T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILDIRIM ENERJİSİNİN BENZETİM PROGRAMI YARDIMIYLA İNCELENMESİ VE DİKEY BİR İLETKENE YILDIRIM DÜŞMESİ DURUMUNDA ALAN DAĞILIMLARININ s-DOMENİNDE TAHMİNİ

BİLAL TÜTÜNCÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİMDALI

MALATYA
Ocak 2012

Tezin Başlığı: Yıldırım Enerjisinin Benzetim Programı Yardımıyla İncelenmesi ve Dikey Bir İletkene Yıldırım Düşmesi Durumunda Alan Dağılımlarının s-Domeninde Tahmini

Tezi Hazırlayan: Bilal TÜTÜNCÜ

Sınav Tarihi: 20.01.2012

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Prof. Dr. Hafız ALİSOY (Jüri Başkanı) ……..

Yrd. Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ (Danışman) ……..

Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV ……..

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum "Yıldırım Enerjisinin Benzetim Programı Yardımıyla İncelenmesi ve Dikey Bir İletkene Yıldırım Düşmesi Durumunda Alan Dağılımlarının s-Domeninde Tahmini" başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Bilal TÜTÜNCÜ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YILDIRIM ENERJİSİNİN BENZETİM PROGRAMI YARDIMIYLA İNCELENMESİ
VE
DİKEY BİR İLETKENE YILDIRIM DÜŞMESİ DURUMUNDA ALAN DAĞILIMLARININ s-DOMENİNDE TAHMİNİ

Bilal TÜTÜNCÜ
İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
73+ix sayfa
2012

Danışman: Yrd. Doç.Dr. Asım KAYGUSUZ

Yüzyıllardır hakkında çok farklı araştırmalar yapılan ve tabiatta var olan düzenin bir parçası olan yıldırım enerjisinden faydalanmak için farklı metotlar geliştirilmiştir. Çok kuvvetli bir akım olan yıldırımı direk olarak depolayıp kullanmak şimdiye kadar mümkün olmamıştır. Fakat yıldırım akımını dolaylı yollarla kullanmak için farklı fikirler yürütülmüştür. Yıldırım akımıyla açığa çıkan enerji değerini hesaplamak için de birçok farklı deneyler yapılmıştır. Örneğin Amerika'nın Florida eyaletinde uluslararası yıldırım araştırma merkezi kurulmuş ve uygun şartlarda roket ve metal bir tel yardımıyla yıldırım tetiklenerek etrafındaki elektrik alan yardımıyla yıldırımla açığa çıkan enerjinin tahmini hesabı yapılmaya çalışılmıştır.

Bu tezde daha önce yapılan yıldırım enerjisinin tahmini değerleri özetle verildi. Yıldırım yolu empedansı modeliyle ATP programında yıldırımın yükte oluşturduğu gerilim, anlık güç ve enerji değerleri yıldırım akımının üç farklı yarılanma süresine göre analiz edildi. Daha sonra roket ve metal bir telle tetiklenen yıldırımın etrafındaki iletkende indüklediği gerilimin kullanılabileceği bir sistem düşünülerek bu gerilimin simülasyonu yapılmaya çalışıldı. İndüklenen gerilimin, yıldırımın düştüğü iletkenin boyu ve iletkenler arası uzaklıkla olan değişimi MATLAB programıyla simülasyonu yapılarak analiz edildi.

ANAHTAR KELİMELER: Yıldırım enerjisi, Geçici durum analizi, İndüklenme gerilimi, Modelleme, ATP, MATLAB

ABSTRACT

Master Thesis

ANALYSIS OF LIGHTNING ENERGY BY SIMULATION PROGRAM
AND
s-DOMAIN ESTIMATES OF FIELD DISTRIBUTIONS
IN CASE IF LIGHTNING STRIKES A VERTICAL CONDUCTOR

Bilal TÜTÜNCÜ
Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
73+ix pages
2012

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ

Different methods were developed for centuries for using lightning energy that has been made many kind of researchs about and is the part of the nature system. Using the energy of lightning which is a very large amount of current wasn't possible directly until now. But many different ideas carried out by different academics about using this current indirectly and many different experiments were made to measure the energy that occur after lightning. International Lightning Research Center was established at Florida (USA) and lightning was triggered by a metal wire and a rocket to estimate the energy due to electric field arround the stroke point.

In this thesis the estimation that has been made formerly for lightning energy was summarized. Voltage, instantaneous power and energy of lightning on the load was analyzed by using lightning path impedance model on ATP program. Three different half-time were used. Then a voltage that induced by a rocket-triggered lightning was thought. An analysis was made on three diferent values for this induced voltage. The effects of the heights of conductives and distance between conductives on the coupling voltage were simulated on MATLAB program.

KEYWORDS: Lightning Energy, Transient Analysis, Induce Voltage, Modeling, ATP, MATLAB

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı gerçekleştirmemde değerli zaman ve bilgilerinden yararlandığım Yrd. Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ hocama teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tüm hayatım boyunca olduğu gibi yüksek lisans çalışmalarım süresince de bana destekleriyle güç veren değerli aileme ve eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ……..……i

ABSTRACT ……..ii

TEŞEKKÜR ……...iii

İÇİNDEKİLER……..……iv

SİMGELER VE KISALTMALAR……vi

ŞEKİLLER DİZİNİ...……..vii

ÇİZELGELER DİZİNİ……...……..……...ix

1. GİRİŞ…….……..1

2. KURAMSAL TEMELLER ……..6

2.1. Termoelektrikle Elektriklenme…….……8

2.2. Gökgürültüsü……..…10

2.3. Yıldırımın Atmosferdeki Etkileri……...…11

2.4. VLF Yayılımı Kullanarak Yıldırımın Alt İyonosfere Etkilerinin İncelenmesi..12

2.4.1. Yıldırımla indüklenen Elektron Yağışları LEP……..14

2.4.2. Erken/hızlı (early/fast) VLF olayları……..……17

2.5. Alt İyonosferde Yıldırım Kaynaklı Optiksel Olaylar……17

2.5.1. Mavi püskürmeler (jets)……..……18

2.5.2. Işık sütunları (sprites)…….……19

2.5.3. Işık yayılımları (elves)……20

2.6. Yıldırımın Oluşumu……21

2.7. Yıldırımın Sınıflandırılması……...23

2.7.1. Bulut yer boşalmaları……..23

2.7.2. Yerden buluta doğru boşalmalar…….26

2.7.3. Bulutlar arası boşalmalar…….……..……...26

2.7.4. Pozitif kutbiyetli boşalmalar……..26

2.8. Yıldırım Boşalması Sonucu Oluşan İkincil Olaylar……..26

2.8.1. Elektromagnetik darbe etkisi…….26

2.8.2. Elektrostatik darbe etkisi……...27

2.8.3. Geçici toprak akımları……27

2.8.4. Bağlı yük ve ikincil kıvılcımlar…….28
2.9. Yıldırım Enerjisini Hesaplamak için Kullanılan Metotlar……....28
2.9.1. Elektrik alan metodu…….28
2.9.2. Optik Güç ile ölçüm metodu…….32
2.9.3. Akustik Metot……33
3. MATERYAL ve YÖNTEM……...35
3.1. ATP Programı Hakkında Genel Bilgi…….35
3.2. Yıldırım Enerjisi Hesaplama Yöntemleri……...36
3.2.1. Havadaki atlama aralığına göre yıldırım enerjisi hesabı……...36
3.2.2. Yıldırım eşdeğer devresine göre yıldırım enerjisi hesabı…….……36
3.3. MATLAB Programıyla s-Domeninde Yıldırım Enerji Dağılımının Analizi…39
3.3.1. İki Dikey İletkenin Ortak Empedans Hesabı…….39
3.3.2. Kolonları gruplama……44
3.3.3. Yere dik iki iletken arasındaki kuplaj matrisi……45
4. ARAŞTIRMA BULGULARI…….51
4.1. Yıldırım Akımının ATP Programı Benzetimi Yardımıyla Enerji Hesabı…...51
4.1.1. Yıldırım yükselme zamanının yıldırım enerji hesabına etkisi……..……52
4.1.2. Yıldırım yarılanma süresinin yıldırım enerji hesabına etkisi……..55
4.2. Yıldırım Düşen Dikey İletkenlerde İndüklenme Yoluyla Alan Dağılımının MATLAB Benzetimi Sonucu……..55
4.2.1. İletkenler arası mesafenin indüklenen gerilimdeki etkisi……56
4.2.2. Yıldırımın düştüğü iletkenin yüksekliğinin indüklenme gerilimindeki etkisi …….59
4.2.3. Yıldırım düşen dikey iletkenin yakınındaki direğin yüksekliğinin etkisi……61
4.3. Wilson ve Malan'ın Alan Değişim Formüllerinin MATLAB'da Analizi…...64
5. TARTIŞMA VE SONUÇ……..67
6. KAYNAKLAR……...68
8. EKLER……...……70
ÖZGEÇMİŞ……....73

SİMGELER VE KISALTMALAR

VLF	Çok düşük frekans
ELF	Oldukça düşük frekans
LEP	Yıldırım kaynaklı elektron yağışı
TLEs	Geçici parlama olayları
ILRC	Uluslararası yıldırım araştırma merkezi
+CG	Pozitif bulut yer boşalması
-CG	Negatif bulut yer boşalması
P	Güç [W]
I	Akım [A]
V	Gerilim [V]
C	Kapasite [F]
L	Endüktans [H]
R	Direnç [Ω]
Z	Empedans [Ω]
Y	Admitans [℧]
ω	Açısal Frekans [$rad.s^{-1}$]
σ	İletkenlik [$℧.m^{-1}$]
ρ	Özdirenç [Ω.m]
ε	Dielektrik sabiti [$F.m^{-1}$]
μ	Magnetik geçirgenlik [$H.m^{-1}$]
YKEM	Yıldırım kuplaj empedans matrisi
FILT	Hızlı ters Laplace dönüşümü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Yıllık Küresel Yıldırım dağılımı……..7

Şekil 2.2. Yıldırım kaynaklı elektromagnetik dalgaların iyonosfere yayılımı……11

Şekil 2.3. İyonosferde elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi……12

Şekil 2.4. İyonosferin *D* bölgesindeki *Ne* değişimini etkileyen karışıklıklar……..…...14

Şekil 2.5. Elektronun sabit bir magnetik alanda (*B*) *v* hızıyla dairesel hareketi …..…..15

Şekil 2.6. Dalga-parçacık etkileşimi…….…..…..16

Şekil 2.7. Mavi püskürmeler…….……..……..…….....19

Şekil 2.8. 2005 Tarihinde Picdu Midi tarafından yakalanan ışık sütunları ……....20

Şekil 2.9. 2005 yılında Y. Ridge Field İstasyonunda kaydedilen ışık yayılımları..……...20

Şekil 2.10. Yaklaşık 50 aşamada bir "step leader"……..……22

Şekil 2.11. Yerden yukarı doğru yakalama deşarjı ve ana deşarj……22

Şekil 2.12. Negatif bulut-yer yıldırımın (-CG) üç aşamalı gösterimi……..24

Şekil 2.13. Negatif bulut-yer (-CG) yıldırımının basit olarak gösterimi…….....25

Şekil 2.14. Pockels sensor yardımıyla yıldırımın enerji ve güç ölçümü……...….32

Şekil 3.1. Atlama aralığına göre yıldırım enerji hesabı……..…….....36

Şekil 3.2. Yıldırım yolu empedansını içeren yıldırımın eşdeğer modeli ……...37

Şekil 3.3. τ_2 =50 μs için yıldırım akımının dalga şekli ……...……38

Şekil 3.4. τ_2 =1000 μs için yıldırım akımının dalga şekli……...…….38

Şekil 3.5. İki dikey iletkenin ortak empedansı……..……..40

Şekil 3.6. Dikey iletkenin öz karakteristik empedansın gösterimi…….……42

Şekil 3.7. Yere dik iki iletken arasındaki kuplajlık nedeniyle indüklenen gerilimin gösterimi…….47

Şekil 3.8. Topraklama direnci eklenmiş iki dik iletkenin eşdeğeri……48

Şekil 3.9. Yere dik iletkenin empedansının ayrıntılı gösterimi…….……..…...48

Şekil 4.1. I_0=20 kA, τ_1=1.2 μs ve τ_2=50 μs için gerilim……..…….…….51

Şekil 4.2. I_0=20 kA, τ_1=1.2 μs ve τ_2=50 μs için anlık güç……..……...52

Şekil 4.3. Yükselme zamanının 1.2/50 μs olması durumu için enerji ……..….53

Şekil 4.4. Yükselme zamanının 1.5/50 μs olması durumu için enerji …….…..….53

Şekil 4.5. Yükselme zamanının 2/50 μs olması durumu için enerji ……...54

Şekil 4.6. I_0=20 kA, τ_1=1.2 μs ve τ_2=1000 μs için enerji benzetimi……..55

Şekil 4.7.Yıldırım akımının dalga şekli…….…..56
Şekil 4.8. h_1=100 m, h_2=100m ve d=1m iken benzetim sonucu...……..……56
Şekil 4.9. h_1=100 m, h_2=100m ve d=25m iken benzetim sonucu …...……57
Şekil 4.10. h_1=100 m, h_2=100m ve d=50 m iken benzetim sonucu ……..…….….57
Şekil 4.11. h_1=100 m, h_2=100m ve d=100 m iken benzetim sonucu …….…….58
Şekil 4.12. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=10 m iken benzetim sonucu ……59
Şekil 4.13. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=25 m iken benzetim sonucu……..……59
Şekil 4.14. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=50 m iken benzetim sonucu……..60
Şekil 4.15. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=100 m iken benzetim sonucu……60
Şekil 4.16. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=10 m iken benzetim sonucu……..62
Şekil 4.17. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=25 m iken benzetim sonucu……..62
Şekil 4.18. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=50 m iken benzetim sonucu……..63
Şekil 4.19. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=100 m iken benzetim sonucu……63
Şekil 4.20.Wilson'un alan değişim formülünün benzetim sonucu……..65
Şekil 4.21. Malan'ın alan değişim formülünün benzetim sonucu……...65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. LEP olayını tanımlayan bu karakteristiklerin değişim aralıkları…….17
Çizelge 2.2. Bulut-yer boşalmalarının sınıflandırılması ……..……23
Çizelge 2.3. Elektrik alan değişim metoduyla elde edilen tahmini yıldırım enerji değerleri……..30
Çizelge 2.4. Balon yardımıyla yapılan yük ve enerji tahmin değerleri…..…….....31
Çizelge 2.5. Pockels sensor yardımıyla elde edilen güç, enerji ve akım değerleri…....31
Çizelge 2.6. Optik deneyler sonucu elde edilen sonuçlar……...…….33
Çizelge 2.7. Yıldırım kaynaklı enerjinin akustik metotla ölçüm sonuçları…...……..34
Çizelge 4.1. Üç farklı yükselme zamanı için enerji tepe değerleri……..……54
Çizelge 4.2. İletkenler arası mesafe etkisi…….……..58
Çizelge 4.3. Yıldırım düşen iletkenin boyunun indüklenen gerilime etkisi……61
Çizelge 4.4. Yıldırım düşen iletkenin yakınındaki direğin indüklenen gerilimdeki etkisi…….……64

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojiyle beraber yaşadığımız yüzyıl, tarih seyrinde enerji kaynağına en çok ihtiyaç duyulan bir dönem olmuştur. Petrol ve doğalgaz gibi geri dönüşümü olmayan enerji kaynaklarının tükenmeye yüz tutması insanlığı rüzgâr, güneş enerjisi vb. gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönlendirmiştir. Bununla birlikte enerji yakalama fikri de son yıllarda önemli olmaya başlamıştır. Bu tür çalışmalardan biriside yıldırım enerjisini yakalama fikridir. Rüzgâr ve güneş enerjilerinin sürekli olması onlardan faydalanmayı daha kolay bir hale getirmiştir fakat yıldırım mikro saniyelik bir zaman diliminde gerçekleşen yüksek akımlı bir elektriksel boşalma olmasından, yeri ve zamanının önceden tahmin edilemeyişinden henüz bu süper güç bir kayıt altına alınamamıştır. Bulut ile yeryüzü arasında 100 MV'a kadar ulaşabilen bir potansiyel fark olduğu düşünüldüğünde fırtına ve yıldırım sırasında açığa çıkan enerjiden faydalanılabilmesi de yıllarca araştırma konusu olmuştur [1].

Yıldırım ve elektrik arasındaki bağ, yakın geçmişe kadar hala bilinmeyen bir olaydı. 1707 yılında, İngiliz bilim adamı William Wall, elektrik boşalmalarının kıvılcım ve ses yapısı olarak yıldırım veya şimşeğe benzediğini ortaya atan ilk kişi olmuştur. 1745 yılında Pieter van Muschenbrook elektrik kıvılcımlarının yıldırım boşalmalarıyla benzer olduğunu saptamıştır. Benjamin Franklin, 1747 yılında sivri uçlu cisimlerin yıldırımı yakalama özelliğini keşfetmiştir. Yıldırım hakkında görüş belirten bir diğer bilim adamı Newton ise, elektrik kıvılcımlarını küçük ölçekte yıldırımlara benzetmiştir.

1749 yılının Kasım ayında Franklin, yaptığı gözlem ve deneylerini özetleyen bir çalışma sunmuştur. Buna göre elektrik boşalmalarının ışık üretmesi, üretilen ışığın rengi, doğrusal olmayan boşalma kanalı oluşturması, hızlı hareket edebilmesi, metaller tarafından iletilebilmesi, sesi, içinden geçtiği cisme zarar vermesi ve bazı cisimleri yakabilmesi bakımından yıldırıma benzediğini belirtmiştir. Sonuç olarak yıldırım ve elektrik boşalmaları arasında bir bağ olması gerektiğini savunmuştur. Bu açıklamalarından iki hafta sonra Franklin yaklaşık olarak 2,5-3 m olan demir yakalama çubuğunu tanıtmıştır. Bu çubuğun amacı evleri yıldırıma karşı korumadır. Bu aşamada Franklin yıldırım yükünün toprağa iletilmesini sağlayan topraklama iletkenlerini kullanmayı gereksiz görmüştür [2].

1752 yılında, D'Allibart, DeLorre ve Beaufont adlarında üç Fransız, Franklin'in deney ve gözlemlerinden yola çıkarak bir yıldırımlık yapmışlardır. Bu yıldırımlık üçgen seklinde yerleştirilmiş tahta kazık, bunların üstlerine kurulmuş yakalama çubuğu ve topraklama iletkeninden oluşmaktaydı. 10 Mayıs 1752 tarihinde yıldırımlığın konulduğu yere büyük çapta bir yıldırım

düşmüş, yıldırımlığı gözlemek için orada bulunan bir kişi, üzerinde elektrik yanıkları oluşmuş ve yıldırımlığın yanında ölüsü bulunmuştur [2].

Fransızlardan habersiz olarak deneylerine devam eden Franklin, 1753 yılında tasarladığı yıldırımdan koruma sistemini açıklamıştır. Sistemin etkinliği, 1760 yılında koruma düzeninin yerleştirildiği eve yıldırım düşmesi ile gözlemlenebilmiştir. Eve düsen yıldırım eve zarar vermeden yakalama ucunu yakmıştır. Gökyüzündeki bulutların yeryüzüne bakan kısımlarının negatif yüklü olduklarını da Franklin anlayabilmiştir. İlerleyen yıllarda birçok bilim adamı yıldırım olayı hakkında araştırmalar yapmışsa da, bu araştırmalar yıldırım olayının fiziksel boyutu dışına çıkamamıştır [3].

Bundan sonra 19. yüzyılın sonlarına kadar, ancak fotoğraflama ve spektroskopik araçların icadına ve böylece yıldırımın daha yakından incelenebilmesi olanaklarının artmasına kadar yıldırımın genel özelliklerinin anlaşılması konusunda sadece küçük ve önemsiz gelişmeler sağlanmıştır.

20. yüzyıla gelindiğinde ise bu enerji kaynağının akımına bağlı olarak elektrik ve magnetik alanları, bulutun elektrostatiği, nasıl yüklendiği, yıldırımın fiziği, düşüş sıklığı, kutbiyeti, etkileri (iletim hatlarına ve çevreye) gibi birçok açıdan teknolojik imkanlar kullanılarak incelenmiştir. Yıldırımlar için geçerli ve doğru ölçümler ancak 1897-1900 yılları arasında Alman bilim adamı Pockels tarafından yıldırımın oluşturmuş olduğu magnetik alan ölçümlerinin yıldırımın kendisi ile de bağlantılı olduğu bilgisine varıldıktan sonra yapılabilmiştir. Zamanla fotoğraflar bireysel yıldırım çarpmalarının teşhis edilmesindeki deneylerde de kullanılmıştır.

Yıldırım kanalının etrafında oluşturduğu elektrik alanı ölçerek bunu yıldırım fırtınalarının elektriksel yükü ve bunun sonrasında oluşan yıldırım boşalmalarının yapısını tahmin etmekte kullanan ilk kişi C. T. R Wilson olmuştur. Aynı zamanda Wilson yüklü parçacıkları, aşırı doymuş su buharıyla dolu kapalı bir alana maruz bırakarak bunların iyonlaştığını gözlemlemiş, iyonize radyasyonu tespit etmek için kullanılan parçacık detektörü ‘Cloud Chamber (bulut odası)’ nı icat ederek Nobel ödülü almıştır. Bu çalışmasıyla yıldırımın anlaşılmasına büyük katkıda bulunmuştur [3].

1960’a kadar devam eden bu çalışmalar uzay araçları, roket, uçak, ve elektronik cihazların gelişmesi ve yıldırımdan zarar görmesi ve çeşitli şekilde etkilenmesiyle daha da aktif hale gelmiştir. 1967 senesinde yıldırım akımını ölçmek için Newman ilk olarak yıldırımı yapay yolla üretmeyi başarmıştır. Yine aynı sene Berger İsviçre’de şönt direnç ve çıkışına bağlı bir osiloskop kullanarak

akım değerlerini ölçmüş ve bu görüntüleri kaydetmiştir. 1970'li yılların başında bu teknik Fransa Amerika ve Japonya'da da kullanılmıştır [4].

Daha sonraki yıllarda Florida üniversitesinde Elektrik ve Bilgisayar mühendisliği bölümü bünyesinde uluslararası yıldırım araştırma merkezi (ICLR) kurulmuş ve Vladimir Rakov ve Martin Uman tarafından geniş çaplı araştırma, gözlem ve yapay tetiklemeli yıldırım deneyleri yapılmıştır. Bugüne kadar yaklaşık 1000 defa denenen bu tarz yıldırımların 300'e yakını Florida da Blanding kampında gerçekleştirilmiştir. Burada topraklanmış bakır bir kabloya bağlı bir küçük roket çubuğunun yukarda yeterince yüklenmiş bir buluta doğru fırlatılmasıyla yıldırım tetiklenmiş ve bu yıldırım kanalının 0.1 ila 1.6 m lik yatay bölgesindeki elektrik alan dalga şekilleri Pockel sensörleri yardımıyla ölçülmüş ve bu sayede birçok farklı yıldırım örneklerinin ölçülen elektrik alanlarına bağlı olarak enerji ve güç değerleri saptanmıştır [1].

1998 yılında Vladimir Rakov ve Martin Uman tarafından yıldırım deşarjı dört farklı formda modellenmiştir. Bunlar: **Dinamik gaz modeli, Elektromanyetik Model, Dağılmış Parametreli Devre Modeli ve Mühendislik Modeli** [1].

Dinamik gaz modeli veya diğer adıyla fiziksel model kütle, momentum ve enerjinin korunumunu tanımlayan hidrodinamiğin denklemlerinden yola çıkarak, giriş parametresi zamanın bir fonksiyonu olarak tahmini yıldırım kanal akımı iken çıkış modeli ise sıcaklık, basınç ve radyal koordinat ve zamanın bir fonksiyonu olarak kütle yoğunluğudur.

Elektromanyetik model mantığı ise genellikle yıldırım kanalına yakın bir kayıplı ve ince tel antene dayanmaktaydı. Bu modeller uzaktan elektrik ve manyetik alanları hesaplanabilen yıldırım kanalındaki akım dağılımını bulmak için Maxwell denklemlerinin sayısal çözümlerini içeriyordu.

Dağılmış parametreli devre modelinde ise yıldırım; R birim kanal boyundaki direnç, L Endüktans ve C ise Kapasitans olacak şekilde bir dikey R-L-C iletim hattında geçici bir süreçteki elektriksel boşalma gibi ele alınmıştır. Bu model çevresindeki elektrik ve magnetik alanı hesaplamak için zamana ve yüksekliğe bağlı kanal akımını tanımlamak için kullanılmıştır.

Mühendislik modelinde ise zamana ve yüksekliğe bağlı yıldırım kanal akımı, akımın ölçülen kanal tabanındaki değeri temel alınarak modellenmiştir [1].

Daha sonraları yıldırımın enerjisi üzerine yapılan çalışmalarda V. Rakov yer ile bulut arasındaki her yıldırımın yaklaşık 10^9 J enerji içerdiğini hesaplamıştır. 10^9 J = 277.777 kW -saat (1

kW-saat = 3,6 x 10^6 J) eder ki bu değer yaklaşık olarak 100 W'lık 4 adet lambayı bir ay süreyle yakacak bir enerjidir. Ayrıca yıldırımdaki enerjinin tamamı düştüğü noktaya inmez; büyük bir kısmı ısı, ışık, ses ve radyo dalgası olarak kaybolur.

Yeryüzünde belirli bir noktaya yıldırım düşme olasılığı çok düşüktür. Örneğin Rakov Florida'da 1 m^2 'lik bir alana yıldırım düşme olasılığını 10^5 yılda 1 olarak vermiştir ki bu çok düşük bir orandır. Toprağa gömülü yer üstünde uzunlamasına duran cisimlere yıldırım düşme olasılığı daha yüksektir. V. Rakov Florida'da kurulan 60 m yüksekliğindeki bir kuleye yıldırım düşme olasılığını 2 yılda 1 olarak vermiştir ki 4 ampülü bir sene yakmak için kurulması gereken 24 kulenin kaplayacağı alan yaklaşık 1 km^2 'lik bir alandır [5].

Tüm bunlar düşünüldüğünde yıldırım enerjisini kullanmakta iki ana problem olduğu ortaya çıkar:

1. Yıldırım deşarjındaki enerji çok yüksektir ve bu boşalma 10^{-4}-10^{-5} saniye gibi çok kısa bir sürede gerçekleşmektedir.

2. Yıldırım darbelerini yakalamak için çok sayıda yüksek kulelere ihtiyaç duyulacaktır ki bu hiç elverişli değildir [6].

Yıldırımın iletim hatlarına etkisi ve enerji kayıplarına sebep olması bu mevzuda geniş çaplı araştırmalara sebep olmuştur. Amerika ve Kanada'da uzun periyotlu bir gözlem sonucu 230 kV'luk hatlarda yıldırımın % 65'lik bir oranda kayıplara sebep olduğu gözlemlenmiştir. İngiltere'de yapılan bir çalışmada ise 33 kV'luk hatlarda 50.000 hata raporlanmıştır [7].

Yıldırım düştüğü konuma göre enerji iletim hatlarını ya doğrudan ya da dolayısıyla etkilemektedir. Yıldırımın faz hattına, elektrik direğine veya toprak hattına düşmesi sonucu doğrudan, yüksek gerilim hattının yakınında bir yere düşmesiyle de tesirle elektriklenme yoluyla aşırı gerilimlere sebebiyet verdiği görülmüş ve bu aşırı gerilimler esas alınarak iletim hatlarındaki izolatörler tasarlanmıştır.

Faz iletkenine, toprak iletkeni bulunmayan direğe, üzerinde toprak iletkeni bağlı bulunan direğin tepe noktasına ve toprak iletkenine yıldırım düşmesi durumları tek tek incelenmiş ve tüm bu durumlara göre direk modellemeleri yapılmıştır [8].

Enerji dağıtım sistemlerine yıldırım düşmesi sonucu oluşan geçici rejimler analiz edilmiş, enerji dağıtım sistemi toplu parametreli olarak modellenip, EMTP programı kullanılarak yıldırımın

dağıtım hattı yakınına, doğrudan iletim hattına düşmesi durumları için bilgisayar benzetimi gerçekleştirilmiştir [8].

