'lik (ışık hızının 1/6 sı kadar) bir hızla ilerler. Her ileri sıçrayışın ardından 30-90 μ s kadar (μ s: saniyenin milyonda biri) bir duraklama devresi izler [5, 7].

Yıldırımın ortalama ilerleme hızı yaklaşık 150 km/s kadardır. Genellikle yıldırımlar bu gelişme safhasında yeryüzüne ulaşmadan sönerler. Yıldırımın başı yer yüzeyine

yaklaştığı zaman, yer üzerinde bulunan sivrilmiş noktalardeki akım şiddetleri bu noktalarda aşağıdan yukarıya doğru ilerleyen ve aynı zamanda kademeli olarak gelişen boşalmalar meydana getirebilecek dőzeye yőkselebilirler.

Yerden yukarıya doğru gelişen yakalayıcı boşalmanın ilerleme hızı boşalma kanalının elektrik yőkő ile beslenmesi imkanına bağlıdır. Topraklanmış noktalarda yők akışı kolay ve hızlı olacağından yakalama boşalmaları da uzun mesafelere kadar gelişir.

Genel olarak elektrik yőklerinin oluşumu ve yők ayrılması olayının bir sonucu olarak yıldırımın boşalma kanalı daha çok negatif uzay yőklerinden oluşur. Bunlara karşılık gelen pozitif yőkler daha başlangıçta yıldırımın ilerlemesi esnasında buluttan kanalın içine akan negatif yőkler ile ve daha çok elektronlar ile nőtrolize olurlar.

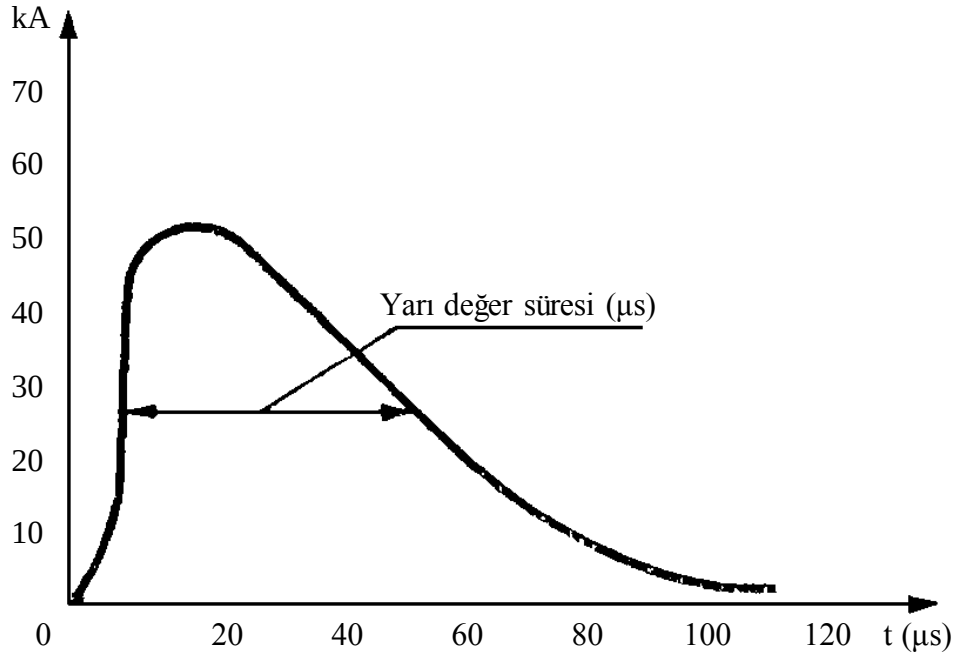
Nőtrolizasyon olayı yaklaşık 30 000-150 000 km/s kadar bir hızla ve hiç duraklama yapmadan aynı zamanda yıldırım kanalı boyunca kuvvetli bir ışık yayarak ilerler. İlerleme esnasında nőtrolizasyon olayı daha önce ncő kanalda ilerleyen yan kollar da geçer. Henőz gelişme durumunda olan ncő boşalmayı izleyerek onunla beraber ilerler. Bu arada ncő boşalmanın başı toprağa da erişebilir [5, 7].

Bu boşalma olayı genel olarak nőtrolizasyon olayı bulutun alt kısmına ulaştığında pratik olarak tamamlanmış olur. Fakat daha boşalma tamamlanmadan önce akım şiddeti gittikçe azalmaya başlar. Sebep olarak olayın yukarı kanal kesimlerine erişinceye kadar bu kısımlardaki kanal yőklerinin kısmen dağılmaya yőz tutmuş olmalarını gősterebiliriz.

1.4 Yıldırım Akımı ve Yıldırım Boşalması

1.4.1 Boşalmanın oluşumu

Yıldırım dőřmesi olayı yőksek frekanslı bir olay olmayıp tek kutbiyetli bir darbe boşalması, kısa sőren bir doğru akım darbesidir. Akım şiddetinin tepe değeri geniş sınırlar içinde değişmektedir. Yapılan incelemelerde akım şiddeti orta değerde olanların daha sık meydana geldiği gőzlenmiřtir [8].



Şekil 1.5 Yıldırım akımının zamana göre değişimi [8, 9].

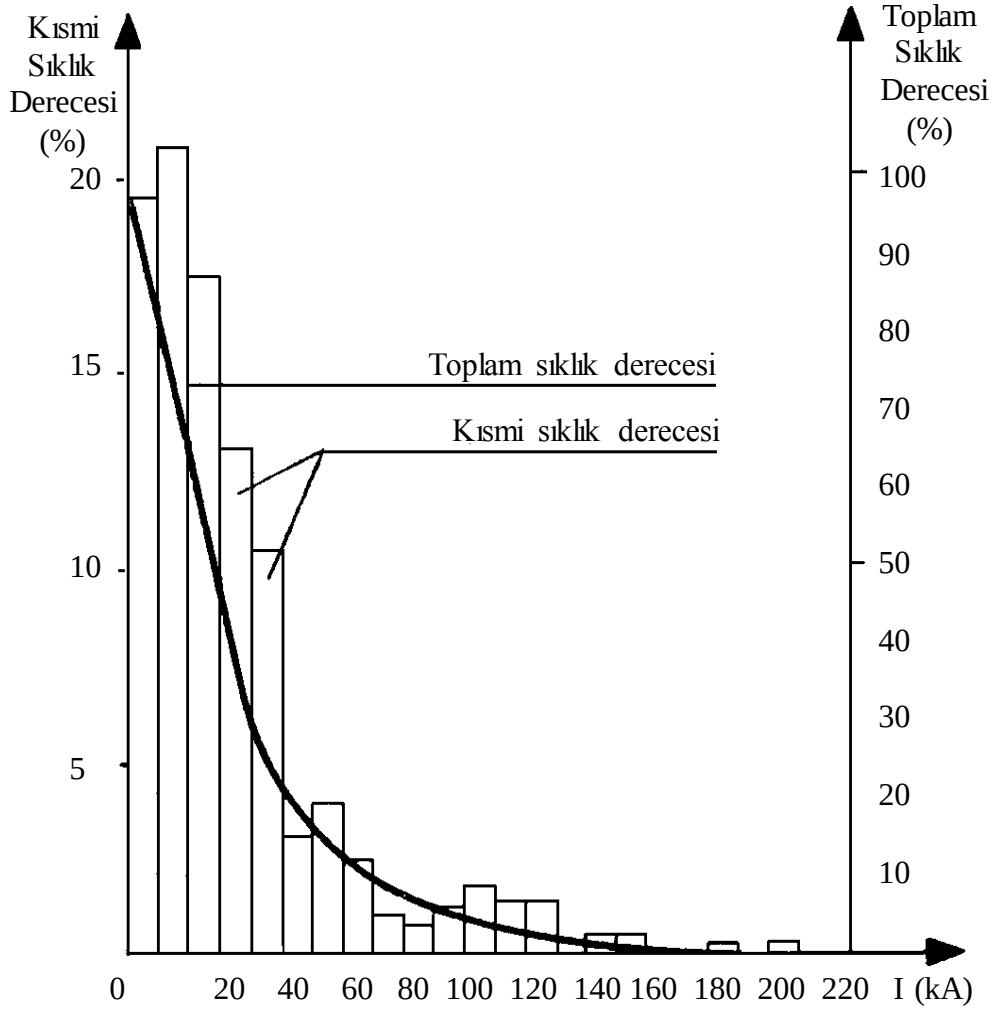
En fazla meydana gelen akım şiddetleri, 20000 A'nın altında olanlardır. Yapılan ölçmelerde 200000 A'nın üstündeki akımlara nadiren rastlanmış ve 250000 A'nın üstündeki akımların ise hiçbir zaman meydana gelmediği saptanmıştır. Meydana gelen yıldırımların yaklaşık % 85'inin akım şiddeti 60000 A'den küçüktür [8].

Yıldırım darbe akımlarının yarı değer süreleri merteye olarak 30-100 mikrosaniye kadardır. Yıldırım akımının cephe yükselişinin dikliği, yapılan ölçmelere göre yaklaşık 20-50 kA/μs kadardır [8].

Bu şekilde çok kısa süren darbe akımlarında madeni iletkenler, tıpkı yüksek frekansta olduğu gibi akım yığılma olayından dolayı doğru akımdakine göre daha yüksek bir direnç gösterirler. Bir yıldırımda boşalan yük miktarı genellikle 1 C'nun altında olmakla beraber, şiddetli yıldırımlarda 10...20 As olabilir. 75 As gibi çok daha büyük değerlere rastlanırsa da, bunlar nadiren meydana gelir. Genel olarak ilk yıldırımın ana boşalmasından sonra 1/1000-1/2 saniye arasında değişen aralıklarla aynı kanal üzerinden birbirini izleyen küçük yıldırımlar boşalır [7, 8].

Tali boşalmaların sayısı çok değişiktir. Bütün yıldırımların ancak %10-20'si yalnız tek bir boşalmadan ve bütün yıldırımların yaklaşık yarısı ise, dört ve daha fazla tali

boşalmadan oluşur. Bu gibi yıldırım olaylarında olayın meydana geldiği toplam zaman genelde 1 saniye kadardır.



Şekil 1.6 Yıldırım akımının (tepe değerinin) sıklık derecesi [6]

1.4.2 Bulut-toprak arası yıldırım boşalması

Pozitif kutbiyetli bir yıldırım, pozitif yüklerin yeryüzüne boşalmalarına neden olduğu gibi bir negatif kutbiyetli yıldırım da negatif yüklerin yeryüzüne boşalmalarına neden olur.

Negatif kutbiyetli bir yıldırım, bulut içindeki farklı yük merkezlerinin oluşturduğu farklı darbe akımlarının, başarılı bir şekilde bir araya gelerek yeryüzüne yıldırım düşmesi şeklinde ulaşmasıyla meydana gelir.

Şimşek çakması olarak sonlanan süreç, su zerrecikleri için yaklaşık 900 kV/m ve buz kristalleri için 500 kV/m olarak verilebilen kritik bir yüksek alan şiddetinin bulunduğu bölgeler arasındaki kılavuz bir iyonize kanal oluşumu ile başlar. Bu kanal, yeryüzüne negatif kutbiyetli bir boşalma sırasında, her biri 50 m uzunlukta ve 40-150 ms aralıklarla zikzak şeklinde kademeli kanallar oluşturarak gelişir [7].

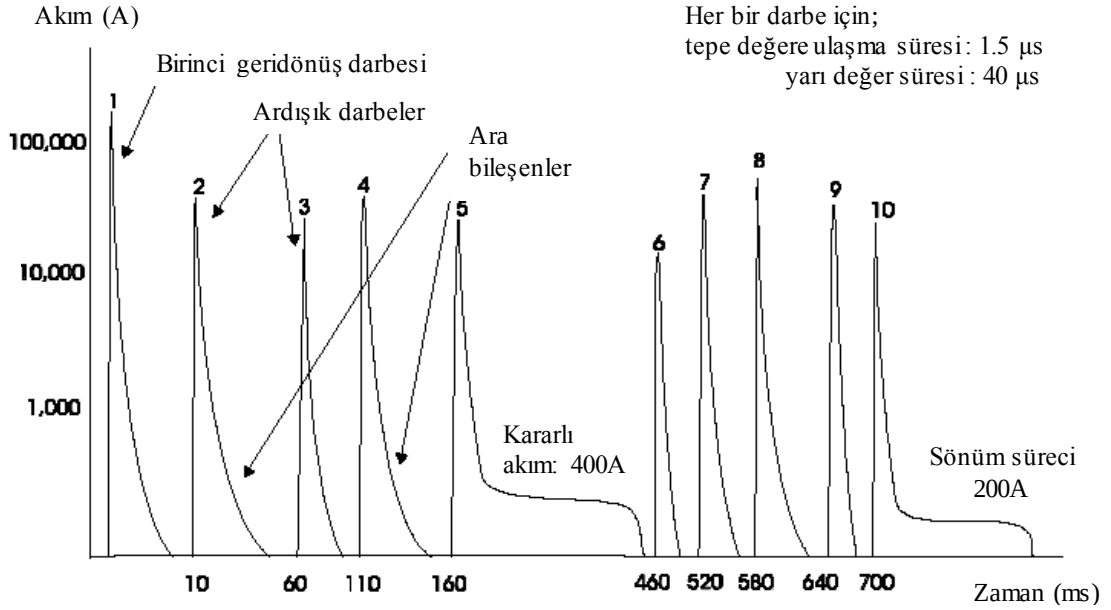
Bu kanalın çapı yaklaşık 1 m ile 10 m arasında olmakla birlikte, küçük bir akım (yaklaşık 100 A), kanalın merkezinde yaklaşık 1 cm çapındaki yüksek iyonize olmuş bölgede toplanmıştır. Ortalama yayılma hızı $1,5 \times 10^5$ m/s dir. Bu kanal yere ulaşana kadar izlediği yol boyunca çeşitli kollara ayrılabilir. Bu kollardan biri yeryüzüne yaklaştığında, ağaç, yüksek bina, kule gibi, yüksek alanın oluşacağı uç bölgeleri, aşağıya inen ana kanalın ucuna bağlar. Böylece devre kapanmış olur ki buna anahtarlama anı da denebilir. Bu durum oluştuğunda, kılavuz kanal içinde yaklaşık hızı 5×10^7 m/s olan tersine bir darbe şeklinde kanal boşalması meydana gelir. Bu ilk darbe, yüksek ışıklı çok yüksek değerli bir akım darbesi olarak nitelendirilebilir. İlk boşalmanın ardından, genellikle aynı yolu izleyen yıldırım boşalmaları da gözlenebilir ancak bunların hızları düşük olacaktır (yaklaşık 2×10^6 m/s) [5, 7].

Bulut ile toprak arasındaki yıldırım akımlarının darbe şekilleri yeryüzü şekillerine göre farklılıklar gösterir. Bulut ile bir ağaç veya kule arasındaki yıldırım akımının karakteristiği ile buluta daha yakın bir noktadaki yüksek bir dağın zirvesine düşen yıldırım akımının karakteristiği birbirinden farklıdır. Bu farklılık, hava taşıtlarına olan etkilerinde de önemli farklar olmasına neden olacaktır.

1.4.2.1 Toprağa negatif kutbiyetli yıldırım boşalması

Ard arda birkaç yıldırım düşmesinin oluşturduğu akım darbelerinin karakteristiği Şekil 1.7 de görülmektedir. Genellikle negatif kutbiyetli yıldırım darbelerinin sayısı 1 ile 11 arasında değişmektedir [6]. Ölçmeler sonucu ortalama değer 3 ve maksimum değer 24 olarak belirlenmiştir. Yıldırım düşmesinin toplam süresi ise yaklaşık 20 ms ile 1 s arasında değişmektedir. Yıldırım düşmesiyle sonuçlanan boşalmaların aynı zamanda en uzun boşalma süresine de sahip olması gibi bu parametreler arasında da bazı ilişkiler kurulabilir. İlk darbenin cephe süresi yaklaşık 2 μ s ve sırt yarı değer süresi 45 μ s dir. Sonraki darbeler ilk darbeden daha küçük akım değerine sahip olmalarına rağmen daha kısa bir cephe süresine sahip olabilirler. Bu ise akım

değişimlerinin bir kabloda meydana getireceği indüklemeye geriliminin çarpıcı şekilde aynı orantıda değişimine neden olabilir.



Şekil 1.7 Ard arda birkaç yıldırım darbesinin akım dalga şekli [10].

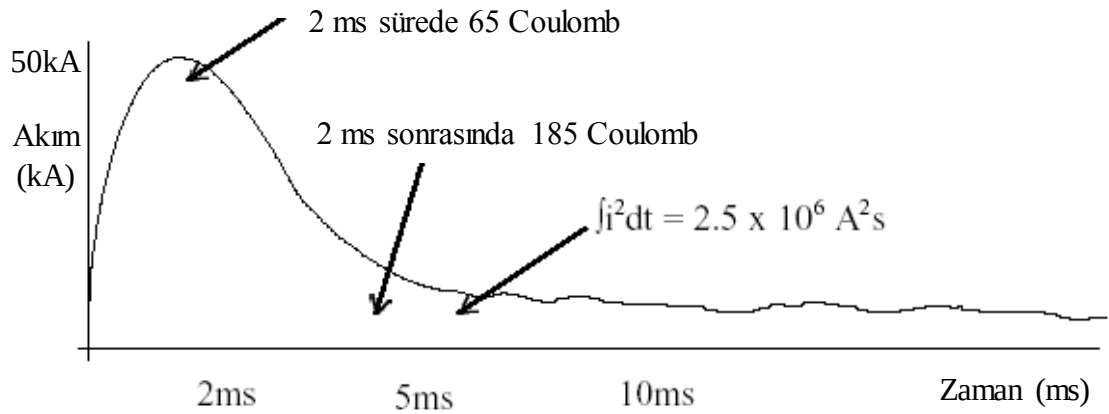
Negatif yıldırım darbesinin sonlarına doğru, bazen birkaç milisaniye süreyle birkaç kA mertebesinde ara akım olarak adlandırılabilen düşük bir akıma rastlanabilir. Bu tür bir akımın dalga şekli Şekil 1.7 de görülmektedir [10]. Bazı darbelerin ardından yaklaşık 100-400 A civarında bir sürekli akım 100-800 ms süresince akabilir. Bu sürede önemli bir yük transferi yapılır. Son yıldırım darbesinin ardından sürekli akımın oluşması sıkça rastlanan bir durumdur. Yıldırım boşalmasının tekrar oluşması için Şekil 1.7'de de görülen 5. darbeden sonra oluşmuş sürekli akımın kesilmesi gerektiği düşünülmektedir.

1.4.2.2 Toprağa pozitif kutbiyetli yıldırım boşalması

Buluttan toprağa pozitif kutbiyetli yıldırım boşalmaları, negatif kutbiyetli yıldırım boşalmalarına göre daha az rastlanan boşalmalardır. Bununla beraber konum ve atmosferik koşullar nedeniyle bir bölgeye daha fazla pozitif kutbiyetli yıldırım düşmesi de mümkündür.

Son verilere göre yeryüzüne düşen yıldırımların yaklaşık %10'unu pozitif kutbiyetli yıldırım boşalmalarıdır. Pozitif kutbiyetli yıldırım boşalmaları, genellikle dağlar gibi

yüksek yeryüzü şekillerinden yukarı yönde kanal oluşumu sonucu meydana gelen yıldırım boşalmalarıdır. Genellikle tek bir boşalmayla sonuçlanırlar. Negatif kutbiyetli yıldırım darbesine göre daha uzun bir cephe süresine sahiptirler. Darbe süreci tek bir negatif yıldırım darbesinden daha uzun ama genellikle tamamlanmış bir negatif yıldırım boşalmasından daha kısadır. Bazen yıldırım darbesini sonraki darbeler de izleyebilir. Şekil 1.8'de bu tür bir yıldırım darbe akımının dalga şekli görülmektedir [10].



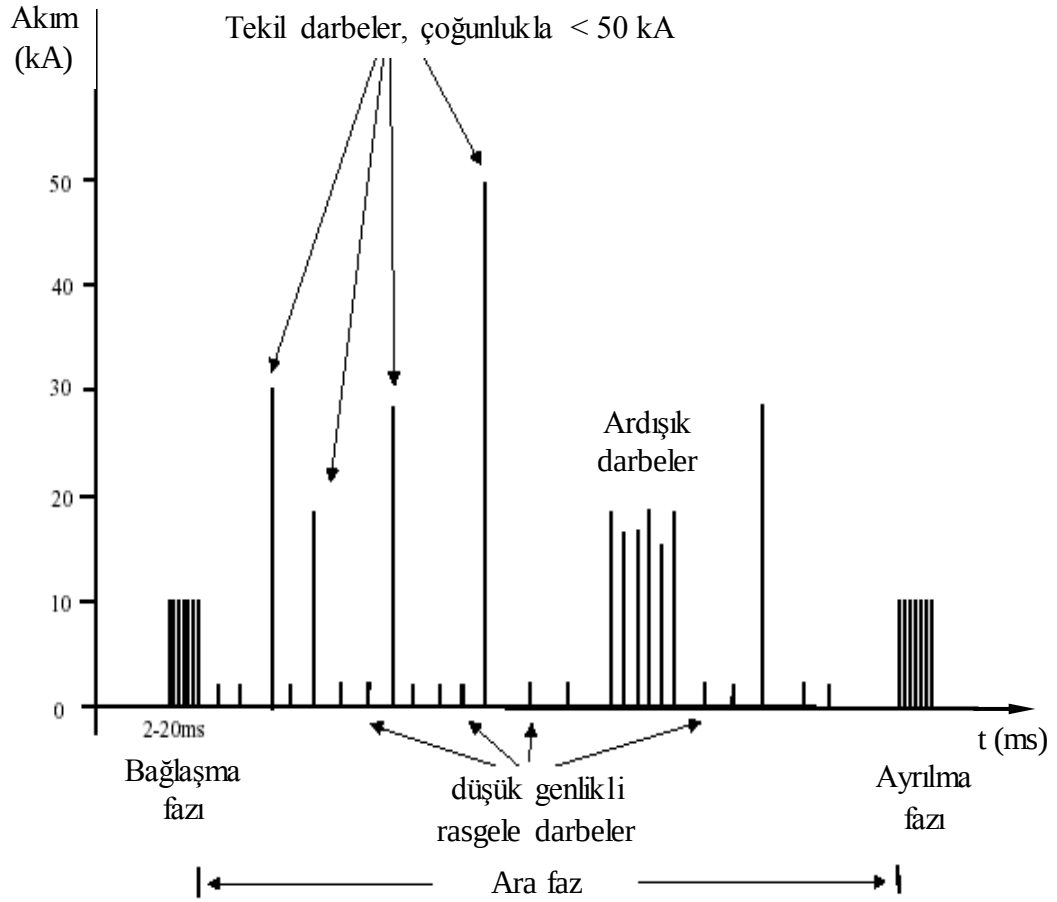
Şekil 1.8 Pozitif kutbiyetli yıldırım darbesi [10].

Cephe süresi genellikle 20 μs ve toplam sönme süresi yaklaşık 0,1 s dir. Her ne kadar sıklıkla karşımıza çıkmasalar da hava taşıtlarının tasarımında ve malzemelerin deneylerinde pozitif kutbiyetli yıldırım akımlarının etkileri de göz önüne alınmaktadır.

1.4.3 Bulut içinde ve bulutlar arası yıldırım boşalmaları

Bulut ile yer arasındaki boşalma olayları ile ilgili oldukça çok çalışmanın olması elimizde çok sayıda veri ve deneysel çalışma imkanlarının bulunması ile mümkün olmuştur. Bulut içi ve bulutlar arasındaki yıldırım boşalma olaylarının incelenmesi açısından o kadar şanslı olduğumuz söylenemez.

Özellikle son yıllarda uzay çalışmalarının önem kazanması nedeniyle bu konu üzerinde çalışmak üzere özel donanımlı uçaklar hazırlanmış ve bulutlarda yaşanan boşalma olaylarının aydınlatılması için veri toplama çalışmalarına önem verilmiştir. Amerika ve Fransa'da bu konu için özel olarak hazırlanmış uçaklar bulut içi boşalma olayları ile ilgili verileri kaydetmektedir [10].



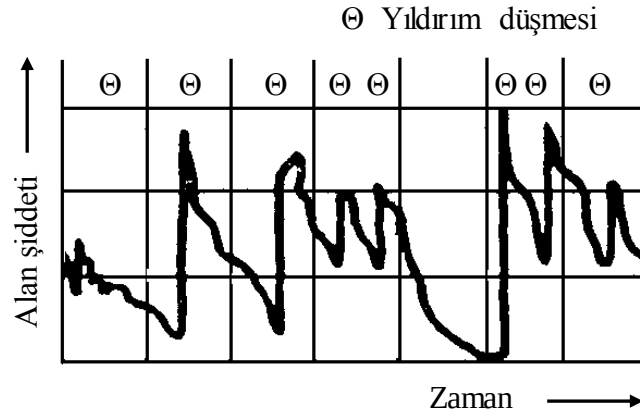
Şekil 1.9 Bir uçağa etki eden bulutlar arası yıldırım boşalmaları [10].

Bulut içi yıldırım boşalmaları ile ilgili sonuçlar kesin olmamakla birlikte veriler boşalmayla ilgili fikir verebilmektedir. Kaydedilen değerlere göre bulut içi yıldırım darbelerinin bir çoğunun cephe süresinin kısa ($0,4 \mu s$ den az) olduğu anlaşılmıştır. Genellikle 20-30 kA olmak üzere ama yaklaşık 60 kA'lere ulaşan geri dönüş akımları görülmüştür. Şekil 1.9'da tipik bir bulut içi yıldırım darbesinin dalga şekli görülmektedir [10].

1.5 Yıldırım Düşmesi İle İlgili Olaylar

a) Atmosferik alan

Bir yıldırım düşmesinde elektrik yükleri (genel olarak negatif yükler) yer yüzeyine taşındığından, yıldırım düşmesinin bir sonucu olarak üzerindeki atmosferik elektrik alan şiddeti yükselir.



