

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SONLU FARKLAR YÖNTEMİ İLE  
TOPRAKLAMA AĞLARINDAKİ  
POTANSİYEL DAĞILIMIN HESAPLANMASI**

Elektrik Müh. Ali DARMAN

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nurettin UMURKAN**

**İSTANBUL, 2006**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	iv
KISALTMA LİSTESİ .....	v
ŞEKİL LİSTESİ .....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	vii
ÖNSÖZ.....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT .....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİK TESİSLERİNDE TOPRAKLAMA ve TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ .....	3
2.1 Topraklama ile İlgili Temel Kavramlar .....	3
2.2 Topraklama Çeşitlerine Göre Tanımlar .....	11
2.3 Topraklama Sistemleri.....	12
2.3.1 Çubuk.....	12
2.3.2 Levha .....	13
2.3.3 Şerit.....	14
2.3.4 Doğal.....	17
2.3.5 Özel.....	17
2.3.6 Birleşik.....	17
2.3.7 Paralel .....	17
2.3.8 Karma .....	18
3. TOPRAKLAMA AĞLARININ ANALİZİ .....	19
3.1 Topraklama Ağlarının İndüktansı.....	19
3.1.1 Reaktif kVA Yöntemi.....	20
3.1.2 İndüktans Hesabı .....	22
3.1.3 Darbe Empedansı.....	24
3.1.3.1 Etkin Alan.....	25
3.1.3.2 Kare Topraklama Ağlarında Darbe Empedansı.....	25
3.1.3.3 Dikdörtgen Topraklama Ağlarında Darbe Empedansı .....	26
3.1.4 Akım Dağılımının Bulunması .....	27
4. POTANSİYEL DAĞILIM ANALİZİNDE KULLANILACAK SAYISAL YÖNTEM .....	29
4.1 Topraklama Ağlarının Toprak Yüzeyinde Oluşturduğu Potansiyel Dağılımı.....	29
4.1.1 Akım Dağılımı .....	29

4.1.2	Direnç İfadeleri.....	31
4.1.2.1	Öz Direnç.....	31
4.1.2.2	Bir Katmanlı Toprakta Karşılıklı Direnç.....	32
4.1.2.2.1	Aralarında Açık Bulunan Kollar.....	32
4.1.2.2.2	Paralel İletken Kollar.....	34
4.1.2.2.3	Aynı Doğrultudaki Paralel İletken Kollar.....	35
4.1.2.2.4	Birbirine Dik Doğrultudaki İletken Kollar.....	35
4.1.2.3	Çok Katmanlı Toprakta Karşılıklı Direnç.....	36
4.2	Toprak Yüzey Potansiyeli.....	37
5.	TOPRAKLAMA AĞLARI İÇİN POTANSİYEL DAĞILIM HESAPLAMALARI.....	39
5.1	1x1 Gözlü Kare Topraklama Ağı Analizi.....	39
5.1.1	Direnç İfadeleri.....	40
5.1.2	Göz İçerisindeki Potansiyel Değerler.....	42
5.1.3	Herhangi Bir Nokta İçin Potansiyel Değer.....	44
5.1.4	1x1 Gözlü Kare Topraklama Ağı İçin Sonuçlar.....	46
5.1.5	Ağ İle Referans Toprak Arasında Potansiyel Dağılımının Sonlu Farklar Yöntemi İle Hesaplanması.....	46
5.1.5.1	Sonlu Fark Denklemleri.....	48
5.1.5.2	Sonlu Fark Denklemlerinin MS Excel® İle Çözümü.....	50
5.1.5.3	MS Excel® İle Toprak Yüzeyinde Ağ İle Referans Toprak Arasında Potansiyel Dağılımının Hesaplanması.....	51
5.2	2x2 Gözlü Kare Topraklama Ağı Analizi.....	55
5.2.1	Direnç İfadeleri.....	55
5.2.2	Göz İçerisindeki Potansiyel Değerler.....	58
5.2.3	Ağ İle Referans Toprak Arasında Potansiyel Dağılımının Sonlu Farklar Yöntemi İle Hesaplanması.....	59
6.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	64
	KAYNAKLAR.....	66
	ÖZGEÇMİŞ.....	67

## SİMGE LİSTESİ

$m$	Metre
$V$	Potansiyel ifadesi
$U_a$	Adım gerilimi
$U(V)$	Gerilim eksenini
$l(m)$	Uzaklık eksenini
$U_{tk}$	Topraklayıcı gerilimi
$R_k$	Koruma topraklaması
$R_i$	İnsan vücudunun direnci
$R_{ge}$	Elden geçiş direnci
$R_t$	Ayaktan geçiş direnci
$U_{tk}$	Topraklayıcı gerilimi
$U_{ts}$	İnsan teması esnasındaki temas gerilimi
$I_k$	Bir faz toprak kısa devre akımı
$I_i$	İnsan vücudundan geçen akım
$I_t$	Toprak akımı
$h$	Gömülme derinliği
$R_y$	Yayılma direnci
$\rho$	Toprak özgül direnci
$L$	İletkenin özindüktansı
$e(t)$	Darbe akımının girdiği noktada oluşturacağı gerilim
$L_k$	Karşılıklı indüktans
$L_s$	İletkenin İndüktansı
$A$	Darbe Katsayısı
$T$	Dalga cephe süresi
$M$	Karşılıklı direnç katsayısı

## **KISALTIMA LİSTESİ**

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ANSI	American National Standart Institute
SFY	Sonlu Farklar Yöntemi
MS	Microsoft

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.2 Bir yüksek gerilim tesisinde bir toprak teması olması durumunda temas gerilimi.....	5
Şekil 2.3 Bir toprak kısa devresinde meydana gelen potansiyel dağılımı ve bu alanda bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi.....	9
Şekil 2.4 Ağ iletkenlerine akım yoğunluğu faktörünün değişimi.....	10
Şekil 2.5 Çubuk topraklayıcı .....	12
Şekil 2.6 Emdirmeli topraklayıcı.....	13
Şekil 2.7 Levha topraklayıcı.....	14
Şekil 2.8 Şerit topraklayıcıların çeşitleri .....	15
Şekil 2.9 Gözlü topraklayıcı .....	16
Şekil 2.10 Paralel topraklayıcı.....	18
Şekil 3.1 Paralel iletkenler için karşılıklı indüktans .....	21
Şekil 3.2 Topraklama ağının genel yapısı .....	21
Şekil 3.3 Akımın ağa girişi ortadan olması durumunda kollardaki akım dağılımı.....	27
Şekil 3.4 Akımın ağa girişinin köşeden olması durumunda kollardaki akım dağılımı .....	28
Şekil 4.1 3x3'lük model ağ.....	30
Şekil 4.2 Karşılıklı direnci hesaplanacak olan ve aralarında açı bulunan iletken kol modelleri	32
Şekil 4.3 Paralel iletken kollar.....	34
Şekil 4.4 Aynı doğrultudaki iletken kolların gösterimi .....	35
Şekil 4.5 Birbirine dik doğrultudaki iletken kolların durumu .....	36
Şekil 5.1 1x1 Gözlü kare topraklama ağ modeli .....	40
Şekil 5.2 1x1 Gözlü kare ağ içerisinde potansiyelleri bulunacak yer yüzeyi noktaları.....	43
Şekil 5.3 Rasgele seçilen ve potansiyeli hesaplanacak noktanın kollara göre koordinatları....	45
Şekil 5.4 1x1'lik ağ gözü içerisine denk gelen toprak yüzeyinde potansiyel dağılımın gösterimi .....	47
Şekil 5.5 İki boyutlu kartezyen koordinatlarda kare gözlü sonlu farklar yöntemi için örnek ağ	48
Şekil 5.6 Ağ ile referans toprak arasındaki bölgenin SFY ile hesaplanması için kurulan modelde alanların numaralandırılması.....	49
Şekil 5.7 Döngüsel hesaplama için başlangıç hücresine yazılması gereken bağıntı .....	51
Şekil 5.8 1x1'lik topraklama ağında referans toprağa kadar olan bölümün ¼ 'üne eş alan için toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı .....	52
Şekil 5.9 1x1 Gözlü topraklama ağının yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı	54
Şekil 5.10 2x2 Kare gözüün numaralandırılması .....	55
Şekil 5.11 2x2 Model kare ağda potansiyelleri bulunacak noktalar.....	58
Şekil 5.12 2x2 Gözlü kare ağın iç yüzeyine tekabül eden toprak yüzeyi için bulunmuş potansiyel dağılımları.....	59
Şekil 5.13 2x2 Gözlü kare ağ alanı içerisine tekabül eden toprak yüzeyi potansiyel dağılımı	60
Şekil 5.14 Sonlu farklar yöntemi ile 2x2 gözlü model kare ağ ile referans toprak arasındaki potansiyel dağılımı sonuçları .....	61
Şekil 5.15 2x2 Gözlü kare model ağ için referans toprağa kadar bölgede potansiyel dağılımı	62

## ÇİZELGE LİSTESİ

Tablo 3.1 İndüktans hesabında kullanılacak ağlara ilişkin veriler .....	22
Tablo 3.2 İndüktans hesabında kullanılacak ağlara ilişkin veriler .....	22
Tablo 3.3 D katsayısının değerleri.....	23
Tablo 3.4 Ağa ortadan giren akımlar için elde edilen indüktans değerleri .....	23
Tablo 3.5 Ağa köşeden giren akımlar için elde edilen indüktans değerleri .....	24
Tablo 4.1 Karşılıklı direnç eşitliğinde uzunlukların matematiksel gösterimi .....	33
Tablo 5.1 Model ağlarda kullanılacak veri değerleri ve sembolleri.....	39
Tablo 5.2 Hayali düğümler için hesaplanan potansiyel değerler.....	43
Tablo 5.3 Seçilen noktada kolların meydana getirdiği gerilim değerleri .....	45
Tablo 5.4 1 numaralı kola ait yatay karşılıklı direnç değerleri.....	56
Tablo 5.5 1 numaralı kola ait dikey karşılıklı direnç değerleri .....	56
Tablo 5.6 12 numaralı kola ait yatay karşılıklı direnç değerleri.....	57
Tablo 5.7 1 numaralı kola ait dikey karşılıklı direnç değerleri .....	57

## ÖNSÖZ

Topraklama tesisleri normal işletme esnasında varlığını hemen hemen hiç hissettirmedeği halde bir arıza halinde etkisini gösterir ve görevini yapar. Bu sebeple topraklama her an işletmede olmayan bir tür gizli tesistir ve elektrik tesislerinde topraklamaya gerektiği önemi vermek gerekir.

Topraklama başta insanlar olmak üzere diğer canlıların ve elektrikle iş gören donanımların tehlikeli gerilime maruz kalmasını önlemek ve koruduğu tesisin işletme geriliminde sürekliliğini güvenle sürdürmesi için ihtiyaç duyulan toprak potansiyelini sağlayacak elektrik tesisidir. Temelde topraklama tesisi, topraklanacak aksamın toprak ile bağlantısını sağlayan iletkenler ve toprak içine gömülen topraklayıcı adındaki iletkenlerin bütününe verilen isimdir. Topraklama tesisi, arıza durumunda meydana gelebilecek akımların tehlikeli gerilime dönüşmeden toprağa akıtılmasını sağlayarak görevini yerine getirmelidir.

Bu tez çalışmasında, topraklama tesisinin bir çeşidi olan ve gün geçtikçe kullanımı daha da yaygın hale gelen topraklama ağlarının farklı yapıları için hata durumlarında toprak yüzeyinde oluşturacakları potansiyel dağılım ifadeleri Sonlu Farklar Yöntemi (SFY) kullanılarak incelenmiş ve bunlara ait grafiksel gösterimler sunulmuştur.

Çalışmalarım sırasında her türlü yardım ve desteği esirgemeyen, karşılaştığım engellerde bana daima çıkış yolları sunan tez danışmanım, hocam, Sayın Doç. Dr. Nurettin UMURKAN' a, iyi dileklerini hep hissettiğim ve bu çalışma süresince beni sürekli cesaretlendiren TEKSAN JENERATÖR Elek. San. Tic. A.Ş. yönetimine ve buradaki çalışma arkadaşlarıma ve üzerimdeki emeğini nasıl ödeyeceğimi bilemediğim annem Gülderen DARMAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## ÖZET

Elektrik tesislerinde aktif olmayan bölümler ile bunlara bağlı bölümlerin, bir iletken yardımı ile toprakla irtibatlandırılması işlemine topraklama denilmektedir. Elektrik sistemlerinin devamlılığını sağlamak ve insan hayatını güvenceye almak için elektrik sistemlerinde, gerilim altındaki kısımlar yalıtılırlar. Toprağa karşı yalıtımda, çeşitli sebeplerle, her zaman bozulma ve delinme şeklinde hata meydana gelmesi kaçınılmazdır. Topraklama, meydana gelebilecek bu çeşit bir hata durumunda, insan hayatını güvenceye almak amacıyla uygulanacak işlemlerden biridir.

Bu tez çalışmasında, topraklama sistemlerinde yoğun şekilde kullanımdaki topraklama ağları, hesaplama bakımından kolaylığı ve aynı zamanda yüksek doğruluğu bulunması nedeniyle Sonlu Farklar Yöntemi (SFY) ile incelenmiş ve bu yöntem teorik olarak model topraklama ağlarının analizinde kullanılmıştır. Bu amaçla 2. bölümde topraklama hakkındaki temel kavramlar sunulmuş ve 3. bölümde topraklama ağlarının incelenmesine yer verilmiştir. 4. bölümde topraklama ağlarında akım dağılımlarının elde edilmesi ve özdirenç ve karşılıklı direnç ifadelerinin çıkarılmasına ilişkin sayısal ifadeler sunularak 5.bölümde topraklama ağlarının hem ağ içerisine tekabül eden toprak yüzeyinde hem de referans toprağa kadar mesafedeki toprak yüzeyinde potansiyel dağılım ifadeleri elde edilmiştir. Ayrıca model topraklama ağ örnekleri için toprak yüzeyindeki potansiyel dağılım ifadelerinin SFY ile çözümü elde edilerek sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir. Son bölümde de elde edilen sonuçlar ve akabinde öneriler sunulmuştur.

Bu çalışmada öne çıkarılmak istenen tema, farklı iletken sayısına ait kare topraklama ağlarının hata durumu sonrasında toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımın SFY ile hesaplanarak sonuçların grafiksel olarak sunulmasıdır. Böylece tasarlanması planlanacak topraklama ağ modeli için referans oluşturması amaçlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Topraklama ağı, özdirenç, karşılıklı direnç, akım dağılımı, potansiyel dağılım, sonlu farklar yöntemi.

## **ABSTRACT**

In electrical plants, connecting the voltage free parts and the protection cords with their linked sections via a conductor into the earth surface named as grounding. In order to obtain continuity of electrical systems and to save human life, the parts that applied voltage have insulated in electrical systems. At insulation against the earth, becoming a failure, as every time a deterioration and penetration with various reasons, is inevitable. Grounding is one of the methods, which aims to keep the security of human life in such a possible fault condition.

In this thesis, the grounding grids that widely used in electrical systems have analyzed with Finite Difference Method (FDM) because of the simplicity in calculations and high accuracy of the method and this method used theoretically for analyzing the model grounding grids. With this goal, fundamental concepts regarding the grounding have given in section 2 and the inspections on grounding grids have stated in section 3. In section 4, obtaining the current distribution, self resistance and mutual resistance is stated with the use of numerical expressions and in section 5, the potential distribution that correspond earth surface of both the points inside the grid and the points up to reference earth has calculated. In addition to these, solution of the potential distribution expressions on earth surface with FDM have obtained and the results have shown in graphically. In the final section, attained results and suggestions have mentioned.

The theme that desired to highlight in this thesis is to express the calculation of the potential distribution on earth surface of a square grounding grid after a failure case with FDM, and illustrate the results graphically. By doing as, it has desired to be a reference for the grounding grid model, which is planning to design.

**Key words:** Grounding grid, self resistance, mutual resistance, current distribution, potential distribution, finite difference method.

## 1. GİRİŞ

Elektrik tesislerinde aktif olmayan bölümler ile sıfır iletkenleri ve bunlara bağlı bölümlerin, bir iletken yardımı ile toprakla irtibatlandırılması işlemine topraklama denilmektedir. Elektrik sistemlerinin devamlılığını sağlamak ve insan hayatını güvenceye almak için elektrik sistemlerinde, gerilim altındaki kısımlar yalıtılırlar. Toprağa karşı yalıtımda, çeşitli sebeplerle, her zaman bozulma ve delinme şeklinde hata meydana gelmesi kaçınılmazdır. Topraklama, meydana gelebilecek bu çeşit bir hata durumunda, insan hayatını güvenceye almak maksadıyla uygulanacak işlemlerden biridir.

Alçak gerilim tesislerinde öncelikli olarak insan hayatını koruma amaçlı topraklamaya alternatif koruma yöntemleri olduğu halde yüksek gerilim tesisleri için tek çözüm topraklamadır. Topraklamada genel amaç adım ve temas gerilim değerlerinin belirlenmiş sınır değerlerinin altında tutarak insanlar, diğer canlılar ve kullanılan donanımların tehlikeli gerilimlere maruz kalmamasını sağlamaktır.

Ohm yasası gereğince arıza durumunda potansiyel değerlerin yüksek değerler almamasını sağlamak üzere toplam geçiş direnç değerinin yani topraklama sisteminin yayılma direncinin mümkün olduğunca küçük tutmak gereklidir. Böylece seçilen topraklayıcı ile arıza veya darbe akımının en kısa yoldan toprağa akması sağlanması arzu edilir.

“Sonlu Farklar Yöntemi İle Topraklama Ağlarındaki Potansiyel Dağılımın Hesaplanması” adlı bu tez çalışmasında; yaygın kullanımı olan topraklayıcı çeşitlerinden topraklama ağlarının tek katmanlı toprakta, arıza durumunda ağ ile referans toprak arasındaki toprak yüzeyinde potansiyel dağılımın hesaplanması ve sonuçların üç boyutlu olarak gösterilmesi amaçlanmıştır.

İlk bölümlerde sırasıyla topraklama ile ilgili temel kavramlar ve topraklayıcı çeşitleri verilerek topraklama terminolojisinden bahsedilecek olup sonraki her bir bölümde sonuç model topraklama ağ modelleri için hesaplamalarda kullanılacak değerlerin elde edilmesi ile ilgili yöntemlerin adım adım incelenmesi yer alacaktır.

Topraklama ağlarının analizi ile ilgili olarak 1960’lı yıllara kadar uzanan bilimsel çalışmalarda yayınlanan ve ileriki bölümlerde ayrıntılı biçimde bazıları yoğun olarak ele alınacak olan çok sayıda sayısal yöntem bulunmaktadır.

Topraklama ağı ile referans toprak arasındaki potansiyel dağılımın sayısal analizi yapılırken sonlu farklar yönteminden (SFY) yararlanılmıştır. SFY; kısmi türevli denklemlerin

çözümlemesinde kullanılan ve kullanımı 1940'lı yıllardan sonra artan bir sayısal yöntemdir. Bu yöntem ile bir alan problemi, sınır koşulları verilen yani sınırları üzerinde bazı alan büyüklükleri bilinen sınırlı bir bölge içerisinde incelenir. Göz önüne alınan bölgede potansiyel dağılımın sürekli olduğu kabul edilir. Potansiyel dağılımın bulunacağı bölgede belirli noktalar için yazılan sonlu fark eşitliklerinin oluşturduğu doğrusal denklem sisteminin çözülmesiyle bu noktalardaki potansiyel değerler elde edilir. Bu yöntem topraklama ağı ile referans toprak arasındaki potansiyel dağılım için ağırlıklı olarak kullanılacaktır.

Ağ içerisindeki belirli noktaların potansiyel değer ifadelerinin elde edilmesi içinse Robert J. Hepp'e'nin, gerek ağ iletkenlerindeki kaçak akımların gerekse ağ iletkenlerinin karşılıklı direnç değerlerinin de hesaplamaya katılması bakımından uygun olması nedeniyle, enerjili bir ağ üzerindeki yüzeydeki potansiyel ifadenin hesaplama metodundan ağırlıklı olarak yararlanılacaktır.

Farklı iletken sayısına sahip kare topraklama ağları için öz ve karşılıklı direnç değerlerinin bulunması, ağ içerisinde belirlenen noktalar için potansiyel ifadelerin elde edilmesi, yine ağ ile referans toprak arasındaki potansiyel dağılımın SFY ile hesaplanması ve son olarak sonuçların üç boyutlu olarak gösterimi için MS EXCEL® programından yararlanılarak formüllerin yazımı ile grafikler için gerekli veri değerleri ilgili kısımlarda sunulacaktır.

## 2. ELEKTRİK TESİSLERİNDE TOPRAKLAMA ve TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ

Topraklama tesisleri normal işletme esnasında varlığını hemen hemen hiç hissettirmedeği halde bir arıza halinde etkisini gösterir ve görevini yapar. Elektrikle iş gören herhangi bir donanımda yalıtım hatası meydana gelmesi, cihazın işletimi ile ilgisi olmayan madeni aksamının gerilime maruz kalmasıyla sonuçlanır. Topraklama sistemleri bu durumlarda devreye girer ve eğer gerektiği gibi planlanmışsa hiçbir canlı ve aksama hasar gelmeden arıza durumunda oluşan potansiyelin topraklayıcı elemanı üzerinden toprağa akışını sağlar.

Topraklama sistemlerinde topraklayıcılar yaygın olarak çubuk, şerit (topraklama ağı) ve levha biçiminde yer alırlar. Hangi tip topraklayıcı kullanılırsa kullanılsın sistemin toprakla bağlantısını sağlayacak elektrotun her noktasının toprakla tam temasını sağlamak esastır.

### 2.1 Topraklama ile İlgili Temel Kavramlar

Burada elektrik sistemlerinde adı geçen ve yeri geldikçe bahsedilecek bazı temel kavramlar üzerinde durulacaktır.

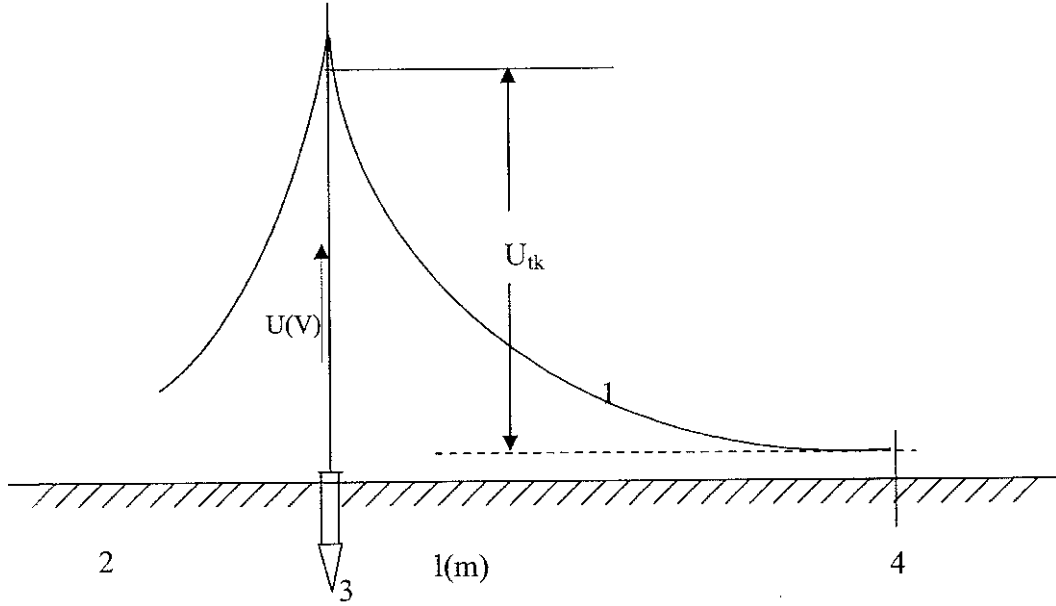
**Toprak:** Dünyanın doğal yapısını oluşturan madde olup, nemle karışık, killi, kumlu, humuslu toprak veya nemle birlikte toprak, kum, çakıl, taş veya bunların karışımıdır.

