

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAKALAMA BÖLGESİ YAKLAŞIMI İLE
YAPILARA YILDIRIM ÇARPMA RİSKİNİN HESABI**

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elk. Müh. Gürkan SOYKAN
504981002**

101376

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Haziran 2001**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ
Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Kevork MARDİKYAN
Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU (KO.Ü.)

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen başta değerli hocam Sayın Doç. Dr. Özcan Kalenderli'ye, Elk. Müh. Nurşen Dünder'a, sevgi ve desteklerini her zaman yanımda hissettiğim sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2001

Gürkan SOYKAN



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. YILDIRIM VE YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMLERİ	4
2.1. Yıldırım Olayı	7
2.2. Yıldırım Çarpma Süreci	11
2.3. Yapıları Yıldırımdan Koruma Sistemleri	14
3. YILDIRIM ÇARPMA OLASIĞININ HESABI	22
3.1. Elektrogeometrik Model (Yuvarlanan Küre Modeli)	22
3.2. Elektromanyetik Model	24
3.2.1. Yıldırım boşalma yolunun benzetimi	24
3.2.2. Yürüyen dalga yaklaşımı	27
3.3. Yakalama Bölgesi Kavramı	35
4. YAKALAMA BÖLGESİ YAKLAŞIMI İLE YAPILARA YILDIRIM ÇARPMA RİSKİNİN MODELLENMESİ VE BİLGİSAYAR UYGULAMALARI	42
4.1. Eşdeğer Alan	42
4.2. Bilgisayar Programının Yapısı	45
4.3. Basit Geometrik Şekiller İçin Hesap	53
4.3.1. Yer yüzeyinden h yüksekliğindeki bir nokta durumu	53
4.3.2. Yer yüzeyinden h yüksekliğindeki yatay bir iletken durumu	56
4.3.3. Yer yüzeyinden h yüksekliğindeki düşey bir iletken durumu	57
4.4. Bilgisayar Uygulamaları	59
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
KAYNAKLAR	69
EK A	72
EK B PROGRAMLAR	73
EK C GRAFİKLER	87
ÖZGEÇMİŞ	92

KISALTMALAR

ESE	: Aktif Yıldırımlık (Early Streamer Emission)
DYKS	: Dış Yıldırımdan Koruma Sistemi
İYKS	: İç Yıldırımdan Koruma Sistemi
TS	: Yıldırımın Kutbiyeti



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Risk indeksini değerlendirme tablosu	15
Tablo 2.2. Çeşitli yapı tipleri için A indeksinin değeri	16
Tablo 2.3. Çeşitli yapı malzemeleri için B indeksinin değeri	17
Tablo 2.4. Çeşitli yapı konumları için C indeksinin değeri	18
Tablo 2.5. Yapının bulunduğu yerin konumuna göre D indeksinin değeri	18
Tablo 2.6. Yapıların farklı kullanım amacına göre E indeksinin değeri	19
Tablo 2.7. Yapının bulunduğu bölgedeki yıllık fırtınalı yıldırımlı gün sayısına göre F indeksinin değeri	19
Tablo 4.1. Yıldırım akımının kutbiyete göre ortalama değerleri	46
Tablo A.1. Türkiye de yıllık ortalama yıldırımlı fırtınalı günler sayısı	72

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Öncü boşalma	8
Şekil 2.2 : Yıldırım akımının dalga şekli	10
Şekil 2.3 : Çarpma sürecinin aşamaları	11
Şekil 3.1 : Bir toprak ve iletken hatlı bir yüksek gerilim hattının maruz kalma açıları	23
Şekil 3.2 : Bilgisayar benzetimine göre öncü boşalmanın ilerleme safhaları	24
Şekil 3.3 : Üretilmiş alanın hesaplanmasında kullanılan büyüklükler	25
Şekil 3.4 : Bir kulenin eksenine dağıtılmış yükler	26
Şekil 3.5 : I akım dalgası nedeniyle $P(\xi; r)$ noktasındaki E bileşenleri	32
Şekil 3.6 : Bir NP dalga çifti nedeniyle alan hesabı için düzen	34
Şekil 3.7 : Bir NP dalga çifti nedeniyle elektrik alan şiddeti bileşenleri	34
Şekil 3.8 : Bir nesneye yıldırım çarpması sıklığını hesaplamak için hacim elemanı	36
Şekil 3.9 : Moskova da ki bir televizyon kulesi modeli ile yakalama bölgesi içindeki b olasılık değerleri	38
Şekil 3.10 : 1963 yılında Horvath' ın çalıştığı model ile belirlediği sabit b değerleri için yüzey çizgileri	39
Şekil 3.11 : h yüksekliğindeki bir çubuğun yakalama bölgesi	40
Şekil 3.12 : (a) yıldırıma karşı korumasız bir yapının yakalama bölgesi, (b) yıldırıma karşı korumalı bir yapının yakalama bölgesi	41
Şekil 4.1 : Bölümler içindeki yakalama bölgesinin bölümü	43
Şekil 4.2 : dr nin hesaplanması programına ait akış diyagramı	48
Şekil 4.3 : Ae _q nun hesaplanması programına ait akış diyagramı	50
Şekil 4.4 : dAe _q nun hesaplanması programına ait akış diyagramı	51
Şekil 4.5 : Yıldırım çarpma olasılığının hesaplanmasına ait akış diyagramı	52
Şekil 4.6 : Yeryüzünden h yüksekliğindeki bir noktanın yakalama bölgesi	54
Şekil 4.7 : Yeryüzünden h yüksekliğinde bir nokta durumunda eşdeğer alanın hesaplanmasına ait akış diyagramı	55
Şekil 4.8 : Yeryüzünden h yüksekliğindeki yatay bir iletkenin yakalama bölgesi	56
Şekil 4.9 : Ana programın içine yerleştirilecek f(x) işleminin akış diyagramı	57
Şekil 4.10 : Yeryüzünden h yüksekliğindeki düşey bir iletkenin yakalama bölgesi	57
Şekil 4.11 : Bir noktaya yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldırım/km ² .yıl)	59
Şekil 4.12 : Yatay bir iletkene yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldırım/km ² .yıl)	60
Şekil 4.13 : Düşey bir iletkene yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldırım/km ² .yıl)	60
Şekil 4.14 : Bir noktaya yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldırım/km ² .yıl)	61

Şekil 4.15 : Yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	61
Şekil 4.16 : Düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	62
Şekil 4.17 : Yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	62
Şekil 4.18 : Bir noktaya yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	63
Şekil 4.19 : Yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	63
Şekil 4.20 : Düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	64
Şekil 4.21 : Bir noktaya yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	64
Şekil 4.22 : Yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	65
Şekil 4.23 : Düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)	65
Şekil 5.1 : Bir kuleye yıldıırım çarpma olasılığı	66
Şekil C.1 : $N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,3$, $P(-)=0,7$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için bir noktaya yıldıırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi	87
Şekil C.2 : $N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için bir noktaya yıldıırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi	88
Şekil C.3 : $N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için bir noktaya yıldıırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi	88
Şekil C.4 : $N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,3$, $P(-)=0,7$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığının iletkenin uzunluğu ile değişimi	89
Şekil C.5 : $N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığının iletkenin uzunluğu ile değişimi	89
Şekil C.6 : $N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığının iletkenin uzunluğu ile değişimi.....	90
Şekil C.7 : $N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,3$, $P(-)=0,7$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi	90
Şekil C.8 : $N_g = 1$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi	91
Şekil C.9 : $N_g = 1,1816$ yıldıırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi	91

SEMBOL LİSTESİ

a	: μ katsayısını belirlemek için kullanılan bir katsayı
$\vec{A}$	: Vektörel alan
A_{eq}	: Eşdeğer alan
A_l, A_u	: Alt ve üst sınır alanları
b	: Yıldırım çarpma olasılığı
b	: μ katsayısını belirlemek için kullanılan bir katsayı
$\vec{B}$	: Manyetik akı yoğunluğu
c	: $A(r)$ 'nin yaklaşık fonksiyonun üssü
c	: Işık hızı
C, D	: μ katsayısını belirlemek için kullanılan yıldırımın kutbiyetine göre değer alan sabit sayılar
dA_{eq}	: Yakalama bölgesi içindeki eşdeğer alan değişimi
dr	: Yakalama bölgesi içindeki adım büyüklüğü
$\vec{D}$	: Elektriksel akı yoğunluğu
$\vec{E}$	: Elektrik alan şiddeti
E_ξ, E_r	: Elektrik alan şiddetinin ξ ve r yönündeki bileşenleri
$f(x)$	: Yakalama bölgesinin kesit alanı ve yönlendirme mesafesi arasındaki ilişkinin fonksiyonu
f_l, f_u	: $f(x)$ fonksiyonunun adımın alt ve üst sınırındaki değeri
h	: Yükseklik
$\vec{H}$	: Manyetik alan şiddeti
$\vec{J}$	: Akım yoğunluğu
I	: Yıldırım akımının tepe değeri
I_b	: Negatif kutbiyetli yıldırım için eşik akım değeri
I_m	: %50 olasılıklı yıldırım akımı
I_n	: Anma yıldırım akımı
I_0	: Minimum yıldırım akımı
L	: Uzunluk
N	: Yıldırım çarpma sıklığı
N_g	: Buluttan yere olan yıldırım yoğunluğu
$P(+)$	: Oluşan yıldırımlar içinde pozitif kutbiyetli yıldırımların oranı
$P(-)$	: Oluşan yıldırımlar içinde negatif kutbiyetli yıldırımların oranı
p_i	: Çarpma katsayısı
p	: Yönlendirme uzaklığı ve yıldırım akımı arasındaki üssel ilişki
Q	: Toplam elektrik yükü
r	: Yönlendirme uzaklığı
r_b	: Negatif kutbiyetli yıldırım durumunda eşik yönlendirme uzaklığı
r_l, r_u	: Yönlendirme uzaklığının alt ve üst sınır değerleri
r_m	: Yönlendirme uzaklığının ortalama değeri
r_0	: Yönlendirme uzaklığının minimum değeri

r_{max}	: Yönlendirme uzaklığının maksimum değeri
s	: Yıldırım akımının istatistiksel dağılımını ifade eden bir katsayı
T_d	: Yıllık yıldırımlı gün sayısı (1/yıl)
T_f	: Cephe süresi (us)
T_h	: Sırt yarıdeğer süresi (us)
v	: Yürüyen dalga hızı (m/s)
V	: Skaler potansiyel (V)
Φ	: Hata fonksiyonu
ε	: Kutbiyete bağlı olan çarpma mesafeleri oranı
ε_0	: Boşluğun (havanın) dielektrik sabiti
φ	: Kutupsal koordinat sisteminde açı
γ	: Elektriksel iletkenlik
ρ	: Elektriksel yük yoğunluğu
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ	: Yönlendirme uzaklığının ortalama değerinin hesaplanmasında kullanılan bir katsayı
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$	: Koruma açıları



YAKALAMA BÖLGESİ YAKLAŞIMI İLE YAPILARA YILDIRIM ÇARPMA RİSKİNİN HESABI

ÖZET

Yıldırım atmosferde meydana gelen canlılar ve yapılar için tehlikeli durumlara neden olan doğadaki en güçlü elektriksel boşalma olayıdır. Yıldırım oluşumu; bulutun elektriksel yüklenmesi, boşalma süreci ve ana boşalma aşamalarından oluşur. İnsan hayatını ve yeryüzündeki bütün yapıları yıldırımın zararlı etkilerine karşı korumak amacıyla yıldırımdan korunma sistemleri kullanılır.

Yıldırımdan koruma sistemini gerçekleştirmeden önce korunacak yapıya yıldırım çarpma olasılığının (N) bilinmesi gerekir. Bu bilindiği takdirde koruma yapıp yapılmayacağına ve yapıya nasıl bir koruma sistemi yapılması gerektiğine karar verilir. Bu şekilde etkili ve doğru bir koruma yapılmış olur. Yıldırım çarpma olasılığını belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunların başlıcaları elektrojeometrik model (yuvarlanan küre modeli), elektromanyetik model ve yakalama bölgesi yaklaşımına dayanan modeldir.

Bu tez çalışmasında yakalama bölgesi yaklaşımı kullanılarak yıldırım çarpma olasılığını hesaplayacak geometriler için model tanımlamaları yapılmış, yerden belli bir yükseklikteki bir noktasal yapı, belli boyda düşey bir yapı ve yerden belli yükseklikte ve uzunlukta bir yatay yapı için Matlab 5.0 da bilgisayar programları geliştirilerek incelemeler yapılmıştır. İncelemelerde yıldırım yoğunluğu, akımı, pozitif ve negatif yıldırımların oranı, nokta ve düşey iletken halinde yapının yerden yüksekliği, yatay iletken halinde de yerden yükseklik ve iletkenin uzunluğu değişken olarak alınmıştır. Geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla giriş parametrelerinin değişik değerleri kullanılarak farklı durumlar için yıldırım çarpma olasılıkları hesaplanmış ve grafikler halinde verilmiştir. Elde edilen grafiklere göre yıldırım akımı arttıkça çarpma sıklığı N azalmakta, yapının yeryüzünden yüksekliği, düşey iletkenin boyu ve bölgenin yıldırım yoğunluğu arttıkça N değeri artmaktadır. Tezde kullanılan yöntem üç boyutlu uygulamalar için genişletilmeye açıktır.

COMPUTATION OF LIGHTNING STRIKE PROBABILITY TO THE CONSTRUCTIONS BY ATTRACTIVE VOLUME APPROACH

SUMMARY

Lightning is a natural event which happens on earth surface and leads to the dangerous situations. The formation of lightning consist of the electrical charcing of the clouds the stage of discharge, the stage of the preliminary discharge, the stage of the return stroke current. Protection systems for human life and the buildings on earth surface against lightnings dangerous effects, are used.

Before using the lightning protection system, the lightning strike probability (N) must be known. If it is known, it can be decided that what kind of protection system must be done. In this way, the effective and right protection system can be done. There are several methods to determine the lightning strike probability. Some of the important methods are; electrogeometric model (rolling sphere model), electromagnetic model and attractive volume concept.

In this thesis study, the models for geometric shapes which is used for computing the lightning strike probability are defined, then the flow charts, which will be used to compute, are formed. And finally, the computer program is developed for a point structure above the ground, vertical structure with obvious length and horizontal structure with obvious length, above the ground by using the Matlab 5.0, and the results are examined. In these examinations, the ground flash density, peak value of lightning current, the ratio of negative and positive lightning, the height above the ground for point and vertical structure, the length of the line for horizontal structure are taken as input variables. The lightning strike probabilities are computed for different values of input variables and the results are given with graphics by using the developed computer program. According to these graphics, when the lightning current increases, the lightning probability (N) decreases, when the height of structure above the around, the length of vertical structure and ground flash density increase, the lightning probability increases too. Method used in this thesis study may be developed for three dimensional applications.

1. GİRİŞ

Yıldırım yeryüzünde meydana gelen ve tehlikeli durumlara neden doğal bir elektriksel boşalma olayıdır. Yıldırımın oluşum safhaları, bulutun elektriksel yüklenmesi, boşalma süreci ve ana boşalma safhalarıdır. Yıldırım olayı basınç, ses, mekanik, elektriksel, ışık ve ısı etkisi gibi etkileri meydana getirir. Yıldırımın zararlı etkilerinden kurtulabilmek için yıldırımdan korunma sistemleri kullanılmaktadır.

Yıldırımdan koruma sistemini gerçekleştirmeden önce korunacak yapıya yıldırım çarpma olasılığının (N) bilinmesi gerekir. Bu bilindiği takdirde yapıya nasıl bir koruma sistemi yapılması gerektiğine karar verilir. Yıldırım çarpma olasılığını belirlemek için farklı metodlar kullanılmaktadır. Bunlar elektrogeometrik model, elektromanyetik model ve yakalama bölgesi kavramlarına dayanan yöntemlerdir.

Yapıların yıldırıma karşı korunmasının tasarlanmasında çarpma mesafesi kavramı üstüne kurulmuş ampirik yaklaşımlar kullanılmaktadır [1]. Bu ampirik formüllerin bulunmasından sonra ilerleme modeli kullanılarak yeryüzündeki yapılara yıldırım çarpma simülasyonları yapılmıştır [1]. Bu model elektromanyetik model yaklaşımına dayanmaktadır. İlerleme modeli yapının bulunduğu zeminin düz ve engebeli durumları için incelenmiştir [1].

Topraklanmış yapılara yıldırım çarpma mesafesinin belirlenmesinde yıldırımın kutbiyetinin ve yapının geometrisinin etkisi büyüktür. Pozitif yıldırım durumunda çarpma mesafesi yapının yüksekliğine çok az bağlıdır. Negatif yıldırım ile çarpma mesafesi küçülmektedir. Yarı elipsoid, küre ve silindir şeklinde kabul edilmiş yapılar analitik elektrik alan çözümlerine imkan verirler. Bunlar, yıldırım akımı, yapının yüksekliği ve yapının biçiminin fonksiyonu olarak çarpma mesafelerini fiziksel modelleme ile belirlemek için kullanılır [2, 3].

Enerji hatlarına yıldırım çarpma sıklığı ile ilgili olarak IEEE nin basitleştirilmiş formülü

$$N = 0,004T_d^{1,35}(b + 4H^{1,09}) \quad (1.1)$$

Burada N: 100 km lik bir hatta bir yılda çarpan yıldırım sayısı

T_d : Yıllık yıldırımlı gün sayısı

b: Koruma hatları arasındaki yatay mesafe (m)

H: Koruma hatlarının ortalama yüksekliği (m)

Yakalama yarıçapı kavramı göz önüne alınarak denklem (1.1)

$$N = 0,004T_d^{1,25}(b + 28H^{0,6}) \quad (1.2)$$

olarak ifade edilir. Bu iki model karşılaştırıldığı zaman yeni durumda 10 ile 30 m yükseklik aralığında beklenenden % 50 daha fazla , 60 ile 100 m lik yüksek yapılarda beklenenden % 30 daha az yıldırım düşeceği ortaya çıkmıştır [4].

Elektrogeometrik model ile yıldırım çarpma olasılığının belirlenmesinde nesnelerin geometrik modeli için üç boyutlu inceleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem, enerji santralleri, iletim hatları ve binalar gibi her yapı için geçerli olup yapının çevresindeki nesneleri ve yeryüzünün durumunu da ele almaktadır. Bu yöntemde

- Nesneler için hiçbir şekil ve boyut sınırlanması yoktur.
- Yıldırımın çarpacağı nesnenin maruz kalmasını etkileyen bütün etkenler hesaba katılarak çevre üç boyutlu modellenir.
- Oldukça kesin sonuç verir [5].

İletim hatlarına direk yıldırım çarpması sonucunda sistemde bulunan cihazlarda meydana gelecek tehlike olasılığını da tahmin edilebilmektedir [6].

Özel yapılar olan rüzgar çiftlikleri için yıldırım çarpma sıklığının belirlenmesi elektrogeometrik modele dayanarak yıldırım yoğunluğu (N_g), yıldırım akımı (kA), yakalama yarıçapı (r_a) ve tesisin geometrik yapısı hesaplama için önemli birer etkidir. Özellikle bu yerler yüksek yıldırım sıklığına sahip alanlar üzerine kurulduğu için N_g nin en büyük değerinin bulunması gerekir [7].

Yıldırım çarpma olasılığı ile ilgili yapılan çalışmalarda elektrojeometrik ve elektromanyetik modeller kullanılmıştır. Bu çalışmada ise yakalama bölgesi kavramı kullanılarak üç farklı durum için yıldırım çarpma olasılığının hesabı yapılmıştır. Bu amaç için kullanılan akış diyagramlarına dayanarak üç farklı durum için Matlab 5.0 da yazılmış bilgisayar programı ile N değerleri hesaplanmaktadır. Bu programda giriş parametreleri olarak yıldırım yoğunluğu N_g , pozitif yıldırımların oranı $P(+)$, negatif yıldırımların oranı $P(-)$, noktasal ve düşey iletken durumu için yapının yerden yüksekliği, yatay iletken durumu için iletkenin yerden yüksekliği ve iletkenin boyu alınır. Tezde bu program yardımı ile farklı durumlardaki farklı giriş parametreleri için yıldırım çarpma olasılıkları elde edilmiş ve bunlara ilişkin grafikler elde edilmiştir.



2. YILDIRIM VE YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMLERİ

Yıldırım, yıldırım bulutu ile yeryüzü arasında, bulutun içindeki yük merkezleri arasında veya buluttan buluta olan bir elektriksel boşalmadır.

Yıldırım, bugün bile hala doğanın en heyecan verici ve en şaşırtıcı olaylarından biridir. Bu olay, insanlık tarihinin ve mitolojinin önemli bir parçası olmuştur. Dünyaya dakikada 1800 civarında yıldırım düşmektedir. Dünyanın değişik bölgelerine düşen yıldırım sayısı birbirinden farklıdır. Örneğin, genel olarak söylendiği gibi, Kuzey ve Güney Kutuplarına hiç yıldırım düşmezken, Ekvator bölgesi yıldırım sayısı bakımından zengindir (örneğin Uganda, Kampala'da bir yıldaki yıldırımlı gün sayısı 242 dir).

İlk insanlar ve atalarımız yıldırımı tanrının öfkesi ve güç gösterisi olarak görmüştür. M.Ö. 2200'lü yıllarda yaşamış olan Akadlıların, ateşli bir yıldırım oku ve gök gürültüsünü temsil eden kamçıyla hava tanrısı görülmektedir. Yıldırımlardan ve gök gürültülerinden İncil'de de söz edilir. Eski Yunanlılar, yıldırım boşalmalarının Zeus'un silahı olduğuna inanırlardı. Romalılar ise yıldırımın Jupiter'in Vulcan tarafından yapılan silahı olduğuna inanıyorlardı. İskandinavlıların Thor adını verdikleri bir yıldırım tanrısı vardı. Bunların dışında da yıldırım ve gök gürültüsü pek çok eski uygarlıkta ve mitolojide yer almaktadır.

Aristo, yıldırım olayını dünya ile ay arasındaki boşlukta, ateş ile hava arasındaki dengenin değişimi olarak açıklamaya çalışmıştır. Uzun yıllar sonra, Leonardo da Vinci, yıldırımın bulutların çarpışmasının bir sonucu olduğunu söylemiştir.

Bu açıklamalarda, yıldırım ile elektriksel olaylar arasındaki ilişki hala bilinmiyordu. Elektrik üretmek için yapılan ilk araç, 1663'te yapılan, Otto von Guericke'nin sürtünme makinası idi.

Fikir yaklaşık iki bin yıllık. Eski Yunanlılar, kehribarın (Yunanca "Electra"nın) bir kürke sürtüldüğünde, kağıt (papirüs) veya tahta gibi küçük parçacıkları çektiğini biliyorlardı. 1745'te "Leiden (Leyden) şişesi" olarak bilinen yapıyı oluşturan Pieter van Muschenbrook, "elektrik kıvılcımlarının yıldırım boşalmalarına benzer" olduğunu söylemiştir.

Benjamin Franklin, 1747'de keskin kenar veya çubukların elektrik kıvılcımlarını çeken veya atan karakteristiğe sahip olduğunu buldu. Franklin'in açıklaması elektriksel akışkanlık teorisine dayanıyordu.

İngiliz bilim adamı William Wall, "elektrik boşalmasının kıvılcım şekli ve sesi ile yıldırıma ve gök gürültüsüne benzer" olduğunu söyleyen ilk kişiydi. Yıl 1708 idi.

Newton, elektrik boşalmalarını gözlerken: "kıvılcımları gözlemem beni çok küçük ölçekte bir yıldırım gözlediğimi düşünmemen neden oldu" dedi.

18. yüzyıldan beri yıldırım olayı üzerinde çalışan pek çok araştırmacı bulunmaktadır. Ancak burada bunlardan çok az bir bölümünün adından söz edilecektir. Benjamin Franklin, 1749'da, çalışmaları sonunda elektrik akımı ile yıldırım boşalması arasındaki benzerliği söylediği çalışmalar yapmıştır. Franklin, 1760'ta Philadelphia'da Mr. West binasına yıldırım çarparken etkinliğini kanıtladığı "yıldırım yakalama çubuğu (bugün Franklin çubuğu veya yakalama ucu olarak söylenen koruma elemanı)" ile bir yıldırımdan koruma sistemi tasarlamıştır. Ayrıca, yıldırım boşalmaları üzerine çalışan ve 1753 yılında yıldırım çarpması sonucu ölen St. Petersburg'lu Prof. Richmann, sonradan Lichtenberg şekilleri olarak adlandırılan şekilleri keşfeden Lichtenberg, ilk Klidonografi yapan Peters, yıldırım boşalmalarının fotoğrafını çekmek için dönen kamerayı geliştiren Boys, ilk yıldırım boşalması simülatörünü yapan Steinmetz, darbe generatörünü (üreticini) geliştiren Marx ve daha pek çok kişi bu konuda çalışmalarda bulunmuştur.

Yukarıda sözü edilen araştırmacı ve bilim adamlarından çoğu yıldırım olayının fiziği ile ilgilenmiştir. Elektrik enerjisinin kullanımındaki artış ile 20. yüzyılın başında, enerji iletim hatlarına yıldırım çarpmaları önemli problemlere sebep olmuştur.

K. W. Wagner 1908'de yıldırım boşalması hakkında ilk analizi yapmıştır. Wagner, buluttaki yükün boşalma süreci ile yok olduğunda, iletkenler ve enerji iletim hatlarında endüklenmiş yükler hareket eden yürüyen dalgalara sebep olur. Elde edilen endüklenmiş gerilimler, iletkenlerin yeryüzünden h yüksekliği ile elektrik alan şiddeti bileşenlerinin çarpılması ile elde edilir. Wagner yürüyen dalgaları kullanarak bu olay ile ilgili çalışan ilk kişidir. Fakat bu çalışmasında boşalma olayı varsayımı yanlıştır.

Bewley, 1929'da Wagner'in varsayımlarından bazılarını düzeltmeyi denedi. Bunu buluttaki yüklerin meydana getirdiği elektomanyetik alanın hemen kaybolmadığını ifade ederek dile getirdi. Onun hesap sonuçları, Wagner'in sonuçları ile karşılaştırıldığında yürüyen dalgaların yürüme süresi daha uzun ve genliği daha küçüktür.

Jordan tarafından 1934'te çok ilginç ve önemli bir yaklaşım tanımlandı. O, kanal içindeki yıldırım boşalmasının sebep olduğu yürüyen gerilim ve akım dalgalarını ifade eden bir kişidir. Endüklenen gerilimleri, ilerleyen ve yansıyan gerilim dalgaları ile çalışarak belirledi.

Bewley, 1934'te kendi dalga teorisini genişletti ve hızlı dalga teorisini yayınladı. Bu teori ile endüklenen gerilimleri hesapladı.

Wagner ve McCann tarafından 1942'de yapılan iş belkide en önemli yaklaşımdı. 1934 – 1938 yılları arasında Schonland, Malan, Collen ve Hodges'in yayınlarında tanımlanmış yıldırım boşalma mekanizması üzerine kurulmuş yaklaşımlarında, boşalma kanalı içindeki yükler ve akımların tehlikeli endüklenmiş gerilimlere sebep olduğunu ifade etmişlerdir. Onlar dönüş darbesinin adım fonksiyonu karakterinde olduğunu ve böylece gecikmeli potansiyellerin belirlenebileceğini varsaymışlardı. Bu hesaplamaların bir dezavantajı vardı. Burada vektör potansiyeli önemli değildi.

O zaman içinde var olan yöntemlerin çoğu yıldırım olayı hakkındaki bilgi eksikliğinden ve belirsizlikten dolayı tahmini ve pratik değildi. 1940'ların sonuna doğru, teorik çalışmalardan daha çok var olan sistemlerden elde edilmiş deneyimlere

bağlı olmak için bir eğilim vardı. 1950'lerin ortalarında bu yaklaşımın yanlış olduğu ispatlandı.

Birçok bilim adamı ve araştırmacı yıldırım olayı ve endüklenen gerilimlerle ilgilenmiştir. 1958'de Lundholm, elektromanyetik alan kavramları üstüne kurulmuş çevrim gerilim yöntemini yayınladı. Bu yöntem enerji iletim hatlarında endüklenen gerilimlerin belirlenmesi için uygulanır. Bu oldukça basit ve ileri bir yöntemdir. Bu yöntemin ana geri çekilme sebebi dengeleme akımlarının ihmal edilmesidir. Dengeleme akımları endüklenen gerilimlerin hesabında önemli rol oynar.

Rusck 1958'de elektromanyetik alan kavramlarına ve yürüyen dalgalara dayanan yaklaşımını sundu. Bu yöntem alçak gerilim şebekelerinde endüklenen gerilimlerin kesin hesaplarında kullanılmıştır.

Wagner ve Hileman 1959 – 1960'da Lundholm'un yaklaşımına dayanan bazı yayınlar yayınladı. Kanal boşalmasını da içeren sistem içindeki yükleri ve akımları belirledi. Hesaplamalar çok karışıktır ve birçok yaklaşım yapılmıştır. Bu yöntemin dezavantajı dengeleme akımlarının ihmal edilmesidir.

1960'larda yıldırım olayı ve endüklenen gerilimler hakkındaki çalışmalarda dengeleme akımları hesaba katılmaya başladı [8].