Bu tez çalışmasında öncelikle yıldırım bulutlarının elektrostatiği ve atmosferdeki etkilerinden bahsedilmiştir. Daha sonra yıldırımın oluşumu ve çeşitlerinden olan bulut-yer, bulut-hava, bulut içi ve bulutlar arası yıldırımlar hakkında bilgiler verilmiştir. Yıldırım yolu empedans modeli kullanılarak ATP programı yardımıyla yıldırımın yükte oluşturduğu gerilim, anlık güç ve farklı yarılanma ve yükselme süreleri için enerji değerleri analiz edilmiştir. Daha sonra yıldırımın düştüğü noktadan mesafeye bağlı olarak gerilimin nasıl değiştiğini hesap etmek için analiz yapılmıştır. Bunun için yere dik iki iletkenin ortak empedans hesabı yapılmış ve MATLAB programı yardımıyla birinci iletkene yıldırım düşmesi durumunda parelerindeki diğer iletkende indüklenen gerilim, farklı durumlar için analiz edilmiştir.

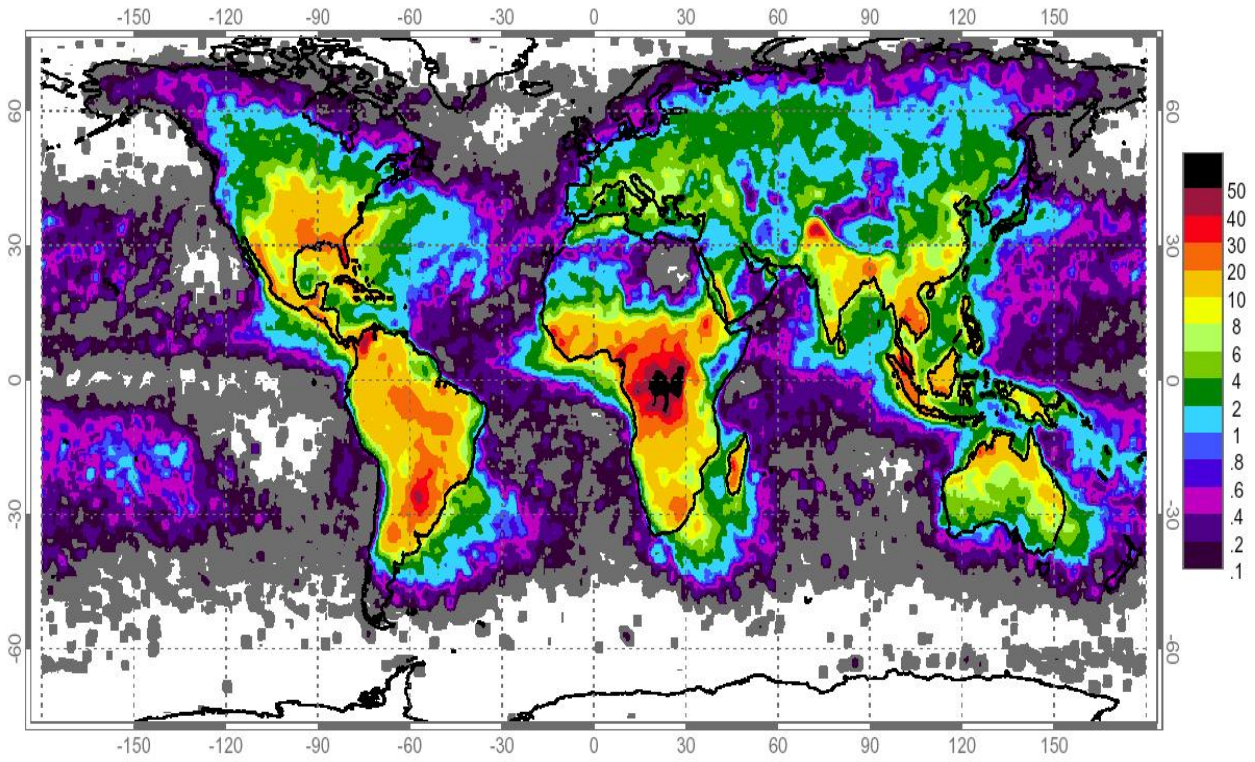
2. KURAMSAL TEMELLER

Dünyamızda kara, deniz ve atmosferdeki kalıcı elektriklenme yaklaşık iki yüzyıldır bilinmektedir. Yüzeyde net negatif yük ve atmosfere doğru yayılan eşit değerde zıt pozitif yük vardır. Genellikle açık havada yüzeyde 100 ila 300 V/m lik bir elektrik alan vardır. Bu değer günlük ve mevsimlik bazı faktörlere göre değişim gösterir. Atmosfer yüksekliğe göre artan bir iletkenliğe sahiptir. Bu iletkenlik ilk olarak galaktik kozmik ışın iyonizasyonu ile sağlanmıştır. Yerin yüzeyine yakın iletkenlik, 5 ila 40 dakikalık (hava kirliliğine göre değişen) bir sürede her hangi bir alanı yayacak bir iletkenliğe sahip olduğundan yerel elektrik alanı sağlayacak neredeyse sürekli bir elektrik akım kaynağına ihtiyaç vardır [3].

Atmosferdeki bulutların büyük bir çoğunluğu yağış ve yıldırım oluşturmadan toplanıp dağılırlar fakat bu bulutlar azda olsa elektrik yüklenebilirler. Bazı bulutlarda ise havada ısı aktivitesi artıkça, dikey ve yatay bulut hareketleri hızlandıkça ve su damla parçacıkları hızlı hareket ettikçe elektrostatikleşme kuvvetlenir. Yıldırımların çoğu kümülonimbus denilen bulutlar tarafından üretilir. Kümülonimbus bulutlarında aşağı-yukarı hava hareketleri, ısı aktiviteleri oldukça kuvvetlidir ve yoğun bir şekilde çok soğuk su ve buz parçacıkları içerirler. Çok az bir kısım ılık bulutlarda da yıldırım gözlenmiştir.[4].

1920 den bu yana yıldırım bulutları küresel elektrik döngüsünün etkin jeneratörleri olarak tanımlanır. Çoğu buluttan yere doğru olan yıldırımlar negatif yükü yere ve deşarj akımının düştüğü noktada ki pozitif yükleri de atmosfere taşır [4].

1977 senesinde Turman ve Edgal küresel elektrik döngüsündeki parametreleri ne denli etkilediğini saptamak için Meteorolojik Savunma Uydu Programıyla (DMSP) bir yıllık periyotta yıldırımın mevsimlere göre coğrafik dağılımı ve düşme oranını kabaca çıkarmışlardır [1]. Daha sonra yıldırım olayının yıllık düşme sıklığını araştırmak için NASA tarafından 1995 yılında atmosfere gönderilen bir detektör yardımıyla beş yıl süreyle gözlem yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.1 ‘de verilmiştir [9].



Şekil 2.1. Yıllık Küresel Yıldırım dağılımı [9].

Bulutlardaki negatif ve pozitif yük ayrışması; doğrusal hava akımları, bulut ve havadaki su partiküllerinin etkileşmesiyle tanımlanmıştır. Bu varsayıma göre pozitif yükler bulutun üst kısmına doğru çıkarken negatif yükler alt kısmında birikir. Bazı araştırmalardaki bulgulara göre negatif yükler atmosfer sıcaklığının -10 ° C ve -20 ° C olduğu yükseklikte yoğunlaşır (yazın deniz seviyesine göre 6-8 km, kışın 1-3 km). Bu bulgular yıldırım bulutlarının yüklenme mekanizmasını anlamada önemli kriterlerdir.

Negatif yüklerin üst tarafındaki pozitif yükler daha derin katmanlara yayılırlar ve negatif yüklerdeki gibi atmosfer sıcaklığıyla bir net ilişki göstermezler. Pozitif yükler fırtınanın büyüklüğüne bağlı olarak -25 ° C ve -60 ° C deki atmosfer sıcaklığında bulunurlar. Bu sıcaklık ise deniz seviyesine göre 8 ve 16 km yüksekliktedir [3-5].

Bulut elektriklenme aşaması iki uzaysal ölçekte ele alınabilir. Birincisi mikro ölçekteki ayrışma aşaması, ikincisi daha geniş ölçekte ayrışma aşaması. Mikro ölçekteki aşamada su ve buz partikülleri yüklenir. Daha geniş ayrışma aşamasında ise büyük yoğunlukta net pozitif ve negatif yükler belirir ve sonunda da yıldırım oluşur. Mikro ölçekteki ayrışma iyon çiftlerinin oluşumu, iyon bağlantıları ve bulutların ve partiküllerin çarpışması sonucu yük ayrışması olaylarını içerir. Daha

geniş ölçekteki yük ayrışma aşamasında ikili kombinasyonlar ve konveksiyon akımlarıyla devam eder [5].

Bulutların elektriklenmesindeki mekanizma ile ilgili çok sayıda hipotez vardır. Elektrik alan ve iyon konsantrasyonundaki değişimlerden dolayı geri beslemeler olabilir ve bu yüzden bulut ve çevresindeki elektriklenmeyi tam olarak belirlemek veya değerlendirmek zordur. Halen bulut ve çevresindeki yüklerin konumu, büyüklüğü ve hareketlerini tanımlamak için daha fazla ölçümlere ihtiyaç vardır [6].

2.1.Termoelektrikle Elektriklenme

Yaz döneminde, güneş enerjisi, atmosferin yeryüzüne yakın olduğu zamanlarda dünyanın yüzeyini ısıtır. Yer yüzeyinde ısınmış olan hava yukarılara doğru çıkmaya ve atmosferde bulunan soğuk ortama girmeye zorlanır. Bu zorlama sonucunda içerisinde bulunacağı ortamı ısıtırken kendiside ani bir soğumaya tabi kalacaktır. Eğer bu karasızlık yeterince büyük olursa, sıcak hava sütunları, konveksiyon adı verilen bir ilerleme içinde, atmosferi yukarı doğru, çok hızlı bir şekilde yarmaya başlayacaktır. Büyük miktardaki bu sıcak hava kütlesi yükseldiğinde, daha soğuk olan hava tabakasının içine girerek yoğunlaşacaktır.

Eğer havada yeterince nem varsa, bu durum çok büyük ve çok yüksek yoğunlukta kümülonimbus bulutlarını oluşturacak ve yıldırımlı bir fırtınaya neden olacaktır. Yıldırımlı bir fırtınanın içinde yıldırım üretim mekanizması, bazı teoriler olmasına rağmen henüz bilinmemektedir. Yıldırımlı bir fırtınanın içindeki güçlü hava akımları, su damlacıklarını atmosferin üst kısımlarındaki donmuş hava kütlesine taşırlar. Bir fırtınanın elektrikselliğinin, kümülonimbus bulutlarının yükseklerine taşınan küçük su damlacıklarının donmasıyla ilişkili olduğu düşünülür [3].

Yıldırım, pozitif ve negatif yüklü bölgeler arasındaki elektriksel enerjisinin açığa çıkmasıyla oluşmaktadır. Bu bölgelerin yüksek bir pozitif ya da negatif yüküne sahip olabilmesi için kumulonimbus bulutunun içerisinde "yük ayrımı" sürecinin meydana gelmesi gerekir. İşte bu yük ayrımının nasıl meydana geldiğine dair teorilerden biride “Termoelektrik etki” dir.

Bu olay kısaca moleküller tarafından serbest bırakılan elektronların buzun sıcak bölgelerine doğru göç etmesidir. Bir madde elektron kazandığı zaman negatif yükle dolar, elektron kaybettiği zaman ise pozitif olmaktadır ki bu süreçte madde iyonlaşmaktadır. Tipik olarak dünyanın yüzeyi negatif değerdedir, troposferin üst katmanları ise pozitif yüklüdür. Bir kümülonimbus bulutunda birtakım süreçler oluşarak bu şablon değişebilir. Bir teori, buz kristallerinin grezil maddesi ile aşırı soğutulmuş su damlacıkları arasındaki etkileşimini öne sürmektedir [6].

Bu damlacıklar sadece bulutlarda meydana gelir çünkü su molekülleri sıvı olarak donma ısısının (32 ºF ya da 0 ºC) altında bulunurlar. Yine de sıcaklık -40ºC ye ulaşırsa su donar. Ufak grezil soğutulmuş su damlacıklarının olduğu bölgeye düşer ve damlacıklara çarpar, böylece su grezilin etrafında donar. Sıvı su molekülleri tarafından açığa çıkan gizli ısı grezilin yüzeysel çevresinde bir sıcaklık artışı meydana getirir. Su damlacıklarını topladığı müddetçe grezil hafif sıcak kalmaya devam edecektir [5].

Bu arada buz kristalleri ve grezil tarafından etkilenmeden donmuş durumda kalan su damlaları da mevcut bulunurlar ve bu su damlaları buz kristalleri etrafındaki hava ile aynı sıcaklıktadırlar, ama grezil biraz daha sıcaktır. Ilık grezile çarpan soğuk buz kristallerinde bulunan elektronlar grezile doğru hareket ederler. Böylelikle, küçük buz kristalleri pozitif olarak, daha büyük olan grezilde negatif olarak yüklenir. Hava, bulut içerisinde dinamik bir şekilde aşağı yukarı hareket ederken küçük buz kristallerini yükseklere taşır, büyük grezil de aşağı seviyelerde kalmaya eğilimlidir. Bulut şimdi yüksek seviyelerde daha çok pozitif değerdedir (P bölgesi), alt seviyelerde ise negatif elektrikle yüklüdür (N bölgesi). Aşağı seviyelerde, çökelme ile beraber oluşan küçük bir pozitif bölge de görülür (P Bölgesi).

Yüklü bir kümülonimbus bulutu yer ya da su yüzeyine doğru hareket ettiğinde, bulutun aşağı yüzeyinde bir pozitif yük oluşur. Benzer yüklerin birbirini ittiği tezinden yola çıkarsak negatif yüklü olan bulutun aşağı kesimi, yerdeki negatif yükü itecek ve burada pozitif bir değer bırakacaktır. Bu pozitif değer yeryüzünde her yerdedir [3]. Her bölgedeki değerlerin güçleri değişkenlik gösterir, yine de +40 Coulomb'luk bir değer P bölgesi için tipik olarak gösterilebilir ki bu bulutun en tepesinde olacaktır, aynı şekilde -40 Coulomb N bölgesi için ideal bir değerdir, buda en aşağı kesimdir. Ayrıca, P bölgesi için +10 Coulomb, yağmur bölgesinin aşağı bölümlerinde tipik bir değer taşır. (1 Coulomb, 1 sn 'de 1 amperlik akım geçtiğinde bir kesitten geçen yük miktarıdır).

Hava iyi bir iletken değildir, buluttaki ve yerdeki yükün büyüklüğü, havanın elektrik akışına gösterdiği direnci yenecek güçte olmalıdır. Benzer şekilde bir bulutta yıldırımın meydana gelmesi için de bu direncin yenilmesi gerekmektedir. Hava iyonlaştığı zaman elektriği daha iyi iletir ve yıldırım daha kolay oluşur. Bu iyonlaşma süreci zincirleme reaksiyon modelindedir. N bölgesinden başlayarak elektronlar, hava moleküllerinden atlayarak yere doğru inen iyonlaşmış dar hava yolunu genişleterek devam ederler. Bu iyonlaşmış patika şeklini almış yollar, her biri 50 m uzunluğunda adımlar şeklinde dağılıp saçılırlar; tıpkı bir ağacın dal budak sarması gibi. Her adım saniyenin milyonda birinden daha az zaman alır ve adımlar arasındaki zamanda saniyenin 50 milyonda biri kadardır. Bu iyonlaşma işlemi "Stepped Leader" yani öncü akım olarak anılır. Öncü akım saniyede

75 mil hızla hareket eder ve düşük parlaklıkta bir kıvılcım özelliğindedir ki çıplak gözle görmek ya da özel bir takım kameralarla tespit edilmeleri mümkün değildir [3].

Yere yaklaştığında, yaklaşık 100 metrede öncü akımın yükü ile yerdeki pozitif elektrik yükünün büyüklüğü öyle çoktur ki havadaki bu iki bölge arasında, yerden başlayan ve yukarıya doğru hareket eden elektrik gerilimi oluşur. Bu yukarıya doğru hareket eden yük pozitif değerdedir ve buna "Leader" (lider) denir. Öncü akımlardan yukarıya doğru yayılan birçok “leader” olabilir. Aşağı doğru hareket eden öncü akımlar ve yukarıya doğru yönlenen “leader”lar arasında, tıpkı iletken bir tele benzeyen bir bağlantı kurulur ve bulutu toprağa bağlayan iyonlaşmış bir hava kanalı oluşmuş olur. Bağlantı kurulduğu zaman, elektrik yükü, aşırı yüklü bir tel gibi bağlantıdan hızlıca hareket ederek geçer [10].

Parçalanmış hava kanalı, havadan daha iyi bir iletken olmasına rağmen, şiddetli akımın içinden geçmesi halinde aşırı yüklenir. Bu dev "kısa devre", yıldırım kanalına ve yıldırımın bütün saçaklarının göz kamaştırıcı bir parlaklıkla parlamasına, ampulün içindeki filaman teli gibi şiddetli bir şekilde ısınmasına neden olur. Akımın bu dolaşımı "first return stroke" (dönüş darbesi) olarak adlandırılır ve gözümüzle görebildiğimiz yıldırım parıltısıdır [4]. Bu ön çarpmadan sonra yükçe daha negatif olan enerji, henüz iyonlaşmamış hava yolundan aşağıya doğru akar, bu akım bu sefer adım şeklinde değil, daha doğrusaldır ve saniyenin 30 da 1’i kadarlık bir zaman süreci içerisinde bir başka karşı darbe meydana getirir. “Dart Leader” veya “return stroke” olarak tanımlanmış bu süreç boyunca yıldırım, titreyen bir görünüme bürünerek birçok kez tekrarlanabilir [3].

2.2. Gök Gürültüsü

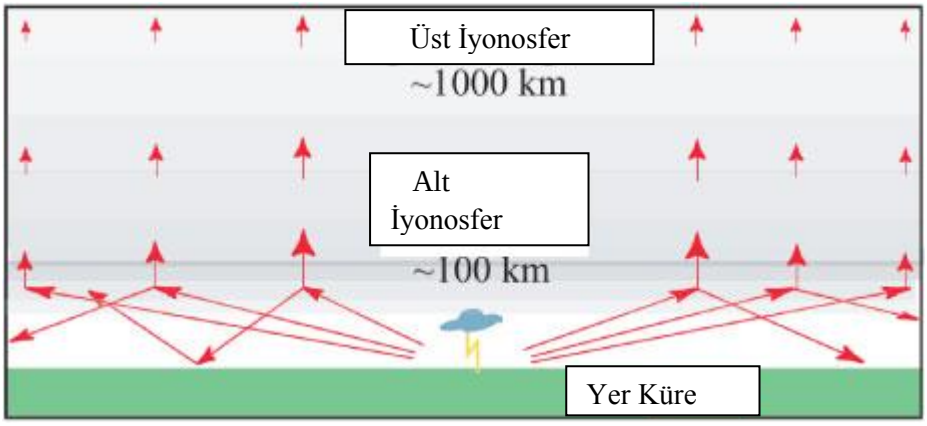
Yıldırım kanalındaki sıcaklık 50.000 Fahrenhayt’tan daha yüksek bir dereceye çıkar, bu saniyenin milyonda biri kadar kısa bir zamanda olur ki, havanın azar azar genişlemesi için bu değer çok hızlıdır. Kanal boyunca yoğun ısıyla oluşan basınç deniz seviyesinde 10 ila 100 Atm arasında bir değere sahiptir. Bu yüksek basınç bölgesi, havanın sıkışmasına yol açarak merkezden dışarı doğru hızla yayılır. Sıkıştırma bölgesi dışta, sesten daha hızlı bir şok dalgası (Shock wave) üretir fakat saniyenin onda biri kadar bir zaman sürecinden sonra normal bir ses dalgası gibi yayılmaya devam eder. Gök gürültüsü de işte bu şok dalgasının oluşturduğu basıncın kulaklarımıza değişik şekillerde gelen sesidir. Saniyeden daha az bir sürede hava, 15.000 Fahrenheit'tan 60.000 Fahrenheit'a kadar ısınır. Hava bu derece yüksek bir sıcaklığa bu kadar kısa sürede ulaştığında hızlı bir şekilde sıkışır ve patlar. Hava moleküllerinin bu hızlı patlaması ve sıkışması, bizim "gök gürültüsü" olarak duyduğumuz ses dalgasına neden olur. Yıldırım çok yakında olduğu zaman ses, gürültülü bir patlama, yarılma, çatırtı olarak duyulacaktır. Gök gürültüsünün süresi, yakındaki bir

yıldırım ile birleştiğinde çok kısa olacaktır. Çok uzaklara çarpabilen yıldırım, daha uzun bir zaman periyodunda, yıldırım parıltılarının uzunluğuna bağlı olarak, sesi, farklı yerlere, farklı zamanlarda ulaşacaktır (genellikle bir kaç mil uzunluğunda). Gök gürültüsü genellikle 10 mil uzaklıktan duyulabilir. Şiddetli yağmur ve rüzgâr bu uzaklığı azaltabilir [10].

2.3. Yıldırımın Atmosferdeki Etkileri

Birkaç kHz ile birçok MHz frekans aralığında bulunan elektromanyetik radyasyonun iyi bilinen bir kaynağı yıldırım deşarjlarıdır [11]. Yıldırım deşarjı menşeli elektromanyetik dalgalar genelde atmosferin iyonize yüksek bölgeleriyle radyasyon kuşaklarına yayılır. Radyasyon Kuşakları bilim adamları tarafından 1958 yılında keşfedilen ve bazen Van Allen Kuşakları olarak ta adlandırılan yerin jeomanyetik alanda sıkışmış enerjili elektron ve iyonların bileşiminden oluşan bölgedir [12]. Son zamanlarda yapılan çalışmalar radyasyon kuşaklarının yıldırımlardan dolaylı veya doğrudan etkilendiğini göstermiştir. Bu bölgede ki yüksek enerjili elektronlar, dünya yörüngesinde sayısı artan bilimsel ve ticari uzay araçları için tehlike arz ettiğinden bu radyasyonun nicelliğini anlamak, kaynağını ve kayıplarını bilmek önemlidir.

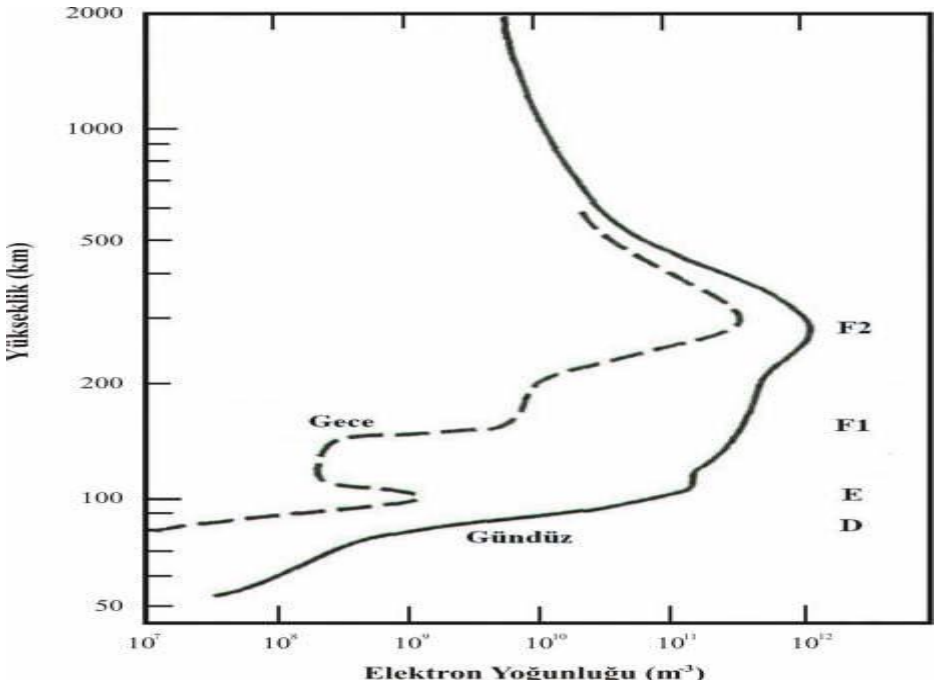
Yapılan gözlemler, yıldırım deşarjlarından kaynaklanan elektromanyetik Whistler dalgalarının enerjik elektronları yayabildiğini ve bunların radyasyon kuşaklarına bir çökelti oluşturduğunu göstermiştir. Elektron yağışına sebep olan bireysel yıldırım vakaları gözlemlenmiş fakat küresel ölçekte sıkışmış radyasyon kayıplarına hangi yıldırım dalgalarının sebep olduğu tam olarak saptanamamıştır [13]. Şekil 2.2'de yıldırım kaynaklı Whistler dalgaların alt iyonosferden üst iyonosfere yayılımı görülmektedir.



Şekil 2.2. Yıldırım kaynaklı elektromagnetik dalgaların iyonosfere yayılımı [14].

2.4. VLF (Very Low Frequency) Yayılımı Kullanarak Yıldırımın Alt İyonosfere Etkilerinin İncelenmesi

İyonosfer D, E, F bölgeleri olarak isimlendirilen ve elektriksel olarak nötr olan iyonlaşmış tabakalardan oluşur. Bu tabakalar, farklı yüksekliklerde farklı oranlardaki bağlanma ve tekrar birleşme süreçleri sonucunda ortaya çıkar. Bu süreçlerin etkisi güneş ve güneş kaynaklı olmayan ışınımlara bağlı olarak gece ve gündüz değişiklik gösterir. Elektron yoğunluğu iyonosfer yapısını belirleyen önemli bir parametredir. Sekil 2.3'de gündüz ve gece için iyonosferde ki elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi verilmiştir. D tabakası, 70–90 km yükseklik arasındadır ve buradaki iyonlaşmanın ana kaynağı güçlü X-Isınları ve Lyman ışımalarıdır [10].



Şekil 2.3. İyonosferde elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi [10].

Çok Düşük Frekanslı (VLF) radyo dalgaları (3–30 kHz) denizcilik (denizaltı) haberleşmeleri, askeri amaçlı haberleşmeler ve uzak mesafe haberleşmelerinde kullanılır. Bu frekansların diğer frekanslardan az kullanılmasının sebebi modülasyonun çok az bilgi taşıyabilmesi ve vericilerinin çok pahalı olmasıdır. VLF dalgaları Yer yüzeyi ile atmosferin iyonlaşmış bölgesinin alt sınırı (alt iyonosfer) arasındaki küresel dalga kılavuzunda yayılırlar ve bu bölge İyonosfer Dalga kılavuzu olarak adlandırılır. Herhangi bir noktaya gelen sinyalin genlik ve fazı iyonosferin elektriksel iletkenliğine bağlıdır. VLF sinyallerinin özellikleri alt iyonosferde oluşan bölgesel karışıklıkların konumlarını ve geçici yapılarını açıklamada kullanılır ve bu teknik VLF Uzaktan Algılama (VLF Remote Sensing) olarak isimlendirir [10].

