

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA ELEKTRONİĞİ VE YAZILIMI YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**KALKANLAMA SONLANDIRMA METOTLARININ YILDIRIMIN
UÇAKLAR ÜZERİNDEKİ DOLAYLI ETKİLERİNE KARŞI
BAŞARIMININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

EMRE ATALAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA - 2023

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA ELEKTRONİĞİ VE YAZILIMI YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**KALKANLAMA SONLANDIRMA METOTLARININ YILDIRIMIN
UÇAKLAR ÜZERİNDEKİ DOLAYLI ETKİLERİNE KARŞI
BAŞARIMININ İNCELENMESİ**

HAZIRLAYAN

EMRE ATALAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ AHMET TURGUT TUNCER

ANKARA - 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı Savunma Elektronik ve Yazılım Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Emre ATALAY tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 16 / 08 / 2023

Tez Adı: Kalkanlama Sonlandırma Metotlarının Yıldırımın Uçaklar Üzerindeki Dolaylı Etkilerine Karşı Başarımının İncelenmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Turgut TUNCER (Başkent Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Remzi YILDIRIM (Yıldırım Beyazıt Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Çağdaş Sıtkı İNAM (Başkent Üniversitesi)

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 17 / 08 / 2023

Öğrencinin Adı, Soyadı: Emre ATALAY

Öğrencinin Numarası: 22110374

Anabilim Dalı: Savunma Teknolojileri ve Sistemleri

Programı: Savunma Elektronik ve Yazılım Tezli Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Turgut TUNCER

Tez Başlığı: Kalkanlama Sonlandırma Metodlarının Yıldırımın Uçaklar Üzerindeki Dolaylı Etkilerine Karşı Başarımının İncelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 65 sayfalık kısmına ilişkin, 17 / 08 / 2023 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 6'dır. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

Tarih: 17 / 08 / 2023

Öğrenci Danışmanı Unvan, Ad, Soyad, İmza:

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Turgut TUNCER

TEŞEKKÜR

Bu zamana kadar benden desteklerini esirgemeyen anneme ve babama, kardeşime, her zaman yanımda olan eşim Ahsen'e, çalışmanın her aşamasındaki yardımlarından ve tezin sonuçlanması için yol gösterici olduğundan dolayı tez danışmanım Sn. Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Turgut TUNCER'e şükranlarımı sunarım.



ÖZET

Emre ATALAY

KALKANLAMA SONLANDIRMA METOTLARININ YILDIRIMIN UÇAKLAR ÜZERİNDEKİ DOLAYLI ETKİLERİNE KARŞI BAŞARIMININ İNCELENMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı

2023

Yıldırım yüksek akım ve yüksek voltajın ani olarak boşaldığı bir doğa olayıdır. Bu doğa olayı bulutlar arasında, bulut içinde ya da bulut ile yeryüzü arasında olacak şekilde meydana gelebilmektedir. Hava araçlarına da yıldırım çarpma riski vardır. Günümüzde yıldırım çarpmasını önleyici bir sistem mevcut değildir. Bunun için yıldırımın etkileri azaltılmaya çalışılmaktadır. Uçaklarda kullanılan metalik malzemeler Faraday kafesi etkisi göstererek yıldırımdan kaynaklanan elektromanyetik alanların uçak içerisine girişine izin vermemektedir fakat günümüzde daha sık kullanılmaya başlayan kompozit yapılar bu konuda metallere kıyasla daha kötü performans göstermektedir. Ayrıca uçak üzerinde bulunan pencere, kapı gibi süreksizlikler Faraday kafesi üzerinde boşluklar yaratmakta ve elektromanyetik alanların uçak içerisine girişine olanak sağlamaktadır. Bu sebeple uçak üzerinde kullanılan ekipmanların yıldırımın dolaylı etkilerine karşı kalifiye olması gerekmektedir. Ekipmanları yıldırımın dolaylı etkilerine karşı korumada en sık tercih edilen metot kabloların kalkanlanmasıdır. Kalkanın koruma etkisini ve sonlandırma metotlarının bu korumaya katkısını anlamak oldukça önemlidir. Bu çalışmada, yıldırımın dolaylı etkisine karşı çeşitli kalkan sonlandırma teknikleri hem deneysel metotlarla hem de EMA3D programında yapılan benzetim çalışmaları ile incelenmiş ve 360° arka kabuk sonlandırma tekniğinin kullanılmasının yaklaşık 3 dB koruma sağlayarak oldukça etkili olduğu bulunmuştur. Deneylerden elde edilen sonuçlar benzetim sonuçları ve önceki çalışmalar ile karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların birbiri ile tutarlı olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER: Yıldırım, Kalkanlama, Kalkanlama Sonlandırma, Hava Aracı, Havacılık, EMA3D

ABSTRACT

Emre ATALAY

INVESTIGATION OF THE SUCCESS OF SHIELDING TERMINATION AGAINST THE INDIRECT EFFECTS OF LIGHTNING ON AIRCRAFT

Baskent University Institute of Science

Department of Defense Technologies and Systems

2023

Lightning is a natural phenomenon where high voltages and currents suddenly discharge. It can be caused by clouds themselves, clouds between them, or clouds near the earth. Aircraft are also at risk of being struck by lightning and there is currently no way to prevent this from happening. Instead, efforts are being made to protect by reducing the effects of lightning. Metal structures in aircraft form a Faraday cage which helps in preventing lightning currents from entering the aircraft. However, composite structures, which are becoming more prevalent in the aviation sector, are less efficient in doing so compared to metals. Additionally, openings such as windows in the aircraft can break the Faraday cage and allow strong electromagnetic fields to penetrate. Hence, all equipment used on board the aircraft must be adequately qualified and lightning-proof. The most popular technique used to reduce the indirect effects of lightning on electronics is cable shielding. In this study, various shield termination techniques against the indirect effect of lightning were examined both by experimental methods and by simulation studies in the EMA3D program, and it was found that the use of 360° back shell termination technique was very effective by providing about 3 dB of protection. The results obtained from the experiments are compared with simulation results and previous studies and it has been observed that the obtained results are consistent with each other.

KEYWORDS: Lightning, Shielding, Shield Termination, Aircraft, Aviation, EMA3D

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ.....	1
2. YILDIRIMIN FİZİĞİ.....	4
2.1. Genel Bakış	4
2.2. Streamers	6
2.3. Korona	7
2.3.1. Korona boşalması	8
2.3.2. Korona oluşumu	8
2.4. Lider	10
3. YILDIRIM ORTAMI	11
3.1. Yıldırımın Oluşumu	11
3.2. Yıldırım Tipleri	13
4. HAVA ARAÇLARINA YILDIRIMIN TUTUNMA FENOMENİ.....	15
4.1. Yıldırım Çarpması ile İlgili İstatistikler	15
4.2. Elektrik Alan Etkisi	17
4.3. Uçak Üzerindeki Tutunma Bölgelerinin Tanımlanması	19
5. HAVA ARAÇLARI İÇİN TANIMLANMIŞ YILDIRIM ORTAMI	21
5.1. Direkt Yıldırım Ortamı – Gerilim Komponentleri	21
5.2. Direkt Yıldırım Ortamı – Akım Komponentleri	22
5.3. Dolaylı Yıldırım Ortamı	25
6. YILDIRIMIN UÇAK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	29
6.1. Yıldırımın Direkt Etkileri (LDE)	30

6.1.1. Uçak yüzeyi üzerindeki direkt etkiler.....	31
6.2. Yıldırımın Dolaylı Etkileri (LIE).....	32
6.2.1. İndüklenme etkileri	34
7. HAVA ARACI ELEKTRONİK SİSTEMLERİNİN SERTİFİKASYONU	38
8. ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK.....	41
9. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM.....	43
9.1. Elektromanyetik Girişim Kaynakları	43
9.2. Elektromanyetik Girişimin Etkileri	44
9.3. Elektromanyetik Girişimi Azaltmak için Alınabilecek Önlemler	44
10. ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK VE YILDIRIM	45
10.1. Elektronik Sistemleri Yıldırım Hasarından Korumaya Yönelik Önlemler	45
11. KALKAN SONLANDIRMA METOTLARI	47
12. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	51
12.1. EMA3D Analiz Programına Genel Bakış	52
12.2. Kalkanlı ve Kalkansız Kabloların Analizi	53
13. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	57
13.1. Test Konfigürasyonları	57
13.2. Test Düzenegi ve Bulgular	60
14. SONUÇ VE TARTIŞMA	65
KAYNAKLAR	66

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1. İdeal akım komponentleri ve alakalı parametreler [42]	22
Tablo 5.2. Yıldırım dalga formlarının uçak üzerindeki görülme bölgeleri [42].....	25
Tablo 6.1. Hata durumlarının sınıflandırılması [47].....	38
Tablo 6.2. Ekipmanların hata durumları ile ilgili seviyeleri [47].....	39



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Elektrot konfigürasyonu [30]	4
Şekil 2.2. Gerilim - Akım karakteristiği [31]	5
Şekil 2.3. Elektrot konfigürasyonları [30] 1. Küre - Düzlem 2. Küre-Küre 3. Çubuk-Düzlem 4. Çubuk-Çubuk	7
Şekil 2.4. Adım 1 [29]	8
Şekil 2.5. Adım 2 [29]	9
Şekil 2.6. Pozitif korona modları [35] [36]	9
Şekil 2.7. Negatif korona modları [35] [36]	10
Şekil 3.1. Kümüls bulutlarındaki yük dağılımının gösterimi [37].....	12
Şekil 3.2. Dönüş darbesinin oluşum adımları [30]	13
Şekil 3.3. Yıldırım flaşının genel görünümü [30]	13
Şekil 3.4. Negatif yıldırım darbesinin dalga formu modeli [30]	14
Şekil 3.5. Pozitif yıldırım darbesinin dalga formu modeli [30]	14
Şekil 4.1. Hava araçları yıldırım çarpma sayısı-yükseklik kıyaslaması [30][41].....	16
Şekil 4.2. Raporlanan 881 yıldırım çarpma olayında yıldırım çarpma sayısı - (a) sıcaklık aralığı, (b) hava durumu, (c) türbülans durumu [30][41].....	16
Şekil 4.3. Hava aracı çevresindeki elektrik alan yoğunluğu [30]	18
Şekil 4.4. (a) Lider uçağa yaklaşıyor (b) lider uçağa tutunuyor ve yayılmaya devam ediyor (c) darbe uçağın üzerinden geçiyor (d) darbe uçağın üzerinden geçmiyor [30].....	18
Şekil 4.5. Uçak üzerindeki süpürülmüş kanal tutunma noktalarının tipik gösterimi [39].....	19
Şekil 5.1. Direkt etki testi için yıldırım ortamı [42]	23
Şekil 5.2. Akım komponentlerinin detaylı özellikleri [42]	24

Şekil 5.3. Dolaylı etkiler için standart dalga formları [7]	27
Şekil 5.4. Cable bundle testleri için kullanılacak dalga formları ve single stroke test seviyeleri [7]	27
Şekil 6.1. Direkt yıldırım test sonuçları (a) boyasız 0.8 mm kalınlığında alüminyum panel (b) boyalı 1 mm kalınlığında alüminyum panel [43]	32
Şekil 6.2. Yıldırım için örnek bir akım yolu [45]	33
Şekil 6.3. NEMP ve yıldırımın spektrum karşılaştırması	34
Şekil 6.4. Bir uçakta meydana gelen manyetik alan bağlanması [30]	35
Şekil 6.5. Kablo'nun iki noktadan bağlı olduğu durumda indüklenen manyetik akı [46]	35
Şekil 6.6. Uçaklardaki elektrik alan bağlanması [30]	36
Şekil 6.7. Uçaklardaki direnç gerilimi bağlanması [30]	36
Şekil 6.8. Kalkan eklenmiş kabloların gösterimi [46]	37
Şekil 6.9. Transient seviyeleri arasındaki ilişki [47]	40
Şekil 10.1. EMU mühendisliği açısından farklı kalkan sonlandırma yöntemlerinin genel değerlendirmesi	48
Şekil 11.1. EMA3D programında, F16 modeli ve yıldırımın giriş/çıkış noktaları	54
Şekil 11.2. EMA3D programında modellenen kabloların yakından görünümü	54
Şekil 11.3. Giriş ve çıkış noktalarında simüle edilmiş yıldırım akımı seviyeleri (Komponent A)	55
Şekil 11.4. Kalkansız kabloda indüklenen akım değeri	55
Şekil 11.5. Kalkanlı kabloda indüklenen akım değeri	56
Şekil 11.6. Kalkan üzerinde indüklenen akım değeri	56
Şekil 12.1. Konfigürasyon 1	57
Şekil 12.2. Konfigürasyon 2	58

Şekil 12.3. Konfigürasyon 3	58
Şekil 12.4. Konfigürasyon 4	59
Şekil 12.5. Konfigürasyon 5	59
Şekil 12.6. Standart test düzeneği kurulumu, MIL-STD-461G, FIGURE CS117-10	60
Şekil 12.7. 360° backshell ile sonlandırma (Konfigürasyon 1)	61
Şekil 12.8. Pigtail (5cm) ile konektörde sonlandırma (Konfigürasyon 2)	61
Şekil 12.9. Pigtail (7cm) ile şaside sonlandırma (Konfigürasyon 3)	62
Şekil 12.10. Pigtail (15 cm) ile ayrı bir noktada sonlandırma (Konfigürasyon 4)	62
Şekil 12.11. Pigtail (25 cm) ile ayrı bir noktada sonlandırma (Konfigürasyon 4)	63
Şekil 12.12. Pigtail (15 cm) ile ekipman içinde sonlandırma (Konfigürasyon 5)	63

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Advisory Circulars
AEHP	Atmospheric Electricity Hazard Program
AI	aksiyon integrali
ARP	Aerospace Recommended Practice
ATL	Actual Transient Level
bck	backshell
CFRP	carbon fiber reinforced polymers
cnt	konetör
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EM	elektromanyetik
EMD	elektromanyetik duyarlılık
EMG	elektromanyetik girişim
EMU	elektromanyetik uyumluluk
ESB	elektrostatik boşalma
ETDL	equipment transient design level
ETSL	equipment transient susceptibility levels
EUROCADE	The European Organisation for Civil Aviation Equipment
FAA	Federal Aviation Administration
FCC	Federal Communications Commission
FHA	functional hazard assessment
JAA	Joint Aviation Authorities
LDE	lightning direct effects
LIE	lightning indirect effects
MEİ	mükemmel elektrik iletkeni
NACA	National Advisory Committee For Aeronautics
NEMP	nuclear electromagnetic pulse
SAE	Society Of Automotive Engineers
TAC	test altındaki cihaz
TCL	transient control level
TLM	transmission-line matrix
WF	waveform

1. GİRİŞ

Literatüre göre, ticari yolcu uçaklarına yılda en az bir kez yıldırım çarpmaktadır [1][2]. Raporlar ayrıca, savaş uçaklarının hizmet ömürleri boyunca en az bir kez yıldırım çarpmasıyla karşılaşabileceğini, bazı durumlarda iki kez vurulduğunu göstermektedir [3]. Bir uçağa yıldırım çarpması, iki ayrı iletim yıldırım kanalının oluşumunu başlatır. Bu kanallar pozitif lider ve negatif lider olarak kendini gösterir [4].

Yıldırım çarpması tarafından üretilen yüksek voltaj ve akım, uçak üzerinde doğrudan (fiziksel) ve dolaylı (elektromanyetik) olmak üzere iki türe ayrılabilen çeşitli etkilere sahip olabilir. Doğrudan etkiler, yüksek basınçlı şok dalgaları ve yüksek akımların neden olduğu yanma, kaynama ve parçalanma gibi uçakta yapısal hasarları içerir. Dolaylı etkiler ise, uçak yüzeyinde dolaşan ve uçak içindeki cihazları etkileyen yıldırım akımlarının oluşturduğu elektrik ve manyetik alanlardan kaynaklanan girişimin sonucudur. [5]'te belirtildiği gibi, hava aracı yıldırım çarptıktan sonra bile operasyonel gereksinimlerini karşılamaya ve güvenli bir iniş yapmaya devam etmelidir.

Havacılık endüstrisi, güvenlik etkileri nedeniyle uzun süredir dolaylı yıldırım etkileriyle mücadele etmektedir. Bu nedenle, uçaklar çeşitli seviyelerde yıldırım sertifikasyonuna tabi tutulur. Bu sertifikasyon [4], [6], ekipman [7], alt sistem ve hava aracı [8], [9] gibi çeşitli seviyeleri içerir.

1980'lerin sonlarında, Fransız Savunma Ajansı tarafından desteklenen Onera, C160 Uçağı üzerinde bir uçuş deneyi gerçekleştirme fırsatı elde etti [10]. Bu deney sırasında, uçağın dış kısmına elektromanyetik (EM) alan yüzey sensörleri yerleştirildi, arka kapı sensörleri ise bir karbon kompozit kapının arkasına yerleştirildi. Şaşırtıcı bir şekilde, deney sırasında beklenmeyen çift yönlü dalga biçimleri gözlemlendi ve araştırmacıları şaşırttı. Ancak, derinlemesine yapılan analizler sonucunda, bu fenomenlerin kökenleri, uçağın dış yüzeyini doğru bir şekilde temsil eden basitleştirilmiş bir 3D model kullanılarak akım dağılımlarının yeniden hesaplanmasıyla ortaya çıkarıldı [11]. Ayrıca, arka kapıdaki elektromanyetik (EM) bağlanma olgusu, küçük yüklü açıklıklar ve saçılma teorisiyle doğrulandı [12].

1990'larda Avrupa Birliği, akademik, laboratuvar ve endüstri ortaklarıyla işbirliği yaparak dolaylı yıldırım ve etkilerini araştırmaya yönelik iki önemli proje başlattı. Bu projelerden biri

FULMEN AB projesiydi. Bu proje, uçakların iç kısımlarını ve kablo tesisatını içeren 3D modellemenin temelini oluşturmada önemli bir rol oynadı. Bu çalışmalar hakkında daha detaylı bilgi için [13] ve [14] referansları incelenebilir.

Çalışmamızın odak noktası pasif koruma metodu olan kabloların kalkanlanması olarak belirlenmiştir. Kalkanlı kablolar, elektromanyetik (EM) kalkanlama teorisinin temellerine dayanan bir uygulamadır [15]. Öte yandan, aktif koruma, ekipman girişlerinin korunması için indüklenen akımlar tarafından tetiklenen doğrusal olmayan cihazların kullanılmasıyla ilgilidir. Ancak bu çalışma, aktif koruma konularını ayrıntılı olarak ele almamaktadır. Ayrıca, dolaylı yıldırım etkilerinden, yakıt depolarının korunmasıyla ilgili özel bir konuyu da ele almamaktadır. Yakıt tanklarının korunması ile ilgili okuyuculara [16] referansı önerilmektedir.

Kalkanın performansı, kullanılan sonlandırma yönteminden büyük ölçüde etkilenir. Literatürdeki çalışmalar [17]-[25], çeşitli kalkan sonlandırma yöntemlerinin performans üzerindeki etkisini araştırmıştır. Ayrıca, kablolardaki elektromanyetik (EM) kuplaj ile ilgili kapsamlı araştırmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalar, özellikle Rafale Fighter ve NH90 gibi uçakların düşük empedanslı kablolarındaki akımları ölçmeyi içermektedir. Ölçümler, her iki uçağa da bir koaksiyel dönüş testi ile yıldırım dalga formunun enjekte edilmesi sırasında gerçekleştirilmiştir [7], [26], [27].

Çalışmamızda yıldırımın dolaylı etkilerine karşı etkinliklerinin belirlenmesi için çeşitli kalkan sonlandırma yöntemlerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bunu başarmak için hem deneysel hem de simülasyon yöntemleri kullanılmıştır. İlk olarak, yıldırım etkileri EMA3D programı kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları, test sonuçlarına ilişkin beklentilerin belirlenmesini sağlamıştır. Daha sonra deneysel sonuçları elde etmek için test düzenekleri üretilmiştir.

Bu çalışmada, önceki literatürden farklı olarak, yıldırımın dolaylı etkilerini ölçme yöntemlerinden biri olan “Single Stroke” testi kullanılmış ve direkt olarak kablo üzerinde indüklenen akımlar ölçülmüştür. Ayrıca, bu çalışma elektromanyetik uyumluluk (EMU) mühendisliği tarafından tercih edilen kalkan sonlandırma yöntemlerinin yıldırımın dolaylı etkilerine karşı korumadaki etkinliğini göstermektedir.

Sonuçlar, literatürdeki kalkan sonlandırma yöntemlerinin başarısıyla karşılaştırılmıştır. Bu sayede elektromanyetik uyumluluk (EMU) için alınan önlemlerin yıldırımdan korunma

önlemleriyle tutarlılığı tartışılmış ve hava taşıtı uygulamalarında tercih edilebilecek sonlandırma yöntemleri hakkında fikir edinilmiştir.

Simülasyon ve test sonuçları arasındaki tutarlılığın çalışmanın çok önemli bir yönü olduğunu belirtmekte fayda vardır. Bu tutarlılık olmadan, elde edilen sonuçlardan anlamlı sonuçlar çıkarmak zor olacaktır. Simülasyon ve test sonuçlarının eşleşmesi, aynı zamanda elde edilen sonuçların önceki çalışmalar ile tutarlı olması, çalışmanın bulgularının güvenilir olduğunun ve gerçek dünyadaki uygulamalar için kullanılabileceğinin güçlü bir göstergesidir.

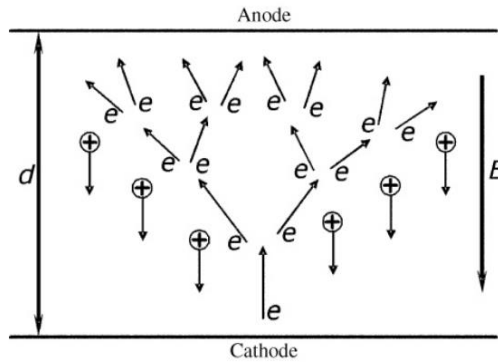
Elde edilen sonuçlar, uçağı yıldırımın dolaylı etkilerine karşı korumak için en iyi uygulamaların geliştirilmesine rehberlik etmek için kullanılabilir. Ayrıca gelecekte, farklı sonlandırma metotları test edilerek bu çalışmada elde edilen veriler geliştirilebilir, aynı sonlandırma metotlarına farklı dalga formları uygulanarak dalga formlarının akım indüklemeye kabiliyetleri araştırılabilir veya farklı malzemelerden üretilen kalkanlar kullanılarak malzemenin koruma üzerindeki başarımı araştırılabilir böylece kalkanlamanın yıldırımın dolaylı etkilerine karşı başarımı konusunda bizlere daha geniş bir perspektif sağlayabilir. Bu sebeplerden dolayı çalışmamızın geliştirmeye açık ve pratikte kullanılabilecek çıktılar ürettiğini söylememiz mümkündür.

2. YILDIRIMIN FİZİĞİ

Yıldırım fenomeni ile çalışırken arkasındaki fiziği anlamak önemlidir. Yıldırım yüksek akım ve yüksek gerilimin ani şekilde boşaldığı bir doğa olayıdır. Bu bölümde bu fenomenin arkasındaki fiziğe genel bir bakış sağlanması amaçlanmıştır.

2.1. Genel Bakış

Bu bölümde öncelikle gazlardaki elektrik boşalmasıyla bağlantılı çeşitli olaylardan kıvılcımlar (sparks), streamers, korona ve liderler incelenecektir. Referans [28] ve [29] Çöküş Mekanizmasını (The Mechanism of Breakdown) açıklamak için iki tür teori sunar. Elektriklin iletilmesi için, yüklerin yönlendirilmiş hareketini üreten bir elektrik alanıyla, bir gaz ortamında bulunan iki elektrot olması gerekir. Şekil 2.1’de bunun bir örneği verilmiştir.

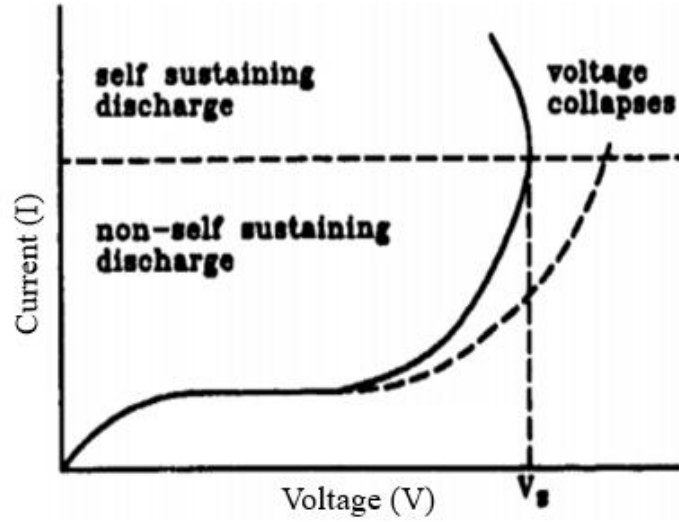


Şekil 2.1. Elektrot konfigürasyonu [30]

Bir gazın tamamen çökmesi veya iki elektrot arasında bir kıvılcım oluşumunu araştırabilmek için, gazlara özgü elektriksel özelliklerin anlaşılması gerekmektedir.