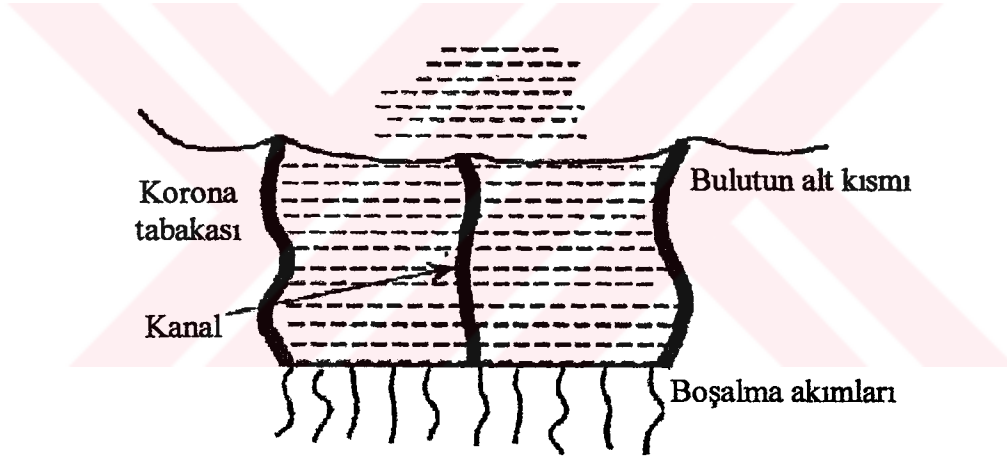
2.1. Yıldırım Olayı

Yıldırım hakkında ne biliyoruz? Bu olayın açıklaması nedir? Yıldırım olayı üç ana aşamaya bölünür.

a) Bulutun elektriksel yüklenmesi: Bu olay çok az bilinen bir olaydır. Bu olayın oluşumu için, yukarı doğru sıcak ve nemli hava akışının olması gerektiği bilinir. Hava, yukarı doğru hareket ederken yavaş yavaş soğur ve havadaki nem yoğunlaşır. Küçük su damlacıkları meydana gelir. Bu küçük su damlacıkları belli bir yükseklikte donar ve oluşan bu buz parçacıkları veya dolu tanecikleri yer çekimi etkisiyle yere doğru düşmeye başlar. Dolu tanecikleri yere düşerken, su damlacıklarına çarpar ve onları parçalar. Küçük su damlacıkları aşağı doğru düşerken negatif elektrik yükü ile

yüklenir. Böylece, negatif yükler bulutun alt kısmında yoğunlaşırken, bulutun üst kısmında pozitif elektrik yükleri yoğunlaşır. Bu olay, "Cumulonimbus" adı verilen yıldırım bulutları üzerine çalışan pek çok araştırmacı tarafından gözlenmiştir. Bu bulutlar, belli bir yüksekliğe kadar ulaşır. Bulutun üst kısmının yerden yüksekliği 8 - 12 km'yi bulurken, bulutun alt kısmı yerden 1,5 - 3 km yüksekliktedir.

b) Boşalma olayı: Bulutun alt kısmından toprağa doğru harekete geçen "öncü" boşalma şeklindeki negatif yükler yıldırım olayının ikinci aşamasını başlatırlar. Bu olay, "kritik (delinme) alan şiddeti" adı verilen belli bir noktadaki (veya noktalardaki) elektrik alan şiddetinin boşalma olayını başlatacak değerin üstüne çıkması durumunda olur. Öncü boşalma, "kanal" adı verilen birkaç milimetre çapında, silindirik şeklinde, ince iletken bir plazma çekirdeği biçimindedir (Şekil 2.1). İyonize olmuş kanal, "korona tabakası" adı verilen negatif uzay yükleri ile kuşatılır. Bu tabaka birkaç on metre çapında bir silindirdir.



Şekil 2.1. Öncü boşalma

Boşalma olayını, "Kanal boşalması" adı verilen zayıf boşalma akımları izler ve "korona tabakası"ndan boşalma yolları arayışları başlar. "Korona tabakası" zamanla büyüyerek "Kanal boşalma" bölgesini uzay yükleri ile doldurur. Bu anda, "kanal", "korona tabakası" sınırına ulaşana kadar yüksek bir hızla yayılır ve sonra durur. Yeniden, "kanal boşalması" boşalma yolları arayışına girer ve bu olay böylece devam eder. Olay kendi kendine tekrarlanır. Adımlar şeklinde gelişen bu olay, bu konuda çalışan çoğu bilim adamı tarafından gözlenmiştir. Boşalma adımlarının veya sıçramalarının uzunluğu 10 ile 80 m arasında olup ortalama adım uzunluğu 50 m alınmaktadır. "Öncü" boşalma toprağa yaklaşırken, adımları gittikçe kısalmır. "Öncü"

boşalma, ışık hızının yaklaşık 1/1000'ine eşit (0,3 m/ s) sabit bir hızla hareket eder. Aşağı doğru ilerleyen "öncü" boşalma, yere yaklaştıkça elektromanyetik alan şiddetinin yavaş yavaş yükselmesine sebep olur. Bu elektromanyetik alan, yerde, binaların kenarlarında ve tesislerde, direklerin tepesinde, enerji iletim hatlarında vb. yüksek elektrik alan şiddetlerinin oluşmasına neden olur. Bu elektrik alan şiddetleri, belli kritik alan şiddeti değerlerini aştığında, aşağıya inen "öncü" boşalma ile birleşmek üzere, aşağıya inen "öncü" boşalmaya benzer karakterde yerden yukarı doğru çıkan bir boşalma olur.

c) Ana boşalma (dönüş darbesi): Aşağıya doğru gelen "öncü" boşalma, yukarı doğru çıkan "öncü" boşalma ile birleştiğinde yıldırım olayının üçüncü aşaması başlar. Bu aşamada, bulut ile toprak arasında bir elektriksel kontak (bir kısa devre) oluşur. Bu sırada, hem boşalma yolundaki hem de bulutun altındaki yük merkezlerindeki tüm yükleri nötrleştirmek için yüksek bir akım akar. Bu akım "dönüş darbesi" (ana boşalma akımı) olarak adlandırılır ve değeri birkaç kA ile 400 kA arasında değişir

Bu akımın ilerleme hızı Toepler kanunu ile belirlenir.

$$v = c \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\kappa}{I}}} \quad (2.1)$$

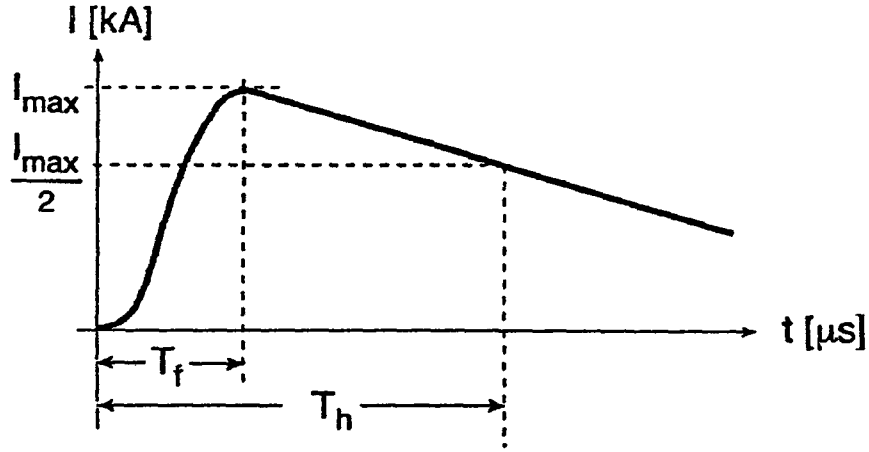
Burada, c: ışık hızı

I: ana boşalma akımı

κ : katsayı

Lundholm 1958 de κ katsayısını 900 kA olarak, Rusck 1958 de κ yı 500 kA olarak Wagner 1963 de κ yı 250 kA olarak belirlemiştir.

Yıldırım akımı, maksimum değerine kısa sürede ulaşan bir akım darbesi şeklindedir. Akımın maksimum değerden sonra azalması yükselmesine göre daha yavaş olur. Şekil 2.2. de yıldırım akımının dalga şekli verilmiştir.



Şekil 2.2 Yıldırım akımının dalga şekli

Bir bulutta birden fazla yük merkezi ortaya çıkabilir. Böyle bir durumda, ilk yük merkezinin nötrleşmesinden sonra, yük merkezlerinin sayısına göre aynı boşalma yolundan birkaç yıldırım boşalması daha görülebilir. Örneğin bir keresinde aynı "dönüş darbesi"nin ardından 16 kısmi boşalma daha görülmüştür.

Yukarıda sözü edilen aşamalardan anlaşılacağı gibi, yıldırım olayı karmaşık bir olaydır. Yıldırımı gözlediğimizde gerçekte yalnızca üçüncü aşamasını farkedebiliriz. Bu aşamada, yerden buluta nötralize olan "dönüş darbesi" akar. İnsan gözü, yıldırım akımını diğer yönde yani buluttan yere akıyormuş gibi görür. Bu optik bir yanılmadır. Dahası, aynı yoldan boşalan çok sayıda boşalma bir yıldırım boşalması gibi görülür. Çoğu durumda, buluttan aşağı doğru gelişen yükler negatif kutbiyetlidir.

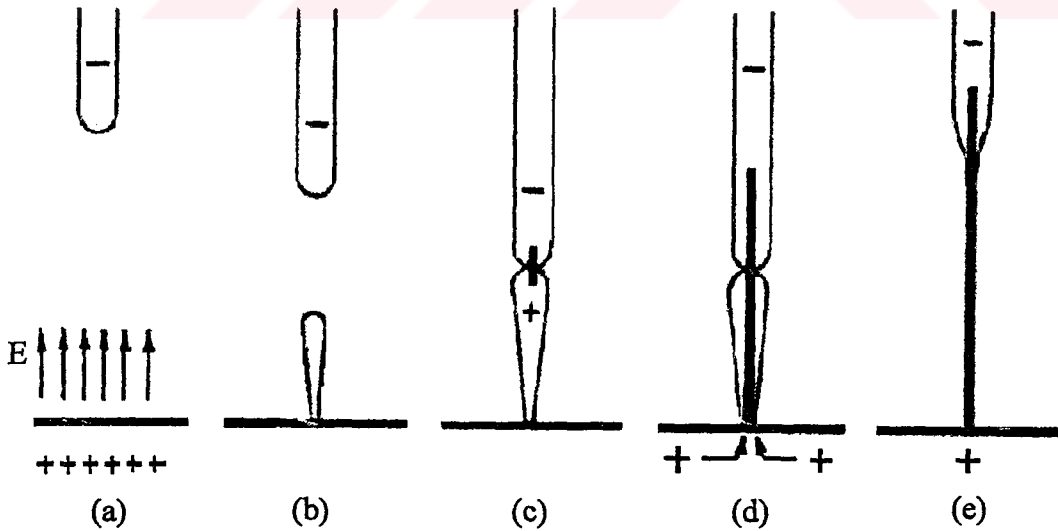
Bizi fazla ilgilendirmeyen bulut içi ve bulutlar arası boşalmaların oluşumu da yukarıda açıklananlara benzerdir.

Boşalma yolundan yüksek nötrleştirici dönüş darbe akımının akışı ohmik kayıplara sebep olur. Bu kayıplar nedeniyle, boşalma yolunun ve çevresindeki havanın sıcaklığı hızla yükselir. Bu hızlı sıcaklık yükselmesi şok dalgaları şeklinde çevredeki hava tabakasının hızla genişlemesine sebep olur. Bu genişlemeye gök gürültüsü olarak bilinen akustik bir olay eşlik eder [9, 10, 11].

2.2. Yıldırımın Çarpma Süreci

Yıldırım çarpma olasılığını incelerken, bulut ile yer arasında iyonize olmuş bir kanal vasıtası ile olan birleşme sürecinin bilinmesi gerekir. Bu süreci etkileyen ve yıldırım çarpma noktasını belirleyen koşullarla ilgili birçok teori vardır. Bu bölümde öncelikle olasılık hesaplarının temelini oluşturan boşalma modeli ile ilgilenilecektir.

Herhangi bir aşağı doğru ilerleyen öncü boşalma yeryüzü üzerindeki nesnelerden etkilenmeden dünyaya yaklaşır. Öncü boşalmanın yükleri tarafından üretilen elektrik alanı yerden çıkan yakalama öncülerini başlatır. Bu aşama çarpma sürecinde çok önemlidir. Çünkü bu durum yıldırımın yolunu belirler. Yıldırımın çarpacağı nokta yakalama öncüsünün çıkış noktası olabilir. Bu anda aşağı doğru inen öncü kanalının alt ucunun bulunduğu nokta yönelme noktası olarak adlandırılır. Çünkü yıldırımın yolu burada çarpacağı noktaya doğru yönelir. Eğer birden fazla yakalama öncüsü başlamışsa bunlar birbiriyle yarışır ve aşağı doğru inen öncü ile ilk teması yapan yakalama öncüsü yıldırımın çarpma noktasını belirler. Bu ilk temastan sonra diğer yakalama öncüleri normal olarak durur. Fakat daha sonra duruma göre birden fazla bağlantının kurulabilmesi de mümkündür. Bu durumda yıldırım çok farklı çarpma noktalarına sahip olur.



Şekil 2.3 Çarpma sürecinin aşamaları

Çarpma sürecinin bazı aşamaları Şekil 2.3 de kabaca gösterilmiştir. Şekil 2.3-a da ki aşama aşağı doğru inen öncünün yönlenme noktasına ulaşmadığı durumu gösterir. Eğer öncüde negatif bir yük olduğu varsayılırsa, bu yük yeryüzüne yakın, yukarıya doğru yönelmiş ve yoğunluğu öncü kanalın yükü ile orantılı olan bir elektrik alanı oluşturur. Öncü boşalma yeryüzüne yaklaştıkça, yeryüzündeki alan şiddeti bir yakalama öncüsünü başlatmak için gerekli olan kritik bir değere kadar yükselir. Bu durum Şekil 2.3-b de gösterilmiştir. Şekil 2.3-c de negatif ve pozitif yüklerin bir arada hareketi görülmektedir. Yoğun çarpışmalar havayı ısıtır ve sıcak bir plazma yukarı ve aşağı doğru gelişmeye başlar. Bu plazma yeryüzü ile temas kurar ve pozitif yükler kanalın içine doğru akar. Bu durum ise Şekil 2.3-d de görülmektedir. Bu pozitif yük yüksek iletkenlikli bir yol içinden yukarıya doğru çıkar ve öncü kanaldaki negatif yükler nötrleştirilir. Şekil 2.3 deki gibi, sonunda plazma kanalının ucundaki korona tabakası kaybolur. Akım ise öncü kanalın negatif yüküyle belirlenir.

Yeryüzü ile yönlendirme noktası arasındaki uzaklık yönlendirme uzaklığı olarak adlandırılır ve yeryüzündeki elektrik alan şiddeti tarafından belirlenir. Anlaşıldığı gibi yönlendirme uzaklığı öncü kanaldaki yük yoğunluğunun bir fonksiyonudur. Diğer taraftan, bu yük plazma kanalındaki yukarı doğru çıkan yük tarafından etkisiz hale getirilir bu yüzden yıldırım akımı öncü kanaldaki yük ile ilgilidir. Bu nedenle yönlendirme uzaklığı ile yıldırım akımı arasında da bir ilişki mevcuttur.

Ana boşalma yukarıya doğru 100 m/μs'lik bir hız ile yayılır. Hız için ortalama değer 50 m/μs, kanalın uzunluğu olarak 5000 m alındığı zaman bulutun merkezine 100 μs sonra ulaşılabilir. Fakat bulutun yükünün etkisi sadece yeryüzü üzerinde dalga geri döndüğü zaman görülür. Görüldüğü gibi akım dalgası öncü boşalma yükünün bir fonksiyonudur. İlk 200-300 μs içinde bulutunun yükünün bir fonksiyonu değildir. Çünkü akımın yükselme zamanından genellikle daha uzun sürer. Yıldırım akımının tepe değeri öncü yük tarafından belirlenir. Yıldırım akımı yönlendirme uzaklığı aynı zamanda tepe değere bağlıdır.

Diğer teorilere (Wagner, Hileman 1961; Armstrong, Whitehead 1968) göre çarpma noktası, yeryüzü ile öncü arasındaki hava aralığının geriliminin delinme gerilimi değerine ulaştığı yerde meydana gelir. Öncünün potansiyeli ana boşalma akımının

meydana getirdiği gerilim düşümüne eşittir. Delinme gerilimi laboratuvar sonuçlarının ekstrapolasyonu ile tahmin edilir. Bu ilkeye göre belirlenen son aralık genellikle çarpma uzaklığı olarak adlandırılır. Bu önceden belirttiğimiz yönlendirme uzaklığına benzer olup, onun anlamından farklı bir temele sahiptir.

Yönlendirme uzaklığı veya çarpma uzaklığı yıldırım akımının tepe değerinin bir fonksiyonudur. Bu genel bir eşitlik ile gösterilecek olursa;

$$\frac{I}{I_m} = \left(\frac{r}{r_m} \right)^p \quad (2.2)$$

yazılır. Bu eşitlikte

I: yıldırım akımının tepe değeri,

r: I akımına ilişkin yönlendirme uzaklığı,

I_m ve r_m : % 50 olasılık ile olan I ve r değerleri,

p: 1,2 ile 2,0 arasında alınan bir sayıdır (Golde 1977; Wagner, Hileman 1961; Whitehead 1968).

Çeşitli yazarlara göre yönlendirme uzaklıklarının ortalama değeri $r_m = \mu \cdot h$ olarak ifade edilir. Burada μ , yıldırımın kutbiyetinin fonksiyonu olan bir katsayıyı ve h de yıldırımın çarpacağı nesnenin yüksekliğini göstermektedir.

Yönlendirme uzaklıklarının dağılım fonksiyonunu belirlemek mümkündür. Bu amaçla

$$P(x \leq r) = \Phi \left(\frac{p}{s} \ln \frac{r}{r_m} \right) \quad (2.3)$$

eşitliği kullanılır. Bu eşitlik yönlendirme uzaklığının r den küçük olma olasılığını ifade eder. Ayrıca hesaplamalarda bir önceki dağılımın yoğunluk fonksiyonu da gerekir. Bunun için (2.3) ifadesinin türevi alınarak hesap yapılabilir.

$$\frac{dp}{dr} = \frac{p}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{p}{s} \ln \frac{r}{r_m}\right)^2\right] \quad 1/m \quad (2.4)$$

Bu fonksiyona göre çok küçük ve çok büyük yönlendirme uzaklıklarının olma olasılığı küçüktür. Yönlendirme uzaklığının maksimum değerini elde etmek için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$\frac{r}{r_m} = \exp\left(-\frac{s^2}{p^2}\right) \quad (2.5)$$

Ortalama değer r_m büyüdükçe maksimum uzaklık değeri azalır [12].

2.3. Yapıları Yıldırımdan Koruma Sistemleri

Etkin koruma sistemleri, nesne veya nesnelerde yıldırımın çarpması olası noktaların belirlenmesi ile tasarlanabilir. Bu basit olarak yıldırım risk değerlendirme analizi kullanılarak gerçekleştirilebilir [13]. Risk değerlendirme analizi, yıldırımın zarar verme riskini belirlemek amacıyla çok değişik kriterlere göre değerlendirmeleri içerir. Bir yapının yıldırıma karşı korunmasındaki ihtiyaçlarını belirlemek için aşağıdaki değişik kriterler göz önünde tutulur.

1. Yapının tipi (A)
2. Yapının malzemesi (B)
3. Yapının konumu (C)
4. Topografya (D)
5. Yapının kullanım amacı (E)
6. Yıldırım frekansı (F)

Risk değerlendirme analizi yaparken, analizin yapılacağı ülkenin yıldırım haritasına göre analizin yapılacağı bölgenin ülke içindeki yeri de dikkate alınmalıdır. Yıldırım haritasına göre yüksek risk taşıyan bölgelerde risk endeksi R 1,5 ile çarpılır.

Risk değerlendirme endeksi :

$$R = \frac{A + B + C + D + E}{F} \quad (2.6)$$

Elde edilen R endeksine göre, risk değerlendirme tablosundan koruma gerekli olup olmadığı, gerekliyse de nasıl bir korumanın yapılacağına karar verilir.

Tablo 2.1. Risk indeksini değerlendirme tablosu

Risk değeri(R)	Risk düzeyi	Koruma
0-2	Hafif	Gerekli değil
2-3	Orta derece hafif	Fark etmez
3-4	Orta derece	Önerilir
4-7	Orta derece ağır	Gerekli
7 ve üstü	Ağır	Mutlaka korunması gerekir

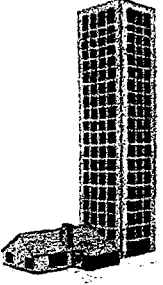
A indeksinin belirlenmesi için Tablo 2.2. kullanılır. Bu tabloda farklı yapı tipleri için A indeksinin alabileceği değerler görülmektedir.

B indeksinin belirlenmesi için Tablo 2.3. kullanılır. Bu tabloda farklı yapı malzemeleri için B indeksinin alabileceği değerler görülmektedir.

C indeksinin belirlenmesi için Tablo 2.4. kullanılır. Bu tabloda farklı yapı konumları için C indeksinin alabileceği değerler görülmektedir.

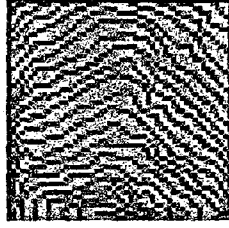
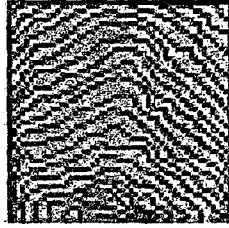
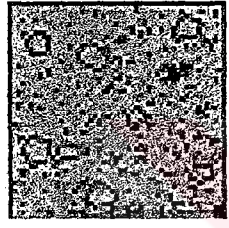
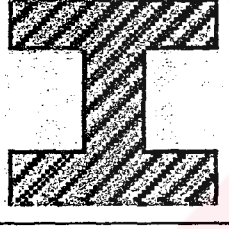
D indeksinin belirlenmesi için Tablo 2.5. kullanılır. Bu tabloda yapının bulunduğu yerin farklı konumları için D indeksinin alabileceği değerler görülmektedir.

Tablo 2.2. Çeşitli Yapı Tipleri İçin A indeksinin değeri



Yapı	İndeks Değeri
• 465 m ² den küçük konutlar	1
• 465 m ² den büyük konutlar	2
• 15 metreden daha az yükseklikteki konut, ofis veya fabrika binaları:	
- 2323 m ² den daha az alan kaplayanlar	3
- 2323 m ² den daha fazla alan kaplayanlar	5
• 15-23 metre yüksekliğinde konut, ofis veya fabrika binaları	4
• 23-46 metre yükseklikte konut, ofis veya fabrika binaları	5
• 46 metreden daha yüksek konut, ofis veya fabrika binaları	8
• İtfaiye, polis, su işleri gibi genel hizmet binaları	7
• Hangarlar	7
• Enerji üretim merkezleri ve telefon santralı merkezleri	8
• Müze, kütüphane, tarihi binalar	8
• Çiftlik ve ahırlar	9
• Golf korunakları, ek binalar ve diğer dinlenme korunakları	9
• Tiyatro, stadyum, kilise, okul gibi umumi toplantı yerleri	9
• Fener kulesi, kilise kuleleri, kontrol kuleleri gibi ince ve uzun yapılar	10
• Hastane, sağlık ocağı, yaşlılar evi gibi engelli ve yaşlıların yaşadığı yapılar	10
• Patlayıcıların,yanıcı ve patlayıcı gazların depolandığı, üretildiği veya taşındığı binalar	10

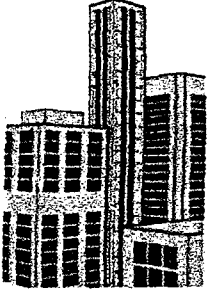
Tablo 2.3. Çeşitli yapı malzemeleri için B indeksinin değeri

	Yapı İskeleti	Çatı Tipi	İndeks Değeri
	Metal olmayan (tahta hariç)	Tahta	5
		Alaşım	3
		Metal-elektriği iletmeyen	4
		Metal-elektriği ileten	1
	Tahta	Tahta	5
		Alaşım	3
		Metal-elektriği iletmeyen	4
		Metal-elektriği ileten	2
	Beton	Tahta	5
		Alaşım	3
		Metal-elektriği iletmeyen	4
		Metal-elektriği ileten	1
	Çelik	Tahta	4
		Alaşım	3
		Metal-elektriği iletmeyen	3
		Metal-elektriği ileten	1

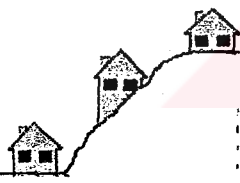
E indeksinin belirlenmesi için Tablo 2.6. kullanılır. Bu tabloda yapıların farklı kullanım amaçları için E indeksinin alabileceği değerler görülmektedir.

F indeksinin belirlenmesi için Tablo 2.7. kullanılır. Bu tabloda yapının bulunduğu bölgedeki yıllık fırtınalı yıldırımlı gün sayısına göre F indeksinin alabileceği değerler görülmektedir. Türkiye için yıllık ortalama fırtınalı yıldırımlı günleri gösteren harita Tablo A.1. de gösterilmiştir.

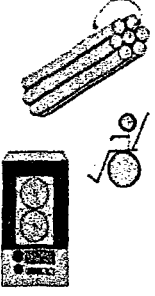
Tablo 2.4. Çeşitli yapı konumları için C indeksinin değeri

	
Yapının Konumu	İndeks Değeri
• Yüksek binaların arasında kalan yapılar	
- Küçük binalar -900 m ² den az alan kaplayan binalar (zemin alanı)	1
- Büyük binalar- 900 m ² den fazla alan kaplayan binalar (zemin alanı)	2
• Alçak binaların arasında kalan binalar	
- Küçük binalar -900 m ² den az alan kaplayan binalar (zemin alanı)	4
- Büyük binalar- 900 m ² den fazla alan kaplayan binalar (zemin alanı)	5
• Bitişik olduğu yapıdan 15,2 metreye kadar fazla uzun olan yapılar	7
• Bitişik olduğu yapıdan 15,2 metreden daha fazla uzun olan yapılar	10

Tablo 2.5. Yapının bulunduğu yerin konumuna göre D indeksinin değeri

	
Yerin Konumu	İndeks Değeri
• Düz alanda	1
• Tepe yamacında	2
• Tepenin üst kısmında bulunan	3
• Dağın üst kısmında bulunan	4

Tablo 2.6. Yapıların farklı kullanım amacına göre E indeksinin değeri



Yapının Kullanım Amacı	İndeks Değeri
• Yanıcı olmayan malzeme	1
• Konut içindeki döşemeler	2
• Genel döşeme ve ekipmanlar	2
• Sığırlar ve ahır hayvanları	3
• Küçük insan toplulukları-50 kişiden daha az	4
• Büyük insan toplulukları- 50 kişiden daha fazla	6
• Yanıcı içerikler	5
• Değerli malzemeler ve aletler	7
• Zorunlu hizmetler- Polis, itfaiye gibi	8
• Yatalak veya özürlü insanlar	8
• Yanıcı sıvı ve gazlar	9
• Tarihi içerikli	10
• Patlayıcı maddeler	10

Tablo 2.7. Yapının bulunduğu bölgedeki yıllık fırtınalı yıldırımlı gün sayısına göre F indeksinin değeri

Yıllık fırtınalı yıldırımlı gün sayısı haritası	İndeks değeri
0-5	9
6-10	8
11-20	7
21-30	6
31-40	5
41-50	4
51-60	3
61-70	2
70 üzeri	1

Yukarıdan verilen tablolar kullanılarak basit olarak İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi binası için risk değerlendirme analizi yapılacak olursa, $A = 9$, $B = 3$, $C = 2$, $D = 1$, $E = 7$, $F = 7$ olarak belirlenip okulun risk endeksi $R=3,14$ elde edilir. Tablo 2.1. den okula yıldırım koruma sisteminin yerleştirilmesinin iyi olacağı anlaşılır.

İlke olarak, yıldırımdan koruma sistemlerinin iki ana türü vardır. Bunlar

1. Dış yıldırımdan koruma sistemi
2. İç yıldırımdan koruma sistemi

Dış yıldırımdan koruma sistemi (DYKS), nesneleri doğrudan yıldırım çarpmalarına karşı korumayı sağlar. Bu sistem ilke olarak, yıldırım akımının korunan sistem üzerinden değil, koruma sistemi üzerinden toprağa akmasını sağlayan bir düzendir. Koruma sistemi, bir yakalama sistemi, bir indirme iletken sistemi ve bir topraklama sisteminden oluşur. Yakalama sistemi olarak Franklin yakalama çubuğu, Faraday kafesi sistemi, Radyoaktif yakalama çubuğu kullanılmaktadır. Son yıllarda erken boşalma yayan yıldırımlıklar (Early Streamer Emission (ESE)) olarak bilinen aktif yıldırımlıklar kullanılmaya başlanmıştır. Faraday kafesi sistemine göre daha etkili ve daha güvenli bir sistem olduğu iddia edilmektedir [9, 11, 14].

DYKS, enerji dağıtım sistemlerinde ve alçak gerilim şebekelerinde farklılık gösterir. Bu yapılarda parafudrlar, yalıtım transformatörleri, aşırı gerilime karşı koruma düzenleri ve optoelektronik koruma devreleri gibi koruma elemanları kullanılmaktadır [15, 16].

İç yıldırımdan koruma sistemi (İYKS), binalar ve tesisler içindeki duyarlı elektrik ve elektronik sistemleri ve aletleri, zararlı endüklenen gerilimlere karşı korumayı sağlar. Bu gerilimlere, doğrudan veya dolaylı yıldırım çarpmaları nedeniyle ortaya çıkan elektromanyetik alanlar sebep olmaktadır. İç yıldırımlardan koruma sistemi, havalı veya gazlı koruma elektrot sistemleri, filtreler, değişken dirençler, zenerler ve hızlı koruma diyotları gibi elemanlardan oluşur [9, 16].

Yıldırım darbeleri çoğu ÷lkede, binalarda, tesislerde, enerji sistemlerinde, bilgisayarlarda vb. düzenlerde pek çok zararlara sebep olur. Doğru tasarlanmış ve etkin bir yıldırımdan koruma sistemi ile bu zararlar en aza indirilebilir .