**Topraklama:** Topraklanacak olan iletken kısımların bir topraklama tesisi üzerinden toprağa bağlanmasıdır.

**Topraklayıcı:** Yeraltında toprağa gömülen ve bununla iletken bağlantıda bulunan bir iletkenidir. Topraklayıcı çeşidi olarak; şerit, çubuk, levha ve şerit topraklayıcıların bir çeşidi olan topraklama ağı veya bunların birlikte kullanımı bulunmaktadır.

**Topraklama İletkeni:** Topraklanacak olan cihaz veya tesis kısmı ile topraklayıcı arasındaki ve toprağın üstünde bulunan veya toprak altında yalıtılmış olarak gömülen iletken bağlantıdır.

**Potansiyel Dağılımı:** Topraklanmış bir işletme aracında, bir hata sonucu olarak, bir gövde kısa devresi olduğunda, referans toprağından itibaren ölçülmek üzere bahsi geçen işletme aracına doğru yer yüzeyindeki potansiyelin dağılımıdır. Başka bir ifadeyle yüksek gerilim trafo merkezlerindeki herhangi bir faz-toprak kısadevresi veya bir yıldırım darbesinin isabet etmesi sonucu toprağın "h" kadar altına gömülü topraklama ağının referans toprağa göre yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımıdır.



Şekil 2.1 Referans toprağa göre topraklayıcının yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı

U(V) : Gerilim eksenini  
 l(m) : Uzaklık eksenini  
 U<sub>tk</sub> : Topraklayıcı gerilimi

1- Potansiyel değişimi  
 2- Toprak  
 3- Topraklayıcı  
 4- Referans toprağı

**Referans Toprağı:** Bir topraklayıcıdan yeter derecede uzakta bulunan (yaklaşık 20 m.) ve topraklayıcı ile herhangi bir nokta arasında belirgin bir gerilim meydana gelmeyen ve özellikle yer yüzeyinin özellikle bir bölgesidir.

**Toprak Özgül Direnci:** Dünyanın doğal yapısını oluşturan maddenin yani toprağın özgül elektriksel direnci olup birimi genellikle ohm.m cinsinden verilir. Bu değer bir kenarının uzunluğu 1 m. olan toprak bir küpün karşılıklı iki yüzeyi arasındaki direnç değeridir. Toprağın kimyasal yapısı değiştikçe özgül direnci de değişir.

**Topraklayıcı Yayılma Direnci:** Bir topraklayıcı veya topraklama tesisi ile referans toprağı arasındaki dirençtir.

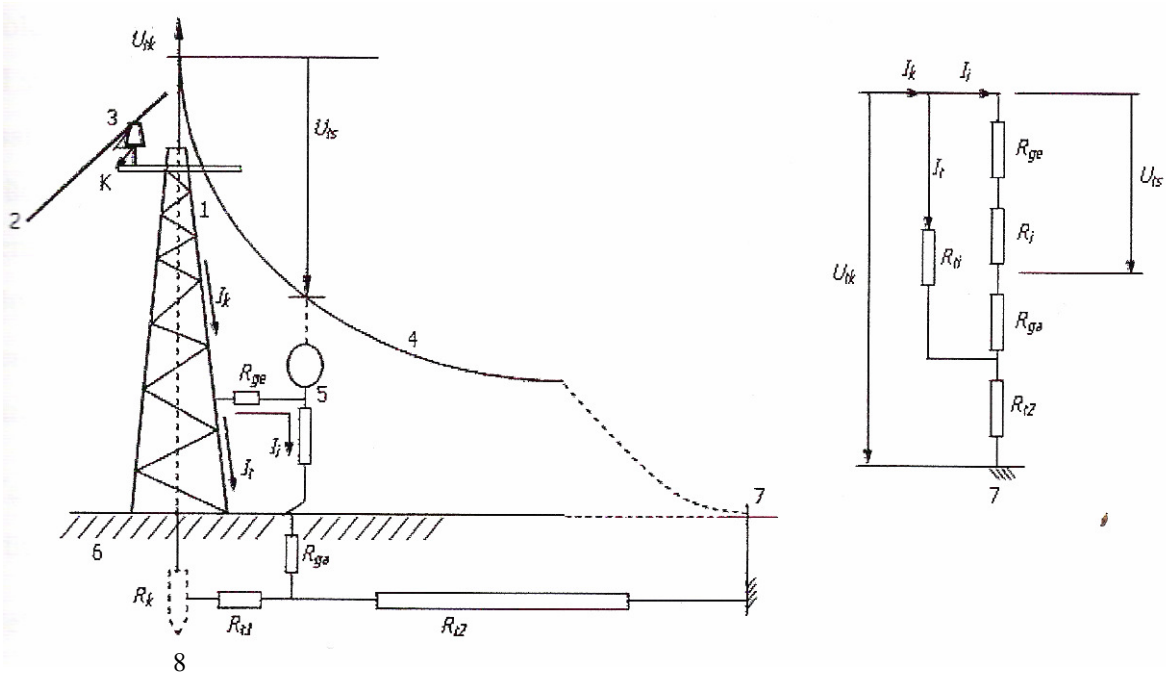
**Darbe Yayılma Direnci:** Akım darbelerinin geçmesi esnasında etkili olan yayılma direncidir. Bu değer; topraklayıcının şekline, toprağın cinsine ve akım darbesinin zamana göre değişimine bağlıdır.

**Topraklama Direnci:** Topraklayıcının yayılma direnci ile topraklama iletkenin direncinin toplamına eşittir.

**Göz Potansiyeli:** Bir topraklama ağında, gözün orta noktasında ölçülen, topraklama ağı ile toprak yüzeyi arasındaki potansiyel farkı olarak veya referans toprağa göre ağıın iletkenlerindeki potansiyel artışının yüzde olarak ifade edilmesidir.

**Temas Gerilimi:** İşletmedeki bir ekipmanı besleyen fazlardan birinin hata sonucu ekipmanın topraklanmış kısmına temas etmesi ve topraklanmış kısma bir insanın temasıyla insan vücudu ile toprak arasında bir potansiyel fark oluşur. Buna temas gerilim denir.

Bir yüksek gerilim hava hattına ait bir direk üzerindeki bir izolatörde bir atlama olması sonucunda bir faz hattının direğin topraklanmış olan madeni gövdesine temas ettiği ve hata yerinden  $I_k$  gibi bir hata akımının geçtiği kabul edildiğinde, hatalı kısmın etrafında meydana gelen potansiyel dağılımı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Bir yüksek gerilim tesisinde bir toprak teması olması durumunda temas gerilimi

- a - Tesisin Şeması  
b - Eşdeğer Şema

- 1- Madeni yüksek gerilim direği  
2- Hava hattı  
3- İzolatör  
4- Potansiyel dağılımı

- 5- Yüksek gerilim direğine dokunan insan
- 6- Toprak
- 7- Referans toprağı
- 8- Topraklayıcı
- K- Toprak teması
- $R_{ga}$ - Ayaktan geçiş direnci
- $R_k$ - Koruma topraklaması
- $R_i$ - İnsan vücudunun direnci
- $R_{ge}$ - Elden geçiş direnci
- $R_t$ - Ayaktan geçiş direnci
- $U_{tk}$ - Topraklayıcı gerilimi
- $U_{ts}$ - İnsan teması esnasındaki temas gerilimi
- $I_k$ - Bir faz toprak kısa devre akımı
- $I_i$ - İnsan vücudundan geçen akım
- $I_t$ - Toprak akımı

Temas geriliminin yalnız el ile ayak arasında olması şart değildir; biri hata gerilimi ile ve diğeri toprak ile temas eden vücudun herhangi iki noktası örneğin iki el arasında da bir akım yolu meydana gelebilir. Birinci durumda akım yolu ile ayak arasında ve ikincisinde ise iki el arasındadır. Çoğu kez insanın durduğu nokta, potansiyel değişimin en büyük olduğu noktaya isabet ettiğinden temas gerilimi, topraklayıcı ile insanın durduğu yerdeki potansiyel farkından daha büyük olur. Bu bakımdan iki cins temas geriliminden bahsetmek mümkündür. Birincisi, insan vücudunun temas etmesinden önce ölçülebilen temas gerilimi,  $U_{te}$  ve ikincisi insan tarafından meydana gelen temas gerilimi,  $U_{ts}$ 'dir.

Temas sırasında meydana gelen temas gerilimi ise el ve ayaktaki geçiş dirençleri ile insan vücudunun direncinde oluşan toplam gerilim düşümüdür ve genellikle  $U_{te} > U_{ts}$ 'dir.

Şekil 2.2a'dan da görülebileceği gibi, topraklayıcıya ait toplam yayılma direnci  $R_t = R_y$  olup ayağın yer ile temas ettiği noktadan topraklayıcıya kadar olan kısmı  $R_{t1}$  ve referans toprağına kadar olan kısmı  $R_{t2}$  olarak gösterilmiştir. Buna göre;

$$R = R_{t1} + R_{t2} \quad (2.1)$$

dir. Temastan önceki temas gerilimi bu durumda;

$$U_{te} = I_k \cdot R_{t1} = \frac{U_{tk}}{R_t} \cdot R_{t1} = U_{tk} \cdot \frac{R_{t1}}{R_{t1} + R_{t2}} \quad (2.2)$$

olur.

Bu bağıntı temas geriliminin topraklayıcı geriliminin bir kısmı olduğunu açıkça gösterir. İdeal bir koruma topraklamasında  $R_{t1} = 0$  olması gerektiğinden, ideal durumda  $U_{te} = 0$  olur.

İnsan vücudunun temas ettiği yerde hata akımı iki kola ayrılır. İnsan vücudundan geçen akım  $I_i$  ise, buna göre direk üzerinden geçen akım;

$$I_t = I_k - I_i \quad (2.3)$$

olur.

İnsan vücudunun direnci  $R_i$ 'dir. Direk üzerindeki el ile temas noktasındaki geçiş direnci  $R_{ge}$  ile zemin üzerindeki ayağın toprağa karşı geçiş direnci  $R_{ga}$  ile gösterilmiştir. Genellikle  $R_i$ 'ye seri olan eldeki geçiş direnci  $R_{ge}$  küçüktür ve ihmal edilebilir.

Şekil 2.2b'deki eşdeğer şemada gösterilen paralel akım kollarındaki akımlar, kolların dirençleri ile ters orantılı olduğundan;

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{R_i + \frac{R_{ga}}{2}}{R_{t1}} \quad (2.4)$$

veya

$$\frac{I_k - I_t}{I_i} = \frac{R_i + \frac{R_{ga}}{2}}{R_{t1}} \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikten yararlanılarak insan vücudundan geçen akım için,

$$I_i = I_k \cdot \frac{R_{t1}}{R_i + R_{ia} + 2 + R_{t1}} \quad (2.6)$$

yazılabilir.

Buradan da, insan vücudunun teması esnasındaki temas gerilimi,

$$U_{ts} = I_i \cdot R_i \quad (2.7)$$

olduğundan,

$$U_{ts} = I_k \cdot \frac{R_i \cdot R_{t1}}{R_i + R_{ga} + 2 + R_{t1}} \quad (2.8)$$

veya

$$U_{ts} = U_{te} \cdot \frac{R_i}{\frac{R_i + R_{ga}}{2 + R_{t1}}} \quad (2.9)$$

olur.

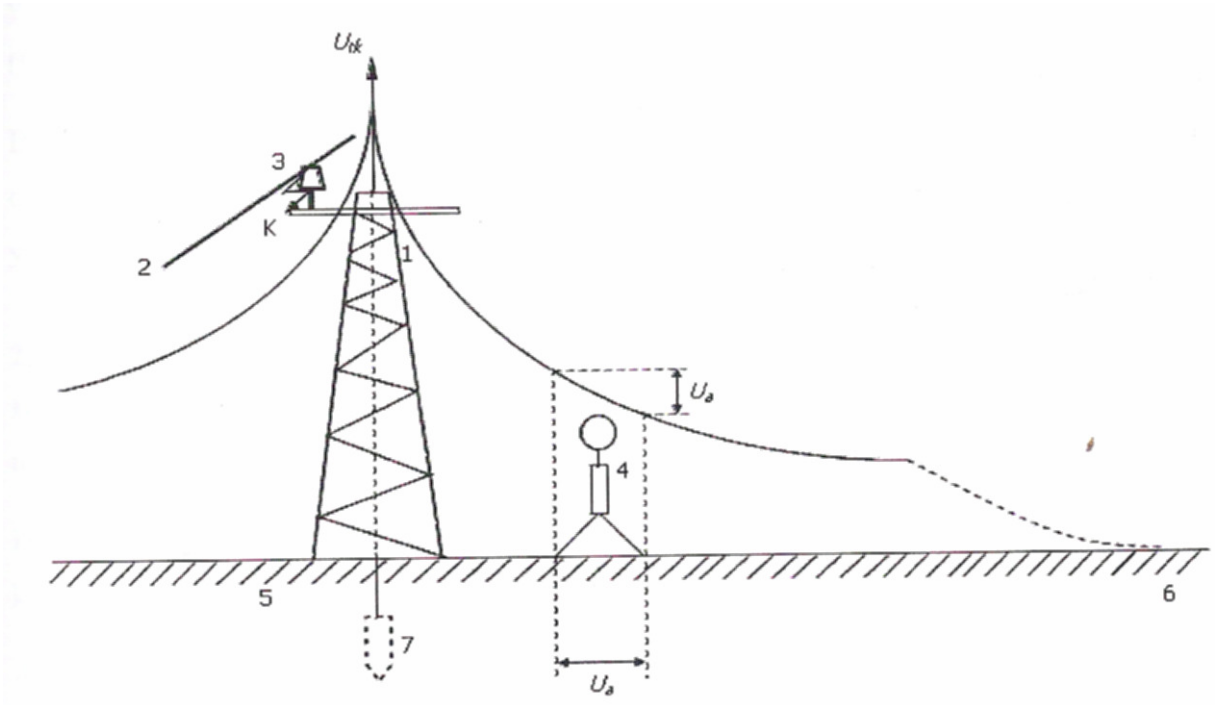
Burada bazı özel durumlardan bahsetmek gerekir.

Özel durumlar;

- 1)  $R_i = 0$  ise bu durum, direğe dokunan bir insanın iletken bir kıyafet örneğın madeni bir zırh giymesine eşdeğerdır. Bu durumda  $U_{ts} = 0$  olur ve bir tehlike söz konusu olmaz.
- 2)  $R_i = \infty$  ise bu durumda insanın vücut direnci sonsuzdur. Denklem (2.9)'a göre temas gerilimi olarak  $U_{ts} = I_k \cdot R_{t1} = U_{te}$  elde edilir. Fakat bu durumda insan üzerinden akım geçmeyeceğı için bir kaza olmaz.
- 3)  $R_{ga} = 0$  ise söz konusu insanın bastığı yer ıslaktır veya ayakkabılarının tabanı madenidir. Ayrıca  $R_i \gg R_{t1}$  olduğundan  $R_i$  yanında  $R_{t1}$  ihmal edilerek temas gerilimi  $U_{ts} = I_k \cdot R_{t1} = U_{te}$  değerını alır. Zeminin ıslak olması, temas geriliminin büyük ve tehlikenin daha fazla olmasına yol açar.
- 4)  $R_{ga} = \infty$  ise bu durum, insanın ayak bastığı yerin yalıtılmış olmasına karşılık düşer. Buna göre  $U_{ts} = 0$  olur. Ayak basılan yerin uygun bir şekilde yalıtılması ile temas gerilimlerine karşı bir koruma sağlanmış olur.
- 5)  $R_{ga} = 0$  ve  $R_{t1} = 0$  ise, yani ayak basılan yer iletken olup topraklayıcı ile ve topraklanacak kısımla bağlanmışır. Bu koşullar altında insan vücudunun direnci kısa devre edilmiş olduğundan  $R_i = 0$ 'dır.  $U_{ts} = 0$  olduğundan bu durum ideal topraklamaya karşılık düşer.

**Adım Gerilimi:** Alçak gerilim tesislerinde önemli olmadığı halde, yüksek gerilim tesislerinde insan ve hayvan hayatı bakımından önemli bir tehlike kaynağı olabilir. Örneğın bir Açık hava tesisinde bir yalıtım hatası yüzünden toprağa bir hata akımı geçerse ve topraklayıcı ile referans toprağı arasında meydana gelen potansiyel alanına bir insan veya bir hayvan girse bir adım gerilimine maruz kalır ve vücudundan bir akım geçer.

Şekil 2.3'te bir toprak kısa devresi durumunda oluşan potansiyel dağılımı ile bu alanın içinde bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Bir toprak kısa devresinde meydana gelen potansiyel dağılımı ve bu alanda bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi

- 1- Madeni direk
- 2- Hava izolatörü
- 3- İzolatör
- 4- Potansiyel alandaki insan
- 5- Toprak
- 6- Referans toprağı
- 7- Topraklayıcı
- $U_{tk}$ : Topraklayıcı gerilimi
- $U_a$  : Adım gerilimi

Bu durumda adım gerilimi, üzerinden akım geçen topraklayıcıya ait potansiyel alanı içinde her bir ayağı karşı düşen potansiyellerin farkına eşittir. İnsanın ve hayvanın eş potansiyel çizgilere dik yürümesi durumunda iki ayağı arasındaki potansiyel farkı yani adım gerilimi en büyük değerdedir. Yine eş potansiyel çizgilere paralel yürüyen bir insanda iki ayağı arasındaki potansiyel farkı sıfırdır. Diğer yönlerdeki adım gerilimleri sıfır ile maksimum değer arasında değişir. Ayrıca adım gerilimi adım uzunluğuna bağlıdır.

Topraklayıcı yakınında potansiyel değişimi en büyük değeri aldığından, topraklayıcıya yakın olan yerlerde adım gerilimi daha büyük değerler alır ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım geriliminin değeri düşer. Bu nedenle adım gerilimi, temas gerilimine göre daha küçük değerler alır. Adım gerilimi yüzünden bir tehlike, yalnız topraklayıcı veya topraklama tesisi

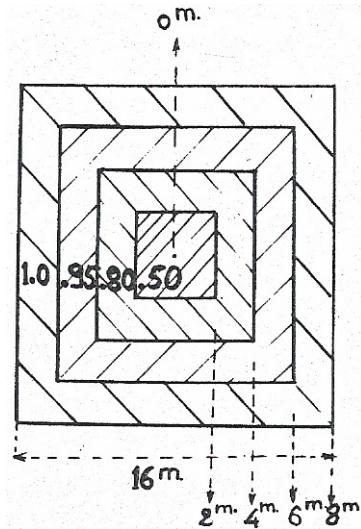
üzerinden bir hata akımı geçtiğinde baş göstermez. Aynı zamanda topraklayıcının direnci büyük akımlarla ölçüldüğü zaman da meydana gelir. Bu sebeple, bu gibi durumlarda önlem alınması gerekir. Bir insanın adım uzunluğunun yaklaşık 1 metre olduğu ve akımında bir ayaktan ötekine doğru geçtiği kabul edilir. Ayaktan ayağa akım geçtiğinde kalp üzerinden geçen akım şiddetinin aynı koşullar altında elen ele geçerken kalp üzerinden geçen akımın 1/10'ine eşittir. Bu nedenle izin verilen temas gerilimine göre daha büyük bir adım gerilimine izin verilir ( $U_t = 65 \text{ V}$ ,  $U_a = 90 \text{ V}$ ).

**Göz Gerilimi:** Topraklama ağlarında, referans toprağa göre topraklama ağı potansiyelinin yükselmesine göre, ağın gözlerinin ortasında volt olarak ifade edilen yer yüzeyindeki potansiyel değeridir.

**Akım Yoğunluğu:** Bir iletkenden birim zamanda geçen akım miktarına denir ve birimi  $A/m^2$ 'dir. Teorik çalışmalarda akım yoğunluğu için üç farklı kabul yapılmaktadır (Dawalibi ve Mudhedkar, 1975).

Bunlar;

- 1) Ağ iletkenlerindeki akım yoğunluğu homojen ve sabittir.
- 2) Ağ iletkenlerinde akım yoğunluğu homojen değildir. Homojen olmayan akım yoğunluğu faktörü  $J$ , Şekil 2.4'e göre seçilir.



Şekil 2.4 Ağ iletkenlerine akım yoğunluğu faktörünün değişimi

- 3) Ağ iletkenlerindeki akım yoğunluğu homojen değildir ve akım yoğunluk faktörü  $\delta$ ; ağın merkezinde sıfır olmak üzere ağın diğer kısmındaki maksimum değere kadar lineer biçimde değişir. Matematiksel olarak şöyle ifade edilir:

$$\delta = a \cdot d_{cj} \quad (2.10)$$

Burada,

$a$  : İletkenden dışa doğru sızan toplam akıma uygun olarak seçilen bir sabit

$d_{cj}$  : Ağın kapladığı alanın merkezi ile iletken üzerindeki herhangi bir nokta arasındaki uzaklığın metre cinsinden değeridir.

Bu çalışmada ağ iletkenlerinden akan akım yoğunluğunun sabit ve homojen olduğu kabul edilecektir.

## 2.2 Topraklama Çeşitlerine Göre Tanımlar

Elektrik tesislerinde topraklamaların uygulama alanları ve yapılan topraklamaların amaçları ile şekilleri farklıdır. Buna göre topraklamaların başlıca çeşitleri şöyle sıralanabilir:

**Koruma Topraklaması:** İnsanları ve hayvanları tehlikeli temas veya adım gerilimine karşı korumak maksadı ile tesislerin işletme ile doğrudan ilişkisi bulunmayan ve bir yalıtım hatası ve/veya ark sonucu insanların ve hayvanların teması anında tehlike oluşturabilecek iletken aksamın toprağa bağlanması ile yapılan topraklama tesisine verilen addır.

Transformatörlerin, kesicilerin, ayırıcıların, izolatörlerin, şasilerin, hava hattı direk demirlerinin, beton direklerin ve demir teçhizatının, binalarda kolon ve kirişlerin demir aksamının, kablolarda zırhın ve ekranın, akım ve gerilim transformatörlerinin sekonder sargı uçlarının birinin topraklanması koruma topraklamalarına örnek olarak gösterilebilir.

**İşletme Topraklaması:** Genel ifade ile gerilim altındaki aktif kısımların ve sıfır hattının topraklanmasıdır ve işletme akım devresinin toprağa karşı potansiyel değerinin belirli sınırlar içinde tutulmasını sağlar. Eğer işletme topraklamasında topraklayıcının kendinden başka devrede başka herhangi bir direnç ilavesi yoksa bu tip topraklama direkt topraklama olarak anılır. Ancak topraklayıcıya ilaveten devrede ohmik, endüktif veya kapasitif dirençler bağlanmışsa bu tarz işletme topraklaması endirekt topraklama ismin alır. Generatör ve transformatörlerin yıldız uçlarının, nötr iletkenlerinin, yüksek gerilim transformatörlerinin yüksek gerilim tarafındaki topraklamalar işletme topraklamalarına örnek olarak verilebilir.

**Fonksiyon Topraklaması:** Bir işletim tesisinin veya bir işletme elemanının fonksiyonunu yerine getirmesi için yapılan topraklamadır. İletişim cihazlarında toprağı dönüş iletkeni olarak kullanmak suretiyle işletme akımlarını da taşır.

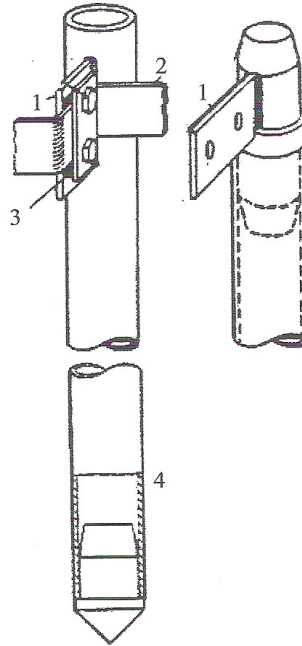
### 2.3 Topraklama Sistemleri

Bu bölümde günümüzde yaygın olarak kullanılan topraklayıcılar ele alınacaktır.

Topraklayıcıların, toprağın durumuna ve topraklayıcı olarak kullanılan malzemenin cinsine, geometrik şekillerine ve toprağa gömülme derinliğine göre birçok çeşitleri vardır. Topraklayıcı tipinin seçiminde ve düzenlenmesinde yerel koşullar, zeminin yapısı ve izin verilen yayılma direnci göz önüne alınır. Buna göre yaygın kullanıma sahip topraklayıcılar aşağıda verilmektedir.