Şekil 1.10 Yıldırımlı havalarda elektrik alan şiddetinin değişimi [6]

b) Gök gürültüsü

Yıldırım akımı aktığı sürece, boşalma kanalı elektrodinamik kuvvetlerin etkisi altında büzülerek çok dar bir bölgeye sıkışır. Yıldırım deneylerine bakacak olursak, yıldırım kanalı çapının en fazla birkaç santimetreyi geçmeyeceğini ve ancak özel durumlarda (zayıf akımlı boşalmalarda) birkaç desimetreye varabileceği gözlemlenmiştir [6].

Yıldırım kanalının içinde elektrodinamik etkilerden ileri gelen aşırı basınç 2 ile 3 atmosfer arasında olabilir [6, 7]. Yıldırım akımının sönməsi üzerine bu basıncı meydana getiren kuvvetler ortadan kalkar ve böylece yıldırımın çekirdeği infilak edercesine genişler, gök gürültüsü meydana gelir.

1.6 Yıldırımın Etkileri

Yıldırım elektriksel bir oluşum olduğuna göre, bir akımın bir iletken veya izolatörden geçmesi halinde meydana getirdiği etkilerin aynısını yapacaktır. Buna göre bir yıldırımdan aşağıdaki etkiler beklenebilir [5, 7]:

- Isıl (termik) etkiler,
- Elektrodinamik etkiler (kuvvetler),
- Elektrokimyasal etkiler (galvanik parçalanmalar),
- Elektromanyetik etkiler.

2. UÇAKLARA YILDIRIMIN ETKİLERİ

2.1 Uçakların Karşılaştığı Elektriksel Etkiler

Uçağa yıldırım çarpması ya çok güçlü bir elektrik alan içine giren uçağın boşalmanın başlaması için tetikleme yapması ile ya da doğal bir yıldırım çarpmasının uçağa isabet etmesiyle ortaya çıkabilir. Son yıllarda uçakların elektronik kontrol sistemlerinin atmosferik koşullardan etkilenmesi ve hasar görmesi nedeniyle bu konuyla ilgili çalışmalara ağırlık verilmiştir [3, 6, 10]. En çok endişe duyulan etki statik elektriklenme ve yıldırımdır. Bunu en önemli nedenleri,

- 1) Uçak elektronik kumanda ve kontrol sistemlerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlanan duyarlı elektronik donanımlar ve
- 2) Yıldırım etkileri nedeniyle uçuş kumanda sistemlerinin uçuş sırasında yapısal olarak hasar görmesi

olarak sıralanabilir.

Yıldırım olasılığının bulunduğu atmosferik ortamlardan mümkün olduğu kadar kaçınılmaya çalışılır. Kokpit ekibinin en istemediği durum uçuş güvenliğini etkileyecek şiddetli bir yıldırım çarpmasının etkisinde kalmaktır. Uçak sistemlerinin her geçen gün daha karmaşık elektronik kontrol donanımları ile donatılması nedeniyle tüm hava taşıtlarında daha gelişmiş koruma yöntemlerinin geliştirilmesi ve bunların uygulanabilirliği son yıllarda önemi artan bir konudur [6, 10].

2.1.1 Çarpma olasılığı

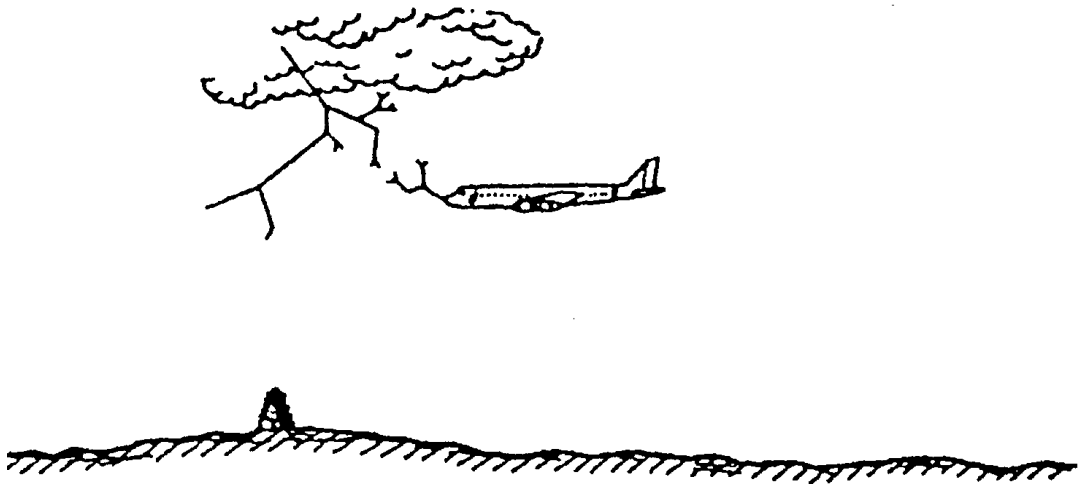
Uçağa yıldırım çarpması olasılığı, uçağın tipi, uçuş güzergahı, uçuş sırasındaki hava koşulları gibi bir çok etkene bağlıdır. Yapılan istatistiklere göre tarifeli sefer yapan hava yolu şirketlerinde uçaklara yıldırım isabet etmesinin ortalama olasılığı her 10000 uçuş saatinde bir defa olarak belirlenmiştir. Bununla beraber yıldırım olayları

için uygun olan iklim koşullarında uçuş yapan uçaklar için bu olasılık her 1000 uçuş saatinde bir defa olarak gerçekleşebilmektedir. Bu yüzden uçaklara yıldırım çarpması, 1000 ile 20000 uçuş saati arasındaki bir sürede, adet olarak değişim göstermektedir [10, 11].

Rapor edilen yıldırım çarpması olayları genellikle parlak ışık ve yüksek sesle birlikte oluşan fiziksel hasarlardan oluşmaktadır. Çoğu yıldırım çarpması ise ses veya bir fiziksel etki göstermediği için rapor edilmemektedir [10-12].

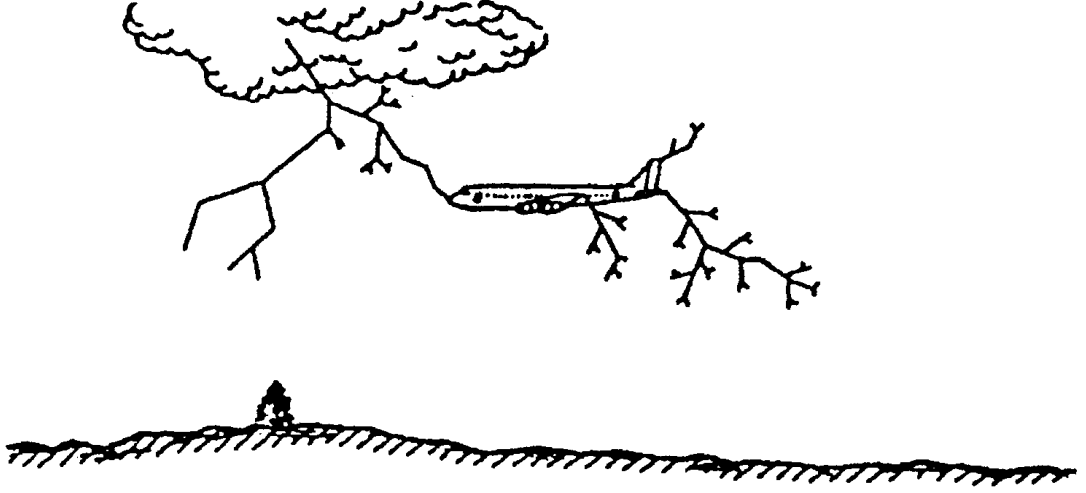
2.1.2 Uçakların yıldırıma rastlaması

Uçak doğal bir yıldırım boşalması sırasında, oluşan kılavuz kanalın yakınlarında bulunuyorsa kanal gelişimi uçağa doğru yön değiştirebilir. Bu yön değiştirme, bulut içi, bulut arası ya da bulut toprak arası gelişenler gibi her türlü yıldırım boşalması olayı sırasında meydana gelebilir. Ancak bulutlar arasındaki boşalma olayları toprağa olan boşalma olaylarına göre daha az rapor edilmiştir. Uçağa sadece bulut toprak arasındaki yıldırım çarpması olaylarının etki ettiği kabulünün yapılması durumunda ise yerden ölçülen parametrelerle, uçağın bulunduğu uçuş yüksekliğindeki parametreler arasında farklılık bulunacaktır. Bu durum, yıldırımın başlangıç noktasından uçağa ulaşana kadar boşalma kanalının kayıplı bir iletim hattı gibi davranarak yıldırım darbesinin hem büyüklüğünü hem de şeklini değiştirmesine neden olur [6, 10].



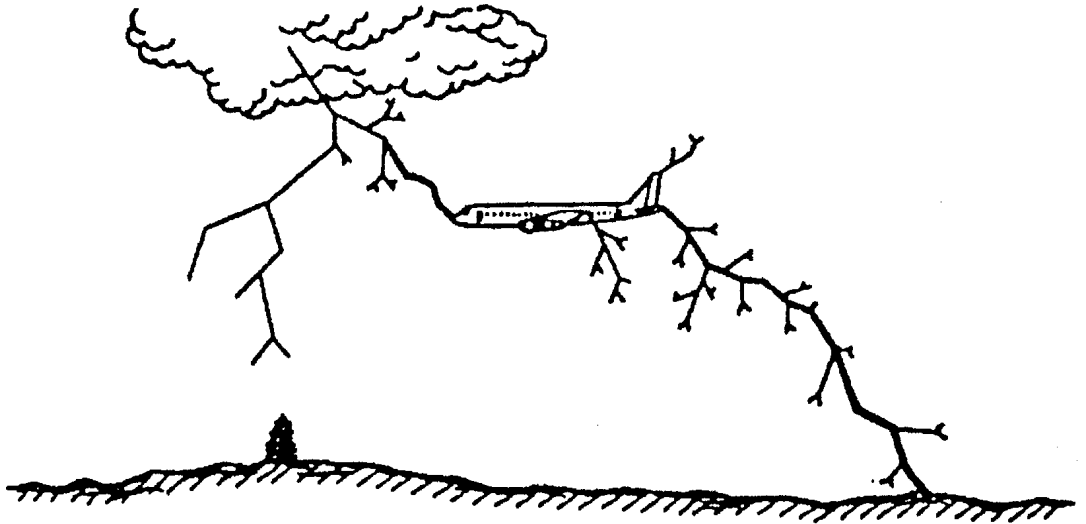
şekil 2.1 Uçağın kılavuz kanala yaklaşması [6].

Şekil 2.1’de uçağa rastlayan bir yıldırım çarpmasının gelişimi görülmektedir. Burada uçak yıldırım boşalmasını başlatacak kılavuz kanala doğru yaklaşmaktadır. Şekil 2.2’de ise kılavuz kanalın uçak üzerinden yön değiştirmesi görülmektedir.



Şekil 2.2 Kılavuz kanalın uçağa doğru yön değiştirmesi [6].

Yıldırım uçağa çarptığında yaklaşık 1000 A civarında bir akım uçak üzerinden akmaya başlayacaktır. Yıldırım uçak üzerinden geçerek toprağa ulaştığında oluşan akımın değeri yaklaşık olarak 30 kA kadardır. Bu süreçten sonra gelişen geriye dönüş darbesinin oluşturduğu akımın değeri ise 200 kA’e kadar ulaşır. Süreç birkaç akım darbesinin daha oluşmasıyla tamamlanır (Şekil 2.3) [6, 10].

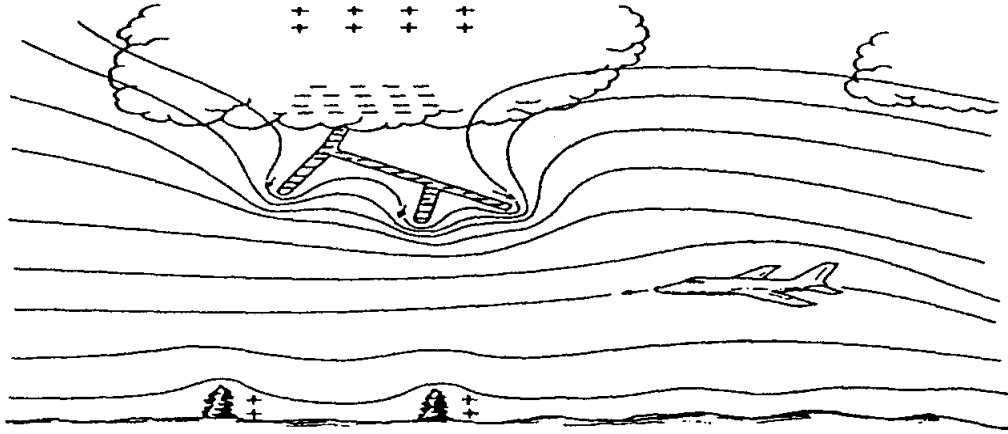


Şekil 2.3 Uçak üzerinden tamamlanan geri dönüş çarpması [6].

2.1.3 Uçakların tetiklediği yıldırımlar

Uçaklar seyrüsefer sırasında çok yüksek elektrik alana sahip, yıldırım boşalması için uygun iklim koşullu bölgelerden geçerken yıldırım boşalmasının başlamasına neden olabilirler. Bu tür yıldırım boşalması, uçağın ilgili ortamda bulunmaması durumunda meydana gelmeyecektir.

Yıldırım etkilerinin ölçümü için hazırlanmış özel uçakların etkilendiği bir çok yıldırım darbesinin bu uçakların tetiklemesi sonucu oluşmuş yıldırım darbeleri olduğu düşünülmektedir (Şekil 2.4). Bununla beraber bu tür yıldırım çarpmaları, toprak bulut arasında oluşan yıldırım düşmelerinin çoğuna göre daha düşük akım büyüklüğüne sahiptirler [6, 10].



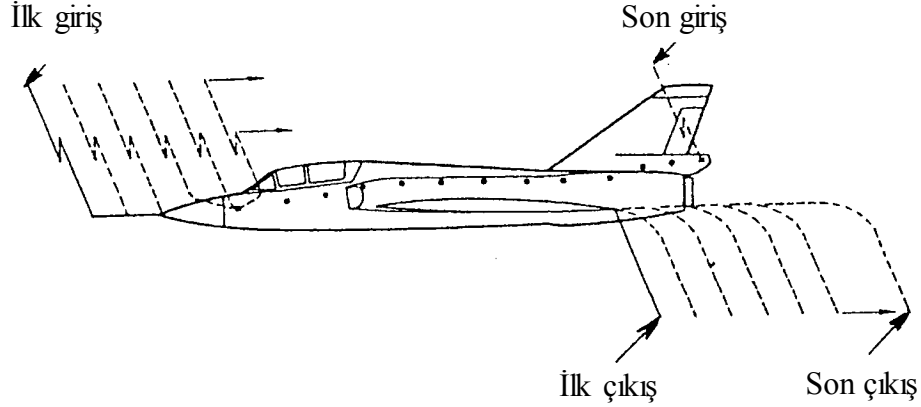
Şekil 2.4 Tetiklenmeye hazır bir alan gelişimi [6]

2.1.4 Süpürme kanalı oluşumu

Eğer yüksek hızla hareket eden bir uçak, doğrudan yıldırım çarpmasına maruz kalırsa, yıldırımın uçağa isabet ettiği ark noktası, yıldırım boşalması kanalının durgun ortamda bulunması nedeniyle aracın arkasına doğru süpürülecektir (Şekil 2.5) [6, 10].

Çok düzgün boyasız yüzeyler hariç, bu çarpma noktasının hareketi sürekli olmayan ancak düzensiz karmaşık bir dizi adımın bir araya gelmesiyle ortaya çıkar. Herhangi bir adımın sonlanma süresi 50 ms'yi genellikle aşmaz. Bu süre doğal olarak yüzeyin

özelliğine ve uçağın hızına doğrudan bağlıdır. Yaklaşık 300 knot'lık bir hızla ilerleyen bir uçak her 100 ms'de boyunun 15 m'si kadar ilerlemektedir ki bu durum yıldırım çarpmasına maruz kalmış bir hava taşıtı için ideal modeldir [10].



Şekil 2.5 Süpürme kanalı oluşumu [6].

Yıldırım kanalı uçağın firar kenarına kadar süpürüldükten sonra artık ya uçak üzerinden bir yük akışı olmayarak yıldırım sönecek ya da yıldırım uçağın firar kenarından kendini beslemeye devam edecektir. Yıldırım kanalının uçağa giriş ve çıkış bölgesi uçağın firar kenarından uzaklaştıktan sonra kanal tekrar birleşerek boşalma kanalını tekrar tamamlar. Artık uçağın yıldırım boşalmasıyla ilişkisi kesilmiş olur.

Uçakların gövdeye yakın kanat bölgeleri, gövdeye yakın motorlar yıldırım etkileri açısından incelenirken bu bölgelerin uçuş güvenliğine doğrudan etkileri dolayısıyla süpürme etkisi de ayrıca göz önüne alınmaktadır. Bu incelemeler sırasında yıldırımın uçağın tek bir noktasına düşmeyeceği ve yıldırımın tüm enerjisinin tek bir nokta tarafından karşılanmayacağı düşünülerek uçağın yıldırıma maruz kalabilecek hassas bölgeleri ayrı ayrı incelenmelidir.

2.1.5 Uzaktaki Bir Yıldırımın Etkisi

Uçağın uzağında oluşmuş bir yıldırım düşmesi olayının dolaylı etkileri hissedilebilir. Bu etkiler baskın olarak elektromanyetik etkileşim olarak ortaya çıkar ve genellikle yıldırımın doğrudan etkileri kadar şiddetli hasarlara neden olmazlar. Uçağın yakınındaki bir yıldırım boşalması nedeniyle oluşacak manyetik alanın değeri yaklaşık olarak,

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.1)$$

ifadesiyle belirlenebilir. Burada,

H = Manyetik alan şiddeti (A/m)

I = Yıldırım akımı (A)

r = Yıldırım kanalı ile uçak arasındaki uzaklık (m)

olarak alınmıştır.

2.1.6 Yıldırım çarpma bölgeleri

Yıldırım boşalmasının oluşumu ve uçak üzerindeki gelişimi göz önüne alınarak yıldırım etki bölgeleri belirlenmiştir [13, 14]. Uçak üzerinde oluşacak etkilere göre bölgeler,

- 1) 1A Bölgesi : Yıldırım çarpmasının düşük olasılıkla etkilediği bölgeler
- 2) 1B Bölgesi : Yıldırım çarpmasının büyük olasılıkla etkilediği bölgeler
- 3) 2A Bölgesi : Süpürme çarpmasının düşük olasılıkla etkilediği bölgeler
- 4) 2B Bölgesi : Süpürme çarpmasının büyük olasılıkla etkilediği bölgeler
- 5) 3 Bölgesi : Akım geçirme bölgeleri

olarak sıralanabilir. Bu bölgeler uçağın geometrisi, kullanılan malzeme, işletme koşulları gibi etkenlere bağlı olarak her uçakta farklılık gösterir. Bölgelerin nasıl belirleneceği üretici ülkelerin sivil havacılık birimleri tarafından tanımlanmıştır. Üretici firmalar ilgili standartlardan yola çıkarak bölgeleri belirleyerek ilgili koruma yeterliliklerini sağlamakla yükümlüdürler.

2.1.7 Statik elektriklenme

Yüksek hızda atmosfer içinde hareket hava taşıtlarının karşılaşacağı ikinci bir elektriksel etki statik elektriklenmedir. Statik elektriklenme ve boşalmanın meydana gelmesi uçağın sürekli maruz kaldığı bir olaydır. Statik elektriklenme iki metalin teması ve daha sonra birbirlerinden ayrılması sonucu oluşmaktadır. Temel olarak iki metal arasındaki yük dağılımı etkileşimini başlatan bu temas ve ayrılma sonucu her iki metal zıt yüklerle yüklenir. Hava taşıtı göz önüne alındığında, taşıtın seyri sırasında yüklü su zerrecikleri ile temas sonucu uçak statik olarak elektriklenecektir.

Yağmur veya kar yağışı gibi atmosferik koşullar sonucu yüklü zerreciklerin uçağa teması olayın başlangıcıdır. Uçak yüzeyindeki elektrik yüklerinde artış meydana gelir ve uçağın potansiyelinde artış olur. Oluşan bu potansiyel değeri atmosferik kırılma eşiğini geçtiğinde boşalma olayı meydana gelebilir. Bu boşalma sırasında bir ışıma görülebilir. Hava taşıtlarında bu boşalmayı kolaylaştırıcı bir dizi koruma önlemi alınmaktadır. Uçakların aletli uçuş ve seyrüsefer sistemlerindeki gelişmeler statik elektriklenmenin uçaklara olan etkilerinin araştırılmasının ve gerekli korunma yöntemlerinin geliştirilmesinin önemini arttırmıştır [6, 10].

2.2 Atmosferik Elektriksel Olayların Uçaklara Etkileri

2.2.1 Doğrudan etkiler

Atmosferik koşulların meydana getirdiği elektriksel olayların uçaklara olan doğrudan etkileri çoğunlukla uçakların gövde yapısı ve uçuş kontrol sistemleri üzerindeki fiziksel etkiler olarak karşımıza çıkar. Yıldırım çarpması sırasında boşalma kanalından akan yüksek akımın (200 kA), çarpma noktasında oluşturduğu sıcaklık yaklaşık 20000°C'ye ulaşır. Bu temas sonucu temel olarak iki tip hasar meydana gelir. Bunlar metal yanması veya yırtılmasıdır. Metal yanması ve yırtılması şeklinde ortaya çıkan hasarlara uçağın gövdesinde rastlanabileceği gibi yıldırım darbesinin meydana getireceği gerilim artışı nedeniyle kablo veya donanımların yanması şeklinde uçak aviyonik sistem ve donanımlarında da rastlanabilir [11].

Doğrudan etkiler uçağın genellikle radom, pito tüpü, harici antenler ve kanat ucu lambaları gibi hücum ve firar kenarları olarak adlandırılan bölgelerinde gözlenirler. Nadiren de olsa, yıldırımdan dolayı oluşan akımlar uçağın kablo donanımını veya gövdede meydana gelen yanma olayları sonucu uçağın içersine sızarak sistemlere zarar verebilirler. Bunlar aviyonik sistemlerini fonksiyonel olarak çalışamaz hale getirebileceği gibi yakıt tanklarında da patlamaya neden olabilir.

1967 yılında Pan Am şirketine ait bir Boeing 707 uçağı bir iç hat seferi sırasında yıldırım çarpmasına maruz kalmış ve uçağın gövdesinden akan yıldırım akımı yakıt tankında bir arka neden olarak tankın patlamasına neden olmuştur [10-12]. Havacılık tarihinin yıldırım çarpması sonucu oluşmuş bu en talihsiz kazasından sonra Amerika Sivil Havacılık Dairesi (F.A.A.: Federal Aviation Administration) olayı incelemeye

almış ve 2 hafta içinde, bugün de hala en etkili koruma aygıtlarından biri olan, statik boşalma uçlarının (püsküllerinin) (static discharger) ticari tüm uçaklara takılmasını zorunlu hale getirmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Bir uçak kanadındaki statik boşalma uçları (static discharger) [15].

Günümüzde, Amerika'daki F.A.A gibi, uçak üreticisi firmaların bulunduğu ülkelerin sivil havacılık daireleri, uçakların güvenilirliğinin artırılması için gerekli minimum standartları belirlerler. Bu birimler, üretici firmaların ve havayolu işletmelerinin gerekli koşulları yerine getirmelerini ve işletme sırasındaki güvenlik önlemlerinin alınması sağlamaktadırlar. Günümüzde “direk etki” sonucu oluşabilecek hasarları ve olayları en aza indirmek için uçak tasarımlarında ve uçuş işletmesinde bu ölçütler dikkate alınmaktadır [10, 11].

2.2.2 Dolaylı Etkiler

Yıldırımın uçak gövdesine teması sonucunda oluşan elektrik akımı, elektromanyetik akım üretilmesine neden olur. Oluşan elektromanyetik akım uçağın kablo donanımını ve aviyonik sistem donanımları üzerinde geçici bir gerilim meydana gelmesine neden olur [10, 11]. Gerilimin büyüklüğüne bağlı olarak, günümüzde oldukça hassaslaşmış olan, uçak elektronik sistemleri hasarlanabilir. Bu tür etkiler “dolaylı etkiler” olarak adlandırılırlar.

Dolaylı etkiler daha çok, bağlantı kabloları üzerinde yıldırımın yarattığı elektromanyetik gerilim, uçağın uçuş kontrol ve haberleşme sistemlerini yöneten elemanların hasar görmesi olarak ortaya çıkar. Amerika’da yapılmış istatistiklere göre ticari uçaklar yaklaşık olarak 3000 uçuş saatinde bir defa veya yılda bir defa yıldırım olayına maruz kalmaktadır. ABD hava kuvvetlerinde bu oran 20 000 uçuş saatinde bir defa olarak istatistiklere geçmiştir [11].

Yıldırımın dolaylı etkilerinin uçakta hissedilmesi için yıldırımın mutlaka uçağa isabet etmesi gerekmez. Uçağın etrafındaki 1 km’lik bir alan içerisinde meydana gelebilecek bir yıldırım boşalması olayı, uçağın elektrik/elektronik donanımları üzerinde bir hasar oluşturmaya yetebilecek gerilim indüklenmesine neden olabilir.

Ticari hava taşıtlarında yıldırım sonucu meydana gelebilecek dolaylı etkilerin önlenmesi için, doğrudan etkilerde olduğu gibi, ilgili ülkelerin sivil havacılık daireleri üretimde ve işletme sırasında uyulması gereken standartları belirlemektedirler. Uçakların bu koşullara uygunluğu da yine bu birimler tarafından düzenli olarak kontrol edilir [10, 11].