3. YILDIRIM ÇARPMA OLASILIĞININ HESABI

Yıldırım çarpma olasılığının hesabında beklenen yıldırım çarpma sıklığı en önemli büyüklüklerden birisidir. Bunu belirlemek için çok çaba gösterilmiş ve farklı yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerin çoğu istatistiksel veriler ile karşılaştırılamayan sayısal değerler vermektedir. Bunlar çarpma olasılığını değerlendirememekte ve doğrulayamamaktadır. Bu bölümde nicel sonuçlar vermiş ve doğrulanan yeni yöntemlerden söz edilecektir.

3.1. Elektrogeometrik Model (Yuvarlanan Küre Modeli)

Bu model, yıldırım çarpma noktasının, çarpma uzaklığının belirlenmesi ile bulunması ilkesine dayanır. Bu uzaklık genellikle yıldırım akımının tepe değerinin bir fonksiyonudur. Yıldırım akımı ile çarpma uzaklığı arasındaki ilişki denklem (3.1)'deki gibidir.

$$r = a \cdot I^c \quad \text{m} \quad (3.1)$$

Burada

a : 6...7 arasında değişen bir katsayı

I : yıldırım akımı (kA)

c : 0,6...0,8 arasında değişen bir katsayı

Denklem (3.1)'e göre çarpma uzaklığı nesnenin yüksekliğinden bağımsızdır, bu yüzden bu denklemin uygulama alanı sınırlıdır. Diğer bir denklem bu sorunu ortadan kaldırır:

$$r = a \cdot I^c \cdot h^b \quad \text{m} \quad (3.2)$$

Burada

I : yıldırım akımı (kA)

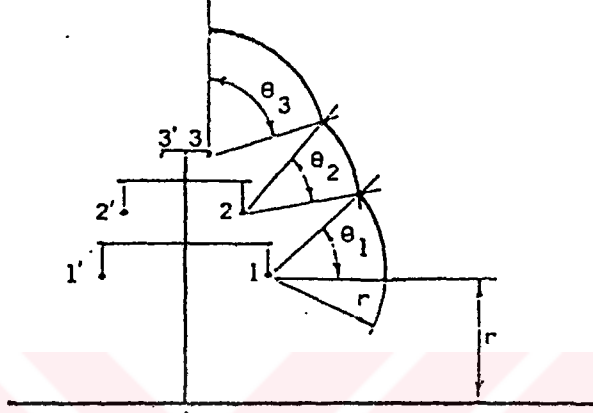
c : 0,6...0,8 arasında değişen bir katsayı

h : nesnenin yüksekliği (m)

a : 1...1,5 arasında değişen bir katsayı

b : 0,5...0,7 arasında değişen bir katsayı

Fakat (3.1) ve (3.2) ampirik denklemleri için kullanılan değerlerle ilgili dünya çapında farklılıklar vardır.



Şekil 3.1 Bir toprak ve iki iletken hatlı bir yüksek gerilim hattının maruz kalma açıları

Bu yöntem için diğer bir temel ilke, en küçük uzaklıklar ilkesidir. Yıldırımın arpma uzaklığında iken en yakın topraklanmış noktaya çarpacağı varsayılır. Şekil 3.1 de toprak iletkeninden, korunmuş iletkenlerden ve yer yüzeyinden çarpma uzaklığı kadar uzakta bulunan noktaların oluşturduğu eğri görülmektedir. 1'den 3'e kadar olan bölümler her hattın maruz kaldığı bölümleri göstermektedir. Bu basit düzenlemede maruz kalma, θ_1 , θ_2 ve θ_3 açıları ile ifade edilir. Korumanın göreli etkisini hesaplamak için bu aılar uygulanabilir. Bu aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$p_i = (\theta_1 + \theta_2) / (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (3.3)$$

Burada pay, korunmuş iletkenlerin yıldırım çarpması ile ilgili kısmı, payda ise toplam hatlara çarpma durumudur. Eğer arpma uzaklığı artarsa maruz kalma açısı büyür ve bu yüzden koruma daha etkili olur. İletkenlerin maruz kalma açısı sıfıra

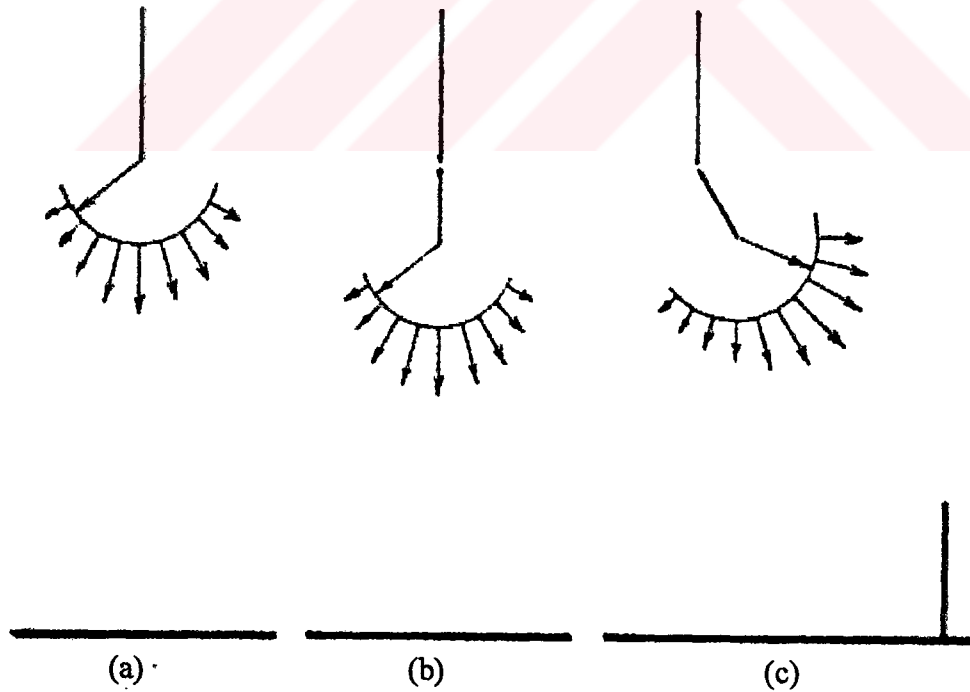
düştüğü zaman çarpma uzaklığındaki yıldırım akımından daha büyük bir yıldırım akımına sahip yıldırıma karşı tam bir koruma sağlar.

3.2. Elektromanyetik Model

Bu model, yıldırım boşalma yolunun benzetimine ve yürüyen dalga yaklaşımına dayanan iki model üzerinde ele alınacaktır.

3.2.1. Yıldırım boşalma yolunun benzetimi

Bilgisayarda yıldırımın ilerleyişinin ve çarpma sürecinin adım adım benzetimi yapılabilir. Modeller ayrıntılarda farklı olmasına rağmen temelde benzerdir. Yeryüzündeki nesnelerin varlığını etki dışı bırakmak için yeteri kadar yüksek bir seviyeye kadar gelişmiş bir öncü boşalmanın düşey düz bölümü ile benzetim başlar. Çünkü yeryüzü üzerinde yalnız başına duran bir nesne sadece yüksekliğinin iki katı seviyesine kadar alanda bir değişikliğe neden olduğundan, benzetimin başlangıç noktası bu seviyenin üstünde olmak zorundadır.



Şekil 3.2 Bilgisayar simülasyonuna göre öncünün ilerleme safhaları

Öncü kanal boyunca yük dağılımının düzgün olduğu kabul edilmiştir. Bazı modellerde yükün kanalın alt kısmında toplandığı veya aşağı doğru artan yük dağılımının olduğunu kabul edilmektedir. Kanal içindeki bu yük dağılımı elektrik alanının kaynağıdır. Kanalın ilerlemesi 10 veya 20 metre uzunluğundaki eşit adımlarla modellenir. Elektrik alanının yönü ise elektrik alanının maksimum olduğu yöne doğrudur. Şekil 3.2 de başlangıç ve yarıçapı adıma eşit bir çember (küre) üzerindeki potansiyel gösterilmiştir. Burada potansiyel daima negatiftir. Çember (küre) üzerinde potansiyelin en küçük negatif değerine ulaştığı yönde fark en yüksektir. Şekil 3.2-a ya göre bu nokta ortada bu yüzden adım düşey olarak aşağıya gider. Şekil 3.2-b de bu görülmektedir. Şekil 3.2-c de topraklanmış bir cismin alanı biraz değiştirmesi gösterilmiştir. Öyle ki en yüksek potansiyel fark bir tarafa kayar. Ve bir sonraki adım düşeyden başka tarafa yönelir. Bilgisayar benzetimi şu şekilde ilerler: Öncü boşalma 10 veya 20 metre adım uzunluğunda bölümlere ayrılmıştır. Her bir bölümün yükü

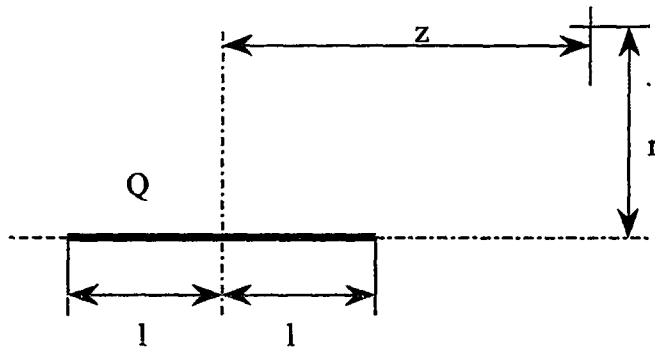
$$U = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 l} \ln \frac{z+l+\sqrt{r^2+(z+l)^2}}{z-l+\sqrt{r^2+(z-l)^2}} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilen bir potansiyel üretir. Bu ifadede

Q : Bölümün toplam yükü

ϵ_0 : Boşluğun (havanın) dielektrik sabiti

z , r ve l büyüklükleri Şekil 3.3 üzerinde gösterilmiştir.



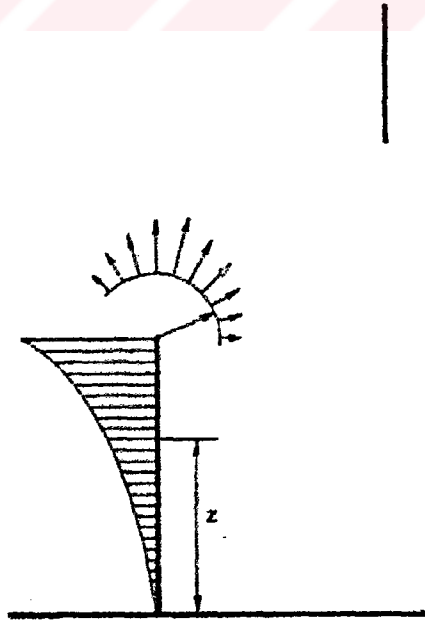
Şekil 3.3 Üretilmiş alanın hesaplanmasında kullanılan büyüklükler

Burada aynı zamanda görüntü yükünü hesaba katmak gerekir. Üstteki ifade ile çember boyunca potansiyel hesaplanabilir. Ve alanın maksimum değeri belirlenebilir.

Eğer maksimum değer bilinirse, bilgisayar öncü kanalın bir sonraki kısmını yaratır. Elektrik alanı o zaman yeni bölümün alt ucu etrafındaki çevre üzerinde hesaplanmalıdır. Ve bu noktada yukarıda açıklanan çevrim tekrar başlar.

Bir topraklanmış cisim, elektrik alanını biraz değiştirir. Çünkü bu cisimlerin yüzeyindeki potansiyel sıfırdır. Bir kule veya bir antenin etkisi, eksenı boyunca dağılmış bir yük olarak dikkate alınabilir. Ayrıca yüzeydeki potansiyel sıfır alınır. Hesaplama için bu yük bölümlere dağılmış olmak zorundadır.

Nesnenin etkisi altında öncünün yolu düşeyden biraz yön değiştirir. Çarpma süreci ile ilgili olarak, nesnenin üstündeki elektrik alanı oldukça önemlidir. Çünkü bağlantı öncüsünün başlaması buna bağlıdır. Nesnelerin üzerinde daima keskin nokta şeklinde yerler vardır. Bu yerlerde korona boşalması görülür. Fakat bu bir bağlantı öncüsü değildir. Laboratuvar deneyleri, korona boşalmasının bir yakalama öncüsüne dönüşebilmesi için 5-10 metrelik mesafede ortalama alan şiddetinin 500-600 kV/m'ye yükselmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 3.4 Bir kulenin eksenine dağıtılmış yükler

Bilgisayar benzetimi ile aynı zamanda nesnenin üzerindeki potansiyel kontrol edilir. Bu Şekil 3.4'de gösterilmektedir. Eğer en yüksek alan şiddeti kritik değeri belirli bir yönde aşarsa yakalama öncüsünün bu bölümü yaratılmak zorundadır. Bu bölüm öyle bir değere sahiptir ki potansiyel bu bölümün en üstünde sıfır olmaktadır. Bu süreç öncü boşalmanın yayılma periyoduna ve yakalayıcı boşalmanın adım adım ilerlemesine uydurulmalıdır. Yakalama öncüsünün ilerleme hızı kutbiyete bağlıdır. Yıldırım negatif olduğu zaman yakalama öncüsü buluttan aşağı inen öncüden daha hızlı gelişir. Bu durum yakalama öncüsünün uzun adımlar atmasına bağlanmaktadır. Pozitif kutbiyette ise tam tersi bir durum söz konusudur.

3.2.2. Yürüyen dalga yaklaşımı

Yukarıda anlatılanlardan anlaşılacağı gibi, yerden veya yüksek bir yapıdan yukarı doğru gelişen boşalma (veya boşalmalar), buluttan yere doğru gelişen öncü boşalma tarafından başlatılır. Bu nedenle, yıldırımın sistemin belli bir yerine neden çarptığını açıklayabilmek için, aşağı doğru gelişen yükler ve bu yüklerin etkileri incelenmelidir. Bunun en iyi yolu, bu yük hareketinin sonucu olan elektromanyetik alanları incelemektir.

Aşağıya doğru ilerleyen öncünün neden olduğu elektromanyetik alanı hesaplamak için bazı varsayımlar yapılır.

1. Buluttan aşağıya doğru ilerleyen yük dalgası negatif kutbiyetlidir. Bu dalga $t = 0$ anında ilerlemeye başlamış ve hızı ışık hızının $1/1000$ 'ni kadardır. Yük dalgası bir adım fonksiyonu karakterine sahiptir.
2. Bulutun alt kısmından yeryüzüne kadar olan uzaklık 2000 m'dir.
3. Yeryüzü sonsuz iletkenlikte bir yatay düzlem olup, bu durumda görüntü yöntemi kullanılabilir.

Önce genel alan denklemleri ile başlayıp daha sonra bunları yukarıdaki varsayımlarla kullanacağız.

Elektromanyetik alan teorisine göre Maxwell denklemleri:

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

Bu denklemde $\vec{E}$ - elektrik alan şiddeti

$\vec{B}$ - manyetik akı yoğunluğu

t - zamandır.

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (3.6)$$

Bu denklemde $\vec{H}$ - manyetik alan şiddeti

$\vec{J}$ - akım yoğunluğu

$\vec{D}$ - elektriksel akı yoğunluğudur.

$\vec{D}$ şu şekilde tanımlanır.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (3.7)$$

Burada ϵ_0 - boşluğun dielektrik sabitidir ($10^{-9}/36\pi$ F/m).

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (3.8)$$

Burada ρ - elektriksel yük yoğunluğudur.

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (3.9)$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (3.10)$$

Burada μ_0 - boşluğun manyetik geçirgenliğidir ($4\pi 10^{-7}$ H/m).

Vektörel manyetik potansiyel $\vec{A}$ dan yararlanarak manyetik akı yoğunluğu,

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (3.11)$$

dır. Denklem (3.5)'den

$$\text{div} \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.12)$$

elde edilir. Bu denklem "elektriğin süreklilik yasası" denklemleri olarak adlandırılır. Bu denklemler,

$$\vec{J} = \gamma \vec{E} \quad (3.13)$$

γ - elektriksel iletkenlik

şeklindeki "ohm yasası" ile birlikte alan hesapları için temel denklemlerdir.

Denklem (3.5) ve (3.11)'den

$$\vec{E} = -\text{grad} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (3.14)$$

elde edilir. V skaler potansiyeldir. Denklem (3.14), elektrik alan şiddeti bileşenlerini hesaplamak için kullanılır.

(3.5)'den (3.14)'e kadar olan denklemlerden yararlanarak, skaler ve vektörel potansiyeller için kısmi hiperbolik denklemler

$$\nabla^2 V - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3.15)$$

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu_0 \vec{J} \quad (3.16)$$

yazılır. Bu denklemlere "Dalga denklemleri" denir. Bu denklemler yalnızca aşağıdaki koşulun yerine gelmesi durumunda geçerlidir.

$$\text{div} \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

İncelediğimize benzer problem olan anten problemlerinde, bütün iletkenler ince ve silindirseldir. Böylece ρ yerine q birim uzunluğun yükü ve $\vec{J}$ yerinde I akımı kullanılır.

Sonsuz küçük iletken bir ds elemanından r uzaklığındaki bir P noktasında, (3.15) ve (3.16) ile verilen denklemlerden, skaler ve vektörel potansiyellerin genel çözümleri:

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_s \frac{q(s; t - \frac{r}{c})}{r} ds \quad (3.18)$$

$$\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_s \frac{I(s; t - \frac{r}{c})}{r} d\vec{s} \quad (3.19)$$

dir. Bu iki denklem "gecikmeli (retarded) potansiyel denklemleri" olarak bilinir.

Yukarıda verilen eşitliklerle, herhangi bir $P(\xi; r)$ noktasında meydana gelen elektrik alan şiddeti hesaplanabilir. İnce bir silindirsil iletken üzerinde I değerli dikdörtgen bir akım dalgası v hızıyla yayılır ($v < c$). Bu akım dalgasının $t = 0$ anında iletken akmaya başladığı kabul edilir (Şekil 3.5).

Eğer akım dalgası I dikdörtgen şeklini korursa, bu bir yük dalgasına eşit olur. Burada

$$q = \frac{I}{v} \quad (3.20)$$

Bu durumda denklem (3.18) in çözümü

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_{x=0}^{x=x'} \frac{dx}{\sqrt{(x - \xi)^2 + r^2}} \quad (3.21)$$

Burada integralin üst sınırı olan x' , dalganın ön kısmının tam olarak konumuna bağlıdır. Şekil 3.5 e göre

$$\frac{x'}{v} + \frac{\sqrt{(x' - \xi)^2 + r^2}}{c} = t \quad (3.22)$$

elde edilir. Burada ct , t anında ilerleyen elektromanyetik alanı kapsayan mesafedir. Eğer şu tanımlar kullanılırsa

$$u = \frac{c}{c + v}(vt - \xi) \quad (3.23)$$

$$R = \sqrt{\frac{c - v}{c + v}} \cdot r \quad (3.24)$$

Skaler potansiyel için denklem (3.21) in çözümü

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + R^2}) - \ln(-\xi + \sqrt{\xi^2 + r^2}) \right] \quad (3.25)$$

denklem (3.20) den

$$\frac{q}{4\pi\epsilon_0} = 30I \frac{c}{v} \quad (3.26)$$

bu ifade denklem (3.25) de yerine yazılırsa

$$V = 30I \frac{c}{v} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + R^2}) - \ln(-\xi + \sqrt{\xi^2 + r^2}) \right] \quad (3.27)$$

Benzer şekilde vektör potansiyeli de aynı şekilde elde edilir.

$$\bar{A} = 30I \frac{1}{v} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + R^2}) - \ln(-\xi + \sqrt{\xi^2 + r^2}) \right] \cdot \bar{\xi} \quad (3.28)$$

Burada $\vec{\xi}$, ξ yönündeki bir birim vektördür.

Denklem (3.14), (3.27) ve (3.28) kullanılarak $P(\xi; r)$ noktasındaki elektrik alan şiddetinin ξ ve r yönündeki bileşenleri elde edilebilir. Akım dalgasının ilerleme hızı v olduğu durum için

$$E_{\xi v} = -\frac{\partial V}{\partial \xi} - \frac{\partial A}{\partial t} = 30I \frac{c}{v} \left[\frac{\frac{c-v}{c}}{\sqrt{u^2 + R^2}} - \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + r^2}} \right] \quad (3.29)$$

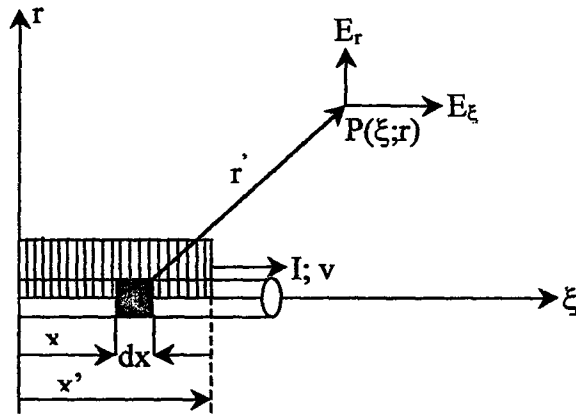
$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} = 30I \frac{c}{v} \cdot \frac{1}{r} \left[\frac{u}{\sqrt{u^2 + R^2}} + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + r^2}} \right] \quad (3.30)$$

Eğer dalganın hızı ışık hızına eşit olduğu zaman $v = c$

$$E_{\xi c} = -30I \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + r^2}} \quad (3.31)$$

$$E_r = 30I \cdot \frac{1}{r} \left[1 + \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + r^2}} \right] \quad (3.32)$$

Bu ifadeler $t \geq \sqrt{\xi^2 + r^2} / c$ için geçerlidir. Bu zamandan daha önce alan bileşenleri sıfırdır. Çünkü elektromanyetik alan P noktasına henüz ulaşmamış olur.



Şekil 3.5 I akım dalgası nedeniyle $P(\xi; r)$ noktasındaki $\vec{E}$ bileşenleri

Elektrik alan şiddeti bileşenlerini hesaplamak için denklem (3.14) kullanılabilir. Görüleceği gibi, $\vec{E}$ 'yi bulmak için, sırasıyla V ve $\vec{A}$ skaler ve vektörel potansiyelleri hesaplanmalıdır. Bu hesaplama, denklem (3.18) ve (3.19)'dan yararlanılarak yapılabilir. Denklem (3.17) ile belirtilen koşulun yerine getirilip getirilmediğini kontrol etmek için, yukarıda söylenen durumdaki gibi buluruz, başka türlü değil. Bu çözüm fiziksel anlamı olmayan bir çözümdür. Bu yüzden yürüyen akım dalgasının kaynağına ve sistemi besleme yoluna dikkati çekerek değildir.

Yalnızca denklem (3.17)'nin sağlandığı durumda, NP veya PN türü, sola giden dalganın sağa giden dalgaya göre zıt kutbilyete sahip olduğu akım dalgası çiftidir (Şekil 3.6). Elektrik alan şiddetinin hem ξ hem de r yönündeki bileşenleri hesaplanabilir ve bu durumda, bu bileşenlerin dalga yayılma hızının ışık hızına eşit olduğu kabul edilir:

$$E_{\xi NP_0} = -60I \frac{1}{\sqrt{\xi^2 + r^2}} \quad (3.33)$$

$$E_{r NP_0} = -60I \frac{1}{r} \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + r^2}} \quad (3.34)$$

Buluttan aşağıya doğru giden yüklerin sebep olduğu elektrik alan şiddetinin bileşenlerini bulmak için yukarıda belirttiğimiz varsayımları da hesaba katarak bir çalışma yapılır. Şekil (3.7) $v < c$ için ξ ve r yönlerindeki alan şiddeti

$$E_{\xi} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{c-v}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{u_1^2 + R^2}} + \frac{1}{\sqrt{u_2^2 + R^2}} + \frac{1}{\sqrt{u_1'^2 + R^2}} + \frac{1}{\sqrt{u_2'^2 + R^2}} \right] \right. \\ \left. - 2 \left[\frac{1}{\sqrt{\xi_1^2 + r^2}} + \frac{1}{\sqrt{\xi_2^2 + r^2}} \right] \right]$$

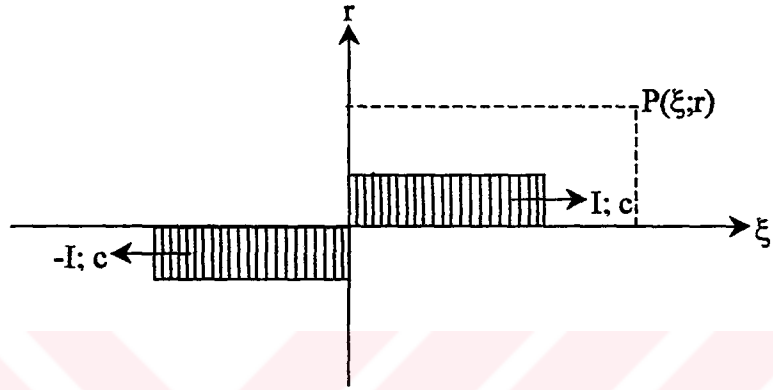
$$E_r = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r} \left[\frac{u_1}{\sqrt{u_1^2 + R^2}} - \frac{u_2}{\sqrt{u_2^2 + R^2}} - \frac{u_1'}{\sqrt{u_1'^2 + R^2}} - \frac{u_2'}{\sqrt{u_2'^2 + R^2}} + 2 \left[\frac{\xi_1}{\sqrt{\xi_1^2 + r^2}} - \frac{\xi_2}{\sqrt{\xi_2^2 + r^2}} \right] \right]$$

Burada, $u_1 = \frac{c}{c+v} (vt - \xi_1)$

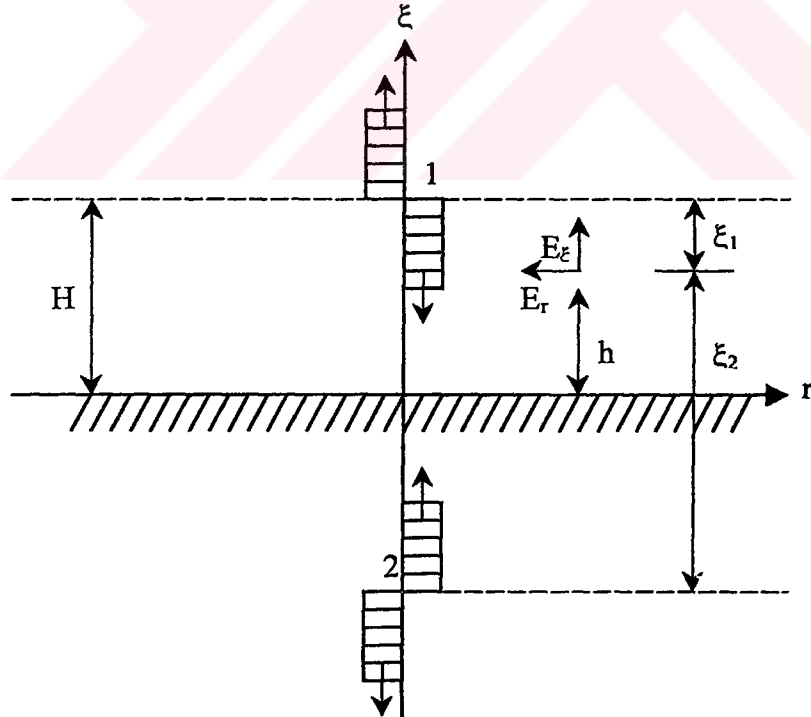
$$u_2 = \frac{c}{c+v} (vt - \xi_2)$$

$$u'_1 = \frac{c}{c+v} (vt + \xi_1)$$

$$u'_2 = \frac{c}{c+v} (vt + \xi_2)$$



Şekil 3.6 Bir NP dalga çifti nedeniyle alan hesabı için düzen



Şekil 3.7 Bir NP dalga çifti nedeniyle elektrik alan şiddeti bileşenleri

Aşağı doğru gelen boşalma tarafından sistemin değişik noktalarında endüklenen elektrik alan şiddetinin bilinmesi ve konform dönüşüm (veya Schwarz-Christofel dönüşümü) ile kritik değerlerin bulunması, bize olası yıldırım çarpma noktalarının belirlenmesi olanağını verir.

3.3. Yakalama Bölgesi Kavramı

Buradaki temel yaklaşım aşağı doğru inen öncü, yere kendine göre bir yol üzerinden yaklaşır ve çarpma noktasına yere yakinken karar verir. Yıldırımın tamamen çarpma noktasına doğru döndüğü kritik nokta yönlenme noktası olarak alınabilir. En azından bir yakalama öncüsünün bir yapıdan veya yerden başlaması kriteri ile bu nokta belirlenir. Yönlenme noktası dahil yıldırımın nesneye çarpabileceği bütün noktalardan bir nesnenin yakalama bölgesini oluşturur. Yakalama bölgesi ya tüm nesne ile ya da yıldırımdan koruma sistemi veya yapının bir kısmı ile veya yer ile ilgilidir. Yakalama bölgesinin kapsamı korunmuş parçanın veya yapının yıldırımın çarpmasının beklenen sıklığının kabaca değerini verir. Fakat bu kaba bir tahmindir. Daha iyi bir sonuç elde etmek için, yönlenme noktası yakalama bölgesi içindeki çok sayıdaki noktalardaki farklı olasılıkları ile meydana gelmesi gerçeği düşünülür.

Yakalama bölgesi ile yakalama alanı aynı değildir. Bir nesnenin yakalama alanı yer yüzünü kapsar. Bu alan aynı sıklık ile nesneyi vurabilecektir. Yakalama alanı eşdeğer alan ile aynıdır. Yakalama alanı yerine yakalama yarıçapı ve yakalama bandı kavramlarından söz edilir. Bunlar yönlenme uzaklığı veya çarpma uzaklığı ile karıştırılmamalıdır.