#### 2.3.1 Çubuk

Genellikle 25 mm çapında çelik borudan veya buna eşdeğer çelik profilden yapılırlar ve genellikle zemine dik olarak çakılırlar. Uzunlukları 3-5 m kadardır ve üst ucu 50 cm kadar toprak altında kalır. Çubuk topraklayıcılar oldukça derine gömüldüklerinden, yazın zemin kurusa bile topraklayıcı daima nemli zeminde bulunur ve çok iyi bir topraklama sağlar. Nu nedenle buna derin topraklayıcı denir.



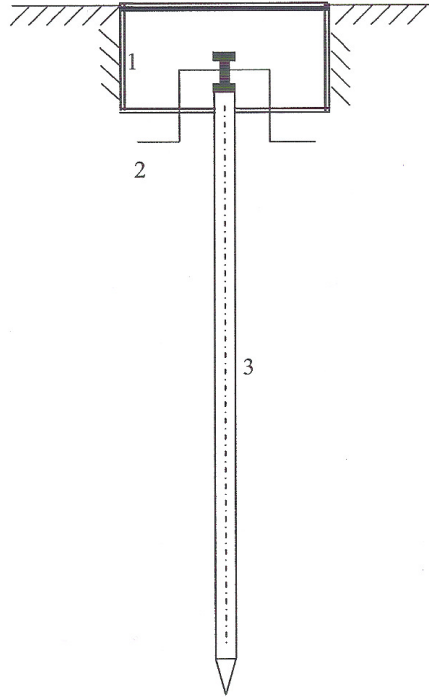
Şekil 2.5 Çubuk topraklayıcı

- 1- Bağlama ucu
- 2- Topraklama iletkeni
- 3- Kurşun tabaka
- 4- Boru topraklayıcının ucu

Çubuk topraklayıcının çapı, yayılma direnci üzerine çok az etki eder; onun için boru çapı veya

profil kesiti mekanik dayanma ve korozyon olaylarına göre belirlenir. Yayılma direnci, çubuk uzunluğuna, çakılacak zemine yerleştirilmesine bağlı olarak değeri küçük olur.

İstenilen yayılma direnci elde edilemeyen zemin yapılarında, üzerlerinde delikler bulunan ve içine bir iletken sıvının döküldüğü bir cins boru topraklayıcıdan meydana gelen “emdirmeli topraklayıcı” kullanılır.



Şekil 2.6 Emdirmeli topraklayıcı

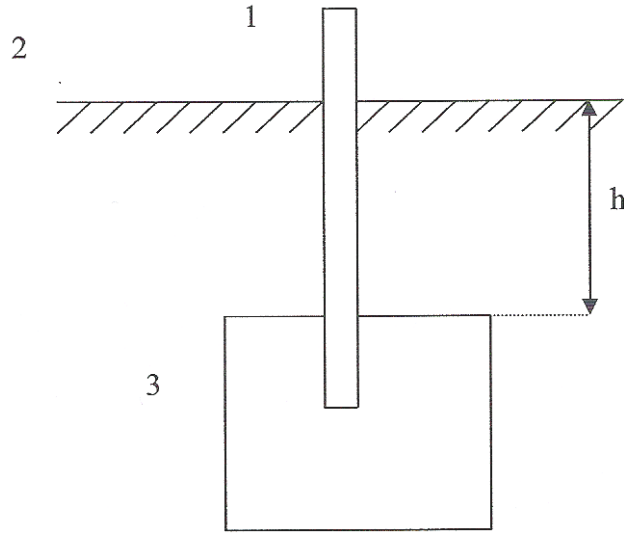
- 1- Topraklama bağlama başlığı kutusu
- 2- Topraklama iletkeni
- 3- Topraklayıcı çubuğu

### 2.3.2 Levha

Geçmiş yıllarda çok kullanılan ancak günümüzde önemini yitirmiş bir topraklayıcı cinsidir. Levha topraklayıcıda belirli bir yayılma direnci elde etmek için başka cins topraklayıcılara göre çok daha fazla malzemeye ihtiyaç vardır. Bunun sebebi şöyle açıklanabilir; topraklayıcı levhanın şeritlere ayrıldığı kabul edilirse bunlar karşılıklı olarak akımın toprağa geçmesine engel olurlar. Bunun için topraklama levhasına örneğin tarak şekli vermekle aynı yayılma direnci sağlandığı durumda daha az malzeme kullanılmış olur.

Levha zemine dik olarak yerleştirilir. Eğer levha zemine paralel olarak yerleştirilecek olursa

bunun ancak üst yüzeyi etkili olur. Çünkü toprağın çökmesiyle levhanın altı boşlukta kalabilir. Şekil 2.7’de levha topraklayıcı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.7 Levha topraklayıcı

- 1- Topraklama iletkeni
- 2- Zemin, toprak
- 3- Levha topraklayıcı

Uygulamalara bağlı olarak, levhanın alanı büyük seçilebilmektedir. Şekil ise daha çok fiziksel sınırlamalara uyum sağlayabilmesi bakımından kare ve çoğunlukla dikdörtgen biçiminde seçilir.

### 2.3.3 Şerit

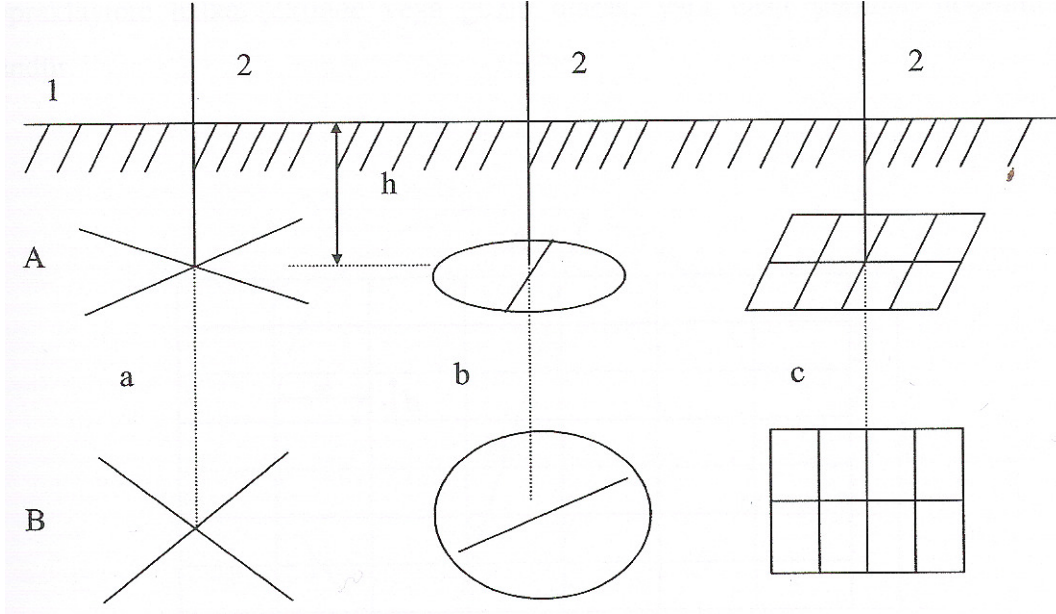
En az 3 mm kalınlığında ve  $100 \text{ mm}^2$  kesitinde galvanizli demir şeritten yapılırlar. Bundan başka yuvarlak iletkenler veya örgülü tellerde bu maksatla kullanılabilirler. Çok derine gömülmediklerinden dolayı bunlara “yüzeysel topraklayıcılar” adı verilir. İklim koşulları göz önüne alınarak sürekli olarak nemli kalacak ve donma olmayacak şekilde bir gömülme derinliği seçilir ki bu derinlik 0,5-1 m kadardır.

En basit şerit topraklayıcı boylu boyuna döşenen bir şeritten oluşur. Bunun yayılma direnci öncelikle şeridin uzunluğuna bağlıdır. Bunun için yalnız yassı şerit kullanılır.

Yassı şeritler toprağa, yüksek kenarı yukarıya gelecek şekilde döşenir. Böylece toprak ile şerit arasında boşlukların kalmaması ve akımın toprağa daha iyi geçmesi sağlanır. Şerit

topraklayıcıda yayılma direnci kesitten çok uzunluğa bağlıdır (Bayram, 2000).

Şerit topraklayıcılar en çok yıldız, halka, gözlü veya bunların kombinasyonu şeklinde yapılır. Şekil 2.8'de en çok kullanılan şerit topraklayıcıların yapıları gösterilmektedir. Bu topraklayıcılar da yaklaşık olarak 0,5-1 m derinlikte, yeryüzüne paralel olarak gömülürler.



Şekil 2.8 Şerit topraklayıcıların çeşitleri

A- Perspektif görünüş

B- Üstten görünüş

a- Dört kollu yıldız topraklayıcı

b- Halka topraklayıcı

c- Ağ topraklayıcı

1- Zemin, toprak

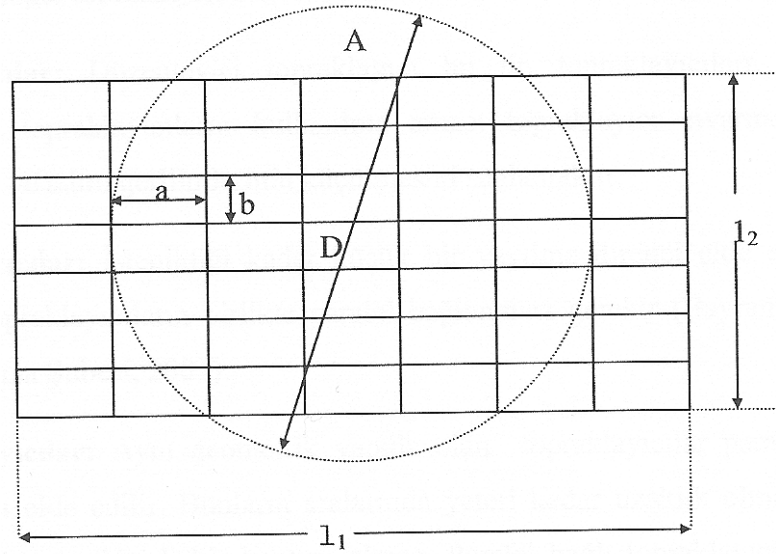
2- Topraklama iletkeni

h- Gömülme derinliği

Yıldız topraklayıcılar daha çok direk topraklanmasında kullanılırlar. Buna karşılık, örneğin bir yüksek gerilim açık hava bağlama tesisinde olduğu gibi, büyük bir alana yayılmış çok sayıda topraklamanın yapılması söz konusu olan yerlerde, yeraltına uygun derinlikte paralel şeritlerden oluşan bir topraklayıcının kullanılması çok uygun olur. Kullanılacak paralel şeritlerin sayısının belirlenmesinde mümkün olduğu kadar az malzeme kullanarak ve karşılıklı etkinin az olmasını sağlayarak düşük bir yayılma direncinin sağlanması düşünülmez. Bu gibi durumlarda daha çok direkt topraklanmış şebekelerde, temas ve adım gerilimlerinin izin

verilen sınırları aşmayacak şekilde alan şiddetinin küçük yani yer yüzeyindeki gerilim dağılımının yatık olması önemlidir. Onun için paralel şeritlerden yapılmış bu gibi topraklamalar aynı zamanda potansiyel düzenleyici olarak da iş görürler. Malzemenin yararlanma bakımından şerit topraklayıcının halka şeklinde veya gözlü olarak yani hasır şeklinde döşenmesi de mümkündür.

Gözlü topraklayıcılar da paralel şeritlerden meydana gelir. Ayrıca hem iyi bir akım dağılımı sağlamak ve hem de topraklanacak başka makine, cihaz veya tesisleri bağlayabilmek için enine bağlamalar da yapılır. Bu enine bağlamalar, köşelerde meydana gelen karşılıklı etki sebebiyle yayılma direncinin düşmesine daha az yardımcı olurlar. Buna karşılık direkt topraklanmış şebekelerde temas ve adım gerilimlerinin izin verilen sınırlar içinde kalması için alan şiddetinin küçük olmasını sağlarlar. Gerek paralel şeritlerden yapılmış topraklayıcılarda ve gerekse hasır şeklinde gözlü topraklayıcılarda karakteristik büyüklük, bu topraklayıcıların kapladıkları alanın çevresi ve alanıdır.



Şekil 2.9 Gözlü topraklayıcı

$l_1$ - Boyuna iletkenlerin uzunluğu

$l_2$ - Enine iletkenlerin uzunluğu

$axb$ - Göz boyutları

A- Topraklayıcı alanı

D- A alanına eşdeğer daire çapı

### 2.3.4 Doğal

Şerit, çubuk ve levha topraklayıcılar yapay topraklayıcılar olup bunlardan başka doğal topraklayıcılar da vardır. Doğal topraklayıcının birinci ve en önemli tipi madeni borular ile yapılmış su borusu şebekesidir. Su borusunun topraklayıcı olarak özellikle alçak gerilim tesisleri için önemi büyüktür.

Su borusu şebekesinde yayılma direnci çok büyük ise ek topraklayıcıların örneğin kabloların madeni kılıfların bağlanması ile bu direnç küçültülür.

İkinci olarak, kabloların madeni kılıfları üçüncü olarak da yüksek gerilimli hava hatlarındaki koruma iletkenleri, doğal topraklayıcı olarak kullanılabilirler.

### 2.3.5 Özel

Düzenleyici topraklayıcı bu tip topraklayıcılara örnek olarak verilebilir. Bu tür topraklayıcıların kullanılma amacı, topraklayıcı civarında potansiyeli yatıklaştırarak temas ve adım gerilimlerinin küçülmesini sağlamaktır.

### 2.3.6 Birleşik

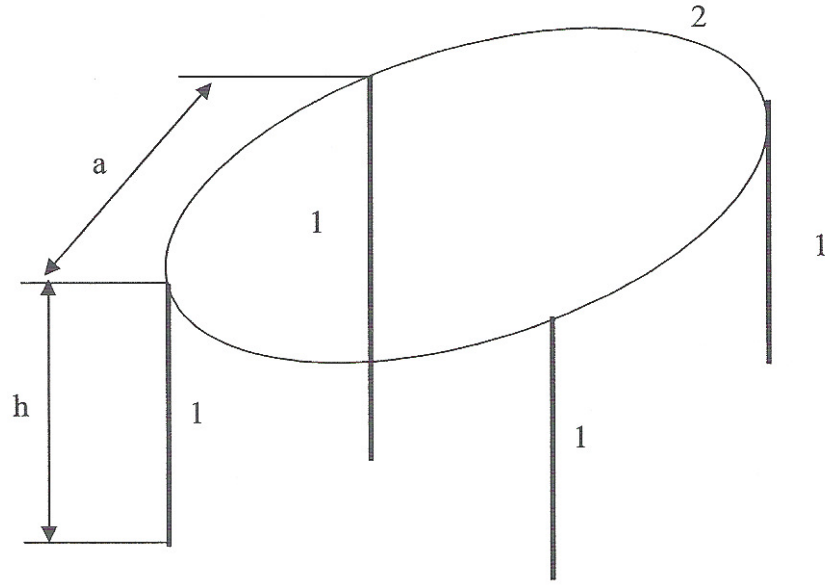
İstenildiği kadar küçük bir yayılma direnci elde etmek için bazen çeşitli tip topraklayıcıların birlikte paralel bağlanması gerekir.

### 2.3.7 Paralel

Aynı geometrik yapıda olan topraklayıcılar paralel bağlanarak paralel topraklayıcı elde edilir. Bunların arasında yeteri kadar uzaklık olması durumunda bunların birbirine karşı etkisi söz konusu olmaz. Paralel bağlı topraklayıcıların boyutları farklı olabilir. Her bir topraklayıcının yayılma direnci  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$  ise, toplam yayılma direnci şu ifade ile hesaplanır.

$$R_{top} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (2.11)$$

Çubuk topraklayıcılarda, topraklayıcılar arasındaki  $a$  uzaklığı;  $h$  çubuk uzunluğunun 2-3 katı ise, bu durumda topraklayıcıların karşılıklı etkisi söz konusu olmaz. Eğer kuraklık veya don sebebi ile çubuğun bütün uzunluğu etkili olmazsa,  $a$  aralığı etkili olan çubuk uzunluğunun iki katı olarak alınır. Levha topraklayıcılarda  $a = 3$  m normaldir.



Şekil 2.10 Paralel topraklayıcı

- 1- Birey topraklayıcılar
- 2- Paralel bağlama
- h- Topraklayıcıların uzunluğu
- a- Topraklayıcılar arasındaki uzaklık

### 2.3.8 Karma

Geometrik bakımdan farklı yapıdaki topraklayıcıların paralel bağlanması ile meydana gelen topraklayıcılara karma topraklayıcı adı verilir. Örneğin yüksek gerilimli açık hava bağlama tesislerinde bir normal gözlü topraklayıcı bulunduğu gibi, buraya giren ve çıkan hava hatlarına ait toprak iletkenleri, kabloları ait kurşun kılıf ve çelik zırh, demiryolu rayları, madeni su boruları vb. gibi doğal topraklayıcılar hep birlikte paralel bağlanırlar.

### 3. TOPRAKLAMA AĞLARININ ANALİZİ

Topraklama ağları genellikle belirli bir bölgede elektriksel donanımlar ve metalik yapılara genel bir topraklama sağlayacak şekilde toprak altına yatay gömülü ve toprak elektrotunun birbirine bağlı birkaç çıplak iletken içermesi ile oluşan bir sistemdir. Toprak yüzeyine yakın mesafede yatay olarak gömülü topraklama ağları ayrıca yüzey potansiyel dağılımının kontrol edilmesinde de etkilidir (ANSI/IEEE, 1985).

Topraklama ağlarının diğer topraklayıcı tipleri ile kıyaslandığında yapılarının daha karmaşık olması sebebiyle analizleri, diğer topraklayıcıların analizlerine göre bir takım zorluklar içermekte ve bazı sayısal ve analitik sistemlerin kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Topraklama ağlarının tasarımı için yıldırım darbeleri göz önüne alınarak yapılan bir tasarımda ağ iletkenlerindeki akım dağılımlarının, darbe empedans, indüktans ve özindüktans değerleri gibi bazı parametrelerin bilinmesi önemlidir.

Bu çalışmada yapılacak olan model topraklama ağı analizlerinde ağ iletkenlerinin darbe empedansları, özindüktans ve karşıt indüktans değerleri dikkate alınmayacaktır. Bunun başlıca nedeni hata durumunda meydana gelecek olan arıza akımının ana bileşeninin şebeke frekansında meydana geliyor olmasıdır (Gan ve Ruan, 2005).

Bu bölümde topraklama ağlarının yıldırım darbe akımlarının toprağa deşarjında önemli rol oynayan indüktansı ile ilgili genel bilgiler verilerek kollardaki darbe empedans değerine göre akım dağılımları ve topraklama ağlarının darbe empedans değerleri için etkin alanlardan bahsedilecektir.

#### 3.1 Topraklama Ağlarının İndüktansı

Topraklama ağının indüktansı büyük oranda darbe empedansını kontrol eder. Bu nedenle özellikle yıldırım darbe akımlarının toprağa akmasında darbe empedansının etkin olduğundan dolayı olarak ağ indüktansının bu duruma büyük ölçüde etkisi olduğu söylenebilir (Gupta ve Singh, 1992).

Ağ indüktansının hesaplanması için başlıca kabullerin yapılması gerekmektedir (Rudenberg, 1945). Bunlar;

- 1) İletken çevresinde akımın en yoğun olduğu yerde manyetik alan en yüksek değerindedir. Bu nedenle indüktans başlıca topraklama ağını oluşturan iletkenlerdeki akım dağılımı ile verilir. Topraktaki akımın etkisi ihmal edilir.

- 2) Toprak kaçak akımı ihmal edilir. Besleme noktasına giren bütün akımlar ağ üzerindeki ayrı uzak noktalarda toplanırlar.
- 3) Ağı oluşturan iletkenlerin yarıçapındaki değişim, alan içindeki iletken boyutlarının belli uzunlukları için ağ indüktansı üzerinde ihmal edilebilir bir etki yapar.

İkinci yaklaşımın toprak kaçak akımı ihmal edildiğinde indüktansın en büyük değerini vermesinin aksine birinci yaklaşım, toprak kaçak akımının ihmal edilmesiyle en düşük değerini vermektedir. İki yaklaşımın meydana getirdiği hatalar bir dereceye kadar birbirini yok eder.

Burada sunulan metotlar, topraklama ağlarının darbe empedanslarını analitik olarak belirlenmesinde kullanılır. Bu yaklaşımları temel alarak iki sınır durum göz önünde bulundurulmalıdır.

- 1) Akımın giriş noktası ağın ortasında, toplanma noktası ise ağın dört köşesindedir.
- 2) Akımın giriş noktası ağın köşelerinin birinde, toplanma ise ağın akımın girdiği köşenin karşı köşesindedir.

Gerçekte ise topraklama ağlarında akım, ağın yerleşimine ve bağlantılarına göre her noktadan girebilir. Bu tahminin amacı yukarıda belirtilen iki durumu pratik olarak temsil edebilmektir. Giriş noktası, bu iki durumun kapsamı dışındaysa, indüktansın değeri yukarıda bahsedilen iki durum için belirlenen iki değer arasında olacaktır (Gupta ve Singh, 1992).

### 3.1.1 Reaktif kVA Yöntemi

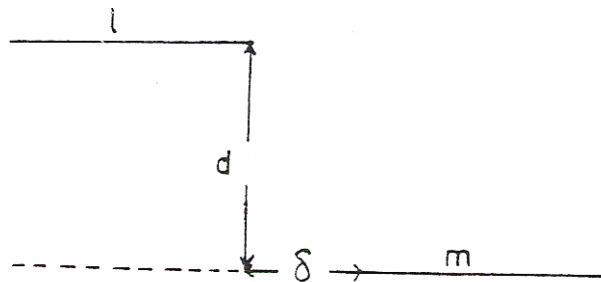
Doğrusal bir iletkenin özindüktansı

$$L = 0,2l \left( \ln \frac{2l}{r} - 1 \right) \quad (3.1)$$

olarak verilir.

Burada;

l: uzunluk (m), r: iletken yarıçapı (m) ve  $l \gg r$



Şekil 3.1 Paralel iletkenler için karşılıklı indüktans

İki paralel iletken arasındaki karşılıklı indüktans şu bağıntı ile hesaplanır;

$$L_{12} = 0,1 \cdot \left( \alpha \cdot \sinh^{-1} \frac{\alpha}{d} - \beta \cdot \sinh^{-1} \frac{\beta}{d} - \gamma \cdot \sinh^{-1} \frac{\gamma}{d} + \delta \cdot \sinh^{-1} \frac{\delta}{d} - \sqrt{\alpha^2 + d^2} + \sqrt{\beta^2 + d^2} + \sqrt{\gamma^2 + d^2} - \sqrt{\delta^2 + d^2} \right) \mu\text{H} \quad (3.2)$$

Burada;

m: ikinci iletkenin uzunluğu

$\delta$  : iki iletken arasındaki yatay uzaklık

d : iki iletken arasındaki dikey uzaklık

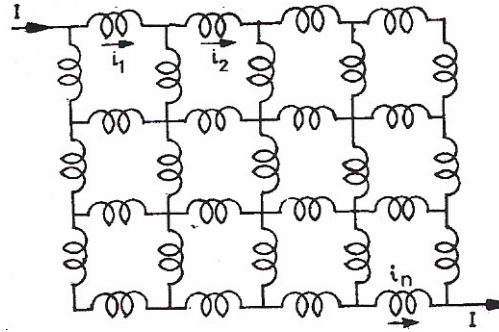
$$\alpha = l + m + \delta$$

$$\beta = l + \delta$$

$$\gamma = m + \delta$$

dır.

İletkenler üst üste binmiş vaziyetteyse  $\delta$  mesafesi negatif işaretli olarak alınır. Birbirine dik iki iletken arasındaki karşılıklı indüktans ise sıfırdır.