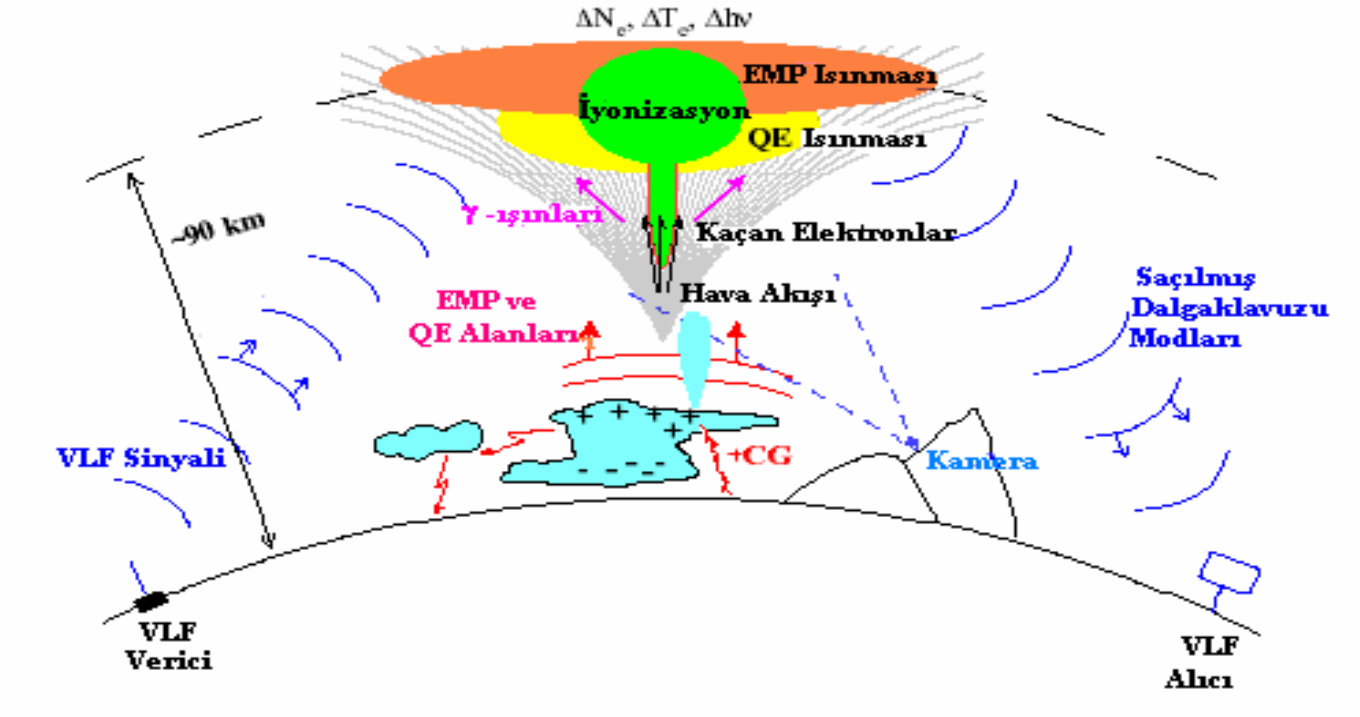
Atmosferdeki VLF deneyleri elektromanyetik dalgaların iyonosferin D bölgesinden yansımasına dayanır. D bölgesi çok düşük frekanstaki radyo dalgaları için iyi bir yansıtıcıdır. Yer'in yüzeyi ve D bölgesinin küresel dalga kılavuzu şekli bu frekanslarda uzun mesafe yayılımına izin verir. D bölgesinde VLF dalgalarının yansıması elektron yoğunluğuna bağlıdır. İyonosferde elektron yoğunluğunu en fazla etkileyen süreç iyonlaşmadır. İyonlaşma; zamanın, yüksekliğin, solar aktivite seviyesinin ve diğer faktörlerin bir fonksiyonudur. Gece süresince D bölgesindeki düşük elektron yoğunluğundan dolayı bu tabakanın radar ve iyon sondalarla incelenmesi mümkün değildir [13] .

Çok düşük frekanslı dalgalar ise D bölgesindeki geçici iyon küresel karışıkları uzaktan algılamak için kullanılan çok güçlü bir yöntemdir. VLF teknikleri kullanılarak D bölgesindeki süreçleri kapsayan birçok çalışma yapılmıştır. Bunlar; güneş patlamaları, meteor yağmurları, nükleer patlamalar, uzaysal gamma ışın patlamaları, Yer'in radyasyon kuşaklarındaki yüksek enerjili elektronların orta enlemlerden iyonosfere gece girişi, Auroral bölgelerdeki enerjili elektronların iyonosfere girişi ve yıldırımların VLF yayılımına etkileridir [12,13].

Alt iyonosferde iletkenlik değişimlerinin doğrudan ve dolaylı sebebi yıldırım boşalmaları sonucunda yayılan elektromanyetik dalgalardır. Ortalama olarak Yer atmosferinde 1800 yıldırımlı fırtına olduğu, saniyede toplam 37 adet boşalma üretildiği ve bir yıldırım boşalmasının yaklaşık 10^9J elektromanyetik enerji yaydığı düşünülürse iyonosferde yıldırıma bağlı oluşan etkilerin araştırılmasının ne kadar önemli olduğu anlaşılır. Yıldırımın sebep olduğu elektromanyetik darbeler tarafından yayılan enerji ELF/VLF bandındadır. Bu darbeler VLF radyo atmosferikleri veya "sferics" olarak bilinirler ve birkaç milisaniye zamanda oluşarak çok uzak mesafelerde yayılabilirler. Bunların ölçülen özellikleri, yıldırım akımları ve yayılım boyunca iyonosfer özellikleri hakkında bilgi sağlamada kullanılırlar. Yıldırımlı fırtınaların sebebi ile ortaya çıkan bu etkiler ortamdaki elektronların birkaç yüz milisaniye süresince ısınmaları, yaklaşık 85 km yükseklikte 10–100 sn süren iyonlaşma değişimleri ve elektron sıcaklığındaki değişimler olarak tanımlanabilinir. Bu karışıklar genellikle VLF sinyalinin genliğinde ve fazında ani değişimlerle ve tekrar sinyalin eski haline gelmesi için bir geri dönüşüm süresiyle tespit edilirler. Sekil 2.4'te iyonosferin D bölgesindeki Ne değişimini ve VLF yayılımını etkileyen karışıklıklar şematik olarak gösterilmiştir [12].

İki tane yıldırım etkili VLF olayı tanımlanmıştır. Bunlar, Erken/Hızlı (Early/Fast) VLF ve LEP (Lightning-induced Electron Precipitation) olaylarıdır. Erken/Hızlı VLF olayları, alt iyonosferdeki iletkenlik üzerinde bir yıldırım boşalmasının *doğrudan* etkisidir. LEP olayı ise

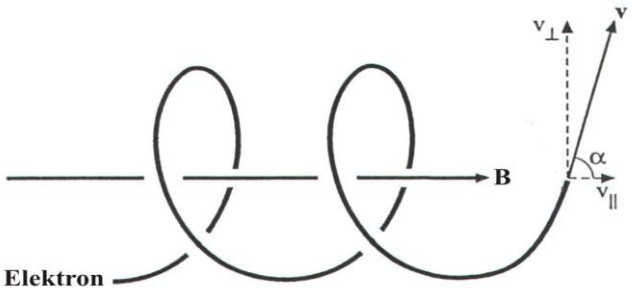
yıldırımın alt iyonosferdeki iletkenlik üzerinde *dolaylı* etkisi olarak tanımlanabilir. Yıldırım boşalması sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik ışıma manyetosfere yayılır ve sıkışan enerjili elektronlarla etkileşerek bunların alt iyonosfere yağmasına sebep olur ve burada ikinci bir iyonlaşma meydana getirir [13].



Şekil 2.4. İyonosferin *D* bölgesindeki *Ne* değişimini karışıklıklar [10].

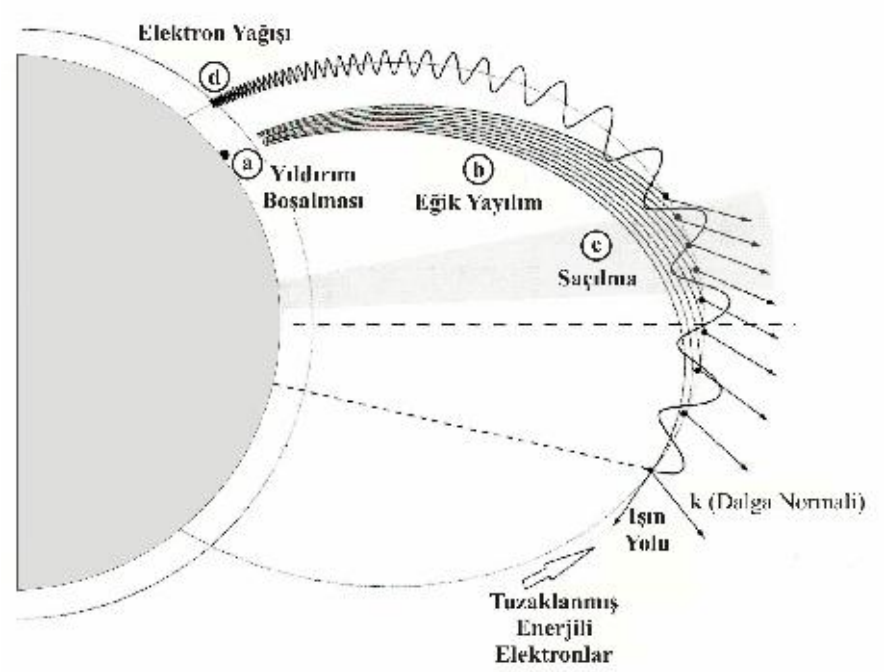
2.4.1. Yıldırımla indüklenen elektron yağışları (LEP)

LEP (Lightning-induced electron precipitation), yani yıldırımla indüklenen elektron yağışlarının mekanizması şu şekildedir: Bireysel yıldırım deşarjları sıkışmış elektronlarla siklotron rezonans (yüklü parçacıkların dairesel bir yörüngede ve sabit bir manyetik alanda hareket etmesi) etkileşimi geçiren Whistler modu dalga paketlerini başlatır. Bu etkileşimler aşağı doğru eğimli koni şeklinde bir elektron saçılımına sebep olur [14]. Şekil 2.5'de elektronun siklotron rezonansı görülmektedir.



Şekil 2.5. Elektronun sabit bir magnetik alanda *(B) v* hızıyla dairesel hareketi [10].

Diğer bir anlatımla; yıldırım boşalması ile yayılan enerjinin bir kısmı manyetosfere kaçar ve burada Whistler dalgaları olarak yayılır. Yer'in radyasyon kuşağındaki sıkışmış elektronlarla etkileşir ve eğim açılarını (pitch angle) değiştirir. Kayıp konisine yakın elektronların alt iyonosfere yağmasına sebep olur. Bu yağan yüksek enerjili elektronlar ikincil iyonlaşmaya neden olur. Alt-iyonosferde LEP'in VLF (very high frequence) kullanarak ölçümleri ve izole fırtınalarda onlarca ve yüzlerce olayların gözlemi sonucu, çok geniş alanların, bireysel yıldırım boşalmalarından etkilendiğini göstermiştir. Sonraki yıldırım menşeli Whistler dalgalarıyla olan etkileşimler, bir fırtınada veya bir seri fırtınadaki birçok bireysel deşarjlarla saçılıma sebep olabilirler. Şekil 2.6'da dalga parçacık etkileşimi görülmektedir. LEP in geçici patlamaları, direk olarak uydu ile ve çok düşük frekanstaki sinyallerin (VLF) yayılımını kullanarak LEP in sebep olduğu iyonosferin D-bölgesi'ndeki ikincil bir iyonizasyon oluşumuyla gözlemlenmiştir [15].



Şekil 2.6. Dalga-parçacık etkileşimi; **a)** Bir yıldırım oluşur ve Whistler dalgalar manyetosfere girer **b)** Dalga enerjisi yerin manyetik alanına bağlı olarak yayılır **c)** Ekvatoral bölge yakınında Whistler sıkışmış elektronlarla etkileşir ve bunları eğim açısından saptırarak saçılmalarına sebep olur **d)** Kayıp konisine saçılan bu elektronlar atmosfere yağarak ikincil bir iyonlaşmaya sebep olurlar [14].

Bu tip olay ilk olarak Mike Trimpi tarafından Antartika'daki VLF verici sinyalleri gözlemleri yapılırken tespit edilmiştir. VLF olayları ile ilgili 1970–1980 yılları arasındaki literatürlerin çoğunda "Trimpi" olayları olarak tanımlanmıştır. VLF verici sinyal tedirginlikleri, saçılan enerjili elektronlar tarafından VLF yansıma yüksekliğindeki ikincil iyonlaşma olarak tanımlanır. Günümüzde uydularla, roketlerle ve alt iyon küresel VLF uzaktan algılama teknikleri ile bu olayları kanıtlayan birçok deneysel sistem vardır [12].

Bir LEP olayını tanımlayan dört adet geçici karakteristik değer vardır. Bunlar;

1. Gecikme Zamanı (Δt): LEP olayına sebep olan yıldırım boşalması ile VLF sinyalinde LEP olayının etkisinin oluşmaya başlaması arasındaki zaman gecikme süresi olarak tanımlanır. Bu süre sırasıyla yıldırım boşalması tarafından üretilen Whistler dalgasının manyetosferde yayılması, dalganın radyasyon kuşaklarındaki elektronlarla etkileşmesi ve Yer'in manyetik alan çizgilerinden saçılan elektronların iyonosfere yağmaya başlamasına kadar geçen zamandır.

2. Oluşum Süresi (td): Olayın başlaması ile genlik değişimindeki artışın son bulması arasındaki zaman olarak tanımlanır. Genlikteki artış pozitif veya negatif olabilir. Ayrıca bu zaman iyonosfere ne kadar süreyle elektron yağışı olduğunu gösterir.

3. Oluşum Şiddetindeki Değişim Miktarı (ΔA): Meydana gelen LEP olayının sinyal genliğindeki değişim miktarıdır ve dB cinsinden tanımlanır. Pozitif veya negatif yönde değişim olabilir. Onun için mutlak değer olarak tanımlanır.

4. Geri Dönüş Zamanı (tr): Sinyalin tekrar eski haline dönmesi için geçen zaman olarak tanımlanır. İyonosferin tekrar normal haline dönmesi için geçen süredir [10].

Çizelge 2.1. LEP olayını tanımlayan bu karakteristiklerin değişim aralıkları [15].

LEP Karakteristikleri	**Değişim Aralıkları**
Gecikme zamanı	0,2 sn ≤ Δt ≤ 2.5 sn
Oluşum süresi	0.5 sn ≤ td ≤ 5 sn
Oluşum şiddetindeki değişim miktarı	0.5 dB ≤ | ΔA | ≥ 10 dB
Geri dönüşüm zamanı	10 sn ≤ tr ≤ 100 sn

2.4.2. Erken/hızlı (early / fast) vlf olayları

Erken/Hızlı VLF olayları yıldırım boşalmalarının alt iyonosferin iletkenliğini doğrudan etkilemesi sonucunda ortaya çıkar ve neden olan yıldırım boşalmasının ardından yaklaşık 20 msn içinde oluşur ve oldukça yavaş bir geri dönüşüm (onlarca saniye) gösterir. Bu olayların altında yatan fiziksel mekanizma henüz nicel olarak tam anlaşılamamıştır. Elektrostatik (Quasi-electrostatic) fırtına bulutları iyonosferin D bölgesini ısıtabilirler ve aktif bir yıldırım etkili fırtına boyunca bu bölgenin iletkenliğini geçici olarak değiştirebilir [13].

Fırtına bulutunun yükündeki yıldırım-etkili değişimler, D bölgesinin yerel ısıtma/soğutma sabit değerlerinin civarında küçük değişimlere sebep olurlar ve bu da alt iyonosferde yayılan VLF sinyallerinin gece yansıma yüksekliğini (~85 km) etkiler. Bir tipik Erken/Hızlı olayın başlangıcı neden olan yıldırımla eş zamanlı olmalıdır. Erken/Hızlı VLF olayları alıcı ve verici arasındaki sinyalin 50 km yakınında yıldırım boşalmaları olursa gözlenir ve bu karışıklıklar iyonosferde yatay olarak yaklaşık 100–150 km bir uzunluğa sahiptirler [10].

2.5. Alt İyonosferde Yıldırım Kaynaklı Optiksel Olaylar

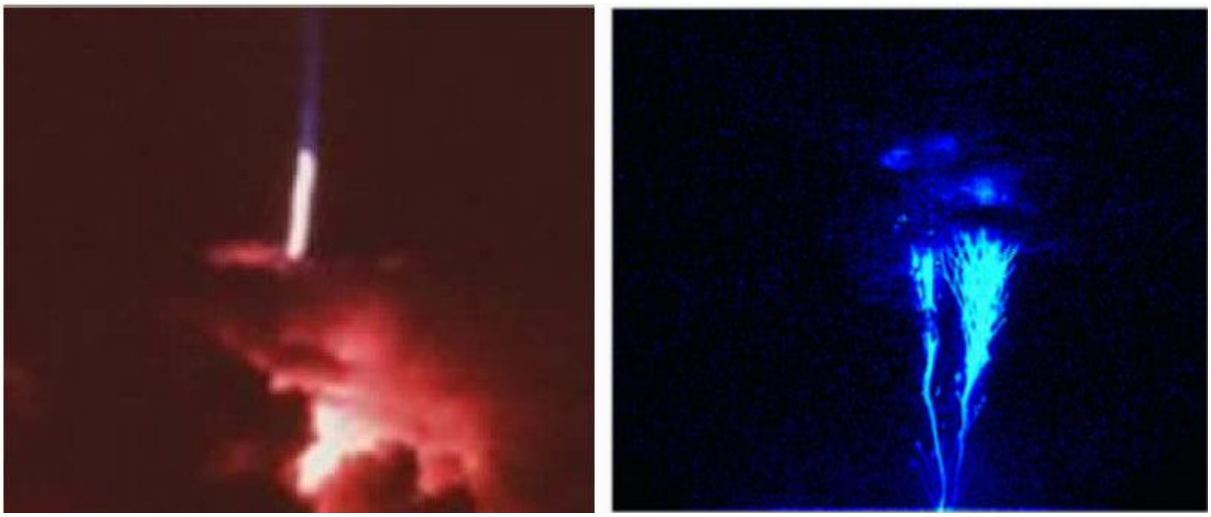
Son yüzyılın yarısından itibaren fırtınaların üzerinde oluşan geçici optiksel parlamalara ait gözlemlere ve bilimsel çalışmalara başlanmıştır. Wilson gözlemlendiği bu boşalmaları "gökyüzüne doğru yeşilimsi rengin pervane biçiminde parlama olarak yayılması" seklinde tanımlamıştır. Ayrıca pilotlar tarafından gözlemlenen ve rapor edilen birçok parlama olayı vardır [16]. Bu konuda ilk

bilimsel çalışmalar 1989 yılında başlamıştır. Günümüzde ışık sütunları olarak bilinen bu olayın ilk görüntüsü 5 Temmuz 1989 yılında Minnesota Üniversitesinde görevli araştırmacılar tarafından O'Brien Gözlemevinde kazara tespit edilmiştir. Düşük-ışık-seviyeli bir kamera test edilirken bulutların üstünden yukarı doğru yaklaşık 30 ms süren ikiz parlamalar kaydedilmiştir. Bu bilimsel keşifle birlikte, troposfer ve üst atmosfer ile alt iyonosfer, yaklaşık 100 km'ye kadar olan yükseklik aralığında oluşan elektriksel olayların yapılarının araştırılmasına ilgi artmıştır. Uydu, uçak, uzay mekiklerinin üzerine monte edilmiş cihazlarla, yeryüzündeki kameralarla ve Uluslararası Uzay istasyonları tarafından sayısız gözlemler yapılmıştır [16].

Bu optiksel yayılmalar, Geçici Işık Saçan Olaylar (Transient Luminous Events) TLEs olarak adlandırılmışlardır. TLEs'lerin özellikleri ve üretim mekanizmaları hakkında yoğun bir şekilde hem deneysel hem de teoriksel çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle, TLEs üreten yıldırımlı fırtınalar, Amerika'da çok geniş bir alanda oluşmaktadır ve sayısız gözlemsel araştırmalar yapılmıştır. TLEs'ler ayrıca Japonya'da**,** Avusturalya'da, Afrika'da, Orta ve Güney Amerika'da ve yakın zamanda Avrupa'da gözlemlenmiştir. Şekillerine, oluşma sürelerine ve oluştukları yüksekliklere bağlı olarak ***mavi püskürmeler, ışık sütunları*** **ve** ***ışık yayılımları*** olarak üç ana gruba ayrılmışlardır [17].

2.5.1. Mavi püskürmeler (Jets)

Püskürmeler yıldırım bulutunun aktif kısmının üzerinden yayılan koyu mavi ışığın oluşturduğu koni biçimli ışınlar kümesidir ve ~100 kms^{-1} hızla ve ~40-50 km yüksekliklere doğru yayılırlar. ***Mavi Püskürmeler*** (Blue Jets), yaklaşık 250 ms ile en uzun ömürlü TLEs'lerdir. Gözlemler bunların sadece troposferdeki yıldırımlara bağlı olmadığını göstermiştir. Oluşumları, kuvvetli dolu aktivitesinin ve aktif olarak negatif bulut-toprak (-CG) boşalmalarının olduğu fırtınalara bağlıdır [18]. Şekil 2.7'de iki mavi püskürme örneği verilmiştir.

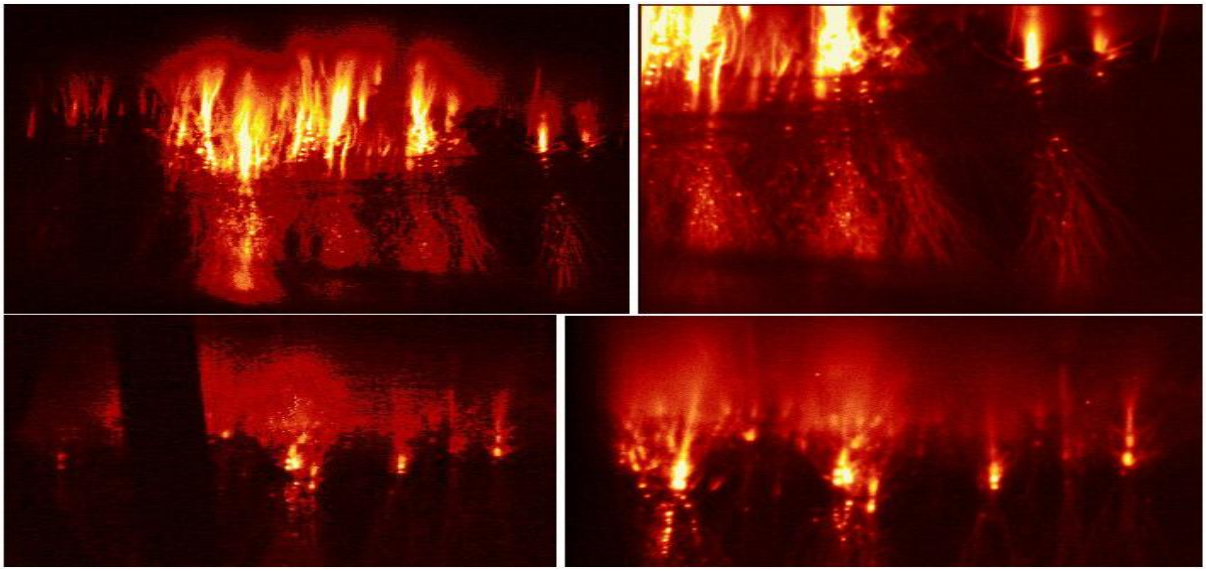


(**a**) (**b**)

Şekil 2.7. Mavi püskürmeler **(a)** Avustralya'da kaydedilen mavi püskürme **(b)** Arecibo Gözlemevinde kaydedilen alt iyonosfer ile yıldırım bulutu arasındaki bağlantıyı saptayan ilk büyük mavi püskürme [17].

2.5.2. Işık sütunları (sprites)

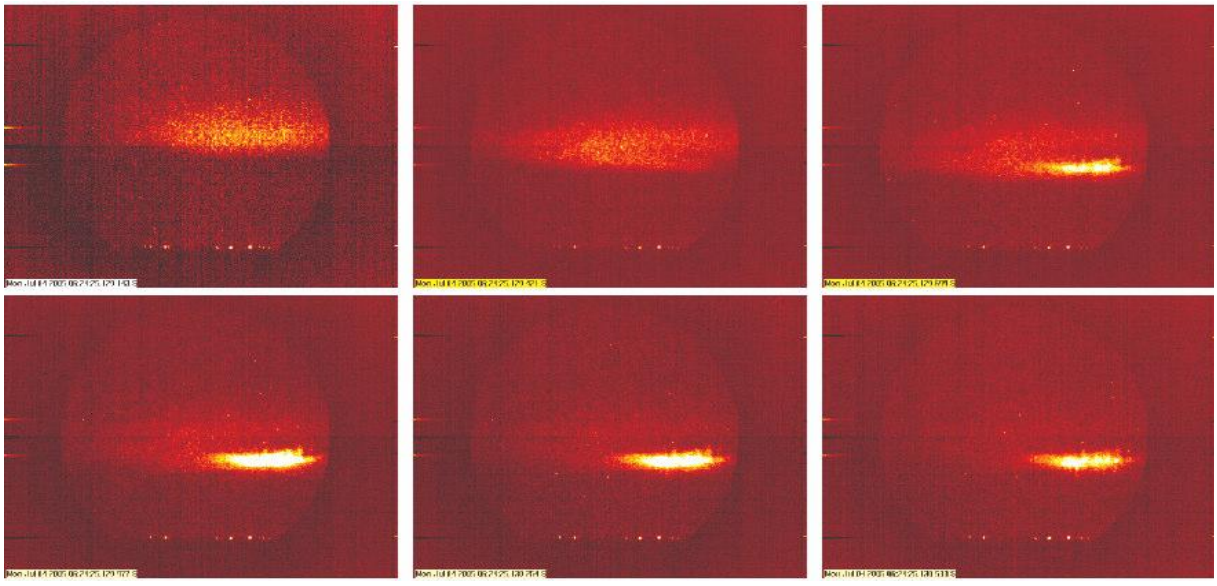
Işık Sütunları, tek veya demet olarak görülebilir. Yaklaşık 40–95 km aralığındaki yüksekliklerde oluşurlar ve yanal olarak yaklaşık 25–50 km civarında bir genişliğe sahiptirler. Fotometrik ve yakın zamanda yapılan optiksel gözlemler ışık sütunlarının ilk olarak ~70 km civarında oluşmaya başladığını ve ~10–100 msn zaman aralığında aşağı ve yukarı doğru yayıldığını ortaya koymaktadır. Işık sütunları, pozitif bulut-toprak (+CG) boşalmalarından hemen sonra oluşur. Işık sütunları farklı karmaşık biçimler gösterirler. Teleskopik gözlemler sonucunda yanal boyutlarının on metre ile birkaç yüz metre arasında değişen karmaşık bir yapıda olduğunu ortaya koymuştur [19,20]. Şekil 2.8'de 2005 Tarihinde elde edilen bazı ışık sütunlarının görüntüleri verildi.



Şekil 2.8. 2005 Tarihinde Picdu Midi tarafından yakalanan ışık sütunları [20].

2.5.3. Işık yayılımları (elves)

Işık Yayılımları (Emissions of Light and VLF perturbations due to Electromagnetic pulse Sources), ilk olarak Amerika'da Sprites'95 araştırması sırasında çok kanallı yüksek hızlı fotometre ve görüntü kuvvetlendiricili CCD kameralar kullanılarak gözlemlenmiştir. Yaklaşık 5–105 km aralığındaki yüksekliklerde bulut-toprak boşalmalarından (>60 kA) yaklaşık 350 µsn sonra oluşurlar. Parlaklık yatay olarak bir yüzük seklinde genişler ve yanal genişliği 500 km'ye kadar çıkabilir. 1 ms'den daha az bir ömürleri vardır [21]. Şekil 2.9'da 2005 yılında kaydedilen bazı ışık yayılımının görüntüleri verildi.



Şekil 2.9. 2005 yılında Y. Ridge Field İstasyonunda kaydedilen ışık yayılımları [21].