2.3 Kokpitteki Etkiler

Uçağın kontrol sistemlerinin, personel dahil, hemen hemen tümüne yakını burundaki radomun arkasında kalan kokpit ve elektrik/elektronik kompartımanında bulunur. Basıncsız bölge olan radom kapağının altında genellikle uçağın radarı bulunur. Hemen radardan itibaren kokpit ve elektrik/elektronik kompartımanının bulunduğu basınçlı bölge başlar. Bu bölge uçağın en hassas bölgelerinden bir tanesidir [6, 11].

Uçağın güvenli ve doğru rotada uçuşunu sağlamak için elektronik sistemlerin ihtiyacı olan hız, irtifa, rüzgar, burun açısı gibi bilgileri sağlayan donanımlar genellikle basıncsız bölge olarak adlandırılan uçağın dışında bulunurlar ve data kabloları ile elektronik kompartımanındaki ilgili işlemciye bağlanırlar. Özellikle hız bilgisinin elde edildiği pitot tüpleri ve burun açısı bilgisinin alındığı atak açısı aygıtları sivri uç oluşturduğundan yıldırım anında etkilenme olasılığı en yüksek aygıtlardan bazılarıdır. Bu aygıtlar yıldırım riski nedeniyle ısıya dayanıklı özel alaşım malzemelerden yapılırlar. Bazen bunların bağlı olduğu kablolar yıldırım akımı nedeniyle eriyip patlayabilirler. Dış ortam yaklaşık -50°C civarında olduğu için bu

aygıtların ısıtılması gerekir. Yıldırım çarpması sırasında eğer ısıtıcı devresi de hasar görürse bu devreyi besleyen güç devresinde gerilim dalgalanmaları oluşabilir. Bu durum uçuş sırasında hiç istenmeyen durumlardan birisidir ki kontrol sistemlerinin devre dışı kalması sonucu uçağın kaybedilmesiyle bile sonuçlanabilir. Dolayısıyla bu bölgede kullanılan malzemeler daha dayanıklı olmalıdır [6, 12].

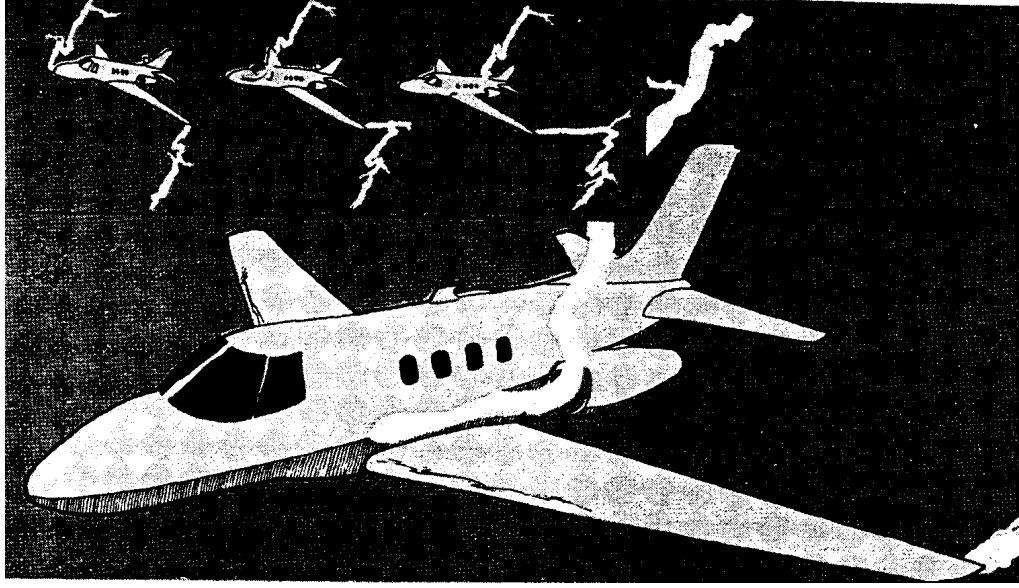
Kanat uçları ve seyrüsefer lambaları da sıklıkla yıldırım çarpmasına maruz kalırlar. Normalde yıldırım metal lamba yuvasına değer ve az zarar verir. Bu etki probun maruz kaldığı gibi çok tehlikeli değildir.

2.4 Motordaki Etkileri

Uçağa yıldırım çarpması sonucu yıldırım akımının uçak üzerinde yayılımı sırasında motorlara etki ederek yangın çıkmasına neden olması olası bir durumdur. Motorlarda yıldırım çarpması sonucunda yangın çıkar veya kompresör durursa motor kaybedilebilir. Yıldırım etkisinin geçmesinden sonra tekrar motor çalıştırma denenebilirse de yıldırımın vereceği muhtemel hasarlar çalıştırmayı mümkün kılmayabilir. Savaş uçaklarında ve küçük jetlerde buna yönelik önlemlerin alınması şarttır. ABD’de business jet uçakları için raporlanan 10 yıldırım çarpması olayından dördü bir motorun alev almasına ve beşincisi de her iki motorun birden durmasına sebep olduğu yönündedir. Motoru uçuş sırasında tekrar çalıştırmak mümkünse de bu örneklerde uçak yere inene kadar mümkün olmamıştır. Her iki motorunu kaybeden uçağa yıldırım 31.500 ft’te çarpmış motorlar uçak 13.000 ft’e inene kadar çalışmamıştır [6].

Şekil 2.7’de görüldüğü gibi motorun önü sıcak yıldırım kanalı ile örüldüğünde havanın bozulması nedeniyle motor alev alabilmektedir. Yıldırım kanalları başlangıçta burun ve kanat ucu gibi noktalar temas etse de uçak hareket ettikçe kanal uzayarak arka mahallere tekrar geçecektir.

Tipik bir yıldırım kanalındaki elektrikli hava 30 cm ya da daha fazla çapta ve merkezinde 30.000^0K civarında sıcaklıkta olabilir [5]. Bu kanal küçük jet motorunun içine akan düzenli havayı bozabilir. Bu durum motorun alev alması ve kompresörün durması için yeterlidir.



Şekil 2.7 Yıldırım çarpmasının motorun alevlenmesine neden oluşu [6].

- Motorların durmasına neden olan asıl sebebin yıldırımın elektriksel gücünden mi yoksa dolaylı etkilerinden mi olduğu tartışma konusudur. Yıldırım çarpması, genellikle gövdenin sadece bir tarafını sarar. Her iki motorunda alevlendiği durumda şimşek hemen hemen her iki tarafı da sarmıştır. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi gövdenin bir tarafından girip diğer tarafından çıkar.



Şekil 2.8 Olası çift motor alevlenmesi
(yıldırım bir taraftan girip diğer taraftan çıkıyor) [6].

Küçük uçaklar için uzmanlar şu önerilerde bulunmuşlardır [6];

- Yıldırım motorların alev almasına sebep olabilir,
- Yoğun yağışlı alanlardan kaçınılmalıdır,
- Uçuşta tekrar çalıştırma yeteneğine sahip olunmalıdır.

2.5 Personel

Yıldırım çarpmasının kokpit ya da kabinde bulunan yolcu ve personel için en tehlikeli durumu yıldırımın pencere yakınına çarpmasıdır ki bu geçici körlüğe sebep olur (Şekil 2.9). Genellikle gece meydana gelen olaylarda geçici körlük meydana gelir ve 30 s kadar sürer. Bu esnada pilotların uçuş cihazlarını okumaları mümkün olmaz. Eğer iki pilot varsa bunlardan bir tanesi elektrikli bölgeden geçerken cihazlar üzerine eğilerek onlara odaklanırsa gözlerini koruyabilir. Ayrıca bazı pilotlar şimşek çakması meydana geldiğinde hafif bir elektrik şoku aldıklarını rapor etmişlerdir [12].



Şekil 2.9 Kokpit bölgesine çarpan yıldırım [11].

10 Ekim 2002 tarihinde British Airways'e ait Boeing 757 tipi bir yolcu uçağı Amsterdam hava alanı için yaklaşma sırasında yıldırım çarpmasına maruz kalıyor. İkinci kaptanın hemen önündeki cama düşen yıldırımdan sonra ikinci kaptan bir süre kendine gelemiyor ve daha sonra sol kolunu kullanmada zorluk yaşıyor. Uçak

herhangi bir olumsuzluk yaşamadan inişini tamamlıyor. Daha sonra yapılan kontrolde ikinci kaptanın boynunda ve göğsünde yanıklara rastlanıyor [11]. Bu olayda kaptanın doğrudan yıldırım etkisinde kalmış olabileceği düşünülmektedir.

Sıklıkla yıldırım şok bir gürültülü patlama ile ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle de geçici duyma kayıpları da söz konusu olabilir. Planör gibi metalik olmayan uçaklarda etkiler çok daha ciddi olabilir. Bu tür uçaklarda kontrol kabloları tek elektrik iletkeni olup, yıldırım bağlantı noktası olarak direk pilot mahalline gelebilir ki ölümcül sonuçlara sebep olur.

Son on yıl içerisinde, uçakların performanslarında önemli ölçüde artış olmuştur. En önemli iki nedeni teknolojinin kullanılarak mikroelektronik devrelerin ve gelişmiş yapısal malzemelerin üretilmesidir. Teknolojideki bu hızlı ilerleme aynı zamanda uçakların tasarım mantığını da değiştirmiştir. Fly by wire, dijital motor kontrolü, dijital uçuş kontrol/ kumanda sistemleri bu değişimin en önemli ürünleridir. Daha fazla mekanik kontrol sistemleri içeren uçaklar yerine elektrik kabloları kontrol ve kumanda edilen uçuş kumanda sistemleri geliştirilmiş yeni nesil uçaklar üretilmeye başlanmıştır. Böylece uçakların ağırlıklarında ve mekanik etkenlere bağlı arızalarında önemli azalmalar elde edilmiştir. Fakat gelişmiş teknolojiyle tasarımı ve üretimi yapılan uçaklarda da bazı endişeler ve soru işaretleri mevcuttur. Bu endişe atmosferik elektrik olaylarının uçaklara verebilecekleri hasarlardır.

Yeni nesil uçaklarla ilgili üç temel endişe mevcuttur. Birincisi, mikroelektronik devreler kullanılarak tasarımı yapılan elektronik ve elektrik sistemlerin eski sistemlere göre daha küçük güç seviyesine sahip olması ve dolayısıyla hassasiyetinin artmasıdır. Böylece uçak elektronik sistemlerin aşırı gerilimden dolayı hasarlanma ve çalışmama olasılığı artmıştır. İkincisi, yeni kullanıma başlanan uçak yapısal malzemelerinin 10 kHz ile 1 MHz arasında, eskiden kullanılan yapısal malzemelerle aynı derecede “elektromanyetik ekranlama” sağlayamamasıdır. Üçüncü endişe ise mikroelektronik devrelerin uçakların çok hayati sistemlerinde kullanılmaya başlanmasıdır. Böylece bu devrelerde meydana gelebilecek herhangi bir hasar uçağın uçuş kontrol sistemlerini direk olarak etkileyebilecektir. Uçakların bu karmaşık ve hassas yapıları nedeniyle koruma sistemlerinin önemi artmış, bu konuda yapılan araştırmalar hız kazanmıştır [1 -3, 10, 11].

3. YILDIRIM ETKİLERİNDEN KORUNMA YÖNTEMLERİ

3.1 Doğrudan Etkilerden Korunma Yöntemleri

Çoğu uçağın gövdesi öncelikli olarak aynı zamanda çok da iyi bir iletken olan alüminyum alaşımlarından imal edilirler. Yıldırımın doğrudan etkilerinin azaltılmasında bu bir avantaj olarak düşünülebilir. Eğer uçak gövdesinin dış yüzeyinde iletkenlik olarak bir süreklilik var ve yıldırım akımı bir boşluktan atlamak zorunda kalmadan gövde dış yüzeyinden akarak geçebiliyorsa, uçağın içindeki sistemlere ve canlılara zarar vermeden yıldırım uçağa terk edebilecektir.

Son yıllarda uçak malzeme teknolojisinde önemli gelişmeler oldu. Artık uçaklarda ağır metaller yerine daha hafif ve daha esnek bunun yanında korozyona ve mekanik kuvvetlere mukavim kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bunların en yaygın karbon-fiber kompozit malzemelerdir. Kanat yapısının büyük bir kısmında ve uçuş kumanda yüzeylerinin hemen hepsinde artık bu kompozit malzemeler kullanılmakta. Ancak bu malzemeler bu avantajlarının yanında yüksek dielektrik katsayıları nedeniyle uçak gövdesinin iletken sürekliliğini engelleyen parçalar olarak önümüze çıkmaktadır. Olumsuz bu etkilerini azaltmak için kritik bölgelerde kullanılan kompozit yüzeylerin üstleri iletken bir tabakayla kaplanmaktadır. Böylece yıldırım akımının yolu üzerinde herhangi bir dirençle karşılaşması durumu önlenmeye çalışılır. Kompozit malzemelerin uçak üzerinde yıldırım etkilerine karşı deneylerinin yapıp dayanımlarının gözlenmesi gerekmektedir.

3.1.1 Yönlendirme Çubukları

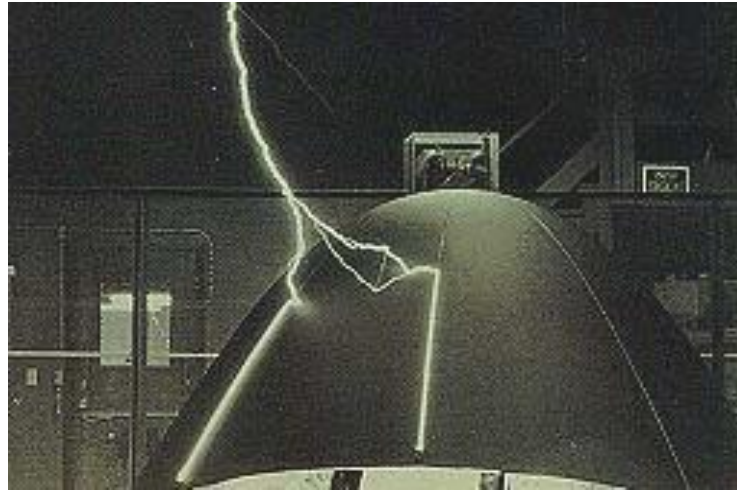
Özellikle radom üzerinde yaygın olarak kullanılan yönlendirme çubukları yıldırımın gövde üzerinde kontrollü bir şekilde yol almasını sağlayan etkili bir koruma yöntemidir (Şekil 3.1) [16]. Uçağın hassas bölgelerinde kullanılabilir. Hassas bölgelere yerleştirilen yönlendirici çubuklar uçağın hareketi sırasında üzerlerinde

oluşan iyonize düzgün alan yardımıyla yıldırım darbesinin herhangi başka bir bölgeye sapmaması için kılavuzluk ederler. Böylece yıldırım akımı güvenli bir şekilde örneğin radom üzerindeki yönlendirici çubuklar vasıtasıyla ilerleyerek uçağın iletken olan gövdesine ulaşır (Şekil 3.2) [16].



Şekil 3.1 Radom bölgesi yönlendirme çubukları [16].

Yönlendiricilerin anten çalışma koşullarına ve uçağın aerodinamik yapısına olumsuz bir etkisinin olduğu görülmemiştir. Küçük disk sınıfındaki anten çapları yönlendiricilerin, (X bandı dalga boyunun 1/10'u veya altı kadar) radar sisteminin Ku bandı da dahil çalışma koşullarıyla uyumlu olmasını sağlar. Yüksek frekanslı çalışma koşulları için anten disk çapı düşürülebilir [16].



Şekil 3.2 Yönlendirici çubuk yıldırım deneyi [11, 16]

Uçağın burun radomu ve kuyruğun hücum kenarı, radar ve haberleşme antenleri için en uygun bölgeler olmalarının yanı sıra yıldırım çarpmaları için de en riskli bölgelerdir. Koruma önlemi alınmamış radom ve kuyruk kapakları yıldırım çarpması sırasında hasarlanarak yıldırım akımının haberleşme sistemine sızmasına izin verebilir. Bu durum uçağın kontrol sisteminin kaybedilmesine ve radomun hemen arka bölgesinde bulunan pilotların hayati tehlike içinde bulunmalarına neden olacaktır. Yönlendiricilerin avantaj ve dezavantajları şöyle sıralanabilir.

- birden fazla yıldırım çarpmasını karşılayabilirler
- uygulanması ucuz ve kolaydır
- şiddetli yıldırım çarpmaları sonucu bükülerek radomun kompozit yapısını bozabilirler
- birden fazla yıldırım karşılamaları nedeniyle maliyeti ucuz olmasına karşın rüzgarın kesme kuvvetini ve ağırlığı arttırdığı için yakıt tüketimine etki eder
- kesme kuvvetini azaltmak için kompozit yapının içine gömülebilirler ancak bu durumda karışık bağlantı tasarımı ve deney zorlukları oluşturur
- bağlantı için kompozit yapıya delinen delikler içeriye suyun nüfuz ederek yapının yapraklanarak bozulmasına neden olabilir



Şekil 3.3 Yönlendirici çubuk bulunmayan radomdaki yıldırım hasarı [16].

3.1.2 Boşalma Uçları (Static Discharger)

1967 yılında Pan Am şirketine ait Boeing 707 uçağında yıldırım çarpması sonrasında oluşan patlamanın ardından Amerika Ulusal Havacılık İdaresi F.A.A. olayı

araştırmaya başlamış ve uçağın düşüş nedeninin, yıldırım çarpması sonucu uçaktaki yük boşalması sırasında yakıt tankında bir ark meydana gelmesi ve bu nedenle yakıt buharının tutuşarak patlama oluşması olduğu sonucuna varmıştır [17]. İki hafta içerisinde uçaklarda oluşacak yük birikimlerinin atmosfere doğal olarak boşalmasını sağlayacak olan yeni bir aygıtın tasarlandığı ve işletmedeki ve üretimdeki tüm ticari uçaklara “static wick” olarak adlandırılmış bu aygıtların takılma zorunluluğunun getirildiği açıklanmıştır (Şekil 3.4) [18].



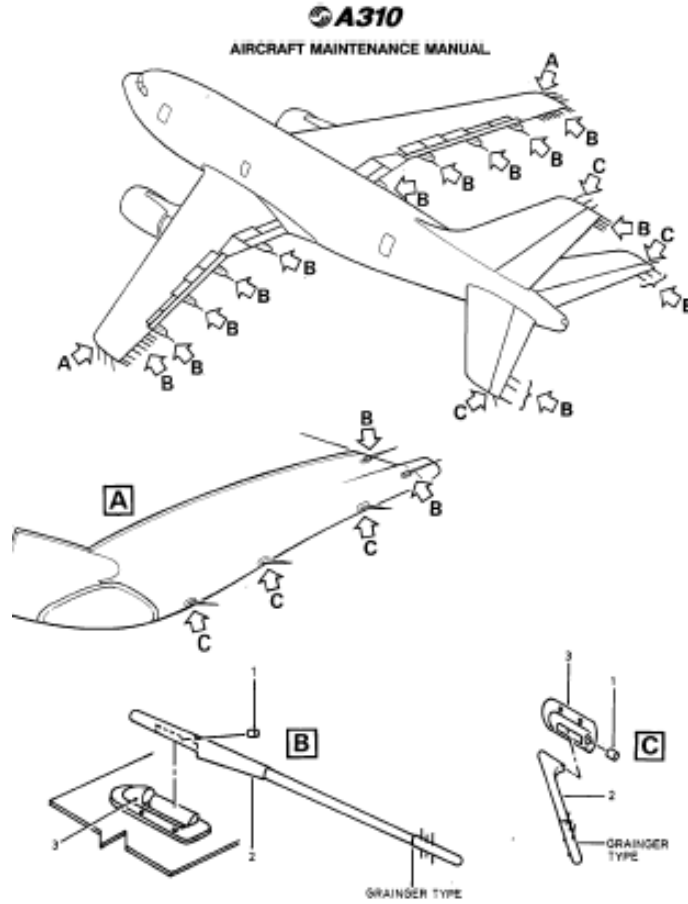
(a)



(b)

Şekil 3.4 Uçak kanatlarında kullanılan boşalma ucu (static wick) fotoğrafları [15].

Boşalma uçları (püskülleri) olarak adlandırabileceğimiz bu aygıtlar, uçlarında iğne ucu şeklinde bir veya iki tane elektrot bulunan ve bir iletken ile uçağın gövdesine bağlanan sabit elemanlardır (Şekil 3.5) Elektrotlara kadar olan kısım, uçaktan boşalacak yükleri ince uçlu elektrotların etrafında yoğunlaştırabilmek için fiberglas veya benzeri bir yalıtkan malzeme ile gövdeden yalıtılır. Elektrotlardaki yük birikimi ve ortam koşulları boşalma için gerekli eşiği aştığında yükler atmosfere boşalmış olurlar [18].



Şekil 3.5 Boşalma uçları ve bağlantı yerleri [18].

Boşalma uçları aşağıda belirtilen üç yolla elektrik yüklerini boşaltır [18]:

- korona boşalmasının başlangıcı için gereken gerilim seviyesini düşürerek
- boşalmanın atmosferik alana dik açıda oluşmasına neden olarak
- bölgesel radyo frekansı alan şiddetini pratik olarak sıfırlayıp boşalmanın bu bölgede oluşumunu sağlayarak

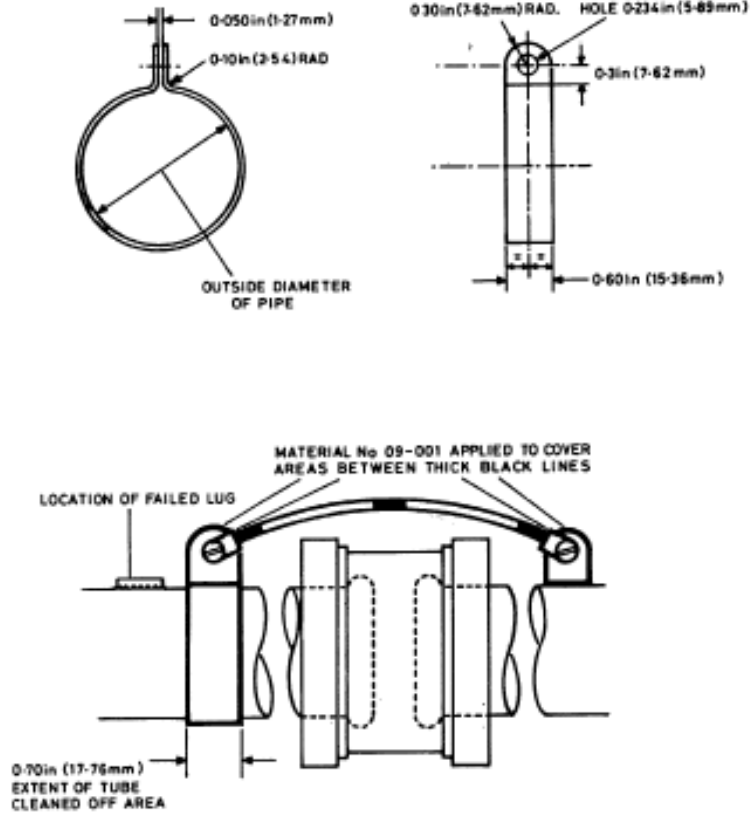
Boşalma uçları, statik yükleri boşaltmaları yanında yıldırım darbesinin uçağın başka bölgesine yönlendenen, gövdenin uç bölgelerinden dışarı çıkması için kılavuzluk görevi de yaparlar. Basit yapıları ve ucuz maliyet nedeniyle etkin olarak kullanılan bir korunma yöntemidir.

Statik elektriklenmeyi azalttığı için haberleşme sistemlerinde oluşabilecek parazitlenmeleri de önleyen etkisi vardır. Uçaklarda yapısal hasarlarının dışında elektriksel özelliklerindeki değişimler açısından da düzenli olarak kontrolleri yapılır. Özellikle haberleşme sistemindeki zor ve parazitli iletişim sorunlarında ilk olarak arıza aranacak yerler boşalma uçlarıdır. Zamanla gövdeden aygıtta olan geçiş direncinde malzeme özelliğinin değişmesi nedeniyle büyümeler olabilir. Uçak bakım kitaplarındaki (maintenance manual) limitlere göre gerektiğinde değiştirilebilir.

3.1.3 Topraklama İletkenleri

Daha önceki konularda da anlatıldığı gibi yıldırım darbesi çarpma şeklinde uçağa ulaşmasından itibaren çok iyi bir iletken olan alüminyum alaşımı gövde üzerinde akmaya başlar ve geçiş direncinin en az olduğu bölgelerden ilerleyerek uçağı terk eder. Yıldırımın uçak üzerindeki bu geçişi sırasında farklı dirençli bölgelerle karşılaşması da mümkündür. Uçağın uçuşunu doğrudan etkileyen aileron, elevator, flap vb. uçuş kumanda yüzeyleri gövde yapısına menteşelerle bağlıdır. Yıldırım akımı bu menteşelere ulaştığında elektriksel bir dirençle karşılaşacak ve menteşelerin üzerinden ark oluşturarak atlayacaktır. Kiloamperler boyutundaki bu akımın oluşturacağı ark, menteşelerin eriyip parçalanması ya da hareket yeteneğini kaybedecek şekilde kaynamasına neden olabilir. Uçuş kumanda yüzeylerindeki bir hareket kaybı uçağın kontrolden çıkmasına neden olacaktır. Aynı şekilde uçağın hayati parçalarından biri olan iniş takımlarında meydana gelebilecek bir hasar uçağın güvenli bir iniş yapmasına engel olabilecek önemli sonuçlar doğurabilir.

Bu gibi hasarlardan korunabilmek, geçiş direncinin azalabileceğinin ve uçuş sistemlerinin zarar göreceğinin bilindiği bölgelerde yıldırım akımının daha kolay geçebileceği yollar yaratmakla mümkün olabilir.



Şekil 3.6 Örnek bir topraklama iletkeni bağlantı detayı [18].

