

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARADAY KAFESİ İLE KORUMA VE TOPRAKLAMA DİRENCİNİN VERİM
ARTTIRMA YÖNTEMLERİ

RAMAZAN KAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

MALATYA
OCAK 2013

Tezin Başlığı : Faraday Kafesi ile Koruma ve Topraklama Direncinin Verim Arttırma Yöntemleri

Tezi Hazırlayan: Ramazan KAYA

Sınav Tarihi : 28.01.2013

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Doç. Dr. M. Emin TAĞLUK İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Müslüm ARKAN İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet ALPASLAN
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Faraday Kafesi ile Koruma ve Topraklama Direncinin Verim Arttırma Yöntemleri” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığı ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenden oluştuğunu belirtir ve onurumla doğrularım.

Ramazan KAYA

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARADAY KAFESİ İLE KORUMA VE TOPRAKLAMA DİRENCİNİN VERİM ARTTIRMA YÖNTEMLERİ

Ramazan Kaya

İnönü Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

60+X Sayfa

2013

Danışman: Prof. Dr. M. Salih Mamiş

Yıldırımın yapılara ve canlılara zarar vermesi nedeniyle yıldırımdan koruma günümüzde büyük önem arz etmektedir. Nüfus ve buna paralel olarak bina sayısındaki artış, yıldırımın verdiği hasarları daha da artmaktadır. Bu hasarları en aza indirmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bunlardan biri Faraday kafesi olup iyi bir Faraday kafesi için uygun topraklama direncinin sağlanması gerekmektedir.

Bu tezin ilk aşamasında yıldırım ve topraklama ile ilgili teorik bilgiler araştırılmıştır. Faraday kafesi kısa iletim hatları ile modellenerek yıldırım dalgası cevabı EMTP-ATP ile elde edilmiştir. Yapılan modelleme ile Faraday kafesinin ağ gözlerinin boyutlarının etkisi incelenmiştir. Faraday kafesinin ağ gözleri arasındaki potansiyel dağılımı kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu farklar ile nümerik çözümü MATLAB kullanılarak bulunmuştur. Topraklamanın iyileştirilmesi için kullanılan tekniklerden bahsedilmiş, bu tekniklerin bir bölümün uygulaması yapılarak test sonuçları değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Yıldırımdan korunma, Faraday kafesi, topraklama

ABSTRACT

Graduation Thesis

PROTECTION BY FARADAY CAGE AND METHODS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF GROUNDING RESISTANCE

Ramazan Kaya

Inonu University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical-Electronic Engineering

60+X Pages

2013

Supervisor: Prof.Dr. M. Salih Mamiş

Protection against lightning is important subject as lightning is harmful for livings and structures. Damage due to lightning strokes increases since there is increase in population and number of buildings. Various techniques have been developed to minimize the effects of lightning. One of them is Faraday cage and grounding resistance should be suitable for an effective grounding.

In the first part of this thesis the theoretical information about lightning and grounding systems is given. Faraday cage is modeled by short lines (stubs) and lightning surge response of the cage is obtained in EMTP-ATP. Using this model, the effect of grid size is investigated. Potential distribution in the grids is also obtained by solving partial differential equation numerically using finite difference approximations in MATLAB. In addition, the techniques for improving the grounding resistance are discussed and application results are obtained.

KEY WORDS: Lightning protection, Faraday cage, Grounding

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, tavsiye ve desteğini aldığım beni yönlendiren bilgi ve birikimlerini bana aktaran ve değerli zamanını ayıran danışman hocam Sayın Prof. Dr. M. Salih MAMIŞ'e;

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'nda görev yapan öğretim üyelerine;

Desteklerinden dolayı Ferda KOYUNOĞLU'na;

Tüm hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen değerli aileme ve tüm sevdiklerime;

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ONUR SÖZÜ.....	i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. YILDIRIM VE YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMLERİ	3
2.1. Yıldırımın Oluşması	3
2.2. Yıldırımdan Koruma ve Korunma Sistemleri	4
2.3. Yıldırım Dalgasının Benzetimi.....	6
2.4. Yıldırım Risk Hesabı	9
3. FARADAY KAFESİ VE MODELLEME	13
3.1. Faraday Kafesinin İletim Hatları ile Modellemesi.....	13
3.1.1 Hat Modelleri	14
3.1.1.1. Uniform Hat Modeli.....	14
3.1.1.2. Nonuniform Hat Modeli.....	15
3.2. Faraday Kafesinin Ağ Gözlerinde Potansiyel Dağılımı.....	18
4. TOPRAKLAMA DİRENCİNİN VERİMİNİ ARTTIRMA YÖNTEMLERİ	19
4.1. Topraklama İle İlgili Temel Terimler	20
4.2. Topraklama Direnci Düşürme Yöntemleri.....	21
4.2.1. Derin topraklayıcılar	23
4.2.2. Şeritle yapılan topraklama tesisleri	26
4.2.3. Izgara topraklama sistemleri	28
4.2.4. Tabi topraklayıcılar	31
4.2.5. Özel topraklayıcılar	31
4.2.6. Birleşik topraklayıcılar.....	31
4.3. Topraklama Direncinin Ölçülmesi	31
5. UYGULAMALAR	33

5.1	Faraday Kafesinin Modellenmesi	33
5.2	ATP Programı	36
5.3	EMTP-ATP simülasyon sonuçları	38
5.4	Faraday Kafesinin Potansiyel Dağılımı	46
5.5	Derin Topraklama Sisteminde Topraklama Direncini Düşürme Yöntemleri.....	51
5.5.1	Derin topraklama sisteminde elektrot boyunu değiştirerek topraklama direncini düşürmek	52
5.5.2	Derin topraklama sisteminde elektrot kesitini değiştirerek topraklama direncini düşürmek	53
6.	TARTIŞMA ve SONUÇ	55
7.	KAYNAKLAR.....	56
	EKLER.....	58
	ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Yakalama Çubuğunun Koruduğu Alan	6
Şekil 2.2. Yıldırım Dalgasının Gerçek Modeli ve Rampa Fonksiyonlar ile Benzetimi	7
Şekil 2.3. Yıldırım Dalga Modeli	7
Şekil 2.4. Yıldırım Darbe Formu	8
Şekil 2.5. Türkiye'nin Yıllık Ortalama Orajlı Gün Sayısı	10
Şekil 3.1. Uniform Hat Parametreleri	15
Şekil 3.2. Nonuniform Hat Parametreleri	15
Şekil 3.3. Noktasal Yük Dağılımı	19
Şekil 4.1. Adım Gerilimi	21
Şekil 4.2. Toprağın Direncinin Tuz, Nem ve Sıcaklığa Göre Değişimi	22
Şekil 4.3. Derin Topraklayıcılarda Elektrotlar	24
Şekil 4.4. Topraklama Direncinin Toprak Özgül Direncine Bağlı Olarak Değişimi	24
Şekil 4.5. Topraklama Direncinin Elektrot Uzunluğuna Bağlı Olarak Değişimi ...	25
Şekil 4.6. Topraklama Direncinin Elektrot Genişliğine Bağlı Olarak Değişimi.....	25
Şekil 4.7. Şerit Topraklama	26
Şekil 4.8. Topraklama Direncinin Şerit Uzunluğuna Bağlı Olarak Değişimi.....	27
Şekil 4.9. Topraklama Direncinin Şerit Genişliğine Bağlı Olarak Değişimi.....	27
Şekil 4.10. Ağ Tipi Topraklama.....	28
Şekil 4.11. Topraklama Direncinin İletken Uzunluğuna Bağlı Olarak Değişimi	29
Şekil 4.12. Topraklama Direncinin Ağın Kapladığı Alana Bağlı Olarak Değişimi. 30	
Şekil 4.13. Topraklama Direncinin Ağın Derinliğine Bağlı Olarak Değişimi.....	30
Şekil 5.1. 5x5 Ağ Gözlü Faraday Kafesi Uygulanmış Binanın Üstten Görünümü	33
Şekil 5.2. 5x5 Ağ Gözlü Faraday Kafesi Uygulanmış Binanın Yandan Görünümü	34
Şekil 5.3. Akım Dalga Biçimi.....	35
Şekil 5.4. 15x15 Ağ Sistemi EMTP-ATP Modeli	38
Şekil 5.5. 15x15 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-25 us)	39
Şekil 5.6. 15x15 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-2 us)	39
Şekil 5.7. 10x10 Ağ Sistemi EMTP-ATP Modeli.....	40
Şekil 5.8. 10x10 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-25 us)	41
Şekil 5.9. 10x10 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-2 us)	41
Şekil 5.10. 5x5 Ağ Sistemi EMTP-ATP Modeli.....	42

Şekil 5.11. 5x5 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-25 us)	43
Şekil 5.12. 10x10 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-2 us)	43
Şekil 5.13. $R_g=5$ ve $R_g=0.5$ Toprak Direncine Bağlı Yıldırım Dalga Şekli Değişimi	45
Şekil 5.14. 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerleri	47
Şekil 5.15. 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Potansiyel Dağılımın Grafikselsel Görünümü	48
Şekil 5.16. 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerlerinin Noktasal Görünümü	48
Şekil 5.17. Bir Kenarı Toprak 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerleri	49
Şekil 5.18. Bir Kenarı Toprak 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerlerinin Grafikselsel Görünümü	50
Şekil 5.19. Bir Kenarı Toprak 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerlerinin Noktasal Görünümü	50
Şekil 5.20. Topraklama Test Cihazı	51
Şekil 5.21. Topraklama Testi İçin Gerekli Malzemeler	52
Şekil 5.22. Elektrot Uzunluğunun Topraklama Direncine Etkisi	53
Şekil 5.23. Topraklama Direncinin Elektrot Genişliğine Bağlı Olarak Değişimi....	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Çevresel C1 Katsayıları	11
Çizelge 2.2.	Çevresel C2 Katsayıları	11
Çizelge 2.3.	Çevresel C3 Katsayıları	11
Çizelge 2.4.	Çevresel C4 Katsayıları	12
Çizelge 2.5.	Çevresel C5 Katsayıları	12
Çizelge 2.6.	Etkinlik Eşdeğerleri	13
Çizelge 4.1.	Toprak Çeşitlerinin Özgöl Dirençleri	23
Çizelge 5.1.	5x5,10x10 ve 15x15 Ağ Gözü Koruma Sistemlerinde Yıldırım Dalga Gerilimleri.....	44
Çizelge 5.2.	Farklı Topraklama Dirençlerinde Elde Edilen Gerilimler.....	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

A	Akım Değeri (Amper)
A_e	Eşdeğer Alan
C	Çevresel Katsayı
D	İletken Çapı
Hz	Frekans Değeri (Hertz)
H	Yapı Yüksekliği
kV	Gerilim Değeri
L	Yapı Boyu
M	Metre
mA	Akım Değeri (10^{-3} Amper)
N_c	Onaylı Yıldırım Darbe Sayısı
N_d	Beklenen Yıldırımlı Gün Sayısı
N_g	Yıldırım Yoğunluğu
N_k	Yıldırımlı Gün Sayısı
q	Dikey İletken Sabiti
R	Topraklama Direnci
V	Gerilim Değeri (Volt)
W	Yapı Genişliği
Z_x	Dikey Karakteristik Empedansı
Z_w	Yatay İletken Empedansı
ρ	Toprak Özgöl Direnci
Ω	Empedans veya Direnç Değeri (Ohm)
vd.	Ve Diğerleri
r_s	Çarpma Mesafesi
γ	Yayılm Katsayısı
Z_0	Empedans
ε	Materyal Geçirgenliği
pu	Per Unit

1. GİRİŞ

Yıldırım, yeryüzü ile bulutlar arasındaki elektriksel bir yük boşalmasıdır. Fırtına bulutunun tabanı ile yeryüzü arasındaki bir devrenin tamamlanması sonucu yıldırımlar oluşmaktadır. Bu yük boşalmaların kontrolü ve yönlendirilmesi hakkında ise kesin yargılar bulunmamaktadır. Bu nedenle bu konudaki çalışmalar günümüzde de halen devam etmektedir [1,2].

Yıldırımlar, genellikle toprak iletkenine ve elektrik hatlarına düşer. Bunun sonucunda yapılar ve canlılar büyük hasar görmektedir. Yıldırımların şiddetini kontrol etmek mümkün olmadığı için, yıldırımdan korunma yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Korunmadaki amaç ise, yıldırımın yapılara ve canlılara verdiği hasarı ortadan kaldırmak veya en aza indirmektir. Eski dönemlerde yıldırımın verdiği zarar can güvenliği ve yangın ile sınırlıyken, gelişen teknoloji ve yaşam standartları ile birlikte, yıldırımdan korunma olgusu ve kapsamı çok daha ileri noktalara gelmiştir. Yıldırım çarpmalarından korunmak için yapılara, canlılara ve elektronik sistemlere göre çeşitli korunma yöntemleri geliştirilmiştir [3-5].

Rakov vd.'nin yıldırımdan korunma ile ilgili son yıllarda yayınlanan çalışmaları, tek bir çalışma adı altında toplanmıştır [6]. Bu çalışmada yıldırım; yıldırım boşalması, yıldırım oluşma karakteristikleri, yıldırım elektromanyetik darbe ve bu darbelere karşı koruma ana başlıkları olmak üzere, dört gruba ayrılmış olup bunların etkisini incelenmiştir.

Rakov'un yıldırım ile ilgili yapmış olduğu bir diğer çalışmada, yıldırımın karakteristik parametreleri ve yıldırımdan korunma sistemleri hakkında bilgi verilmiştir [7]. Mühendislik hesaplamaları için ise, tepe akımı, maksimum akım türü, ortalama akım artış hızı, akım yükselme zamanı, akım süresi, yük akışı ve akım türevleri gibi hesaplamaların gerekli olduğu belirtilmiştir.

Mamiş vd. yapmış oldukları çalışmalarda, yıldırım dalga modelini yatay ve iletken hat modellerinde incelemişlerdir [8]. Bu çalışmada topraklama direncinin değişimine bağlı olarak dalga modelinin değiştiği, farklı hat modeli kullanıldığında ise dalga modelinin daha farklı çıktığı görülmüştür.

Yıldırım dalgalarının oluşturduğu etkileri kaldırmak için koruma iletkenleri ve parafudurlar kullanılmaktadır. Fakat iki durumun da yarattığı sorunlar bulunmaktadır [9]. Yaygın olarak kullanılan ve yıldırımın yükünü toprağa boşaltan koruma

sistemleri, yakalama uçlu düzeneklerdir. Bunlar; Faraday kafesi, Paratoner ve Franklin çubuklarıdır.

Yıldırımdan korunma sistemlerinden olan Faraday kafesi, yapıların ve içindeki cihazların doğrudan korunması için geliştirilen korunma yöntemlerinden bir tanesidir. Bu kafes, örgü şeklinde elektriksel iletkenlerle kaplanmıştır. Böylelikle kafesin iç hacmi, dış elektriksel alanlara karşı korumaktadır. Ağ gözlerinin sıklığı koruma kalitesini artırmaktadır. Çalışma ilkesi, iletken malzemeleri oluşturan atomların yörüngelerindeki en dış değerlik elektronların atomlarından kolayca ayrılarak hareket etmesine dayanmaktadır [10]. Faraday kafesi iç ortamı dış elektromanyetik alanlardan korumaktadır. Varne vd.'nin yaptığı çalışmada, yıldırım çarpmasında Faraday kafesinde oluşan elektriksel parametreleri incelenmişlerdir [11]. Elektriksel parametreler değiştirilerek kafesin etrafındaki metal direncin, Faraday kafesine yaptığı etki gözlemlenmiştir.

Faraday kafesinin modellenmesi ile ilgili olarak Mamiş vd.'nin yapmış oldukları çalışmada, Faraday kafesinin 5x5 koruma sistemi için direnç modellemesi yapılmıştır [10]. Bu modellemede, yıldırım çarpmasında kafesin herhangi bir noktasında oluşabilecek akım ve gerilim parametreleri gözlemlenmiştir. Ağ gözlerinin her biri hat parametresi olarak kullanılmış ve topraklama direncinin Faraday kafesine etkisi incelenmiştir.

Faraday kafesi pratikte, yıldırım risk hesabına göre tasarlanır ve yıldırımın düşme riski, korunacak yapının özelliklerine göre hesaplanır. Bu hesaba göre oluşturulan ağ gözlerinde, yıldırımın belirli noktalara çarparak, diğer noktalarda oluşan akım ve gerilim modellemesi ilgili standartlar kullanılarak yapılır. Norm NFC 17102 bu standartlardan biridir [12].

Yıldırımdan korunma sistemleri toprakla bağlantılı olduğundan dolayı, topraklama da Faraday kafesi kadar önemlidir. Topraklama direnci ne kadar düşük olursa, koruma seviyesi de o kadar yüksek olur. Mghairbi, topraklama direncinin değerlendirilmesi hakkındaki çalışmasında, topraklama elektrotunun performansı ile ilgili akım modelleri kullanarak, topraklama elektrotunun topraklama direncine olan etkisini incelenmiştir [13].

Eduful vd.'lerinin topraklama direncinin düşürülmesi ile ilgili yaptığı çalışmada, topraklama direncini düşürmek için, topraklama elektrotu sayısını arttırmışlardır. Bu arttırma sonucunda, topraklama direncinin bir yere kadar düştüğü

görülmüştür. Topraklama direncinin düşürülmesi için uygulanması gereken çözüm, toprak miktarındaki artış ile elektrot sayısı artışının paralel olmasıdır [14].

Topraklama yöntemleri derin topraklama yöntemi, ağ tipi topraklama yöntemi ve şerit ile topraklama yöntemlerinden oluşur ve bu yöntemlerde topraklama direncini etkileyen faktörler bulunur. Bu faktörler derin topraklama sisteminde, elektrot boyu, elektrot çapı ve toprak çeşidi; ağ tipi topraklama türünde, iletken boyu, toprak çeşidi, ağ derinliği ve ağ miktarı; şerit ile topraklama türünde ise şerit uzunluğu, şerit genişliği ve toprak çeşitleridir. Herhangi bir yapıya düşen yıldırım, düşük topraklama direncine sahip sistemlerde daha hızlı toprağa iletilir. Bunun için Faraday kafesinde topraklama direncinin düşük olması önemlidir.

Bu çalışmada Faraday kafesi kısa iletim hatları ile modellenerek yıldırım dalgası cevabı elde edilmiştir. Kafes modellemesi için dikey iletken nonuniform hat modeli kullanılarak analiz yapılmıştır. Faraday kafesinin bir noktasına yıldırım dalgasını temsil eden akım enjekte edilerek yıldırım dalgasının tepkisi görülmüştür. Yapılan modelleme ile Faraday kafesinin koruma sınıfları arasındaki farklar incelenmiştir. Faraday kafesinin ağ gözleri arasındaki potansiyel dağılımı kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu farklar ile nümerik çözümü yapılarak bulunmuştur. Topraklamanın iyileştirilmesi için kullanılan tekniklerden bahsedilmiş, bu tekniklerden olan derin topraklama sisteminde topraklama direncini etkileyen faktörler deneysel olarak incelenmiştir.

2. YILDIRIM VE YILDIRIMDAN KORUNMA SİSTEMLERİ

2.1. Yıldırımın Oluşması

Yıldırım, ortamdaki elektrostatik dengeyi sağlayan, içinde yüksek gerilim barından ve aniden oluşan elektriksel boşalmayı sağlayan doğa güçlerinden biridir. Hava iyi bir iletken değildir bundan dolayı yüksek gerilimli bulutlar oluşmaktadır. Statik elektriğe benzer olarak oluşan bulut içerisindeki hava akımları, zıt yüklerin ayrılmasını sağlayarak yıldırım için elverişli bir ortam oluşmasına zemin hazırlamaktadır [15]. Oluşumu statik elektriğe benzeyen bulut içerisindeki hava akımları, zıt yüklerin ayrılmasına neden olarak, yıldırımın oluşumu için gerekli ortamı oluşturur.

Yıldırım boşalması, yüklerin ayrılmasından sonra oluşan kanalla ortaya çıkar. Buluttaki elektrik alan şiddeti yeteri kadar yükseldiği zaman genellikle, bulut-bulut boşalması, bulut içi boşalma veya bulut-yeryüzü boşalması oluşur. Oluşan bu boşalma aşırı akım ve elektromanyetik etki bırakır [16].

Yıldırımın oluşmasında temel iki etken görülmektedir [17]. Bu iki sebeplerden ilki, atmosferdeki yüksek nem, ikincisi ise sıcak hava akımları yardımıyla yüklü bulutların oluşmasıdır. Dolayısıyla yıldırımın oluşmasında yüklü bulutlara ve neme ihtiyaç duyulmaktadır. Elektriksel yükler arasındaki fark yeterince büyük olduğunda, elektriksel boşalma oluşmaktadır.

Atmosferik boşalmaları dört sınıfta incelenir:

1. Bulut- Yer Arası Boşalmalar
2. Bulut-Bulut Arası Boşalmalar
3. Bulut- Hava Boşalmaları
4. Bulut İçi Boşalmalar

Atmosferik boşalmaların büyük bir kısmı bulut içi boşalmalardan oluşmaktadır. Bulut-yer arası boşalmalar yani yıldırımlar, bulut içi boşalmalar kadar fazla değildir. Bulutlar arası boşalmalara ve bulut-hava boşalmalarına diğer boşalma türlerine göre daha az rastlanır. Bulut-yer arası yıldırım boşalmaları en önemli boşalma türlerindendir ve oluşumu yönünden, canlılara ve yapılara çok fazla etki eder. Bu nedenle de en çok inceleme ve araştırma yapılan boşalma türüdür [18].

Yıldırımın elektrodinamik, basınç, ses, elektrokimyasal, ışık ve termik etkisi bulunmaktadır.

