

**ENERJİ SİSTEMLERİNDE TOPRAKLAMA AĞLARININ
BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZİ**

T. 66527

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Mehmet ÇELİKİYAY

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Ocak 1995

Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Şubat 1995

Tez Danışmanı : Y. Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Yılmaz ÖZKAN

: Y. Doç. Dr. Belgin TÜRKAY

ŞUBAT 1995

ÖNSÖZ

Topraklama tesisleri normal işletme durumunda, varlığını hemen hemen hiç hissettirmedeği halde bir arıza durumunda etkisini gösterir ve görevini yapar. Bu nedenle topraklama, her an işletmede olmayan ve görünmeyen bir tür gizli tesisdir ve elektrik tesisleri içinde topraklamaya ihmal edilmeden, hakettiği önemi vermek gerekir.

Bu tez çalışmasında, topraklama sistemleri içinde, üzerinde teorik çalışmaların yoğun olarak yapıldığı ve kullanımı gittikçe yaygınlaşmakta olan gözlü topraklama ağlarının analizi için, bilimsel literatürdeki sayısal yöntemler içinde kolaylığı ve doğruluğu ispatlanan Yük Benzetim Yöntemi (YBY)'nin uygulanabilirliği incelenmiş ve bu yöntem kullanılarak bazı topraklama ağlarının analizi yapılmıştır. Bu amaçla 2.bölümde, topraklama ile ilgili temel kavramlar verildikten sonra 3. bölümde topraklama sistemleri geniş bir şekilde ele alınmıştır. 4.bölümde topraklama ağlarında endüktans ve darbe empedansının hesap yöntemleri verilmiştir. 5. bölümde topraklama ağlarının analizinde kullanılan sayısal yöntemler geniş bir şekilde verildikten sonra 6. bölümde YBY'nin topraklama ağlarına uygulaması ve bunun için geliştirilen bilgisayar programının tanıtımı ile bu yöntemin çeşitli tipteki topraklama ağlarına uygulama örnekleri verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar ve sunulan öneriler açıklanmıştır.

Bana bu çalışmayı yapma olanağını veren, çalışmalarımı büyük bir sabır ve titizlikle inceleyerek karşılaştığım zorlukları aşmamı sağlayan, tez yöneticim, hocam, Sayın Yrd. Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, ayrıca özellikle bilgisayar programının hazırlanmasındaki büyük katkılarından dolayı Arş. Gör. Elk.Yük. Müh. Sayın Hayri YILDIRIM'a ve son olarak tezi sabırla ve özenle daktilo eden EM&ŞE Yazılım'dan Sayın Şehriban YAZAN'a içten teşekkürlerimi sunarım.

İstanbul, Ocak 1995

Elk. Müh.Mehmet ÇELİKAY

İÇİNDEKİLER

NOTASYON LİSTESİ.....	vi
ÖZET.....	vii
SUMMARY.....	viii
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. TOPRAKLAMA İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR.....	4
BÖLÜM 3. TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ.....	16
3.1. Çubuk Topraklayıcılar.....	16
3.2. Levha Topraklayıcılar.....	18
3.2.1. Dikdörtgen Topraklama Levhalarının Analizi.....	19
3.3. Şerit Topraklayıcılar.....	38
3.4. Doğal Topraklayıcılar.....	40
3.5. Özel Topraklayıcılar.....	41
3.6. Bileşik Topraklayıcılar.....	41
3.6.1. Paralel Topraklayıcılar.....	41
3.6.2. Karma Topraklayıcılar.....	42
BÖLÜM 4. TOPRAKLAMA AĞLARININ ANALİZİ.....	43
4.1. Genel Bilgi.....	43
4.2. Topraklama Ağlarında İndüktans.....	43
4.2.1. Reaktif kVA Yöntemi.....	45
4.2.2. Akım Dağılımının Bulunması.....	47
4.2.3. İndüktansın Hesabı.....	50

4.3. Topraklama Ağlarının Darbe Empedansı.....	54
4.3.1. Etkin Alan.....	55
4.3.2. Kare Topraklama Ağlarının Darbe Empedansının Bulunması.....	56
4.3.3. Dikdörtgen Topraklama Ağlarının Darbe Empedansının Bulunması.....	59

BÖLÜM 5. TOPRAKLAMA AĞLARININ ANALİZİNDE KULLANILAN

SAYISAL YÖNTEMLER.....	65
5.1. Eşdeğer Dairesel Levha Yaklaşım Yöntemi.....	65
5.2. Topraklama Ağlarında Göz Potansiyelinin Hesabı.....	68
5.2.1. Göz Potansiyel İfadesinin Bulunması.....	68
5.2.2. Göz Potansiyel Değerlerinin Bulunması.....	76
5.3. Topraklama Ağlarının Yeryüzeyinde Oluşturduğu Potansiyel Dağılımının Kaçak Akım Yöntemi ile Bulunması.....	77
5.3.1. Akım Dağılımının Bulunması.....	78
5.3.2. Direnç Katsayıları Matrisinin Bulunması.....	82
5.3.2.1. Öz Direncin Bulunması.....	82
5.3.2.2. Karşılıklı Direncin Bulunması.....	83
5.3.2.2.1. Paralel Kollar.....	83
5.3.2.2.2. Aynı Doğrultadaki Kollar.....	84
5.3.2.2.3. Birbirine Dik Doğrultadaki Kollar.....	84
5.3.2.3. Çok Tabakalı Toprak Yapısında Karşılıklı Direnç	85
5.3.3. Toprak Yüzeyi Potansiyelinin Bulunması.....	87
5.3.4. Yöntemin Topraklama Ağlarına Uygulanması.....	88

BÖLÜM 6. TOPRAKLAMA AĞLARININ TOPRAK YÜZEYİNDE

OLUŞTURDUĞU POTANSİYEL DAĞILIMININ YÜK BENZETİM YÖNTEMİ İLE BULUNMASI.....	90
6.1.Genel Bilgi.....	90
6.2.Benzetim Yük Türleri.....	92
6.2.1.Noktasal Yükün Alanı ve Potansiyeli.....	92

6.2.2. Sonsuz Uzun Çizgisel Yükün Alanı ve Potansiyeli.....	95
6.2.3. Sonlu Çizgisel Yükün Alanı ve Potansiyeli.....	98
6.3. YBY'nin Topraklama Ağlarına Uygulanması.....	101
6.4. Topraklama Ağlarının YBY ile İncelenmesine İlişkin Uygulamalar ..	103
6.4.1. 1x1 Gözlü Dikdörtgen Ağ.....	104
6.4.2. 1x1 Gözlü Kare Ağ.....	106
6.4.3. 2x2 Gözlü Kare Ağ.....	109
6.4.4. 3x3 Gözlü Kare Ağ.....	111
6.4.5. Gömülme Derinliğinin Topraklama Direnci ve Adım Gerilimi Üzerindeki Etkisi.....	111
BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	114
KAYNAKLAR.....	118
ÖZGEÇMİŞ	121

NOTASYON LİSTESİ

ρ_t	= Toprak özgül direnci	: (ohm.m) ⁻¹
R_y	= Topraklayıcı yayılma direnci	: ohm
R_t	= Topraklama direnci	: ohm
R_{ge}	= Elden geçiş direnci	: ohm
R_{ga}	= Ayaktan geçiş direnci	: ohm
U_a	= Adım gerilimi	: V
U_{ts}	= Temas gerilimi	: V
Q	= Topraklama levhasındaki toplam yük	: coulomb
q_s	= Yüzeysel yük yoğunluğu	: coulomb/m ²
C_{mm}	= Yüzeysel yük yoğunluğu katsayısı	
a	= Topraklama levhasının uzunluğu	: m
b	= Topraklama levhasının genişliği	: m
E_z	= Elektrik alan şiddeti	: V/m
J	= Akım yoğunluğu	: A/m ²
σ	= İletkenlik	: Siemens/m
ϵ	= Dielektrik sabiti	
d	= İletken ile potansiyeli bulunacak olan nokta arasındaki dik uzaklık	: m
d_i	= İletken ile görüntü yükü arasındaki uzaklık	: m
h	= Topraklayıcının gömülme derinliği	: m
P_{mm}	= Genişleme fonksiyonu	
W_{xm}	= Yayılan dalganın uzunluğu	
W_{yn}	= Yayılan dalganın genişliği	
K	= Kenar çekirdek integrali	
k	= Ölçek katsayısı	
M	= x - yönündeki genişleme sayısı.	
N	= y-yönündeki genişleme sayısı	
N_c	= Bilinmeyen katsayıların sayısı	
S	= Eğrilik yarıçapı	: m
r_o	= Köşe yuvarlaklık yarıçapı	: m
r	= Radyal uzaklık; iletken yarıçapı	: m
I	= Arıza akımı	: A
L	= Öz indüktans	: μH
V	= Elektrostatik potansiyel	: V

ÖZET

Yüksek gerilim tesisleri ve istasyonların da, yıldırım boşalmaları açma ve kapama olayları gibi durumlar sonucunda meydana gelebilen yüksek gerilim darbeleri çok yüksek potansiyel artışlarına sebep olmakta bu da canlılar ve aygıtlar için tehlikeli durumlar yaratmaktadır.

Yüksek gerilim sistemlerinde insanları tehlikeli gerilimlere karşı korumak için topraklama başlıca çare olarak ortaya çıkmaktadır. Topraklamanın yapılmasındaki amaç, istenmeyen nedenlerden dolayı meydana gelebilecek temas ve adım gerilimlerinin izin verilen sınır değerlerden küçük kalmasını sağlamak ve bu gibi tehlikeli gerilimleri ortadan kaldırmaktır.

Topraklama amacıyla kullanılan birçok topraklayıcı çeşidi vardır. Bunlar arasında yaygın kullanıma sahip olan topraklama ağlarının, diğer topraklayıcılara göre daha karmaşık bir yapı içermesi, analizlerde birçok analitik ve sayısal yöntemlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmada bu analitik ve sayısal yöntemlerden, bu çalışmada Bölüm 3'te topraklama levhalarının analizinde Moment Yöntemi, Bölüm 4'te topraklama ağlarının indüktanslarının bulunmasında Reaktif kVA yöntemi ve darbe empedansının bulunmasında amprik yöntemler, Bölüm 5'te topraklama ağlarında topraklama direncinin, akım dağılımının bulunmasında ve toprak yüzeyinde meydana gelen potansiyel değerinin hesabında; Eşdeğer Dairesel Levha Yaklaşım Yöntemi, Elektrostatik Potansiyel Yöntemi, Kaçak Akım Yöntemi ve en son olarak Bölüm 6'da Yük Benzetim Yöntemi (YBY) geniş bir şekilde ele alınmış ve YBY'nin kullandığı bilgisayar programları yardımıyla, yeryüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımlarının üç boyutlu grafikleri elde edilmiştir.

Böylece diğer yöntemlere göre, uygulama kolaylığı ve basitliği ile öne çıkan yük benzetim yöntemi ile topraklama ağlarının analizi gösterilmiş ve uygulanmıştır.

SUMMARY

COMPUTER AIDED ANALYSIS OF GROUNDING GRID FOR POWER SYSTEMS

Power plants and substations are extremely vulnerable to hazards of lightning strikes, of electrical and mechanical equipment malfunctioning and of human errors in which a surge current of the order of kiloamperes is impressed on the plant or is generated from within.

Although these surge currents seldom last longer than a few milliseconds, they are long enough to cause severe, irreversible damages to equipment and occasionally fatal injuries to human beings. Personnel and equipment inside are usually protected by dispersing the surge current to the earth through an earthing system to prevent charge accumulation, such that secondary faults can be aborted.

In practice, electrical appliances are earthed so that the surge current can be diverted to earth. To prevent secondary faults, an earthing system is used where all earth wires are connected to one or several electrodes driven into the earth, through which the surge current is dissipated. To increase the surface area for current discharges, the earthing electrode is usually connected to a conducting plate or wire grid buried in earth. On the one hand, earthing grids are used extensively in manufacturing plants and power stations.

However, studies on earthing plates are seldom found in recent literature. An earthing plate is usually made of steel, aluminum, or other inexpensive conductors. It is buried beneath and parallel to the surface of the earth. Although the shape of an earthing plate could be tailor-made to conform with a given physical environment, circular and rectangular plates are the most prevalent.

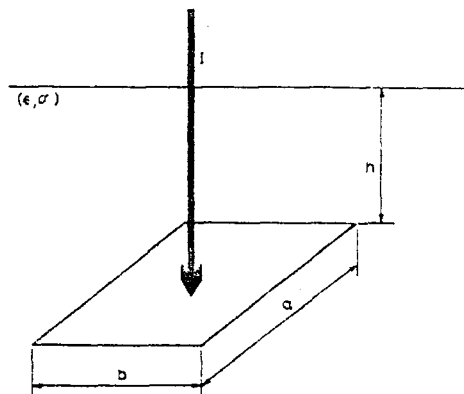


Fig. 1. A square earthing plate in a homogeneous earth

Dependent on applications, the area of the plate ranges from a fraction to tens of square meters. During the emergence of a surge current, current injected into an earthing electrode is free to flow into the earthing plate because both are good conductors. Since the conductivity of an earthing plate is much higher than that of surrounding earth, charges are accumulated on the plate. As electric charges are amassing, the potential of electrode is also increasing. Consequently, the current flow is checked. Eventually the current input into its plate is equal to the current dissipated into its surrounding earth. Until all charges have been dispensed, the fault current injected into the electrode is constant. Depending on the design of an earthing plate and the amplitude of a surge current, an equilibrium state is usually obtained in microseconds. The transient effects are as usual ignored because they are negligible compared with those in the quasi-steady state. Electrostatic analysis sufficient for the study of earthing plates.

Dependent on the earthing resistance R_i of the earthing system, the injection of a current I_i into the earth would inevitably induce an input potential $V_i=R_i I_i$ at the point of disturbance. If the earthing system is composed of a simple conducting rod driven into the earth, the potential on the earth surface would be inversely proportional to the distance from the point of current injection. It then follows that the potential difference between the two feet of an operator in the vicinity of the earthing electrode during fault could be so large that an electric current of the order of amperes would be induced to flow through the body, and which might result in irreversible damage and sometimes fatal damage to the person of correct. Furthermore, consider an operator carrying a metallic ladder or other conducting rod walking inside a substation during fault and accidentally one of the ends of the ladder hits a conducting post the potential difference between the end and the foot of the operator could then be much larger than that between the two feet.

The design of grounding systems of substations and electrical systems has the primary purpose of ensuring the safety and well being of personal who may become electrically coupled to the grounding mats during unbalanced fault conditions. In general an unbalanced fault will cause a ground potential rise of the system neutral and any conductive medium electrically connected to the neutral. A person touching grounded structures during this condition may experience an electric shock.

The possibility of hazard is usually assessed by computing the maximum touch and step voltage or the maximum body current. The analysis of grounding systems for the purpose of computing touch, step, transfer voltages and body currents due to accidental contact is a complex problem, making the simulation of all potentially hazardous situations very difficult. Since the grounding system is part of the electric power system, complete analysis requires inclusion of all power system elements, resulting in computational problems due to the size of the system.

The problem is usually decomposed into two manageable subproblems;

1. Computation of the maximum expected ground potential rise of the grounding system, or alternatively, the maximum earth current,

2. Computation of the touch and step voltages around the grounding system given the earth current, or alternatively, computation of body currents for a person in accidental contact with the ground.

Step and touch voltages are defined as potential differences between two points on the earth surface, or between a point on the earth surface and grounding mat conductors, respectively.

For these reason, a practical earthing system must be designed so that the touch potential should always be contained below a predetermined value that it would cause no severe damage to human beings.

There are many of methods which are concerned with this problem.

In this thesis, moments method for grounding plates [2-3], reactive kVA method and experimental methods, to find inductance and impulse impedance for grounding grids [5-7], equivalent circular plates method [4], electrostatic potential method [8,9], leakage current method [10] and charge simulation method [11-12], for computing grounding resistance, current distribution and finding the potential distribution at the grounding grids were studied.

Charge Simulation Method is the well-known method. This method was initially proposed by H. Steinbigler, which is sometimes called as the average potential method or matrix method in the grounding mesh analysis, would be an effective method.

The principal of this method is such that;

Consider an isolated conducting cylinder of radius a and of length b in a homogeneous medium. This method assumes finite line simulation currents, I_1, I_2, \dots, I_n , flowing in certain parts of the conducting wires. Given the potentials $V_1 = V_2 = \dots = V_n$ (surge impedance of the wires are neglected. Traveling waves on the wires are considered as adequate fast.) on the surface of each wire, and say 100 % or V (volt), one can construct an equation in the matrix form.

$$[R] \cdot [I] = [V] \tag{1}$$

where

$[R]$ is a resistance coefficient matrix

$[R]$; $n \times n$, $[I]$; $n \times 1$ and $[V]$; $n \times 1$, with n being the number of unknown currents.

The element R_{ij} of the matrix $[R]$ means that a unit current, A , flowing in the j -th wire provides the potential R_{ij} , V , at a point on the i -th wire.

An unknown current matrix, I , can be obtained by solving the simultaneous equation given by equation (1).

In equation (1), the construction of (R) depends on the geometric position between the wires of earthing grid or the finite line currents. For this reason, in solving the equation (1),

1. Coordinates of the finite line currents
2. Potential of grounding grid must be given.

If the entire space is filled with a material of conductivity σ , finite line current source, I, located between $X_1; (x_1, y_1, z_1)$ and $X_2; (x_2, y_2, z_2)$

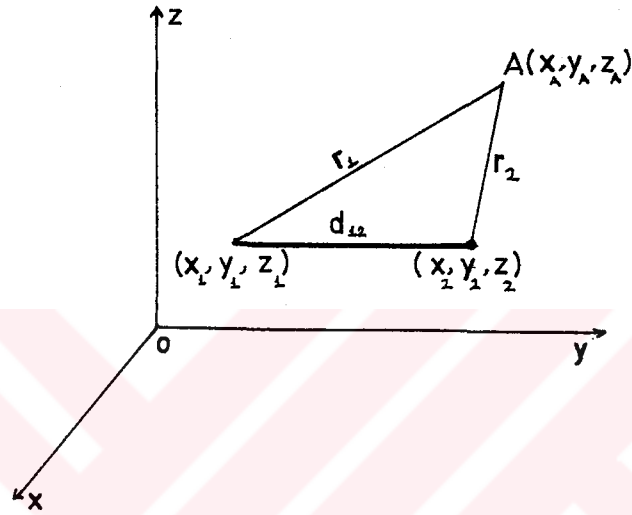


Fig 2. A finite line current source

In equation (1), R coefficient is

$$R = \frac{I}{4\pi\sigma d_{12}} \ln \left(\frac{r_1 + r_2 + d_{12}}{r_1 + r_2 - d_{12}} \right) \quad (2)$$

where

$$\begin{aligned} r_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \\ r_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2} \\ d_{12} &= \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \end{aligned} \quad (3)$$

σ = medium conductivity = $1/\rho$ (ohm.m)⁻¹

ρ = medium resistance (ohm.m)

Note that, in this computation, image currents must be taken into consideration

Once a current matrix (I) is obtained, the potential V_p at any point can be computed by

$$V_p = (R) (I) \quad (4)$$

The resistance coefficients, $(R) = (R_1, R_2, \dots, R_n)$; $1 \times n$, are newly defined by geometric configuration between the wires and the point where the potential, V_p , is to be calculated. The resistance of a grounding system is computed by;

$$R = \frac{V}{\sum_i I_i} \quad (5)$$

where;

V is the voltage of the grounding system

I_i ; $i = 1, 2, \dots, n$, is the current distribution computed from equation (1).

Three dimensional potential distributions on the earth surface can be plotted using charge simulation method by the computer program. The following graphic was plotted for the grounding grid with 2x2 mesh by the computer program. Step and Touch potential can easily be obtained by this method.

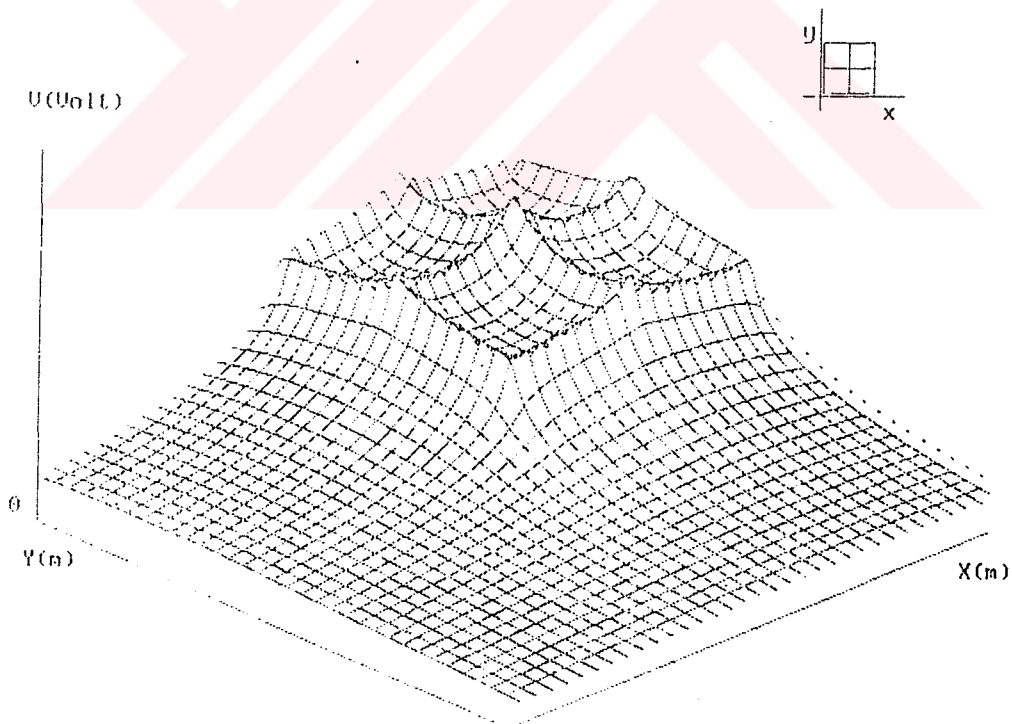


Fig. 3. Potential Profile of 2x2 Mesh

In the design of grounding system, an impulse impedance is the most important topic; because the behavior of grounding systems under lightning discharge conditions governs the degree of protection. When an impulse current is fed to a

grounding system, its impulse impedance is defined as the ratio of the peak value of the voltage developed at the feeding point to the peak value of current. The ratio of impulse impedance to the power frequency grounding resistance is referred to as impulse coefficient.

The impulse impedance of grounding grids depends on the size and shape of the grid, the spacing between electrodes, point of injection of the current, magnitude and wave shape of current and characteristic of the soil. The impulse impedance of the grid is governed by the inductance of the grid and can be computed for square or rectangular grids by empirical formulas.

The maximum voltage at the lightning arrester in substation depends on the arrester characteristics, lead inductance and station grounding resistance. To ensure proper protection the impulse impedance should be used to determine the arrester voltage. In the grounding grid the power frequency grounding resistance, step voltage and mesh voltage are within the safe limits. However impulse impedance is higher than the power frequency grounding resistance and it may not give satisfactory protection against direct lightning strokes.

In case it is found that the system does not give satisfactory lightning protection. It may be necessary to shift the position of the feeding point to as close to the center of the grid as possible.

BÖLÜM 1.

GİRİŞ

Yüksek gerilim tesis ve istasyonları, yıldırım boşalmaları, açma-kapama olayları, elektrostatik boşalmalar, nükleer elektromanyetik darbe durumlarında, μs 'ler içerisinde meydana gelebilen kA'lar mertebesindeki akımların sebep olduğu çok yüksek potansiyel artışlarından etkilenilmekte ve bu gibi yerlerde bulunabilecek olan canlılar hayati tehlikelere maruz kalabilmekte ve kurulu bulunan makina ve donanımlarda onarılamayacak zararlar meydana gelebilmektedir.

Alçak gerilim tesislerinde insan hayatını tehlikeli gerilimlere karşı korumak için topraklamadan başka belki daha da etkili yöntemler olduğu halde, yüksek gerilim tesislerinde tek çare topraklamadır. Topraklamaların ve topraklama tesislerinin birinci gayesi, yukarıda sayılan nedenlerden dolayı meydana gelebilecek temas ve adım gerilimlerinin izin verilen sınır değerlerden küçük olmasını sağlamak veya bu gibi tehlikeli gerilimleri ortadan kaldırmaktır. Böylece bir taraftan insan hayatının güvenliği sağlandığı gibi, diğer taraftan da güvenli işletme koşulları yerine getirilmiş olur.

Günümüzde, topraklama sistemlerinde topraklayıcı olarak; çubuk, levha, şerit topraklayıcılar ile şerit topraklayıcıların bir çeşiti olan topraklama ağıları uygun olarak kullanılmaktadır.

Uygun topraklayıcı tipinin seçilmesinde, topraklayıcıda aranan en önemli özellik; topraklayıcının bulunduğu ortamın yani toprak yapısının özgül direncinin belirlenmesinin ya da istenilen değere göre ayarlanmasının gerçekte mümkün olmaması nedeniyle, seçilen topraklayıcının, darbe akımının en kısa yoldan toprağa verilerek

dağılmasını kolaylaştıracak, küçük değerde geçiş direncine ya da diğer adıyla yayılma direncine sahip olmasının sağlanmasıdır. Toprak geçiş direnci ne kadar küçük olursa darbe akımının toprağa geçişi ve dolayısı ile en kısa yoldan dağılması sağlanacağından, $V = R \cdot I$ temel bağıntısına göre, topraklayıcı üzerinde daha küçük değerde potansiyel yükselmesi meydana gelecek ve toprak yüzeyinde oluşturacağı temas ve adım gerilimleri de, o derecede küçük bir değer alacaktır.

Bu tez çalışmasında, yaygın kullanıma sahip topraklayıcı tiplerinden olan topraklama ağları ele alınmıştır. Topraklama ağlarının, diğer topraklayıcı tipleri ile karşılaştırıldığında, daha karmaşık yapıya sahip olmaları analizlerde, analitik ve sayısal yöntemlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Topraklama ağlarının analizi ile ilgili olarak, 1950'li yıllara kadar uzanan bilimsel çalışmalarda yayınlanan ve ilerideki bölümlerde ayrıntılı bir biçimde birkaç ele alınacak olan çok sayıda sayısal yöntem bulunmaktadır. Bunların arasında, R. Caldecott'un iki tabakalı toprak için "Elektrolitik Banyo Yöntemi", J.G. Swerak'ın bölüm 5.2'de sözü edilen yöntemi, J.C. Maxwell ve E. Durand tarafından üç tabakalı toprak için yapılan çalışmalar, iki tabakalı toprak için "Maxwell Seri Etki Yöntemi" ile bu tez çalışmasının ana konusunu oluşturan ve temelleri H. Steinbigler tarafından atılan, ortalama potansiyel ya da matris yöntemi olarak da adlandırılan "Yük Benzetim Yöntemi" sayılabilir.

YBY'nin birçok yüksek gerilim alan problemlerinde başarı ile kullanılabileceği gösterilmiştir. Yöntem diğer sayısal yöntemler ile karşılaştırıldığında oldukça basit ve birden fazla homojen yalıtkan ortam içeren herhangi bir sisteme de kolaylıkla uygulanabilmektedir. Bu yöntemin özel bir üstünlüğü, aksenal simetrisi olmayan üç boyutlu problemlere ve uzay yükü bulunan problemlere daha kolaylıkla uygulanabilir olmasıdır.

Bu çalışmada, ilk bölümlerde, topraklama ile ilgili temel kavramlar verilerek, bugüne kadar yaygın kullanıma sahip topraklama sistemleri tanıtılacak ve bunların arasında, teorik çalışmalara temel olması bakımından önemli bir yeri olan topraklama levhaları incelenecek, ardından son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılan ve bu

çalışmanın ağırlıklı konusunu oluşturan topraklama ağları geniş bir şekilde ele alınarak, topraklama ağlarının, yıldırım darbelerine karşı koruma derecesinin belirlenmesinde ve yapılacak tasarımın başarılı olmasında taşıdığı önem açısından, topraklama ağlarında indüktans, akım dağılımı ve darbe empedansı gibi faktörlerin bilinmesini sağlayan yöntemler tanıtılarak elde edilen değerler tablolar ve grafikler halinde verilecektir. Topraklama ağlarının analizi için geliştirilen yöntemlerden; Eşdeğer Dairesel Yaklaşım Yönteminden, J.G. Sverak'ın Elektrostatik Potansiyel Hesap Yönteminden, Kaçak Akım Yöntemin' den bahsedilerek ve son olarak sözkonusu yöntemler için de topraklama ağları dışında birçok sistemler için uygulaması bulunan Yük Benzetim Yöntemi tanıtılacak ardından bu yöntemin topraklama ağlarına uygulama esasları ile geliştirilen bilgisayar programı hakkında bilgiler verilecek ve en son olarak, bilgisayar yardımı ile çeşitli boyut ve şekildeki topraklama ağlarında, akım dağılımı, toprak geçiş direnci bulunacak ve toprak yüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımı üç boyutlu olarak elde edilecektir.



BÖLÜM 2.

TOPRAKLAMA İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

Bu bölümde, topraklama konusunda bu çalışmada yeri geldikçe kullanılacak olan bazı temel kavramların açıklaması yapılacaktır.

a) Toprak:

Dünyanın doğal yapısını oluşturan madde olup, nemle karışık, killi, kumlu, humuslu toprak veya nemle birlikte toprak, kum, çakıl, taş veya bunların karışımıdır. Toprak ayrıca yer veya zemin anlamında da kullanılır.

b) Topraklama:

Topraklanacak olan iletken kısımların bir topraklama tesisi üzerinden toprağa bağlanmasıdır.

c) Topraklayıcı:

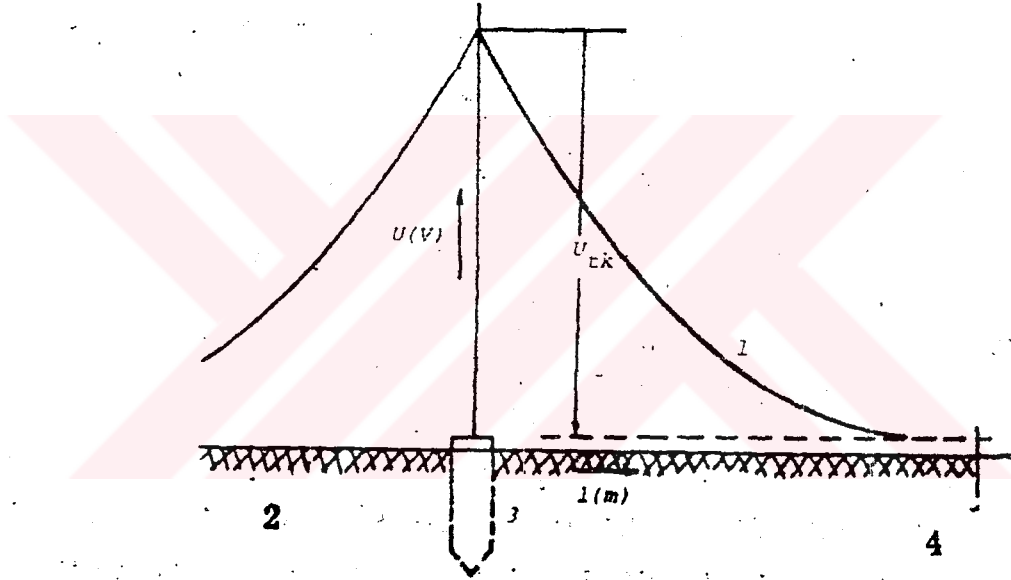
Yer altında toprağa gömülen ve bununla iletken bağlantıda bulunan bir iletkenidir. Topraklayıcı, iletkenin şekline göre çeşitli tiplerde olabilir; şerit, çubuk, levha ve topraklama ağı veya bunların kombinasyonudur.

d) Topraklama İletkeni:

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

e) Potansiyel Dağılımı:

Topraklanmış bir işletme aracında, bir hata sonucu olarak, bir gövde kısa devresi olduğunda, referans toprağından itibaren ölçülmek üzere söz konusu işletme aracına doğru yeryüzeyinde potansiyelin dağılımıdır. Ya da başka bir anlatımla Yüksek gerilim istasyonlarında, bir yıldırım darbesinin isabet etmesi durumunda toprağın h. kadar altına gömülü topraklama ağının referans toprağına göre yeryüzeyinde meydana getirdiğı potansiyel dağılımıdır.



