

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

151667

151667

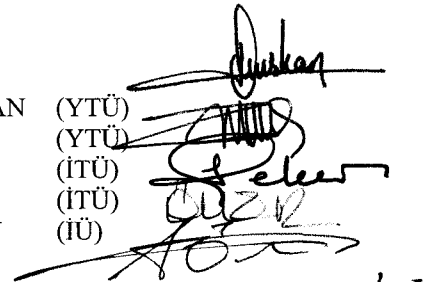
GEÇİCİ REJİMLERDE TOPRAKLAMA SİSTEMLERİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Elk. Yük. Müh. Ersan ŞENTÜRK

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında
Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi	: 09 Mart 2004
Tez danışmanı	: Doç. Dr. Nurettin UMURKAN (YTÜ)
Jüri Üyeleri	: Doç. Dr. F. Okan PEKİNER (YTÜ)
	: Prof. Dr. Serhat ŞEKER (İTÜ)
	: Prof. Dr. Ömer USTA (İTÜ)
	: Prof. Dr. Ayten KUNTMAN (İÜ)



İSTANBUL, 2004

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Çelik Konstrüksiyon Direklerin Darbe Empedans Hesabı.....	2
1.2 Yıldırım Darbe Gerilimlerinde Toprağın ve Topraklayıcının Davranışının İncelenmesi.....	14
1.2.1 Yıldırım Darbe Deneyi.....	14
1.2.2 Toprağın ve Topraklayıcının Davranışının İncelenmesi İçin Ortaya Konan Sayısal Uygulama.....	16
2. ELEKTRİKSEL TOPRAKLAMA ve YILDIRIM BOŞALMALARI	25
2.1 ELEKTRİKSEL TOPRAKLAMA ve TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ.....	25
2.1.1 Topraklama ile İlgili Temel Kavramlar.....	25
2.1.2 Topraklamanın Çeşitlerine Göre Tanımlar.....	33
2.1.3 Topraklama Şekline Göre Tanımlar	34
2.1.4 Topraklama Sistemleri	34
2.2 YILDIRIM BOŞALMALARI.....	42
2.2.1 Yıldırım Bulutunda Elektrik Yüklerinin Meydana Gelişi.....	43
2.2.2 Yıldırım Boşalmasının Oluşumu.....	47
2.2.2.1 Aşağıya Doğru İnen Yıldırım.....	48
2.2.2.2 Yukarıya Doğru Çıkan Yıldırım.....	49
2.2.3 Yıldırım Boşalmasının Özellikleri	49
2.2.4 Yıldırım Akımı	51
2.2.5 Yıldırım Boşalması ile ilgili olaylar	54
2.2.5.1 Atmosferik alan	54
2.2.5.2 Gök Gürültüsü	54
2.2.6 Yıldırımın Etkileri	54
2.2.6.1 Termik Etkiler	55
2.2.6.2 Elektrodinamik Etkiler	57

2.2.6.3	Elektrokimyasal Etkiler	57
2.2.6.4	Basınç ve Ses Etkisi	58
2.2.6.5	Işık Etkisi.....	58
2.2.7	Yıldırım Çarpmasına Karşı İnsanların Korunması.....	58
3.	YÜKSEK GERİLİMLİ İLETİM HATLARINDA KULLANILAN ÇELİK KONSTRÜKSİYON DİREKLERİN YILDIRIM DARBE DİRENCİNİN HESAPLANMASI	60
3.1	Elektrik Alan Kavramları	61
3.2	Direk Darbe Empedansını Hesaplamak İçin Kullanılan Silindir Yaklaşımı	63
3.3	Elektrik Alan Şiddetlerinden İfade Türetme	65
3.4	Darbe Empedansı İfadesinin Literatürde Yer Alan Çalışmalardaki ifadeler ile karşılaştırılması	69
3.5	Sayısal Örnek	71
4.	YILDIRIM DARBE GERİLİMLERİNDE TOPRAĞIN VE TOPRAKLAYICININ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ.....	76
4.1	YILDIRIM DARBE GERİLİMİ DENEYİ	77
4.2	YILDIRIM DARBE GERİLİMLERİNDE TOPRAĞIN ve TOPRAKLAYICININ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN SAYISAL UYGULAMA.....	79
4.2.1	Sayısal Uygulama için Geliştirilen Model	81
4.2.2	Hesaplama Algoritması	84
4.2.3	MODEL-1 (2 metre Derinliğe Gömülmüş 2 metrelik Çubuk Topraklayıcı).....	85
4.2.3.1	MODEL-1'in (2 metre Derinliğe Gömülmüş 2 metrelik Çubuk Topraklayıcı) Sonlu Fark Denklemlerinin Yazılması	86
4.2.3.2	Potansiyel Dağılımı Hesaplarının Bilgisayar Yardımı İle Yapılması	93
4.2.4	MODEL-2 (4 metre Derinliğe Gömülmüş 4 metrelik Çubuk Topraklayıcı).....	94
4.2.5	MODEL-3 (6 metre Derinliğe Gömülmüş 6 metrelik Çubuk Topraklayıcı).....	99
4.2.6	MODEL-4 (8 metre Derinliğe Gömülmüş 8 metrelik Çubuk Topraklayıcı).....	103
4.2.7	MODEL-5 (10 metre Derinliğe Gömülmüş 10 metrelik Çubuk Topraklayıcı)..	107
4.2.8	Sayısal Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi	111
4.2.9	Toprak Yüzeyinde Topraklama Elektrotu ile Elektrot En Yakın İlk Düğüm Arasındaki Potansiyel Dağılımının Hesaplanması	114
4.2.10	Potansiyel Dağılımı Hesapları İçin Sonlu Fark Denklemlerinin Yazılması.....	116
5.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	121
	KAYNAKLAR.....	128
	EKLER.....	133
	Ek 1 YILDIRIM DARBE GERİLİMİ DENEYİ.....	134
	Ek 1.1 Deneyde Kullanılan Donanım	134
	Ek 1.2 Deneyde Kullanılan Darbe Gerilim Generatörü	135
	Ek 1.3 Darbe Gerilimleri.....	137

Ek 1.4 Darbe Karakteristikleri	138
Ek 1.5 Darbe Gerilimlerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi.....	139
Ek 1.6 Deneyin Yapılışı	141
Ek 1.7 Deney-1 için Kurulan Deney Devresi.....	152
Ek 1.8 Deney-1.....	153
Ek 1.9 Deney-2 ve 3 için Kurulan Deney Devresi.....	155
Ek 1.10 Deney-2.....	156
Ek 1.11 Deney-3.....	158
Ek 2 SONLU FARKLAR YÖNTEMİ.....	160
Ek 2.1 Sonlu Farklar Yöntemi İle Statik Elektrik Alan Hesabı	163
Ek 2.2 Yalıtkan-Yalıtkan Arakesitinde Laplace Denkleminin Sonlu Fark Yazılı	170
Ek 2.3 Silindirselsel koordinatlarda Laplace denkleminin sonlu farklar yazılımı.....	173
Ek 2.4 Küresel koordinatlarda Laplace denkleminin sonlu farklar yazılımı.....	175
Ek 2.5 Magnetik Alan Problemlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü.....	177
Ek 2.5.1 Lineer problemler	177
Ek 2.5.2 Lineer olmayan problemler.....	179
Ek 2.6 Başlangıç Değer Problemlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü	180
Ek 2.7 Zamanla Değişen Problemlerin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü.....	182
Ek 3 MODELLER İÇİN YAZILAN SONLU FARK DENKLEMLERİ	184
ÖZGEÇMİŞ	229

SİMGE LİSTESİ

ρ	Özdirenç
U_{tk}	Topraklayıcı Gerilimi
R_k	Koruma topraklaması direnci
R_i	İnsan vücudunun direnci
R_{ge}	Elden geçiş direnci
R_{ga}	Ayaktan geçiş direnci
R_t	Topraklama direnci
U_{ts}	Temas (dokunma) gerilimi
U_a	Adım Gerilimi
I_k	Bir faz toprak kısa devresi akımı
I_i	İnsan vücudundan geçen akım
I_t	Toprak akımı
Q	Topraklayıcı üzerindeki toplam yük
P_{mn}	Genişleme fonksiyonu
E	Elektrik alan şiddeti
E_z	Yüzeysel yük tabakasına dik olan elektrik alan şiddeti;
V	Elektrostatik potansiyel
R_{top}	Toplam yayılma direnci
$i(t)$	Yıldırım akımı
I_m	Yıldırım akımının tepe değeri
W	Enerji
A	Vektörel magnetik potansiyeli
J	Akım yoğunluğu
σ	İletkenlik
μ_0	Boşluğun magnetik geçirgenliği
H	Magnetik alan şiddeti
B	Magnetik indüksiyon
I_s	Yıldırım darbe akımı
I_g	Yıldırım darbe akımının koruma teli üzerindeki bileşeni
I_t	Yıldırım darbe akımının çelik direk üzerindeki bileşeni
c	Işık hızı
Ψ	Elektromagnetik potansiyel
Z_t	Direk darbe empedansı
η	Verim
$P(U_d)$	Darbe geriliminin atlama olasılığı
ε	Dielektrik sabiti

KISALTMA LİSTESİ

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
AIEE	American Institute of Electrical Engineers
IEE	Institute of Electrical Engineers
IEEJ	Institute of Electrical Engineers Japan
SFY	Sonlu Farklar Yöntemi
MS	Microsoft



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği ve bu direğin yıldırımdan korunma ve topraklama sistemi	2
Şekil 1.2 C.F. Wagner'ın silindir formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği	4
Şekil 1.3 M.A. Sargent ve M. Darveniza'nın koni formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği	7
Şekil 1.4 Hara ve Yamamoto'nun parçalı silindir formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği	10
Şekil 1.5 Hara ve Yamamoto'nun parçalı silindir formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği gövdesi	11
Şekil 1.6 Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı.	23
Şekil 2.1 Topraklayıcının referans toprağa göre yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı	26
Şekil 2.2 Bir yüksek gerilim tesisinde bir toprak teması olması durumunda temas gerilimi.....	28
Şekil 2.3 Bir faz toprak kısa devresinde meydana gelen potansiyel dağılımı ve bu alanda bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi	32
Şekil 2.4 Çubuk topraklayıcı	35
Şekil 2.5 Emdirmeli topraklayıcı	36
Şekil 2.6 Levha topraklayıcı.....	37
Şekil 2.7 Şerit topraklayıcıların çeşitleri	38
Şekil 2.8 Gözlü topraklayıcı.....	39
Şekil 2.9 Paralel topraklayıcı	41
Şekil 2.10 Simpson'a göre bir yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin dağılımı	44
Şekil 2.11 Elster ve Geitel'e göre bir yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin meydana gelişinin büyük ve küçük su damlası davranışına göre açıklanması	44
Şekil 2.12 Frenkel'e göre bir yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin meydana gelmesi	46
Şekil 2.13 Bulut yüklerinin ayrılması	46
Şekil 2.14 Yıldırımın türleri	48
Şekil 2.15 Çok kademeli bir yıldırım boşalmasının gelişme evreleri	50
Şekil 2.16 Yıldırım akımı.....	51
Şekil 2.17 Birikmeli olasılık eğrileri	52
Şekil 3.1 Elektrik alan teorisi analizinde kullanılan silindirsel direk modeli.....	63
Şekil 3.2 Bir noktadaki vektör magnetik potansiyelini "A" hesaplamak için kullanılan model	64
Şekil 3.3 Darbe akımına maruz kalan direk üzerindeki akım dağılımı.....	65
Şekil 3.4 Çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği ve bu direğin yıldırımdan korunma ve topraklama sistemi ile eşdeğer elektriksel devresinin gösterilmesi	73
Şekil 4.1 Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı.	80
Şekil 4.2 Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı ve referans toprak	81
Şekil 4.3 Çubuk topraklayıcı sonlu farklar yöntemi modeli	83
Şekil 4.4 2 metre derinliğe gömülmüş 2 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.	85
Şekil 4.5 Kartezyen koordinatlarda, iki boyutlu, kare gözlü sonlu farklar yöntemi ağı örneği.....	86
Şekil 4.6 Silindirsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.	87

Şekil 4.7 Yalıtkan-Yalıtkan arakesiti	88
Şekil 4.8 Çubuk elektrotun 2 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri	92
Şekil 4.9 4 metre derinliğe gömülmüş 4 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.	95
Şekil 4.10 Silindirsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.	96
Şekil 4.11 Çubuk elektrotun 4 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri	98
Şekil 4.12 6 metre derinliğe gömülmüş 6 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.	99
Şekil 4.13 Silindirsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.	100
Şekil 4.14 Çubuk elektrotun 6 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri	102
Şekil 4.15 8 metre derinliğe gömülmüş 8 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.	103
Şekil 4.16 Silindirsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.	104
Şekil 4.17 Çubuk elektrotun 8 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri	106
Şekil 4.18 10 metre derinliğe gömülmüş 10 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.	107
Şekil 4.19 Silindirsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.	108
Şekil 4.20 Çubuk elektrotun 10 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri	110
Şekil 4.21 Sayısal uygulama için kurulan, bütün modellerin, yapılan sonlu fark yöntemi çözümlemesi ile elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları	111
Şekil 4.22 Bir çubuk topraklayıcı etrafında ve toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımının 3 boyutlu olarak gösterimi	112
Şekil 4.23 Sayısal uygulama için kurulan, bütün modellerin, yapılan sonlu fark yöntemi çözümlemesi ile elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel farkları dağılımları	113
Şekil 4.24 Çubuk elektrot ile çubuk elektrotun sağında yer alan ilk düğüm arasındaki potansiyel dağılımını hesaplamak için kullanılan model	115
Şekil 4.25 Çubuk elektrot ile çubuk elektrotun sağında yer alan ilk düğüm arasındaki potansiyel dağılımını hesaplamak için sonlu farklar denklemlerini yazmak için kullanılan eşksenli silindirsel model	116
Şekil 4.26 Bütün modellerin, çubuk elektrot ile çubuk elektrota 2 metre mesafedeki ilk düğümleri arasındaki potansiyel dağılımları	119
Şekil Ek 1.1 Darbe gerilimi a ve b eşdeğer devreleri	135
Şekil Ek 1.2 Deneyde kullanılan tek katlı “b” bağlamı darbe gerilim generatörü	137