Bu modelin ana koşullarına göre iki sorunun cevaplandırılması gerekir. İlk olarak, yönlenme noktasını içeren bir yakalama bölgesinin beklenen sıklığı nedir? İkinci soru olarak da, bu yönlenme noktasından gözönüne alınan bir nesneye yıldırımın çarpma olasılığı nedir? Önce ilk sorunun cevabını bulmaya çalışalım. Makul bir ifade ile yer yüzünün yıldırım yoğunluğu (N_d) ve düz alan ($\Delta x \Delta y$) ye orantılı bir sıklık ile yıldırım yer yüzündeki kare bir alana çarpabilecektir. Bu durumda yakalama bölgesi, alanın üstünden sonsuza büyüyen bir prizmadır. Fakat yönlenme noktaları

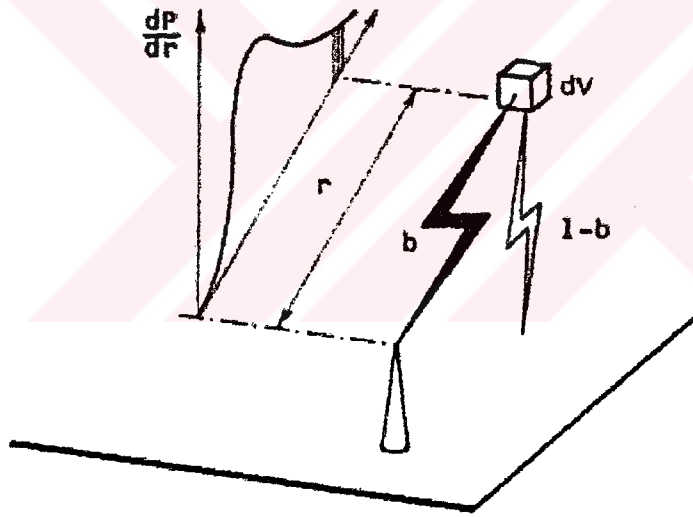
$$\frac{dp}{dr} = \frac{p}{s\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{p}{s} \ln \frac{r}{r_m}\right)^2\right] \quad 1/m \quad (3.35)$$

ifadesine göre z eksenı boyunca dağılır. Beklenen sıklık

$$\Delta N(z) = N_g \Delta x \Delta y \frac{dP}{dz} \Delta z \quad \text{çarpma/yıl} \quad (3.36)$$

olarak ifade edilir. dP/dz yönlenme uzaklıklarının yoğunluk fonksiyonunu ifade eder.

Düz bir arazide bir yapı düşünelim. Şekil 3.8 de hacim elemanının pozisyonu gösterilmiştir. Eğer boyutları Δx , Δy ve Δz sıfıra giderse, bunların ürünü belki diferansiyel hacim elemanı olarak dV sembolü ile yer değıştirebilir. Eşitlik sıklığının türev değeriini ifade eder.



Şekil 3.8 Bir nesneye yıldırım çarpma sıklığını hesaplamak için hacim elemanı

İkinci soruya dönecek olursak, yıldırım b olasılığı ile yapıya çarpabilir, veya $(1-b)$ olasılığı ile arpamayabilir.

$$dN = N_g b \frac{dP}{dr} dV \quad \text{çarpma/yıl} \quad (3.37)$$

Yönlenme noktasının hacim elemanının içinde olduğu ve yapının oradan çarpılacağı sıklık üsteki ifade ile verilir. Yapıya çarpacak bütün yıldırımların beklenen sıklığını elde etmek için diferansiyel büyüklüğün integrali teorik olarak sonsuz uzayda hesaplanır. Gerçekte integrasyon sadece yapının yakalama bölgesi üstüne kadar genişletilir. Bu yüzden beklenen sıklık

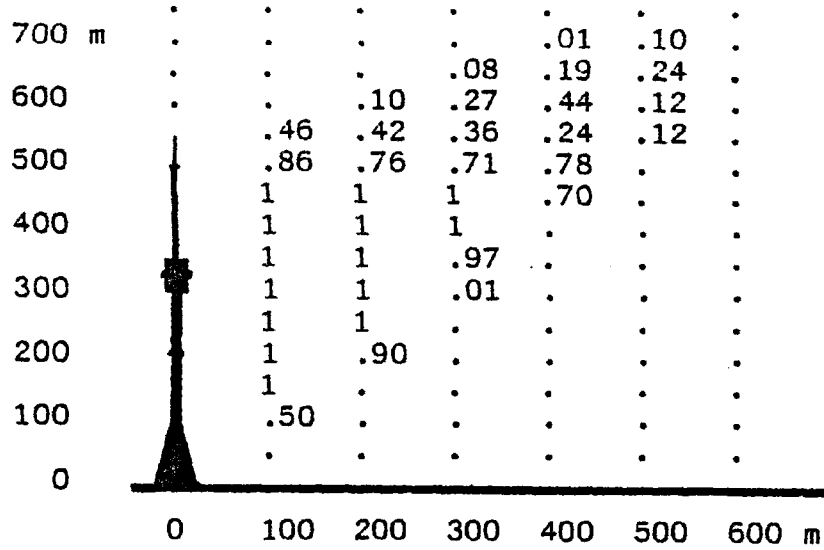
$$N = N_g \int_{V_a} b \frac{dP}{dr} dV \quad \text{çarpma/yıl} \quad (3.38)$$

olarak ifade edilir. burada integral metre-kare boyutundadır. Bunun anlamı eşdeğer alana benzer bir alanı gösterir. İntegral bu ilişki düşünülerek eşdeğer alan (A_{eq})

$$A_{eq} = \int_{V_a} b \frac{dP}{dr} dV \quad m^2 \quad (3.39)$$

bir sonraki problem ise yakalama bölgesi içindeki herhangi bir nokta için b olasılığının belirlenmesidir. Bu amaç için bir yol bir model çalışmasıdır. Bunun gibi sonuçların geçerliliği sık sık, şüpheli olarak kabul edilmesine rağmen, yönlenme noktasının koşulları bir model çalışmaya uygulanabilir. Yönlenme noktasının tanımı iki boşalmanın birbirine doğru gelmesini gerektirir. Bu benzer durum standart yıldırım darbesi kullanılarak üretilir. Standart açma kapama darbesi yeterli değildir. Çünkü uzun öncü boşalma belki zıt olanının varlığı olmadan pozitif elektrottan üretilir. En uygun gerilim aralığı delinme geriliminin biraz üstüdür. Çünkü bu doğal koşullara en iyi yaklaşımdır.

Deneyde bir yüksek gerilim elektrodu, yönlenme noktasının yukarıdaki öncü kanalın üst kısmını temsil eder. b nin belirlendiği yönlendirme noktasının yeri deneyin temelidir. Bu amaçla elektrot üsteki modelde hareket ettirilir ve her noktada düşünülen nesneye çarpan boşalmalar sayılır. b olasılığı bu boşalmaların toplam boşalmaya oranından elde edilir. Uygun bir koordinat sistemi kullanıldığında, bu düzenin karmaşıklığından bağımsız bir sonuç veren yöntem elde edilir. Uzun zaman gerektirmesi ve model oluşturmanın pahalı olması bu yöntemin dezavantajıdır.



Şekil 3.9 Moskova da ki bir televizyon kulesi modeli ile yakalama bölgesi içindeki b olasılık değerleri

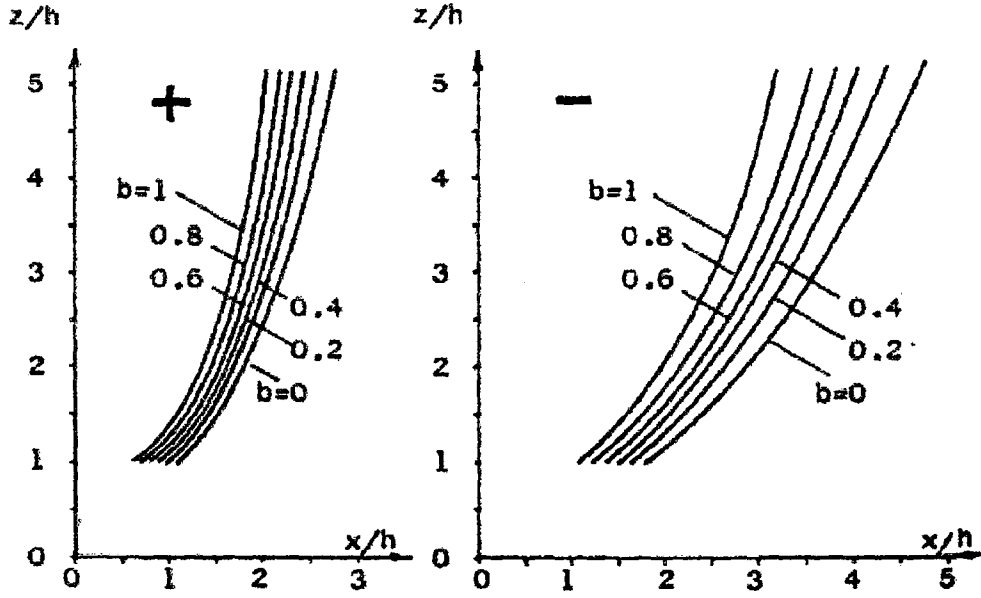
Şekil 3.9 Moskova da ki bir televizyon kulesinin modeli ile yapılmış bir deneyin sonuçlarını göstermektedir. Kulenin kenarı düşünülen nesne olarak alınır. Dönel simetri düşünüldüğü zaman hacim elemanı

$$\Delta V = 2\pi x \Delta x \Delta z \quad (3.40)$$

olur. Burada Δx ve Δz ölçüm noktaları arasındaki uzaklıktır. (3.40) ifadesi ile integral bir toplam halinde yazılır.

$$A_{eq} = \sum b(z, r) \frac{dP}{dr} \Delta V \quad m^2 \quad (3.41)$$

Bu hesaplama bilgisayar ile yapılır. Sistem koordinatları ve b nin ölçülen değerleri giriş verileridir. Her noktada (3.35) denklemi kullanılarak yoğunluk fonksiyonu hesaplanır.



Şekil 3.10 1963 yılında Horvarth 'ın çalıştığı model ile belirlediği sabit b lerin yüzey çizgileri

Bu model çalışması genel ilişkileri elde etmek içinde kullanılır. Şekil 3.10 metal bir yüzeyden basit bir yükselen çubuk ile yapılmış deneylerin sonuçlarını göstermektedir. Çevre çizgileri $b=0$ dan $b=1$ 'e değişen seviyeleri gösterir. Kutbiyete bağlı olarak ortaya çıkan farklılıklar yakalama bölgesinin büyüklükleri arasında görülebilir. Çevre çizgileri aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir.

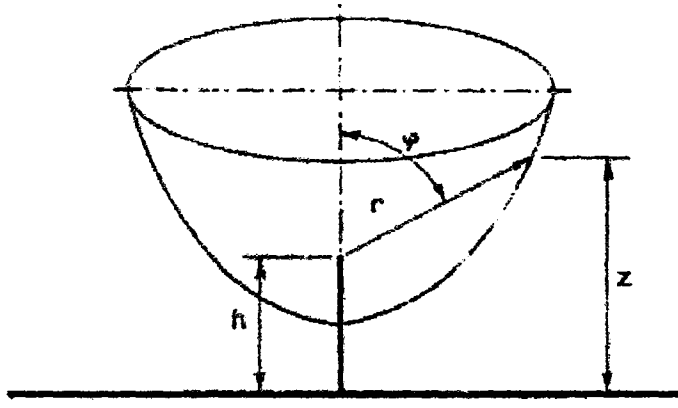
$$\cos\varphi = \varepsilon - \frac{h}{r} \quad (3.42)$$

Burada

$$\varepsilon = \frac{z}{r} \quad (3.43)$$

dir. Hesapta kutupsal koordinatlar kullanılmıştır. Şekil 3.11 da bunlar görülmektedir. ε sayısı aşağıdaki değerlere sahiptir.

$b=0,5$ için	pozitif $\varepsilon=1,06$	negatif $\varepsilon=0,88$
$b=0$ için	pozitif $\varepsilon=1,00$	negatif $\varepsilon=0,75$

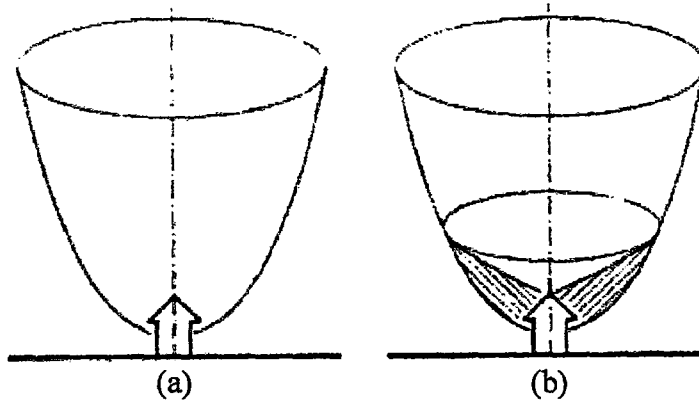


Şekil 3.11 h Yüksekliğindeki bir çubuğun yakalama bölgesinin sınırları

Denklem (3.42) eğer $\epsilon < 1$ ise bir hiperbolü, eğer $\epsilon = 1$ ise bir parabolü, eğer $\epsilon > 1$ ise bir elipsi gösterir. Bu denklem bilgisayar programlarında analitik ilişkiler kullanılarak yakalama bölgesi sınırlarının tanımlanmasında kullanılır. Bu amaçla geçiş bölgesinin ortası genellikle yakalama bölgesinin sınırı olarak kullanılabilir. Bu durum $b = 0,5$ durumu ile aynıdır. ϵ 'nın uygun değeri yerine konulduğu zaman, eğer o düşey eksen etrafında döndürülürse denklem (3.42) bir kule veya bir çubuk durumunda uygulanabilir. Yatay bir hat durumunda ise paralel yer değiştirme ile yakalama bölgesi elde edilir.

Yakalama bölgesi aynı zamanda bir yıldırım koruma sisteminin koruma etkisini değerlendirmede kullanılır. Bu durumda korunmuş nesneye ait yakalama bölgesi düşünülmek zorundadır. Denklem (3.38) veya (3.39) da ki integraller sadece bu yakalama bölgesi için hesaplanır. Bu yöntem, genellikle beklenen çarpma sıklığının veya yıldırımlık dışına çarpması önlenen boşalmaların sıklığının hesaplanmasında hiçbir değişiklik olmadan uygulanır. Fark yakalama bölgelerinin sınırlarını içerir.

Bu yöntem bir yıldaki çarpmalar olarak ifade edilen beklenen sıklığı üretir. Beklenen sıklık şüphesiz tanımlanmış nicelik olup gözlemlenmiş veriler ile karşılaştırılabilir. Koruyucu etki bağıl bir değer olarak da ifade edilebilir. Bu bağıl değer (oran), başka yere çarpması önlenen boşalmaların sıklığının bütün çarpmaların sıklığına oranıdır.



Şekil 3.12 (a) Yıldırıma karşı korumasız bir yapının yakalama bölgesi, (b) yıldırıma karşı korumalı bir yapının yakalama bölgesi

Yakalama bölgesi, yıldırım yakalama ucunun çarpmaların sıklığını nasıl azalttığını gösterir. Şekil 3.12-a yıldırım koruması olmayan bir yapının yakalama bölgesini gösterir. Şekil 3.12-b ye göre çatının üstünde bulunan bir yıldırımlık bu bölgenin bir kısmını azaltır. Korunmuş yapının azalmış yakalama bölgesi çarpma sıklığının da azalması anlamına gelir. Çünkü sadece onun büyüklüğü küçültülmemiş aynı zamanda da o sonsuza yaklaşmamaktadır. dP/dt nin değeri kalan bölgede daha küçüktür. Ve bu yüzden denklem (3.38) ve (3.39) oldukça azalmış beklenen sıklıkla sonuçlanır.

4. YAKALAMA BÖLGESİ YAKLAŞIMI İLE YAPILARA YILDIRIM ÇARPMA RİSKİNİN MODELLENMESİ VE BİLGİSAYAR UYGULAMALARI

Bu bölümde, yeryüzünden belli bir yükseklikteki bir noktaya, düşey veya yatay iletkene yakalama bölgesi yaklaşımı ile yıldırım çarpma riskinin hesabına ilişkin bilgiler, bunların bilgisayarda uygulanması için akış diyagramları ve uygulama örnekleri verilmiştir.

4.1. Eşdeğer Alan

Yakalama bölgesinin sınırları tanımlandığında denklem (3.39)' dan eşdeğer alan hesaplanabilir. Bu durumda yakalama bölgesi içindeki her bir noktada $b = 1$, yakalama bölgesi dışında ise $b = 0$ olarak kabul edilir. Bu yüzden Şekil 3.10'da gösterilen geçiş bölgesi bir adımla değiştirilir. Bu durumda hacimsel integral sadece yakalama bölgesi içinde hesaplanır. Çünkü bu integralin bölge dışındaki değeri sıfırdır. Bu yüzden denklemden b değeri ihmal edilebilir. Bu durumda

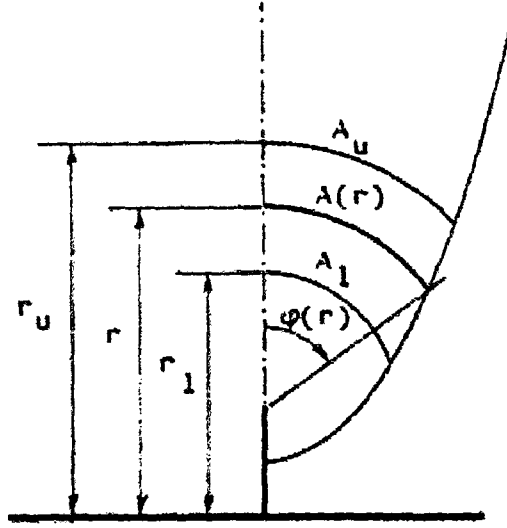
$$A_{eq} = \int_{V_i} \frac{dP}{dr} dV \quad m^2 \quad (4.1)$$

olur. Yoğunluk fonksiyonu dP/dr yönelme uzaklığına bağlı olup, r uygun bir bağımsız değişken olarak alınabilir. Hacim elemanı dV 'nin, r 'nin bir fonksiyonu olarak ifade edilmesi durumunda denklem (4.1) aşağıdaki şekle dönüştürülebilir.

$$A_{eq} = \int_{V_i} \frac{dP}{dr} A(r) dr \quad m^2 \quad (4.2)$$

Bu denklemde $A(r)$, nesneden r kadar uzaklıkta yakalama bölgesinin kesit alanıdır. $A(r)$ fonksiyonu ya bir analitik denklem ile ya da $A(r)$ ve r 'nin birbirlerine ait

değerleri ile ifade edilebilir. Sonuncusu belki model deney ile elde edilmiş sonuçların bilgisayarla değerlendirilmesidir. Burada analitik çözümle ilgilenilecektir.



Şekil 4.1 Bölümler içindeki yakalama bölgesinin bölümü

İntegrali hesaplamak için yakalama bölgesi alt bölgelere bölünür. Bu durum Şekil 4.1'de görülmektedir. Bir bölümün alt sınırında yönelme uzaklığı r_1 olup üst sınırı da r_u değerini alır. Kesit sürekli olarak A_1 den A_u ya farklı fonksiyonlara göre değişir. Bu fonksiyonu basitleştirmek için lineer bir fonksiyon kullanılabilir. Bu yaklaşık fonksiyonun genel hali

$$A(r) = A_1 + \frac{A_u - A_1}{r_u - r_1} (r - r_1) \quad \text{m}^2 \quad (4.3)$$

$$A(r) = \frac{A_1 r_u - A_u r_1}{r_u - r_1} + \frac{A_u - A_1}{r_u - r_1} r \quad \text{m}^2 \quad (4.4)$$

r ve diğer niceliklerin ürünü kesiti ifade ettiği durumlarda vardır. Bir yayın paralel yer değiştirmesi ile elde edilen bir silindrsel yüzey tipik bir örnektir. Bu alan, silindirin ve yayın uzunluğu ile orantılıdır. Bu yüzden kesit alanının fonksiyonu

$$A(r) = L \cdot r \cdot \varphi(r) \quad \text{m}^2 \quad (4.5)$$

Burada $\varphi(r)$ yayla ilgili bir açı olup $r \cdot \varphi(r)$ yayın uzunluğuna eşittir. Bu durumu da hesaba katarak denklem (4.5) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$A(r) = \frac{\varphi_1 r_u - \varphi_u r_1}{r_u - r_1} L \cdot r + \frac{\varphi_u - \varphi_1}{r_u - r_1} L \cdot r^2 \quad m^2 \quad (4.6)$$

Hesaplamalar için aşağıdaki genel denklem kullanılabilir.

$$A(r) = K_1 r^c + K_2 r^{c+1} \quad (4.7)$$

Burada

$$K_1 = \frac{f_1 r_u - f_u r_1}{r_u - r_1} \quad \text{ve} \quad K_2 = \frac{f_u - f_1}{r_u - r_1} \quad (4.8)$$

dir. Bu denklemlerde f_1 ve f_u , bölgenin alt ve üst sınırlarında $f(r)$ 'nin değerleridir. $f(r)$ fonksiyonu ya kesitin alanı ya da onunla ilgili diğer bir niceliktir.

Denklem (4.7) denklem (4.2)'de yerine yazılırsa, bir bölüme ilişkin eşdeğer alanın r_1 den r_u ya olan bileşeni aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$A_{eq} = K_1 \int_{r_1}^{r_u} \frac{dP}{dr} r^c dr + K_2 \int_{r_1}^{r_u} \frac{dP}{dr} r^{c+1} dr \quad m^2 \quad (4.9)$$

Burada r in üssü $c=0$ dan $c+1=3$ e kadar değişebilir. Bu integrallerin belirsiz hali genellikle şu şekilde yazılır.

$$\int \frac{dP}{dr} r^n dr = \frac{p}{s\sqrt{2\pi}} \int r^{n-1} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{p}{s} \ln \frac{r}{r_m} \right)^2 \right] dr \quad (4.10)$$

Bu tip bir belirsiz integral analitik bir yöntemle çözülür. İntegralin sınırlarını 0 dan r 'ye kadar alarak aşağıdaki denklem verilebilir.

$$\int_0^r \frac{dP}{dr} r^n dr = r_m^n \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{n \cdot s}{p} \right)^2 \right] \Phi \left(\frac{p}{s} \ln \frac{r}{r_m} - \frac{n \cdot s}{p} \right) \quad (4.11)$$

Eğer $r = 0$ olursa $\Phi(0) = 0$, $r \rightarrow \infty$ olursa da $\Phi(\infty) = 1$ olur.

Bu denklemin uygulaması küçük bir hata içerir. Çünkü integrand bir analitik fonksiyon olarak düşünülür ve $A(r)$ için lineer yaklaşım yavaş değişen yakalama bölgesi kesiti için uygundur.

4.2. Bilgisayar Programının Yapısı

Genellikle her durumda uygulanan böyle birçok veri, fonksiyon ve prosedür vardır.

İlk olarak yıldırımın ana parametrelerini saptamak zorundayız. Bu parametreler arasında pozitif ve negatif aşağı doğru olan yıldırımın dağılım fonksiyonları çok önemlidir. Çok fazla bilgi elde mevcut olmasına rağmen bu iş ana problemi oluşturur. Yıldırım parametrelerinin istatistiksel verileri yüksek nesnelerden toplanmaktadır. Fakat hesaplamalar nesnenin varlığının yıldırım parametrelerini ve onların dağılımlarını etkileyeceğini gösterecektir. Bu yüzden amaç ana parametreleri elde etmektir.

Yıldırım akımlarının tepe değerlerinin dağılım fonksiyonu

$$P(i \leq I) = \Phi\left(\frac{1}{s} \ln \frac{I}{I_m}\right) \quad (4.12)$$

ile ifade edilir. Bu ifade akımın % 50 olasılıklı ortalama değerini ve s katsayısını parametre olarak içerir. Bu parametrelerin değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Bu veriler, bilgisayar programının başlangıcında sabit olarak alınmıştır. Bu, hesaplama boyunca uygulanan yönlenme uzaklıklarının dağılım fonksiyonu, yönlenme uzaklıklarının dağılımı için bir temeldir.

Tablo 4.1. Yıldırım akımının kutbiyete göre ortalama değerleri

Yıldırımın kutbiyeti	Ortalama değer I_m (kA)	Katsayı S
Pozitif	16	1,360
Negatif $I \leq 20$ kA	24	1,520
İlk arpma $I > 20$ kA	20	0,645

Pozitif yıldırımın negatif yıldırıma oranı yüksek nesnelerin etkisi altında değişen diğer bir parametredir. Bunun yüksek nesnelerdeki çarpmalar için gözlenmiş değeri yaklaşık %10 / %90 dır. Bu oranda, düz yapılara göre yapı yüksekliği arttıkça negatif yıldırımların oranı yükselir. Yıldırımı oluşturan bulut içinde eşit miktarda pozitif ve negatif yükler üretilir. Pozitif yüklerin bir kısmı iyonofere yükselir. Bütün yıldırımlar tarafından yeryüzüne taşınan pozitif yük daha azdır. Bir pozitif yıldırımın ortalama yükü bir negatif yıldırımın ortalama yükünden daha yüksektir. Pozitif buluttan yere olan yıldırımların sayısı, diğer yıldırım türlerine göre %50 daha azdır. Fakat pozitif yıldırımların oranı kesinlikle %10'dan büyüktür. Çünkü bu değer yüksek nesnelerde kaydedilmektedir. Bu yüzden pozitif yıldırımlar için önerilen oran %10 ve %50 arasındır. Bilgisayarda başlangıçta %30 pozitif, %70 negatif yıldırım oranı kullanılır. Fakat bu gerektiğinde değiştirilebilir.

Diğer önemli bir sabit, denklem (2.2)' deki p katsayısıdır. Çünkü bu yönlenme uzaklığı ile yıldırım akımı arasındaki ilişkiyi belirler. Teorik bir çalışmada $p = 1,85$ değerinin alınması önerilmesine rağmen, genellikle $p = 1,5$ olarak alınmaktadır. Bu yüzden bilgisayar programında bu değer kullanılır, gerekirse de değiştirilebilir.

İlk olarak, buluttan yere olan yıldırımların yoğunluğu (sayısı) N_g ve beklenen en küçük yıldırım akımı I_0 giriş verileri olarak düşünülür. I_0 elektriksel aletleri korumak için önemlidir. Ana ilişkilerden biri olan yönlenme uzaklığının ortalama değeri ile nesnenin yüksekliği arasındaki ilişki $r_m = \mu \cdot h$ ile verilmiştir. Bu ilişkide μ katsayısı aşağıdaki genel denklem ile ifade edilir.

$$\mu = \left(\frac{I_m}{I_n} \right)^q \left[(C \cdot h)^a + (D/h)^b \right] \quad (4.13)$$

Burada,

I_m : yıldırım akımının tepe değeri;

I_n : 20 kA;

$q = 1/p = 2/3$;

$a = 0,1$ ve $b = 0,7$;

pozitif yıldırım için $C = 1 \text{ m}^{-1}$ $D = 31,6 \text{ m}$;

negatif yıldırım için $C = 644 \text{ m}^{-1}$ $D = 32,5 \text{ m}$

Bu ilişki yıldırım akımının dağılım parametreleri olan I_m ve p 'den bağımsız değildir. Bunlar değiştirildiği zaman denklem (4.13)'deki sabitlerde değiştirilmek zorundadır.

Bu genel işlemde, denklem (4.9)'a göre eşdeğer alanın hesaplanması istenir. Bu hesaplama için K_1 ve K_2 katsayıları düşünülmüştür. Yakalama bölgesinin kesit alanı aşağıdaki değerlere sahip olabilir.

Üst sınır için:

$$A_u = f_u r_u^c$$

Alt sınır için:

$$A_l = f_l r_l^c \quad (4.14)$$

Burada $c = 0$, $c = 1$ veya $c = 2$ olabilir. Gerçek durum düşünüldüğü zaman $f(r)$ fonksiyonu tahmin edilebilir.

Denklem (4.11) aşağıdaki hale çevrilmiş integralleri hesaplamak için kullanılabilir.

$$\int_0^r \frac{dP}{dr} r^n dr = r_m^n \cdot e(n) \cdot \Phi(v) \quad (4.15)$$

Burada,

$$e(n) = \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{n \cdot s}{p} \right)^2 \right] \quad (4.16)$$

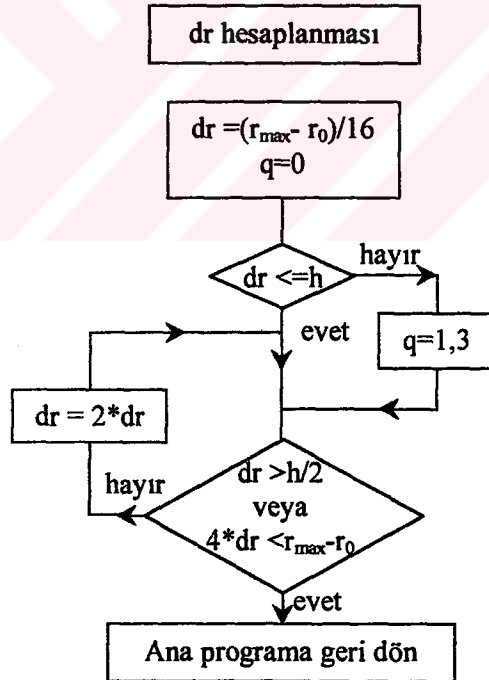
İfade n nin bir fonksiyonu olup r den bağımsızdır.

$$v(n, r) = \frac{p}{s} \ln \frac{r}{r_m} - \frac{n \cdot s}{p} \quad (4.17)$$

Bu ise n ve r in fonksiyonudur.

Φ hata fonksiyonun hesaplanması için birçok standart denklem mevcuttur.

Denklem (4.9) eşdeğer alanın sadece r_l den r_u ya olan sınırlar arasındaki bölümüne bağlı bir bileşeni verir. İşlem birbirinden sonra gelen bölümleri de ele alır ve denklem (4.9) ile hesaplanmış bileşenleri toplar. Bu amaçla yakalama bölgesi, yıldırım uzaklığının minimum r_0 değeri ile maksimum r_{max} değeri arasında bölümlere bölünür. En uygun adımı hesaplamak için dr hesabı yapılır. Şekil 4.2'de bu hesabın akış diyagramı gösterilmiştir.