Şekil 2.1. Bir topraklayıcı civarındaki potansiyel dağılımı

$U(V)$; Gerilim ekseni

$l(m)$; Uzaklık ekseni

U_{ek} ; Topraklayıcı gerilimi

1) Potansiyel değişimi

2) Toprak

3) Topraklayıcı

4) Referans toprağı

f) Referans Toprağı:

Bir topraklayıcıdan yeter derecede uzakta bulunan ve topraklayıcı ile herhangi bir nokta arasında hissedilebilir bir gerilim meydana gelmeyen toprağın ve özellikle yeryüzeyinin belirli bir bölgesidir.

g) Özgöl Toprak Direnci: ρ_t

Dünyanın doğal yapısını oluşturan maddenin, yani toprağın özgöl elektriksel direnci olup genellikle ohm. mm² /m veya ohm. m cinsinden verilir. Bu değer, bir kenarının uzunluğu 1 m olan toprak kübün karşılıklı iki yüzeyi arasındaki dirence eşittir.

h) Topraklayıcı Yayılma Direnci: R_y

Bir topraklayıcı veya topraklama tesisi ile referans toprağı arasındaki dirençtir.

i) Darbe Yayılma Direnci:

Akım darbelerinin geçmesi esnasında etkin olan yayılma direncidir. Bu değer, topraklayıcının şekline, toprağın cinsine ve akım darbesinin zamana göre değişimine bağlıdır.

j) Topraklama Direnci:

Topraklayıcının yayılma direnci ile topraklama iletkeninin direncinin toplamına eşittir.

k) Toplam Topraklama Direnci:

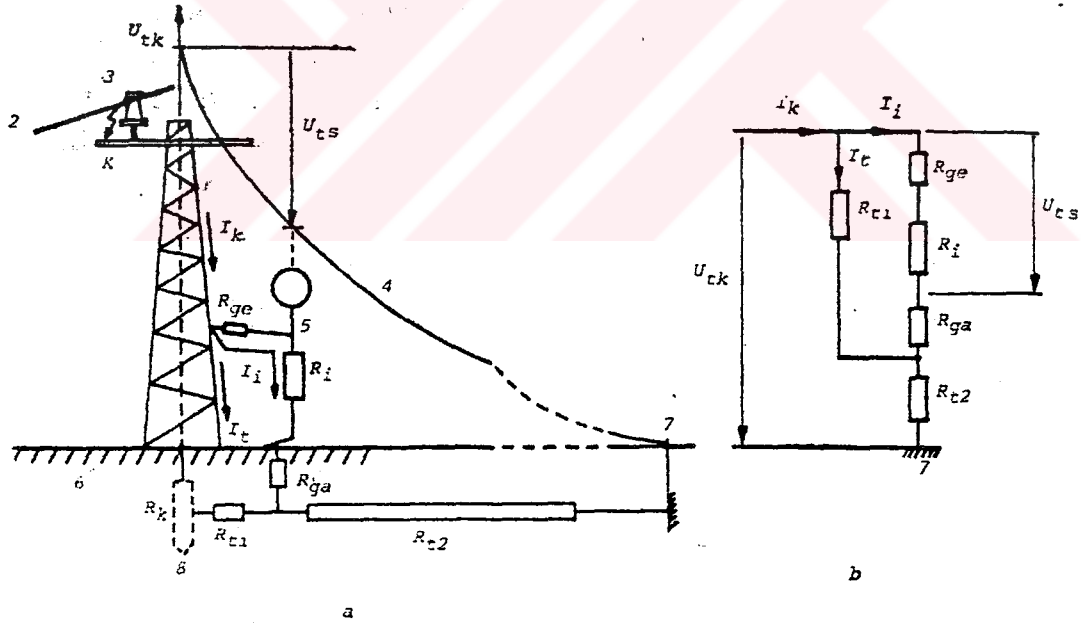
Bir yerde ölçülebilen ve ölçüye giren bütün topraklamaların toplam direncidir.

l) Göz Potansiyeli:

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

m) Temas Gerilimi:

Bir yüksek gerilim hava hattına ait bir direk üzerindeki bir izalatörde 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 tesis kısmı 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_k - Koruma topraklaması
- R_i -İnsan vücudunun direnci,
- R_{ge} -Elden geçiş direnci,
- R_{ga} -Ayaktan geçiş direnci,
- R_t -Toprak direnci,
- U_k - Topraklayıcı gerilimi,
- U_{ts} - İnsan teması esnasındaki temas gerilimi,
- I_k -Bir fazlı toprak kısa devresi 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 el ile ayak arasında ve ikincisinde ise iki el arasındadır. Çoğu zaman insanın durduğu yer, potansiyel değişiminin en büyük olduğu yere isabet ettiğinden temas gerilimi, topraklayıcı geriliminin büyük bir kısmını oluşturur. İnsan vücudunun direnci ile el ve ayaktaki geçiş dirençleri göz önüne alındığında meydana gelen temas gerilimi, topraklayıcı ile insanın durduğu yerdeki potansiyel farkından daha büyük olur. Bu bakımdan iki cins temas geriliminden söz etmek mümkündür; Birincisi insan vücudunun temas etmesinden önce ölçülebilen temas gerilimi, U_{te} ve ikincisi insan tarafından temas sırasında meydana gelen temas gerilimi, U_{ts} 'dir. Birincisi, elektrot ile insanın durduğu yer arasında, iç direnci çok büyük olan bir elektronik voltmetre yardımı ile ölçülür.

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

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

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

dir. Temastan önceki temas gerilimi, bu durumda

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

dir. 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; insan vücudundan geçen akım I_i ise, buna göre direk üzerinden geçen akım

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

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

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

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

veya

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

yazılabilir. Bu eşitlikten yararlanarak insan vücudundan geçen akım için,

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

yazılabilir.

Buradan da, insan vücudunun teması esnasındaki temas gerilimi,

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

olduğundan

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

veya

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

elde edilir.

Özel Durumlar

1) $R_i = 0$ ise bu durum, direğe dokunan insanın iletken bir elbise örneğinin madeni bir zırh giyinmiş olmasına karşı düşer. Bu durumda $U_{ts} = 0$ olur ve bir tehlike söz konusu olmaz.

2) $R_i = \infty$ ise buna göre insan vücudunun direnci sonsuzdur. Denklem (2.9)'a göre temas gerilimi olarak $U_{ts} = I_k R_{t1} = U_{te}$ elde edilir. Fakat bu durumda insan üzerinden akım geçmeyeceği için bir kaza olmaz.

3) $R_{ga} = 0$ ise sözkonusu insanın bastığı yer ıslaktır veya ayakkabılarının tabanı madenidir. Ayrıca $R_i \gg R_{t1}$ olduğundan R_i yanında R_{t1} ihmal edilerek temas gerilimi $U_{ts} = I_k \cdot R_{t1} = U_{ts}$ değerini alır. Zeminin ıslak olması, temas geriliminin büyük ve tehlikenin daha fazla olmasına yol açar.

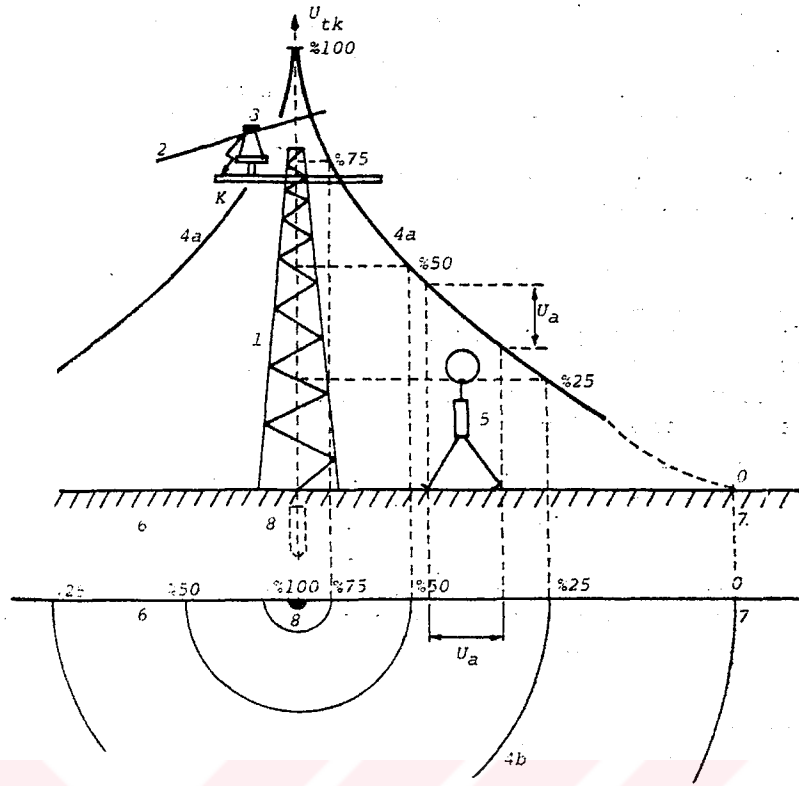
4) $R_{ga} = \infty$ ise bu durum, insanın ayak bastığı yerin yalıtılmış olmasına karşı düşer. Buna göre $U_{ts} = 0$ olur. Ayak basılan yerin uygun bir şekilde yalıtılması ile temas gerilimine karşı bir koruma olanağı sağlanmış olur.

5) $R_{ga} = 0$ ve $R_{t1} = 0$ ise, yani ayak basılan yer iletken olup topraklayıcı ile ve topraklanacak kısım ile bağlanmıştır. Bu koşullar altında R_i insanı vücudunun direnci kısa devre edilmiş olduğundan $R_i = 0$ 'dir. $U_{ts} = 0$ olduğundan bu durum ideal topraklamaya karşı düşer.

n) Adım Gerilimi

Adım gerilimi alçak gerilim tesislerinde önemli olmadığı halde yüksek gerilim tesislerinde insan ve hayvan hayatı bakımından önemli bir tehlike kaynağı olabilir. Örneğin bir açık hava tesisinde bir izolasyon hatası yüzünden toprağa bir hata akımı geçerse ve topraklayıcı ile referans toprağı arasında meydana gelen potansiyel alanına bir insan (veya bir hayvan) girerse bir adım gerilimine maruz kalır ve vücudundan bir akım geçer.

Şekil 2.3'de bir toprak kısa devresi durumunda oluşan potansiyel dağılımı ve toprak üzerinde buna karşı düşen eşpotansiyel çizgiler ile bu alan içinde bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi gösterilmiştir. Bu durumda adım gerilimi, üzerinden akım geçen topraklayıcıya ait potansiyel alanı içinde herbir ayağa karşı düşen potansiyellerin farkına eşittir. İnsanın ve hayvanın eşpotansiyel çizgilere dik olarak yürümesi durumunda iki ayağı arasındaki potansiyel farkı yani adım gerilimi en büyüktür. Eşpotansiyel çizgilere paralel olarak hareket eden insanın ayakları arasındaki adım gerilimi sıfırdır. Başka yönlerdeki adım gerilimleri maksimum değer ile sıfır arasında değişir. Ayrıca adım geriliminin değeri, adım uzunluğuna bağlıdır.



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

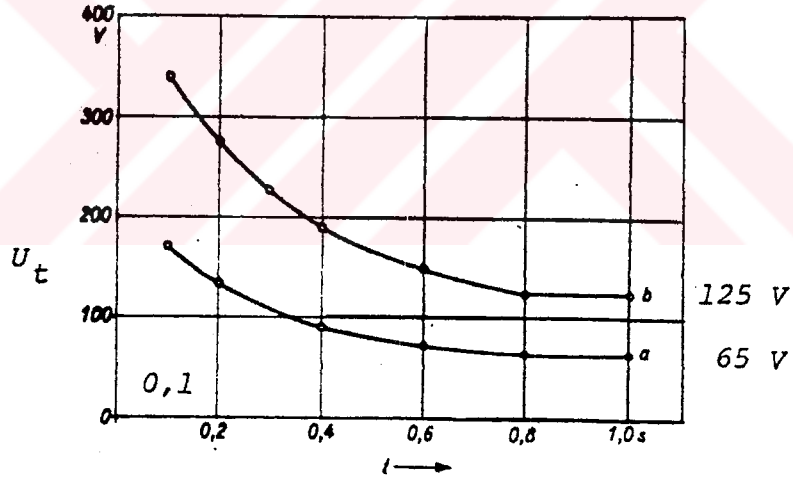
- 1-Madeni direk,
- 2-Hava hattı,
- 3-İzolatör,
- 4a-Potansiyel dağılımı,
- 4b-Eşpotansiyel çizgiler,
- 5-Potansiyel alanındaki insan,
- 6-Toprak,
- 7-Referans toprağı,
- 8-Topraklayıcı,
- U_{tk} -Topraklayıcı gerilimi,
- U_a -Adım gerilimi.

Topraklayıcının yakınında potansiyel değişimi en büyük değerini aldığından, topraklayıcıya yakın olan yerlerde adım gerilimi daha büyük değer alır ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım geriliminin değeri hızla düşer. Onun için genellikle adım gerilimi, temas gerilimine göre daha küçük değer alır. Adım gerilimi yüzünden

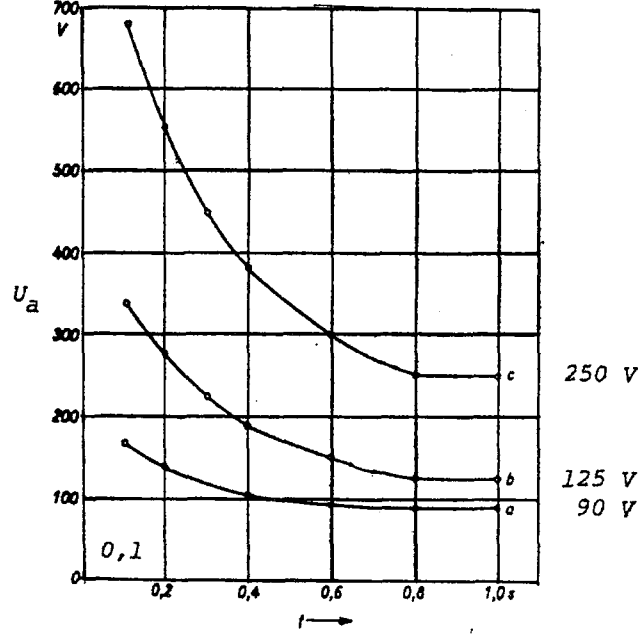
bir tehlike, yalnız topraklayıcı veya topraklama tesisi üzerinden bir hata akımı geçtiğinde baş göstermez, aynı zamanda topraklayıcının direnci büyük akımlarla ölçüldüğü zamanda meydana gelir. Onun için bu gibi durumlarda önlem alınması gerekir. Bir insanın adım uzunluğunun yaklaşık 1 metre olduğu ve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

Bununla beraber olanakların izin verdiği derecede topraklayıcılar , yüksek gerilim alanının ne içinde ve nede dışında temas ve adım gerilimleri ile bir tehlike meydana gelmeyecek şekilde yapılmalı ve yerleştirilmelidir.

Şekil 2.4. ve Şekil 2.5.'de izin verilen temas ve adım gerilimlerinin sınır değerleri gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Yıldız noktası doğrudan doğruya veya akım sınırlayıcı bir direnç üzerinden topraklanan şebekelerde izin verilen temas gerilimi.
a-Tesisin dışında,
b-Tesisin içinde.



*Şekil 2.5. Yıldız noktası doğrudan doğruya veya akım sınırlayıcı bir direnç üzerinden topraklanan şebekelerde izin verilen adım gerilimi.
a-Tesisin dışında, trafiği çok olan yollarda,
b-Tesisin içinde veya dışında (a hali hariç)
c-Açık hava tesislerinde yalıtkan ayakkabılar ile.*

o) Göz Gerilimi:

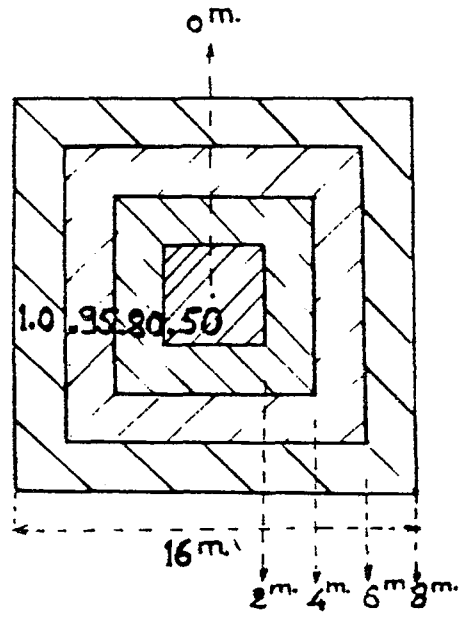
Topraklama ağlarında, referans toprağa göre, topraklama ağı potansiyelinin yükselmesine göre, ağın gözlerinin ortasında volt olarak ifade edilen yeryüzeyindeki potansiyel değeridir.

p) Akım Yoğunluğu: J

Bir iletkenin, birim alanında geçen akım miktarına (A/m^2) denir. Teorik çalışmalarda akım yoğunluğu için üç farklı kabul yapılmaktadır [1].

Bunlar;

- 1) Ağ iletkenlerindeki akım yoğunluğu homojen ve sabittir.
- 2) Ağ iletkenlerindeki akım yoğunluğu homojen değildir. Homojen olmayan, akım yoğunluğu faktörü J , Şekil 2.6' da gösterilen şekle göre seçilir.



Şekil 2.6. Ağ iletkenlerinde akım yoğunluğu faktörünün değişimi

3) Ağ iletkenlerindeki akım yoğunluğu homojen değildir. δ faktörü ağın ortasından sıfır olmak üzere, kenara doğru maksimum değer olacak şekilde doğrusal değişir.

Matematiksel olarak

$$J = a \cdot d_{c_j} \quad (2.10)$$

eşittir. Burada

a = İletkenden dışarı doğru sızan toplam akıma uygun olarak seçilen bir sabit

d_{c_j} = Ağın kapladığı alanın merkezi ile iletken üzerindeki herhangi bir nokta arasındaki uzaklık olarak ifade edilir.

Bu çalışmada, topraklayıcı iletkenlerinde akan akım yoğunluğunun sabit ve homojen olduğu kabul edilecektir.

BÖLÜM 3

TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ

Bu bölümde, günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmakta olan topraklayıcılar ele alınacaktır.

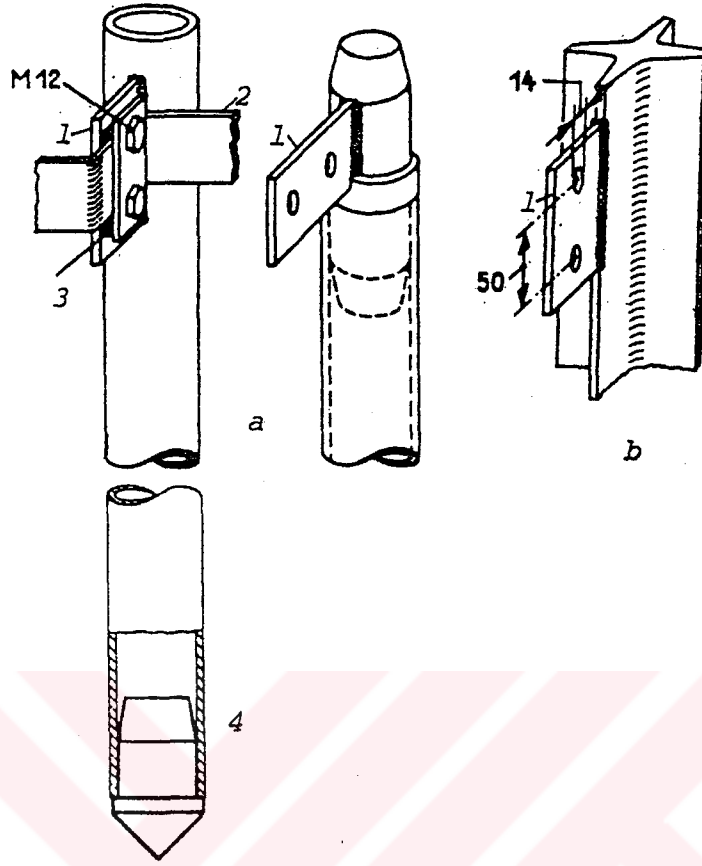
Topraklayıcılar, toprağın durumuna ve topraklayıcı olarak kullanılan malzemenin cinsine, geometrik şekillerine ve toprağa gömülme derinliğine göre birçok çeşitleri vardır. Topraklayıcı tipinin seçilmesinde ve düzenlemesinde yerel koşullar, zeminin yapısı ve izin verilen yayılma direnci gözönüne alınır.

Buna göre yaygın kullanıma sahip topraklayıcılar aşağıda verilmektedir.

3.1. Çubuk Topraklayıcılar

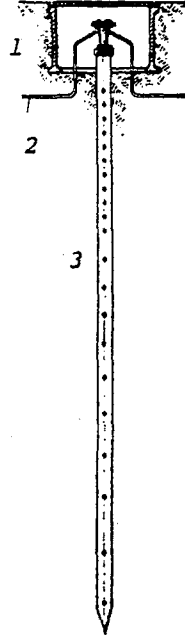
Bunlar genellikle 25 mm, çapında çelik borudan veya buna eşdeğer profil çelikten yapılırlar ve zemine dik olarak çakılırlar. Çubuk topraklayıcının uzunluğu 3-5 m kadardır ve üst ucu 50 cm kadar toprak altında kalır. Çubuk topraklayıcılar oldukça derine indiklerinden, yazın zemin kurursa dahi topraklayıcı daima nemli zeminde bulunur ve çok iyi bir topraklama sağlar. Onun için buna derin topraklayıcı denir.

Bu topraklayıcının çapı, yayılma direnci üzerine çok az etki eder; onun için boru çapı veya profil kesiti mekanik dayanıma ve korozyon (aşınma) olaylarına göre belirlenir. Yayılma direnci, çubuk uzunluğuna, çakılarak zemine yerleştirilmesine bağlı olarak değeri küçük olur.



Şekil 3.1. Çubuk topraklayıcı
 a- Boru topraklayıcı,
 b- Profil topraklayıcı,
 1) Bağlama ucu,
 2) Topraklama iletkeni,
 3) Kurşun tabaka,
 4) Boru topraklayıcının ucu.

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



Şekil 3.2. Emdirmeli topraklayıcı.

1-Topraklayıcı bağlama başlığı kutusu,

2-Topraklama iletkeni,

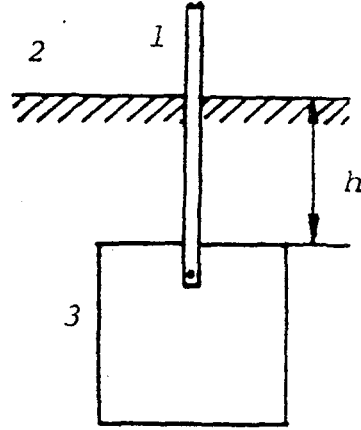
3-Topraklayıcı çubuğu,

3.2. Levha Topraklayıcılar

Levha topraklayıcı, geçmiş yıllarda çok kullanılan ve bugün önemini kaybeden bir topraklayıcı cinsidir. Levha topraklayıcıda belirli bir yayılma direnci elde etmek için başka cins topraklayıcılara göre çok daha fazla bir malzemeye ihtiyaç vardır. Bunun sebebi şöyle açıklanabilir; Topraklayıcı levhanın şeritlere ayrıldığı kabul edilirse, bunlar karşılıklı olarak akımın toprağa geçmesine engel olurlar. Onun 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; zira toprağın çökmesi ile levhanın altı boşlukla kalabilir.

Şekil 3.3'te levha topraklayıcı şematik olarak gösterilmektedir.



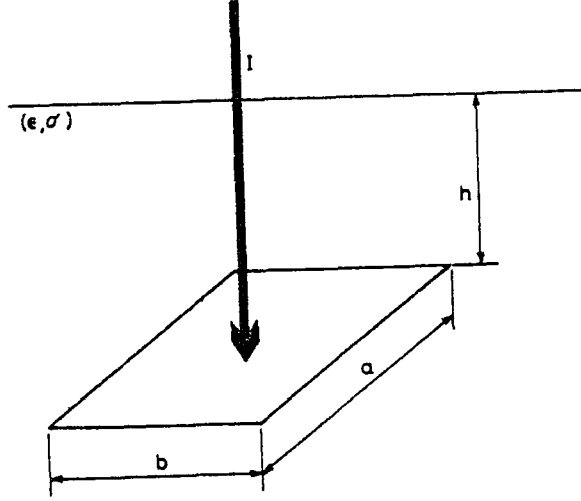
Şekil 3.3. Levha topraklayıcı.
 1- Topraklama iletkeni,
 2- Zemin, toprak,
 3- Levha topraklayıcı.

Uygulamalara bağlı olarak, levhanın alanı büyük seçilebilmektedir. Şekli ise daha çok fiziksel sınırlamalara uyum sağlayabilmesi bakımından kare ve çoğunlukla dikdörtgen biçiminde seçilir. Dikdörtgen topraklama levhalarının, kare topraklama levhaları ile karşılaştırması bakımından, sadece dikdörtgen topraklama levhalarının bilinen sayısal yöntemlerle incelenmesi sonuç verebilir.

3.2.1. Dikdörtgen Topraklama Levhalarının Analizi:

Gerçekte tüm yöntemlerin, dikdörtgen topraklama levhalarının şeklinin analizini yapmak için bir takım kolaylıklar sunmasına karşın simetri eksikliği ve buna ek olarak karmaşıklığı sebebiyle bilgisayarla analizde daha çok bellek kapasitesi ve hesap süresi gerektirmektedir [2].

Söz konusu geometri, boyu a , eni b ve $(a \geq b)$ olmak üzere yalıtılmış dikdörtgen bir levhadır. Levha ihmal edilecek kadar ince ve ihmal edilecek kadar küçük dirence sahip bir iletken yapılmıştır. Levhanın Şekil 3.4'te gösterildiği gibi yer altında ve yeryüzeyine paralel olarak gömülü olduğu gözönüne alınmıştır.



Şekil 3.4. Homojen toprak içinde gömülü bulunan bir dikdörtgen topraklama levhası

Toprak, ϵ dielektrik sabitine, σ iletkenliğine ve yarı sonsuz uzunluğa sahip homojen bir ortamdır. h gömülme derinliği ile levhanın eni aynı mertebededir. Darbe akımları, levhanın merkezine bağlı topraklama elektrodu üzerinden akarak levhaya gelmektedir. Elektrodun iletkenliğinin levhanın iletkenliği ile aynı mertebelerinde olmasına karşın, elektrotun yarıçapı, levhanın eni yanında ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Kolaylık olması bakımından, levha merkezi orijinde olmak üzere, x - y düzlemine yerleştirilir.

Darbe akımı ilk kez ortaya çıktığında, elektrota gelen akım, her ikisinde iyi iletken olması sebebiyle levhanın içine doğru yayılır. Levha iletkenliğinin çevresindeki toprağinkinden oldukça yüksek olmasından dolayı yükler levhada toplanır. Yük toplanması nedeniyle, elektrodun ve levhanın potansiyeli karşılıklı olarak artar. Bu nedenle serbest akım yavaşlar. Potansiyelin artması sonucunda daha çok yük toprağa akar. Sonunda levhaya gelen akım, toprağa dağılan akıma eşit olur ve yarı kararlı durum elde edilir. Topraklama levhasının şekline ve darbe akımının genliğine bağlı olarak μ S'ler içinde denge durumuna ulaşılır. Geçici akımlarının genliğinin çok yüksek olmasına karşın μ s'ler gibi kısa sürede büyük zararlara yol açabilir. Yarı kararlı

etkilerle karşılaştırıldığında bu geçici etkiler ihmal edilebilir ve bu nedenle topraklama levhaları için elektrostatik analiz yeterli olur [2].

Yarı kararlı durumda, levha Q yükü ile yüklenir. Elektronlar arasında karşılıklı itmeler nedeniyle yükler, levha üzerinde dengeli olarak dağılmazlar. Dağılımlar $q_s(x,y)$ yüzeysel yük yoğunluğu ile karakterize edilir. Denge ilkesi, yük yoğunluğu belirlenmesi için gerekli eşitliklerin çıkarılmasını sağlar. Buna göre, serbest uzay ortamı, levhanın fiziksel gövdesinin kaydırılması ile tasvir edilir. Yükler, ilk durumda girişe doğru hareket ederler ve bundan sonra serbest uzayda zorlanmış kaynak gibi kabul edilirler. Levha, ihmal edilecek kadar ince olduğunda, levhanın her iki tarafındaki yükler, yüzeysel yük tabakası şeklinde toplanırlar.

Yük yoğunluğu cinsinden toplam yük;

$$Q = \int_{-b}^b \int_{-a}^a q_s(x,y) dx dy \quad (3.1)$$

dir [2]. Simetri nedeniyle, yönleri zıt olmasına karşılık sonsuz genişliğinin ortasında bulunan yüzeysel yük tabakasının alt ve üst tarafındaki elektrik alan şiddetleri, birbirine eşittir. Gauss yasasının uygulanması ile, yük tabakasına dik olan E_z elektrik alan şiddeti;

$$E_z(x,y) = \pm \frac{q_s(x,y)}{2\epsilon} \quad (3.2)$$

olarak belirlenir.

Elektrik alanının bu etkisi altında, akımlar σ iletkenlikli kayıplı ortamda indüklenerek akarlar. Yük tabakasının alt ve üst tarafındaki J_z akım yoğunlukları,;

$$J_z(x,y) = \pm \frac{\sigma q_s(x,y)}{2\epsilon} \quad (3.3)$$

dir. Sonuç olarak, levhanın alt ve üst yüzeylerinden geçerek toprağa akan akım

$$I = \sigma/\varepsilon \int_{-b}^b \int_{-a}^a q_s(x,y) dx dy \quad (3.4)$$

dir. Sabit koşullar altında yukarıda verilen akım, levhadan geçen arıza akımına eşittir. Levha üzerinde bir (x_1, y_1) noktasındaki dQ yük artışı için levha dışındaki bir (x,y) gözlem noktasındaki dV elektrostatik potansiyeli

$$dV(x,y) = \frac{q_s(x_1,y_1) dx_1, dy_1}{4 \pi \varepsilon d(x,y; x_1, y_1)} \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir. Burada d , (x,y) ve (x_1, y_1) noktaları arasındaki uzaklıktır.

$$d(x,y; x_1, y_1) = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2} \quad (3.6)$$

Yarı sonsuz uzayda yerleşik bulunan topraklama levhasının koşulları yeniden ele alındığında, toprak yüzeyinin üstünde topraktan havaya hiçbir akım akmadığı kabul edildiğinden elektrik alanı toprak yüzeyine teğettir. Bu etkiyi benzetmek için görüntü yükleri yöntemi kullanılabilir. Toprak yüzeyinin altında h derinliğine gömülü bir noktasal yük için, aynı genlik ve kutbiyetle bir yük, toprak yüzeyinden, h kadar üstünde bir noktaya yerleştirilirse,

$$dV(x,y) = \frac{q_s(x_1,y_1) dx_1, dy_1}{4 \pi \varepsilon} \cdot K(x,y; x_1, y_1) \quad (3.7)$$

dir. Yukarıdaki eşitlikte

$$K(x,y; x_1, y_1) = (1/d) + (1/d_i) \quad (3.8)$$

olarak tanımlanır. Burada d_i , levha üzerinde alınan nokta ile görüntü yükü arasındaki uzaklıktır.

$$d_i(x, y; y_1, x_1) = \sqrt{[(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (2h)^2]} \quad (3.9)$$

Bu nedenle levha üzerindeki bir noktada tüm yüklerin ve görüntülerinin sebep olduğu V potansiyeli;

$$V(x, y) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{-b}^b \int_{-a}^a q_s(x_1, y_1) K(x, y; x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (3.10)$$

olarak verilir.

Sonuç olarak, yük tabakasının yüzeyine teğet olan elektrik alanın sıfır alınması ile levhanın mükemmel bir iletken olması sağlanır [2].

Bu durum (3.10) eşitliğindeki tabaka yüzeyinde V potansiyelinin sabit olması uygulamasına eşdeğerdır. Sözü edilen sabit, topraklama direnci R_t ile I darbe akımının çarpımı alınarak

$$V(x, y) = R_t I \quad -a \leq x < , -b \leq y \leq b \quad (3.11)$$

olarak verilebilir.

(3.11) eşitliği, birinci dereceden Fredholm integral eşitliği olarak bilinir ve bu eşitlikteki, q_s bilinmeyeninin iki katlı integralinin alınması gerekmektedir. (3.11) eşitliğinin çözümü için birçok sayısal yöntemler bulunmaktadır. Bu sayısal yöntemler arasında, en çok bilinenlerden biri olan "Moment Yöntemi", bu eşitliği çözmek için kullanılabilir [3].