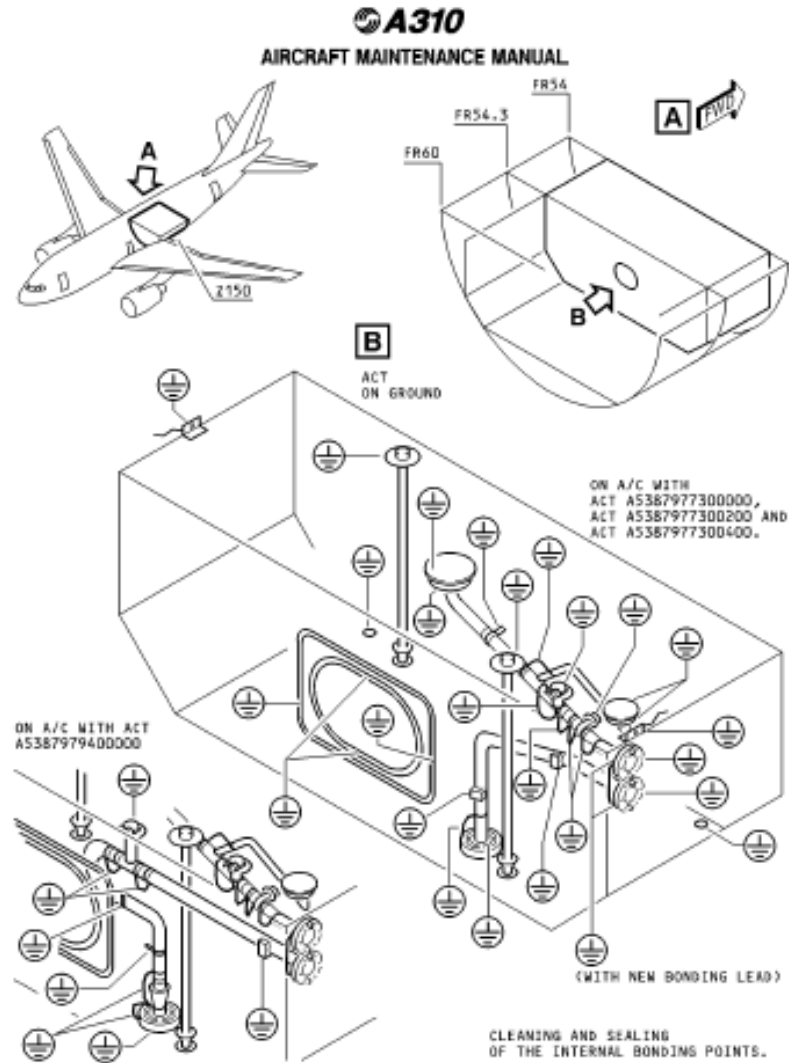
Uçağın hemen hemen tüm hareketleri yüzeyleri, yıldırım akımının oluşturacağı ark riskini önlemek için birkaç yerden, iyi bir topraklama kablosu yardımıyla gövdeyle birleştirilirler. Genellikle örgülü iletken şeklindeki topraklama kabloları her iki ucundaki kablo pabuçları ve civata-somun yardımıyla gövdeye çok düşük bir geçiş direnci ile bağlanır (Şekil 3.6). Maliyeti oldukça düşük ama çok etkin bir koruma yöntemidir.

3.2 Dolaylı Etkilerden Korunma Yöntemleri

Modern yolcu uçakları kilometrelerce kablo, düzinelerce bilgi işlemci ve motor gücünden yolcu kulaklığına kadar bir çok işlevleri olan donanımlarla donatılmışlardır. Her bilgi işlemcide olabileceği gibi uçak üzerindeki bilgi işlemciler

de zaman zaman gerilim dalgalanmalarından etkilenirler. Yıldırım darbesinin uçağın yapısal elemanlarına etkileri göz önüne alınarak geliştirilen tasarımlara ek olarak elektrik/elektronik sistemlerin tasarımında yıldırım etkilerinin göz önünde tutulması gelişmiş teknolojiler kullanan günümüz uçakları için oldukça önem kazanmıştır.

Uçağa yıldırımın çarpması ya da uçağın yakınında bir yıldırım düşmesi olayının gerçekleşmesi, güç ve avionik sistemler üzerinde geçici aşırı gerilimlerin oluşmasına neden olacaktır. Bu aşırı gerilimlerin ve uçak üzerindeki yük birikiminin uçak sistemlerine olan etkileri dolaylı etkiler olarak adlandırılır. Topraklama, ekranlama, koruyucu mikroelemanlar gibi önlemlerle bu etkilerden korunmak ve etkileri uçuş güvenliğini etkilemeyecek şekilde azaltmak mümkündür.



Şekil 3.7 Yakıt tankındaki topraklama noktaları [18].

Yıldırım çarpması olaylarının uçağın iniş ve kalkış gibi en kritik fazında meydana geliyor olması ve uçağın kaybedilmesi ile sonuçlanacak etkiler meydana getirebilmesi nedeniyle alınacak koruma önlemleri ile ilgili olarak yetkili birimler tarafından standartlar belirlenmiştir. Tüm uçak üreticileri ve havayolu işletmecileri bu kurallara uymakla yükümlüdürler.

Geçici aşırı gerilimlerin oluşturacağı küçük bir arkın ölümcül sonuçlar doğuracağı başka bir uçak bölgesi ise yakıt tanklarıdır. Yakıt tanklarının metalik yapısının yıldırımdan en az etkilenecek şekilde kalın, dayanıklı malzemelerden tasarlanmasının yanında yakıt sistemi ile ilgili elektriksel sistem ve kullanılacak malzeme seçiminde ark oluşumunu engelleyecek ölçütler göz önünde tutulmalıdır (Şekil 3.7). Yine bu konuyla ilgili uyulması gereken standartlar mevcuttur [13, 14, 19].

3.2.1 Tasarım Ölçütleri

Yıldırımın dolaylı etkilerini azaltmak için yapılan çalışmalar göz önünde tutulması gereken ölçütler şöyle sıralanabilir [6]:

- fiziksel hasarları önleyebilecek dolaylı etkilerden koruyan bir tasarım yapmak
- aracın uçuş güvenliğini, mürettebat ve yolcuların yaşamını ve uçak sistemlerinin güvenilirliğini sağlamak
- mevcut ve denenmiş koruyucu cihazlar ve teknikler yardımıyla aviyonik sistemleri tasarlamak
- maliyeti arttıran mükemmel sistemler ile maliyeti düşük ancak etkin koruyucu sistemler arasındaki optimizasyonu sağlamak
- elektromanyetik etkilere maruz kalabilecek bölgelere kablo ve donanım yerleştirilmesinden kaçınmak

3.2.2 Donanımların Konumu Sayesinde Korunma

Donanımların yıldırımın yaratacağı elektromanyetik etkilerin ez az olacağı yerlere konumlandırılması en doğal korunma yöntemidir. Örneğin yıldırım akımının uçak içine sızabileceği giriş kapakları, geçiş delikleri gibi yerlere elektronik donanımları yerleştirmekten kaçınılmalıdır. Kapaklar genelde elektromanyetik sızıntının olabileceği en riskli bölgelerdir ancak küçük bir alana fazla sayıda donanım

sığdırabilmek sorunu, bu donanımları kapaklardan uzak bir konuma yerleştirmeyi her zaman mümkün kılmaz.

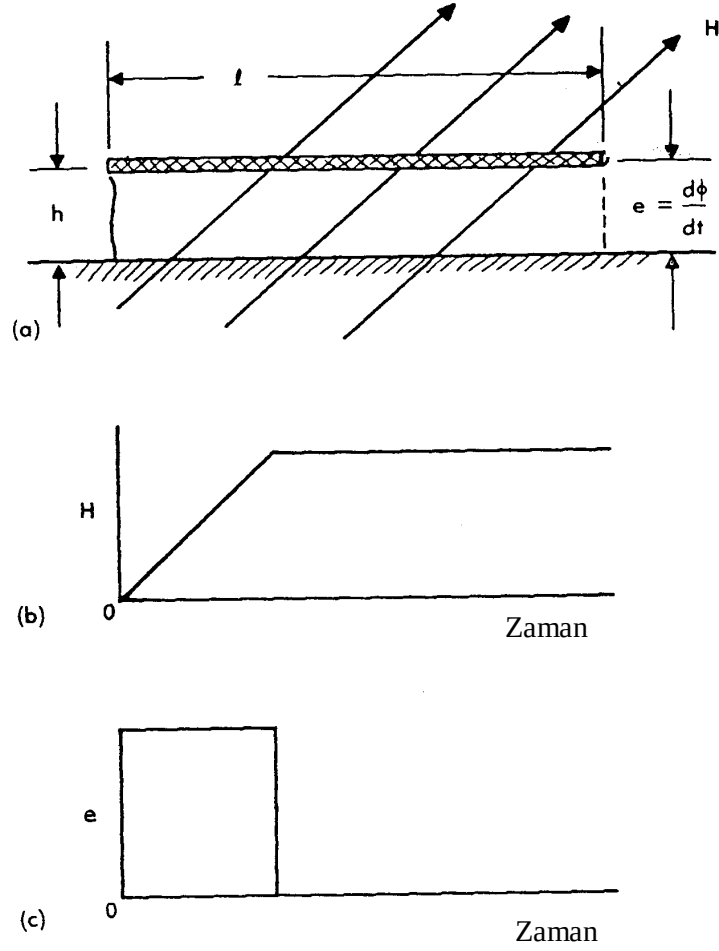
3.2.3 Kabloların Konumu Sayesinde Korunma

Kabloların yolunu belirlemek biraz daha esnek olunabilecek bir konudur. Kablolar deliklerden, eğrilik yarıçapının küçük ve dış yüzeyin ince olduğu yerlerden uzak tutulmalıdır. Kablolar aynı zamanda topraklama yapılabilecek yapısal düzlemlere yakın yerleştirilmelidir. Metaller toprak düzlemine ne kadar yakın yerleştirilirse, iletken ile toprak düzlemi arasından geçebilecek akı o kadar az olur. Kanadın dış hücum kenarına yerleştirilmiş iletkenler, iç tarafa yerleştirilmiş iletkenlere göre daha fazla akı toplayacaktır. Kokpit camlarının etrafına düşmüş bir yıldırım, camın büyük bir delik gibi davranması nedeniyle manyetik akı çok yüksek değerlere ulaşarak kokpit personeli ve ön panelde bulunan seyrüsefer aletlerini tehlike altında bırakır. Bu bölgedeki donanım ve bağlantı kablolarının bu yüksek alan tehlikesine karşı uygun yerleştirilmeleri gerekir. Tüm bu bilgilerin dayanağı, kabloların korumalı ve korumasız olması durumunda kabloda endüklenen gerilim ve akımların düzeyi ile ilgilidir [6].

3.2.4 Korumasız Bir Kablolama Sisteminde Endüklenen Gerilim ve Akımlar

Aviyonikler için oluşturulacak koruma sisteminin ilk aşaması endüklenen gerilimin hesaplanmasıdır. Temelde endüklenen gerilim ve akımlar uçtaki kablo sisteminin geometrik yapısından, çevresindeki manyetik ve elektrik alanların değerlerinden hesaplanır. Ancak uçtaki kablo sisteminin karmaşıklığı düşünüldüğünde böyle bir hesaplama pek de kolay değildir. Yaklaşım yöntemleri ile basit geometrik şekiller ele alınarak hesaplama yoluna gidilebilir. Bu tip hesaplamalar problemin kaynağını belirleyebilir ve kolay hesaplama yöntemlerine geçiş yardımcı olabilir. Bu sayede sistemin zarar görmesi önlenmiş olur.

Bir iletkenin veya bir iletken demetinin en basit geometrik yaklaşımı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Şekil 3.8'de kablo üzerine, kabloda maksimum gerilimi oluşturacak yönde düzenli bir manyetik alan uygulanmaktadır.



Şekil 3.8 Bir kabloda değişen manyetik alanda endüklenen gerilim [6].

- (a) Geometri
- (b) Manyetik alan dalga şekli
- (c) Gerilim dalga şekli

Ortak uç gerilimleri dikkate alındığında ve kablo sistemleri yeterince kısa tutulduğunda iletilen akımın etkisi göz önünde alınmayabilir. Bu durumda endüklenen gerilim:

$$e = d\Phi/dt = \mu_0 A dH/dt \quad (3.1)$$

olur. Burada A (m²) cinsinden döngü alanı; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; Φ Weber cinsinden toplam akı; H (A/m) cinsinden manyetik alan şiddeti; t (s) zaman ve e (V) cinsinden gerilimdir. (3.1) denklemi, l (inch) kablo demetinin uzunluğunu, h (inch) kabloun zeminden yüksekliğini göstermek üzere

$$e = 8.11 \times 10^{-10} l.h.dH/dt \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir [6]. Hesaplanan gerilim değeri kablo demeti ile uçak gövdesi arasında oluşmaktadır.

İletkenlerin birbirine yakın olması nedeniyle aralarındaki gerilimler veya devre gerilimleri 10'dan 200 dB'e veya 20'den 46 dB'e kadar oranlarda düşer [6]. Bu da toplam döngü alanının düşmesini sağlar. Kabloda oluşabilecek maksimum akım kablounun iki ucunun da uçak gövdesine bağlanmasıyla meydana gelen alçak veya sıfır empedans üzerinden akar. Bu empedans, kablo ekranının kablounun her iki ucundan gövdeye topraklanması ile veya yarı iletken devre gruplarının bağlanması ile oluşur. Bu bağlantıların her ikisinde de düşük empedans meydana gelir.

3.2.5 İletim Hattı Etkileri

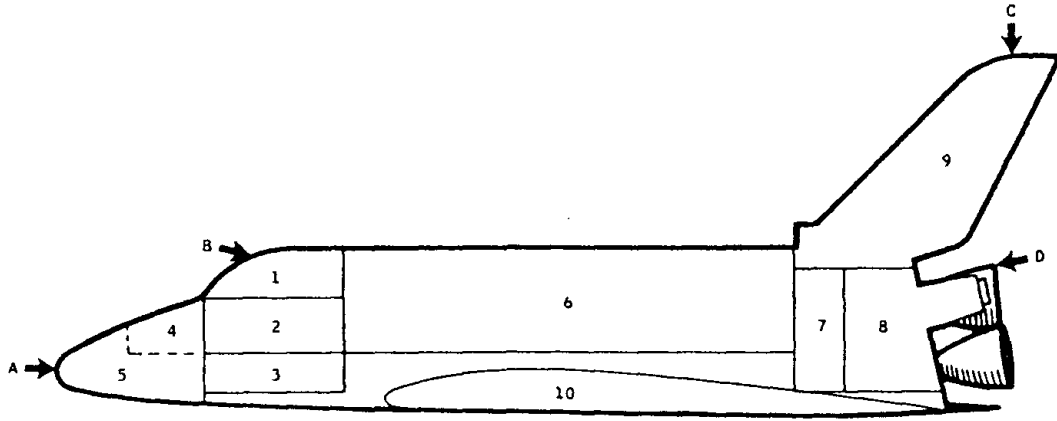
İletkenler, boyutları ve yakınındaki zemine uzaklığı ile değişen kapasite ve endüktans değerleri ile sınıflandırılır. Bunlar göz önüne alındığında manyetik alandaki değişim açık devre uç gerilimlerinde salınlara yol açar. Bu salınımlar manyetik alanın değişim oranına göre gerilim üzerinde değişiklikler yaratır. Manyetik alan genelde değişken bir yapıdadır ve düzgün bir rampa fonksiyonu şeklinde değildir. Bu oluşan açık devre geriliminin de değişken olmasına sebep olur. Maksimum gerilimin tahmin edilmesi zor olacağından (3.1) ve (3.2) formüllerden yaklaşık bir sonuç elde edilebilir. Salınımların frekansı iletken uzunluğu ile ters orantılıdır.

Uçak üzerinde kablolama demetler halinde yapılır, bu demetler farklı boylarda iletkenleri içerirler. Herhangi bir ünite basit bir manyetik alana bile maruz bırakılırsa kompleks salınımlar üretir. Genelde birçok frekans yanında tek bir baskın frekans olur. Her frekans kendine has sönümlene karakteristiğine sahiptir. Güvenli olan tek bir genelleme vardır, o da; büyük uçakların kabloları küçük uçaklarınkinden uzun olur ve düşük frekanslarda salınırlar. Savaş uçaklarında endüklenen gerilim ölçümlerinde frekansların 1 ile 10 MHz arasında değiştiği görülmüştür [6].

Kablo demetinde topraklama tek bir noktadan yapılmalıdır. Kablolarda yapılan ölçümlerde akımında gerilim gibi salındığı görülmüştür. Çok noktadan topraklanan kablolarda akımın salınmadığı ancak grafiksel olarak içerdeki manyetik alanı hemen altından izlediği görülmüştür [6].

3.2.6 Manyetik Alan Bölgeleri

Bir kablo üzerindeki gerilimin hesaplanabilmesi, o bölgedeki manyetik alanların ölçülmesine bağlıdır. Mümkün olan çözüm, karakteristik bölgelerin belirlenmesini gerektirmektedir. Örneğin savaş uçaklarında kokpit manyetik olarak açık bir bölge olarak düşünülebilir. Kabul edilebilir sınırlar içerisinde bütün kokpitler aynı manyetik alanı oluşturmaktadırlar. Diğer bir karakteristik bölge ise aviyonik kompartmanı olabilir. Böyle birçok bölge benzerlik gösterir. Bu doğrultuda uçak az sayıda ve farklı manyetik karakteristikler gösteren bölgelere bölünebilir. Bu düşünce, ilk kez bir uzay mekiğinde denenmiştir. Bu şekilde belirlenen bölgeler Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Bu bölgelere ait manyetik alan hesaplamaları alan konusunda uzman bir grup mühendis tarafından yapılmıştır [6].



Şekil 3.9 A ile D bölümleri arasında, yıldırım arkı olasılığının en yüksek olduğu bölgeler [6].

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| 1. Uçuş güvertesi | 6. Yükleme bölümü |
| 2. Merkez donanım bölümü | 7. Arka donanım bölümü |
| 3. Alt donanım bölümü | 8. Motor bölümü |
| 4. Ön üst | 9. Kuyruk |
| 5. Ön merkez | 10. Kanat |

Alanlar iki bileşenden oluşmaktadır. Geçişlerde meydana gelene A bileşeni, metal yüzeylerde yayılma yoluyla meydana gelene de B bileşeni denilmektedir. A bileşeni dışarıdaki manyetik alanın değişim hızına uyarken, B bileşeni daha yavaş değişmektedir. Alan şiddeti hesaplama çalışmaları, akımın uçak ve ölçülen manyetik alanın üzerinde döndüğü deneysel çalışmalarla desteklenebilir.

3.2.7 Gerilim ve Akımın Hesaplanmasındaki Temel Noktalar

Her bölge için oluşturulan manyetik alanlar daha sonra tipik bir uçak üzerindeki yaklaşık akım ve gerilim hesaplamalarında kullanılabilir. Bunun için aşağıdaki yaklaşımlar yapılır [6];

- Yerden h yüksekliğinde, l boyunda, d çapında bir iletken,
- Maksimum gerilimi üretecek şekilde yönlendirilmiş manyetik alan,
- İletkenin bir ucu topraklı olmalı,
- Manyetik alanlar bulunmalı.

Bunlar (3.1) ve (3.2) denklemlerine dayanan yaklaşımlardır. Bu yaklaşımlardan sonra;

$$e_{oc} = K_1 \cdot l \cdot h \cdot H \quad (3.3)$$

yazılabilir. Burada, l ve h metre ise $K_1 = 0.63$, l ve h cm ise $K_1 = 0.63 \times 10^{-4}$ alınır [6]. H A/m cinsinden manyetik alan şiddetidir. Açık devre gerilimi H alanının türeviyle orantılıdır. İletkenin her iki ucundan da topraklandığını düşünürsek;

$$I_{sc} = K_2 \cdot l \cdot h \cdot H \quad (3.4)$$

olur. İletken uzunluğu kısa devre akımını etkilemez. Kısa devre akımının şekli manyetik alan şekli gibi olmaya çalışır.

Kablo demetinin zeminden yüksekliğini (h) hesaplamak zordur. Çünkü kablo demeti sıkça kendisini destekleyen yapıya bağlanmıştır. Bu yapı nadiren uçak yüzeyi olmaktadır. Bu hesap için;

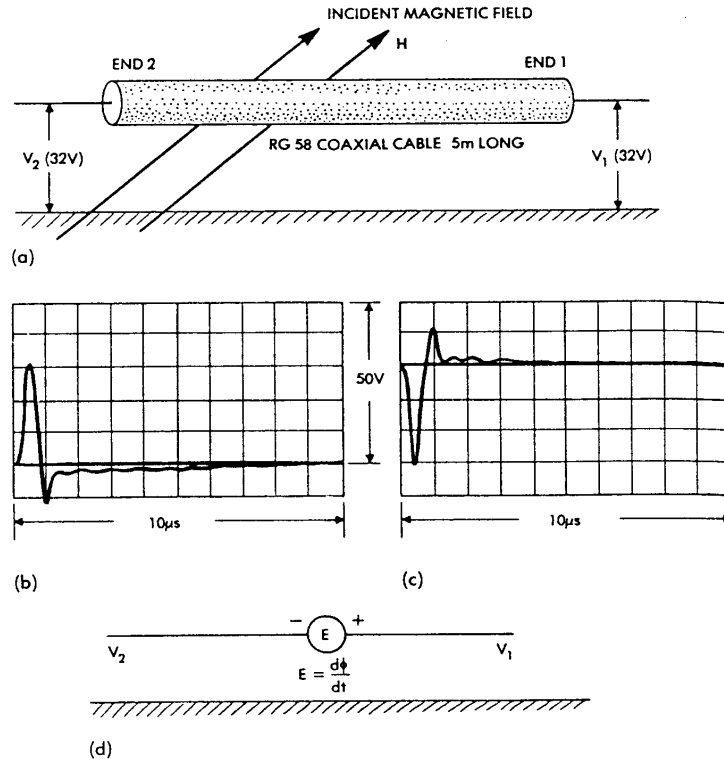
- Yükseklik en yakın metalik yapıya göre hesaplanır,
 - Eğer demet o yapı üzerine bağlı ise h değeri kablo çapının $1/4$ 'ü olarak alınır,
 - Eğer demet o yapı üzerinde değişken bir yükseklik gösteriyor ise h değeri net yükseklik ile kablo çapının $1/4$ 'ünün toplamı olarak alınır
- yaklaşımları dikkate alınır.

3.3 Ekranlama

3.3.1 Ekranların Topraklanması

Ekranların manyetik alana karşı etkili olabilmesi için her iki ucundan da uçak gövdesine bağlanması gerekir. Bu durumda kısa devre akımı ekrandan geçecek ve bu akım orijinal akıyı bozmak isteyecektir. Eğer ekran bir uçtan topraklanırsa gerilim endüklenecek ancak, akım akışı veya akımın bozulması söz konusu olmayacaktır.

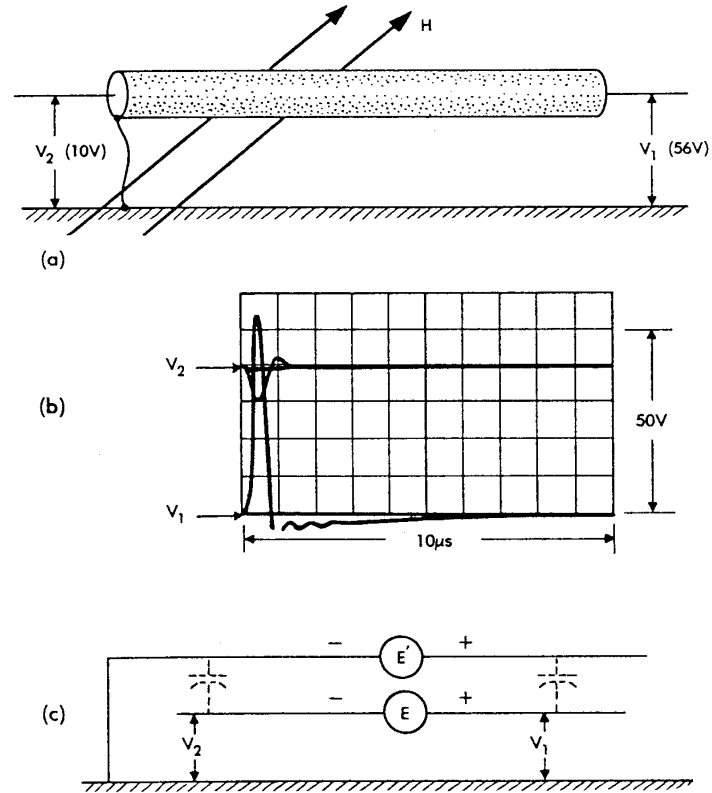
Bu etkilerden bazılarını gözlemlemek için 5 m uzunluğunda bir RG-58/U koaksiyel kablosu üzerinde bir takım deneyler gerçekleştirilmiştir [6]. Topraklı metal zemine yakın bir kablo ele alınmış, manyetik alan kablo ile topraklı zemin arasına uygulanmıştır. Kablonun damar iletkeni ile topraklı zemin arasında, kablounun iki ucunda da gerilim ölçümü yapılmıştır. Tüm yük empedansları dengelendiğinde, ekransız veya ekranın bağlanmadığı iletkenlerde; ortak nokta gerilimleri eşit fakat birbirine ters olduğu görülmüştür (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Ekranın iki uçtan da topraklanmadığı durumda endüklenen gerilimler [6].

a) Deney düzeni; b) V_1 ; c) V_2 ; d) Eşdeğer devre

İletkenin bir ucuna direnç bağlandığında ve yük dengesi değiştiğinde, toplam endüklenen gerilim değişmemekle birlikte çoğunluğu yüksek empedanslı bölgede oluşmaktadır. Ekranı bir uçtan topraklamak diğer uçtaki ortak nokta gerilimini etkilememektedir (Şekil 3.11). Değişen manyetik alan ekranın açık ucu ile toprak arasında gerilim endüklenmesine yol açmaktadır [20]. İletkende aynı alana maruz kaldığından ekranların ucunda oluşan etki, iletken uçlarında da oluşmaktadır. Yük empedanslarının eşit olmaması bir kenara bırakılırsa, bir uçtaki gerilim ancak diğer uçtakinin artırılması ile düşürülebilir.