Gazlardaki elektrik boşalmaları iki türe ayrılabilir: kendi kendine devam etmeyen deşarj (non-self-sustaining discharge) ve kendi kendine devam eden deşarj (self-sustaining discharge).

Gazlardaki Çökme Mekanizması, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, kendi kendine devam etmeyen bir boşalmadan, kendi kendine devam eden boşalma türlerinden birine geçiştir.



Şekil 2.2. Gerilim - Akım karakteristiği [31]

Çökme bölgesinde elektronların ve iyonların iyonlaşmasından dolayı akımda dikkate değer bir artış meydana gelir. Bu yüklü parçacıklar nötr atomlardan üretilir ve negatif elektrottan pozitif elektrota geçer. Bu süreç bir elektron akışı ile sonuçlanır ve hızlanarak hareket eden elektronlar tarafından oluşturulan toplam elektron sayısı

$$N^- = n_0^- e^{\alpha d} \quad (2.1)$$

formülü ile bulunur. Burada N^- son durumdaki elektron sayısı, n_0^- başlangıç durumundaki elektron sayısı ve d iki elektrot arasındaki mesafeyi göstermektedir. α ise Townsend'in ilk iyonlaşma katsayısıdır ve bir elektronun santimetre başına yaptığı iyonlaştırıcı çarpışmaların ortalama sayısını gösterir. [32]

Elektrik alan, elektron ivmesinin derecesinin belirlenmesinde ve çeşitli mekanizmalar yoluyla yeni elektronların serbest bırakılmasında çok önemli bir rol oynar, daha fazla elektron akışını mümkün kılar ve ikinci iyonlaşma sürecini kolaylaştırır.

Townsend, toplam akımın iki bileşen tarafından karakterize edilebileceğini öne sürmektedir. İlk bileşen, elektron hareketini açıklayan ve (2.1)'de zaten elde edilen bileşendir. İkinci bileşen ise pozitif yüklü parçacıkların hareketinden kaynaklanır ve

$$N^+ = n_0^+ e^{\gamma d} \quad (2.2)$$

formülü ile bulunur. Burada N^+ son durumdaki pozitif yüklü parçacık sayısını, n_0^+ başlangıçtaki pozitif yüklü parçacık sayısını, d ise katedilen mesafeyi göstermektedir. γ ise Townsend'in ikinci iyonlaşma katsayısıdır.

$$N = N^+ + N^- \quad (2.3)$$

Anoda ulaşan toplam elektron sayısı:

$$N = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.4)$$

(2.4) çökme olmadan önce boşluktaki ortalama akımı verir. Payda şu şekilde yazılabilir:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.5)$$

Bu duruma Townsend'in çökme kriteri denir. $e^{\alpha d} \gg 1$ olduğu dikkate alınırsa (2.5) şu şekilde sadeleştirilebilir:

$$\gamma(e^{\alpha d}) = 1 \quad (2.6)$$

Son olarak kıvılcım gerilimi V_s 'de boşluk direnci kırılacak ve çökme gerçekleşecektir. [29][32][33]

2.2. Streamers

Çökme sürecinin karmaşık doğası nedeniyle, Townsend'in çökme kriteri nadiren kullanılır. Buna alternatif bir yaklaşım olarak ise Sparks teorisi önerilmiştir. [29]

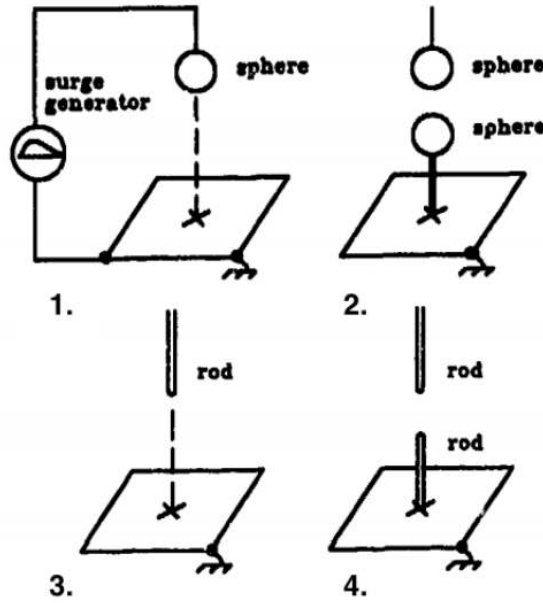
Kıvılcım teorisi, iyonların boşluğu geçmesi ve ikinci emisyonu tetiklemesi için gereken süreye kıyasla çok daha hızlı aşırı voltaj gelişimini içeren kıvılcım çökme mekanizması etrafında toplanmıştır. Bu teoride, kıvılcım kanalı yüksek iletkenlik sergiler ve katottan anoda elektron sürüklenme süresinden bile daha hızlı oluşabilir. Townsend ve Sparks çökme mekanizmaları arasındaki bu temel ayrım, gaz iyonlaşmasına yol açan ve elektrotlarda meydana gelen diğer işlemlerden bağımsız olan bir streamers oluşumunun hızlı oluşumunda yatmaktadır.

Teori, çökmenin, gaz iyonlaşmasını başlatan bir streamer'ın büyümesine atfedildiğini açıklar ve streamer'ın iki elektrot arasında tamamen çökmeye doğru mu uzandığını yoksa

korona olarak bilinen lokalize bir boşalmayla sınırlı mı kaldığını araştırır. Streamer'ın bu sınırlandırılması veya uzatılması, elektrik alanının boşluk boyunca dağılımına bağlıdır [30].

2.3. Korona

Korona, [34]'de bahsedildiği gibi, yüksek elektrik potansiyelinde tutulan bir iletkenin çevresinde meydana gelen görünür mavi parıltıyı ifade eder. Bu noktayı çevreleyen elektrik alan kuvveti, çöküş için öncü görevi görebilir, güç kaybına veya radyo alıcılarında parazite neden olabilir. Hava araçları bulutlardan geçerken yüklendiğinde uç kısımlarında ve ayrıca yüksek elektrik alanlarına maruz kalan topraklanmış cisimlerde korona gözlemlenebilir. Korona deşarjının özellikleri elektrot konfigürasyonlarından etkilenir. Tipik konfigürasyonlar Şekil 2.3'te gösterilmektedir ve topraklanmış bir düzlemin, kürenin veya çubuğun üzerine yerleştirilmiş enerji verilmiş bir küre veya çubuktan oluşur [30].



Şekil 2.3. Elektrot konfigürasyonları [30] 1. Küre - Düzlem 2. Küre-Küre 3. Çubuk-Düzlem 4. Çubuk-Çubuk

Yüksek voltaj testleri sırasında, çubuktan düzleme elektrot konfigürasyonu genellikle en uygun konfigürasyondur. Bu konfigürasyon, uçağın yapısındaki yıldırım için potansiyel bağlantı noktalarının daha iyi anlaşılmasını ve analiz edilmesini sağlar.

2.3.1. Korona boşalması

Bir boşluktaki elektrik alanı tekdüze olduğunda ve voltajı arttığında, boşluğun stream şeklinde çökmesine neden olur. Bu stream çökme, yüklü parçacıkların hızlanması ve iyonlaşması nedeniyle meydana gelir ve boşluktan iletken bir yolun oluşmasına neden olur.

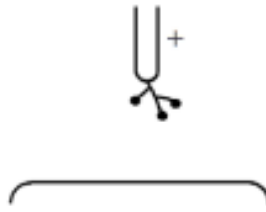
Öte yandan, boşluktaki elektrik alanı tekdüze değilse ve voltaj artmaya başlarsa, gazda yüksek elektrik alan yoğunluğuna sahip noktalarda ortaya çıkan bir boşalmaya neden olur. Bu durumda boşalma, elektrik alanının özellikle güçlü olduğu lokalize bölgelerde meydana gelir ve bu da korona boşalmalarının oluşmasına neden olur. Bu korona boşalmaları, mavimsi parlamalar ve duyulabilir çatırtı sesleri ile karakterize edilebilir.

Özetle, tekdüze bir elektrik alan ve artan voltaj, stream çökmeye yol açarken, tekdüze olmayan bir elektrik alanı ve artan voltaj, korona olarak bilinen lokalize boşalmalara neden olur. [33]

2.3.2. Korona oluşumu

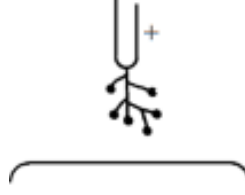
İyonizasyon seviyesinin hemen üzerinde bir darbe gerilimi uygulandığında ne olduğunu kesin bir şekilde izlemek oldukça zordur. Buna rağmen bu eşik değerin altındaki gerilimlerde farklı boşalma adımlarının incelenmesi mümkündür.

Çubuk elektroda pozitif gerilim uygulandığında Şekil 2.4'te gösterildiği gibi dallar oluşur. Bu tür bir boşalma tekdüze bir elektrik alanda meydana gelen stream gibidir.



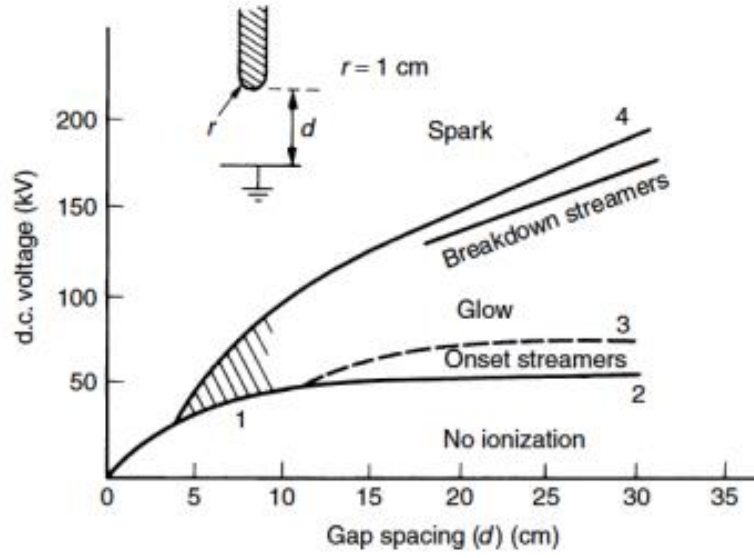
Şekil 2.4. Adım 1 [29]

Darbe gerilimi arttırıldığında Şekil 2.5'te gösterildiği gibi stream hem uzunluk hem de dal sayısı olarak büyür. Çok sayıda dal olmasına rağmen bu dallar birbirlerini kesmezler.



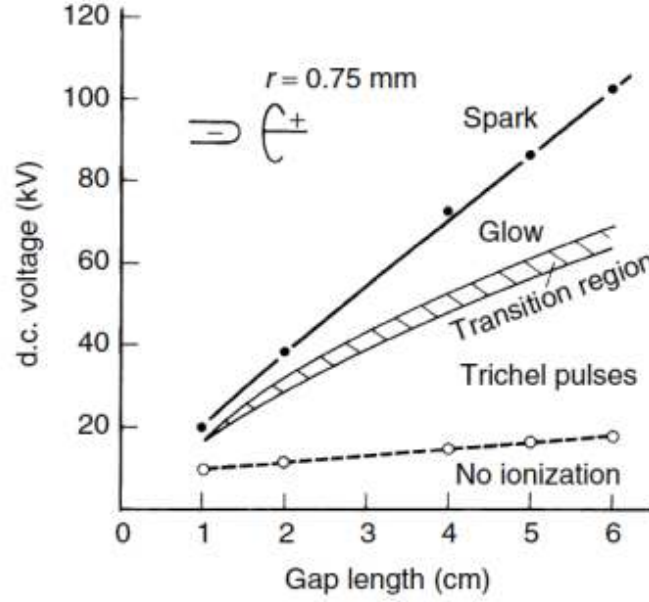
Şekil 2.5. Adım 2 [29]

Şekil 2.6’da 1 cm’lik yarıçapa sahip bir çubuğa çubuk-düzlem konfigürasyonunda pozitif gerilim uygulanması sonucunda elde edilen verileri göstermektedir.



Şekil 2.6. Pozitif korona modları [35] [36]

Şekil 2.7’de ise negatif gerilim uygulanması sonucunda elde edilen veriler gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Negatif korona modları [35] [36]

2.4. Lider

Bir hava boşluğu pozitif veya negatif voltaj darbesine maruz kaldığında, özel kameralar kullanılarak yapılan gözlem, çökmeye yol açan birkaç farklı aşamayı ortaya çıkarır. [29]

Başlangıçta, elektrotun yakınında en yüksek elektrik stresini yaşayan bir korona patlaması olur. Elektrik alan arttıkça, bu korona oluşumu hızla gerçekleşir. Gerilim daha yüksek bir seviyede tutulursa, ilk korona boşalmasından daha yoğun ve lokalize bir stream ortaya çıkar. Streamler, elektronları çubuğun bir uzantısı olarak işlev gören yeterince iletken bir kanal olan lider adı verilen tek bir kanala çeker ve bir elektrik arkına yaklaşan bir elektrik iletkenliğine sahip olabilir. Sonuç olarak, yeterince yüksek gerilim altında, lider hızla ilerler, daha fazla akım taşır ve kendini boşluğun derinliklerine doğru genişletir. Tüm boşluk köprülenene kadar bir dizi atlama yoluyla boşluğu geçer [30].

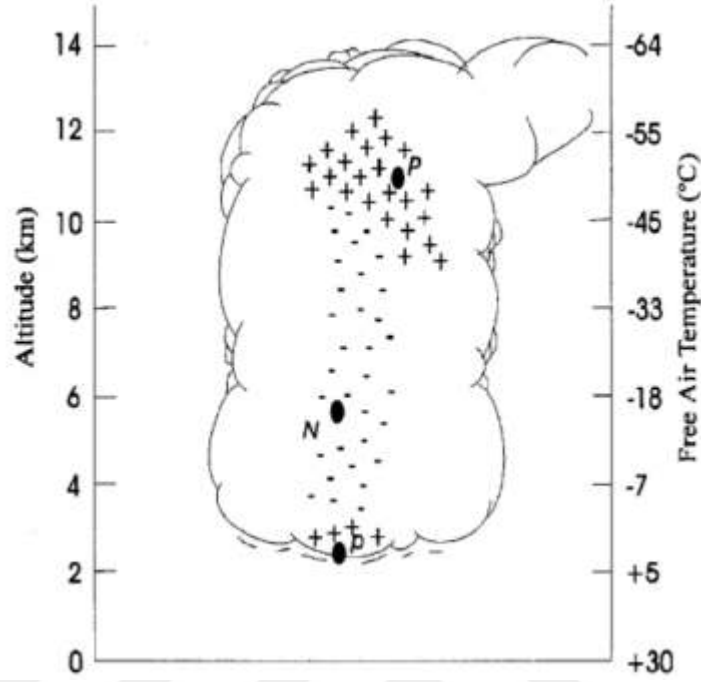
3. YILDIRIM ORTAMI

Yıldırım, atmosferdeki ya da yerdeki iki yüklü bölgenin yüklerinin geçici süreliğine eşitlendiği ve gigajoule seviyelerinde enerjinin ortaya çıktığı doğal bir elektriksel boşalma olayıdır. Bu olay bulut-bulut arasında, bulut-yeryüzü arasında ya da bulutun kendi içerisinde olacak şekilde meydana gelebilir. Bu üç durumda da yıldırımın hava araçları ile etkileşimi söz konusu olabilir. İlerleyen bölümlerde bu etkileşim detaylı olarak anlatılacaktır.

3.1. Yıldırımın Oluşumu

Yıldırımın oluşumu için farkı potansiyele sahip bölgelerin oluşması gerekmektedir. Bu bölgeler arası potansiyel havanın direncini kırarak kadar büyüdüğünde – ki bu direnç nominal koşullarda ve deniz seviyesinde 30 kV/cm'dir, deniz seviyesinden yukarı çıkıldıkça bu seviye düşmektedir – iki bölge arası bir kanal oluşarak bu kanal üzerinden ani bir elektrostatik boşalma meydana gelmektedir.

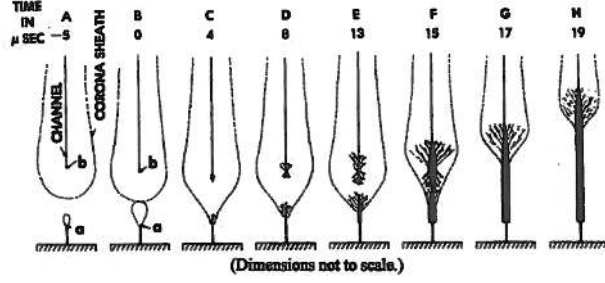
Bulutların elektrifikasyon sürecini aydınlatmak için çok sayıda teori ortaya çıkmıştır ve bunların arasında bir teori, bulutların içindeki elektrik yüklerinin gelişiminin arkasındaki mekanizma hakkında fikir vermektedir. Bu teoriye göre süreç, daha sonra dolu tanelerine dönüşen buz kristallerinin oluşumu ve donmasıyla başlar. Bu dolu taneleri bulutun içinden inerken, aşırı soğumuş su damlacıklarıyla etkileşime girerek ikisinin karışmasına neden olurlar. Bu işlem sırasında dolu tanelerinde küçük kıymıklar koparak pozitif elektrik yüklerini yanlarından uzaklaştırır. Sonuç olarak, dolu taneleri negatif bir elektrik yükü ile yüklenmiş olur. Bu teori, bulutların içindeki elektrik yükünün oluşumunu anlamak için bir çerçeve sağlar [37].



Şekil 3.1. Kümülüs bulutlarındaki yük dağılımının gösterimi [37]

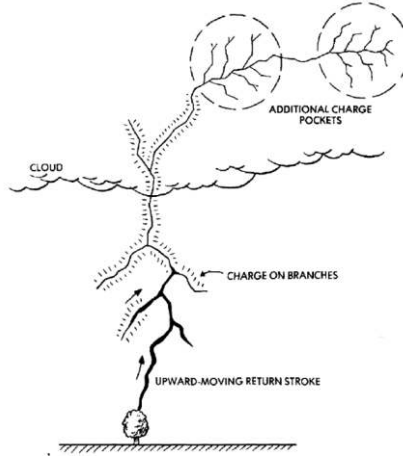
Şekil 3.1 kümülüs bulutlarındaki genel yük dağılımını göstermektedir. Tipik olarak kümülüs bulutlarının üst bölgesi pozitif yük ile yüklenirken, alt kısımları negatif yük ile yüklenir yine de en alt kısımda küçük bir bölge pozitif olarak yüklenmiş olabilir. Burada meydana gelen yük dağılımı farklılıkları potansiyel fark oluşumunun temel sebeplerindendir. Bilindiği üzere potansiyel gradyanları sivri köşelerde daha yoğun olmaktadır. Havanın kırılma direnci aşıldığında ayrı bir boşalma olayı olan mavimsi renkli korona akımları gözlemlenir. Örneğin bu durum uçak kanat ve kuyruk uçlarında görülebilir ki bu tehlikeli bir durumun yaşanmak üzere olduğunun son habercilerinden biri olarak değerlendirilmelidir.

Genel olarak yıldırım flaşı ile ilişkilendirilen ani parlamanın sebebi aslında dönüş darbesi (Return Stroke)'dir. Yıldırım kanalı tutunma bölgesine ulaştığında iki bölge arası potansiyel eşitlenmeye başlar. Bu eşitlenme yerden buluta olacak şekilde ışık hızının yaklaşık 1/3 ile buluta ulaşana kadar devam eder. Şekil 3.2 dönüş darbesinin oluşum aşamalarını göstermektedir.



Şekil 3.2. Dönüş darbesinin oluşum adımları [30]

Buluttan boşalma devam ettikçe birkaç yüz amper seviyesinde akım yıldırım ile akmaya devam eder. Bu akımlara sürekli akımlar denmektedir. Daha sonra dönüş darbesi buluta ulaştığında yer yüzeyine yakın noktalarda, buluta yakın noktalara göre daha şiddetli görünen kol liderleri gözlemlenir. Bu aşamada ara akımlar oluşur. Şekil 3.3 dönüş darbesini ve kol liderlerindeki yükün boşalmasını göstermektedir.

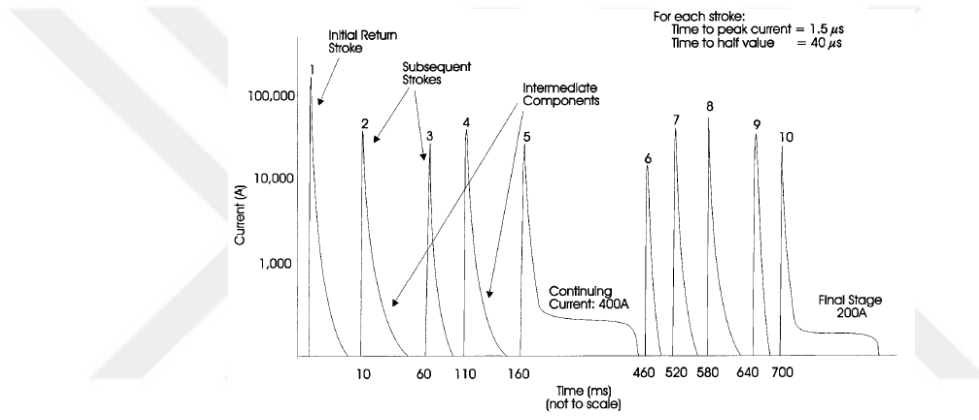


Şekil 3.3. Yıldırım flaşının genel görünümü [30]

3.2. Yıldırım Tipleri

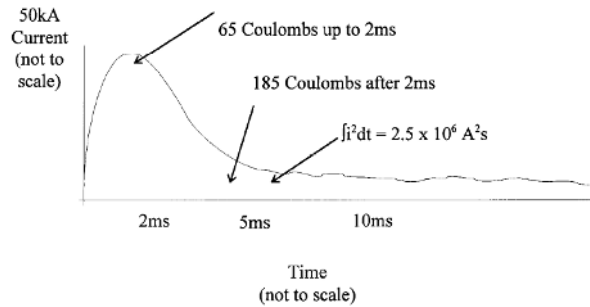
Daha önce söylendiği gibi yıldırımlar; bulut-bulut, bulut içi ya da bulut-yeryüzü arasında oluşabilir ve bir hava aracı bu üç tipte yıldırıma da maruz kalabilir. Bunlara ek olarak yıldırımları polaritelerine göre sınıflamakta mümkündür. Ayrıca bazen liderin yeryüzünden başlayarak gök yüzüne ilerlediği yıldırımlarda oluşabilir.

Çoğu yıldırım darbesi bulutta oluşur ve negatif yükü dünyaya taşır. Bu şekildeki yıldırım darbelerine negatif yıldırım denmektedir. Şekil 3.4 negatif yıldırım akım formunu göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi müteakip darbeler daha düşük genliğe sahip olmakla beraber daha yüksek bir yükselme oranına sahiptirler. Bu özellikleri sayesinde hava aracının kablolarında daha fazla akım indükleyebilirler [38]. Ek olarak birkaç müteakip darbeden sonra görülen bir sürekli akım bileşeni vardır. Bu bileşenin değeri 100 ile 400 A arasındadır ve en yüksek yük transferi burada yapılır. Genellikle tekrar darbesinden önce görülür.



Şekil 3.4. Negatif yıldırım darbesinin dalga formu modeli [30]

Yıldırım darbelerinin yaklaşık %10'u pozitif yönlüdür. Yani negatif yük dünyadan buluta taşınır. Bu tip yıldırımlarda – negatif yönlü yıldırımlardan farklı olarak – genel olarak yavaş yükselen ve uzun süreli tek bir tane yüksek akım darbesi oluşur. Şekil 3.5'de pozitif yıldırım akım formu gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Pozitif yıldırım darbesinin dalga formu modeli [30]

4. HAVA ARAÇLARINA YILDIRIMIN TUTUNMA FENOMENİ

İstatistikler incelendiğinde yolcu uçaklarının yılda 1 ya da 2 kez yıldırım çarpmasına maruz kalması beklenmektedir. Fakat bazı uçaklar daha fazla bu olaya maruz kalırken bazıları ise daha az belki de servis ömürleri boyunca hiç maruz kalmamaktadır. Hava araçlarının uçuş boyunca karşılaştığı diğer tehlikeler ile – örneğin, dolu yağışı, kuş çarpması, türbülans vs. – ile karşılaştırıldığında oldukça düşük olasılıklıdır. Hatta bu düşük riskten dolayı bazı hava araçlarının tasarımı esnasında yıldırıma karşı önlem almak gereksiz olarak değerlendirilir. Fakat uluslararası standartlar bir hava aracının sertifikasyonu için yıldırım koruma önlemlerinin alınmış olmasını zorunlu tutmaktadır.