İlk olarak q_s , iki boyutlu P_{mn} serisine açılır.

$$q_s(x,y) = \sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N C_{mn} P_m(x,y) \quad (3.12)$$

C_{mn} ; hesaplanacak olan bilinmeyen açınım katsayısıdır. Kolaylık açısından alt bölge türü açınım fonksiyonu kullanılır. Simetri nedeniyle q_s hem x 'in hem de y 'nin bir fonksiyonudur.

$$P_{-m,n}(x,y) = P_{mn}(x,y) \quad m=1,2,\dots,M \quad (3.13a)$$

$$P_{m,-n}(x,y) = P_{mn}(x,y) \quad n=1,2,\dots,N \quad (3.13b)$$

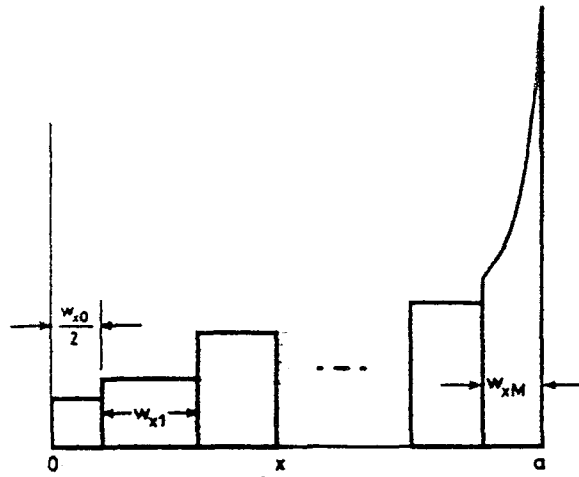
(3.12) eşitliğindeki bilinmeyenlerin sayısı

$$C_{-m,n} = C_{mn} \quad m=1,2,\dots,M \quad (3.14a)$$

$$C_{m,-n} = C_{mn} \quad n=1,2,\dots,N \quad (3.14b)$$

yardımla azaltılabilir.

Yukarıda verilen koşullara ek olarak, açınım katsayıları tamamen birbirinden bağımsız değildir. Bu katsayılar (3.4) eşitliğinde verilen q_s 'teki koşulları sağlamalıdır. Bunun yanında, koşulların kolay olarak sağlanması için pozitif işaretli tüm açınım katsayıları bilinmeyen olarak alınır ve ek bilinmeyen olarak R_i bulunur.



Şekil 3.5. Yüzeysel yük yoğunluğu için genişleme fonksiyonları

Açınım fonksiyonlarının seçimi, Şekil 3.5 gibi çok karmaşıktır. Tam olarak söylenirse, (3.13ab) eşitliklerinde belirlenen koşullar bir sınırlama değildir. Bu ise bulunacak katsayıların azalması gibi tercih edilen bir koşuldur. Eğer açınım beklenen yük dağılımını yansıtıyorsa, sayısal sürecin yaklaşım hızı tam olarak bulunur.

Hata akımı, ilk olarak topraklama levhasına geçtiğinde, elektronlar her yere gelişi güzel olarak yayılırlar. Karşılıklı itmeler elektronların oldukça dağınık yerleşmesine neden olur. Sonuç olarak elektronlar daha çok levhanın kenarına yakın yerlere ya da köşelere sıkıştırılmış gibi bulunacaklardır. Sonuçta bu bölgelerde elektronların toplanması oldukça yüksek olur ve yoğunluk sonsuza yaklaşır. Kenara yakın yük dağılımı, kenar koşulları olarak adlandırılacak karakterize edilir. Levha sonsuz incelikte olduğunda, kenara yakın yüzeysel yükün aşağıda verilen şekilde olduğu kabul edilir.

$$\lim_{x \rightarrow a} q_s(x, y) = \frac{f(y)}{\sqrt{a-x}} \quad (3.15 a)$$

$$\lim_{y \rightarrow b} q_s(x, y) = \frac{f(x)}{\sqrt{b-y}} \quad (3.15b)$$

Alt bölge açınım işlevlerinin kullanılması nedeni ile kenar koşulları yalnızca kenar darbeleri ile ilgili olanları etkiler. Yüklerin orta bölge içinde yayıldığı varsayılır. Böylece sabit genlikli dikdörtgen dalga, orta bölgedeki yük değişimini temsil etmesi açısından yeterlidir.

$$P_{mn}(x, y) = \begin{cases} 1, & x_m < x < x_{m+1}, y_n < y < y_{n+1} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$m=0, 1, \dots, M-1 \quad (3.16)$$

$$n=0, 1, \dots, N-1$$

x_m ve y_n , levha üzerinde önceden belirlenen noktalardır. Şeklin simetrisi sebebiyle P_{00} , levhanın ortasına yerleştirilmiştir. Böylece x_0 ve y_0 ;

$$x_0 = -\frac{W_{x0}}{2} \quad y_0 = \frac{W_{y0}}{2} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilir.

W_{x0} , W_{y0} sırasıyla merkezi dalganın uzunluğu ve genişliğidir. Yük dağılımını daha iyi verebilmek ve gerekli hesap süresini azaltmak için, eşit olmayan uzunluk ve genişlikli alt bölge işlevleri seçilir.

$$W_{xm} = k^m W_{x0} \quad m=1,2,\dots,\dots,\dots, M+1 \quad (3.18a)$$

$$W_{yn} = k^n W_{y0} \quad n=1,2,\dots,\dots,\dots, N+1 \quad (3.18b)$$

k ; 1'den küçük pozitif bir katsayıdır.

$x_{m+1}=a$ ve $y_{N+1}=b$ olması için W_{x0} ve W_{y0} ;

$$W_{x0} = \frac{a(1-k)}{0,5 + (k-k^{M+1})} \quad (3.19a)$$

$$W_{y0} = \frac{b(1-k)}{0,5 + (k-k^{N+1})} \quad (3.19b)$$

şeklinde tanımlanır.

Kenardaki yük toplanmasını belirtmek için, açınım fonksiyonlarının çarpımının kullanılması yoluna gidilirse de bu işlem, köşelerdeki yük dağılımının iyi bir göstergesi değildir.

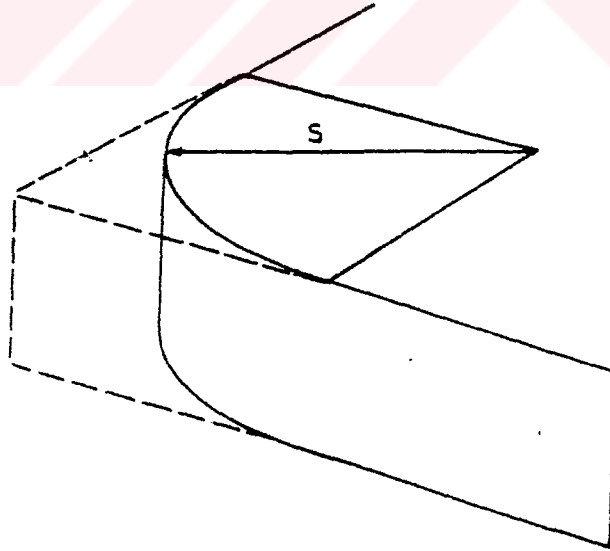
$$P_{Mn}(x,y) = \begin{cases} \sqrt{0,5 W_{xm}} & x_m < x < a, y_N < y < y_{N+1} \\ 0 & , \text{ aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.20a)$$

$n=0,1,\dots,N-1$

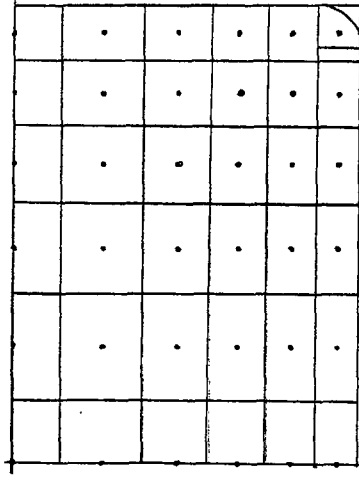
$$P_{mN}(x,y) = \begin{cases} \sqrt{0,5 W_{yN}} & , x_m < x < x_{m+1}, y_N < y < b \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases}$$

$m=0,1,\dots,M-1$

Bunun yanında Meixner tarafından formüle edilen kenar koşullarının, levhanın köşesi 3 boyutlu geometriye sahip olsa bile yalnız iki boyutlu şekillerde geçerli olması bir çelişki doğursada bunu gidermek için Şekil 3.6'da görüldüğü gibi çok dikkatli bir inceleme yapmaya gerek vardır. Büyük ölçekte, levhanın köşe sivriliği iyi tanımlanamaz. Olası bir çözüm, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi köşelerin s eğrilik yarıçapı ile belirli olan modelin kullanılmasıdır.



Şekil 3.6. Topraklama levhasının köşe modeli



Şekil 3.7. Topraklama levhasının $k=0,85$ faktörü için numaralı modeli

Ancak bu modelin yalnızca levha kalınlığının, s yarıçapından daha büyük olduğunda geçerli olduğu dikkate alınmalıdır. Levhanın ayrıntılı karakteristiklerinin değerlendirilmesinde eğrilik yarıçapı büyük olan köşe kullanılır. Kolaylık açısından $s=W_{yN}$ alınabilir. (3.18b) ve (3.19b) eşitliklerinden k 'nın küçük ve N 'in büyük alınması ile b ile karşılaştırıldığında, s 'in çok küçük yapılabileceği dikkate değerdir. Şekil 3.7'de verilen modelden hareketle köşe dalgası iki kısma ayrılabilir.

1. Kısım

$$P_{MN}(x,y) = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{s-r_0}{s-r}\right)} & , \quad 0 < r < s, \quad 0 < \phi < \pi/2 \\ 0 & , \quad \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.21a)$$

2. Kısım

$$P_{MN}(x,y) = \begin{cases} \sqrt{\left(\frac{0.5W_{yN}}{b-y}\right)} & , \quad x_M < x < a-s, y_N < y < b \\ 0 & , \quad \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.21b)$$

r ; $(a-s, y_N)$ noktasından olan radyal uzaklıktır.

$$r_0 = 0,5\sqrt{[(2s - W_{xM})^2 + W^2 y_N]} \quad (3.22)$$

dir. Yani belirlenecek olan $N_c=(M+1) (N+1)$ adet C_{mn} s bilinmeyen vardır. R_e 'ye ek olarak hesaplanacak bilinmeyenlerin sayısı N_c+1 dir. Kolaylık açısından N_c lineer bağımsız eşitlikleri düzenleme yöntemi ile belirlenir. Özellikle birinci çeyrek daire içinde herbir genlik dalgasının (x_i, y_j) merkez koordinatları işaretli noktalar olarak seçilir.

$$x_i = \frac{(x_{m+1} + x_m)}{2} \quad i=0,1,\dots,M \quad (3.23a)$$

$$y_j = \frac{(y_{n+1} + y_n)}{2} \quad j=0,1,\dots,N \quad (3.23b)$$

İşaretli noktalar Şekil 3.7'te gösterilmektedir. Bu noktalarda (3.11) eşitliği tekrar yazılırsa;

$$\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N C_{mn} \int_{y_n}^{y_{n+1}} \int_{x_m}^{x_{m+1}} P_{mn}(x_1, y_1) \times K(x_i, y_j; x_1, y_1) dx_1 dy_1 - 4 \pi \epsilon R_e = 0$$

$$i=0,1,\dots,M \quad (3.24)$$

$$j=0,1,\dots,N$$

(3.4) eşitliğinde açılım ile q_s yerine konursa;

$$\sum_{m=-M}^M \sum_{n=-N}^N C_{mn} \int_{y_n}^{y_{n+1}} \int_{x_m}^{x_{m+1}} P_{mn}(x_1, y_1) dx_1 dy_1 = \epsilon / \sigma \quad (3.25)$$

Köşe modeli ile uyumlu olarak (3.24) ve (3.25) eşitliklerinin her ikisinde köşe dalga integralinin limiti aynı şekilde değiştirilmelidir. Böylece (3.24) ve (3.25) eşitliklerindeki matris denklemi bulunur. Genlik ve topraklama direnci katsayıları için Crout indirgeme yöntemi gibi standart sayısal cetveller kullanılır.

(3.24) eşitliğinin çözümündeki ikinci zorluk, sayısal yollarla düzensiz integralin hesabıdır. İntegrasyon parametreleri, gözlem noktasına çok yakın olduğunda, (3.24) eşitliğindeki integralin sonsuz geniş duruma geldiği gözlenebilir. Bu nedenle integral uygun dönüşümler yapılmadan, standart sayısal integral yolları ile hesaplanamaz.

Köşe ve kenar dalgaları için bu iki özellikten dolayı problem daha karmaşık duruma gelir. Bu tür düzensiz integralin çözümü şöyle verilebilir [2].

$m=M$ veya $n=N$ için

$$I_{kenar} = \int_{y_{N-1}}^b \int_{x_1}^{x_m} \frac{I}{\sqrt{(b-y_1)}} \cdot \frac{I}{\sqrt{[(x_m-x)^2 + (b-y_1)^2]}} dx_1 dy_1 \quad (3.26)$$

x' e göre integrasyondan sonra

$$I_{kenar} = \int_{y_{N-1}}^b \frac{I}{\sqrt{(b-y_1)}} \ln \left[\frac{fm(x_m, y_1)}{fm(x_1, y_1)} \right] dy_1 \quad (3.27)$$

$$fm(t, y_1) = x_m - t + \sqrt{[(x_m - t)^2 + (b - y_1)^2]} \quad (3.28)$$

(3.27) eşitliğinin integrali alınır ise,

$$I_{kenar} = 2\sqrt{(b-y_{N-1})} \ln \left[\frac{fm(x_u, y_{N-1})}{fm(x_i, y_{N-1})} \right] + \quad (3.29)$$

$$+ 2 \int_{y_{N-1}}^b \frac{(b-y_i)^{3/2}}{\sqrt{\{[(\Delta x_u^2 + (b-y_i)^2] + [\Delta x_i^2 + (b-y_i)^2]\}}} x \left[\frac{\Delta x_i}{fm(x_u, y_i)} - \frac{\Delta x_u}{fm(x_i, y_i)} \right] dy_i$$

burada

$$\Delta x_i = (x_m - x_i) \text{ ve } \Delta x_u = (x_m - x_u)$$

Yukarıdaki eşitlikte geriye kalan integral alma işlemi integralin sınırlı olması nedeniyle standart sayısal integral işlemleri ile yapılabilir.

$$I_{kenar} = \int_0^{\pi/2} \int_0^s \frac{r dr d\phi}{\sqrt{(s-r)} \sqrt{[(x-r \cos \phi + x_c)^2 + (y-r \sin \phi + y_c)^2]}} \quad (3.30)$$

$$U = \sqrt{(s-r)}$$

$$I_{knye} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\sqrt{s}} \frac{2(s-u^2)}{\sqrt{[\beta^2 + \alpha(s-u^2) + (s-u^2)^2]}} du d\phi \quad (3.31)$$

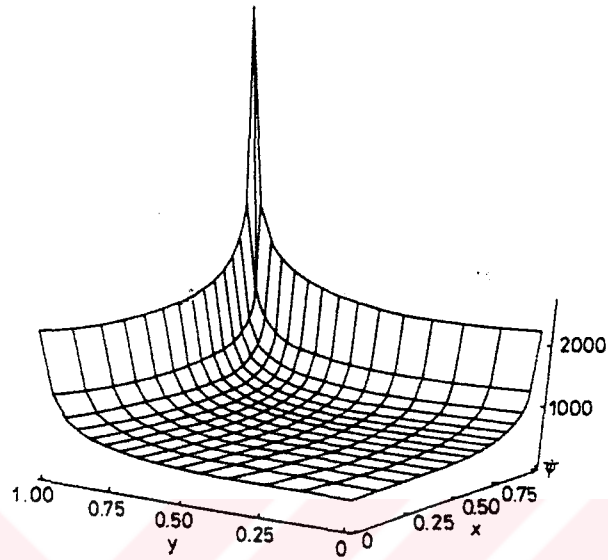
burada

$$\alpha = 2 [(x_c - x) \cos \phi + (y_c - y) \sin \phi] \quad (3.32)$$

ve

$$\beta^2 = (x_c - x)^2 + (y_c - y)^2 \quad (3.33)$$

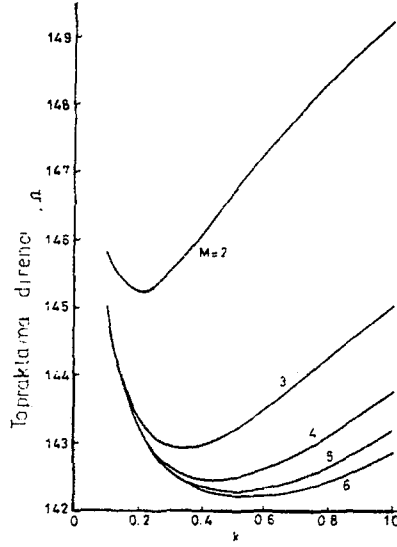
Şekil 3.8’de bağıl dielektrik sabiti $\epsilon=3,4$, özgül direnci $\rho_t=1$ S/m olan kuru kumlu toprakta, $h=1$ m derinliğe gömülü, 1 m^2 ’lik alana sahip kare levhanın seçilmesi ile bulunan yük dağılımını göstermektedir.



Şekil 3.8. Temsili levha üzerindeki yük dağılımı

Burada yük yoğunluğunu, levhanın orta ve kenar bölgelerde özellikle köşelerde yüksek yoğunlukta düzgün dağılımı beklenmektedir. Tipik levhalar için, levha üzerindeki yükün yarısı, alanın sadece %17’sine yerleşir. Daha uzun çevre uzunluğuna sahip olması nedeniyle, dikdörtgen levhada yük toplanması daha şiddetlidir. Yük toplanmasının sonucu olarak akım dağılımında etken olan etkin alan, levhanın alanından daha küçüktür.

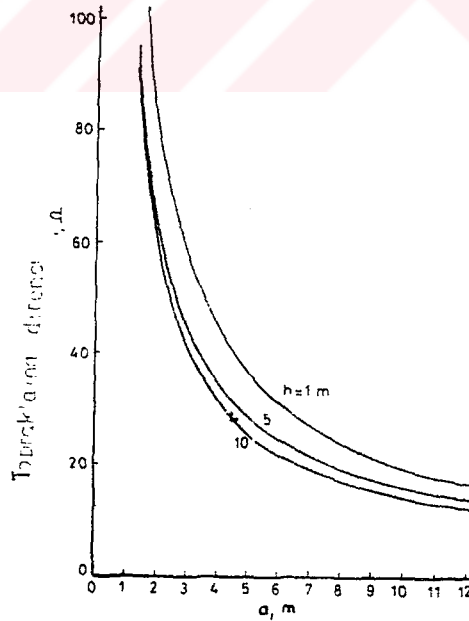
(3.18) eşitliğinde bulunan k ölçüm faktörü, hesap sürecini hızlandırmak için kullanılır. M açınım sayısı büyük olmadıkça k ’nın küçük değeri, merkez bölgede yüklerin çok az değiştiğini ifade etmektedir.



Şekil 3.9. Temsili levhanın, topraklama direncinin k 'ya bağlı değişimi

Şekil 3.9. temsili levhanın topraklama direncindeki değişimleri, birkaç M değeri için k 'ya göre çizilmiştir. $M > 4$ için k 'nın farklı değerleri ($0,4 < k < 0,6$) için bulunan topraklama direnç değerleri arasında bir fark görülmektedir. Bu nedenle $k=0,5$ yük açılımı için seçilen bir değer olur.

Kuru kumlu toprağa gömülü kare levhalar da genişliğe bağlı topraklama direncinin değişimi, $h=1,5$ ve 10 m derinlikler için Şekil 3.10 gösterilmektedir.

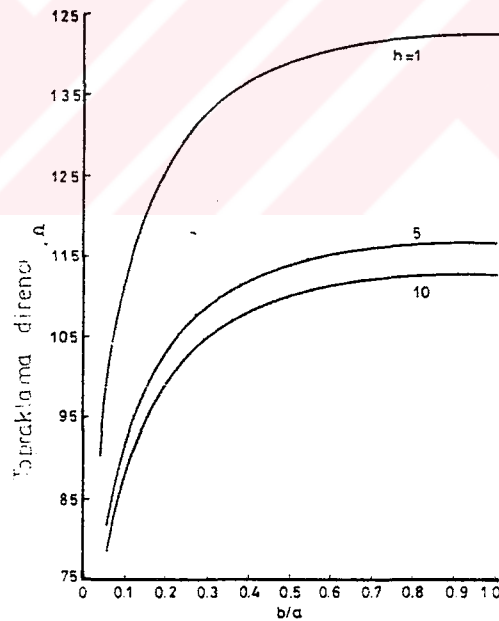


Şekil 3.10. Temsili levhanın topraklama direncinin, levha genişliğine bağlı değişimi

Kare levhanın genişliği 5 m'den 6 m'ye genişletildiğinde topraklama direncinde %12'den daha az bir azalma gözlenir. Bunun yanında bu kazanç alandaki %44 artış ile sağlanır. $a > 6$ m için topraklama direncindeki marjinal azalış, alanda oransız bir artışla kazanılır. Şekil 3.10'dan en düşük topraklama direncinin yaklaşık 10 ohm'a eşit olduğu görülebilir.

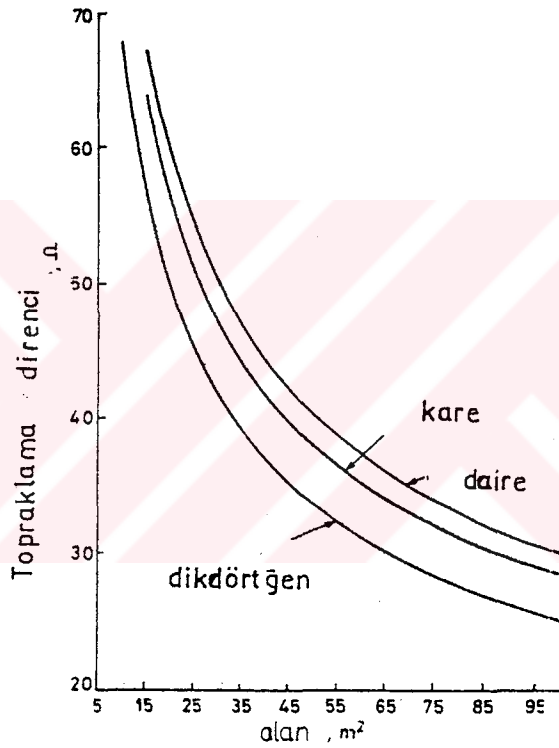
Görünüşte bu düşük sınır, gömme derinliğinden bağımsızdır. Kare levhanın topraklama direnci genişliği ile orantılı değildir.

Önceden sözedildiği gibi dikdörtgen levhanın çevresinde nisbeten daha fazla yük toplanır. Bu nedenle topraklama direnci, aynı alana sahip kare levhanınkinden daha düşüktür. Herhangi bir levhanın "genişlik/uzunluk" oranının ne anlama geldiği $4m^2$ alana sahip bir levha için $h=1,5$ ve 10 m derinlikleri için b/a 'ya göre değişimi Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Dikdörtgen levhanın topraklama direncinin genişlik/uzunluk oranına bağlı değişimi

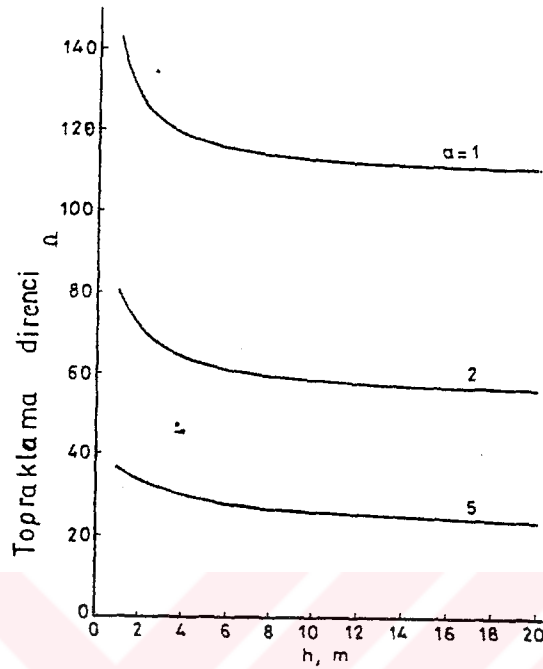
Şekil 3.11'den incelediğinde, $b/a=0,2$ değerinin kritik bir nokta olduğu, $b/a > 0,2$ için levhanın direncinin b/a 'nın değişimiyle yavaşça değiştiği, $b/a < 0,2$ olduğunda, topraklama direncinin b/a 'nın azalması ile önemli bir şekilde azaldığı gözlenmektedir. Bu sonuçlardan sonsuz uzunlukta dar bir şerit için topraklama direncinin değerinin sıfır olduğu kanaatine varılabilir. Daha kolay ve direkt karşılaştırma yapabilmek için $b/a=0,2$ olan dikdörtgen, kare ve daire şeklindeki topraklama levhaları için $h=1$ m ve $h=5$ m değerleri için topraklama direncinin levhanın alanına göre değişimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Dikdörtgen, kare ve daire şeklindeki topraklama levhalarında topraklama direncinin değişimi

Şekil 3.12'den görüldüğü gibi dikdörtgen topraklama levhasının direnci, aynı boyutlardaki karesel levhanınkinden ve aynı kare levhanın topraklama direnci ise dairesel levhanınkinden daha düşüktür.

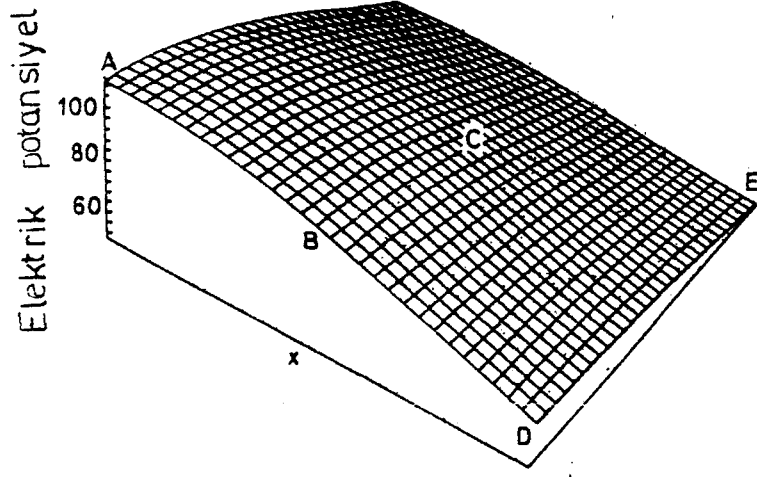
Kare levhanın topraklama direncinin, $a=1,2$ ve 5 m değerleri için h derinliğine bağlı olarak aldığı değerler Şekil 3.13'de gösterilmektedir.



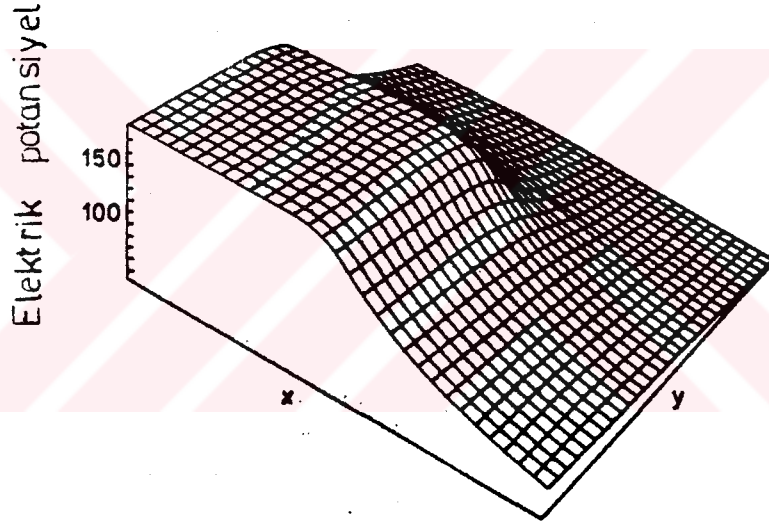
Şekil 3.13. Kare levhanın topraklama direncinin h gömülme derinliğine bağlı değişimi

Şekil 3.13'den görüldüğü gibi kare levhanın direnci gömme derinliğinin ve uzunluğunun artması ile azalmaktadır. Eğer levha yeryüzeyine yakın ise daha fazla yük, levhanın alt kısmına toplanır, üst kısım kullanım dışı kalır ve topraklama direnci bu nedenle karşılıklı olarak azalır. Daha başka bir anlatımla, levha toprakta derine gömülür ise levhadaki yük ve etkisi arasındaki karşılıklı etki ihmal edilebilir.

Topraklama direnci, h/a oranı yaklaşık olarak 5'e eşit olduğunda en düşük sınırın %5'inden daha küçük bir değere ulaşır. Genel olarak h/a 'nın 2'den büyük değeri için topraklama direncindeki azalış o denli önemsizdirki, istenen derinlikte yerleştirilen levhanın extra maliyetini karşılamayabilir. $h=1$ m ve $h=0,1$ m derinliklerde gömülü bulunan, 1 m^2 alana sahip levhanın yeryüzeyinde oluşturduğu potansiyel dağılımı sırasıyla Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te gösterilmektedir.



Şekil 3.14. $h=1$ m için topraklama levhası üzerindeki yeryüzeyi potansiyel dağılımı



Şekil 3.15. $h=0,1$ m için topraklama levhası üzerindeki yeryüzeyi potansiyel dağılımı

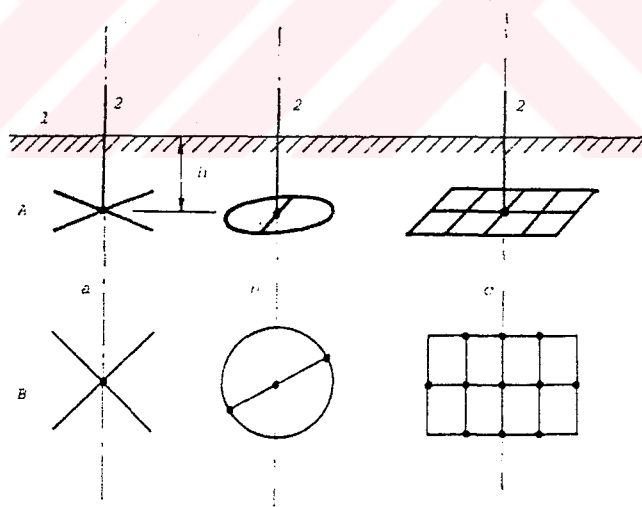
Şekil 3.14'ten potansiyel dağılımının çok düzgün derecede değiştiği ve düşük adım ve dokunma geriliminin meydana geldiği, Şekil 3.15'ten ise levhanın üzerindeki potansiyel değişiminin çok düşük, çevresine yakın yerlerde yüksek adım ve dokunma geriliminin meydana geldiği görülmektedir.

3.3. Şerit Topraklayıcılar:

Şerit topraklayıcılar, en az 3 mm. kalınlığında ve 100 m² 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 gözönüne alınarak sürekli olarak nemli kalacak ve donma olmayacak şekilde bir gömülme derinliği seçilir ki bu derinlik ortalama 0,5-1 m kadardır.

En basit şerit topraklayıcı boyu boyuna döşenen bir şeritten oluşur. Bunun yayılma direnci öncelikle şeritin uzunluğuna bağlıdır. Bunun için yalnız, yassı çelik şerit kullanılır.

Yassı şeritler toprağa, yüksek kenarı yukarıya gelecek şekilde düşer; böylece toprak ile şerit arasında boşlukların kalmaması ve akımın toprağa daha iyi geçmesi sağlanır. Şerit topraklayıcıda yayılma direnci kesitten çok uzunluğa bağlıdır [4].



Şekil 3.16. Şerit topraklayıcıların çeşitleri.