Şekil 3.2 Topraklama ağının genel yapısı

Ağdan toplam I akımının aktığını varsayalım ve bu durumda farklı kollarındaki akımlarda  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$  olsun. Tüm kollar aynı uzunlukta olduğundan bir kolun özindüktansı  $L_{kk}$ , tüm kollarında aynı olacaktır. Karşılıklı indüktanslar farklı kollar için  $L_{12}, L_{23}, \dots$  gibi gösterilirse, k. koldaki toplam indüktans şöyle verilir:

$$L_k = \frac{1}{i_k} \cdot (I_1 \cdot L_{1k} + I_2 \cdot L_{2k} + \dots + I_k \cdot L_{kk} + \dots + I_n \cdot L_{nk}) \quad (3.3)$$

Ağın giriş ve çıkış uçları arasındaki indüktans ise şöyledir:

$$L_s = \frac{1}{I^2} \cdot \left( \sum_{k=1}^n I_k^2 \cdot L_k \right) \quad (3.4)$$

### 3.1.2 İndüktans Hesabı

Uygulama örneklerinden elde edilen verilerin üzerinde çalışılmasıyla dikdörtgen ağın indüktans hesabı için şu ampirik bağıntı ile yapılabilir (Gupta ve Singh, 1992):

$$L_s = D \cdot L \cdot X^{0.16} \quad (3.5)$$

Burada;

L: İletkenin özindüktansı

X: Ağın uzunluk genişlik oranı

D: Ağdaki göz sayısına ve akımın ağın girdiği noktaya göre değişen ampirik bir katsayıdır.

İndüktans hesabı yapılacak ağ verileri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 İndüktans hesabında kullanılacak ağlara ilişkin veriler

	Ortadan Giren Akım					Köşeden Giren Akım				
Göz Sayısı	4x2	6x4	8x4	10x6	12x6	4x2	6x4	8x4	10x6	12x6
Göz Boyutu	2x2 m <sup>2</sup>	4x4 m <sup>2</sup>		6x6 m <sup>2</sup>		2x2 m <sup>2</sup>	4x4 m <sup>2</sup>		6x6 m <sup>2</sup>	

Burada ağa yerleştirilen iletken uzunlukları için hesaplanmış özindüktans değerleri Tablo 3.2’de verilmektedir.

Tablo 3.2 İndüktans hesabında kullanılacak ağlara ilişkin veriler

İletken Uzunluğu (m)	Özindüktans (μH)
2	1,72
4	1,0

6	6,48
---	------

D katsayısı için, ağ modellerine göre elde edilmiş veriler Tablo 3.3'te yer almaktadır.

Tablo 3.3 D katsayısının değerleri

Göz Sayısı	Ortadan Giren Akım	Köşeden Giren Akım
8	0,469	2,807
24	0,6232	4,472
32	0,7952	5,3696
60	0,9595	6,9021
72	1,0988	7,6649

Bu veriler yardımıyla artık akımın ağın ortasından ve köşesinden girmesi durumları için indüktans hesabı yapılabilir. Topraklama ağına ortadan giren akım için elde edilen indüktans değerleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Ağa ortadan giren akımlar için elde edilen indüktans değerleri

Göz Sayısı	$\mu\text{H}$ Cinsinden Ağ Boyutları İçin İndüktans Değerleri		
	2x2 m	4x4 m	6x6 m
4x2	0,9047	2,0914	3,3846
6x4	1,1573	2,6483	4,2653
8x4	1,5706	3,5263	5,6273
10x6	1,8558	4,1249	6,5496
12x6	2,2026	4,8560	7,6796

Tablo 3.5'te ise akımın topraklama ağına herhangi bir köşeden girdiği durum için indüktans değerleri sunulmuştur.

Yapılan bu hesaplamalardan dikdörtgen bir ağda ağ indüktansının;

- 1) Ağın bir elemanın özindüktansına
- 2) Ağdaki göz sayısına
- 3) Ağın uzunluk / genişlik oranına
- 4) Akımın giriş noktasına bağlı olduğu görölmektedir.

Tablo 3.5 Ağa köşeden giren akımlar için elde edilen indüktans değerleri

Göz Sayısı	μH Cinsinden Ağ Boyutları İçin İndüktans Değerleri		
	2x2 m	4x4 m	6x6 m
4x2	5,6358	12,3954	19,6080
6x4	8,7484	18,6683	29,4808
8x4	11,0158	23,6041	36,7858
10x6	12,8827	29,9597	48,5347
12x6	14,7299	34,2556	55,4940

### 3.1.3 Darbe Empedansı

Bir topraklama sisteminin darbe empedansı akımın topraklama ağına girdiği noktada oluşturduğu potansiyelin tepe değerinin, darbe akımının tepe değerine oranı olarak tanımlanır. Darbe empedansının Şebeke frekansındaki topraklama direnci ise darbe katsayısı olarak belirtilir.

Topraklama sistemi bir iletim hattındaki gibi kaçak iletkenlik, indüktans, kapasite ve direnç ile temsil edilebilir. Orta ve düşük toprak geçiş direncine sahip topraklama sistemleri için seri direnç ve kapasitenin etkisi ihmal edilebilir (Gupta.ve Thapar, 1980). Topraklama ağına birim darbe akımı uygulanırsa akımın girdiği noktada oluşturacağı gerilim Şöyle belirlenir:

$$e(t) = \frac{1}{G} \cdot \left( 1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot t}{G \cdot L}} \right) \quad (3.6)$$

Burada;

G: Topraklama ağının toplam yayılı toprak kaçak iletkenliği, siemens

L: Topraklama ağının yayılı elektrot indüktans toplamı, μH

$\rho$ : Toprak özgül direnci, ohm-metre

t: Zaman,  $\mu\text{s}$ ' dir.

Darbe akımı iki fonksiyonun toplamı olarak ifade edilir. Bu dalga şekline ile ilgili geçen devreye ait dağıtılmış devre parametrelerinin geçici cevabı süperpozisyon prensibi uygulanarak belirlenir.

### 3.1.3.1 Etkin Alan

Ağ boyutları arttıkça darbe empedansı belli bir alana kadar yayılır. Ağın alanı bu alandan daha büyük olduğu durumda, darbe empedansında son değerinin %3'ü veya daha az bir değişim göstermektedir. Başka bir deyişle ağ alanının büyümesi ile darbe empedansının artış hızının çok yavaş olması darbe empedansının bu küçük değişimler için hesaplanan son değer alınmasına neden olmaktadır. Darbe empedansının bu alana karşılık gelen ağ alanı "Etkin Alan" olarak adlandırılır (Gupta ve Thapar, 1980).

Arıza akımının ağın merkezinden girdiği durumlar için etkin alanın şekli daima kare, köşeden giren akımlar içinse daima üçgen şeklindedir.

### 3.1.3.2 Kare Topraklama Ağlarında Darbe Empedansı

Kare topraklama ağlarında etkin yarıçap ve darbe katsayısı şu amprik formül ile bulunabilir (Gupta ve Singh, 1992):

$$r_e = K \cdot (\rho \cdot T)^{0,5} \quad (3.7)$$

Burada ortadan giren akım için  $K = (1,45 - 0,05 \text{ s})$  ve köşeden giren akım için  $K = (0,6 - 0,025 \text{ s})$  ve,

$$r \leq r_e \text{ ise } A = e^{0,333 \cdot \left(\frac{r}{r_e}\right) \cdot 2,3} \quad (3.8)$$

bu durumda darbe empedansı;

$$Z_d = A \cdot R \quad (3.10)$$

olur.

$$r > r_e \text{ ise } R = \frac{\rho}{4 \cdot r_e} \text{ iken } A = e^{0,333} = 1,395 \quad (3.11)$$

olur. Burada,

A: Darbe katsayısı

R: Topraklama ağının şebeke frekansındaki direnci, ohm

T: Dalga cephe süresi,  $\mu\text{s}$

r: Ağın kapladığı alanla eşdeğer alana sahip dairesel levhanın yarıçapı, m

$r_e$ : Ağın etkin alanla eşdeğer alana sahip dairesel levhanın yarıçapı, m

$\rho$ : Toprak özgül direnci, ohm-metre

### 3.1.3.3 Dikdörtgen Topraklama Ağlarında Darbe Empedansı

Kare topraklama ağlarının darbe empedansının hesaplanması için yapılan işlemlerin benzerleri dikdörtgen ağların darbe empedans hesapları için de yapılabilir. Burada tek fark, kare ağların darbe empedanslarının bulunması ile ilgili verilen Eşitlik 3.7'de uzunluk genişlik oranından kaynaklanan bir  $X^c$  katsayısının yer almasıdır (Gupta ve Singh, 1992).

Dikdörtgen ağlarda darbe empedansı şu ampirik formülle hesaplanır;

$$r_e = K \cdot \frac{(\rho \cdot T)^{0,5}}{X^c} \quad (3.12)$$

Burada

ortadan besleme için;  $K = (1,45 - 0,05 s)$ ,

köşeden besleme için;  $K = (0,6 - 0,025 s)$ ,

ortadan besleme için;  $c = 0,029$ ,

köşeden besleme için;  $c = 0,08$

dir.

$$r \leq r_e \text{ ise } A = e^{0,333 \left( \frac{r}{r_e} \right)^{2,3}} \quad (3.13)$$

Bu durumda darbe empedansı Eşitlik 3.10 ile aynı olur.

$$r > r_e \text{ ise } R = \frac{\rho}{4 \cdot r_e} \text{ iken } A = e^{0,333} = 1,395 \quad (3.11)$$

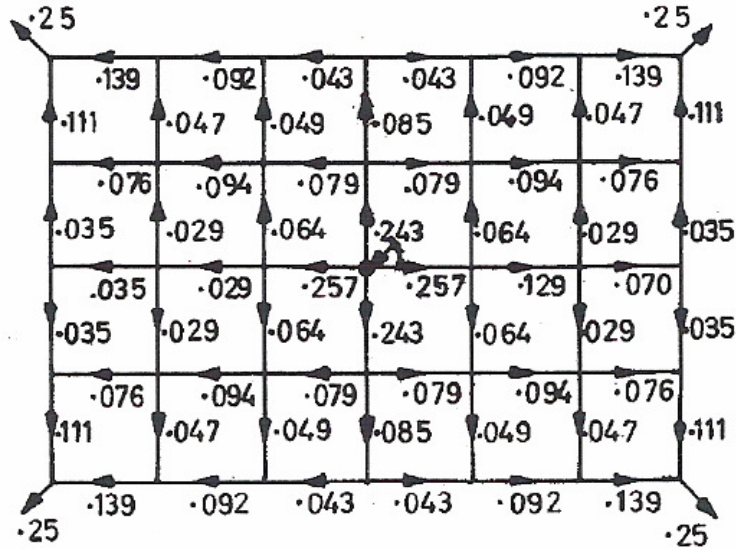
elde edilir. Darbe empedansı Eşitlik 3.10 ile aynıdır.

Yapılan çalışmalar ve deneysel veriler göz boyutunun sabit kalması koşulu ile göz sayısının artmasının dolayısı ile ağ boyutu büyüdükçe empedansının küçüldüğü ve bu değer belli bir yarıçap değerine kadar küçülmeye devam ettiğini, akımın ağın ortasından girdiği durumda ağın darbe empedansının, akımın ağın köşesinden girdiği durumdaki ağ darbe empedansına oranla küçük olduğunu göstermektedir.

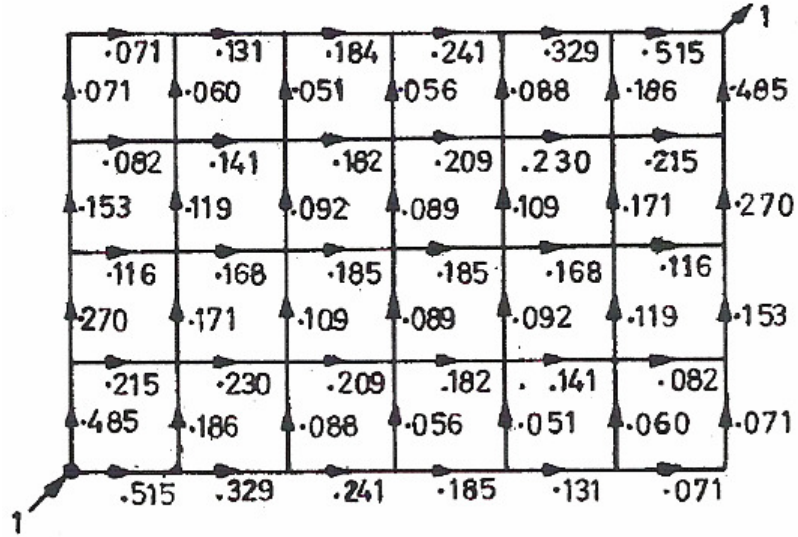
### 3.1.4 Akım Dağılımının Bulunması

Ağdaki her bir kolundaki akım dağılımlarının bulunması için Kirschoff kanunlarından yararlanılır ve sadece her bir kolun direnç ve özindüktansı göz önüne alınır. Tüm kollar birbirine benzer olduğundan, aynı yüksek frekans direncine ve özindüktansa sahiptirler. Her kola ait empedans  $Z$  olarak alınabilir. Tüm kolların benzerliği sebebi ile akım dağılımının bulunması için  $Z$  değerinin bulunmasına gerek yoktur. Değişik kollardaki akım dağılımının toplanmasındaki çok küçük bir farklılık karşılıklı indüktansın da dikkate alınması ile sonuçlara etki etmediğinden akım dağılımında hiçbir değişiklik yapılmasına gerek yoktur.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te 4x6 gözlü bir topraklama ağının, sırayla ortadan ve köşeden birim akım uygulanması ile kollardaki akım dağılımları verilmiştir.



Şekil 3.3 Akımın ağa girişi ortadan olması durumunda kollardaki akım dağılımı



Şekil 3.4 Akımın ağa girişinin köşeden olması durumunda kollardaki akım dağılımı

#### 4. POTANSİYEL DAĞILIM ANALİZİNDE KULLANILACAK SAYISAL YÖNTEM

Bu bölümde topraklama ağlarının yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı hesaplamak üzere kullanılacak olan “Kaçak Akım Yöntemi”nden bahsedilecektir. Gerçekte ağ iletkenlerinin çok uzun olmadığı durumlarda ve şebeke frekansında, iletkenlerin direnci ve endüktif reaktansı iletkenler ile toprak arasındaki dirence kıyasla küçük olduğundan bütün iletkenlerin aynı potansiyele sahip olduğu kabul edilebilir. Ağın, yıldırım darbeleri gibi geçici durumlara cevabının araştırılması istenildiğinde, iletkenler oldukça uzun ise şebeke frekansında endüktif reaktans bir önem kazanır.

##### 4.1 Topraklama Ağlarının Toprak Yüzeyinde Oluşturduğu Potansiyel Dağılımı

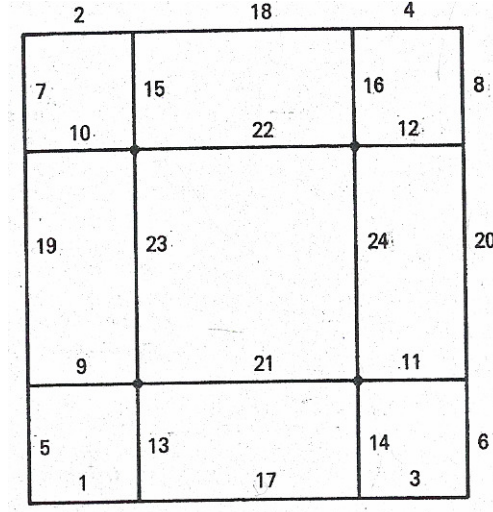
Bu yöntem iki temel işlemi gerektirmektedir. İlki iletken kollardaki kaçak akım değerlerinin bulunması, ikincisi ise bu kaçak akımların yüzeyin istenilen noktasındaki gerilimin hesaplanması için kullanılmasından ibarettir.

###### 4.1.1 Akım Dağılımı

Kaçak akım dağılımının bulunması için ağı oluşturan iletkenler doğrusal kollara ayrılır. Her bir koldaki kaçak akım dağılımının sabit ancak her kolda birbirinden farklı olduğu kabul edilecektir (Dawalibi ve Mukhedkar, 1979).

Daha fazla doğruluğun istendiği durumlarda ağ iletkenleri daha çok kollara ayrılmalıdır. İletkenler kollara ayrıldıktan sonra, aynı kaçak akıma sahip oldukları simetri ile belirlenen kollar ardışık olarak numaralandırılır. Şekil 4.1’de 3x3’lük bir kare ağ modeli bulunmaktadır. Burada ağın merkezdeki gözünden yatay olarak simetri alındığında merkez göz civarındaki dikey kollar ve köşe göz civarındaki dikey kollar birbirlerine kendi içlerinde simetriktir. Yani göz merkezine yakın dikey kollar birbiri ile, köşe gözlere yakın kollar birbiri ile simetriktir. Yine aynı şekilde ağ dikey bir çizgi ile merkez gözden ayrıldığında yine merkez göze yakın kollar ve köşe gözler kendi içlerinde birbirlerinin simetriğini oluşturacaktır.

Bu şekilde yapılan ardışık numaralandırma yine Şekil 4.1’de verilmiştir. Burada 1’den 8’e kadar olan kollar aynı uzunlukta, buldukları durumlar açısından simetrik olmaları nedeniyle aynı kaçak akımlara sahip olduklarından 1. tip kol olarak adlandırılır. Ve yine 9’dan 16’ya olan kollar 2. tip, 17’den 20’ye kadar numaralandırılmış kollar 3. tip ve 21’den 24’e kadar olan kollar ise 4. tip olarak sınıflandırılır. Buradan da açıkça görülüyor ki toplam 24 kol olmasına rağmen simetri nedeniyle hesaplanması gereken sadece 4 tip kol bulunmaktadır.



Şekil 4.1 3x3'lük model ağ

4.1 Eşitliği çözülerek kaçak akımın 4 farklı kol tipi için değeri bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} r_{11} \cdot i_1 & r_{12} \cdot i_2 & r_{13} \cdot i_3 & r_{14} \cdot i_4 \\ r_{21} \cdot i_1 & r_{22} \cdot i_2 & r_{23} \cdot i_3 & r_{24} \cdot i_4 \\ r_{31} \cdot i_1 & r_{32} \cdot i_2 & r_{33} \cdot i_3 & r_{34} \cdot i_4 \\ r_{41} \cdot i_1 & r_{42} \cdot i_2 & r_{43} \cdot i_3 & r_{44} \cdot i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Burada  $r_{jj}$ ; j. kolun öz direnci ile j. tipteki diğer kollar ile arasındaki karşılıklı direncin toplamı,  $r_{jk}$  ise; j. tipteki herhangi bir kol ile k. tipteki kollar arasındaki karşılıklı direncin toplamıdır (Heppe, 1979).

Kolların toprağa göre potansiyelleri  $V_j$ , dört farklı tip kol için kaçak akımlar  $I_j$  ise her bir kolun kendi kaçak akımının ve diğer kolların kaçak akımlarının meydana getirdiği potansiyellerin toplamının uygulanan gerilime eşit olması gerektiğini belirtilmektedir ve bu ifade Eşitlik 4.2'de verilmektedir.

$$\sum_{k=1}^n r_{jk} \cdot I_k = V_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4.2)$$

Burada tüm  $V_j$ 'lerin ağa uygulanan gerilime eşit olduğu kabul edilecektir. 4.1 Eşitliğindeki r katsayılarının bulunabilmesi için denklemdeki r terimleri ile Şekil 4.1'de numaralanan kollar arasında bir bağıntı kurulması gereklidir.

Gerçek karşılıklı direnç  $r^l$  olarak gösterilir ve numaralama sistemi Şekil 4.1'e uyarlanırsa şöyle bir ilişki kurmak mümkün olur:

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^8 r^l \cdot 8(i-1) + 1, 8(j-1) + k \quad i = 1,2 \text{ ve } j = 1,2 \quad (4.3)$$

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^8 r^l \cdot 4(i-1) + 9, 8(j-3) + k \quad i = 3,4 \text{ ve } j = 1,2 \quad (4.4)$$

$$r_{ij} = \sum_{k=17}^{20} r^l \cdot 8(i-1) + 1, 4(j-3) + k \quad i = 1,2 \text{ ve } j = 3,4 \quad (4.5)$$

$$r_{ij} = \sum_{k=17}^{20} r^l \cdot 4(i-1) + 9, 8(j-3) + k \quad i = 3,4 \text{ ve } j = 3,4 \quad (4.6)$$

Burada örneğin  $r_{31}$ ; 1. tipteki kolların kaçak akımlarının 3. tipteki herhangi bir kolda meydana getirdiği gerilimdir. Buna göre;

$$r_{11} = r_{1,1}^l + r_{1,2}^l + r_{1,3}^l + r_{1,4}^l + r_{1,5}^l + r_{1,6}^l + r_{1,7}^l + r_{1,8}^l \quad (4.7)$$

$$r_{12} = r_{1,9}^l + r_{1,10}^l + r_{1,11}^l + r_{1,12}^l + r_{1,13}^l + r_{1,14}^l + r_{1,15}^l + r_{1,16}^l \quad (4.8)$$

$$r_{13} = r_{1,17}^l + r_{1,18}^l + r_{1,19}^l + r_{1,20}^l \quad (4.9)$$

$$r_{14} = r_{1,21}^l + r_{1,22}^l + r_{1,23}^l + r_{1,24}^l \quad (4.10)$$

Buradaki 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 Eşitliklerinin bulunması ile 1. tip koldaki 1 numaralı teldeki toplam öz direnç ve karşılıklı direnç bulunmuş olur. Ancak Şekil 4.1 gibi 3x3'lük bir ağ için 576 adet denklem yazılması gerekecektir. Bu hesaplamalar için zorluk getireceğinden  $r_{ij} = r_{ji}$  alınmasıyla hesaplamalar için gerekli kolaylık sağlanmış olur.

#### 4.1.2 Direnç İfadeleri

Topraklama ağındaki iletken kollarının dirençleri hesaplanırken bu kısımda iki tip direnç ele alınacaktır. Bunlardan ilki öz direnç olup, hesaplamalar açısından karşılıklı dirençlerin hesaplanmasına göre hesabı daha basittir.