Şekil Ek 1.3 Tam darbe gerilimi	138
Şekil Ek 1.4 a.) Cephede kesik darbe gerilimi	139
b.) Sırtta kesik darbe gerilimi	139
Şekil Ek 1.5 Darbe karakteristiği	139
Şekil Ek 1.6 Üç Katlı Marx bağılamı	140
Şekil Ek 1.7 Belirli bir elektrot açıklığında atlama olasılığının gerilimle değişimi	141
Şekil Ek 1.8 Deneysel çalışmada kullanılan metal deney kabı	145
Şekil Ek 1.9 Geçit izolatörü olarak kullanılan 4 adet yalıtkan destek plaka ve yalıtkan kapağın silindirselsel metal deney kabı üzerine yerleştirilmesi	146
Şekil Ek 1.10 İletkenlik ölçmek için kullanılan iletkenlik ölçer (Conductivity meter)	147
Şekil Ek 1.11 İletkenlik ölçer (Conductivity meter) cihazının yakından görünüşü	147
Şekil Ek 1.12 “b” Bağılamı Darbe generatörünün kumanda masası	148
Şekil Ek 1.13 Darbe gerilimini ölçmeye yarayan darbe voltmeteri	148
Şekil Ek 1.14 Darbe generatörü çıkışındaki atlama küreleri	149
Şekil Ek 1.15 Kumanda masasında yer alan ölçü ampermetre ve voltmetreleri	149
Şekil Ek 1.16 Kurulu deney düzeneği	150
Şekil Ek 1.17 Dijital Osiloskop (Band genişliği 100 MHz)	151
Şekil Ek 1.18 Deney düzeneğinin kumanda masasından kontrol edilmesi	151
Şekil Ek 1.19 Geçici Rejimlerde Topraklama sistemlerinin performans analizi için geliştirilen ve Deney 1 için kullanılan deney devresi	152
Şekil Ek 1.20 Geçici Rejimlerde Topraklama sistemlerinin performans değerlendirmesi için geliştirilen ve Deney 2 ve 3 için kullanılan deney devresi	155
Şekil Ek 2.1 Türevin tanımı	162
Şekil Ek 2.2 Dikdörtgen gözlü ağ parçası	163
Şekil Ek 2.3 Düzgün olmayan ağ	165
Şekil Ek 2.4 Üçgen gözlü ağ	168
Şekil Ek 2.5 Eşksenli silindirselsel elektrot sistemi	173
Şekil Ek 2.6 Eşmerkezli küresel elektrot sistemi	175
Şekil Ek 2.7 Düzgün olmayan ağ ve pusula notasyonu	178
Şekil Ek 2.8 Zamanla değişen bir boyutlu problemlerin sonlu farklar yöntemi çözümünün gösterilmesi	183

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Farklı tipteki topraklar için toprak özgül direnci değerleri	27
Çizelge 2.2 Yıldırım akımlarının polaritesinin ve yıldırım akım şiddetlerinin sıklık derecesine göre değerleri	53
Çizelge 3.1 Elde edilen ifade ile literatürdeki ifadelerin karşılaştırılması	70
Çizelge 3.2 GSM 1800 BEU tipi çelik kafes anten direği özellikleri	71
Çizelge 3.3 GSM 1800 BEU tipi çelik kafes anten direğinin farklı boyları için farklı ifadeler ile hesaplanan darbe topraklama empedansı değerleri	71
Çizelge 3.4 50 mm ² 'lik (r=4 mm) yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin farklı boyları için farklı ifadeler ile hesaplanan darbe topraklama empedansı değerleri	72
Çizelge 3.5 2x50 mm ² 'lik (r=4 mm) yuvarlak kesitli dolu bakır iletken ve çelik direğin paralel bağlı olması durumunda iletken ve direğin farklı boyları için farklı ifadeler ile hesaplanan darbe topraklama empedansı değerleri	74
Çizelge 4.1 Bütün modellerin, çubuk elektrot ile çubuk elektrota 2 metre mesafedeki ilk düğümleri arasındaki potansiyel değerlerinin 20 cm aralıklı olarak değişimleri	118
Çizelge Ek 1.1 Farklı küre çaplarında değişik elektrot açıklıkları için küreler arasındaki atlama gerilimleri.....	144
Çizelge Ek 1.2 Deney-1 için elde edilen ölçüm sonuç değerleri	154
Çizelge Ek 1.3 Deney-2 için elde edilen ölçüm sonuç değerleri	157
Çizelge Ek 1.4 Deney-3 için elde edilen ölçüm sonuç değerleri	159
Çizelge Ek 2.1 Birinci mertebeden sonlu farklar algoritmasına göre türev tanımları.....	162

ÖNSÖZ

Elektriksel topraklama, başta insanlar olmak üzere, canlıları, elektrik devrelerini, elemanlarını ve kullandığımız nesneleri tehlikeli gerilimlerden korumada ve elektriksel sistemlerin işletilmesi için gereken toprak potansiyelini sağlamada kullanılan bir elektrik tesisidir. Basitçe bir topraklama tesisi, topraklanacak yerin toprakla bağlantısını sağlayan topraklama iletkenlerinden ve toprağa gömülen topraklayıcı adı verilen iletkenlerden oluşur. Koruma görevini arıza koşullarında oluşan akımları, çevresi için tehlikeli gerilimler oluşturmada güvenli bir şekilde toprağa akıtarak yerine getirir.

Topraklama tesisleri normal işletme durumunda, varlığı hemen hemen hiç hissedilmediği halde bir arıza oluşması durumunda etkisini gösterir ve görevini yerine getirir. Bu nedenle topraklama, her an işletmede olmayan ve görünmeyen bir tür gizli tesistir ve elektrik tesisleri içinde topraklamaya hak ettiği önemi vermek gereklidir.

Doktora tez çalışmaları sonunda hazırlanacak tezin; bilime yenilik getirme, yeni bir bilimsel yöntem geliştirme, bilinen bir yöntemi yeni bir alana uygulama niteliklerinden birini yerine getirmesi gerekir. Bu tez çalışması, bugüne kadar doktora seviyesinde hemen hemen üzerinde hiç durulmayan topraklama sistemleri konusunda, her açıdan yeni bir yaklaşımı ortaya koymaktadır.

Bu nedenle, zorlu geçen tez çalışmalarım esnasında benden bir gün bile güler yüzünü esirgemeyen ve tezin iskeletinin oluşmasından son halini alıncaya kadar geçen süreçte, yardımlarını ve insanlığını hayatım boyunca unutamayacağım, hocam Sayın Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, desteği ve teşviki ile beni hiç yalnız bırakmayan tez danışmanım Doç. Dr. Nurettin UMURKAN'a, tez çalışmalarını birlikte yürüttüğümüz, zor dönemlerimde beni vazgeçmekten alıkoyan ve bunu iyi ki yapan, yazım ve hesap dönemlerinde beni yalnız bırakmayan dostum Elk.Yük.Müh. Okan İhsan ÖZTÜRK'e ve tezin yazımı esnasındaki yardımlarından dolayı Dr. Ece SAYGUN'a, kıymetli destekleri için aileme özellikle de kardeşlerim Şerafettin ve Ender ŞENTÜRK'e, TURKCELL İletişim Hizmetleri A.Ş. deki çalışma arkadaşlarıma ve tabi ki sorumluluklarımı benimle paylaşan ve desteğini hiç esirgemeyen eşim Pınar ŞENTÜRK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

ÖZET

Elektriksel topraklama, başta insanlar olmak üzere, canlıları, elektrik devrelerini, elemanlarını ve kullandığımız nesneleri tehlikeli gerilimlerden korumada ve elektriksel sistemlerin işletilmesi için gereken toprak potansiyelini sağlamada kullanılan bir elektrik tesisidir. Elektriksel topraklamada yaygın kullanılan bir topraklayıcı türü olan çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı sonlu farklar yöntemi kullanılarak, bilgisayar yardımı ile sayısal olarak kolaylıkla bulunabilir.

Bu tezin birinci bölümünde, çalışmanın amacı ve bu konuda daha önce yapılmış olan çalışmaların tarihsel akışı verilmiştir.

İkinci bölümde, elektriksel topraklama ile ilgili genel bilgiler ve temel tanımlar ile geçici rejimlerin herkes tarafından en çok bilinen türü olan yıldırım boşalmaları ile ilgili genel bilgiler ve tanımlar verilmiştir.

Üçüncü bölümde, yıldırım darbe gerilimine maruz kalan bir yüksek gerilim direğinin, elektrik alan teorisi ile desteklenen ve direk darbe empedansının hesaplanması için geliştirilen yeni bir ifadenin elde edilmesi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, ilk olarak geçici rejimlerde topraklama sistemlerinin davranışını incelemek amacı ile İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Kampüsü Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen yıldırım darbe gerilimi deneyi ve bu deneysel çalışma ile ilgili bilgiler ve sonuçlar verilmiştir. İkinci olarak, elektriksel topraklamada kullanılan topraklayıcı türlerinden biri olan çubuk topraklayıcıların yıldırım darbesine maruz kalmaları halinde, işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı sunulmuştur. Problemin sayısal hesabı, silindirselsel koordinatlarda, iki boyutlu sonlu farklar yöntemi ile geliştirilen bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır.

Bu tezde vurgulanmak istenen konu; farklı geometrilerde, boyutlarda ve derinliklerdeki topraklayıcılar için potansiyel dağılımı hesabı ile davranışlarının değerlendirilmesidir. Böylece, güvenli ve doğru topraklama tesisi tasarımının yapılabilmesi için önemli bir adım atılmış olacaktır.

Anahtar kelimeler: Elektriksel topraklama, yıldırım darbe gerilimi, direk darbe empedansı, potansiyel dağılımı, sonlu farklar yöntemi

ABSTRACT

Electrical grounding is an installation which protects firstly humans, living creatures, electrical circuits, circuit elements and using equipments from dangerously voltages and provides grounding potential that necessary for operate electrical systems.

The potential distribution around a rod electrode which commonly used a kind of grounding electrode can be easily obtained utilizing computer with using finite difference method.

In the first chapter of this thesis, aim of this study is given and studies that had been made in this subject are presented historically.

In the second chapter, general information and basic definitions on electrical grounding with general information and definitions related with transient states which is the most common form of the lightning discharge are given.

In the third chapter, the derivation of a new expression which makes use of the electrical field theory for the tower surge impedance of a high voltage tower which has been affected by a lightning surge voltage is described.

In the fourth chapter; firstly, lightning surge voltage experiment performed in Maslak Campus of Istanbul Technical University High Voltage Laboratory in order to examine behavior of the grounding systems during the transient states and informations and results related with it's experimental study is given. Secondly, the numerical calculation of potential distribution around the rod electrodes -commonly used a kind of grounding electrode in electrical grounding- exposed to a lightning surge voltage while functioning is presented. The calculations of the problem have been made with two dimensional finite difference method using a computer program.

The main point emphasized in this thesis is evaluation of the behavior of the grounding electrodes having different geometrical forms, sizes and depths by calculating the potential distribution calculation. In this way, a major improvement can be achieved towards designing reliable and accurate grounding installations.