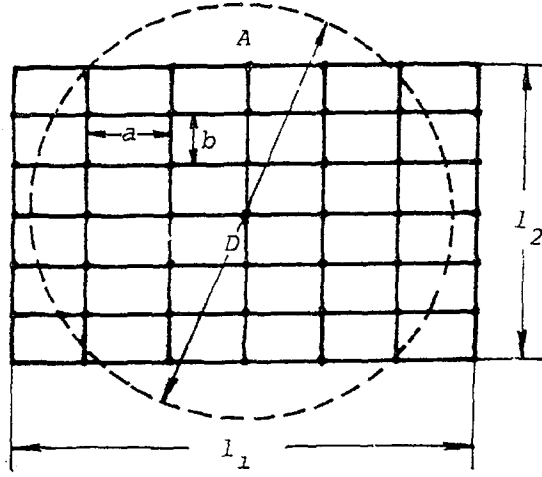
- A- Perspektif görünüş,
 B- Üstten görünüş,
 a- Dört kollu yıldız topraklayıcı,
 b- Halka topraklayıcı,

- c- Ağ topraklayıcı,
 1- Zemin, toprak,
 2- Topraklama iletkeni,
 h- Gömülme derinliği.

Şerit topraklayıcılar en çok yıldız, halka, gözlü veya bunların kombinasyonu şeklinde yapılır. Şekil 3.16'da en çok kullanılan şerit topraklayıcıların yapıları gösterilmektedir. Bu topraklayıcılar da yaklaşık olarak 0,5-1 m derinlikte, yeryüzüne paralel olarak gömülürler.

Yıldız topraklayıcılar daha çok direk topraklamasında 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 yeryüzündeki gerilim dağılımının yatık olması önemlidir. Onun için paralel şeritlerden yapılmış bu gibi topraklamalar aynı zamanda potansiyel düzenleyici olarak da iş görürler. Malzemeden 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 makina, cihaz veya tesisleri bağlayabilmek için enine bağlamalarda yapılır. Bu enine bağlamalar, köşelerde meydana gelen karşılıklı etki sebebi ile yayılma direncinin düşmesine daha az yardımcı olurlar; buna karşılık direkt topraklanmış şebekelerde temas ve adım geriliminin 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 3.17. Gözlü topraklayıcı

l_1 - Boyuna iletkenlerin uzunluğu

l_2 - Enine iletkenlerin uzunluğu

axb - Göz boyutları.

A - Topraklayıcı alanı

D - A alanına eşdeğer daire çapı.

3.4. Doğal Topraklayıcılar:

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 çok 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.

3.5. Özel Topraklayıcılar:

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

3.6. Bileşik Topraklayıcılar :

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

3.6.1. Paralel Topraklayıcılar:

Aynı geometrik yapıda olan topraklayıcılar paralel bağlanarak paralel topraklayıcı elde edilir. Bunların aralarında yeteri kadar uzaklık olması durumunda bunların birbirine karşı etkisi bahis konusu olmaz. Paralel bağlı topraklayıcıların boyutları farklı olabilir. Herbir topraklayıcının yayılma direnci $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ ise, toplam yayılma direnci

$$R_{\text{top}} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_n} \quad (3.34)$$

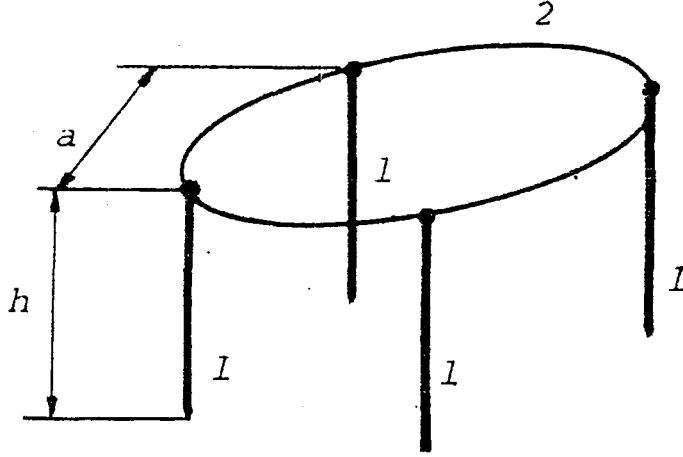
ifadesi ile hesaplanır.

Eğer topraklayıcıların yayılma dirençleri eşit ise, n sayıdaki paralel topraklayıcının toplam yayılma direnci

$$R_{\text{top}} = R/n \quad (3.35)$$

dir. Çubuk topraklayıcılarda, topraklayıcılar arasındaki a uzaklığı; h çubuk uzunluğunun 2-3 katı ise, bu durumda topraklayıcıların karşılıklı etkisi sözkonusu 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 3.18. Paralel topraklayıcı.
 1-Birey topraklayıcılar,
 2-Paralel bağlama,
 h- Topraklayıcının uzunluğu,
 a- Topraklayıcılar arasındaki uzaklık.

3.6.2. Karma Topraklayıcılar:

Geometrik bakımdan farklı yapıdaki topraklayıcıların paralel bağlanması ile meydana gelen topraklayıcılara karma topraklayıcı denir. 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.

BÖLÜM 4.

TOPRAKLAMA AĞLARININ ANALİZİ

4.1. Genel Bilgi

Yüksek Gerilim istasyonlarında topraklama için kullanılan kare veya dikdörtgen ağlar, birbirine paralel ve aynı derinlikte toprağa gömülen çıplak iletkenlerle yapılmaktadır.

Topraklama ağlarının diğer topraklayıcı tipleri ile karşılaştırıldığında, daha karmaşık bir yapıya sahip olmaları nedeniyle analizleri, diğer topraklayıcılara göre bir takım zorluklar içermekte olup analitik ve sayısal yöntemlerin kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Topraklama ağlarının tasarımında, topraklama ağının yıldırım darbelerine karşı davranışının belirleyen bazı faktörlerin yani indüktans, akım dağılımı ve darbe empedansı vb. gibi faktörlerin dikkate alınması, yapılacak olan tasarımın başarılı olması açısından çok önemlidir.

Bu bölümde, sözkonusu faktörler hakkında genel bilgiler sunulacak, temsili topraklama ağları için bu faktörlerin, ağların koruma derecesinin belirlenmesinde taşıdığı önem araştırılacaktır.

4.2. Topraklama Ağlarında Özindüktans

Topraklama ağının indüktansı, yıldırım akımlarının toprağa boşalması durumunda ağın buna karşı davranışının belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Ağ indüktansı, büyük alanlarda darbe empedansını kontrol eder ve bu büyüklüğün hesabı için gereklidir [5].

İndüktans hesabı için şu kabullerin yapılmasına gerek vardır.

I- Elektromagnetik alan, iletkenin çevresinde akımın en çok yoğunlaştığı yerde en yüksek değere sahiptir. Bu nedenle ağ şeklindeki iletkenler de indüktans, akım dağılımı ile verilir. Toprak içindeki akımın etkisi ihmal edilir.

II- Toprak kaçak akımı ihmal edilir. Besleme noktasından giren tüm akımlar, ağ üzerinde ayrı uzak noktalarda toplanırlar.

III- Ağı oluşturan iletkenlerin yarıçapının değişimi, alan içinde kalan iletkenin boyutlarının belli uzunlukları için ağın indüktansı üzerinde ihmal edilebilir bir etkisi vardır.

II. yaklaşımının toprak kaçak akımı ihmal edildiğinde, indüktansın en büyük değerini vermesinin aksine I. yaklaşım, toprak akımının etkisinin ihmal edilmesi nedeniyle indüktansın en düşük değerini vermektedir. Bu iki yaklaşımın ortaya çıkardığı hatalar, bir dereceye kadar birbirini yok eder. Burada, aşağıda verilen iki durum gözönünde bulundurulmalıdır .

I- Akımın giriş noktası ağın ortasında, toplanma noktası ise ağın dört köşesindedir.

II- Akımın giriş noktası ağın köşelerinin birinde, toplanma noktası ise ağın karşı köşesindedir.

Gerçekte ise topraklama ağlarında akım, tasarıma ve bağlantıya bağlı olarak her noktadan girebilir. Bu tahminin amacı, yukarıda verilen iki durumu pratik olarak temsil edebilmektedir. Eğer giriş noktası, bu iki durumun kapsamı dışında bir nokta ise, indüktansın değeri, yukarıda sözü edilen iki durum için belirlenen iki değer arasında değişir. Bu iki durum, topraklama ağlarının darbe empedansının extrem

değerlerini de verir. Diğer giriş noktalarının darbe empedansı, bu iki değer arasında olacaktır.

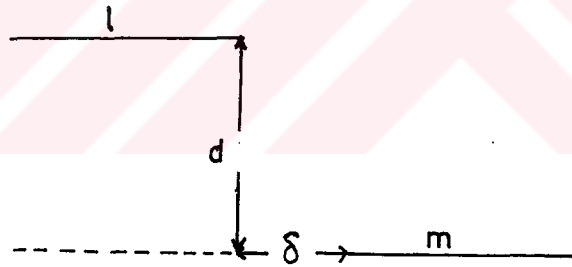
4.2.1. Reaktif kVA Yöntemi

Doğrusal bir iletkenin öz indüktansı

$$L = 0,2l \left(\ln \frac{2l}{r} - 1 \right) \quad (4.1)$$

olarak verilir [5].

Burada l =uzunluk (m), r = iletkenin yarıçapı (m), $l \gg r$



Şekil 4.1. İki paralel iletken arasında karşılıklı indüktansın bulunması.

İki paralel iletken arasındaki karşılıklı indüktans;

$$L_{12} = 0,1 \left(\alpha \sinh^{-1} \frac{\alpha}{d} - \beta \sinh^{-1} \frac{\beta}{d} - \gamma \sinh^{-1} \frac{\gamma}{d} + \delta \sinh^{-1} \frac{\delta}{d} - \sqrt{\alpha^2 + d^2} + \sqrt{\beta^2 + d^2} + \sqrt{\gamma^2 + d^2} - \sqrt{\delta^2 + d^2} \right) \mu H \quad (4.2)$$

olarak verilir.

Burada

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

$$\beta = l + \delta$$

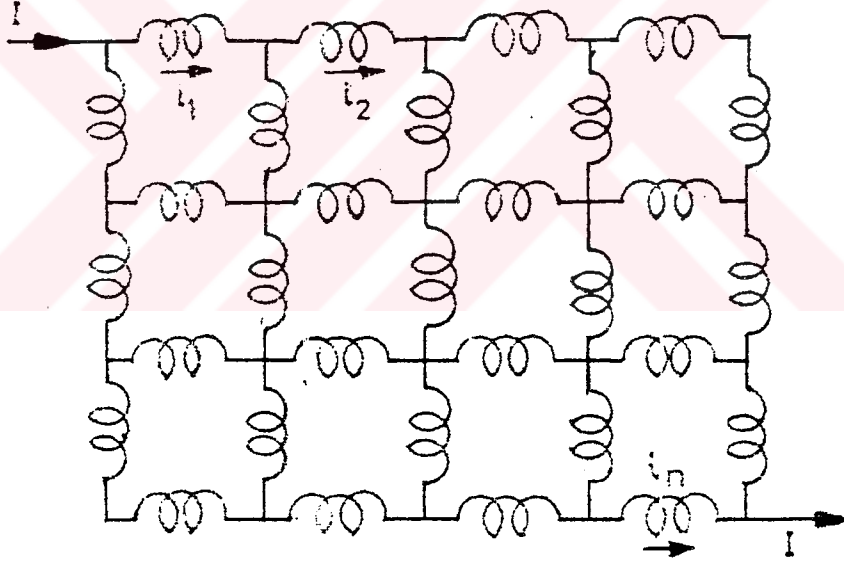
m = İkinci iletkenin uzunluğu

$$\gamma = m + \delta$$

δ = İki iletken arasındaki yatay uzaklık

d = İki iletken arasındaki dikey uzaklık

Eğer iletkenler üst üste bindirilmiş ise δ uzunluğu negatif işaretli olarak kullanılır. Birbirine dik iki iletken arasındaki karşılıklı indüktans sıfır olarak alınır.



Şekil 4.2. Topraklama ağlarının genel gösterilimi

Şekil 4.2'deki ağda I toplam akımı akmaktadır. Farklı kollardaki akım değerleri I_1, I_2, \dots, I_n olsun. Tüm kolların uzunlukları birbirine eşit olduğundan, kolların L_{kk} öz indüktansları eşit olacaktır. Farklı kollar arasındaki karşılıklı indüktanslar L_{12}, L_{23}, \dots vb ile gösterilirse, k . koldaki toplam indüktans;

$$L_k = \frac{1}{I_k} (I_1 L_{1k} + I_2 L_{2k} + \dots + I_k L_{kk} + \dots + I_n L_{nk}) \quad (4.3)$$

olur.

Ağın, giriş ve çıkış uçları arasındaki indüktansı ise;

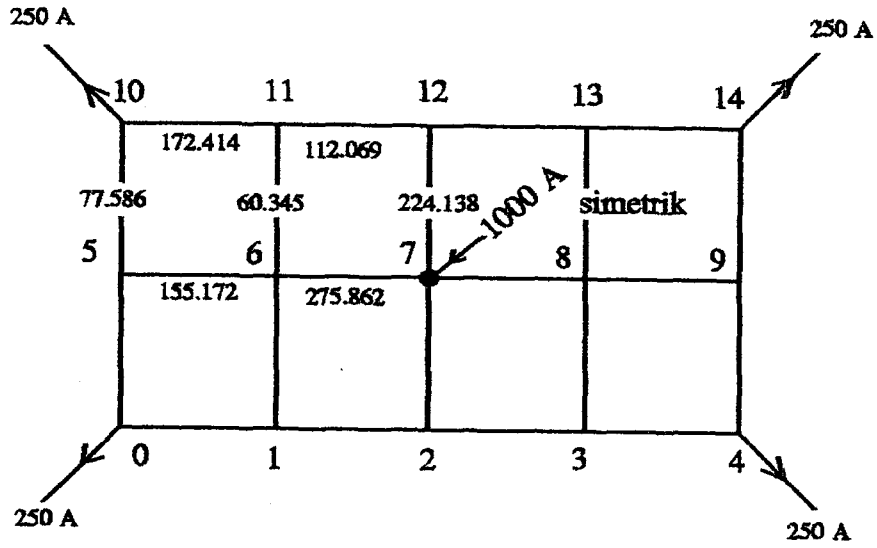
$$L_s = \frac{1}{I^2} \left(\sum_{k=1}^n I_k^2 L_k \right) \quad (4.4)$$

olur.

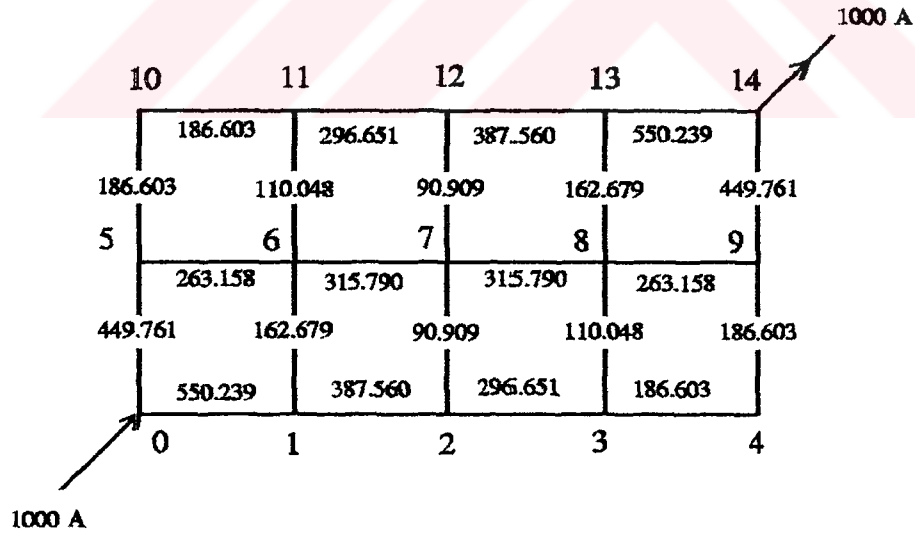
4.2.2. Akım Dağılımının Bulunması:

Ağın her bir kolundaki akımların dağılımını bulabilmek için Kirchoff kanunları kullanılır ve sadece her bir kolun direnç ve öz indüktansı göz önüne alınır. Tüm kollar birbirine benzer olduğundan, aynı yüksek frekans direncine ve öz indüktansa sahiptirler. Her bir kolun empedansı Z olarak alınır. Tüm kollarını benzerliği sebebiyle akım dağılımının bulunması için Z'nin sayısal değerinin bulunmasına gerek yoktur. Değişik kollardaki akım dağılımının toplanmasında ki çok az bir farklılık karşılıklı indüktansında dikkate alınması ile sonuçlara etki etmediğinden akım dağılımında hiç bir değişiklik yapılmasına gerek yoktur.

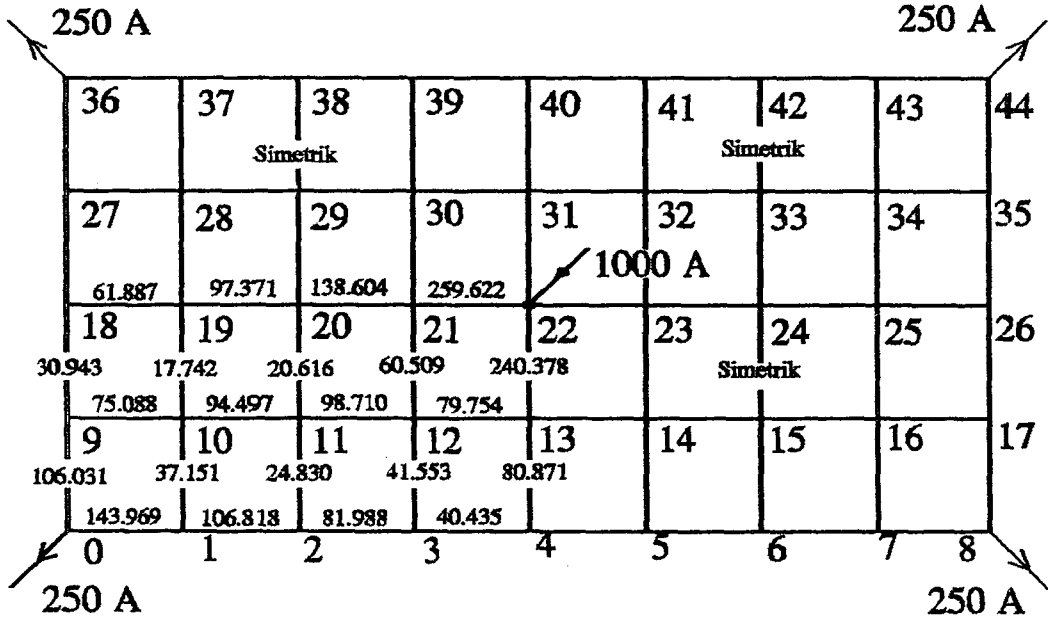
Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de 2x4 gözlü bir topraklama ağının, Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da ise 4x8 gözlü bir topraklama ağının, ortadan ve köşeden birim akım ile beslenmesi durumunda kollardaki akım dağılımı verilmektedir.



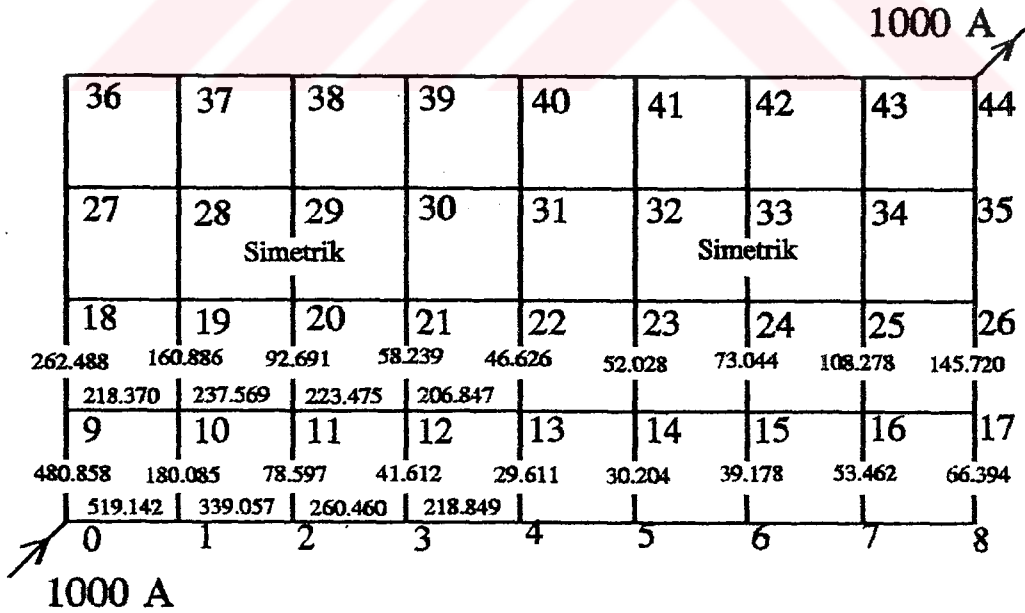
Şekil 4.3. Ortadan beslenen 2x4 gözlu ağda meydana gelen akım dağılımı



Şekil 4.4. Köşeden beslenen 2x4 gözlu ağda meydana gelen akım dağılımı.



Şekil 4.5. Ortadan beslenen 4x8 gözülü ağda meydana gelen akım dağılımı



Şekil 4.6. Köşeden beslenen 4x8 gözülü ağda meydana gelen akım dağılımı

Şekil 4.3 ve Şekil 4.5'teki ortadan beslenen ağların kollarındaki akım değerleri ile Şekil 4.4 ve Şekil 4.6'da köşeden beslenen ağların kollarındaki akım değerleri ile karşılaştırıldığında ortadan beslenen ağlarda daha küçük değerlerde akımlar akmaktadır. Bundan dolayı topraklama ağında o derecede az gerilim yükselmesi meydana gelecek dolayısı ile toprak yüzeyinde oluşacak adım ve dokunma gerilimi daha küçük değerler olacaktır.

4.2.3. İndüktansın Hesabı

Topraklama ağlarının indüktansı,

$$L_s = D.L. X^{0,16} \quad (4.5)$$

amprik formülü ile hesaplanabilir [5].

Burada

L: İletkenin öz indüktansı, μH .

x: Ağın uzunluk/genişlik oranı.

D: Göz sayısına ve akımın girişine bağlı amprik bir katsayıdır. Bu katsayıya ait değerler. Tablo 4.1.'de verilmektedir [5].

Tablo 4.1. Topraklama ağları için D katsayıları

Göz Sayısı	Ortadan besleme için (D)	Köşeden besleme için (D)
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 çalışmada, indüktans hesabı yapılacak temsili dikdörtgen topraklama ağları ile ilgili veriler şunlardır;

I- Ortadan besleme için

Göz sayısı =4x2 , 6x4, 8x4, 10x6, 12x6

Göz boyutu = 2x2 m², 4x4 m², 6x6 m²

II- Köşeden besleme için

Göz sayısı =4x2 , 6x4, 8x4, 10x6, 12x6

Göz boyutu = 2x2 m², 4x4 m², 6x6 m²

Bu ağların en küçüğü 32 m² ve en büyüğü 2592 m², iletken yarıçapı r=0.02m'dir.

l= 2 m için L=1,72 µH.

l= 4m için L=4,0 µH.

l= 6m için L=6,48 µH.

(4.5) denklemine göre, ortadan ve köşeden beslenen ağlar için hesaplanan indüktans değerleri Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'te verilmektedir.

Tablo 4.2. Ortadan beslenen topraklama ağında indüktans hesabı sonuçları

Göz Boyutları	2x2 m ²	4x4 m ²	6x6 m ²
Göz Sayısı	L (µH)	L (µH)	L (µH)
4x2	0,9012	2,0960	3,3955
6x4	1,1437	2,6598	4,3090
8x4	1,5281	3,5538	5,7572
10x6	1,7910	4,1648	6,7470
12x6	2,116	4,9107	7,9553

Tablo 4.3. Köşeden beslenen topraklama ağında indüktans hesabı sonuçları

Göz Boyutları	2x2 m ²	4x4 m ²	6x6 m ²
Göz Sayısı	L (μH)	L (μH)	L (μH)
4x2	5,3943	12,5448	20,3227
6x4	8,2073	19,0869	30,9208
8x4	10,3189	23,9975	38,8760
10x6	12,8826	29,9596	48,5346
12x6	14,7298	34,2555	55,4940

Yukarıda yapılan indüktans hesaplarından, bir dikdörtgen ağın indüktansının;

I- Ağın bir elemanının öz indüktansına

II- Gözlerin sayısına

III- Ağın uzunluk /genişlik oranına

IV- Akımın giriş noktasına bağlı olduğu görülmektedir.

Bu sonuçların genelleştirilmesi ile toplam alanı 100 m² olan 8,24,32,60 ve 72 gözlü ortadan ve köşeden beslenen ağların indüktansı hesaplanabilir.

Bununla ilgili hesaplanan değerler Tablo 4.4. ve Tablo 4.5’de verilmektedir.

Tablo 4.4. Ortadan beslenen, toplam alanı 100 m² olan ağın indüktans hesabı sonuçları

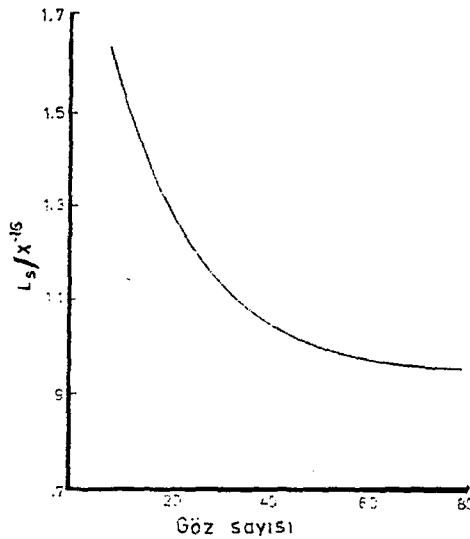
Göz Sayısı (Ad)	Göz Alanı (m ²)	Göz Boyutu (m)	L(μH)	D	L _o /X 0,16
4x2	100/8	3,54	3,44	0,469	1,6136
6x4	100/24	2,04	1,76	0,6232	1,0979
8x4	100/32	1,77	1,48	0,7952	1,1709
10x6	100/60	1,29	1,0	0,9595	0,9595
12x6	100/72	1,18	0,89	1,0988	0,9779

Tablo 4.5. Köşeden beslenen, toplam alanı 100 m² olan ağın indüktans hesabı sonuçları

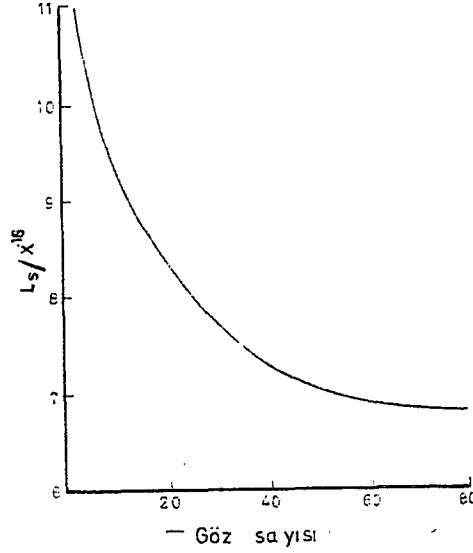
Göz Sayısı (Ad)	Göz Alanı (m ²)	Göz Boyutu (m)	L(μH)	D	$L_s/X^{0,16}$
4x2	100/8	3,54	3,44	2,807	9,6560
6x4	100/24	2,04	1,76	4,472	7,8707
8x4	100/32	1,77	1,48	5,3696	7,9470
10x6	100/60	1,29	1,0	6,9021	6,9021
12x6	100/72	1,18	0,89	7,6649	6,8218

Sadece gözlerin sayısındaki artışın etkisini görebilmek için eğrinin düşey eksenini $L_s/X^{0,16}$ olarak alır ise Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'den ağın toplam ve sabit alanı için göz sayısının artması ile, indüktansın sabit oluncaya kadar önceleri hızla, sonra yavaşça azaldığı görülmektedir.

Göz sayısını 60'ın üstüne çıktığında, indüktansın bu azalışı hemen hemen ihmal edilecek duruma gelir. Göz sayısı 60'dan çok olan ağın indüktansının hesabında, ağın sadece 60 göze sahip olduğu farzedilir ve bu ağ için hesaplanan indüktansın, daha fazla göze sahip ağ için bulunduğu kabul edilir. Dikdörtgen levhanın indüktansı, 60 göze bölünmüş aynı alana sahip bir ağın indüktasına yaklaşık olarak eşit olacaktır.



Şekil 4.7. Ortadan besleme durumunda göz sayısı ile $L_s/x^{0,16}$ oranının değişimi



Şekil 4.8. Köşeden besleme durumunda göz sayısı ile $L_s / x^{0.16}$ oranının değişimi

4.3. Topraklama Ağlarının Darbe Empedansı

Yıldırım boşalması durumunda, topraklama sisteminin davranışı, topraklama sisteminin koruma derecesini belirler. Darbe akımı, topraklama sistemine girdiğinde topraklama sisteminin darbe empedansı, besleme noktasındaki gerilimin tepe değerinin, darbe akımının tepe değerine oranı olarak ve darbe empedansının şebeke frekansındaki topraklama direncine oranı ise darbe katsayısı (A) olarak tanımlanır.

Topraklama sisteminin darbe empedansı; ağın şekil ve boyutlarına, elektrotlar arasındaki uzaklığa, akımının giriş noktasına, akımın dalga şekline ve tepe değerine ve toprak karakteristiklerine bağlıdır. Bunun yanısıra darbe empedansının belirlenmesinde önemli bir rolü olan ağın indüktansının (L), amprik formüllerden yararlanılarak bulunması Bölüm 4.2.3'de verilmektedir.

Topraklama sistemi, kaçak iletkenlik, indüktans, kapasite ve direncin bulunduğu iletim hattı eşdeğer devresiyle temsil edilir. Orta ve düşük derecede toprak direncine sahip bir topraklama sisteminde seri direnç ve kapasitenin etkisi ihmal edilir. Birim akım bu devreye uygulandığında, akımın girdiği noktadaki gerilim;

$$U(t) = \frac{1}{G} \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-n2\pi 2t/GI} \right) \quad (4.6)$$

olarak ifade edilebilir [6-7].

Darbe akımı, üstel iki fonksiyonun toplamı şeklinde bir dalga ile temsil edilir. Devre parametrelerinin, sözkonusu darbeye geçici cevabı, süperpozisyon ilkesinin uygulanması ile bulunabilir.

Topraklama ağının şebeke frekans direncinin, levhanın topraklama direncine eşit olduğu kabul edilir.

$$R = \rho / 4r \quad (4.7)$$

(4.6) ve (4.7) ifadelerinde;

G= Topraklama ağının, toplam yayılı toprak kaçak iletkenliği, siemens

L= Topraklama ağının yayılı elektrot indüktans toplamı, μH .

R= Topraklama ağının şebeke frekansındaki direnci, ohm

ρ = Toprak direnci, ohm.m

T= Dalga çephe süresi, μs

A= Darbe katsayısı

r= Ağın kapladığı alana eşdeğer alanlı dairesel levhanın yarıçapı, m

r_e = Ağın etkin alanına eşdeğer alanlı dairesel levhanın yarıçapı, m

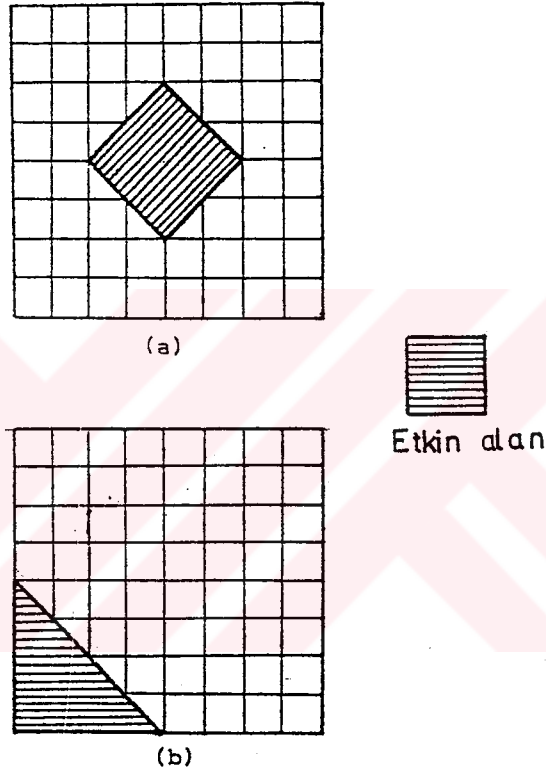
t= zaman, μs

4.3.1. Etkin Alan

Ağ boyutları arttıkça darbe empedansının belli bir alana kadar yayıldığı ileri sürülebilir. Ağ alanının bu değerin üzerinde olması durumunda, darbe empedansında farkedilir bir değişme görülmemektedir. Darbe empedansı, son değerinin %3' ü gibi

bir değere kadar düşürüldüğünde alanın büyümesi ile darbe empedansının azalma hızı çok yavaş olmakta ve bu değerin darbe empedansının son değeri olarak alınmasına neden olmaktadır. Darbe empedansının bu değerine karşılık gelen ağ alanı “Etkin Alan” olarak adlandırılır.