2.2. Yıldırımdan Koruma ve Korunma Sistemleri

İnsanları, binaları, tesisleri, elektrik ve elektronik cihazları, yıldırımın fiziksel etkilerinden korumak için kullanılan sistemlere yıldırımdan korunma sistemleri denir. Yıldırımdan korunmadaki amaç, yıldırımın doğrudan veya dolaylı etkilerini ortadan kaldırmak veya en aza indirmektir.

Yıldırım dalgalarının etkisini ortadan kaldırmak için koruma iletkenleri ve parafudurlar kullanılır. Her iki durumda da sorunlar ortaya çıkmaktadır [9]. Yaygın olarak kullanılan koruma sistemlerinden biri, yıldırımın yükünü toprağa boşaltan yakalama uçlu düzenektir. Yıldırımı yakalamada ve bulut yükünü toprağa boşaltmada:

1. Paratoner Koruma Sistemi,
2. Franklin Çubuğu Koruma Sistemi,
3. Faraday Kafesi ile Koruma Sistemleri kullanılmaktadır.

Yıldırım koruma sistemlerinde, iletken çarpma mesafesi yıldırımın karakteristik özelliklerinden olduğu için önemlidir. Rakov bununla ilgili yapmış olduğu çalışmada, elektrogeometrik modelleme oluşturmuştur [6]. Çarpma mesafesini genellikle çarpan maksimum akım fonksiyonu olarak ifade etmiştir. Yıldırım çarpma mesafesi sistemindeki önemli unsurlardan birkaçı; çarpılacak nesne, nesnenin üst noktası ve topraklamadır. Çarpma mesafesi;

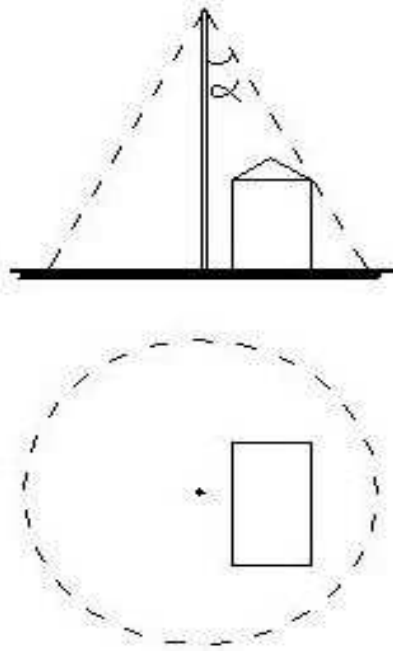
$$r_s = 10I^{0.65} \quad (2,1)$$

ile bulunur. Burada r_s çarpma mesafesi, I yıldırım dalgasının en yüksek akım değeridir

Elektrogeometrik modelin kullanım alanları; çarpma mesafesi, düşen yıldırımların yüzeye dağılımı ve maksimum yıldırım akımının istatistiksel dağılımı gibi karakteristikleri incelemek için kullanılmaktadır.

Yıldırımın zararlarından korunma yöntemlerinden birisi, paratoner ile koruma sistemidir. Elektriksel yükler paratonerin sivri uçlarda toplandığından dolayı bulutla yer arasındaki yük akışı, paratoner ile bulut arasında olmaktadır [19].

Bir diğer korunma yöntemi Franklin çubuğu ile koruma sistemidir. Pasif korunma olarak adlandırılan sistemde, yıldırımdan korunmak için yüksek noktalara sivri uçlu metal çubuklar konulur ve toprak bağlantısı sağlanır. Çubuğa yıldırım çarpmasından dolayı oluşan akım toprağa verilmiş olur. Düşen yıldırımın binaya ve çevresine zarar vermesi engellenir. Çubuğun koruduğu hacim, yakalama çubuğunun yüksekliğinin yapmış olduğu açıyla belirlenir [20]. Franklin çubukları, camilerin ve fabrikaların üst noktalarında görülebilmektedir. Şekil 2.1’de yakalama çubuklarının yaptığı açı ve koruma alanını görülmektedir.



Şekil 2.1. Yakalama Çubuğunun Koruduğu Alan [21]

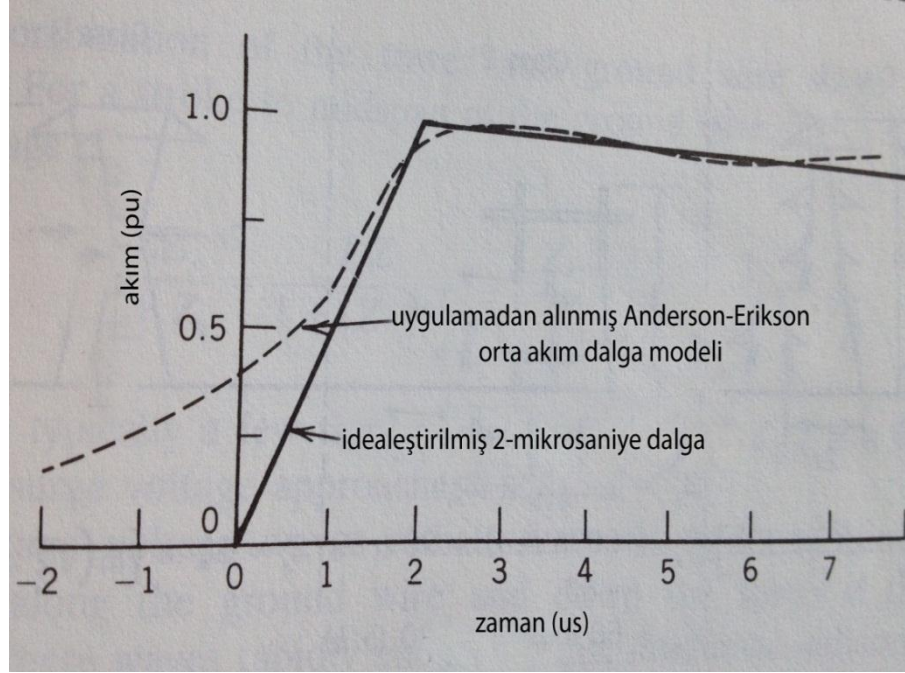
Faraday kafesi ise, 1836 yılında İngiliz Fizikçi Michael Faraday'ın adını verdiği bir başka korunma yöntemidir. Bu yöntemde yapı, metal veya iletken ile kaplanmış ve ağ biçiminde örülmüş Faraday kafesi, içteki hacmi dışardaki elektrik alanlardan koruyan bir muhafaza işlevi görmektedir.

Faraday kafesinin çalışma ilkesi, iletken malzemeleri oluşturan atomların en dış yörüngelerindeki değerlik elektronları ile atomlarından kolayca ayrılarak hareket etme yeteneğinin oluşmasını sağlamaktır. Dolayısıyla, kapalı bir yüzeye sahip olan iletken bir cisim elektrik alanı içerisine yerleştirildiğinde bu elektronlar, iletkenin içerisindeki elektrik alanı sıfırlanıncaya kadar hareket ettikten sonra yeniden dağılıma uğrar.

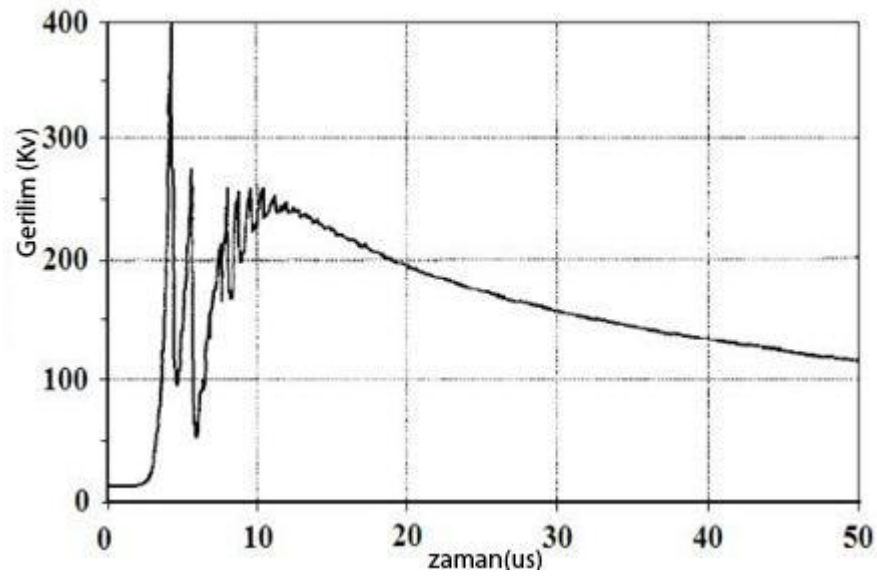
2.3. Yıldırım Dalgasının Benzetimi

Günümüzde, elektronik cihazlar için kararlı rejimde olan gerilim ve akım parametrelerine ihtiyaç duyulmuştur. Enerji iletim sistemlerine düşen yıldırım, normal gerilimin üzerinde aşırı gerilim oluşturmaktadır. Endüklenen bu aşırı gerilimlerden dolayı elektronik cihazlar zarar görmektedir. İletim hatlarına yıldırım düşmesi sonucu oluşan aşırı gerilimlerin belirlenmesi, iletim sistemlerinin korunması için önemlidir. Yıldırım çarpma biçimine göre; iletim hatlarına çarpanlar (direk çarpma) ve iletim sisteminin yakınlara çarpanlar (dolaylı çarpma) olarak

isimlendirilir [22]. Yıldırım dalgası bilgisayar simülasyonlarında bir akım dalgası olarak modellenmektedir. Ölçüm sonucu elde edilen dalga ile bunun rampa fonksiyonlar ile benzetim modeli Şekil 2.2’de verilmiştir. Yıldırım dalgasının dikey bir iletkene düşmesi sonucunda elde edilen yıldırım dalgası ise Şekil 2.3’de verilmiştir. Bu dalga şekli deneysel ölçüm sonucunda elde edilmiştir.

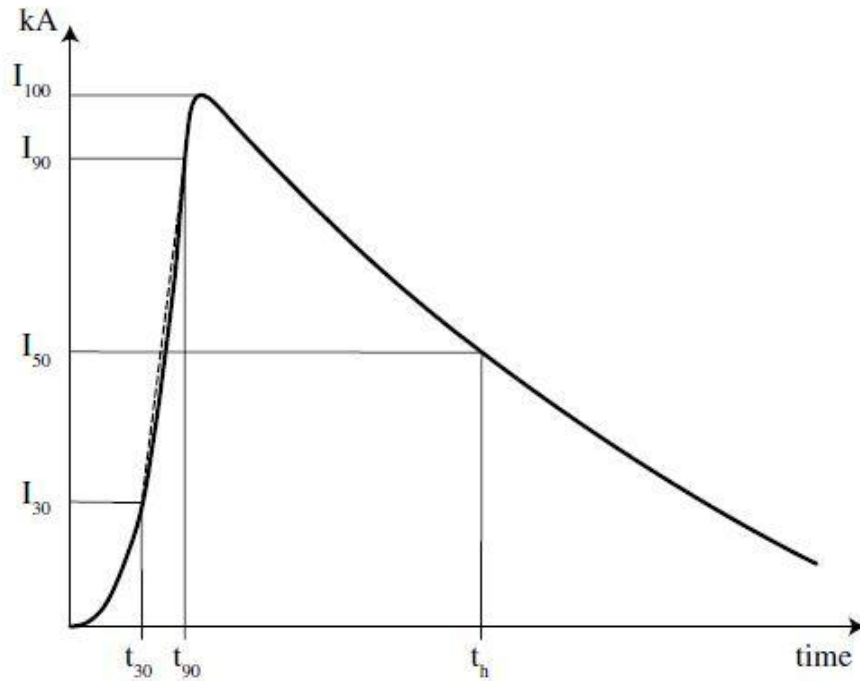


Şekil 2.2. Yıldırım Dalgasının Gerçek Modeli ve Rampa Fonksiyonlar ile Benzetimi



Şekil 2.3. Yıldırım Dalga Modeli [23]

Yıldırım dalga modeli gerilim olarak kaynak empedans etkisinin değerine göre değişmektedir. Mamiş vd.'nin yapmış olduğu çalışmada yıldırımın bir dikey iletken düşmesi halinde meydana gelen gerilimlerde, unifrom hat modeli ve nonuniform (uniform olmayan) hat modelinin etkisinin olduğu görülmüştür. Yıldırım akımı iki ayrı biçimde; hızlı yükselme zamanına sahip rampa fonksiyonu ve çift katlı üssel fonksiyonla ifade edilir [24]. Şekil 2.4'te ise yıldırım dalgasının belirli zaman süresinde elde edilen yıldırım dalgası akım değerleri görülmektedir. Bu şekilde I_{100} maksimum akım genliği, $t_{30} - t_{90}$ yükselme zamanı, t_h yarılanma süresidir.



Şekil 2.4. Yıldırım Darbe Formu

Yıldırım dalgası genellikle çift katlı üssel fonksiyonla ifade edilmektedir. Çift üssel fonksiyon:

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2,2)$$

Şeklindedir ve burada I_0, α, β uygun katsayılardır. Bunun sonucunda bir iletim hattına düşen ve karakteristik empedansı Z_0 yıldırım akımı için gerilim dalgası ise aşağıdaki gibi olur:

$$u(t) = \frac{1}{2}Zi(t) = \frac{1}{2}ZI_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) = U_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2,3)$$

2.4. Yıldırım Risk Hesabı

Pratikte Faraday kafesi hesaplamaları için, yıldırım risk hesabı yapılması gerekmektedir. Yıldırım risk hesabı ile ilgili standartlar bulunmakta olup bu alanda en iyi çalışmanın Norm NFC 17102 standartları olduğu görülmüştür [12]. Yıldırım risk hesabı için gerekli karakteristikler şunlardır:

Etkili Eşdeğer Alan (A_e): Yıldırımdan korunacak yapının boyutlarının belirtilmesi gerekmektedir. Yükseklik, genişlik ve en ölçütlerine göre etkili eşdeğer alan aşağıdaki eşitliğe göre çıkartılır [12]:

$$A_e = LW + 6H(L + W) + 9\pi H^2 \quad (2,4)$$

Burada A_e eşdeğer alan, L ve W yapı genişliği ve boyu, H yapı yüksekliğidir.

Yıldırım Yoğunluğu (N_g): Yıldırımlı gün sayısına göre yoğunluğunun belirtir ve aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanır [12]:

$$N_g = 0.04N_k^{1,25} \quad (2,5)$$

Burada N_g yıldırım yoğunluğu ve N_k yıldırımlı gün sayısıdır.

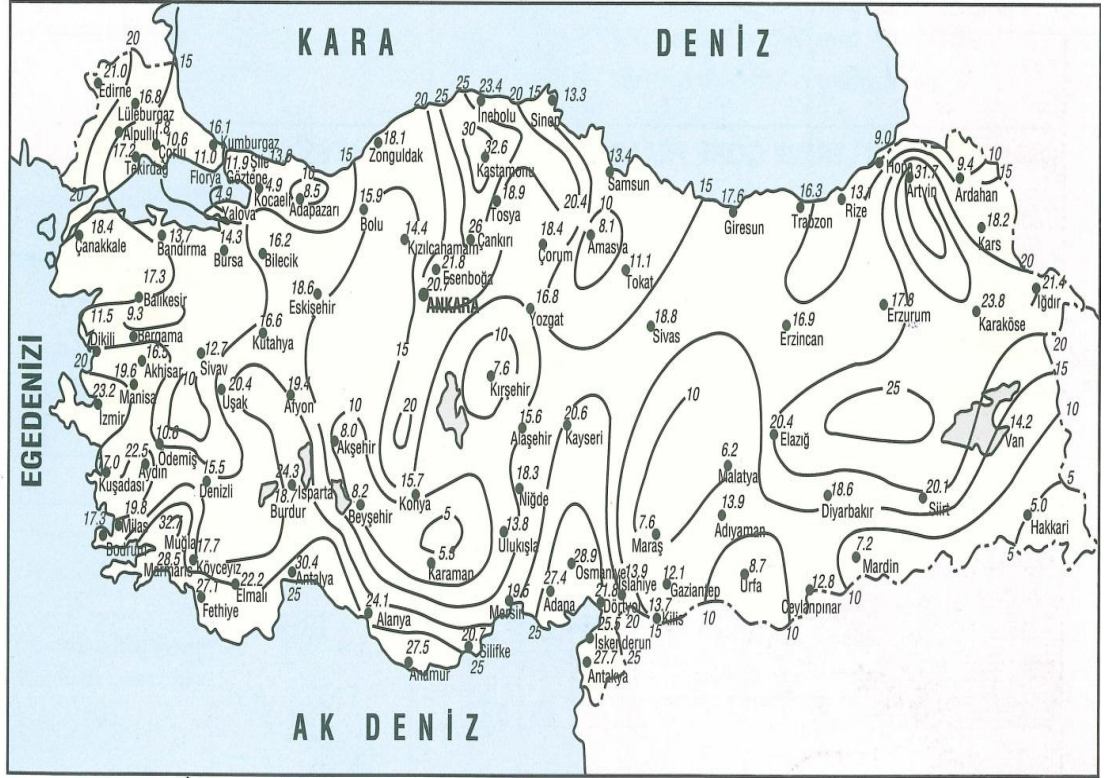
Tesis İçin Beklenen Yıldırım (N_d): Koruması yapılacak olan sistem için beklenen yıldırımlı gün sayısıdır ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır [12]:

$$N_d = N_g A_e C_1 10^{-6} \quad (2,6)$$

Burada N_d beklenen yıldırımlı gün sayısı, N_g yıldırım yoğunluğu, A_e eşdeğer alan ve C_1 yapının çevrel katsayısıdır.

Yıldırım Günlük Sayısı (N_k): Korunacak yerleşim yerinin yıldırım günlük sayısı olur.

Şekil 2.5'teki haritadan yararlanılarak belirlenir.



Şekil 2.5. Türkiye'nin Yıllık Ortalama Oranlı Günlük Sayısı [25]

Onaylı Yıldırım Darbe Sayısı (N_c): Onaylı yıldırım darbe sayısı; korunacak yapının karakteristiklerine göre hesaplanır [12]:

$$N_c = \frac{5.5 \times 10^{-3}}{C} \quad (2,7)$$

şeklinde bulunur. Burada N_c onaylı yıldırım darbe sayısı ve C çevresel katsayıdır.

Çevresel Faktörler (C faktörleri): Korunacak yapının özelliklerinde belirtilen çevresel ve yapısal faktörlerdir.

a. Çevresel katsayı

Yapılarla ilgili çevresel katsayılar Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çevresel C1 Katsayıları

0,25	Yapı aynı & daha yüksek ağaç ve yapılar
0,5	Yüksekliği az olan yapılarla çevrili
1	En yakın yapıya mesafesi 3H uzaklıkta
2	Bölge de en yüksek

Burada H:yapı yüksekliğidir.

b. Yapısal katsayı

Korunacak yapının yapı maddesinin özelliğine göre koruma değeri Çizelge 2.2. kullanılır.

Çizelge 2.2. Çevresel C2 Katsayıları

Yapı-Çatı	Metal	Kiremit	Yanıcı
Metal	0,5	1	2
Tuğla/Beton	1	1,5	2,5
Tutuşabilir	2	2,5	3

c. Yapı katsayısı

Korunacak yapının yanıcı, tutuşabilir, değerli, parlayabilir olma özelliğindeki koruma değerleri Çizelge 2.3'teki gibi alınmalıdır.

Çizelge 2.3. Çevresel C3 Katsayıları

0,5	Değersiz-Yanıcı olmayan
1	Normal-Yanıcı
2	Değerli-Yanıcı
3	Parlayıcı-Yanıcı

d. Yapı doluluğu

Korunacak yapının insan trafiğiyle ilgili olan durumu Çizelge 2.4 'te ifade edilmiştir.

Çizelge 2.4. Çevresel C4 Katsayıları

0,5	Personelsiz bina
1	Normal kalabalık
3	Tahliye zorluluğu

e. Yapı kullanımı

Yapının sürekli kullanıma ve değerliliğine göre aldığı değerler Çizelge 2.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.5. Çevresel C5 Katsayıları

1	Sürekli kullanımı yok-Çevrede değersiz
5	Sürekli kullanımda-Çevrede değersiz
10	Çevrede değerli

$$\text{Etkinlik (E)} = 1 - \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (2,8)$$

Yukarıdaki çizelgelerde verilen koruma ölçütlerine göre denklem 2.8 ile hesaplanmasıyla E (Etkinlik) değeri ortaya çıkmakta ve bu değere göre yapının Faraday kafes tipi, aralığı ve iletkenlerin iniş aralıklarını belirlenilmesi aşamasıdır. Faraday kafesi, E etkinlik eşdeğerine göre Çizelge 2.6'dan faydalanılarak Faraday kafesinin koruma sınıfı belirlenmektedir.

Çizelge 2.6. Etkinlik Eşdeğerleri

Etkinlik	Koruma seviyesi	Kafes Aralığı	İniş aralığı
$E > 0,98$	SEVİYE 1+Ek önlemler	5X5	10m
$0,95 < E < 0,98$	SEVİYE 1	5X5	10m
$0,90 < E < 0,95$	SEVİYE 2	10X10	15m
$0,80 < E < 0,90$	SEVİYE 3	15x15	20m
$0 < E < 0,80$	SEVİYE 4	20X20	25m

3. FARADAY KAFESİ VE MODELLEME

Ağ biçiminde kaplanmış iletken teller ve topraklanmış bir kafesle yıldırımdan koruma sağlanmış olur. Ağ ve gözlü yapı dış elektromanyetik alanların dışarıdan içeriye geçirgenliği zorlaştırır. Ağ gözleri boyutları ve frekans, elektromanyetik dalgalara karşı geçirmezlik sağlanmasında daha etkili olabilir.

3.1. Faraday Kafesinin İletim Hatları ile Modellenmesi

Mamiş vd. Faraday kafesi kısa iletim hatları ile oluşturdukları modelde kafesin farklı noktalarından gerilim veya akım vererek bu sonuçları karşılaştırmışlardır [10].