Şekil 3.11 Ekranın bir uçtan topraklandığı durumda endüklenen gerilimler [6].

a) Deney düzeni; b) V_1 , V_2 ; d) Eşdeğer devre

Ekranın iki uçtan topraklanması tamamen farklı bir tepki oluşturur. Eğer ekran iki uçtan topraklanmış ise değişen manyetik alan ekran üzerinde değişen bir akımın akmasına sebep olur. Ekran akımı, sinyal iletkeni ve toprak arasında indüklenen gerilimi düşürmektedir. Ekran akımı anlık alanı düşürecek bir manyetik alan oluşturur. Bu açıdan bakıldığında sinyal üzerindeki gerilim, sadece anlık alan ile düşünülen alan arasındaki farka tepki verecektir. Alternatif olarak gerilimdeki düşüş ekran ile sinyal iletkeni arasındaki etkileme endüktansı olarak açıklanabilir. İletkenin

uçları arasındaki gerilim, sinyal iletkeni üzerinde indüklenen gerilim (E) ile ekran ve sinyal iletkeni arasında oluşan etkilenme endüktansı ile oluşan gerilimin toplamıdır.

Devrenin iki bölümü vardır; biri manyetik alanı ekran üzerinde akan akıma eşlemekte diğeri ekran üzerindeki akımı iletken üzerindeki gerilime eşlemektedir. Ölçümler ve devre, damar iletkeni üzerindeki gerilimin uçlardaki yüklerin bağlı empedansına bağlı olduğunu göstermektedir. Bir uçtaki düşük empedans o uçtaki gerilimi aşağı çekmekte diğeri uçtaki gerilimi de yükseltmektedir.

3.3.2 Ekran Transfer İşlevleri

Eğer bir ekran “mükemmel” ise ekran üzerindeki akımın akışı, ekran ve sinyal iletkeni arasında herhangi bir gerilim oluşturmaz. Bununla beraber ekranların mükemmel olmasını engelleyen bazı etkenler vardır. Öncelikle ekranın sahip olduğu bir direnç vardır. Bu direnç içinden akan akım, ekranın iç yüzeyinde bir elektrik alan üretir. Oluşan dahili alan ve sinyal iletkeni arasındaki etkileşimin doğası, kabloun ucundaki bağlantılara ve kabloun içinde bulunan devredeki dağılmış endüktans ve kapasiteye bağlıdır. Basitleştirilmiş bir durum olarak sinyal iletkeninin solda kalan ucunun ekranının kesildiğini düşünelim. Dahili elektrik alan böylelikle sinyal iletkeniyle tamamiyle girişim yapmış olur. Kabloun sağ taraftaki ucundaki ekran arasındaki gerilim, ekran uzunluğu boyunca toplam dahili elektrik alanı şiddetinin yarattığına eşit olur [21].

Bu basit girişim (coupling) tipi, düşük frekanslı veya yavaş değişen ekran akımları için geçerlidir. Ekran akımlarının yeteri kadar yavaş olması sebebiyle bu model uygulanabilir. Yani ohm yasasıyla ifade edilen dahili elektrik alanın dalga biçimi, ekran akımınıninkiyle aynıdır.

$$U = I R \quad (3.5)$$

Eğer bütün ekran, katı cidarlı bir silindir ise dahili elektrik alan ekran malzemesinin direncine ve ekran dahili yüzeyindeki akımın yoğunluğuna bağlıdır. Bu j_i dahili akım yoğunluğu, genel olarak silindirin dış yüzeyindeki akım yoğunluğuyla aynı olmaz. Deri etkisi nedeniyle, ekranın iç yüzeyindeki akım yoğunluğu harici akımından daha yavaş yükselecektir. İç yüzeydeki akım yoğunluğunun arttığı durumdaki değişim, alan malzemesinin yayılma özelliğiyle ve cidar kalınlığının karesiyle doğru

orantılı ve cidar malzemesinin direnciyle ters orantılıdır. Katı-cidar ekranlı kablolar ve sıkıca oturan kaplamalı katı metal kablolar bu tip davranışı gösterecektir [6].

Farklı bir davranış şekli genellikle örgülü ekranlı kablolarla gözlenebilmektedir. Ekranlar sızıntıya neden olan bir miktar küçük deliklere sahip olmaları nedeniyle, mükemmel bir iletken silindir değildir. Bir ilk yaklaşım olarak örgülü ekran içindeki deliklerden dışarıya ve içeriye doğru oluşan dış alan çizgileri görselleştirilebilir. Kaçak alan, damar iletkeni ile ekran arasında bir gerilim endükleyerek ekran iç yüzeyi etrafında dairesel bir manyetik alan oluşturur. Böylelikle bir iletken ile ekran arasında ortaya çıkan toplam endüklenmiş gerilim, kablo ekranının direnciyle, ekran akımının değişim hızıyla ve kablodaki delik sayısı ile orantılıdır.

Eğer ekran toprak potansiyelinde tutulursa, sinyal iletkeni toprak potansiyeline yakın tutulursa ve ekranlanmış kablo bir harici ve değişken elektrik alanına maruz bırakılırsa, harici kaynaktan gelen dielektrik akımı kablodaki delikten ve sinyal iletkeni üzerinden geçecektir. Harici yük empedansları içersindeki bu dielektrik veya yerdeğişim akımları sinyal iletkeni ve ekran arasında bir gerilim üretir.

Ekranın harici empedansı içinde akan gürültü akımları eğer ekran tam olarak topraklanmamışsa, ekran ve herhangi bir harici toprak yapısı arasında yüksek bir gerilim üretir. Ekran ve sinyal iletkeni arasında doğal olarak gelişen kapasitenin yanında, sinyal iletkeni ve ekran arasındaki harici empedanslar sinyal iletkenini hemen hemen bütün potansiyeli ekran olarak kabullenmeye zorlayacaktır. Bu durumda sinyal iletkeninin çevre toprağından farklı bir potansiyelde olması nedeniyle dielektrik akım sinyal iletkeninden, ekran içindeki delikler boyunca toprağına geçer. Dielektrik akımlar yine sinyal iletkeni ve ekran arasındaki gerilim değerini yükseltirler.

Çoğu durumda manyetik kaçak etkileri, kapasitif kaçak etkilerinden daha önemlidir. Bu durumda sinyal iletkeni ve toprak arasında oluşabilecek gerilimlerden farklı olarak, bir sinyal iletkeni ve bir kablonun ekranı arasında oluşabilecek gerilimi etkileyen faktörler; ekranın direnci, ekranın manyetik alanların içine sızmasına izin verme derecesine ekranın elektrik alanlarının içine girmesine izin verme derecesidir. Son iki karakteristik, ekranın bir eşdeğer transfer endüktansı ve bir eşdeğer transfer

kapasitesi cinsinden ifade edilebilirler. Frekans domeninde bu durum aşağıdaki formülasyonla ifade edilebilir.

$$V_s = I_n(Z_d + j\omega M_{12}) \quad (3.6)$$

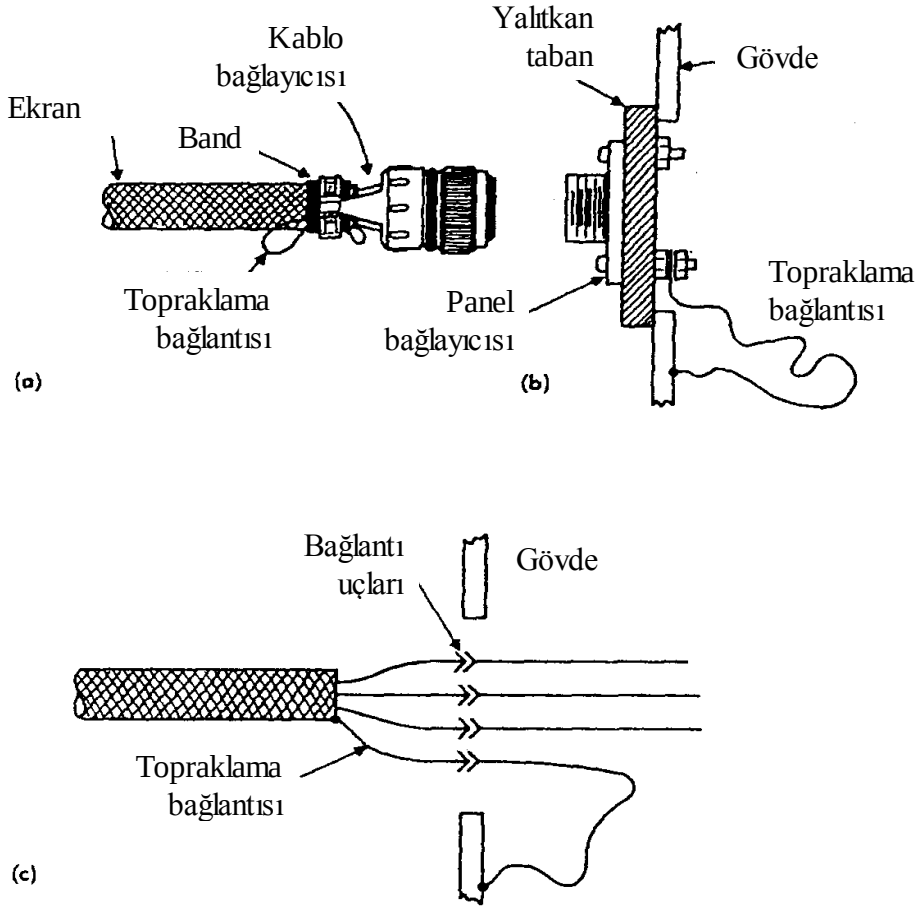
Burada, Z_d terimi yerine genellikle kablo ekranının doğru akım direnci göz önüne alınır. Bu durumda akım ve gerilim arasındaki ilişki basitçe;

$$V_s = I_n(R_{dc} + j\omega M_{12}) \quad (3.7)$$

olarak ifade edilebilir. Sinyal iletkeni üzerinde indüklenen akım ile harici gürültü gerilimi arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir [6].

$$I_s = E_n j\omega C_{12} \quad (3.8)$$

Bir ekranlı kablunun transfer empedansı genellikle imalatçı tarafından belirlenebilen bir faktör değildir. Aynı normal türden kablolar arasında bile bu transfer empedansı önemli ölçüde değişebilir.



Şekil 3.12 Çeşitli ekranlama tipleri [6, 21].

Bir ekranlı kablunun transfer karakteristiklerini belirlemenin en güvenli yolu, ekran içersinde dolaşan akımlar tarafından üretilen iletken gerilimlerinin gerçek ölçümelerini yapmaktır.

Yıldırım tarafından oluşturulan elektromanyetik girişim genellikle geniş bantlı ve yüksek frekanslıdır. Ekranlamalar genellikle sinyalin dalga boyundan daha kısa olacak şekilde yapılır. Kablolar genelde, kablo demetinin üstünde örgü şeklinde zırha sahiptirler. Bu ekran uçağın gövdesine en az bir noktadan bağlanmalıdır (Şekil 3.12).

Sonuç olarak, elektromanyetik alanların kablo ve donanımlarda meydana getireceği etkileri önlemek için kullanılan en etkili yöntemlerden biri ekranlamadır. Ekranlama, çevrim akımının etkisini azaltabilmek için en az iki ucundan yapılmalıdır. Uzun bir kablunun belirli bir kısmına etkimiş manyetik alanın oluşturacağı akım eğer ekranlama sadece uçlardan yapılmışsa, bütün kablo boyunca akacaktır. Böyle uzun kablolar birkaç yerinden birden topraklanmalıdır [22].

3.4 Koruma Elektrodu

Koruma elektrotlu sistemler, genellikle birbirinden belirli uzaklıkta ve aralarında bir dielektrik malzeme bulunan elektrot sistemleridir. Elektrotlar arası atlama gerilimi, dielektrik malzemenin özelliğine, elektrotların geometrisine ve elektrotlar arasına uygulanan gerilimin dalga şekline bağlıdır. Gerilim dalgası kısa sürede yükselen bir dalga şekline sahipse atlama gerilimi, yavaş yükselen bir dalga şeklindekine göre daha yüksek olacaktır. Koruma elektrotlarına eklenen tritium gibi radyoaktif elementler atlama geriliminin dalga şekline bağlılığını azaltıcı etki gösterir [22].

Avantajları şöyle sıralanabilir ;

- basit ve güvenlidirler
- yüksek akımlara dayanıklıdır
- düşük kapasiteye sahiptirler
- her iki yönde akım geçişine izin verirler
- delinme durumunda gerilim düşümü oldukça azdır

Dezavantajları ise şöyledir ;

- devam eden arkı söndüremezler, bir anahtar devresine ihtiyaçları vardır
- atlama gerilimi dalga şekline bağlıdır
- yüksek atlama gerilimine sahiptirler
- yansımalar nedeniyle harici dirençler kullanmak gerektirir

3.5 Zener diyotlar

Zener diyotlar, tek jonksiyonlu yarı iletkenler, bipolar tranzistörler dalgalanma önleyici olarak kullanılabilirler. Zener diyotlar üzerlerine uygulanan ters gerilim belli bir eşik değerini aştığında iletme geçen elektronik devre elemanlarıdır. Bu özellikleri nedeniyle devrelerde koruma elemanı olarak kullanılırlar. Daha düşük enerji seviyeli koruma sistemlerinde kullanılmaları daha uygundur [22].

Avantajları şu şekilde sıralanabilir ;

- küçüktürler
- montajları kolaydır
- iletimdeyken düşük empedansa sahiptirler
- gerilim zener seviyesine düşünce devreyi keserler
- düşük gerilimle çalışırlar
- iletme geçme süresi kısadır

Dezavantajları ;

- maliyetleri yüksektir
- yüksek frekanslarda sinyal kaybına uğrarlar (1 MHz üzeri)
- çift yönlü kullanım için iki adet zener ters bağlanmalıdır
- yüksek akımın geçtiği devrelere uygun değildirler (1 A-100 A)
- çalışma gerilimi aralığı 5 V ile birkaç yüz volt arasındadır

3.6 İleri Geçirgen Diyotlar

İleri geçirgen diyotlar düşük iletim gerilimleri nedeniyle düşük gerilim sistemlerinde koruma iletkeni olarak kullanılabilirler. Germanyum diyotlar 0,3 V ve silisyum diyotlar 0,6 V civarında bir eşik gerilimine sahiptirler [22].

Avantajları ;

- boyutları küçüktür
- maliyetleri düşüktür
- çalışma gerilimleri düşüktür
- dalgalı akımlarda mükemmel çalışırlar

Dezavantajları ;

- çift yönlü çalışma için ters yönde paralel iki diyot kullanılmalıdır
- kapasiteleri nispeten yüksektir

3.7 Lineer Olmayan Dirençler (Varistör)

Silisyum karbür, selenyum ya da metal oksitten yapılan lineer olmayan dirençlerdir.

Avantajları ;

- çift yönlü kullanılabilirler
- küçük boyutludurlar
- kendinden sönmüldürler, uygulana gerilim cihaz geriliminin altına düştüğünde çok küçük bir akım iletirler
- çok hızlı tepki verirler
- enerji kapasiteleri yüksektir

Dezavantajları ;

- düşük empedans yüksek kapasiteye sahiptirler
- 20-30 V'un altındaki gerilimlerde çalışmaya uygun değildirler.

4. UÇAK SİSTEMLERİNE UYGULANAN YILDIRIM DENEYLERİ

Doğada meydana gelen yıldırım boşalmalarını laboratuvar ortamında bire bir dalga karakteristikleriyle elde edebilmek mümkün değildir. Ancak yıldırım darbesinin evrelerinin benzer dalga şekilleri yüksek gerilim laboratuvarlarındaki çeşitli deney düzenekleri ile elde edilebilirler. Daha sonra bu evreler bir arada değerlendirilerek doğal yıldırım darbesi doğal şekline yakın bir şekilde incelenir.

Bu bölümde uçak malzeme ve sistemlerinin deney ve analizlerinde kullanılacak ideal dalga şekilleri incelenecektir. Dalga şekilleri sıradan bir yıldırım darbesi gibi değil, doğada karşılaşıldığı gibi daha karmaşık bileşenleri olan bir yıldırım darbesi şeklinde ele alınacaktır. Standart yıldırım konusu, doğal yıldırım darbesinin temel karakteristiklerini içeren, ayrı ayrı gerilim ve akım dalga şekillerini kapsar.

4.1 Yıldırım Etki Bölgeleri

Hava taşıtları, yıldırım çarpmaları sonucu meydana gelecek olası hasarlanma derecelerine göre çeşitli bölgelere ayrılmıştır [10, 13, 14]. Her bölge incelenirken, yıldırım darbesinin uçak üzerindeki bırakacağı hasar ve bu bölgelere düşme olasılıkları göz önüne alınır ve bu bölgelerle ilgili yer deneyleri yapılırken uygun dalga şekilli akım ve gerilim darbeleri uygulanması gerekir.

Bu bölgeler şu şekilde belirlenmiştir;

1. Bölge :

- 1A Bölgesi: Düşük olasılıkla ark kanalının oluşacağı çarpma noktaları
- 1B Bölgesi: Yüksek olasılıkla ark kanalının oluşacağı çarpma noktaları

2. Bölge :

- 2A Bölgesi: Düşük olasılıkla süpürme çarpması sonucu ark kanalının oluşacağı çarpma noktaları

- 2B Bölgesi: Yüksek olasılıkla süpürme çarpması sonucu ark kanalının oluşacağı çarpma noktaları

3. Bölge:

- 1. ve 2. bölgeleri içermeyen diğer bölgeler. Çok düşük yıldırım çarpması olasılığına sahiptirler ve çoğunlukla bir çift yıldırım çarpma noktası arasındaki yıldırım akımını taşırlar.

Herhangi bir uçakta bu bölgelerin yeri uçağın tasarım geometrisine ve çalışma koşullarına göre belirlenir. Bu nedenle bölgeler sıklıkla bir uçaktan başka bir uçağa farklılık gösterebilir.

4.2 Yıldırım Etki Bölgelerinin Belirlenmesi

Yukarıda anlatılan yıldırım etki bölgeleri tanımlarına göre, bu bölgelerin uçaktaki yerlerinin belirlenmesi aşağıda açıklanan ölçütlere göre yapılabilir [13, 14]:

1. Burun, kanat ve kuyruk uçları, kuyruk konisi, kanat ve motoru bağlayan yapı (pylon) gibi önemli çıkıntı bölgeleri doğrudan yıldırım çarpma bölgesi olarak düşünülmelidir çünkü uçağın bu bölgeleri kılavuz yıldırım çarpma noktasının büyük olasılıkla oluşacağı bölgelerdir. Hava taşıtının hücum kenarları olarak adlandırılan ön uç bölgeleri 1A bölgesi, firar kenarı olarak adlandırılan arka uç bölgeleri de 1B bölgesi olarak ele alınmalıdır. Genellikle ilk dönüş çarpması öncü kanalın uçağa değişinden kısa bir süre sonra meydana geldiği için 1A bölgesi, hücum kenarlarından 0,5 m'lik bir uzaklıkla sınırlandırılabilir. Bununla beraber bazen dönüş çarpması çeşitli koşullara bağlı olarak gecikebilir. 1A bölgesine gelebilecek zarar uçağın uçuş güvenliğini etkileyecek düzeyde ve 1A bölgesindeki yüzeyler yıldırıma karşı yeterince korunamıyorsa gecikmenin yaratacağı hasarların olasılığı da göz önünde tutulmalıdır.
2. Çarpma noktasının tanımlanması ile ilgili sorular artıyor ya da uçağın şekli eldeki eski deneyimlere ve deneylere göre tanımlanabilecek bir tasarıma benzemiyorsa ölçekli model deneyleri uygulanmalıdır.

3. 1A bölgesinin hemen arkasındaki bölge 2A bölgesi olarak tanımlanır. Gövde , kanat bölümleri, motor bağlantı yapısı için genellikle 1A bölgesinin tüm uzunluğu boyunca arkasında kalan bölge 2A bölgesi olarak ele alınabilir.
4. 2A bölgesinin arkasında kalan firar kenarları, 2B bölgesi ya da ilk çarpma noktası üstlerinde oluşuyorsa 1B bölgesi olarak tanımlanabilir. Eğer firar kenarı yüzeyleri tamamen yalıtkan malzemelerden yapılmışsa 2B bölgesi (ya da 1B bölgesi) öndeki ya da yandaki en yakın iletken yüzeye kaydırılarak ele alınmalıdır.
5. 1. ve 2. maddede belirlenen bölgelerin her iki tarafında kalan yaklaşık 0,5m genişliğindeki bölge, süpürme kanalının yana kaydığı ve değme noktası etrafındaki çeşitli saçılımların ele alındığı durumlarda yanındaki bölge ile aynı olarak düşünülebilir. Örneğin kanat ucu normalde 1A bölgesi olarak ele alınır (1B bölgesinde bulunan kana ucu firar kenarı hariç). Kanalın ve saçılımların ele alınabilmesi için kanadın altında ve üstünde, kanat ucunun 0,5m genişliğindeki iç kısımlarının aynı bölgeymiş gibi ele alınması gerekir.
6. Ark kanalı ile doğrudan temas olasılığı düşük olan yüzeyler yukarıda sayılan bölgelerin içindeki değil bu bölgelerin arasında kalan bölge olarak değerlendirilen 3. bölge ile tanımlanırlar. 3. bölgede bulunan yüzeyler önemli büyüklükteki elektrik enerjisini taşıyabilmelidir.

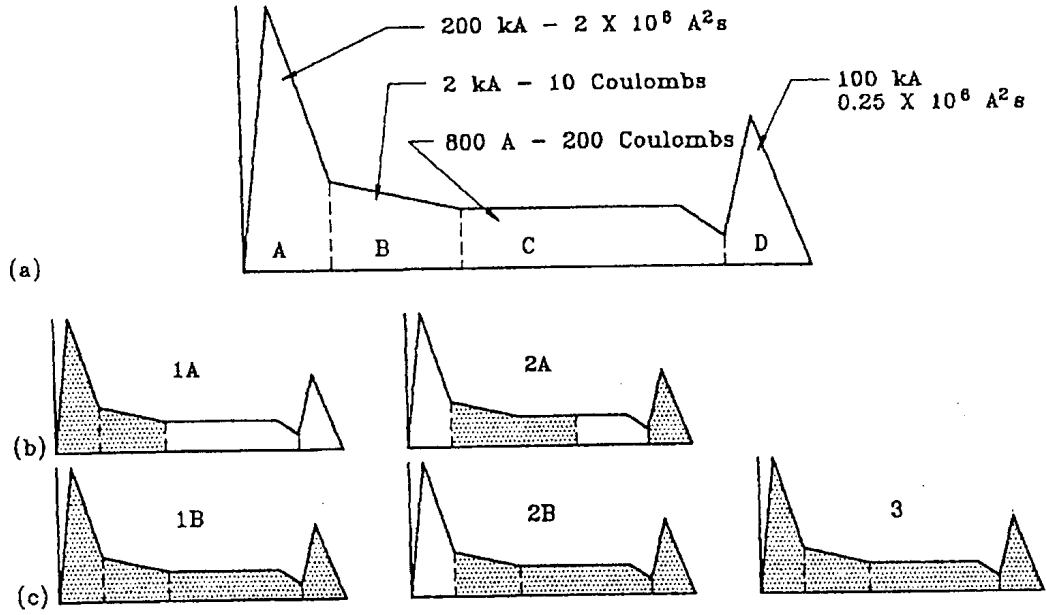
4.3 Yıldırım Deneyi Darbe Şekilleri

Hava taşıtlarının yukarıda sıralanan ve her biri farklı koşullarda ele alınması gereken yıldırım etki bölgelerinin incelenmesi için A, B, C, D, E akım deney bileşenleri ve A, B, C, D gerilim deney bileşenleri tanımlanmıştır (Şekil 4.1). Bu deney bileşenleri ile ilgili dalga şekilleri, deney şekilleri, analiz yöntemleri uçak üreticisi ülkelerin sivil havacılık birimleri tarafından standartlar halinde belirlenmiştir [13, 14].

4.3.1 Akım Dalga Şekilleri

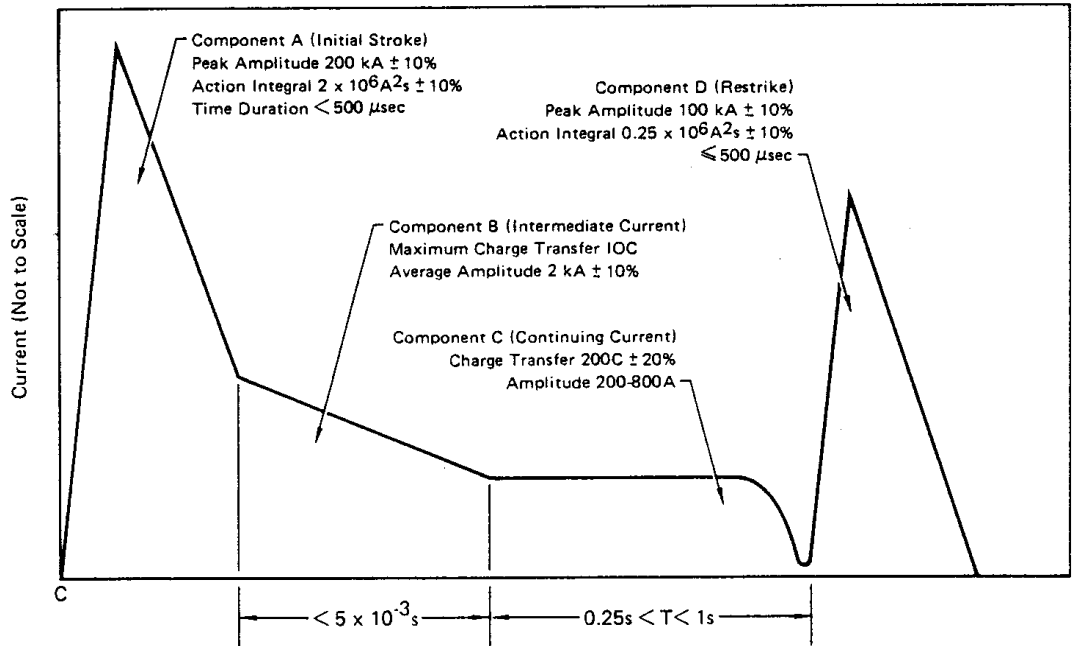
Yıldırımın doğrudan etkilerinin belirlenmesinde 4 farklı akım bileşeni (A,B,C ve D) kullanılır. E akım bileşeni ise yıldırımın dolaylı etkilerinin belirlenmesinde kullanılır.