Ağ gözlerinin sonlu sayıda olması nedeniyle merkezinden beslenen büyük boyutlarda ki ağların etkin alanının şekli daima kare, köşeden beslenen ağlarda ise üçgen olacaktır.



Şekil 4.9. Topraklama ağlarında etkin alan
a) Ortadan besleme
b) Köşeden besleme

4.3.2. Kare Topraklama Ağlarının Darbe Empedansının Bulunması

Kare topraklama ağlarında, etkin yarıçap ve darbe katsayısı

$$r_e = K(\rho \cdot T)^{0.5} \quad (4.8)$$

amprik formülü ile bulunabilir [6].

Burada $K=(1,45 -0,05s)$; ortadan besleme için
 $K= (0,6 - 0,025s)$; köşeden besleme için

$$r \leq r_e \quad \text{ise} \quad A=e^{0,333 (r/r_e)^{2,3}} \quad (4.9)$$

$$Z_d = A \cdot R$$

$$r > r_e \quad \text{ise} \quad R= \rho /4r_e \quad A=e^{0,333} = 1,395 \quad (4.10)$$

$$Z_d= A.R$$

olur.

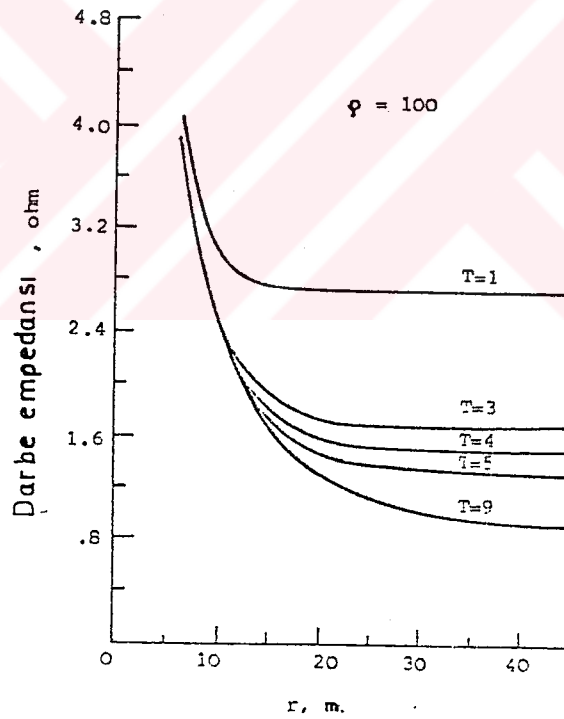
Aşağıda, ortadan beslenen ve göz boyutu $5 \times 5 \text{ m}^2$ ile köşeden beslenen ve göz boyutu $2 \times 2 \text{ m}^2$ olan topraklama ağlarının, $T=1, 2, 3, 4, 5, 9 \text{ } \mu\text{s}$ cephe süreli darbe dalgalarına karşı gösterdiği darbe empedanslarının bulunması için yapılan hesaplamalar, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7’de, darbe empedansının, ağın kapladığı alanın yarıçapına göre değişimi Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmektedir.

Tablo 4.6. Ortadan beslenen kare topraklama ağının darbe empedans değerleri

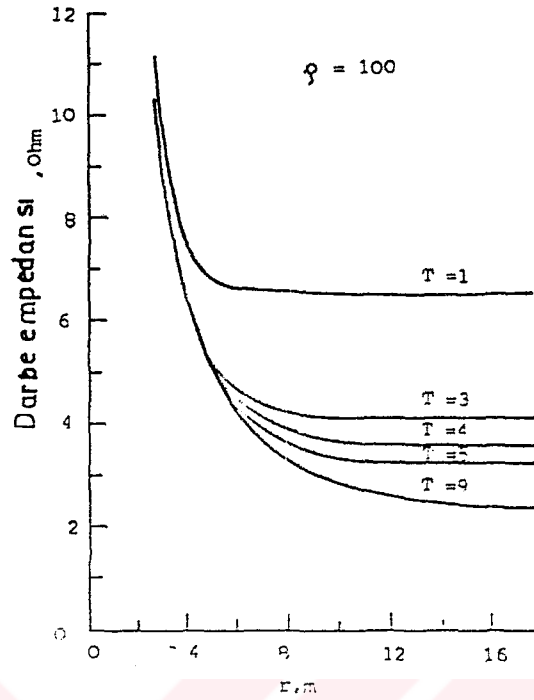
Ağ Boyutu (m^2)	Göz adedi	Göz boyutu (m^2)	Ağ Alanı (m^2)	Eşdeğer dairesel yarıçap (m)	DARBE EMPEDANSI Ohm				
					T=1 (μs)	T=3 (μs)	T=4 (μs)	T=5 (μs)	T=9 (μs)
10 x10	2x2	5x5	100	5,64	4,70	4,50	4,48	4,47	4,45
20 x 20	4x4	5x5	400	11,28	2,96	2,39	2,34	2,31	2,26
30 x30	6x6	5x5	900	16,93	2,90	1,82	1,72	1,66	1,57
40 x40	8x8	5x5	1600	22,57	2,90	1,69	1,48	1,38	1,24
50 x50	10x10	5x5	2500	28,21	2,90	1,69	1,45	1,30	1,07
60 x60	12x12	5x5	3600	33,86	2,90	1,69	1,45	1,30	0,986
70 x70	14x14	5x5	4900	39,50	2,90	1,69	1,45	1,30	0,968

Tablo 4.7. Köşeden beslenen kare topraklama ağının darbe empedans değerleri

Ağ Boyutu (m ²)	Göz adedi	Göz boyutu (m ²)	Ağ Alanı (m ²)	Eşdeğer dairesel yarıçap (m)	DARBE EMPEDANSI Ohm				
					T=1 [μs]	T=3 [μs]	T=4 [μs]	T=5 [μs]	T=9 [μs]
4 x4	2x2	2x2	16	2,25	11,6	11,24	11,20	11,18	11,14
8 x 8	4x4	2x2	64	4,51	6,84	5,88	5,79	5,73	5,64
12 x12	6x6	2x2	144	6,77	6,34	4,30	4,13	4,03	3,86
16 x16	8x8	2x2	256	9,03	6,34	3,72	3,42	3,26	3,01
20 x20	10x10	2x2	400	11,29	6,34	3,66	3,17	2,91	2,54
24 x24	12x12	2x2	576	13,54	6,34	3,66	3,17	2,84	2,28
28 x28	14x14	2x2	784	15,80	6,34	3,66	3,17	2,84	2,14



Şekil 4.10. Ortadan besleme durumunda, darbe empedansının ağın kapladığı alana bağlı değişimi.

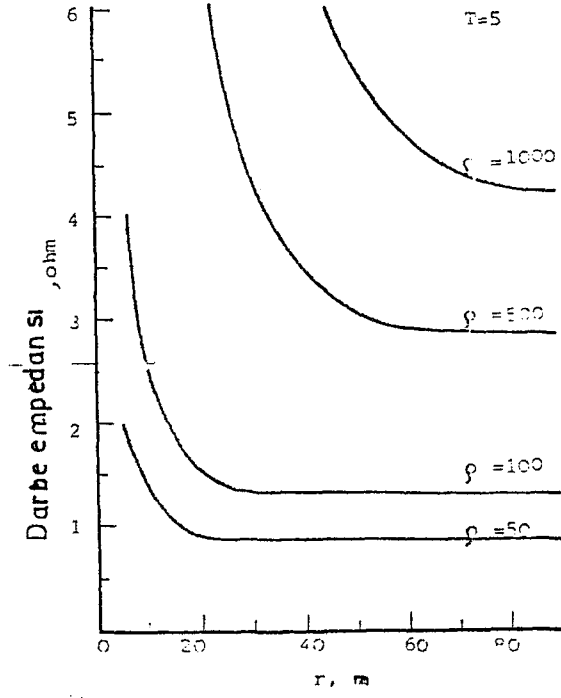


Şekil 4.11. Köşeden besleme durumunda, darbe empedansının ağıın kapladığı alana bağlı değişimi.

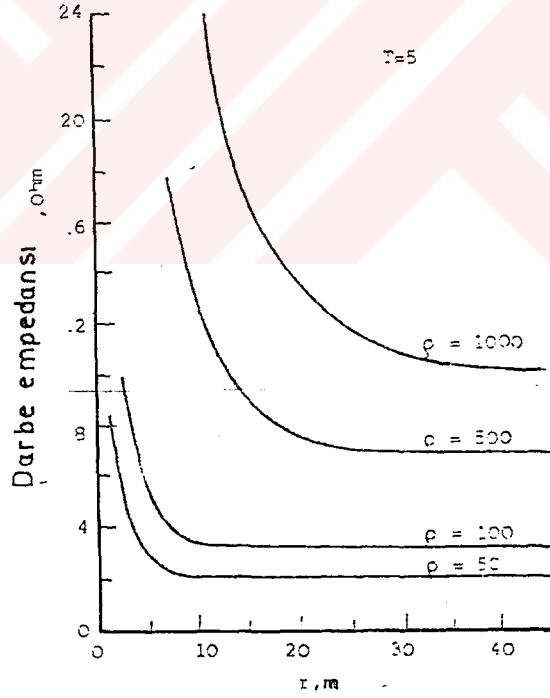
Toprak özgül direncinin, darbe empedansına etkisinin saptanması için aynı göz boyutuna sahip ağların, $T=5\mu s$ ve $\rho=50, 100, 500$ ve 1000 ohm. m özgül direnç değerleri için darbe empedansının değişimi Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de sunulmuştur.

4.3.3. Dikdörtgen Topraklama Ağlarının Darbe Empedansının Bulunması.

Bölüm 4.3.2'de kare topraklama ağının darbe empedansı hesabı için yapılan çalışmaların benzeri dikdörtgen ağların darbe empedansının hesaplanması için de yapılabilir. Buradaki tek farklılık, amprik formülde dikdörtgen ağın uzunluk/genişlik oranını yansıtan X^c faktörünün yer almasıdır [7].



Şekil 4.12. Ortadan besleme durumunda darbe empedansının, toprak özgül direncine bağlı değişimi.



Şekil 4.13. Köşeden besleme durumunda darbe empedansının, toprak özgül direncine bağlı değişimi.

Etkin yarıçap ve darbe empedansı;

$$r_e = \frac{K(\rho T)^{0,5}}{X^c} \quad (4.11)$$

ampirik formülünden hesaplanır.

Burada $K = (1,45 - 0,05s)$; Ortadan besleme için
 $K = (0,6 - 0,025s)$; Köşeden besleme için
 $c = 0,029$; Ortadan besleme için
 $c = 0,08$; Köşeden besleme için

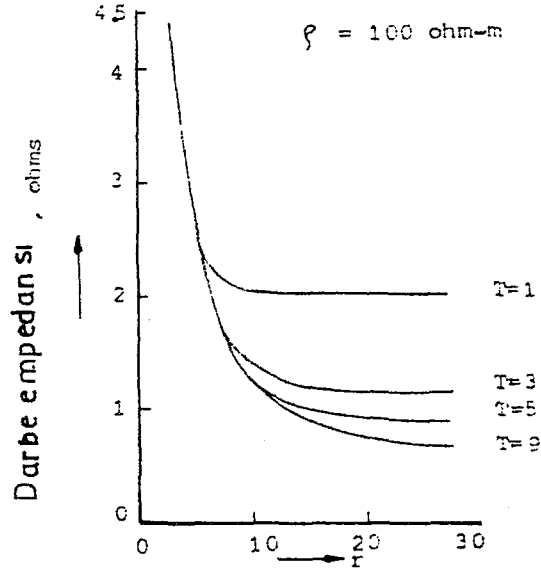
$$r \leq r_e \quad \text{ise} \quad A = e^{0,333 (r/r_e)^{2,3}} \quad (4.12)$$

$$Z_d = A \cdot R$$

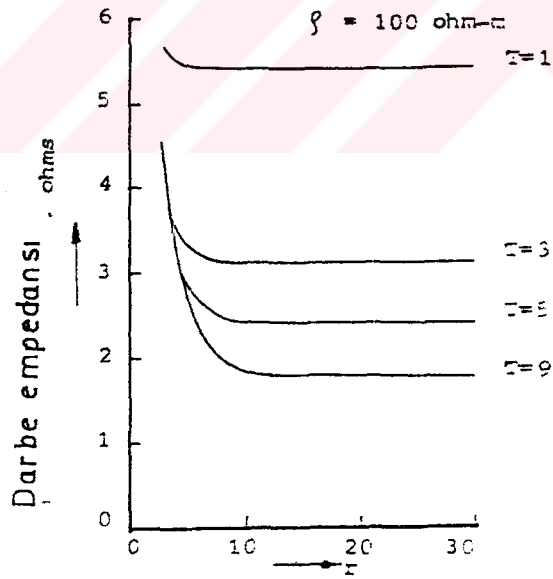
$$r > r_e \quad \text{ise} \quad R = \rho / 4r_e \quad A = e^{0,333} = 1,395 \quad (4.13)$$

$$Z_d = A \cdot R$$

Aşağıda, ortadan ve köşeden beslenen, göz boyutu $4 \times 4 \text{ m}^2$ olan topraklama ağlarının $T = 1, 3, 5, 9 \text{ } \mu\text{s}$ cephe süreli darbe dalgalarına karşı gösterdiği darbe empedanslarının bulunması için yapılan hesaplamalar Tablo 4.8 ve Tablo 4.9'da, darbe empedansının ağı kapladığı alanın yarıçapına göre değişimi Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sunulmuştur.



Şekil 4.14. Ortadan besleme durumunda darbe empedansının ağırlıklı olarak alana bağlı değişimi.



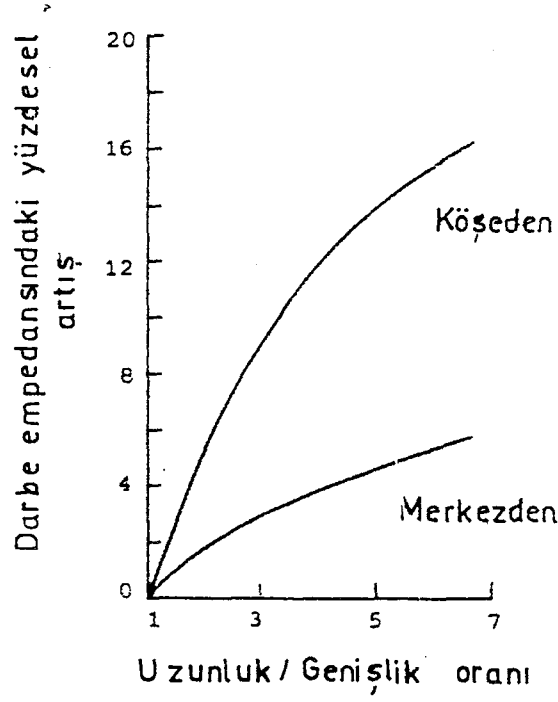
Şekil 4.15. Köşeden besleme durumunda darbe empedansının ağırlıklı olarak alana bağlı değişimi.

Tablo 4.8. Ortadan beslenen dikdörtgen topraklama ağının darbe empedans değerleri

Ağ Boyutu (m ²)	Göz adedi	Göz boyutu (m ²)	Ağ Alanı (m ²)	Eşdeğer daireysel yarıçap (m)	DARBE EMPEDANSI Ohm			
					T=1 [μs]	T=3 [μs]	T=5 [μs]	T=9 [μs]
16x8	4x2	4x4	128	6,38	4,22	4,0	3,97	3,94
24x16	6x4	4x4	384	11,06	2,93	2,43	2,35	2,30
32x16	8x4	4x4	512	12,77	2,84	2,17	2,07	2,01
40x24	10x6	4x4	960	17,49	2,83	1,77	1,61	1,52
48x24	12x6	4x4	1152	19,15	2,83	1,7	1,51	1,40
80x40	20x10	4x4	3200	31,92	2,83	1,64	1,27	0,994
96x48	24x12	4x4	4608	38,31	2,83	1,64	1,27	0,948

Tablo 4.9. Köşeden beslenen dikdörtgen topraklama ağının darbe empedans değerleri

Ağ Boyutu (m ²)	Göz adedi	Göz boyutu (m ²)	Ağ Alanı (m ²)	Eşdeğer daireysel yarıçap (m)	DARBE EMPEDANSI Ohm			
					T=1 [μs]	T=3 [μs]	T=5 [μs]	T=9 [μs]
16x8	4x2	4x4	128	6,38	7,37	4,73	4,35	4,13
24x16	6x4	4x4	384	11,06	7,20	4,16	3,22	2,70
32x16	8x4	4x4	512	12,77	7,37	4,26	3,29	2,54
40x24	10x6	4x4	960	17,49	7,26	4,19	3,25	2,42
48x24	12x6	4x4	1152	19,15	7,37	4,19	3,39	2,46
80x40	20x10	4x4	3200	31,92	7,37	4,19	3,29	2,46
96x48	24x12	4x4	4608	38,31	7,37	4,19	3,29	2,46



Şekil 4.16. Darbe empedansının uzunluk/genişlik oranı ile değişimi

Buraya kadar yapılan hesaplardan ve sunulan grafikler, göz boyutunun sabit kalması koşulu ile göz sayısının dolayısı ile ağ boyutu büyüdükçe ağın darbe empedansının küçüldüğü ve bu belli bir yarıçap değerine kadar sürmekte sonra sabitlenmekte olduğu, ortadan beslenen ağın darbe empedansının, köşeden beslenenkinden daha küçük olduğunu göstermektedir.

Darbe empedansının uzunluk/genişlik oranı ile değişimi Şekil 4.16'da sunulmuştur. Uzunluk/genişlik oranı 2'den az olduğundan darbe empedansındaki artışın küçük olduğu, oranın büyümesi durumundan, sözkonusu artışın belirgin bir duruma geldiği ve bu oranın köşeden beslenen ağlar için de etkisinin oldukça büyük olduğu görülmektedir.

BÖLÜM 5.

TOPRAKLAMA AĞLARININ ANALİZİNDE KULLANILAN SAYISAL YÖNTEMLER

Bu bölümde, topraklama ağlarının; topraklama direnci, göz potansiyeli, toprak yüzeyinde oluşturduğu potansiyel dağılımının dolayısı ile temas ve adım gerilimlerinin bulunması için geliştirilen çeşitli sayısal yöntemler tanıtılacak ve temsili topraklama ağlarına uygulanmasından elde edilecek hesap sonuçları sunulacaktır.

5.1. Eşdeğer Dairesel Levha Yaklaşım Yöntemi

Toprağın altında h derinliğine gömülü levha topraklayıcı için;

I_t = Topraklayıcı akımı, A

D= Eşdeğer dairesel levhanın çapı, m

h= Gömülme derinliği, m

ρ_s = Toprak özgül direnci, ohm.m

olmak üzere, yeryüzünde herhangi bir P noktasındaki V potansiyeli, h derinliğe gömülen bir ağın meydana getirdiği V_1 potansiyeli ile bunun görüntüsünün V_1' potansiyelinin toplamına eşittir. Simetri dolayısı ile $V_1=V_1'$ olduğundan $V=2V_1$ dir. Buna göre yeryüzeyindeki potansiyel dağılımı için,

$$V = I_t \frac{\rho}{\pi D} \arcsin \frac{\sqrt{2}D/2}{\sqrt{r^2 + h^2 + (D/2)^2} + \sqrt{[r^2 + h^2 + (D/2)^2]^2 - 4(D/2)^2 r^2}} \quad (5.1)$$

elde edilir [4].

Burada r ; potansiyeli bulunması istenen $P(x,y)$ noktası ile dairesel levha arasındaki radyan uzaklıktır.

Eğer;

$$1^\circ) \frac{4(D/2)^2 r^2}{[r^2 + h^2 + (D/2)^2]} \ll 1 \quad \text{ise yaklaşık olarak}$$

$$V \cong I_t \frac{\rho}{\pi D} \arcsin \frac{D/2}{\sqrt{r^2 + h^2 + (D/2)^2}} \quad (5.2)$$

2°) $r \gg \sqrt{h^2 + (D/2)^2}$ ise, yani topraklayıcıdan çok büyük uzaklıklarda;

$$V \cong I_t \frac{\rho}{\pi D} \arcsin \frac{D/2}{r} \quad (5.3)$$

bulunur.

Yayıma direnci için ise;

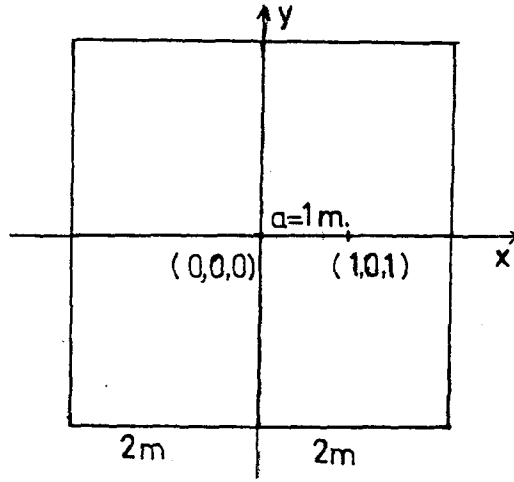
$$R = \frac{\rho}{\pi D} \left[1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{2\sqrt{4h^2 + D^2/4}} \right] \quad (5.4)$$

dir [4].

Temsili topraklama ağ ile ilgili veriler;

2x2 gözlü,

$A=a.b=4 \times 4=16$ m, $h=1$ m, $\rho=100$ ohm. m, $I_t=100$ A., Adım uzunluğu = 1m.



Şekil 5.1. 2x2 gözlü topraklama ağı

(5.1) denkleminin kullanılması ile,

$$V_{(0,0,1)} = 7,89 \text{ V}, \quad V_{(1,0,1)} = 7,62$$

$$V_a = V_{(0,0,1)} - V_{(1,0,1)} = 7,89 - 7,62 = 0,25 \text{ V.}$$

Yayıma direnci ise:

$$R_y = 8,51 \text{ ohm.}$$

olarak bulunur.

Topraklayıcı gerilimi;

$$V_{tk} = I_t \cdot R_y = 100 \cdot 8,51 = 851 \text{ V}$$

Adım gerilimi

$$V_a = 100 \cdot 0,25 = 25 \text{ V}$$

olacağından izin verilen adım gerilimi sınırları içerisinde.

Topraklayıcı gerilimi V_{tk} , %100 kabul edilirse, $V_{göz} / V_{tk}$ oranı, 1x1 gözlü ağ için %64, 2x2 gözlü ağ için %45, 4x4 gözlü ağ için %30 mertebesindedir [4].

Temsili levhanın üzerindeki potansiyel değeri hesap edilirse,

$$V = I_t \frac{\rho}{4D} = 5,53 \text{ V}$$

$$V_{(1,1,0)} = I_t \frac{\rho}{2\pi D} \arcsin \frac{b}{r} = 2,76 \text{ V}$$

$V_{\text{göz}} = 5,53 \times 0,45 = 2,45 \text{ V}$ olarak bulunur. Bulunan bu değer 2,76 V değerine oldukça yakındır.

Pratik hesaplarda, topraklama ağının potansiyel bağıntısı ve yayılma direnci, yaklaşık olarak eşdeğer alana sahip levha topraklayıcının potansiyel bağıntısına ve yayılma direncine eşit olarak alınır ve göz boyutları ne kadar küçük, göz sayısı ne kadar çok ise yani çubuklar ne kadar sık döşenmişse bu yaklaşık o kadar iyidir.

5.2. Topraklama Ağlarında Göz Potansiyelinin Hesabı:

Yüksek gerilim merkezlerinde kullanılan topraklama ağları için hesaplanması gereken en önemli büyüklüklerden biri de göz potansiyelinin hesabıdır [8].

Göz potansiyelinin analitik olarak hesabı için kullanılan yöntemlerden biri de topraklama ağının üzerindeki elektrik potansiyelinin hesabına dayanan elektrostatik analiz yöntemidir [9]. Bu bölümde, sözü edilen analiz yöntemi ile yüzde olarak göz potansiyelinin matematiksel formülü elde edilecek olup, buradan hesaplanan değerler ile [8]'den alınan gerçek değerlerle birlikte tablo halinde sunulacak ve kare gözlü ağlar için hesap ve gerçek değerlerin karşılaştırılması yapılacaktır.

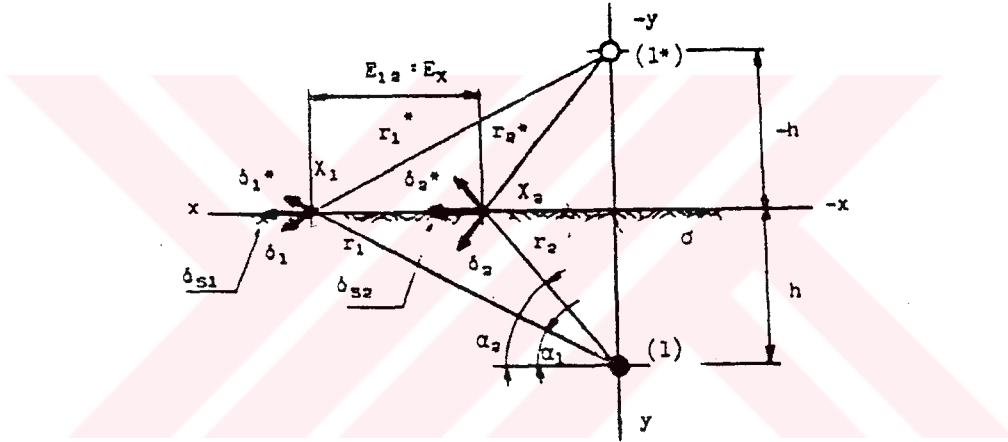
5.2.1. Göz Potansiyel İfadesinin Bulunması

ρ özgül direncine sahip homojen bir ortamda, birim uzunluğunda I akım dağılımı bulunan sonsuz bir çizgisel yükten r_1 uzaklığındaki X_1 ve r_2 uzaklığındaki X_2 noktaları arasındaki potansiyel farkı

$$V_{12} = \frac{gI}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} (1/r) dr = \frac{gI}{2\pi} \ln(r_2/r_1) \quad (5.5)$$

ile ifade edilir [9].

Çizgisel yük, düz toprak yüzeyinin h kadar altına çok derin olmayacak bir biçimde gömüldüğünde, yüzey üzerinde X_1 ve X_2 noktaları arasındaki potansiyel farkı, aynı g özgül dirençli ortam için h derinliğinde (1) yükü ile toprak yüzeyinden $-h$ yukarıdaki (1*) görüntü yükünün birlikte söz konusu X_1 ve X_2 noktalarında oluşturduğu potansiyel farkı olarak hesaplanır.



Şekil 5.2. Bir çizgisel yükün ve görüntüsünün toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel farkı.

Şekil 5.2'de, yüzeyde herhangi bir $X_{(x,0)}$ (burada $X=x_i$, $i=1,2$), noktasında bu durum görülmektedir. (1) ve (1*) nolu yüklerin her ikisinden akmakta olan I akımının yüzeyde birim alanda oluşturduğu yüzey akım yoğunluğu J_s , vektörel olarak;

$$J_s = \frac{I}{2\pi r} (\cos \alpha + j \sin \alpha) + \frac{I}{2\pi r^*} (\cos \alpha - j \sin \alpha) \quad (5.6)$$

dir. Burada α , yatay düzlem ile akımın doğrultusu arasındaki açıdır.

$$|r| = |r^*| = (x^2 + h^2)^{1/2} \text{ ve } \cos \alpha = x/r, \sin \alpha = y/r$$

olduğundan

$$J_s = \frac{I}{2\pi r} (2 \cos \alpha) = \frac{I}{\pi} \frac{x}{x^2 + h^2} \quad (5.7)$$

dir.

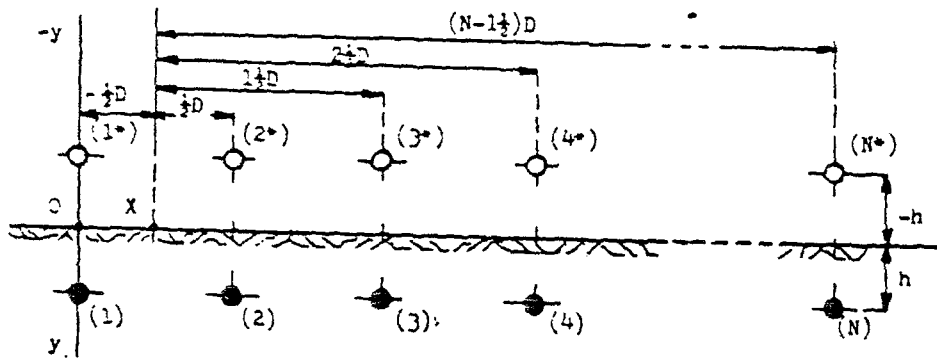
X_1 ve X_2 noktaları arasındaki potansiyel farkı, skaler olarak;

$$V_x = \int_{x_1}^{x_2} J_s ds = \frac{\rho I}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{x dx}{x^2 + h^2} \quad (5.8)$$

gerekli integral alma işlemi yapıldığında;

$$V_x = \frac{\rho I}{2\pi} \ln \left[\frac{x_2^2 + h^2}{x_1^2 + h^2} \right] \quad (5.9)$$

olarak bulunur.



Şekil 5.3. N adet çizgisel yük ve görüntüsü

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi eşit aralıklarla yerleştirilmiş N adet paralel iletken ve görüntülerinin oluşturduğu bir sistemi ele alalım.

Toprak yüzeyinde $O_{(0,0)}$ ve $X_{(-D/2,0)}$ noktaları arasındaki uzaklık “D/2” ve iki çizgisel yük arasındaki uzaklık “D” olsun. O ile X arasında k iletken ve görüntüsünün birlikte oluşturdukları yüzeysel potansiyel

$$V_x(k) = \frac{\rho I}{2\pi} \int_0^{-D/2} \frac{x_{(k)} dx}{x_{(k)}^2 + h^2}, \quad x_{(k)} = (k-1)D + x, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5.10)$$

olarak ifade edilebilir.

İletkenin kendi elektriksel alanının, diğer iletkenlerden etkilenmediği kabulü ile N adet çizgisel yükün ve görüntüsünün O ve X noktaları arasındaki potansiyel ifadesi, her bir iletkenin potansiyel katkısının toplanması ile hesaplanır.

$$V_x = \sum_1^N V_x(k) = \rho I K_{\max}(1, N) = \rho I \sum_1^N \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{(k-3/2)D^2 + h^2}{[(k-1)D]^2 + h^2} \right] \quad (5.11)$$

Burada X eksenini boyunca N adet iletkenin yüzey potansiyelindeki etkisini temsil eden $K_{\max}(1, N)$ faktörü

$$K_{\max}(1, N) = \frac{1}{2\pi} \sum_0^{N-1} \ln \left[\frac{4h^2 + (2k-1)^2 D^2}{4h^2 + 4(kD)^2} \right] \quad (5.12)$$

olarak ifade edilebilir.

O ve X noktaları arasındaki potansiyel farkı (5.11) ifadesiyle hesaplanabilmesine rağmen değeri uzak toprağa ilişkin potansiyel değeri bilinmediğinden hesaplanması gerekmektedir.

N adet iletkenin ve görüntüsünün V_0 potansiyelinde olduğu kabul edilir ise bir toprak arızası durumunda

$$V_0 = R \cdot I \quad (5.13)$$

Burada

R = Topraklama ağının direnci

I =Toprağa akan toplam akım, $I=i \cdot l$

l = İletkenlerin toplam uzunluğu
dir.

Birinci iletkenin ve görüntüsünün O noktasında meydana getirdiği potansiyel;

$$V_0(1) = V_0 - V_y(1) \quad (5.14)$$

Burada (5.14) bağıntısı kullanılır ve hava toprak sınırında iletken yükün ve görüntüsünün yüzeyden 0 noktasına kadar integrali alınır ise;

$$V_y(1) = \frac{\rho I}{2\pi} \ln \left[\frac{4h^2}{4hd - d^2} \right] \quad (5.15)$$

dir.

Diğer iletkenlerin O noktasında oluşturduğu potansiyel

$$V_0(k) = V_0 - V_y(k) \quad k=2,3,\dots,N \quad (5.16)$$

dir.