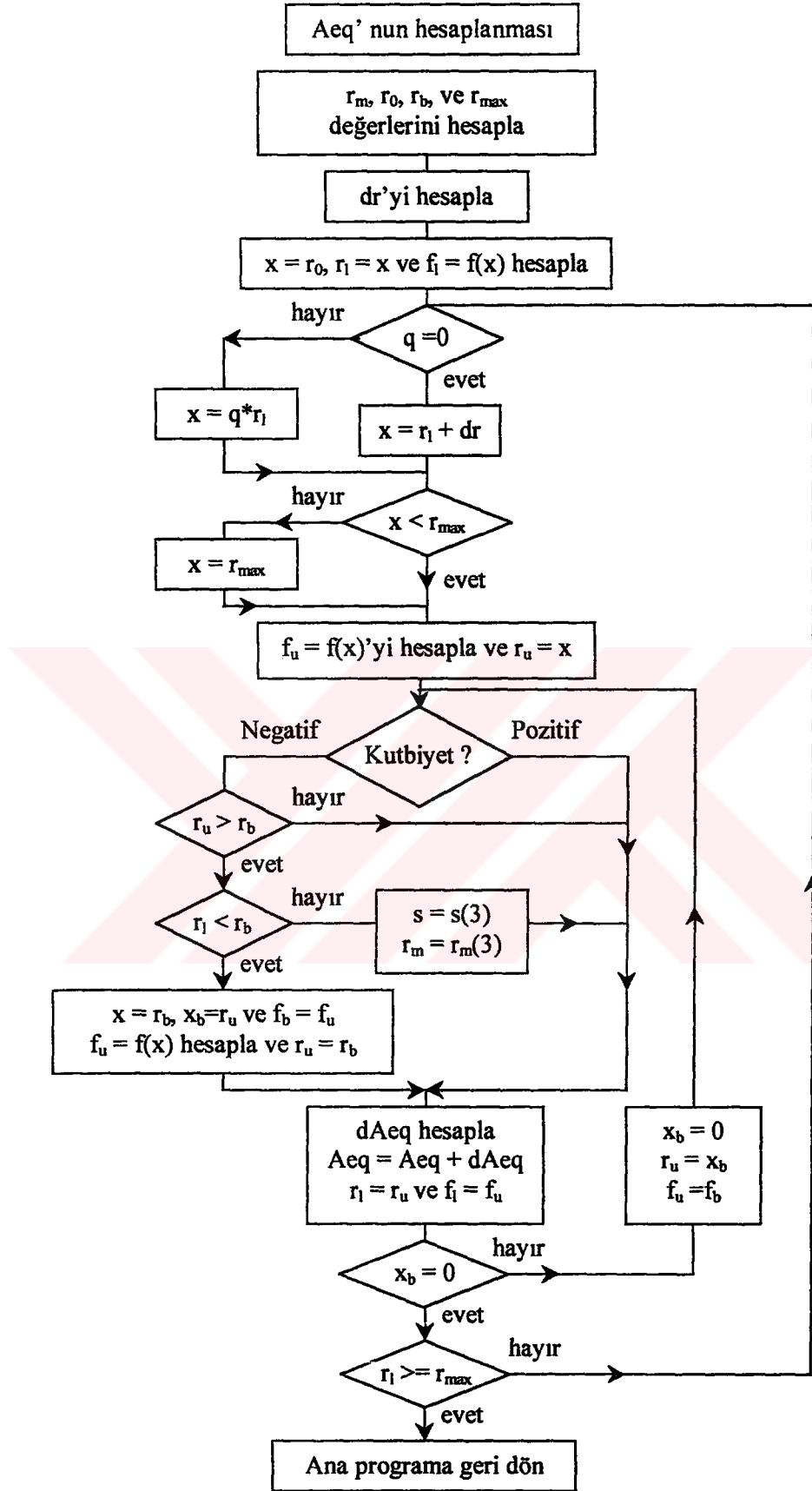
Şekil 4.2 dr' nin hesaplanması programına ait akış diyagramı

Ana programın akış diyagramı Şekil 4.3' de gösterilmiştir. Bu program sadece bir kutbiyet için hesaplama yapar. Yönlenme uzaklığı için ortalama değerler $r_m = \mu \cdot h$ ve

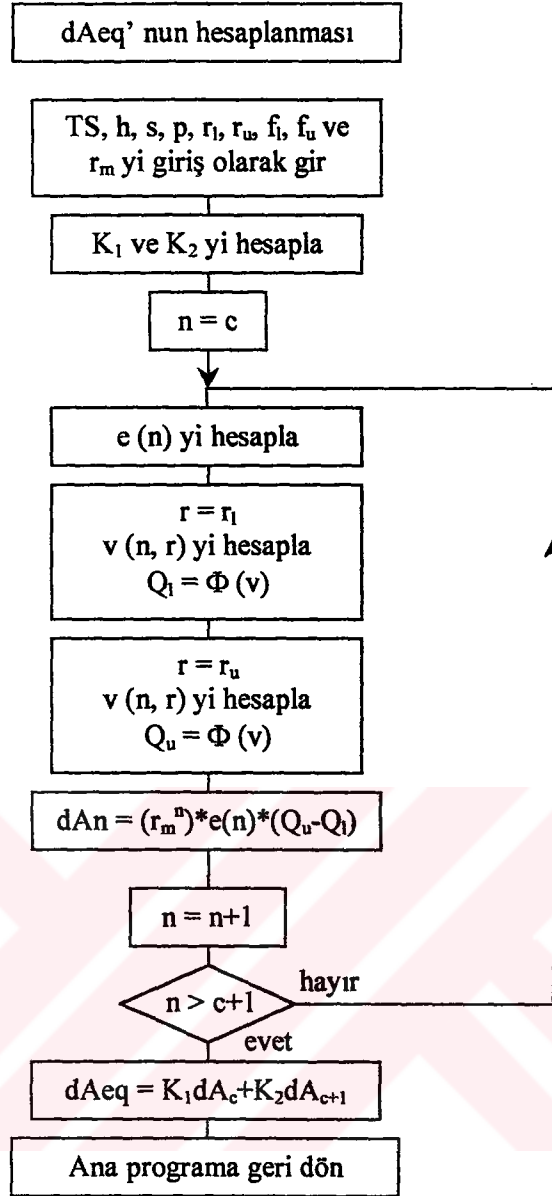
(4.13) kullanılarak başlangıçta belirlenir. Denklem (2.2) de I yerine I_0 değeri konarak beklenen en küçük yönlenme uzaklığı r_0 hesaplanır. Bu denkleme göre sadece negatif yıldırım için 20 kA'lık akıma ait r_b değeri hesaplanır. Maksimum yönlenme uzaklığı $r_{\max}$ ya nesneden yakalama bölgesinin en uzak noktasına kadar olan uzaklık ya da bölge sonsuza kadar uzanıyorsa 5000 metredir. Son durumda önerilen yükseklik yıldırım bulutunun ortasından düşünülmüştür.

Başlangıç büyüklükleri ayarlandıktan sonra dr hesabı sonucu kullanılarak adım büyüklüğü seçilir. Daha sonra $f(x)$ fonksiyonunun değeri hem alt hem de üst sınırdan hesaplanır. $f(x)$ fonksiyonu yakalama bölgesinin kesit alanı ile yönlenme uzaklığı arasındaki bağlantıyı belirleyen geometrik koşullara uydurulur. Bu fonksiyon nesnenin ve yakalama ucunun özelliğidir.

Hesaplama için x değişkeni ilk olarak $x = r_0$ olarak tanımlanmıştır. İlk bölümde bu değer aynı zamanda alt sınırı da göstermektedir. Bundan dolayı $r_1 = x$. Bu değer $f(x)$ 'te kullanıldığında alt sınırla ilgili f_1 elde edilir. Bundan sonra, x 'e dr ekleyerek yada dr hesabının sonucuna göre q ile çarpılarak yeni bir adım elde edilir. eğer x maksimum değeri aşarsa $x = r_{\max}$ olarak alınmak zorundadır. Bir adım sonra, $f(x)$ bölümün üst sınırı ile ilgili f_u yu verir. Elde edilen değerler denklem (4.8)'de yerine konur. Fakat negatif yıldırım durumunda dağılımın delinme noktası göz önüne alınmalıdır.



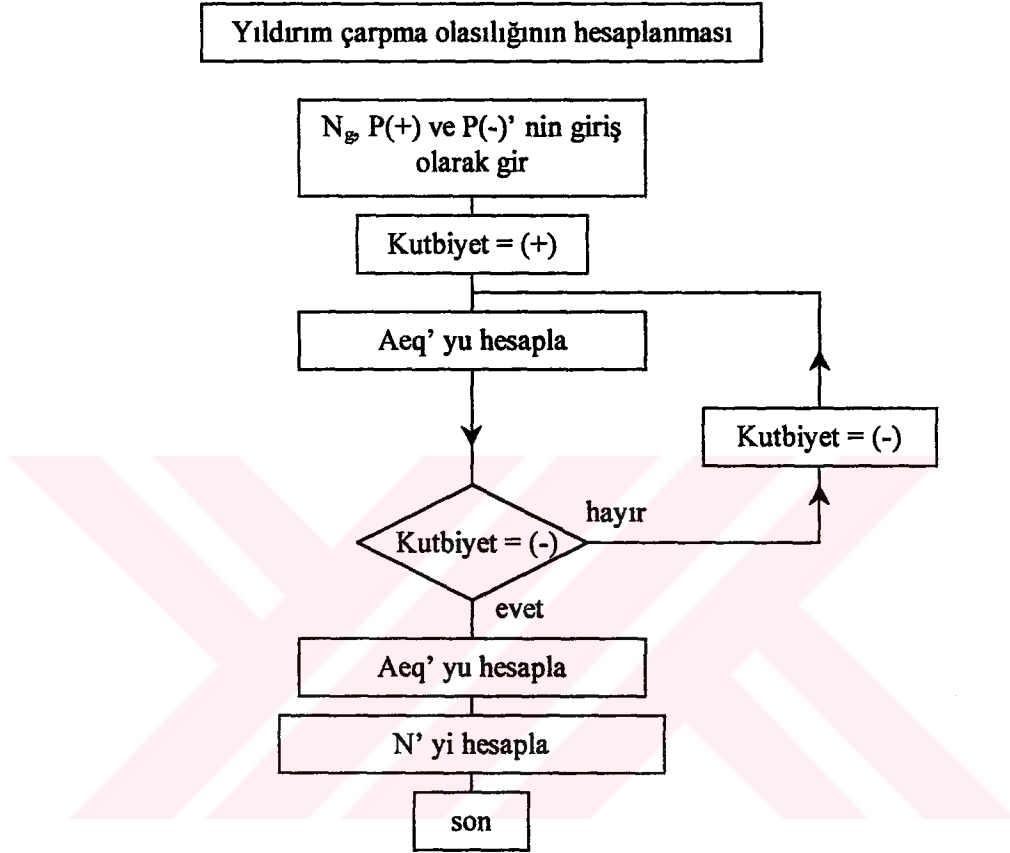
Şekil 4.3 Aeq ' nun hesaplanması programına ait akış diyagramı



Şekil 4.4 dAeq' nun hesaplanması programına ait akış diyagramı

Çarpmanın türü ya pozitif ($TS = 1$) ya da negatif ($TS = 2$) olur. Çarpma türüne göre Tablo 4.1'den yıldırımın parametreleri belirlenir. Pozitif yıldırım durumunda yukarıdakiler genellikle geçerlidir. Fakat negatif yıldırım durumunda delinme gerilimi aşıldığı zaman, negatif yıldırımın parametreleri değişir. Eğer r_b , $r_l < r_b < r_u$ bölümüne düşerse, bölüm iki parçaya ayrılır. Bölümün üst kısmında yıldırımın türü $TS = 3$ olur ve parametreler $I > 20$ kA için Tablo 4.1'den alınır. Bu noktada program içinde r_l ve r_u sınırları arasındaki bölüme bağlı eşdeğer alanın hesaplanması için bilgiler elde mevcuttur. Bu amaç için dAeq işlemi olarak adlandırılan program uygulanabilir. Şekil 4.4 bunun akış diyagramını göstermektedir. Ana program içinde

bu işlemin sonucu eşdeğer alana eklenir. Bu yüzden integral, denklem (4.9)'a göre hesaplanır. Alt sınır ile ilgili değerler üst sınır ile ilgili değerlerin yerini alır. Eğer delinme noktası bölümün içinde ise program delinme noktasına geri döner. Eğer ya üst sınır maksimuma ulaşırsa ya da eşdeğer alanının büyümesi önemszenmezse, bu durumda hesaplama işlemi tamamlanır.



Şekil 4.5 Yıldırım çarpma olasılığının hesaplanmasına ait akış diyagramı

Şekil 4.3'de gösterilen program sadece bir kutbiyet için eşdeğer alanı hesaplar. Her iki kutbiyetle ilgili sonuçlar elde mevcut olduğu zaman onların ağırlıklı toplamı ortaya genel bir davranış çıkarır. P(+) pozitif buluttan yere olan yıldırımların oranını, P(-) de negatif buluttan yere olan yıldırımların oranını gösterir. Böylece sonuçta eşdeğer alan

$$A_{eq} = P(+).A_{eq}(+) + P(-).A_{eq}(-) \quad m^2 \quad (4.18)$$

dir. $A_{eq}(+)$ ve $A_{eq}(-)$ Şekil 4.3'e göre pozitif ve negatif çarpımlar ile ilgili programın sonuçlarını gösterir.

Göz önüne alınan nesneye yıldırım çarpmasının beklenen sıklığı alttaki ifade ile hesaplanır.

$$N = N_g \cdot A_{eq} \quad \text{çarpma/yıl} \quad (4.19)$$

Şekil 4.5 yıldırım çarpımlarının beklenen sıklığını çıkış olarak üreten bir programın akış diyagramını göstermektedir. Bu amaç için buluttan yere olan yıldırımların yoğunluğu (sayısı) başlangıç verisi olarak belirlenir. Hesaplama sırayla pozitif ve negatif yıldırımı hesaba katarak çalışır. Her iki kutbiyetinde meydana gelme oranları başlangıçta belirlenmek zorundadır.

4.3. Basit Geometrik Şekiller İçin Hesap

Basit geometrik şekiller birçok nesnenin ve yakalama ucunun yerini almaktadır. Bu geometrik şekiller noktalar (sivri uçlar), düzlemler, yatay ve düşey iletkenler (çubuklar) olmaktadır. Bu gibi durumlarda yönelme uzaklığı ve yakalama bölgesinin kesit alanı arasındaki ilişki analitik denklemler tarafından ifade edilebilir.

4.3.1. Yer yüzeyinden h yüksekliğinde bir nokta durumu

Bir noktadan eşit uzaklıktaki noktaların geometrik yeri olan yüzey bir küredir. Yakalama bölgesinin sınırı küreden Şekil 4.6'da görülen tas şeklini kesip çıkarır. Denklem (3.42)'de tanımlanan bir eğrinin döndürülmesi ile sınırlar elde edilir. Pozitif çarpımlar için yakalama bölgesi bir elipsoide dönüşür, negatif çarpımlar durumunda da bir hiperboloide dönüşür. Tas şeklinin yüzey alanı

$$A = 2\pi(1 - \cos\phi) \cdot r^2 \quad (4.20)$$

ve denklem (3.42) bu ifade de yerine konursa

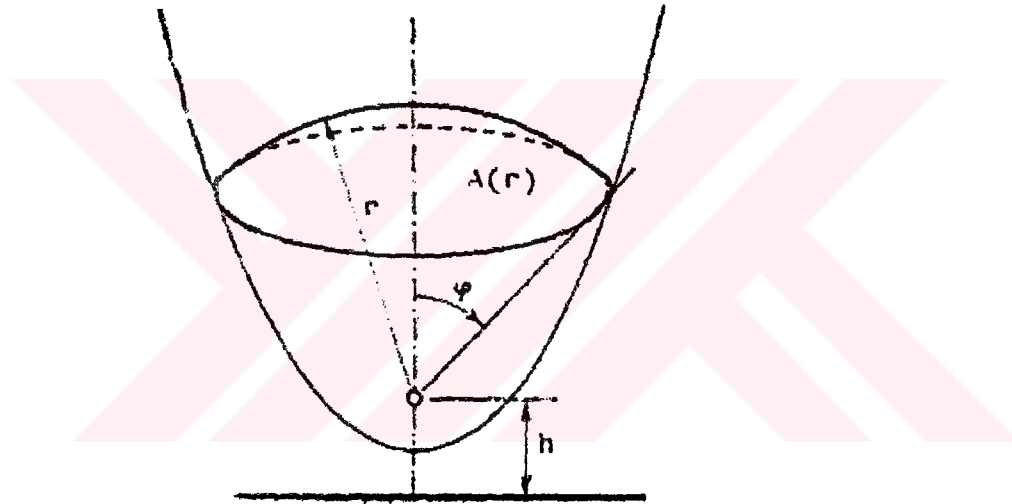
$$A(r) = 2\pi[h \cdot r + (1 - \varepsilon) \cdot r^2] \quad (4.21)$$

olur. Denklem (4.7)'yi düşünerek

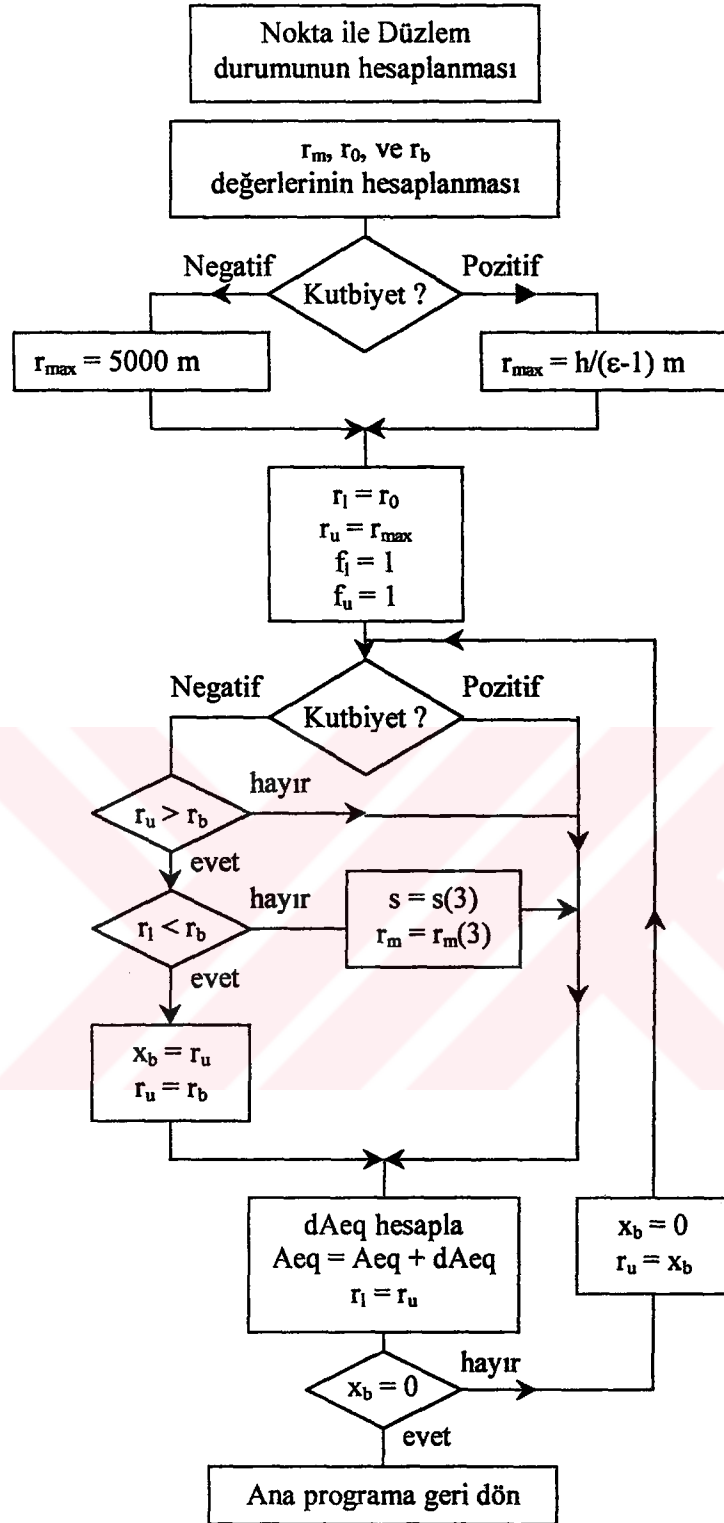
$$c=1 \quad K_1 = 2\pi h \quad K_2 = 2\pi(1-\varepsilon) \quad (4.22)$$

olur. Bu değerler kullanılarak denklem (4.9) ve(4.10) eşdeğer alanı belirlemek için kullanılır. Şekil 4.2'den Şekil 4.5'e kadar olan program akış diyagramlarında aynı değerler kullanılmalıdır. Burada ek olarak $f(x) = 1$ düşünülebilir.

$$r_{\max}(+) = h/(\varepsilon - 1) \quad (4.23)$$



Şekil 4.6 Yeryüzünden h yüksekliğindeki bir noktanın yakalama bölgesi



Şekil 4.7 Yeryüzünden h yüksekliğinde bir nokta durumunda eşdeğer alanın hesaplanmasına ait akış diyagramı

4.3.2. Yer yüzeyinden h yüksekliğinde yatay bir iletken durumu

Yakalama bölgesi doğrultman bir eğrinin paralel yerdeğiştirmesi ile üretilmiş bir tekneye benzemektedir. şekil 4.8 de bu durum görölmektedir. Doğrultman denklem (3.42) ile belirlenir. Yakalama bölgesinin kesiti silindirselsel bir yüzeyin bir daire dilimidir. Bunun alanı denklem (4.5) ile hesaplanabilir.

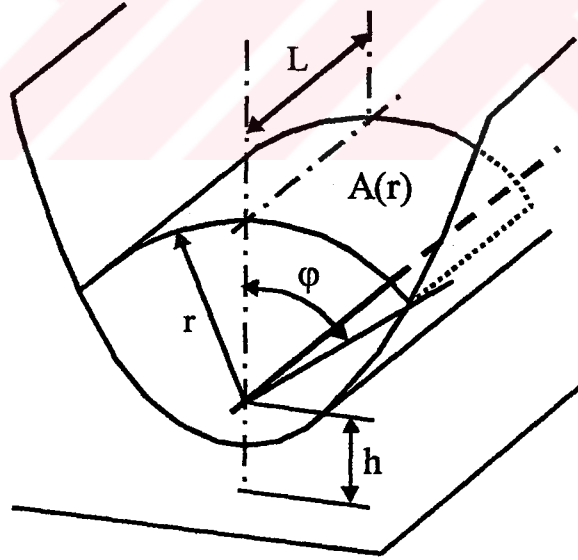
$$\varphi = \arccos(\varepsilon - h/r) \quad \text{radyan} \quad (4.24)$$

$$\text{fakat eğer } (\varepsilon - h/r) < -1 \text{ ise } \varphi = \pi \quad (4.24.a)$$

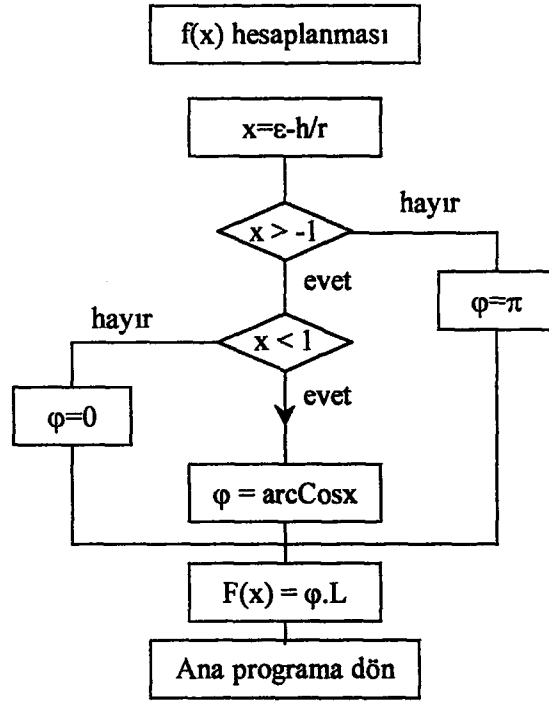
$$\text{veya eğer } (\varepsilon - h/r) > 1 \text{ ise } \varphi = 0 \quad (4.24.b)$$

Bu durumda, eşdeğer alanı analitik olarak hesaplamak mümkün değildir. şekil 4.3 de görölen A_{eq} işlemleri kullanılmak zorundadır. Denklem (4.5) den denklem (4.8) ye kadar olan denklem düşünöldüğü zaman

$$f(r) = \varphi \cdot L \text{ ve } c=1 \quad (4.25)$$



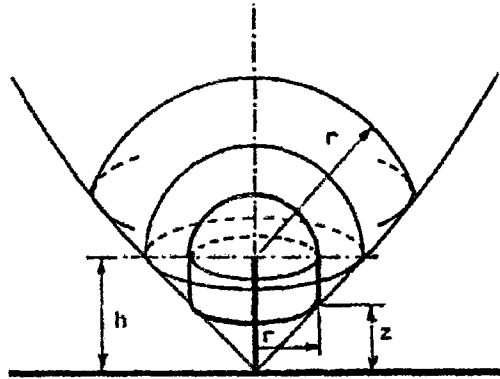
şekil 4.8 Yeryüzünden h yüksekliğindeki bir yatay iletkenin yakalama bölgesi



Şekil 4.9 Ana programın içine yerleştirilecek $f(x)$ işlemi için akış diyagramı

4.3.3. Yer yüzeyinden h yüksekliğinde düşey bir iletken durumu

Bir düşey iletken asla çok uzun olarak kabul edilemez. Bu yüzden onun üst ucu bir nokta olarak düşünülmelidir. Bu iletkenin yanının yakalama bölgesi alt tarafı onun tepesi olan bir konidir. Bu koni için yönlendirme mesafesinin iletkene olan uzaklığı (r) ile düzleme olan uzaklığı (z) arasındaki farkı gösteren denklem (3.43) geçerlidir. Bu durum içinde pozitif kutbiyetli yıldırım için ϵ nun değeri 1,06, negatif kutbiyetli bir yıldırım için bu değer 0,88 dir. Yakalama bölgesi içerisinde eşit uzaklıktaki yüzey bir silindirdir. Bu silindirin uzunluğu ($h-z$) olup, burada h düşey iletkenin yerden yüksekliğidir.



Şekil 4.10 Yeryüzünden h yüksekliğindeki düşey bir iletkenin yakalama bölgesi

Bu silindirin alanı

$$A = 2\pi r(h - \epsilon r) \quad (4.25)$$

Yakalama bölgesi iletkenin üst ucunun üstünde diğer bir parçaya sahiptir. Şekil 4.10 da bu durum görülmektedir. Eğer $r = h/\epsilon$ ise eşit uzaklıktaki yüzey alanı $2\pi r^2$ olan bir yarımküredir. Silindir ve yarım kürenin toplam alanı

$$A(r) = 2\pi hr + 2\pi(1 - \epsilon)r^2 \quad (4.26)$$

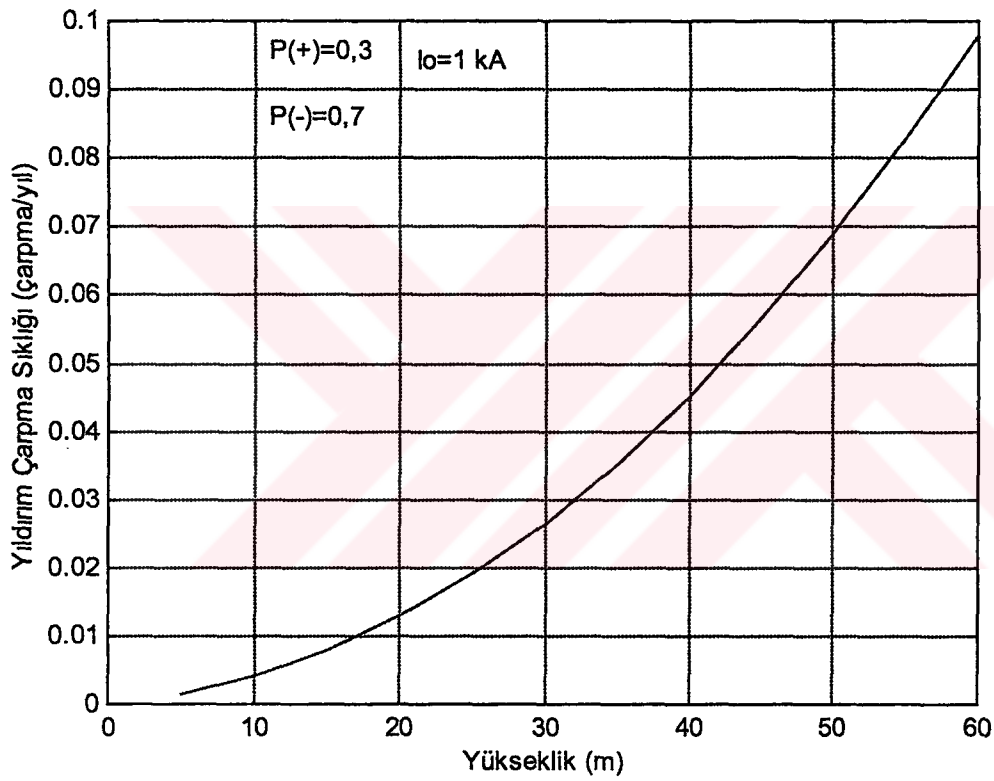
olup,

$$c = 1 \quad K_1 = 2\pi h \quad K_2 = 2\pi(1 - \epsilon) \quad (4.27)$$

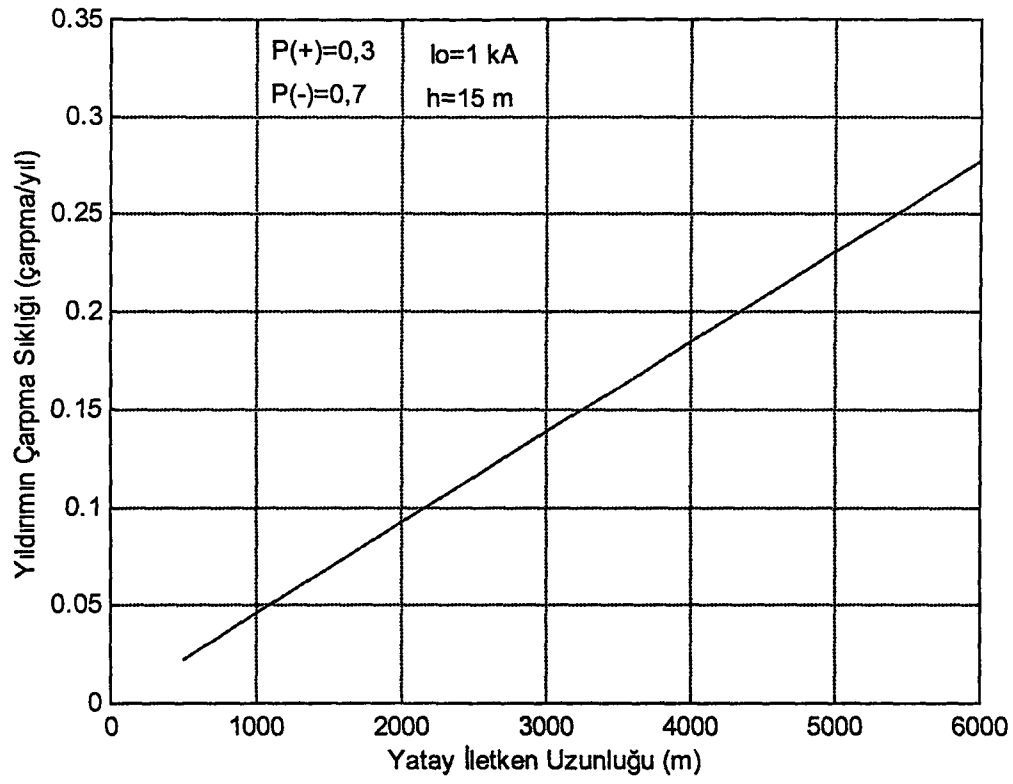
yazılabilir. Bu katsayılar eşdeğer alanın ilk parçasını veren Şekil 4.4 de gösterilmiş program içinde yer almaktadır. Eşdeğer alanın ikinci kısmı bir nokta için olan durumu gösteren Şekil 4.9 da ki programı kullanarak hesaplanabilir. Fakat ikinci kısmın hesabında $r_0 = h/\epsilon$ olarak kabul edilmelidir. Eğer $r_0 > h/\epsilon$ ise ilk kısım atılıp hesaplama sadece ikinci kısım için yapılır.