Bu çalışmada uygulanan akım ile kritik noktalarda elde edilen gerilim ve gerilimin zamana bağlı olarak sönümü verilmiştir.

Enerji iletim hatlarına düşen yıldırımdan dolayı etkilenen elektrik direklerindeki yıldırımın analizi, ilk olarak elektromanyetik alan teorisi kullanılarak elde edilmeye çalışılmıştır. Sargent vd.'leri yapmış oldukları çalışmada, iletim hattı direğinin biçimini boyutsal olarak modellemiş ve hesaplama yöntemini bu modellemeye göre uygulamışlardır [26].

Rakov yıldırım dalga hızı ile ilgili yapmış olduğu çalışmada negatif ve pozitif çarpma hızı ayrımını yapmıştır [27]. Negatif dönüş vuruş hızının ilk ve sonraki her iki iniş için yüksekliği genellikle azaldığı sonucuna varılmıştır.

Mota vd.'leri, iletim hatlarında nonuniform modelde karakteristik empedansı analitik metotları kullanarak karşılaştırmışlardır [28]. Uniform ve nonuniform

hatlarda iletim hattı boyunca rezistans, endüktans, kapasitans ve kondüktans olmak üzere dört temel elektriksel karakteristik kullanılmaktadır [29]. Yapılan incelemede Faraday kafesinin dikey iletkenlerinin nonuniform hat modeli ile modellenmesinin daha uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Uniform ve nonuniform hat modelleri ile ilgili detaylar sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

3.1.1 Hat Modelleri

Yıldırım darbesinin analizinde dikey konumdaki iletkenler için nonuniform hat modeli, yatay konumdaki iletkenler için ise uniform hat modelleri kullanılmaktadır [10,22,23].

3.1.1.1 Uniform hat modeli

Enerji iletim hatlarıyla ilgili Telegrapher denklemleri çözümü aşağıdaki şekildedir [32]:

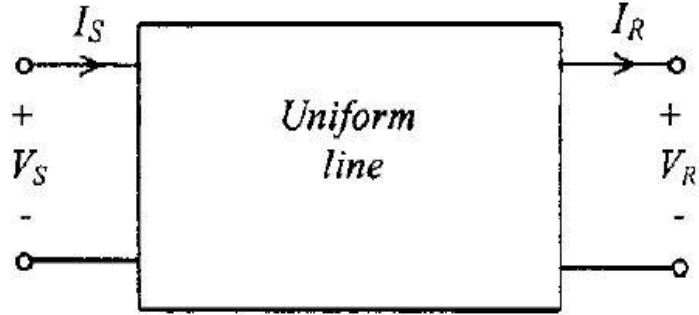
$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = ri(x,t) + l \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (3,1)$$

$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = gv(x,t) + c \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (3,2)$$

Burada gerilim ve akım dalga yayılımı hat boyunca (x noktasında) rezistans (r), endüktans (l), kapasitans (c) ve kondüktans (g) ile değişir. (3,1) ve (3,2) denklemlerinin uniform hatlardaki Şekil 3.1'deki uç gerilim ve akım frekans düzleminde çözümü aşağıdaki gibidir [30]:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_0 \sinh \gamma l \\ Z_0^{-1} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3,3)$$

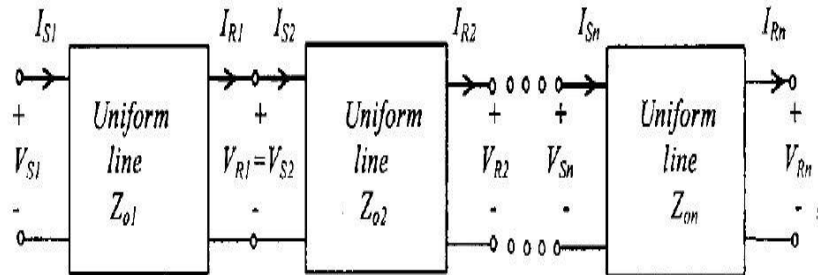
Yukarıdaki denklemde l toplam uzunluk, Z_0 ve γ kompleks karakteristik empedans, yayılma sabiti, V_S, V_R uç nokta gerilimleri ve I_S, I_R uç nokta akımlarıdır. Yayılım sabiti ve karakteristik empedans birim uzunluğa düşen parametreler cinsinden $\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)}$, $Z_0 = \sqrt{Z/Y} = \sqrt{(r + j\omega l)/(g + j\omega c)}$ dir.



Şekil 3.1. Uniform Hat Parametreleri

3.1.1.2 Nonuniform hat modeli

Dikey iletkenler için daha güvenilir sonuç alınması amacıyla uniform olmayan hat modelleri kullanılmaktadır. İletkenler ile ilgili çalışmalar daha çok enerji nakil hatları kapsamında olduğundan dolayı direk modeli olarak nonuniform hatlar kullanılmıştır. Kawai tarafından yapılan çalışma, yatay ve dikey iletkenlerle ilgili önemli çalışmalardan biridir [31]. Bu çalışmada iletkenin karakteristik empedansı ile dalga yayılım hızı değişimi hakkında tespitlerde bulunulmuştur. Nonuniform hatların modellenmesi uniform hat modellerin Şekil 3.2'deki gibi birbirine eklenmesi ile bulunabilir. Bu şekilde uç denklemlerin her kısmı için kayıp ve frekans bağıllığı daha kolay bir yolla elde edilir.



Şekil 3.2. Nonuniform Hat Parametreleri [29]

Dikey iletkenlerin analizinde kullanılan nonuniform hat modeli için elektromanyetik geçici rejim analiz programları tercih edilmektedir [22]. Dikey iletkenler için nonuniform hatların modellenmesi uniform hatların ardışık bağlantısı ile de bulunabilir [32]. Bu şekilde uniform olmayan hattın uç denklemleri ve böyle bir hattı kapsayan sistemin cevabı Laplace dönüşümü ile daha kolay bulunur. Bu tekniği uygulamalı için Nonuniform hatlarda i . bölümünün uç denklemleri

$$\begin{bmatrix} V_{Si} \\ I_{Si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_i l_i & Z_{0i} \sinh \gamma_i l_i \\ Z_{0i}^{-1} \sinh \gamma_i l_i & \cosh \gamma_i l_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Ri} \\ I_{Ri} \end{bmatrix} \quad (3,4)$$

şeklinde yazılır. Burada $\gamma_i = \sqrt{Z_i Y_i}$ i bölümünün yayılım katsayısı, $Z_{0i} = \sqrt{Z_i / Y_i}$ i . bölümünün karakteristik empedansı, l_i $x = x_i$ 'den başlayıp $x = x_{i-1}$ 'de biten bölümün uzunluğu, $Z_i = r_i + sl_i$ i . bölüm seri empedansı, $Y_i = g_i + sc_i$ ise aynı bölümün şönt admintansıdır. Bu denklemlerin s-domendindeki sistem cevabı ters Laplace dönüşümü ile zaman domenine dönüştürülebilir [33]. Dolayısı ile hat ortasında elde edilecek gerilimin s-domendeki ifadesi:

$$V_S = \frac{x}{y} I \quad (3,5)$$

şeklindedir. Burada $x = Z_0 / \sinh \gamma l$ $y = 1 / \cosh \gamma l + Z_0 / (2Z \sinh \gamma l)$ ile ifade edilir.

Bu durumda, alıcı ucu boşa olan hattın sonundaki gerilim ise,

$$V_R = \frac{V_S}{\cosh \gamma l} \quad (3,6)$$

olarak bulunur.

Dikey iletkenlerde karakteristik empedans değeri önemli parametrelerden biridir. Dalga empedansı ile Wagner ve Hileman dikey bir silindirde akım dalgasının cevabını analiz etmiştir ve bu çalışmada dikey silindir için dalga empedansı aşağıdaki gibi hesaplanır [44]:

$$Z_0 = 60 \ln \left[\sqrt{2} \left(\frac{ct}{r} \right) \right] \quad (3,7)$$

Burada c ışık hızı, t zaman, h iletken yüksekliği, silindir yarıçapıdır ve direkte üst noktasında oluşan maksimum gerilimde $t = 2h/c$ 'dir. Bu yaklaşım iletim hatlarına uygulandığında dalga empedansı:

$$Z_0 = 60 \ln[\sqrt{2}/S] \quad (3,8)$$

olarak elde edilmiştir. Dikey iletken hatlar için üssel nonuniform hat modeli kullanılmaktadır [22]. Bu değişim üssel fonksiyon olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$Z_x = 150 e^{qx} \quad (3,9)$$

Burada x toprağa giden iletkenin topraktan yüksekliği, q iletkenin yüksekliği ile ilgili sabit ve Z_x dikey iletkenin karakteristik empedansı 150Ω ile 220Ω arasında değişecek şekilde alınmaktadır. [34]. Denklemdaki q katsayısı üst ve alt sınır değerlerinden faydalanılacak h uzunluğundaki bir iletken için

$$q = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{Z_{üst}}{Z_{alt}}\right) \quad (3,10)$$

şeklinde bulunur. Faraday kafesin yatay iletkenlerin karakteristik empedansları [11]:

$$Z_0 = 60 \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \quad (3,11)$$

Burada h iletkenin yerden yüksekliği ve r iletkenin yarıçapı şeklinde gösterilir.

Faraday kafesinde dikey iletkenler için uniform olmayan iletim hattı modeli kullanılmıştır. Bu modele göre tüm parça belirli eşit parçalara ayrılarak birbirinden farklı empedanslar elde edilir. Uniform olmayan iletim hattı direk modeli temel alınarak hesaplanır. Kafese uygulanan akım üssel fonksiyon olup matematiksel olarak [10]:

$$i(t) = 1,0177(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3,12)$$

burada $\alpha = 1,5 \cdot 10^4 s^{-1}$ ve $\beta = 6 \cdot 10^6 s^{-1}$ alınabilir.

3.2. Faraday Kafesinin Ağ Gözlerinde Potansiyel Dağılımı

Kenarları belli olan bir iletkenin etrafındaki elektriksel akı yoğunluğu:

$$D = -\varepsilon \frac{dV}{dx} \quad (3,13)$$

şeklinde bulunur. Burada D elektrik akı yoğunluğu, ε materyal geçirgenliği ve V elektrostatik potansiyeli ifade eder. Poisson denklemi iki eksenli olarak yazıldığında

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (3,14)$$

denklemi elde edilir.

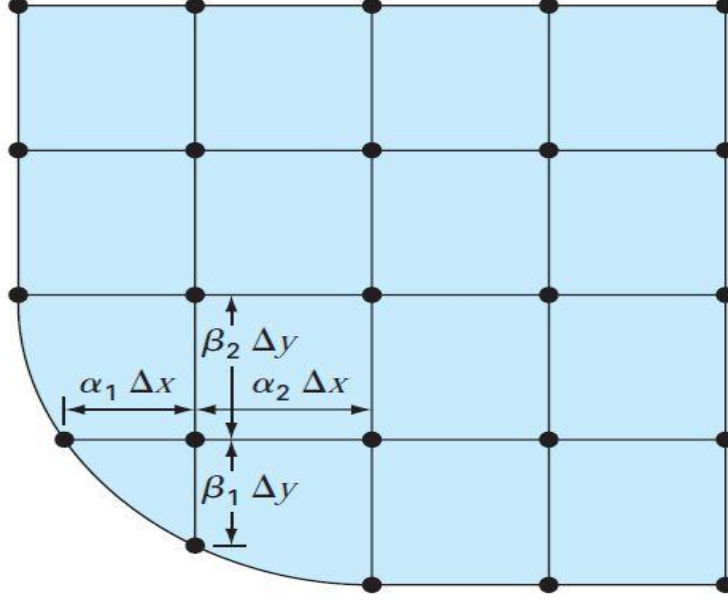
Burada ρ_v hacimsel yük yoğunluğu ve ε materyal geçirgenliğini gösterir. Hacimsel yük akışı olmadığında $\rho_v = 0$ olacaktır. Dolayısıyla

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (3,15)$$

olur. Kenarları bilinen bir sistemin iç noktasında herhangi bir noktanın gerilimi belirlemek için aşağıdaki eşitlik kullanılabilir [25]:

$$\frac{2}{\Delta x} \left[\frac{V_{i-1,j} - V_{i,j}}{\alpha_1(\alpha_1 + \alpha_2)} + \frac{V_{i+1,j} - V_{i,j}}{\alpha_2(\alpha_1 + \alpha_2)} \right] + \frac{2}{\Delta y} \left[\frac{V_{i,j-1} - V_{i,j}}{\beta_1(\beta_1 + \beta_2)} + \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j}}{\beta_2(\beta_1 + \beta_2)} \right] = 0 \quad (3,16)$$

Denklem 3.16'teki parametreler Şekil 3.3'te gösterilmiştir. 3.16'teki denklem ile Faraday kafesinin bir ağ gözünde oluşan potansiyel değerleri bulunabilir.



Şekil 3.3. Noktasal Yük Dağılımı [25]

4. TOPRAKLAMA DİRENCİNİN VERİMİNİ ARTTIRMA YÖNTEMLERİ

Bir iletkenin, elektrik tesislerinde aktif olmayan bölümlerinin çeşitli büyüklüklerde iletken ile elektrota bağlanıp toprakla birleştirilmesine topraklama denir. Elektrik tesisi işletmesi esnasında gözle görülemeyecek kadar iletken üzerinden küçük akımlar geçmektedir. Yıldırım çarpması sonucunda ise iletkenin üzerinden daha büyük bir akım geçmektedir.

Elektrik sistemlerinin devamlılığını sağlamak ve insan hayatını güvenceye almak amacıyla, elektriksel sistemlerde gerilim altındaki kısımlar yalıtılır. İletkenlerin yalıtkanlıkları zamanla bozulur, bu yüzden toprakla direk temas oluşturması gerekmektedir.

Topraklama, insanların ve diğer canlıların tehlikeli gerilime maruz kalmasını önlemek için ihtiyaç duyulan bir tesistir.

Topraklamanın amaca göre:

1. Koruma Topraklaması
2. İşletme Topraklaması
3. Yıldırım Topraklaması şeklinde sınıflandırılabilir.

Bir yapıya uygulanan Faraday kafesi için iniş iletkenlerinin topraklanması gerekmektedir. İyi bir Faraday kafesi, direnci düşük bir topraklama ile mümkündür. Topraklama derin topraklama, şeritle topraklama ve ızgara topraklama gibi yöntemlerle yapılmaktadır.

4.1. Topraklama İle İlgili Temel Terimler

Aktif kısımlar, gerilim altında bulunan üzerinden küçük veya büyük ölçüde akım geçen iletkenlerdir.

Gövde, işletme esnasında üstünde akım veya gerilim olmayan, hata durumunda gerilim ve akım oluşan kısımdır.

Toprak, dünyanın doğal yapısını teşkil eden maddedir. Elektrik direnci çok küçük olup 0,05 Ohm/km civarındadır. Genellikle bu direnç değeri ihmal edilir. Nemle karışık, killi, kumlu, humuslu toprak veya nemle birlikte toprak, kum, çakıl, taş ve bunların karışımıdır [13].

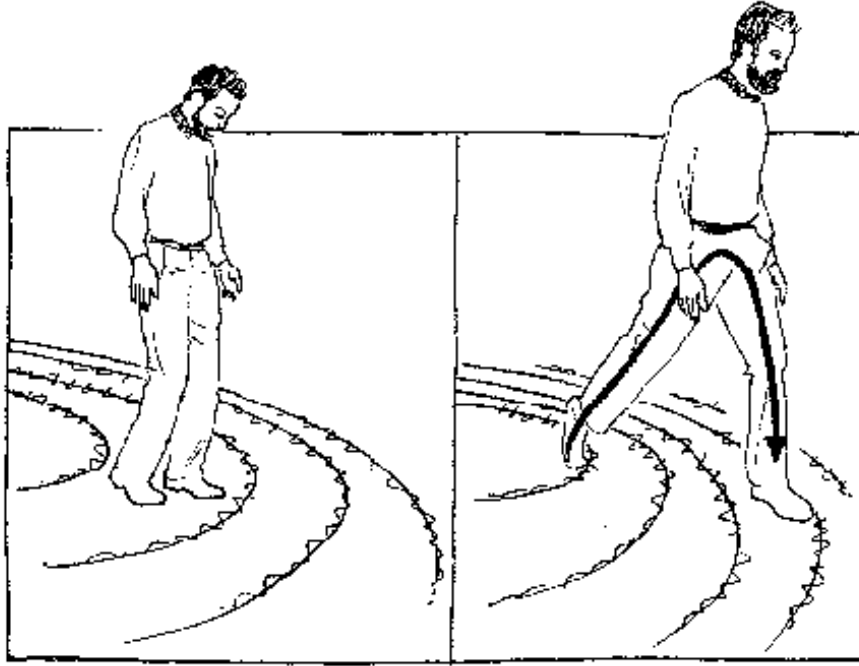
Topraklama, topraklanacak olan iletken kısımların birleştirip toprağa bağlanmasıdır.

Topraklayıcı, yer altında bulunan tel veya levha biçimindeki iletkenlere denir.

Toprak özgül direnci, dünyanın doğal içeriğini oluşturan toprağın özgül elektrik direncidir.

Topraklama direnci, herhangi bir topraklama tesisi ile belirli bir mesafede bulunan referans toprak arasında ölçülen direnç değeridir.

Adım gerilimi, herhangi bir topraklanmış maddeye temas olmadan, bir kişinin iki ayağı arasındaki 1 m mesafede oluşan yüzeydeki potansiyel farkı, adım gerilimi olarak tanımlanır. Şekil 4.1’de adım gerilimi gösterilmiştir. Alçak gerilim tesislerinde pek etkisi görülmemesine rağmen, yüksek gerilim tesislerinde insan ve hayvan hayatı bakımından önemli bir tehlike oluşturabilir. Yıldırımın toprağa boşalması sonucunda adım gerilimi yüzünden oluşan farklı potansiyellerden dolayı canlılar zarar görmektedir.



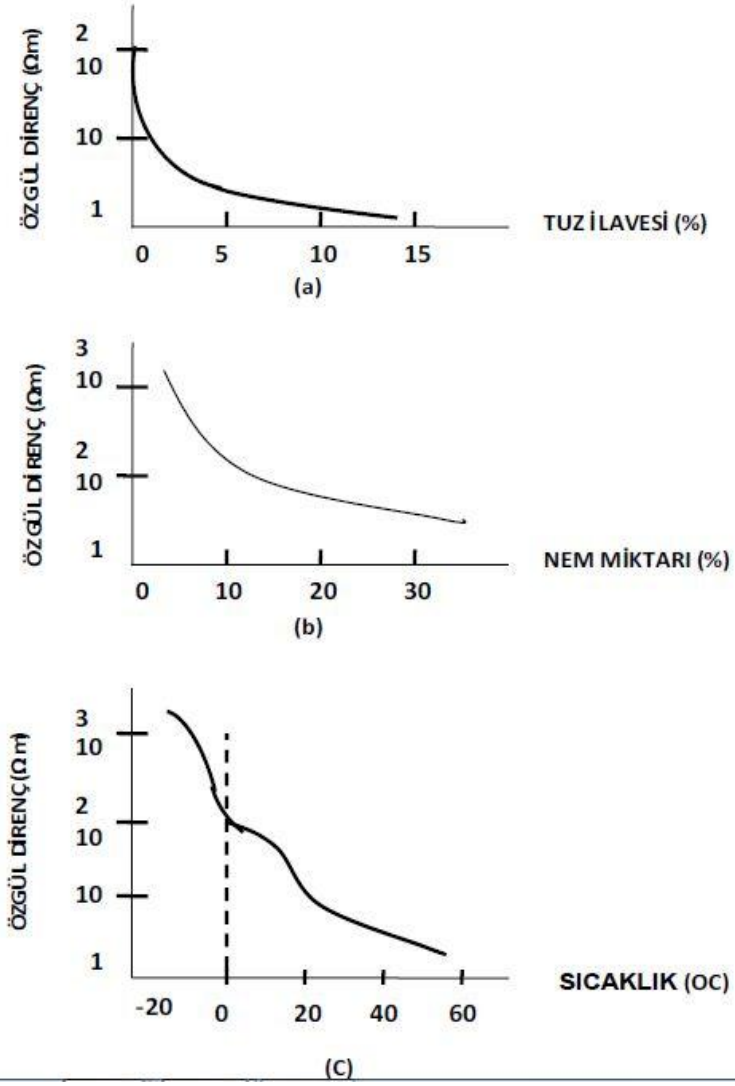
Şekil 4.1. Adım Gerilimi [35]

4.2. Topraklama Direnci Düşürme Yöntemleri

Elektrik sisteminin bulunduğu toprağın ve topraklayıcı olarak kullanılan malzemenin özelliğine göre topraklama değeri çıkmaktadır. Genellikle topraklayıcı malzemenin şekli, cinsi ve toprağa gömülme yükseklikleri açısından topraklama sisteminde belirleyici rol oynamaktadır. Topraklama sisteminin kullanıldığı yerlerden biri ise enerji tesisleridir.

Düşük bir topraklama direnci, toprağın yapısına bağlıdır. İnsanların ve hayvanların bulunduğu alanlarda toprağa geçiş direncinin mümkün olduğunca düşük olması önemlidir.

Toprağın iletkenliği, temel olarak nem oranına bağlıdır. Şekil 4.2’te toprağın direncinin tuz, nem ve sıcaklığa göre değişimi gösterilmiştir. Mevsim koşullarının, yüzeysel katmanların özgül direnci üzerindeki etkisi, ortalama 1-2 m’ye kadar derinlikte etkili olmuştur. Bir metre derinlikteki toprakta nemli kış ile kuru yaz oranındaki değişme oranı 1’e 3 düzeyindedir [36].