(5.5) ifadesinin kullanılması ile gerçek kaynak ve görüntüsü için $V_y(k)$ genel olarak;

$$V_y(k) = \frac{\rho I}{4\pi} \ln \left[\frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + d^2/4} \right] \left[\frac{(k-1)^2 D^2 + h^2}{(k-1)^2 D^2 + (2h-d/2)^2} \right] \quad (5.17)$$

şeklinde ifade edilir.

N adet gerçek ve görüntü yükünün O noktasında oluşturduğu potansiyel ifadesi

$$V_0 = V_0 - \sum_1^N V_y(k) = V_0 - \rho I K_{my}(1, N) = V_0 - V_y; \quad V_y = \sum_1^N V_y(k) \quad (5.18)$$

şeklindedir.

Burada

$$K_{my}(1, N) = \frac{1}{4\pi} \sum_0^{N-1} \ln \left[\frac{(kD)^2 + h^2}{(kD)^2 + d^2/4} \right] \left[\frac{(kD)^2 + h^2}{(kD)^2 + (2h-d/2)^2} \right] \quad (5.19)$$

dır.

X noktasındaki potansiyel ifadesi ise

$$V_x = V_0 - (V_x + V_y) = V_0 - \rho I [K_{mx}(1, N) + K_{my}(1, N)] \quad (5.20)$$

Sonuç olarak, tüm topraklama ağının V_0 potansiyeline sahip olması nedeniyle köşedeki gözün ortasında dokunma gerilimi;

$$V_t = V_0 - V_x = V_x + V_y \quad (5.21)$$

1°) Göz faktörü K_m 'in, $N=2$ ve $h \geq 4d$ için hesabı

$N=2$ için, göz gerilimi faktörü, x ve y'nin bileşenleri olarak

$$K_m = K_{mx}^{(1,2)} + K_{my}^{(1,2)} = K_{mx}^{(1)} + K_{mx}^{(2)} + K_{my}^{(1)} + K_{my}^{(2)} \quad (5.22)$$

dir.

Burada

$$K_{mx}^{(1)} = \frac{1}{2\pi} \ln[(4h^2 + D^2) / 4h^2] \quad (5.23)$$

$$K_{mx}^{(2)} = \frac{1}{2\pi} \ln[(4h^2 + D^2) / (4h^2 + 4D^2)] \quad (5.24)$$

$$K_{my}^{(1)} = \frac{1}{2\pi} \ln[4h^2 / (4h^2d - d^2)] \quad (5.25)$$

$$K_{my}^{(2)} = \frac{1}{4\pi} \ln[(h^2 + D^2) / (D^2 + d^2 / 4)] + \frac{1}{4\pi} \ln[(h^2 + D^2) / [D^2 + (2h - d / 2)^2]] \quad (5.26)$$

gerekli işlemler yapılır ise

$$K_m(N=2) = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right] \quad (5.27)$$

şeklinde ifade edilir.

2°) $K'_{mx}(3, N)$ serisinin $h=0$ için yaklaşık hesabı

Bir topraklama ağını temsil eden N adet paralel iletken için, göz potansiyeli faktörü K_m , üç adet bileşenden oluşur.

$$K_m = K'_{my}(1,1) + K'_{mx}(1,2) + K'_{mx}(3,N) \quad (5.28)$$

Burada $h=0$ için

$$K_{mx}^1(3, N) = \frac{1}{\pi} \ln[(3/4) (5/6) (7/8) \dots] \quad (5.29)$$

veya genel olarak

$$K_{mx}^1(3, N) = 1 / \pi \ln (Sn) \quad (5.30)$$

$$Sn = \prod_{k=3}^N \left[\frac{2K-3}{2K-2} \right]$$

$$K_{my}^1(1, 1) = 1/2\pi \ln (h/d) \quad (5.31)$$

$$K_{mx}^1(1, 2) = 1/2\pi \ln (D^2 / 16h^2) \quad (5.32)$$

O halde N adet paralel iletkenden meydana gelen bir topraklama ağında potansiyel ifadesi;

$$V_{göz} = V_{my} + V_{mx} = \frac{\rho I}{L} K_i K_m \quad (5.33)$$

$$V_{göz} = \frac{\rho I}{L\pi} \left[\left(\frac{1}{2} \ln \frac{D^2}{16hd} \right) + \ln(3/4 \cdot 5/6 \cdot 7/8 \dots \frac{2N-3}{2N-2}) \right] K_i \quad (5.34)$$

yani

olarak bulunur [9].

Burada

D; Ağ iletken uzunluğu, m

d; İletken yarıçapı, m

$l_{(0)}$; Toplam iletken uzunluğu, m

K_i ; Düzensizlik faktörü, (0,65+0,172 N)

N; Paralel iletken sayısı, (N-S doğrultusunda)

V_{mx} = Göz potansiyelinin yatay bileşeni

V_{my} =Göz potansiyelinin dikey bileşeni

Buna göre homojen toprak yapısı için ağın topraklama direnci, r eşdeğer yarıçap olmak üzere

$$R = (\rho/4r) + (\rho/L) \quad (5.35)$$

herhangi bir arıza durumunda meydana gelen potansiyel artışı V_r ;

yüzde olarak

$$\% V_{göz} = (V_{göz} / V_r) \times 100 \quad (5.36)$$

$$\% V_{göz} = 4r / \pi (L+4r) [1/2 \ln (D^2/16hd) + \ln (3/4, 5/6 \dots)] \times K_i \times 100 \quad (5.37)$$

şeklinde ifade edilebilir [8-9].

5.2.2. Topraklama Ağlarında Göz Potansiyel Değerlerinin Bulunması

Tablo 5.1'de verilen topraklama ağları için 5.37 ifadesi kullanılarak yüzde olarak hesap edilen göz potansiyel değerleri yine Tablo 5.1'de verilmektedir.

Tablo incelediğinde hesaplanan ve ölçülen potansiyel değerleri [8] arasında %10'dan daha büyük bir fark olmadığı, farkın 16 ve 24 gözlü küçük boyuttaki ağlar için daha büyük olduğu görülmektedir. Yüzde olarak göz potansiyelinin, gömme derinliği ve iletken boyutları ile değişimi nisbeten küçüktür. Gömme derinliğinin 0,3 m'den 0,8 m'ye değişimi, göz potansiyelini %10'dan daha az, iletken çapının 1 cm'den 3 cm'ye değişimi, göz potansiyelini %15'ten daha az değiştirmektedir.

Tablo 5.1. Göz Potansiyel Değerleri

AG Kenar uzunluğu (m)	Göz sayısı	Gömme derinliği (m)	İletken çapı (cm)	Hesaplanan Göz potansiyeli (Yüzdesel)	Ölçülen Göz Potansiyeli (Yüzdesel)
90	1	0,8	3,0	56,90	62,1
90	1	0,3	1,0	68,79	67,5
90	4	0,8	3,0	40,49	39,8
90	4	0,3	1,0	51,04	50,0
90	16	0,8	3,0	26,60	26,8
90	16	0,3	1,0	35,89	36,2
90	64	0,8	3,0	15,12	17,5
90	64	0,3	1,0	23,12	24,5
50	1	0,8	3,0	50,18	57,5
50	1	0,3	1,0	62,07	60,5
50	4	0,8	3,0	36,64	37,2
50	4	0,3	1,0	45,06	47,5
50	16	0,8	3,0	20,98	22,5
50	16	0,3	1,0	30,13	30,5
50	64	0,8	3,0	10,58	16,7
50	64	0,3	1,0	18,59	22,6
20	1	0,8	3,0	39,71	50,0
20	1	0,3	1,0	51,59	59,5
20	4	0,8	3,0	25,20	28,5
20	4	0,3	1,0	35,84	38,1
20	16	0,8	3,0	13,00	17,5
20	16	0,3	1,0	22,11	23,7

16 ve 64 gözlü ağlarda, yüzde olarak göz potansiyeli, köşelerde maksimum, ağın iç kısımlarına doğru orantılı olarak azalır. Köşedeki gözlerin yüzde olarak göz potansiyelinin, iç kısımlarındaki gözlerin göz potansiyeline oranı 16 gözlü ağ için 2,6, 64 gözlü ağ için 3,4'tür.

5.3. Topraklama Ağlarının Yeryüzeyinde Oluşturduğu Potansiyel Dağılımının Kaçak Akım Yöntemi ile Bulunması

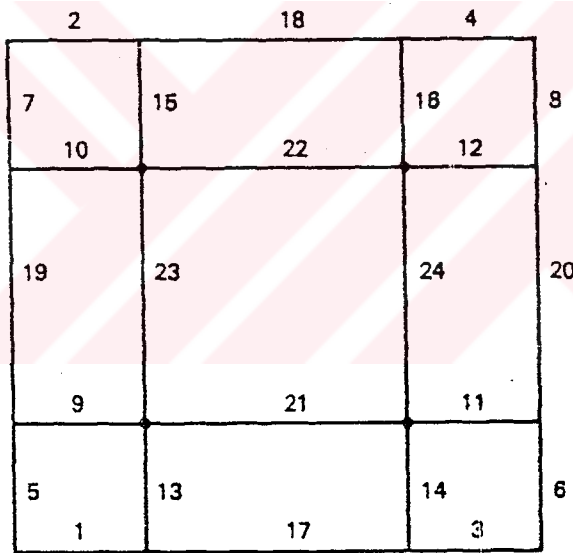
Yöntemin temeli iki işlemi gerektirmektedir. Birincisi ağı meydana getiren iletkenlerin her birindeki kaçak akımların bulunması ve diğeri ise bu kaçak akımların

kullanılması ile toprak yüzeyinin herhangi bir noktasındaki potansiyelin hesaplanmasıdır [10].

5.3.1. Akım Dağılımının Bulunması:

Akım dağılımının bulunması için ağı oluşturan iletkenler kollara ayrılır. Her bir kol doğrusal iletken parçasından meydana gelmektedir. Her bir kol içinde kaçak akım yoğunluğu sabit fakat kollarda birbirinden farklıdır.

Eğer yaklaşımın doğruluğu arttırılmak istenir ise iletkenler daha da küçük kollara ayrılır. Kollara ayrılmadan sonra ikinci adım olarak aynı kaçak akıma sahip (simetrik) kolları ardışık olarak numaralandırılır.



Şekil 5.4. 3x3'lük ağı.

Örneğin Şekil 5.4'de kare ağıda 1'den 8'e kadar olan kolları aynı uzunlukta, buldukları durumları açısından simetrik olmaları nedeniyle aynı kaçak akımlara sahip olduklarından 1.tip kol olarak adlandırılır. Benzer şekilde 9'dan 16'ya kadar olan kolları 2.tip, 17'den 20'ye kadar olan kolları 3.tip, 21'den 24'e kadar olan ve ortada

bulunan kollardan 4.tip olarak adlandırılır. Yani 24 adet kol olmasına karşın hesaplanması gereken sadece 4 farklı akım bulunmaktadır.

Benzer kolların arka arkaya numaralanması, çözüm için kolaylıklar getirmektedir. Aynı tipten kolların sırası rastgele alınabilir fakat numaralama ilk olarak 8 kola sahip tipten başlanmış ise bilgisayar programı sadeleşir sonra 4 kola sahip tiplere geçilir. Dört grupta toplanan kaçak akım değerleri aşağıdaki matrisel denklemin çözülmesi ile bulunabilir;

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} & \Gamma_{24} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} & \Gamma_{34} \\ \Gamma_{41} & \Gamma_{42} & \Gamma_{43} & \Gamma_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (5.38)$$

Bu denklemin Γ_{ij} elemanı j. tipdeki herhangi bir kolun öz direnci ile diğer kollar arasındaki karşılıklı direncinin toplamı, Γ_{jk} elemanı ise j. tipdeki herhangi bir kol ile k. tipdeki kollar arasındaki karşılıklı direncin toplamıdır [10].

Kolların referans toprağa göre potansiyelleri V_j , dört farklı tip kol için kaçak akımlar I_j ise (5.38) eşitliği, herbir kolun kendi kaçak akımının ve diğer bütün kolların kaçak akımlarının meydana getirdiği potansiyellerin toplamının, uygulanan gerilime eşit olması gerektiğini ifade etmektedir [10].

n tip koldan meydana gelen bir ağ için

$$\sum_{k=1}^n \Gamma_{jk} I_k = V_j \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (5.39)$$

yada

$$R \cdot I = V \quad (5.40)$$

yazılabilir.

Burada

R, Öz ve karşılıklı direnç değerleri matrisi

I, n tip kolun kaçak akım vektörü

V, n tip kolun potansiyel vektörü

dür. Şebeke frekansında, iletkenlerin direnci ve indüktif reaktansı, iletkenler ile toprak arasındaki dirence göre küçük olduğundan bütün iletkenlerin aynı potansiyele sahip olduğu kabul edilebilir. Ancak ağın geçici durumlara örneğin yıldırım darbelerine verdiği cevabın araştırılması istenildiğinde, iletkenler oldukça uzun ise şebeke frekansında indüktif reaktans bir önem kazanır. Bu durumda yüzeysel derinlik

$$g = 1/2\pi \sqrt{\rho 10^7 / f} \quad (5.41)$$

olarak ifade edilebilir.

Burada ρ = Ortamın yada toprağın özgül direnci (ohm-m), f = Frekans (Hz)

Bu gibi durumlarda, her bir V_j nin, kolların direnç, indüktans ve karşılıklı direncinden akan kaçak akımların sebep olduğu gerilim düşümü ve uygulanan gerilim cinsinden ifade edilmesine gerek vardır. Burada tüm V_j 'lerin ağa uygulanan gerilime, V , eşit olduğu kabul edilecektir. (5.38) denklemindeki r katsayılarını bulabilmek için, (5.38) denklemindeki r terimleri ile Şekil 5.4'deki numaralanan kollar arasındaki karşılıklı dirençler ile arasında matematiksel bir ilişki kurulması gereklidir.

Gerçek karşılıklı direnç r' olarak gösterilir ve numaralama sistemi Şekil 5.4'e uydurulursa aradaki ilişki;

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^8 r^{1,8(i-1)+1,8(j-1)+k} \quad \begin{array}{l} i=1,2 \\ j=1,2 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
r_{ij} &= \sum_{k=1}^8 r^1_{4(i-1)+9, 8(j-3)+k} & i=3,4 \\
& & j=1,2 \\
r_{ij} &= \sum_{k=17}^{20} r^1_{8(i-1)+1, 4(j-3)+k} & i=1,2 \\
& & j=3,4 & (5.42) \\
r_{ij} &= \sum_{k=17}^{20} r^1_{4(i-1)+9, 4(j-3)+k} & i=3,4 \\
& & j=3,4
\end{aligned}$$

formülleri ile verilebilir. Örneğin r_{44} ; 4.tipdeki kolların kaçak akımlarının 4. tipdeki herhangi bir kolda meydana getirdiği gerilimdir.

Buna göre;

$$\begin{aligned}
r_{11} &= r^1_{1,1} + r^1_{1,2} + r^1_{1,3} + r^1_{1,4} + r^1_{1,5} + r^1_{1,6} + r^1_{1,7} + r^1_{1,8} \\
r_{12} &= r^1_{1,9} + r^1_{1,10} + r^1_{1,11} + r^1_{1,12} + r^1_{1,13} + r^1_{1,14} + r^1_{1,15} + r^1_{1,16} \\
r_{13} &= r^1_{1,17} + r^1_{1,18} + r^1_{1,19} + r^1_{1,20} & (5.43) \\
r_{14} &= r^1_{1,21} + r^1_{1,22} + r^1_{1,23} + r^1_{1,24} \\
r_{22} &= r^1_{9,9} + r^1_{9,10} + r^1_{9,11} + r^1_{9,12} + r^1_{9,13} + r^1_{9,14} + r^1_{9,15} + r^1_{9,16} \\
r_{33} &= r^1_{17,17} + r^1_{17,18} + r^1_{17,19} + r^1_{17,20} \\
r_{44} &= r^1_{21,21} + r^1_{21,22} + r^1_{21,23} + r^1_{21,24}
\end{aligned}$$

yazılarak r katsayıları matrisi oluşturulabilir. Ancak 3×3 'lük bir ağ için $24^2=576$ adet öz ve karşılıklı direncin hesaplanması ve saklanması gerekmekte olduğundan zaman ve bellek kapasitesi sınırlamaları nedeniyle (5.42) denklemlerinde 1. ve 4. eşitliklerde $r_{ij} = r_{ji}$ alınarak hesaplama süresi kısaltılabilir.

5.3.2. Direnç Katsayıları Matrisinin Bulunması:

Herhangi iki kol arasındaki karşılıklı direncin değeri, kollar arası uzaklığa ve açığa bağlıdır. Bir kolun öz direncinin hesabı, iletken yarıçapı r olan iki paralel kolun karşılıklı direncinin hesabına göre daha kolaydır.

5.3.2.1. Öz Direncin Bulunması

Bir kolun öz direnci, uygulanan gerilimin, koldan akan akıma oranıdır. Yani bir başka anlatım ile kol üzerinde oluşan gerilim, koldan akan akımın bir sonucudur. Karşılıklı direnç ise diğer kollardan akan akımların, sözkonusu kolda meydana getirdiği gerilimin o koldan akan akıma oranıdır [10].

l uzunluğunda çıplak bir iletkenin öz direnci, iletken yarıçapı r olmak üzere ve iletkenin toprağa göre görüntüsünün etkisinin de hesaba katılması ile;

$$R_{ij} = \frac{\rho}{2\pi l^2} \left[l \ln \left(\frac{\sqrt{l^2 + r^2} + 1}{r} \cdot \frac{\sqrt{l^2 + r^2 + 4h^2} + 1}{\sqrt{r^2 + 4h^2}} \right) + r + \sqrt{r^2 + 4h^2} - \sqrt{l^2 + r^2} - \sqrt{l^2 + r^2 + 4h^2} \right] \quad (5,44)$$

yada $l \gg h \gg r$ ise

$$R_{ij} = \frac{\rho}{\pi l} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right] \quad (5.45)$$

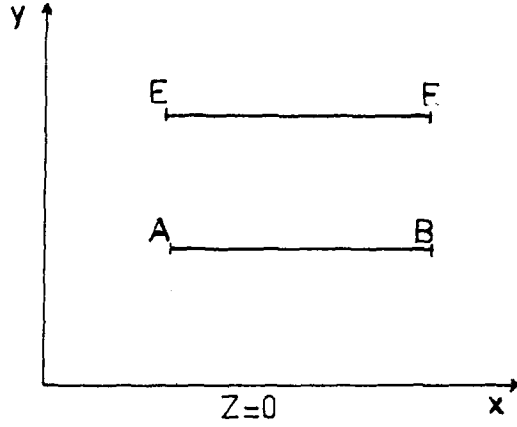
olarak ifade edilebilir.

Burada ρ : Toprak özgül direnci (ohm.m).

h ; x, y, z koordinat sisteminin toprak yüzeyinde seçilmesi koşulu ile akım kaynağının gömülme derinliğidir (m).

5.3.2.2. Karşılıklı Direncin Bulunması:

5.3.2.2.1. Paralel Kollar İçin Karşılıklı Direncin Hesabı



Şekil 5.5. Kartezyen koordinatlarında paralel iletkenlerin durumu.

$$\begin{aligned}
 M = L_1 \ln \frac{\sqrt{(x+l_2-l_1)^2+w^2}+x+l_2-l_1}{\sqrt{(x-l_1)^2+w^2}+x-l_1} + (x+l_2) \ln \frac{\sqrt{(x+l_2-l_1)^2+w^2}-(x+l_2-l_1)}{\sqrt{(x+l_2)^2+w^2}-(x+l_2)} \\
 - x \ln \frac{\sqrt{(x-l_1)^2+w^2}-(x-l_1)}{\sqrt{x^2+w^2}-x} - \sqrt{(x-l_1)^2+w^2} - \sqrt{(x+l_2)^2+w^2} + \sqrt{(x+l_2-l_1)^2+w^2} + \sqrt{x^2+w^2}
 \end{aligned} \quad (5.46)$$

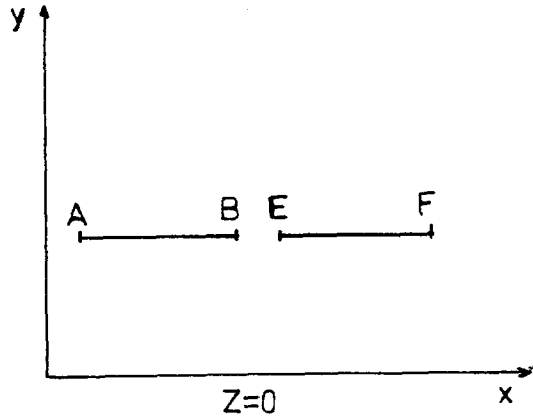
Burada $w^2 = y^2 + z^2$ olmak üzere karşılıklı direnç

$$R = \frac{M \cdot \rho}{4\pi l_1 l_2} \quad (5.47)$$

eşitliğinde M 'in yerine konmasıyla hesaplanır.

Eğer kollar yatay ve aynı düzlemde bulunuyor ise kolların görüntüsünün etkisinin de hesaba katılması için $z=0$ ve $z=2h$ değerleri için M 'in iki farklı değeri bulunur.

5.3.2.2. Aynı Doğrultudaki Kollar İçin Karşılıklı Direncin Hesabı

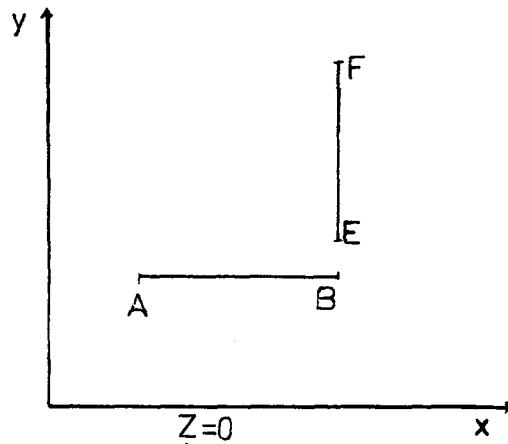


Şekil 5.6. Kartezyen koordinatlarda aynı doğrultudaki iletkenlerin durumu.

5.46 denkleminde sadece $y=r$ alınması ile aynı doğrultudaki kollar için karşılıklı direnç, yukarıda yapılan işlemler tekrarlanarak hesap edilir.

5.3.2.2.3. Birbirine Dik Doğrultudaki Kollar İçin Karşılıklı Direncin Hesabı

Eğer kollar aynı düzlemde birbirine dik konumda ise, AB kolu bir ucu A'da olan ve x,y,z koordinat sisteminde x eksenine paralel olarak yerleşik olan E noktasının koordinatları x,y,z olmak üzere;



Şekil 5.7. Kartezyen koordinatlarda birbirine dik doğrultudaki iletkenlerin durumu.

$$\begin{aligned}
M &= (l_1 - x) \ln \left[\frac{\sqrt{(l_1 - x)^2 + (l_2 + y)^2 + z^2} + l_2 + y}{\sqrt{(l_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + y} \right] \\
&+ x \ln \left[\frac{\sqrt{(x^2 + (l_2 + y)^2 + z^2) + l_2 + y}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + y} \right] + (l_2 + y) \ln \left[\frac{\sqrt{(l_1 - x)^2 + (l_2 + y)^2 + z^2} + l_1 - x}{\sqrt{x^2 + (l_2 + y)^2 + z^2} - x} \right] \\
&- y \ln \left[\frac{\sqrt{(l_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + l_1 - x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - x} \right] - |U|
\end{aligned} \tag{5.48}$$

olarak ifade edilir.

Burada $Z \neq 0$ ise $|U| = 0$ dir.

Eğer $Z = 0$ ise;

$$U = Z \left[\begin{aligned} &\tan^{-1} \left[\frac{(l_1 - x)(l_2 + y)}{Z \sqrt{(l_1 - x)^2 + (l_2 + y)^2 + z^2}} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{(l_1 - x)y}{Z \sqrt{(l_1 - x)^2 + y^2 + z^2}} \right] \\ & - \tan^{-1} \left[\frac{-x(l_2 + y)}{Z \sqrt{x^2 + (l_2 + y)^2 + z^2}} \right] + \tan^{-1} \left[\frac{-xy}{Z \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right] \end{aligned} \right] \tag{5.49}$$

dir.

5.3.2.3. Çok Tabakalı Toprak Yapısında Karşılıklı Direncin Bulunması

Eğer toprak, iki farklı tabakadan meydana gelmekte ve üstteki tabakanın kalınlığı, H , öz direnci g_1 , alttaki tabakanın kalınlığı daha büyük ve özgül direnci g_2 ise karşılıklı direncin iki kez bulunması yerine, birçok kez bulunması gerekir. Bu durumda K yansıtma katsayısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$K = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1) \quad (5.50)$$

Her iki kolun üstteki toprak tabakasında olması durumu;

$$R_m = \frac{\rho_1}{4\pi l_1 l_2} \left[\sum_{n=0}^{\infty} K^n \left[M(2nH + Z_i + Z_j) + M(2nH + Z_j - Z_i) \right] + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[M(2nH - Z_j + Z_i) + M(2nH - Z_j - Z_i) \right] \right] \quad (5.51)$$

Burada M, bir kolun diğer kollara göre l uzunluğuna ve θ açısına bağlı olarak x ve y'nin bir fonksiyonudur. Fakat burada ele alınan kollarm etkilerinin tümü için aynıdır.

Homojen toprak yapısı için ($K=0$), $n=0$ ise (5.51) eşitliğinde $0^0 = 1$ olduğundan (5.51) eşitliği

$$R_m = \frac{\rho_1}{4\pi l_1 l_2} \left[M(Z_i + Z_j) + M(Z_i - Z_j) \right] \quad (5.52)$$

olarak sadeleştirilebilir.

Her iki kolun alttaki toprak tabakasında olması durumu;

$$R_m = \frac{\rho_2}{4\pi l_1 l_2} \left[M(Z_j - Z_i) - KM(2H - Z_j + Z_i) + (1 - K^2) \sum_{n=0}^{\infty} K^n M(2nH + Z_j + Z_i) \right] \quad (5.53)$$

Kolların farklı toprak tabakasında olması durumu;

$$R_m = \frac{\rho_2 (1 - k)}{4\pi l_1 l_2} \left[M(Z_j - Z_i) + \sum_{n=0}^{\infty} K^n M(2nH + Z_j + Z_i) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n (2nH + Z_j - Z_i) \right] \quad (5.54)$$

5.3.3. Toprak Yüzeyi Potansiyelinin Bulunması:

Farklı tipteki kollar için kaçak akımları bulunduktan sonra, tüm kolların katkılarının toplanması ile ağıdan uzak yeryüzeyindeki herhangi bir noktadaki yüzey potansiyeli bulunabilir.

l uzunluğundaki herhangi bir kolun I kaçak akımının katkısının kullanımı ile toprak yüzeyindeki potansiyel ifadesi;

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi d} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + h^2} + x-l} \quad (5.55)$$

olarak verilebilir.

Eğer yüzeye yakın toprak tabakasının kalınlığı H , özgül direnci ρ_1 ve alttaki tabakının özgül direnci ρ_2 ise (5.55) denklemi;

Kol üst tabakada ise;

$$V = \frac{I\rho_1}{2\pi d} \left[\ln \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + h^2} + x-l} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left[\ln \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h)^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + (2nH+h)^2} + x-l} \right] + \ln \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH-h)^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + (2nH-h)^2} + x-l} \right] \right] \right] \quad (5.56)$$

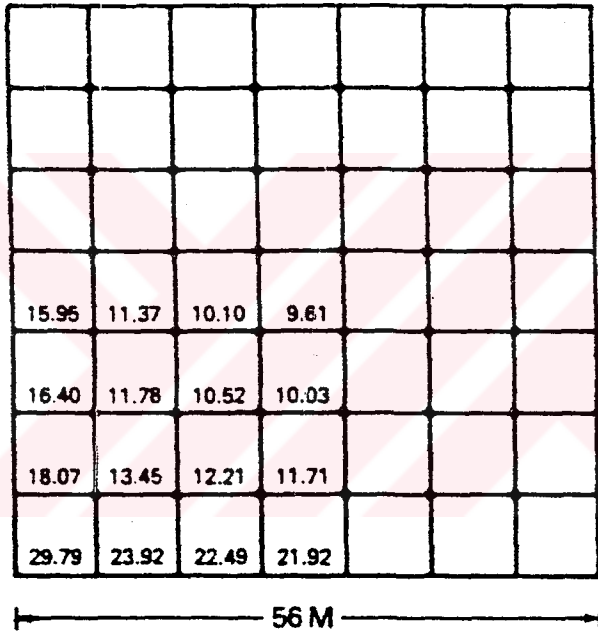
Kol alttaki tabakada ise;

$$V = \frac{I\rho_1(1+K)}{2\pi l} \left[\ln \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + h^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + h^2} + x-l} \right] + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (2nH+h)^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + (2nH+h)^2} + x-l} \right] \right] \quad (5,57)$$

dir.

5.3.4. Yöntemin Topraklama Ağına Uygulanması:

Şekil 5.8'deki 7x7 gözlü ağ ile ilgili veriler şunlardır;



Şekil 5.8. 7x7'lik topraklama ağı

S: Göz kenar uzunluğu :8 m:

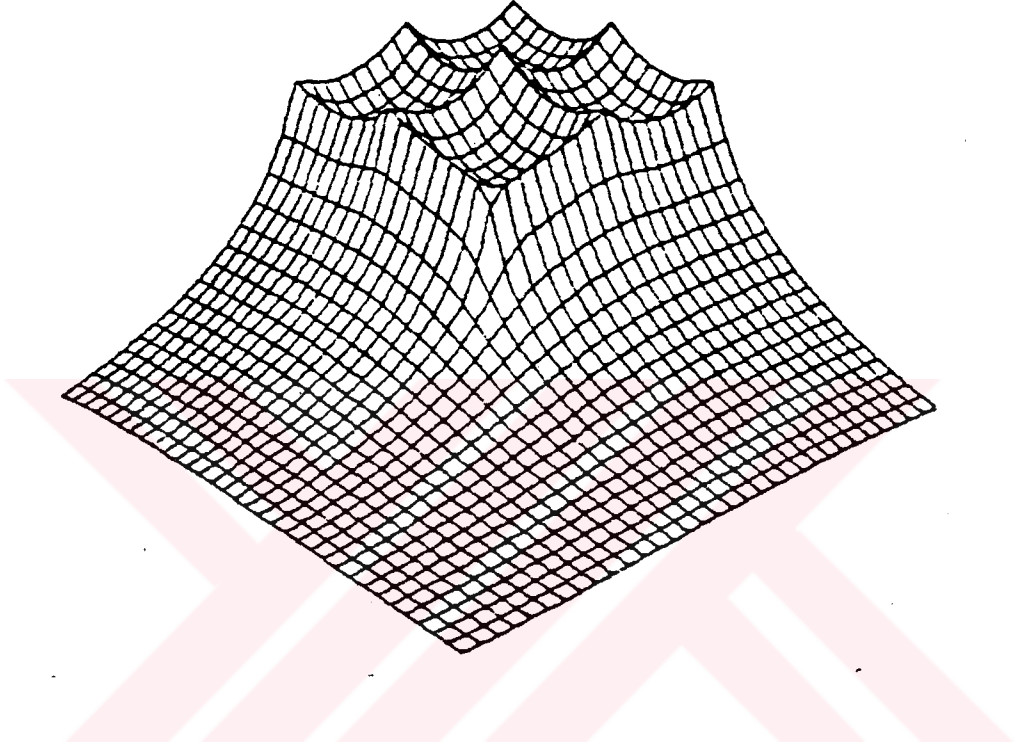
h: Gömülme derinliği:0,5 m.

ρ : Toprak özgül direnci:1000 ohm.m

r: Ağı oluşturan iletkenlerin yarıçapı:0,007 m

V: Uygulanan gerilim:15.000 V

Sözkonusu yöntemin 7x7 gözlü topraklama ağına uygulanması ile bulunan akım dağılımı Şekil 5.8'de toprak yüzeyinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 5.9'da sunulmaktadır.



Şekil 5.9. 7x7'lik topraklama ağının köşeye yakın gözleri için toprak yüzeyinde oluşturduğu potansiyel dağılımı.

BÖLÜM 6.