4.3. Bilgisayar Uygulaması

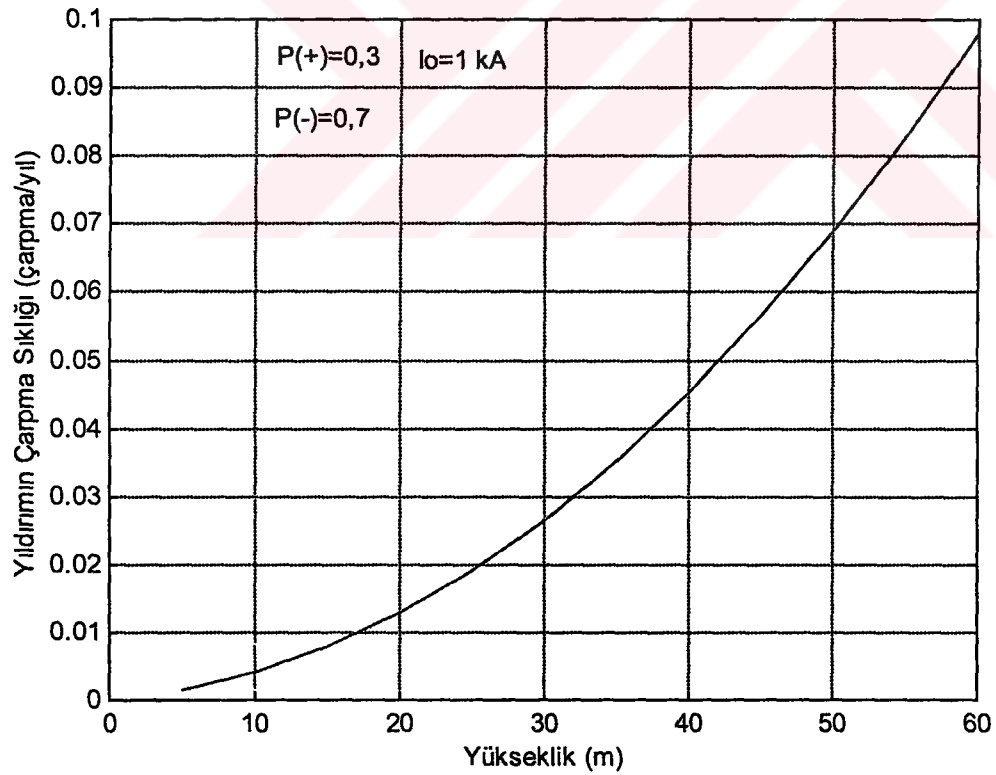
Yakalama kavramı kullanılarak elde edilen akış diyagramlarına göre Matlab 5.0 programı kullanılarak N_g , $P(+)$, $P(-)$, I_o , h ve L giriş parametreleri olmak üzere yıldırım çarpma sıklıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda I_m ve s değerleri Tablo 4.1 den alınmıştır.



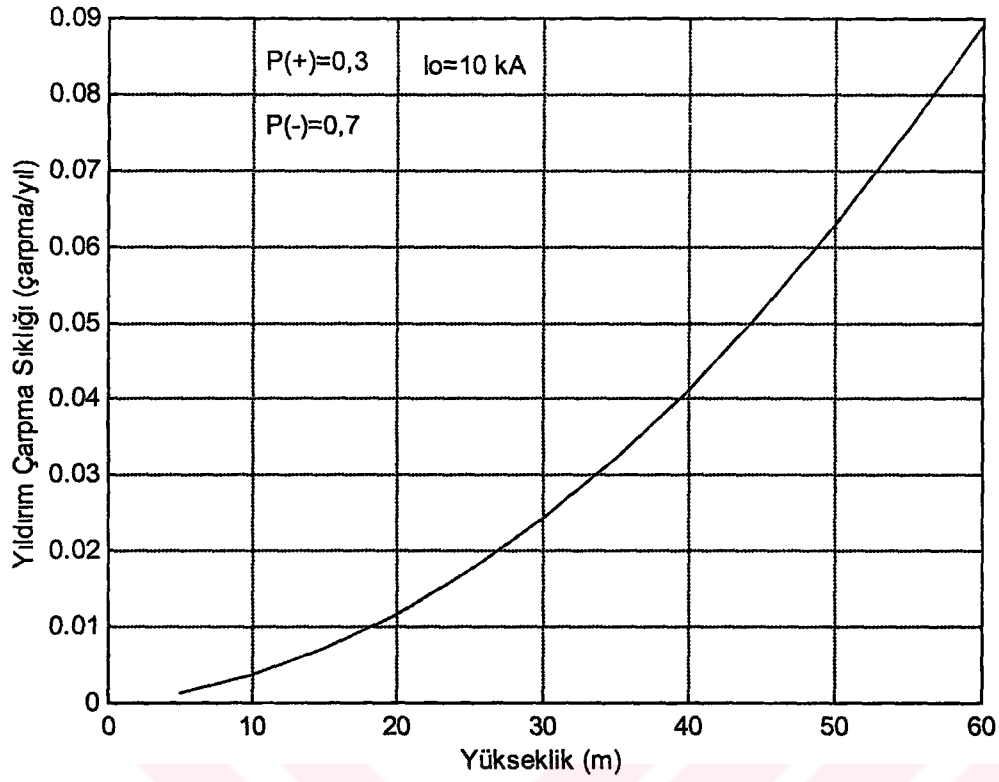
Şekil 4.11 Bir noktaya yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



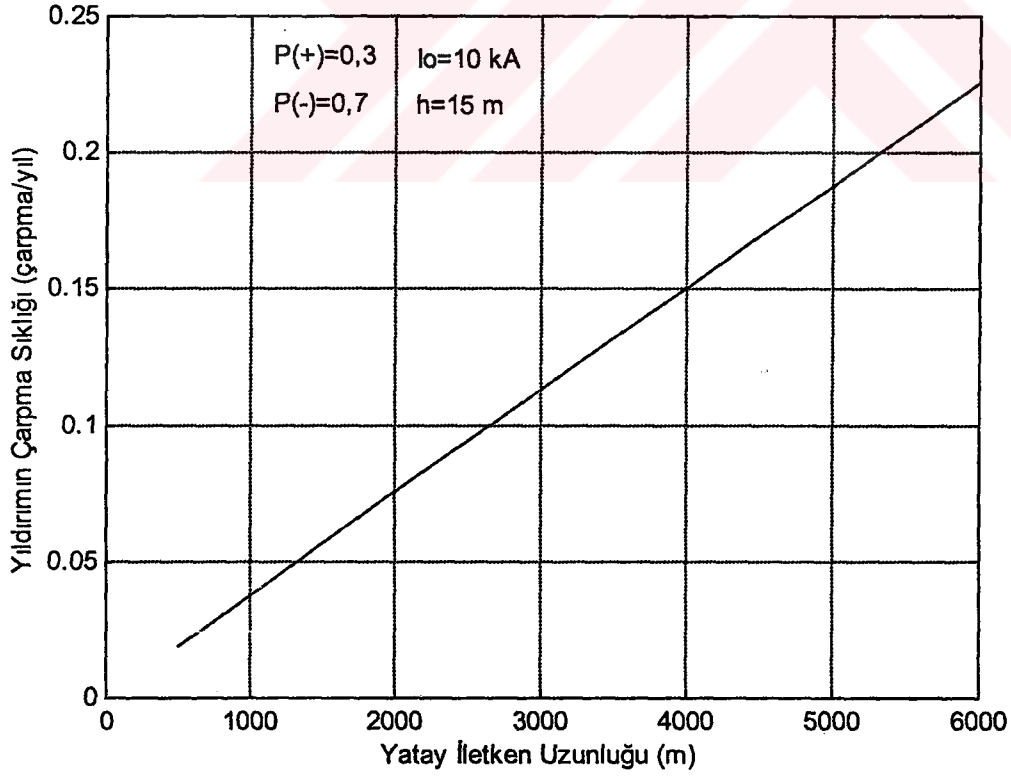
Şekil 4.12 Yatay bir iletken e yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)



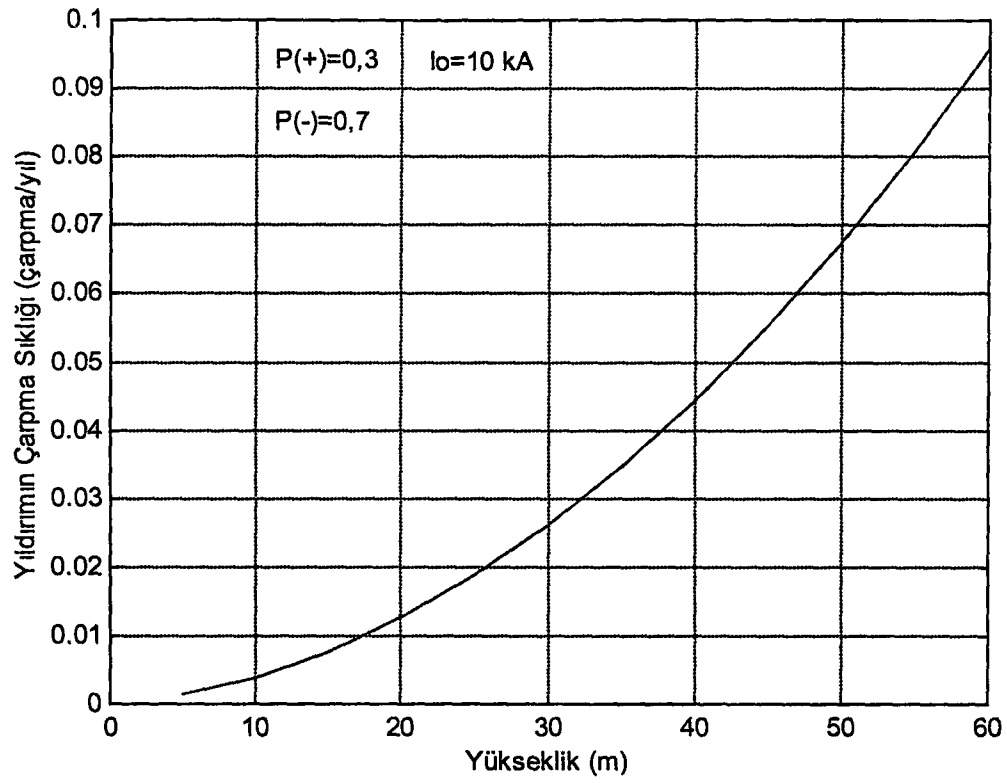
Şekil 4.13 Düşey bir iletken e yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1$ yıldırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$)



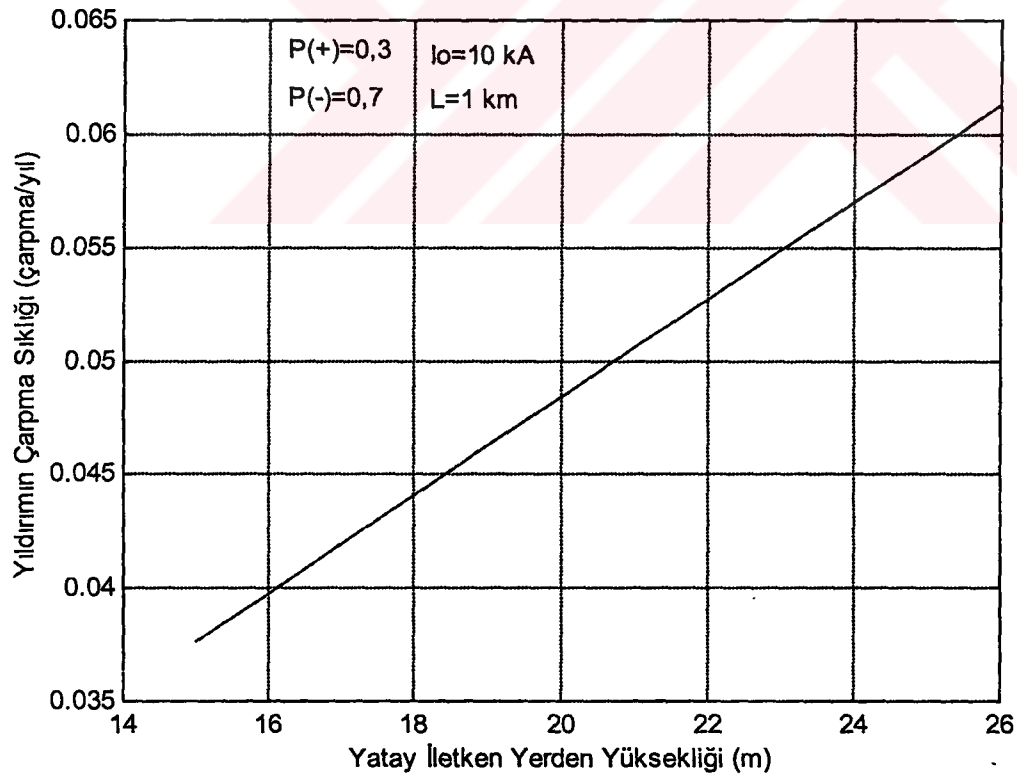
Şekil 4.14 Bir noktaya yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



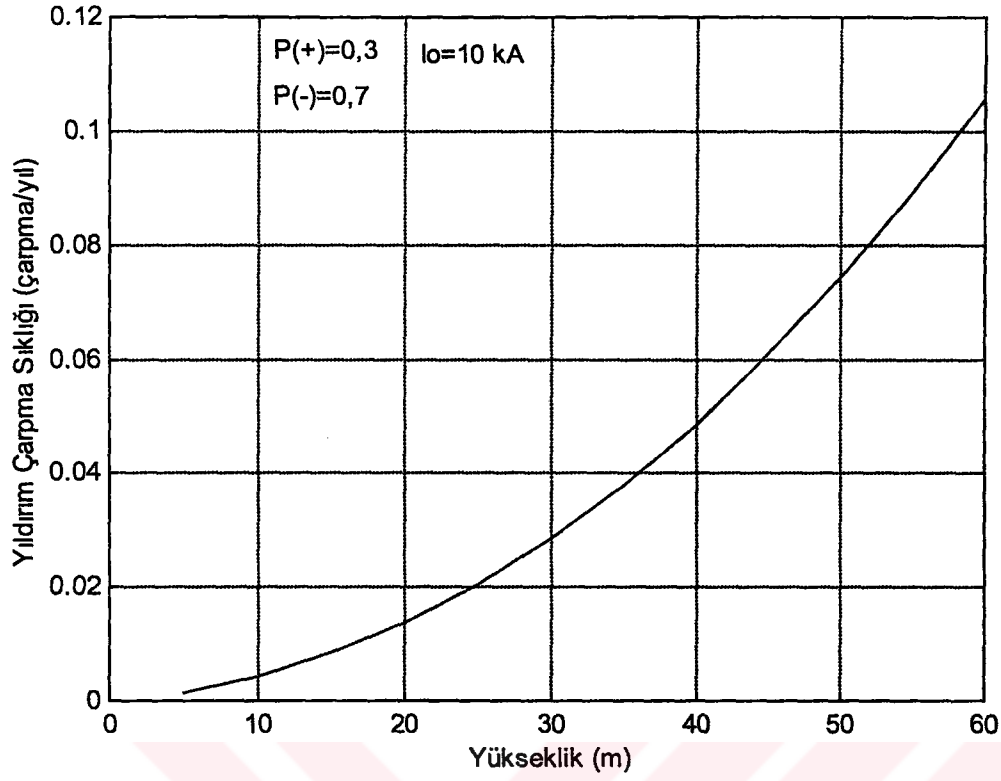
Şekil 4.15 Yatay bir iletkene yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



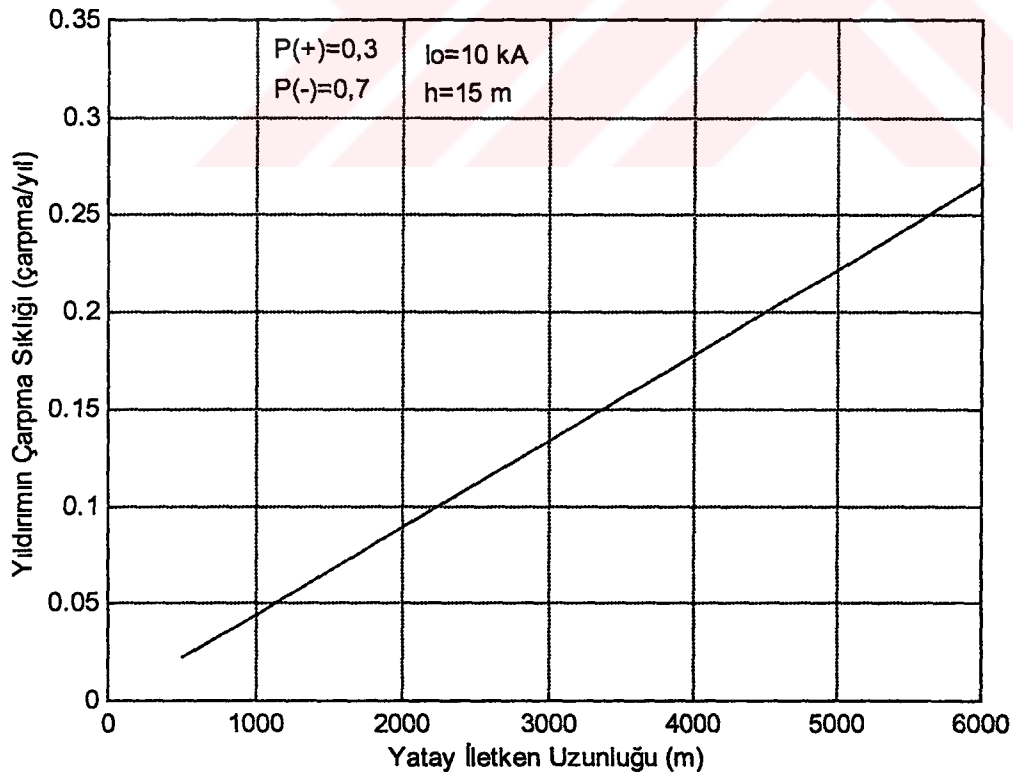
Şekil 4.16 Düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



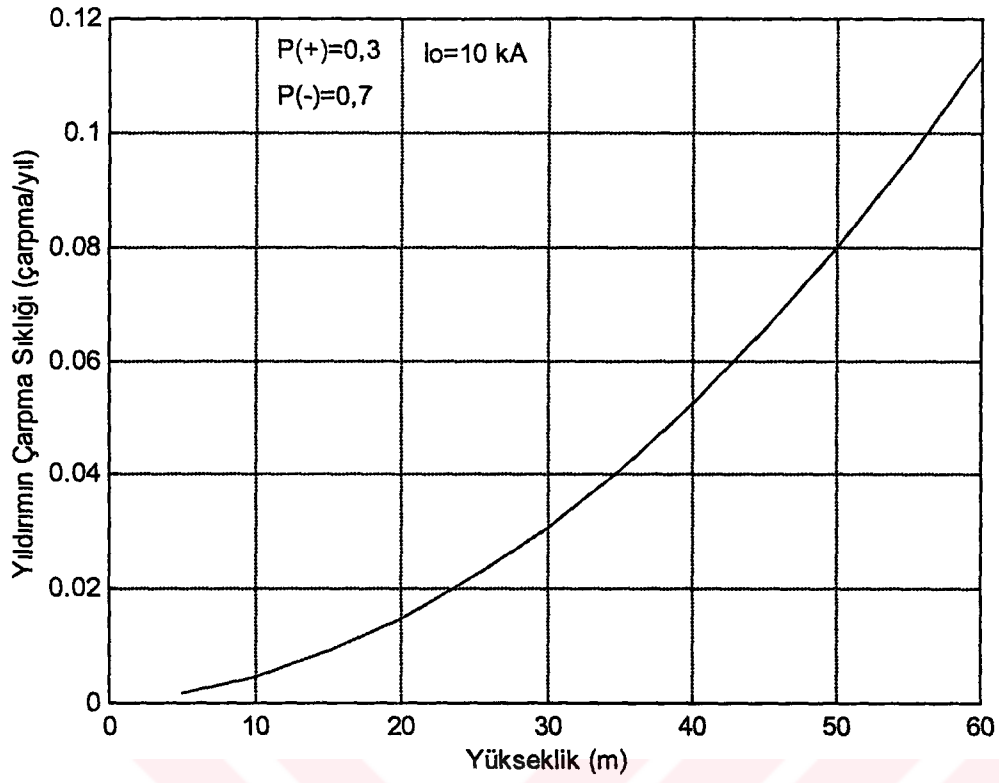
Şekil 4.17 Yatay bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



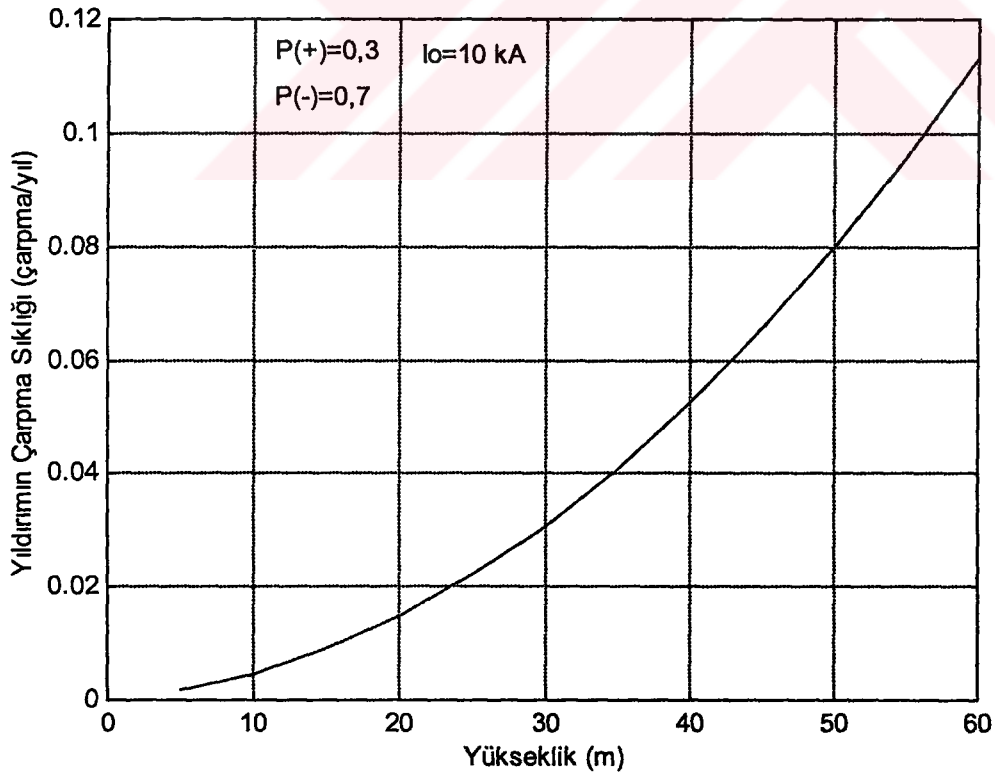
Şekil 4.18 Bir noktaya yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



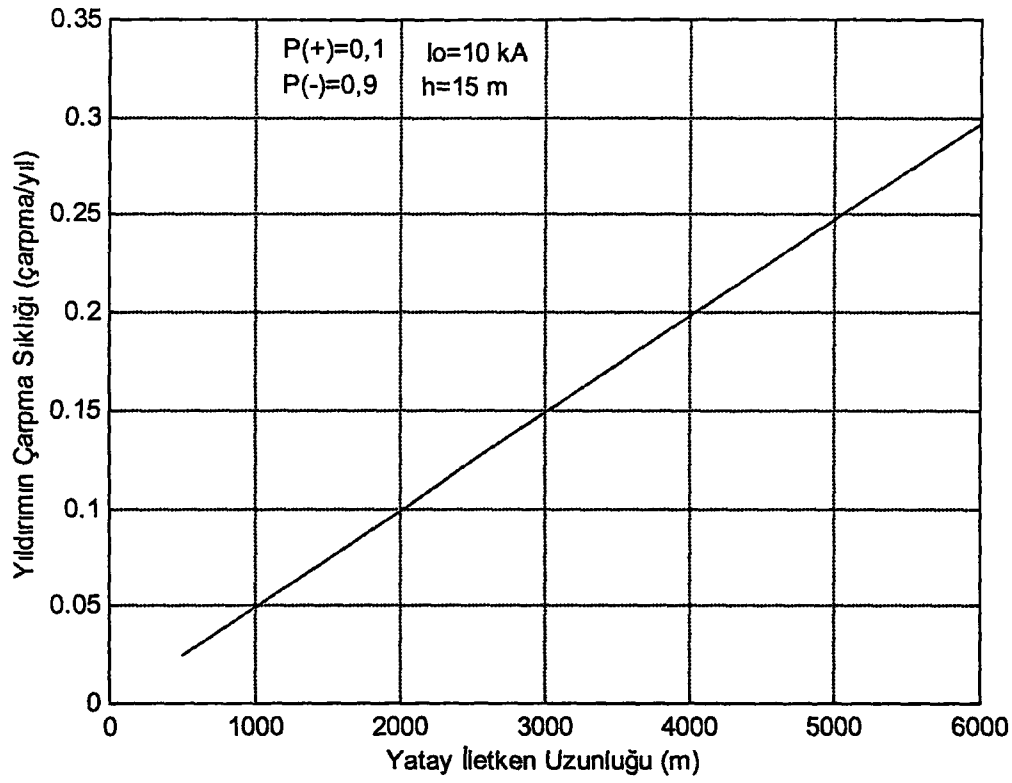
Şekil 4.19 Yatay bir iletkene yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



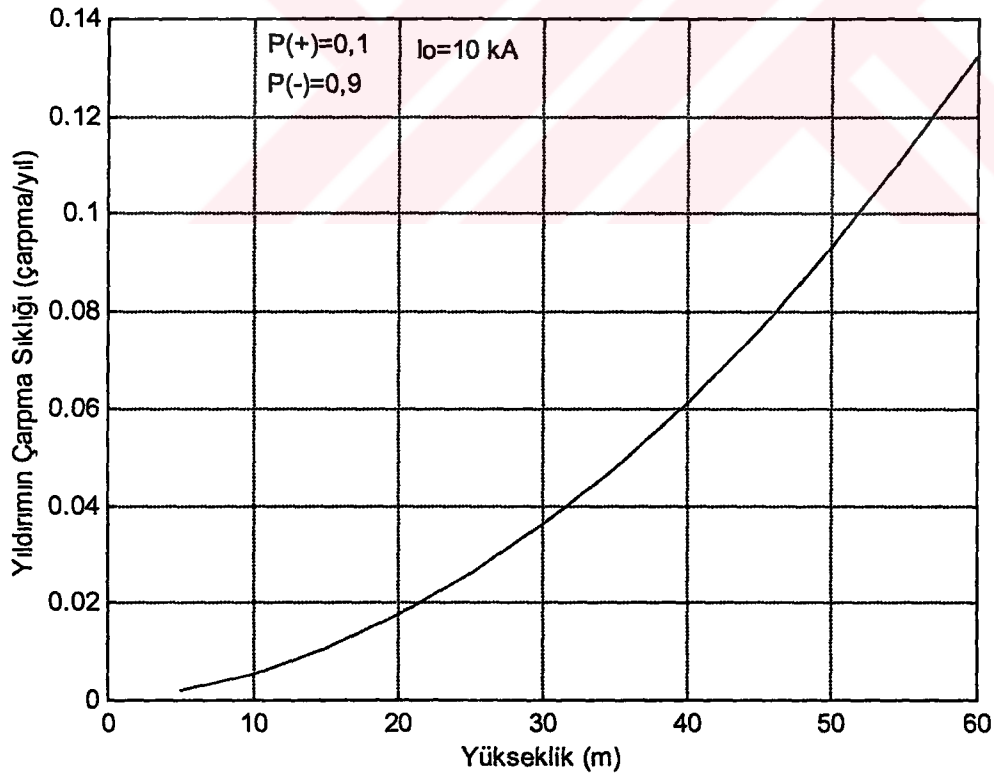
Şekil 4.20 Düşey bir iletken yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