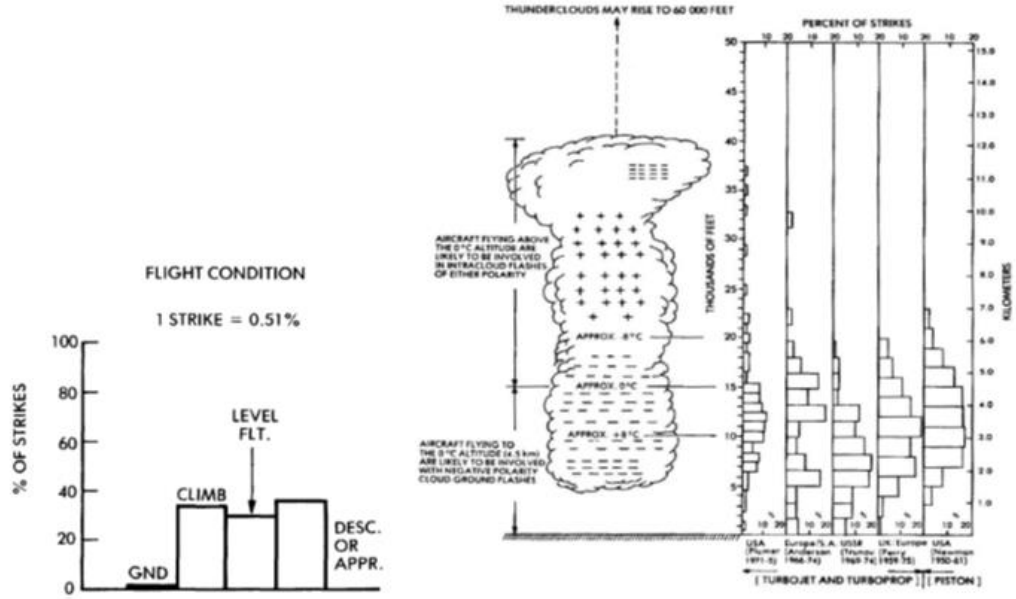
4.1. Yıldırım Çarpması ile İlgili İstatistikler

Hava durumunun bilinmesi yıldırım çarpmasına karşı avantaj sağlayabilmektedir fakat bu durumun tamamen açık bir gökyüzünde bulutlardan uzak bir uçuş anında bile yıldırım çarpma olasılığının tamamen olmadığı söylenemez.

Hava araçlarına yıldırım çarpma verileri uzun yıllar boyunca toplanmış ve aşağıdaki kategorilerde bir araya getirilmiştir.

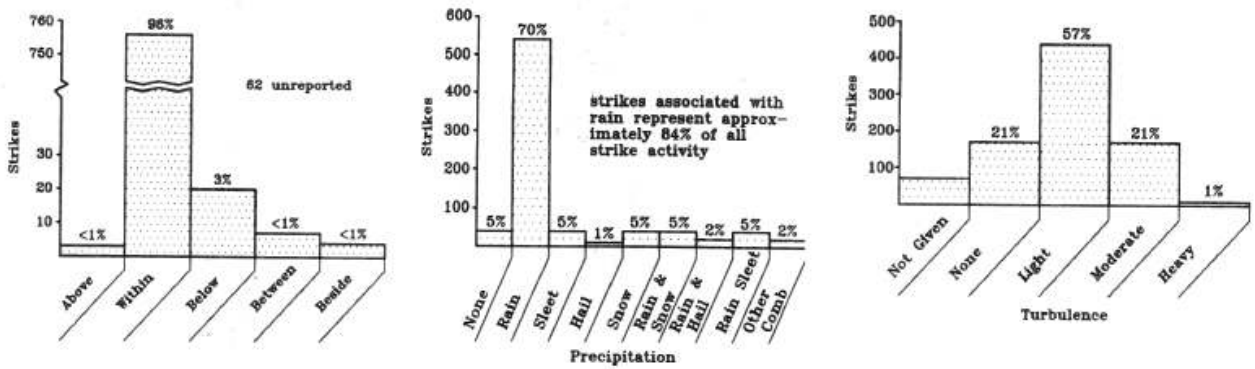
- Yükseklik
- Uçuş yolu: uçuş esnası, yükselme, alçalma
- Meteorolojik koşullar
- Dış ortam sıcaklığı

İlk olarak hava araçların yıldırım çarpmasına maruz kaldıkları yükseklikleri inceleyecek olur isek Şekil 4.1’de de görüldüğü üzere hava araçları yükselme ve alçalma esansında daha fazla yıldırım çarpmasına maruz kalmaktadır. En yoğun yıldırım çarpması görülen yüksekliğin ise yeryüzünden 2 – 4 km olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Hava araçları yıldırım çarpma sayısı-yükseklik kıyaslaması [30][41]

Raporlar ayrıca çoğu yıldırım çarpma olayının $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 'de olduğunu göstermektedir. Şekil 4.2'te 881 adet raporun tasnifi detaylı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde yıldırım çarpma olaylarının, (a) %96'sının $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 'de yaşandığını, (b) %70'inin yağmurlu havada yaşandığını, (c) %57'sinin hafif türbülans şartlarında gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 4.2. Raporlanan 881 yıldırım çarpma olayında yıldırım çarpma sayısı - (a) sıcaklık aralığı, (b) hava durumu, (c) türbülans durumu [30][41]

Yıldırıma karşı alınabilecek en iyi önlemlerden biri mümkün olduğu kadar kaçınmaktır. Örneğin fırtına bulutunun görsel bir belirtisi var ise bundan 25 mil ya da daha fazla uzak durmak, fırtına bulutunun üstünden uçmak gibi önlemler yıldırım çarpma olasılığını oldukça düşürmektedir.

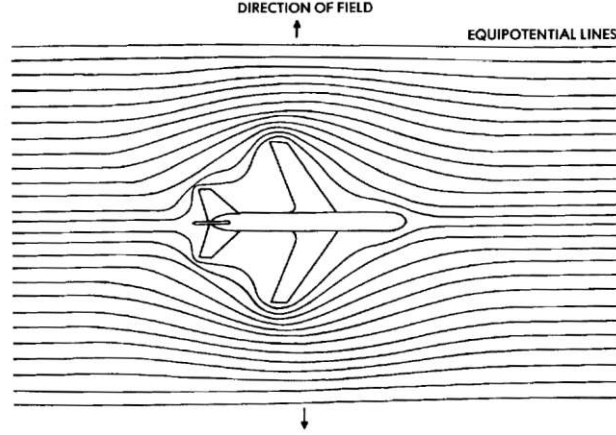
Zaman zaman yıldırım çarpmasını önceden haber veren sistemlerin geliştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bu tür sistemlerin çoğu ortamdaki elektrik alanının algılanması prensibiyle çalışmaktadır, çünkü yıldırım olayı görünmeden hemen önce ortamda yoğun bir elektrik alan oluşmaktadır. Fakat bu sistemlerin hiç biri bir hava aracı üzerinde başarılı bir şekilde test edilmemiştir çünkü yıldırım çarpması görünmeden hemen önce uçak yüzeyi üzerinde oluşan elektrik alanlar çok geniş büyüklük ve yönlerde olabilmektedir.

Belki de en etkili uyarı doğal olarak oluşan statik boşalmaların ve korona akımlarının farkına varmaktır. Örneğin statik boşalma esnasında düşük frekansta çalışan göstergelerde sapma görülebilir ya da radyolarda parazit duyulabilir. Özellikle gece uçuşlarında hava aracının sivri noktalarında yoğun elektrik alandan kaynaklanan mavimsi renkli korona halkaları görülebilir. Bu uyarıları zamanında fark edebilmek yıldırım çarpmasına karşı önlem alabilmek için mürettebata birkaç dakika sağlayabilmektedir.

4.2. Elektrik Alan Etkisi

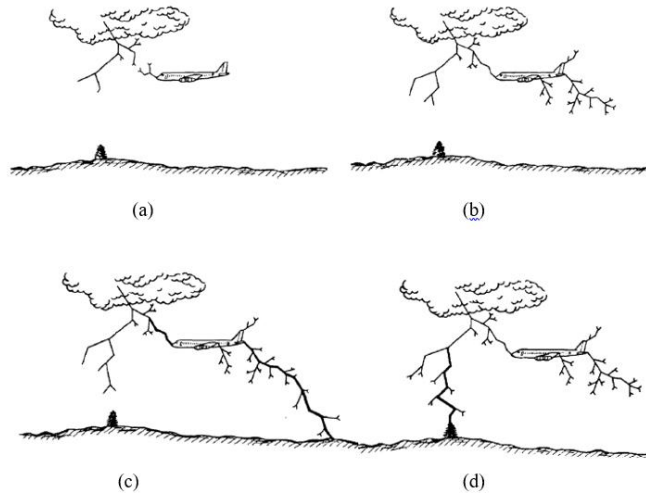
Lider bulutun yük merkezinden çıkıp, zıt yüklü yük merkezine doğru yol alırken gideceği yön henüz tayin edilmemiştir. Farklı dallar ile en düşük dirençli yolu havayı en kolay iyonize edebileceği yolu bulmaya çalışmaktadır. Bu yol alan yoğunluğunun en büyük olduğu yani eş potansiyel çizgilerinin birbirine en yakın olduğu noktalardır. Bu bölgeler havayı iyonize etmek için ve iletken bir kıvılcım oluşturmak için uygundur.

Hava araçları genellikle kalın iletkenlerden yapılmış ve tüm iletkenler eş potansiyele sahip olması üzerine tasarlanmıştır. Bu durum yakın eş potansiyel çizgileri böler ve sıkıştırır böylece elektrik alan yoğunluğunu artırır. Yani hava araçları liderin gideceği yolu etkileyebilir ya da normal şartlarda oluşmayacak bir yıldırımı tetikleyebilir. Daha öncede söylendiği gibi ve Şekil 4.3'te gösterildiği gibi en yüksek elektrik alan hava aracının sivri bölgelerinde oluşmaktadır.



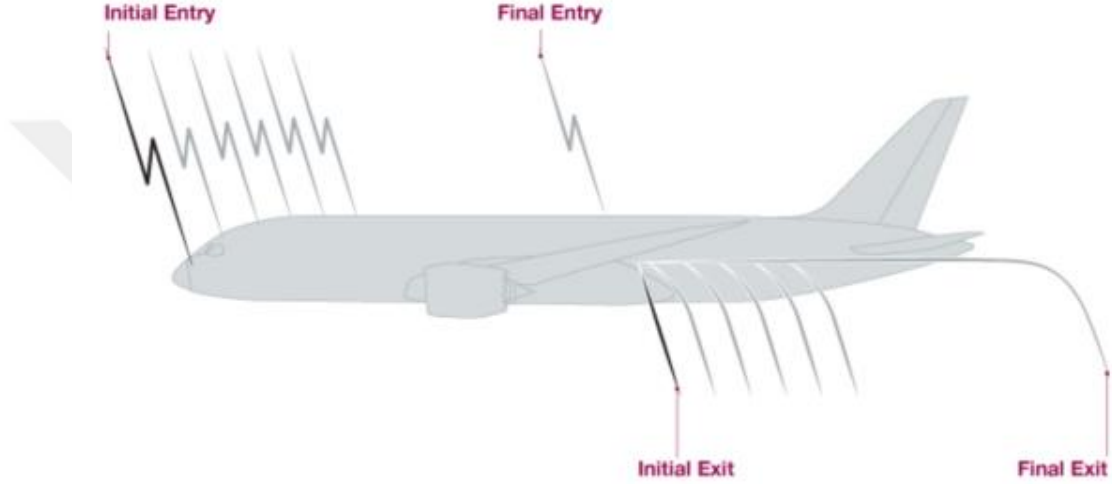
Şekil 4.3. Hava aracı çevresindeki elektrik alan yoğunluğu [30]

Unutulmamalıdır ki hava aracı üzerinde yıldırım liderinin yükünü depolayabilecek her ya da nötrleyebilecek herhangi bir mekanizma yoktur. Bundan dolayı lider dalları hava aracını aşarak nihai hedefi olan zıt yüklü yük merkezine ulaşmak üzere devam eder. Lider zıt yüklü yük merkezine ulaştığında sürekli iyonize iletim kanalı kurulmuş olur ve yüksek genlikli dönüş darbesi gerçekleşir. Eğer hava aracının dahil olmadığı herhangi bir lider dalı, hava aracının dahil olduğu daldan önce zıt yük merkezine ulaşırsa diğer tüm dallar yüklerini lidere aktaracağı için hava aracı dönüş darbesine maruz kalmamış olacaktır. Şekil 4.4 bir liderin oluşumunu ve hava aracı ile etkileşimini göstermektedir.



Şekil 4.4. (a) Lider uçağa yaklaşıyor (b) lider uçağa tutunuyor ve yayılmaya devam ediyor (c) darbe uçağın üzerinden geçiyor (d) darbe uçağın üzerinden geçmiyor [30]

Ek olarak uçak tarafından tetiklenen yıldırımların yalnızca uçağın varlığından kaynaklandığını ve başka türlü oluşamayacağını belirtmek gerekir. Uçak yıldırım tarafından çarpıldığında, akım kanaldan akar. Kanal orijinal konumunda kalır fakat hava aracının hızından dolayı flaş ömrü boyunca önemli bir mesafe ilerleyebilir. Bu fenomene süpürülmüş kanal süreci (swept-channel process) denir ve Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Uçak üzerindeki süpürülmüş kanal tutunma noktalarının tipik gösterimi [39]

Bir yüzeyin özellikleri, yıldırım kanalının farklı konumlardaki bağlanmasını ve bağlanma süresini etkileyebilir. Bu fenomen, bağlanma noktaları olarak bilinen, süpürme yolu boyunca bir dizi ardışık yıldırım bağlantı noktasına yol açar. Yıldırım tarafından her bir bekleme noktasına verilen hasarın boyutu, o bölgedeki malzemenin özelliklerine bağlı olarak değişir. [40]

4.3. Uçak Üzerindeki Tutunma Bölgelerinin Tanımlanması

Hava aracı yüzeyinin farklı bölgeleri yıldırım darbesinin farklı komponentlerine maruz kalmakta bundan dolayı farklı tip ve derecede etkilere karşı dayanmak zorundadır. Bu komponentler ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde anlatılacaktır. Yukarıda bahsedilen farklı etkilerden dolayı hava araçlarının tasarımını yapılırken aracı bölgelere bölerek her bölge için ayrı ayrı yıldırım önlemleri almak gerekmektedir. Ek olarak yıldırım olayı esnasında hava aracı hareket halinde olduğundan dolayı yıldırım liderinin ilk tutunma noktası hava aracı üzerinde

ilerlemektedir bu ve bunun gibi etkiler dikkate alınarak yıldırım bölgelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu bölgelerin detayları ve bölgelerin nasıl belirleneceği SAE ARP5414B “Aircraft Lightning Zone” dokümanında detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

Kısaca yıldırım bölgelerini özetlemek gerekirse:

- Bölge (Zone) 1A – İlk Dönüş Darbe Bölgesi (First Return Stroke Zone)
Yıldırım kanalı tutunması sırasında ilk geri dönüş darbesinin görülme ihtimalinin yüksek fakat uzun tutunma görülme ihtimalinin düşük olduğu bölgelerdir.
- Bölge (Zone) 1B – Uzun Tutunma Görülen İlk Dönüş Darbe Bölgesi (First Return Stroke Zone with Long Hang-on)
Yıldırım kanalı tutunması sırasında ilk geri dönüş darbesinin görülme ihtimalinin yüksek aynı zamanda uzun tutunma görülme ihtimalinin de yüksek olduğu bölgelerdir.
- Bölge (Zone) 1C – İlk Dönüş Darbesi için Geçiş Bölgesi (Transition Zone for First Return Stroke)
Yıldırım kanalı tutunması sırasında düşük genlikli ilk geri dönüş darbesinin görülme ihtimalinin yüksek fakat uzun tutunma görülme ihtimalinin düşük olduğu bölgelerdir.
- Bölge (Zone) 2A – Süpürülmüş Darbe Bölgesi (Swept Stroke Zone)
Yıldırım kanalı tutunması sırasında müteakip dönüş darbelerinin sürüklenme ihtimalinin yüksek, uzun tutunma ihtimalinin ise az olduğu bölgelerdir.
- Bölge (Zone) 2B – Uzun Tutunma Görülen Süpürülmüş Darbe Bölgesi (Swept Stroke Zone with Long Hang-on)
Yıldırım kanalı tutunması sırasında müteakip dönüş darbelerinin sürüklenme ihtimalinin yüksek aynı zamanda uzun tutunma ihtimalinin de yüksek olduğu bölgelerdir.
- Bölge (Zone) 3
Zone 1A, 1B, 1C, 2A ve 2B dışında ve bu bölgelerin arasında kalan kısımlardır. Bu bölgeye yıldırım tutunmama olasılığı düşüktür.

5. HAVA ARAÇLARI İÇİN TANIMLANMIŞ YILDIRIM ORTAMI

Hava araçları yıldırımdan koruma standartları, yıldırı hakkında edinilen bilgiler ve hava araçlarında kullanılan malzemelerin zaman içerisinde değişimi ile ciddi değişiklikler geçirmiştir. Özellikle Amerikan havacılık otoritesi FAA hava araçlarının uyum gösterimlerini düzenlemek için Advisory Circular (AC) yayınlarak bir hava aracını sertifikaya etmek için gerekli kuralları ortaya koymaktadır. Özellikle bu düzenlemeler tarihsel olarak kritik ve temel fonksiyonlarla ilgilenmektedir.

Kritik fonksiyonlar hava aracının güvenli uçuşu ve inişi için gerekli olan, temel fonksiyonlar ise iletişim, navigasyon gibi kaybı tehlike oluşturacak fakat hava aracının direkt kaybına yol açmayan fonksiyonlar olarak tanımlanmıştır.

FAA'e ek olarak farklı ülkelerin havacılık otoriteleri de farklı standartlar yayınlarak sertifikasyon süreçlerini tanımlamıştır. Örneğin EASA, JAA vs. Fakat bu otoritelerin yayınladıkları dokümanlar daha çok kurallar kitabı gibi düşünülebilir. Bir tasarımı doğrulamak, test ortamını tanımlamak, yıldırım ortamını standart hale getirmek, yapılacak test prosedürlerini vs. belirleyip bir standart sağlamak için ise SAE ve EUROCAE gibi komiteler kurulmuş bu komiteler direkt ve dolaylı yıldırım ortamını ve test prosedürlerini tanımlamıştır. Bunu başarabilmek için standart dalga formları tanımlanmıştır. Bu dalga formlarının yıldırımı taklit etmekten çok hava aracı üzerinde yıldırım ile aynı etkiyi oluşturması gerektiğini hatırlatmak gerekir. Ayrıca bu dalga formları Gerilim Dalga Formları ve Akım Dalga Formlarını içerir.

5.1. Direkt Yıldırım Ortamı – Gerilim Komponentleri

Gerilim dalga formları [42]'da sunulmuştur. Bu dalga biçimleri uçağa yıldırım çarpmadan hemen önce uçağı çevreleyen elektrik alanı temsil eder. Bu dalga formları ve özellikler aşağıda özetlenmiştir.

- **Gerilim Dalga Formu A:** test edilen nesne ile elektrot arasındaki boşlukta çökme oluşana kadar $1000\text{kV}/\mu\text{s}$ ($\pm\%50$) ile gerilim yükselir. Çökme oluştuğu anda gerilim sıfıra düşer. Eğer çökme oluşmaz ise, gerilimin azalma süresi belirtilmez.

- **Gerilim Dalga Formu B:** darbe dielektrik testleri için elektrik endüstrisinde kullanılan standart dalga formudur. $1.2\mu s$ ($\pm\%20$) içinde zirveye yükselir ve $50\mu s$ ($\pm\%20$) içinde tepe genliğinin yarısına düşer.
- **Gerilim Dalga Formu C:** çökmenin $2\mu s$ 'de ($\pm\%50$) meydana geldiği kesilmiş bir voltaj dalga formudur. Genlik değeri ve yükselme hızı belirtilmemiştir.
- **Gerilim Dalga Formu D:** $50\mu s$ ile $250\mu s$ arasında değişen yükselme süresi sebebi ile yavaş bir dalga formudur.

5.2. Direkt Yıldırım Ortamı – Akım Komponentleri

SAE/EUROCAE tasarım ve test amacıyla, hava araçlarının üzerine yerleştirilmiş sensörler ile yıldırım çarpması anında oluşan elektriksel parametrelerden elde edilmiş doğal verilerden sentezleyerek standart yıldırım ortamını geliştirmiştir. Unutulmamalıdır ki hiçbir yıldırım birbirinin aynısı değildir ve aynı parametrelere sahip olması beklenemez. Bundan dolayı standart dalga formları oluşturulmuştur. SAE'nin geliştirdiği standartta Komponent A, B, C ve D olmak üzere dört akım bileşeninden oluşan yıldırım darbelerinden oluşan bir dizi test içermektedir.

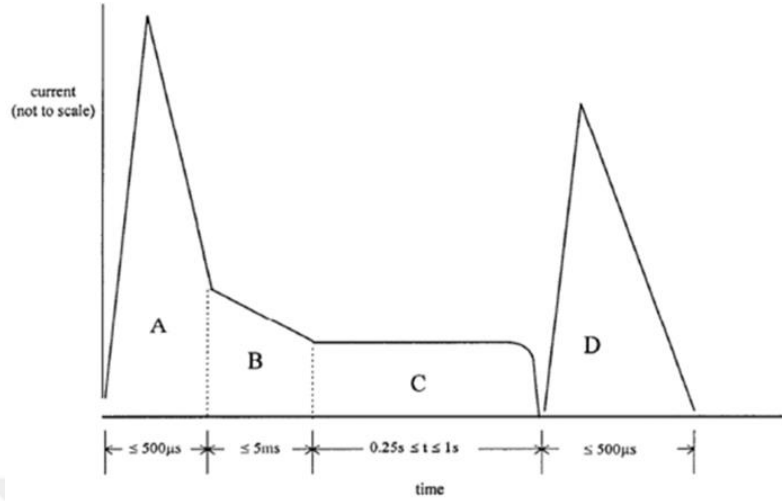
Şekil 5.1 Akım Komponenti A'dan D'ye kadar olan dalga formlarının sürelerini ve sahip olması gereken özellikleri göstermektedir.

Ayrıca bu akım darbeleri matematiksel olarak çift üstel fonksiyonlar ile tanımlanabilir. (5.1)'de bu matematiksel ifade verilmiştir. Tablo 5.1'de ise tüm dalga formları için gerekli olan parametreler verilmiştir.

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (5.1)$$

Tablo 5.1. İdeal akım komponentleri ve alakalı parametreler [42]

Parametre	Akım Komponentleri						
	A	A_h	B	C	D	D/2	H
I_0 (A)	218810	164903	11300	400	109405	54703	10572
α	11354	16065	700	X	22708	22708	187191
β	647265	858888	2000	X	1294530	1294530	19105100
I_{max} (A)	200000	150000	4173	400	100.000	50000	10000
di/dt_{max} (A/s)	1.4e11	1.4e11	X	X	1.4e11	0.7e11	2.0e11
Aksiyon İntegrali (A^2s)	2.0e6	0.8e6	X	X	0.25e6	0.0625e6	X



COMPONENT A (First Return Stroke)

Peak Amplitude	: 200kA ($\pm 10\%$)
Action Integral	: $2 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ ($\pm 20\%$) (in 500μs)
Time Duration	: $\leq 500\mu\text{s}$

COMPONENT B (Intermediate Current)

Max. Charge Transfer	: 10 Coulombs ($\pm 10\%$)
Average Amplitude	: 2kA ($\pm 20\%$)
Time Duration	: $\leq 5\text{ms}$

COMPONENT C (Continuing Current)

Amplitude	: 200 - 800A
Charge Transfer	: 200 Coulombs ($\pm 20\%$)
Time Duration	: 0.25 to 1 s

COMPONENT D (Subsequent Return Stroke)

Peak Amplitude	: 100kA ($\pm 10\%$)
Action Integral	: $0.25 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ ($\pm 20\%$) (in 500μs)
Time Duration	: $\leq 500\mu\text{s}$

Şekil 5.1. Direkt etki testi için yıldırım ortamı [42]

Daha önce bahsedildiği üzere oluşan yıldırımların %90 negatif polariteli, %10'u ise pozitif polaritelidir. Komponent A hem pozitif hem de negatif polariteli yıldırım darbelerinin bir sentezinden oluşmuştur. Buna göre Komponent A'nın maksimum akımı 200 kA, aksiyon integrali ise $2 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ olmalıdır.

Not olarak belirtmek gerekir ki pozitif polariteli yıldırım darbelerinin yarısı, yani oluşan yıldırımların %5'i, $15 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ gibi çok yüksek aksiyon integraline sahiptir. Fakat standart oluşma sıklığını göz önünde bulundurarak bu yüksek aksiyon integralini dikkate almamaktadır.