Keywords: Electrical grounding, lightning surge voltage, tower surge impedance, potential distribution, finite difference method

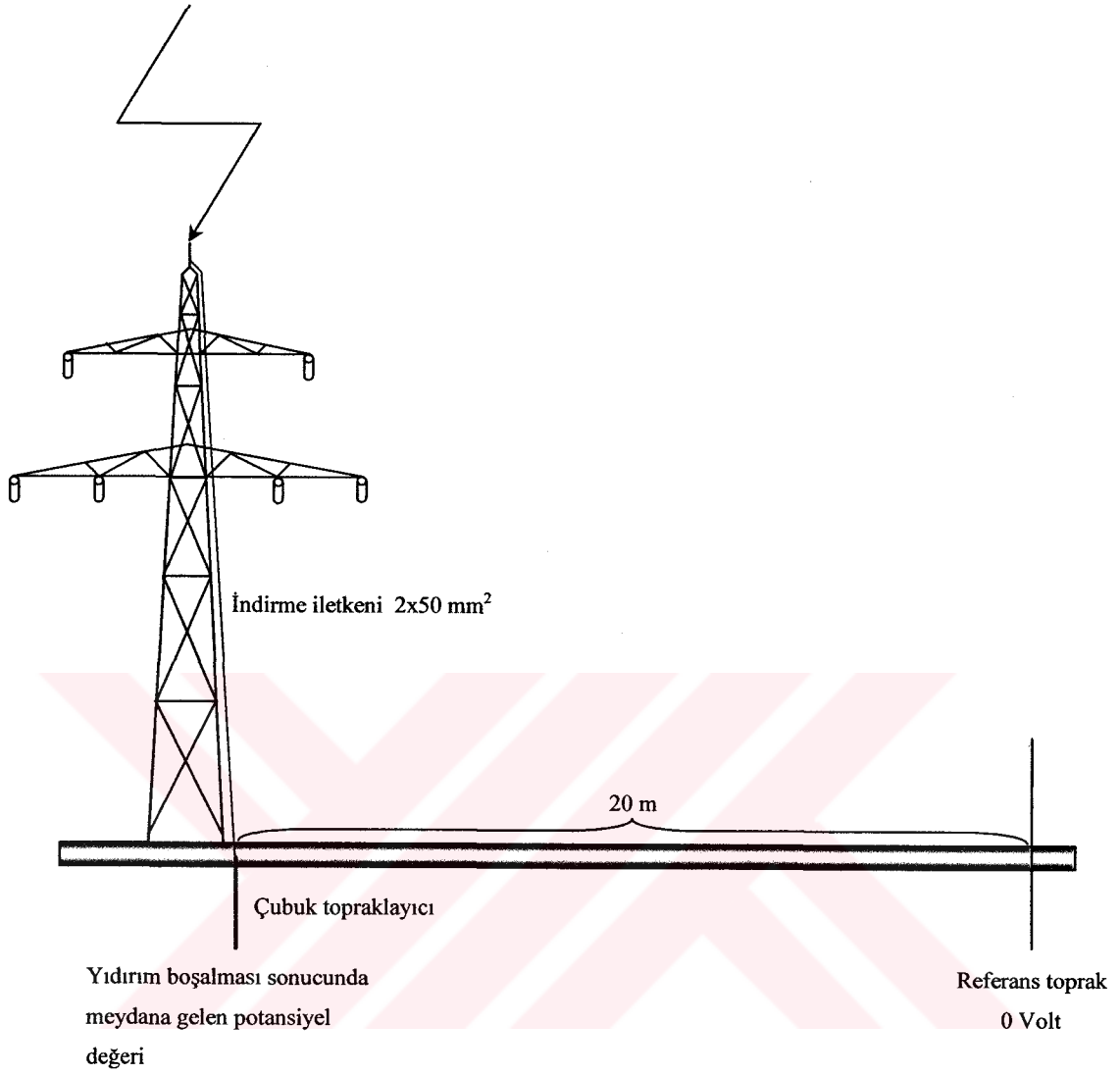
1. GİRİŞ

Yıldırım boşalmaları, açma kapama olayları, elektrostatik boşalmalar, kısa devreler ve toprak temasları, yüksek gerilim şebekelerinde çok kısa süre içerisinde kA'ler mertebesinde akımlar ve dolayısı ile çok yüksek potansiyel artışları oluşturur. Ortaya çıkan bu gerilimler canlılar için hayati tehlikeye yol açtığı gibi elektriksel cihazlar için de onarılamayacak hasarlar meydana getirir. Bu durumda göz önünde bulundurulması gereken en önemli şey toprağa karşı meydana gelen bu gerilimlerde belli bir sınırı sağlayabilmek için gerek elektrik güç sisteminin ve gerekse işletme araçlarının topraklanmasıdır.

Elektriksel topraklama, başta insanlar olmak üzere, canlıları, elektrik devrelerini, elemanlarını ve kullandığımız nesneleri tehlikeli gerilimlerden korumada ve elektriksel sistemlerin işletilmesi için gereken toprak potansiyelini sağlamada kullanılan bir elektrik tesisidir. Basitçe bir topraklama tesisi, topraklanacak yerin toprakla bağlantısını sağlayan topraklama iletkenlerinden ve toprağa gömülen topraklayıcı adı verilen iletkenlerden oluşur. Topraklama tesisi koruma görevini, arıza koşullarında oluşan akımları çevresi için tehlikeli gerilimler oluşturmadan güvenli bir şekilde toprağa akıtarak yerine getirir.

Bir topraklama tesisi üzerinde ve çevresinde oluşacak gerilim değeri, topraklama tesisini oluşturan, malzemenin türüne, boyutlarına, topraklayıcının gömülme ortamına ve koşullarına yakından bağlıdır. Atlama, delinme, dokunma, bağlanma gibi olaylar sonucu devrede veya elemanlarda meydana gelen kısa devrelerde veya yıldırım gibi elektriksel boşalmanın etkisinde topraklama tesisinden yüksek değerde akımlar geçer. Bu akımlarla topraklama tesisi ve bağlı olduğu yapılarda ortaya çıkacak gerilim düzeyi, topraklama direncine veya genel anlamda topraklama empedansına bağlıdır. Topraklama direnci ise toprağın ve topraklayıcının özelliklerine bağlıdır.

“Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi” adlı bu tez çalışmasında ortaya konmak istenen; topraklama sistemlerini oluşturan elemanların yıldırım boşalmasına maruz kaldıklarında gösterdikleri davranışların yeni bir bakış açısıyla incelenmesidir. Tez çalışmasında temel olarak ele alınan ve Şekil 1.1’de gösterilen sistem yüksek gerilim sistemlerinde veya GSM alt yapısındaki çelik konstrüksiyon direklerde kullanılan klasik bir yıldırımdan korunma sistemidir. Şekil 1.1’den de görüldüğü gibi sistem yakalayıcı çubuk, indirme iletkeni ve topraklayıcıdan oluşmaktadır. Sistemin işlevi; yıldırım boşalması sonunda maruz kalınan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmadan güvenli bir şekilde toprağa akıtmaktır.



Şekil 1.1 Çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği ve bu direğin yıldırımdan korunma ve topraklama sistemi

Topraklama sistemi, yıldırım boşalması sonrasında ortaya çıkan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmadan güvenli bir şekilde toprağa akıtırken, akım yolu üzerindeki elemanların ayrı ayrı değerlendirilmesi topraklama sisteminin performans analizini yapmak anlamına gelmektedir.

1.1 Çelik Konstrüksiyon Direklerin Darbe Empedans Hesabı

Tez çalışmasında akım yolu üzerinde yer alan ilk eleman olarak indirme iletkeni ve bu iletken ile darbe empedanslarının karşılaştırıldığı çelik konstrüksiyon direk ele alınmış ve direk darbe empedansının hesaplanabilmesi için yeni bir ifade elde edilmeye çalışılmıştır.

Yüksek gerilimli iletim direkleri, yeryüzündeki diğer yapılara göre genelde daha yüksek yapılardır ve genelde topraklıdır veya potansiyelleri toprak potansiyeline yakındır. Bu durum direklerin yıldırım bulutu altında elektrik alan şiddetinin yüksek, potansiyelin düşük olduğu yerler olmalarına yol açar. Bu durum da direklere yıldırım düşme olasılığını artırır.

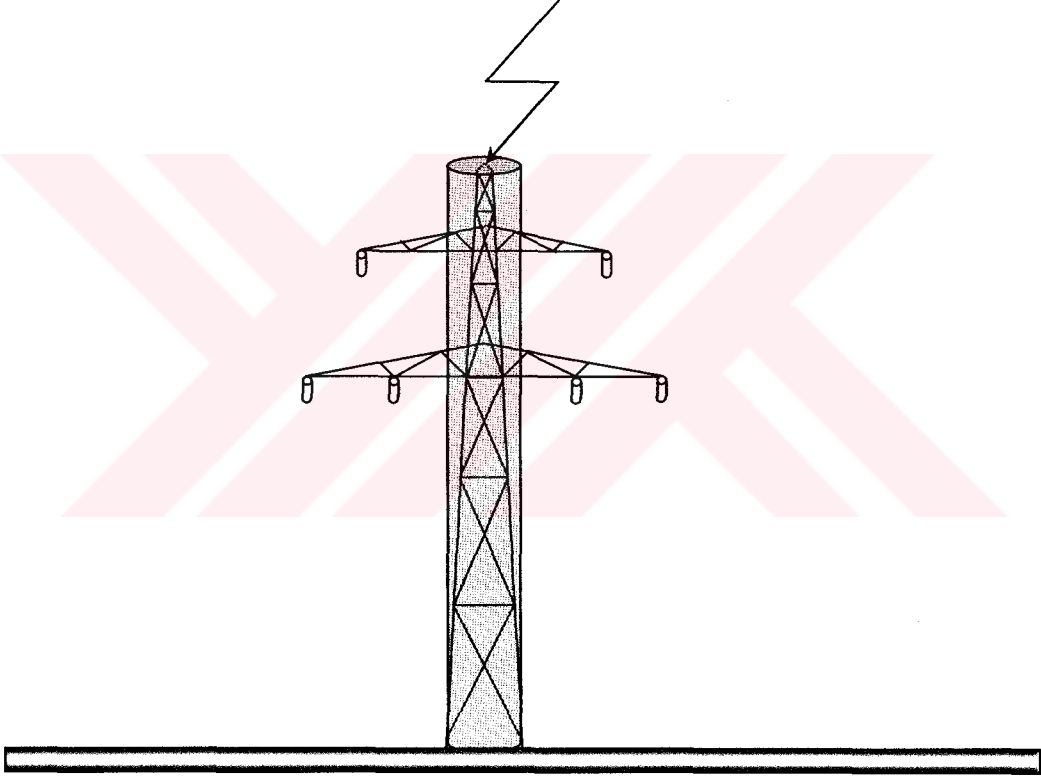
Direklerin yıldırımdan koruma tesisatında indirme iletkeni olarak $2 \times 50 \text{ mm}^2$ kesitli yuvarlak dolu bakır iletken kullanılmaktadır. Bu tür bir indirme iletkeni kullanılmayıp direk metal gövdesi akım yolu olarak seçilirse direğin darbe akımına karşı göstereceği direnç önem kazanır.

Yıldırım akımı, darbe şeklinde değişen, kısa süreli, büyük genlikli ve tek yönlü (pozitif veya negatif polariteli) bir akımdır. Yıldırım akımının aktığı yol boyunca karşılaştığı direnç, darbe direnci veya bu yolun omik direnci, endüktansı, kapasitesi ve frekans etkili olduğundan darbe empedansı adı verilir. Bu direnç, yıldırım akımının toprağa aktığı yol üzerinde olduğundan darbe topraklama direnci veya darbe topraklama empedansı olarak da adlandırılır. Bütün bu anlatılanlara ek olarak bir direğin darbe empedansı (veya karakteristik empedansı), ölçme ile deneysel olarak da belirlenmiştir. Bu işlem, ya gerçek bir direk üzerinde ya da ölçekli bir direk modeli üzerinde gerçekleştirilir. Ölçme ile darbe empedansının belirlenmesinde direk tepesinden genliği ve şekli belli bir darbe akımı uygulanıp direk uçlarında oluşan gerilim ölçülür. Uygulanması çok zor olan bu yöntem ile literatürde ölçülmüş direk darbe empedansı değerleri bulunmaktadır. Bu değerler, direk darbe empedansını vermenin yanında kuramsal hesap sonuçlarını doğrulamak açısından önemlidir.

Yüksek gerilimli iletim hatlarının yıldırım performansının hesaplanması için geliştirilen ve literatürde rastlanan en eski çalışma C.F. Wagner tarafından Aralık 1956'da yapılan ve AIEE'de (The American Institute of Electrical Engineers) yayınlanan, "A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines" adlı çalışmadır. Çalışma tamamen teorik bir çalışma olup, bu konuda daha sonra yapılacak olan çalışmalara temel teşkil etmiş yapıdadır.

C.F.Wagner "A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines" adlı çalışmada iletim hattı üzerinde meydana gelen bir yıldırım boşalmasında iletim hattının ve hattın üzerinde kurulduğu çelik konstrüksiyon direklerin performanslarını hesaplamak için yeni bir metot geliştirmiştir. Çalışmada kullanılan metot ile hesaplamalar yapılırken yıldırım boşalmasının direğin en üst noktasında meydana geldiği varsayılmış ve tüm hesaplamalar bu varsayımdan hareketle gerçekleştirilmiştir. Wagner'e

göre yıldırım darbe akımının direğin en üst noktasından toprağa doğru akarken izlediği yolun daha önce bu konuda söylenenlerin aksine yürüyen dalgalarda olduğu gibi yansıma ve kırılmalar ile gerçekleştiği yönündedir. Yani akım toprakla direğin birleştiği noktaya kadar belirli bir değerde akmakta bu noktadan sonra küçük bir kısmı toprağa doğru akarken diğer büyük kısmı yansıyarak direğin tepesine doğru hareket etmektedir. Wagner çalışmasında yıldırım darbe akımının ışık hızında hareket ettiğinden yola çıkarak ve direği silindir şeklinde modelleyerek bir takım elektriksel alan ifadeleri çıkarımlarında bulunmuştur. İfadelerin temelinde ise Maxwell'in elektrik alan ifadeleri bulunmaktadır. Wagner yüksek gerilimli iletim direğini Şekil 1.2'de görüldüğü gibi silindir olarak modellemiş ve tüm ifadelerinde silindrisel koordinatları kullanarak hesaplamalarını gerçekleştirmiştir.



Şekil 1.2 C.F. Wagner'in silindir formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği

“A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines” adlı çalışma, bir seri çalışmanın ilk ayağıdır. Bu çalışmada ele alınan temel sistem bir çelik konstrüksiyon direk ve bu direk üzerindeki tekli bir iletkeni içermektedir. Maxwell'in dinamik alan ifadelerinden yola çıkarak öncelikle akım dalgasının elektrik alan ifadesini ve yıldırım boşalması esnasında meydana gelen elektriksel potansiyel ifadesini elde etmiştir.

Daha sonra akımın vektör potansiyelini elde etmek için elektriksel potansiyel ifadesini ve elektrik alan ifadesini kullanmıştır. Böylece daha sonraki çalışmalarına temel olacak elektrik alan ifadelerini elde etmiştir. Bu ifadeler daha önceden bilinen ifadeler olup sadece yüksek gerilimli çelik konstrüksiyon direklerinin silindir formunda düşünülmesi sonucunda elde edilen ifadelerdir.