##### 4.1.2.1 Öz Direnç

İletken kolun maruz kaldığı gerilim, iletken üzerinden bir akımın akmasına neden olur ki öz dirençten bahsedilirken diğer iletken kollarının incelenen kol üzerindeki meydana getirebilecekleri kaçak akımlar burada ihmal edilmiştir.

l uzunluğundaki çıplak bir iletkenin öz direnci şöyle hesaplanır:



uzandığını kabul edelim.  $L_1$  uzunluğundaki kolun E son ucundaki koordinatlarına da  $x$ ,  $y$  ve  $z$  diyelim. Ve bu iki kol arasındaki açı  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ) olsun. Karşılıklı direnç; bu  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\theta$ ,  $L_1$  ve  $L_2$  değerleri kullanılarak hesaplanacaktır.

$$\begin{aligned}
 M = & \underline{CB} \cdot \ln \frac{BF + \underline{B^1F}}{BE + \underline{B^1E}} - \underline{CA} \cdot \ln \frac{AF + \underline{A^1F}}{AE + \underline{A^1E}} + \underline{GF} \cdot \ln \frac{BF + \underline{F^1B}}{AF + \underline{F^1A}} - \underline{GE} \cdot \ln \frac{BE + \underline{E^1B}}{AE + \underline{E^1A}} \\
 & - \frac{CG}{\sin \theta} \left[ \tan^{-1} \left( \frac{CG}{BF \tan \theta} + \frac{CB}{CG} \cdot \frac{GF \sin \theta}{BF} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{CG}{BE \tan \theta} + \frac{CB}{CG} \cdot \frac{GE \sin \theta}{BE} \right) \right. \\
 & \left. - \tan^{-1} \left( \frac{CG}{AF \tan \theta} + \frac{CA}{CG} \cdot \frac{GF \sin \theta}{AF} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{CG}{AE \tan \theta} + \frac{CA}{CG} \cdot \frac{GF \sin \theta}{AE} \right) \right] \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

Eşitlik 4.13'te bahsedilen uzunluklar Şekil 4.2'den elde edilmesiyle her bir uzunluğa tekabül eden matematiksel bağıntılar Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4.1 Karşılıklı direnç eşitliğinde uzunlukların matematiksel gösterimi

Uzunluk	Eşdeğeri	Uzunluk	Eşdeğeri	Uzunluk	Eşdeğeri
$w^2$	$y^2 + z^2$	$\underline{CB}$	$CA + L_1$	$AF$	$\sqrt{x_F^2 + y_F^2 + z^2}$
$x_F$	$x + L_2 \cos \theta$	$GA^1$	$CA \cos \theta$	$\underline{A^1E}$	$GE - GA^1$
$y_F$	$y + L_2 \sin \theta$	$GB^1$	$CB \cos \theta$	$\underline{A^1F}$	$GF - GA^1$
$\underline{GE}$	$\frac{y}{\sin \theta}$	$BE$	$\sqrt{(x - L_1)^2 + w^2}$	$\underline{E^1A}$	$CA - CE^1$
$\underline{GF}$	$\frac{y_F}{\sin \theta}$	$BF$	$\sqrt{(x_F - L_1)^2 + y_F^2 + z^2}$	$\underline{F^1A}$	$CA - CF^1$
$CE^1$	$y / \tan \theta$	$\underline{B^1E}$	$GE - GB^1$	$\underline{E^1B}$	$CB - CE^1$
$CF^1$	$y_F / \tan \theta$	$\underline{B^1F}$	$GF - GB^1$	$F^1B$	$CB - CF^1$
$\underline{CA}$	$CE^1 - x$	$AE$	$\sqrt{x^2 + w^2}$	$CG$	$z$

Böylece karşılıklı direnç katsayısı,  $M$ ; 4.13 Eşitliğinin kullanılmasıyla elde edilebilir. Karşılıklı direnç eşitliği ise şöyledir:

$$R = \frac{M \cdot \rho}{4\pi L_1 L_2} \quad (4.14)$$

Yüzey etkisinin sebebiyle birbirine dik iki iletken tel için R karşılıklı direncin iki değeri hesap edilmelidir. Bunlar:

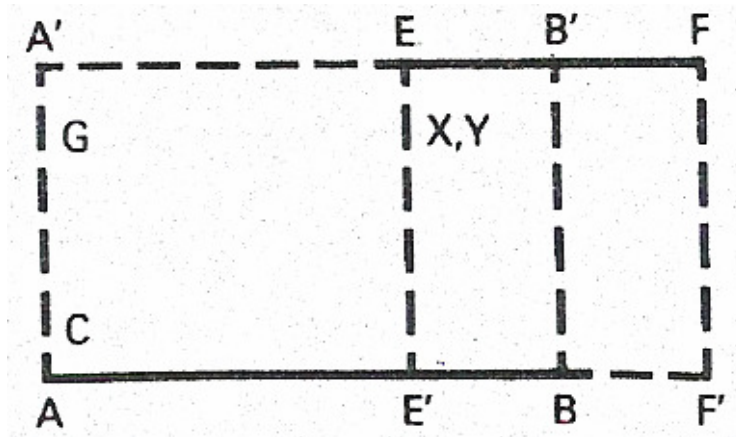
- 5) İki iletken kol arasındaki karşılıklı direnç
- 6) Biri etkilenen kol olmak üzere diğeri etkileyen kolun toprak yüzeyine göre simetriği olan imaj iletkenin etkilemesi ile oluşan karşılıklı direnç

Bu işlem Eşitlik 4.13'teki M değerinin hesaplanmasında  $z = 0$  ve  $z = 2h$  alınarak ve bulunan her iki M değeri toplanıp karşılıklı direnç değerinin hesaplanmasında işleme konularak yapılabilir.

#### 4.1.2.2 Paralel İletken Kollar

Her ne kadar Eşitlik 4.13 ve Eşitlik 4.14'te karşılıklı direnç ifadelerinin bulunmalarına ilişkin bağıntılar verilmişse de, ağ göz sayısının artmasıyla birlikte yapılacak hesaplamaların karmaşık bir hal alması, karşılıklı direnç hesaplamalarında iletken konularından kaynaklanan bazı özel durumlar için bu eşitliklerin sadeleştirilmesinde yarar vardır.

Şekil 4.2'deki ifadede AB ve EF'nin paralel ancak eş düzlemsel olmaması durumunda eşitlik basitleşir ki buda iki iletken kolun paralel konumda olduğunu gösterir. Tekrar AB iletken telinin x eksenini boyunca A orijin noktasından başlayarak sağa doğru uzandığını ve x, y ve z noktalarının E'nin koordinat noktaları olduğunu belirtmekte yarar vardır.



Şekil 4.3 Paralel iletken kollar

Bu durumda paralel iki iletken kol için karşılıklı direnç katsayısı M şöyle yazılabilir:

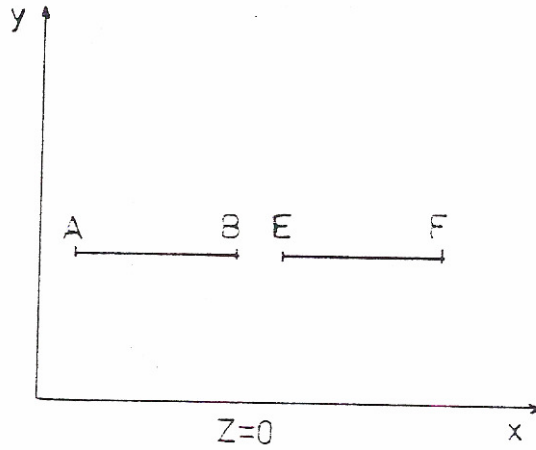
$$\begin{aligned}
M &= L_1 \cdot \ln \frac{x + L_2 - L_1 + \sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + w^2}}{x - L_1 + \sqrt{(x - L_1)^2 + w^2}} + (x + L_2) \cdot \ln \frac{\sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + w^2} - (x + L_2 - L_1)}{\sqrt{(x + L_2)^2 + w^2} - (x + L_2)} \\
&\quad - x \cdot \ln \frac{\sqrt{(x - L_1)^2 + w^2} - (x - L_1)}{\sqrt{x^2 + w^2} - x} - \sqrt{(x - L_1)^2 + w^2} - \sqrt{(x + L_2)^2 + w^2} + \sqrt{(x + L_2 - L_1)^2 + w^2} \\
&\quad + \sqrt{x^2 + w^2}
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Bu katsayı yardımı ile paralel kollar için karşılıklı direnç hesabı bulunan değerlerin Eşitlik 4.14'te yerine yazılması ile yapılabilir.

Aynı düzlemde bulunan yatay kollar için iletken kolların görüntülerinin de hesaba katılmasıyla karşılıklı direnç katsayısının bulunmasında 4.15 Eşitliğinde  $z = 0$  ve  $z = 2h$  yazılarak M'in iki farklı değeri bulunur. Bu iki değer toplanarak toplam karşılıklı direnç katsayısı elde edilmiş olur.

#### 4.1.2.2.3 Aynı Doğrultudaki Paralel İletken Kollar

Eğer kollar Şekil 4.4'teki gibi aynı doğrultuda ise, bu kez Eşitlik 4.15'te  $y = r$  yazılarak karşılıklı direnç katsayısı bulunabilir.



Şekil 4.4 Aynı doğrultudaki iletken kolların gösterimi

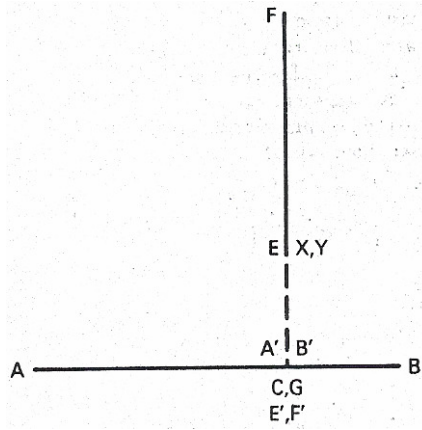
#### 4.1.2.2.4 Birbirine Dik Doğrultudaki İletken Kollar

İletken kollar yatay ancak birbirlerine dik doğrultuda yer alması durumu Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Yine AB iletken kolunun x-ekseni boyunca uzandığı ve orijin noktasının A olduğu, E noktasının koordinatlarının  $x, y, z$  olduğunu kabul edelim. Bu durumda karşılıklı direnç katsayısının ifadesi şöyle oluşur:

$$\begin{aligned}
M &= (L_1 - x) \ln \left( \frac{L_2 + y + \sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}}{y + \sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2}} \right) + x \ln \left( \frac{L_2 + y + \sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}}{y + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \\
&+ (L_2 + y) \ln \left( \frac{L_1 - x + \sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}}{-x + \sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) - y \ln \left( \frac{L_1 - x + \sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2}}{-x + \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) - |U| \quad (4.16)
\end{aligned}$$

Burada  $z = 0$  ise  $|U| = 0$  dir. Ancak  $z \neq 0$  ise  $|U|$  şöyle bulunabilir.

$$\begin{aligned}
U &= z \cdot \left[ \tan^{-1} \left( \frac{(L_1 - x)(L_2 + y)}{z \sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{(L_1 - x)y}{z \sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2}} \right) \right. \\
&\left. - \tan^{-1} \left( \frac{-x(L_2 + y)}{z \sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{-xy}{z \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \right] \quad (4.17)
\end{aligned}$$



Şekil 4.5 Birbirine dik doğrultudaki iletken kolların durumu

#### 4.1.2.3 Çok Katmanlı Toprakta Karşılıklı Direnç

Toprak iki farklı katmandan meydana gelmekte ve üstteki katmanın kalınlığı  $H$ , özgül direnci  $\rho_1$ , alttaki katmanın kalınlığı daha büyük ve özgül direnci  $\rho_2$  ise karşılıklı direncin iki kez bulunmasının yerine birçok kez bulunması gereklidir (Çelikyay, 1995). Bu durumda  $K$  karşılıklı direnç katsayısı Eşitlik 4.18'deki gibi tanımlanabilir.

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4.18)$$

Her iki kolun üstteki tabakada olması durumunda karşılıklı direnç ifadesi şöyledir:

$$R_m = \frac{\rho_1}{4\pi L_1 L_2} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} K^n \left( M(2nH + Z_i + Z_j) + M(2nH + Z_j - Z_i) \right) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left( M(2nH - Z_j + Z_i) + M(2nH - Z_j - Z_i) \right) \right] \quad (4.19)$$

Burada M, bir kolun diğer kollara göre L uzunluğuna ve  $\theta$  açısına bağlı olarak x ve y'nin bir fonksiyonudur. Ancak burada ele alınan kolların etkilerinin tümü için aynıdır.

Homojen toprak yapısı için ( $K = 0$ ),  $n = 0$  ise 4.19 Eşitliğinde  $0^0 = 1$  olduğundan 4.19 Eşitliği şöyle sadeleştirilebilir:

$$R_m = \frac{\rho_2}{4\pi L_1 L_2} \left[ M(Z_i + Z_j) + M(Z_i - Z_j) \right] \quad (4.20)$$

Her iki kolun alttaki katmanda olması durumu için;

$$R_m = \frac{\rho_2}{4\pi L_1 L_2} \left[ M(Z_j - Z_i) - KM(2H - Z_j + Z_i) + (1 - K^2) \sum_{n=0}^{\infty} K^n M(2nH + Z_j + Z_i) \right] \quad (4.21)$$

yazılabilir. Kolların farklı toprak katmanında olması durumu için ise;

$$R_m = \frac{\rho_2(1-K)}{4\pi L_1 L_2} \left[ M(Z_j - Z_i) + \sum_{n=0}^{\infty} K^n M(2nH + Z_j + Z_i) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (2nH + Z_j - Z_i) \right] \quad (4.22)$$

eşitliği kullanılır.

## 4.2 Toprak Yüzey Potansiyeli

Farklı tipteki kollar için kaçak akımlar bulunduktan sonra tüm kolların katkılarının toplanması ile ağdan uzak yer yüzeyindeki herhangi bir noktadaki yüzey potansiyeli bulunabilir (Çelikyay, 1995). L uzunluğundaki bir kolun I kaçak akımının katkısının kullanımı ile toprak yüzeyindeki potansiyelin ifadesi şöyledir:

$$V = \frac{I\rho}{2\rho L} \ln \frac{x + \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}{x - L + \sqrt{(x - L)^2 + y^2 + h^2}} \quad (4.23)$$

Eğer yüzeye yakın toprak katmanının kalınlığı H, özgül direnci  $\rho_1$  ve alttaki katmanının özgül direnci  $\rho_2$  ise 4.23 Eşitliği şöyle düzenlenebilir:

$$\begin{aligned}
V = \frac{I\rho_1}{2\pi L} & \left[ \ln \left[ \frac{x + \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}{x - L + \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + h^2}} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[ \ln \left[ \frac{x + \sqrt{x^2 + y^2 + (2nH + h)^2}}{x - L + \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + (2nH + h)^2}} \right] \right. \right. \\
& \left. \left. + \ln \left[ \frac{x + \sqrt{x^2 + y^2 + (2nH - h)^2}}{x - L + \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + (2nH - h)^2}} \right] \right] \right] \quad (4.24)
\end{aligned}$$

Kol alttaki tabakada ise yüzey potansiyelini bulmak için şu eşitlik kullanılır:

$$V = \frac{I\rho_1(1+K)}{2\pi L} \left[ \ln \left( \frac{x + \sqrt{x^2 + y^2 + h^2}}{x - L + \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + h^2}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left( \frac{x + \sqrt{x^2 + y^2 + (2nH + h)^2}}{x - L + \sqrt{(x-L)^2 + y^2 + (2nH + h)^2}} \right) \right] \quad (4.25)$$

Yer yüzeyinde belirlenen noktaların potansiyellerinin bulunması için IEEE Std 80'in Ek 1'inde belirtilen yöntem de kullanılabilir. Fakat bu yaklaşımda ağın merkez gözüne ve köşe gözlerine yakın olan tüm kollardaki akım dağılımının, her bir iletkenin tüm noktalarında kaçak akımların aynı olduğu ve kesişen iletkenlerin etkilerinin ihmal edilebileceği belirtilmiştir. Bu standart düzensizliklerin etkisinin ihmal etmesine müsaade etmektedir ki ayrıca bazı özel tasarım parametreleri için fiziksel olarak imkansız negatif göz gerilimler ortaya çıkabilmektedir (Heppe, 1979). Bu nedenle bu tezde sonraki kısımda hesaplaması yapılacak olan model ağ analizlerinde potansiyel dağılımın ağ içerisine tekabül eden yer yüzeyi noktalarında kaçak akım yöntemi ile potansiyel dağılım hesaplaması yapılacaktır.

## 5. TOPRAKLAMA AĞLARI İÇİN POTANSİYEL DAĞILIM HESAPLAMALARI

Bu bölümde ele alınacak olan kare topraklama ağ modellerine ait genel özellikler Tablo 5.1’de sunulmuştur. Bölüm 4.2’de bahsedildiği gibi ağ içerisindeki yer yüzeyine tekabül eden potansiyel dağılımlar bulunurken kaçak akım yönteminden yararlanılacak olup ağ ile referans toprak arasındaki yer yüzeyinde potansiyel dağılım sonlu farklar yöntemi ile bulunacaktır. Sınır koşulları için bu durumda bir ön koşul yapılması gerekir. Bunun için referans toprağın ağın bir kenarından 20 m ötede bulunduğu yani ağın bir kenarından 20 m uzaklıktaki bir noktada potansiyelin yer yüzeyinde sıfır olduğu kabul edilecektir. Ayrıca toprak özgül direncinin değişmediği ve toprağın tek katmanlı olduğu ön kabulünün de yapılmış olduğunu belirtmekte yarar vardır. Böylece gerek burada bahsedilen kaçak akım yönteminin gerekse sınır koşulları belirlenmiş bir problemde SFY’nin bu tip bir analiz için uygunluğu tespit edilmiş olacaktır. Hesaplamalar yapılırken sadece MS Excel® paket programından yararlanılmıştır.

Tablo 5.1 Model ağlarda kullanılacak veri değerleri ve sembolleri

Parametre	Sembol	Değer	Birim
Ağ Gerilimi	V	15000	volt
Gömülme Derinliği	h	0,5	metre
İleken Yarıçapı	r	0,005	metre
Toprak Özgül Direnci	$\rho$	100	ohm.metre
Bir Koldaki Toplam İletken Uzunluğu	L	24	metre

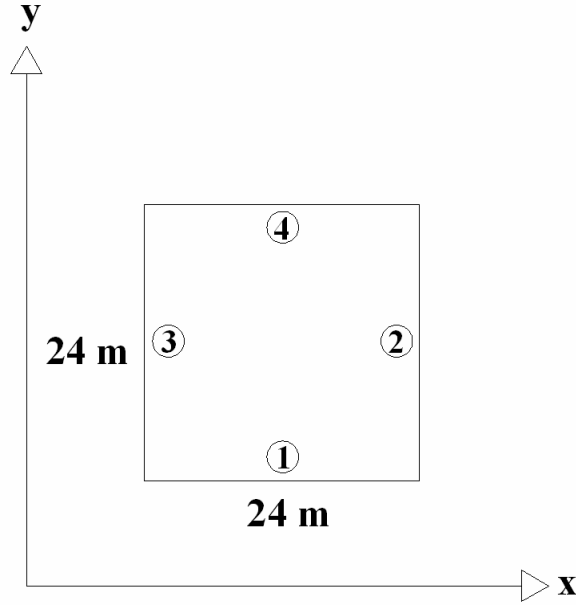
Sırasıyla incelenecek olan ağ ebatları 1x1, 2x2, 4x4 ve 8x8’dir.

### 5.1 1x1 Gözlü Kare Topraklama Ağı Analizi

Diğer topraklama ağ modellerinde de aynı metot kullanılacak olup önce ilk başta ağ içerisindeki her 1 metrelik mesafedeki yer yüzeyine tekabül eden potansiyeller kaçak akım yöntemi ile hesaplanacak daha sonra ağ ile referans toprak arasındaki yer yüzeyinin potansiyel dağılımına geçilecektir.

### 5.1.1 Direnç İfadeleri

Model topraklama ağı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 1x1 Gözlu kare topraklama ağı modeli

Numaralandırmalar yapıldıktan sonra topraklama ağının direnç katsayılar matrisinin yazılması gerekmektedir. Ağ düşey ve yata olarak simetrik olduğundan tek tip kol mevcuttur ve elde edilecek direnç katsayılar matrisi 1x1’lik bir matristen ibaret olacak ve ağda dolaşan sadece bir akım değeri olacaktır.

$$[r_{11}] \cdot [I] = [V] \quad (5.1)$$

Burada  $r_{11}$  bir numaralı kol için öz direnç ve karşılıklı dirençler toplamıdır. İşlemler için sadece bu iletkenden akan akımın bulunması yeterlidir çünkü simetriden dolayı ağdaki kollarda aynı akım akacaktır.

$$r_{11} = r_{11}^1 + r_{12}^1 + r_{13}^1 + r_{14}^1 \quad (5.2)$$

Buradaki her bir direnç değeri Bölüm 4.1 ve alt kısımlarında bahsedildiği gibi hesaplanacaktır.  $r_{11}^1$  öz direnç değerinin bulunması için 4.11 Eşitliği kullanıldığında;

$$r_{11}^1 = 6,8894 \text{ } [\Omega] \quad (5.3)$$

$r_{14}^1$ ’nin bulunması için gereken karşılıklı direnç katsayısı M’in hesaplanması için Eşitlik 4.15 kullanılmalıdır. Burada  $z = 0$  ve  $z = 2h = 1$  m için iki ayrı hesaplama yapılacağı gözden

kaçmamalıdır. Burada  $(x, y, z)$  koordinatları  $(0, 24, 0)$  ve  $(0, 24, 1)$  olarak alınarak yapılan hesaplama sonucu  $r_{14}^1$  için karşılıklı direnç katsayıları;

$$M_{y(z=0)} = 22,424 \quad (5.4)$$

$$M_{y(z \neq 0)} = 22,406 \quad (5.5)$$

olarak bulunur. Buradan yatay iletkenler için toplam  $M_y$  katsayısı;

$$M_y = M_{y(z=0)} + M_{y(z \neq 0)} = 44,830 \quad (5.6)$$

olarak bulunur. Bulunan  $M_y$  katsayısı 4.11 denkleminde yerine yazıldığında;

$$r_{14}^1 = 0,619 [\Omega] \quad (5.7)$$

elde edilir.

$r_{12}^1$  ve  $r_{13}^1$ ; 1 numaralı iletken üzerinde eş potansiyel artışı meydana getireceğinden  $r_{12}^1 = r_{13}^1$  olarak alınabilir.  $r_{12}^1 = r_{13}^1$  dirençlerinin hesaplanması için 4.16 ve 4.17 eşitlikleri kullanılacaktır. Hesaplamalar yapılırken  $y$  ve  $z$ 'nin birlikte sıfır değeri aldığı durumlar için  $0.\ln(0/0)$  gibi tanımsız bağıntılarla karşılaşılabilir. Bu gibi durumlarda bu terim bütünüyle sıfır olarak alınabilir (Heppe, 1979). Birbirlerine dik iki iletken olan 1 numaralı ve 3 veya 4 numaralı iletken için  $(x, y, z)$  koordinatları  $(24, 0,005, 0)$  şeklindedir. Bu durum için karşılıklı direnç katsayıları şöyledir;

$$M_{d(z=0)} = 42,306 \quad (5.8)$$

$$M_{d(z \neq 0)} = 40,764 \quad (5.9)$$

Buradan dikey iletkenler için toplam karşılıklı direnç katsayısı

$$M_d = M_{d(z=0)} + M_{d(z \neq 0)} = 83,070 \quad (5.10)$$

şeklinde elde edilir. 5.10 Eşitliği, 4.14 Eşitliğinde yerine konulursa  $r_{12}^1 = r_{13}^1$  için karşılıklı direnç değeri elde edilir. Böylece;

$$r_{12}^1 = r_{13}^1 = 1,147 [\Omega] \quad (5.11)$$

olarak bulunur. Yatay ve dikey iletkenler nedeniyle 1 numaralı iletken kolunda meydana gelecek toplam karşılıklı direnç ve 1 numaralı kolun öz direnci hesaba katılarak, bu kol üzerindeki toplam direnç bulunmuş olacaktır. Bulunan bu değerlerle 5.1 ifadesi yeniden

düzenlenirse, ağda dolaşan akım değeri bulunmuş olacaktır.

$$[r_{11}] \cdot [I] = [V] = [r_{11}^1 + r_{12}^1 + r_{13}^1 + r_{14}^1] \cdot [I] = [V] = [9,8041] \cdot [I] = [15000] \quad (5.12)$$

Böylece 1 numaralı iletken kolda dolaşan akım ise;

$$I = 1529,972 \text{ [A]} \quad (5.13)$$

olarak bulunur.

Her iletkenden akan akım aynı olacağından ağda dolanan toplam akım;

$$I_{\text{toplam}} = I_{\text{kol}} \cdot 4 = 6119,888 \text{ [A]} \quad (5.14)$$

olacaktır.

Ağın topraklama direnci:

$$R_g = 15000 / 6119,888 = 2,451 \text{ [\Omega]} \quad (5.15)$$

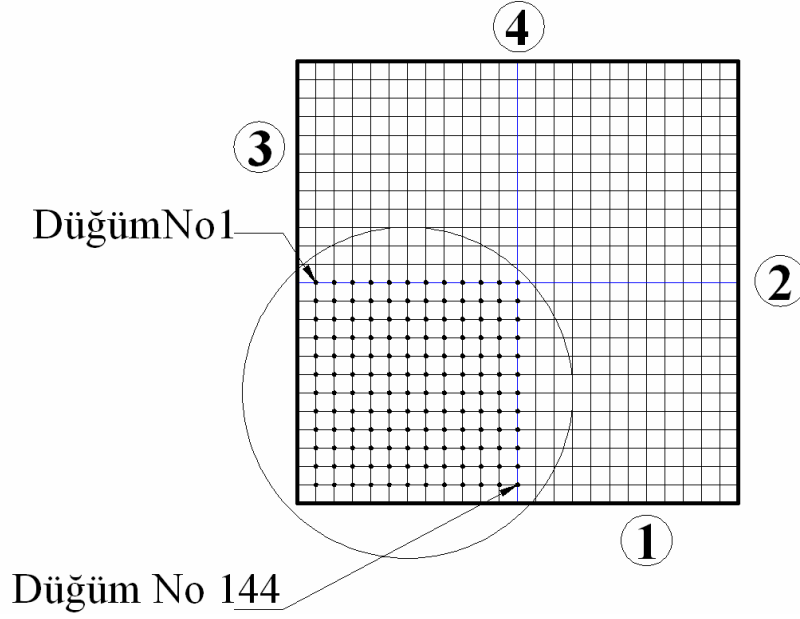
olmuş olur.