Yukarıda bahsi geçen aksiyon integrali standart dalga formlarının çok önemli bir parçasıdır. Bir akım darbesinin aksiyon integrali, akımın dirençli bir nesnede enerji biriktirme yeteneğini temsil etmektedir. Birimi A^2s olduğu gibi J/Ω olarakta ifade edilebilir. Dalga formu

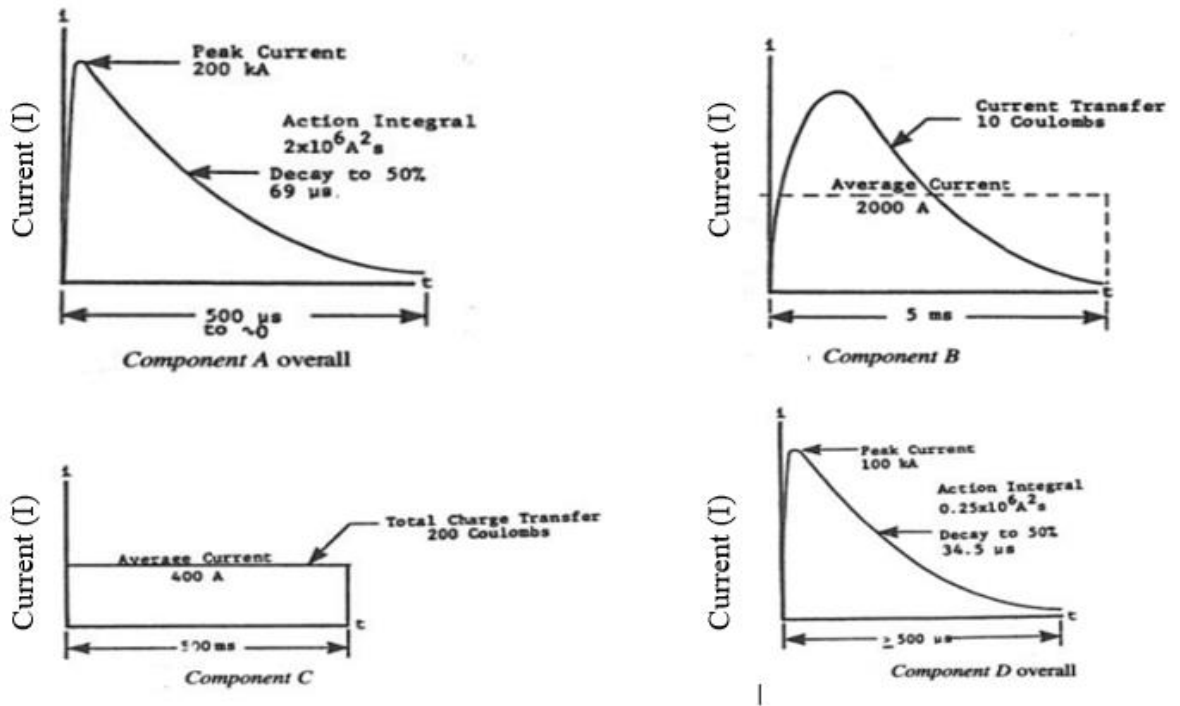
$i(t)$ fonksiyonu tarafından verilen bir yıldırım darbesi sonucu, ohm başına ısıya dönüştürülen toplam enerji

$$AI = \int_{t_0}^t i^2(t) dt \text{ A}^2\text{s} \quad (5.2)$$

formülü ile hesaplanmaktadır.

Komponent A, B, C, D bulut-yer arası yıldırımlardan, Komponent H ise bulut için yıldırımlardan türetilmiştir. Tüm bu komponentler birlikte direkt yıldırım akım ortamını oluşturmakta ve doğal yıldırımın darbesinin önemli özelliklerini simüle etmektedir. Fakat daha öncede söylendiği gibi tüm komponentlerin, hava aracının her yüzeyinde görülmesi gerekmemektedir.

Komponent A, B, D ve H çift üstel fonksiyonlar ile Komponent C ise dikdörtgen akım darbesi ile tanımlanabilir. Komponent A ilk dönüş darbesini, Komponent B ara akımları, Komponent D tekrar darbelerini ve Komponent C ise sürekli akımları simüle eder. Ayrıca Komponent C yıldırım darbesinin en fazla yük transfer eden komponentidir. Şekil 5.2’da akım formlarının detaylı özellikleri verilmiştir.



Şekil 5.2. Akım komponentlerinin detaylı özellikleri [42]

Hava aracı üzerindeki farklı bölgelerde görülen dalga formları aşağıda Tablo 5.2’de özetlenmiştir.

Tablo 5.2. Yıldırım dalga formlarının uçak üzerindeki görülme bölgeleri [42]

Uçak Bölgesi	Gerilim Dalga Formları				Akım Dalga Formları						
	A	B	C	D	A	A_h	B	C	D	D/2	H
1A	X	X		X	X		X			X	X
1B	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X
1C	X					X	X		X	X	X
2A	X						X		X	X	X
2B	X		X				X	X	X	X	X
3	X		X		X		X	X	X	X	X

5.3. Dolaylı Yıldırım Ortamı

Yıldırım darbesi hava aracının kabloları ile doğrudan temas etmese bile, yıldırım akımı uçak gövdesi üzerinde akarken manyetik alanlar oluşturur, oluşan bu manyetik alanlar kablolar üzerinde akım/gerilim indükler. Bu girişim cihazların bozulmasına ya da fonksiyonel arızalara sebep olabilir.

Bu etkilere yıldırımın dolaylı etkileri denir ve direkt yıldırım etkileri ile birlikte dikkate alınması gerekmektedir. Dolaylı etkiler geçmişte çok dikkate alınan ve majör güvenlik tehlikeleri meydana getirebileceği düşünülmeyen etkiler iken günümüzde; hava araçlarında kompozit kullanımının artması, solid-state elektroniklerin yaygınlaşması ve kritik uçuş fonksiyonlarında elektronik cihazların daha çok kullanıma başlaması ile dolaylı etkilerinde en az direkt etkiler kadar kritik hatalar meydana getirilebileceği düşünülmekte ve artık hava araçlarının sertifikasyon sürecinin daha sıkı denetlenen bir parçasıdır.

RTCA DO-160G [7], 22. Bölümü, hasar direnci ve işlevsel arıza testleri aracılığıyla dolaylı yıldırım ortamının kapsamlı bir tanımı yer alır. Bu testler, ekipmanın amaçlanan ortamda çeşitli yıldırım çarpmalarına dayanabilmesini sağlamada kritik öneme sahiptir. Bunu başarmak için standart iki test sağlamaktadır: "Pin Enjeksiyonu" ve "Kablo Demeti" testi. İlk test, ekipmanın hasar direncini test ederken, ikincisi işlevsel arızasını test eder. Ekipmanı bu testlere

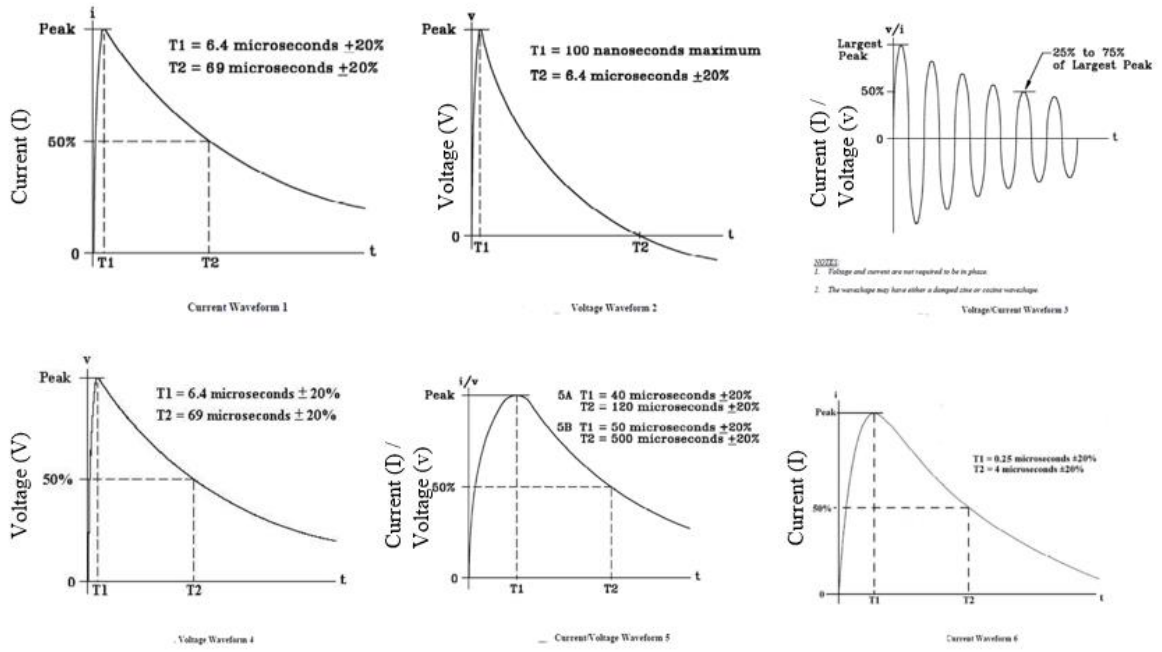
tabi tutarak, güvenle amaçlandığı gibi çalışacağı ve bir yıldırım çarpmasından sonra bile çalışır durumda kalacağı sonucuna varabiliriz.

Hasar direnci testleri sırasında, sinyallerin seviyesi ve dalga biçimi dikkatlice ölçülür ve ardından doğrudan Test Altındaki Cihaz (TAC) konnektöründeki belirlenmiş pime uygulanır. Bu yöntem, ekipmanın potansiyel hasara dayanmasını ve düzgün çalışmaya devam etmesini sağlayan testin çok önemli bir yönü olan ekipman ara yüzlerinin hasar direnci toleransını ortaya çıkarır. [7]

Test ve analizlerle elde edilen seviyeler işlevsel arıza testi için bir indüksiyon probu kullanılarak kablo demetine uygulanır. Bu testler, ekipmanın harici yıldırım tarafından oluşturulan elektromanyetik (EM) ortama karşı direncini kapsamlı bir şekilde değerlendirir ve kaydeder. Bu bilgiler, ekipmanın maruz kalabileceği zorlu koşullara dayanabilmesini ve çeşitli koşullar altında en iyi şekilde çalışmaya devam etmesini sağlamada kritik öneme sahiptir. [7]

Doğrudan yıldırım dalga formlarından türetilen standart dalga formları, çeşitli test seviyelerini ve gereksinimlerini karşılamak için kullanılır. Bu dalga biçimleri, deneysel olarak gözlemlenen ve daha sonra standardize edilen yıldırımın uçağa olan dolaylı etkileri temel alınarak oluşturulmuştur. Standart dalga biçimleri, uçağın uçuş sırasında yıldırım çarpmalarının ve diğer elektriksel bozulmaların etkilerine dayanabilmesini sağlamada kritik öneme sahiptir.

Direkt etki testlerinde olduğu gibi dolaylı etki testlerinde de tanımlanmış dalga formları vardır. Bu dalga formları ve özellikleri Şekil 5.3’de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Dolaylı etkiler için standart dalga formları [7]

Waveform Set	Test Type	Test Levels	Test Waveform Nos.
C (unshielded, aperture coupling)	Single Stroke	Table 22-3	2, 3
D (unshielded, aperture and resistance coupling)	Single Stroke	Table 22-3	2, 3, 4
E (shielded aperture coupling)	Single Stroke	Table 22-3	1, 3
F (shielded, aperture and resistance coupling)	Single Stroke	Table 22-3	3, 5A
G (unshielded, aperture coupling)	Single Stroke	Table 22-3	2, 3
	Multiple Stroke	Table 22-4	2, 3
H (unshielded, aperture and resistance coupling)	Single Stroke	Table 22-3	2, 3, 4
	Multiple Stroke	Table 22-4	2, 3, 4
J (shielded, aperture coupling)	Single Stroke	Table 22-3	1, 3
	Multiple Stroke	Table 22-4	1, 3
K (shielded, aperture and resistance coupling)	Single Stroke	Table 22-3	3, 5A
	Multiple Stroke	Table 22-4	3, 5A
L	Multiple Burst	Table 22-5	3
M	Multiple Burst	Table 22-5	6

Level	Waveforms				
	2/1	2/1	3/3	4/1 ^{Note 3}	4/5A
	V_I/I_T	V_T/I_L	V_T/I_L	V_T/I_L	V_I/I_T
1	50/100	50/100	100/20	50/100	50/150
2	125/250	125/250	250/50	125/250	125/400
3	300/600	300/600	600/120	300/600	300/1000
4	750/1500	750/1500	1500/300	750/1500	750/2000
5	1600/3200	1600/3200	3200/640	1600/3200	1600/5000

Şekil 5.4. Cable bundle testleri için kullanılacak dalga formları ve single stroke test seviyeleri [7]

Hangi dalga formunun hangi seviyede uygulanacağı yine standartta belirtilmiştir. Şekil 5.4’de Cable Bundle testleri için kullanılacak dalga formları ve seviyeleri verilmiştir.

Bu çalışmada Şekil 5.4’de verilen Dalga Formu Setlerinden “J” seti kullanılacaktır. Kalkanlı kablolar için standardın önerdiği set “J” setidir. Ayrıca deneysel çalışmalarda “Single Stroke” testleri uygulanacaktır. Böylece direkt olarak çalışmanın amacına ulaşılacaktır.

Yukarıdaki açıklama göze alındığında testler için kullanılacak dalga formlarının 1 ve 3 olduğu görülmektedir. Dalga formu 1 akım dalga formudur. Dalga formu 3 ise voltaj dalga formudur. Kalkanlı kablolar üzerinde akım dalga formlarının etkisi voltaj dalga formlarının etkisinden daha fazla olduğu için bu çalışmada gerçekleştirilen testler “Dalga formu 1” ile yapılacaktır. Yine şekilde görüleceği üzere 1’den 5’e kadar seviyeler mevcuttur. Bu seviyelerde “Level 1” uçak üzerinde açıklıklardan uzak, elektromanyetik alanlara karşı en korunaklı bölge olarak değerlendirilirken, “Level 5” herhangi bir korumanın bulunmadığı dış ortam olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada, açıklıklardan veya endüktif bağlanmadan kaynaklanan girişime duyarlılığı nedeniyle Akım Dalga Biçimi 1 (WF1), Seviye 1’i kullanmayı seçtik. WF1, doğrudan yıldırım etkileri testlerinde kullanılan Komponent A’ya benzer fakat daha düşük seviyeli bir akım dalga biçimidir.

Ayrıca Seviye 1 kullanımının bu çalışma için yeterli olduğu değerlendirilmektedir çünkü bu çalışmada kalkan sonlandırma metodlarının birbirlerine göre göreceli karşılaştırılması yapılacağı için uygulanan seviyeden bağımsız olarak gösterdikleri başarımlar değerlendirilecektir.

6. YILDIRIMIN UÇAK ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Motorlu uçuşların güvenliği, yıldırım çarpmalarının uçaklar üzerindeki etkileri üzerine yapılan araştırmalarla daha da artırılmaya çalışılmıştır. Uçakların, yıldırım çarpmalarına dayanıklı hale getirilmesi için çeşitli önlemler alınmıştır. Yıldırım çarpmalarının uçaklarda yarattığı hasarlar, kablolarda patlamalar, yakıt tanklarının tutuşması ve pilotların yanıklar yaşaması gibi problemlerdir.

Bu sorunların çözümü için 1938 yılında Ulusal Havacılık Danışma Komitesi (NACA) tarafından Uçak Güvenliği, Hava Durumu ve Yıldırım Uzmanları Alt Komitesi kurulmuştur. Ayrıca diğer kuruluşlar da yıldırımın uçak üzerindeki etkisini araştırmaya başlamıştır. Sertifikasyon kuruluşları, yıldırımın uçak üzerindeki genel etkilerini üç ana kategoride sınıflandırmıştır: Direkt Yıldırım Etkileri (LDE), Yıldırımın Dolaylı Etkileri (LIE) ve Yakıt Sistemi Üzerindeki Etkiler.

Doğrudan Yıldırım Etkileri, yıldırım bağlantı noktalarına daha yakın yerlerde veya yıldırımın giriş veya çıkış noktaları arasındaki yıldırım akımı yolları boyunca yer alan yapılar veya yakıt depoları içinde meydana gelme eğilimindedir. Dolaylı Etkiler ise, hava aracının elektrik kablolarında kendini gösterir ve yıldırım bağlantı noktalarından uzaktaki ekipman konumlarında bile hava aracının herhangi bir yerinde meydana gelebilir.

Uçaklardaki iki tasarım eğilimi, yıldırım etkilerinden kaynaklanan sorunları şiddetlendirebilir. İlk olarak, solid-state devrelerin uçak elektroniği ve elektrik güç sistemlerinde artan kullanımı, daha verimli ve daha hafif olmakla birlikte, onları dolaylı etkilerden kaynaklanan aşırı gerilime doğal olarak daha duyarlı hale getirir. İkincisi, alüminyum kaplamalar yerine güçlendirilmiş plastik ve iletken olmayan malzemelerin artan kullanımı, elektromanyetik korumayı azaltır ve kablolamada indüklenen dalgalanmaların seviyesini yükseltir.

Günümüzde yıldırım çarpmasını önleyebilecek bir sistem olmadığı için yıldırım çarpmasından korunmak yerine bunun zararlı etkileri azaltılmaya çalışılmaktadır. Yıldırımın uçak üzerindeki en önemli doğrudan etkilerinden biri erime, yanma, buharlaşma veya delinme gibi yapısal hasardır. 30.000 Kelvin sıcaklığa ve 10 ile 15 atm basınca ulaşabilen yıldırım kanalının uçağa tutunması bu hasarların temel sebebidir. Yıldırım çarpmaları, kanatlar, gövde ve kuyruk dahil olmak üzere uçağın dışına zarar verebilir.

Uçak üreticileri, uçaklarının yıldırım çarpmalarına ve bunlarla ilişkili etkilere dayanabileceğini doğrulamak için sıkı testler gerçekleştirir. Bu testler, kanatlar ve antenler gibi hava taşıtı bileşenlerine, yıldırım çarpmalarıyla ilişkili koşullara dayanabilmelerini sağlamak için yıldırım çarpmalarının simule edilmesini içerebilir. Ancak yıldırım hasarını önlemek yeterli değildir. Risklerin farkında olmak ve bir acil durum planına sahip olmak da gereklidir.

Örneğin pilotlar, şimşek çakmalarının en yaygın nedeni olan gök gürültülü fırtınaları tanıyacak ve bunlardan kaçınacak ve gerçek zamanlı hava durumu bilgilerine erişebilecek şekilde eğitilmelidir. Bir uçağa yıldırım düşmesi durumunda, mürettebat, yolcuların ve uçağın güvenliğini sağlamak için belirlenmiş prosedürleri takip etmelidir. Bu adımları atarak yıldırımın havacılık endüstrisi üzerindeki etkisini azaltabilir, yolcuların ve mürettebatın güvenliği sağlanabilir.

Özetle, uçaklar açısından yıldırım çarpmaları önemli bir güvenlik sorunudur. Ancak, yıldırımın etkileriyle başa çıkmak için çeşitli önlemler alınmıştır. Yıldırım hasarını azaltmak için uçak üreticileri, sıkı testler gerçekleştirir ve risklerin farkında olmak için acil durum planları hazırlarlar. Bu önlemler sayesinde yıldırımın etkileri azaltılır, yolcuların ve mürettebatın güvenliği sağlanır.

6.1. Yıldırımın Direkt Etkileri (LDE)

Bir hava aracına yıldırım çarpması esnasında, yıldırım genel olarak uçağın burnu, kanat uçları, yatay ve dikey dengeleyicileri, pervanesi veya anten gibi çıkıntılara tutunur. Bu noktalar yıldırım kanalı için doğrudan bağlantı konumlarını oluşturur. Yıldırımın doğrudan etkileri tutunma noktasında delinmeler, hareketleri yapıların kaynaması veya metalik olmayan yapıların parçalanması gibi çeşitli fiziksel hasar çeşitlerini kapsar. [30]

Uçak komponentlerinin yıldırım etkilerine karşı duyarlılığı, uçak içerisinde bulundukları konumlar ile doğrudan ilişkilidir. Daha önce verilen uçak üzerindeki yıldırım bölgeleri kullanılarak bu duyarlılık belirlenebilir. Direkt etkilere karşı öncelikle aşağıdaki önlemler dikkate alınmalıdır:

- Genel olarak kabloların direkt yıldırıma maruz kalmasından kaçınılmalıdır. Ancak bu tür bir önlemin mümkün olmadığı durumlarda kablolar uygun bir şekilde korunmalıdır. Bu tür bir koruma kabloların, uygun mekanik ve elektriksel özelliklere sahip iletken bir kalkan ile çevrelenmesidir. Bu uygulama ek bir

koruma kalkanı sağlayarak yıldırımın kablolar üzerindeki potansiyel etkisinin azaltılmasına yardımcı olur.

- Hava aracının yüzeyleri ve bileşenleri arasındaki ara yüzler, yıkıcı etkilere neden olmadan yıldırım akımının iletebilme kabiliyetine sahip olmalı.
- Tüm yapılar ve bileşenler arasında uygun iletken yollar tanımlanmış olmalıdır.
- İçerisinde yanıcı sıvı ve/veya gaz bulunan komponentler yıldırım etkisine maruz kalmayacak şekilde tasarlanmalıdır.

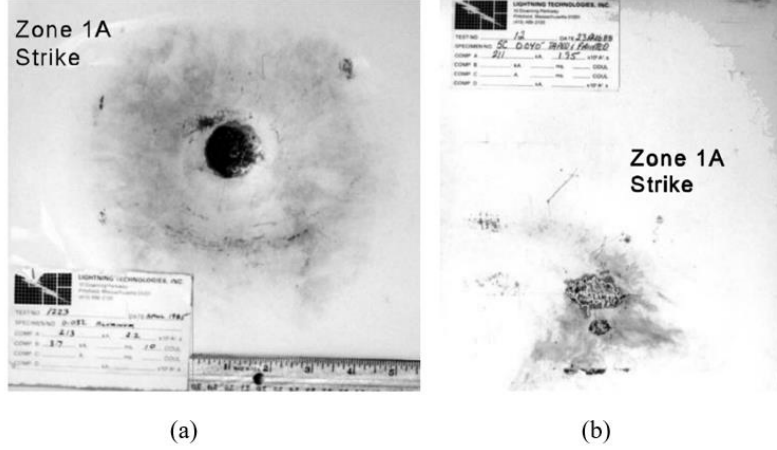
6.1.1. Uçak yüzeyi üzerindeki direkt etkiler

Bir uçak, dış yüzeyi ve rib, spar, bulkhead'lerden oluşan iç yapısı olmak üzere iki kısım olarak tanımlanabilir. Bu yapılar yıldırım akımının, giriş ve çıkış noktaları arasında akmasına ve ayrıca tutunma noktaları arasında etkili bir şekilde dağıtılmasına izin verir. Bu yapıların çoğu metal ya da iletken kompozitlerden yapılmış iletken materyallerdir. Bu sayede yıldırım akımı için iletken yolun parçası haline gelirler ve uçağı etkin bir iletken yaparlar. Tek bir noktada meydana gelen akım yoğunluğu fazla olmasına rağmen, nadiren yapısal hasara yol açar. Yapısal hasara yol açan temel faktör yapısal elemanlar arasındaki kötü elektriksel bağlantılardır.

Hem metalik hem de kompozit yüzeylere zarar veren etkiler şu şekilde ele alınabilir:

- Yıldırım tutunma noktalarında erime veya yanmalar meydana gelebilir. Genellikle erime veya yanma 1 mm ve daha ince yapılarda meydana gelir. Fakat liderin daha uzun tutunduğu bölgelerde daha kalın yapılarda da gözlemlenebilir.
- Yıldırımın tutunma bölgelerinin yakınlarında yıldırım akımından kaynaklanan manyetik kuvvetlerin neden olduğu bükülmeler meydana gelebilir.
- Yıldırım akımının enerjisinin iletken üzerinde depolanması sonucu iletkenlerin sıcaklığı artabilir. Genel olarak uçaklarda kullanılan metaller bu sıcaklık artışına dayanabilse de tüm malzemeler için geçerli değildir. Bundan dolayı malzemelerin sıcaklık artışlarını belirlemek ve dayanımlarını hesaplamak önemlidir.
- Basınç ve şok dalgalarının oluşturacağı streten kaynaklı hasarlar da gözlemlenebilir.

Özellikle erime veya yanma etkilerinde büyük öneme sahip olan kalınlık ve boya gibi faktörlerin incelendiğı testleri bulmak mümkündür. Şekil 6.1'de boyalı ve boyasız alüminyum panel üzerinde 1A bölgesi için yapılmış direkt yıldırım testleri gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Direkt yıldırım test sonuçları (a) boyasız 0.8 mm kalınlığında alüminyum panel (b) boyalı 1 mm kalınlığında alüminyum panel [43]

Bunlara ek olarak farklı yüzey özelliklerini veya iletken olmayan kompozitlerin davranışlarını inceleyen farklı çalışmalarda mevcuttur.