Şekil 4.21 Bir noktaya yıldıırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



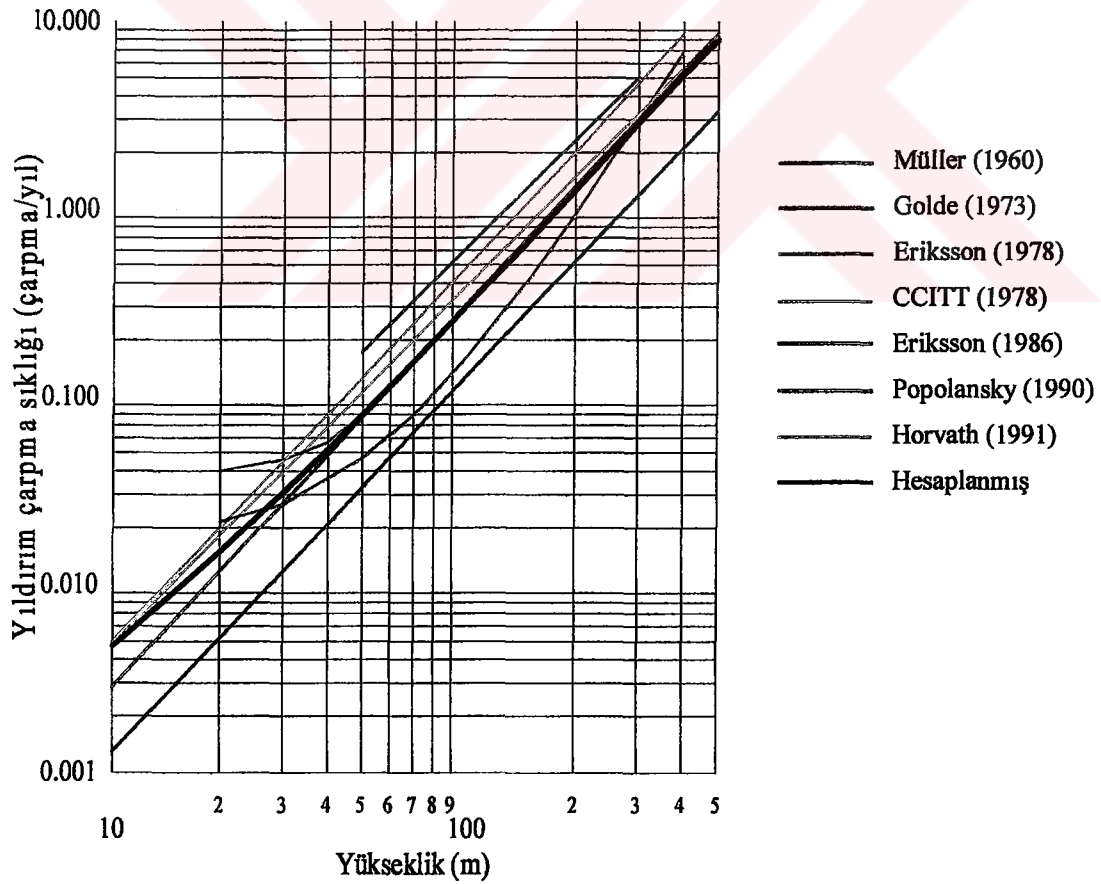
Şekil 4.22 Yatay bir iletkene yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)



Şekil 4.23 Düşey bir iletkene yıldırım çarpma sıklığı ($N_g = 1,1816 \text{ yıldırım/km}^2 \cdot \text{yıl}$)

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada yakalama bölgesi yöntemi ile yapılara yıldırım çarpma sıklığının hesabı gösterilmiştir. Yönteme uygun algoritma ile Matlab 5.0 bilgisayar programında yazılıp çalıştırılan bir program yardımıyla çeşitli yıldırım parametreleri için yıldırım çarpma sıklığı N' nin yapıların yükseklik (h), uzunluk (L) gibi yapısal özelliklerine bağlı olarak değişimlerini veren grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklerin elde edilmesinde N_g , $P(+)$, $P(-)$ ve I_o değerlerinin yapıların bulunduğu bölgeye göre farklılıklar göstereceği ve her yapıya ilişkin h ve L değerlerinin değişik olacağı göz önüne alınmıştır.



Şekil 5.1 Bir kuleye yıldırımın çarpma olasılığı

Şekil 5.1 de I_0 1 kA ve N_g 1 yıldırım/km².yıl alınarak düşey iletken durumunda farklı teorilere göre ve bu çalışmadan elde edilmiş, yüksekliğin değişimi ile N değerlerindeki değişimler gösterilmektedir. Bu çalışmada aynı koşullar için elde edilen değerler bu grafikte karşılaştırılacak olursa, çözüm aralığına düşen, doğruluğu yüksek sonuçlar elde edildiği görülmektedir [12].

Elde edilen grafik sonuçlarına göre N_g 1 yıldırım/km².yıl, $P(+)$ = 0,3 ve $P(-)$ = 0,7 alındığında akım 1 kA den 10 kA e yükseldiğinde yükseklik arttıkça çarpma sıklığı hızla azalmaktadır. Bunun sebebi yüksek akımlarda yıldırımın çarpma mesafesinin büyümesinden dolayı yıldırımın çarpabileceği yeryüzündeki nokta sayısı artmakta dolayısıyla çarpma sıklığı hesaplanacak yapıya yıldırım çarpma olasılığı da azalmaktadır.

Yıldırım çarpma sıklığının hesaplanmasında, hesap yapılan yapının bulunduğu bölgenin yıllık km² başına düşen yıldırımlı fırtınalı gün sayısı (T_d) önemli bir parametredir. Bu sayıda meydana gelecek bir artış ile bölgenin yıllık yıldırım yoğunluğu da artacaktır. Sonuçta N_g nin artmasından dolayı N sayısı da artacaktır.

Pozitif ve negatif yıldırımların oranı da N değerini etkilemektedir. Nokta durumu için N_g 1,1816 yıldırım/km².yıl ve yıldırım akımı 10 kA olmak üzere $P(+)$ = 0,3 yerine $P(+)$ = 0,1, $P(-)$ = 0,7 yerine $P(-)$ = 0,9 alınırsa h = 15 m için N değeri 0,0084 den 0,0099 a çıkar.

Nokta veya düşey iletken durumunda, yapının yerden yüksekliğine bağlı olarak, N ile h arasında lineere yakın bir ilişki olduğu görülmektedir. Yapının yüksekliği arttıkça çarpma sıklığı da artmaktadır. Çünkü yıldırıma yapı daha çok yaklaşmakta olup yıldırımın yapıya çarpma olasılığını artmaktadır. N_g 1 yıldırım/km².yıl, $P(+)$ = 0,3 ve $P(-)$ = 0,7 alınırsa nokta durumu için yıldırım akımı 10 kA iken yükseklik 5 den 60 m'ye çıkarıldığı zaman N değeri 68 kat artmaktadır. Yatay bir iletken durumunda, iletkenin yerden yüksekliği 15 m olmak üzere iletkenin uzunluğu 500 m den 6000 m ye değiştirilirse N değeri de 12 kat artar. Düşey bir iletken durumunda ise h 5 m den 60 m ye artırılırsa N değeri 68 kat artar.

Yatay iletken için ise belirli bir yükseklikte iletkenin uzunluğuna bağlı olarak, N ile L arasında doğrusal bir ilişki vardır. Ayrıca sabit uzunluktaki bir yatay iletkenin yerden yüksekliği arttırıldığında N nin de arttığı görülmektedir.

Yukarıda belirtilen sonuçlara göre yıldırım çarpma olasılığının hesaplanmasında etkili olan faktörler yıldırım akımının büyüklüğü dolayısıyla aşağıya doğru ilerleyen öncünün yük yoğunluğu, yeryüzü ve onun üzerindeki yapıların geometrileri, bölgenin yıldırım yoğunluğu ve öncünün simetri eksenine ile yapılar üstündeki noktalar arasındaki uzaklıktır. Elde edilen yıldırım çarpma olasılığına göre koruma yapılıp yapılmayacağına ve yapıya nasıl bir yıldırıma karşı koruma sisteminin yapılması gerektiğine karar verilir.

Yıldırımın çarpma olasılığı hesabında, bu tezde kullanılmış olan yakalama bölgesi yöntemi, yapıların en veya genişlik boyutlarının göz önüne alınmaması nedeniyle zayıflık göstermektedir. Bu yöntemle noktasal, düşey iletken, yatay iletken yapıları ve bu şekilde kabul edilebilecek yapılar için sadece hesaplanma yapılabilir. Yani yöntem, bayrak direği, kule, fabrika bacası gibi yapılar için de kullanılabilir. Ama elde edilen sonuçlar yaklaşık bir sonuç olur. Çünkü o durumda yapıların yatay boyutları ihmal edilmektedir. Bunun için yapıların bütün boyutlarının hesaba katılması sonucu süperpozisyon ilkesi ile eşdeğer alan belirlenip aynı algoritma ile hesaplama yapılması önerilir. Ayrıca yıldırım çarpma olasılığı yapının yapıldığı malzemenin cinsine göre de değişir. İletken bir malzemeden yapılmış bir yapı ile, yalıtkan bir malzeme ağırlıklı bir yapının yıldırım koşullarında sergileyecekleri davranış farklı olacaktır. Bu gibi etkenleri göz önüne alan yöntemler üzerinde çalışmaya devam edilmelidir.

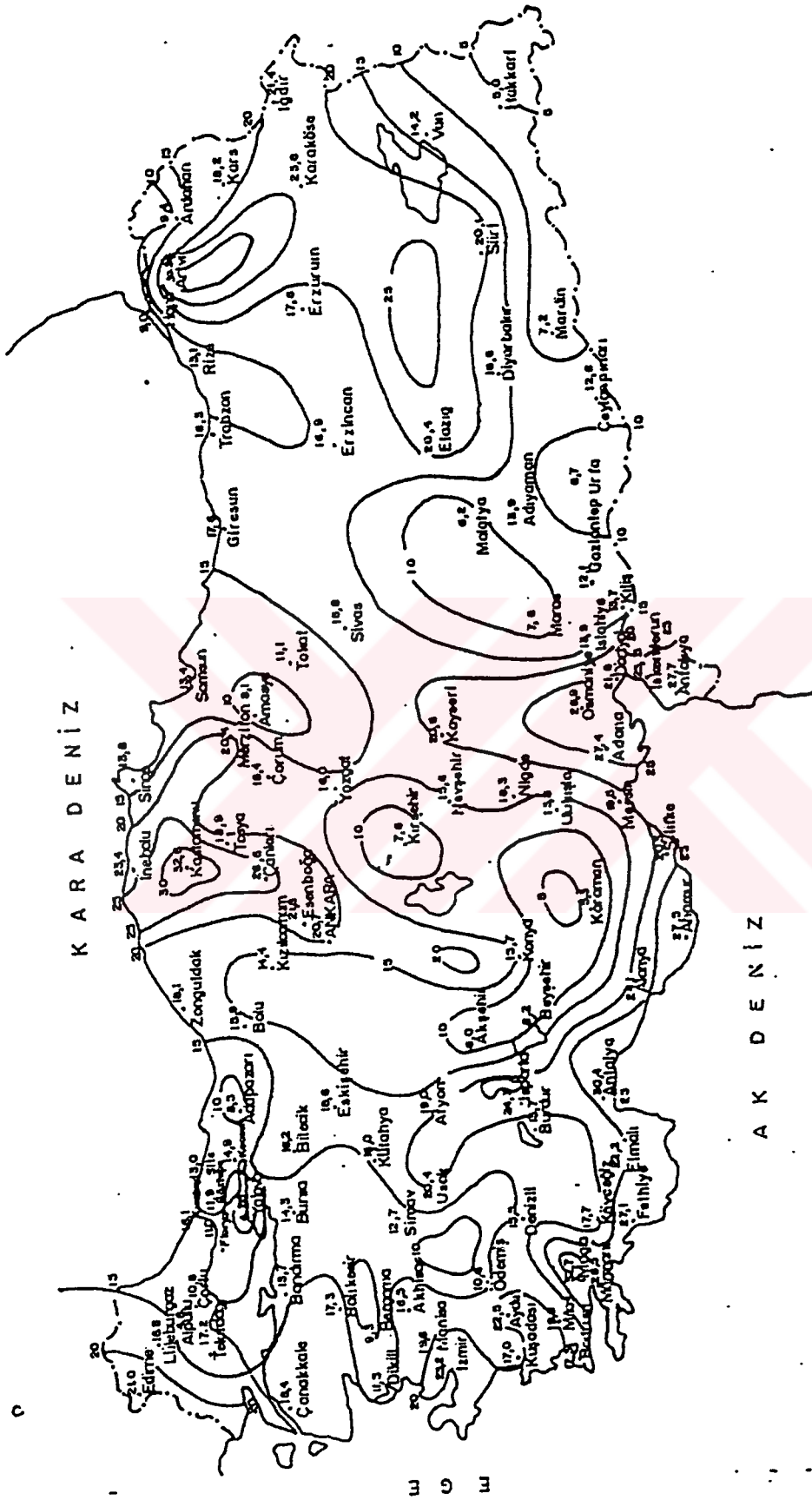
KAYNAKLAR

- [1] **Dellera, L. and Garbagnati, E.**, 1990. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model, *IEEE Transactions on Power Delivery* Vol. 5, No. 4, 2009-2021.
- [2] **Petrov, N. I. and Waters, R. T.**, 1999. Striking distance of lightning to earthed structures: Effect of stroke polarity, *The 11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London, England, August 23-27, Paper 2.220.
- [3] **Petrov, N. I. and Waters, R. T.**, 1999. Striking distance of lightning to earthed structures: Effect of structure geometry, *The 11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London, England, August 23-27, Paper 2.393.
- [4] **Eriksson, A. J.**, 1987. The incidence of lightning strikes to power lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, No. 3, 859-864.
- [5] **Jankov, V.**, 1995, Modeling of the objects in lightning incidence calculation, *The 9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, Austria, August 28-September 1, Paper 6787.
- [6] **İsmaili, M. A., Bernard, P., Lambert, R., and Xemard, A.**, 1999. Estimating the probability of failure of equipment as a result of direct lightning strikes on transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 4, 1394-1396.
- [7] **Aguado, M., Hermoso, B. and Cid, P. M.**, 1999. Risks assessment for lightnings strokes in wind farm installation, *The 11th International Symposium on High Voltage Engineering*, London, England, August 23-27, Paper 2.357.
- [8] **Braunstein, A. H.**, 1990. Lightning Protection Systems, Tel-Aviv.
- [9] **Golde, R. H.**, 1977. Lightning Vol. 2, Academic Press, New York.

- [10] **MacGorman, D. R. and Rust, W. D.**, 1998. *The Electrical Nature Of Storms*, Oxford University Press, New York.
- [11] **Emre, Ş.**, 1992. *Yıldırım Boşalmaları ve Etkinlik Bölgelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] **Horvath, T.**, 1991. *Computation of Lightning Protection*, Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset.
- [13] **NFPA 780**, *Lightning Protection Code*, *National Fire Protection Association*, Quincy, MA.
- [14] **Space Age Lightning Protection: Science Fact or Science Fiction**, WJ Furse Co. Ltd., 1996.
- [15] **Suzuki, T.**, 1995, Present and future lightning research by power utilities in Japan, *The 9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, Austria, August 28-September 1, Paper 6.778.
- [16] **Bonomy, A.**, 1995, Lightning protection of structures, *The 9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, Austria, August 28-September 1, Paper 6.732.
- [17] **Donald, W. Z.**, 1994. Lightning protection systems: Advantages and disadvantages, *IEEE Transactions on Industry Applications* , Vol. 30, No. 5, 1351-1361.
- [18] **Taylor, J. R.**, 1997. *An introduction to Error Analysis*, University Science Books, Sausalita, California.
- [19] **Horvath, T.**, 1995. Interception efficiency of the lightning air termination system at structures with flat or inclined roofs, *The 9th International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, Austria, August 28-September 1, Paper 6.754.
- [20] **TS-622**, 1990. *Yapıların Yıldırımdan Korunması Kuralları*, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [21] **Noblat, B. De Metz**, 1994. *Lightning and HV electrical installations*, Merlin Gerin Cahier Technique publications No. 168.

- [22] IEC 1024-1, 1990. Protection of structures against lightning, Part 1: General principles, *International Standard*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.
- [23] IEC 1024-1-1, 1993. Protection of structures against lightning, Part 1: General principles, Section 1: Guide A – Selection of protection levels for lightning protection systems, *International Standard*, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.





EK B PROGRAMLAR

Nokta durumu için çarpma olasılığının hesabı

```
function [N] = pcarpma
%Bir noktaya yıllık yıldırım çarpma sıklığının hesaplanması
%GİRİŞ :Yıllık buluttan yere doğru olan pozitif yıldırımların oranı
Ppoz;
%      Yıllık buluttan yere doğru olan negatif yıldırımların oranı
Pneg;
%      Yıllık buluttan yere doğru olan yıldırım yoğunluğu
Ng(yıldırım/km2.yıl);
%      Noktanın yerden yüksekliği h(m).
%ÇIKIŞ :Noktaya yıllık yıldırım çarpma sıklığı N(çarpma/yıl);
%TS Yıldırım kutbiyetine göre değer alan bir sayı;
%Pozitif kutbiyetli bir yıldırım için TS=1;
%Negatif kutbiyetli bir yıldırım için (I<=20 kA)TS=2;
%Negatif kutbiyetli bir yıldırım için (I>20 kA) TS=3;
%Aeq esdeger alan
Ng = input('Yıllık buluttan yere doğru olan yıldırım yoğunluğu Ng, Ng=
')
Ppoz = input('Yıllık buluttan yere doğru olan pozitif yıldırımların
oranı Ppoz, Ppoz= ')
Pneg = input('Yıllık buluttan yere doğru olan negatif yıldırımların
oranı Pneg, Pneg= ')
h = input('Noktanın yerden yüksekliği h, h= ')
P=[Ppoz; Pneg];
B=zeros(1,2);
for TS=1:2
    n=TS;
    Aeqq=pesdeger(TS,h);
    B(1,n)=Aeqq;
end
Aeq=B*P;
N=Ng*Aeq;
```

Nokta durumu için eşdeğer alanın hesabı

```
function [Aeqq] = pesdeger(TS,h)
%Bir nokta için eşdeğer alanın hesaplanması
%GİRİŞ: Yıldırımın kutbiyeti TS;
%   Noktanın yerden yüksekliği h(m);
%ÇIKIŞ: Eşdeğer alan Aeqq(m2);
%Katsayı p (1,2<=p<=2,0);
%Minimum yıldırım akımı Io(kA);
%Boşalma akımı Ib(kA);
%Yıldırım kutbiyetine bağlı olarak yıldırım akımının %50 olasılıklı
tepe değeri Im(kA);
%Yıldırım akımının kutbiyetine ve tepe değeri dağılımına bağlı sapma
katsayısı s;
if TS==1
    C=1;
    D=31.6;
else
    C=644;
    D=32.5;
end
a=0.1;
b=0.7;
In=20;
if TS==1
    Im =16;
    s = 1.36;
else
    Im =24;
    s =1.52;
end
p = 1.5;
Io = input('Minimum yıldırım akımı Io, Io= ');
Ib = 20;
u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
rm=u*h;
ro=rm*[(Io/Im)^(1/p)];
if TS==1
    rb=0;
else
    rb=rm*[(Ib/Im)^(1/p)];
end
if TS==1
    rmax=(h/(1.06-1));
else
    rmax=5000;
end
rl=ro;
ru=rmax;
Aeqq=0;
if TS==1
    dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
    Aeqq=Aeqq+dAeq;
    xb=0;
else
    if ru>rb
        if rl<rb
```

```

        xb=ru;
        ru=rb;
        dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
        Aeqq=Aeqq+dAeq;
    else
        TS=3;
        Im =20;
        s=0.645;
        u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
        rm=u*h;
        dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
        Aeqq=Aeqq+dAeq;
        xb=0;
    end
end
else
    dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
    Aeqq=Aeqq+dAeq;
    xb=0;
end
end
rl=ru;
if xb~=0
    ru=xb;
    xb=0;
    TS=3;
    Im =20;
    s = 0.645;
    u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
    rm=u*h;
    dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
    Aeqq=Aeqq+dAeq;
else
    Aeqq;
end
Aeqq;

```

Nokta durumu için eşdeğer alandaki artımın hesabı

```
function [dAeq] = alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm)
%Esdeger alan artım miktarının hesabı
if TS==1
    eps=1.06;
else
    eps=0.88;
end
K1=2*pi*h;
K2=2*pi*(1-eps);
K=[K1;K2];
A=zeros(1,2);
c=1;
n=c;
while n<=c+1
    e=exp(0.5*((n*s)/p)^2);
    V1=[(p/s)*log(rl/rm)]-(n*s)/p;
    Vu=[(p/s)*log(ru/rm)]-(n*s)/p;
    Q1=0.5+(0.5*erf(V1/sqrt(2)));
    Qu=0.5+(0.5*erf(Vu/sqrt(2)));
    a=((rm)^n)*e*(Qu-Q1);
    A(1,n)=a;
    n=n+1;
end
A;
dAeq=A*K;
```

Yatay iletken durumu için çarpma olasılığının hesabı

```
function [N] = hcarpma
%Yatay bir iletkene yıllık yıldırım çarpma sıklığının hesaplanması
%GİRİŞ :Yıllık buluttan yere doğru olan pozitif yıldırımların oranı
Ppoz;
%      Yıllık buluttan yere doğru olan negatif yıldırımların oranı
Pneg;
%      Yıllık bluttan yere doğru olan yıldırım yoğunluğu
Ng(yıldırım/km2.yıl);
%      iletkenin yerden yüksekliği h(m);
%ÇIKIŞ :İletkene yıllık yıldırım çarpma sıklığı N(çarpma/yıl);
%TS Yıldırım kutbiyetine göre değer alan bir sayı;
%Pozitif kutbiyetli bir yıldırım için TS=1;
%Negatif kutbiyetli bir yıldırım için (I<20 kA)TS=2;
%Negatif kutbiyetli bir yıldırım için (I>20 kA) TS=3;
%Aeq esdeger alan
Ng = input('Yıllık buluttan yere doğru olan yıldırım yoğunluğu Ng, Ng=
')
Ppoz = input('Yıllık buluttan yere doğru olan pozitif yıldırımların
oranı Ppoz, Ppoz= ')
Pneg = input('Yıllık buluttan yere doğru olan negatif yıldırımların
oranı Pneg, Pneg= ')
h = input('İletkenin yerden yüksekliği h, h= ')
L = input('İletkenin uzunluğu L, L= ')
P=[Ppoz; Pneg];
B=zeros(1,2);
for TS=1:2;
    n=TS;
    Aeqq=hesdeger(TS,h,L);
    B(1,n)=Aeqq;
end
Aeq=B*P;
N=Ng*Aeq;
```

Yatay iletken durumu için eşdeğer alanın hesabı

```
function [Aeqq] = hesdeger(TS,h,L)
%Yatay bir iletkenin eşdeğer alanının hesaplanması
%GİRİŞ: Yıldırımın kutbiyeti TS;
%      iletkenin yerden yüksekliği h(m);
%      iletkenin uzunluğu L(m);
%      Minimum yıldırım akımı Io(kA);
%ÇIKIŞ: Eşdeğer alan Aeqq(m2);
%Katsayı p (1,2<=p<=2,0);
%Boşalma akımı Ib(kA);
%Yıldırım kutbiyetine bağlı olarak yıldırım akımının %50 olasılıklı
tepe değeri Im(kA);
%Yıldırım akımının kutbiyetine ve tepe değeri dağılımına bağlı sapma
katsayısı s;
if TS==1
    C=1;
    D=31.6;
else
    C=644;
    D=32.5;
end
a=0.1;
b=0.7;
In=20;
if TS==1
    Im = 16;
    s = 1.36;
else
    Im =24;
    s =1.52;
end
p =1.5;
Io = input('Minimum yıldırım akımı Io, Io= ');
Ib = 20;
u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
rm=u*h;
ro=rm*[(Io/Im)^(1/p)];
if TS==1
    rb=0;
else
    rb=rm*[(Ib/Im)^(1/p)];
end
rmax=5000;
dr=adim(rmax,ro,h);
if dr>h
    q=1.3;
else
    q=0;
end
x=ro;
rl=x;
fl=fonksiyon(L,h,TS,x);
Aeqq=0;
while rl<rmax
    if q==0
        x=rl+dr;
```

```

else
    x=q*rl;
end
if x<rmax
    fu=fonksiyon(L,h,TS,x);
else
    x=rmax;
    fu=fonksiyon(L,h,TS,x);
end
ru=x;
if TS==1
    dAeq=halan(TS,h,s,p,rl,ru,rm,fl,fu);
    Aeqq=Aeqq+dAeq;
    xb=0;
else
    if ru>rb
        if rl<rb
            x=rb;
            xb=ru;
            fb=fu;
            fu=fonksiyon(L,h,TS,x);
            ru=rb;
            dAeq=halan(TS,h,s,p,rl,ru,rm,fl,fu);
            Aeqq=Aeqq+dAeq;
        else
            TS=3;
            Im =20;
            s = 0.645;
            u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
            rm=u*h;
            dAeq=halan(TS,h,s,p,rl,ru,rm,fl,fu);
            Aeqq=Aeqq+dAeq;
            xb=0;
        end
    else
        dAeq=halan(TS,h,s,p,rl,ru,rm,fl,fu);
        Aeqq=Aeqq+dAeq;
        xb=0;
    end
end
end
rl=ru;
fl=fu;
if xb~=0
    ru=xb;
    fu=fb;
    xb=0;
    TS=3;
    Im = 20;
    s = 0.645;
    u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
    rm=u*h;
    dAeq=halan(TS,h,s,p,rl,ru,rm,fl,fu);
    Aeqq=Aeqq+dAeq;
    rl=ru;
else
    Aeqq;
end

```

```
end  
Aeqq;
```

Yatay iletken durumu için eşdeğer alandaki artımın hesabı

```
function [dAeq] = halan(TS,h,s,p,rl,ru,rm,fl,fu)  
%Esdeger alan artım miktarının hesabı  
if TS==1  
    eps=1.06;  
else  
    eps=0.88;  
end  
K1=((fl*ru)-(fu*rl))/(ru-rl);  
K2=(fu-fl)/(ru-rl);  
K=[K1;K2];  
A=zeros(1,2);  
c=1;  
n=c;  
while n<=c+1  
    e=exp(0.5*((n*s)/p)^2);  
    Vl=[(p/s)*log(rl/rm)]-(n*s)/p;  
    Vu=[(p/s)*log(ru/rm)]-(n*s)/p;  
    Ql=0.5+(0.5*erf(Vl/sqrt(2)));  
    Qu=0.5+(0.5*erf(Vu/sqrt(2)));  
    a=((rm)^n)*e*(Qu-Ql);  
    A(1,n)=a;  
    n=n+1;  
end  
A;  
dAeq=A*K;
```

Yatay iletken durumu için f işlevinin hesabı

```
function [f] = fonksiyon(L,h,TS,x)
%Yakalama bölgesinin kesit alanı ile yönlendirme mesafesi arasındaki
ilişkiyi veren fonksiyonun hesaplanması
%GİRİŞ: TS Yıldırım kutbiyetine göre değer alan bir sayı
%       İletkenin yerden yüksekliği h(m)
%       İletkenin uzunluğu L(m)
%       Değişken x(m)
%ÇIKIŞ: Yakalama bölgesinin kesit alanı ve yönlendirme mesafesi
arasındaki ilişkiyi veren fonksiyon f
if TS==1
    eps=1.06;
else
    eps=0.88;
end
y=eps-(h/x);
if y>-1
    if y<1
        fi=acos(y);
    else
        fi=0;
    end
else
    fi=pi;
end
f=fi*L;
```

Yatay iletken durumu için dr adım büyüklüğünün hesabı

```
function [dr] = adim(rmax,ro,h)
%Yatay bir iletkenin yakalama bölgesinin bölüneceği adım mesafesinin
belirlenmesi
dr=(rmax-ro)/16;
while dr<(h/2)
    dr=2*dr;
end
```

Düşey iletken durumu için çarpma olasılığının hesabı

```
function [N] = vcarpma
%Düşey bir iletkene yıllık yıldırım çarpma sıklığının hesaplanması
%GİRİŞ :Yıllık buluttan yere doğru olan pozitif yıldırımların oranı
Ppoz;
%      Yıllık buluttan yere doğru olan negatif yıldırımların oranı
Pneg;
%      Yıllık buluttan yere doğru olan yıldırım yoğunluğu
Ng(yıldırım/km2.yıl);
%      İletkenin yerden yüksekliği h(m);
%ÇIKIŞ :İletkene yıllık yıldırım çarpma sıklığı N(çarpma/yıl);
%TS Yıldırım kutbiyetine göre değer alan bir sayı;
%Pozitif kutbiyetli bir yıldırım için TS=1;
%Negatif kutbiyetli bir yıldırım için (I<20 kA)TS=2;
%Negatif kutbiyetli bir yıldırım için (I>20 kA) TS=3;
%Aeq esdeger alan
Ng = input('Yıllık buluttan yere doğru olan yıldırım yoğunluğu Ng, Ng=
')
Ppoz = input('Yıllık buluttan yere doğru olan pozitif yıldırımların
oranı Ppoz, Ppoz= ')
Pneg = input('Yıllık buluttan yere doğru olan negatif yıldırımların
oranı Pneg, Pneg= ')
h = input('İletkenin boyu h, h= ')
P=[Ppoz; Pneg];
B=zeros(1,2);
for TS=1:2
    n=TS;
    Aeqq=vesdeger(TS,h);
    B(1,n)=Aeqq;
end
Aeq=B*P;
N=Ng*Aeq
```