TOPRAKLAMA AĞLARININ TOPRAK YÜZEYİNDE OLUŞTURDUĞU POTANSİYEL DAĞILIMININ YÜK BENZETİM YÖNTEMİ İLE BULUNMASI

6.1.Genel Bilgi

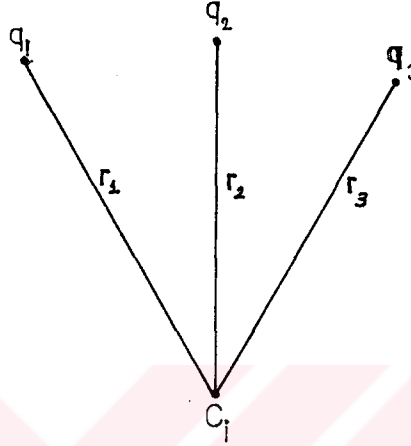
Yük Benzetim Yöntemi (YBY) ile elektrostatik alan incelemesinin temeli, alanın yüklerle benzetilmesi ilkesine dayanır. Bu yöntemde gerçek elektriksel alan yerine, alanın çözüleceği bölgenin dışına yerleştirilen belirli sayıda ayrık yükün oluşturduğu alan alınır. Burada elektrotların yüzeyine fiziksel olarak dağılmış yüzeysel yükler yerine “ayrık yükler” konur. Ayrık yüklerin değerleri, sınır üzerinde seçilen belirli sayıda sınır noktasında sınır koşullarının sağlanmasıyla belirlenir. Bu yüklerin oluşturduğu potansiyeller, incelenen bölge içinde Laplace veya Poisson denklemini sağladığından sözkonusu bölge içinde çözüm tektir. Yani benzetim yüklerinin yerleri ve değerleri bilinirse, sözkonusu bölge içinde herhangi bir noktadaki potansiyel ve alan şiddeti kolaylıkla hesaplanabilir [11-12]. Bu yöntemde yeterli doğruluk elde etmek için çok sayıda uygun yük kullanılmasına ve bu yüklerin uygun yerleştirilmesine gerek vardır ve bu nedenle de sayısal hesap yapmak gerekmektedir.

Yük Benzetim Yöntemi, elektroteknikteki toplama ilkesine dayanır. Buna göre, eğer bir bölge içerisinde herhangi tipten birçok ayrık yük (örneğin noktasal, çizgisel veya halkasal) var ise herhangi bir noktadaki elektrostatik potansiyel bu nokta ile herhangi bir yükün bulunduğu nokta olmadığı sürece, her bir yükün ayrı ayrı bu noktada oluşturduğu potansiyellerin toplamına eşittir [12].

q_j , n adet ayrık yükten biri ve V_i de bu bölge içinde herhangi bir noktadaki potansiyel olsun. Toplama ilkesine göre;

$$V_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot q_j \quad (6.1)$$

olur. Burada p_{ij} , her yük tipi için değeri Laplace veya Poisson denklemlerinin çözülmesi ile hesaplanan "Potansiyel katsayıları" dır.



Şekil 6.1. Üç adet ayrık yükün bir noktada oluşturduğu potansiyel.

Örneğin Şekil 6.1'de gösterilen serbest uzaydaki üç adet noktasal yükün (q_1 , q_2 , q_3) C_i noktasında oluşturdukları V_i potansiyeli

$$V_i = \frac{q_1}{4\pi\epsilon r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon r_2} + \frac{q_3}{4\pi\epsilon r_3} \quad (6.2)$$

$$V_i = p_{i1} \cdot q_1 + p_{i2} \cdot q_2 + p_{i3} \cdot q_3$$

bağıntısıyla verilebilir [12].

Böylece, bir defa yüklerin tipi ve yerleri tanımlandıktan sonra, herhangi bir sınır noktasında V_i ile q_j arasında matematiksel bir bağıntı kurmak mümkündür. YBY ile elektrostatik alanların hesabında, elektrotların yüzeyine dağılmış olan yükler yerine kullanılan n adet "benzetim yükü", çözümü istenen bölgenin dışına (veya elektrot gibi herhangi bir eşpotansiyel yüzey içerisine) yerleştirilir.

Eğer C_i sınır noktası bir iletkenin yüzeyinde alınmış bir nokta ise, o zaman bu “sınır” noktasındaki V_i potansiyeli iletkenin potansiyeli olan V_e 'ye eşittir. Bu işlem m adet sınır noktasına uygulandığı zaman, n adet bilinmeyen yük için m adet denklemden oluşan bir lineer denklem sistemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_m \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

6.2. Benzetim Yükü Tipleri:

YBY'nin uygulamasının başarılı olabilmesi, uygun tipte benzetim yükünün seçilmesine bağlıdır [12]. Literatürde, noktasal, sonsuz ve yarı sonsuz uzunlukta çizgisel, eliptik silindrsel, küresel, düzlemsel, disk tipi, sabit yük yoğunluklu halkasal, hacimsel, tabaka ve halka şeklinde düzlemsel, değişken yoğunluklu çizgisel yükler gibi benzetim yükü türleri bulunmaktadır.

Topraklama ağlarının analizinde probleme uyması bakımından bu çalışmada sadece noktasal, sonsuz ve yarı sonsuz uzunluktaki çizgisel benzetim yükü tipleri ele alınacaktır.

6.2.1. Noktasal Yükün Alan ve Potansiyeli:

Noktasal bir yükün alanı Coulomb kanunundan gidilerek bulunur. Buna göre boyutları, aralarındaki açıklığa göre çok küçük olan yüklü iletken iki cisim arasında, yüklerin işaretine göre meydana gelen çekme veya itme kuvveti, bu yüklerin çarpımı ile orantılı ve aralarındaki uzaklığın karesi ile ters orantılıdır. Bu kuvvetler diğer taraftan dielektrik ortamın cinsine, yani ortamın dielektrik sabitine de bağlıdır.

İzotrop, homojen bir ortamda hareketsiz durumunda bulunan ve aralarındaki uzaklık r olan q ve q' gibi noktasal iki yük arasında, bu yükleri birleştirilen doğrultuda, radyal yönde meydana gelen kuvvet, Coulomb kanuna göre vektörel olarak

$$\vec{F} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon r^2} \cdot \vec{U}_r \quad (6.4)$$

şeklinde ifade edilir. Burada U_r , yükleri birleştiren doğrultu üzerinde, bir yükten diğerine yönelik radyal yöndeki birim vektörü, ϵ ise ortamın dielektrik sabitidir.

Bu kuvvet

$$\vec{F} = q' \cdot \vec{E} \quad (6.5)$$

bağıntısı ile, elektrik alan şiddeti ise

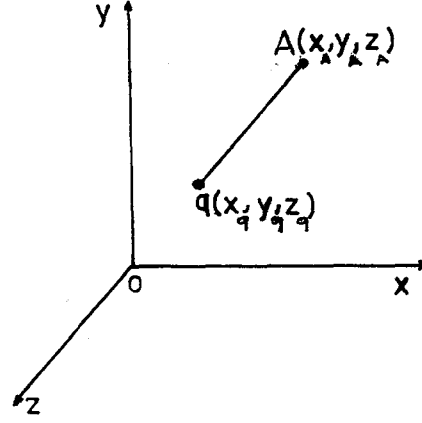
$$\vec{E} = \vec{F} / q' \quad (6.6)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \vec{U}_r = E \cdot \vec{U}_r \quad (6.7)$$

$$|E| = Er = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \quad (6.8)$$

Bu bağıntılar, q noktasal yükünden r uzaklığında bulunan bir A noktasındaki alan şiddeti verir.



Şekil 6.2. Kartezyen koordinatlarda q noktasal yükü

Burada

$$r = \sqrt{(x_A - x_q)^2 + (y_A - y_q)^2 + (z_A - z_q)^2} \quad (6.9)$$

dir.

Noktasal bir yükün alanında, bu yükten uzaklığı r olan herhangi bir noktası sonsuza göre mutlak potansiyeli ise;

$$V = \int_r^{\infty} \vec{E} d\vec{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} = \frac{q}{4\pi\epsilon r} \quad (6.10)$$

bağıntısı ile bulunur. $r \rightarrow \infty$ için $V=0$ olacağından, sonsuzdaki bir nokta, noktasal yükün potansiyel alanı için referans bir nokta olarak alınabilir.

(6.10) ifadesi

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon r} = \frac{1}{4\pi\epsilon r} \cdot q = p \cdot q \quad (6.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$p = 1/4\pi\epsilon r \quad (6.12)$$

terimine noktasal yükün “potansiyel katsayısı” denir.

Şekil 6.2’den yararlanarak

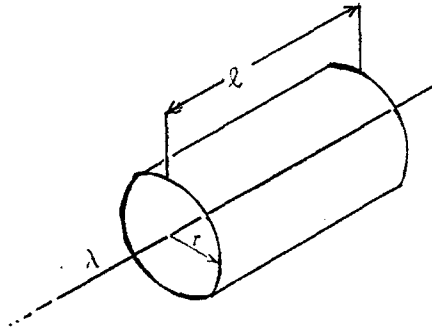
$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon \sqrt{(x_A - x_q)^2 + (y_A - y_q)^2 + (Z_A - Z_q)^2}} \quad (6.13)$$

yazılabilir.

6.2.2. Sonsuz Uzun Çizgisel Yükün Alanı ve Potansiyeli

Bir iletkenin üzerindeki yükün, sonsuz uzunluktaki çizgisel yüklerle benzetiminin yapılması, dairesel silindrsel iletkenlerin elektrostatik alanının hesabı için bilenen bir yoldur.

Yarıçapı sonsuz küçük olan düzgün yüklü, çok uzun doğrusal bir iletken, çizgisel bir yük kaynağı olarak ele alınabilir. Böyle bir kaynağın alanı, aksenal simetriden dolayı radyan doğrultuda olacağından, alan çizgileri iletken yüzeyini dik olarak keserler. Çizgisel yük kaynağına dik paralel düzlemlerdeki alan şekilleri birbirinin aynı olur. Alan değişimi sadece radyal yönde meydana gelir. Bu sebeple, bu gibi alanlara iki boyutlu alan veya diğer bir deyimle “paralel düzlemsel alanlar” denir.



Şekil 6.3. Gauss teoreminden yararlanılarak bir çizgisel yükün alanının bulunması

Çizgisel yük kaynağının l uzunluğundaki bir parçasını ele alalım. Bu parçanın toplam yükü q olsun. Sözkonusu düzgün yük dağılımı kaynağın çizgisel yük yoğunluğunu $\lambda = q/l$ ile gösterelim. Kaynağın l parçasının her iki ucunun, kaynağa dik birer düzlem ile kesildiğini kabul edelim. Yük kaynağını kuşatan, eşeksenli r yarıçaplı bir silindir yüzeyine Gauss teoremi uygulanır ise, bu yüzeyin herhangi bir noktasındaki deplasman ve alan şiddeti için,

$$\int_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_s D_r \cdot d\vec{s} = D_r \cdot 2\pi r \cdot l = q = \lambda \cdot l \quad (6.14)$$

$$D_r = \frac{q}{2\pi r \cdot l} = \frac{\lambda}{2\pi r}, \quad \vec{D} = D_r \cdot \vec{U}_r \quad (6.15)$$

$$E_r = \lambda / 2\pi\epsilon r, \quad \vec{E} = E_r \cdot \vec{U}_r \quad (6.16)$$

bağıntıları elde edilir.

Çizgisel yükün potansiyeli ise,

$$V = -\int \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\int E_r \cdot d_r = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \int \frac{d_r}{r} = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r + K \quad (6.17)$$

bağıntısı yardımıyla bulunur. Burada, K integral sabitinin değeri, potansiyeli sıfır kabul edilen referans noktasına göre sınır koşullarından bulunur. Referans noktası A ve referans noktasının çizgisel yük kaynağına uzaklığı r_A ile gösterilirse $r=r_A$ için referans noktası potansiyeli sıfır olacağına göre ($V_A=0$),

$$0 = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r_A + K \quad (6.18)$$

$$K = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln r_A$$

bağıntısı ve dolayısıyla potansiyel ifadesi için de,

$$V = -\frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r}{r_A} = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_A}{r} \quad (6.19)$$

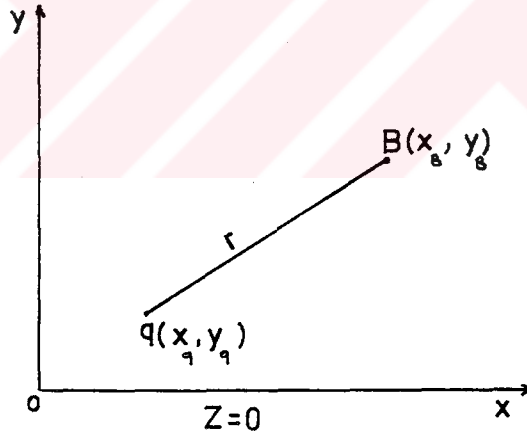
bağıntısı bulunur.

$$V = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_A}{r} = \left(\frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_A}{r} \right) \cdot q = p \cdot q \quad (6.20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$p = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{r_A}{r} \quad (6.21)$$

sonsuz çizgisel yükün “potansiyel katsayısı”dır. r_A ise çizgisel yükün, potansiyeli sıfır olan noktaya olan uzaklığıdır. r ise;

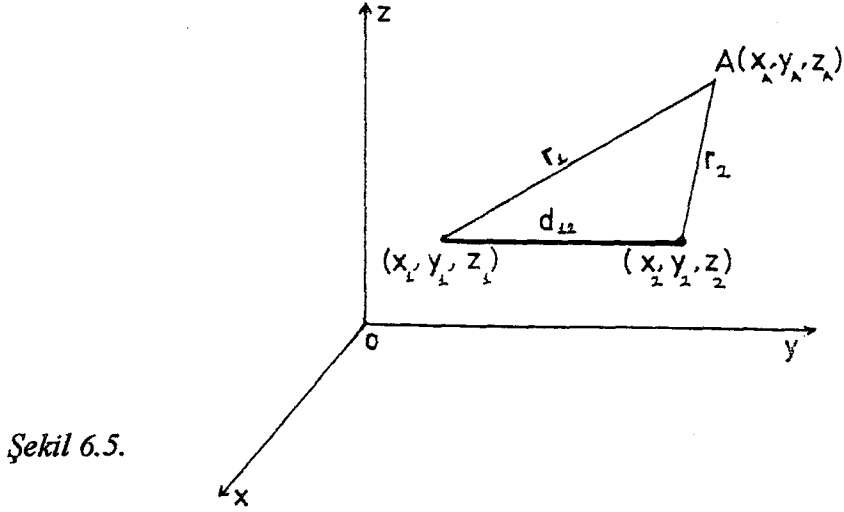


Şekil 6.4. Potansiyel ifadesinde bulunan r uzaklığının gösterilmesi

$$r = \sqrt{(x_B - x_q)^2 + (y_B - y_q)^2} \quad (6.22)$$

dir.

6.2.3. Sonlu Çizgisel Yükün Alan ve Potansiyeli:



Şekil 6.5.

Şekil 6.5'de görülen sonlu uzunluktaki bir çizgisel yükün A (x_A, y_A, z_A) noktasında oluşturduğu potansiyel;

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon d_{12}} \ln \left[\frac{r_1 + r_2 + d_{12}}{r_1 + r_2 - d_{12}} \right] \quad (6.23)$$

ifadesi ile verilebilir [11].

Burada;

$$r_1 = \sqrt{(x_A - x_1)^2 + (y_A - y_1)^2 + (z_A - z_1)^2}$$

$$r_2 = \sqrt{(x_A - x_2)^2 + (y_A - y_2)^2 + (z_A - z_2)^2} \quad (6.24)$$

$$d_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

$$V = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon d_{12}} \ln \left[\frac{r_1 + r_2 + d_{12}}{r_1 + r_2 - d_{12}} \right] \right] q = p \cdot q \quad (6.25)$$

şeklinde yazılabilir. Burada

$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon d_{12}} \ln \left[\frac{r_1 + r_2 + d_{12}}{r_1 + r_2 - d_{12}} \right] \quad (6.26)$$

ifadesi sonlu çizgisel yükün “potansiyel katsayısı”dır.

Sonlu çizgisel yükün alan bileşenlerinin ifadeleri ise potansiyelin r ve z 'ye göre türevleri alınarak elde edilebilir.

6.3. YBY'nin Topraklama Ağlarına Uygulanması:

Statik elektrik alan problemlerinde yük benzetim yöntemi oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem H. Steinbigler tarafından geliştirilmiş olup, ortalama potansiyel yöntemi yada matris yöntemi olarak bilinmektedir

Yöntem, topraklama ağını oluşturan iletkenlerde akmakta olan I_1, I_2, \dots, I_n akımlarını; bilinmeyen benzetim akımları olarak ele alır. Her iletkenin yüzeyinde $V_1 = V_2 = \dots = V_n$ potansiyelleri yüzde olarak ya da volt olarak verilir [11]. Eğer iletkenlerin direnci ve indüktif reaktansı, iletkenler ile toprak arasındaki dirence göre küçük ise, bütün iletkenlerin aynı potansiyele sahip olduğu kabul edilebilir [10].

$$[R] \cdot [I] = [V] \quad (6.27)$$

eşitliği, matris şeklinde ifade edilebilir.

Burada n = Bilinmeyen akımların sayısı
 $[R]$ = Direnç katsayıları matrisi; $n \times n$
 $[I]$ = Bilinmeyen akım sütun matrisi; $n \times 1$
 $[V]$ = Ağ potansiyel sütun matrisi ; $n \times 1$

$[R]$ matrisinin R_{ij} elemanı, j iletkenden akan birim akımın i iletken üzerinde bir noktada meydana getirdiği R_{ij} değerini ifade eder.

6.27. eşitliği ile verilen denklemin çözülmesi ile [I] bilinmeyen akımlar matrisi bulunabilir ve buradan herhangi bir P noktasındaki potansiyel

$$V_p = [R] \cdot [I] \quad (6.28)$$

olarak hesaplanabilir.

Burada $[R] = [R_1, R_2, \dots, R_n]$; $[1 \times n]$ direnç katsayı matrisinin, iletkenler ile potansiyeli hesaplanması istenen nokta arasındaki geometriye bağlı olarak yeniden tanımlanması gerekmektedir

Topraklama ağlarının YBY ile analizi için (6.23) ifadesinde, q yükü yerine I akımının, ϵ yerine ağın bulunduğu ortamın iletkenliğinin ' σ ' alınması ile yani ağ meydana getiren iletkenlerin her birinin sonlu çizgisel akım kaynağı kabulü ile kartezyen koordinat sisteminde $X_1; (x_1, y_1, z_1)$ ve $X_2; (x_2, y_2, z_2)$ noktaları arasına yerleştirilen I çizgisel akım kaynağının herhangi bir (x, y, z) noktasında meydana getirdiği $V_{(x,y,z)}$ potansiyeli aşağıda

$$V = \frac{I}{4\pi\sigma d_{12}} \ln \left[\frac{r_1 + r_2 + d_{12}}{r_1 + r_2 - d_{12}} \right] \quad (6.29)$$

$$V = p \cdot I \quad (6.30)$$

olarak gösterildiğinde sonlu çizgisel akım kaynağının potansiyel katsayısı

$$p = \frac{1}{4\pi\sigma d_{12}} \ln \left[\frac{r_1 + r_2 + d_{12}}{r_1 + r_2 - d_{12}} \right] \quad (6.31)$$

olarak bulunabilir.

Burada

r_1, r_2 ve d_{12} 6.24'deki ifadelerin aynısıdır.

$\sigma = 1/\rho$; ortamın iletkenliği (1/ohm.m=S(siemens)/m)

ρ = Ortamın yani toprağın özgül direncidir. (ohm.m)

6.4. Topraklama Ağlarının YBY ile İncelenmesine İlişkin Uygulamalar

Burada, topraklama ağlarında YBY ile alan dağılımı hesabına ait örnekler verilecektir. Ayrıca geliştirilen bilgisayar programının ayrıntıları verilerek bu konuda YBY'nin uygulama kolaylığı ve doğruluğu gösterilecektir.

Bu bölümdeki uygulamalarda, sonlu çizgisel yükler kullanılarak çeşitli topraklama ağlarında, akım dağılımı, toprak geçiş direnç değerleri hesaplanmış, topraklama ağlarının belirli koordinatlarında ağın gözlerindeki potansiyel yükselmesinin yüzde yada volt olarak değerleri bulunarak, buradan hareketle sözkonusu ağ sistemleri için potansiyel dağılımları üç boyutlu olarak elde edilmiştir.

Geliştirilen bilgisayar programı Quick-Basic programlama dilinde yazılmıştır. YBY ile sonlu çizgisel yük tipi için çözümün ana adımları Şekil 6.6'da akış diyagramında gösterilmiştir.

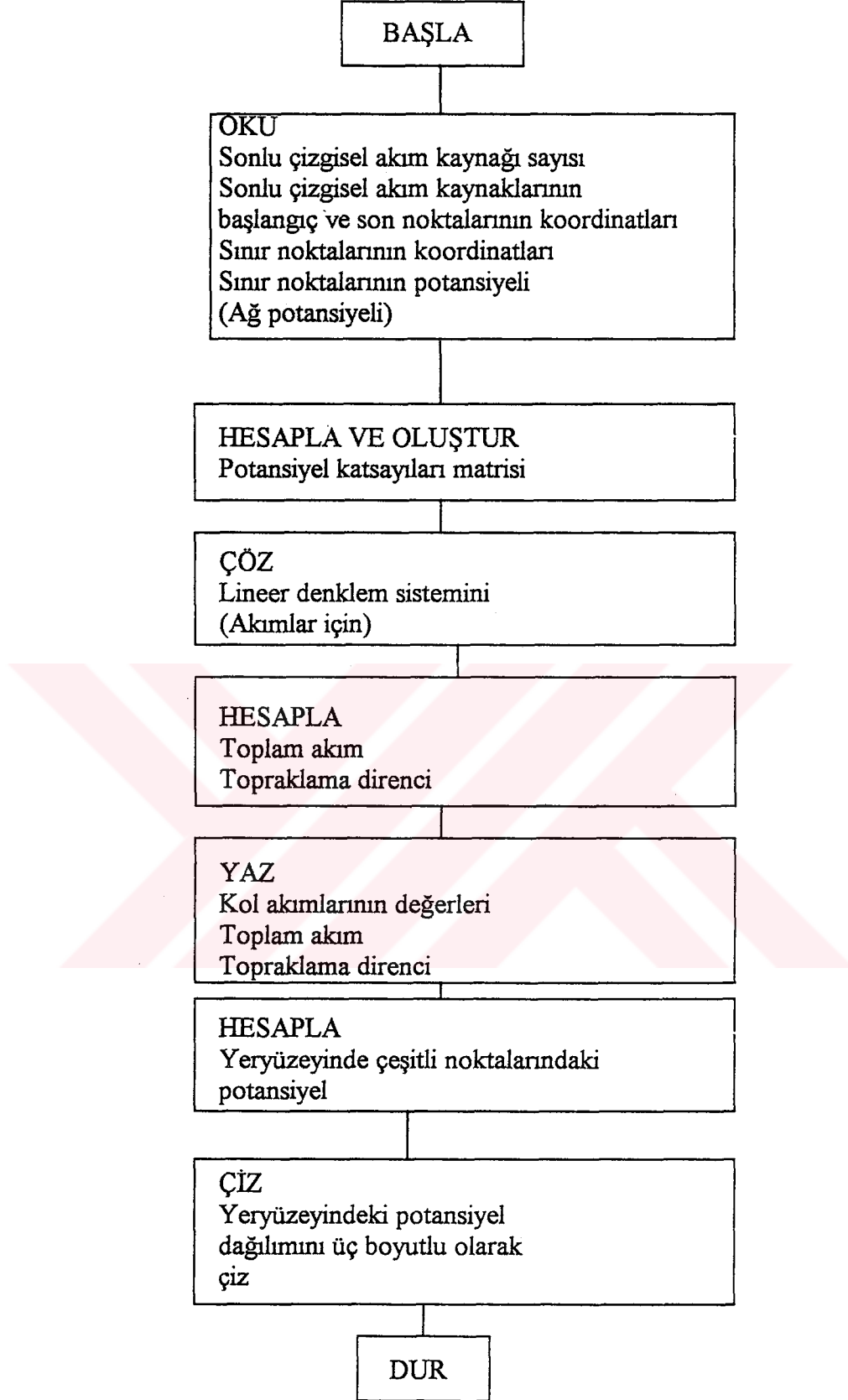
Yöntemde ortaya çıkan lineer denklem sistemi Gauss-indirgemesi yöntemiyle çözülmüştür.

Homojen toprak yapısı için çözümün yapıldığı YBY'de, sonlu çizgisel akım kaynaklarının sayısı ile sınır noktalarının sayısı birbirine eşit alınmıştır.

Ele alınacak olan ağ sistemlerinin yeryüzeyinde oluşturduğu potansiyel dağılımının bulunmasında giriş verileri olarak;

- 1) Sonlu çizgisel akımların sayısı ve koordinatları.
- 2) Ağ üzerinde seçilen sınır noktalarının koordinatları
- 3) Ağ potansiyeli

ve yöntemlerin karşılaştırması bakımından uygunluk olması için bölüm 5.3.4'de sunulan giriş verileri;



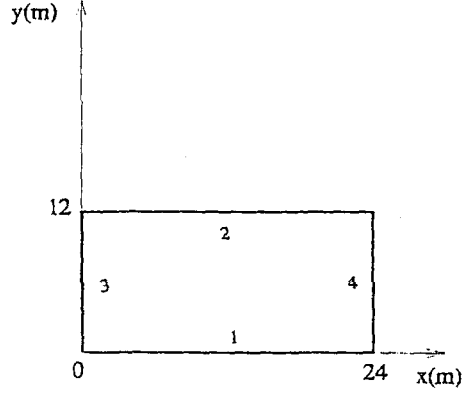
Şekil 6.6. Yük benzetim yöntemine göre geliştirilen bilgisayar programı akış diyagramı

$S=8m=80dm$, $h=0,5m=5dm$, $\rho=100 \text{ ohm.m}=1000 \text{ ohm.dm}$, $r=0,007m=0,07dm$

$V=15000 \text{ Volt}$ olarak alınmıştır.

6.4.1. 1 x 1 Gözlü Dikdörtgen Ağ

Ele alınan ağ, Şekil 6.7'de gösterilmektedir.



Şekil 6.7. 1x1 gözlü dikdörtgen ağ

Bölüm 6.4.'teki giriş verileri kullanılarak bulunan, 1x1 gözlü dikdörtgen ağın her bir kolunda akmakta olan akım ve topraklama direnç değeri ile topraklama ağının merkezi referans olmak üzere, göz potansiyeli ve göz gerilimlerinin Volt ve yüzdesel olarak değerleri aşağıda sunulmaktadır.

YBY ile Hesaplanan Kol Akımları:

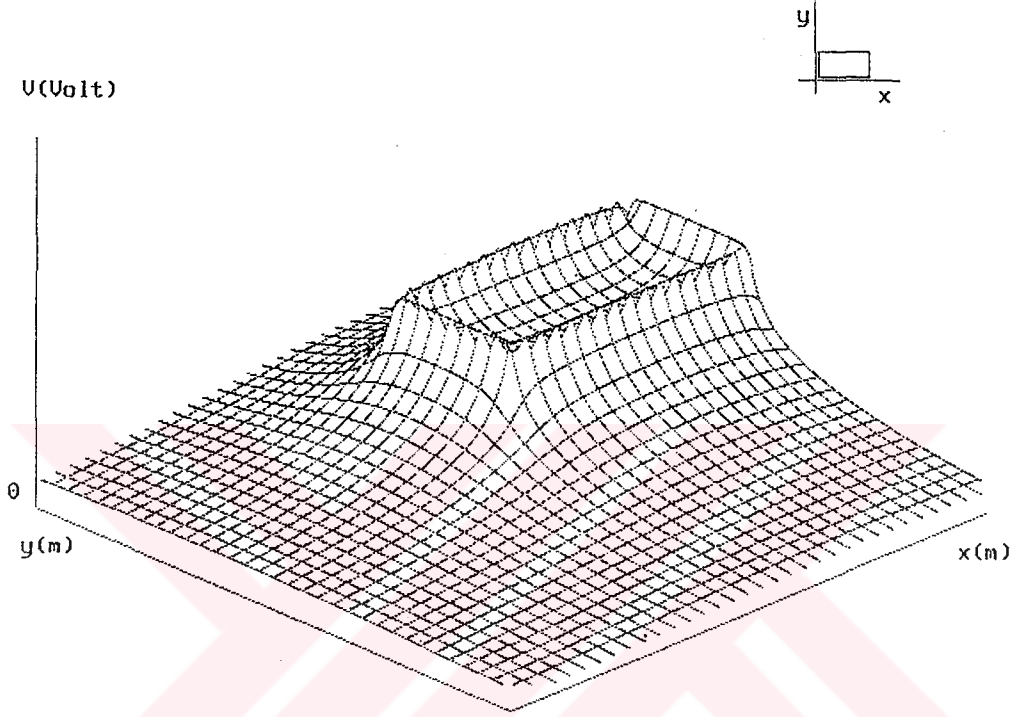
$$\begin{aligned} I(1) &= 1535.87 \text{ Amper} \\ I(2) &= 1535.871 \text{ Amper} \\ I(3) &= 777.7825 \text{ Amper} \\ I(4) &= 777.7826 \text{ Amper} \end{aligned}$$

Göz Potansiyeli hesaplanacak noktanın koordinatları:

$$\begin{aligned} XP &= 120 \text{ dm} \\ YP &= 60 \text{ dm} \\ ZP &= 0 \text{ dm} \end{aligned}$$

Toprağın Özgül Direnci	: 100 Ohm.m
Topraklama Ağının Yerleştirildiği Derinlik	: 0.5 m
Topraklama Ağının İletken Yarıçapı	: 0.7 cm
Toprağa Akan Toplam Akım	: 4627.306 Amper
Topraklama Direnci	: 3.241627 Ohm
Topraklama Ağının Potansiyeli	: 15000 Volt
Göz Potansiyeli (Herbir Göz Ortasında)	: 7852.809 Volt
Göz Potansiyeli	: % 52.35206
Göz Gerilimi (Temas Gerilimi)	: 7147.191 Volt
Göz Gerilimi (Ağ Geriliminin Yüzdesi)	: % 47.64794

YBY'ne dayanan bilgisayar programı yardımı ile 1x1 gözlü dikdörtgen ağın, bir arıza durumunda, toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımının üç boyutlu grafiği Şekil 6.8'de gösterilmektedir.

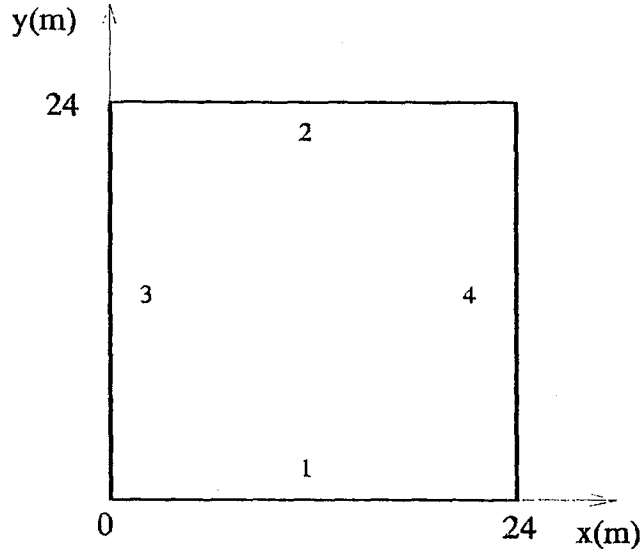


Şekil 6.8. 1x1 gözlü dikdörtgen ağın, toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı

6.4.2. 1x1 Gözlü Kare Ağ

Ele alınan ağ, Şekil 6.9'de gösterilmektedir.