Şubat 1958’de, R. Lundholm, R.B. Finn,Jr. ve W.S. Price tarafından AIEE (The American Institute of Electrical Engineers)’de yayınlanan, “Calculation of Transmission Line Lightning Voltages by Field Concepts” adlı çalışma, C.F. Wagner tarafından Aralık 1956’da yapılan ve AIEE’de yayınlanan “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines” adlı çalışmadan esinlenerek gerçekleştirilmiş bir çalışmadır. Çalışmada, toprak koruma iletkenli iletim hattı ve bu hattın üzerinde bulunduğu çelik konstrüksiyon direkten oluşan sistem üzerindeki darbe akımının hesabı için yeni bir yaklaşım verilmiştir. Lundholm, Finn ve Price’a göre toprak koruma iletkenli iletim hattı ve bu hattın üzerinde bulunduğu çelik konstrüksiyon direkten oluşan sistemde direğin tepe noktasında meydana gelen bir yıldırım darbe akımı;

$$I_o = I_t + 2I_g \quad (1.1)$$

(1.1) ifadesinden de görüldüğü gibi toprak koruma iletkeninin iki yöne doğru olan I_g akımı ve direk üzerinden akan I_t akımından oluşmaktadır. Başka bir deyişle yıldırım darbe akımı üçe bölünmektedir. Bu ifadeden hareket edilerek sistemin elektrik alan ifadeleri çıkartılmış ve bu ifadelerden hareket edilerek darbe akımının elektrik alan ifadelerine bağlı ifadesi elde edilmiştir.

Daha sonra karşılaşılan çalışma C.F. Wagner ve A.R. Hileman tarafından Aralık 1959’da yapılan ve AIEE (The American Institute of Electrical Engineers)’de yayınlanan “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines-II” adlı çalışmadır. Bu çalışmanın amacı ise daha önce 1956 da C.F. Wagner tarafından yayımlanan “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines” adlı çalışmada elde edilen ifadelerin geliştirilmesi üzerinedir. Bu çalışmada ele alınan sistem toprak koruma iletkenli iletim hattı ve bu hattın üzerinde bulunduğu çelik konstrüksiyon direkten oluşmaktadır. Çalışmada öncelikle yıldırım darbe karakteristikleri anlatılmıştır. Yıldırım darbe karakteristiklerinin ilki olan darbe akımından bahsedilmiş, darbe akımı olarak

$$i = vcq_0 \quad (1.2)$$

ifadesi verilmiştir. Bu ifadede yer alan “ c ” ışık hızıdır (3×10^8 m/s), “ v ” ışık hızında hareket eden akımın yansıyan parçasının yansıma hızıdır. “ q_0 ” cm başına akım boşalması esnasında oluşan coulomb cinsinden elektrik yüküdür. Daha sonra toprakta indüklenen akımdan bahsedilmiştir. Çalışmada “Field-Cancellation Method” adı altında bir metottan bahsedilmiştir. Bu metodun amacı oldukça karmaşık olan elektrik alan ifadelerinin daha basit bir hale getirilmesidir. Bu şekilde daha önce 1956 da elde edilen ifadeler kullanılan yeni sistem için daha basit hale getirilmiştir. “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines-II” adlı çalışmada bahsedilen en önemli metot daha sonraki birçok çalışmada kullanılan “Loop-Voltage Method” dur. Bu metoda göre eğer bir elektrik alanı oluşturan çizgisel integral vektörel olarak kapalı bir çevrim oluşturuyor ise sistemin elektrik alan ifadesi çevrimi oluşturan tüm integrallerin toplamına eşittir. Tümü metal aksamdan oluşan elemanların elektrik alan çizgisel integrali sıfır kabul edilebilir çünkü her elemanın birbirine elektriksel iletkenliğin sürekliliği sağlanarak bağlandığı düşünülmüştür. Bu metot kullanılarak yapılan son hesaplamada ise (1.2) ifadesinde verilen elektriksel potansiyel ifadesi elde edilmiştir.

$$\int_0^0 E.ds = 30.I_l \ln \frac{ct}{ct-x} \quad (1.3)$$

İfadede yer alan “ x ”, “ $0'$ ” den “ 0 ” a kadar olan mesafedir. Böylece toprak koruma iletkenli iletim hattı ve bu hattın üzerinde bulunduğu çelik konstrüksiyon direktan oluşan sistem için hem iletkenin hem de direğin silindriksel koordinatlarda düşünülerek yapılan hesapları sonucunda sistemin elektriksel potansiyel ifadesi elde edilmiştir.

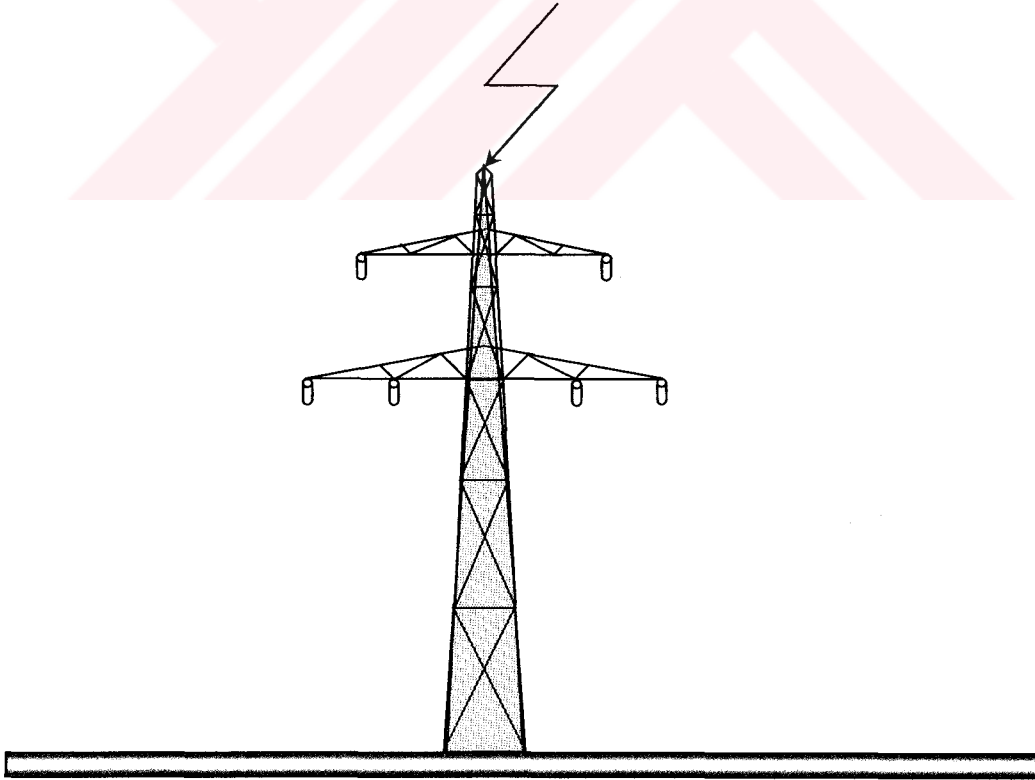
Ekim 1960’da AIEE’de C.F. Wagner ve A.R. Hileman tarafından yayınlanan “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines III-A Simplified Method: Stroke to Tower” adlı çalışma, daha önce C.F. Wagner tarafından Aralık 1956’da yapılan ve AIEE (The American Institute of Electrical Engineers)’de yayınlanan “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines” ve C.F. Wagner ve A.R. Hileman tarafından Aralık 1959’da yapılan ve AIEE (The American Institute of Electrical Engineers)’de yayınlanan “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines-II” adlı çalışmaların devamı niteliğindedir. İlk iki çalışma, yıldırım darbe akımına maruz kalan çelik konstrüksiyon direğin, direk üzerindeki iletkenin ve toprak koruma iletkeninin performans incelemesi için temel bir takım düşünceleri ve ifadeleri ortaya koymaktadır. Bu çalışma ise daha basitleştirilmiş ifadeleri ilk iki

çalışmadaki temel ifadelerden yararlanarak ortaya koymak üzerinedir. Çalışma sonunda ortaya konan ve (1.4)'te verilen direk darbe empedansı ifadesi daha sonra pek çok bilim adamı tarafından yapılan çalışmalar için temel teşkil eder niteliktedir.

$$Z_t = 60 \ln \sqrt{2} \frac{ct}{r_t} \quad (1.4)$$

ifadede yer alan “c” ışık hızını, “t” yıldırım darbe akımının süresini, “ r_t ” ise çelik konstrüksiyon direğin silindir olarak modellenmesi sonucunda temel alanının hesabında kullanılan temel yarıçapını göstermektedir. Bu temel çalışmada ortaya konulan direk darbe empedansı ifadesi bugün bile pek çok bilim adamı tarafından kabul edildiği gibi geçerliliğini korur niteliktedir.

M.A. Sargent ve M. Darveniza tarafından Mayıs 1969'da IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'de yayınlanan, “Tower Surge Impedance” adlı çalışmada daha önce yapılan ve yukarıda verilen tüm çalışmalara atıfta bulunularak yeni bir yaklaşım ortaya konmuştur. Sargent ve Darveniza çelik konstrüksiyon direği daha önceki çalışmalarda olduğu gibi silindir şeklinde değil Şekil 1.3'te görüldüğü gibi koni şeklinde modellemişlerdir.



Şekil 1.3 M.A. Sargent ve M. Darveniza'nın koni formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği

Sargent ve Darveniza'ya göre yüksek gerilimli iletim hatlarında kullanılan çelik konstrüksiyon direkler silindirden çok koni formunda bulunmaktadır. Bu nedenle daha önceki çalışmalarda olduğu gibi yine elektrik alan ifadelerinden yararlanılmışlar ancak çalışmalarını sadece silindir formuna yönelik değil aynı zamanda koni formuna uygun olarak sürdürmüşlerdir. Daha önceki çalışmalar ile aynı mantığı yürütmeyi sürdürmüşler, Maxwell denklemlerinden faydalanarak önce kurdukları modelin vektör magnetik potansiyel ifadesini ortaya koymuşlar daha sonra bu ifadeden hareketle elektrik alan ifadesini elde etmişlerdir. Elektrik alan ifadesinin çizgisel integralinden yararlanarak vektörel potansiyel ifadesini elde etmişlerdir. Silindir formundaki bir direğin üzerinde olması muhtemel yıldırım boşalma akımının iki farklı şekli için işlem yapılmıştır. Bunlardan birincisi dikdörtgen dalga şeklindeki akıma, silindir olarak modellenmiş direğin darbe cevabının analizidir. İkincisi ise rampa dalga şeklindeki akıma, silindir olarak modellenmiş direğin darbe cevabının analizidir. Her iki durum için ayrı ayrı ifadeler verilmiştir. Sargent ve Darveniza teorik çalışmalarını yürütürlerken bazı kabullerde bulunmuşlardır;

- Toprak ve direk iletkenliği sonsuzdur.
- Direkte hiçbir şekilde Korona etkisi yoktur.
- Boşalma akımının hızı ışık hızına eşittir.
- Akım boşalma boyunca bulunduğu dalga formunu değiştirmemektedir.

Dikdörtgen dalga şeklindeki akıma, silindir olarak modellenmiş direğin gösterdiği darbe empedansı ifadesi;

$$Z = 60 \cdot \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) \quad (1.5)$$

şeklinde elde edilmiştir.

Rampa dalga şeklindeki akıma, silindir olarak modellenmiş direğin gösterdiği darbe empedansı ifadesi;

$$Z = 60 \cdot \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) - 60 \quad (1.6)$$

şeklinde elde edilmiştir.

Teorik analizler yapılırken Sargent ve Darveniza koni formunda düşündükleri direk modelleri

için boşalma akımının sadece dikdörtgen dalga şeklindeki akıma, koni olarak modellenmiş direğin gösterdiği darbe empedansı ifadesini elde etmişlerdir.

Dikdörtgen dalga şeklindeki akıma, koni olarak modellenmiş direğin gösterdiği darbe empedansı ifadesi;

$$Z = 60 \ln \left(\frac{\sqrt{2}}{S} \right) \quad (1.7)$$

şeklinde elde edilmiştir. İfadedeki “S” modelleme için kullanılan koninin tepe açısının yarısının sinüs değeridir.

W.A. Chisholm, Y.L. Chow ve K.D. Srivastava tarafından Eylül 1983’de IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems’de yayınlanan “Lightning Surge Response of Transmissions Towers” adlı çalışmada daha önceki yıllarda yapılan çalışmalardan farklı bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Chisholm, Chow ve Srivastava’ya göre bir yüksek gerilim direği üzerinde yıldırım boşalması, her zaman direk tepesinden aşağıya doğru dikey olarak meydana gelmez. Yıldırım boşalması iki kısımda değerlendirilmelidir ve hesaplar bu iki ayrı durumdan hangisi ortaya çıkıyor ise o duruma göre yapılmalıdır.

1983 yılında Chisholm, Chow ve Srivastava’nın yaptıkları çalışmaya kadar yapılan çalışmalardan, Sargent ve Darveniza’nın 1969’da yaptıkları “Tower Surge Impedance” adlı çalışma hariç tamamı direklerin silindir olarak modellenmesini ortaya koymuşlardı. Chisholm, Chow ve Srivastava ise yıldırım boşalmasının dikey ve yatay konumda olmasına göre çözümlenmesi gerektiği fikrini ortaya koymuşlardır. Böylece direklerin hem silindir hem de koni şeklinde modellendiği hallerde ifadelerini vermişlerdir.

Yıldırım boşalmasının dikey konumda olması durumunda direk darbe empedansı ifadeleri daha önce verilen ifadelerde olduğu gibi,

Silindir modeli için;

$$Z_i = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{ct}{r} \right) \quad (1.8)$$

Koni modeli için ise;

$$Z_i = 60 \ln \left(\frac{\sqrt{2}}{\sin \theta} \right) = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) \quad (1.9)$$

şeklinde verilmiştir. (1.9) ifadesindeki “ θ ” koninin tepe açısının yarısıdır.