### 5.1.2 Göz İçerisindeki Potansiyel Değerler

Kollarda dolanan akımların ve ağda dolanan toplam akımın bulunması ile ağ gözü içerisine tekabül eden yer yüzeyindeki her 1 metrede potansiyel ifadeleri Eşitlik 4.23 kullanılarak bulunabilir. Bu eşitlikte x, y ve z koordinatları potansiyel değerinin bulunacağı noktaya ait konumu ifade eder.

Belirlenen noktanın potansiyel değeri hesaplanırken, her bir kolun potansiyeli bulunması istenen noktada oluşturdukları gerilimler teker teker bulunup cebirsel olarak toplanır. Şekil 5.2'den görüldüğü gibi ağın sadece çeyreklik kısmındaki potansiyellerin bulunması yeterli olacaktır. Çünkü enine ve dikine simetriden dolayı diğer noktaların potansiyelleri bulunan bu nokta potansiyellerinden elde edilebilir.

Hayali düğümler soldan sağa ve yukarıdan aşağı doğru numaralandırılmıştır. Her bir düğüme karşılık gelen potansiyel değerleri Tablo 5.2'de sunulmaktadır. Göz içerisinde isabet gelen toprak yüzeyi potansiyel değerlerine bakıldığında kolaylıkla görülebilir ki; göz merkezinde gerilim köşelerdeki noktalara oranla daha küçük değerdedir.



Şekil 5.2 1x1 Gözlu kare ağ içerisinde potansiyelleri bulunacak yer yüzeyi noktaları

Tablo 5.2 Hayali düğümler için hesaplanan potansiyel değerler

Düğüm No.	Potansiyel Değeri	Düğüm No.	Potansiyel Değeri	Düğüm No.	Potansiyel Değeri	Düğüm No.	Potansiyel Değeri
1	10262,087	17	7808,064	33	7280,332	49	10281,566
2	9161,336	18	7596,940	34	7228,660	50	9203,841
3	8518,247	19	7443,000	35	7205,627	51	8583,960
4	8096,436	20	7331,179	36	7189,415	52	8184,341
5	7802,010	21	7251,918	37	10272,364	53	7910,176
6	7589,852	22	7199,058	38	9183,846	54	7715,758
7	7435,028	23	7168,748	39	8553,131	55	7575,859
8	7322,486	24	7158,871	40	8143,224	56	7475,348
9	7242,669	25	10266,456	41	7859,748	57	7404,716
10	7189,415	26	9170,933	42	7657,252	58	7357,908
11	7158,871	27	8533,143	43	7510,616	59	7331,179
<b>12</b>	<b>7148,915</b>	28	8116,449	44	7404,716	60	7322,486
13	10263,151	29	7826,753	45	7329,996	61	10295,259
14	9163,678	30	7618,790	46	7280,332	62	9233,383
15	8521,885	31	7467,539	47	7251,918	63	8629,254
16	8101,328	32	7357,908	48	7242,669	64	8244,354

Düğüm No.	Düğüm No.	Düğüm No.	Düğüm No.
65	7983,258	85	10346,095
66	7799,964	86	9341,573
67	7669,184	87	8792,572
68	7575,859	88	8456,785
69	7510,616	89	8237,145
70	7467,539	90	8087,521
71	7443,000	91	7983,258
72	7435,028	92	7910,176
73	10315,515	93	7859,748
74	9276,734	94	7826,753
75	8695,180	95	7808,064
76	8330,850	96	7802,010
77	8087,521	97	10394,458
78	7918,953	98	9442,828
79	7983,258	99	8928,599
80	7715,758	100	8645,402
81	7657,252	101	8456,785
82	7618,790	102	8330,850
83	7596,940	103	8244,354
84	7589,852	104	8184,341
		105	8143,224
		106	8116,449
		107	8101,328
		108	8096,436
		109	10477,490
		110	9612,856
		111	9183,679
		112	8928,599
		113	8792,572
		114	8695,180
		115	8629,254
		116	8583,960
		117	8553,131
		118	8533,143
		119	8521,885
		120	8518,247
		121	10641,705
		122	9932,822
		123	9612,856
		124	9442,828
		125	9341,573
		126	9276,734
		127	9233,383
		128	9203,841
		129	9183,846
		130	9170,933
		131	9163,678
		132	9161,336
		133	<b>11053,070</b>
		134	10641,705
		135	10477,490
		136	10394,458
		137	10346,095
		138	10315,515
		139	10295,259
		140	10281,566
		141	10272,364
		142	10266,456
		143	10263,151
		144	10262,087

Tablo 5.1’de 12 numaralı düğüm göz merkezindeki noktayı, 133 numaralı nokta ise en köşede iki iletken kola en yakın olan noktayı ifade etmektedir.

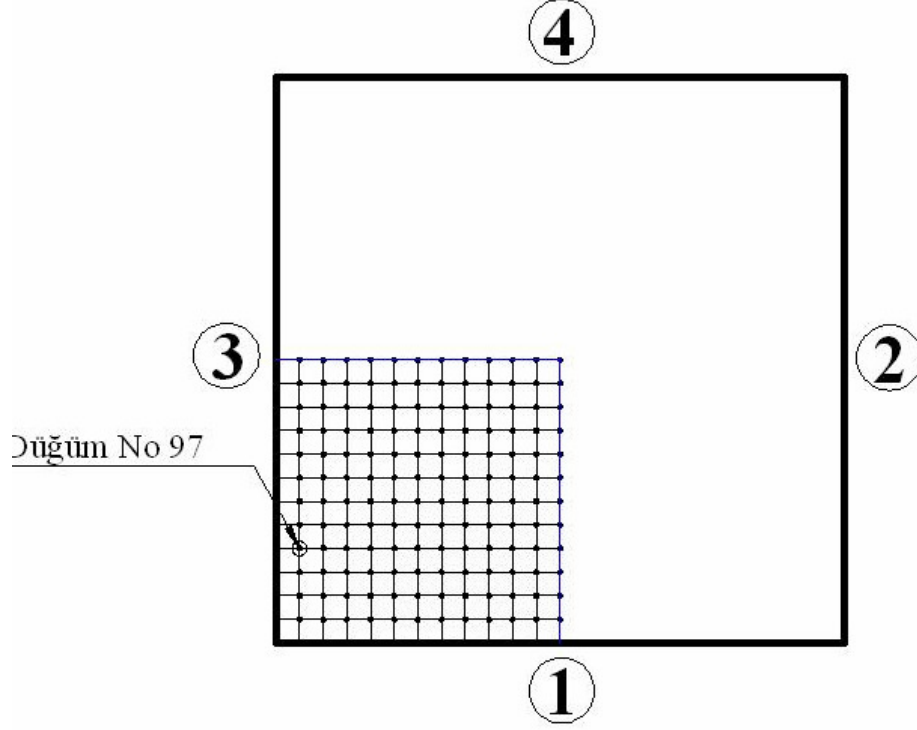
### 5.1.3 Herhangi Bir Nokta İçin Potansiyel Değer

Örnek teşkil etmesi açısından rasgele seçilen 97 numaralı noktanın potansiyelini hesaplayalım. Öncelikle işleme her bir iletken kolun bu noktada meydana getireceği potansiyeller bulunmalıdır. Bu gerilimlere kol numaraları verilerek yani 1 numaralı kolun meydana getireceği potansiyele  $V_1$  diyelim ve diğer potansiyelleri de buna göre belirtelim.

x, y, z koordinat sisteminde öncelikle z; h gömülme derinliği kadar alınır. Buna göre 97 numaralı noktanın koordinatları Şekil 5.3’te belirtildiği gibi olur.

Bu koordinat sisteminin verileri 4.23 Eşitliğinde yerine konularak dört ayrı gerilim ifadesi

bulunup bu ifadeler cebirsel olarak toplanacaktır. Seçilen noktanın koordinatı ise her kol iletkenin göre değişmektedir. Yani 4.23 Eşitliğinde hangi kol seçilen noktada bir potansiyel oluşturacaksa, noktanın o kola göre koordinatları 4.23 Eşitliğinde yerine yazılmalıdır.



- 1 numaralı kol için: (1, 4, 0,5)  
 2 numaralı kol için: (4, 23, 0,5)  
 3 numaralı kol için: (4, 1, 0,5)  
 4 numaralı kol için: (1, 20, 0,5)

Şekil 5.3 Rasgele seçilen ve potansiyeli hesaplanacak noktanın kollara göre koordinatları

Şu halde örneğin  $V_3$ 'ün hesaplanması için  $(x, y, z)$  olarak  $(4, 1, 0,5)$  değerleri 4.23 Eşitliğinde kullanılmalıdır. Böylece elde edilen gerilim değerleri Tablo 5.3'te sunulmuştur.

Tablo 5.3 Seçilen noktada kolların meydana getirdiği gerilim değerleri

Kol Numarası	Gösterimi	Gerilim Değeri
1	$V_1$	2727,0067
2	$V_2$	972,9205
3	$V_3$	5646,1563
4	$V_4$	1048,3741

97 numaralı hayali düğümde böylece meydana gelen toplam gerilim;

$$V_1+V_2+V_3+V_4 = 10394,458 \text{ [V]} \quad (5.16)$$

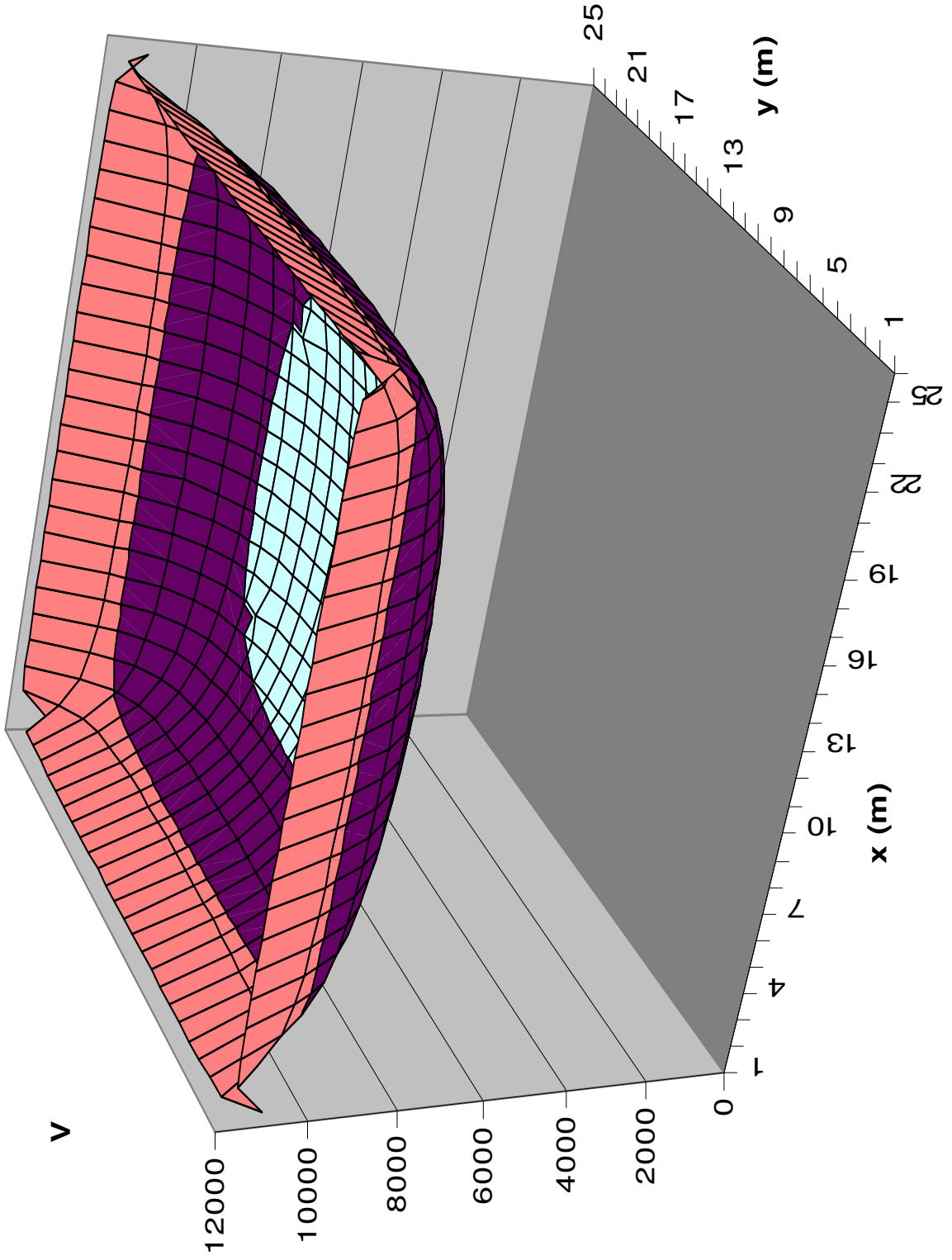
olarak bulunur. Bu değer Tablo 5.2'deki değerle aynıdır ki zaten bu tablodaki değerler de aynı yöntemle hesaplanmıştır.

#### **5.1.4 1x1 Gözlu Kare Topraklama Ağı İçin Sonuçlar**

Gösterim için Tablo 5.2'de verilen değerler MS Excel® programına girilmiş ve “Grafik Sihirbazı – Yüzey” işlemi seçilip çıkan menüde verilerin tamamı seçilmiştir. Meydana gelen grafik Şekil 5.4'te resmedilmektedir.

#### **5.1.5 Ağ İle Referans Toprak Arasında Potansiyel Dağılımının Sonlu Farklar Yöntemi İle Hesaplanması**

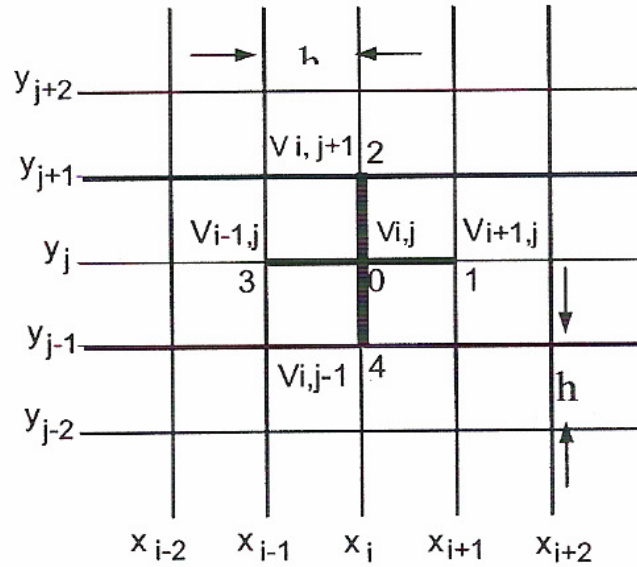
Bu kısımda ilk önce kullanılacak sayısal yöntem olan Sonlu Farklar Denklemi'nden bahsedilecek ve bu yöntemin toprak potansiyel dağılımında nasıl kullanılacağı izah edilecektir.



Şekil 5.4 1x1'lik ağ gözü içerisine denk gelen toprak yüzeyinde potansiyel dağılımın gösterimi

### 5.1.5.1 Sonlu Fark Denklemleri

Sonlu Farklar Yöntemi (SFY), potansiyel dağılımı hesaplamalarında da kullanılabilen bir sayısal yöntemdir. Temel prensip olarak, Laplace ve Poisson denklemleriyle verilmiş kapalı bir bölgede sayısal çözümlemedeki sayısal türev konusundan bilinen türevler için sonlu fark denklemlerini kullanarak potansiyel dağılımını hesaplamak için kullanılır (Şentürk, 2004). Bu nedenle problemi iki boyutlu problemlerde inceleme bölgesi kare, üçgen veya dikdörtgenlere bölünür. Bu çalışma için incelenecek alan 1x1 metrelik kare gözlemlere bölünmüştür.



Şekil 5.5 İki boyutlu kartezyen koordinatlarda kare gözlü sonlu farklar yöntemi için örnek ağ

Ağın düğüm noktalarında Laplace ve Poisson denklemleri yerine sonlu fark denklemleri yazılır. Böylece bilinen ve bilinmeyen düğüm potansiyellerini içeren bir lineer denklem takımı elde edilir. Bu denklemlerde, sınır koşulları veya bilinen düğüm potansiyelleri kullanılarak lineer denklem takımı çözülür ve bilinmeyen düğüm potansiyelleri bulunur.

Bu çalışmada kare gözlere sahip bir ağ yapısında incelenen problemin geometrisine uygun olarak sonlu fark denklemleri kartezyen koordinatlarda yazılmıştır. Kartezyen koordinatlarda iki boyutlu Laplace denklemi;

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = \nabla^2 V = 0 \quad (5.17)$$

şeklinindedir. Buna göre 5.17 Eşitliğindeki Laplace denkleminin indisli simgelerle sonlu fark biçiminde yazılımı,

$$\nabla^2 V_{i,j} = \frac{(V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j})}{h^2} + \frac{(V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1})}{k^2} = 0 \quad (5.18)$$

şeklinindedir. Burada h; x yönündeki artış veya adım büyüklüğü ve k, y yönündeki artıştır. Burada incelenecek olan ağ modeli 1'er metrelik düzgün alanlara bölündüğü için hesaplamalarda h = k olduğu şekilden de anlaşılacaktır. Bu durumda Laplace denkleminin sonlu fark yazılımı,

$$\nabla^2 V_{i,j} = \frac{1}{h} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} - 4V_{i,j}) = 0 \quad (5.19)$$

olur. Bu eşitlikten,

$$V_{i,j} = \frac{1}{4} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1}) \quad (5.20)$$

yazılabilir. 5.20 Eşitliğinden de görüldüğü gibi bir noktanın potansiyel değerinin bulunmasında özellikle birbirine komşu beş noktanın potansiyeli doğrudan etkilidir.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126
127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147
148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168
169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189
190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231
232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252
253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273
274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294
295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315
316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336
337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357
358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378
379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399
400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420
421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441
442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462
463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483
484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504
505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525
526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546
547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567
568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588
589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609
610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630
631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651
652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672
673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693
694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714
715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735
736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756
757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777
778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798
799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819
820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840
841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861
862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882
883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903
904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924
925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945
946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966
967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987
988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008
1009	1010	1011	1012	1013	1014	1015	1016	1017	1018	1019	1020	1021	1022	1023	1024	1025	1026	1027	1028	1029
1030	1031	1032	1033	1034	1035	1036	1037	1038	1039	1040	1041	1042	1043	1044	1045	1046	1047	1048	1049	1050
1051	1052	1053	1054	1055	1056	1057	1058	1059	1060	1061	1062	1063	1064	1065	1066	1067	1068	1069	1070	1071
1072	1073	1074	1075	1076	1077	1078	1079	1080	1081	1082	1083	1084	1085	1086	1087	1088	1089	1090	1091	1092
1093	1094	1095	1096	1097	1098	1099	1100	1101	1102	1103	1104	1105	1106	1107	1108	1109	1110	1111	1112	1113
1114	1115	1116	1117	1118	1119	1120	1121	1122	1123	1124	1125	1126	1127	1128	1129	1130	1131	1132	1133	1134
1135	1136	1137	1138	1139	1140	1141	1142	1143	1144	1145	1146	1147	1148	1149	1150	1151	1152	1153	1154	1155
1156	1157	1158	1159	1160	1161	1162	1163	1164	1165	1166	1167	1168	1169	1170	1171	1172	1173	1174	1175	1176
1177	1178	1179	1180	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197
1198	1199	1200	1201	1202	1203	1204	1205	1206	1207	1208	1209	1210	1211	1212	1213	1214	1215	1216	1217	1218
1219	1220	1221	1222	1223	1224	1225	1226	1227	1228	1229	1230	1231	1232	1233	1234	1235	1236	1237	1238	1239
1240	1241	1242	1243	1244	1245	1246	1247	1248	1249	1250	1251	1252	1253	1254	1255	1256	1257	1258	1259	1260
1261	1262	1263	1264	1265	1266	1267	1268	1269	1270	1271	1272	1273	1274	1275	1276	1277	1278	1279	1280	1281
1282	1283	1284	1285	1286	1287	1288	1289	1290	1291	1292	1293	1294	1295	1296	1297	1298	1299	1300	1301	1302
1303	1304	1305	1306	1307	1308	1309	1310	1311	1312	1313	1314	1315	1316	1317	1318	1319	1320	1321	1322	1323
1324	1325	1326	1327	1328	1329	1330	1331	1332	1333	1334	1335	1336	1337	1338	1339	1340	1341	1342	1343	1344
1345	1346	1347	1348	1349	1350	1351	1352	1353	1354	1355	1356	1357	1358	1359	1360	1361	1362	1363	1364	1365
1366	1367	1368	1369	1370	1371	1372	1373	1374	1375	1376	1377	1378	1379	1380	1381	1382	1383	1384	1385	1386
1387	1388	1389																		

Şekil 5.6'da 1x1'lik kare ağdan referans toprağa kadar olan noktaların ¼ kadarı gösterilmektedir. Diğer alanlar simetriden dolayı gösterilmemiştir yani incelemeler sadece bu alanda yapıp düşey ve yatay eksene göre noktaların simetrisi alındığında tüm alanlar için noktaların potansiyelleri bulunacaktır.

Burada alanın iç bölümü numaralandırılırken rasgele bir numaralamaya gidilmiştir. Ancak yukarıda 5.18 Eşitliğindeki i ve j indislerinin buradaki numaralar ile ilişkisi bulunmamaktadır. 5.18 Eşitliğindeki indisler noktaların alan içerisinde buldukları koordinatları belirtmektedir. Bu nedenle Şekil 5.6'daki birkaç bölge numarası için sonlu fark denklemi kurularak durum izah edilecektir.

Şekil 5.6 da örneğin 41 numaralı konum için sonlu fark denklemi Eşitlik 5.18'e göre şöyledir:

$$V_{41} = \frac{1}{4}(V_{42} + V_{40} + V_{20} + V_{62}) \quad (5.21)$$

$V_{42}$  noktası referans topraktaki alanda bulunduğu için sıfır olarak alınmalıdır. Bu durumda 5.21 Eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$V_{41} = \frac{1}{4}(V_{40} + V_{20} + V_{62}) = 0,25V_{40} + 0,25V_{20} + 0,25V_{62} \quad (5.22)$$

olarak bulunur. Burada toplam 740 adet düğüm bulunmaktadır ve bunların hepsi için 5.21'de gösterildiği gibi eşitliklerin yazılması oldukça zahmetlidir. Bunun yerine MS Excel® paket programında döngüsel basit bir formül yazılarak 740 adet denklemin çözülmesi sadece birkaç saniyeyi alacaktır.

### 5.1.5.2 Sonlu Fark Denklemlerinin MS Excel® İle Çözümü

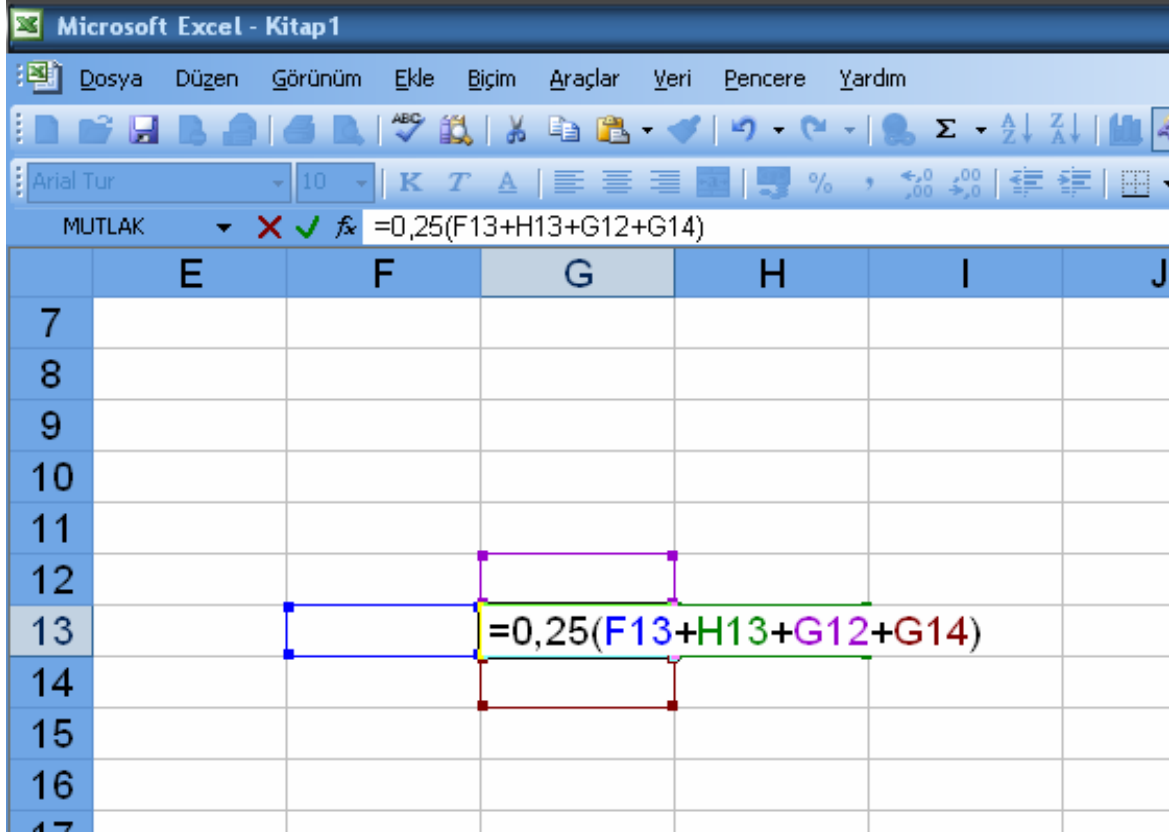
Sonlu farkların MS Excel® ile çözümü için öncelikle Şekil 5.6'daki gibi bir ağ alanı belirlenmelidir. Daha sonra burada potansiyeli bilinmeyen bir nokta için örneğin Şekil 5.7'de gösterildiği gibi potansiyeli hesaplanacak alan içerisindeki G13 hücresi için;

$$= 0,25(F13+H13+G12+G14) \quad (5.23)$$

Yazılarak bu hücrenin değeri etrafındaki dört hücrenin değerleri toplamının ¼'üne eşit olacaktır. Yalnız bu işlem sadece incelenecek alan düzgün olarak noktalara ayrıldığında uygulanabilir.