Şekil 4.2. Toprağın Direncinin Tuz, Nem ve Sıcaklığa Göre Değişimi [32]

Presenter yaptığı çalışmada toprağın nem ve sıcaklığa göre etkisini inceleyip, toprak özgül direncinin nem ve sıcaklık artışına bağlı olarak azaldığını görmüştür [37]. Toprağın yapısı, toprağın nem tutuculuğunu veya elektrotlarla olan temasını etkilemektedir. Bazı toprak çeşitlerinin özgül dirençleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Toprak Çeşitlerinin Özgül Dirençleri [21]

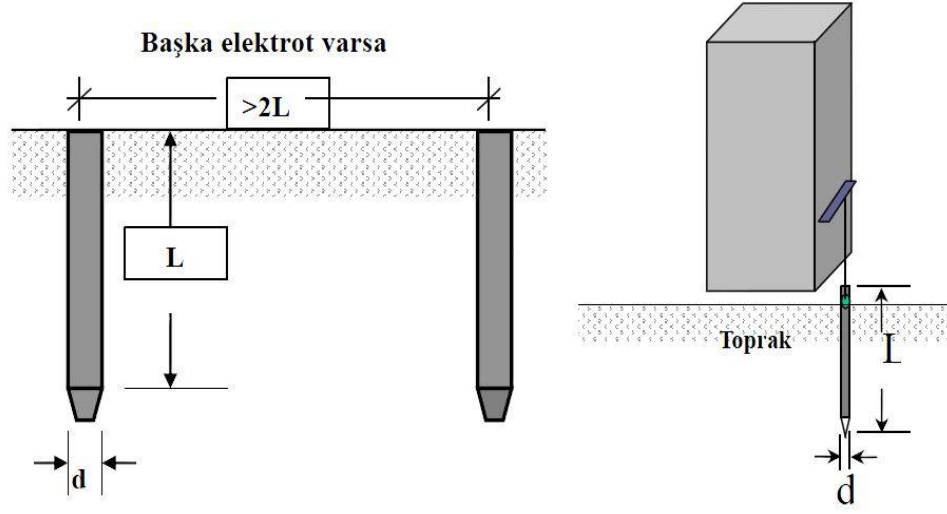
Toprağın cinsi	Özgül direnç(ohm.m)
Bataklı	1—30
Balçık, mil	20-100
Humuslu	10-150
Nemli turbo	5-100
Killi kumlar	50-500
Silisli kumlar	200-300
Çıplak taşlı toprak	1500-3000
Gevşek kalkerler	100-300
Sıkışık kalkerler	1000-5000
Çatlak kalkerler	500-1000
Kumtaşı	2000-3000
Granit	>50000
Buzultaş	>50000
Çimenle kaplı taşların	300-500
Kaya	>10000

Topraklama direnci düşürmek için:

1. Islak ve bataklık zemin
2. Kil, balçıklı toprak, sürülebilir toprak, killi toprak, az miktarda kum ile karışık killi toprak veya balçık
3. Rutubetli ve ıslak kum
4. Değişik oranlarda kum ile karışık kil veya balçık, çakıl ve taşları bulunan toprak çeşitleri kullanılmaktadır.

4.2.1. Derin topraklayıcılar

Topraklama tesislerinde topraklama direncini düşürmek için kullanılan yöntemlerden biri elektrot kullanmaktır. Elektrot (derin) ile topraklama sisteminde, topraklama direncini etkileyen faktörler; elektrotun boyu, elektrotun genişliği ve toprak özgül direncidir. Elektrotun boyunun arttırılması, elektrot çapının arttırılması ve düşük özgül direncine sahip toprak kullanmak, topraklama direncini düşürür.

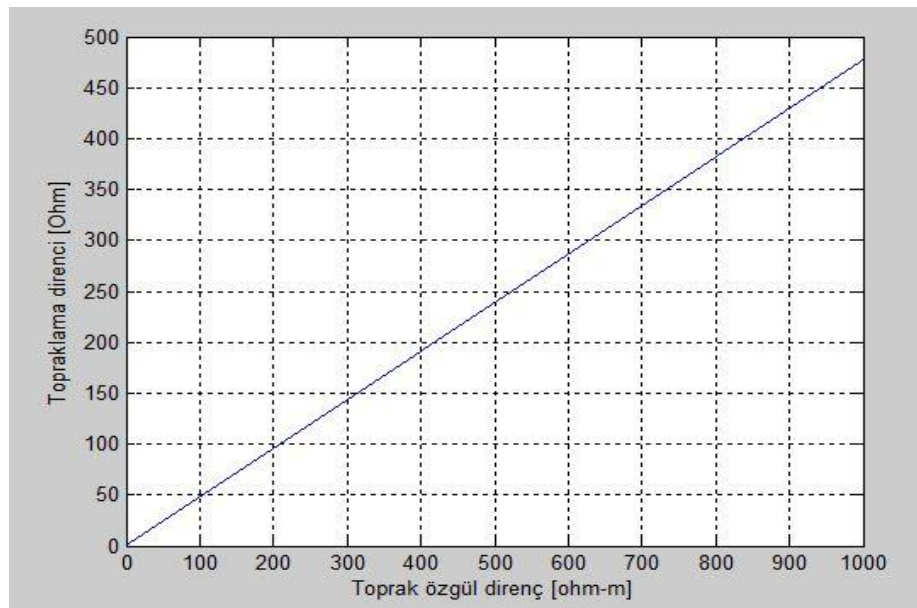


Şekil 4.3. Derin Topraklayıcılarda Elektrotlar [36]

Derin topraklama sisteminde topraklama direnci:

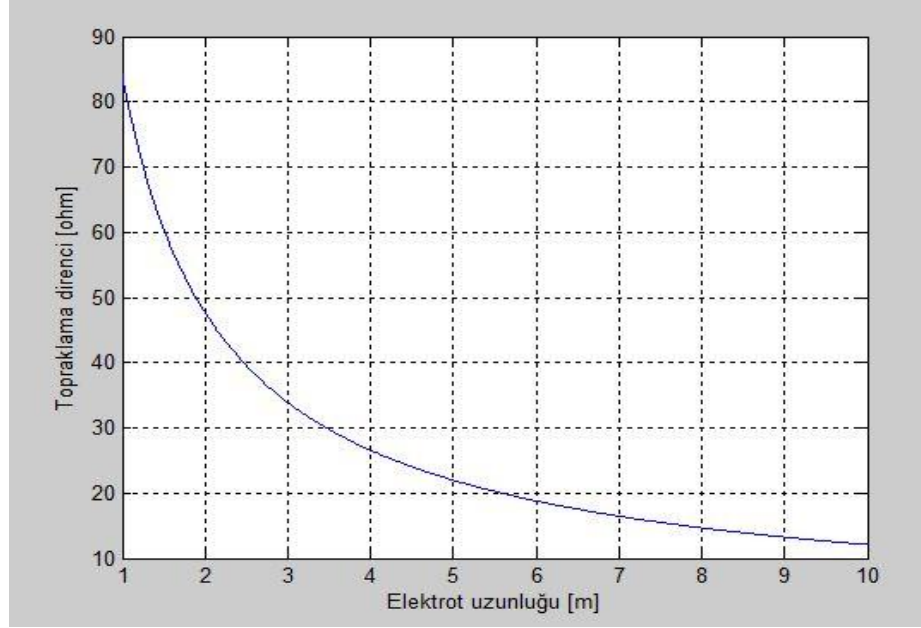
$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad (4,1)$$

kullanılarak bulunur. Burada d elektrotun çapı, L elektrotun uzunluğu, ρ toprak özgül direnci, R topraklama yayılma direncini göstermektedir. 4.1 denkleminde özgül direncin topraklama direncine etkisi Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Burada elektrot uzunluğu 2 m ve elektrot çapı 2 cm alınmıştır.

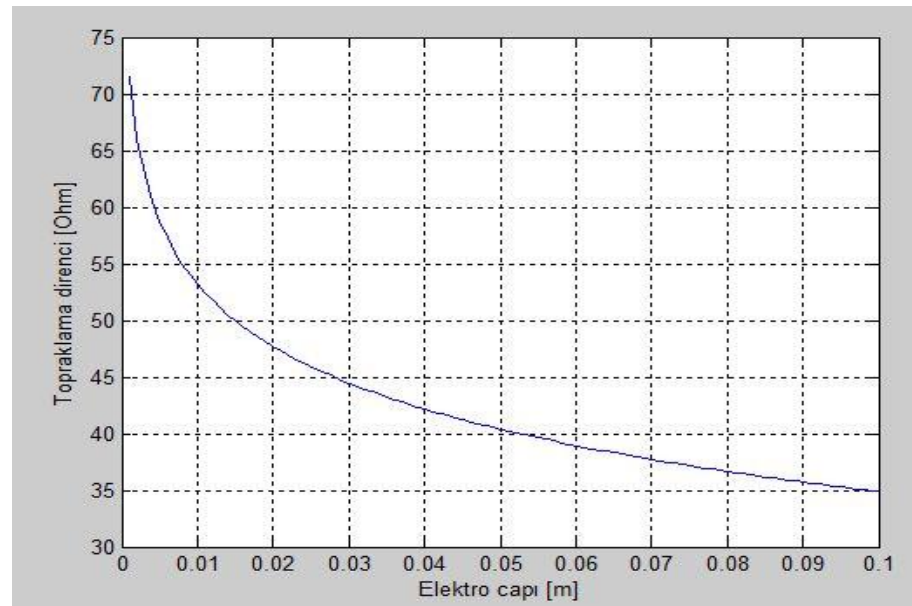


Şekil 4.4. Topraklama Direncinin Toprak Özgül Direncine Bağlı Olarak Değişimi

4.1 denkleminde elektrot uzunluğunun topraklama direncine etkisi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Burada toprak özgül direnci 100 ohm.m ve elektrot genişliği 2 cm alınmıştır. 4.1 denkleminde elektrot çapının topraklama direncine etkisi Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Burada toprak özgül direnci 100 ohm.m ve elektrot uzunluğu 2 m alınmıştır.



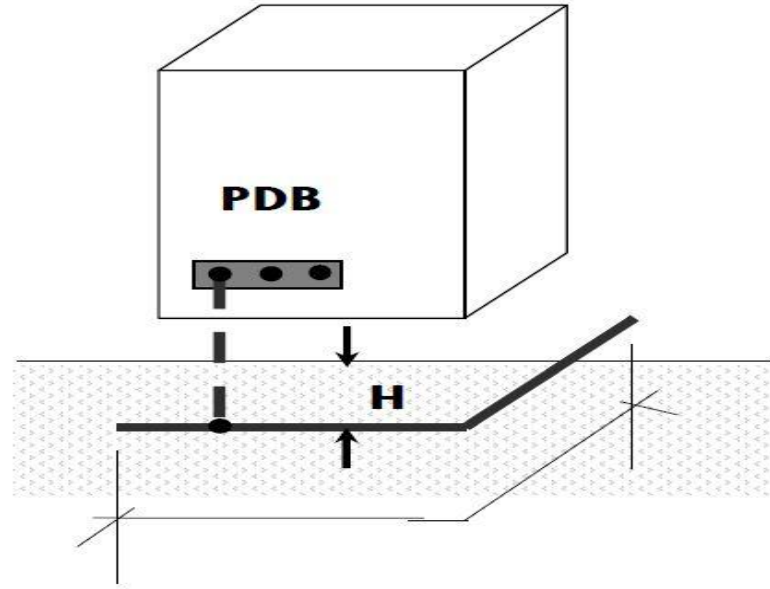
Şekil 4.5. Topraklama Direncinin Elektrot Uzunluğuna Bağlı Olarak Değişimi



Şekil 4.6. Topraklama Direncinin Elektrot Genişliğine Bağlı Olarak Değişimi

4.2.2. Şeritle yapılan topraklama tesisleri

Toprak seviyesinde şerit iletkenle yapılan topraklama yöntemidir. Toprak yüzeyinin belirli bir mesafe altında şerit iletkenler yerleştirilir. Şekil 4.7’de şerit topraklama yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Şerit Topraklama [36]

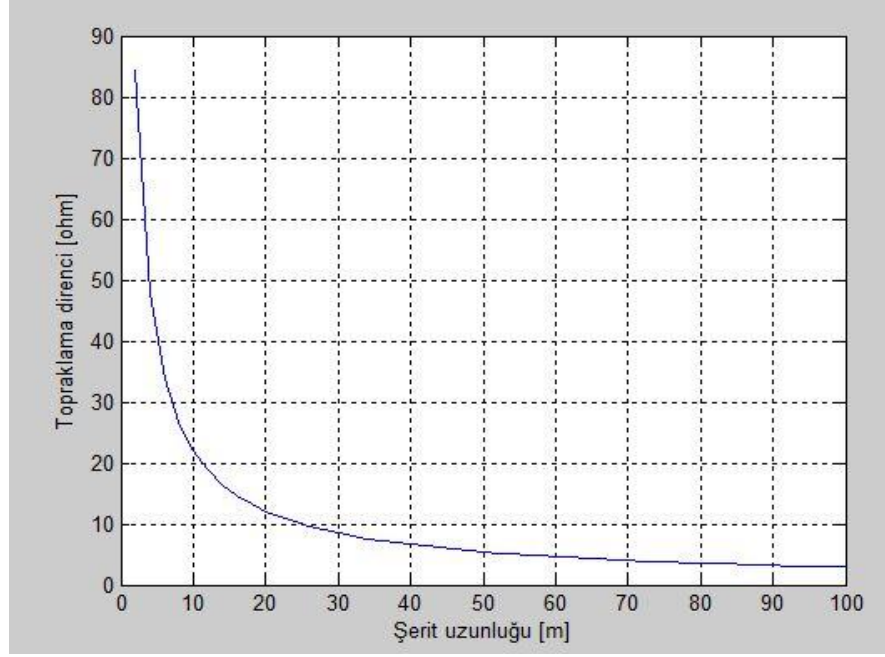
şerit topraklama yayılma direnci:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} \ln\left(\frac{2L}{d}\right) \quad (4,2)$$

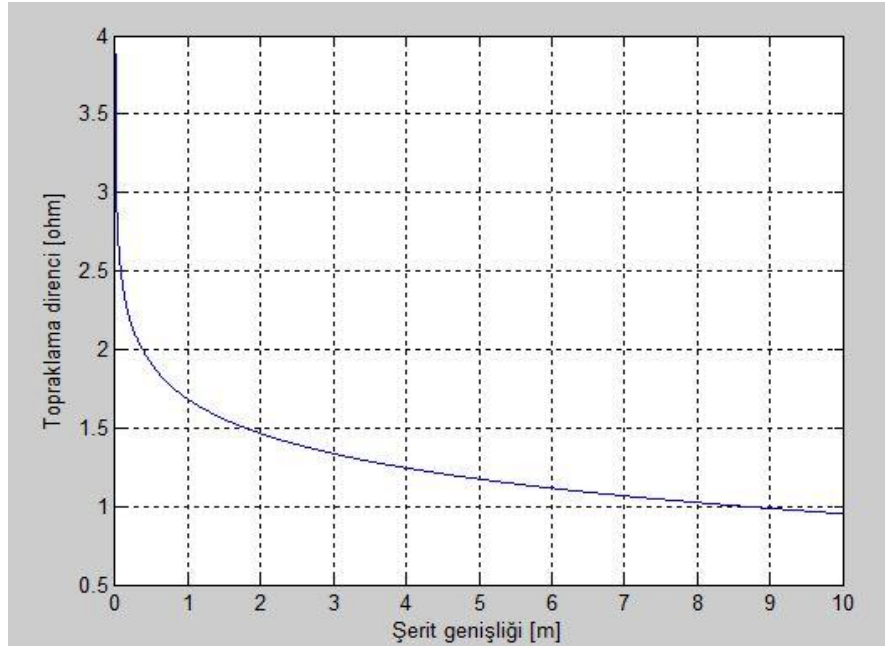
ile bulunur. Burada R şerit yayılma direnci, ρ toprak özgül direnci, D şerit çapı, L şerit uzunluğunu göstermektedir.

4.2 denkleminde şerit uzunluğunun topraklama direncine etkisi Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Burada topraklama özgül direnci 100 ohm.m ve şerit genişliği 2 cm olarak alınmıştır.

4.2 denkleminde şerit genişliği topraklama direncine etkisi Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Burada toprak özgül direnci 100 ohm.m ve şerit uzunluğu 100 m olarak alınmıştır.



Şekil 4.8. Topraklama Direncinin Şerit Uzunluğuna Bağlı Olarak Değişimi



Şekil 4.9. Topraklama Direncinin Şerit Genişliğine Bağlı Olarak Değişimi

4.2.3. Izgara topraklama sistemleri

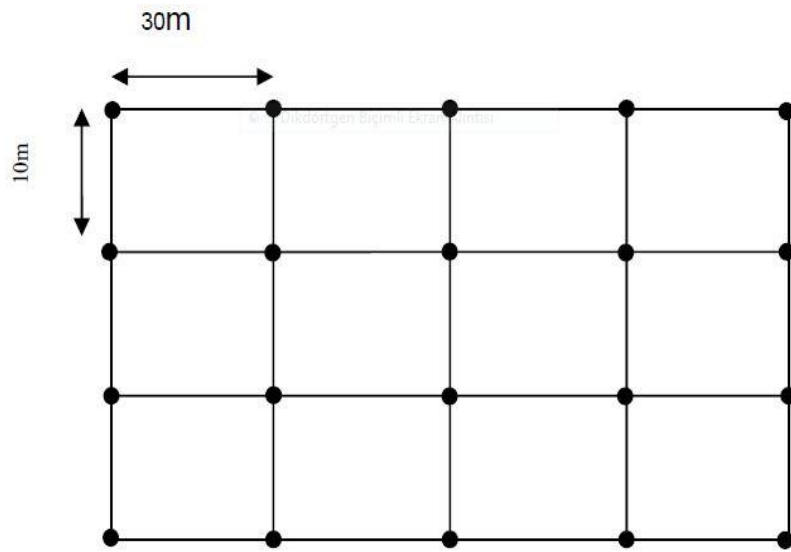
Genelde elektrik cihazlarının yoğun olduğu ve potansiyel farklarının düşük çıkması için tercih edilen topraklama türüdür. Çoğunlukla şalt sahalarında kullanılır. Ağ şeklindeki yapısından dolayı ızgara tipi topraklama da denir. Şekil 4.10'da ızgara topraklama yöntemi gösterilmiştir. Şalt sahasında tüm ekipmanlara tek tip topraklama yapılacağına bütün cihazlar bu topraklama ringine bağlanır.

Topraklama iletkenleri enine ve boyuna olmak üzere iki şekilde yapılır. Enine ve boyuna iletkenler Cadwell kaynağı ile bağlanılıp tam ağ sistemini oluşturarak, potansiyel farkı her yerde küçültülmeye çalışmaktadır. 60 cm'den fazla toprak altına ağ sistemi kurulması, yayılma direncini ve verimini artırmaktadır.

Izgara tipi topraklama sistemlerinde topraklama direncini etkileyen faktörler; toprağın özgül direnci, iletkenin boyu, ağın kapladığı toplam alan ve ağın toplam gömülme derinliğidir. Topraklama direnci Sverak denklemi kullanılarak bulunabilir [38]:

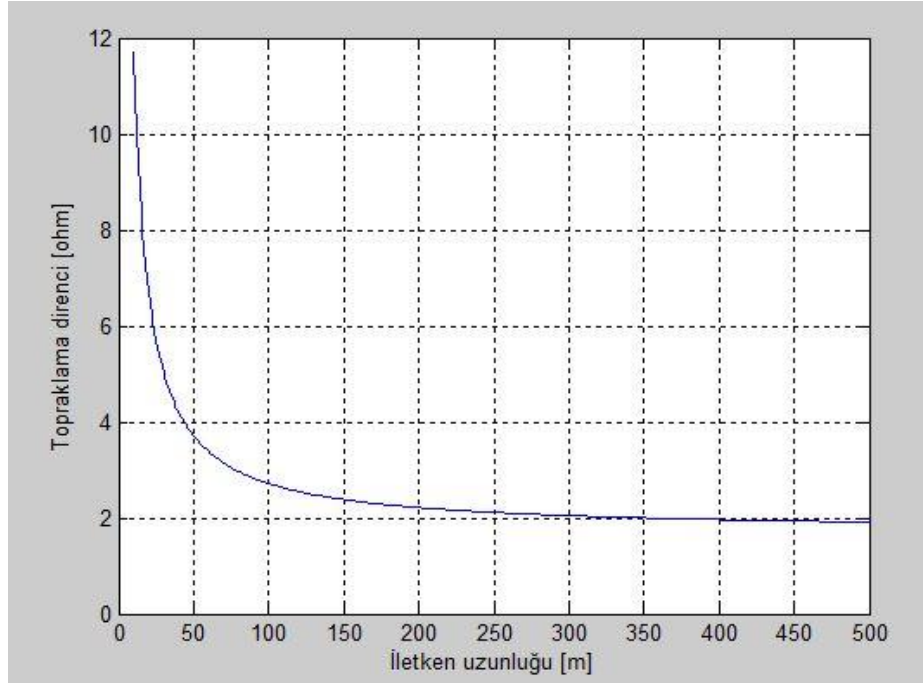
$$R = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (4,3)$$

Bu denklemde ρ toprağın özgül direnci, R topraklama direnci, L toplam iletken boyu, A ağın kapladığı toplam alan, h ağın toplam gömülme derinliğini göstermektedir.