6.2. Yıldırımın Dolaylı Etkileri (LIE)

Dolaylı etkiler uçağa yıldırım çarpması sonucu oluşan elektromanyetik alanların etkileşiminin sonucudur. Böylece yıldırım sürecinde oluşan geçici bir iç ortam yaratır. [44]

Yıldırımın dolaylı etkileri, hava aracındaki elektrikli bir ekipmanın yıldırım çarpması nedeni ile arızalanması veya hasar görmesi durumunu tarif eder. Yıldırım çarpması esnasında akım uçağın yüzeyinde hareket ederek hızla değişen güçlü bir manyetik akı meydana getirir. Bu durum yıldırıma Şekil 6.2’te örnek olarak gösterilen bir akım yolunu takip ettiği esnada geçtiği yol boyunca yüzeyin altındaki kabloları veya ekipmanlara akım indükleme potansiyeli kazandırır.



Şekil 6.2. Yıldırım için örnek bir akım yolu [45]

Önceden uçaklarda kullanılan elektronik ekipmanlar bu kadar fazla ve kritik rollere sahip değillerdi. Buna ek olarak günümüz mikro elektronik devreleri kadar dış ortamdan gelen etkilere de açık değillerdi. Ne var ki günümüzde mikro elektronik devrelerin daha fazla ve kritik görevlerde kullanılması ile beraber yıldırım gibi dış ortamdan kaynaklanan geçici gerilimlere karşı duyarlılıklar artmaya başlamıştır. Bundan dolayı yıldırımların elektronik devreler üzerindeki potansiyel etkilerini hafifletmekte gerekmektedir.

Dolaylı etkilerden kaynaklanan problemleri önlemek için alınabilecek topraklama, aşırı gerilim koruma devreleri, kalkanlama gibi önlemler mevcuttur. Bir uçağın güvenli uçuş ve inişi için kritik veya gerekli olan her devrenin FAA tarafından belirlenen düzenlemeler doğrultusunda üretici tarafından doğrulanması gerekmektedir. [30]

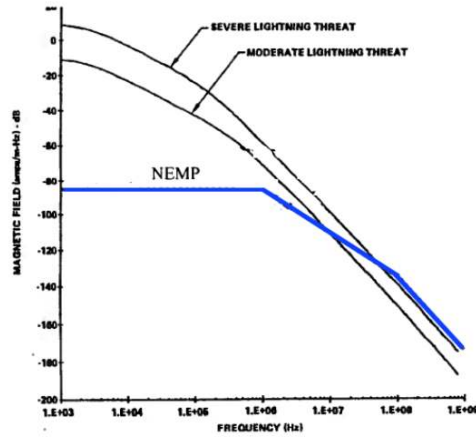
Yıldırımın dolaylı etkilerinden korunmak için alınabilecek önlemlerin Elektromanyetik Girişim (EMG) ve Elektromanyetik Uyumluluk (EMU) içinde kullanılabileceği belirtilmelidir.

Dolaylı yıldırım etkileri, özellikle ekipman ve kabloları akım ve gerilim indüklemeyi içeren test tekniklerinin geliştirilmesinde NEMP'den (Nükleer Elektromanyetik Darbe) yararlanılmıştır. Ayrıca Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Hava Kuvvetleri ve Boeing Askeri Uçak Şirketi tarafından yürütülen Atmosferik Elektrik Tehlikesi Programı (AEHP) yıldırımın dolaylı etkilerine karşı kapsamlı araştırmalar yapmıştır. Bu araştırmalar dolaylı yıldırım etkilerinin meydana getirdiği potansiyel tehlikelerin anlaşılmasında önemli bilgiler sağlamıştır.

Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) tarafından standart yıldırım testi tasarımlarının ve tavsiye belgelerinin kapsamlı bir çalışması yapılmıştır. Bu çabanın amacı, Amerika Birleşik

Devletleri ve Avrupa'daki onaylayıcı kurumlar arasında koordinasyon ve anlaşmayı teşvik etmekte. Nihayetinde SAE tarafından geliştirilen dokümanlar, havacılık endüstrisinde yıldırım sertifikasyonu ile ilgili standartların ve yönergelerin tamamlanmasını ve uyumlu hale getirilmesini sağlamak için Federal Havacılık İdaresi (FAA) tarafından onaylandı.

Bir uçak üzerindeki etkileri açısından NEMP ile yıldırım arasında dikkate değer benzerlikler vardır. Bununla birlikte, dikkate alınması gereken farklılıklar da vardır. NEMP yıldırıma kıyasla daha kısa bir süreye sahiptir ve genliği her zaman daha yüksek değildir, ancak daha yüksek frekanslarda daha fazla enerji taşır. Şekil 6.3, yıldırımın daha düşük frekanslarda NEMP'den daha yüksek enerji seviyelerine sahip olduğunu göstermektedir. Bundan dolayı farklı olguların potansiyel etkilerini ele alırken özel yaklaşımlara ihtiyaç duyulur.



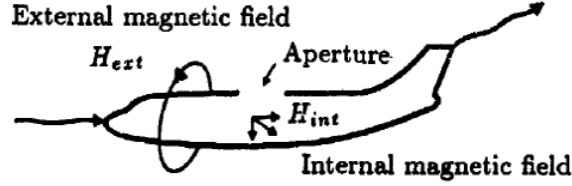
Şekil 6.3. NEMP ve yıldırımın spektrum karşılaştırması

6.2.1. İndüklenme etkileri

Teorik olarak metal bir uçak içerisindeki ve dışarıdaki elektromanyetik ortamı birbirinden ayıran bir Faraday Kafesi olarak kabul edilebilir. Elektrik enerjisinin uçağın iç kısımlarına bağlanması sağlayan bazı mekanizmalar vardır. Yıldırım kaynaklı girişimler için en önemli parametreler kablo uzunluğu, kalkanlama ve açıklıklara göre kabloların konumudur. Bunlara ek olarak indüklenme etkileri antenler veya dış ortam ışıkları gibi ekipmanların doğrudan yıldırım akımına maruz kalması sonucu bu ekipmanların kablolarının bağlı olduğu aviyoniklere zarar verebilir. Dış bileşenleri bu etkilerden korumak için bu ekipmanların kasasının uçağın ana metal yapısına uygun bir şekilde bağlanması ve kabloların yalıtılması önemlidir. [30]

Temel bağlanma mekanizmaları aşağıda özetlenmiştir:

- **Manyetik voltaj indüklenmesi:** Uçağın kablolarına bağlanma, temel olarak gövde boyunca akan yıldırım akımı tarafından üretilen manyetik alanın bir sonucudur. Bu dinamik manyetik alan, kablolar ve hava aracının yapısı içerisinde bir döngü oluştururken akım ve gerilim indükler. Şekil 6.4 bu fenomenin görsel bir temsili gösterilmiştir.



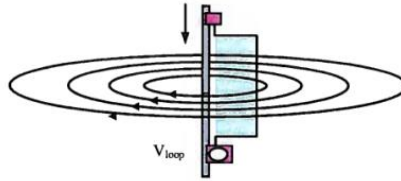
Şekil 6.4. Bir uçakta meydana gelen manyetik alan bağlanması [30]

İndüklenen voltajın etkisi göz önüne alındığında ekipmanın lokasyonu, kabloların lokasyonu kadar önemli değildir. Özellikle açıklıklara yakın konumlardan geçen kablolarlarda koruma önlemlerinin daha üst düzey tutulması önemlidir. Ayrıca kompozit malzemelerden yapılmış alanlar, alüminyum ile aynı seviyede koruma sağlamaz ve yıldırım çarpması durumunda elektromanyetik olarak açıklık olarak kabul edilir.

Lenz kanuna göre değişen bir manyetik alanın oluşturduğu açık devre gerilimi

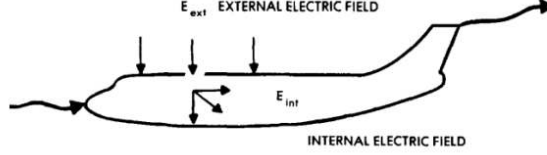
$$V = \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1)$$

formülü ile bulunur [30]. Örneğin Şekil 6.5 kablunun her iki ucundan da uçağın metalik yapısına bağlanmış bir devreyi temsil eder. Φ çevrimlerin boyutuna bağlıdır yani kablolar yapıya ne kadar yakın olursa indüklenerek voltaj o kadar az olacaktır. [46]



Şekil 6.5. Kablunun iki noktadan bağlı olduğu durumda indüklenen manyetik akı [46]

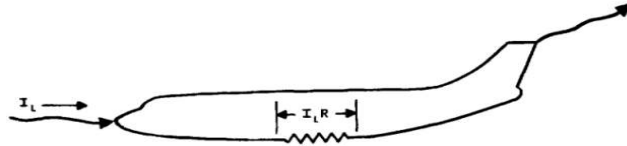
- **Elektrik alan bağlanması:** Şekil 6.6’da gösterildiği gibi açıklıklardan geçerek uçağın iç kısmına geçen elektrik alanları inceler.



Şekil 6.6. Uçaklardaki elektrik alan bağlanması [30]

Kapasitörün bir plakasının uçağın dışında ve diğerinin uçağın kendisi olduğu bu mekanizma ile kapasitif bağlanmayı ilişkilendirmek mümkündür. Elektrik alanda meydana gelen hızlı bir değişim kablolardan akım akmasına sebep olacaktır. Bağlanmanın büyüklüğü elektrik alanın büyüklüğü ile ilişkilidir. Hava aracı metalden yapılmış ise bu tür bir bağlantı ancak açıklıklarda meydana gelebilir çünkü metaller elektrik alana karşı iyi bir koruma sağlar.

- **Direnç gerilimi:** Şekil 6.7’de gösterildiği gibi direnç üzerinden akan akım ile uçağın içerisinde yaratılan elektrik alanlarla ilgilenen bir bağlanma mekanizmasıdır.

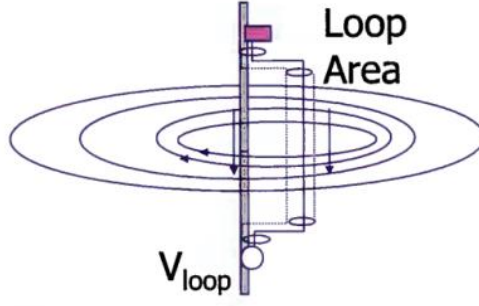


Şekil 6.7. Uçaklardaki direnç gerilimi bağlanması [30]

- **Deri etkisi:** Bu bağlanma özellikle kompozit malzemeler ile alakalıdır. Bilindiği gibi iletken malzemelerde akım malzemenin tüm enine kesitinde tek düze olarak bulunmaz. Aksine dönüş yoluna en yakın olan iletken yüzeyinden akar. Akımın derine nüfus etkisi malzemenin direncine ve frekansa bağlıdır. Deri kalınlığı aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu_0 f}} \quad (6.2)$$

Kalkan kullanarak yıldırımdan kaynaklanan indüklenen etkileri azalmak mümkündür. Daha önce Şekil 6.5’da verilen örneğe kalkan eklenmesi durumu Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Bu durumda kalkan her iki uçtan elektriksel olarak yapıya bağlanırsa yıldırım akımının bir kısmını iletecektir. Eğer kalkan mükemmel elektrik iletken ise akı oluşmayacak ve kablo indüklenen etkilerden korunmuş olacaktır.



Şekil 6.8. Kalkan eklenmiş kablonun gösterimi [46]

Gerçek hayatta kalkanın akım taşıma kapasitesini limitleyen bir direnç değeri vardır ve ayrıca bir kısım akı girişim yaparak kalkan tarafında voltaj indüklenenecektir. İndüklenen bu voltaj

$$V = I_{kalkan} \times Z_T \quad (6.3)$$

formülü ile bulunabilir. Bu formülde Z_T kalkanın transfer empedansıdır.

7. HAVA ARACI ELEKTRONİK SİSTEMLERİNİN SERTİFİKASYONU

SAE, Aerospace Recommended Practice (ARP) adı verilen hava aracının içerisinde ve dışarısında bulunan elektronik sistemlerin yıldırımdan kaynaklanan tehlikeler için yönetmeliklere uygunluğun gösterilmesi konusunda rehber dokümanlar hazırlamıştır. Bir hava aracını yıldırımın dolaylı etkilerine karşı sertifikaya etmek için aşağıda tanımlanmış yedi sürecin takip edilmesi gerekmektedir.

- 1. Yıldırımın dolaylı etkilerinin hava aracı üzerindeki emniyet analizinin yapılması.** Yıldırımın dolaylı etkilerinin Fonksiyonel Tehlike Değerlendirmesi (FHA) yapılarak tanımlanması ve sınıflandırılması gerekmektedir. Tablo 7.1’te bazı hata koşullarının sınıflandırılması verilmiştir.

Tablo 7.1. Hata durumlarının sınıflandırılması [47]

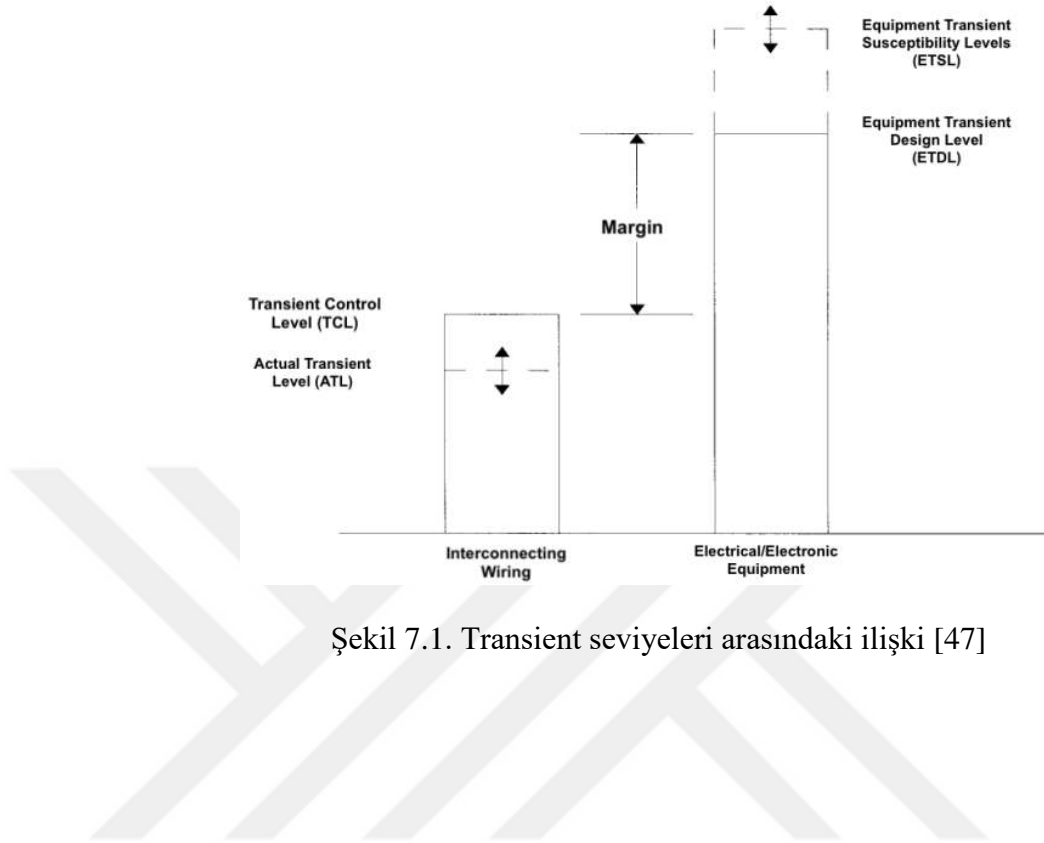
Sınıfı	Etkinin Açıklaması
Ölümcül	Güvenli uçuş ve inişi etkileyebilecek hatalar
Tehlikeli	Uçağın veya mürettebatın kapasitesini zorlu çalışma koşullarıyla azaltacak hatalar - Fonksiyonel yetenekler büyük azalma - Uçuş ekibi üzerinde daha fazla iş yükü ve fiziksel tehlike - Az sayıda yolcunun ciddi yaralanması
Riskli	Uçağın veya mürettebatın kapasitesini olumsuz çalışma koşullarıyla azaltacak hatalar - Fonksiyonel yetenekler önemli azalma - Uçuş ekibi üzerinde önemli artış - Yolcular için rahatsızlık ve muhtemel yaralanma
Az riskli	Uçak güvenliğini önemli ölçüde azaltmayacak ve mürettebata hafif iş yükü getiren hatalar - Fonksiyonel yetenekler hafif azalma - Uçuş ekibi üzerinde hafif iş artışı - Bazı yolcular için rahatsızlık
Etkisiz	Hava aracının güvenliğini ve fonksiyonelliğini etkilemeyen mürettebata ek iş yükü getirmeyen hatalar

FHA yapılırken ekipmanların hata seviyelerinin de Tablo 7.2 verilen bilgilere göre değerlendirilmesi ve dikkate alınması gerekmektedir.

Tablo 7.2. Ekipmanların hata durumları ile ilgili seviyeleri [47]

Level A	Arızası Ölümcül bir hataya yol açacak veya katkıda bulunacak olan elektrik/elektronik sistem
Level B	Arızası Tehlikeli bir hataya yol açacak veya katkıda bulunacak olan elektrik/elektronik sistem
Level C	Arızası Riskli bir hataya yol açacak veya katkıda bulunacak olan elektrik/elektronik sistem
Level D	Arızası Az Riskli bir hataya yol açacak veya katkıda bulunacak olan elektrik/elektronik sistem Sistemin Level D olduğu onaylandıktan sonra yıldırım sertifikasyonuna tabii değildir, ek isterler gerekmez.
Level E	Arızası Etkisiz bir hataya yol açacak veya katkıda bulunacak olan elektrik/elektronik sistem Sistemin Level E olduğu onaylandıktan sonra yıldırım sertifikasyonuna tabii değildir, ek isterler gerekmez.

- Hava aracı üzerindeki yıldırım bölgelerinin belirlenmesi.**
- Yıldırım bölgeleri için gövde yıldırım akım yollarının belirlenmesi.**
- Yıldırımın iç ortama olan etkilerinin belirlenmesi.** Bu aşamada hava aracı içerisinde oluşacak akım ve voltajların belirlenmesi Actual Transient Level – ATL’nin tanımlanması gerekir.
- Transient Control Level – TCL ve Equipment Transient Design Level – ETDL değerlerinin tanımlanması.** ATL, TCL ve ETDL arasındaki ilişki Şekil 7.1’da gösterilmiştir. Equipment Transient Susceptibility Level – ETSL ekipmanın bozulmasına ve işlevini yerine getirememesine neden olmak için ekipmana uygulanması gereken limiti göstermektedir. ETDL’ler ekipmanın özelliklerini belirler ve uygunluk değerlendirmesi için kullanılırlar.
- Uyumun gösterilmesi.** Kablo/ekipman üzerinde indüklenen ATL seviyeleri, TCL seviyelerini geçmemesi gerekmektedir ve ekipman ETDL seviyelerine dayanabilmelidir.
- Düzeltilici önlemler.** Testlerden kalınması durumunda tasarımı optimize ederek koruma metodolojilerini iyileştirin.



Şekil 7.1. Transient seviyeleri arasındaki ilişki [47]

8. ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK

Elektromanyetik Uyumluluk (EMU), modern dünyada önemi giderek artan karmaşık ve çok yönlü bir disiplindir. Elektronik cihazların tasarımında, test edilmesinde ve değerlendirilmesinde, birbirleriyle ve çalıştıkları elektromanyetik ortamlarla uyumlu olmalarının sağlanmasında önemli bir rol oynar. EMU, elektronik cihazların güvenilirliğinde ve performansında kritik bir faktör olup, elektronik cihazlarda önemli bozulmalara veya hatalara neden olabilecek elektromanyetik girişim (EMG) ve elektromanyetik duyarlılık (EMD) sorunlarını önler.

EMG, başka bir cihazdan veya elektromanyetik alandan gelen istenmeyen elektromanyetik enerji nedeniyle ortaya çıkabilir ve cihazın çalışmasında kesintilere, hatalara veya başka sorunlara neden olabilir. Örneğin, bir cihazın yakınında bulunan bir radyo vericisi, cihazın çalışmasını engelleyebilir. Benzer şekilde EMD, bir cihazın diğer cihazlardan veya elektromanyetik alanlardan gelen elektromanyetik enerjiye duyarlılığını veya savunmasızlığını ifade eder.

Elektromanyetik uyumluluğu sağlamak için elektronik cihazlar, EMU tasarımı, PCB tasarımı, kablolama ve topraklama tasarımı, filtreleme, koruma, test etme ve doğrulama gibi çeşitli tekniklerle tasarlanır. Teknikler, elektronik cihazların çeşitli elektromanyetik ortamlarda doğru ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayarak EMG ve EMD sorunlarını en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

EMU, savunma, havacılık, tıp, telekomünikasyon, otomotiv, endüstriyel kontrol ve bilgi teknolojisi gibi çeşitli sektörlerde kritik öneme sahiptir. Örneğin savunma sanayinde, askeri uygulamalarda kullanılan elektronik cihazların elektromanyetik parazitlere karşı dirençli olması ve zorlu elektromanyetik ortamlarda doğru ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için EMU çok önemlidir.

EMU için çok sayıda bilimsel çalışma, makale ve kaynak mevcuttur. Henry Ott, bu alandaki önde gelen araştırmacılardan biridir ve "Electromagnetic Compatibility Engineering (Elektromanyetik Uyumluluk Mühendisliği)" adlı kitabı, EMU'nun temellerini, tekniklerini ve uygulamalarını kapsayan bir referans kitabı olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, Amerika Birleşik Devletleri'nde Federal İletişim Komisyonu (FCC) tarafından yayınlananlar ve elektronik

cihazların elektromanyetik uyumluluğuna ilişkin standartları belirleyen Avrupa Birliği'ndeki EMU Direktifi gibi elektromanyetik uyumlulukla ilgili standartlar ve yönergeler vardır.

Sonuç olarak, elektromanyetik uyumluluk, elektronik cihazların güvenilir ve emniyetli çalışmasını sağlamada önemli rol oynayan kritik bir disiplindir.



9. ELEKTROMANYETİK GİRİŞİM

Elektronik cihazlar, elektromanyetik dalgaların neden olduğu bozulma olan elektromanyetik girişime (EMG) karşı hassastır. EMG, kısmi performans düşüşüne veya tüm sistem arızasına neden olabilir.

EMG'nin etkilerini azaltmak için, elektronik cihazlar üzerindeki EMG kaynaklarını ve etkilerini anlamak önemlidir.

9.1. Elektromanyetik Girişim Kaynakları

Radyo ve televizyon yayınları, cep telefonları, mikrodalgalar, elektrik hatları ve yıldırım çarpmaları gibi çeşitli kaynaklar EMG'ye sebep olabilir.

EMG'nin etkileme yolları, genellikle iletim yolu ve radyasyon yolu ile etkilenme olarak sınıflandırılır. İletim yolu, elektromanyetik alanın bir kaynaktan bir kabloya veya başka bir iletken yüzeye doğrudan girmesi sonucu oluşur. Bu durum, sinyal hatları, güç hatları ve toprak hatları gibi iletken yüzeyler arasında meydana gelebilir.

Radyasyon yolu ise, elektromanyetik alanın doğrudan bir iletkene girmeden önce hava veya boşlukta seyahat ederek başka bir cihaza etki etmesi sonucu oluşur. Bu durum, radyo vericileri, cep telefonları, kablosuz ağlar ve diğer kablosuz cihazlar tarafından üretilen elektromanyetik radyasyon ile daha çok ilgilidir.

EMG, kablosuz cihazların yakın mesafeden kullanılmasından da kaynaklanabilir. Örneğin, uçaklarda cep telefonu kullanımı kritik ekipmanları etkileyebilir. Bu girişim yanlış okumalara ve hatta tam ekipman arızasına yol açabilir. Bundan dolayı uçuş esnasında cep telefonlarının kullanımı uluslararası normlarla yasaklanmıştır.

Yukarıda belirtilen EMG kaynaklarının dışında, yıldırım, güneş patlamaları vs. gibi elektronik cihazlara zarar verebilecek güç dalgalanmalarına neden olabilecek doğal kaynaklar da vardır. Ayrıca elektrostatik boşalma (ESB) da EMG'ye neden olabilir. ESB, iki nesnenin arasında birbirleriyle temas ettiklerinde veya ayrıldıklarında meydana gelebilecek statik elektriğin transferidir. Bu statik elektrik transferi, elektromanyetik dalgalar oluşturabilen ve EMG'ye neden olabilen bir kıvılcıma neden olabilir.

9.2. Elektromanyetik Girişimin Etkileri

EMG, radyo veya televizyonlarda parazite neden olabileceği gibi, bilgisayar hesaplamalarında hatalara neden olabilir. Tıbbi veya havacılık gibi kritik uygulamalarda EMG, kritik bir sistemi bozarsa hayati tehlike oluşturabilir.

EMG, elektronik cihazlara müdahale ederek veri kaybına veya bozulmasına neden olabilen bir etkidir. Bu, finans sektöründe mali kayıplara ve havacılık sektöründe can kaybına neden olabilecek sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, tasarımcılar ve mühendisler EMG'yi dikkate alarak güvenilir ve emniyetli elektronik cihazlar ve sistemler geliştirmelidirler.