Her bir bileşen doğal yıldırım darbesinin farklı aşamalarının karakteristikleri ile benzeştirilir. Şekil 4.2'de bu bileşenler görülmektedir [10].



Şekil 4.1 Çapma evreleri ile yıldırım akımları [10].

- | | |
|-----------------------------|------------------------------|
| (a) Yıldırım akımı | (c) Yüksek olasılıklı çarpma |
| (b) Düşük olasılıklı çarpma | 1B Doğrudan (direk) çarpma |
| 1A Doğrudan (direk) çarpma | 2B Süpürülmüş çarpma |
| 2A Süpürülmüş çarpma | 3 Sadece taşıma |



Şekil 4.2 Akım dalga şeklinin bileşenleri [10].

Şekil 4.2'deki bileşenlerin bazı karakteristikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir [10].

- A Bileşeni (İlk Geridönüş Çarpması)

Tepe Değer	:	200 kA ($\pm 10\%$)
Verilen Enerji	:	$2 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ ($\pm 20\%$) (500 μs de)
Süre	:	$\leq 500 \mu\text{s}$

- B Bileşeni (Yarı Değerli Akımı)

Max. Yük Aktarımı	:	10 Coulombs ($\pm 10\%$)
Ortalama Değer	:	2kA ($\pm 20\%$)
Süre	:	$\leq 5 \text{ ms}$

- C Bileşeni (Sürekli Akım)

Akım Büyüklüğü	:	200-800A
Yük Aktarımı	:	200 Coulombs ($\pm 20\%$)
Süre	:	0,25s - 1s

- D Bileşeni (Sonraki Geridönüş Çarpması)

Tepe Değer	:	100 kA ($\pm 10\%$)
Verilen Enerji	:	$0,25 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ ($\pm 20\%$) (500 μs de)
Süre	:	$\leq 500 \mu\text{s}$

4.3.1.1 A Akım Bileşeni

Bu dalga şeklinin negatif ve pozitif geri dönüş darbeleri için önemli bileşenleri vardır [10]. Bu tür bir darbe ile uçak alçak irtifalarda seyrederken sıkça karşılaşılır. Akımın tepe değeri 200 kA ($\pm 10\%$) ve 500 μs 'yi aşmayan süredeki verilen enerji ($\int i^2 dt$) $2 \times 10^6 \text{ A}^2 \text{ s}$ ($\pm 20\%$) olarak verilebilir. Yıldırım akımı,

$$i(t) = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.1)$$

olarak ifade edilebilir. A akım bileşeni için sabit değerler,

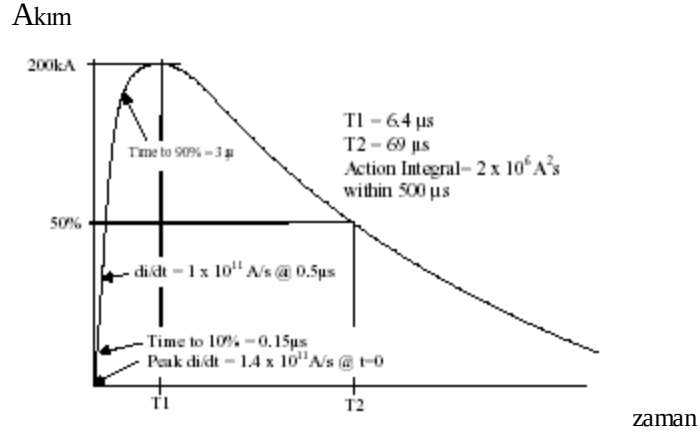
$$I_0 = 223,000 \text{ A}$$

$$\alpha = 11,000 \text{ s}^{-1}$$

$$\beta = 460,000 \text{ s}^{-1}$$

t = zaman (s)

olarak alınabilir. Şekil 4.3'te A akım bileşenine ait bir dalga şekli görülmektedir.



Şekil 4.3 A akım bileşeni dalga şekli [10].

Verilen enerji yıldırım darbesinin verdiği hasarı belirleyen önemli bir etkidir. Sisteme etkiyen ya da sistem tarafından çekilen enerjiyi ifade eder. Bununla beraber verilen gerçek enerjinin belirlenebilmesi için sistemin direnç değerinin de bilinmesi gerekir. Bir dirençte harcanan olarak ani güç $i^2 R$ dir ve Watt ile ifade edilir. Toplam enerjinin Watt-saniye (ya da Joule) olarak bulunabilmesi için ise güç ifadesinin zamana göre integralini almak gerekir. Verilen enerji, toplam enerjinin belirlenebilmesi için herhangi bir dirence uygulanabilir.

4.3.1.2 B Akım Bileşeni

Bu bileşen temel olarak negatif kutbıyetli bir yıldırım darbesi sonrası ve/veya devam eden ardışık yıldırım darbeleri arasındaki yarı değerli akımı ifade eder.

Analiz için 4.1 ifadesindeki sabitler yerine,

$$I_0 = 11,300 \text{ A}$$

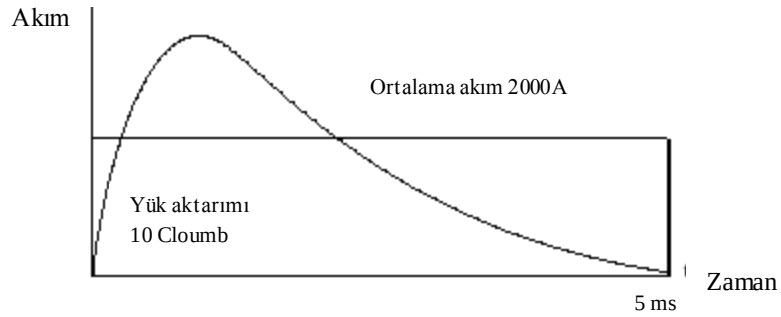
$$\alpha = 700 \text{ s}^{-1}$$

$$\beta = 2,000 \text{ s}^{-1}$$

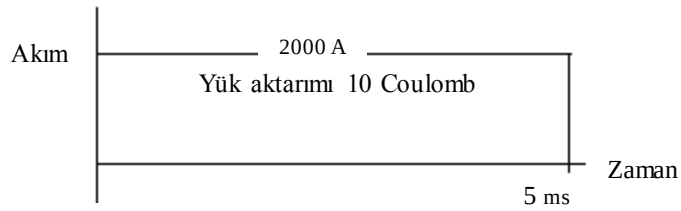
t = zaman (s)

değerleri alınabilir.

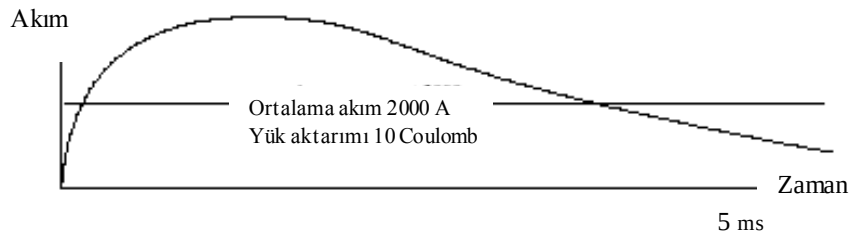
Ortalama akım değeri en fazla 5 ms süre ile 2 kA ($\pm 20\%$) olmalıdır. Doğrudan yıldırım etkilerinin daha iyi incelenebilmesi için üstel fonksiyon olarak değişen darbe şeklinin yanında kare dalga veya lineer azalan dalga şekilleri ile de deneyler yapılmalıdır. Eğer sonlanma süresi 5 ms'den fazla olursa geriye kalan süre için 400 A'lık bir ortalama akım uygulamak gerekir. Sonlanma süresi uçağı etkiyen yıldırım tipleri için belirlenmişse de ulaşılabilen herhangi bir değer yoksa 50 ms olarak alınmalıdır [10, 13, 14]. Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da B bileşenine ait darbe şekilleri görülmektedir.



Şekil 4.4 B akım bileşeni dalga şekli [10].



Şekil 4.5 Doğrudan etki deneylerinde kullanılan örnek dalga şekli [10].



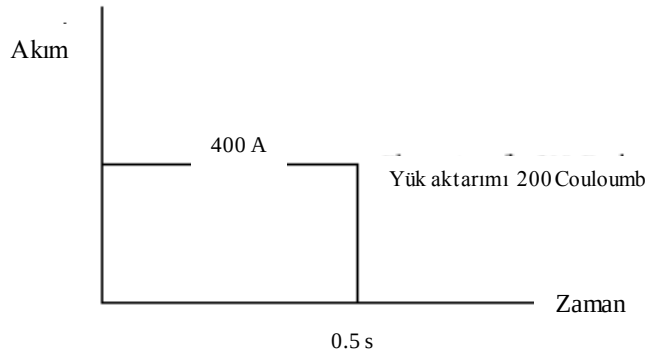
Şekil 4.6 Doğrudan etki deneylerinde kullanılan örnek dalga şekli [10].

4.3.1.3 C Akım Bileşeni

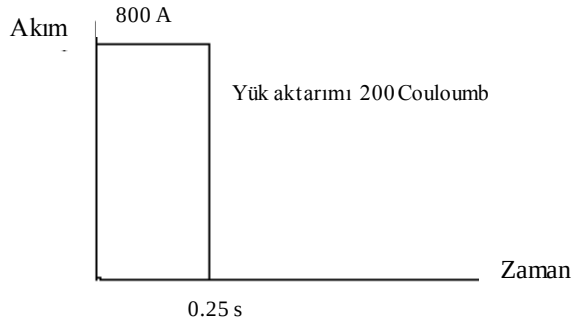
Bu bileşen, negatif kutbilyetli bulut toprak arası oluşmuş geri dönüş darbeleri ve pozitif kutbilyetli bulut toprak arası oluşmuş geri dönüş darbelerinin, olağan dışı

olarak uzun sürmesi durumu için kullanılır. Analiz amaçlı olarak 0,5 s periyotlu ve 400 A akım değerli kare dalga kullanılabilir. Şekil 4.7'de böyle bir dalga şekli görülmektedir.

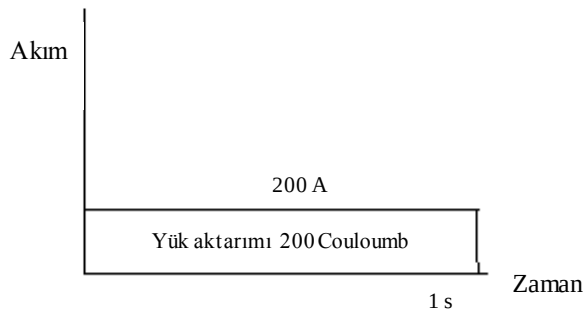
Doğrudan etki deneyleri için 200 A ile 800 A arası akım değerlerine sahip dalga şekilleri kullanılabilir. Bu bileşen yaklaşık 200 ($\pm 20\%$) coulomb'luk bir yük transferi yapmalıdır. Dalga şekilleri kare, üstel değişen ve doğrusal azalan biçimlerde olabilir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da örnek dalga şekilleri görülmektedir [10].



Şekil 4.7 Analiz amaçlı kullanılan bir kare dalga [10].



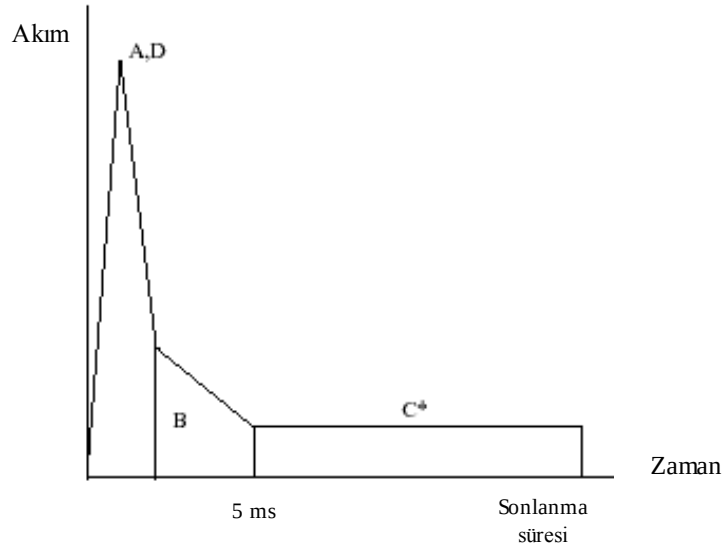
Şekil 4.8 Örnek dalga şekli [10].



Şekil 4.9 Örnek dalga şekli [10].

Uçağın 1A veya 2A bölgelerindeki bağlantı noktalarına 5ms'den uzun süre ile etkiyen akım benzeşimi ve değişik yapısal durumlar için geliştirilmiş özel C akım bileşenleri de (C*) mevcuttur. Bu bileşen metal yüzeylerin erime sırasındaki değişimlerini incelemek için kullanılır [10].

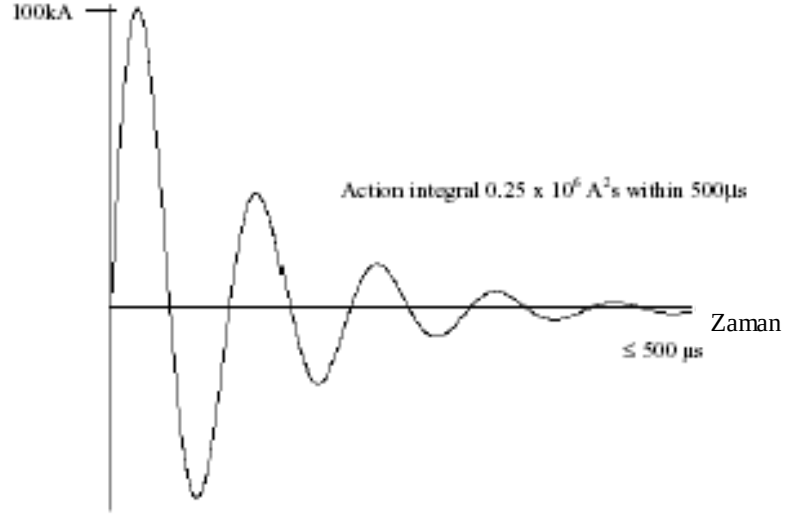
A ya da D, B ve C* bileşenlerinin kombinasyonları 1 ile 50 ms arasındaki sürelerle deney araçlarına uygulanabilir. Yaygın arakat ve boyalarla kaplanmış gövde yüzeyinde sonlanma süresi 20 ms olarak alınabilir. Boyasız bir yüzey için bu değer 1 ile 5 ms arasında olacaktır ve sadece A veya D ve B bileşenlerinin kombinasyonu kullanılmalıdır. Kalın tabaka boyalı ve yüksek dielektrik özelliğine sahip yüzeylerde sonlanma süresi 20 ile 50 ms arasında değişebilir [10]. Şekil 4.10'da görülen dalga şekli bu kombinasyonlara örnek olarak verilebilir.



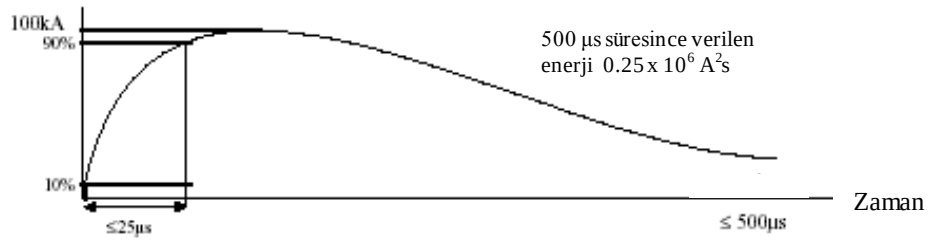
Şekil 4.10 C* bileşeninin uygulandığı akım dalga şekli [10].

4.3.1.4 D Akım Bileşeni

D akım bileşeninin doğrudan ve dolaylı etkilerin deneyleri için kullanılır. Tepe değeri 100 kA ($\pm 10\%$) ve verilen enerji $0,25 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ ($\pm 20\%$) dir. Şekil 4.11 ve 4.12'de görülen dalga şekilleriyle benzeştirilebilir. Toplam uygulama süresi 500 ms'yi aşmamalıdır [10].



Şekil 4.11 Sönümlü salınımlı dalga şekli [10].



Şekil 4.12 Tek kutuplu darbe şekli [10].

Analiz amacıyla yine (4.1)'de verilen çift üstel fonksiyon ifadesi kullanılabilir. İfade-deki sabitler,

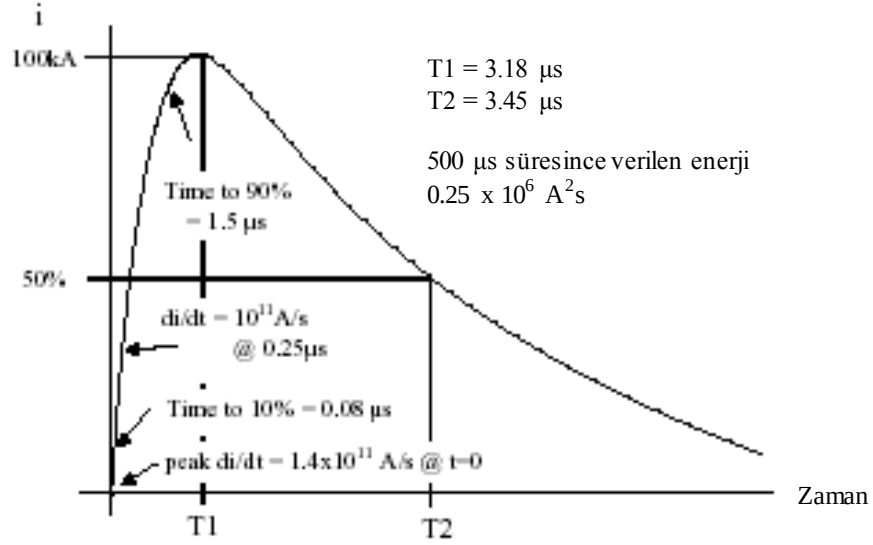
$$I_0 = 130,000 \text{ A}$$

$$\alpha = 27,500 \text{ s}^{-1}$$

$$\beta = 415,000 \text{ s}^{-1}$$

$$t = \text{zaman (s)}$$

olarak alınmalıdır. Akım büyüklüğü 100 kA ($\pm 10\%$) ve yükselme süresi 25 μs 'yi aşmamalıdır (%10 ve %90 arası akım değeri için). Şekil 4.13'te böyle bir dalga şekli görülmektedir.



Şekil 4.13 Analiz ve dolaylı etki deneyleri için kullanılan D akım bileşeni dalga şekli

4.3.1.4 E Akım Dalga Şekli

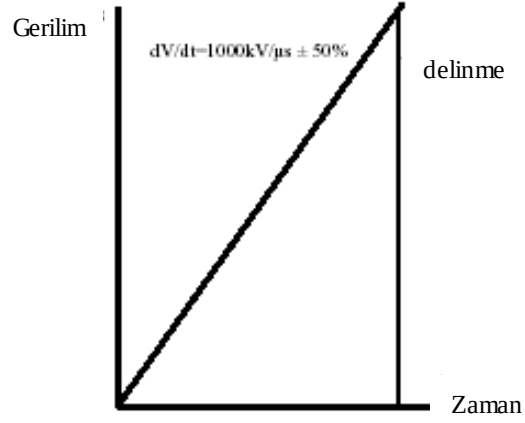
Yükselme oranı hızlı akım bileşeni olarak tanımlanabilir. E akım dalga şekli, en az $0,5 \mu s$ de $25 kA/\mu s$ 'lik yükselme oranına sahip olmalıdır. En az akım büyüklüğü $50 kA$ 'dır. E akım dalga şeklinin elde edilemediği durumlarda A veya D bileşenleri en az $0,5 \mu s$ de $25 kA/\mu s$ 'lik yükselme oranı uygulanarak kullanılabilir [10].

4.3.2 Gerilim Dalga Şekli

Yıldırım etkilerinin belirlenmesinde kullanılan ve yıldırım darbesinin oluşturduğu elektrik alanları açıklayan üç değişik gerilim dalga şekli vardır. A ve D gerilim dalga şekilleri olası dielektrik malzeme hasarlarının belirlenmesinde kullanılır. B gerilim dalga şekli ise kanal boşalma olaylarının tanımlanması için kullanılır [10].

4.3.2.1 A Gerilim Dalga Şekli

Temel yıldırım darbesi dalga şeklindedir. Darbe, deney nesnesi üzerindeki delinme veya boşalma olayı gerçekleşinceye kadar süren, ortalama mikrosaniyede 1×10^6 volt yükselme hızına sahiptir.

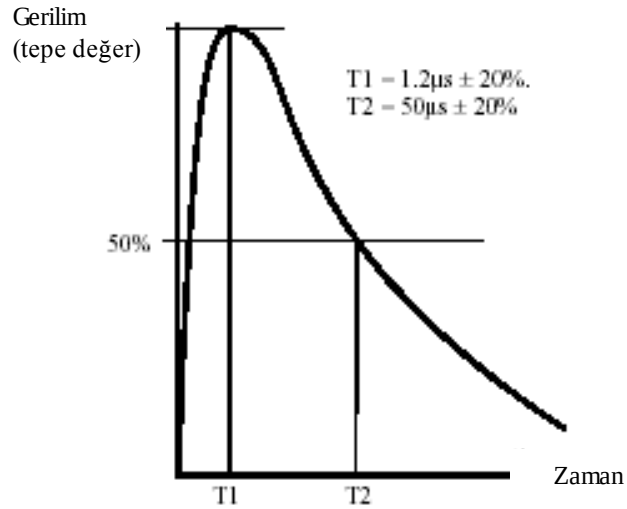


Şekil 4.14 A gerilim darbe şekli [10].

Delinme anında gerilim değeri ani olarak sıfıra düşer. Şekil 4.14'te A gerilim dalga şekli görülmektedir.

4.3.2.2 B Gerilim Dalga Şekli

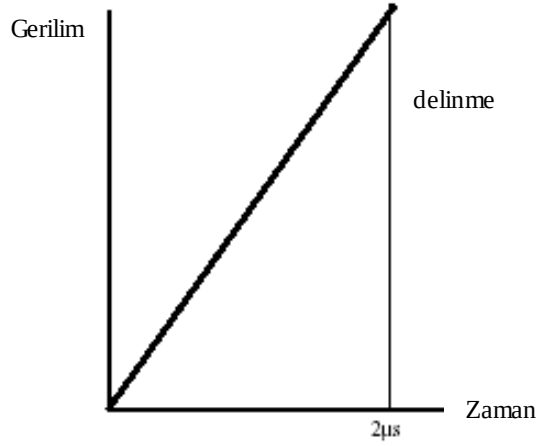
Tam dalga şekli olarak tanımlanabilir. 1,2/50 μs lik elektrik endüstrisinin standart darbe dielektrik deneylerinin de yapıldığı dalga şeklidir. Tepe değerine 1,2 μs ($\pm 20\%$) de ulaşır ve 50 μs ($\pm 20\%$) de yarı değerine düşer. Cephe ve sırt süreleri yıldırım darbe üreticinin açık devre gerilimine bağlıdır ve deney altındaki deney nesnesinden etkilenmez. Şekil 4.15'de bu gerilime ait dalga şekli görülmektedir.



Şekil 4.15 B gerilim darbe şekli [10].

4.3.2.3 C Gerilim Dalga Şekli

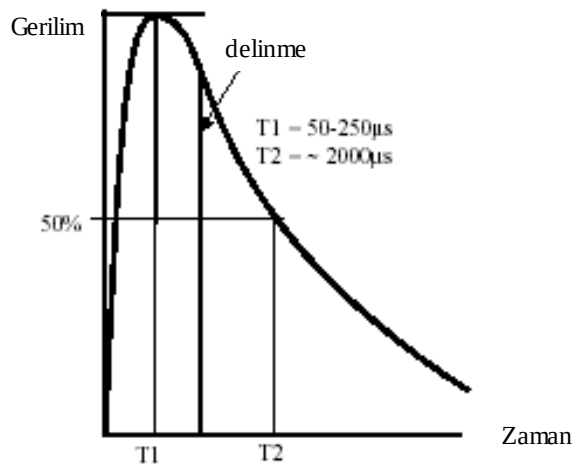
Bu gerilim şekli $2 \mu s$ ($\pm 20\%$) de deney elektrotu ve deney cismi arasındaki aralığın delindiği kesik dalga şeklindedir. Gerilimin değeri ve yükselme oranı belli bir değerde değildir. Şekil 4.16'da bu gerilimle ilgili dalga şekli görülmektedir.



Şekil 4.16 C gerilim darbe şekli [10].

4.3.2.4 D Gerilim Dalga Şekli

Deney nesnesinde kanal boşalmalarının oluşabileceği, cephesi yavaş yükselen ($50 \mu s$ ile $250 \mu s$ arasında) bir gerilim dalga şeklindedir. Uçuş sırasında karşılaşılabilecek düşük yıldırım olasılıklı bölgeler için deney sırasında daha yüksek bir değer uygulanmalıdır. İlgili dalga şekli 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17 D gerilim darbe şekli [10].