Düşey iletken durumu için eşdeğer alanın hesabı

```
function [Aeqq] = vesdeger(TS,h)
%Düşey bir iletkenin eşdeğer alanının hesaplanması
%GİRİŞ: Yıldırımın kutbiyeti TS;
%      İletkenin boyu h(m);
%ÇIKIŞ: Eşdeğer alan Aeqq(m2);
%Katsayı p (1,2<=p<=2,0);
%Minimum yıldırım akımı Io(kA);
%Boşalma akımı Ib(kA);
%Yıldırım kutbiyetine bağlı olarak yıldırım akımının %50 olasılıklı
tepe değeri Im(kA);
%Yıldırım akımının kutbiyetine ve tepe değeri dağılımına bağlı sapma
katsayısı s;
if TS==1
    C=1;
    D=31.6;
else
    C=644;
    D=32.5;
end
a=0.1;
b=0.7;
In=20;
if TS==1
    Im = 16;
    s = 1.36;
else
    Im =24;
    s = 1.52;
end
p =1.5;
Io = input('Minimum yıldırım akımı Io, Io= ');
u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
rm=u*h;
ro=rm*[(Io/Im)^(1/p)];
if TS==1
    eps=1.06;
else
    eps=0.88;
end
Aeqq=0;
if ro>=(h/eps)
    Aeqq1=vesdeger1(TS,h);
    Aeqq=Aeqq1;
else
    rl=ro;
    ru=h/eps;
    Aeqq2=valan(TS,h,p,s,rl,ru,rm);
    Aeqq1=vesdeger1(TS,h);
    Aeqq=Aeqq1+Aeqq2;
end
Aeqq;
```

Düşey iletken durumu için eşdeğer alandaki artımın hesabı

```
function [dAeq] = valan(TS,h,s,p,rl,ru,rm)
%Esdeger alan artım miktarının hesabı
if TS==1
    eps=1.06;
else
    eps=0.88;
end
K1=2*pi*h;
K2=2*pi*(1-eps);
K=[K1;K2];
A=zeros(1,2);
c=1;
n=c;
while n<=c+1
    e=exp(0.5*((n*s)/p)^2);
    V1=[(p/s)*log(rl/rm)]-((n*s)/p);
    Vu=[(p/s)*log(ru/rm)]-((n*s)/p);
    Q1=0.5+(0.5*erf(V1/sqrt(2)));
    Qu=0.5+(0.5*erf(Vu/sqrt(2)));
    a=((rm)^n)*e*(Qu-Q1);
    A(1,n)=a;
    n=n+1;
end
A;
dAeq=A*K;
```

Düşey iletken durumu için üst ucunun tanımladığı eşdeğer alanın hesabı

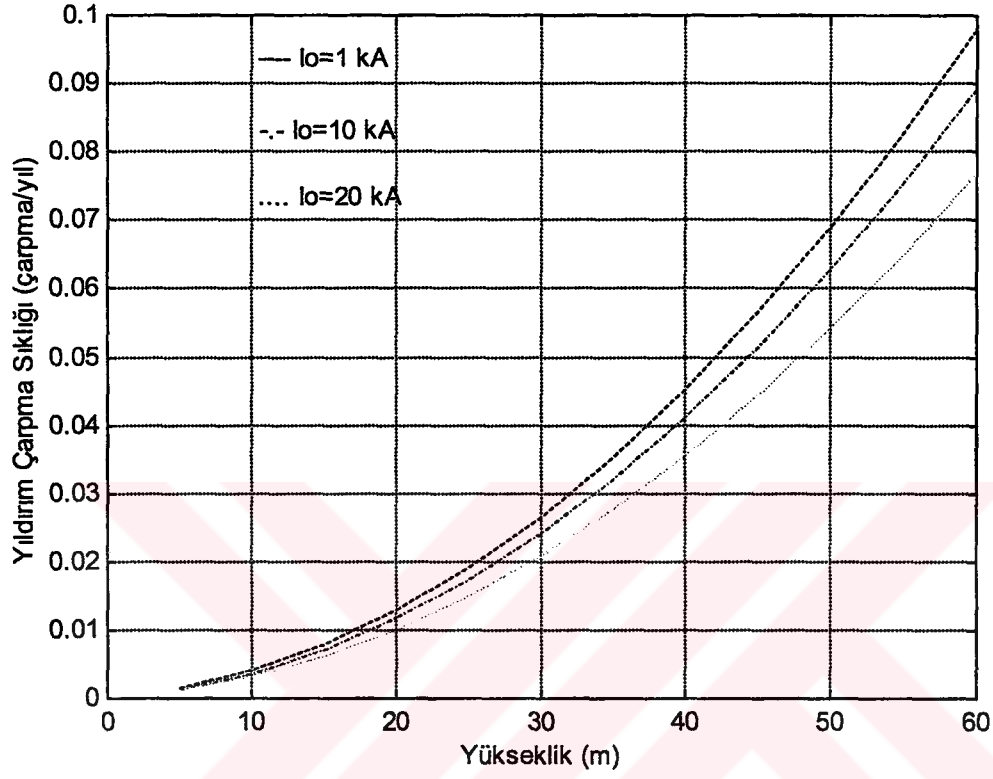
```
function [Aeqq1] = vesdeger1(TS,h)
%Düşey bir iletkenin üst ucunun meydana getirdiği eşdeğer alanın
hesaplanması
%GİRİŞ: Yıldırımın kutbiyeti TS;
%      İletkenin boyu h(m);
%ÇIKIŞ: Eşdeğer alan Aeqq1(m2);
%Katsayı p(1.2<=p<=2.0);
%Delinme akımı Ib(kA);
%Yıldırım kutbiyetine bağlı olarak yıldırım akımının %50 olasılıklı
tepe değeri Im(kA);
%Yıldırım akımının kutbiyetine ve tepe değeri dağılımına bağlı sapma
katsayısı s;
if TS==1
    C=1;
    D=31.6;
else
    C=644;
    D=32.5;
end
a=0.1;
b=0.7;
In=20;
if TS==1
    Im =16;
    s = 1.36;
else
    Im =24;
    s =1.52;
end
if TS==1
    eps=1.06;
else
    eps=0.88;
end
p =1.5;
Ib =20;
u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
rm=u*h;
ro=h/eps;
if TS==1
    rb=0;
else
    rb=rm*[(Ib/Im)^(1/p)];
end
if TS==1
    rmax=(h/(1.06-1));
else
    rmax=5000;
end
rl=ro;
ru=rmax;
Aeqq1=0;
if TS==1
    dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
    Aeqq1=Aeqq1+dAeq;
```

```

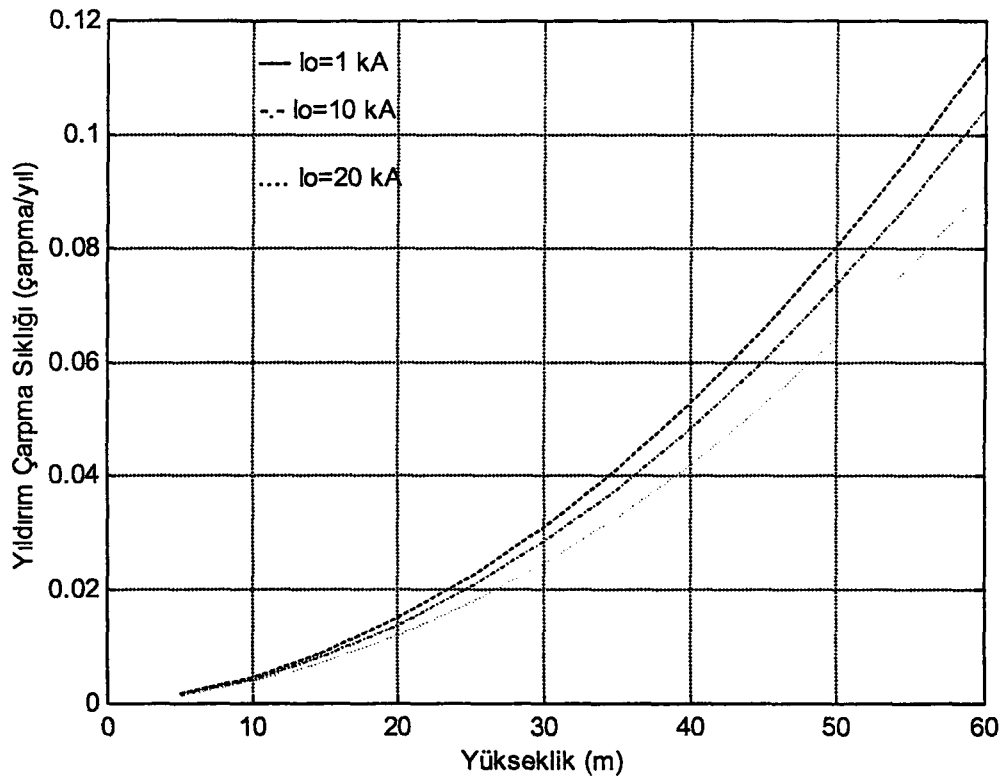
    xb=0;
else
    if ru>rb
        if rl<rb
            xb=ru;
            ru=rb;
            dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
            Aeqq1=Aeqq1+dAeq;
        else
            TS=3;
            Im =20;
            s =0.645;
            u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
            rm=u*h;
            dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
            Aeqq1=Aeqq1+dAeq;
            xb=0;
        end
    else
        dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
        Aeqq1=Aeqq1+dAeq;
        xb=0;
    end
end
rl=ru;
if xb~=0
    ru=xb;
    xb=0;
    TS=3;
    Im = 20;
    s =0.645;
    u=((Im/In)^(1/p))*[(C*h)^a+(D/h)^b];
    rm=u*h;
    dAeq=alan(TS,h,s,p,rl,ru,rm);
    Aeqq1=Aeqq1+dAeq;
else
    Aeqq1;
end
Aeqq1;

```

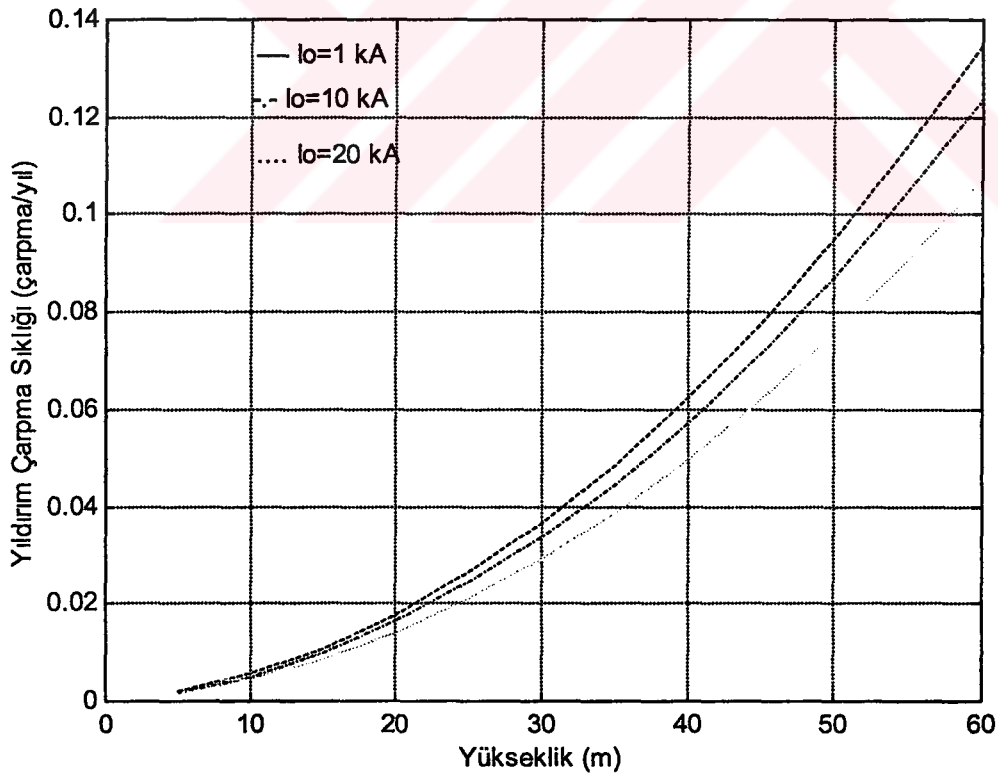
EK C GRAFİKLER



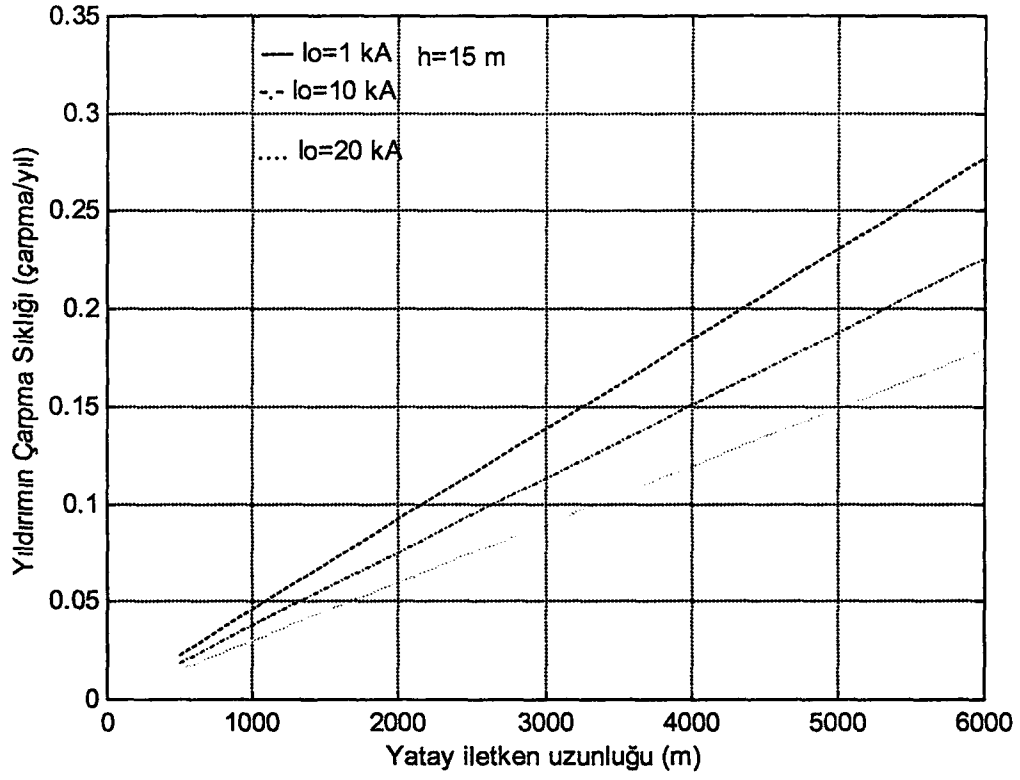
Şekil C.1 $N_g = 1$ yıldırım/ km^2 .yıl, $P(+)=0,3$, $P(-)=0,7$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için bir noktaya yıldırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi



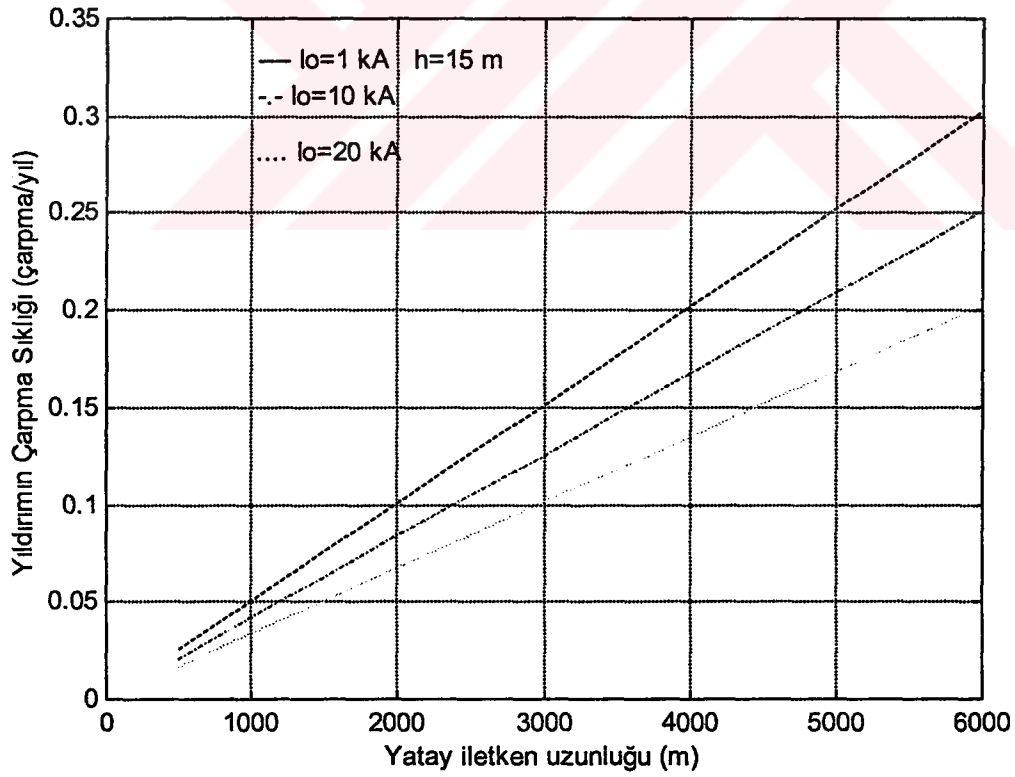
Şekil C.2 $N_g = 1$ yıldırım/km².yıl, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için bir noktaya yıldırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi



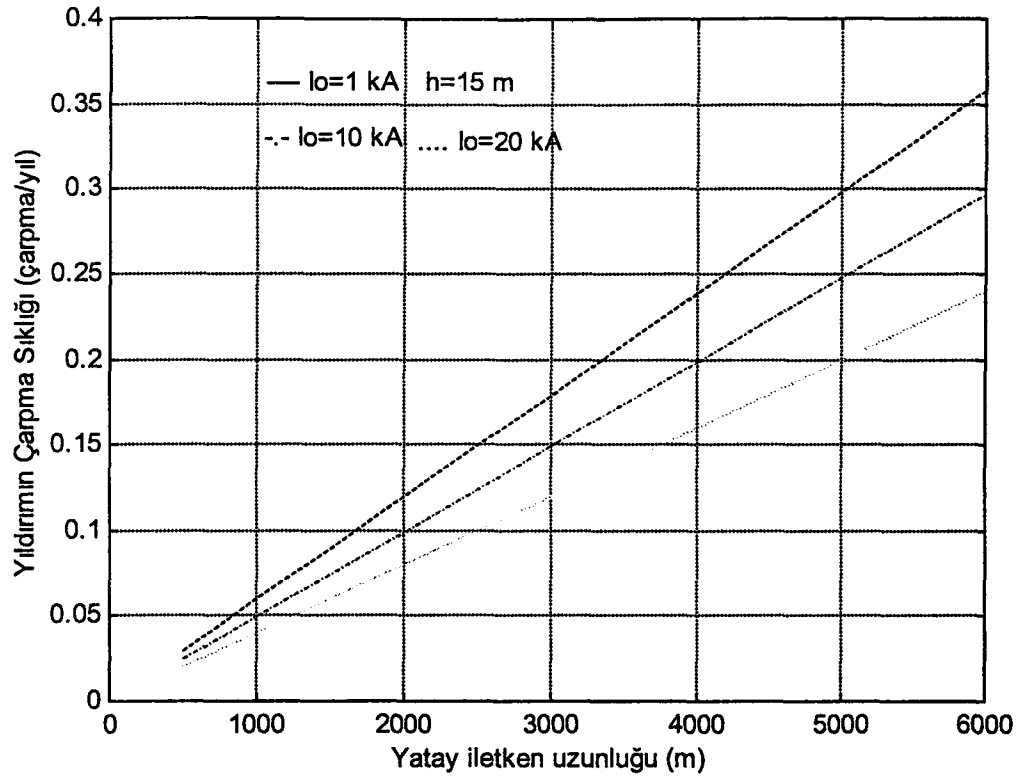
Şekil C.3 $N_g = 1,1816$ yıldırım/km².yıl, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için bir noktaya yıldırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi



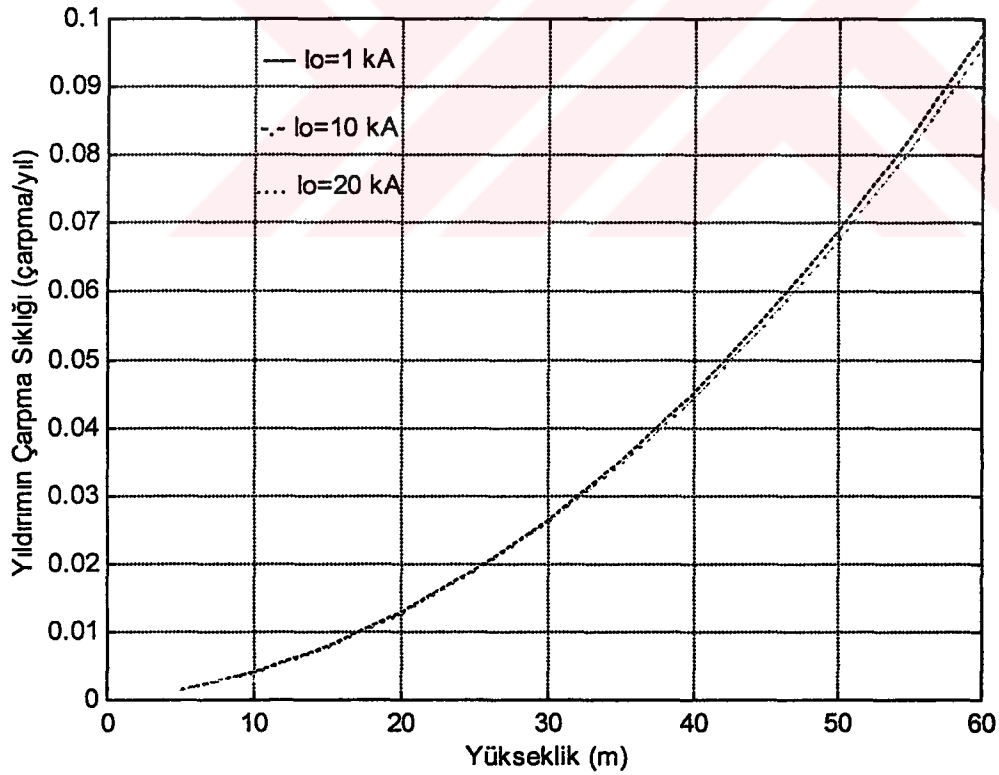
Şekil C.4 $N_g = 1$ yıldırım/ km^2 .yıl, $P(+) = 0,3$, $P(-) = 0,7$, ve $I_o = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için yatay bir iletkenin yıldırım çarpma sıklığının iletkenin uzunluğu ile değişimi



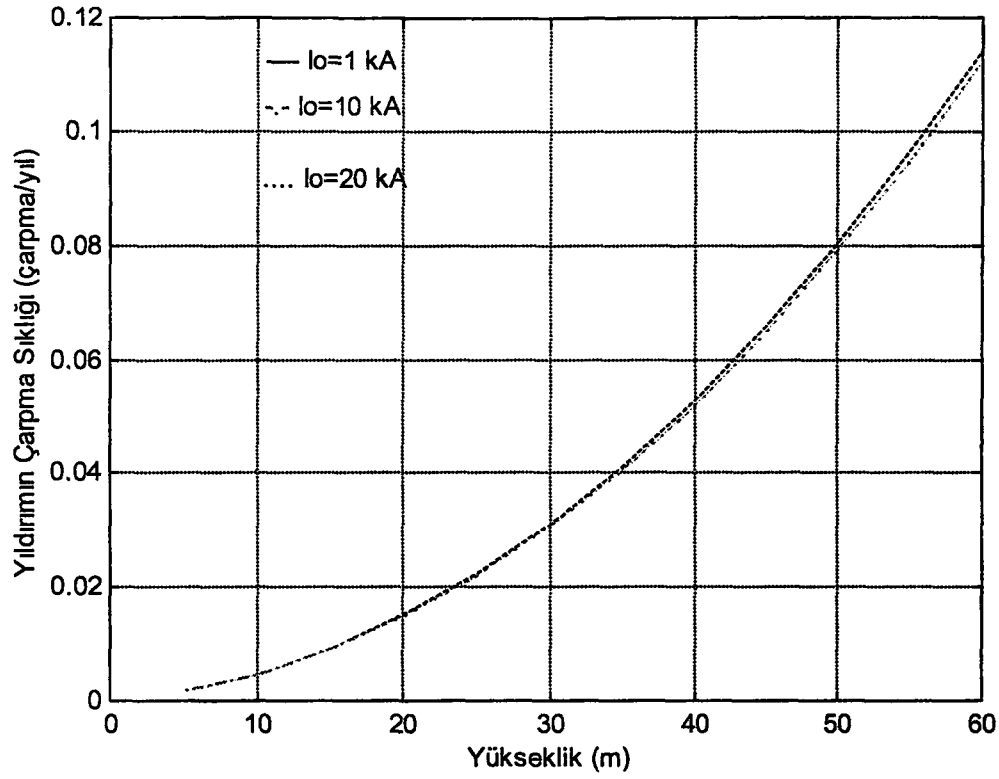
Şekil C.5 $N_g = 1$ yıldırım/ km^2 .yıl, $P(+) = 0,1$, $P(-) = 0,9$, ve $I_o = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için yatay bir iletkenin yıldırım çarpma sıklığının iletkenin uzunluğu ile değişimi



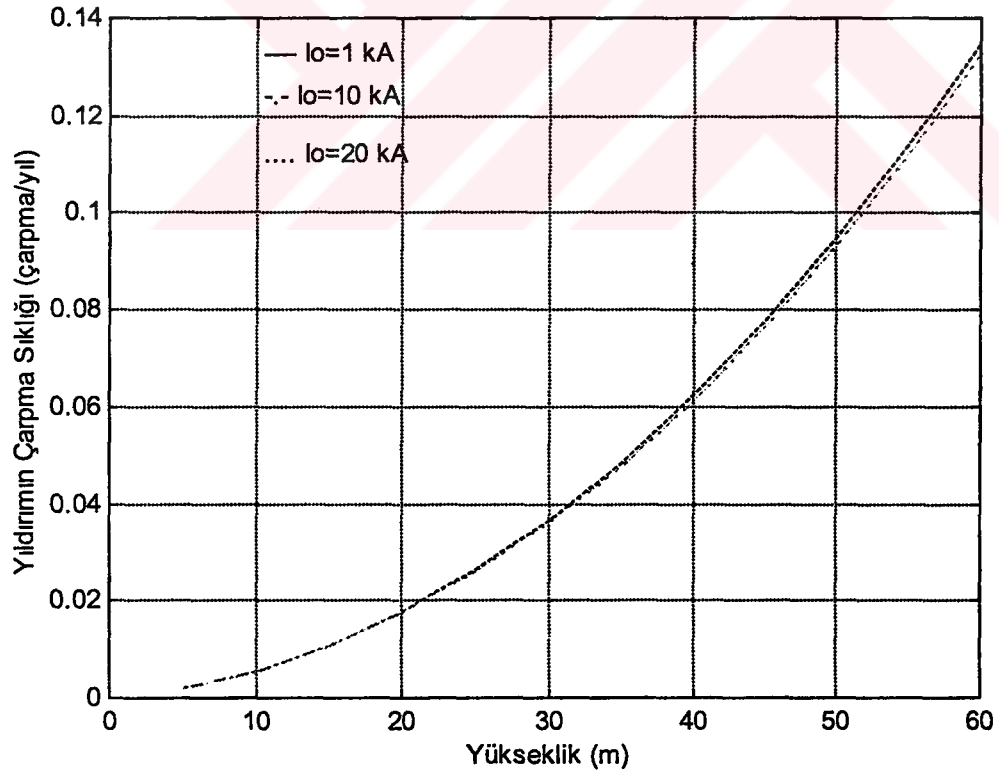
Şekil C.6 $N_g = 1,1816$ yıldırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_o = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için yatay bir iletkenin yıldırım çarpma sıklığının iletkenin uzunluğu ile değişimi



Şekil C.7 $N_g = 1$ yıldırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,3$, $P(-)=0,7$, ve $I_o = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için düşey bir iletkenin yıldırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi



Şekil C.8 $N_g = 1$ yıldırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için düşey bir iletkene yıldırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi



Şekil C.9 $N_g = 1,1816$ yıldırım/ $\text{km}^2 \cdot \text{yıl}$, $P(+)=0,1$, $P(-)=0,9$, ve $I_0 = 1$ kA, 10 kA, 20 kA için düşey bir iletkene yıldırım çarpma sıklığının yükseklikle değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Gürkan Soykan, 1976 yılında Konya’da doğdu. İlkokulu Mustafa Hotamışlı İlkokulu’nda (Konya), orta okulu Erbil Kuru Lisesi’nde (Konya) ve liseyi Özel Konya İdeal Fen Lisesi’nde tamamladıktan sonra 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümüne girdi. 1998 yılında Elektrik Mühendisliği bölümünden (3,68/4 ortalama) bölüm ikincisi olarak mezun oldu ve aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında yüksek lisans programına başladı. Halen aynı programda tez çalışmasına devam etmektedir.