Chisholm, Chow ve Srivastava çalışmalarında yıldırım boşalmasının yatay konumda olması durumunda direk darbe empedansı ifadelerini,

Silindir modeli için;

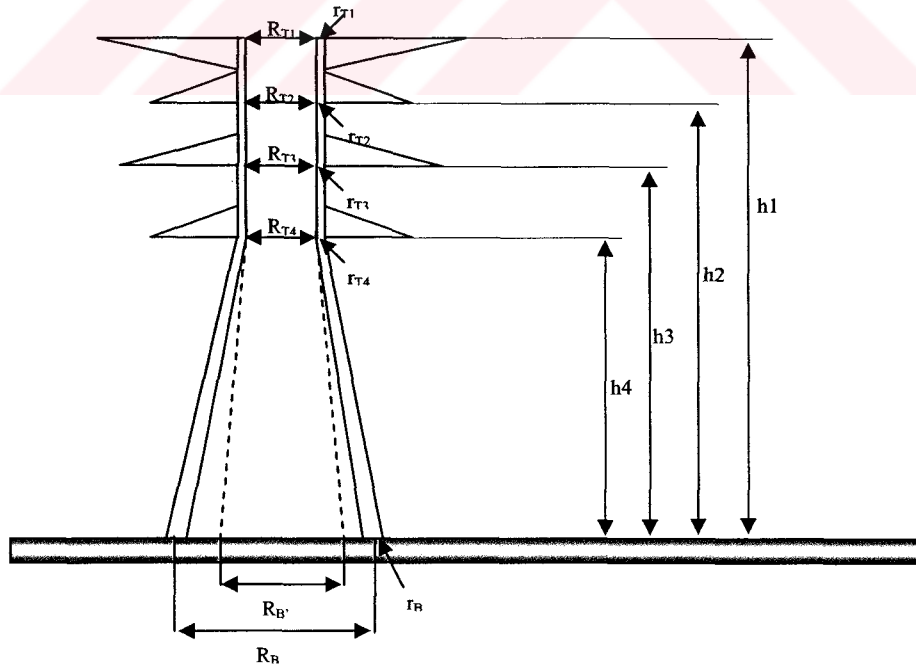
$$Z_t = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h-ct} \right) \right) \right) \quad (1.10)$$

Koni modeli için;

$$Z_t = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{rct}{h(h-ct)} \right) \right) \right) \quad (1.11)$$

şeklinde vermişlerdir.

T. Hara ve O. Yamamoto’nun 1996’da IEE Proceeding Generation, Transmission, Distribution’da yayınlanan “Modelling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis” adlı çalışmalarında direk darbe empedansının hesaplanabilmesi için bir amprik ifade önermişlerdir.



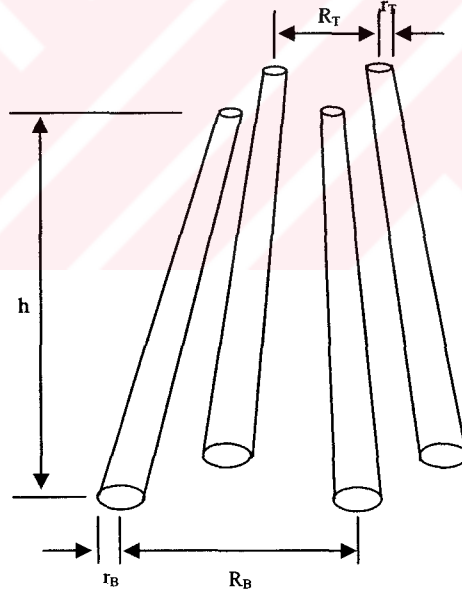
Şekil 1.4 Hara ve Yamamoto’nun parçalı silindir formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği

Bu çalışmada da direğin silindir olarak modellendiği düşünülmüştür. Çalışmanın daha önceki çalışmalardan farkı modellemede direğin tek bir parça halinde, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi üst üste 4 ayrı parçadan oluştuğunun düşünülmesidir.

Hara ve Yamamoto'nun önerdiği amprik ifade;

$$Z_T = 60 \left(\ln \frac{2\sqrt{2}h}{r_e} - 2 \right) \quad (1.12)$$

şeklinde verilmiştir. İfadede yer alan “ h ” direğin tepe noktasının yerden yüksekliğidir. “ r ” ise parçalı olarak modellenmiş sistemin eşdeğer silindir taban yarıçapıdır. Burada önemli olan eşdeğer silindir yarıçapının hesaplanmasıdır. Hara ve Yamamoto sistemi dört ayrı parçaya böldükleri gibi direğin çelik konstrüksiyon ayaklarını ve gövdesini de dikey bir yol boyunca taban noktasından tepe noktasına kadar ayrı ayrı parçalara bölmüşler ve bu konstrüksiyon kısmını da Şekil 1.5'te görüldüğü gibi ayrıca bir silindir şeklinde modellemişlerdir.



Şekil 1.5 Hara ve Yamamoto'nun parçalı silindir formunda modellediği çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği gövdesi

Eşdeğer direncin hesaplanması için verilen ifade;

$$r_{ek} = 2^{1/8} (r_{Tk}^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} (R_{Tk}^{1/3} R_B^{2/3})^{3/4} \dots\dots\dots(k=1,2,3,4) \quad (1.13)$$

şeklindedir. Her model parçası için eşdeğer yarıçap hesabı ayrı ayrı yapılmış ve sonuçta elde edilen her değer için ayrı ayrı direk darbe empedansları hesaplanmıştır. Her parça için elde edilen direk darbe empedansı ifadeleri toplanarak direğin tamamının darbe empedansı hesaplanmıştır.

Y. Baba ve M. Ishii'nin Nisan 1999'da IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınlanan "Numerical Electromagnetic Field Analysis on Measuring Methods of Tower Surge Impedance" adlı çalışmalarında çift devreli bir direğin darbe empedansının hesaplanabilmesi için 1996'da Hara ve Yamamoto'nun yaptığı çalışmaya benzer bir şekilde çelik konstrüksiyon direği parçalı olarak silindir şeklinde modellemişler ve bunun sonucunda yeni bir ifade vermişlerdir. Verdikleri ifadeden elde ettikleri sonuçları daha sonra karşılaştırabilecekleri bir çalışma yapmışlar ve direklerin darbe empedanslarını ölçmüşlerdir. Darbe empedanslarını ölçmek için direğin tepe noktasına darbe generatörü ile darbe akımı uygulamışlardır. Direğin tepe noktası ile tabanı arasına bağlanan bir gerilim ölçer ile direk üzerinden darbe akımının geçmesi esnasında oluşan gerilimi kaydetmişlerdir. Daha sonra bu ölçüm sonuçlarını uyguladıkları darbe akımlarına bölerek direk darbe empedanslarını hesaplamışlardır. Direk darbe empedansının hesaplanması için, IEEE Working Group on Estimating Lightning Performance of Transmission Lines'ın 1993 de yayınladığı "IEEE working group report - Estimating Lightning Performance of Transmission Lines-II- updated to analytical models" ve 1996'da gözden geçirerek güncellediği "IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines" çalışmalardan elde edilen (1.14)'te verilen ifade kullanılmıştır.

$$Z_{T.IEEE} = \sqrt{\frac{\pi}{4}} 60 \left(\ln \cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{R_{avg}}{h_1 + h_2} \right) - \ln \sqrt{2} \right) \quad (1.14)$$

İfadedeki " R_{avg} ";

$$R_{avg} = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{h_1 + h_2} \quad (1.15)$$

şeklinde hesaplanmıştır. " r_1 " direk tepe yarıçapıdır. " r_2 " direk orta yarıçapıdır. " r_3 " direk taban yarıçapıdır. " h_1 " direğin tabanından orta noktasına kadar olan yüksekliktir. " h_2 " ise

direğin orta noktasından tepe noktasına kadar olan yüksekliktir. Bütün büyüklükler metre cinsinden hesaba katılmıştır.

Tez çalışmasının ilk adımı olan bu çalışmada direk darbe empedansını hesaplamak için yeni bir ifade elde edilmeye çalışılmıştır. Amaç; elde edilen ifade ile birlikte daha önce literatürde kullanılan tüm ifadelerin sonuçlarını sayısal bir örnek üzerinde irdelemektir. İfade elde edilirken direk yine tek bir silindir olarak modellenmiştir. Çalışmada kullanılan metot ile hesaplamalar yapılırken yıldırım boşalmasının direğin en üst noktasında meydana geldiği varsayılmış ve tüm hesaplamalar bu varsayımdan hareketle gerçekleştirilmiştir. Yıldırım darbe akımının ışık hızında hareket ettiğinden yola çıkarak akımın direğin tepe noktasından toprağa doğru akarken izlediği yolun sadece direk yüksekliği kadar olmadığı yürüyen dalgalarda olduğu gibi yansıma ile yoluna devam ettiği düşünülmüştür. Yani yürüyen dalga'nın yansıyan ilk bileşeninin en yüksek değerde olduğu düşünülmüş ve diğer bileşenleri hesaplama'ya katılmamıştır. Işık hızında akımın yıldırım boşalması sona erene kadar " t " zamanında izlediği yol bu durumda akımın kendisi ve ilk yansıması ile birlikte " $2h$ " olarak kabul edilmiştir. Çalışmada öncelikle Maxwell denklemleri yazılmıştır. Elektrik alanın eğrisel bir yol boyunca bir noktadaki integrali o noktadaki vektör magnetik potansiyelinin zamana göre türevinin o noktadaki integraline eşittir. Dolayısı ile öncelikle vektör magnetik potansiyeli ifadesi silindirsel koordinatlarda kurulan modelden faydalanılarak yazılmıştır. Daha sonra Vektör magnetik potansiyelinin zamana göre türevi alınmıştır. Elde edilen ifadenin yüzey üzerindeki herhangi bir noktadaki integrali bize o noktadaki potansiyel farkını verecektir. Potansiyel farkı Ohm kanunundan da bilindiği gibi empedans çarpı akıma eşittir. Yani sonuç ifadede akımın dışında kalan ifade bize direk darbe empedansını vermektedir.

Günümüzde özellikle de Türkiye'de direkleri yıldırımdan koruma tesisatında indirme iletkeni olarak $2 \times 50 \text{ mm}^2$ kesitli yuvarlak dolu bakır iletken kullanılmaktadır. Bu tür bir indirme iletkeni kullanılmayıp direk metal gövdesi akım yolu olarak seçilirse direğin darbe akımına karşı göstereceği empedans önem kazanmaktadır. Tez çalışmasında yapılmak istenen direk darbe empedansı ifadelerinden yararlanarak piyasada kullanılan bir direğin darbe empedansını hesaplamak ve indirme iletkeni olarak $2 \times 50 \text{ mm}^2$ kesitli yuvarlak dolu bakır iletken kullanılması durumundaki iletkenin darbe empedansı ile karşılaştırmaktır. Karşılaştırma sonucuna göre yıldırımdan korunma tesisatında kullanılan indirme iletkeninin fonksiyonu incelenmiş olacaktır.

1.2 Yıldırım Darbe Gerilimlerinde Toprağın ve Topraklayıcının Davranışının İncelenmesi

Tez çalışmasında yıldırım darbe akımının koruma sisteminde izlediği akım yolu üzerinde yer alan ikinci ve belki de en önemli eleman olarak topraklayıcılardan en yaygın kullanılan çubuk topraklayıcı ele alınmıştır.

Yıldırım darbe akımının topraklayıcıya ulaştıktan sonra topraklayıcıdan toprağa doğru akıtılması esnasında topraklayıcı ve toprağın davranışının incelenmesi özellikle sistemin yakınlarındaki canlıların sağlıklarının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bir topraklama tesisi üzerinde ve çevresinde oluşacak gerilim değeri, topraklama tesisini oluşturan, malzemenin türüne, boyutlarına, topraklayıcının gömülme ortamına ve koşullarına yakından bağlıdır. Atlama, delinme, dokunma, bağlanma gibi olaylar sonucu devrede veya elemanlarda meydana gelen kısa devrelerde veya yıldırım gibi elektriksel boşalmanın etkisinde topraklama tesisinden yüksek değerlerde akımlar geçer. Bu akımlarla topraklama tesisi ve bağlı olduğu yapılarda ortaya çıkacak gerilim düzeyi, topraklama direncine veya genel anlamda topraklama empedansına bağlıdır. Topraklama direnci ise toprağın ve topraklayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu basit gibi görünen bağlılık zinciri pek çok araştırmaya konu olmuştur. Topraklayıcının geometrisine (çubuk, levha, şerit, boru,...), boyutlarına, gömülme derinliğine, toprağın öz direncine gibi birçok büyüklüğe bağlı olarak topraklama direncinin belirlenmesi, topraklama konusunda kuramsal ve deneysel çalışmaların ilgi odağı olmuştur.

Bu nedenle “Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi” adlı bu tez çalışmasında topraklayıcının ve toprağın davranışını incelemek üzere iki ayrı çalışma yürütülmüştür. İlk çalışma tezde “Yıldırım Darbe Deneyi” adı altında bir bölüm olarak verilmiş deneysel bir çalışmadır. İkinci çalışma ise yine tezde “Yıldırım Darbe Gerilimlerinde Toprağın ve Topraklayıcının Davranışının İncelenmesi için Geliştirilen Sayısal Uygulama” adı altında bir bölüm olarak verilen kuramsal bir çalışmadır.