Şekil 4.10. Ağ Tipi Topraklama

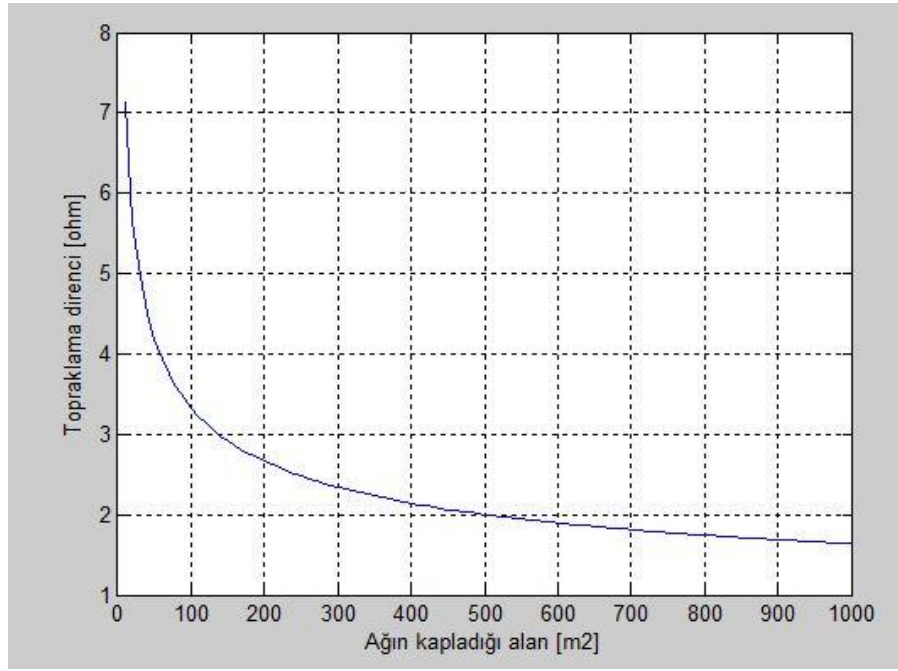
Ağ topraklama sisteminde iletkenin uzunluğu topraklama direncini düşürmek için önemli bir faktördür. 4.3 denkleminde iletken uzunluğunun topraklama direncine etkisi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Burada toprak özgül direnci 100 ohm.m, ağ derinliği 0,5 m ve ağın kapladığı toplam alan 625 m² olarak alınmıştır.



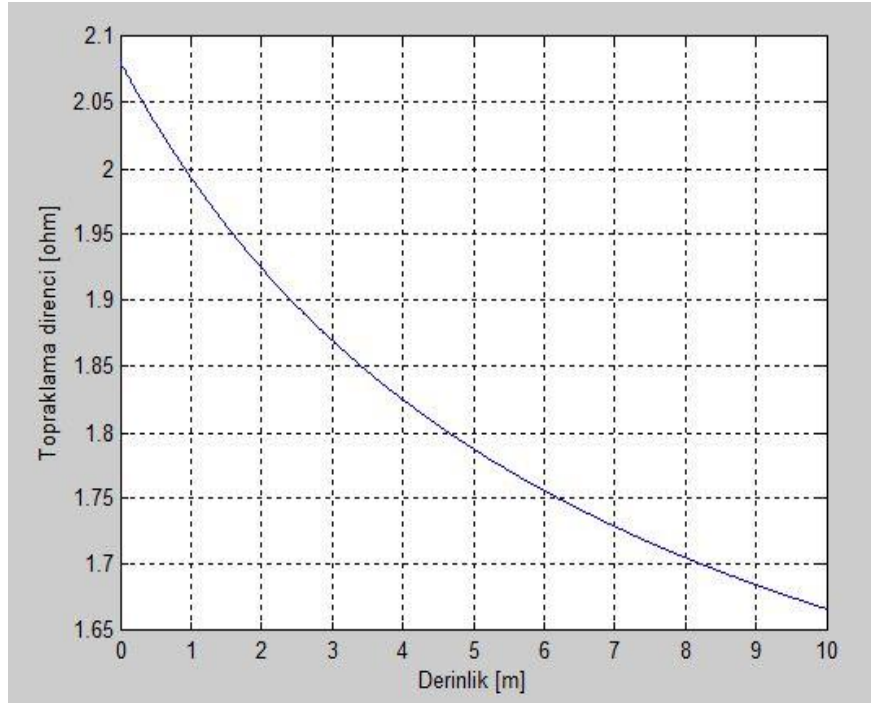
Şekil 4.11. Topraklama Direncinin İletken Uzunluğuna Bağlı Olarak Değişimi

Izgara tipi topraklama sisteminde iletken uzunluğunun yanı sıra topraklama ağının kapladığı alan önemlidir. 4.3 denkleminde iletken uzunluğunun topraklama direncine etkisi Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Topraklama direnci yüksek çıktığında toprak ilavesi çözüm olarak kullanılabilir. Burada toprak özgül direnci 100 ohm.m, iletken uzunluğu 150 m ve ağ derinliği 0,5 m alınmıştır.

Izgara tipinde topraklama sisteminde ağ sistemin kurulduğu derinlik önemlidir. 4.3 denkleminde ağ sisteminin derinliği topraklama direncine etkisi Şekil 4.13’te gösterilmiştir. Burada toprak özgül direnci 100 ohm.m, iletken uzunluğu 150 m ve ağın kapladığı toplam alan 625 m² olarak alınmıştır.



Şekil 4.12. Topraklama Direncinin Ağın Kapladığı Alana Bağlı Olarak Değişimi



Şekil 4.13. Topraklama Direncinin Ağın Derinliğine Bağlı Olarak Değişimi

4.2.4. Tabi topraklayıcılar

Suni topraklama yöntemi olarak adlandırılır. Tabi topraklayıcılara en güzel örnek olarak su şebekelerinde döşetlenen borular gösterebilir. Su borusu topraklayıcı olarak alçak gerilim tesislerinde kullanılmaktadır.

4.2.5. Özel topraklayıcılar

Fonksiyon bakımından koruma, işletme ve parafudur topraklaması için kullanılan topraklayıcılardır.

4.2.6. Birleşik topraklayıcılar

Küçük bir yayılma direnci elde etmek için farklı tip topraklayıcı malzemelerin birbirine paralel bağlanmasına birleşik topraklayıcı adı verilir. Bu topraklayıcı sistemleri; paralel topraklayıcılar, karma topraklayıcılar, kombine topraklayıcılar ve toplu topraklayıcılar olarak ayrılmaktadır.

4.3. Topraklama Direncinin Ölçülmesi

Toprak belirlenemeyen büyüklükte iletken bir kitledir. Bütün elektrik tesislerinin bulunduğu binaları veya açık hava tesislerini yapısında taşımaktadır.

Toprak öz direnci değişken nitelikte olup; $10 \Omega\text{-m}$ ile $10000 \Omega\text{-m}$ arasında olduğu gözlenmiştir [23]. Toprak öz direnci toprağın tipine, sıcaklığına, rutubetine ve tuz oranına bağlıdır. Her işletme için toprak elektrot direnç değeri toprak öz direncine bağlı olarak günlük ve mevsimsel olarak değişebilmektedir.

Topraklamanın elektrik güç sistemlerinde kullanılması ile beraber topraklama direncinin önemi artmıştır [39]. Topraklama direnci hesaplamaları genellikle toprağın belli bir direnç değerine sahip, sınırsız ve homojen olduğu varsayılarak yapılmaktadır. Direnç değerinde, söz konusu olabilecek küçük bir yanlışlık bile topraklama direncinin fiili direnç değerini önemli ölçüde etkileyebilir, bu sebeple toprak direncinin istenilen hassasiyette saptanması genellikle zorlaşır. Bu nedenle de, topraklama direncinin kesin bir şekilde formüllendirilmesi sadece basit yapılarıdaki toprak elektrotları için, toprak gerilimi ile toprak potansiyel dağılımı ve toprak akımı arasındaki ilişkileri göstermek için kullanılmaktadır. Geniş kapsamlı uygulamalar ve örgülü toprak elektrotları için yaklaşık değerler alınmaktadır [40].

Martinez topraklama elektrotunun ömrü üzerine yaptığı çalışmada, Antofagasta bölgesinde madencilik faaliyetlerinde bulunan bir bölgede çıkartılan kimyasal katkı maddelerinin topraklama elektrotlarına etkisi incelemiştir [41]. Bu çalışmada farklı kimyasallar küçük parçalar halinde birbirlerine eklenilerek üç parçaya ayrılıp her bir parçanın etkisi incelenmiştir. Elde edilen bu kimyasalların topraklama elektrotunun ömrünü uzattığını göstermiştir.

Topraklama direnci ölçümü değişik yöntemlerle ölçülmektedir. Topraklama direncinin ölçülmesinin nedenleri:

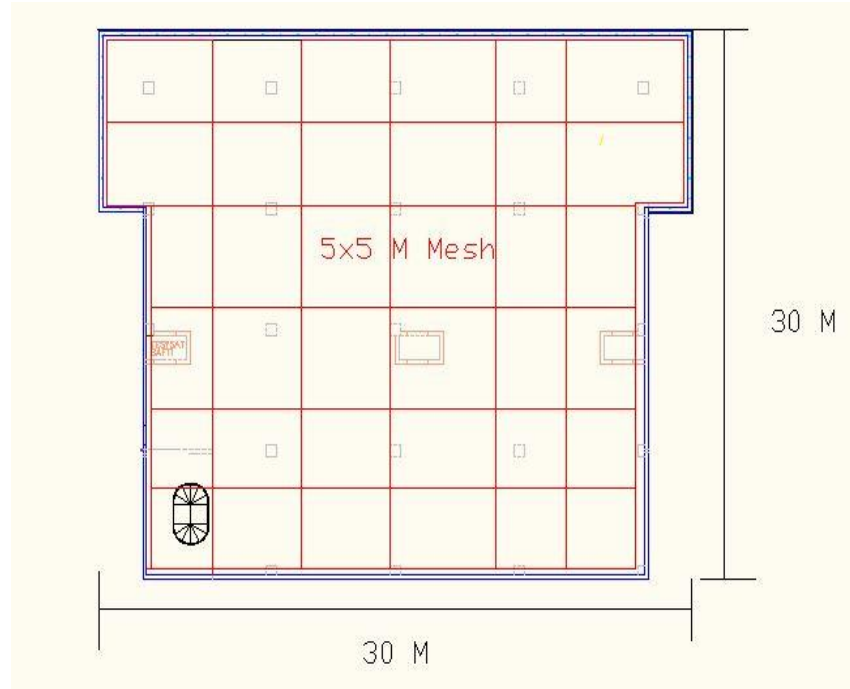
1. Topraklama sisteminin gerçek direncinin saptanması ve uygun değerlerinin kontrol edilmesi,
2. Topraklama tesislerinin yıldırım boşalmalarına karşı korumayı belirlemek,
3. Topraklama sistemi kurulurken hesapların denetlenmesi,
4. Topraklama sisteminde gerilim yükselmesinin ve değişimin saptanması,
5. Topraklama direncinin büyüklüğünde alınacak korumaların belirlenmesi şeklinde sıralanabilir.

5. UYGULAMALAR

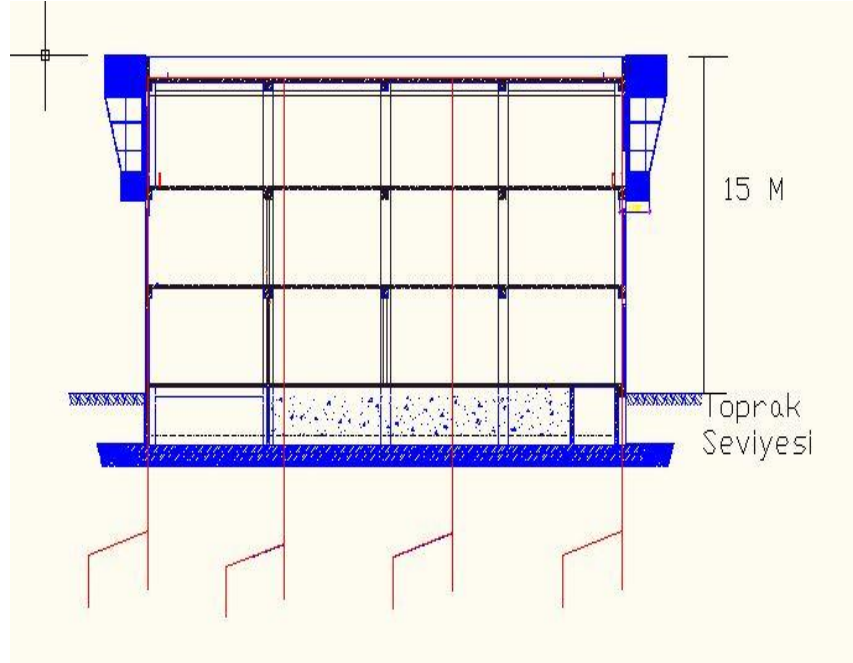
Bu çalışmada Faraday kafesinin iletim hatları ile modellemesi gerçekleştirilmiş, Faraday kafesinin ağ gözünde oluşan potansiyel dağılımı hesaplanmış ve derin topraklama sisteminde topraklama direncini düşürmeye yönelik çalışmalar verilmiştir.

5.1 Faraday Kafesinin Modellenmesi

Yıldırım risk hesabı yapılan ve Faraday kafesi kurulan bir yapının iletim hatları ile EMTP-ATP modeli gerçekleştirilmiştir. Bu yapıya yıldırım risk hesabına göre koruma sistemleri uygulanmış olup, bu koruma sistemleri 15x15, 10x10 ve 5x5 ağ gözlü kafeslerdir. Yapılan bu modellenme ile ağ gözleri boyutlarının etkisi incelenmiştir. Uygulama yapılacak bina boyutları genişliği ve uzunluğu 30 m olup Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Binanın yüksekliği 15 m olup yandan görünümü Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.1. 5x5 Ağ Gözlü Faraday Kafesi Uygulanmış Binanın Üstten Görünümü



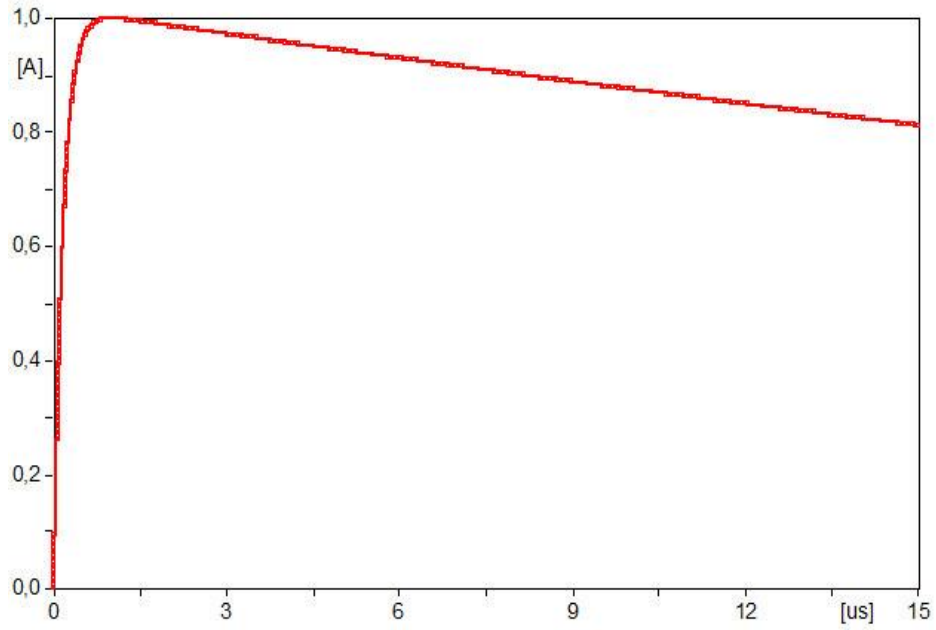
Şekil 5.2. 5x5 Ağ Gözlü Faraday Kafesi Uygulanmış Binanın Yandan Görünümü

Faraday kafesinin modellenmesi için dikey ve yatay iletkenlerin parametreleri Bölüm 3,1’de belirtildiği gibi hesaplanmıştır. Akım dalgası için 3,12’deki çift üssel fonksiyon kullanılmış olup bu denklem

$$i(t)=1,0177(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (5,1)$$

şeklindedir ve burada $\alpha = 1,5 \cdot 10^4 s^{-1}$ ve $\beta=6 \cdot 10^6 s^{-1}$ olarak alınmıştır.

Akım dalgasının biçimi Şekil 5.3’te görülmektedir.



Şekil 5.3. Akım Dalga Biçimi

Yatay iletkenler için uniform hat modeli kullanılmıştır. Kafes iletkeni olarak $1 \times 50 \text{ mm}^2$ bakır kullanılmış olup, iletim hatlarının karakteristik empedansı $Z_w = 60 \ln(30000/3,98) = 535,6 \Omega$ olarak elde edilmiştir.

Dikey iletkenler için nonuniform hat modelinin kullanılmasının daha uygun olduğu düşünülmüştür. Bu değişim üssel fonksiyon olarak ifade edilmiş ve hattın birim uzunluğunun yüksekliğe bağlı olarak değişmesinden dolayı tepe noktada $Z_x = 220 \Omega$ ve toprak seviyesinde $Z_x = 150 \Omega$ olarak seçilmiştir [42].

$$Z_x = 150e^{0,026x} \quad (5,2)$$

Bu hesaplar çerçevesinde Faraday kafesinin dikey iletkenleri üç bölüme ayrıldığında ve bu hat parçalarının empedansları için 5,2'deki denklem kullanıldığında empedans değerleri topraktan tepe noktasına sırasıyla $160,07 \Omega$, $182,29 \Omega$, $207,60 \Omega$ olarak elde edilmiştir. EMTP-ATP modelinde topraklama direnci 2Ω olarak alınmıştır.

5.2 ATP Programı

İletim hatlarının geçici durum analizi ve izolasyon koordinasyonu için birçok program kullanılmaktadır. Yıldırım düşmesi, arıza ve enerji verilmesi ile kesilmesi durumunda meydana gelen aşırı gerilimlerle ilgili çalışmalarda ATP programı yaygın olarak kullanılır [45]. İletim hatlarının kalıcı ve zaman-zaman mikro saniyelerden daha kısa bir zaman süresinde gerçekleşen olayların anahtarlama, yıldırım dalgası analizi vb gibi geçici durum analizlerinin yapılmasına olanak sağlamakta, dağılmış ve toplu parametrelili devrelerin matematiksel olarak modellenip, bilgisayarda simülasyonun yapılmasına imkan vermektedir. Elektromanyetik yanı sıra elektromekanikğin sayısal simülasyonunda kullanılan evrensel bir programdır. Bu dijital program sayesinde, karmaşık ağlar ve yapı kontrol sistemleri simüle edilebilir. ATP programı hesaplamanın yanı sıra modelleme ve ek önemli özelliklere sahiptir.

Çalışma ilkesi;

1. Entegrasyon trapez kuralı zaman domeninde sistem bileşenlerinin diferansiyel denklemleri çözmek,
2. Başlangıç koşulları kararlı durumunda, fazör çözüm tarafından otomatik olarak tespit etmek için veya daha basit bileşenlerine ayırmak,
3. Kontrol Sistemlerinin Geçici Analizi ve korona gibi doğrusal olmaya özelliklere sahip kontrol sistemleri ve bileşenleri modellemek,
4. Simetrik veya Simetrik Olmayan gibi arızalar, yıldırım dalgalanmaları dahil anahtarlama analizleri
5. Frekans tarama özelliğini kullanarak fazör frekans cevap hesapları,
6. Harmonik frekans tarama kullanılarak harmonik analizi (harmonik akım enjeksiyon yöntemi),
7. Dinamik sistemler de herhangi bir elektrik şebekesi olmayan kontrol sistemlerinin geçici analizi ve kontrol sistemi modellemede kullanılır.

ATP'nin uygulama alanlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır:

1. Yıldırım dalgaları analizi
2. Anahtarlama geçici rejimleri
3. İstatiksel ve sistematik uygulama
4. Makine uygulama

5. Geçici kararlılık
6. Trafo, Şönt reaktör/kapasitör anahtarlama
7. Harmonik analizi ve rezonanslar
8. Koruyucu cihaz testleridir.

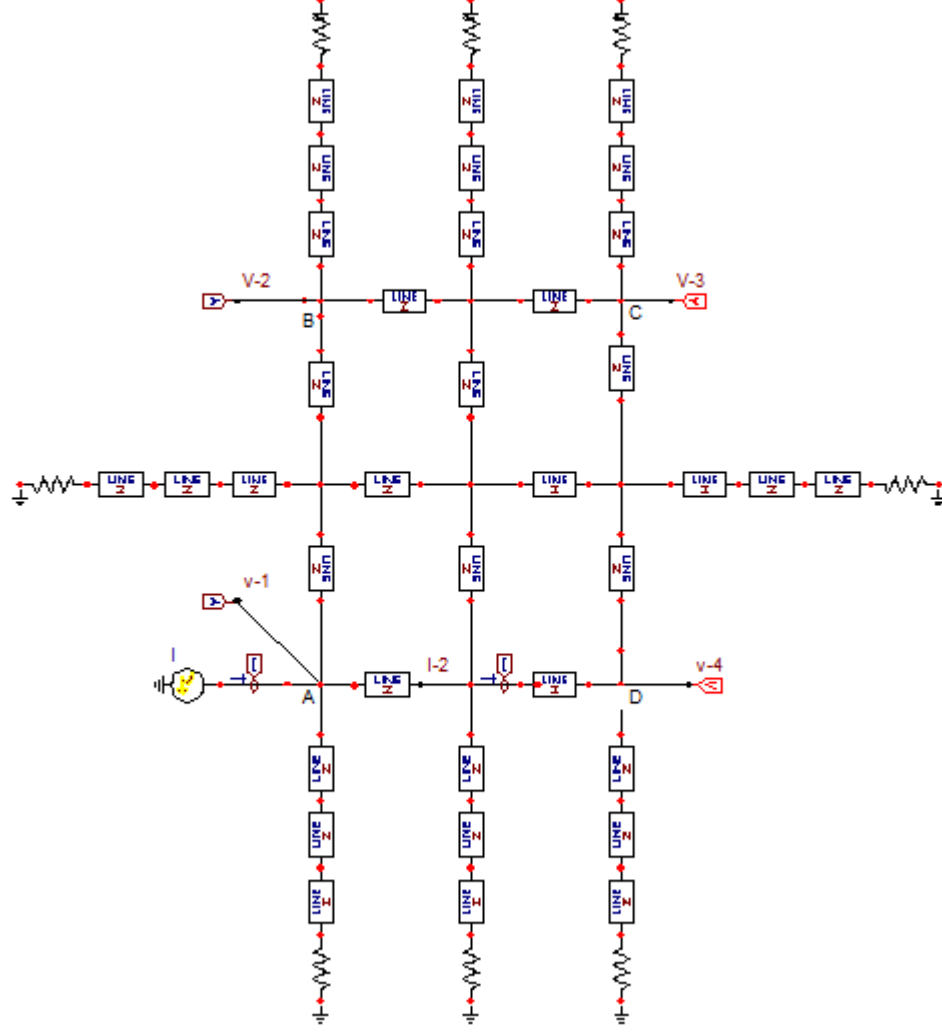
Modellenebilen güç elemanlarından bazıları;

- 1.Kuplajsız ve doğrusal R, L, C elemanları,
- 2.İletim hatları ve frekans bağımlı parametreler,
- 3.Nonlinear direnç ve endüktans, histeretik indüktör, zamanla değişen direnç modelleri,
- 4.Doygunluk ve histerezis dahil transformatörler, parafudrlar ve yaylar,
- 5.Sıradan anahtarlama, zamana bağımlı ve voltaj bağımlı anahtarlama, istatistiksel anahtarlama,
- 6.Vanalar (diyotlar, tristörler, triyaklar),
- 7.Analitik kaynakları, adım, rampa, sinüzoidal, üstel dalga fonksiyonları,
- 8.Döner makineler; 3-fazlı senkron makine, evrensel makine modelidir.