4.4 Dalga Şekillerinin Uygulama Bölgeleri

Uçağın, daha önceki bölümlerde belirtilen yıldırım etki bölgelerine uygulanacak yıldırım darbe şekilleri Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1- Uçak bölgelerine uygulanan darbe şekilleri [10].

UÇAK BÖLGELERİ	GERİLİM DALGA ŞEKLİ	AKIM BİLEŞENLERİ
1A	A, B, D	A, B, C*, E
1B	A, B, D	A, B, C, D, E
1C	A	A, B, C, D, E
2A	A	D, B, C, E
2B	A	D, B, C, E
3		A, B, C, D, E
Model Uçak	C	

Tablo 4.1'de belirtilen yıldırım darbeleri uçaklarda oluşan doğrudan ve dolaylı etkilerin ortaya çıkarılmasında kullanılabilir. Doğrudan etkilerinin belirlenmesine A, B, C, D gerilim dalga şekilleri ve akım bileşenleri kullanılır. Tek bir darbenin bileşenleri olan A, D, ve E akım bileşenleri uçakta oluşan dolaylı etkilerin analizinde yardımcı olur [10].

Uçak gövde yapısının büyük bir kısmı 3. bölgede bulunduğundan tüm bileşenleri içeren darbe şekli bu bölgeye uygulanabilir. Bununla beraber 2. bölgede, A akım bileşenine karşı koruma önlemi alınmış uçak sistemleri ve özel bağlantı iletkenleri nedeniyle bu bölge için D akım bileşeninin deneyler için kullanılması daha uygun olur. Her ne kadar bölgelerin büyük bir kısmı incelenebiliyorsa da uçağın belirli bölgesinde yoğunlaşan sistem ekipmanları için (burun arkasındaki elektrik/elektronik yuvası gibi) bunu söyleyebilmek her zaman doğru olmayabilir. Birbiri içine girmiş karmaşık sistem yapısı ve iletken ağı nedeniyle deney sonuçlarının bunları da kapsayabilmesi için detaylı deneylerin yapılması gerekir.

4.5 Deney Donanımı

Deneyde, yıldırıma maruz kalan yapının tamamı kullanılır. Böylelikle yüzeyin hangi bölgelerine yıldırımın çarpacağı detaylı bir şekilde incelenmiş olur. Bu deney için Marx tipi yüksek gerilim darbe üretici kullanılır. Üreteç ile deney cismi arasındaki uzaklık uygulanan dalga şeklini değiştireceği için önemlidir. Kısa olmalıdır [6].

- **Yapıya Direkt Etki Deneyi**

Bu deney yıldırımın uçak gövdesi üzerinde oluşturacağı “direk” etkiyi tanımlar. Yıldırım deney akımları uçak gövdesi üzerine uygulanır. Uçağın hangi bölgelerine yıldırım akımının uygulanacağı deney öncesinde belirlenir. Bu deneyde dalga şekli, büyüklüğü, uygulama sayısı önemlidir.

- **Direk Etki – Yanıcı Özelliği Olan Buharların Gövde Üzerindeki Etkisi**

Deneyin, yakıt sistemi çevresindeki veya yanıcı özelliği olan buharların olabileceği bölgelerdeki yıldırımdan kaynaklanabilecek kıvılcımların etkilerini araştırmaktır. Deney, yakıt tankları (gerçek ölçülerdeki) ve kanatlar kullanarak gerçekleştirilir.

- **Direk Etki – Arklar**

Bu deneyde, yanıcı buharların mevcut olduğu bölgelerde “streamer” ların üretilme olasılıklarının olup olmadığının araştırılmasıdır.

- **Direk ve Endirek Etkiler – Harici Kablolarda**

Deneyin amacı, direk etkilerin pitot tüpüne, antenlere, seyir lambalarına ve bunlara ait kablo donanımına vereceği fiziksel hasarın tanımlanması ve tespit edilmesidir. Ayrıca endirek etkilerin bu komponentler üzerindeki iletken akımının ve geriliminin saptanarak analizinin yapılmasıdır.

- **Model Uçaklar Üzerindeki Yıldırım Çarpma Deneyleri**

Model uçak kullanılarak yapılan deneyin amacı gerçek uçağın hangi bölgelerinin direk olarak yıldırıma maruz kalacağını belirlenmesidir. Kullanılan modeller genelde 1/30 ile 1/10 ölçekleri arasındadır.

- **Uçak Üzerinde Yıldırım Çarpması Deneyi**

Yıldırım uçağa temas ettiği anda oluşan arkın tüm uçak kanadı ve gövdesi üzerinde sürekli olarak hareket etmesi mümkündür. Arkın sönümleme zamanı, yıldırımın özelliğine, uçağın gövdesinde kullanılan malzemenin özelliğine ve uçağın gövde şekline bağlıdır.

- **Endirek Etkiler – Uçağın Tamamında**

Amaç uçağın tüm bölgelerindeki kablo donanımı üzerinde oluşan akım ve gerilim değerlerinin ölçülmesidir. Deneyin tüm uçak üzerinde yapılmasının nedeni, hangi bölgelerdeki kablo donanımlarının yıldırım olayından daha kolay etkilenebileceğinin belirlenmesidir.

4.6. Uçak Elektronik Sistemlerine Yönelik Yıldırım Deneyleri

Yıldırıma maruz kalan uçaklardaki elektrik donanımının ve tüm elektronik sistemlerin performansını değerlendirmek için laboratuvar deneyleri yapılabilir. Doğrudan hasar deneyleri ışıklar, sondalar ve antenler gibi dış elektrik donanımı üzerinde, doğal yıldırım benzeri yüksek akım veya yüksek-gerilim arklarının örnek bir parçaya doğrudan uygulanması yöntemiyle gerçekleştirilebilir. Hem parçanın gördüğü hasarı tespit etmek hem de geçici gerilimlerin ya da akımların parçaya bağlı iç kablolarda da oluşup oluşmadığının belirlenmesi amacıyla dış ekipman bu şekilde denir. Bu deneyler kriter belgeleriyle standartlaştırılır ve Nitelik Deneyleri (Qualification Tests) olarak sınıflandırılır [6, 17].

Uçak içine yerleştirilen elektronik donanım üzerindeki deneyler yeterince iyi tanımlanmış ya da standartlaştırılmış değildir. Donanımı tehdit eden şeyin gerçekte ne olduğunun belirlenmesinde, yıldırım uyarısına karşı tüm uçağın verdiği kompleks tepkinin hesaba katılmasında problemler yaşanmaktadır. Elektronik sistemlerin kablo tesisatı üzerinde görülen geçici sinyallerin eksiksiz bir tanımı, yıldırım uyarısına tüm uçağın verdiği elektrik tepkisini, gövde kalkanının derecesini, ve dış alanların dahili kablo tesisatını kavramasını ölçen deneylere ya da analizlere dayandırılmak zorundadır.

İyi bir tanım olmamasına rağmen, bütün araçlara ya da büyük binalara uygulanan deneyler tüm elektronik sistemlerin yıldırma verdiği tepkinin belirlenmesine yardımcı olması için kullanılabilir. Uçağın bütünün elektrik empedansı tehlikeli akımlarının araç içine geçmesini engeller. Bu nedenle günümüz deney teknikleri iç kablo tesisatında oluşan geçici sinyaller hakkındaki mühendislik bilgisinin geliştirilmesi için yapı içinde alçak darbecikler kullanmaktadır. Bu deneyler henüz yeterince iyi geliştirilmiş olmadığı için "Mühendislik Deneyleri" (Engineering Tests) olarak sınıflandırılmaktadır [6, 17].

4.6.1 Doğrudan ve Dolaylı Yıldırım Etkileri

Uçakların maruz kaldığı yıldırım etkileri ve simule edilmiş yıldırım dalga şekilleriyle gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri, "doğrudan etkiler (direkt)" ve "dolaylı (endirekt) etkiler" olarak iki gruba ayrılırlar. Doğrudan yıldırım etkileri, ilgili yüksek akımların ürettiği yüksek basınç şok dalgaları ve manyetik güçlerin yanı sıra, yanma, aşınma, patlama ve yıldırım arkı bağlantısının neden olduğu yapısal bozulmalardır. Dolaylı etkiler ise çoğunlukla yıldırımla gelen elektromanyetik alanların uçaktaki elektronik cihazlarla etkileşiminden doğan etkilerdir. Tehlikeli dolaylı etkilere, ilke olarak, doğrudan uçakla temasta bulunmayan ve bu yüzden yanma ve patlama gibi doğrudan etki yaratma kapasitesi taşımayan bir yıldırım çarpması neden olabilir. Fakat çoğu önemli dolaylı etki yıldırımın uçakla temas etmesiyle ilişkilendirilecektir. Bazı durumlarda uçağın aynı parçasında hem doğrudan hem de dolaylı etkiler oluşabilir. Örneğin, bir antenle temas eden yıldırım hem fiziksel olarak antene zarar verebilir hem de bu antene bağlı radyo verici ya da alıcısına zararlı gerilimleri taşıyabilir. Burada antenin gördüğü fiziksel hasar doğrudan, antenin haberleşme donanımına ilettiği gerilimler ya da akımlar da dolaylı bir etki olarak ele alınır.

4.6.2 Nitelik Deneyleri

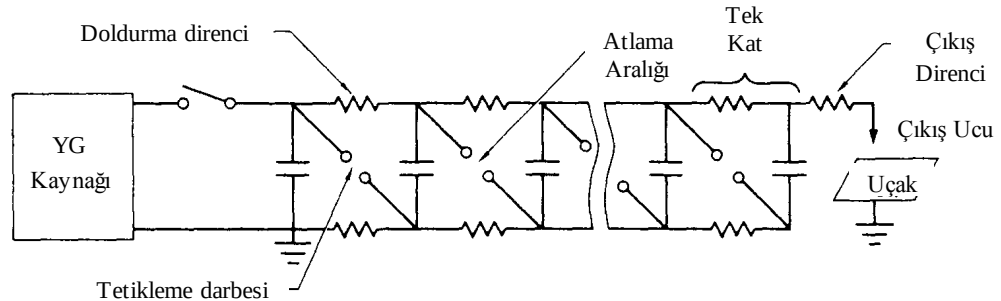
Nitelik Deneyleri, yıldırım çarpmasının dış elektrik aksamına verdiği dolaylı etkilerin yanı sıra, yakıt, yapısal ve elektrik donanım için yüksek-gerilim ve yüksek akım fiziksel zararlarını kapsamaktadır. Mühendislik deneyleri son doğrulama hedeflerinden çok tasarım hedeflerine yönelik mühendislik bilgisi sağlamayı amaçlayan deneylerdir. Mühendislik deneyleri genellikle nitelik deneylerinininkine kadar

iyi tanımlanmış ya da üzerinde çoğunluğun hemfikir olduğu mekanizmalara veya dalga biçimi parametrelerine sahip değildir. Uçak elektronik sistemlerine uygulanabilen başlıca mühendislik deneyleri model bağlantı noktası deneyi ve tüm aracı kapsayan dolaylı etkiler deneyleridir. Diğer bir mühendislik deneyi de kabin içi yüzeylerdeki ark bağlantısı tepkilerini ölçmek için kullanılan taralı darbe deneyidir (swept stroke test) [6].

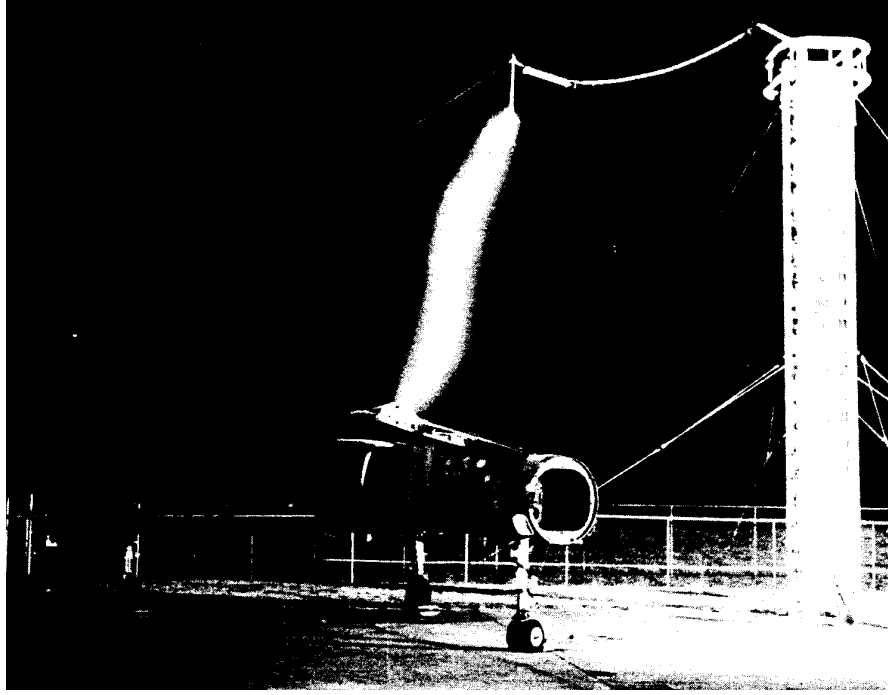
Nitelik deneyleri olarak sınıflandırılan deneyler, 20 Ağustos 1978 tarihli bir NATO Standardizasyon Anlaşmasında (“Uçak ve Donanımda Yıldırım Nitelik Deneyi Teknikleri” başlıklı, Draft STANAG 3659AE) kapsamaktadır. STANAG bu dokümanda ele alınan deneyler için önerilen teknikleri ve başlıca tanımları içermektedir [17].

4.7 Yüksek Gerilim Deneyi

Geleneksel yüksek gerilim darbe üreteçleri, modellerdeki ya da büyük çaplı uçak parçalarındaki arkların bağlantı noktalarının belirlenmesi hedefleri için yüksek elektrik alanları ve uzun arkların üretilmesinde kullanılır. Bu üreteçler ayrıca malzemelerin ve parçaların delinme ve atlama özelliklerinin değerlendirilmesinde de kullanılır. Deney uygulaması için gerekli gerilimler ve dalga biçimleri deneyin tipine ve deney cisminin büyüklüğüne bağlıdır. Geçici yüksek gerilim deneylerinde kullanılan darbe üreteçleri genellikle yüksek gerilim ders kitaplarında kullanılan Marx darbe üreteçlerini kullanırlar (Şekil 4.18). En az birkaç yüz kV’lık çıkış gerilimleri uzun kıvılcım deneyleri için gereklidir (Şekil 4.19). Standart dalga biçimi deney uygulaması için 5 MV’a kadar ekonomik bir şekilde imal edilebilir.



Şekil 4.18 Marx tipi darbe gerilimi üretici [8].



Şekil 4.19 Gerçek uçak üzerine 4,2 MV'luk atlamanın görüntüsü [6].

4.8 Yüksek Akım Deneyi

Yüksek akım deneyi, yüksek gerilim deneylerinden ayrı uygulanır. Çünkü büyük bir aralıkta atlama yaptırmak için gerekli gerilim (10^6 Volt) çok yüksektir, bir de bunun yanında atlamada 200 kA'e akım akıtmak üretilmesi neredeyse olanaksız bir güç değeridir.

Akım olarak üç farklı tepe değerde ve zaman ölçeği olarak ta beş farklı büyüklükte akımlar kullanılır. Bu dalga biçimli yüksek akımlar, genellikle enerji depolama kondansatörlerinin deney numunesine boşaltılmasıyla elde edilir (Şekil 4.20). Çok kısa arklarda yüksek enerji, yüksek akım boşalmaları üretmek için büyük kondansatör grupları kolayca inşa edilebilir. Bir kondansatörden boşalma, bir LRC devresiyle gösterilebilir (Şekil 4.21). Devrenin endüktansı, dış devreye ek olarak, kondansatörlerin iç endüktansıdır. Direnç ise deney numunesininkini de kapsar ve kondansatör iç direncinin ve dış devre direncinin toplamından oluşur.

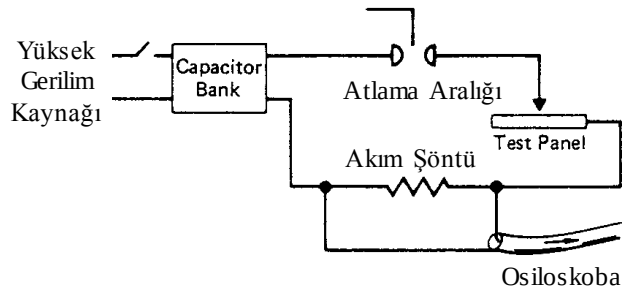
Bir darbe akım üretici LRC devresi gibi çalışır. Devrenin çıkış akım dalga biçimini,

$$I(t) = (U/\omega L).e^{[-R(t)/2L]\sin\omega t} \quad (4.2)$$

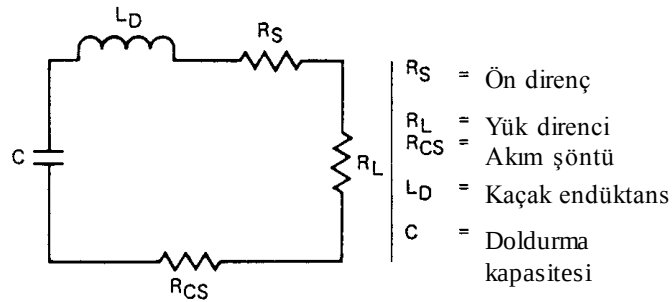
dir. Burada U kondansatörün yükleme gerilimidir. ω aşağıdaki formülün verdiği devre rezonans frekansdır.

$$\omega = [n/LC_s - R^2(t)/4L^2]^{1/2} \quad (4.3)$$

$R(t)$ devre direnci, L endüktans, C_s ise üreteç kondansatörünün kapasitesidir. Temel olarak, devre endüktansı darbe üreticinin iç endüktansının bir sonucudur. Endüktans akımın yükselme süresini kısıtlar ve ortaya çıkan akımın dalga biçiminin hızı 100 kA/μs civarındadır. Dirençli sönüme bağlı olarak, devre salınabilir (yeterince sönmemiş durum) veya akım kritik bir seviyede kısılabılır ya da gereğinden fazla sönümlü hale getirilebilir. Yeterince sönmemiş durum, yıldırım dalga biçiminin yüksek tepe akımını elde etmek için bir çok laboratuvar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır çünkü minimum seviyede donanım ile kolayca yapılabilir. Fakat, boşalma dalga şeklinde enerjinin kontrolü zor olduğu için yeterince sönmemiş durum çok tercih edilmez. Toplam boşalma enerjisi, salınım akımının her yarım dairesi sırasında depolanan enerjinin toplamıdır. Eğer üreteç yeterli enerji ve çıkış akımına sahipse, salınımları elimine etmek, darbe genliğine ulaşmak için dirençli sönümden yararlanılabilir.



Şekil 4.20 Yüksek darbe akımı üretici [8].



Şekil 4.21 Darbe akımı üretici eşdeğer devresi [8].

4.8.1 Yüksek Akımın Doğrudan Etkileri (Nitelik Deneyleri)

Bir uçağa yıldırım çarptığında, yüksek akım hasar etkileri uçak toplam yıldırım yolunun bir kısmını oluşturduğunda ortaya çıkabilir. Yıldırım akımları uçak üzerindeki iki ya da daha fazla bağlantı noktası arasında akar. Birleşme noktalarından geçen akım ya da yüksek empedans yolları ark haricinde hasara yol açabiliyorsa da, Doğrudan (hasar) etkiler çoğunlukla, ark köklerinin ya da bağlantı noktalarının bölgesel kısımlarında üretilir. Süpürme akımındaki yıldırım arkının süpürme işlevinden dolayı uçağın ön kısmında yer alan ark bağlantı noktaları çoğu zaman süpürme akımında kış bölgesine doğru hareket eder. Bu süpürme eylemi dış bölgelere takılmış elektrik aksamını, doğrudan vuruş alanına monte edilmiş olmasalar bile, ark bağlantısına ve hasara maruz bırakabilir. Akımın süre değişkenli yapısından ve süpürme işlevinden dolayı yüksek akım tehdit özellikleri uçak üzerindeki konuma bağlıdır. Yıldırım arkının neden olduğu yanma, aşınma, patlama, ve yapısal bozulma ve yanı sıra ilgili yüksek akımların neden olduğu yüksek-basınç şok dalgaları ve manyetik güçler doğrudan hasar etkileri arasındadır.

Deney, simule edilmiş yıldırım akımlarının, uçağa yıldırımın çarptığı koşulları yansıtacak bir şekilde, deney cismine dağıtılmasını ve deney cisminden uzaklaştırılmasını sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Doğal durumu temsil etmeyen manyetik alanların ve diğer etkileşimlerin en aza indirilmesi için özen gösterilmelidir.

Doğal ortamda, boşalma olayı basit bir şekilde bir buluttan diğerine ya da buluttan toprağa olur. Bu yüzden uçak, üzerinde dolaşan yıldırım akımlarının hareketlerini etkileyecek dönüş yolu akımı manyetik alanları olmaksızın, boşluktadır. Laboratuvar şartlarında, dönüş yolu iletkenleri her zaman deney parçasıyla ilişki içindedir ve ilgili manyetik alanları deney sonuçlarını etkileyebilir. Bu problemi çözmenin yollarından biri, ayrı ayrı manyetik alanların toplamının deney cismi bölgesinde sıfır olmasını sağlayacak şekilde çok dönüşlü yollar kullanmaktır. Çoğu durumda bu 3 ya da 4 dönüş iletkeniyle gerçekleştirilebilir. Bazı durumlardaysa sadece iki büyük geçiş levhası gerekebilir. Geniş nesnelerde, özellikle yüksek di/dt 'li akımlarda, akımların nerede hareket edecekleri ve darbe sırasında kendilerini tekrar nasıl dağıtacaklarına dair bir değerlendirme yapılmalıdır. Daha sonra dönüş iletkeni geometrisi bu etkiyi tekrar üretecek şekilde tasarlanabilir.

Uçağın yüksek hızı yıldırım bağlantı noktalarının ayrı ayrı adımlarla geriye doğru süpürme yapmasına neden olur. Taralı darbe bölgesinde yer alan deneylerdeki ark yanmalarında, ark kalış sürelerinin bilinmesi yararlıdır. Kalış süresini sağlam bir şekilde oluşturmanın mümkün olmadığı yerlerde, 50 ms'lik bir kalış süresi öngörülmelidir.

4.8.2 Yüksek Akımın Dolaylı Etkileri (Nitelik Deneyleri)

Uçağın dış yüzeyine monte edilen elektrik donanımına gelen yıldırım çarpmaları, iç kablo tesisatı üzerinde istenmeyen akımlara ve gerilim yükselmelerine neden olabilir. Bu durum yıldırım arkının elektrik devresine doğrudan temasıyla ya da yıldırım çarpmasının ürettiği yoğun alanlara bağlı olarak ortaya çıkan elektromanyetik eşlemeyle gerçekleşir. İstenmeyen bu geçici etkiler, doğrudan dış parçalara bağlı uçuş elektronığı donanımının çalışmasını tehdit etmekle kalmayıp uçak gövdesindeki ilgisiz diğer devrelere ve donanıma elektromanyetik olarak eşlenebilir.

Bu deneyin amacı, dışa monte elektrik aksamına yıldırım temas ettiğinde uçağın kablo tesisatı üzerinde oluşan gerilim ve akımların büyüklüğünün belirlenmesidir. Deneye tabi tutulacak cisim (bir üretim hattı aksamı parçası veya eksiksiz bir prototip), elektrik konnektörleri yüksek akım yıldırım üreticinin ürettiği yabancı elektromanyetik alanlardan göreceli olarak bağımsız olan bir alanda elde edilebilecek şekilde, kalkanlı bir deney odasına monte edilir. Deney cismi deney odasına tıpkı uçağa monte edildiği gibi monte edilir çünkü normal birleştirici empedanslar gerilimlerin elektrik devresinde oluşmasına yardımcı olabilir. Ekranlanmış çıkış içinde deney cisminin gerçek ekipmana ya da simule edilmiş bir yükleme empedansına bağlanması için uçuş montajının yerini tutan konnektörler ve kablo tesisatı kullanılabilir. Deneyin başlıca amacı kablo tesisatı üzerinde görülen gerilim ve akım seviyelerini ölçmek olduğu için genellikle sahte bir yükleme kullanılır. Ölçüm araç gereçleri de aynı ekranlanmış çıkışa ya da kılıflı bir cihaz kablosuyla bağlanmış ayrı bir ekranlanmış odaya yerleştirilebilir.