1.2.1 Yıldırım Darbe Deneyi

Bu deneysel çalışmada amaç; toprağı modellemek amacı ile toprak yerine elektrolitik sıvı kullanarak, bu elektrolitik sıvı içine yerleştirilen çubuk elektrotun yıldırım darbe geriliminde davranışını ve bununla birlikte toprağın yıldırım darbe geriliminde davranışını analiz etmek olmuştur. Deneysel çalışma üç ayrı deneyden meydana gelmiştir. Kullanılan deney düzeneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü’ne ait İ.T.Ü. Maslak kampüsünde yer alan Yüksek Gerilim Laboratuvarında kurulmuştur.

Bütün deneylerin başlangıcında deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı, hava basıncı ve yüzde cinsinden ortam bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Çizelgelerde verilmiştir.

İlk olarak; topraklama sisteminin direkt olarak toprağa bağlı olduğu durumda ölçüm direnci üzerinden geçen akımın direnç üzerinde oluşturduğu gerilimin ölçülmesi amaçlanmıştır. İkinci olarak; deney kabının içi 65 cm seviyede elektrolitik sıvı olarak çeşme suyu ile dolu iken birinci deneyden farklı olarak akımın geçeceği yola topraklama çubuk elektrotu ve deney kabının içindeki çeşme suyu dahil edilmiştir. Topraklama elektrotunun derinliği belirli bir değerde tutulmuş, böylece elektrot ucu merkez kabul edilerek bir yarı daire modeli gerçekleştirilmiş ve akım dağılımının nasıl gerçekleşeceği ölçüm ile belirlenmeye çalışılmıştır. Üçüncü olarak ise; deneyde kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğini arttırmak için sıvıya belirli miktarda sofr tuzu eklenmiş ve sıvının iletkenliği 2 micro.siemens/cm olduktan sonra topraklama elektrotunun derinliği belirli bir değerde tutulmuş, böylece elektrot ucu merkez kabul edilerek bir yarı daire modeli gerçekleştirilmiş ve akım dağılımının nasıl gerçekleşeceği ölçüm ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları çizelgelere kayıt edilmiş ve üzerinde çalışılmak üzere elektronik ortamda saklanmıştır.

Deneyler gerçekleştirildikten sonra elde edilen tüm sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, çalışılan topraklama direnci aralığında çubuk elektrotu uygulanan gerilimi, dolayısıyla akımı değiştirmenin sonuçları etkilemediği göstermiştir. Bunun nedeni toprak modeli olarak kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğinin yüksek, karşı düşen öz direncin çok büyük olmasıdır. Çünkü uygulamada 50-100 ohmlar mertebesinde olan toprak öz dirençleri üzerindeki gerilim düşümleri geçen akımın büyüklüğü ile orantılı olarak yüksektir. Çalışmada ise sabit genlikli darbe gerilimi için kilo ohm mertebesinde öz direnci olan elektrolitten geçen akımlar çok küçük olmuştur. Her üç deneyde direnç değerini değiştirmek öz direnci ve akımı değiştirecek ölçüde olmadığından sonuçlarda bu durum görülmüştür. Bu durumda toprağın davranışını değerlendirmeye yarayacak seviyede farklılıklar olmadığı açıktır. Bu da fark yaratacak düzeyde elektrolitik ortam iletkenliği sağlanamadığını göstermiştir. Bu farkı yaratabilmek için iletkenliği azaltmak dolayısı ile öz direnci büyütmek gerekir. Ancak elektrolitik sıvının iletkenliğinin damıtık su düzeyi veya daha düşük düzeyde iletkenliğe sahip olması deneysel olarak oluşturma zorluğu yaratmıştır. Bu nedenle mevcut olanaklar içindeki iletkenlikte çalışılmış ve sonuçların değişimi ve aralarındaki farklar incelenmiştir. Bu inceleme küçük öz dirençli toprak içinde çubuk

topraklayıcı davranışını incelemek bakımından yararlı olmuştur. Beklendiği gibi topraklayıcının içinde bulunduğu ortamın iletkenliğinin yüksek öz direncinin küçük olması darbe topraklamasında topraklayıcı ve çevresinde oluşan potansiyel dağılımının basık ve küçük genlikli olmasına neden olmuştur.

Literatürde en çok rastlanan toprak öz direnç değeri 100 ohm.metre'dir. Bu düzeyde bir toprak öz direncine eşdeğer ortam elde edebilmek için 0,01 siemens/metre iletkenliğe sahip bir ortam oluşturmak gerekir. Bunun için piyasada bulunan en düşük iletkenliğe sahip sıvı kullanılacak olsa bile bunun mertebesi 20 micro.siemens/metre olduğundan, bize 50000 ohm.metrelik bir öz direnç sağlayacaktır. Bu da farklı iletkenlik seviyelerindeki toprağın davranışını incelemeye yetecek düzeyde bir aralık sağlanmasına imkan olmadığını göstermiştir. Bu durumda, yayılma direncini deneysel olarak hesaplamak için, öz direnç parametresi daha fazla değiştirilemediğinden, boyutları değiştirmek gerekmektedir. Buradan da deney kabının çapının ve yüksekliğinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışma bu gereksinimi sağlama durumu ortaya çıkınca sona erdirilmiş ve teorik analizlere geçmeye karar verilmiştir.

1.2.2 Toprağın ve Topraklayıcının Davranışının İncelenmesi İçin Ortaya Konan Sayısal Uygulama

Teorik analizlere geçilmesinden sonra yapılan literatür taramasında, topraklayıcıların işlevlerini yerine getirirlerken performans analizlerinin yapılması konusunda farklı şekillerde gerçekleştirilmiş pek çok çalışma ile karşılaşmıştır. Bu çalışmalardan tez çalışmasına esin kaynağı olan bazılarının tarih sırasına göre aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

F.Dawalibi ve D. Mukhedkar, Nisan 1975'te IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'de yayınladıkları "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure" adlı çalışmada kendileri tarafından geliştirilen bir bilgisayar programı aracılığı ile iki katmanlı bir toprak modeli üzerinde ağ topraklayıcılar kullanarak bu topraklayıcıların tarafında ve özellikle de toprak yüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımlarını hesaplayarak grafikler halinde vermişlerdir.

J.G. Sverak, Ocak 1984'te IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'de yayınlanan "Simplified Analysis of Electrical Gradients Above a Grounding Grid-I How Good Is The Present IEEE Method? (A Special Report For WG 78.1)" adlı çalışmada IEEE'nin 1976 da yayınladığı 80 standardında yer alan IEEE Gradient method'unu kullanarak topraklama ağlarının köşelerindeki dokunma ve adım gerilimlerini hesaplamıştır.

F.P. Dawalibi, R.D. Southey ve R.S. Baishiki, Nisan 1990'da IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "Validity of Conventional Approaches for Calculating Body Currents Resulting From Electric Shocks" adlı çalışmalarında iletim ve dağıtım tesislerinin yakınlarında dokunma ve adım gerilimlerinin sonucunda insan vücudundan akan elektrik akımlarını hesaplamak için IEEE 80 standardında ortaya konmuş olan metotları tartışmışlardır.

T. Takahashi, ve T. Kawase, Nisan 1991'de IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "Calculation of Earth Resistance for a Deep-Driven Rod in a Multi-Layer Structure" adlı çalışmalarında çok katmanlı bir toprak içinde yatay olarak döşenmiş bir derin topraklayıcının toprak direncini hesaplamak için bir ifade elde etmişlerdir. Çalışmada amaç; hem topraklayıcının toprak direnci için yeni bir matematiksel ifade elde etmek, hem de bu ifadenin elde edilmesi sonrasında toprak katmanlarının dirence olan etkisini ortaya koymak olmuştur.

B. Thapar, V. Gerez, A. Balakrishnan ve D.A. Blank, Ocak 1992'de, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "Finite Expression and Models for Footing Resistance in Substations" adlı çalışmalarında şalt sahalarındaki adım direncini hesaplamak için sonlu bir ifade ve modeller vermişlerdir.

B. Thapar, V. Gerez ve P. Emmanuel, Ocak 1993'te, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "Ground Resistance of the Foot in Substation Yards" adlı çalışmalarında şalt sahalarındaki adım toprak direncini hesaplamak için daha önce IEEE 80 standardında verilen ifadelerin doğruluğunu tartışmışlar ve kendilerine ait olan ve daha doğru sonuçlar verdiği inandıkları ifadelerini vererek bu ifadeleri karşılaştırmışlardır.

A.P.S. Meliopoulos, F. Xia, E.B. Joy ve G.J. Cokkinides, Ocak 1993'te, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis" adlı çalışmalarında moment metoduna dayanan topraklama sistemlerinin analizi için kendileri tarafından geliştirilen yeni bir metodoloji ve bilgisayar programını anlatmışlardır.

F.P. Dawalibi, W. Xiong ve J. Ma, Ocak 1993'te, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "Effects of Deteriorated and Contaminated Substation Surface Covering Layers on Foot Resistance Calculations" adlı çalışmalarında iletim ve dağıtım tesislerinin yakınlarında dokunma ve adım gerilimlerinin sonucunda insan vücudundan akan elektrik akımlarını hesaplamak için IEEE 80 standardında ortaya konmuş olan metotları değişik bir

bakış açısıyla ele almışlardır. Yazarlar IEEE 80 standardında ortaya konmuş olan adım direnci hesaplama metodunu, yüzeyi kırık kaya parçaları ile kaplı şalt sahaları için uygulamışlardır.

B. Thapar, V. Gerez ve H. Kejriwal, Ocak 1994'te, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "Reduction Factor for the Ground Resistance of the Foot in Substation Yards" adlı çalışmalarında yüzeyi çakıl taşları ile kaplı bir şalt sahasının adım toprak direncinin belirlenmesi için kullanılan ifadelerle bir düzeltme faktörü ortaya koymuşlardır.

J.H. Bogensperger, J. Frei ve S. Pack, 1995'te, Ninth International Symposium on High Voltage Engineering'te yayınladıkları "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behaviour" adlı çalışmalarında topraklama sistemlerinin geçici ve kalıcı davranışlarını incelemişlerdir. Yazarlar bu çalışmalarında EMTP simülasyonundan faydalanmışlar ve klasik yıldırımdan korunma topraklama sistemleri için bir darbe empedansı ifadesi elde etmeye çalışmışlardır.

M. Heimbach ve L.D. Grcev, Ocak 1997'te, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları "Grounding System Analysis in Transient Programs Applying Electromagnetic Field Approach" adlı çalışmalarında transient programlar için özenli bir şekilde hazırladıkları elektromagnetik modellerini kullanarak kompleks bir topraklama sistemi ortaya koymak için bir strateji geliştirmeye çalışmışlardır.

M.B. Kostic, Temmuz 1998'te, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladığı "Analysis of Complex Grounding Systems Consisting of Foundation Grounding Systems With External Grids" adlı çalışmasında, hali hazırda kurulu olan ve sadece topraklama ağının bulunduğu bir topraklama sistemine yeni bir topraklama sisteminin daha eklenmesi halinde sistem toprak direncindeki değişimin hesaplanması ve sistem yalnızca topraklama ağına sahipken var olan toprak direnci ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

J.G. Sverak, Temmuz 1998'de, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladığı, "Progress in Step and Touch Voltage Equations of ANSI/IEEE Std 80- Historical Perspective" adlı çalışmasında, 1961'den 1998'e kadar adım ve dokunma gerilimlerinin hesaplanabilmesi için geliştirilen temel formülleri ve bunlardan korunma kriterlerinin kronolojik bir akışını derlemiştir.

Q. Meng, J. He, F.P. Dawalibi ve J. Ma, Temmuz 1999'da, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladıkları, "A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions" adlı çalışmalarında, toprakta derin bir delik

açılması, delikte meydana getirilen bir patlama ile toprakta çatlaklar oluşturulması ve bu çatlakların basınçla düşük dirençli materyal (LRM) ile doldurulması adımlarını kapsayan metotlarından bahsetmişlerdir.

A. Geri, Temmuz 1999'da, IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınladığı, "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation" adlı çalışmasında, değişik yaklaşımlarla yapılan simülasyonlar, deneysel testler ve sayısal analizlerin sonuçlarını karşılaştırarak bir model ortaya koymuş ve yüksek darbe akımlarında topraklama sistemlerinin davranışlarını incelemiştir.

R. Zeng, J. He, Z. Wang, Y. Gao, W. Sun ve Q. Su, 2000'de IEEE'de yayınladıkları, "Analysis on Influence of Vertical Grounding Electrodes on Grounding Systems for Substation" adlı çalışmalarında, çoklu toprak tabakalarında çubuk topraklama elektrotlarının seçim kurallarına ilişkin bir öneride bulunmuşlardır. Ayrıca çalışmada elektrotların seçimi yapılırken elektrot sayısının kaç tane olması gerektiği ve elektrot sayısı ile uzunlukları arasındaki ilişkiden de bahsedilmiştir.

M.I. Lorentzou ve N.D. Hatziargyriou, 2002'de, 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion MED POWER 2002'de yayınladıkları, "Proposed Methodology for Calculation of the Transient Response of Grounding Systems" adlı çalışmalarında, bir topraklama sisteminin, sistemde kısa devre oluşması veya yıldırım boşalmasına maruz kalması hallerinde, geniş frekans aralığına ihtiyaç duyan, geçici durum cevabının hesaplanması için bir metodoloji önermişlerdir. Yine aynı konferansta yayınladıkları "Effective Design of Large Grounding Systems" adlı çalışmalarında, geniş bir alanı kapsayan topraklama sistemlerinin efektif dizaynları için düşük ve yüksek frekanslarda davranışlarını ortaya koymuşlardır.