Yardımcı donanımları ile; frekansa bağlı hat model girdi verileri üretimi, Transformatörler için model verilerinin hesaplanması, doyunluk ve histeresiz eğrisi dönüşümleri ve veri modülleştirme gibi işlemleri yapmaktadır. ATP Windows ve Linux gibi işletim sistemlerinden kullanılabilir. ATP'nin ATPDraw, ATP kontrol merkezi, GTPPlot, PlotXY, WPCplot gibi grafiksel tabanlı analiz ek araçlarıdır.

5.3 EMTP-ATP simülasyon sonuçları

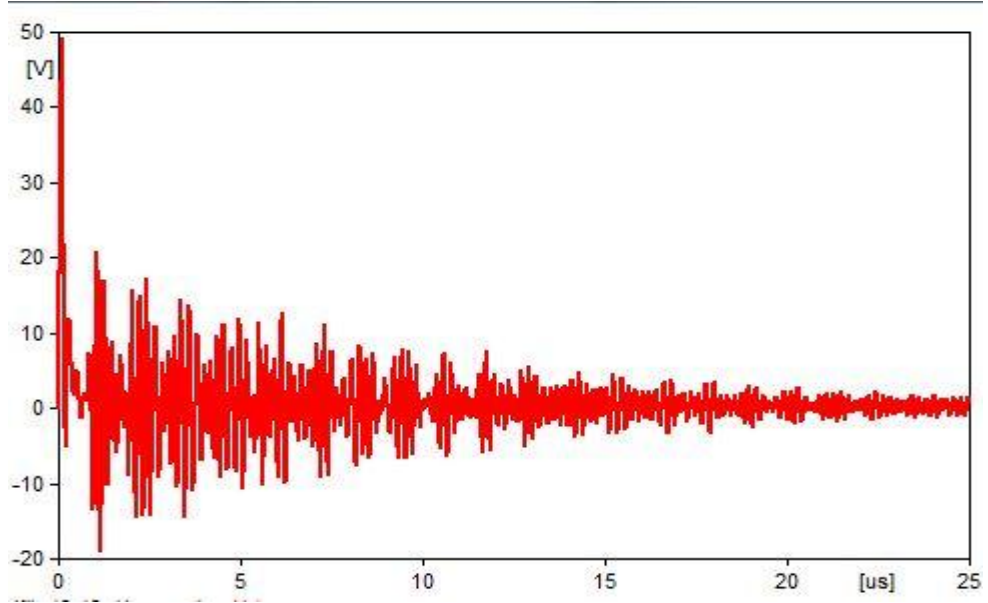
Şekil 5.4’de 15x15 ağ gözü ile koruma sisteminin EMTP-ATP modeli görülmektedir. Bu şekilde yıldırımı temsil eden akım kaynağı A noktasına bağlanmıştır.



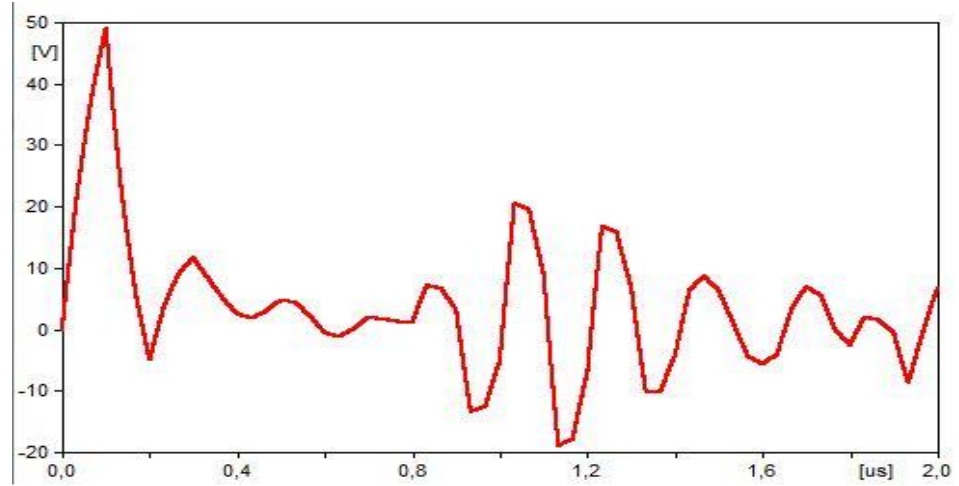
Şekil 5.4. 15x15 Ağ Sistemi EMTP-ATP Modeli

Faraday kafesine $i(t)=1,0177(e^{-1,5 \cdot 10^4 t} - e^{-6 \cdot 10^6 t})$ akım uygulandığında yıldırımın düştüğü noktada elde edilen yıldırım dalgası değişimi Şekil 5.5’te verilmiştir. Burada yatay iletkenlerin yüksekliği sabittir. Dikey iletkenlerin yüksekliği değişmekte olup direk modeli kullanılıp üç parçaya ayrılmıştır. Dikey iletkenler topraklama elektrotlarıyla toprağa gömülmüştür. Şekilden gerilim dalgasının 25 μs sonra büyük ölçüde azaldığı görülmektedir.

15x15 ağ gözlü Faraday kafesine yıldırım çarpmasından sonra gerilimin genliğinin düştüğü görülmektedir. Bu düşüş değeri kafesin ağ gözü sıklığına göre değişmektedir. 15x15 ağ gözlü Faraday kafesinde gerilimin $2\ \mu s$ için sönümü ise Şekil 5.6'daki gibidir. Şekilde yıldırım dalgasının tepe değeri 49.1 pu'dur. 20 kA tepe değerine sahip bir yıldırım dalgası için 981.4 kV gerilim ortaya çıkmaktadır.

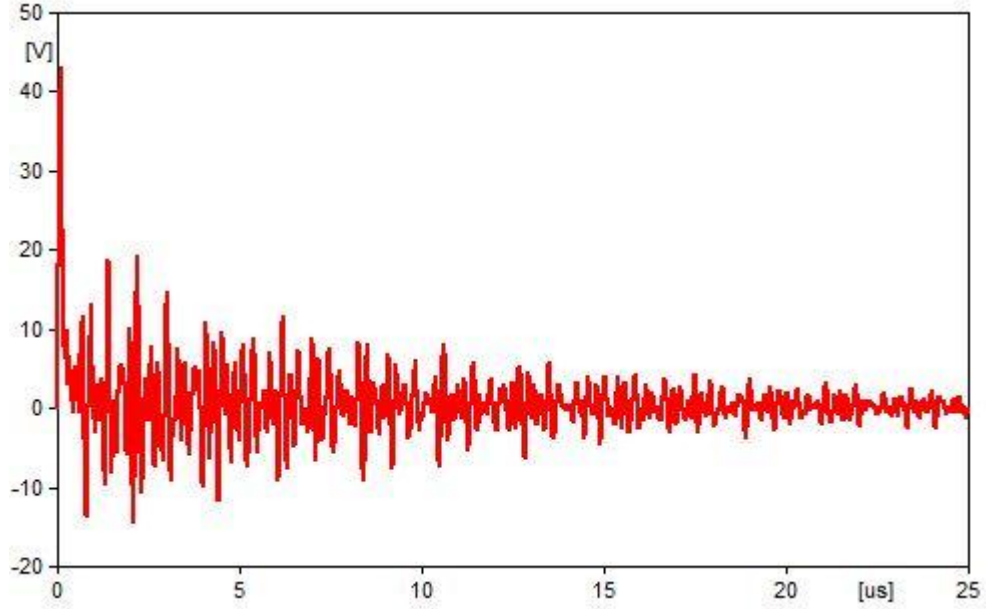


Şekil 5.5. 15x15 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-25 us)

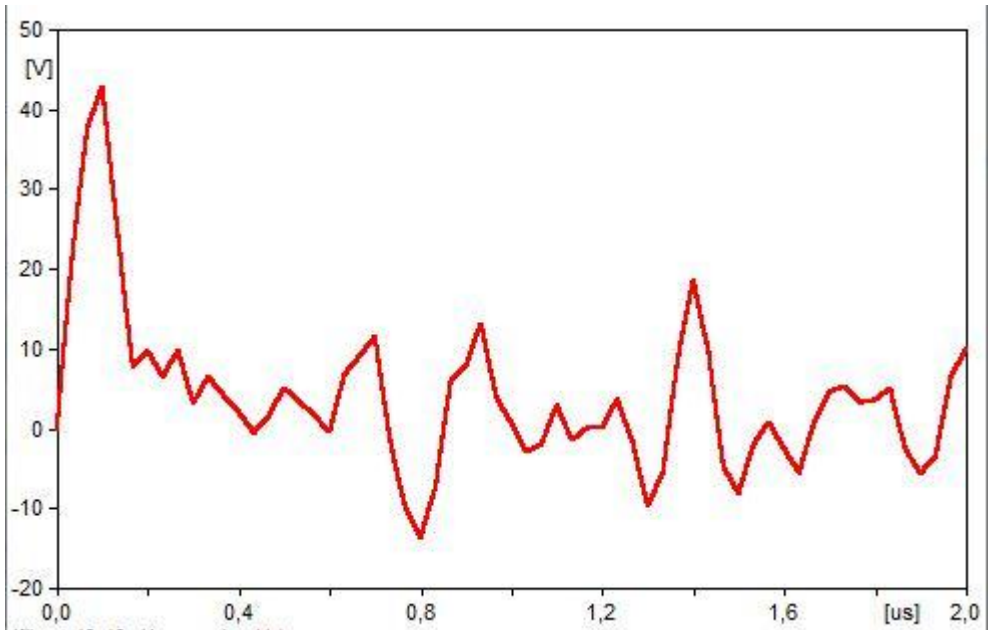


Şekil 5.6. 15x15 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-2 us)

Şekil 5.9’da 10x10 koruma sisteminde yıldırım dalgasının 2 μs sönümü gösterilmiştir. Şekil 5.9’daki dalgalanmalar bağlantı noktalarının yansımalarından dolayı oluşmaktadır.

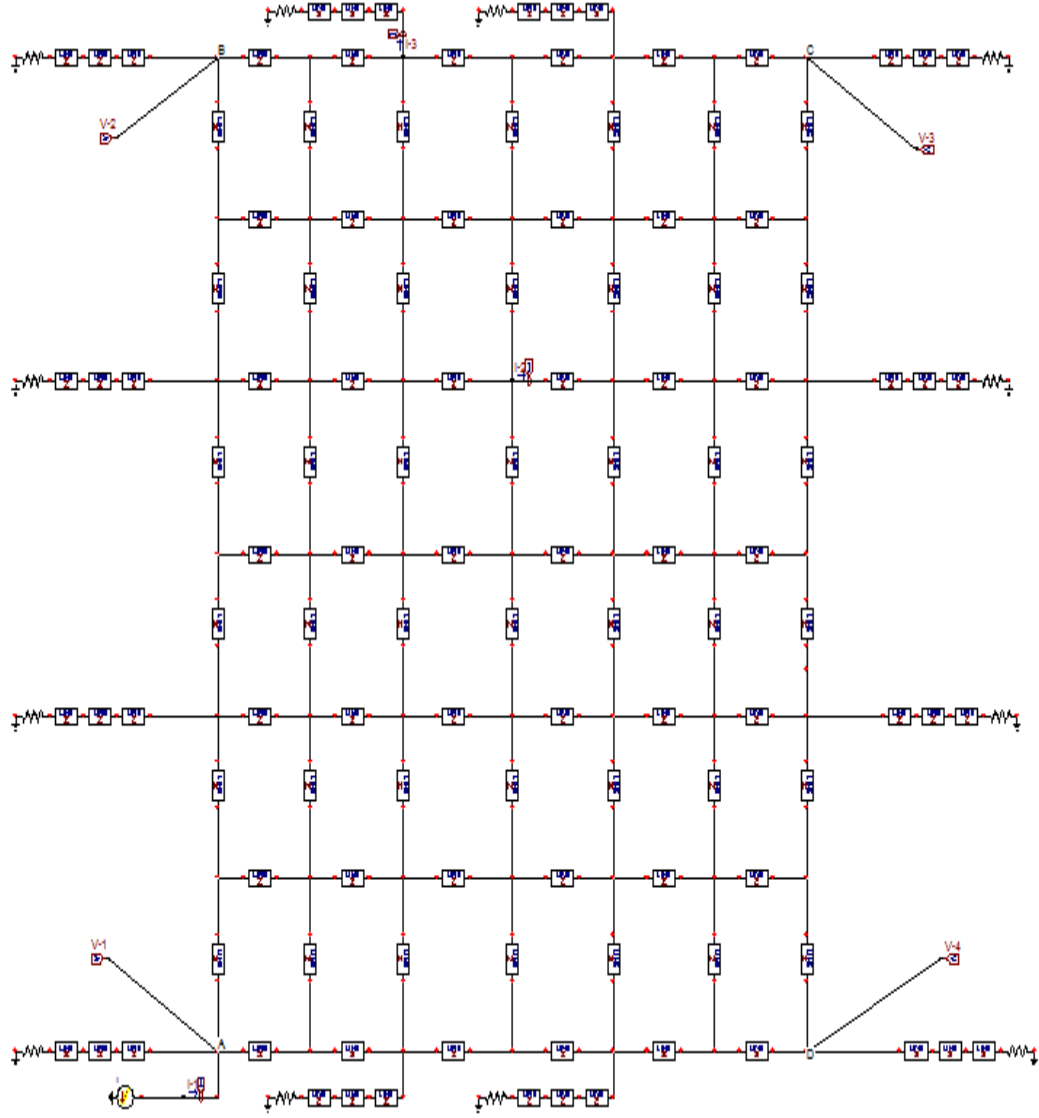


Şekil 5.8. 10x10 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-25 us)



Şekil 5.9. 10x10 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-2 us)

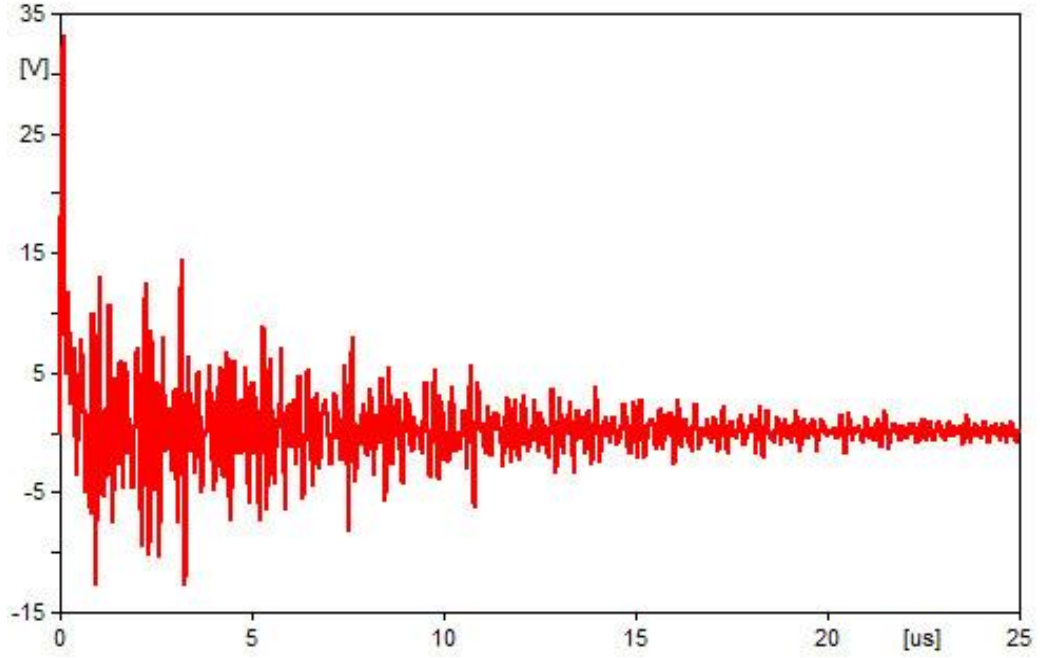
5x5 ağ gözü ile koruma sisteminin EMTP-ATP modeli Şekil 5.10'daki gibidir.



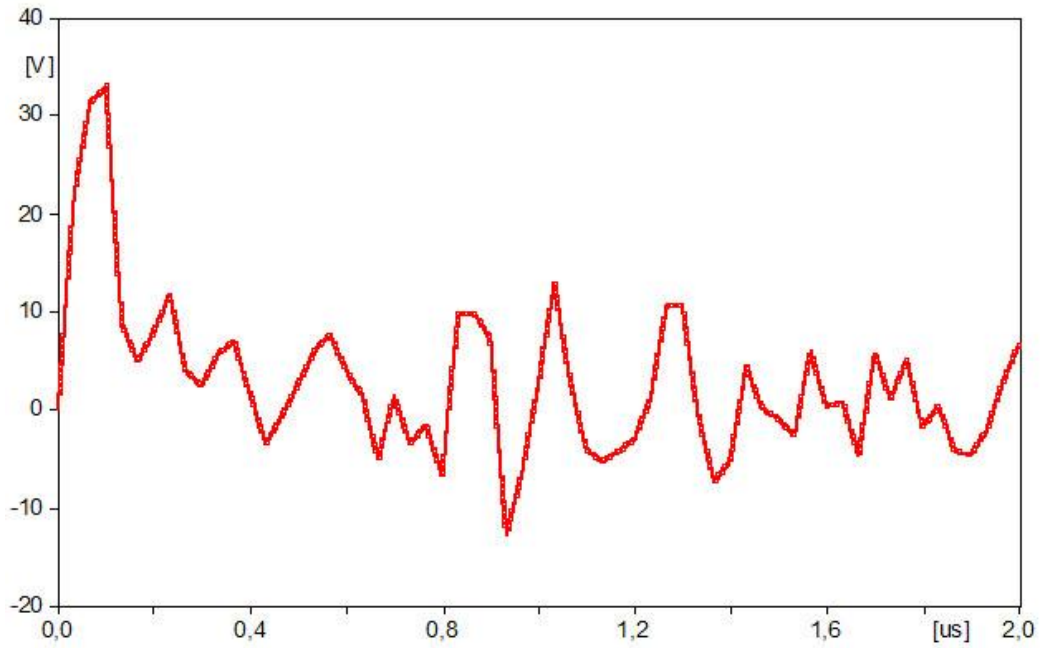
Şekil 5.10. 5x5 Ağ Sistemi EMTP-ATP Modeli

Faraday kafesine $i(t)=1,0177(e^{-1,5.10^4 t} - e^{-6.10^6 t})$ akım uygulandığında yıldırımın düştüğü noktada elde edilen yıldırım dalgası değişimi Şekil 5.11'de verilmiştir. Aşağıdaki şekilde yıldırım dalgasının tepe değeri 33 pu'dur. 20 kA tepe değerine sahip bir yıldırım dalgası için 660.2 kV gerilim ortaya çıkmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi yıldırım dalgasının genlik değeri diğer koruma sistemlerine göre daha düşük çıkmaktadır.