Alan içerisindeki diğer noktalar için 5.23 Eşitliğindeki ifadenin programda defalarca girilmesine gerek yoktur. Zira programda bunu sadece birkaç hücre kopyalama işlemiyle

dakikadan az bir sürede gerçekleştirmek mümkündür. Burada programın bu tip döngülü yani hücre değeri diğer hücre değerlerine bağımlı işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için araçlar çekme menüsü altındaki seçenekler kısmı seçilerek burada bulunan hesaplamalar sekmesindeki yineleme seçme kutusu işaretlenmeli ve döngü adedi yanındaki kutucuğa yazılmalıdır. Aksi takdirde herhangi bir sonuç almak mümkün olmaz.



Şekil 5.7 Döngüsel hesaplama için başlangıç hücresine yazılması gereken bağıntı

### 5.1.5.3 MS Excel® İle Toprak Yüzeyinde Ağ İle Referans Toprak Arasında Potansiyel Dağılımının Hesaplanması

Bölüm 5.1.5.2’de belirtilen yolla hazırlanmış bir programla, model ağ için hesaplanmış olan potansiyel dağılımı Şekil 5.8’de verilmektedir. Burada koyu bölge referans toprağı temsil etmektedir ve potansiyeli sıfır olarak alınır. Diğer bir ön kabul referans toprağın ağdan 20 metre uzakta olması durumudur. Ayrıca ağ iletkenin gelirmiş iletkenlerdeki her noktada aynı ve potansiyel dağılımının sürekli olduğu da belirtilmelidir. Yine sonlu farklar hesabı yapılırken alan dağılımının yani topraklama ağı ile referans toprak arasında potansiyel dağılımı sürekli olduğu belirtilmelidir.

Ağın içerisinde belirtilen gerilimlerin yazılmasında ise Tablo 5.2’de belirtilen potansiyel

değerlerden yararlanılmıştır.

Programda mesafelerin tam hassasiyetle belirlenememesinden kaynaklanan ve referans toprağın ağın çevresinde dairesel olarak bulunmasından dolayı noktaların hesaplamalarında ufak hataların olduğu belirtilmelidir. Bu hatalar daha sık noktalar kullanılarak giderilebilir ve hesaplamaların doğruluğu, belirtilen nokta sayısının çokluğuyla doğru orantılıdır.

7149	7159	7189	7243	7322	7435	7590	7802	8096	8518	9161	10262	11760	11045	10334	9630	8936	8255	7590	6940	6308	5693	5097	4518	3957	3413	2885	2374	1877	1393	921	458	
7159	7169	7199	7252	7331	7443	7597	7808	8101	8522	9164	10263	11760	11043	10329	9623	8928	8246	7579	6928	6295	5680	5083	4504	3942	3397	2870	2358	1861	1378	909	451	
7189	7199	7229	7280	7358	7468	7619	7827	8116	8533	9171	10266	11760	11036	10317	9606	8907	8221	7551	6899	6265	5649	5051	4472	3910	3365	2838	2326	1831	1351	887	438	
7243	7252	7280	7330	7405	7511	7657	7860	8143	8553	9184	10272	11759	11026	10297	9578	8872	8181	7507	6852	6216	5599	5001	4422	3861	3317	2790	2279	1785	1307	849	413	
7322	7331	7358	7405	7475	7576	7716	7910	8184	8584	9204	10282	11758	11010	10268	9537	8821	8123	7444	6785	6148	5530	4932	4354	3794	3251	2725	2216	1722	1244	788	367	
7435	7443	7468	7511	7576	7669	7800	7983	8244	8629	9233	10295	11757	10988	10228	9481	8752	8045	7360	6698	6059	5441	4844	4268	3709	3169	2645	2137	1642	1160	694	265	
7590	7597	7619	7657	7716	7793	7919	8088	8331	8695	9277	10316	11756	10959	10173	9406	8683	7945	7254	6589	5949	5332	4737	4162	3607	3070	2550	2044	1549	1061	562	0	
7802	7808	7827	7860	7910	7983	8088	8237	8457	8793	9342	10346	11754	10919	10100	9308	8547	7819	7122	6455	5815	5200	4608	4038	3487	2955	2439	1939	1451	971	492	0	
8096	8101	8116	8143	8184	8244	8331	8457	8645	8929	9443	10394	11752	10862	9999	9178	8399	7661	6961	6294	5656	5045	4459	3894	3349	2823	2314	1821	1344	882	435	0	
8518	8522	8533	8553	8584	8629	8695	8793	8929	9184	9613	10477	11748	10777	9859	9005	8210	7466	6766	6103	5471	4867	4287	3730	3192	2674	2172	1688	1222	778	366	0	
9161	9164	9171	9184	9204	9233	9277	9342	9443	9613	9933	10642	11739	10638	9654	8772	7970	7228	6534	5880	5258	4663	4094	3546	3017	2507	2013	1537	1078	643	252	0	
10262	10263	10266	10272	10282	10295	10316	10346	10394	10477	10642	11053	11699	10384	9347	8481	7699	6942	6264	5624	5016	4436	3878	3342	2824	2323	1838	1367	909	463	0	0	
11760	11760	11760	11759	11758	11757	11756	11754	11752	11748	11739	11699	11050	9851	8889	8055	7303	6607	5955	5337	4748	4184	3642	3119	2614	2124	1648	1184	730	298	0	0	
11058	11058	11050	11039	11024	11002	10972	10931	10874	10788	10649	10392	9857	9081	8303	7589	6879	6228	5611	5021	4466	3912	3387	2879	2387	1911	1447	992	530	0	0	0	
10360	10356	10345	10325	10295	10254	10199	10125	10024	9882	9675	9365	8903	8311	7675	7038	6417	5817	5239	4681	4142	3620	3114	2623	2148	1684	1237	806	396	0	0	0	
9670	9664	9647	9619	9578	9521	9446	9347	9215	9040	8805	8490	8079	7587	7047	6491	5933	5384	4846	4321	3810	3312	2826	2353	1891	1442	1009	601	249	0	0	0	
8990	8982	8962	8927	8876	8807	8717	8600	8450	8258	8015	7710	7338	6908	6438	5944	5442	4939	4440	3949	3466	2991	2526	2070	1624	1186	756	339	0	0	0	0	
8323	8314	8290	8250	8192	8114	8014	7886	7726	7529	7287	6996	6655	6270	5850	5407	4952	4490	4027	3568	3112	2662	2218	1779	1347	920	491	0	0	0	0	0	
7671	7661	7635	7591	7528	7445	7338	7204	7041	6843	6608	6332	6017	5666	5286	4884	4467	4041	3612	3182	2753	2327	1903	1482	1064	657	287	0	0	0	0	0	
7036	7025	6998	6951	6885	6798	6688	6552	6389	6195	5968	5708	5415	5092	4743	4374	3991	3597	3198	2795	2392	1989	1586	1181	771	357	0	0	0	0	0	0	
6418	6407	6379	6331	6263	6175	6064	5929	5768	5580	5363	5117	4843	4543	4221	3880	3524	3158	2786	2409	2031	1651	1270	885	482	0	0	0	0	0	0	0	
5819	5808	5779	5730	5662	5574	5464	5331	5174	4993	4786	4554	4297	4017	3717	3399	3068	2727	2378	2025	1671	1314	958	607	272	0	0	0	0	0	0	0	
5238	5227	5197	5148	5082	4994	4886	4757	4606	4432	4235	4015	3773	3511	3230	2933	2623	2302	1974	1644	1312	977	642	312	0	0	0	0	0	0	0	0	
4675	4665	4635	4587	4521	4435	4330	4205	4060	3893	3706	3498	3271	3024	2760	2480	2187	1884	1574	1263	955	641	321	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4132	4121	4091	4044	3979	3898	3794	3674	3534	3376	3198	3002	2787	2554	2305	2041	1762	1472	1174	881	605	311	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3606	3595	3566	3519	3456	3375	3277	3161	3028	2877	2709	2523	2321	2101	1866	1616	1349	1066	770	481	271	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3098	3088	3058	3012	2949	2871	2776	2666	2539	2397	2237	2062	1871	1664	1443	1206	953	674	381	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2607	2596	2567	2521	2459	2383	2292	2187	2067	1932	1782	1617	1437	1242	1034	812	583	314	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2134	2121	2092	2046	1984	1909	1822	1723	1611	1483	1340	1187	1018	832	640	426	262	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1677	1665	1635	1587	1523	1446	1364	1273	1170	1048	910	772	617	429	267	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1237	1225	1195	1146	1075	989	913	836	747	629	478	375	248	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
813	802	774	725	642	523	462	412	351	245	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
403	395	377	338	245	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

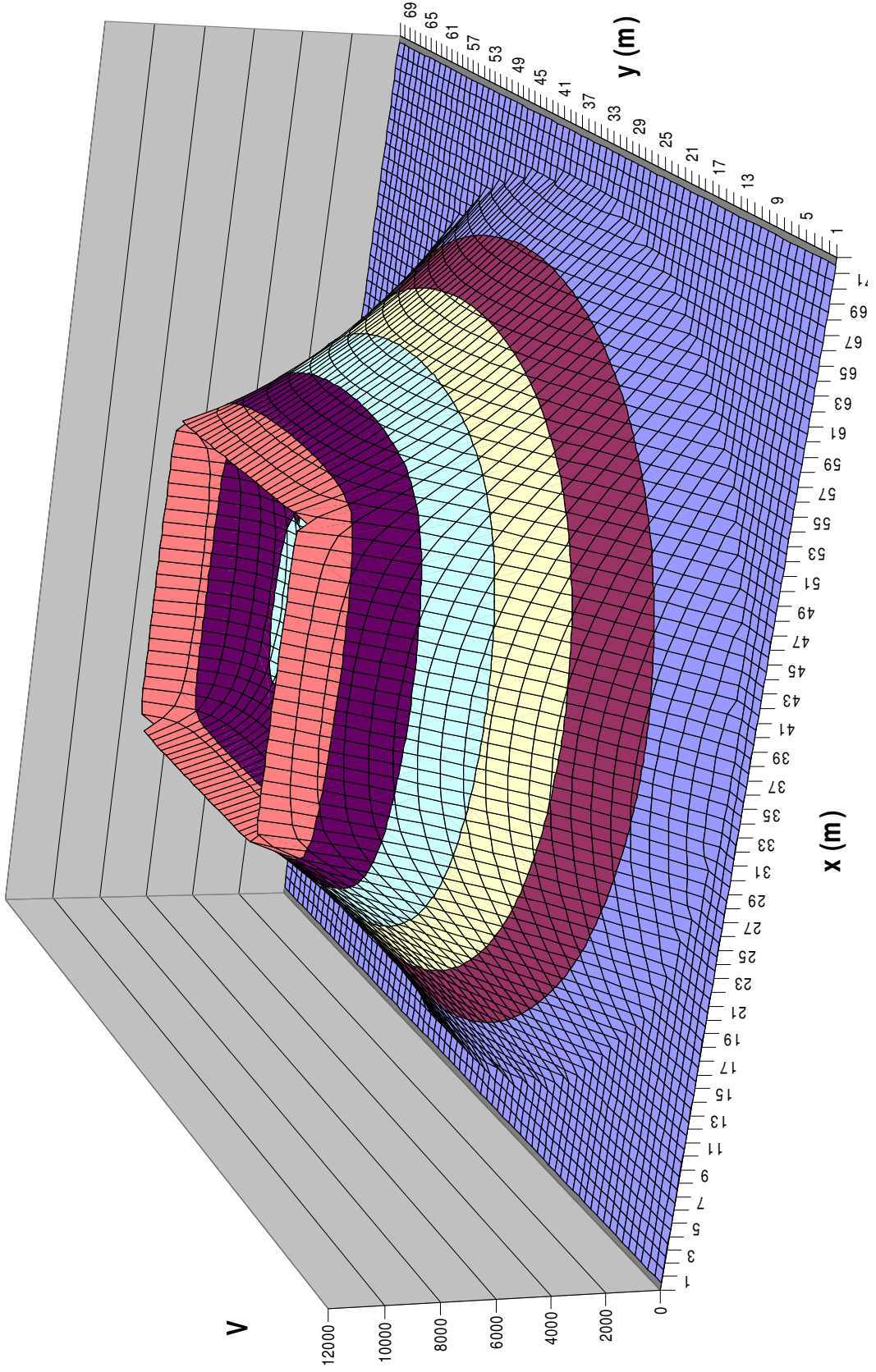
Şekil 5.8 1x1'lik topraklama ağında referans toprağa kadar olan bölümün ¼ 'üne eş alan için toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı

Buradaki hesaplamadan yola çıkarak işlem tüm ağ – referans toprak arası bölgeye uygulandığında ve elde edilen verilerin Tablo 5.1'de belirtilen ağ içerisindeki toprak yüzey potansiyel dağılımlarının da kullanımıyla Şekil 5.9'daki sonuç grafik elde edilebilir. Yine burada elde edilen grafik MS Excel® programında hazırlanmıştır.

Sonuç olarak bu tip bir topraklama ağı ile referans toprağa çok yakın mesafelerde bile

potansiyel değerlerinin kabul edilebilir sınırlarda olmadıkları açıktır.

İlerideki bölümde ağın boyutu sabit tutularak, ağdaki iletken sayısı artırılıp kıyaslamalar yapılacaktır.



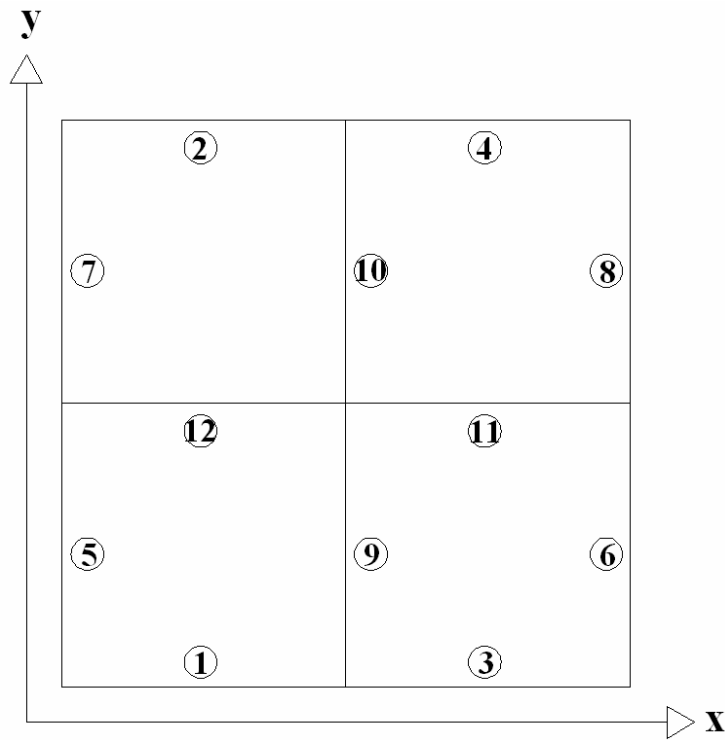
Şekil 5.9 1x1 Gözlu topraklama ağının yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı

## 5.2 2x2 Gözlü Kare Topraklama Ağı Analizi

Bu bölümde ve bundan sonraki model ağlar için her parametrenin tekrar tekrar hesaplanması yerine sadece incelenen ağ için gerekli eşitlikler ve ifadeler sunulacak ve yine sonuçlar grafiklerle desteklenecektir.

### 5.2.1 Direnç İfadeleri

Direnç ifadelerinin çıkarılması Bölüm 5.1.1'de belirtilmiştir. Burada sadece model ağ için hesaplanan direnç değerleri direkt olarak verilecek ve hesaplamalara geçilecektir. 2x2 gözlü model ağ Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



Şekil 5.10 2x2 Kare gözün numaralandırılması

Simetri nedeniyle ağda sadece iki tip direnç söz konusudur. Şekil 5.10'a göre bu direnç tipleri gruplandırılırsa ilk grup 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 numaralı, ikinci grup ise 9, 10, 11, 12 numaralı iletken kollara ait dirençlerdir. Ve her gruba ait iletkenlerde direnç değerleri birbirine eşittir. Yani  $r_1 = r_2 = \dots = r_8$  ve  $r_9 = r_{10} = r_{11} = r_{12}$ 'dir. Anlaşılabacağı gibi ağın iki farklı bölgesinden seçilen iki kola ait dirençlerin hesaplanması yeterli olacaktır. Örneğin Şekil 5.10'dan 1 ve 12 numaralı kollar ele alınırsa diğer kolların dirençleri bulunabilir.

İlk önce 1 numaralı kolun öz direnci Eşitlik 4.11 kullanılarak  $r_{11}^1 = 12,913 \Omega$  olarak hesaplanır. 1 numaralı kol ile yatay karşılıklı direnç değerlerinin bulunacağı kol numaraları 2,

3, 4, 11 ve 12'dir. 1 numaralı kolun bu kollar ile aralarındaki karşılıklı dirençleri hesaplanırken Eşitlikler 4.14 ve 4.15'ten yararlanılmıştır. Ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.4'te sunulmuştur. 1 numaralı kola dik konumdaki kollarla aralarındaki karşılıklı direnç değerleri ise Eşitlikler 4.14, 4.16 ve 4.17 kullanılarak elde edilmiş ve değerleri Tablo 5.5'te sunulmuştur.

Tablo 5.4 1 numaralı kola ait yatay karşılıklı direnç değerleri

Kol Numarası	Direnç Değeri [ $\Omega$ ]
2	0,650
3	1,785
4	0,589
11	0,950
12	1,237

Tablo 5.5 1 numaralı kola ait dikey karşılıklı direnç değerleri

Kol Numarası	Direnç Değeri [ $\Omega$ ]
5	2,251
6	0,852
7	0,852
8	0,631
9	2,251
10	0,852

1 numaralı kolun toplam direnci; öz direnç ile Tablo 5.4 ve 5.5'te belirtilen direnç değerlerinin toplanmasıyla elde edilir. Böylece  $r_1 = 25,813 \Omega$  olarak bulunur.

12 numaralı kolun öz direnci Eşitlik 4.11 kullanılarak  $r_{12}^1 = 12,913 \Omega$  olarak hesaplanır. 12 numaralı kol ile yatay karşılıklı direnç değerlerinin bulunacağı kol numaraları 1, 2, 3, 4, ve

11'dir. 1 numaralı kolun bu kollar ile aralarındaki karşılıklı dirençleri hesaplanırken Eşitlikler 4.14 ve 4.15'ten yararlanılmıştır. Ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.6'da sunulmuştur. 12 numaralı kola dik konumdaki kollarla aralarındaki karşılıklı direnç değerleri ise Eşitlikler 4.14, 4.16 ve 4.17 kullanılarak elde edilmiş ve değerleri Tablo 5.7'de sunulmuştur.

Tablo 5.6 12 numaralı kola ait yatay karşılıklı direnç değerleri

Kol Numarası	Direnç Değeri [ $\Omega$ ]
1	1,237
2	1,237
3	0,950
4	0,950
11	1,785

Tablo 5.7 1 numaralı kola ait dikey karşılıklı direnç değerleri

Kol Numarası	Direnç Değeri [ $\Omega$ ]
5	2,251
6	0,852
7	2,251
8	0,852
9	2,251
10	2,251

12 numaralı kolun toplam direnci; öz direnç ile Tablo 5.6 ve 5.7'de belirtilen direnç değerlerinin toplanmasıyla elde edilir. Böylece  $r_{12} = 29,780 \Omega$  olarak bulunur.

Bu durumda kollardan geçen akımlar 5.12 Eşitliği kullanılarak hesap edilirse;

$$I_1 = 15000 / 25,813 = 581,103 \text{ A} \quad (5.24)$$

$$I_{12} = 15000 / 29,780 = 503,694 \text{ A} \quad (5.25)$$

olur. Buradan;  $I_1 = I_2 = \dots = I_8 = 581,103 \text{ A}$  ve  $I_{12} = I_9 = I_{10} = I_{11}$  olduğu simetriden açıktır. Ağda dolanan toplam akım;

$$I_{\text{toplam}} = (8.581,103) + (4.503,694) = 6663, 595 \text{ A} \quad (5.26)$$

dır. Ağın toplam topraklama direnci ise;

$$R_g = 15000 / 6663,595 = 2,251 \ \Omega \quad (5.27)$$

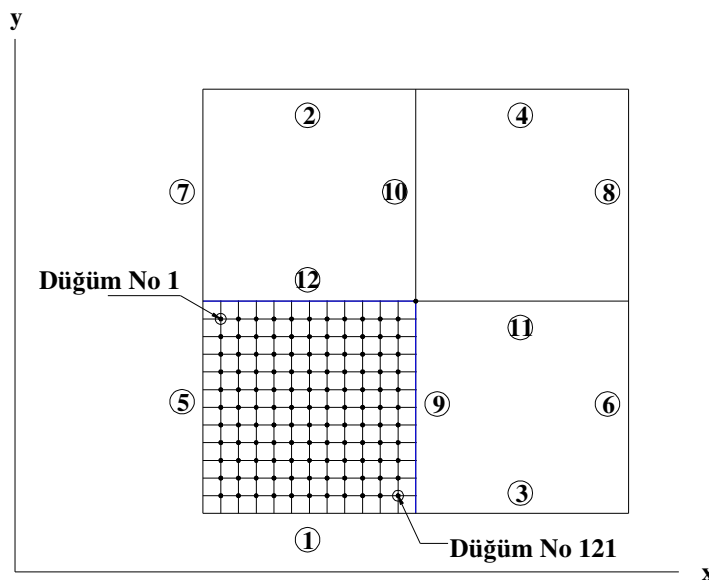
olur.

### 5.2.2 Göz İçerisindeki Potansiyel Değerler

Şekil 5.10'dan görüldüğü gibi ağın sadece çeyreklik kısmındaki potansiyellerin bulunması yeterli olacaktır. Çünkü enine ve dikine simetriden dolayı diğer noktaların potansiyelleri bulunan bu nokta potansiyellerinden elde edilebilir.

Şekil 5.12'de göz içerisindeki noktalarda hesaplanan potansiyel değerleri verilmiştir. Kollarda dolanan akımların ve ağda dolanan toplam akımın bulunması ile ağ gözü içerisine tekabül eden yer yüzeyindeki her 1 metrede potansiyel ifadeleri Eşitlik 4.23 kullanılarak bulunabilir.

Şekil 5.11'de potansiyeli bulunacak noktalar gösterilmektedir. Burada noktaların potansiyel hesapları yapılırken her kolun kendi üzerinden akan akım önemlidir. Ve iletken boyları 12 m olarak alınacaktır.