V.T. Kontargyri, I.F. Gonos, F.V. Topalis ve I.A. Stathopoulos, 2002'de, 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion MED POWER 2002'de yayınladıkları, "Transient behaviour of a horizontal grounding grid under impulse current" adlı çalışmalarında PSCAD/EMTDC(Power Systems Computer Aided Design/ Electromagnetic Transients for DC) programlarını kullanarak yıldırım darbe akımına maruz kalan bir topraklama ağının geçici durum davranışını incelemişlerdir.

M. Osman, G. Chen ve N. Pilling 2003'te, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'te yayınladıkları, "Effect of High Resistive Barrier on earthing system" adlı

çalışmalarında, bir su tankı kullanarak oluşturdıkları deney düzenekleri üzerinde önce ağ ve daha sonra çubuk elektrot kullanarak oluşturdıkları modeli kullanarak bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada bütün model üzerindeki topraklama sisteminin ve topraklama sistemine uygulanan resistif bariyerin etkisi ile ortaya çıkan sistem performansı deneysel ve bilgisayar destekli olarak hesaplanmıştır.

J. He, G. Yu, Y. Gao, J. Zou ve Z. Guan, 2003'te, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'te yayınladıkları, "Lightning transient characteristics of substation considering soil ionization around grounding conductors of grounding System" adlı çalışmalarında, bir topraklama sisteminden yıldırım akımı akarken şalt sahasında oluşan elektromagnetik alanı hesaplamaya çalışmışlar ve hesaplanan elektromagnetik alanda toprak iyonizasyonunun etkisi göstermişlerdir.

C. Lu, J. He, Y. Gao, R. Zeng ve J. Zou 2003'te, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'te yayınladıkları, "Effective lenght of extended earthing electrode under lightning impulse" adlı çalışmada, yıldırım geçici durum karakteristikleri ile toprak iyonizasyonunun toprak elektrodu üzerindeki dinamik ve non-lineer etkisi analiz edilerek, yıldırım darbe akımı, üzerinden akarken toprak elektrodunun bulunması gereken etkili derinliğin hesaplanmasına çalışılmıştır.

F. Van Der Linde, B.Zedan, H. Griffiths, A. Haddad, K. Walker, D. Frame, N. MacDonald, C. Horne, ve J. Porter, 2003'te, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'te yayınladıkları, "The impulse response of Earth grids" adlı çalışmalarında, topraklama ağlarının darbe cevaplarının ağı gözlerinin yoğunluğuna, ağı oluşturan elektrotların çevrelerinin uzunluğuna ve ağ boyutlarına bağlı olduğunu göstermeye çalışmışlardır.

J. Zou, J. Guo, J.L. He ve R. Zeng 2003'te, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'te yayınladıkları, "Speedy analysis of transient voltages in large grounding systems" adlı çalışmalarında, ilk olarak topraklama sistemi omik dirençli, self ve karşılıklı endüktanslı hayali birkaç parçaya ayrılarak analize başlanmıştır, ikinci olarak bu parçaların her birinin birbirlerine bağlı oldukları ve bu bağlanan parçaların hepsinin aynı zamanda elektromagnetik alan modeli adı verilen bir sanal devreye bağlı oldukları varsayılarak, topraklama sisteminin kapasitif etkisi simule edilmeye çalışılmıştır, son olarak da EMTP programı vasıtası ile seçilen keyfi bir akım dalgasının geçici durum cevabı gösterilmiştir.

I.F. Gonos, V.T. Kontargyri, F.V. Topalis ve I.A. Stathopoulos, 2003'te, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'te yayınladıkları, "Transient behaviour of a

horizontal electrode under impulse current” adlı çalışmalarında PSCAD/EMTDC (Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients for DC) programlarını kullanarak yıldırım darbe akımına maruz kalan bir yatay topraklayıcının geçici durum davranışını incelemişlerdir.

M.A. Abdallah, 2003’te, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering’te yayınladığı, “Effect of soil ionisation on the lightning current distribution in earthing system” adlı çalışmasında, geçici bir yıldırım boşalmasında, bir topraklama sisteminin dinamik ve nonlineer cevabını modellemek istemiştir. Kurduğu ilk model her biri 2,5 cm çaplı 9 m uzunluğundaki 6 çubuk elektroddan oluşan modeldir, ikinci model her biri 1,5 cm çaplı 2 m uzunluğundaki 4 çubuk elektroddan oluşan modeldir, her iki modelde 1 metre derine gömülmüş 0,5 mm kesitindeki bakır iletken ile birbirine bağlanmışlardır. Yazar kurduğu bu sistemi Electromagnetic transient program (EMTPDC) ile analiz etmiştir.

M.A. Abdallah, 2003’te, yine XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering’te yayınladığı, “High frequency performance of an earthing system” adlı çalışmasında, Yıldırımdan korunma tesisatlarında çok önemli bir yere sahip olan çubuk elektrotların detaylı bir parametrik analizini (frekans, çubuk elektrot uzunluğu, çubuk elektrot çapı, toprak direnci ve toprak geçirgenliği), bir topraklama dizayn yazılımı olan HIFREQ modülünü ve iki ayrı eşdeğer devre kullanarak gerçekleştirmiştir. Çalışmasında 50 Hz’den 50 MHz’e kadar geniş bir frekans aralığı kullanmıştır.

K. Tanabe ve A.Asakawa, 2003’te IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)’de yayınladıkları, “Computer Analysis of Transient Performance of Grounding Grid Element Based on the Finite-Difference Time-Domain Method” adlı çalışmalarında, Sonlu Fark Zaman Domeni metodunu kullanarak bilgisayar analizi ile topraklama ağlarını oluşturan ağ elemanlarının geçici rejimlerdeki performanslarını hesaplamışlar, bu sonuçları deneysel ve analitik sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

V.A. Toseva ve L.Grcev, 2003’te IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)’de yayınladıkları, “Theoretical Aspects of High Frequency Analysis of Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil” adlı ilk çalışmalarında, Elektromagnetik alan teorisi yaklaşımına dayanan non-uniform iki tabakalı toprakta topraklama sistemlerinin yüksek frekans analizi için yeni bir model ortaya koymuşlardır. “High Frequency Current Distribution in Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil” adlı ikinci çalışmalarında ise, iki tabakalı toprak yapısında, topraklama sistemlerinin yüksek frekans analizinin

araştırma sonuçlarını ortaya koymuşlardır.

Bu tez çalışmasında ise, daha önce yapılan pek çok çalışmanın paralelinde, elektriksel topraklamada yaygın olarak kullanılan topraklayıcı türlerinden biri olan çubuk topraklayıcıların yıldırım darbesine maruz kalmaları halinde, işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı Sonlu Farklar Yöntemi kullanılarak sunulmuştur.

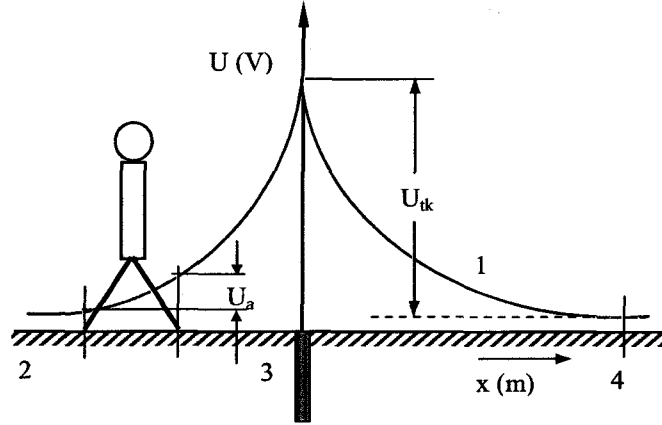
Problemin sayısal hesabı, silindrisel koordinatlarda, iki boyutlu sonlu farklar yöntemi ile geliştirilen bir bilgisayar programı metodolijisi kullanılarak yapılmıştır. Geliştirilen bu yöntem; topraklayıcıların çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabına yeni bir bakış açısı getirmesinin yanında, canlıların can güvenliği bakımından önemli olan adım ve dokunma gerilimlerinin boyutunu ve değişimini vermekte ve elektriksel topraklayıcılar çevresinde potansiyel dağılımı hesapları için farklı bir yaklaşım seçeneği sunmaktadır.

Elektriksel topraklama, başta insanlar olmak üzere, canlıları, elektrik devrelerini, elemanlarını ve kullandığımız nesneleri tehlikeli gerilimlerden korumada ve elektriksel sistemlerin işletilmesi için gereken toprak potansiyelini sağlamada kullanılan bir elektrik tesisidir. Basitçe bir topraklama tesisi, topraklanacak yerin toprakla bağlantısını sağlayan topraklama iletkenlerinden ve toprağa gömülen topraklayıcı adı verilen iletkenlerden oluşur. Koruma görevini arıza koşullarında oluşan akımları, çevresi için tehlikeli gerilimler oluşturmadan güvenli bir şekilde toprağa akıtarak yerine getirir.

Bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı, dokunma ve adım gerilimlerinin büyüklüğünü belirler. Dokunulan yer ile ondan 1 m uzaklıktaki nokta arasındaki potansiyel farkı, dokunma gerilimi olarak; 1 m uzunluğundaki bir adımda iki ayak arasındaki potansiyel farkı da adım gerilimi olarak adlandırılır. Her iki gerilimin de tehlikeli olmayacak sınırlarda olması gerekir. Bu gerilimler hakkında bir şey söyleyebilmek için potansiyel dağılımını bilmek gerekir.

Daha önce yapılan ve bazılarında yukarıda örnekler verilen çalışmalar ile yayınlanmış yönetmelik ve standartlarda, topraklama direncini hesaplamak için amprik, analitik ve sayısal birçok formül ve yöntem, verilmekte; topraklama direncini ölçerek belirlemek için birçok ölçme yöntemi açıklanmaktadır. Sonuçta belli bir direnç değerine sahip bir topraklayıcıdan bir akım geçtiğinde, topraklayıcıda referans toprağa göre bir gerilim oluşur ve topraklayıcı ile referans toprak arasında Şekil 1.6'da görüldüğü gibi bir potansiyel dağılımı ortaya çıkar. Burada sözü edilen referans toprak kavramı, topraklayıcı çevresinde oluşan bir potansiyel

dağılımında potansiyelin teorik olarak sıfır kabul edildiği toprak bölümüdür. Uygulamada bir topraklayıcıdan yaklaşık 20 m uzaklıktaki toprak bölümü referans toprak olarak kabul edilir.



Şekil 1.6 Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı.

$U(V)$: Gerilim Ekseni
 $x(m)$: Uzaklık eksenini
 U_{ik} : Topraklayıcı Gerilimi

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

Hesaplama için kullanılan Sonlu Farklar Yönteminde, genel olarak düzgün gözlerden oluşan ağlar kullanılır. Düzgün olmayan bir ağ ile türevsel denkleme karşılık fark denklemlerinin yazımı ve çözümü zorluk gösterir. Bu nedenle sayısal hesaplarda düzgün olmayan ağ ile çalışılmaktan kaçınılır. Bir bölgeyi örten bir ağ; kare, üçgen, altıgen veya çokgen (poligon) gözlerden oluşabilir. Fakat genelde düzgün bir ağın gözleri, kare veya eşkenar üçgendir.

Kurulan modelde karesel gözlere sahip bir ağ tercih edilmiştir. Her ağ 2 x 2 metrelik bir kareden oluşmaktadır. Bu şekilde düşünülerek kurulmuş olan 2 metrelik tek elektrotlu sistem Şekil 4.3'te verilmiştir. Çubuk elektrot üzerindeki ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel, çubuk elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir. Hesaplamalarda daha sonraki çalışmalara referans teşkil

etmesi açısından, çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki her noktada ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilerek çözüm gerçekleştirilmiştir.

“Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi” adlı bu tez çalışmasında ortaya konmak istenen en önemli konu; topraklama sistemlerini oluşturan elemanların yıldırım boşalmasına maruz kaldıklarında gösterdikleri davranışların yeni bir bakış açısıyla incelenmesidir. Sistemin işlevi; yıldırım boşalması sonunda maruz kalınan bir darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmaktan güvenli bir şekilde toprağa akıtmaktır.

Topraklama sistemi, yıldırım boşalması sonrasında ortaya çıkan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmaktan güvenli bir şekilde toprağa akıtırken, akım yolu üzerindeki elemanların ayrı ayrı değerlendirilmesi, topraklama sisteminin performans analizini gerçekleştirmek anlamına gelmektedir. Bu nedenle Şekil 1.1’de verilen temel sistemden de görüldüğü gibi, tez çalışmasında akım yolu üzerinde yer alan ilk eleman olarak indirme iletkeni ve bu iletken ile darbe empedanslarının karşılaştırıldığı çelik konstrüksiyon direk ele alınmış ve çelik konstrüksiyon direk için yeni darbe empedansı ifadesi elde edilmiştir. Akım yolu üzerinde yer alan ikinci eleman olarak çubuk topraklayıcılar ele alınmış ve yıldırım darbesine maruz kalmaları halinde, işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı Sonlu Farklar Yöntemi kullanılarak sunulmuştur. Bu iki çalışmanın yürütülebilmesi için gerekli olan temel bilgiler, tezin Ek 1 ve Ek 2 bölümlerinde ayrı ayrı verilmiştir.

2. ELEKTRİKSEL TOPRAKLAMA ve YILDIRIM BOŞALMALARI

2.1 ELEKTRİKSEL TOPRAKLAMA ve TOPRAKLAMA SİSTEMLERİ

Topraklama tesisleri normal işletme sırasında varlığını hemen hemen hiç belli etmediği halde bir arıza anında etkili olur ve görevini yapar. Bu yüzden topraklama her an işletmede olmayan ve görünmeyen bir çeşit tesis olarak sistemde yerini alır.