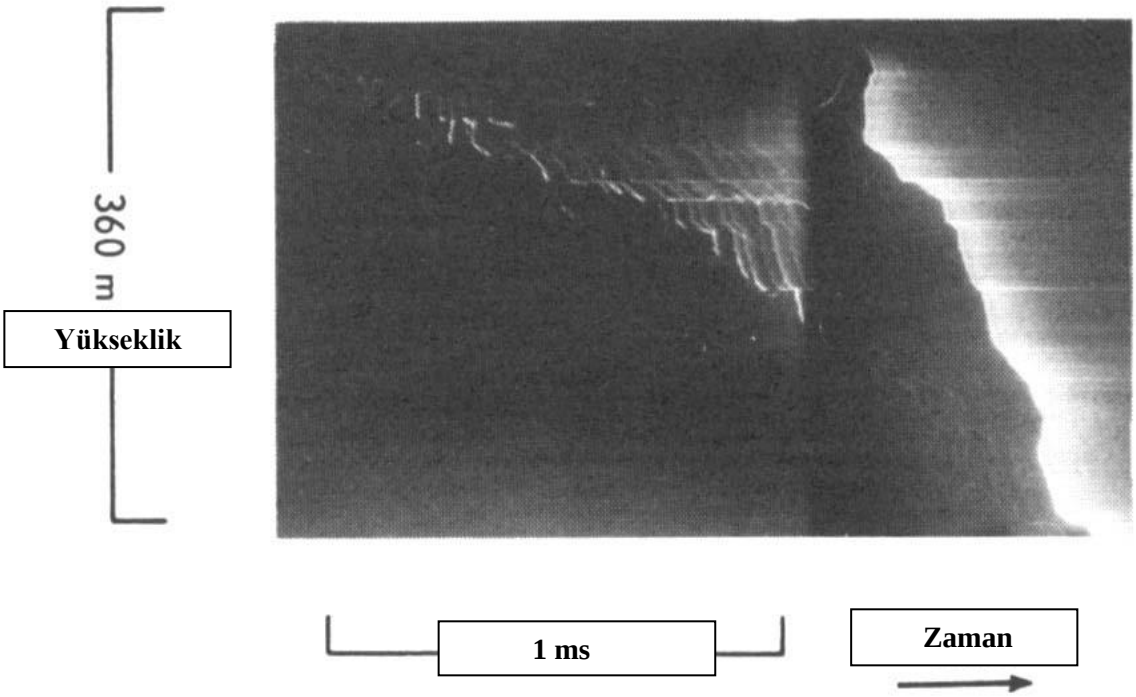
2.6. Yıldırımın Oluşumu

Yıldırım ve şimşek tabiatta var olan her olay gibi kurulu bir düzenin devamını sağlamakta rol alan fiziksel bir olaydır. Yıldırım, ortamdaki elektrostatik dengeyi sağlayan ve yüksek gerilim içeren ani sayılabilecek bir elektriksel boşalmadır. Yıldırımı, büyük ölçekte birikmiş statik elektrik yükünün dengelenmesi gibi ele alabiliriz. Yıldırım da tıpkı statik elektrik gibi, zıt yüklü cisimlerdeki yüklerin denge konumuna geçme isteğinden kaynaklanan bir etkileşimden meydana gelir. Statik elektriğe benzer olarak bulut içindeki hava akımları zıt yüklerin ayrılmasını sağlayarak yıldırım olayı için elverişli bir ortam oluşmasına zemin hazırlar.

Yıldırım boşalması, büyük elektrot açıklıklarındaki kanal boşalması şeklinde meydana gelir. Yıldırım boşalmasının oluşabilmesi için bulut etrafındaki elektrik alan şiddetinin yaklaşık 2500 kV/m değerine ulaşması gerekir. Fırtına ile beraber oluşan potansiyel fark ve elektriksel alan şiddeti yükselmeye devam eder. Belli bir alan şiddeti oluştuğu zaman, bulutla yeryüzü arasındaki hava yalıtkanlık özelliğini kaybeder ve yalıtkanlık kırılmış olur. Kırılma için gerekli elektriksel alan şiddeti değeri atmosfer özelliklerine bağlıdır [3].

Böyle bir şiddet altında bulutun yeryüzüne bakan yüzeyinden kısa veya uzun süreli duraklamalarla kademeli bir şekilde ileri sıçramalar halinde toprağa doğru bir elektron demeti harekete geçer. Yere doğru olan bu ilk akım en az dirence sahip yolu izleme eğilimindedir. Elektron demeti, her ileri sıçrayışta 10-100 metre kadar yol alır. Sıçramalar arasında 30-90 mikrosaniyelik duraksamalar olduğundan bunu gözle görmek mümkün değildir. Bulutdan yere doğru oluşan bu elektron hareketine “Step leader” yani “pilot deşarj” denir [5]. Şekil 2.10’da yaklaşık 50 aşamada bir “step leader” görülmektedir.

Yıldırım yere yaklaşmaya başladıkça yeryüzündeki sivrilmiş noktalarda yoğunlaşan elektrik alan şiddetleri, bu noktalardan bulutlara doğru gelişen “yer deşarjı” adı verilen deşarjlar meydana getirirler. Bir yıldırım olayında boşalan elektrik yük miktarı genelde 10 kA-saniye altında, şiddetli yıldırımlarda ise 200 kA-saniyelik boşalmalar oluşur. Meydana gelen iletken kanal yerden yükselen yakalama deşarjı ile birleştiğinde ana boşalma olayı oluşur. Bu olay sıçramalarla değil tek bir iletken kanalın içerisinden kuvvetli bir akımın geçmesiyle oluşur ki bu da “ return stroke” olarak adlandırılır ve bir kaç defa tekrar eder [6]. Şekil 2.11’de yerden yukarı doğru yakalama deşarjı ve ana deşarj aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Yaklaşık 50 aşamada bir “step leader” [3].



Şekil 2.11. Yerden yukarı doğru yakalama deşarjı ve ana deşarj [3].

2.7. Yıldırımın Sınıflandırılması

Atmosferdeki bu yük boşalmalarını dört ana gruba sınıflandırabiliriz:

1) Bulut-yer boşalmaları (yıldırım),
2) Bulutlar arası boşalmalar,
3) Bulut-hava boşalmaları,
4) Bulut içi boşalmalar.

Tüm bu boşalmaların yaklaşık % 50'si bulut içi boşalmalardır. Bulut-yer arası boşalmalar (yıldırımlar) da bulut içi boşalmalar sıklığında görülür. Bulutlar arası ve bulut-hava boşalmaların olasılığı, diğer boşalmalara kıyasla çok düşüktür. Yıldırım boşalmaları oluşumu, canlılara ve yapılara etkileri nedeniyle en çok inceleme ve araştırma yapılan boşalma türüdür [1].

Bulut-yer boşalmaları yani yıldırımlar kendi aralarında dört sınıfta incelenir (Çizelge 2.2). Yıldırım boşalmalarının yaklaşık % 90'ı negatif kutbiyetli ve buluttan yere doğru ilerleyen boşalmalar, % 10'luk bir bölümü ise buluttan yere ilerleyen pozitif kutbiyetli boşalmalar ve çok küçük bir yüzde de yerden buluta doğru ilerleyen pozitif veya negatif kutbiyetli boşalmalardır.

Çizelge 2.2. Bulut-yer boşalmalarının sınıflandırılması

Sınıf	**Başlangıç Noktası**	**Kutbiyet**
1	Bulut	Negatif(~%90)
2	Bulut	Pozitif (~%10)
3	Yer	Negatif
4	Yer	Pozitif

2.7.1. Bulut-yer boşalmaları

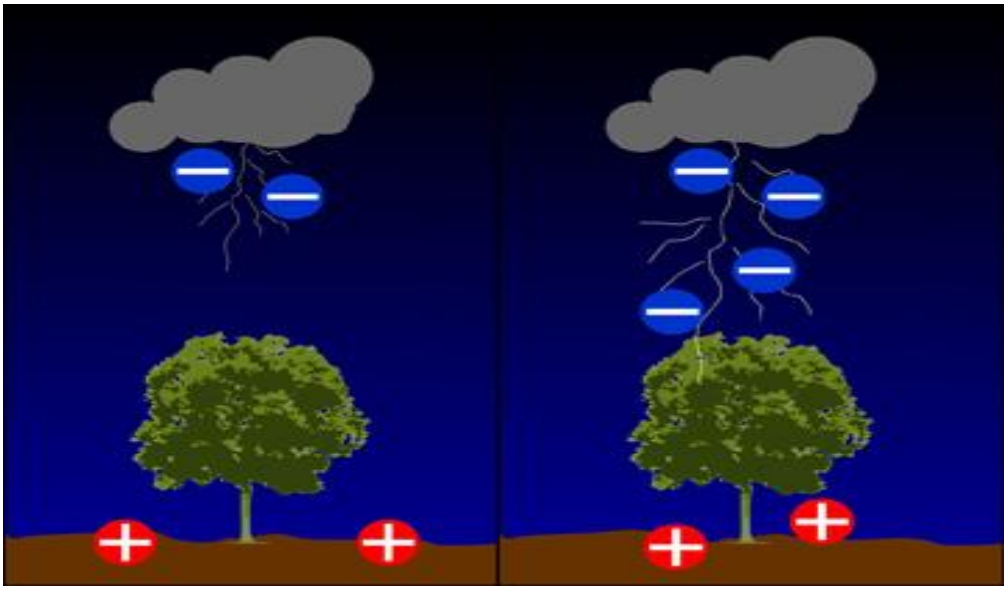
Daha önce bu boşalmaların mekanizmasından bahsedilmişti. Boşalmanın yere doğru olmasının nedeni, negatif yüklerin pozitif yüklerden daha hafif olması ve buna bağlı olarak daha hızlı hareket edebiliyor olmasıdır. Havanın iyi bir yalıtkan olduğu düşünülürse, böylesine bir boşalmanın gerçekleşebilmesi için ortamda aşırı derecede bir yükün birikmiş olması gerekmektedir [1].

Şekil 2.12 'de bulut yer boşalmaları üç aşamada görülmektedir.

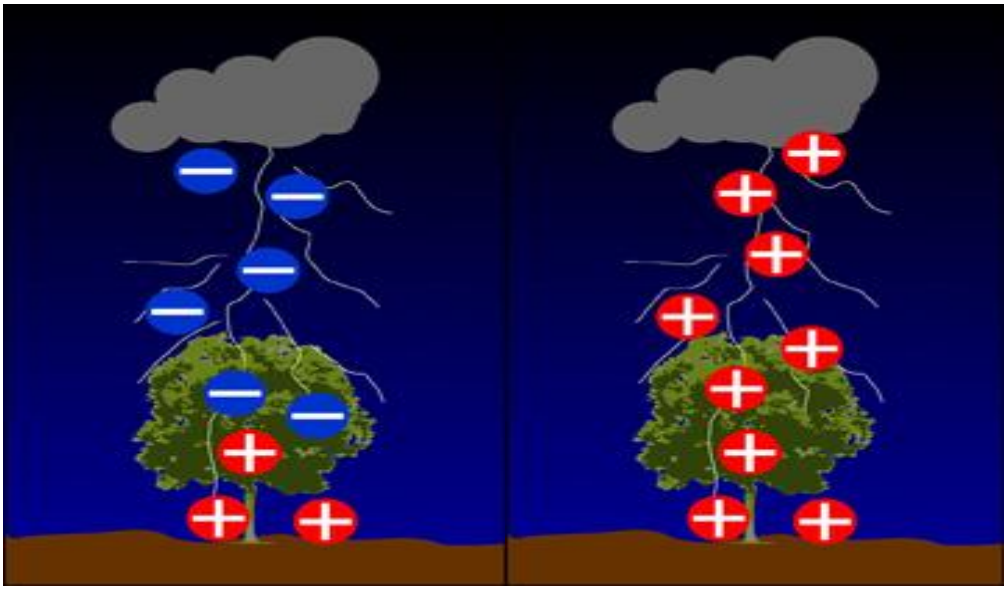


Şekil 2.12. Negatif bulut-yer yıldırımın (-CG) üç aşamalı gösterimi

Şekil 2.13'de ise Negatif bulut –yer (-CG) yıldırımının basit olarak gösterilmiştir.



(**a**) (**b**)



(**c**) (**d**)

Şekil 2.13. **(a)** (-) yükler aşağı doğru zikzak yapmaya başlar **(b)** (+) yüklü parçacıklar da bulutun tabanında toplanır **(c)** Bulut yeryüzüne iyice yaklaşınca gözle görülemeyen öncü eksi yükler yere inerek bir yol açarlar ve sonra da yerden buluta doğru elektrik akımı başlar **(d)** (+)yükler saniyede büyük bir hızla buluta akar.

2.7.2. Yerden buluta doğru boşalmalar

İnsan yapımı yüksek binalardan veya yüksek tepelerden buluta doğru negatif veya pozitif kutbiyetli boşalmalar başlayabilir. Tıpkı buluttan yere boşalmalar gibi, negatif kutbiyetli boşalmalar adım adım ilerleyen boşalmalar, pozitif kutbiyetli olanlar ise sürekli boşalmalar halindedir. Yerden buluta doğru pozitif kutbiyetli boşalmalarda öncü boşalma 100 A ile 1000 A arasında değişen bir akım taşır [2].

2.7.3. Bulutlar arası boşalmalar

Bulut yer boşalması dışındaki diğer bulutlar arası boşalmalar, bulut-hava boşalmaları ve bulut içi boşalmaları, bulut boşalmaları olarak genel isimle anılır. Elektriksel olarak bu boşalma türleri arasında benzerlikler bulunmaktadır. Bulut içi boşalmalar yıldırım bulutu içinde ayrı bulunan negatif yüklü ve pozitif yüklü bölgelerin birbiriyle etkileşiminden meydana gelir. Farklı bulutların pozitif ve negatif yüklü kısımları arasındaki elektrik alan şiddetine bağlı olarak ise bulutlar arası boşalmalar gerçekleşir. Bulut hava boşalmaları ise, öncü boşalmaların kanal oluşturamayarak havada sönmesi sonucu oluşur [2-4]**.**

2.7.4. Pozitif kutbiyetli boşalmalar

Pozitif kutbiyetli yıldırım boşalmaları, yıldırım bulutunun pozitif yüklerle dolu olan üst kısmında başlar. Genelde kış mevsiminde meydana gelen yıldırımlarda, yüksek ve dağlık yerlerde görülen pozitif kutbiyetli boşalmalar, negatif boşalmalar gibi adım adım ilerlemek yerine sürekli ilerleyen bir şekilde gerçekleşir. Bu tür yıldırım boşalmalarında 200 – 300 kA mertebesinde tek bir yıldırım darbe akımı oluşur [4].

2.8. Yıldırım Boşalması Sonucu Oluşan İkincil Olaylar

Yıldırım boşalmasıyla beraber bulutla yeryüzü arasındaki potansiyel fark kapatılır. Yıldırım deşarjı ve takip eden akım aşağıdaki ikincil oluşum ve süreçlere neden olur.

a) Elektromagnetik darbe.

b) Elektrostatik darbe.

c) Geçici toprak akımları.

d) Bağlı yük ve ikincil kıvılcımlar [19].

2.8.1. Elektromagnetik darbe etkisi

Yıldırım vurgunu çok kısa bir sürede gerçekleşmektedir. Bu süre içerisinde yalıtkandan geçirgene dönüşen yıldırım geçidinden oldukça yüksek nötürleştirici akım değerlerine ulaşılır. Bu

akım değerlerinin değişim hızları akım yolunun empedansı ve bulutda biriken elektrik yüküne bağlıdır. Yıldırımlardaki akım değişim hızları 500 kA/mikrosaniye değerlerine ulaşabilmektedir. Ortalama değer ise 100 kA/mikrosaniye civarındadır [11]. Bu değişen akım değerleri bir elektromagnetik darbe etkisi oluştururlar ve darbe etkisi altındaki elektrik sistemlerinde indüklemenin doğurduğu endüktans voltajları oluşur. Bu indükleme voltajları elektrik iletim hatlarıyla pek uzak mesafelere kadar etkisini gösterebilirler. Yine bu indüklenen voltajların geniş frekans spektrumları nedeniyle koruyucu kalkan devrelerini aşarak elektrik sistemlerde girişimlere neden olmaktadırlar [20].

2.8.2. Elektrostatik darbe etkisi

Yıldırım bulutlarındaki elektriksel yük ayrışımları, yeryüzü ile bulutlar arasında büyük potansiyel farkların oluşmasına ve elektriksel alan şiddetlerinin doğmasına sebep olmaktadır. Havada duran herhangi bir metal iletken, havadaki elektriksel alan şiddetinden dolayı, bulunduğu yüksekliğin sahip olduğu bir elektriksel potansiyel değer elde edecektir.

Örnek olarak, yıldırımlı bir havada 10 metre yükseklikte duran bir sabit telefon hattı, toprağa göre 100 kV ile 300 kV arası bir potansiyel değer elde edecektir. Nötrleşme ve boşalma aşamalarında bu potansiyelin oluşturacağı akımları yönlendirmek oldukça önemlidir. Telefon kablosunun bağlı olduğu cihazlar bu akımlar tarafından tehdit altındadır ve kolayca tahrip edilebilirler.

Atmosfer yüksekliğine bağlı olarak oluşan bu tip elektrostatik voltaj değişiklikleri, elektrostatik darbe olarak isimlendirilir. Elektrik iletim hatları ve anten kuleleri gibi dikey metal kuleler, elektrostatik darbelerden oldukça etkilenen tesislerdir. Yeterli şekilde topraklanmadıkları takdirde potansiyel farktan oluşan kıvılcımlar tehlikeli durumlara sebep olabilmektedir [21].

2.8.3. Geçici toprak akımları

Yıldırım deşarjını takip eden nötrleştirme aşamasında toprak yüzeyinde ve yıldırımın düşüş noktası etrafında elektrik akımları oluşur. Bu akımlar elektriksel yüklü alanlardan yıldırımın düşüş noktasına doğru akarlar. Toprakta gömülü metal su, gaz, petrol boruları, elektrik hatları ve diğer metal tesisler bu akımlar için tercihli bir yol oluştururlar. Bu çeşit akımlar geçici toprak akımları olarak isimlendirilirler. Bu akımlar çok ani değişen akımlar oldukları için, yine bu tesislerde yüksek indükleme voltajları doğururlar [22].

2.8.4. Bağlı yük ve ikincil kıvılcımlar

Yıldırımlardan dolayı gelişen ve özellikle metalden yapılmış petrol depolarında ve patlayıcı maddeler içeren diğer metal depolarda görülen çok tehlikeli bir durum "bağlı yük" olayıdır. Bu oluşumun doğurduğu kıvılcımlar çok büyük ve tehlikeli yangınlara neden olurlar. Bağlı yük olayının, yıldırımlarla neden olduğu kıvılcımlar şöyle oluşur. Bir metal deponun yakınına yıldırım düşerse, yıldırımın neden olduğu metal tankdaki elektriksel yüklenmeler hemen boşalır çünkü tanklar iyi bir şekilde topraklanmıştır. Bu gibi tankların içerisi koruma amaçlı yalıtkan maddeler ile kaplıdır. Dolayısıyla topraklanmış metal tank yıldırımla beraber yükünü toprağa boşaltır. Metal depo içerisindeki petrol, patlayıcı madde veya benzeri malzemeler yükünü bağlı tutmaya devam eder. Yıldırım sonrası yavaşça nötrleşmeye başlayan bu yükler, uygun topraklanmanın yapılmadığı ortamlarda kıvılcımlar oluşuturur. Kıvılcımlar depolanan malzeme ile metal tank arasında oluşur ve patlama ile yangınlara sebep olur [22].

2.9. Yıldırımın Enerjisini Hesaplamak İçin Kullanılan Metotlar

Yıldırımla açığa çıkan enerjiyi direk olarak hesaplamak çok zordur. Bu yüzden yıldırım düşmesiyle yayılan enerjiyi hesaplamak için birçok modelleme yapılmış ve birçok metot kullanılmıştır. Örneğin tezin giriş bölümünde bahsettiğimiz gaz-dinamik modeli, elektromagnetik model, dağılmış devre modeli ve mühendislik modeli gibi bazı çalışmalarla enerji tahmini yapılmıştır. Yıldırım enerjisinin tahmini ve ortalama bir değerini hesaplamak için şimdiye kadar yapılan tüm çalışmaları üç ayrı metotta sınıflandırabiliriz. Bunlar; elektrik alan metodu, optiksel metot ve akustik metot. Daha sonra bu enerji tahmin değerlerinin gerçeğe yakınlıklarını birbirleriyle kıyaslamış ve tablo şeklinde verilmiştir.

2.9.1 Elektrik alan metodu

Buluttan yere iletilen yük miktarının değerlendirildiği elektriksel metot ilk olarak 1920 yılında Wilson tarafından gösterilmiştir. Wilson, yerden H yükseklikte bulunan bulutun merkezinde toplam yük Q iken yıldırım darbesinin D uzaklığında ölçülen alan değişimi F'i aşağıdaki şekilde formilize etmiştir [23]:

$$F = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{H}{\sqrt{\left(H^2+D^2\right)^3}}\right) \text{V/m} . \tag{2.1}$$

Wilson ölçtüğü iki tane yıldırım darbesinin yerden buluta uzaklığını 2 km olarak almıştır. Yaptığı deneyler sonucu, yıldırım kanalının *D* uzaklığındaki elektrik alan değişimi *F*'den (eşitlik 2.1) toplam iletilen yükün ortalama 20 Coulomb olduğunu hesaplamıştır.

1963 yılında ise Malan, *H* yüksekliğinde bir bulutun ve yıldırım kanalının merkezinden *D* uzaklığındaki düzgün bir yıldırım öncü darbe sütunu vasıtasıyla boşalan yük miktarı *Q*'nun oluşturduğu alan değişimini aşağıdaki gibi göstermiştir [23]:

$$F = \frac{Q}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{D} - \frac{1}{\sqrt{H^2 + D^2}}\right) \text{ V/m} . \tag{2.2}$$

Malan'ın hesapladığı bu alan değişim formülü yıldırım öncü darbesi içindi. Bu öncü darbe tam darbeye tamamlandığı zaman (2.2) eşitliğinde elde edilen değer (2.1)'dekiyle aynı olacaktır.

1976 yılında Tiller, ilk darbe ve bunu takip eden yıldırım darbelerindeki Q değerinin tahmini için (2.1) eşitliğini kullanmıştır. Malan ve Tiller'in hesapladıkları Q değerleri Wilson'un bulduğu değerlere göre daha küçüktü. Bunun sebebi Tiller ve ekibinin H değerini daha büyük almaları ve Wilson'un bütün yıldırım darbesini hesaba katmasıydı.

Wilson, Q=20 C, H=2 km ve F=1,5.10^6 V/m iken negatif bir yıldırım darbesinin potansiyelini 5.10^8 V olarak bulmuştur. Aynı zamanda buluttaki tüm yükün boşaldığını farz ederek bu değerin maksimum 10^9 V'a kadar çıktığını tahmin etti ve neticede bir yıldırım düşmesiyle toplam açığa çakın enerjiyi 10^{10} J olduğunu ileri sürdü ki bu değer ilim adamlarınca yıllarca kabul görmüştür. Buna karşın Malan Q=0,6 C için bir yıldırımla açığa çıkan enerji miktarını 3.10^8 J olarak vermiştir.

Yıldırım darbesiyle açığa çıkan enerjinin tahmini için az farklı bir yaklaşım ise 1968 yılında Krider tarafından ortaya atılmıştır. Krider her bir yıldırım için açığa çıkan enerjiyi 7.10^8 J olarak vermiştir.

Diğer bir tahmin 1967 yılında Connor tarafından yapmıştır. Connor H uzaklığındaki iletken düzleme bağlı temel yük *Q* iken Potansiyel *P*'yi aşağıdaki gibi vermiştir [23];

$$P = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0(2H)} \tag{2.3}$$

Connor'a göre yerden H yüksekliğindeki toplam yük Q için enerji değeri W ise aşağıdaki gibidir:

$$W = \int_0^Q P dq = \frac{Q^2}{4\pi\varepsilon_0 (4H)} \ . \tag{2.4}$$

Burada buluttaki diğer yüklerin birbirleriyle etkileşimi ihmal edilmiştir.

Connor 1965 yılında New Mexico'da 18 ayrı yıldırımda deney yapmış ve (2.1) eşitliğinden boşalan toplam yükü ve (2.4) eşitliğinden de toplam açığa çıkan enerjiyi hesaplamıştır. Tüm bu 18 ayrı deney için elde ettiği ortalama Q, H ve W değerleri Q = 9.3 ila 3C, H = 1.8 ila 0.25 km ve W= (1.51 + 1.3) $.10^8$ J arasında olduğu belirtilmiştir [23].

Bir yıldırım darbesinde elektrik alan değişim verilerine göre elde edilen enerji değerleri kıyaslamalı olarak çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Elektrik alan değişim metoduyla elde edilen tahmini yıldırım enerji değerleri

Referans	**Gerilim (V)**	**Yükseklik (km)**	**Yük (C)**	**Enerji (Toplam) (J)**
Wilson(1920)	10^9	2	20 (tüm yıldırım)	10^{10}
Malan (1960)	10^9		0,6 (tek darbe)	3.10^8
Krider (1968)	3.10^8		4,6 (tek darbe)	7.10^8
Connor(1967)		1.8	9,3 (tek darbe)	$1{,}5.10^8$
Tiller (1976)		2	3,0 (tek darbe)	1.10^7

Elektrik alan metodu kullanılarak yıldırım kaynaklı enerjinin tahmini için farklı bir yöntem ise C. R. Maggio tarafından Temmuz-Ağustos 1999 yılında New Mexico'daki Langmuir laboratuarında gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde elektrik alan ölçer ve GPS takılı balonlar, elektrik alanın dikey bileşenini ölçmek için zemine konuşlandırılmış üç tane elektrik alan üssü ve elektrik alan değişim sensörü görevi yapan düz plaka bir anten kullanılmıştır. Bu balonlar belirli aralıklarla yüklü bulutlara gönderilmiş ve balonun etrafındaki yüklerden kaynaklanan elektrik alan değişimi ölçülerek enerji tahmini yapılmıştır [24]. Tüm bu veriler Çizelge 2.4'te özet olarak verilmiştir.

Çizelge 2.4 Balon yardımıyla yapılan yük ve enerji tahmin değerleri

Gün	**Saat**	**Yük (C)**	**Enerji (J)**
25 Temmuz	19.47	-6,3	$8{,}4.10^8$
	19.49	-14,5	$10{,}5.10^8$
	19.53	-4,5	$3{,}5.10^8$
7 Ağustos	20.19	-7,7	$5{,}4.10^8$
	20.24	-12,4	$10{,}2.10^8$

Elektrik alan metoduyla enerji tahmin yöntemi üzerine bir diğer deneyde 2005 yılında Amerika'nın Florida eyaletinde V. Rakov, V. A. Jayakumar ve ekibi tarafından Uluslararası Yıldırım Araştırma Merkezinde (ILRC) gerçekleştirilmiştir.

Roket ve metal tel yardımıyla tetiklenen bir yıldırımın yaklaşık 0,8 m yakınında kurulan bir deney düzeneği yardımıyla, yıldırım kanalı boyunca zamana bağlı enerji ve güç hesabı yapılmıştır. 2 m boyunda yere dik bir darbe cismi tel bir halkayla topraklanmış ve elektrik alanın yatay ve dikey bileşenleri, darbe cismine 10 cm mesafede dik ve yatay olarak yerleştirilen iki adet Pockels sensoru yardımıyla ölçülmüştür. Bu deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 2.14' de verilmiştir. Elde edilen bu elektrik alan değerleriyle zamana bağlı güç hesabı yapılmıştır [25]. Dört farklı yıldırım darbesi için elde edilen veriler çizelge 2.5 'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Pockels sensoru yardımıyla elde edilen güç, enerji ve akım değerleri

Yıldırım No	**Akım Tepe Değeri (kA)**	**Güç Tepe Değeri (W/m)**	**Enerji (46 µs'de) (J/m)**
1	9,9	25.10^8	$6{,}2.10^3$
2	14	$2{,}4.10^8$	$1{,}8.10^3$
3	19	$9{,}9.10^8$	$6{,}4.10^3$
4	22	$8{,}7.10^8$	5.10^3



Şekil 2.14. Pockels sensor yardımıyla yıldırımın enerji ve güç ölçümü [25].

2.9.2 Optik güç ile ölçüm metodu

1976 yılında Turman, yıldırımla açığa çıkan enerjiyi hesaplamak için yıldırım darbesiyle oluşan ışığın optik gücünü Florida'da bazı deneylerle ölçmüştür. Farklı yıldırım darbelerinin veri kaydını tutmak için ikisi silikon fotodiyot ve biri foto-çoklayıcı tüpten oluşan üç adet optik kanal kullanmıştır. Birer adet optik dedektör ve TV ekranında görüntü alabilmek için video kamera cihazını binanın çatısına monte ederek sadece 20 km uzaklıktaki yıldırım olaylarını dikkate alarak 77 farklı yıldırım darbe verilerini kaydetmiştir. Uzaklık bilgilerini ise en yakın meteoroloji istasyonundan almıştır. Buna benzer yıldırım enerji tahminleri için optik güç deneylerini Krider (1968), Connor (1967) ve Barasch (1970)'da yapmıştır [23]. Çizelge 2.6'da optik deneyler sonucu elde edilen tahmini yıldırım enerji değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.6 Optik deneyler sonucu elde edilen sonuçlar [23].