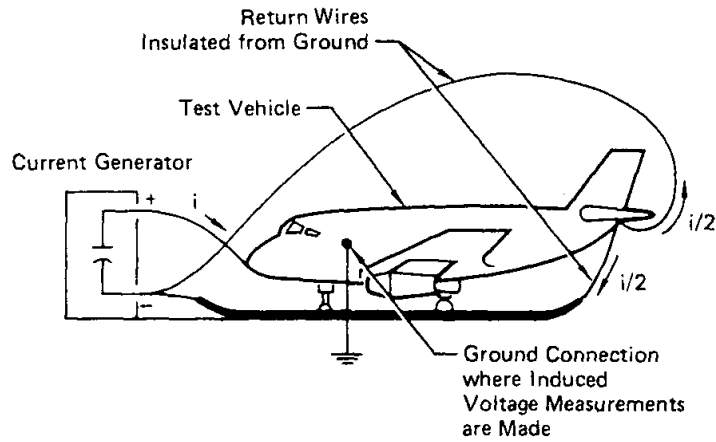
Hedeflenen yıldırım dalga biçimini üretecek kapasitede bir laboratuvar üretici, deney cismi üzerinde yıldırımın temas edebileceği değişik noktalara simule edilmiş yıldırım akımlarını uygulamak için kullanılır. Deney cismi ekranlanmış bir çıkışla topraklanır; bu şekilde akımlar deney cisminde uçak montajında olduğu gibi

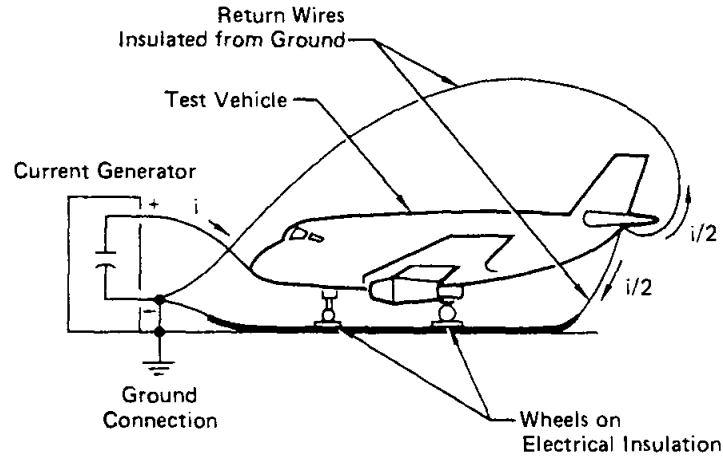
dolaşırlar. İlgili elektrik devresinde oluşturulan, uygulanan gerilimler uygun ölçme düzenleriyle ölçülür. Koşullar bir gereksinim olarak öngörmese de, eşleme deneyinin, 50 kA seviyesine kadar, ya da daha fazla, farklı tepe akımı seviyelerinde (aynı dalga biçimini koruyarak) uygulanması arzu edilen bir durumdur. Her sürücü akım seviyesinde ölçülen gerilimler daha sonra doğrusal bir ilişkinin varlığını doğrulayacak şekilde düzenlenebilir.

4.8.3 Gerçek Uçaklarda Dolaylı Etkilere Yönelik Deneyler

Uçağın kablo tesisatında ve uçuş elektronik sistemlerinde oluşan geçici elektrik etkilerinin özellikleri tüm uçağın yıldırım etkisine verdiği sistem tepkisinden etkilenir. Endüklenme deneyleri parça bazında elektrik donanım ve ilgili kablo tesisatı üzerinde uygulanabilse de, iç kısımlarda oluşan gerilim ve akım seviyelerinin son belirlenmesinde, toplam gövdenin verdiği tepki ve bunu takiben dış yüzeydeki akımların ürettiği manyetik ve elektrik alanların uçağın iç bölgelerine eşlenmesi göz önünde bulundurulmalıdır. Yıldırım akım dalga biçimi gövdenin rezonans tepkileri tarafından değiştirilecektir (Şekil 4.22).

Gerçek bir uçağın elektrik empedansı parçalar üzerinde yapılan dolaylı etkilere yönelik deneylerde kullanılan 50 kA'lık akım darbelerinin kullanımı bile engellemektedir. Bunun sonucu olarak da yıldırımın dönüş darbesinin ürettiği geçici etkilerin yapısını değerlendirmek için düşük seviye akım darbeleri kullanılmalıdır.





Şekil 4.22 Gerçek uçak üzerinde darbe akımı deneyi için kurulacak düzenler [6].

4.9 Yıldırım Elektromanyetik Darbe (LEMP) Deneyi

Yakında meydana gelen yıldırım çarpmalarının bir sonucu olarak iç kablolarda geçici etkiler oluşabilir. Daha genel olarak, E-alanı çevresindeki hızlı değişimler uçak rezonanslarını uyarabilir. EMP durumundaki alan değişimiyle ilgili frekansların daha yüksek olması dışında, bu durum nükleer EMP koşullarına benzer. NEMP için askeri sistemlere uygulanan deneylere yönelik kapsamlı uygulamalar geliştirildi. Bu çalışmalar LEMP deneyi için uygulanmamış olsa da teknik yeterince denenmiştir ve gerekirse yıldırım çalışmalarına uyarlanabilir.

Eğer uçak doğrudan bir çarpmaya karşı korunmuşsa ve deneye tabi tutulmuşsa, LEMP deneyine olan ihtiyaç tartışmalı bir boyut kazanır. Doğrudan çarpma durumu, aşırı alan koşulunu/durumunu içermelidir ve uçak üzerinde bir uzun kıvılcım deneyi uygulandığı takdirde EMP etkileri de kapsanacaktır. Fakat, eğer yüksek gerilim deneyine girmemiş bir uçak fırtınada kullanılacaksa, doğrudan darbe almasa da birkaç yakın çarpmaya maruz kalabilir. Böyle bir durumda, şartlar elveriyorsa bir LEMP deneyinin uygulanması arzu edilir. Mevcut NEMP uygulamalarının yıldırım türünden alanlar üretmeleri içi ne ölçüde değiştirilmeleri gerektiği konusu henüz bir netlik kazanmamıştır [6].

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bilimsel araştırmalar ve teknolojiadaki gelişmeler, birçok doğa olayının nedenini, bunlardan bazen yararlanma bazen de korunma yöntemlerini ortaya koyarak, günlük yaşamımızı kolaylaştırmakta ve güvenliğimizi arttırmaktadır.

Yıldırım, insanlığın hükmedemediği olağanüstü doğal olaylarından biri olarak hala karşımızda durmaktadır. Her geçen gün dünyadaki taşımacılık sektörü büyümesinin hava taşımacılığı yönünde artış göstermesi, daha fazla insan taşınması, daha fazla uçak üretilmesi ve bu iki olgunun ekonomik olarak yaşamımıza sunulması önemli bir optimizasyon konusudur.

Hava taşıtları insan konforunu ve güvenliğini tam karşılayacak biçimde tasarlanıp üretilbilirler. Ancak bunun maliyeti hava taşımacılığını ekonomik olmaktan çıkarır. Uçaklarla ilgili bilimsel çalışmaların daha az olduğu yıllarda, dış yüzeyleri daha kalın metalden yapılmış, kumanda ve kontrol sistemleri daha mekanik olan ağır gövdeli uçaklar, malzeme teknolojilerinde ve üretim tekniklerindeki gelişmelere bağlı olarak hafiflemiş, buna bağlı olarak üretim maliyetleri düşmüş ve hava taşımacılığı ulaşımın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir.

Uçakların yapısal ve elektronik sistemlerinin karmaşıklığı uçakların karşılaştığı yıldırım olaylarının, bu sistemleri etkileyerek uçuş güvenliğini azaltması problemini ortaya çıkartmıştır. Model uçaklar üzerinde yapılan yer deneyleri ve uzun yıllardır edinilmiş uçuş deneyimleri koruma önlemlerinin gelişiminde yardımcı olmaktadır.

Yapılan istatistiklere göre her 3000 uçuş saatinde veya her yıl en az bir kez uçaklara yıldırım çarpmaktadır. Yıldırım darbeleri uçaklara, yüksek akımın oluşturacağı ısı enerjisi nedeniyle yapısal hasarlar, ortaya çıkan elektromanyetik girişim nedeniyle de elektronik hasarlar verebilir.

Bu etkilerden korunmanın en etkili yolu yıldırım riskinin bulunduğu yaklaşık 3000m civarındaki yüksekliklerde uzun süreli uçulmamasıdır. Uçuş ekibi bu tür bir hava

koşulu ile karşılaştığında yer kontrol istasyonlarını uyararak uçuş planının değişimini istemelidirler.

Koruma sağlayan en etkili eleman boşalma uçlarıdır. Boşalma uçları, hem uçak üzerinde biriken yükleri boşaltarak uçak elektronik sistemleri üzerindeki olumsuz etkileri azaltır hem de yıldırım çarpması durumunda yıldırım akımının gövde dışına atılmasına kılavuzluk eder. Özellikle kanat yapılarında karbon-fiber kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaya başlandığından, yer deneyleri yapılarak olası yıldırım akımı ayrılma noktalarına boşalma uçları bağlanmalıdır.

Uçak radarının ve arkasında elektrik-elektronik kontrol sistemlerinin bulunduğu radom, dielektrik malzemeden yapılmıştır. Yıldırım çarpmasının en çok yaşandığı bölge de radom bölgesidir. Radoma rastlayan yıldırım darbesinin hasar vermeden uçak gövdesine ulaşmasını sağlayan yönlendirici çubuklar etkin olarak kullanılır. Yönlendirme çubukları, son yıllarda radomun karşılaştığı hasarları oldukça azaltmıştır. Yönlendirme çubukları uçakta kullanılan diğer kompozit malzemelerin üst yüzeylerinde de yapısal hasarların azaltılabilmesi için kullanılmalıdır. Kullanılacak bölgeler yine yer deneyleri ile belirlenir.

Yıldırım akımının uçak üzerinde ilerlerken geçiş yollarını kolaylaştırıcı topraklama bağlantıları, özellikle kompozit malzemelerin çevresindeki metal yüzeylere mutlaka yapılmalıdır. Topraklama bağlantıları, yıldırım akımının hareketli elemanlar üzerinden geçişi sırasında oluşturacağı yapısal hasarları azaltan temel koruma önleimidir.

Yıldırım akımının veya uzaktaki bir yıldırım olayının kablo ve elektronik donanımlar üzerindeki etkisinin azaltmak için ekranlama en etkin önlemdir.

Yukarıda sayılan önlemler günümüzde tüm ticari uçaklarda kullanılan en etkili koruma yöntemleridir. Bu yöntemler yıldırımın uçağa düşmesini önleyemese de uçakların ve içerisindeki yolcu ve personelin güvenli bir uçuş yapmalarını sağlayabilecek yeterlilikte önlemlerdir.

KAYNAKLAR

- [1] **Beniguel, Y.**, 1985. Induced current surface density after a direct lightning strike on an aircraft, *Proceedings of the Tenth International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Paris, 25-28.
- [2] **Larsson, A., Ladande, P., Clergerie, A. B., Delannoy, A.**, 2000. Thermodynamic and electric properties of a lightning arc channel during its continuous current phase when the lightning strikes an aircraft in flight, *Proceedings of the 13th International Conference on Gas Discharges and Their Applications*, 1, Glasgow, 214-217.
- [3] **Avrootskij, V. A., Bizaev, A. S., Borisov, R. K., Levitova, L. V., Prokhorov, E. N., Sergievskaya, I. M.**, 1991. Investigation of hazardous factors of lightning and development of lightning protection systems for aircrafts, *Proceedings of the Seventh International Symposium on High Voltage Engineering*, Dresden, 77-79.
- [4] **Thomas, M. J., Seshadri, K. N., Shamanna, K. N., Negabhushana, G. R.**, 1995. A new lightning test facility in India for studying aircraft vulnerability, *Proceedings of the Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, 6755.1 - 6755.4.
- [5] **Soykan, G.**, 2001. Yakalama Bölgesi Yaklaşımı ile Yapılara Yıldırım Çarpma Riskinin Hesabı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] **Günay, M.**, 2002. Hava Taşıtlarının Yıldırımdan Korunması, *Bitirme Ödevi*, İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü.
- [7] **Özkaya, M.**, 1996. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt I, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [8] **Özkaya, M.**, 1996. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt II, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [9] **Özkaya, M.**, 1984. Yüksek Gerilim Tekniğinde Ölçme, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [10] **WG-330**, 1998. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, *18th EEHWG Meeting*.
- [11] **LTI**, 2003. Aerospace Protection, www.lightningtech.com
- [12] **Airsafe**, 2003. Fatal Events, U.S. Accidents and Incidents, www.airsafe.com.

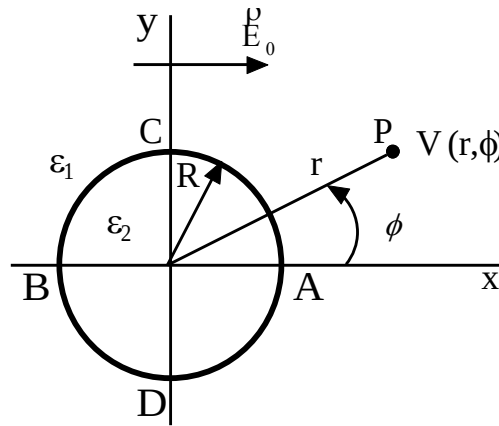
- [13] **AC20-53A**, 1985. Protection of Airplane Fuel Systems Against Fuel Vapor Ignition Due to Lightning, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- [14] **AC20-136**, 1990. Protection of Aircraft Electrical/Electronic Systems Against The Indirect Effects of Lightning, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- [15] **B737 Technical Site**, 2003. Technical Photographs, www.b737.org.uk
- [16] **LDS**, 2003. Aircraft Lightning Diverter Strips, www.lightningdiversion.com.
- [17] **Nmt**, 2001. Lightning Hazards, New Mexico Tech, www.nmt.edu
- [18] **A310 AMM**, 2003. Static Dischargers, Chapter 23-60-00, A310 Aircraft Maintenance Manual, Airbus Industry.
- [19] **WG-328**, 1995. Protection of Aircraft Fuel Systems Against Fuel Vapor Ignition Due To Lightning.
- [20] **Newton BBS**, 2003. Aircraft and Lightning, www.newton.dep.anl.gov
- [21] **Krohto, E. G.**, 1992. Lightning Strike Evaluations of Reinforced Conductive Airframe Seals, July, Chomerics, England.
- [22] **Aircraft Lightning Protection Handbook**, 1989. Chapter 11.
- [23] **Gönenç, İ.**, 1977. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt I, Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrot Sistemleri, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı:1085, İstanbul.

EK A

Uçaklara yıldırım çarpması, ortamdaki elektrik alan dağılımı ile ilgilidir. Uçaklar alan dağılımını bozarak kendi üzerlerinde yüksek alan şiddeti yaratırlar. Basitleştirme bakımından bulutu bir düzlem elektrot, bulut karşısındaki yeri karşı düzlem elektrot olarak düşünersek uçak bu düzgün alan içinde bulunan iletken yapı şeklinde modellenebilir. Uçak için de basitleştirme ile iletken silindir yaklaşımı yapılırsa, problem düzgün alanda iletken silindirin alanı hesabına dönüşür. Bu hesap analitik olarak düzgün alanda yüksüz bir dielektrik silindirin alan hesabından yararlanılarak yapılır. Bunun için öncelikle bu hesap verilecek sonra düzgün alanda iletken silindirin (uçağın) üzerindeki alan hesabı yapılacaktır.

A.1 Düzgün Alan İçinde Yüksüz Bir Dielektrik Silindirin Alanı

Burada, dielektrik sabiti ϵ_1 olan sonsuz geniş bir ortamda, düzgün bir alan içinde, dielektrik sabiti ϵ_2 olan R yarıçapında, sonsuz uzunlukta yüksüz bir yalıtkan silindirin iç ve dış bölgelerindeki alan incelenecektir [23].



Şekil A.1 Düzgün bir alanda yalıtkan bir silindirin alan hesabı

Hesapta silindirin iç ve dış kısımlarındaki ortamların yüksüz ($\rho = 0$) birer ortam olduğu kabul edilecek ve E_0 düzgün alanını meydana getiren ve sonsuzda bulundukları kabul edilen yüklerin, incelenen bölge dışında kaldıkları kabul edilecektir.

Düzgün alanın potansiyel ifadesi $E_0 = -dV/dx$ bağıntısı yardımıyla

$$V_x = -E_0 x + K \quad (A.1)$$

olarak elde edilebilir. Burada $x = 0$ da $V_x = 0$ seçildiğinde $K = 0$ olacağından

$$V_x = E_0 x = -E_0 r \cos \phi \quad (A.2)$$

olur. Silindir dışındaki bölgeyi 1 indisi, dışındaki bölgeyi de 2 indisi ile gösterirsek, şu sınır koşulları belirleyebiliriz:

1. Silindir dışındaki bölgede $r \rightarrow \infty$ iken ($r \gg R$ için) silindirin E_0 düzgün alanına etkisi kalkacağından V_1 potansiyeli için,

$$(V_1)_r = -E_0 x = -E_0 r \cos \phi \quad (A.3)$$

yazılabilir

2. Silindirin sınır yüzeyinde,

$$(V_1)_{r=R} = (V_2)_{r=R} \quad (A.4)$$

olmalıdır.

3. Deplasman vektörlerinin sınır yüzeyindeki dik bileşenleri birbirine eşit olacağından,

$$\epsilon_1 \left(\frac{\partial V_1}{\partial r} \right)_{r=R} = \epsilon_2 \left(\frac{\partial V_2}{\partial r} \right)_{r=R} \quad (A.5)$$

olmalıdır.

4. Silindir içinde $r = 0$ için potansiyel sonsuz bir değer almamalıdır.

Alanın iki boyutlu ($\partial/\partial z = 0$) ve x eksenine göre simetrik olduğu göz önüne alınırsa Laplace denkleminin genel çözümü,

$$V = V(r, \phi) = A_0 \ln r + B_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m r^m + b_m r^{-m}) \cos m\phi \quad (\text{A.6})$$

olur [23].

Dış bölgede: 1. sınır koşuluna göre ($r \rightarrow \infty$), ifadedeki logaritmik terim ve ikinci terim ortadan kalkar, $A_0 = 0$, $B_0 = 0$ ve $m=1$ için $a_1 = -E_0$ ve $m>1$ için $a_m = 0$ olması gerektiğinden dış bölgedeki potansiyel,

$$V_1 = -E_0 r \cos \phi + \sum_{m=1}^{\infty} b_m r^m \cos m\phi \quad (\text{A.7})$$

olarak elde edilir [23].

İç bölgede: 4. sınır koşuluna göre $r=0$ için potansiyelin sonsuz büyüklükte bir değer almaması gerekir. Buna göre $b_m = 0$ $A_0 = 0$ ve referans potansiyel ($V_x = 0$) için $B_0 = 0$ olması gerektiğinden silindir içindeki bölgede potansiyel ifadesi,

$$V_2 = \sum_{m=1}^{\infty} a_m r^m \cos m\phi \quad (\text{A.8})$$

olarak elde edilir [23].

Sınır yüzeyde: 2. ve 3. sınır koşullara göre $r = R$ için,

$$-E_0 R \cos \phi + \sum_{m=1}^{\infty} b_m R^{-m} \cos m\phi = \sum_{m=1}^{\infty} a_m R^m \cos m\phi \quad (\text{A.9})$$

$$-\varepsilon_1 E_0 \cos \phi - \varepsilon_1 \sum_{m=1}^{\infty} m b_m R^{-(m+1)} \cos m\phi = \varepsilon_2 \sum_{m=1}^{\infty} m a_m R^{m-1} \cos m\phi \quad (\text{A.10})$$

ifadeleri yazılabilir [23].

Birinci ifadede $m = 1$ hariç tüm m değerleri için

$$\frac{b_m}{R^m} = a_m R^m \quad (\text{A.11})$$

bağıntısı elde edilir [23]. V_1 bölgesinde $m = 1$ dışındaki tüm değerler için $a_m = 0$ olduğundan bu bağıntıya göre $m = 1$ hariç tüm m değerleri için $b_m = 0$ olması gerekir. Buna göre sadece $m = 1$ olması durumu söz konusu olacağından $m = 1$ için

$$-E_0 R + \frac{b_1}{R} = a_1 R \quad (\text{A.12})$$

$$-\varepsilon_1 \left(E_0 + \frac{b_1}{R^2} \right) = \varepsilon_2 a_1 \quad (\text{A.13})$$

bağıntıları elde edilir [23]. Bu ifadelerden,

$$a_1 = -\frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0, \quad b_1 = -\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} R^2 E_0 \quad (\text{A.14})$$

bulunur [23].

Bulduğumuz bu değerleri (A.7) ve (A.8) denklemlerinde yerine koyduğumuzda silindirin dış ve iç bölgeleri için,

$$V_1 = \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) E_0 r \cos \phi \quad (\text{A.15})$$

$$V_2 = -\frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 r \cos \phi, \quad x = r \cos \phi \quad (\text{A.16})$$

potansiyel ifadeleri elde edilmiş olur. Bu bağıntıları, sınır yüzeyde oluşan polarizasyon yüklerinin meydana getirdiği alan ile mevcut düzgün alanın bileşkesi şeklinde de ifade edebiliriz. Sınır yüzeyde oluşan polarizasyon yüklerinin silindir dışında ve içinde meydana getirdikleri potansiyelleri V_1' ve V_2' ile gösterelim. Birinci bağıntıdaki ikinci terim mevcut düzgün alanı ifade ettiğine göre birinci terim, polarizasyon yükleri tarafından dış bölgede oluşturulan potansiyeli verecektir. İkinci

bağıntıyı da (iç bölgede) mevcut alan ve polarizasyon alanı olarak ayırdığımızda dış ve iç bölgelerdeki polarizasyon yüklerinin alanı için,

$$V_1' = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \frac{R^2}{r^2} E_0 x \quad (\text{A.17})$$

$$V_2' = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 x \quad (\text{A.18})$$

potansiyel ifadeleri elde edilir. V_1' iki çizgisel yük kaynağından oluşan bir dipol alanını ve V_2' de silindir içindeki alan şiddeti E_2'

$$E_2' = -\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 \quad (\text{A.19})$$

düzgün alanını verir. Bu bağıntılar, polarizasyon yüklerinin silindir içindeki E_2' alanının esas alan E_0 alanına paralel ve zıt yönlü olduğunu ve değerinin bu bağıntılar yoluyla bulunabileceğini gösterir. Silindir içindeki bileşke E_2 alanı da E_0 alanına paralel ve değeri

$$E_2 = \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 \quad (\text{A.20})$$

olan bir alan olarak belirlenecektir.

Silindir dışındaki alanda $\vec{E}_1$ bileşke alan şiddeti vektörünün E_{1r} radyal ve buna dik olan $E_{1\phi}$ teğet bileşenleri,

$$E_{1r} = -\frac{\partial V_1}{\partial r} = \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) E_0 \cos \phi \quad (\text{A.21})$$

$$E_{1\phi} = -\frac{1}{r} \frac{\partial V_1}{\partial \phi} = \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) E_0 \sin \phi \quad (\text{A.22})$$

olur. Sınır yüzeyde $\vec{E}_1$ ve $\vec{E}_2$ alan şiddeti vektörlerinin radyal bileşenleri için ($r = R$),

$$E_{1r} = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 \cos \phi \quad (\text{A.23})$$

$$E_{2r} = \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 \cos \phi \quad (\text{A.24})$$

bağıntıları elde edilir [23]. Bunlar $\phi = 0$ ve $\phi = \pi$ için,

$$E_{1r, \max} = E_{1\max} = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 \quad (\text{A.25})$$

$$E_{2r, \max} = E_{2\max} = \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 + \varepsilon_1} E_0 \quad (\text{A.26})$$

maksimum değerlerini alır. Bu bağıntılar bize her iki ortamdaki maksimum zorlanmaların bu ortamların dielektrik sabitlerine bağlı fakat silindir yarıçapından bağımsız olduğunu gösterir.

A.2 Düzgün Alan İçindeki İletken Silindirin Alanı

Yukarıda ele alınan yükstüz silindirin iletken bir silindir ($\varepsilon_2 / \varepsilon_1 \rightarrow \infty$) olması durumunda, silindir içindeki alan sıfır olur. Silindir dışındaki potansiyel,

$$V_1 = \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) E_0 r \cos \phi \quad (\text{A.27})$$

olarak yazılabilir [23]. Alan şiddeti vektörünün radyal ve teğet bileşeni,

$$E_{1r} = \left(\frac{R^2}{r^2} + 1 \right) E_0 \cos \phi \quad (\text{A.28})$$

$$E_{1\phi} = \left(\frac{R^2}{r^2} - 1 \right) E_0 \sin \phi \quad (\text{A.29})$$

olarak elde edilir. Sınır yüzeydeki alan şiddeti değişimi,

$$(E_{1r})_{r=R} = E = 2E_0 \cos \phi \quad (\text{A.30})$$

olur. Bu bağıntıdan kolayca görüleceği gibi sınır yüzeydeki alan şiddeti $\phi = 0$ ve $\phi = \pi$ için maksimum değeri alır. Alan şiddetinin maksimum değeri,

$$E_{\max} = 2E_0 \quad (\text{A.31})$$

olur. Bu bağıntılar bize silindirin yüzeyindeki zorlanmanın, silindir yarı çapına bağlı olmadığını ve maksimum zorlanmanın ortam düzgün alanının iki katına eşit olacağını gösterir.

Bunu uçak için düşünersek uçak üzerindeki alan şiddeti değerinin uçağın çarpına ve boyuna bağlı olmadığını söyleyebiliriz. Uçak üzerindeki maksimum alan şiddeti bulut ile yer arasındaki E_0 olarak belirtebileceğimiz düzgün alan şiddetinin yaklaşık iki katı olacağı görülür. Bir yıldırım olayı sırasında $E_0 = 20\text{-}25$ kV/cm değerleri arasında olduğundan uçak üzerinde yaklaşık maksimum elektrik alan şiddetinin $E_{\max} = 2 E_0 = 2 (20 \div 25 \text{ kV/cm}) = 40 \div 50$ kV/cm mertebesinde olduğu anlaşılır. Bu da yıldırımı üzerine yönlendirmek veya başlatmak için yeterli yükseklikte bir alan şiddetidir.

ÖZGEÇMİŞ

Servet İnce 1969 yılında İstanbul'da doğdu. İlkokulu Abdi İpekçi İlkokulu'nda (İstanbul), orta okulu Haznedar Ortaokulu'nda (İstanbul) ve liseyi Gültepe Teknik Lisesi (İstanbul) Elektrik Bölümünde tamamladıktan sonra 1987 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. 1992-1993 Güz döneminde iyi derece ile Elektrik Mühendisliği bölümünden mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında yüksek lisans programına başladı. 1997 yılında dil eğitimi için gittiği İngiltere'den dönüşünde Türk Hava Yolları'nda mühendis olarak göreve başladı. Halen Türk Hava Yolları Uçak Bakım Merkezi Uçak Bakım Üretim Planlama Müdürlüğü'nde mühendis olarak görev yapmaktadır.