Şekil 5.12’da 5x5 koruma sisteminde yıldırım dalgasının 2 μ s sönümü gösterilmiştir. Şekil 5.12’deki dalgalanmalar bağlantı noktalarında çeşitli yansılardan kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.11. 5x5 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-25 us)



Şekil 5.12. 10x10 Koruma Sisteminde Yıldırımın Düştüğü Noktalardaki Gerilim Değişimi (0-2 us)

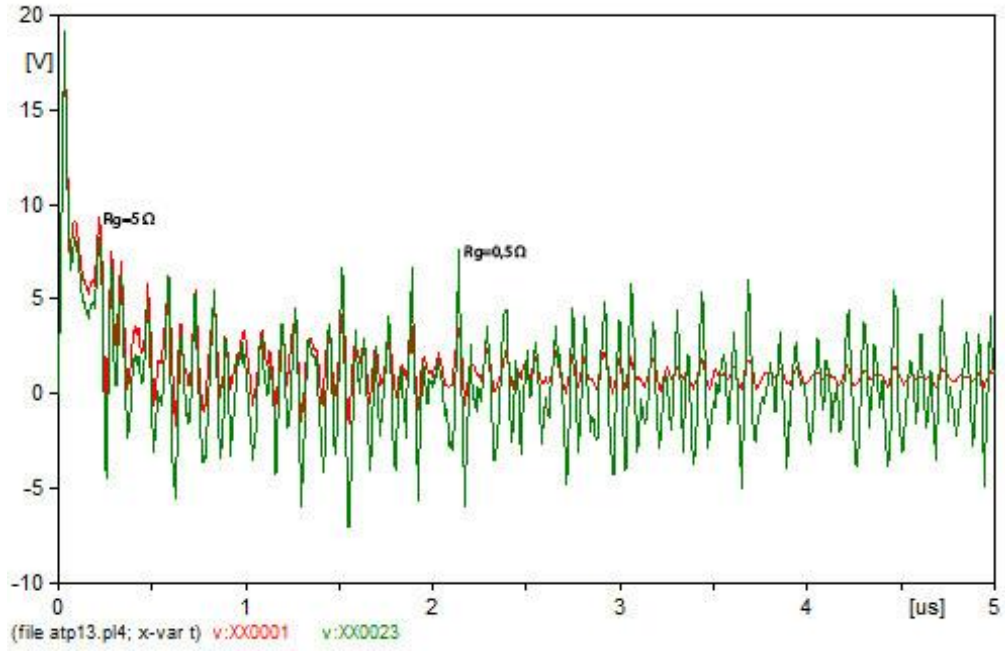
Yapılan bu uygulamalar sonucunda elde edilen A,B,C,D noktalarına karşılık gelen V_1, V_2, V_3, V_4 yıldırım dalga gerilimleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. 5x5,10x10 ve 15x15 Ağ Gözü Koruma Sistemlerinde Yıldırım Dalga Gerilimleri

Ağ sistemleri\V(kV)	V_1	V_2	V_3	V_4
15x15 sistemi	981,4	129,2	443	262,6
10x10 sistemi	856,2	225	248,4	241,3
5x5 sistemi	660,2	182,8	257,8	182,8

Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi giriş gerilim genlik değeri en düşük olan ağ gözleri sık olan 5x5 ağ koruma sistemidir.

Faraday kafesinde topraklama direncinin etkisi ilgili yapılan çalışmada topraklama direncinin Faraday kafesine etkisi incelenmiş ve farklı topraklama direncinde elde edilen yıldırım dalgası değişimi Şekil 5.13’de verilmiştir Aynı şekilde farklı topraklama dirençlerinde yıldırım dalgasının gerilim değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir. Topraklama direncinin V_2, V_3 ve V_4 üzerinde etkili olduğu ve direnç yükseldikçe beklenenin tersine oluşan aşırı gerilimlerin düştüğü görülmüştür.



Şekil 5.13. $R_g=5$ ve $R_g=0.5$ Toprak Direncine Bağlı Yıldırım Dalga Şekli Değişimi

Çizelge 5.2. Farklı Topraklama Dirençlerinde Elde Edilen Gerilimler

$R_g \setminus V(\text{kV})$	V_1	V_2	V_3	V_4
0.5	571.8	215.7	207.3	229.8
1.0	571.8	215.7	206.1	224.4
2.0	571.8	206.7	206.1	213.9
5.0	571.8	191.4	206.1	188.7

5.4 Faraday Kafesinin Potansiyel Dağılımı

Bu bölümde ağ gözünde oluşan potansiyel dağılım incelenmiştir. Potansiyel dağılım için elektriksel akı yoğunluğu;

$$D = -\varepsilon \frac{dV}{dx} \quad (5,3)$$

şeklinde bulunur. Elektriksel akı yoğunluğunun çözümünde Poisson denklemi iki eksenli olarak yazıldığında:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (5,4)$$

elde edilir. Hacimsel yük akışı olmadığında $\rho_v = 0$ olur.

Yukarıda ki denklem ağ gözündeki potansiyel dağılımı bulmak istenildiğinde aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\frac{2}{\Delta x} \left[\frac{V_{i-1,j}-V_{i,j}}{\alpha_1(\alpha_1+\alpha_2)} + \frac{V_{i+1,j}-V_{i,j}}{\alpha_2(\alpha_1+\alpha_2)} \right] + \frac{2}{\Delta y} \left[\frac{V_{i,j-1}-V_{i,j}}{\beta_1(\beta_1+\beta_2)} + \frac{V_{i,j+1}-V_{i,j}}{\beta_2(\beta_1+\beta_2)} \right] = 0 \quad (5,5)$$

Potansiyel dağılım için Faraday kafesinin 10x10 ağ gözlü sistemi alınmıştır.. ATPDraw programı ile bulunan ve bir göze ait iletken için elde edilen gerilim tepe değerleri aşağıdaki gibidir:

Kare üst noktası yu=339 kV

Kare alt noktası yl=321 kV

Kare sağ kenarı xr=378 kV

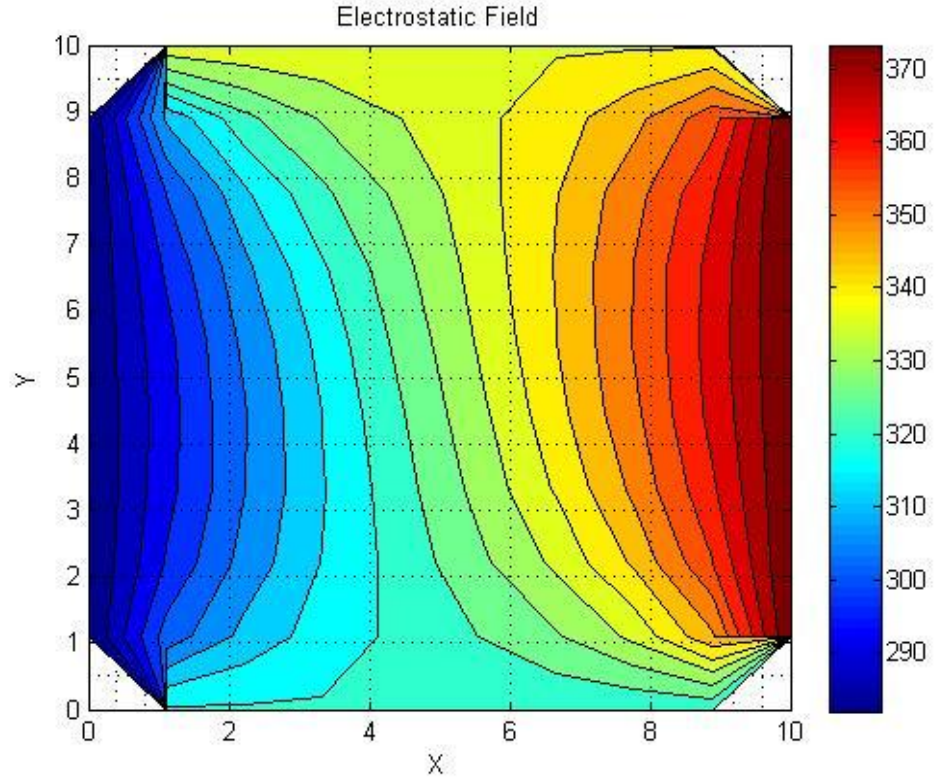
Kare sol kenarı xl=282 kV şeklinde elde edilmiştir.

Gerilimleri yukarıdaki gibi olan gözün potansiyel dağılımı Şekil 5.14'deki gibidir. Bu ağ gözünün potansiyeli için denklem 5,5 kullanılmıştır. İstenilen gerilimlerin dağılımını elde etmek için diğer ağ boyutu farklı olan sistemlere kolaylıkla uygulanan MATLAB'ta bir program hazırlanmıştır. Hazırlanan programla istenilen noktanın potansiyel dağılımı bulunabilmektedir. Ağ gözünde yatay ve dikeyde 100 noktanın potansiyel dağılımı Şekil 5.14'deki gibidir.

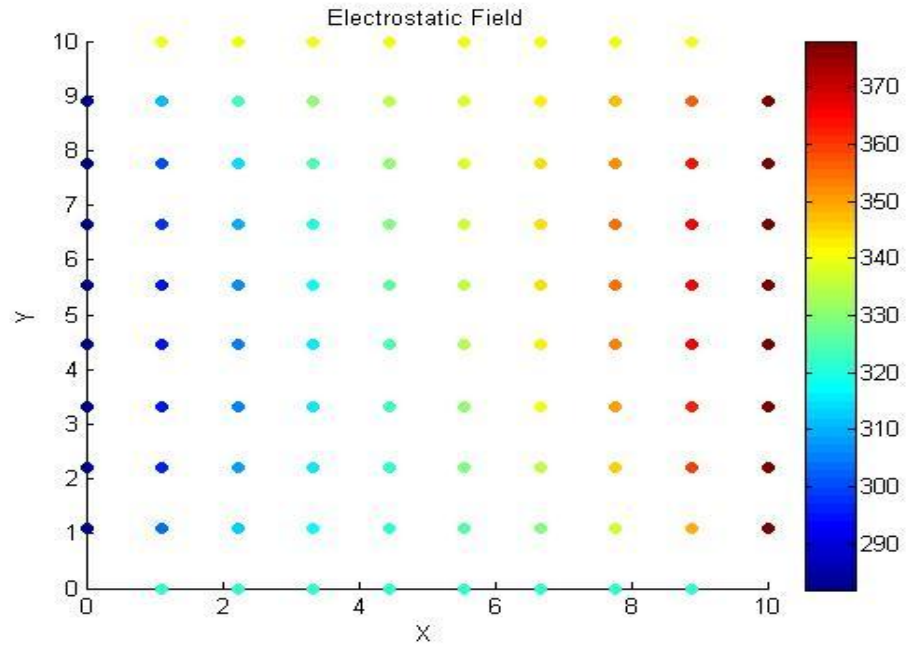
voltage <10x10 double>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	NaN	321	321	321	321	321	321	321	321	NaN
2	282	303.0629	312.3605	317.6664	321.5648	325.2143	329.5469	336.0567	348.4307	378
3	282	296.8909	307.7127	315.7401	322.3787	328.7455	335.9165	345.2492	358.6660	378
4	282	294.7881	305.8594	315.2027	323.4642	331.4725	340.1245	350.3575	362.9843	378
5	282	294.4022	305.7342	315.7471	324.8028	333.5560	342.7514	353.0721	364.9135	378
6	282	295.0865	306.9279	317.2486	326.4440	335.1972	344.2529	354.2658	365.5978	378
7	282	297.0157	309.6425	319.8755	328.5275	336.5358	344.7973	354.1406	365.2119	378
8	282	301.3340	314.7508	324.0835	331.2545	337.6213	344.2599	352.2873	363.1091	378
9	282	311.5693	323.9433	330.4531	334.7857	338.4352	342.3336	347.6395	356.9371	378
10	NaN	339	339	339	339	339	339	339	339	NaN

Şekil 5.14. 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerleri

10x10 ağ gözünde 10x10 nokta potansiyel dağılımının grafiksel görünümü Şekil 5.15'deki gibidir. Gerilim değerlerinin noktasal olarak gösterimi Şekil 5.16'daki gibidir. Bu grafikte noktalar gerilim seviyesine göre renklendirilmiştir.



Şekil 5.15. 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Potansiyel Dağılımının Grafiksel Görünümü



Şekil 5.16. 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerlerinin Noktasal Görünümü

Kenar gerilimleri aşağıdaki gibi olan farklı bir ağ gözünün potansiyel dağılımı Şekil 5.17’de gösterilmiştir. Buradaki amaç bir kenarı toprak ($V=0$) olduğunda oluşan değişimi gözlemektir.

Kare üst noktası $y_l=321$ kV

Kare alt noktası $y_u=0$ kV

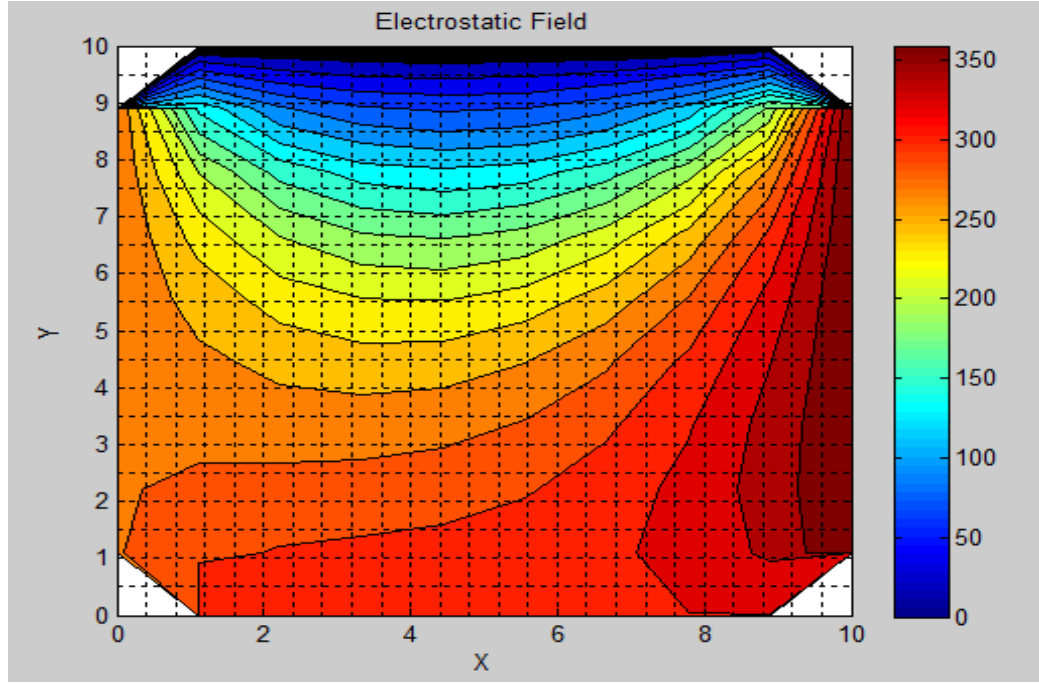
Kare sağ kenarı $x_r=378$ kV

Kare sol kenarı $x_l=282$ kV

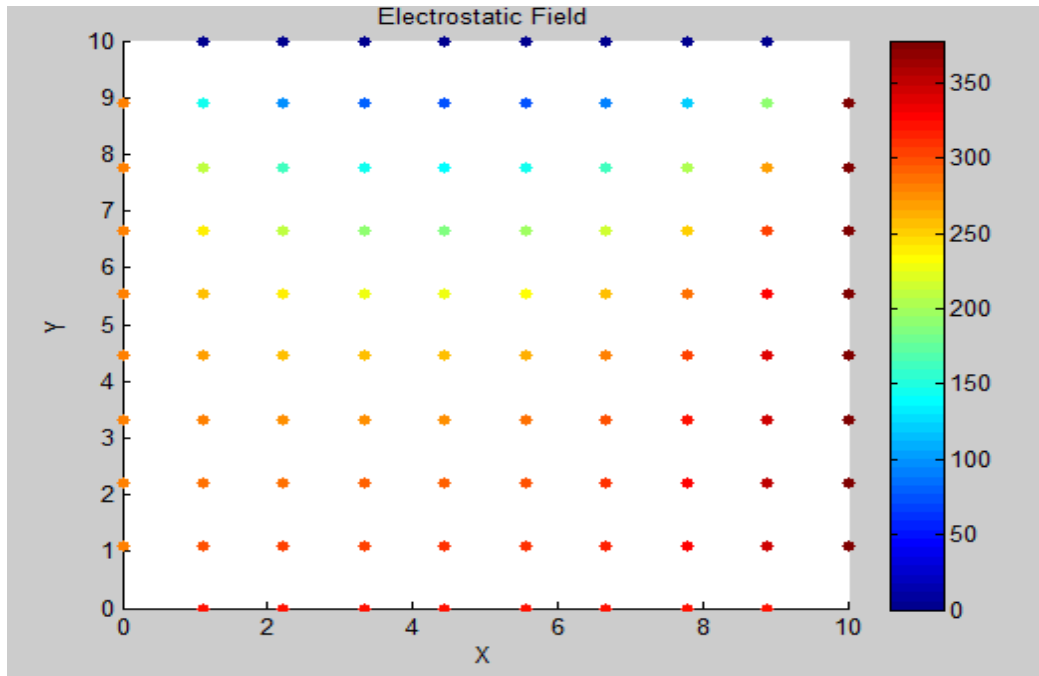
voltage <10x10 double>										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	NaN	321	321	321	321	321	321	321	321	NaN
2	282	298.4154	303.6663	306.0119	308.3544	312.0039	317.8924	327.3625	343.7832	378
3	282	286.9953	289.2380	291.0267	294.4019	300.7687	311.2031	326.7744	348.7704	378
4	282	278.3279	275.2636	274.4552	277.4577	285.4660	299.3770	319.7617	346.5241	378
5	282	269.0528	259.0333	254.0727	255.5076	264.2608	281.0770	306.3712	339.5641	378
6	282	256.8499	237.7442	227.2948	226.2392	234.9924	254.2991	285.0821	327.3612	378
7	282	238.6025	207.7988	191.1230	187.1622	195.1705	216.0448	252.2969	306.7986	378
8	282	207.7612	163.7256	142.2364	136.1158	142.4827	162.4128	201.2620	269.5363	378
9	282	146.7168	97.1059	77.9811	72.5821	76.2316	89.8616	120.8020	192.0846	378
10	NaN	0	0	0	0	0	0	0	0	NaN

Şekil 5.17. Bir Kenarı Toprak 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerleri

Elde edilen gerilim değerlerini noktasal ve grafiksel olarak gösterimi Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’deki gibidir. Grafikte gerilim seviyesine göre noktalar renklendirilmiştir.



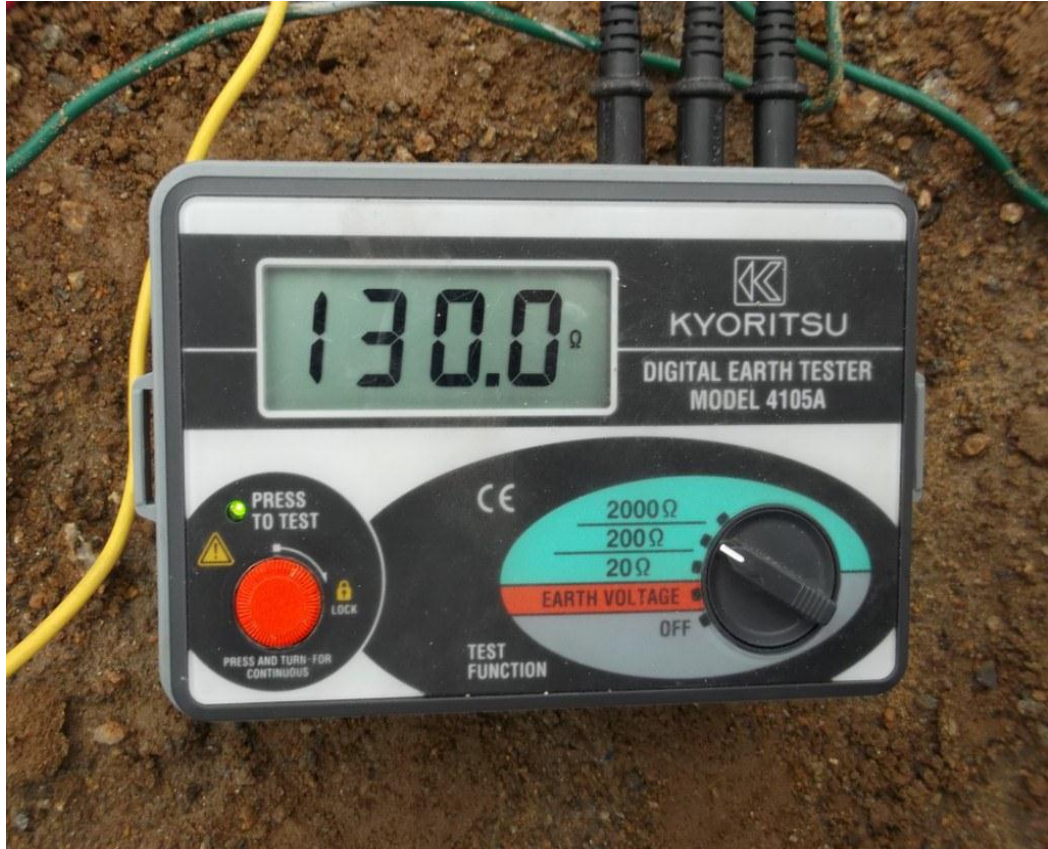
Şekil 5.18. Bir Kenarı Toprak 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerlerinin Grafikselsel Görünümü



Şekil 5.19. Bir Kenarı Toprak 10x10 Gözlü Faraday Kafesinde 10x10 Nokta Gerilim Değerlerinin Noktasal Görünümü

5.5 Derin Topraklama Sisteminde Topraklama Direncini Düşürme Yöntemleri

Faraday kafesinde etkinliği arttırmanın önemli noktalarından biri de topraklamanın iyi yapılmış olmasıdır. Topraklama direnci ne kadar düşük olursa, Faraday kafesinin koruma seviyesi de o kadar yüksek olur. Bu bölümde derin topraklama sisteminde topraklama direncini etkileyen elektrot boyu ve elektrot genişliği gibi faktörler incelenmiştir. Bu uygulama için Şekil 5.20’de gösterilen cihaz kullanılmıştır.