Referans	**Optik Band (Å)**	**Birim uzunluk radyant enerji (J/m)**	**Ortalama Tepe Güç değeri (W)**	**Birim uzunluk Enerji dağılımı (J/m)**
Connor (1967)	3800-7000	580		
Barasch (1970)	Görünür	400	4.10^9 (darbe)	
Krider (1968)	4000-11000	870	$1,1.10^{10}$ (darbe)	$2,3.10^5$
Turman (1977)	4000-11000		1.10^9 (ilk darbe)	

2.9.3 Akustik metot

Yıldırım kanalının birim uzunluğunda yayılan enerji değerlerini bulmak için yıldırımı bir ses kaynağı gibi ele alarak çalışmalar yapılmıştır. Bu basıncın şiddetine göre enerji değerleri tahmin edilmiştir. Gök gürültüsüyle yayılan ses dalgasındaki yoğunluğu ve basıncı ölçerken hata payını artıran iki temel faktör vardır ve bunlar; 1) Yıldırımın çok geniş ve kıvrımlı bir yol izlemesi, çok kısa sürelerde gerçekleşen birkaç darbeden oluşması ses dalgalarının iç içe girmesine ve birbiriyle örtüşmesine sebep olması, 2) Ses dalgasındaki basınç ve yoğunluk ölçümleri genellikle geniş ve tahmini zor uzaklıklarda yapılması gerçek değere ulaşmayı zorlaştırıyordu. Ayrıca tam doğru sonuç için gök gürültüsünden rüzgârın sesini ayırt etmek gerekiyordu.

İlk akustik yöntemle yıldırımın enerji tahmini 1961'de Zhivlyuk ve Mandel'shtam tarafından yapılmıştır ve daha sonra 1965 yılında ilk olarak Newman roket tetiklemeli bir yıldırımın çok yakın mesafesinde direk basınç ölçümü yapmıştır. Bir roket vasıtasıyla metal bir teli yüklü bir bulutun merkezine doğru fırlatmış ve bu tel ve iyonize olan hava vasıtasıyla ilk boşalma başlamıştır. Tetiklenen bu boşalmanın düştüğü noktadaki akımın yaklaşık 1μs'de maksimum 50 kA'e kadar çıktığını ölçmüş ve tepe akımının yarılanma süresini ise yaklaşık olarak 50 μs bulmuştur. Bu boşalma merkezinin 460 cm yakınındaki basıncı ise 0,008 atm olarak ölçmüştür.

E. L. Hill ve J. D. Robb 1968'de Newman'ın roket tetiklemeli yıldırım deneyinden yola çıkarak yaptıkları deneyde boşalma noktasının 35 cm yakınındaki basıncı, içi boş korumalı bir küre

ile 2 atm olarak ölçmüşlerdir. Bu basıncın kaynağı olan enerjinin ise yaklaşık olarak 5.10^4 J/m olabileceğini kaydetmişlerdir. 1974'de ise Few ve ekibi akustik yöntemle bazı ölçümler yapmıştır [23]. Çizelge 2.7 akustik metotla yapılan bu çalışmalar özet olarak gösterilmiştir.

Çizelge 2.7 Yıldırım kaynaklı enerjinin akustik metotla ölçüm sonuçları [23].

Referanslar	**Basınç**	**Enerji tahminleri**
Zhivlyuk ve Mandel'shtam (1961)	0,02 atm (5m mesafede)	10^3 J/m
Newman(1965)	0,008 atm (4,6 m mesafede)	10^2 J/m
E.L.Hill ve J.D.Robb(1968)	2 atm (0,035m mesafede)	5.10^4 J/m
Few(1974)	10^{-4} atm (1000 m mesafede)	10^5 J/m

.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Yıldırım enerjisinin analizinde kullanılan programlar SDTAP (s-Domain Transient Analysis Program), ATP (Alternative Transient Program), EMTP (Electromagnetic Transients Program) ve MATLAB'dır [2]. Bunların içinde en yaygın kullanılanı ilk olarak Dr. Hermann Dommel tarafından geliştirilen EMTP'dir. EMTP (Electromagnetic Transients Program) programı iletim hatları için karakteristik metodu ile toplu parametreler için trapez (yamuk) kuralını birleştiren Dommel'in çalışması temel alınarak Bonville Power Administration (BPA) tarafından geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan programlar EMTP'nin gelişmiş bir versiyonu olan ATP (Alternative Transient Program) ve MATLAB programıdır.

3.1.ATP Programı Hakkında Genel Bilgi

ATP programı ile istenilen tesisin kompleks ağları ve kontrol sistemlerinin benzetimi yapılabilmektedir. ATP, kapsamlı modelleme yeteneklerine ve geçici durumların hesaplanması yanı sıra ilave önemli özelliklere sahiptir. ATP Dr. W. Scott ve Tsu-huei Liu, Kanada/Amerika EMTP kullanıcı grubu başkanı tarafından uluslararası yardımlarla sürekli olarak geliştirilmektedir [26].

Bu program, iletim hatlarının kalıcı ve zaman-zaman mikrosaniyelerden daha kısa bir zaman süresinde gerçekleşen olaylardan olan anahtarlama, yıldırım dalgası analizi vb. gibi geçici durum analizlerinin yapılmasına olanak sağlamakta, dağılmış ve toplu parametreli devrelerin matematiksel olarak modellenip, bilgisayarda benzetiminin yapılmasına imkân vermektedir [27].

ATP'de MODELS ifade ve zaman değişkenli sistemlerin çalışması için benzetim takımlarının kapsamlı yerleştirilmesi ile desteklenen genel amaçlı bir tanımlama dilidir.

EMTP/ATP şu bileşenleri içermektedir:

-Çift olmayan ve çift olan lineer, toplu parametreli *R, L, C* elemanlar.

-Dağılmış ve frekans bağımlı parametreler ile iletim hatları ve kablolar.

-Lineer olmayan dirençler ve endüktanslar, histerik endüktör, zamanla değişen direnç, TACS/MODELS kontrollü rezistans.

-Doğru olmayan bileşenler: doyma ve histeris ihtiva eden transformatörler, dalga kesiciler, arklar.

-Sıradan anahtarlar, zamana bağımlı ve gerilime bağımlı anahtarlar, istatistik anahtarlar (Monte Carlo çalışmaları).

-Valflar (diyotlar, tristörler, triyaklar), TACS/MODELS kontrollü anahtarlar.

-Analitik kaynaklar, adım, rampa, sinüzoidal, üstel, dalga fonksiyonları, TACS/MODELS tanımlı kaynaklar.

-Makineler: 3 faz senkron makine, üniversal makine modeli.

-Sıralı etki eden MODELS ihtiva eden kullanıcı tanımlı bileşenler [7].

3.2.Yıldırım Enerjisi Hesaplama Yöntemleri

3.2.1.Havadaki atlama aralığına göre yıldırım enerji hesabı

Şimdiye kadar yapılan hesaplamalara göre ortalama bir yıldırım darbe akımı I=20 kA seviyesindedir. Yıldırım darbe noktası ve bulut arası mesafe *d* ise yaklaşık 1 km alındığında yer küreyi ve bulutu iki zıt kutuplu elektrot ve aradaki havayı da bir yalıtkan olarak düşündüğümüzde kıvılcım atlaması için gerekli olan standart değer yaklaşık olarak 30 kV/cm'dir. İki paralel iletken levha arasındaki potansiyel fark *V=E.d* 'den gerilim hesabı yapılır. Burada *d* uzaklık, *E* ise elektrik alandır. Atlama aralığına göre yıldırım enerji hesabının gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir. Buradan yola çıkarak güç ve enerji değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanırsa;

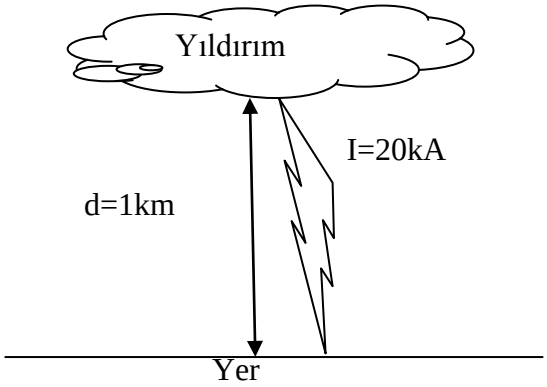
$$V = E.d \tag{3.1}$$

V= 100000 cm x 30 kV/cm = 3 GV =3.10^9 V olarak bulunur. Anlık güç ise;

P= I.V = 3.10^9 V x 20.10^3 A= 60.10^{12} Watt olarak elde edilir.

Yıldırım akımının tepe değerinin yarılanma süresi t=50µs için enerji değeri;

E=P.t = 60.10^{12} x 50.10^{-6} =$3x10^9$ Joule olarak bulunur.

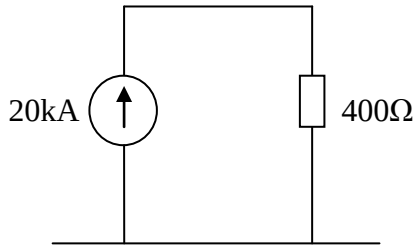


Şekil 3.1. Atlama aralığına göre yıldırım enerji hesabı

Eğer 20 kA'lik bir yıldırım akımı için 50 µs'de boşalan toplam yük (Q) bulmak istenirse;
Q=I.t 'den Q=20.10^3 x 50.10^{-6} =1 Coulomb olarak elde edilir.

3.2.2.Yıldırım eşdeğer devresine göre yıldırım enerji hesabı

Yıldırım akım darbesi Şekil 3.2'de görüldüğü gibi yıldırım yolu empedansı olan paralel bir direnç ve akım kaynağı olarak modellenir. Bu modelde kullanılan paralel direnç değeri 400 Ω olarak alınmıştır [28].



Şekil 3.2. Yıldırım yolu empedansını içeren yıldırımın eşdeğer modeli

Bu verilere göre yıldırımın $400\,\Omega$'luk yük üzerine düşen gerilimi ve anlık gücü aşağıdaki şekilde hesaplanırsa;

$$v = I \times R = 20kA \times 400\Omega = 8 \times 10^6 V \tag{3.2}$$

$$P = I \times V = 8.10^{6} \times 20.10^{3} = 160.10^{9} \text{ Watt} \tag{3.3}$$

$E = P \times t = 160.10^9 \times 50.10^{-6} = 8.10^6 J$ olarak bulunur. (3.4)

Bu değerler ATP programında elde edilmiş ve sonuçlar araştırma bulguları kısmında gösterilmiştir. ATP programında analiz yapmak için yıldırım akımı Heidler type-15 akım kaynağıyla modellenmiştir. Programda kaynağın akım değeri yıldırım akımının ortalama değeri olan 20 kA olarak alınmıştır. Yıldırım akımı dalga formunu göstermek için aşağıda verilen Heidler fonksiyonu kullanılmıştır:

$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t-\tau_1)^n}{(t/\tau_2)+1} \cdot e^{-t/\tau_2} \tag{3.5}$$

$$\eta = e^{[-\tau_1/\tau_2 (n.\tau_2/\tau_1)^{1/(n+1)}]} \tag{3.6}$$

Burada;

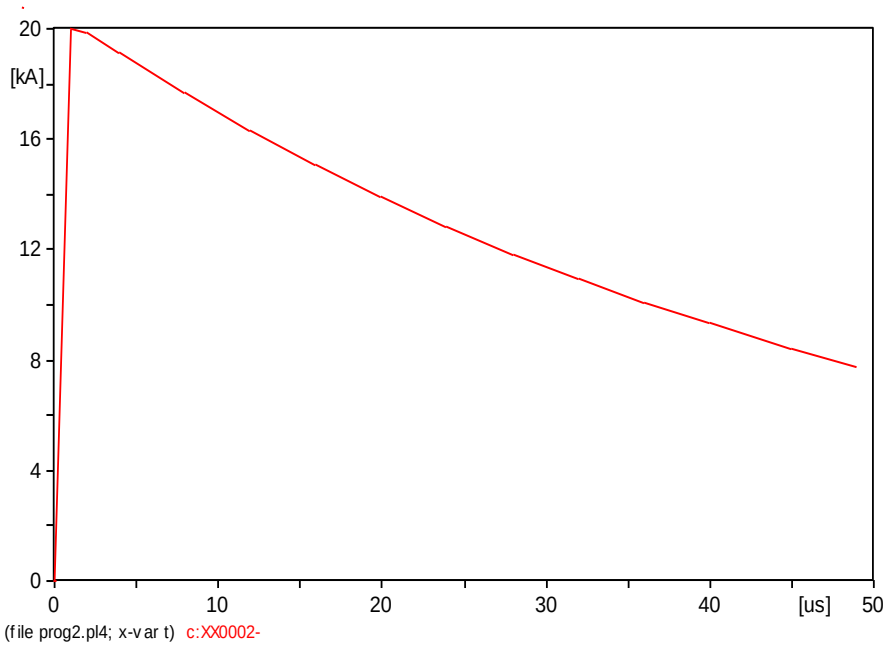
I_0 : Yıldırım akımı tepe değeri,

τ_1 : Akım yükselme zamanına bağlı zaman sabiti,

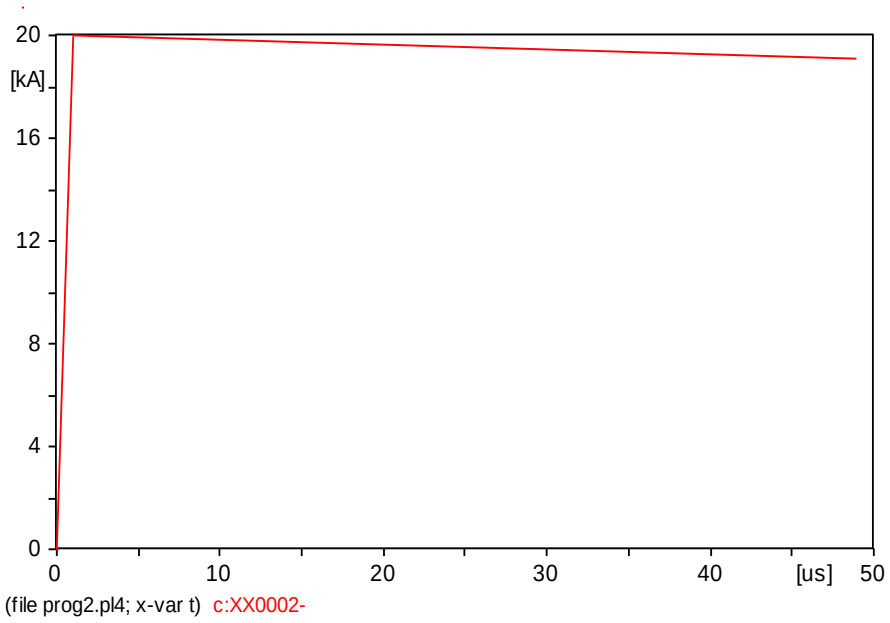
τ_2 : Akımın gecikme zamanına bağlı zaman sabiti,

n : Akım diklik faktörü'dür [29].

Çalışmada kullanılan Heidler fonksiyonunun parametreleri I_0=20 kA, τ_1=1.2 µs, τ_2=50 µs olarak girildiğinde elde edilen yıldırım akımı dalga formu Şekil 3.3'te verilmiştir [29]. Ayrıca yarılanma süresi τ_2 =1000 µs alınarak elde edilen yıldırım dalga formu ise Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3. τ_2 =50 µs için yıldırım akımının dalga şekli



Şekil 3.4. τ_2 =1000 µs için yıldırım akımının dalga şekli

3.3. MATLAB Programıyla s-Domeninde Yıldırım Enerji Dağılımının Analizi

Yıldırım akımı düştüğü noktada bir enerji oluşturduğu gibi bu akımın kuplaj yoluyla çevredeki iletkenlerde de indüklediği bir gerilim vardır. Bu bölümde yere dik h_1 yüksekliğinde bir iletkene yıldırım düşmesi halinde *d* uzaklığında, h_2 yüksekliğindeki diğer bir dik iletken telde indüklediği gerilimi hesap etmek için MATLAB programı yardımıyla *s* domeninde analiz edilecektir.

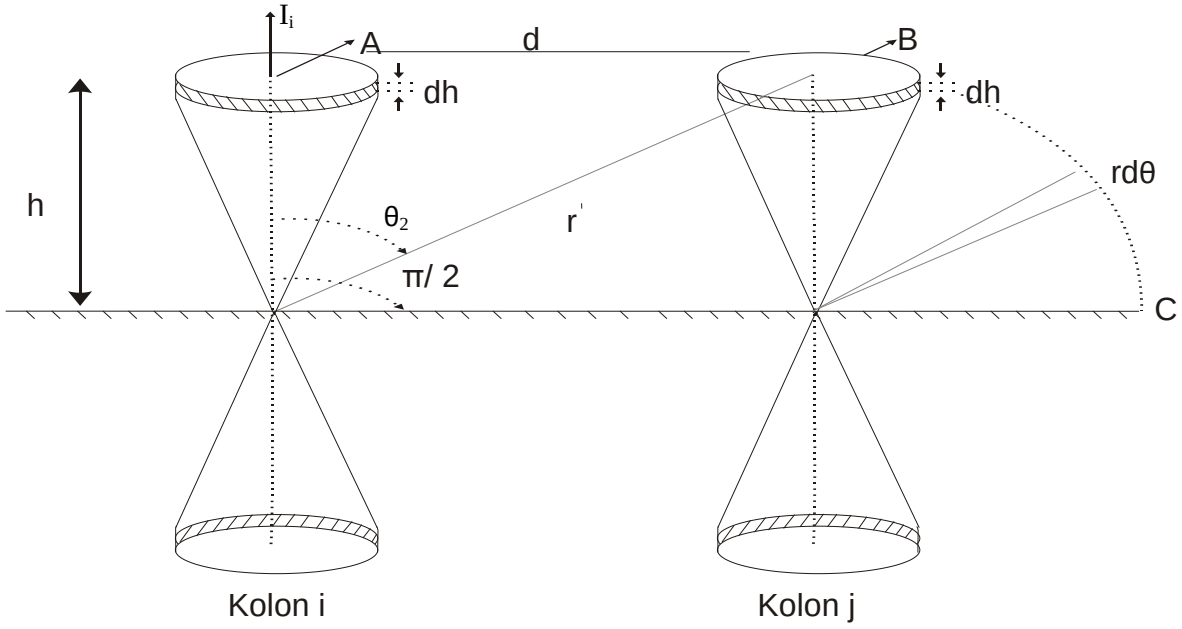
MATLAB'ın sahip olduğu fonksiyonlar ve özellikler ile matematikte akla gelebilecek her konudaki işlemler rahatlıkla yapılabilir. Matris işlemleri, türev, integral hesapları, diferansiyel denklemlerin çözümü gibi birçok matematiksel işlem MATLAB tarafından basit programlamalarla veya hazır olan kodlarla gerçekleştirilir.

İletim sistemlerinde yürüyen dalgaların analizi problemlerinde kullanılan ters Laplace veya Fourier dönüşümlerinin nümerik olarak yapılması gereklidir. Bunun için ilk adım olarak sistemin frekans domenindeki cevabı hesaplanır. Sistemde bulunan frekansa bağımlı parametreler modele dahil edilebilir. Daha sonra ise nümerik ters Laplace veya Fourier dönüşümleri kullanılarak frekans bölgesinden zaman bölgesine geçilir. Geleneksel Laplace ve Fourier dönüşümleri bilgisayar hesaplama zamanlarının uzun olmasından dolayı tercih edilmezler. Bu nedenle bu tez çalışmasında yıldırım enerjisini MATLAB'da analiz ederken, bilgisayar hesaplama zamanı kısa olan ve Hosono tarafından geliştirilen hızlı ters Laplace dönüşümü kullanılmıştır [8].

İletim hatlarının analizi için Hosono tarafından geliştirilen ve kısaca FILT (Fast Inverse Laplace Transforms) olarak isimlendirilen hızlı ters Laplace dönüşümü güç sistemleri için elverişli bir yöntemdir [30]. Bir *f(t)* fonksiyonun Laplace dönüşümü *F(s)* ve bu işlemin tersi olan ters Laplace dönüşümü nümerik yöntemlerle de bulunabilir. İletim hattının zaman domeni çözümüne geçmek için kullanılan FILT tekniği uygulanırken öncelikle *a, k* ve *p'*nın uygun değerlerinin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada katsayılar için uygun değerler a =5, p=15 ve k=20 olarak alınmıştır [8].

3.3.1. İki dikey iletkenin ortak empedans hesabı

Yeryüzünden *h* yükseklikte iki eleman A ve B ile iki paralel iletken göz önüne alınmıştır. Öncelikle I_i akımının A elemanından aktığı varsayılmıştır. Bu durum ayrıntısıyla Şekil 3.5'de görülmektedir.



Şekil 3.5. İki dikey iletkenin ortak empedansı

Koni şeklindeki hattın enine elektromanyetik alan formülleri aşağıdaki gibidir [31]:

$$E_\theta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} H_\varphi \tag{3.7}$$

$$H_\varphi = \frac{A.e^{-j\beta r}}{r.\sin\theta} \tag{3.8}$$

(3.8) eşitliği (3.7)'de yerine yazılırsa;

$$E_\theta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{A.e^{-j\beta r}}{r.\sin\theta} \tag{3.9}$$

olarak bulunur. Burada *A* magnetik vektör potensiyel büyüklüğüdür. Konideki '*dh*' elemanının yere göre gerilimi;

$$V = \int_{\theta_1}^{\frac{\pi}{2}} E_\theta \cdot r \cdot d\theta \tag{3.10}$$

olarak elde edilir.

B elementinin gerilimi , E_θ 'nın r' yarıçapına göre dairesel yörüngesi boyunca C'den B'ye integrali alınarak belirlenir ve sonuç aşağıdaki gibi olur [31];

$$v_j = A \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot e^{-j\beta r'} \cdot \ln\left[\cot\frac{\theta_2}{2}\right] \tag{3.11}$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu \cdot \varepsilon} \tag{3.12}$$

A'dan akan akım;

$$I = \int_0^{2\pi} H_\varphi \cdot r_c \cdot d\varphi \tag{3.13}$$

(3.8) eşitliği (3.13)'de yerine yazılıp integral alınırsa;

$$I = 2\pi \cdot A \cdot e^{-j\beta r} \tag{3.14}$$

olur.

i ve j kolonları arasındaki ortak karakteristik empedans;

$$z_C^{ij} = \frac{v_j}{I_i} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{e^{-j\beta(r'-r)}}{2\pi} \ln\left[\cot\left(\frac{\theta_2}{2}\right)\right] \tag{3.15}$$

$$\cot\left(\frac{\theta_2}{2}\right) = \frac{\sqrt{h^2 + d^2} + h}{d} \tag{3.16}$$

olarak bulunur [32].

Çok iletkenli sistem için karakteristik empedans matrisini belirlemek için öz alanları yazalım. Öz karakteristik empedans aşağıdaki gibi bulunabilir:

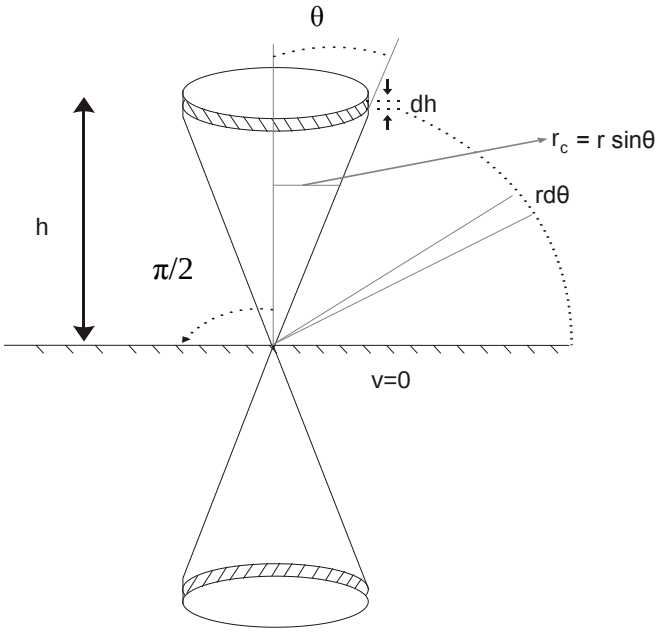
$$Z_C = \frac{V}{I} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln\left(\cot\frac{\theta_1}{2}\right) \tag{3.17}$$

Burada,

$$\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)=\frac{1+\cos\theta_1}{\sin\theta_1}=\frac{\sqrt{h^2+r_c^2}+h}{r_c} \tag{3.18}$$

şeklinde yazılır.

Yere dik bir iletken kolonun yüksekliği, yere göre açısı, yarıçapı gibi konum bilgileri ayrıntılı olarak Şekil 3.6'da verildiği gibidir.



Şekil 3.6. Dikey iletkenin öz karakteristik empedansın gösterimi

Öz ve ortak z_c^{ii} ve z_c^{ij} ile karakteristik empedans matrisi belirlenir. Temel elektromanyetik teoriye göre L_G bu sistemin geometrik endüktans matrisi, Z_C karakteristik empedans matrisiyle ilişkilidir [29].

$$L_G=\sqrt{\mu\varepsilon}\cdot Z_C \tag{3.19}$$

Sonuçta L_G matrisinin öz ve ortak terimleri aşağıdaki gibi yazılırlar:

$$L_G^{ii}=\left(\frac{\mu}{2\pi}\right)\ln\left(\frac{\sqrt{h^2+r_c^2}+h}{r_c}\right) \tag{3.20}$$

$$L_G^{ij}=\frac{\mu}{2\pi}\cdot e^{-j\beta(r'-r)}\cdot\ln\frac{\sqrt{h^2+d^2}+h}{d} \tag{3.21}$$

Çok iletkenli sistemin geometrik kapasitans matrisini hesaplamak içinse aşağıdaki formül kullanılır:

$$C_G = \mu \cdot \varepsilon (L_G)^{-1} \tag{3.22}$$

Yer iletkenliğinin sonlu kayıplarından dolayı (3.20) eşitliği (3.21)'de "*complex depth of images* " metodu vasıtasıyla hesaba katılırsa "*p*" yeryüzünün kompleks kabuk derinliği alınarak [31];

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu\sigma}} \tag{3.23}$$

bulunabilir. Burada:

μ=Toprağın magnetik geçirgenliği

σ=Toprağın iletkenliği

ω= Frekans'tır.

h yerine *h*+*p* yazılıp *p* hesaba dahil edildiğinde yeni endüktans;

$$L_M^{ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_c^2} + h + p}{r_c} \right] \tag{3.24}$$

olarak bulunur. Geometrik L_G ve kompleks endüktans L_{CPX}^{ii} kullanılarak toplam endüktans aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$L_M^{ii} = L_G^{ii} + L_{CPX}^{ii} \tag{3.25}$$

$$L_{CPX}^{ii} = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left[\frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_c^2} + (h+p)}{\sqrt{h^2 + r_c^2} + h} \right] \tag{3.26}$$

L_{CPX}^{ii} 'in reel kısmı L_E^{ii} ile ilişkilidir.

$$L_E^{ii} = \mathrm{Re}\left\{ L_{CPX}^{ii} \right\} \tag{3.27}$$

L_{CPX}^{ii} 'in imajiner kısmı ise R_E^{ii} ile ilişkilidir ve aşağıdaki gibi yazılır:

$$R_E^{ii} = -wI_m \left\{ L_{CPX}^{ii} \right\} \tag{3.28}$$

Önceden yazılan modifiye edilmiş ortak endüktansta *h* yerine *h*+*p* yazılarak;

$$L_M^{ij} = \frac{\mu}{2\pi}\left(\frac{e^{-j\beta r'}}{e^{-j\beta r}}\right)\ln\left[\frac{\sqrt{(h+p)^2+d^2}+h+p}{d}\right] \tag{3.29}$$

$$L_{CPX}^{ij} = \frac{\mu}{2\pi}\left(\frac{e^{-j\beta r'}}{e^{-j\beta r}}\right)\ln\left[\frac{\sqrt{(h+p)^2+d^2}+h+p}{\sqrt{h^2+d^2}+d}\right] \tag{3.30}$$

olur. L_{CPX}^{ij} 'in reel kısmı L_E^{ij} :

$$L_E^{ij} = \mathrm{Re}\left\{L_{CPX}^{ij}\right\} \tag{3.31}$$

ve L_{CPX}^{ij} 'in imajiner kısmı R_E^{ij} :

$$R_E^{ij} = -wI_m\left\{L_{CPX}^{ij}\right\} \tag{3.32}$$

olarak yazılır. Aşağıdaki yüksek frekans ifadesi bu matrislerin köşegen elementlerinin hesabında kullanılır;

$$jwL_C^{ii} + R_C^{ii} = \frac{\sqrt{jw\mu\rho}}{2\pi r_c} \tag{3.33}$$

Burada ρ sütun materyalinin direncidir. Bir dik iletkenin karekteristik empedansını hesaplamak için birçok formül vardır. Tüm bunlar h>>r olduğu durumlarda iyi sonuç verir fakat buradaki formüller h<< r olduğu durumlar için verilmiştir.