Bölüm 6.4.'teki giriş verileri kullanılarak bulunan 1x1 gözlü topraklama ağının her bir kolunda akmakta olan akım ve topraklama direnç değeri ile topraklama ağının merkeze referans olmak üzere, göz potansiyeli ve göz gerilimlerinin Volt ve yüzdesel olarak değerleri aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 6.9. 1x1 gözlü kare ağ

YBY ile Hesaplanan Kol Akımları:

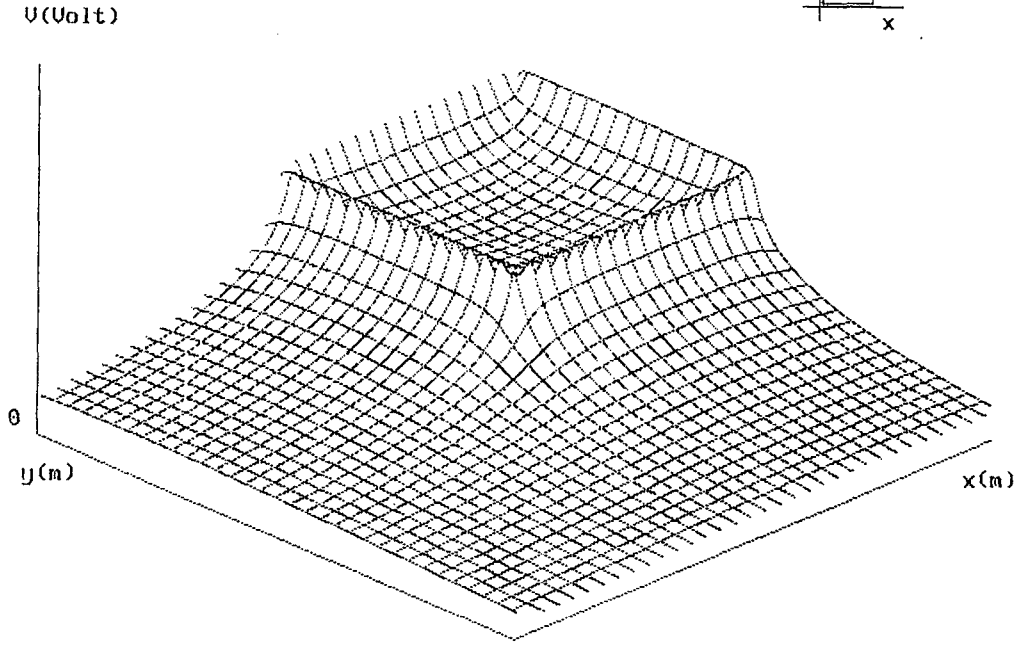
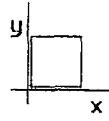
$I(1) = 1504.879$ Amper
 $I(2) = 1504.879$ Amper
 $I(3) = 1504.879$ Amper
 $I(4) = 1504.879$ Amper

Göz Potansiyeli hesaplanacak noktanın koordinatları:

$XP = 120$ dm
 $YP = 120$ dm
 $ZP = 0$ dm

Toprağın Özgül Direnci	: 100 Ohm.m
Topraklama Ağının Yerleştirildiği Derinlik	: 0.5 m
Topraklama Ağının İletken Yarıçapı	: 0.7 cm
Toprağa Akan Toplam Akım	: 6019.516 Amper
Topraklama Direnci	: 2.491895 Ohm
Topraklama Ağının Potansiyeli	: 15000 Volt
Göz Potansiyeli (Herbir Göz Ortasında)	: 7031.667 Volt
Göz Potansiyeli	: % 46.87778
Göz Gerilimi (Temas Gerilimi)	: 7968.333 Volt
Göz Gerilimi (Ağ Geriliminin Yüzdesi)	: % 53.12222

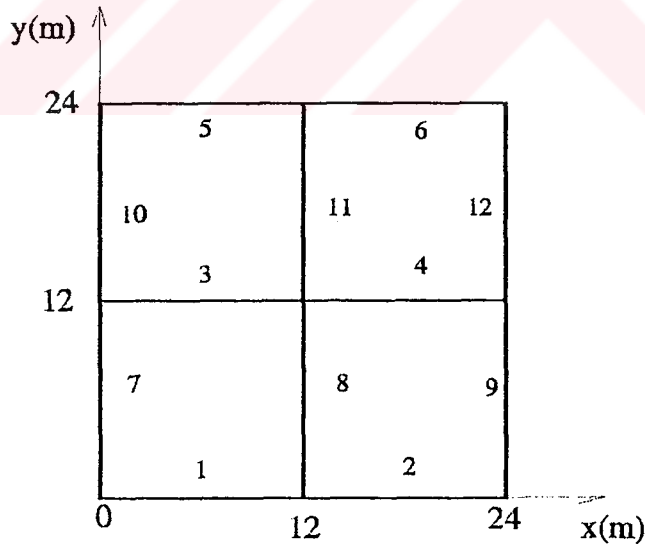
YBY'ne dayanan bilgisayar programı yardımı ile, 1x1 gözlü topraklama ağının, bir arıza durumunda, toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımının üç boyutlu grafiği Şekil 6.10'da gösterilmektedir.



Şekil 6.10. 1x1 gözlü kare ağın toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı.

6.4.3. 2x2 Gözlü Kare Ağ

Ele alınan ağ, Şekil 6.11'de gösterilmektedir.



Şekil 6.11 2x2 gözlü kare ağ

Bölüm 6.4'teki giriş verileri kullanılarak bulunan, 2x2 gözlü kare ağın herbir kolunda akmakta olan akım ve topraklama direnç değeri ile topraklama ağının

merkezi referans olmak üzere, göz potansiyeli ve göz gerilimlerinin volt ve yüzdesel olarak değerleri aşağıda sunulmaktadır.

YBY ile Hesaplanan Kol Akımları:

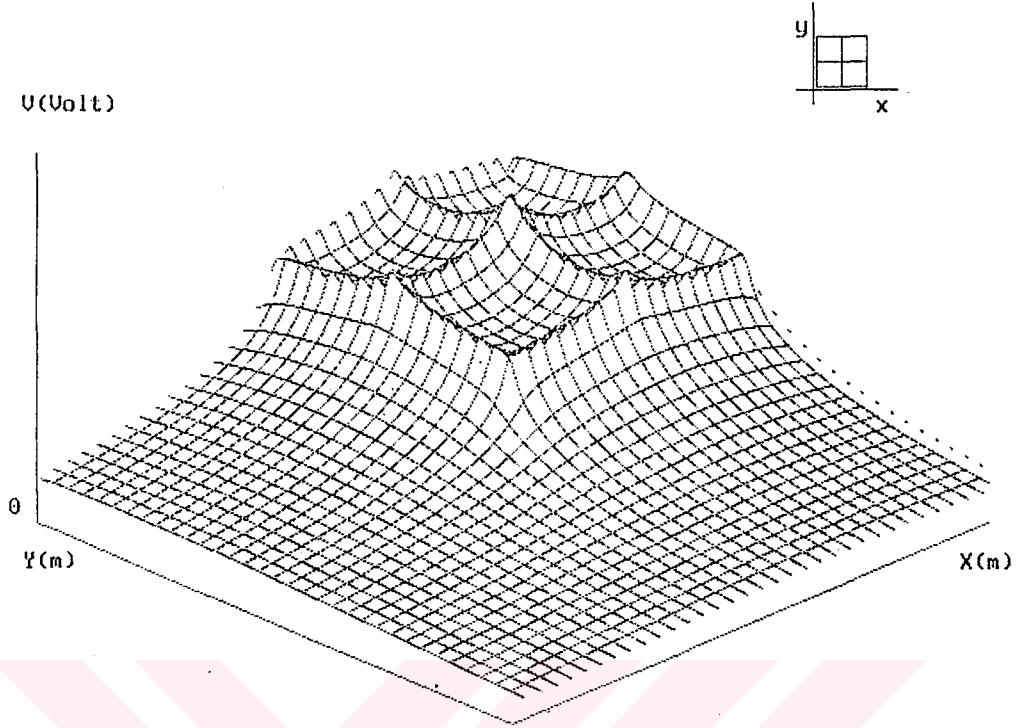
I(1)= 628.5853 Amper
 I(2)= 628.5851 Amper
 I(3)= 475.9063 Amper
 I(4)= 475.9067 Amper
 I(5)= 628.5853 Amper
 I(6)= 628.5854 Amper
 I(7)= 628.5852 Amper
 I(8)= 475.9065 Amper
 I(9)= 628.5852 Amper
 I(10)= 628.5851 Amper
 I(11)= 475.9063 Amper
 I(12)= 628.5854 Amper

Göz Potansiyeli hesaplanacak noktanın koordinatları:

XP=60 dm
 YP=60 dm
 ZP=0 dm

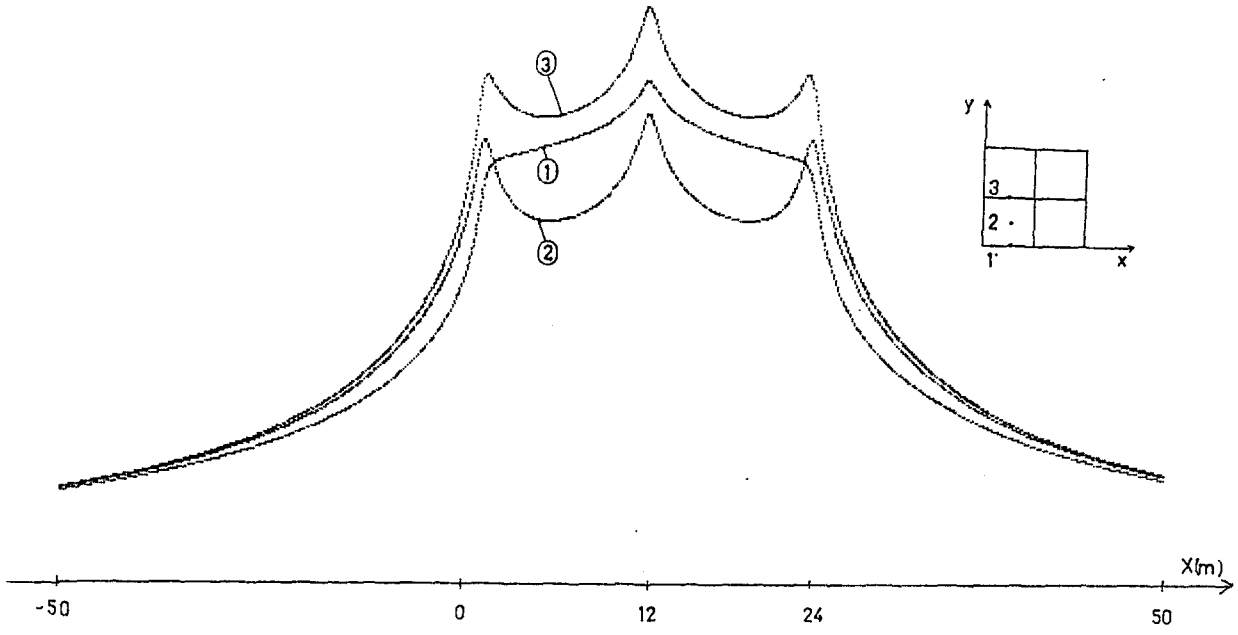
Toprağın Özgül Direnci : 100 Ohm.m
 Topraklama Ağının Yerleştirildiği Derinlik : 0.5 m
 Topraklama Ağının İletken Yarıçapı : 0.7 cm
 Toprağa Akan Toplam Akım : 6932.307 Amper
 Topraklama Direnci : 2.163782 Ohm
 Topraklama Ağının Potansiyeli : 15000 Volt
 Göz Potansiyeli (Herbir Göz Ortasında) : 9906.566 Volt
 Göz Potansiyeli : % 66.04378
 Göz Gerilimi (Temas Gerilimi) : 5093.434 Volt
 Göz Gerilimi (Ağ Geriliminin Yüzdesi) : % 33.95622

YBY'ne dayanan bilgisayar programı yardımı ile, 2x2 gözlü topraklama ağının, bir arıza durumunda, toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımının üç boyutlu grafiği Şekil 6.12'de gösterilmektedir.



Şekil 6.12 2x2 gözlü kare ağın, toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı.

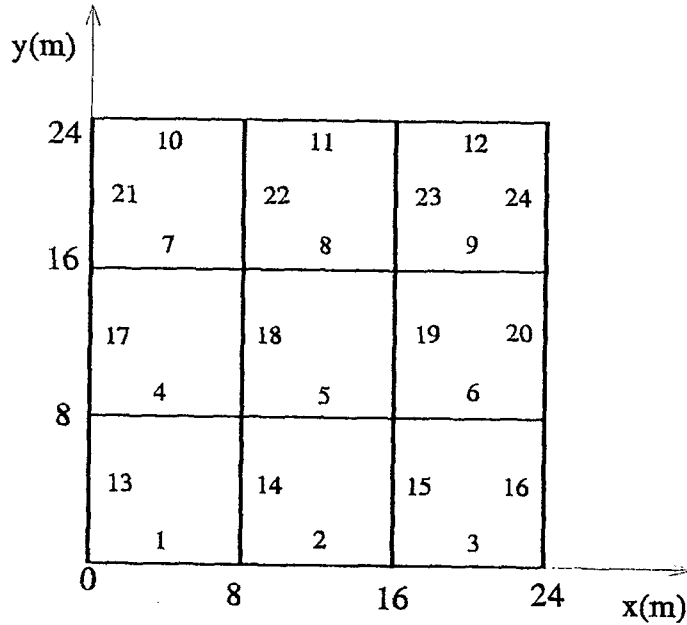
Topraklama ağının toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımının, topraklama ağı üzerinde alınan değişik noktalara göre değişiminin bilinmesi istenirse Şekil 6.11'deki 2x2 gözlü topraklama ağı için elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyelin değişimi Şekil 6.13'te gösterilmektedir.



Şekil 6.13. Topraklama ağı üzerindeki değişik noktalara göre toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.

6.4.4. 3x3 Gözlü Kare Ağ

Ele alınan ağ, Şekil 6.14'de gösterilmektedir.



Şekil 6.14. 3x3 gözlü kare ağ

merkezi referans olmak üzere, göz potansiyeli ve göz gerilimlerinin volt ve yüzdesel olarak değerleri aşağıda sunulmaktadır.

YBY ile Hesaplanan Kol Akımları:

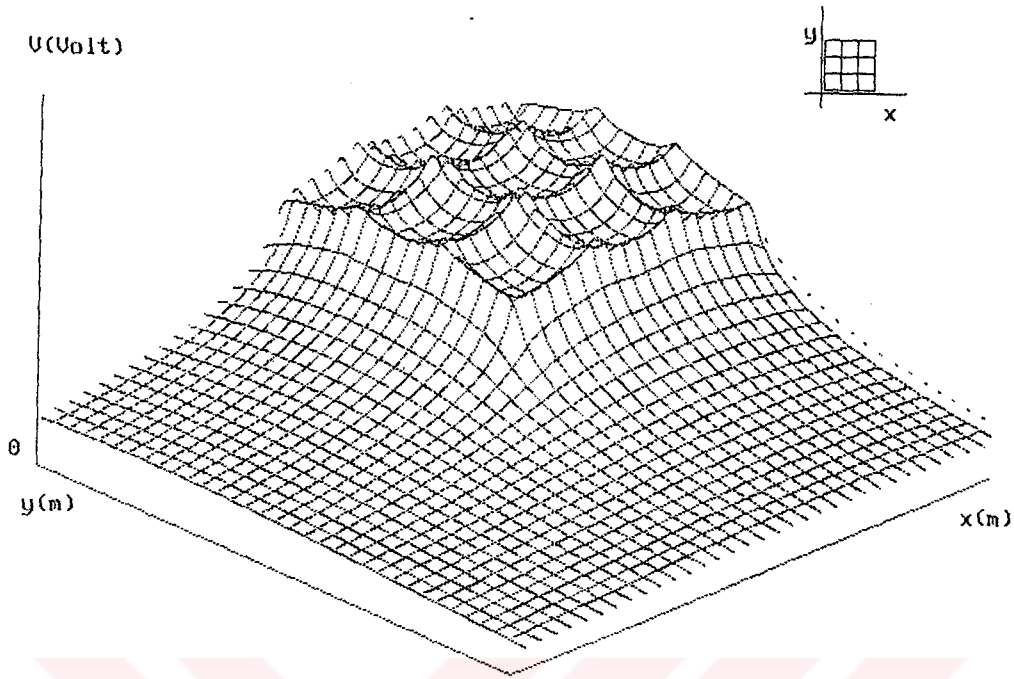
I(1)= 383.9346 Amper	I(13)= 383.9346 Amper
I(2)= 340.5659 Amper	I(14)= 261.8931 Amper
I(3)= 383.9296 Amper	I(15)= 261.9457 Amper
I(4)= 261.8931 Amper	I(16)= 383.9323 Amper
I(5)= 220.2376 Amper	I(17)= 340.5658 Amper
I(6)= 261.884 Amper	I(18)= 220.2375 Amper
I(7)= 261.9457 Amper	I(19)= 220.2885 Amper
I(8)= 220.2887 Amper	I(20)= 340.5628 Amper
I(9)= 261.9367 Amper	I(21)= 383.9294 Amper
I(10)= 383.9319 Amper	I(22)= 261.8841 Amper
I(11)= 340.5627 Amper	I(23)= 261.9367 Amper
I(12)= 383.9271 Amper	I(24)= 383.9268 Amper

Göz Potansiyeli hesaplanacak noktanın koordinatları:

XP=120 dm
YP=120 dm
ZP=0 dm

Toprağın Özgül Direnci	: 100 Ohm.m
Topraklama Ağının Yerleştirildiği Derinlik	: 0.5 m
Topraklama Ağının İletken Yarıçapı	: 0.7 cm
Toprağa Akan Toplam Akım	: 7410.076 Amper
Topraklama Direnci	: 2.024271 Ohm
Topraklama Ağının Potansiyeli	: 15000 Volt
Göz Potansiyeli (Herbir Göz Ortasında)	: 12124.94 Volt
Göz Potansiyeli	: % 80.83294
Göz Gerilimi (Temas Gerilimi)	: 2875.059 Volt
Göz Gerilimi (Ağ Geriliminin Yüzdesi)	: % 19.16706

YBY'ne dayanan bilgisayar programı yardımı ile 3x3 gözlü topraklama ağının, bir arıza durumunda toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımının üç boyutlu grafiği Şekil 6.15'te gösterilmektedir.



Şekil 6.15. 3x3 gözlü kare ağın toprak yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı.

6.4.5. Ağ Gömülme Derinliğinin Topraklama Direnci ve Adım Gerilimi Üzerindeki Etkisi

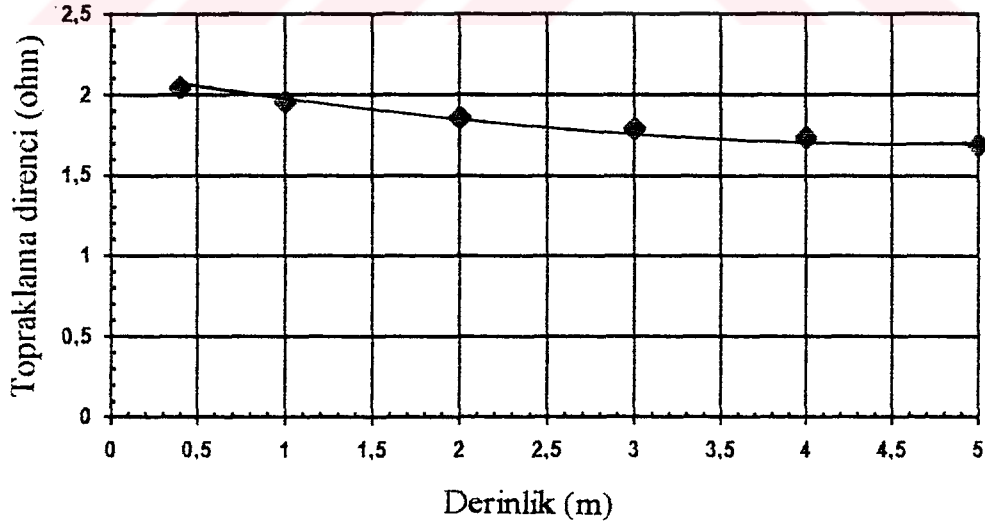
Gömülme derinliğinin topraklama direnci ve adım gerilimi üzerindeki etkisinin bilinmesi, topraklama ağlarının optimum değerlerde tasarımı için önemlidir.

Bunun için giriş verileri Bölüm 6.4.4.'te verilen 3x3 gözlü kare topraklama ağı ele alındığında; bilgisayar programı yardımıyla hesaplanan, topraklama direnci ve insan ayağının birinin koordinatı X_1 (12, 12, 0), adım uzunluğu $a=1$ m kabulü ile diğerinin koordinatı X_2 (11, 12, 0) olan, toprak yüzeyindeki iki nokta arasındaki potansiyel farkını ifade eden adım gerilimi değerleri Tablo 6.1'te sunulmaktadır.

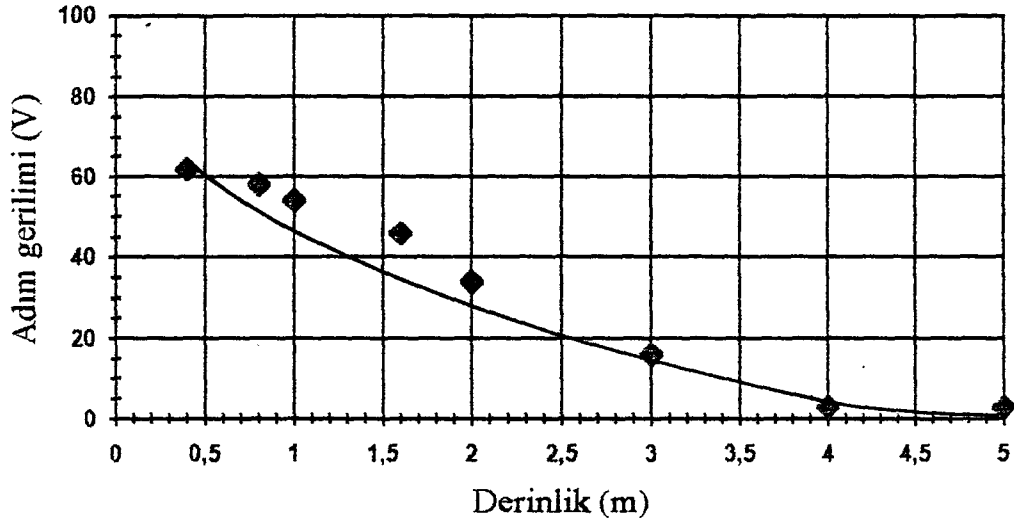
Tablo 6.1. 3x3 Gözlü ağ için YBY ile hesaplanan topraklama direnci ve adım gerilimi değerleri.

Derinlik (m)	Topraklama Direnci (ohm)	x_1 Toprak Yüzey Potansiyeli (V)	x_2 Toprak Yüzey Potansiyeli (V)	Adım Gerilimi
0.4	2.04	12034	12096	62
0.8	1.98	12317	12375	58
1	1.96	12414	12468	54
1.5	1.90	12555	12601	46
2	1.86	12640	12674	34
3	1.79	12640	12656	16
4	1.74	12491	12494	3
5	1.69	12240	12237	3

Tablo 6.1'den topraklama direncinin gömülme derinliğine bağlı olarak değişimi Şekil 6.16'da, adım geriliminin topraklama direncine bağlı değişimi Şekil 6.17'de gösterilmektedir.



Şekil 6.16. Topraklama direncinin gömülme derinliğine bağlı değişimi.



Şekil 6.17. Adım geriliminin gömülme derinliğine bağlı değişimi.

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek gerilim merkezlerinde yıldırım darbeleri, açma-kapama olayları vb. nedenler ile meydana gelen darbe akımlarının toprağa verilmesinde büyük bir fonksiyon üstlenen topraklama sistemleri ve bunların içinde yaygın kullanıma sahip bulunan topraklama ağları ağırlıklı olarak geniş bir şekilde incelenmiş, diğer topraklayıcı tiplerine göre farklılıkları ve üstünlükleri ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır. Buna göre bu çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

1) Topraklama sistemlerinden biri olan topraklama levhaları için genişlik/uzunluk oranı kritik bir büyüklüktür ve oranın azalması ile topraklama direnci önemli bir şekilde azalmaktadır. Buradan sonsuz uzunlukta dar bir şerit için topraklama direncinin değerinin sıfır olduğu söylenebilir. Aynı alana sahip dikdörtgen topraklama levhasının direnci aynı alana sahip kare levhadan, kare levhanın direnci ise aynı alana sahip daire şeklindeki levhanın direncinden daha düşüktür. Topraklama direnci gömme derinliğinin artması ile azaldığından, levha mümkün olduğu kadar derine gömülmelidir.

2) Topraklama ağlarında indüktans ağın tasarımın da dikkate alınması gereken önemli bir parametredir. Bir ağın indüktansı, göz sayısının artması ile azalır. Bu azalma göz sayısı 24'ten az olduğundan hızlı, 60'ı geçtiğinde ihmal edilecek kadar azdır. Dikdörtgen ağın indüktansı, ağın uzunluk/genişlik oranının artması ile artar. Bu oran mümkün olduğu kadar 1'e yaklaşmalıdır. Buna göre kare topraklama ağının indüktansı, aynı alana sahip dikdörtgen ağın indüktansından küçük olacaktır. Ortadan beslenen ağın indüktansı, diğer noktalardan beslenenlere göre çok daha düşüktür. Bu nedenle besleme noktası mümkün olduğu kadar merkeze yakın olmalıdır. Burada verilen bilgiler, yıldırım akımının toprağa yayılması sırasında dikdörtgen topraklama ağının davranışının belirlenmesinde yararlı olabilir.

3) Topraklama ağlarının tasarımın da önem verilmesi gereken diğer, bir parametre de darbe empedansıdır. Yapılan hesaplar, topraklama ağının darbe empedansının, şebeke frekansındaki topraklama direncinden 10 kat kadar büyük olabileceğini göstermektedir. Darbe empedansının minimum olması için uzunluk/genişlik oranının mümkün olduğu kadar 1 değerine yakın olmalı ve besleme noktasını da mümkün olduğu kadar ağın merkezine doğru yaklaştırılmalıdır. Dikdörtgen ağın darbe empedansı, aynı alana sahip kare ağın darbe empedansından daha büyüktür.

4) Topraklama ağlarında, köşeden besleme durumunda ağ iletkenlerinde akan akım değerleri, ortadan besleme durumundakine göre çok daha büyüktür. Akımların bu denli büyük olması topraklama ağında diğer duruma göre daha büyük potansiyel artışlarına sebep olacağından, toprak yüzeyindeki temas ve adım gerilimlerini gereksiz yere büyütecektir. Bu nedenle akım girişi mümkün olduğu kadar ağın ortasına yaklaştırılmalıdır.

5) Topraklama ağlarının, koruma derecesinin belirlenmesinde temas ve adım gerilimlerinin izin verilen değerlerin altında tutulabilmesinde bilinmesi gereken büyüklüklerden biri olan göz potansiyeli;

- a) Ağ kenar uzunluğu azaldıkça
- b) Göz sayısı arttıkça
- c) Gömme derinliği arttıkça
- d) Ağ iletkenlerinin boyutu arttıkça

azalır. Diğer iletkenler arasındaki uzaklığın gömme derinliğine oranı 7'den küçük olduğunda göz potansiyeli, gömme derinliğinin artışı ile artabilir. Yüzde olarak göz potansiyelinin, gömme derinliği ve iletken boyutları ile değişimi nisbeten küçüktür. Gömme derinliğinin 0,3 m'den 0,8 m'ye kadar değişimi ve iletken çapının 1 cm'den 3 cm'ye kadar değişimi, göz potansiyelini sırası ile %10 ve %15'ten daha az değiştirir.

6) Topraklama ağlarında göz sayısı arttıkça topraklama direncinin değeri düşmektedir. Örneğin toplam ağ alanı sabit olmak üzere, göz sayısının 1'den 9'a çıkması, topraklama direncinde yaklaşık olarak %18'lik bir azalma sağlamaktadır.

Aynı şekilde göz sayısının 1'den 9'a çıkması göz potansiyelinde yaklaşık %72 oranında bir artma temas geriliminde ise yaklaşık olarak %64 oranında bir azalma meydana getirmektedir.

7) Topraklama ağlarında gömülme derinliği arttıkça topraklama direncinin değeri azalmaktadır. Örneğin toplam ağ alanı ve göz sayısı aynı olmak üzere gömülme derinliğinin $h=0,4$ m'den $h=5$ m'ye kadar çıkarılması topraklama direncinde yaklaşık olarak %17 oranında bir azalma, adım geriliminde ise yaklaşık olarak %95 oranında bir azalma meydana getirmektedir.

8) Topraklama ağlarında, kenarlardan merkeze doğru gidildikçe ağ üzerindeki potansiyel yükselmekte, gözlerin ortasında ise azalmaktadır.

9) Topraklama ağlarının analizinde kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan Yük Benzetim Yöntemi, diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında çok daha az formül içermektedir. Örneğin, 2x2 kare gözlü bir ağın analizi için 12 adet benzetim ve 12 adet görüntü yükünün koordinatları olmak üzere toplam 24 adet yük noktasının koordinatı ile 24 adet sınır noktasının koordinatı, direnç değeri, gömme derinliği ve uygulanan gerilimin değeri giriş verileri olarak alınmaktadır. Halbuki Kaçak Akım Yöntemi, Elektrostatik Potansiyel Yöntemi, YBY'ne göre çok daha fazla ve karmaşık formül içermekte ve ağ boyutları büyüdükçe daha da fazla bilgisayar bellek kapasitesi ve işlem zamanı gerektirmektedir.

10) YBY, herhangi bir geometrik şekle ve boyutlara sahip topraklama ağlarının analizine imkan vermesine rağmen, diğer yöntemlerin buna yukarıda sayılan sınırlamalar nedeni ile karşılık vermesi bazı zorluklar içermektedir.

YBY, kullanılarak geliştirilen bilgisayar programı yardımı ile topraklama ağlarında meydana gelen akım dağılımı, topraklama direnci ve toprak içinde herhangi bir nokta için potansiyel değeri bulunabilmekte ve yeryüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımı, üç boyutlu olarak çizilebilmektedir. Bu da, bizlere fiziksel olarak imal edilmeden ve herhangi bir maliyete girilmeden topraklama ağları hakkında bilinmesi gereken bilgilerin elde edilmesine imkan vermektedir.

Bu tez çalışmasında, kullanılan bilgisayar programı homojen, tek tabakalı toprak yapısı için geliştirilmiş olup, toprak içindeki yansıma ve kırılma akımları ihmal edilmiştir. Sözkonusu bilgisayar programı, iki , üç veya çok tabakalı toprak yapısı için geliştirilebilir.

Elektrolitik banyo yöntemi ile temsili topraklama ağlarındaki potansiyel dağılımı bulunabilir ve Yük Benzetim Yöntemine dayanan bu tez çalışmasındaki bilgisayar sonuçları ile karşılaştırılabilir.

Topraklama ağlarının analizinde, hangi sayısal yöntem kullanılırsa kullanılsın, analizin doğruluğunun artırılabilmesi ve gerçeğe yakın değerlerin elde edilebilmesi için, toprak özgül direncinin bilinen deneysel yöntemler ile ölçülmesi ve bu değerlerin veri olarak alınması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] DAWALABI, F., MUKHEDKAR, D.; Optimum Desing of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 94, No.2, pp. 252-270, March/April 1975, PART I, II, III
- [2] YUNG, E.K.N. Analysis of a Rectangular Earthing Plate, IEE Proceedings-C, Vol 140, No.5, pp. 381-388, September 1993
- [3] HARRINGTON, R.F. Field Computation by Moment Methods, Mac Milan, New York, 1968
- [4] BAYRAM, M, Elektrik Tesislerinde Topraklama İTÜ Elektrik Fakültesi, 1977
- [5] GUPTA, B.R., SINGH, V.K., Inductance of Rectangular Grids, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 7. No.3, pp 1218-1221 July 1992
- [6] GUPTA, B.R., THAPAR, B. Impulse Impedance of Grounding Grids, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 99, No.6, pp.2357-2362, Nov/Dec. 1980
- [7] GUPTA, B.R., SINGH, V.K., Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.7, No.1, pp. 214-217, January 1992
- [8] THAPAR, B., PURI, K.K., Mesh Potentials in High Voltage Grounding Grids, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas. 86, No.2, pp. 249-254, February 1967.

- [9] SVERAK, J.G., Simplified Analysis of Electrical Gradients Above A Grounding Grid. I, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS.103, No.1, pp.7-18, January 1984.
- [10] HEPPE, ROBERT. J., 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, p.p. 1978-1987, Nov/Dec. 1979
- [11] SATO, S., ZAENGL, W.S. Effective Grounding Mesh Calculation Technique, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3 No.1, pp. 173-182, January 1988
- [12] YILDIRIM, H., Elektrostatik Alanların Yük Benzetim Yöntemiyle İncelenmesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ocak 1992



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Çelikyay 30.08.1969 tarihinde Hatay'ın İskenderun İlçesinde doğdu. İlk , orta ve lise öğrenimini bu ilçede sırasıyla 50. Yıl İlkokulu, 5 Temmuz Ortaokulu ve İskenderun Lisesi'nde tamamladı. 1987'de Y.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'ne kaydını yaptırdı. 1991'de İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği programında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Aynı zamanda İstanbul Üniversitesi, İşletme Fakültesi İşletme İktisadi Enstitüsü'nde İşletme İhtisas Programı eğitimini tamamladı. Halen PTT kurumunda kontrol mühendisi olarak görevine devam etmektedir.