Artan elektronik cihazların kullanımı nedeniyle EMG'nin gelecekte daha önemli bir endişe kaynağı olacağı ve EMG kaynaklarının sayısının artmasıyla etkilerinin daha da şiddetleneceği belirtilmektedir. Bu nedenle, EMG'nin etkilerini azaltmak için yeni yöntemler geliştirilmesi ve elektronik cihazların EMG'ye karşı daha dayanıklı hale getirilmesi önemlidir.

9.3. Elektromanyetik Girişimi Azaltmak için Alınabilecek Önlemler

Elektromanyetik girişim (EMG) etkilerini azaltmak için metal gibi iletken bir malzemeye cihazı veya sistemi korumak, bir filtre kullanmak veya toprağa bağlamak gibi yöntemler kullanılabilir.

Parazit kaynaklarından uzaklaştırmak bazen etkili bir çözüm olabilir, ancak EMG kaynağı güçlüyse veya etkilenen cihaz kritikse, bu yöntem uygulanamayabilir. EMG'yi azaltmak için mevcut tüm yöntemleri göz önünde bulundurmak ve en uygun yöntemi seçmek önemlidir.

Sonuç olarak, EMG modern dünyada önemli bir endişe kaynağıdır ve performans düşüşünden tam sistem arızasına kadar çeşitli etkilere neden olabilir. Ancak, kalkanlama, filtreleme ve topraklama gibi EMG'nin etkilerini azaltmanın yolları vardır. Potansiyel EMG kaynaklarının farkında olmak ve elektronik cihazlarımızı ve sistemlerimizi korumak için uygun önlemleri almak önemlidir.

10.ELEKTROMANYETİK UYUMLULUK VE YILDIRIM

Yıldırım çarpmaları, elektronik cihazlarda ciddi hasara neden olabilen elektromanyetik alanlar oluşturabilir. Bu hasar, elektronik cihazların çalışmasına müdahale edebilen ve hatta arızalanmasına neden olabilen yıldırım çarpmalarının oluşturduğu elektromanyetik parazit varlığından kaynaklanabilir. Bu nedenle, elektronik sistemleri yıldırım hasarından korumak için elektromanyetik uyumluluğu dikkate almak önemlidir.

Elektronik sistemlerin elektromanyetik uyumlu olması, yıldırım çarpmalarından kaynaklanan hasar risklerini önemli ölçüde azaltabilir. Teknolojik gelişmelere rağmen, yıldırım çarpmaları elektronik sistemler için hala önemli bir tehlike oluşturmaktadır. Bu nedenle, aşırı gerilim koruyucular, topraklama ve kalkanlama gibi önlemler alınmalıdır.

Sonuç olarak, elektronik sistemlerin yıldırım çarpmalarının zararlı etkilerinden korunması için elektromanyetik uyumluluk ve yıldırım arasındaki ilişkinin anlaşılması son derece önemlidir.

10.1. Elektronik Sistemleri Yıldırım Hasarından Korumaya Yönelik Önlemler

Elektronik cihazların yıldırımdan korunması için alınabilecek çeşitli önlemler vardır. Bunlardan ilki, kalkanlama olarak adlandırılan bir yöntemdir. Bu yöntem, elektronik cihazları yıldırımın ürettiği elektromanyetik parazitlerden korur. Elektronik cihazlar, elektromanyetik radyasyonu bloke eden ve yıldırım çarpmaları tarafından üretilen elektromanyetik dalgaları yansıtan iletken bir malzemeyle çevrelenir. Bu sayede cihaza ulaşan elektromanyetik parazit miktarı azaltılır.

Aşırı gerilim koruma cihazları da elektronik cihazları yıldırım çarpmalarının neden olduğu güç dalgalanmalarından korumak için kullanılabilir. Bu cihazlar, güç dalgalanmalarının neden olduğu fazla enerjiyi elektronik cihazlardan uzaklaştırarak zarar görmemelerini sağlar. Bir güç dalgalanmasının varlığını algılayarak ve ardından fazla elektrik enerjisini toprağa yönlendirerek cihazı koruyarak çalışırlar.

Son olarak, topraklama da elektronik cihazları yıldırım hasarından korumanın etkili bir yoludur. Bu yöntem, elektronik cihazların, elektrik enerjisini cihazdan uzağa yönlendirerek hasar riskini azaltan iletken bir yola bağlanmasını içerir. Bu sayede, iletken yol elektrik

enerjisini cihazdan uzağa yönlendirdiğinden, elektronik cihazlar yıldırım çarpmalarına zarar görmeden dayanabilir.

Yukarıdaki yöntemler, elektronik cihazların yıldırımın etkilerinden korunmasını sağladığı gibi ekipmanın EMU açısından daha güvenli olmasını da sağlamaktadır.



11. KALKAN SONLANDIRMA METOTLARI

Kabloların kalkanlanması, istenmeyen radyasyon ve elektromanyetik (EM) girişime karşı önemli bir koruma sağlaması açısından son derece önemlidir. Doğru kalkan sonlandırmasının kalkanlamanın etkinliğini büyük ölçüde etkilediği [20]-[24] konusunda genel bir kabul vardır, ancak kesin yöntemler konusunda bazı bilinmezlikler mevcuttur.

Uçak kablağı hem kapsamlıdır hem de uçak üzerinde her yerde bulunur. Elektromanyetik uyumluluk (EMU) büyük ölçüde kablağın tasarımına bağlıdır, bu da [48] ve [49] referanslarında belirtilmiştir.

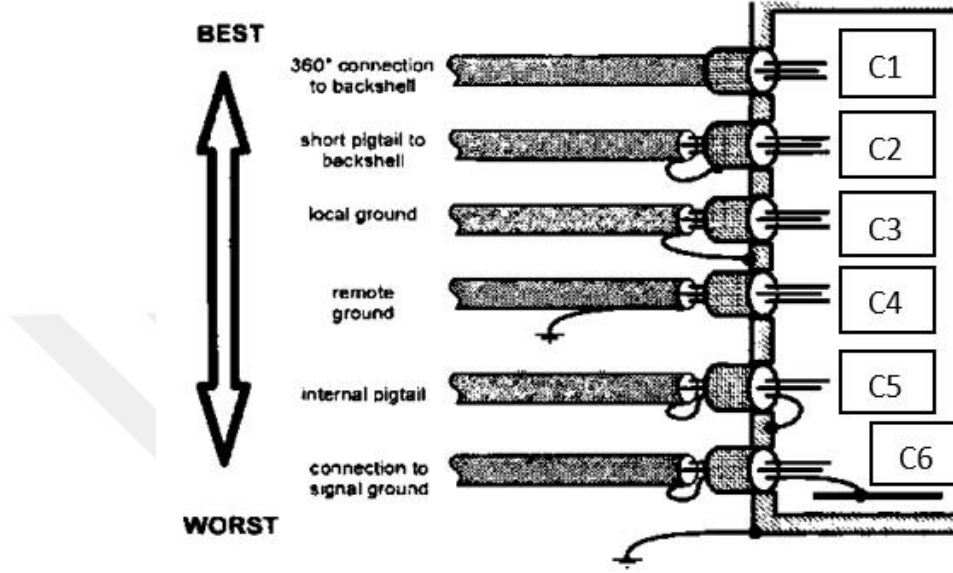
Sonlandırma geometrisi ve malzeme gibi parametrelerin kalkanlama performansını ne ölçüde etkilediği belirsizdir. Bu çalışma, sonlandırmanın kalkanlama etkinliği üzerindeki etkisini keşfetmeyi amaçlamamaktadır. Daha önce belirtildiği gibi, bu araştırmanın odak noktası, yıldırım dolaylı etkilerine karşı en iyi korumayı sağlayan sonlandırma yöntemini belirlemektir.

Kablolarda kalkanı sonlandırırken en etkili yöntem çift taraflı 360° backshell kullanmaktır. Bu yaklaşım, kablonun harici elektromanyetik girişimden korunmasını sağlayarak, kalkan sonlandırması için en yüksek düzeyde elektromanyetik uyumluluk sağlar. Ancak, çeşitli uygulama kısıtlamaları nedeniyle bu yöntemin uygulanabilir olmadığı durumlar vardır. Bu gibi durumlarda, Şekil 3'te gösterildiği gibi alternatif yöntemler kullanılabilir. En sık kullanılan yöntemlerden biri, pigtail ile kalkanı mümkün olan en kısa mesafede sonlandırmaktır. Bu yöntem elektromanyetik paraziti azaltmaya yardımcı olsa da, çift taraflı bir backshell'de sonlandırmayla aynı düzeyde koruma sağlamayabilir.

Özetle, çift taraflı backshell, yüksek EMU seviyesi nedeniyle kablolarda kalkan sonlandırma için tercih edilen yöntem iken, mümkün olmadığında alternatif yöntemler kullanılabilir. Bir kablo için uygun sonlandırma yöntemini seçerken, belirli uygulama kısıtlamalarını ve elektromanyetik parazite karşı istenen koruma seviyesini dikkate almak önemlidir. [50]-[52] numaralı kaynaklar sonlandırma yöntemleri hakkında detaylı bilgi sunmaktadır. Şekil 11.1, bu yöntemleri göstermekte ve elektromanyetik uyumluluk (EMC) mühendisliği açısından etkinliklerini genel olarak değerlendirmektedir.

Ek olarak, burada verilen sonlandırma yöntemlerinden farklı yöntemler de bulunmaktadır. Özellikle güç hatlarında kullanılan sonlandırma yöntemleri, burada bahsedilen yöntemlerden

oldukça farklı olabilir. Okuyucular, güç hatlarında kalkan sonlandırma ayrıntıları için referans[53]'ü inceleyebilir.



Şekil 11.1. EMU mühendisliği açısından farklı kalkan sonlandırma yöntemlerinin genel değerlendirmesi

C1, 360° ile backshell'de sonlandırma yöntemidir. Bu konfigürasyonda kalkanda herhangi bir kesinti olmaksızın 360° her yönden kalkana temas edilerek kalkan backshell'e aktarılır. Bu, kalkanın tamamen çevrelenmesini ve dış parazitlerden korunmasını sağlar. Ek olarak, 360° sonlandırma yöntemi daha güvenli bir bağlantı sağlayarak sinyal kaybı veya bozulma riskini azaltır.

C2, konektörün iletken olduğu fakat EMG backshell'i olamayan konektörlerde en sık tercih edilen yöntemdir. Solder sleeve ile kalkan bir kabloya (pigtail) aktarılır ve bu pigtail konektöre bağlanarak kalkanın aktarımı sağlanır. Bu transfer, konektöre mümkün olduğu kadar yakın, genellikle 10 cm veya daha kısa mesafede yapılır.

C3, C4, C5 ve C6 konfigürasyonlarında kalkan, konektöre mümkün olduğunca yakın bir noktadan yine solder sleeve yöntemi ile pigtail'e aktarılır fakat pigtail'in sonlandırması farklı noktalarda yapılır. Güvenilir ve sağlam bir bağlantı sağladığından, solder sleeve yönteminin kalkanlı kabloların sonlandırılmasında sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Farklı konfigürasyonlarda farklı noktalarda yapılan pigtail sonlandırmaları, farklı senaryolarda kablonun performansını ve işlevselliğini optimize edecek şekilde yapılır. Sonuç olarak, çeşitli

konfigürasyonlar ve sonlandırma noktaları, çeşitli kullanım durumları ve uygulamalar için optimize edilebilen çok yönlü ve uyarlanabilir bir metot sağlar.

C3'te, pigtail ekipman şasisi üzerinde sonlandırılır. Bu sonlandırma yöntemi, pigtailin bir konektörde sonlandırıldığı C2'den farklıdır. Ek olarak, pigtail kayıpları en aza indirecek kadar kısa tutulabilirken, bağlantı doğru yapıldığı sürece C2 ile yaklaşık olarak aynı koruma etkinliği seviyesine ulaşabilir. Genel olarak, C3 sonlandırma yöntemi, C2 sonlandırma yöntemine bir alternatif sunar.

C4'te pigtail, ekipman yerine uçak yapısı üzerinde sonlandırılır. Sinyal kaybı veya parazit olasılığını en aza indirmek için pigtailin mümkün olduğunca kısa tutulması gerektiğine dikkat etmek önemlidir. Bununla birlikte, pigtailin, bağlantıyı zorlamadan veya zarar vermeden ekipmanın uygun şekilde hareket etmesine ve ayarlanmasına izin verecek kadar uzun olmasını sağlamak da önemlidir.

C5'te pigtail, sinyal kablolarıyla birlikte konektörden geçirilir ve ekipmanın içinde sonlandırılır. Ancak, bu süreçten kaynaklanabilecek birkaç sorun var. Örneğin, konektör geçişi düzgün yapılmazsa, kalkan üzerindeki akımlar yakındaki sinyal kablolarında parazite neden olabilir. Bu nedenle, bu yöntemi kullanıp kullanmamaya karar vermeden önce ekipmanın özel gereksinimlerini dikkatlice düşünmek önemlidir. Ayrıca, kurulumun doğru ve verimli bir şekilde yapılmasını sağlamak için alandaki uzmanlara danışmak veya endüstri yönergelerine başvurmak faydalı olabilir.

C6'da pigtail, sinyal kablolarıyla aynı konektörden geçer ve ekipmanın içindeki toprak düzleminde son bulur. Bu tür bir bağlantı, ekipmanın içindeki toprak düzleminin kirlenmesine neden olabilir. Sonuç olarak, ekipmanın sinyal referansı bozulabilir. Bu nedenle, ekipmanın en iyi şekilde çalışmasını sağlamak için bu yöntemden kaçınmak önemlidir. Bunun yerine, sinyal bozulmasına neden olmayan farklı bir yöntemin kullanılması düşünülebilir.

C5 ve C6 arasındaki en önemli fark, koruma etkinliğinden ziyade ekipmanın sinyal düzlemi üzerindeki etkileridir. Ekipman üreticisi açıkça belirtmediği sürece, C5 ve C6 uygulamaları kullanılmamalıdır. Ekipman üreticisi bu yöntemlerden birini kullansa bile, genellikle üretici tarafından kalkanın sonlandırılması için C1 kullanılması kabul edilir.

Bahsedilen konfigürasyonlara ek olarak, koruma söz konusu olduğunda diğer faktörleri de dikkate almak önemlidir. Örneğin, kalkanın sonlandırılmamasının pratik nedenleri olabilir veya ekipman üreticisi, ekipman tarafını dead-end olarak bırakmak için özel bir talepte

bulunmuş olabilir. Bununla birlikte, kalkan etkinliğinin sağlanabilmesi için kalkanın en az bir taraftan sonlandırılması gerektiğini akılda tutmak önemlidir. Ek olarak, parazite ve ortaya çıkabilecek diğer sorunlara karşı maksimum koruma sağlamak için kullanılan kalkanlama türünün yanı sıra kullanılan malzeme ve tekniklerin de dikkate alınması gerekmektedir.

Uygulama sırasında pigtail yöntemi tercih edildiğinde, pigtail uzunluğunun 6 inçten uzun olmaması gerektiği yaygın olarak kabul edilmektedir.

Kalkan sonlandırmayı düşünürken, sonlandırmanın elektriksel bağlanma değerini de dikkate almak önemlidir. MIL-STD-464D'ye göre, kalkan ile ekipman arasındaki bağlanma değeri, konektörün ve yardımcı ara yüzlerin kümülatif etkisini de içerecek şekilde 15 miliohm'dan küçük veya ona eşit olmalıdır [5]. Bu ister 360° sonlandırma ile elde edilebilir ancak “Remote Ground” uygulamaları gibi ekipmandan farklı bir noktada kalkan sonlandırmalarında elde etmek pek mümkün değildir. Bu nedenle pratikte kalkan ile sonlandırma noktası arasındaki direnç değerinin 2,5 miliohm'dan az olması beklenir. Ayrıca, ekipman ile uçak yüzeyi arasındaki bağlantının direnç değeri 2,5 miliohm'dan az olmalıdır [5],[54]. Bu 2,5 miliohm değerinin bilimsel bir dayanağı olmamasına rağmen havacılık endüstrisinde geleneksel ve genel kabul görmüş bir değerdir [5]. Metal-Metal bağlantılarının bağlanma değerinin 2,5 miliohm'dan az olması beklenmektedir.

12. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Standartta belirtildiği gibi, çift üstel dalga formu, çeşitli temel dalga formlarının özünü etkili bir şekilde yansıtan pratik ve uygun bir matematiksel model olarak kabul edilmektedir. Çünkü bu form, genellikle kapasitif boşalmalara dayanan gerçek akım kaynakları tarafından üretilen dalga formlarına oldukça benzemektedir [7], [26], [27]. Çift üstel dalga formunun bir model olarak seçilmesi, gerçek akım kaynaklarının karakteristiklerini doğru bir şekilde temsil etme yeteneğine dayanmaktadır.

Belirtmek gerekir ki, yıldırım darbesini yaklaşık olarak temsil etmek için yaygın olarak üstel dalga formu kullanılsa da, bu tek seçenek değildir. Özellikle, çift üstel dalga formu, zamanın sıfır anında, sıfırdan farklı bir türeve sahiptir ki bu fiziksel olmayan bir durumu temsil eder ve modellerde sorunlara yol açabilir. Bu dezavantajı önlemek için başka dalga formları kullanılabilir [55].

Karmaşık yapılar için uygun elektromanyetik modeller geliştirmek, zorlu ve zaman alıcı bir süreçtir. Şu anda, uçak üzerinde yıldırım tarafından oluşturulan elektromanyetik alanları simüle etmek için yaygın olarak kullanılan birkaç yazılım programı bulunmaktadır.

2008 yılında, Airbus Apra M, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanılarak üretilen uçakların başarılı bir şekilde modellenmesiyle önemli bir kilometre taşına ulaştı. Bu başarı, sonlu fark zaman alanı teorisi (Finite Difference Time Domain) ile EADS IW aracının ve İnovasyon Çalışma Grubu'nun birleşimini kullanarak gerçekleştirildi. Airbus Apra M tarafından gerçekleştirilen çalışma, CFRP uçaklarda yıldırım kaynaklı etkilerin kapsamlı bir analizini içeriyordu ve yıldırımın dolaylı sonuçlarını hafifletmek için değerli önerilerin oluşturulmasını sağladı [56].

Referans [57] tarafından sunulan araştırma, karbon kumaş kompozit bir uçağın bölgesel elektromanyetik alanını ve yüzey akım dağılımını analiz etmeyi içermektedir. Ayrıca, simülasyon yazılımı kullanılarak nasele içerisinde farklı konumlarda kablo kuplajı araştırılmıştır.

Referans [58], yıldırım olayları sırasında aviyoniklerin elektromanyetik ortamını incelemek için EMA3D adlı bir elektromanyetik simülasyon yazılımının kullanımını ele almaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlar aynı zamanda önemli kablolarla indüklenen akımları keşfetmeye odaklanmıştır.

Referans [59]'da açıklanan bir çalışmada, bir uçağın motoruna yapılan bir yıldırım çarpmasının sonucu olarak oluşan elektromanyetik alanın simülasyonu sunulmaktadır. Çalışma, hem motor içinde bulunan kabloların hem de indüklenen yüzey akımlarını analiz etmek için iletim hattı matrisi (TLM) teorisini kullanmaktadır. Tam bir turboprop motorunun hassas bir tasvirini elde etmek için, çalışma uçak üzerindeki gerçek kablolarının ve bileşenlerinin dağılımlarını modele dahil etmektedir. Bu, motorun fiziksel yapılandırmasına yakından benzeyen doğru bir temsil sağlamaktadır.

12.1. EMA3D Analiz Programına Genel Bakış

EMA3D, havacılık, savunma ve otomotiv gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılan bir elektromanyetik analiz yazılımıdır. Bu yazılım, karmaşık elektromanyetik sorunları üç boyutlu olarak çözmek için tasarlanmıştır. Bu bölümde EMA3D programı ve kabiliyetleri hakkında kısa bir bilgi verilecektir.

EMA3D, onu elektromanyetik analiz için verimli ve etkili bir yazılım yapan çeşitli özelliklere sahiptir. Bu özelliklere birkaç örnek vermek gerekirse:

- 3B Modelleme: EMA3D, karmaşık geometrilerin 3B modellerini oluşturma yeteneğine sahiptir, bu da onu büyük ve karmaşık yapıların analizi için uygun hale getirir.
- Yüksek Frekans Simülasyonu: EMA3D, radyo frekansları ve mikrodalgalar gibi yüksek frekans aralıklarında elektromanyetik dalgaları simüle edebilir.
- Çoklu Fizik Simülasyonu: EMA3D, termal ve elektromanyetik etkileşimler gibi birleşik fizik problemlerini simüle edebilir ki bu özelliği ile şuan yıldırımın direkt etkilerini analiz ederken oldukça yarar sağlamaktadır.

EMA3D, elektromanyetik alanların davranışını tanımlayan Maxwell denklemlerini çözmek için bir sonlu elemanlar yöntemi kullanır. Bu, EMA3D'nin karmaşık geometrilerdeki elektromanyetik alanların davranışını doğru bir şekilde tahmin etmesini sağlar. EMA3D, yıldırım çarpmalarının neden olduğu akım ve gerilimlerin ve bunun sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik alanların büyüklüğünü ve dağılımını analiz edebilir.

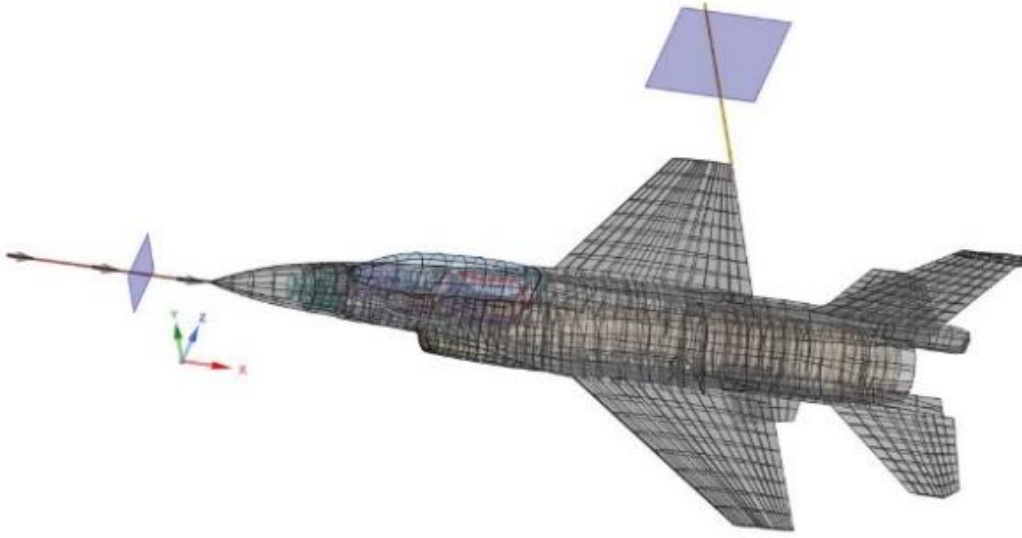
Özellikleri, uygulamaları ve avantajları, onu çeşitli endüstrilerdeki karmaşık elektromanyetik problemlerin çözümü için önemli bir araç haline getirir. EMA3D hem

elektromanyetik analizlerde hem de yıldırım analizlerinde kullanılabilmesi yani geniş bir analiz yelpazesine sahip olması, kolay kullanımı ve en önemlisi gerçek hayat ile tutarlı sonuçları sebebi ile birçok EMU mühendisi tarafından sıklıkla kullanılan bir araçtır.

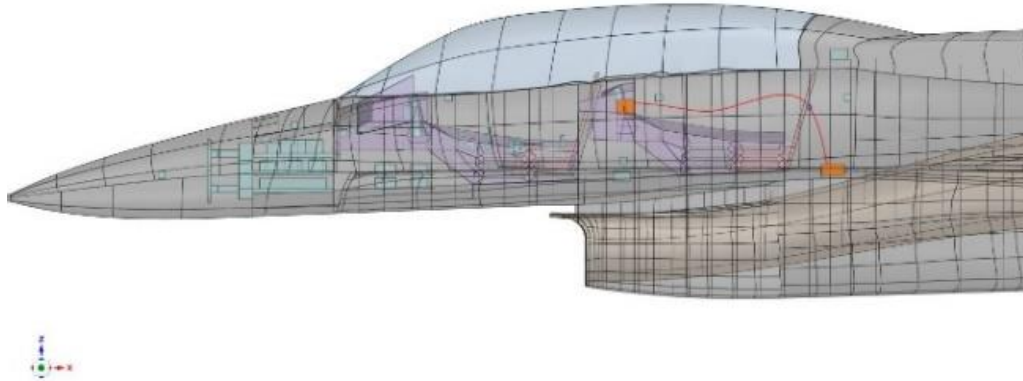
12.2. Kalkanlı ve Kalkansız Kabloların Analizi

Bu çalışmada EMA3D programında F-16 modeli üzerinde 360° kalkanlı ve kalkansız bir kablo simüle edilmiştir. Çalışmanın amacı, özellikle korumalı ve korumasız kablolar arasındaki farklara bakarak, yıldırım çarpmalarının uçak kabloları üzerindeki etkilerini analiz etmektir. Doğru bir analiz sağlamak için hava aracına Direkt Yıldırım Akım Komponenti A uygulandı. Yıldırım giriş noktası uçağın burnu, çıkış noktası ise uçağın sağ kanadı olarak modellenmiştir. Giriş ve çıkış noktaları Mükemmel Elektrik İletkeni (MEİ) olarak tanımlanmıştır. Modelin genel görünümü ve kablonun konumu sırasıyla Şekil 12.1 ve Şekil 12.2’te görülebilir. Giriş ve çıkış noktaları, yıldırım akımının kablonun bulunduğu alandan geçmesine izin vererek en kötü durum senaryosunu simüle edecek şekilde belirlenmiştir.