3.3.2. Kolonları gruplama

Bir demet modelinin sütunlarını çoklu iletken sistemi olarak düşündüğümüzde frekans domeninde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$-\frac{dV}{dx} = Z \cdot I \tag{3.34}$$

$$-\frac{dI}{dx} = Y \cdot V \tag{3.35}$$

Burada $Z=j\omega L+R$ ve $Y=j\omega C_G$ ve n demet modelindeki sütun numarasını göstermek koşuluyla V' nin elemanları $V_1, V_2 .... V_n$, ve I'nın elemanlarıysa $I_1, I_2 ..... I_n$ 'dir.

$$\frac{dV_1}{dx} = ... = \frac{dV_n}{dx} = \frac{dV}{dx} \tag{3.36}$$

$$I = I_1 + I_2 + ...I_n \tag{3.37}$$

(3.34) ‘e Kron’un indirgeme yöntemi uygulanırsa [33];

$$-\frac{dV}{dx} = Z_{eq} \cdot I \tag{3.38}$$

$$Z_{eq} = R + j\omega L \tag{3.39}$$

olur. Aynı şekilde (3.35)’ e Kron’un indirgeme yöntemi uygulanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir:

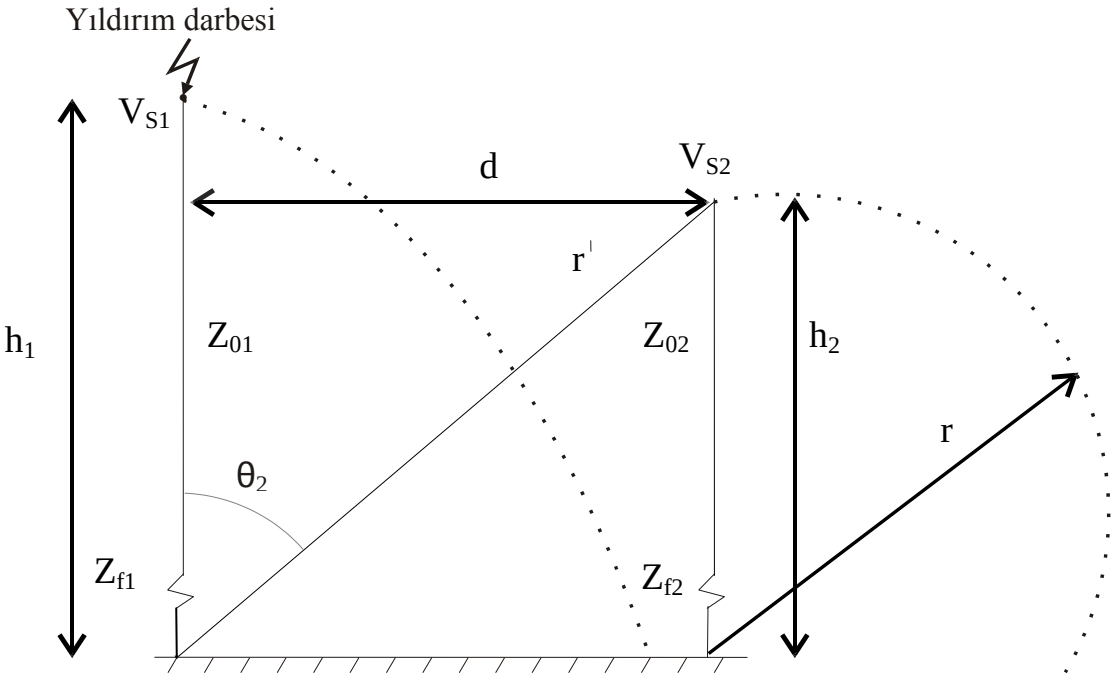
$$-\frac{dI}{dx} = Y_{eq}.V \tag{3.40}$$

$$Y_{eq} = j\omega C_{eq} = j\omega \sum_{i,j=1}^{n} C_G^{ij} \tag{3.41}$$

3.3.3. Yere Dik İki İletken Arasındaki Kuplaj Matrisi

Yere dik olan h_1 yüksekliğindeki bir iletkene yıldırım düşmesi durumunda paralelindeki yere dik bir diğer h_2 yüksekliğindeki iletkende indüklediği gerilimi hesaplamak için yukarıda bulunan karakteristik empedans eşitlikleri kullanılabilir.

Birinci iletkene yıldırım düşmesi durumunda ikinci iletkende indüklenen gerilimi bulmak için gerekli olan yükseklik ve uzaklık gibi konum bilgileri ve gerekli bazı parametreler Şekil 3.7’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.7. Yere dik iki iletken arasındaki kuplajlık nedeniyle indüklenen gerilimin gösterimi

Şekilde görülen bazı kısaltmalar aşağıdaki gibidir:

$$r = h_2$$
$$r' = \sqrt{h_2^2 + d^2}$$
$$r_c = r.\sin\theta_1$$
$$Z = sL + R$$

Z empedans hesabı için;

$$L_G^{ii} = \left(\frac{\mu}{2\pi}\right)\ln\left(\frac{\sqrt{h^2 + r_c^2} + h}{r_c}\right)$$

$$L_G^{ij} = \frac{\mu}{2\pi}\cdot e^{-j\beta(r'-r)}.\ln\frac{\sqrt{h^2 + d^2} + h}{d}$$ olduğu önceden verilmişti.

Buradan *Y* admitans matrisinin hesabı için kapasitans ve endüktans eşitlikleri;

$$C_G = \mu \cdot \varepsilon \left(L_G \right)^{-1}$$

ve

$$L_G = \begin{bmatrix} L_G^{11} & L_G^{12} \\ L_G^{21} & L_G^{22} \end{bmatrix} \tag{3.42}$$

iken admitans;

$$Y = sC_G \tag{3.43}$$

olarak bulunur [32]. Empedans *Z* ve admitans *Y*, matris formunda aşağıdaki şekilde gösterilir;

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

Burada;

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \qquad \gamma = \sqrt{Z.Y}$$

olarak verilir.

Yıldırım Kuplaj Empedans Matrisi (YKEM) [8] aynı metotla hesaplanırsa;

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} \\ e_{21} & e_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.44}$$

olur ve buradan gerilim ve akım eşitlikleri aşağıdaki gibi olur;

$$\begin{aligned} V_{S1} &= e_{11} I_{S1} \\ V_{S2} &= e_{21} I_{S1} \end{aligned} \tag{3.45}$$

$$I_S = \frac{V_{S1}}{Z_S} + \frac{V_{S1}}{e_{11}} \tag{3.46}$$

(3.46) denkleminden birinci iletkenin gerilimi;

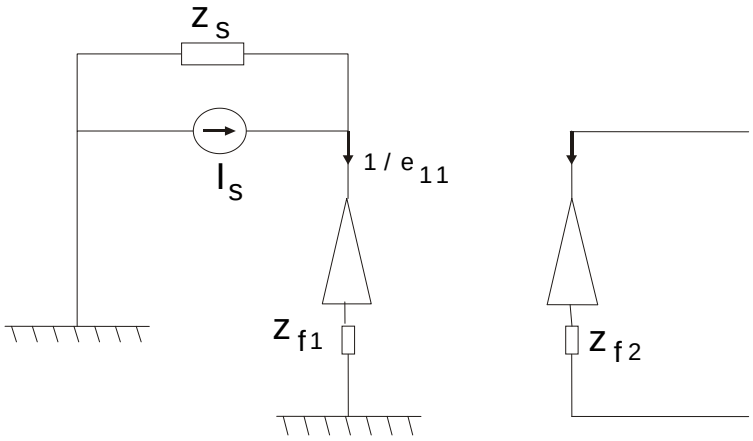
$$V_{S1} = \frac{I_S}{\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{e_{11}}} \tag{3.47}$$

olarak elde edilir ve buradan;

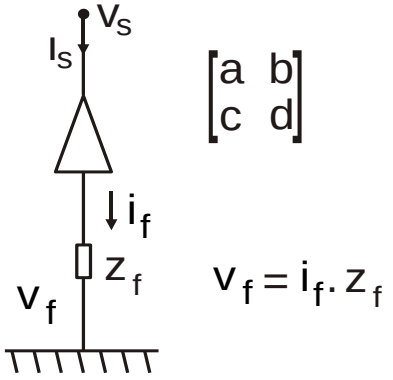
$I_{S1} = \frac{V_{S1}}{e_{11}}$ olarak alınır.

İkinci iletkende (direkte) indüklenen gerilim $V_{S2}=e_{21}.I_{S1}$ olarak bulunmuş olur.

Burada elde edilen formüllere her iletkenin topraklama direncinin eklenmesi gerekmektedir. Çünkü her iletken (veya iletim direği) yeryüzüne topraklanmaktadır. Şekil 3.8'de topraklama direnci eklenmiş iki iletkenin ortak elemanlarını hesaplamak için verilen eşdeğeri görülmektedir. Şekil 3.9'da ise bir iletken için ayrıntılı durum gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Topraklama direnci eklenmiş iki dik iletkenin eşdeğeri



Şekil 3.9. Yere dik iletkenin empedansının ayrıntılı gösterimi

Kuplajlığı direğin admitans ifadesi ile ilişkilendirmek için;

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_f . i_f \\ i_f \end{bmatrix} \tag{3.48}$$

olarak yazılır ve buradan;

$$V_S = \left(a.Z_f + b\right) i_f \tag{3.49}$$

ve

$$I_S = \left(c.Z_f + d\right) i_f \tag{3.50}$$

olarak bulunur ve (3.49) ve (3.50) eşitliklerinden;

$$i_f = \left(c.Z_f + d\right)^{-1} .I_S \tag{3.51}$$

ve

$$V_S = \frac{a.Z_f + b}{c.Z_f + d} .I_S \tag{3.52}$$

olur. Buradan YKEM içine Z_f dahil edilmek istenirse;

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \qquad Z_o = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \qquad \gamma = \sqrt{Z.Y}$$

olduğundan yola çıkarak aşağıdaki gibi:

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ \dots \\ I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \\ c_{11} & c_{12} & d_{11} & d_{12} \\ c_{21} & c_{22} & d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} \tag{3.53}$$

olur.

Burada;

$$V_{f1} = Z_{f1}.I_{f1} \tag{3.54}$$

$$V_{f2} = Z_{f2}.I_{f2} \tag{3.55}$$

şeklinde bulunur. Akım ve gerilim değerleri ayrı ayrı yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \end{bmatrix} = \left[A_{Zf} \right] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} + [B] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} = \left\{ \left[A_{Zf} + B \right] \right\} \left[I_f \right] \tag{3.56}$$

$$\begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} = \left[C_{Zf} \right] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} + [D] \begin{bmatrix} I_{f1} \\ I_{f2} \end{bmatrix} = \left\{ \left[C_{Zf} + D \right] \right\} \left[I_f \right] \tag{3.57}$$

bulunur. (3.51)' de $I_f = \left(c.Z_f + d \right)^{-1}.I_S$ olduğundan gerilim matrisi;

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \end{bmatrix} = \left[\left[A_{Zf} + B \right] \left[C_{Zf} + D \right]^{-1} \right] \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \end{bmatrix} \tag{3.58}$$

olur. Burada;

$$C_{Zf} = \begin{bmatrix} c_{11}Z_{f1} & c_{12}Z_{f2} \\ c_{21}Z_{f1} & c_{22}Z_{f2} \end{bmatrix} \tag{3.59}$$

ve

$$A_{Zf} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{f1} & 0 \\ 0 & Z_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}Z_{f1} & a_{12}Z_{f2} \\ a_{21}Z_{f2} & a_{22}Z_{f2} \end{bmatrix} \tag{3.60}$$

dir.

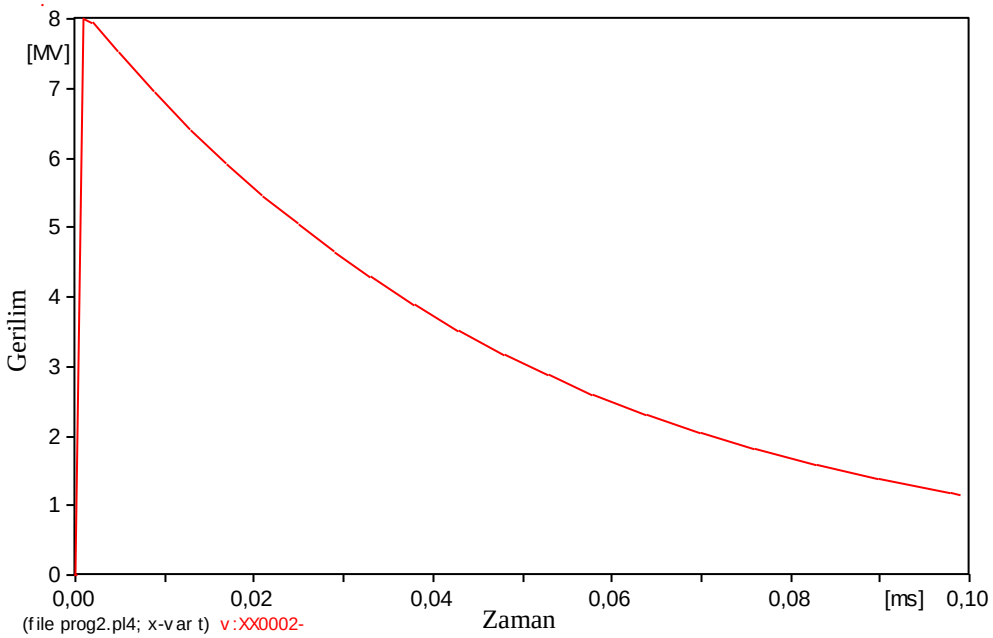
Yukarıdaki formülden elde edilen bu eşitlikler MATLAB'da modellenip kodlanmıştır. Yıldırımın düştüğü bir iletkenin parelelindeki diğer bir iletkende indüklediği gerilim V_{S2} değeri farklı koşullarda elde edilmiştir. Öncelikle h_1 ve h_2 değerleri sabit tutulup, d değeri değiştirilerek uzaklığın indüklenen gerilime etkisi incelenmiştir. Daha sonra, iki iletken arasındaki uzaklık d ve ikinci iletkenin yüksekliği h_2 sabit tutulup, birinci iletkenin yüksekliğinin değişimiyle ikinci iletkende indüklenen gerilimdeki değişiklik gözlemlenmiştir. Üçüncü durumda d ve h_1 sabit tutulup h_2 değeri değiştirilmiştir. Son olarak Wilson ve Malan'ın alan değişim formülleri MATLAB'da incelenmiştir. Bu dört durum için elde edilen sonuçlar araştırma bulguları kısmında verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

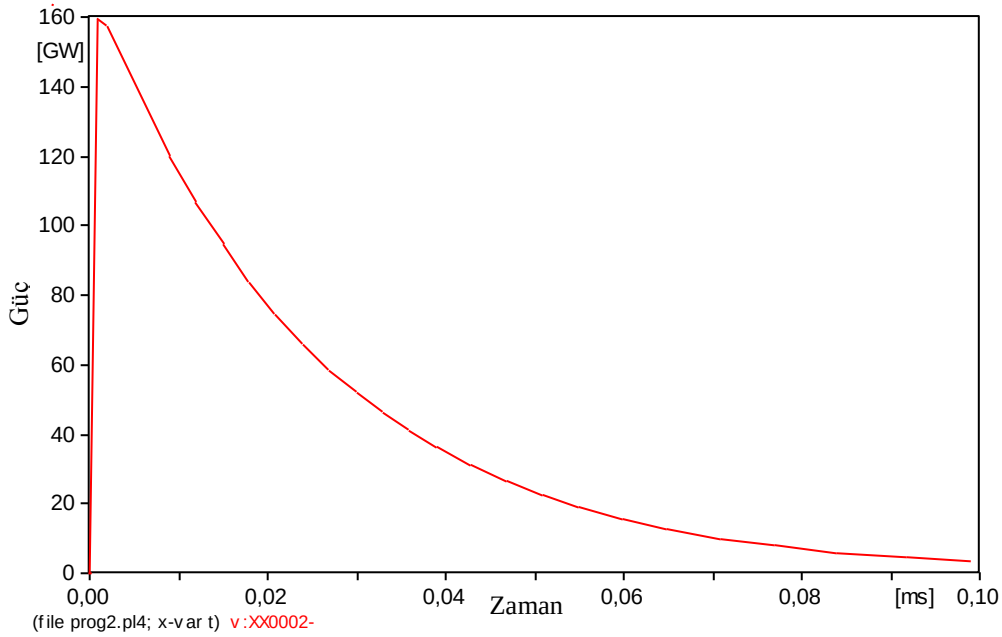
Bu çalışmada yıldırım enerjisinin analizi için EMTP/ATP ve MATLAB programlarından yararlanılmıştır. Öncelikle Şekil 3.2'de görülen yıldırım eşdeğer devresi yöntemiyle elde edilen gerilim ve anlık güç çizimi yapılmıştır. İkinci olarak yükselme süresinin enerji değerine etkisini incelemek için yükselme zamanı üç farklı değer girilerek benzetim yapılmıştır. Ayrıca yarılanma süresinin enerji değerine etkisi farklı bir değer girilerek incelenmiştir. Daha sonra 3.bölümde elde edilen iki iletkenin ortak empedans matrisi MATLAB'da kodlanarak ikinci iletkende indüklenen gerilim değerinin iletkenlerin uzaklıklarına ve boyutlarına bağlı olarak değişimi ayrı ayrı analiz edilmiştir.

4.1. Yıldırım Akımının ATP Programı Benzetimi Yardımıyla Enerji Hesabı

Çalışmada akım kaynağı olarak Heidler fonksiyonu kullanılmıştır. Akım tepe değeri I_0=20 kA girilerek çizim yapılmıştır. Yarılanma süresi τ_2=50 µs ve yükselme zamanı τ_1=1.2 µs için gerilim ve anlık güç değerleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. I_0=20 kA, τ_1=1.2 µs ve τ_2=50 µs için gerilim

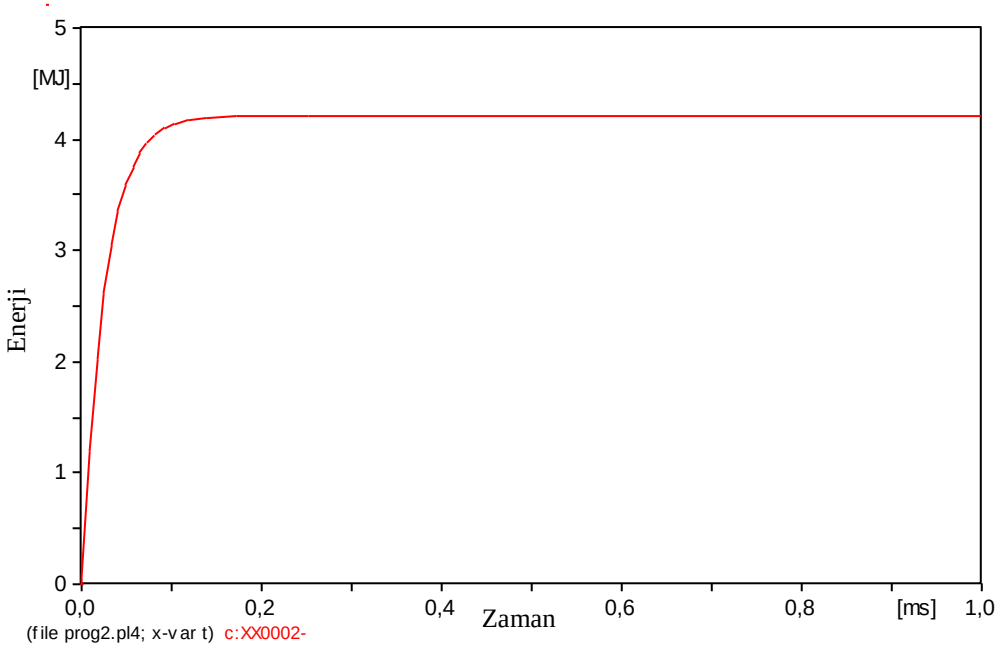


Şekil 4.2. I_0=20 kA, τ_1=1.2 µs ve τ_2=50 µs için anlık güç

Bölüm 2.9'da gösterilen ve şimdiye kadar yapılan çalışmalarda özetle elde edilen sonuçlara bakıldığında yıldırım akımının ortalama gerilim ve anlık güç değerleri sırasıyla 10^6 -10^8 V ve 10^8-10^{10} W aralığında olduğu görülür. Bizim bu bölümde ATP programında elde ettiğimiz gerilim ve anlık güç değerlerinin, bölüm 3.2.2'de yıldırım eşdeğer devre hesabına göre elde ettiğimiz sonuçlarla aynı çıktığı görülür.

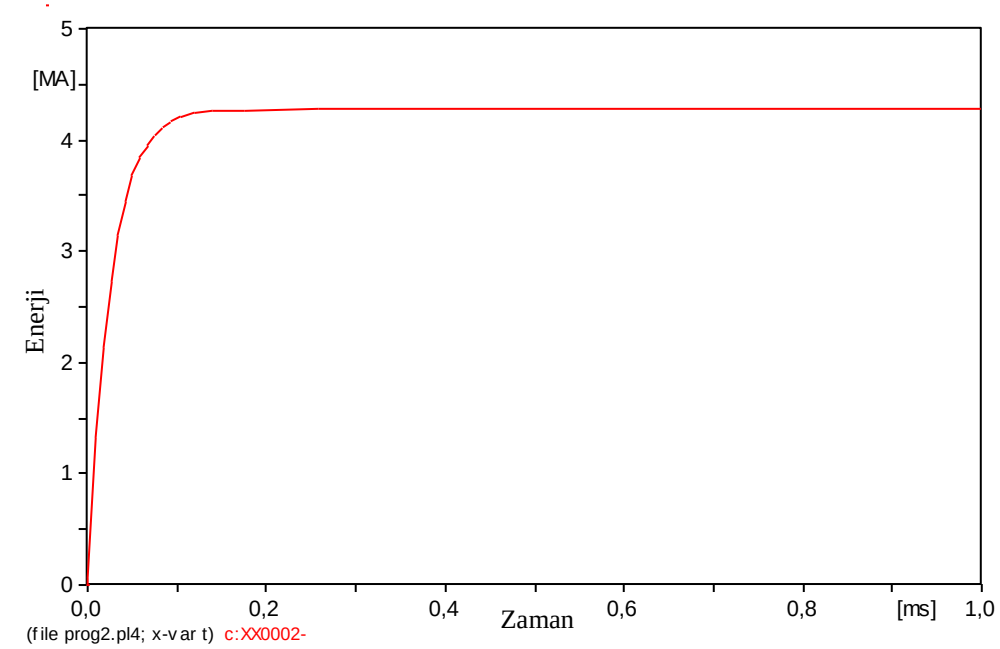
4.1.1. Yıldırım yükselme zamanının yıldırım enerji hesabına etkisi

Yıldırım akım tepe değeri 20 kA için yükselme zamanı üç farklı değer alınarak diklik faktörünün yıldırım enerjisine etkisi incelenmiştir. Öncelikle yükselme zamanı 1.2/50 µs olarak girilmiştir. Enerji benzetimi için elde edilen sonuç Şekil 4.3'de verilmiştir.



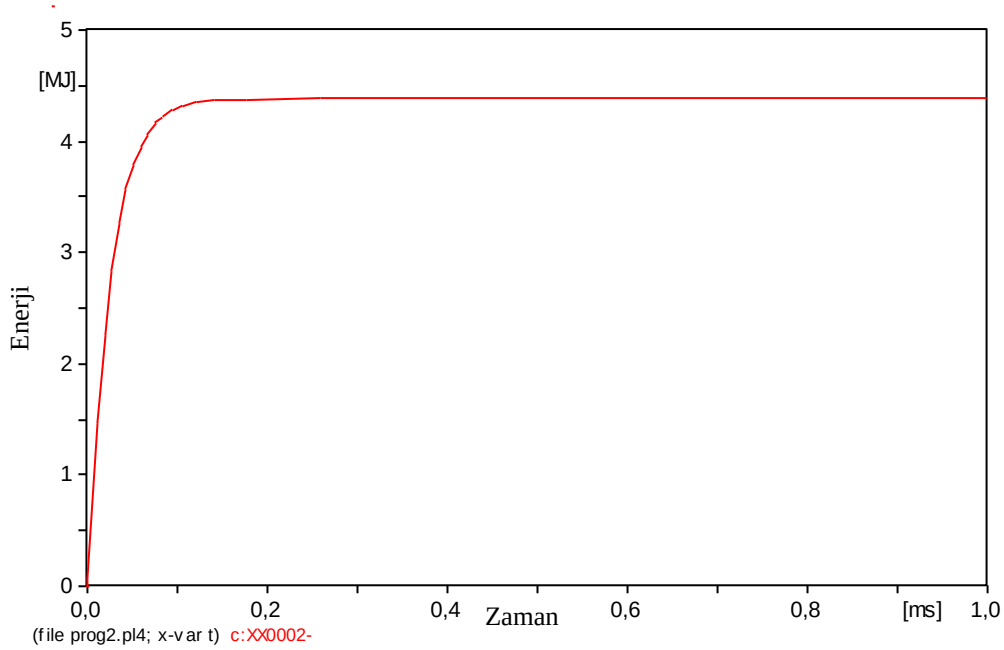
Şekil 4.3. Yükselme zamanının 1.2/50 µs olması durumu için enerji

İkinci olarak yükselme zamanı 1.5/50 µs girilmiştir. Enerji benzetimi için elde edilen sonuç Şekil 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4.4. Yükselme zamanının 1.5/50 µs olması durumu için enerji

Son olarak yükselme zamanı 2/50 µs girilmiştir. Enerji benzetimi için elde edilen sonuç Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Yükselme zamanının 2/50 µs olması durumu için enerji

Üç farklı yükselme zamanı için elde edilen enerji tepe değerleri çizelge 4.1'de verilmiştir.

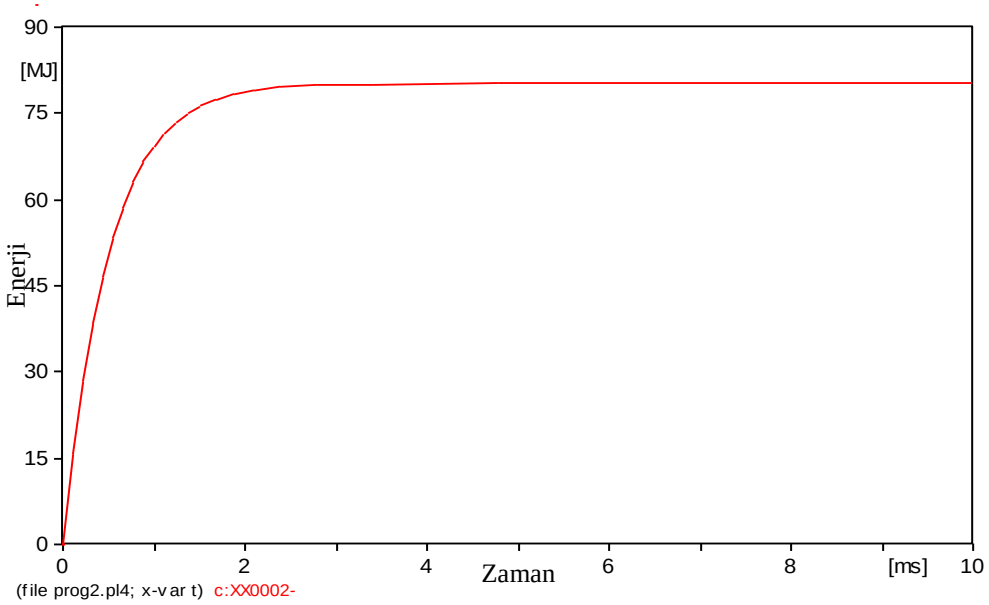
Çizelge 4.1 Üç farklı yükselme zamanı için enerji tepe değerleri

Yükselme zamanı (µs)	**Enerji tepe değeri (MJ)**
1.2/50	4.21
1.5/50	4.27
2/50	4.38

Sonuç olarak yarılanma süresi 50 µs olan 20 kA'lik bir yıldırım akım enerjisinin, farklı yükselme zamanı için farklı değerler aldığı görülür. Çizelge 4.1'e bakıldığında yıldırım akımının yükselme zamanı arttığında enerji tepe değerinin de arttığı görülür. Ayrıca enerji değeri gücün zamana göre integrali yani güç eğrisinin altında kalan toplam alan olduğu için bölüm 3.2.2'de elde edilen değerin yaklaşık yarısı kadar bulunur.