Şekil 5.20. Topraklama Test Cihazı

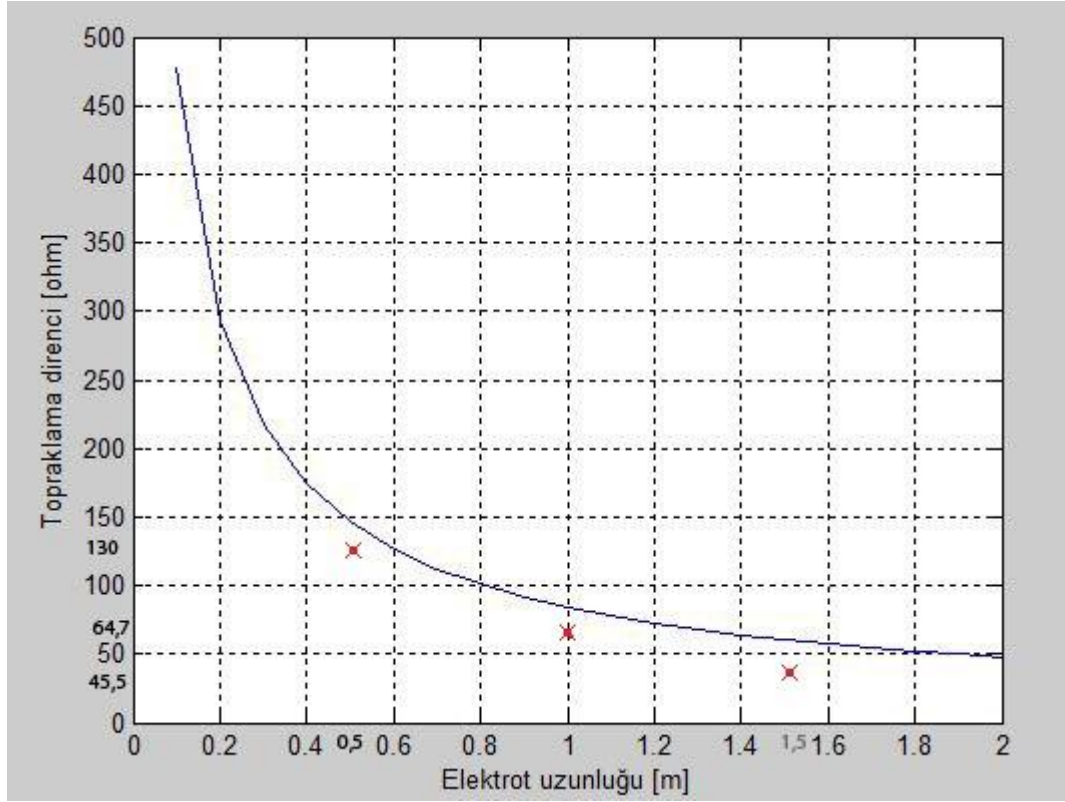
Uygulama için gerekli malzemeler Şekil 5.21’de gösterilmektedir. Burada kullanılan malzemeler 3 adet 1,5 m boyunda elektrot, 1 m boyunda elektrot, 0,5 m boyunda elektrot, topraklama test cihazı, referans noktaları için kablolar ve bağlantı uçlarıdır.



Şekil 5.21. Topraklama Testi İçin Gerekli Malzemeler

5.5.1 Derin topraklama sisteminde elektrot boyunu değiştirerek topraklama direncini düşürmek

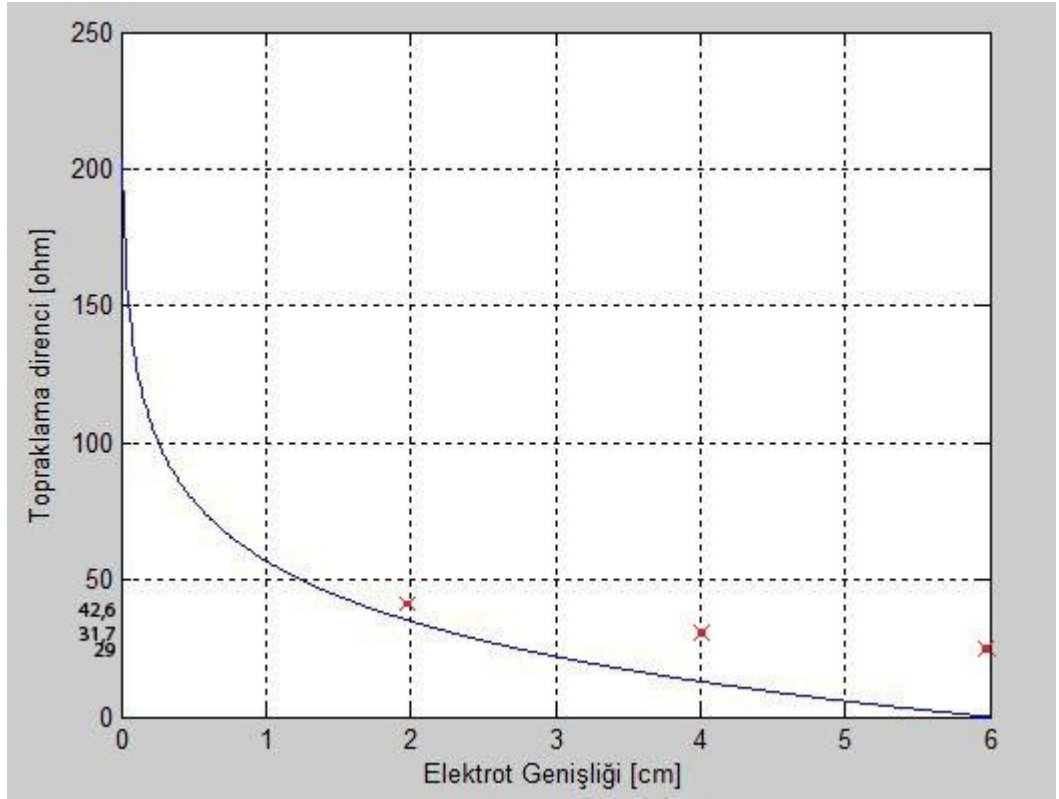
İlk uygulamadan elektrot boyunun değişimine bağlı olarak topraklama direncinin değişimi incelenmiştir. Bu incelemede 1,5 m boyunda elektrot 1 m elektrot ve 0,5 m boyunda elektrotlar kullanılmıştır. Topraklama direncinin elektrot uzunluğuna bağlı olarak değişimi Şekil 5.22'deki gibidir. Bu uygulama sonucunda 0,5 m elektrot uzunluğu için 130 ohm, 1 m elektrot uzunluğu için 64,7 ohm ve 1,5 m elektrot uzunluğu için 45,5 ohm elde edilmiştir. Yapılan uygulama sonucunda elde edilen değerler Şekil 5.22'de işaretlenmiştir. Burada beklenildiği gibi elektrot uzunluğu arttığında topraklama direnci düşmektedir ve elde edilen uygulama sonuçları teorik değişimler ile uyumludur. Farklılıklar toprak öz direncinin farklılığından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.22. Elektrot Uzunluğunun Topraklama Direncine Etkisi

5.5.2 Derin topraklama sisteminde elektrot kesitini değiştirerek topraklama direncini düşürmek

Elektrot kesiti değişimine bağlı olarak topraklama direncinin değişimi incelenmiştir. Bu incelemede 2 cm genişliğinde 3 adet elektrot kullanılmıştır. Topraklama direncinin elektrot kesitine bağlı olarak değişimi Şekil 5.23'deki gibidir. Bu uygulama sonucunda topraklama direnci 2 cm elektrot genişliği için 42,6 ohm, 4 cm elektrot genişliği için 31,7 ohm ve 6 cm elektrot genişliği için 29 ohm elde edilmiştir. Yapılan uygulama sonucunda elde edilen değerler Şekil 5.23'de işaretlenmiştir. Burada beklenildiği gibi elektrot genişliği arttığında topraklama direnci düşmektedir.



şekil 5.23. Topraklama Direncinin Elektrot Genişliğine Bağlı Olarak Değişimi

Yapılan uygulamalar sonucunda derin topraklama sisteminde elektrotun boyu ve elektrotun genişliği topraklama direncine etkisi olduğu görülmüştür.

6. TARTIŞMA ve SONUÇ

Faraday Kafesi yıldırımdan korunma sistemlerinden biridir. Faraday kafesinin etkinliğine göre koruma seviyesi belirlenir. Faraday kafesinin yıldırım çarpmasına karşı göstermiş olduğu tepki yıldırımdan korunma için kullanılabilir olup, akım ve gerilim karakteristiklerine göre yıldırımdan daha etkili koruma sağlanır. Aynı şekilde kafese yıldırım çarptığında göz boşluklarındaki potansiyel dağılımın bilinmesi yıldırımın etkilerinin azaltılması için önem teşkil eder. Faraday kafesi ile korumada önemli etkenlerden biri topraklamadır. Topraklama direncinin uygun değerde olması sayesinde kafese yıldırım çarptığında daha etkili korunma elde edilmiş olur.

Bu çalışmada Faraday kafesine bir noktadan yıldırım çarptığında, ağ gözlerinde oluşan akım ve gerilim karakteristikleri gözlemlenmiştir. Faraday kafesinin modellenmesi için kısa iletim hatları kullanılmış, yatay ve dikey hat modellerinden faydalanılmıştır. Faraday kafesi kısa iletim hatları ile modellenerek yıldırım dalgası cevabı EMTP-ATP ile elde edilmiştir. Yapılan simülasyonda göz aralığı düşük olduğunda yıldırım dalgasının tepe geriliminin daha düşük olduğu görülmüştür. Aynı şekilde yıldırım dalgasının gerilimin büyük kısmının $25 \mu s$ 'de sönümlendiği görülmüştür. Yapılan simülasyonda topraklama direncinin artmasının beklenenin aksine oluşan aşırı gerilimlerin düşmesine yol açtığı belirlenmiştir. Ancak kalıcı rejimde topraklama direncinin düşük olması sistemdeki yüklerin toprağa geçmesinde etki sağlayacaktır. Sistemde iletken sayısı çok artsa da EMTP-ATP kullanılarak sistemin analiz edilebildiği gösterilmiştir. Faraday kafesinin ağ gözleri arasındaki potansiyel dağılımı kısmi diferansiyel denklemlerin sonlu farklar ile nümerik çözümü MATLAB'ta yapılarak bulunmuştur. MATLAB Programı yardımıyla bir gözde oluşan potansiyel dağılımın kafes gözlerinde yüksek seviyelere çıkabildiği belirlenmiştir. Topraklama direncini düşürmek için çeşitli deneysel uygulamalara yer verilmiştir. Elektrot uzunluğu ve elektrot genişliği arttığında, topraklama direncinin teorik formüle uygun şekilde düştüğü görülmüştür.

7. KAYNAKLAR

1. Ueda T, "A Comparison Between Two to Wermodels For Lightning Surge Analysis Of 77 Kv System", **Powercon 2000 International conference on Power System Technology**, 433 - 437 vol.1, (2000)
2. Cooper Ma. "A Fifth Mechanism Of Light Ninginjury", *Acad Emerg Med*; 9:172-4 (2002)
3. Ronald I. Holle, "Recent studies of Lightning safety and Demo Graphics", *Meteorology & Photography Oro Valley*, 2012 **International Conference on Ligthning Protection**, Pages 1-14 (2012)
4. Lewis A. J Emerg Nurs, "Understanding The Principles of Lightning İnjuries". Vol.23, pp.535-541 (1997)
5. Qie Xiushu vd. "Characteristics Of Lightning Discharges and Electric Structure of Thunder Storm" , **Proceedings of the World Congress on Engineering**, Vol:20 (2007)
6. Vladimir A. Rakov, Farhad Rachidi, "Overview of Recent Progress İn Lightning Research and Lightning Protection", **Transactions on electromagnetic compatibility**, Vol. 51, no. 3, IEEE (2009)
7. Vladimir A. Rakov, "Lightning Discharge and Fundamentals of Lightning Protection", **X International Symposium on Lightning Protection** (2009)
8. Mamiş vd. "Yatay Ve Dikey İletkenlerin Yıldırım Dalgası Cevabı" *Elektrik-Elektronijk-Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal kongresi* (2003)
9. John Wiley & Son, "Electrical transients in Power Systems", Greenwood A, Pp. 463-490 (1991)
10. Mehmet Salih Mamis, Cemal Keles, Muslum Arkan, Ramazan Kaya, "Atp Simulation Of Faraday Cage for the Analysis of Lightning Surges", **Proceedings of the EEUG Meeting 20012 European EMTP-ATP Conference**, 19-19 September 2012, Zwickau (2012)
11. Larry k. Warne, vd. Protection Characteristics of A Faraday Cage Compromised By Lightning Urnthrough", *SAND2012-0040* (2012)
12. Norme NFC, "Ligthning Risk Assesment Guide and Selection of Protection Level for ELPI", 17102 GB 2 (1995)
13. El Mghairbi Ahmed, "Assessment of Earthing Systems and Enhancement Of The performance ", *phD.*(2012)
14. George Eduful, Vd, "Optimum Mix of Ground Electrodesand Conductive Backfills to Achieve A Lowground Resistance", *WCECS*, Vol I, (2009)
15. Wiesinger J, Zischank W. "Lightning Protection, in Handbook of Atmospheric Electrodynamics", In: Volland H, Ed. Boca Raton, vol. II: pp. 33-64 (1995)
16. Zafer Faydalı, "Yıldırımdan Koruma: Çeşitli Yöntemler, Üstünlükleri Ve Sakıncaları" *Doktora Tezi* (2009)
17. www.mgm.gov.tr/iklim/dokuman
18. Scott Michael Steiger, "Cloud-To-Ground Lightning Characteristics Over Houston", *Thesis of Master, Texas* (2001)
19. C.B.Moore, William Rison, James Mathis, And graydon aulich, "Lightning rod improvement studies" *Langmuir Laboratory for Atmospheric Research*, Vol:39 (2000)
20. E. Philip Krider, "Benjamin Franklin and The First Lightning Conductors", **Proceedings of the International Commission on History of Meteorology** 1.1 (2004)
21. Güner E. "Yüksek Gerilim Merkezlerinin Topraklanması", *Emo Elektrik Mühendisliği Dergisi* (1977)

22. Almeida M. E. Correia De Barros M. T. "Tower Modelling For lightning Surge Analysis Using Electro-Magnetic Transient Program", **IEEE Proc.-Gener, Transm. Distrib.** Vol. 141, no.6 (1994)
23. Tagg.G.G "Measurement of The Resistance of Physically Large Earth-Electrode Systems", Vol.117, no.11, Pages 2185-2190 (1970)
24. Mamiş M.S, Akçin M, Kaygusuz A, "Yatay Ve Dikey İletkenlerin Yıldırım Dalgası Cevabı", **Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal Kongresi** (2003)
25. Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, Numerical Methods For Engineer 6. Edition
26. Sargent M. Darveniza M, "Tower Surge Impedance", **IEEE Trans.** Vol. Pas-88, Issue 5, pas-pp.680-687 (1969)
27. Vlamidir A.Rakov "Lightning Return Stroke Speed", Journal of Lightning Research, Volume I, pages 80-90 (2007)
28. P.C.A.Mota, M.L. Rchaves, J.r. Camacho, "Power Line Tower Lightning Surge Impedance Computation Comparison of Analytical and Finite Element Methods", **International Conference on Renewable Energies and Power Quality** (2012)
29. M.S. Mamis M.Koksal, "Computation of Lightning Overvoltages Using Nonuniform, Single-Phase Line Model", Vol. 148 (1), pp.85-90 (2001)
30. Liew, A.C, Mar, S.C "Extension of The Chowdhuri-Gross Model For lightning Induced Voltages On Overhead Lines", **IEEE trans.** Vol.1(2) pp.240-247 (1986)
31. Kawai, M, "Studies of The Surge Response on A Transmission Line Tower." IEEE Trans, Vol. 83, pp. 30-34 (1964)
32. Mamiş M. S. Köksal M. "Lightning Surge Analysis Using nonuniform, Single-Phase line Model", IEEE Proc.-gener. Transm. Distrib. Vol. 148, No. 1 (2001)
33. Hosono T."Numerical İnversion of Laplace transform and Some Applications to Wave Optics", Radio science Vol 16 No.6, pp. 1015-1019 (1981)
34. H.V.Nguyen, H.W Dommel, J.R Marti, "Modeling of Single-Phase Nonuniform Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations", **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol.12, No.2, April (1997)
35. <http://www.treesquirrel.us/>
36. Fatoş Üresin, "Yüksek Gerilim Tesislerinde Topraklama Analizi", yüksek lisans tezi (2010)
37. Rohit Narayan Presenter, Chris Holst, "Fundamentals of Earth Electrode Design Author" Seison:2, **Earthing, Lightning, Surge Protection forum** (2005)
38. Mustafa Güçlü Aydiner, "Grounding Design Analysis", Thesis of Master, ODTÜ (2009)
39. Jones p, "Electrical Measurement of Large Area Substation Earth rods", ph.D. Thesis (2001)
40. <http://www.emo.org.tr> (topraklama)
41. Hugo e. Martinez vd. "A New Artificial Treatment For The Reduction of Resistance in Ground Electrode " **IEEE Trans Power Del**(2):301-608(2004)
42. Mamiş M.S., Kaygusuz A., Akın E. "Enerji İletim Hatlarında Yıldırım Nedeniyle Endüklenen Gerilimler". **Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi**
43. Carpenter R.B. Drabkin M.N. "Lightning Strike Protection", Report By Lightning Eliminators & Consultants, inc., Boulder, Colarado, USA (2000)
44. Michael A.Sargent, Mat Darveniza, "Tower Surge Impedance", **IEE TRANCTIONS ON POWER APPARATUES AND SYSTEMS**, Vol.Pas-88, No.5 May, (1969)
45. Laszlo Prikler, Hans Kristian Hoidalén, "ATPDRAW Version 3.5 for Windows 9x/NT/2000/XP", Preliminary Release No.1.0, August 2012

EKLER

EK-1

Faraday Kafesinin Ağ Gözünde Oluşan Potansiyel Dağılımı Bulan MATLAB Kodları:

```
function [ X,Y, output2 ] = Poisson( xl, xr, yl, yu,
points, m, n )
%POISSON Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here

% xl: sol kenardaki voltaj (x=0)
% xr: sağ kenardaki voltaj (x=10)
% yl: alt kenardaki voltaj (y=0)
% yu: üst kenardaki voltaj (y=10)
% points: değerleri istenen noktaların koordinatları
% m: x eksenindeki nokta sayısı (pointsteki noktalar hariç)
% n: y eksenindeki nokta sayısı (pointsteki noktalar hariç)

[X,Y] = coords(m,n,points);
[alpha,beta,deltax,deltay] = dist(m,n,X,Y);

% Ekstradan istenen noktalardan bazıları (points), m ve n
ile belirtilen
% grid noktalarıyla çakışıyor olabilir.
m = length(alpha)+1;
n = length(beta)+1;

% A*U=b denklemini yaratmaya çalışacağız.
% Assumption!! m=n
b = zeros((m-2)*(n-2),1);
b(1:(m-2)) = -xl/(alpha(1)*(alpha(1)+alpha(2)));
b(((m-2)*(n-3)+1):end) = -xr/(alpha(m-1)*(alpha(m-2)+alpha(m-1)));
b((0:(n-3))*(m-2)+1) = b((0:(n-3))*(m-2)+1) -
yl/(beta(1)*(beta(1)+beta(2)));
b((0:(n-3))*(m-2)+m-2) = b((0:(n-3))*(m-2)+m-2) -
yu/(beta(n-1)*(beta(n-2)+beta(n-1)));

% Find each element of A
A = zeros((m-2)*(n-2), (m-2)*(n-2));

% Diagonal terimlerin katsayıları
for k=1:1:(m-2)
    for l=1:1:(n-2)
        A((m-2)*(l-1)+k, (m-2)*(l-1)+k) = ...
```

```

- (1/(alpha(k)*alpha(k+1))
+1/(beta(l)*beta(l+1)));
    end
end

for k=1:1:(m-2)
    for l=1:1:(n-2)
        % left boundary
        if(k~=1)
            A((k-1)*(n-2)+1,(k-2)*(n-2)+1) = ...
                1/(alpha(k)*(alpha(k)+alpha(k+1)));
        end
        % right boundary
        if(k==(m-2))
            A((k-1)*(n-2)+1,k*(n-2)+1) =...
                1/(alpha(k+1)*(alpha(k)+alpha(k+1)));
        end
        % lower boundary
        if(l~=1)
            A((k-1)*(n-2)+1,(k-1)*(n-2)+l-1) =...
                1/(beta(k)*(beta(k)+beta(k+1)));
        end
        % upper boundary
        if(l==(n-2))
            A((k-1)*(n-2)+1,(k-1)*(n-2)+l+1) =...
                1/(beta(k+1)*(beta(k)+beta(k+1)));
        end
    end
end
end

```

```

values=A\b;

```

```

% Değerleri bir matrise koyalım
output = transpose(vec2mat(values,m-2));
% Bu matrisi daha büyük bir matrisin içine yerleştirelim.
Matrisin en
% dıştaki satır ve sütunları tellerimiz olsun.
output2 = zeros(m,n);
output2(:,1)=xl;
output2(:,n)=xr;
output2(1,:)=yl;
output2(m,:)=yu;
output2(1,1)=NaN;
output2(m,1)=NaN;
output2(m,n)=NaN;
output2(1,n)=NaN;
output2(2:(m-1),2:(n-1))=output;

end

```

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı: Ramazan Kaya
Adres: Karşıyaka Mah. Kâhta / ADIYAMAN
E-posta: hazarkaya_34@hotmail.com
Lisans: İnönü Üniversitesi

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

10.02.1984 yılında Adıyaman'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adıyaman 'da bitirdi. Daha sonra 2005 yılında İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2009 yılında öğrenimini tamamladı. 2011 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2009 yılında üniversite eğitimini bitirdikten sonra özel firmalarda çalışıp çeşitli projelerde yer almaktadır. Bu projeler de Denizli RWE&TURCAS 775 MW CCPP S/S Şantiye Müdürü, Ales DGKCS de Elektrik Şantiye Müdürü görevlerinde bulunmuştur.

Yayın Listesi:

Atp simulation of faraday cage for the analysis of lightning surges., Mehmet Salih Mamis, Cemal Keles, Müslüm Arkan, Ramazan Kaya (2012)