Bu çalışmanın kalkanlı ve kalkansız kabloların birbirine göre göreceli durumunu incelediğine dikkat edilmelidir. Bu nedenle, en kötü durum analizi ve testi yapmak gerekli değildir. Kalkanlama etkinliğinin teorik etkisi ve test sırasında kabloda indüklenmesi beklenen akım değerleri tahmin edilerek, yıldırım çarpmalarında kalkanlı ve kalkansız kablolar arasındaki performans farklarını daha iyi anlayabiliriz.

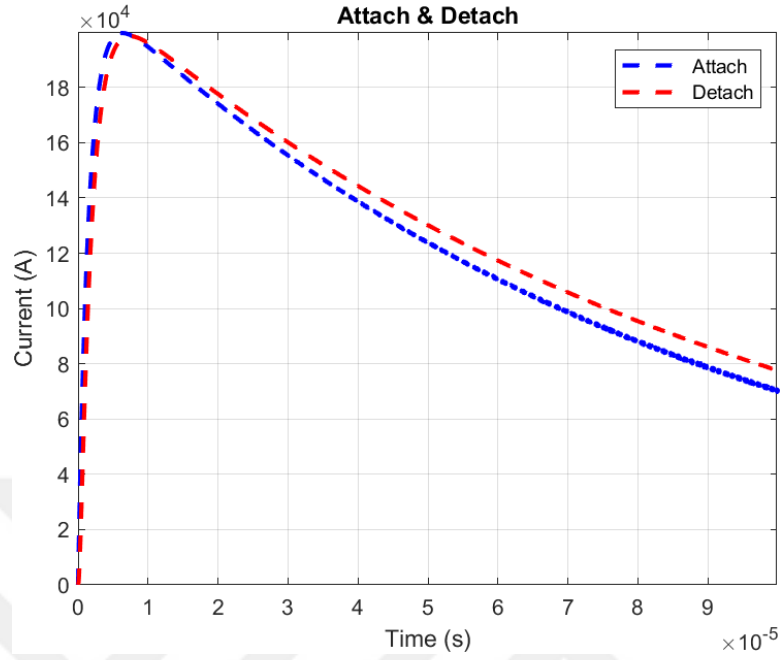


Şekil 12.1. EMA3D programında, F16 modeli ve yıldırımın giriş/çıkış noktaları

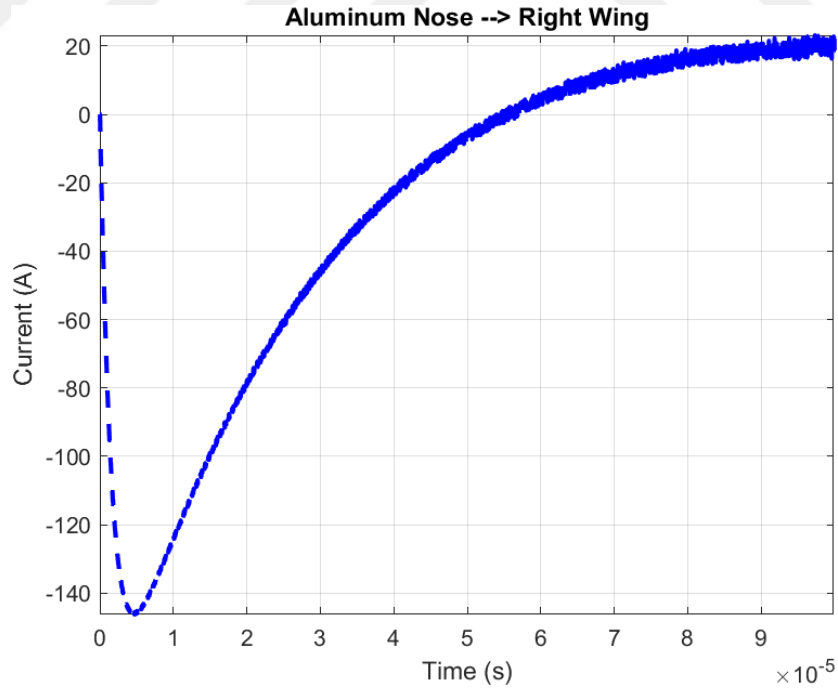


Şekil 12.2. EMA3D programında modellenen kablonun yakından görünümü

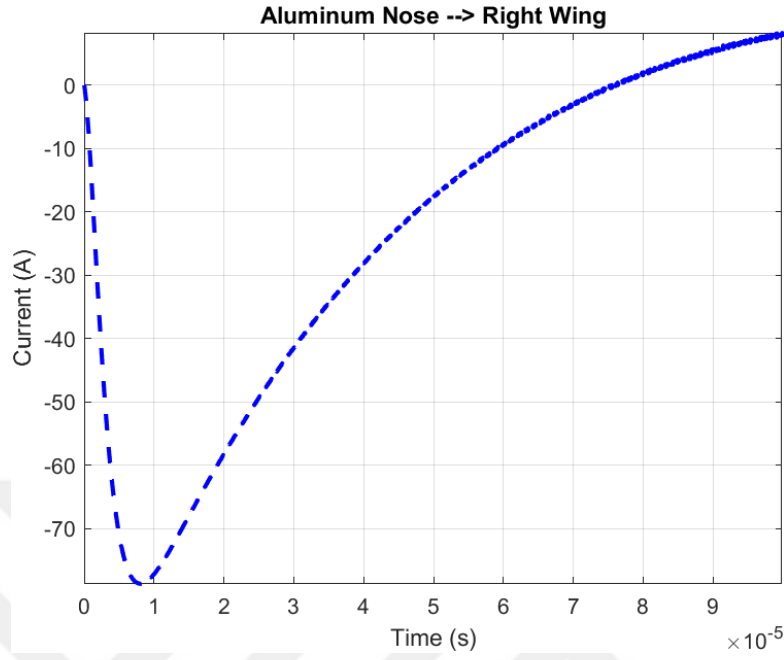
İncelenen kablo yaklaşık 3 metre uzunluğunda tek damar bir kablodur, daha önce belirtildiği gibi kalkanlı ve kalkansız olarak ayrı ayrı modellenmiştir. 360° sonlandırma yöntemini simüle etmek için korumalı durum, 2,5 miliohm değerinde çift taraflı sonlandırmaya sahiptir. Bu analizden elde edilen sonuçlar görsel olarak Şekil 12.3'dan Şekil 12.6'a kadar olan figürlerde gösterilmektedir.



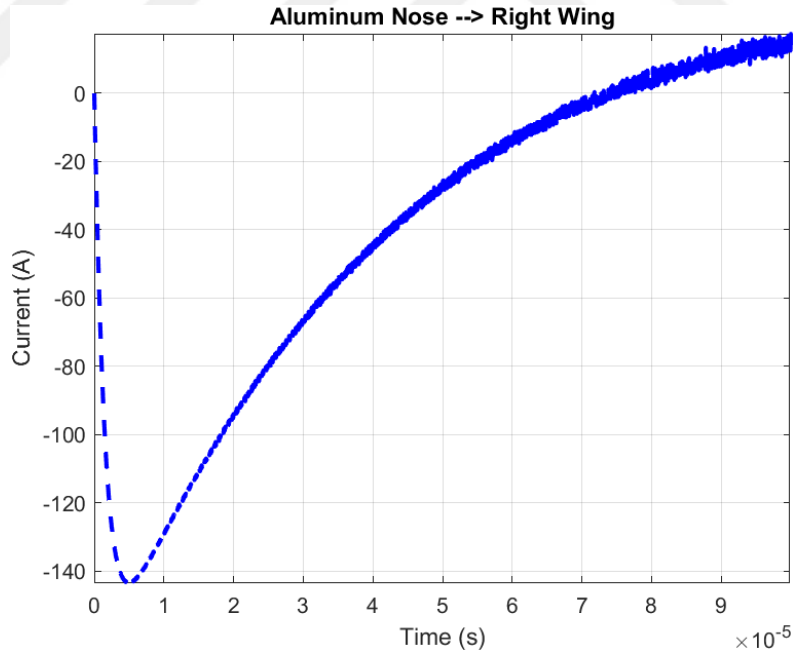
Şekil 12.3. Giriş ve çıkış noktalarında simüle edilmiş yıldırım akımı seviyeleri (Komponent A)



Şekil 12.4. Kalkansız kabloda indüklenen akım değeri



Şekil 12.5. Kalkanlı kabloda indüklenen akım değeri



Şekil 12.6. Kalkan üzerinde indüklenen akım değeri

Analiz sonucunda kalkanlı konfigürasyondaki kalkan üzerinde indüklenen seviye ile kalkansız kablo üzerinde indüklenen seviyelerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Analiz sonuçlarının yakından incelenmesi sonucunda, 360° kalkanlı sonlandırmanın, kalkansız konfigürasyona kıyasla yaklaşık 2,7 dB koruma sağladığı görülmektedir.

13. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, WF1-Level1 kullanarak farklı sonlandırma yöntemlerinin başarımlarını araştırmayı amaçladık. İlk adım olarak, bir akım probu kullanarak R_L 'deki akım değerini ölçtük ve kablo üzerinde indüklenen seviyeleri bulduk. Bu veriler, kalkanlamanın sonlandırılmasının etkilerini anlamamıza yardımcı oldu.

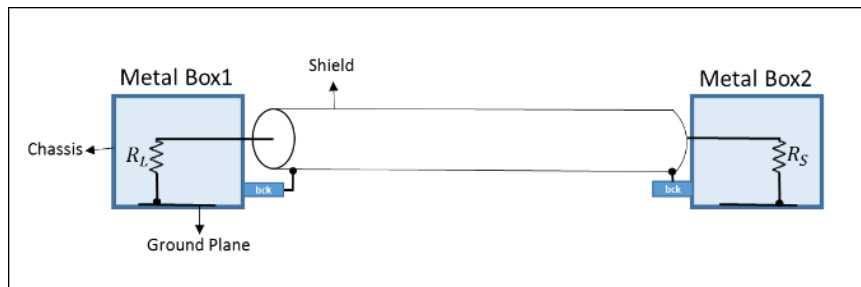
Daha sonra, farklı uzunluklardaki pigtailler yardımı ile pigtail yöntemini inceledik. Amacımız, farklı uzunluktaki pigtaillerin etkisini daha detaylı bir şekilde incelemektir.

Bir sonraki bölümde, çalışmada kullanılan farklı konfigürasyonlar ve test sonuçları ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

13.1. Test Konfigürasyonları

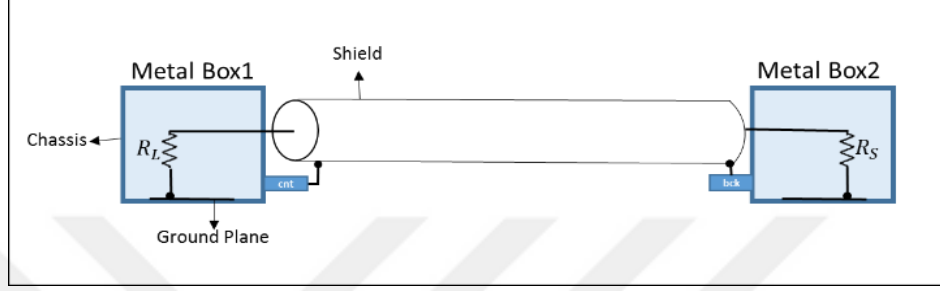
Bu çalışmada, beş farklı konfigürasyonda toplam altı farklı test düzeneği kullanarak çeşitli konfigürasyonların kalkanlama etkinliği incelendi. Tüm konfigürasyon ve test düzeneklerinde Kutu2 tarafında kalkanlama sonlandırması 360° backshell'de (bck) sonlandırıldı. Bu sırada Kutu1 tarafındaki kalkanlama sonlandırması Şekil 11.1'te gösterildiği gibi farklı yöntemlerle sonlandırıldı. Her yöntemin kalkanlama etkinliğini inceleyerek, en iyi kalkan sonlandırma metodu belirlendi.

Bulgularımızın doğruluğunu sağlamak için standartların önerdiği şekilde kutu içindeki zemin düzlemi ile kutu arasındaki direnç değerinin 2,5 miliohm'dan, tüm bağlantılar ve bağlantı noktaları arasındaki bağ değerinin 2,5 miliohm'dan az olması sağlandı. Tüm konfigürasyonlar ve açıklamaları aşağıdaki şekillerde verilmiştir ve okuyucuların metodolojimizi ve bulgularımızı daha iyi anlamaları için her bir konfigürasyonu yakından incelemelerini öneririz.



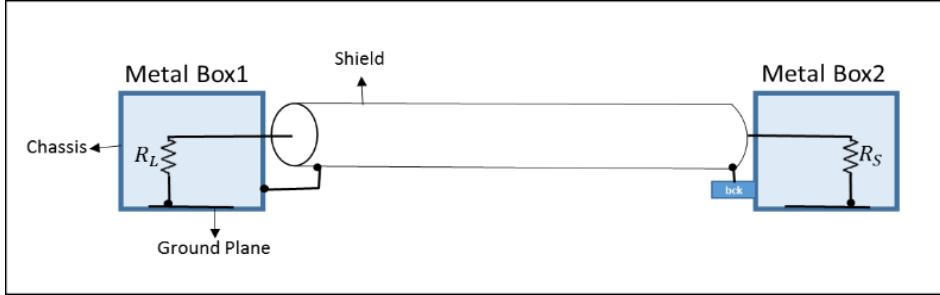
Şekil 13.1. Konfigürasyon 1

Konfigürasyon 1, EMU için özellikle uygun olan bir kalkan sonlandırma yöntemidir. Şekil 13.1, kalkanı çift taraflı olarak sonlandıran 360° backshell (bck) içerdiğini göstermektedir. Bu yöntem, elektromanyetik girişimi azaltmada etkilidir ve elektronik cihazların düzgün çalışmasını sağlamak için önerilen bir yöntemdir. (Bknz. Şekil 11.1, C1)



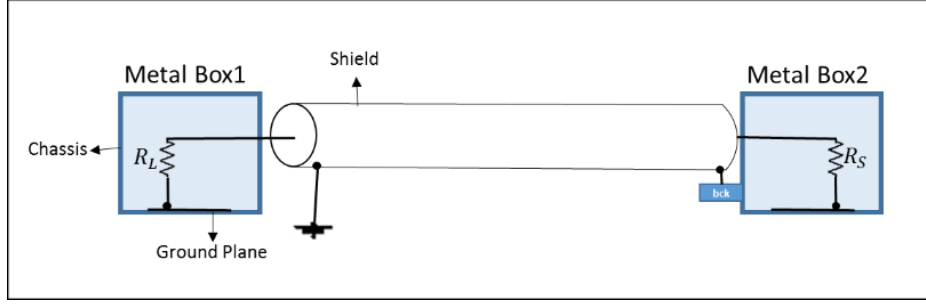
Şekil 13.2. Konfigürasyon 2

Şekil 13.2'de gösterildiği gibi konfigürasyon 2, Box1 tarafında kısa bir pigtail kullanarak kalkanın konektörde (cnt) sonlandırılmasını içerir. Bu pigtail 5 cm uzunluğundadır. (Bknz. Şekil 11.1, C2)



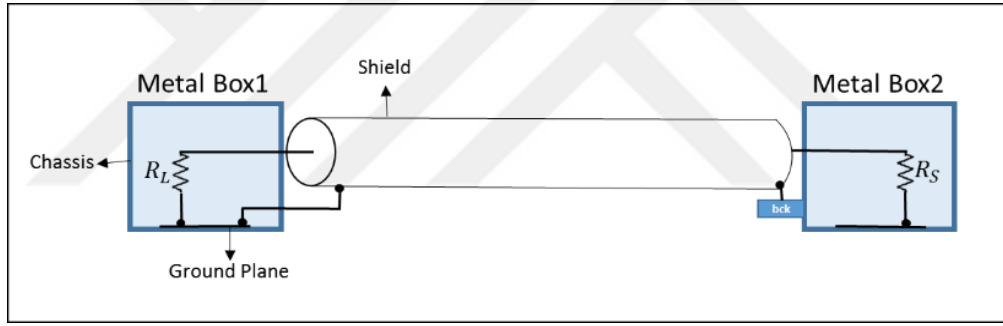
Şekil 13.3. Konfigürasyon 3

Şekil 13.3'de verilen Konfigürasyon 3 ile kalkan, Kutu1 tarafındaki pigtailler yardımıyla ekipmanın şasisinde sonlandırılır. Pigtailin uzunluğu 7 cm'dir. (Bkz. Şekil 11.1, C3)



Şekil 13.4. Konfigürasyon 4

Şekil 13.4'te verilen Konfigürasyon 4 ile kalkan, Kutu1 tarafındaki bir pigtail yardımıyla ekipmandan farklı bir noktada sonlandırılır. Burada, pigtail uzunluğunun etkisini incelemek için iki farklı uzunlukta pigtail kullanılmıştır. Pigtailler sırasıyla 15 cm ve 25 cm olarak test edilmiştir. (Bkz. Şekil 11.1, C4)



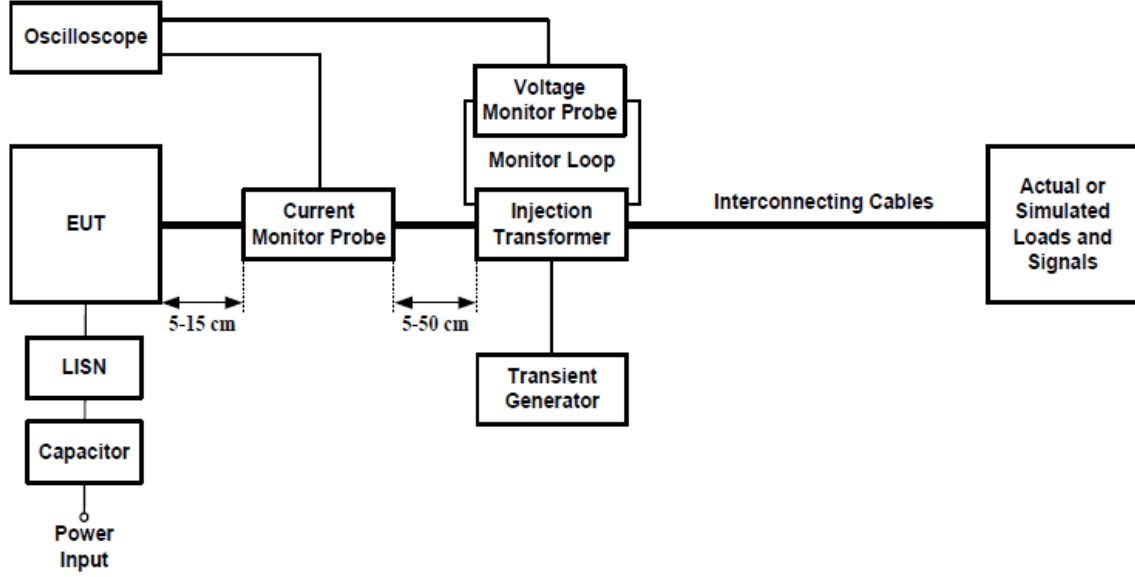
Şekil 13.5. Konfigürasyon 5

Şekil 13.5'te verilen Konfigürasyon 5 ile kalkan, Kutu1 tarafındaki bir pigtail yardımıyla ekipmanın içindeki zemin düzleminde sonlandırılır. EMC açısından en kötü uygulama olarak kabul edilir. (Bkz. Şekil 11.1, C6)

Kalkan sonlandırmasının kalkan performansı üzerindeki etkisi, tüm farklı konfigürasyonlarda testler yapılarak incelenmiştir. Konfigürasyonlar belirlenirken uygulamada en sık karşılaşılan durumlar göz önünde bulundurulmuştur.

13.2. Test Düzeneği ve Bulgular

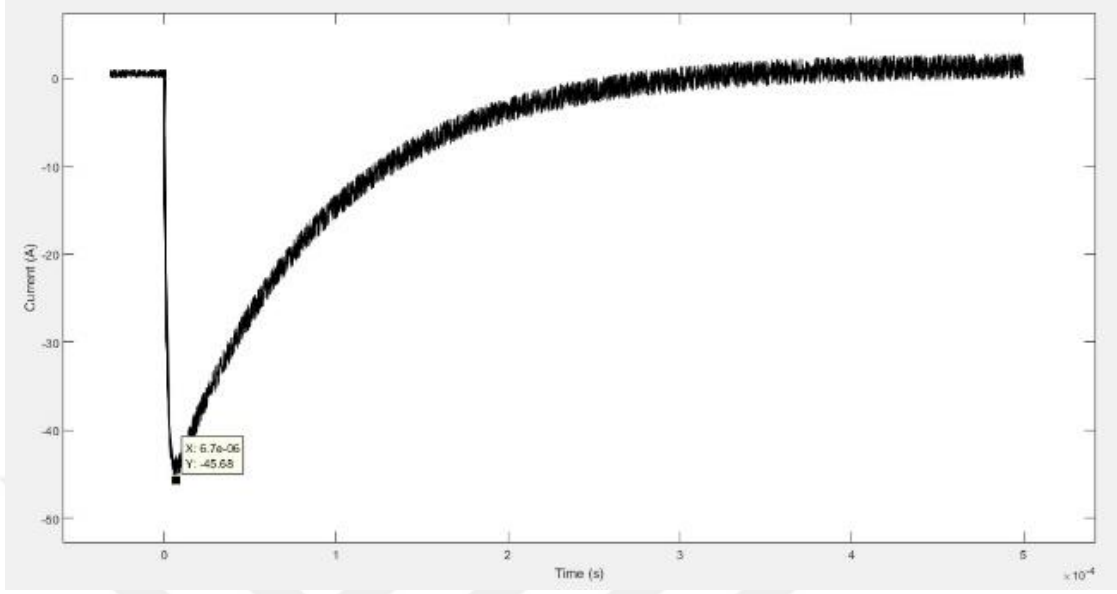
Test Düzeneği, Şekil 13.6'teki genel kurulum şemasında gösterildiği gibi standarda uygun olarak kurulmuştur.



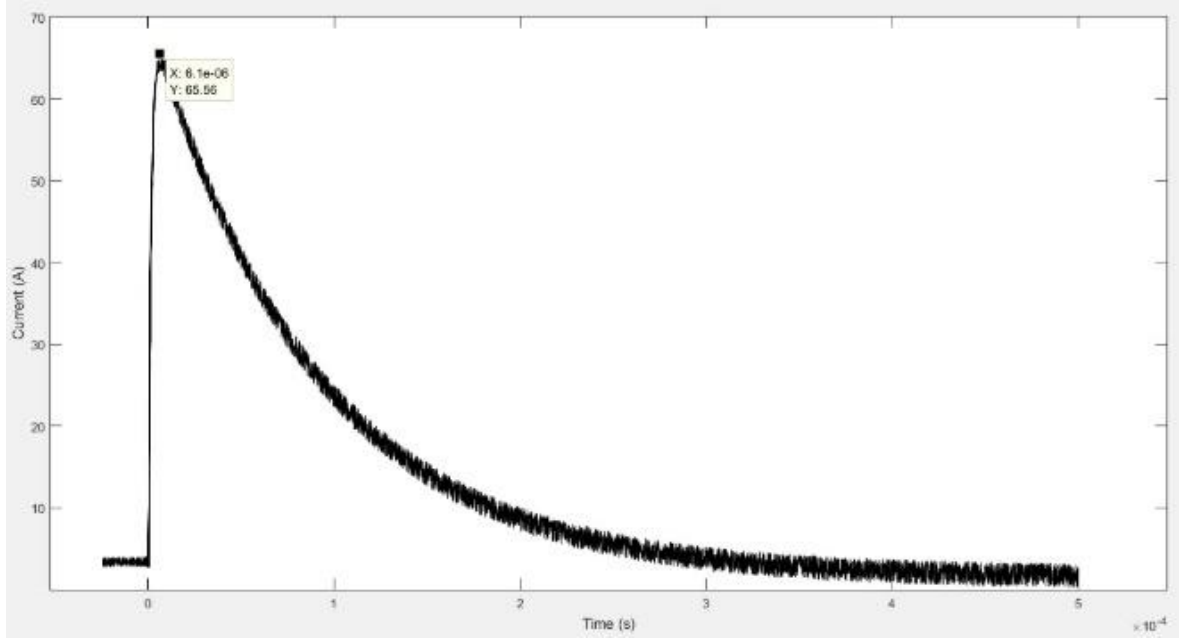
Şekil 13.6. Standart test düzeneği kurulumu, MIL-STD-461G, FIGURE CS117-10

Burada verilen kurulumdan farklı olarak akım, konfigürasyon şekillerinde verilen R_L direnci üzerinden akım probu yardımıyla okunur. Kısa devre akımını okumak için hem R_L hem de R_S dirençlerinin direnç değerleri minimum tutulur. Kablo, toprak düzleminin 2,5 miliohm değerinden daha küçük bir değer ile bağlanmıştır.