4.1.2. Yıldırım yarılanma süresinin yıldırım enerji hesabına etkisi

Bir önceki bölümde yıldırım yükselme zamanı üç farklı değer alınarak diklik faktörünün artmasıyla enerji değerinin arttığı görülmüştür. Yıldırım akımı için diğer önemli bir parametre de yarılanma süresidir. Bir önceki bölümde yarılanma süresi 50 µs alınarak benzetim yapılmıştı. Bu bölümde yıldırım akımının tepe değeri 20 kA olmak kaydıyla yükselme zamanı 1.2 µs için yarılanma süresi 1000 µs alınarak benzetim yapılmıştır ve elde edilen sonuç Şekil 4.6'da verilmiştir.

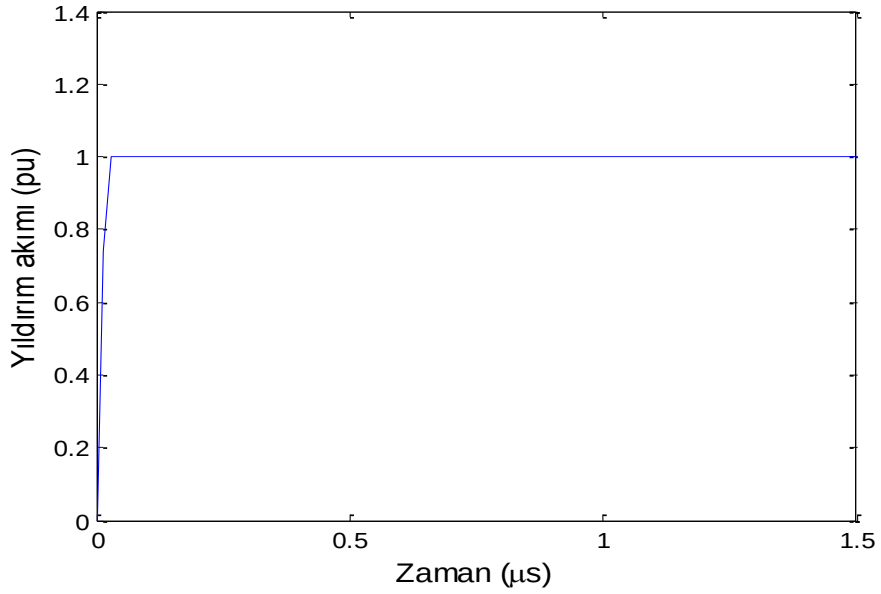


Şekil 4.6. I_0=20 kA, τ_1=1.2 µs ve τ_2=1000 µs için enerji benzetimi

Enerji tepe değeri, yarılanma süresi 50 µs'de Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, yaklaşık $4{,}21.10^6$ J iken, yarılanma süresi 1000 µs alındığında Şekil 4.6'da görüldüğü gibi $80{,}21.10^6$ J'a kadar çıkmıştır. Sonuç olarak yıldırımın enerjisi yıldırım akımının yarılanma süresiyle doğru orantılı olarak artacağı gözlenmiştir.

4.2. Yıldırım Düşen Dikey İletkenlerde İndüklenme Yoluyla Alan Dağılımının MATLAB Benzetimi Sonuçları

Üçüncü bölümde yere dik iki iletkenin ortak empedans hesabı yapılmıştı. Elde edilen sonuçlar bu bölümde MATLAB programında kullanılmıştır. Birinci iletkene yıldırım düşmesi durumunda ikinci iletkende indüklediği gerilim hesabı için üçüncü bölümde elde edilen gerekli parametreler MATLAB' da girilmiş ve bu parametreler sabit tutulmak şartıyla iletkenlerin boyu ve uzaklıklarının indüklenen gerilimdeki etkilerini ölçmek için MATLAB yardımıyla analiz yapılmıştır. Buradaki analizlerde indüklenen gerilimlerin tepe noktalarını daha iyi görmek için yıldırım akımının dalga şekli rampa olarak alınmış ve şekil 4.7' de gösterilmiştir.

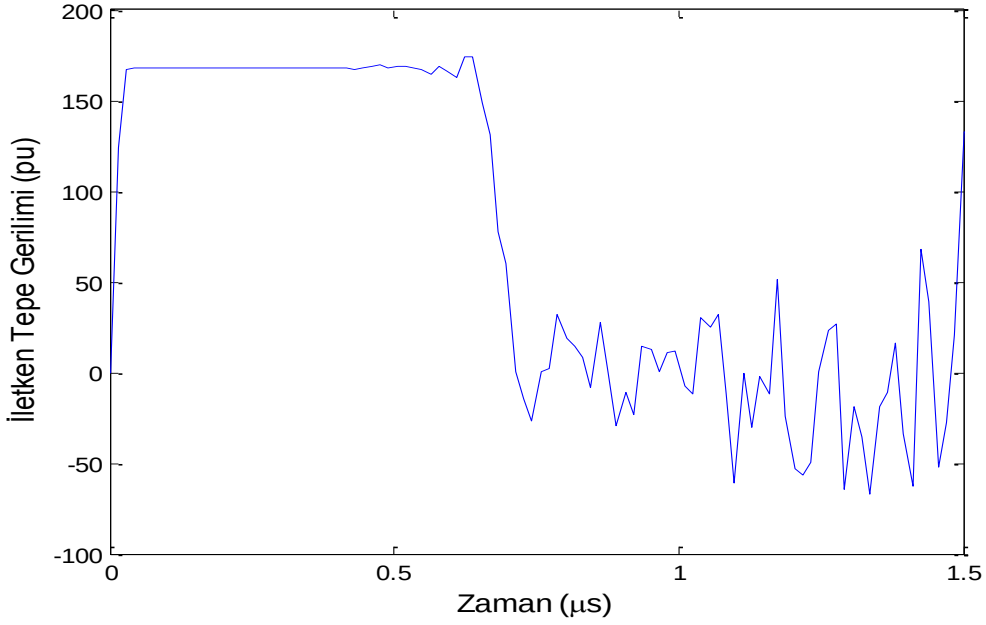


Şekil 4.7.Yıldırım akımının dalga şekli

4.2.1. İletkenler arası mesafenin indüklenen gerilimdeki etkisi

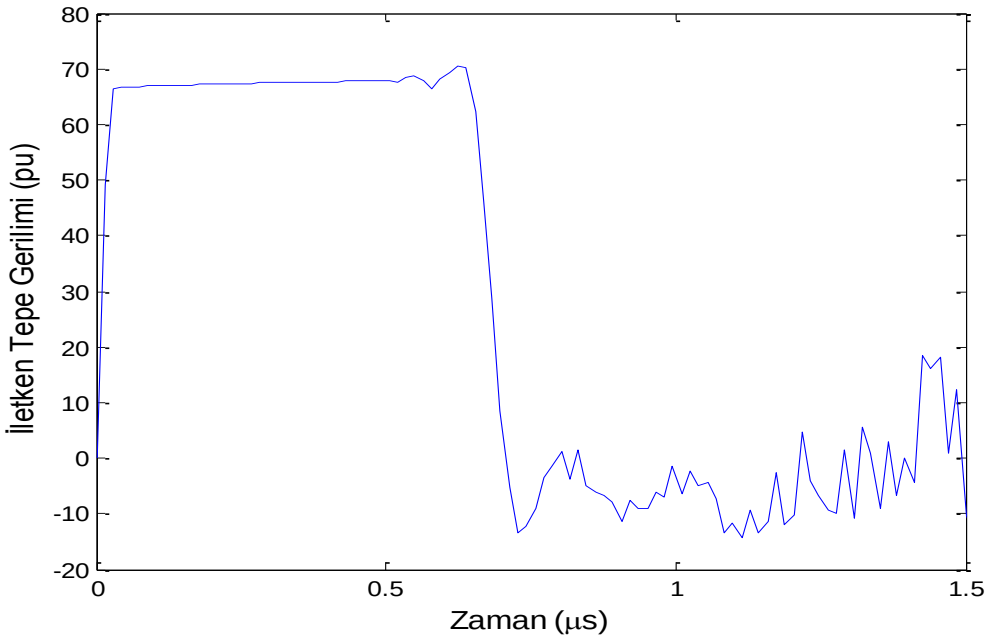
Uzaklığın indüklenen gerilim üzerindeki etkisi, yükseklikler 100 m'de sabit tutulup iletkenler arası mesafe d=1 m, d=25 m, d=50 m, d=100 m olmak üzere dört farklı değer verilerek hesaplanmıştır.

Örnek 1: d=1 m alındı. Sonuç Şekil 4.8 'de verilmiştir.



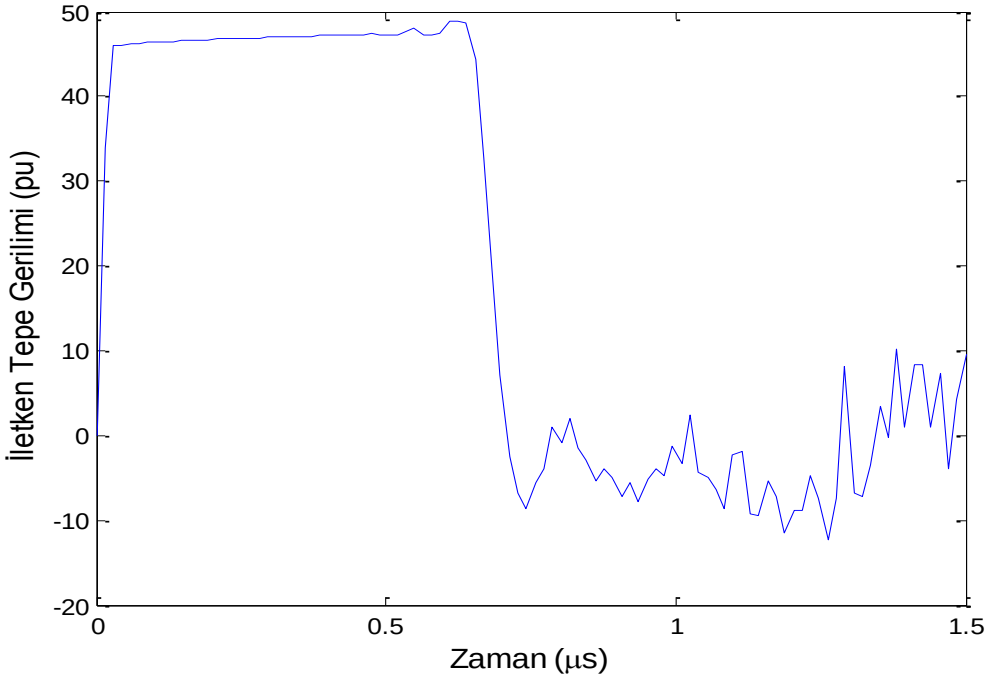
Şekil 4.8. h_1=100 m, h_2=100m ve d=1m iken benzetim sonucu

Örnek 2: d=25 m alındı. Sonuç Şekil 4.9 ‘da verilmiştir.



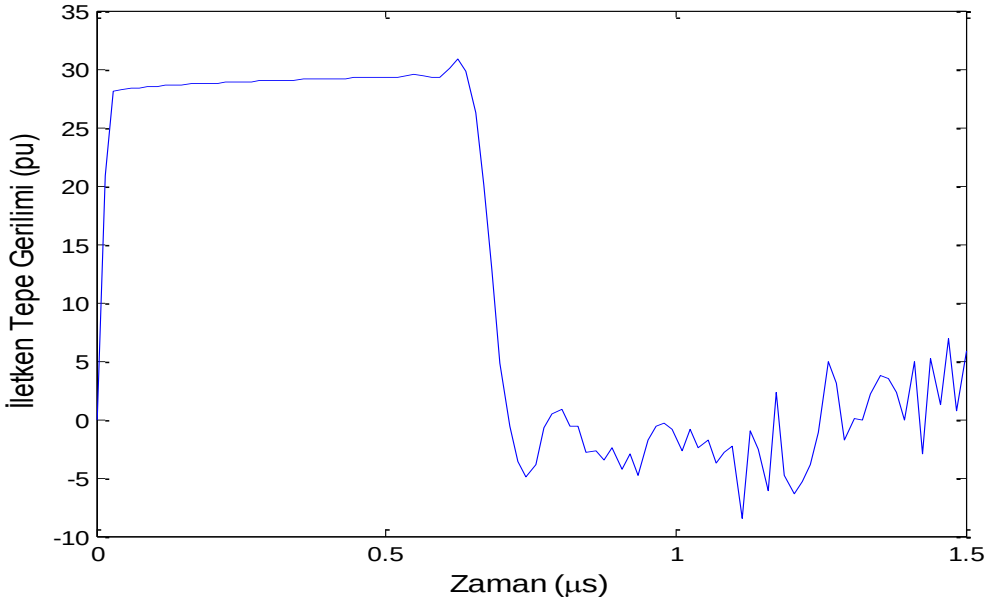
Şekil 4.9. h_1=100 m, h_2=100m ve d=25m iken benzetim sonucu

Örnek 3: d=50 m alındı. Sonuç Şekil 4.10 ‘da verilmiştir.



Şekil 4.10. h_1=100 m, h_2=100m ve d=50 m iken benzetim sonucu

Örnek 4: d=100 m alındı. Sonuç Şekil 4.11 ‘da verilmiştir.



Şekil 4.11. h_1=100 m, h_2=100m ve d=100 m iken benzetim sonucu

Sonuç 1: Örnek 1, Örnek 2, Örnek 3 ve Örnek 4’ deki sonuçlara bakıldığında birinci ve ikinci iletkenin boyu h_1 ve h_2 sabit tutulduğunda ikinci iletkende indüklenen gerilim V_{S2}, iki iletken arasındaki mesafe d ile ters orantılı olarak değiştiği görülür. Birinci örnekte, iletkenler arası mesafe 1 m ve indüklenen gerilim yaklaşık 160 pu iken son örnekte iletkenler arası mesafe 100 m’ye çıkarıldığında indüklenen gerilim yaklaşık 30 pu’a kadar düştüğü görülür. Elde edilen sonuçlar özet olarak Çizelge 4.2.’de verilmiştir. Bu sonuca göre ikinci iletkende indüklenen gerilim değerini artırmak için iletkenler mümkün mertebe yakın tutulmalıdır.

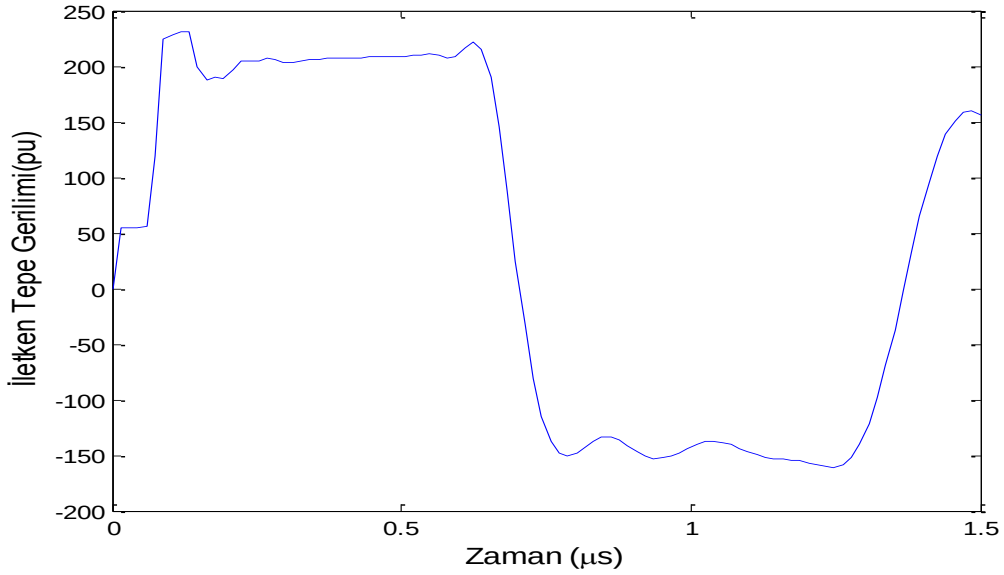
Çizelge 4.2. İletkenler arası mesafe etkisi

İletkenler arası mesafe	**İndüklenen gerilimin tepe değeri**
1 m	160 pu
25 m	70 pu
50 m	45 pu
100 m	30 pu

4.2.2. Yıldırımın düştüğü iletkenin yüksekliğinin indüklenme gerilimindeki etkisi

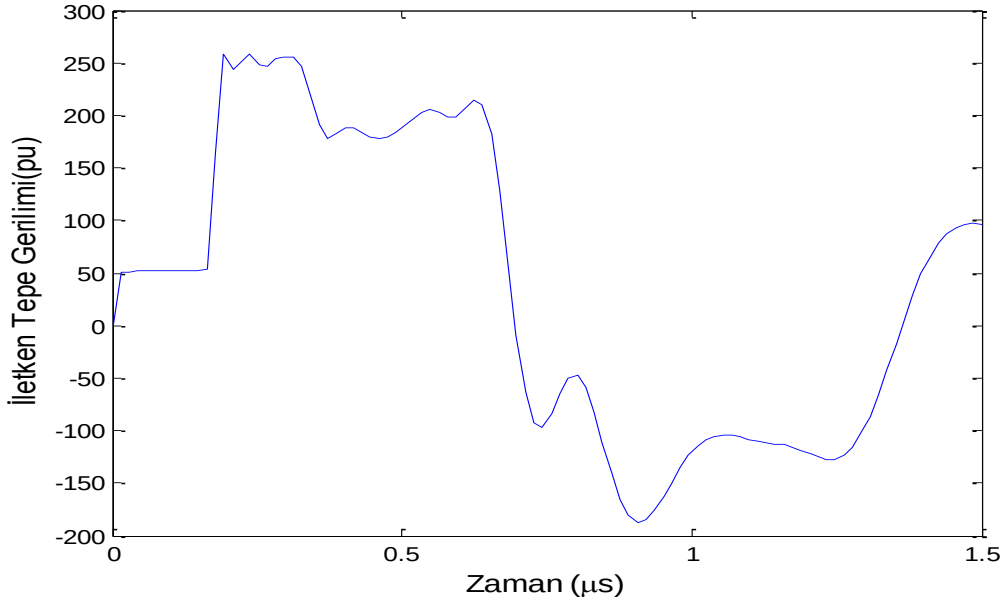
Bu bölümde yıldırım düşen iletkenin yüksekliğinin indüklenen gerilimdeki etkisini ölçmek için iletkenler arası mesafe 50 m ve ikinci iletkenin boyu 100 m'de sabit tutularak birinci iletkenin boyu h_1 sırasıyla 10 m, 25 m, 50 m, 100 m olmak üzere dört farklı değer girilerek analiz edilmiştir.

Örnek 5: Birinci iletkenin yüksekliği h_1=10 m alınarak sonuç Şekil 4.12 'de verilmiştir.



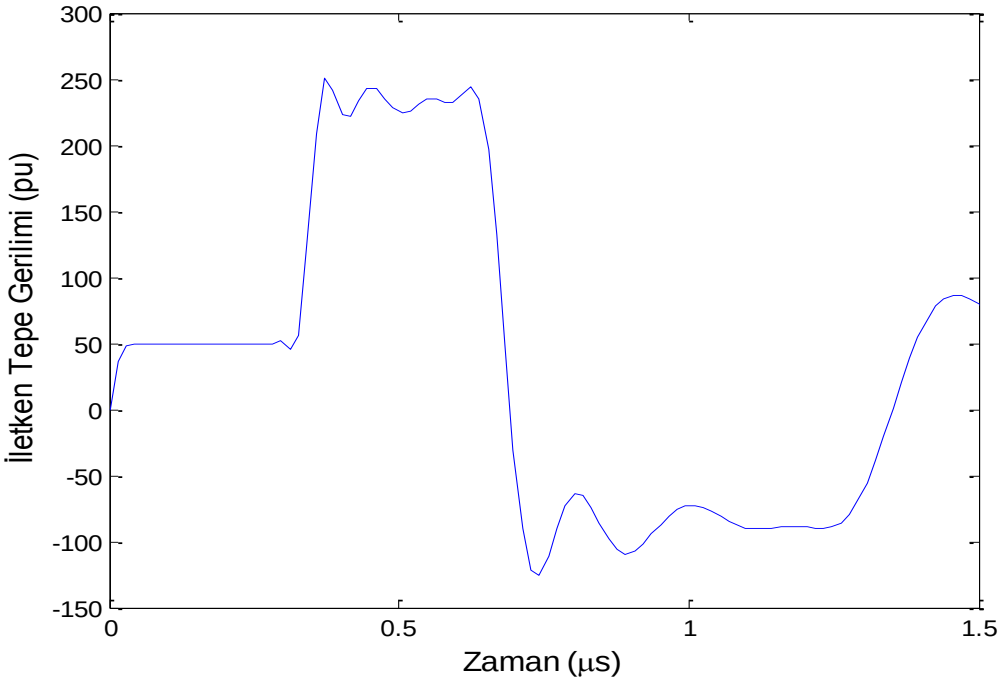
Şekil 4.12. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=10 m iken benzetim sonucu

Örnek 6: Birinci iletkenin yüksekliği h_1=25 m alınarak sonuç Şekil 4.13'de verilmiştir.



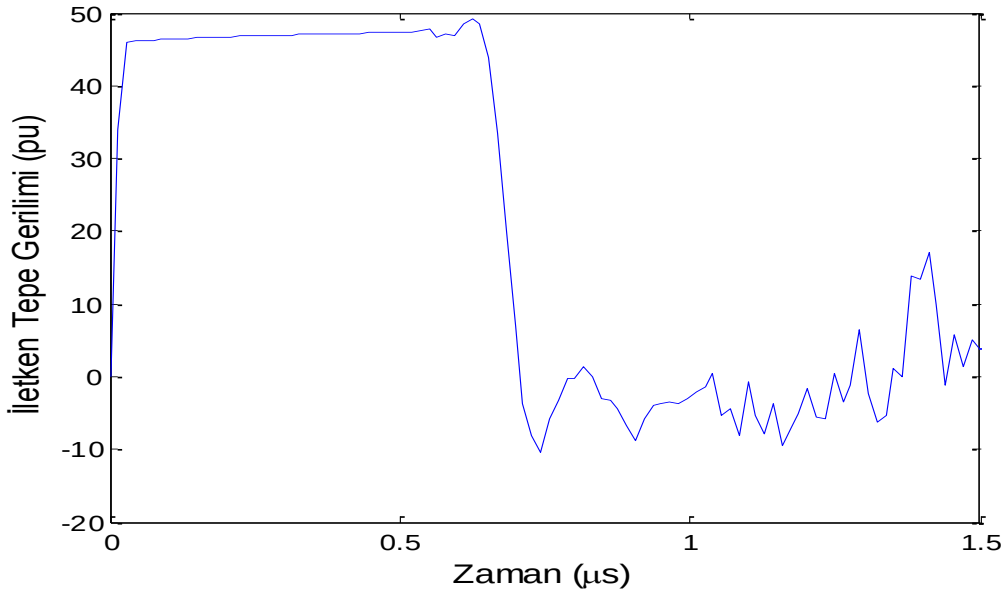
Şekil 4.13. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=25 m iken benzetim sonucu

Örnek 7: Birinci iletkenin yüksekliği h_1=50 m alınarak sonuç Şekil 4.14 ‘de verilmiştir.



Şekil 4.14. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=50 m iken benzetim sonucu

Örnek 8: Birinci iletkenin yüksekliği h_1=100 m alınarak sonuç Şekil 4.15 ‘de verilmiştir.



Şekil 4.15. d=50 m, h_2=100 m ve h_1=100 m iken benzetim sonucu

Elde edilen sonuçlar özet olarak Çizelge 4.3.’de verilmiştir.

Çizelge 4.3.Yıldırım düşen iletkenin boyunun indüklenen gerilime etkisi

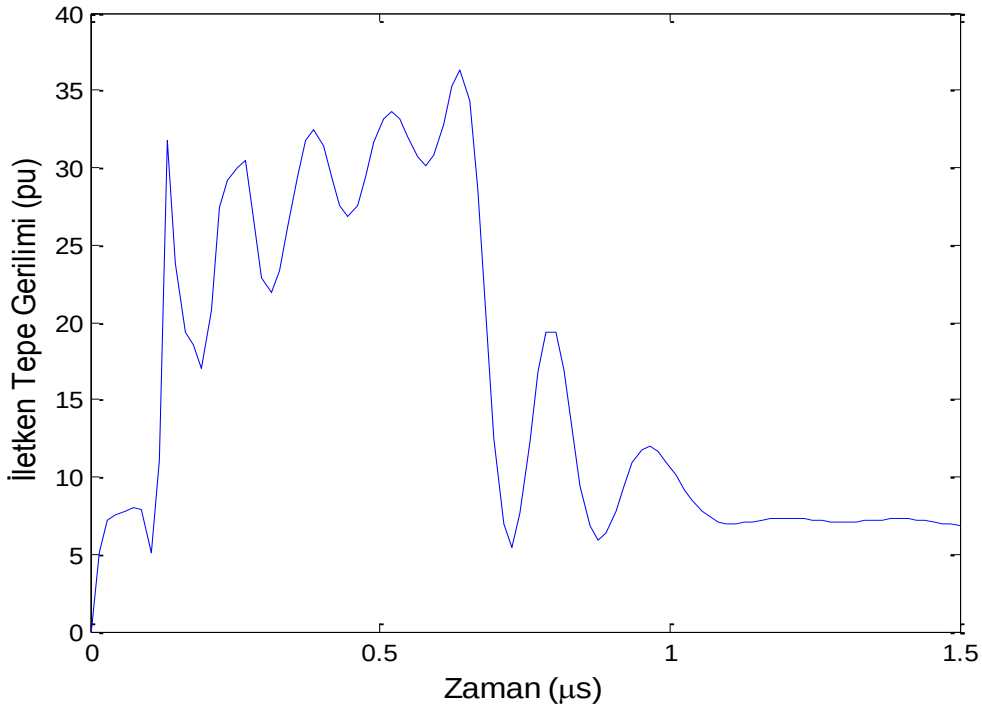
Yıldırım düşen iletkenin boyu	**İndüklenen gerilimin ilk tepe değeri**
10 m	55.9 pu
25 m	51.8 pu
50 m	48.6 pu
100 m	46.0 pu

Sonuç 2: Örnek 5, Örnek 6, Örnek 7 ve Örnek 8'deki sonuçlara ve Çizelge 4.3'e bakıldığında ikinci iletkenin boyu h_2 ve iki iletken arasındaki mesafe d sabit tutulduğunda, ikinci iletkende indüklenen gerilim V_{S2}, h_1 ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. h_1=10 m iken V_{S2}'nin ilk tepe değeri 55.9 pu seviyesindeyken, h_1=100 m 'ye çıkarıldığında V_{S2}'nin ilk tepe değeri 46 pu'a kadar düştüğü görülür. Fakat direğin alt noktasından yansıma olduktan sonra tüm durumlar için tepe geriliminin yaklaşık olarak 250 pu değerine çıktığı şekillerden görülmektedir.