Şekil 5.11 2x2 Model kare ağda potansiyelleri bulunacak noktalar

13160	13041	12706	12562	12527	12568	12672	12838	13077	13413	13905	14706	15776
12722	12076	11752	11505	11463	11501	11603	11769	12007	12343	12835	13636	14706
12207	11424	10961	10735	10678	10709	10807	10971	11208	11464	12034	12835	13905
11940	11209	10667	10282	10208	10229	10323	10484	10718	11052	11464	12343	13413
11742	10837	10236	9913	9893	9959	9996	10154	10422	10718	11208	12007	13077
11582	10654	10035	9768	9673	9682	10134	10285	10154	10484	10971	11769	12838
11446	10223	9887	9617	9521	9603	9615	10134	9996	10323	10807	11603	12672
11326	10396	9781	9520	9430	9443	9603	9682	9959	10229	10709	11501	12568
11216	10311	9721	9457	9391	9430	9521	9673	9893	10208	10678	11463	12527
11114	10262	9725	9527	9457	9520	9617	9768	9913	10282	10735	11505	12562
11015	10283	9774	9725	9721	9781	9887	10035	10236	10667	10961	11752	12706
10897	10498	10283	10262	10311	10396	10223	10654	10837	11209	11424	12076	13041
10322	10897	11015	11114	11216	11326	11446	11582	11742	11940	12207	12722	13160

Şekil 5.12 2x2 Gözlü kare ağın iç yüzeyine tekabül eden toprak yüzeyi için bulunmuş potansiyel dağılımları

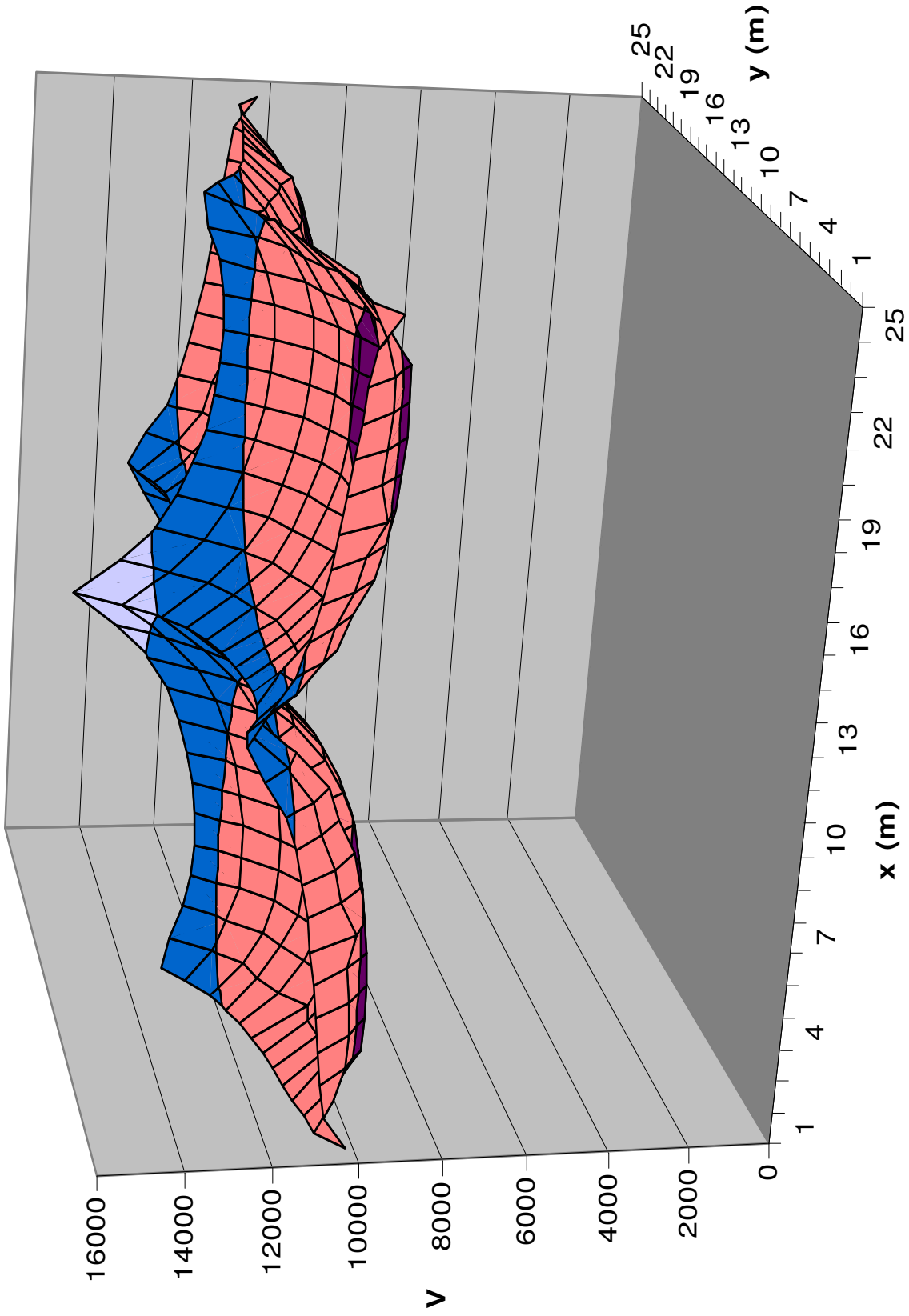
Burada koyu kısımlar tam ağ iletkenlerinin hizasına isabet eden toprak yüzey potansiyellerini belirtmektedir. Bu bilgilerden yola çıkarak 2x2 gözlü kare ağ modelinin iç bölgesine isabet eden toprak yüzeyi potansiyel dağılımları ise Şekil 5.13'te yer almaktadır.

Şekil 5.13'ten de açıkça görüleceği gibi ağdaki iletken sayısı artırdıkça köşe gözlere yakın toprak yüzeyinde potansiyel değeri düşmektedir.

### 5.2.3 Ağ İle Referans Toprak Arasında Potansiyel Dağılımının Sonlu Farklar Yöntemi İle Hesaplanması

Problemin SFY ile çözülebilmesi için sınır koşullarının belirli ve incelenecek alanın düzgün olması gerektiği Bölüm 5.1.5 başlığı altında belirtilmişti. Burada yine referans toprağın en dışta bulunan ağ iletkenlerinden 20 m uzakta olduğu kabul edilecektir.

Toplam ağ alanının referans toprağa kadar olan kısmın çeyreğinde yapılan hesaplama sonuçları Şekil 5.14'te, potansiyel dağılımının üç boyuttaki grafik gösterimi ise Şekil 5.15'te verilmiştir.

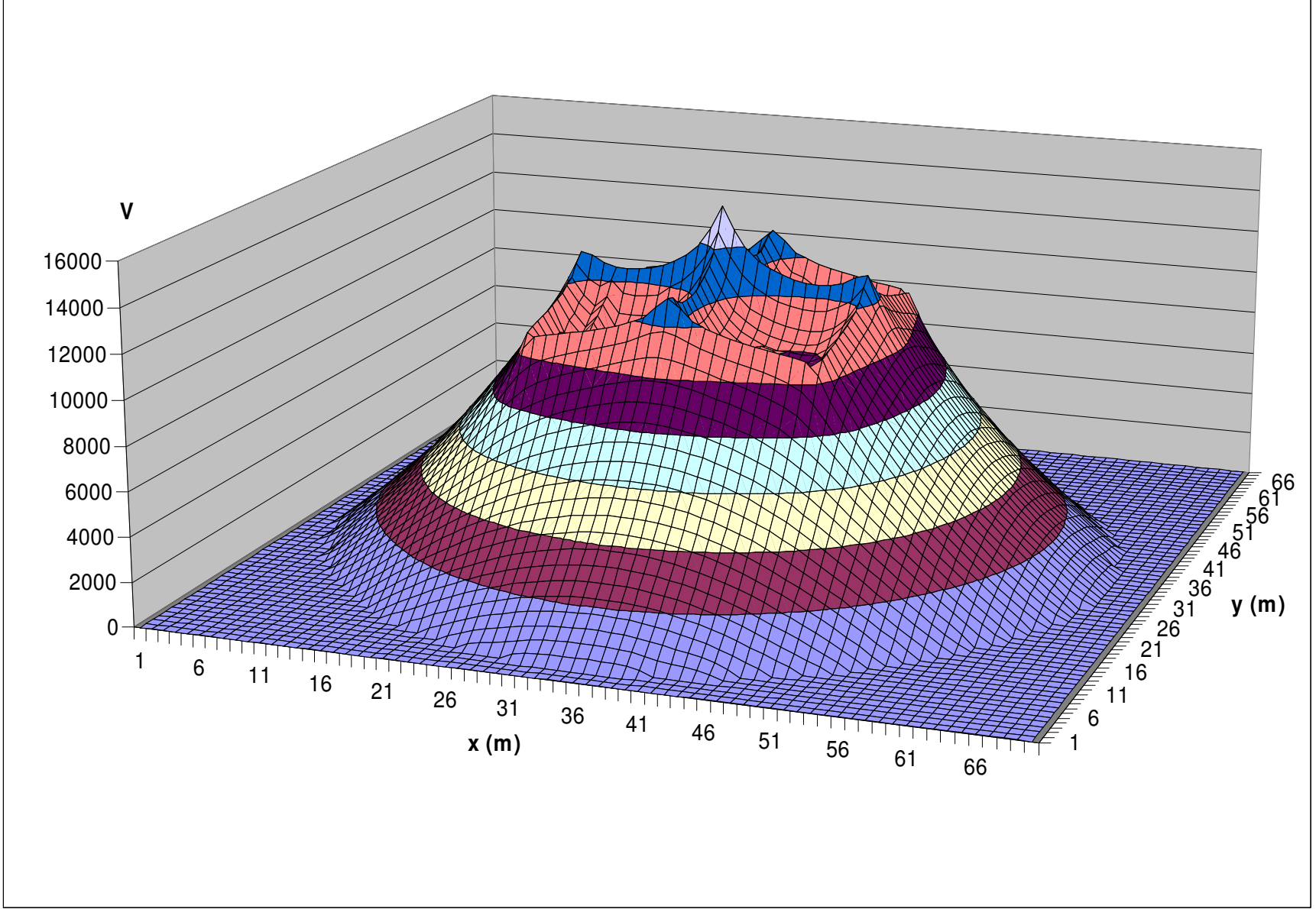


Şekil 5.13 2x2 Gözlü kare ağ alanı içerisinde tekabül eden toprak yüzeyi potansiyel dağılımı

15776	14706	13905	13413	13077	12838	12672	12568	12527	12562	12706	13041	13160	11812	10768	9859	9025	8240	7495	6783	6100	5444	4813	4206	3621	3056	2510	1982	1470	971	483	0
14706	13636	12835	12343	12007	11769	11603	11501	11463	11505	11752	12076	12722	11659	10700	9820	8997	8218	7475	6764	6082	5426	4796	4188	3603	3038	2492	1965	1454	959	476	0
13905	12835	12034	11464	11208	10971	10807	10709	10678	10735	10961	11424	12207	11400	10554	9725	8926	8159	7424	6717	6037	5384	4754	4148	3564	3000	2456	1930	1423	934	461	0
13413	12343	11464	11052	10718	10484	10323	10229	10208	10282	10667	11209	11940	11182	10390	9599	8823	8070	7343	6642	5967	5317	4690	4087	3504	2943	2401	1878	1374	892	434	0
13077	12007	11208	10718	10422	10154	9996	9959	9893	9913	10236	10837	11742	10995	10227	9456	8696	7955	7236	6542	5872	5226	4603	4003	3425	2866	2327	1806	1304	826	384	0
12838	11769	10971	10484	10154	10285	10134	9682	9673	9768	10035	10654	11582	10831	10067	9304	8551	7817	7105	6417	5752	5112	4494	3899	3325	2770	2234	1714	1210	724	277	0
12672	11603	10807	10323	9996	10134	9615	9603	9521	9617	9887	10223	11446	10678	9905	9139	8388	7658	6950	6267	5609	4974	4363	3773	3205	2656	2124	1608	1099	582	0	0
12568	11501	10709	10229	9959	9682	9603	9443	9430	9520	9781	10396	11326	10530	9738	8961	8205	7475	6771	6094	5442	4814	4210	3627	3065	2523	2000	1493	997	505	0	0
12527	11463	10678	10208	9893	9673	9521	9430	9391	9457	9721	10311	11216	10378	9555	8760	7997	7266	6566	5894	5250	4630	4034	3460	2906	2373	1859	1366	893	440	0	0
12562	11505	10735	10282	9913	9768	9617	9520	9457	9527	9725	10262	11114	10210	9345	8527	7756	7026	6331	5668	5033	4424	3837	3272	2727	2203	1698	1218	768	362	0	0
12706	11752	10961	10667	10236	10035	9887	9781	9721	9725	9774	10283	11015	10005	9086	8248	7474	6750	6065	5414	4791	4194	3618	3064	2528	2012	1514	1038	601	241	0	0
13041	12076	11424	11209	10837	10654	10223	10396	10311	10262	10283	10498	10897	9710	8746	7905	7143	6434	5767	5132	4525	3941	3379	2836	2311	1802	1306	822	356	0	0	0
13160	12722	12207	11940	11742	11582	11446	11326	11216	11114	11015	10897	10322	9191	8281	7484	6757	6078	5435	4822	4234	3667	3120	2591	2078	1579	1088	586	0	0	0	0
11826	11673	11415	11197	11010	10845	10693	10544	10391	10223	10017	9719	9197	8452	7704	6994	6323	5684	5074	4487	3921	3374	2844	2329	1830	1347	881	435	0	0	0	0
10797	10730	10584	10420	10257	10097	9935	9766	9583	9370	9109	8766	8297	7713	7090	6466	5856	5263	4689	4132	3590	3064	2551	2052	1567	1098	655	273	0	0	0	0
9903	9865	9770	9644	9502	9349	9184	9004	8802	8567	8285	7938	7512	7014	6477	5924	5371	4824	4286	3760	3245	2740	2246	1762	1287	822	369	0	0	0	0	0
9083	9057	8986	8884	8757	8612	8449	8264	8054	7810	7525	7189	6797	6356	5879	5383	4879	4374	3873	3377	2888	2406	1930	1461	999	533	0	0	0	0	0	0
8314	8293	8236	8147	8032	7894	7734	7550	7338	7096	6816	6495	6132	5731	5301	4851	4389	3922	3454	2988	2525	2065	1608	1155	713	311	0	0	0	0	0	0
7584	7566	7516	7436	7330	7199	7043	6863	6655	6418	6148	5844	5506	5137	4743	4329	3903	3470	3033	2596	2158	1720	1281	837	387	0	0	0	0	0	0	0
6888	6871	6826	6752	6652	6527	6378	6203	6001	5772	5514	5227	4910	4568	4203	3821	3425	3022	2614	2203	1791	1378	960	523	0	0	0	0	0	0	0	0
6221	6206	6163	6095	6000	5881	5737	5569	5375	5156	4910	4638	4341	4021	3681	3325	2956	2579	2197	1812	1426	1040	658	295	0	0	0	0	0	0	0	0
5582	5568	5528	5462	5373	5259	5121	4960	4775	4566	4332	4075	3795	3494	3175	2841	2494	2140	1782	1423	1060	697	339	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4969	4955	4917	4855	4769	4661	4530	4375	4199	3999	3778	3534	3270	2986	2685	2369	2041	1706	1370	1036	695	348	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4380	4366	4330	4271	4189	4085	3960	3814	3645	3456	3245	3014	2764	2495	2210	1909	1594	1272	955	656	338	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3814	3801	3766	3709	3631	3532	3413	3273	3113	2933	2733	2514	2276	2022	1750	1462	1155	835	521	294	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3271	3257	3223	3168	3093	2999	2885	2753	2601	2430	2240	2031	1806	1565	1307	1033	730	391	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2748	2735	2701	2647	2575	2484	2377	2252	2109	1947	1765	1566	1351	1124	881	632	341	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2246	2232	2199	2146	2075	1987	1885	1769	1636	1482	1308	1117	909	697	463	274	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1763	1750	1716	1663	1591	1504	1409	1304	1183	1038	868	685	471	292	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1300	1286	1253	1199	1122	1028	942	855	753	619	442	282	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
854	842	812	758	670	544	477	422	354	243	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
422	415	395	352	255	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Şekil 5.14 Sonlu farklar yöntemi ile 2x2 gözlü model kare ağ ile referans toprak arasındaki potansiyel dağılımı sonuçları

Şekil 5.15 2x2 Gözlü kare model ağ için referans toprağa kadar bölgede potansiyel dağılımı



Şekil 5.15'den de görülebileceği gibi ağdaki köşe gözlerin potansiyeli ağın merkezinin potansiyeline oranla daha düşüktür. Ve yarıca değerlere bakıldığında köşe gözlere doğru gidildikçe potansiyel değeri köşe gözlerin merkezinde ağ içerisindeki diğer noktalara göre daha düşük seviyede olduğu gözlemlenebilir.

Bu şekilde göz sayıları artırılarak daha fazla göz sayısı barındıran topraklama ağları ile ağ içerisindeki yüzey toprak potansiyeli burada verilen model ağlardaki değerlerinden daha düşük değerler elde edilmesi sağlanabilir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

“Sonlu Farklar Yöntemiyle Topraklama Ağlarındaki Potansiyel Dağılımın Hesaplanması” adlı bu tez çalışmasında; yüksek gerilim tesislerinde açma kapama olayları, yıldırım darbeleri gibi darbe akımlarının meydana geldiği durumlarda, akımı toprağa ileten ve yaygın kullanıma sahip olan topraklama ağlarının, ağırlıklı olarak şebeke frekansında meydana gelebilecek darbe akımları sonrasındaki toprak yüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımları incelenmiştir.

Hesaplamalar yapılırken toprağın tek katmandan oluştuğu, referans toprağın; ağın bir kenarının orta noktasından 20 m uzakta olduğu kabul edilmiştir.

İlk önce hesaplamaların yapılması için gerekli olan yöntemler sırası ile belirtilmiş, daha sonra analizleri yapılacak model ağlar seçilerek ağların bir hata durumunda yer yüzeyinde oluşabilecek potansiyel dağılıma verdikleri cevaplar sonlu farklar yöntemi kullanılarak incelenmiştir.

Hesaplamalar yapılırken kullanılan sonlu farklar yönteminin sonuca gidebileceği kare ağlar model olarak belirlenmiştir. Ve yine incelemeler 1’er metre aralıklarla yapılmıştır ki bu adım gerilimlerinin bu çalışmanın son bölümünde verilen tablolardaki değerler yardımıyla bulunabilir.

Buna göre bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar şöyle özetlenebilir:

- Topraklama ağlarının koruma derecelerinin belirlenmesi için belirleyici unsurlar olan adım ve temas gerilimlerinin, belirlenen sınır değerler içerisinde tutulabilmesi için bilinmesi için gereken göz gerilimleri ağın kenar uzunluğunu oluşturan iletken kol uzunluklarının azalmasıyla, ağdaki iletken sayısının artmasıyla, gömülme derinliğinin artmasıyla ve ağ iletkenlerinin kesitinin artmasıyla azalmaktadır.
- Topraklama ağlarında göz sayısı artırıldıkça topraklama direncinin değeri düşmektedir. Modeller üzerinde yapılan incelemede 1x1 kare ağ için ağın topraklama direnci 2,451  $\Omega$  iken, 2x2 kare ağ için ağın topraklama direnci 2,251  $\Omega$  olarak bulunmuştur. Yani ağ alanı sabit tutularak incelenen bu ağlarda göz sayısının 4 katına çıkarılması, ağın direncinde yaklaşık %8,15’lik bir azalma meydana getirmiştir.

Topraklama ağlarında kenarlardan merkeze doğru gidildikçe ağın potansiyeli

yükselirken gözlerin merkezlerine doğru potansiyel değerler azalmaktadır.

- Ağ kollarına ait direnç değerlerinin ve ağ içerisindeki 1'er metre mesafedeki noktaların potansiyel değerlerin bulunmasında kaçak akımlar yönteminin kullanılması, iletkenlerin birbirlerine göre olan özel konumları için bile başarılı sonuç vermektedir.
- Referans toprağa kadar olan toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımların hesaplanması için kullanılan Sonlu Farklar Yöntemi ile hesaplanması bazı sınır koşullarının öngörülmesini gerektirmektedir. Bunların başında incelemesi yapılacak bölgenin sınırları olmalı ve alan düzgün geometrik şekle sahip olmalıdır.
- Topraklama ağının tasarımı için önem arz eden bir başka konu ise toprağın özgül direncinin iyi tespit edilmesidir. Çünkü hesaplamalar yapılırken bu katsayı, ağın direncinin bulunmasında, buna bağlı olarak ağdaki akım dağılımlarının ve son olarak da potansiyel dağılımların hesaplanmasında direkt etkindir.
- Göz sayısının daha fazla olduğu ağ modelleri için "Kaçak Akımlar Yöntemi" ile direnç ve potansiyel dağılımı hesaplarının MS Excel® ile yapılması oldukça zahmetlidir. Ancak buradaki çalışmada programın "Sonlu Farklar Yöntemi" ile kullanımı son derece kolaydır. Buradaki tek sıkıntı referans toprak ile ağ arasındaki mesafenin tam istenilen aralıkta alınamamasından kaynaklanmaktadır.
- Topraklama ağının yeter derece iyi son derece düşük maliyetli olması, iki nokta arasındaki (burada 1 m) potansiyel farkın izin verilen adım gerilimi sınır değerlerini karşılayıp karşılamamasına bağlıdır.

Topraklama ağları günümüzde yaygın kullanıma sahip topraklama çeşitlerinden biridir. Bunların tasarımları yapılırken bu çalışma içerisinde de belirtilen noktaların dikkatle ele alınması gereklidir. Sonuç değerlerden de görüleceği gibi ağdaki göz miktarını yani kullanılacak iletken sayısının artırılması yani göz boyutlarının küçük tutulması ile yer yüzeyindeki potansiyel değerinde özellikle de köşe gözlerin merkezlerine doğru olan bölgelerde potansiyel değerlerin önemli derecede düştüğünü göstermektedir.

## KAYNAKLAR

ANSI/IEEE Committee, (1985), "IEEE Guide For Safety In AC Substation Grounding – Std 80–1986", An American National Standard, Kısım 7: 50-52.

Bayram, M., (2000), "Elektrik Tesislerinde Topraklama", Birsen Yayın Evi, 82-93, İstanbul.

Çelikyay, M., (1995), "Enerji Sistemlerinde Topraklama Ağlarının Bilgisayar Destekli Analizi", Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Dawalibi, F. ve Mudhedkar, D., (1975), "Optimum Design Of Substation Grounding In A Two Layer Earth Structure", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-94 No.2: 262-266.

Dawalibi, F. Ve Mudhedkar, D., (1979), "Influence of Ground Rods on Grounding Grids", IEEE Transactions Paper, F 79 245-2.

Gan Y. ve Ruan, J., (2005), "Simulation Of The Grounding Grid By Coupling The Unidimensional Finite Element Method (FEM) And The Three-Dimensional FEM", Progress In Electromagnetics Research Symposium, 22-26 August, 2005, 1-4.

Gupta B.R. ve Thapar B., (1980), "Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No.6: 2357-2362.

Gupta, B.R. ve Singh, V.K., (1992), "Inductance Of Rectangular Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.3: 1218-1222.

Gupta, B.R. ve Singh, V.K., (1992), "Inductance Of Rectangular Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.3: 214-218.

Heppe, J. Robert, (1979), "Computation Of Potential At Surface Above An Energized Grid Or Other Electrode, Allowing For Non-Uniform Current Distribution", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-98 No.6:1978-1986.

Rudenberg R., (1945), "Grounding Principles and Practice – Fundamental Considerations on Grounding Currents' Electrical Engg., 1-13.

Şentürk E., (2004), "Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi", Doktora Tezi Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

## İNTERNET KAYNAKLARI

[www.ieee.org](http://www.ieee.org)

[www.eric.com](http://www.eric.com)

[www.grounding.com](http://www.grounding.com)

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	12.05.1980	
Doğum yeri	Kiraz / İzmir	
Lise	1995-1998	Efeler Lisesi / Aydın
Lisans	1998-2003	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
<b>Çalıştığı kurum</b>	2003-Devam ediyor	Teksan Jeneratör Elk. San. Tic. A.Ş.