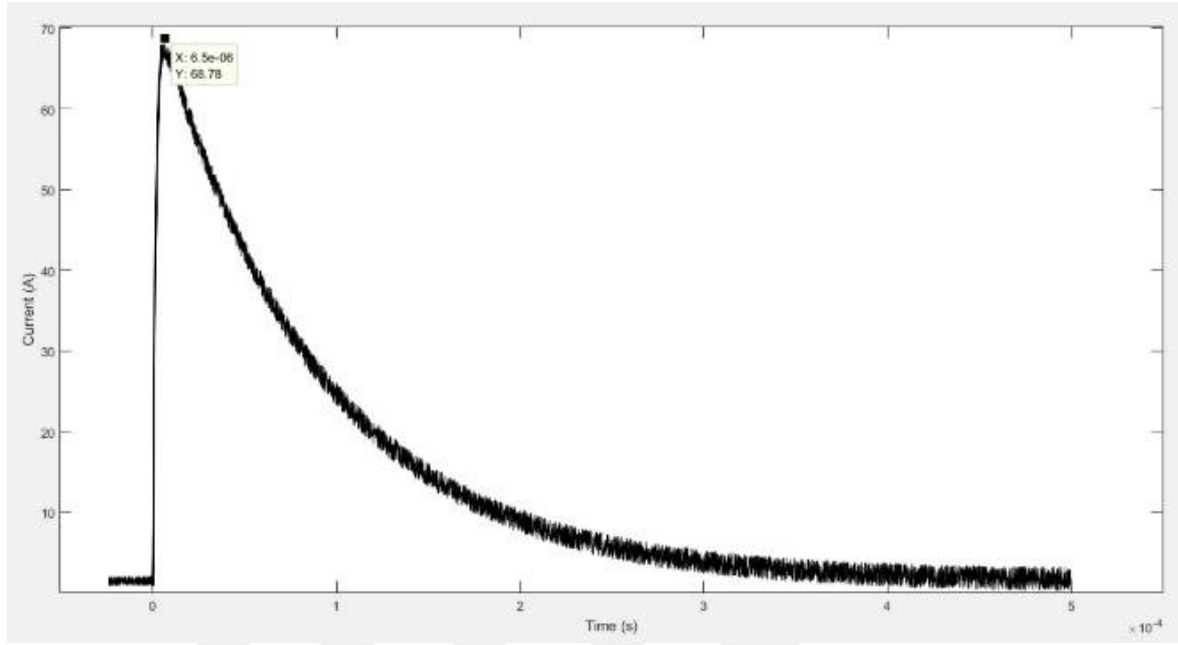
Testler sonucunda elde edilen veriler aşağıda Şekil 13.7'dan Şekil 13.12'e kadar verilmiştir.



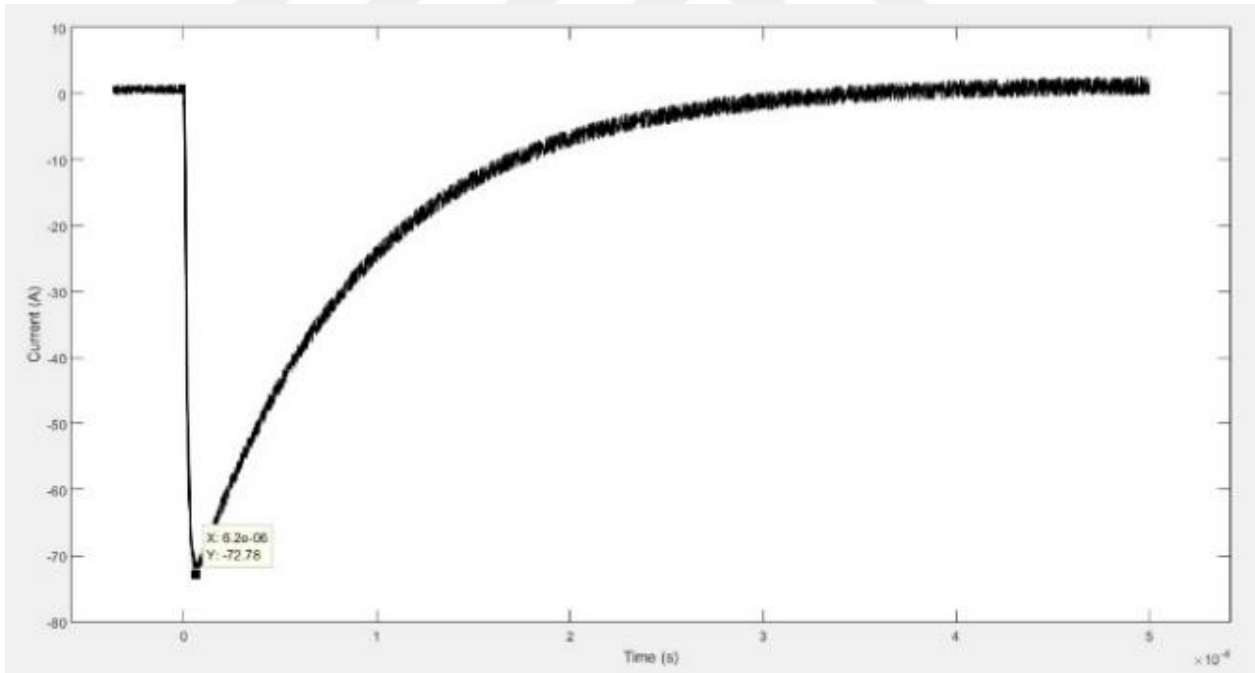
Şekil 13.7. 360° backshell ile sonlandırma (Konfigürasyon 1)



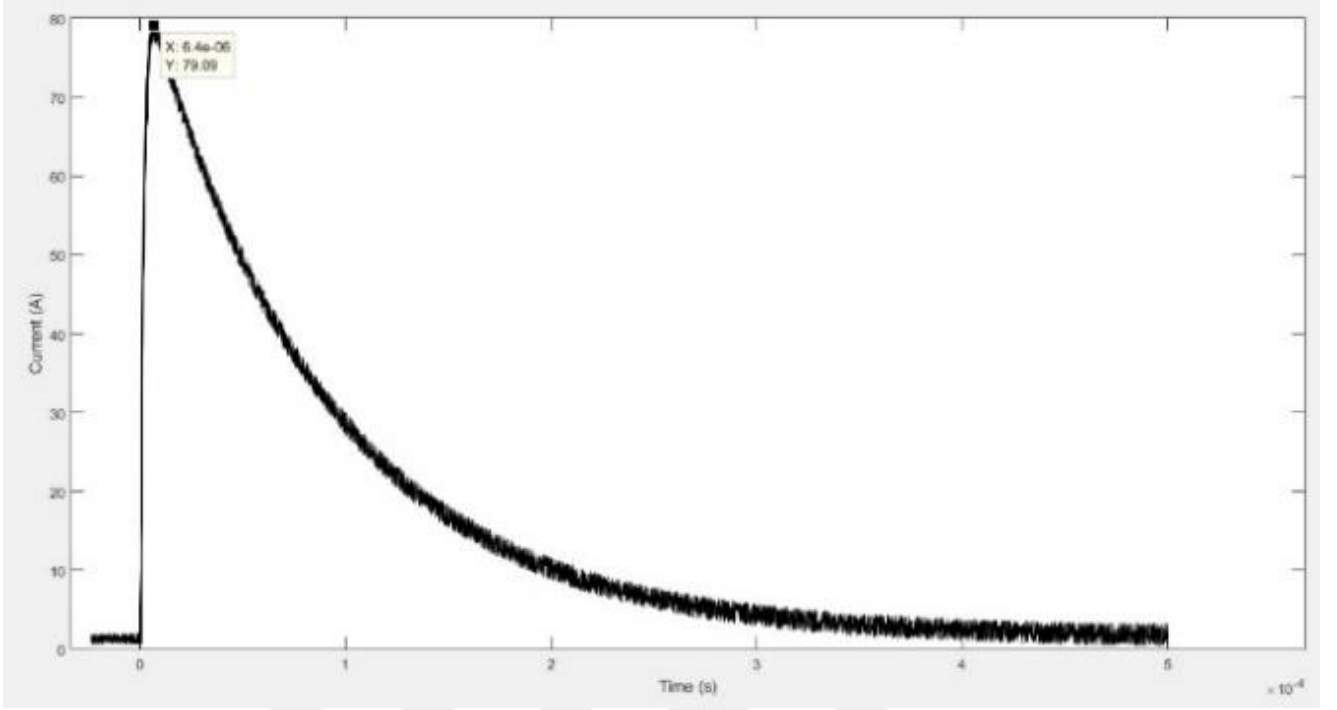
Şekil 13.8. Pigtail (5cm) ile konektörde sonlandırma (Konfigürasyon 2)



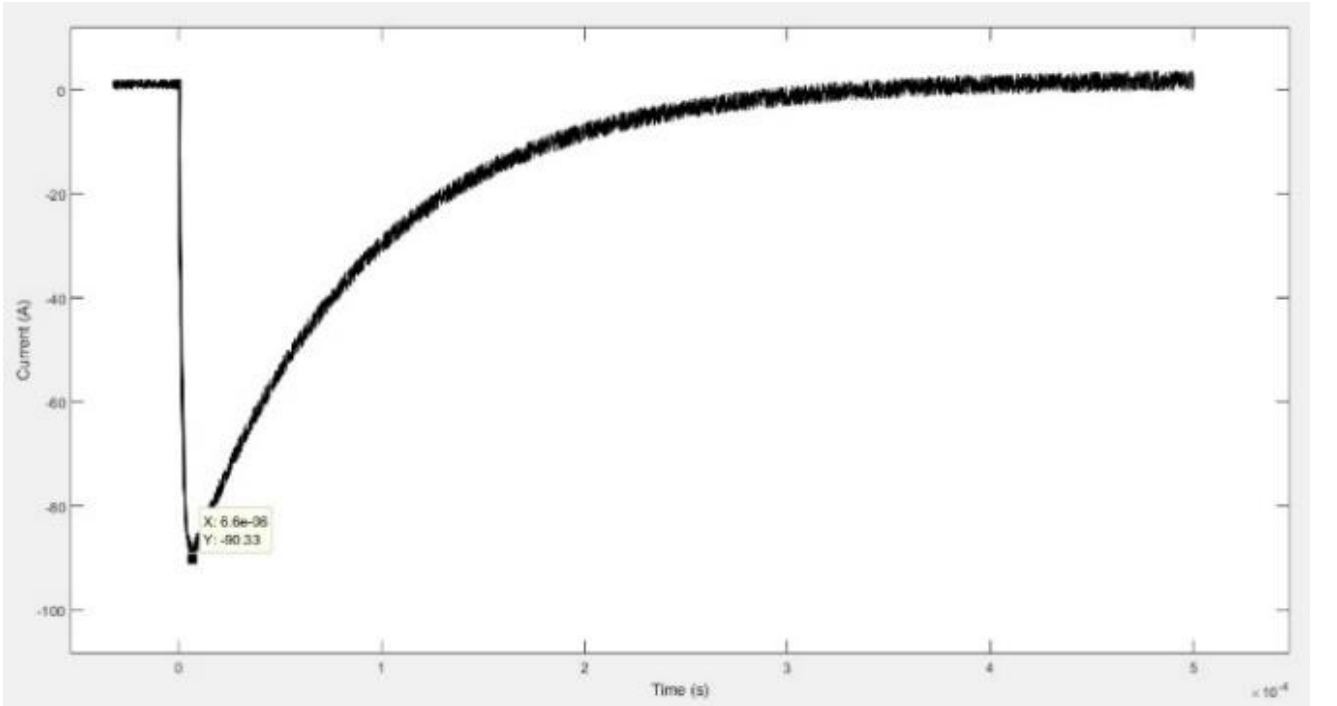
Şekil 13.9. Pigtail (7cm) ile şaside sonlandırma (Konfigürasyon 3)



Şekil 13.10. Pigtail (15 cm) ile ayrı bir noktada sonlandırma (Konfigürasyon 4)



Şekil 13.11. Pigtail (25 cm) ile ayrı bir noktada sonlandırma (Konfigürasyon 4)



Şekil 13.12. Pigtail (15 cm) ile ekipman içinde sonlandırma (Konfigürasyon 5)

Elde edilen veriler incelendiğinde kablo üzerinde indüklenen akım seviyeleri; kalkan 360° backshell ile sonlandırıldığında yaklaşık 45A, kalkan kısa bir pigtail ile konektörde sonlandırıldığında yaklaşık 65A, kalkan kısa bir pigtail ile ekipman şasisinde sonlandırıldığında yaklaşık 68A, kalkan 15 cm'lik bir pigtail ile farklı bir noktada sonlandırıldığında yaklaşık 72A, 25 cm'lik bir pigtail ile farklı bir noktada sonlandırıldığında yaklaşık 79A ve kalkan, pigtail yardımıyla ekipmanın içindeki toprak düzleminde sonlandırıldığında, yaklaşık 90A olarak ölçülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre kalkanlama sonlandırma metotları yaklaşık olarak; 360° backshell'de sonlandırma için 3.46 dB, konektörde sonlandırma için 1.87 dB, şaside sonlandırma için 1.67 dB, 15 cm pigtail sonlandırma için 1.42 dB, 25 cm pigtail sonlandırma için 1.02 dB ve ekipman içerisindeki toprak düzleminde sonlandırma için 0.45 dB koruma sağlamaktadır. Elde edilen veriler kalkanlama sonlandırma yöntemlerinin yıldırımın dolaylı etkilerine karşı başarımının, daha önce literatürde, [17]-[20] ve [51], gösterildiği gibi, yayılan duyarlılığa karşı koruma amacıyla yapılan ve EMU mühendisliği tarafından kullanılan sonlandırma yöntemlerinin performansı ile benzer olduğunu göstermiştir.

14. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışma hem deneysel hem de simülasyon yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve deneylerden elde edilen sonuçlar simülasyon sonuçları ve önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Yıldırımın elektronik üzerindeki dolaylı etkilerine karşı çeşitli kalkanlama sonlandırma tekniklerinin etkinliğinin değerlendirilmesi kapsamında test ve analiz sonuçları incelenmiştir. 360° backshell sonlandırma tekniğinin kullanılmasının oldukça etkili olduğu ve yaklaşık 3 dB'lik koruma sağladığı bulunmuştur. Deney ve simülasyon sonuçları tutarlı olup, 360° backshell'de sonlandırma tekniğinin etkinliğini daha da doğrulamıştır. Genel olarak, bu çalışma, hava taşıtlarında yıldırım çarpmalarına karşı yeterli korumanın önemini ve nitelikli, yıldırıma dayanıklı ekipman ihtiyacını vurgulamaktadır. Ayrıca yapılan testler sonucunda simülasyon sonuçlarının test sonuçları ile tutarlı olduğu gözlemlenmiştir. Bu tutarlılık, simülasyonun doğruluğuna ve güvenilirliğine daha fazla güven vermiştir. Bu nedenle, simülasyon artık gelecekteki sonuçları tahmin etmek ve karar verme süreçlerine bilgi vermek için değerli bir araç olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmada yıldırımın dolaylı etkilerine karşı 360° backshell sonlandırma yönteminin en etkili kalkanlama yöntemi olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık, ekipman içinde yer düzlemi sonlandırmasının en az başarılı olduğu görülmüştür. EMU açısından alınan kalkanlama önlemlerinin, yıldırımın dolaylı etkilerine karşı da eşit derecede başarılı olduğu bulunmuştur.

Bununla birlikte, ekipmanın kalifikasyon testleri esnasında kullanılan sonlandırma yöntemi uçak uygulamaları için uygun değilse, daha iyi bir sonlandırma yönteminin kullanılması önerilir.

Bu çalışmanın sonuçlarının umut verici olmasına rağmen, belirli uygulamalarda yıldırımdan korunma için tasarım yapılırken dikkate alınması gereken ek faktörlerin olabileceğine dikkat etmek önemlidir. Bu nedenle, yıldırımın dolaylı etkilerine karşı mümkün olan en iyi korumayı sağlamak için her zaman kapsamlı bir analiz ve test yapılması önerilir.

Sonuç olarak, hem EMU mühendisliği hem de yıldırımın dolaylı etkilerine karşı koruma için en etkili kalkanlama sonlandırma yöntemi 360° arka kabuk sonlandırmadır.

KAYNAKLAR

- [1] V. Stelmashuk, A.P.J. Deursen & M. Webster, "Sensors for in-flight lightning detection on aircraft", *2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC Europe*, 2008
- [2] E.C. Kişeci & E. Salamcı, "Uçak - Yıldırım Etkileşimi", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, pp. 177-187, 2020
- [3] Z. Duan, "Review of aircraft lightning protection", *High Voltage Engineering*, vol. 43(5), pp. 1393-1399, 2017
- [4] Certification of Aircraft Electrical/Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning (including Amendment N°1 – 26 August 1999), ED-81, EUROCAE, 1996
- [5] Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems, MIL-STD-464D, 2020
- [6] User's Manual for Certification of Aircraft Electrical/Electronic Systems Against the Indirect Effects of Lightning, ARP-5415B, 2020
- [7] Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment, DO-160G, RTCA, 2010
- [8] Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, ARP-5412B, 2013
- [9] Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment, MIL-STD-461G, 2015
- [10] P. Laroche, P. Blanchet, A. Delannoy & F. Issac, "Experimental Studies of Lightning Strike to Aircraft", *Aerospace Lab*, Issue 5, 2012

- [11] J. Grando, X. Ferrières & Muller D., “Code Alice: Introduction des joints résistifs et exploitation Transall”, *Rapport Technique Onera*, 1992
- [12] V. Gobin, “Diffraction par les ouvertures et par des objets tridimensionnels. Application à la mesure des impédances de surface des matériaux bons conducteurs”, Thèse de doctorat de 3ème cycle de l’Université de Lille III, 1989
- [13] J.P. Marque, S. Bertuol & J.P. Parmantier, “Modélisation et analyse de l’environnement électromagnétique induit par un foudroiement. Fonctions de transfert d’un réseau de câbles complexes”, *Actes du 9ème congrès CEM*, 1998
- [14] J. Parmantier, J. Marque, S. Bertuol & U. Thibblin, “Modeling and Analysis of the Electromagnetic Environment on Aircraft and Helicopter Part 2: Coupling to Complex Cable Network”, *SAE Technical Paper*, 1999
- [15] G.M. Kunkel, *Shielding of Electromagnetic Waves: Theory and Practice*, Germany: Springer International Publishing, 2019
- [16] L. Chemartin, P. Lalande, B. Peyrou, A. Chazottes, C. Delalandre, B.G. Chéron & F. Lago, “The Thermo Electrical effects of Lightning on Aircraft Structure: Observation and Modeling of Thermo Electro Mechanical Damaging”, *Aerospace Lab*, Issue 5, 2012
- [17] A.T. Bradley & R. J. Hare, "Effectiveness of shield termination techniques tested with TEM cell and bulk current injection", *2009 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 223-228, 2009
- [18] K. Filik, S. Hajder & G. Masłowski, "Multi-Stroke Lightning Interaction with Wiring Harness: Experimental Tests and Modelling", *Energies*, 14(8):2106, 2021

- [19] F. Moupfouma & Q.C. Luu, "An approach to model electromagnetic threat effects on aircraft wiring/equipment with respect to variations of shield termination arrangements", *IEEE EMC International Symposium*, pp. 69-73, 2001
- [20] A.T. Bradley, "TEM Cell Testing of Cable Noise Reduction Techniques from 2 MHz to 200 MHz – Part 1", *2008 Asia Pacific EMC Symposium*, 2008
- [21] E.F. Vance, *Coupling to Shielded Cables*, Wiley Interscience, 1978
- [22] M. Mardiguian, *Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility: Volume 2 – Grounding and Bonding*, Interference Control Technologies, 1998
- [23] R.B. Schulz, V.C. Plantz & D.R. Brush, "Shielding Theory and Practice", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30(3), 1988
- [24] K.L. Kaiser, *Electromagnetic Compatibility Handbook*, CRC Press, 2005
- [25] K.E. Bow & D.A. Voltz, "Overall shield protects instrument cable from the effects of lightning", *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 269-276, 1994
- [26] D. Morgan, C.J. Hardwick, S.J. Haigh & A.J. Meakins, "Lightning Test of Aircraft: challenge and issues", *Aerospace Lab*, Issue 5, 2012
- [27] Aircraft Lightning Test Methods, ARP-5416A, 2013
- [28] L.A. Kennedy & A. Fridman, *Plasma Physics and Engineering*, Taylor & Francis, 1996
- [29] W.S. Zaengl, E.Kuffel & J.Kuffel, *High Voltage Engineering Fundamentals*, Butterworth-Heinemann, 2000

- [30] F.A. Fisher, J.A. Plumer & R.A. Perala, *Aircraft Lightning Protection Handbook*, LIGHTNING TECHNOLOGIES INC PITTSFIELD MA, 1989
- [31] J.A. Plumer & F.A.Fisher, *Lightning Protection of Aircraft*, NASA, 1977.
- [32] V. Kamaraju & M.S Naidu, *High Voltage Engineering*, 2nd edition. McGrawHill, 1996
- [33] C.L. Wadhwa, *High Voltage Engineering*, New Age International Publishers, 3rd edition
- [34] C.J. Hardwick, *The Lightning Aircraft Interaction*, Cobham, 2018
- [35] L.B. Loeb, *Electrical Coronas*, University of California Press, 1965.
- [36] L.B Loeb & J.M Meek, *The Mechanism of Electric Spark*, Stanford University Press, 1940.
- [37] S.B. Schonland, *Lightning and the Long Electric Spark*, Advancement of science, pp. 306-313, 1962
- [38] A. Delannoy & P. Lalande, “Numerical Methods for Zoning Computation”, *Journal Aerospace*, Dec. 2012
- [39] J. Gokcen, G.Sweers & B. Birch. “Lightning strikes: Protection, Inspection and Repair”, *Boeing Aero Magazine*, 2012
- [40] Aircraft Lightning Zoning, ARP-5414, SAE Aerospace, 2005.
- [41] J.B. O'Loughlin & S.R. Skinner, “General aviation lightning strike report and protection level study”, *Office of Aviation Research, Federal Aviation Administration*, 2004

- [42] Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveform, ARP-5412, SAE Aereospace, 2005
- [43] E. Rupke, *Lightning Direct Effects Handbook*, Lightning Technologies Inc., 2002.
- [44] Aircraft Lightning Test Methods, ED-105, EUROCAE, 2005.
- [45] M.R. Hassan, B. Alemour & O. Badran. "A Review of Using Conductive Composite Materials in Solving Lightening Strike and Ice Accumulation Problems in Aviation", *J. Aerosp. Technol. Manag.*, vol.11, 2019
- [46] C.J Hardwick, *Introduction to Induced Effects*, Cobham, 2018.
- [47] Certification of Aircraft Electrical/Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning, ARP-5413, SAE Aereospace, 1999
- [48] M.D. Heerema, *Designing for electromagnetic compatibility*, 1996
- [49] Electrical integration manual, systems integration group, ISRO satellite centre, 2002
- [50] E.B. Joffe & K. Lock, *Grounds for grounding: A circuit to system handbook*, John Wiley & Sons, 2010
- [51] G. Bhooma et al., "Effectiveness of various shield termination methods of cables", *2016 International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC)*, pp. 1-4, 2016
- [52] H.W. Ott, *Electromagnetic compatibility engineering*, John Wiley & Sons, 2009.

- [53] S. Kara, B. Alboyacı & A. Özyeşil, "Orta Gerilim Yeraltı Güç Kablolarında Zırh Topraklama Yöntemlerinin Analizi", *Politeknik Dergisi*, vol. 25(4), pp. 1587-1594, 2022
- [54] Military Specification: Bonding, Electrical, and Lightning Protection for Aerospace Systems, MIL-B-5087B, 1964
- [55] Protection against lightning – Part 1: General principles, IEC 62305-1:2010, 2010
- [56] M. Apra, M. D'Amore, K. Gigliotti, et al., "Lightning indirect effects certification of a transport aircraft by numerical simulation", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50(3), pp. 513-523, 2008
- [57] C. Gao, S. Song, Y. Guo, et al., "Study of numerical simulation of aircraft attachment points and lightning zoning", *Chinese Journal of Radio Science*, vol. 27(4), pp. 1238-1243, 2012
- [58] T. Zhang, J. Wu, L. Qi, "Analysis of airborne equipment lightning electromagnetic environment based on EMA3D", *Journal of System Simulation*, vol. 26(6), pp. 1350 – 1354, 2014
- [59] Y.F. Qian, B. Du, Z.F. Ye & H.B. Zhang, "Simulation on Transient Electromagnetic Influence of Lightning Strike for Turboprop Engine," *2019 4th International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICEECOT)*, pp. 1-7, 2019