4.2.3. Yıldırım düşen dikey iletkenin yakınındaki direğin yüksekliğinin etkisi

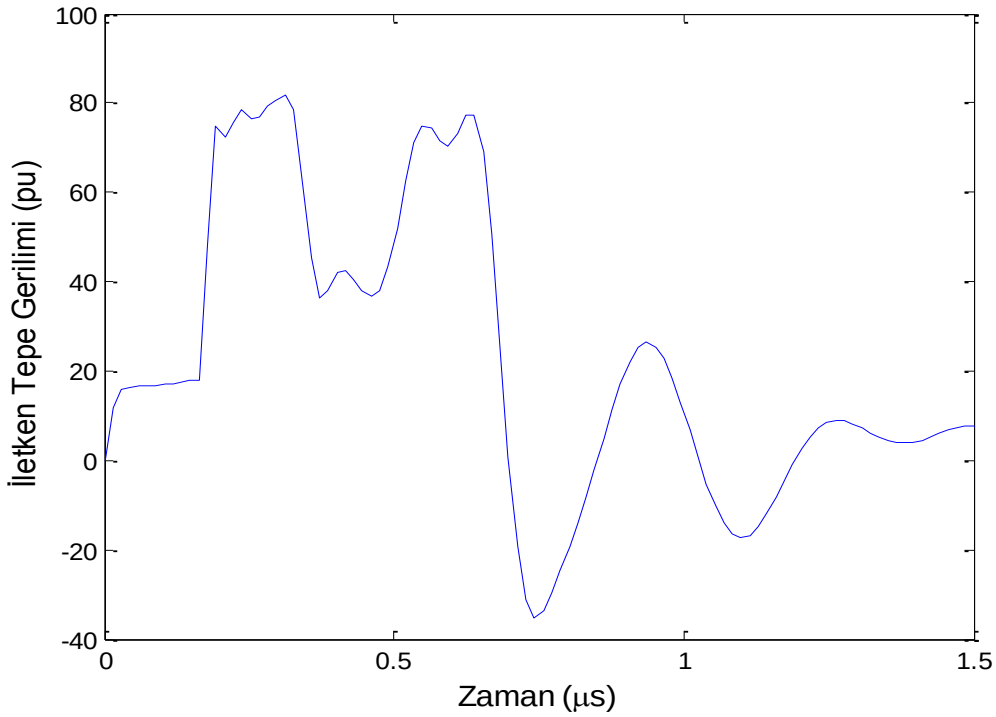
Bu bölümde yıldırım düşen iletkenin yakınındaki direğin yüksekliğinin indüklenen gerilimdeki etkisini ölçmek için iletkenler arası mesafe 50 m ve birinci iletkenin boyu 100 m'de sabit tutularak ikinci iletkenin boyu h_2 sırasıyla 10 m, 25 m, 50 m, 100 m olmak üzere dört farklı değer girilerek analiz edilmiştir.

Örnek 9: İkinci iletkenin boyu h_2=10 m alınarak benzetme sonucu Şekil 4.16' da verilmiştir.



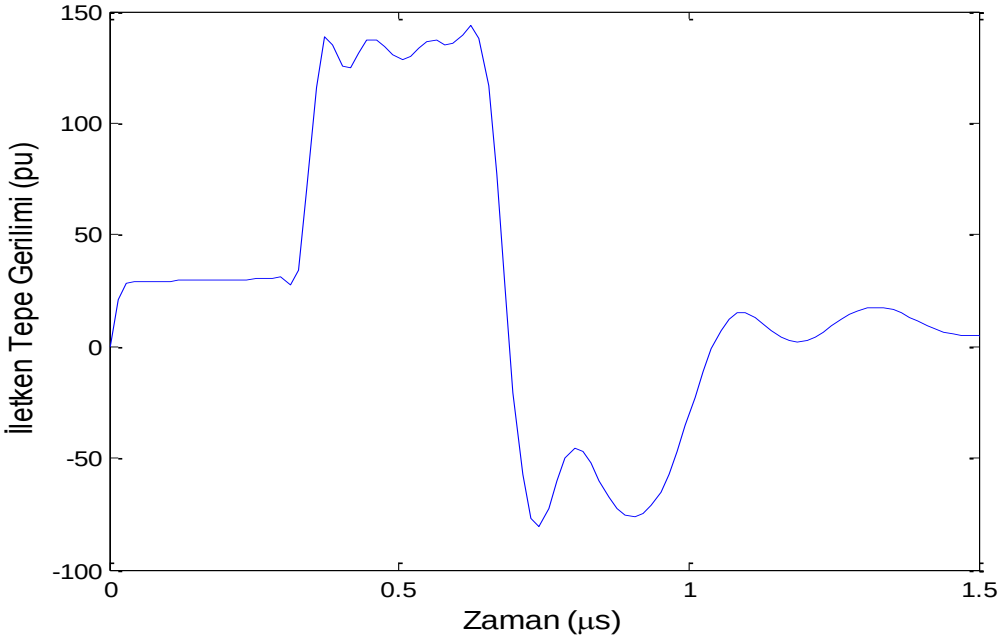
Şekil 4.16. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=10 m iken benzetim sonucu

Örnek 10 : İkinci iletkenin boyu h_2=25 m alındı. Benzetme sonucu Şekil 4.17' de verilmiştir.



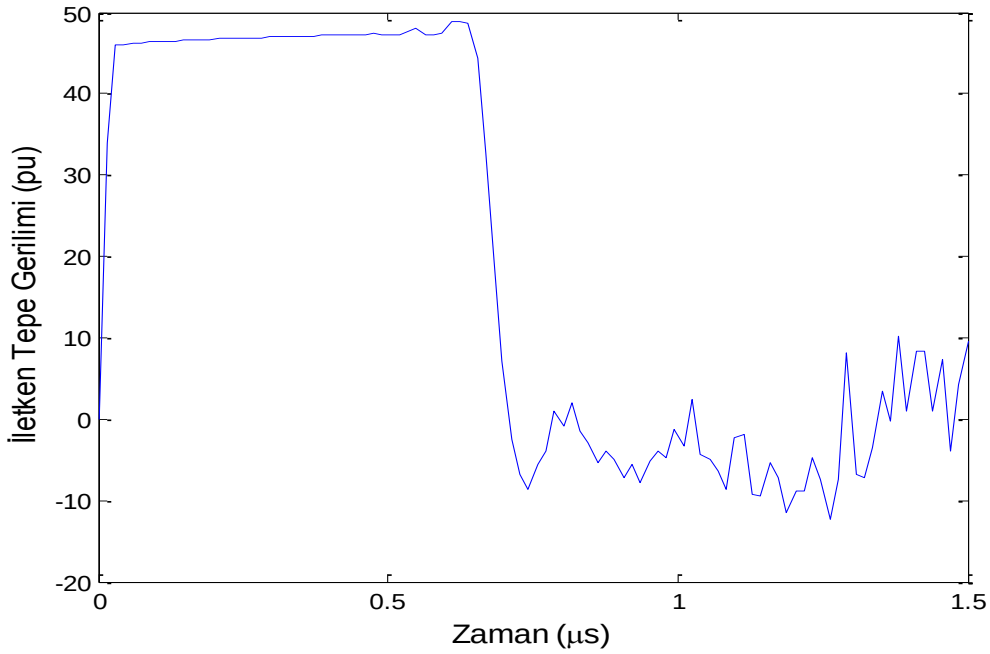
Şekil 4.17. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=25 m iken benzetim sonucu

Örnek 11 : İkinci iletkenin boyu h_2=50 m alındı. Benzetme sonucu Şekil 4.18' de verilmiştir.



Şekil 4.18. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=50 m iken benzetim sonucu

Örnek 12 : İkinci iletkenin boyu h_2=100 m alındı. Benzetme sonucu Şekil 4.19' da verilmiştir.



Şekil 4.19. d=50 m, h_1=100 m ve h_2=100 m iken benzetim sonucu

Elde edilen sonuçlar özet olarak Çizelge 4.4.'de verilmiştir.

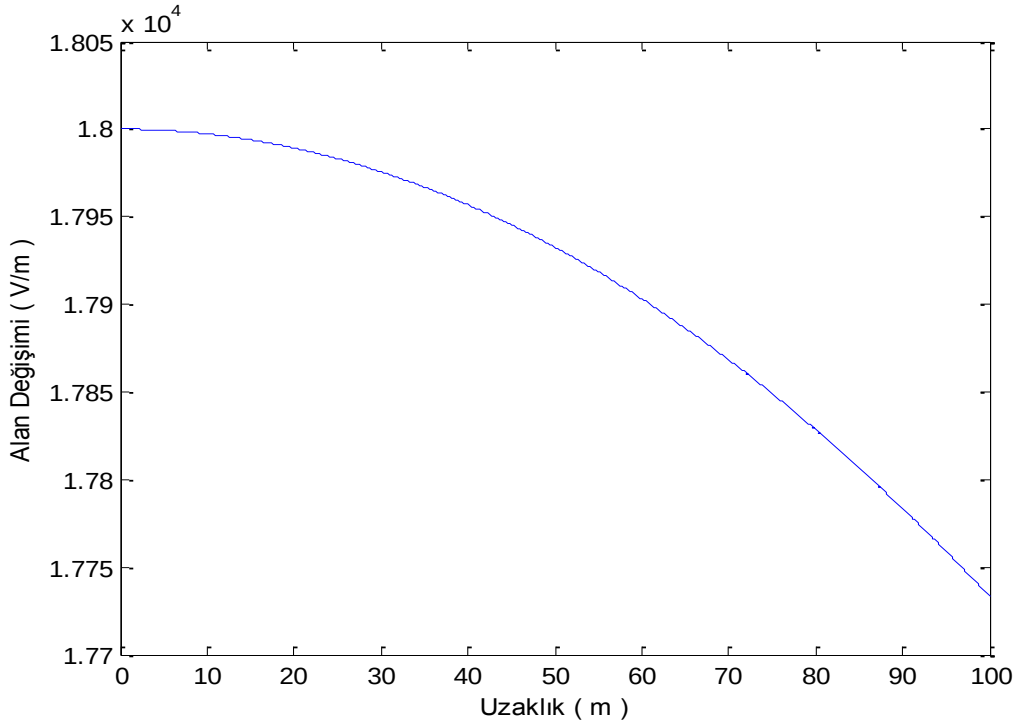
Çizelge 4.4. Yıldırım düşen iletkenin yakınındaki direğin indüklenen gerilimdeki etkisi

Yıldırım düşen iletkenin yakınındaki direğin boyu	**İndüklenen gerilimin ilk tepe değeri**
10 m	7 pu
25 m	16 pu
50 m	28 pu
100 m	46 pu

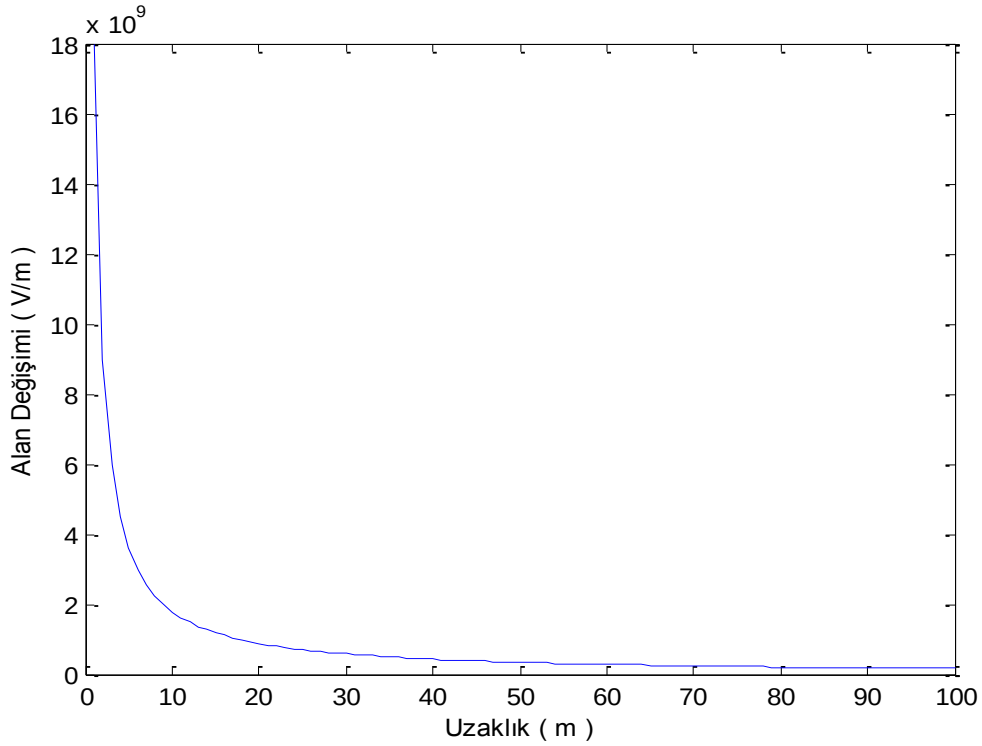
Sonuç 3: Örnek 9, Örnek 10, Örnek 11 ve Örnek 12'deki sonuçlara ve Çizelge 4.4'e bakıldığında birinci iletkenin boyu h_1 ve iki iletken arasındaki mesafe d sabit tutulup h_2 değeri artırıldığında, ikinci iletkende indüklenen gerilimin ilk tepe değerinin giderek arttığı görülür. İkinci iletkenin boyu 10 m'den 100 m'ye çıkarıldığında indüklenen gerilimin ilk tepe değeri de 7 pu'dan 46 pu'e kadar çıktığı görülür. Bu sonuca göre ikinci iletkende indüklenen gerilim, h_2 ile doğru orantılı olarak artacaktır. Şekillerde görüldüğü gibi direğin alt noktasından yansıma olduktan sonra 35 pu ile 140 pu arasında değişen değerlere ulaşmaktadır.

4.3. Wilson ve Malan'ın Alan Değişim Formüllerinin MATLAB'da Analizi

Wilson ve Malan'ın, yerden *H* yükseklikte bulunan bulutun merkezinde toplam yük *Q* iken yıldırım darbesinin *D* uzaklığında ölçülen alan değişimi *F*'i (2.1) ve (2.2) eşitliklerindeki gibi formilize ettikleri ikinci bölümde verilmişti. "Bu eşitliklerde, bulutun yerden yüksekliği H =1000 m ve toplam boşalan yük Q= 1 C alınarak yıldırım darbe noktasından 100 m'ye kadar olan alan değişimi MATLAB'da analiz edilerek benzetim sonuçları Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.20.Wilson'un alan değişim formülünün benzetim sonucu



Şekil 4.21.Malan'ın alan değişim formülünün benzetim sonucu

Sonuç 4: Wilson'un alan değişim formülünün benzetim sonucuna göre yıldırım darbe noktasında yani $D=0$ 'da alan değişimi yaklaşık $1.8.10^4$ V/m iken Malan'ın formülüne göre sonsuza gitmektedir. Ayrıca Wilson (2.1) eşitliğini tüm yıldırım darbesi için vermişken, Malan ise (2.2) eşitliğini sadece öncü darbe için vermiştir. Bu yüzden Malan'ın verdiği eşitliğin benzetim sonucu daha hızlı değişim gösterirken Wilson'un eşitliği nisbeten daha uzun mesafede değişim gösterdiği görülür.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Dönüşümü olmayan fosil yakıtlı enerji kaynaklarının tükenmeye yüz tutmasıyla birlikte rüzgar, güneş gibi yenilenebilir kaynaklarına yönlenişle beraber, enerji kaynağı araştırmalarında çekici olan yıldırım da bir çok araştırmaya konu olmuştur. Yıldırım enerjisinin direk olarak kullanılması şimdiye kadar mümkün olmamıştır fakat dolaylı olarak kullanımıyla ilgili çok sayıda fikir yürütülmüştür. Bu çok farklı tezlerden biride yıldırım enerjisinin öncelikle ısı enerjisine çevrilip daha sonra bu ısıyla buharlaştırılan suyun tribünleri harekete getirmesiyle elektrik üretilmesidir. Bunun için yüksek değerlikli rezistanslar kullanılmalıdır. Yıldırım akımının dolaylı olarak kullanımıyla ilgili olarak ileri sürülen bir diğer yöntemde indüklenmeyle oluşan gerilimin kullanılmasıdır. Fakat bu enerjiyi elde etmek için kurulacak böyle bir sistemde iletkenlerin yüksek olması maliyeti artıracaktır.

Bu çalışmada yıldırım yolu empedansı modeliyle ATP programında yıldırımın yükte oluşturduğu gerilim, anlık güç ve enerji değerleri yıldırım akımının iki farklı yarılanma süresine göre analiz edilmiştir. Ayrıca farklı bir yükselme zamanı için de enerji değeri analiz edilmiştir. Daha sonra bir iletkene yıldırım düşmesiyle yakınındaki yere dik duran başka bir iletkende indüklediği gerilimin analizi MATLAB'da benzetim programı yardımıyla yapılmıştır. Öncelikle iki iletkenin ortak empedans hesabı yapılmış ve daha sonra bu iletkenlerin arasındaki uzaklık ve iletkenlerin boyu dört farklı değerde alınarak indüklenen gerilimin benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim sonuçlarına göre iletkenlerin birbirine yakın olmasıyla indüklenen gerilim değerinin artırdığı görülmüştür. Aynı şekilde ikinci iletkenin yüksekliği artırıldıkça indüklenen gerilimin arttığı benzetim sonucunda gözlenmiştir.

Ultra-kapasitörlerin darbe akımıyla şarjı için kullanılan devre sisteminde olduğu gibi indüklenen bu gerilim ilk aşamada bobin tarafından absorbe edilip ikinci aşamada birkaç paralel bağlı kondansatöre depolanabilmesi için nakledilebileceği öngörülmektedir.

Bu sistemde, yıldırımın önceden düşeceği yerin tespitinin neredeyse imkânsız olması ikinci iletkenin (yüksek verim için yıldırımın düştüğü iletkene yakın olması gerekeceğinden) kurulacağı yerin tespitini zorlaştıracaktır. Kurulacak bu sistemde roket tetiklemeli yıldırımla bu sorununda aşılabileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR:

[1] V. A. Rakov, M. A. Uman, *Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application*, **IEEE transactions on electromagnetic compatibility,** 40:4 (1998).

[2] Z. Faydalı, **"***Protectıon against lightning: lightning protection systems, their advantages and disadvantages***"** Master Thesis, İTÜ Turkey, 2009.

[3] V. A.Rakov, M. A.Uman, *Lightning: Physics and effects,* Florida, 2003, 12.

[4] R. E. Orville, *Earth's Electrical Environment,* Newyork, 1986, 23

[5] V. Jayakumar, V.A.Rakov, M. A.Uman, *Estimation of input energy in rocket-triggered lightning*, **Geophysical Research Letters,** 33:L05702 (2006).

[6] V. A. Rakov, M. A. Uman, R.Thottappillil, J.D. Goldberg, *Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama*, **Journal of Geophysical Research**, 98: D12 (1993)

[7] A. T. Özcan, "*Dağıtım şebekelerinde yıldırım aşırı gerilimlerine karşı koruma",* Yüksek lisans tezi, İnönü Üniversitesi, 2005.

[8] A. Kaygusuz, "*s-domain analysis of lightning overvoltages on nonuniform transmission lines*", PhD Thesis, İnönü University Turkey, 2003.

[9] H. J. Christian, R. J. Blakeslee, *Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector,* **Journal of Geophysical Research,** 108:D1 (2003).

[10] M. Canyılmaz, *"The investigation of the effects of lightning on the subionosphere by using vlf propagation"* PhD Thesis, Fırat University Turkey, 2008.

[11] H. Bilgekul,"*Vahşi Elektrik: Şimşek ve Yıldırımlar"* Doğu Akdeniz Üniversitesi, Gazimagosa, 2005.

[12] M. P. Johnson, "*VLF Imaging o f Lightning-Induced Ionospheric Disturbances"* Phd Thesis, Stanford University Stanford, 2000.

[13] S. A. Cummer, T.F.Bell., U.S.Inan, D.L. Chenette, *VLF remote sensing of high energy auroral particle precipitation,* **Journal of Geophysical Research,** 102:A4 (1997) 7477–7484.

[14] W. B. Peter, " *Quantitative measurement of lightning-induced electron precipitation using VLF remote sensing*" Ph.D. thesis, Stanford University Standford, 2007.

[15] W.B.Peter, U.S.Inan, *On the occurence and spatial extent of electron precipitation induced by oblique nonducted Whistler waves,* **Journal of Geophysical Research**, 109:A 12215 (2004) 1-17.

[16] M. A. Staley, "*Sprites and Their Parent Discharges*" Institute of Mining and Technology,New Mexico,2000.

[17] A. Mika, *"Very low frequency EM wave studies of transient luminous events in the lower ionosphere"* Phd Thesis, Crete University, Greece, 2007.

[18] E. M. Wescott, D. Sentman, D.Osborne, D.Hampton, M.Heavner, *Preliminary results from the Sprite94 aircraft campaign: 2. Blue jets,* **Geophysical Research Letters**, 22:10 (1995) 1209–1212.

[19] U. S. Inan, T. F. Bell, V. P. Pasko, D. D. Sentman, E. M. Wescott, W. A. Lyons, *VLF signatures of ionospheric disturbances associated with sprites* **Geophysical Research Letters**, 22:24 (1995) 3461-3464.

[20] E. A. Gerken, U. S. Inan, C. P. Barrington-Leigh, *Telescopic imaging of sprites*, **Geophysical Research Letters,** 27:17 (2000) 2637–2640.

[21] C. P. Barrington-Leigh, U.S.Inan, M.Stanley, S.A.Cummer, *Sprites triggered by negative lightning discharges,* **Geophysical Research Letters**, 26:24 (1999) 3605–3608.

[22] Ş. Emre**, "***Yıldırım boşalmaları ve etkinlik bölgelerinin incelenmesi*", Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 1992.

[23] R. D. Hill *A Survey of Lightning Energy Estimates*, **Reviews Of Geophysics And Space Physıcs,** 17:1 **(**1979).

[24] C. R. Maggio,"*Estimation of Lightning Charge Transfers in New Mexico*" PhD Thesis, University of Mississippi,2007.

[25] V. Jayakumar, "*Estimatıng Power, Energy, And Action Integral In Rocket-Triggered Lightning*" PhD Thesis, University of Florida, 2004.

[26] Canadian/American EMTP User Group, *Alternative Transients Program (ATP) – Rule Book* 1987-1998.

[27] A. Kaygusuz, M. Şeker, *154 kV'luk Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan Kafes direklerin Yıldırım Analizi,* Fırat Üniversitesi, FEEB 2010.

[28] B. W. Bewly, *Travelling Waves on Transmission Systems*, New York Dover, 1963.

[29] K. Ferete, S. Nikolovski, G. Knezevic, M. Stojkov, Z. Kovac, *Simulation of Lightning Transients on 110 kV overhead-cable Transmission Line Using, ATPEMTP*, IEEE, 2010.

[30] T. Hosono, 1981, Numerical inversion of Laplace-transform and some applications to wave optics, Radio Science, Vol. 16, pp. 1015-1019.

[31] E. C. Jordan, K. G. Balmain, *Elektromagnetic Waves and Radiatig Systems,* **Prentice- Hall,** Second Edition (1968) 380-388.

[32] A. Semlyen, A. Deri, *Time Domain Modelling of Frequency dependent Three-Phase Transmission Line Impedence,* **IEE Trans. on PAS** 104:6 (1985).

[33] L. Guardado, P. Moreno, *Non Uniform Line Tower Model For Lightning Transient Studies*, Instituto Tecnologico de Morelia, Mexico, 2001.

EKLER

EK 1.

terslap.m

```
function [tv,ft]=terslap();
      n=101;
      p=6;
      k=10;
      aa=5.0;
      tmax=1.5e-6;
      dt=tmax/n;
      nst=10;
      ltower=50;
      dxt=ltower/nst;
      for i=1:nst;
         x1=(i-1)*dxt;
         x2=x1+dxt;
         za=150.0*exp(0.0077*x1);
         zb=150.0*exp(0.0077*x2);
         zot(i)=(za+zb)/2.0;
      end
      a(p+1)=1.0;
      f(1)=1.0;
      for i=1:p
         f(i+1)=f(i)*(p-i+2)/i;
      end
      for i=p:-1:1
         a(i)=a(i+1)+f(i+1);
      end
      ft(1)=0;
      tv(1)=0;
      for j=2:n+1
          t=dt*(j-1);
          tv(j)=t;
          sum1=0.0;
          sum2=0.0;
      %
          for i=1:k-1
             s=aa/t+((i-0.5)*pi/t)*sqrt(-1);
             fn1=((-1.0)^i)*imag(tersl(zot,s,nst,dxt));
             sum1=sum1+fn1;
          end
       %
          for  i=0:p
             s=aa/t+((i+k-0.5)*pi/t)*sqrt(-1);
             fn2=((-1.0)^(i+k))*imag(tersl(zot,s,nst,dxt));
             sum2=sum2+a(i+1)*fn2;
          end
          ft(j)=exp(aa)*(sum1+sum2/(2.0^(p+1)))/t;
       end
```

tersl.m

```
function [fs]=tersl(zot,s,nst,dxt2)
vtower=3.0e+8;
zs=400.0;
ik=1*0.05e+9*(1-exp(-0.02e-6*s))/(s*s);
[e]=zgwire1(s);
vs1=ik/(1/e(1,1)+1/zs); %direğin en ustundeki gerilim
is1=vs1/e(1,1);         %1. direk akımı
izs=vs1/zs;             %400 omdan akan akım
vs2=e(2,1)*is1
fs=vs2;                 %çizime gönderilen sonuç
return
```

dikey.m

```
t1=cputime;
linew=1;
[t,y2]=terslap;
t=t*1.0e+6;
set(gcf,'defaultaxeslinewidth',1);
h1=plot(t,y2,'b-');
set(h1,'linewidth',linew);
xlabel('Zaman (\mus)','Fontsize',12);
ylabel('İletken Tepe Gerilimi(pu)','Fontsize',12);
cputime-t1
```

parametre.m

```
function [e]=parametre(s)
h1=100;       %birinci direk yüksekliği
h2=100;       %ikinci direk yüksekliği
Zf1=17;
Zf2=17;
Zf=[Zf1 0;0 Zf2];
rdc=h1*0.05e-3;
ro=0.01;
rc1=0.5;
rc2=0.5;
w=s/j;
d=10;        %iki direk arası mesafe
r1=sqrt(h1^2+d^2);
r2=sqrt(h2^2+d^2);
rmo=12.5664E-7;
eps=8.85e-12;
expb1=1;
expb2=1;%
p=1.0/sqrt(s*rmo*ro);
L11=2.0E-7*log((sqrt((h1+p)^2+rc1^2)+h1+p)/rc1);
L22=2.0E-7*log((sqrt((h2+p)^2+rc2^2)+h2+p)/rc2);
L12=2.0E-7*expb1*log((sqrt((h1+p)^2+d^2)+h1+p)/d);
L21=2.0E-7*expb2*log((sqrt((h2+p)^2+d^2)+h2+p)/d);
LE11=real(L11);
LE22=real(L22);
LE12=real(L12);
LE21=real(L21);
RE11=-w*imag(L11);
RE22=-w*imag(L22);
RE12=-w*imag(L12);
RE21=-w*imag(L21);
```

```
ro1=9.09e-7;
LC11=h1*sqrt(s*rmo*ro1)/(2*pi*rc1);
LC22=h2*sqrt(s*rmo*ro1)/(2*pi*rc2);
Z=[s*L11+rdc+LE11+RE11+LC11 s*L12+LE12+RE12;
 s*L21+LE21+RE21 s*L22+rdc+LE22+RE22+LC22];
LG=[L11 L12;L21 L22];
CG=rmo*eps*inv(LG);
Y=s*CG;
[Ty,Dy]=eig(Y);
[Tz,Dz]=eig(Z);
[Tzy,Dzy]=eig(Z*Y);
gamah=sqrt(Dzy)*[h1 0;0 h2];
A=triu(tril(cosh(gamah)));
Zo=sqrtm(Y\Z);
a=Tz*A*inv(Tz);
d=a;
B=triu(tril(sinh(gamah)));
b=(Zo*Tz*B*inv(Tz));
C=triu(tril(sinh(gamah)));
c=(inv(Zo)*Tz*C*inv(Tz));
aZf=a*Zf;
cZf=c*Zf;
e=(aZf+b)*inv(cZf+d);
```

Wilson'un alan değişim eşitliğini çizdiren program

```
k=9*10.^9;
q=1;
h=1000;
d=0:0.1:100;
f=2*k*q*(h*(h.^2+d.^2).^-1.5);
plot(d,f)
```

Malan'ın alan değişim eşitliğini çizdiren program

```
k=9*10.^9;
q=1;
h=1000;
d=0:0.1:100;
f=2*k*q*(d.^-1-(h.^2+d.^2).^-0.5);
plot(d,f)
```

ÖZGEÇMİŞ

07.10.1978 yılında Bitlis'te doğdu. İlköğrenimini Bitlis Gazipaşa ilköğretim okulunda, ortaokul ve lise öğrenimini ise Bitlis Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2003 yılında Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Askerliğini 2006 yılında Muğla'da kısa dönem olarak yaptı. 2009-2010 yıllarında Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak görev yaptı. Halen İstanbul Hudut ve Sahiller Sağlık Genel Müdürlüğünde Programcı olarak çalışmaktadır.