Topraklama sisteminde topraklayıcı olarak; çubuk, şerit, levha topraklayıcılar ile şerit topraklayıcıların bir çeşidi olan topraklama ağları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Topraklanacak sistemin toprak ile bağlantısını en iyi şekilde sağlamak için topraklama elektodunun her noktasında toprakla en iyi temas etmesini sağlamak esastır. Mümkün ise topraklayıcı yer altı suyu ile temas etmelidir. Göl ve nehir suları içerisinde erimiş maden tuzlarının az ve dolayısı ile bu suların iletkenliklerinin düşük olması nedeni ile topraklayıcıların direkt olarak bu sulara konması uygun olmaz. Yayılma direncinin küçük olmasını sağlamak amacıyla topraklayıcı etrafında çakıl veya taşın bulunmamasına dikkat edilmelidir (Bayram,1977,1995).

2.1.1 Topraklama ile İlgili Temel Kavramlar

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

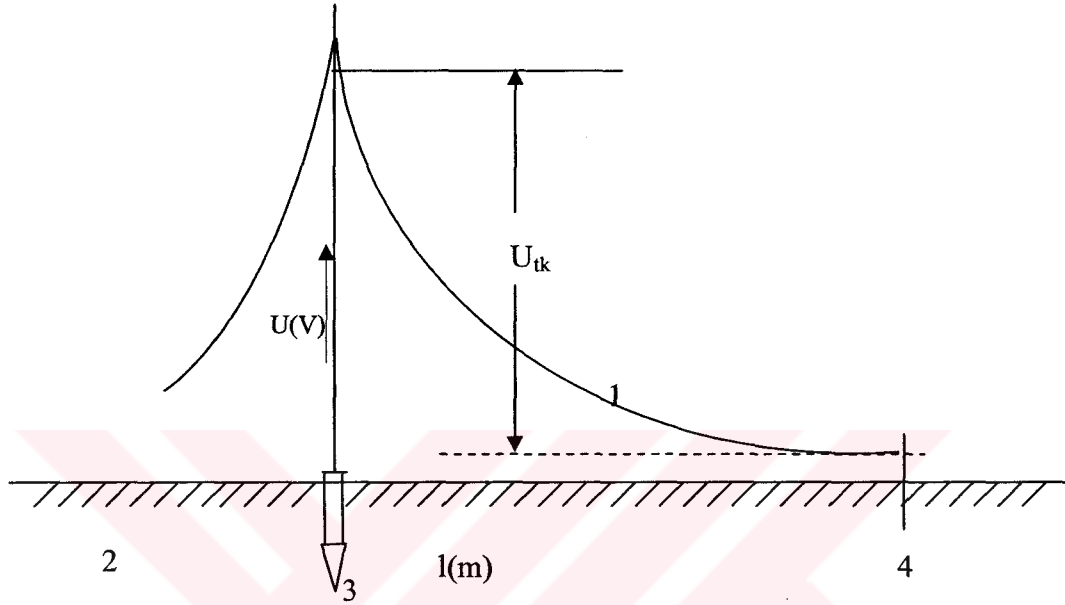
Topraklama: Topraklanacak olan iletken kısımların bir topraklama tesisi üzerinden toprağa bağlanmasıdır.

Topraklayıcı: Yer altında toprağa gömülen ve bununla şebekede bulunan topraklanacak iletken kısımlar arasında bağlantısı bulunan bir iletkenidir. Topraklama sisteminde topraklayıcı olarak; çubuk, şerit, levha topraklayıcılar ile şerit topraklayıcıların bir çeşidi olan topraklama ağları kullanılmaktadır.

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

Potansiyel Dağılımı: Topraklanmış bir işletme aracında, bir hata sonucu olarak, bir gövde kısa devresi olduğunda, referans toprağından itibaren ölçülmek üzere söz konusu işletme aracına doğru yeryüzündeki potansiyel dağılımıdır. Ya da başka bir deyişle yüksek gerilim

istasyonlarında bir yıldırım darbesinin isabet etmesi durumunda toprağın “h” kadar altına gömülmüş olan topraklama ağının referans toprağa göre yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımıdır.



Şekil 2.1 Topraklayıcının referans toprağa göre yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı

$U(V)$: Gerilim Ekseni
 $l(m)$: Uzaklık ekseni
 U_{tk} : Topraklayıcı Gerilimi

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

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

Toprağın Özgül Direnci: Dünyanın doğal yapısını oluşturan maddenin yani toprağın özgül elektriksel direnci olup genellikle $\text{ohm.mm}^2 / \text{m}$ veya ohm.m cinsinden verilir. Bu değer bir

kenarının uzunluğu 1 m olan toprak bir küpün karşılıklı iki yüzeyi arasındaki direnç değeridir. Toprağın özgül direnci farklı tipteki topraklar için farklı değerler alır.

Çizelge 2.1 Farklı tipteki topraklar için toprak özgül direnci değerleri

Zemin Cinsi	Toprak Özgül Direnci (ohm.m)
Bataklık	5-40
Kil, Humus	20-200
Kum	200-2500
Çakıl	2000-3000
Dağlık Bölgede havanın etkisi ile dağılmış taş	Çoğunlukla 1000 den az
Granit, Kumtaşı	2000-3000

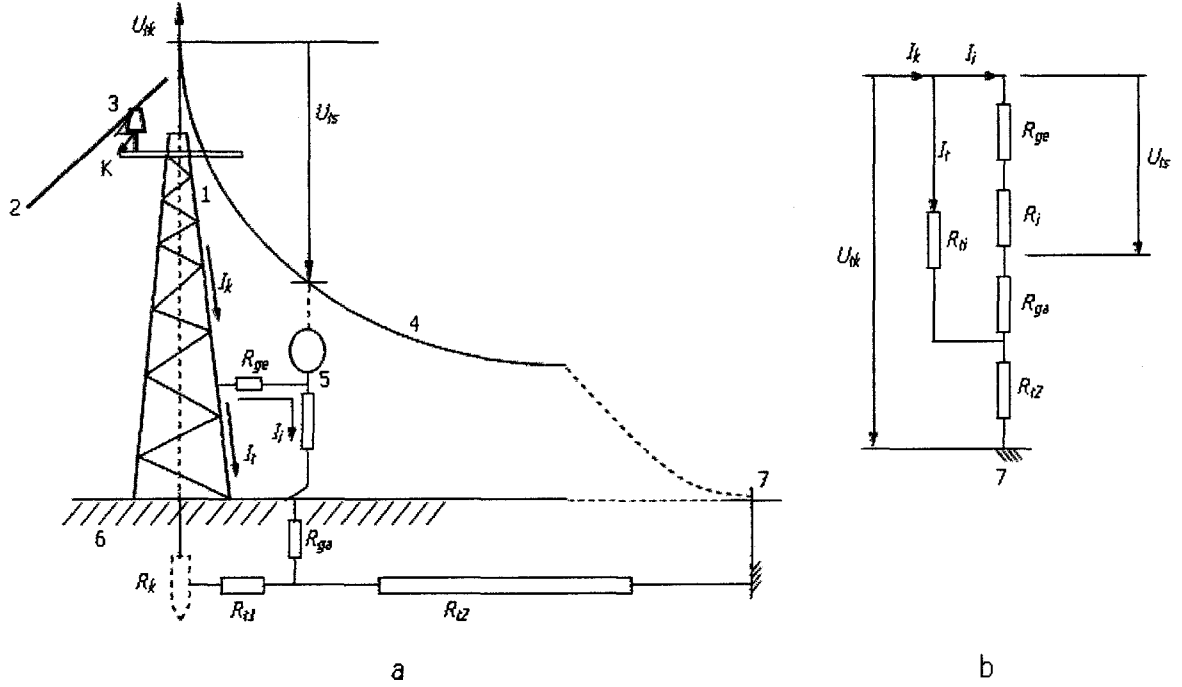
Topraklayıcı Yayılma Direnci: Bir topraklayıcı veya topraklama tesisi ile referans toprağı arasındaki dirençtir.

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

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

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

Temas Gerilimi: Bir yüksek gerilim hava hattına ait bir direk üzerindeki bir izolatörde bir atlama olması sonucunda bir faz hattının direğin topraklanmış olan madeni gövdesine temas ettiği ve hata yerinden I_k gibi bir hata akımının geçtiği kabul edildiğinde, hatalı 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_{tk} - Topraklayıcı gerilimi

U_{ts} - İnsan teması esnasındaki temas gerilimi

I_k - Bir faz 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.

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

Şekil 2.2'den görüleceği gibi, topraklayıcıya ait toplam yayılma direnci $R_t = R_y$ olup ayağın yere temas ettiği yerden topraklayıcıya kadar olan kısmı R_{t1} ve referans toprağına kadar olan kısmı R_{t2} ile gösterilmiştir. Buna göre;

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

dir.

Temastan önceki temas gerilimi, bu durumda;

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

olur.

Bu bağıntı temas geriliminin topraklayıcı geriliminin bir kısmı olduğunu açıkça gösterir. İdeal bir koruma topraklamasında $R_{ti} = 0$ olması gerektiğinden, ideal duruma $U_{te} = 0$ 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'deki eşdeğer 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,

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

yazılabilir.

Buradan da, insan vücudunun teması esnasındaki temas gerilimi,

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

oldüğundan,

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

veya

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

olur.

Ancak burada bazı özel durumlardan bahsetmek gerekmektedir.

Özel Durumlar;

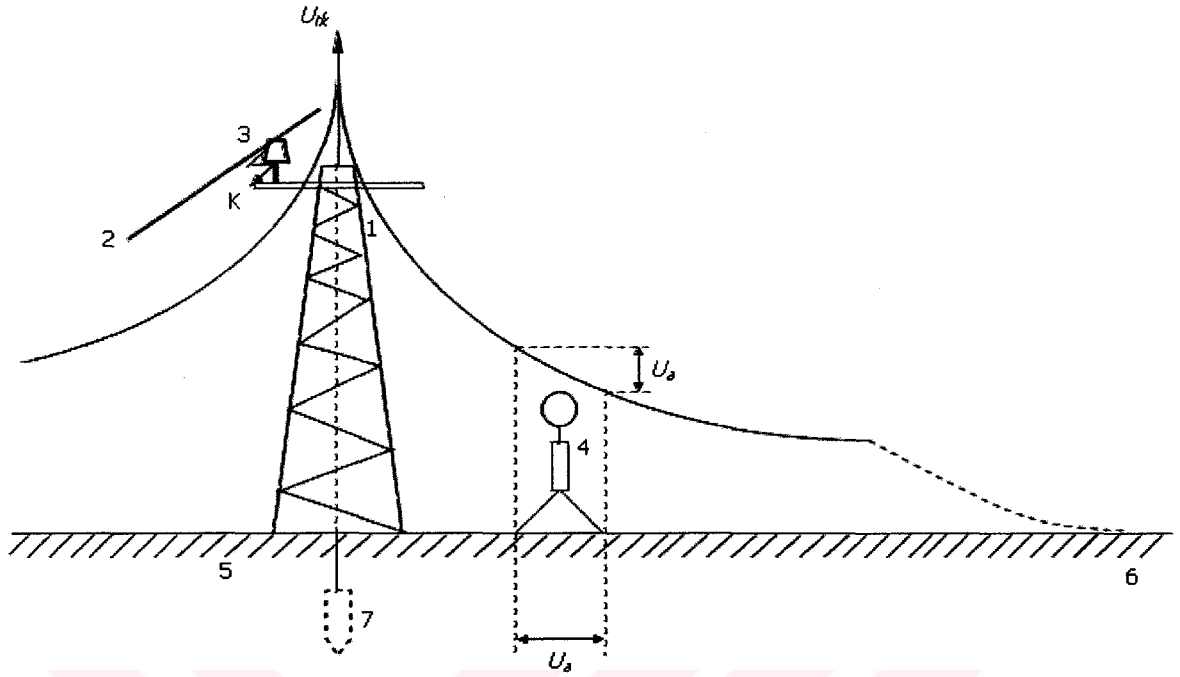
- 1) $R_i = 0$ ise bu durum, direğe dokunan insanın iletken bir elbise örneğın madeni bir zırh giyinmiş olmasına karşılık düşer. Bu durumda $U_{ts} = 0$ olur ve bir tehlike söz konusu olmaz.

- 2) $R_i = \infty$ ise buna göre insan vücudunun direnci sonsuzdur. Denklem (2.9)'a göre temas gerilimi olarak $U_{ts} = I_k \cdot R_{t1} = U_{te}$ elde edilir. Fakat bu durumda insanın üzerinden akım geçmeyeceği için bir kaza olmaz.
- 3) $R_{ga} = 0$ ise söz konusu insanın bastığı yer ıslaktır veya ayakkabıların tabanı madenidir. Ayrıca $R_i \gg R_{t1}$ olduğundan R_i yanında R_{t1} ihmal edilerek temas gerilimi $U_{ts} = I_k \cdot R_{t1} = U_{te}$ değerini alır. Zeminin ıslak olması, temas geriliminin büyük ve tehlikenin daha fazla olmasına yol açar.
- 4) $R_{ga} = \infty$ ise bu durum, insanın toprağa ayak bastığı yerin yalıtılmış olmasına karşılık 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 insanın ayak bastığı yer iletken olup topraklayıcı ile ve topraklanacak kısım ile bağlanmıştır. Bu koşullar altında insan vücudunun direnci kısa devre edilmiş olduğundan $R_i = 0$ 'dır. $U_{ts} = 0$ olduğundan bu durum ideal topraklamaya karşılık düşer.

Adım Gerilimi: Adım gerilimi alçak gerilim sistemlerinde 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 bu gerilime bağlı olarak bir akım geçer.

Şekil 2.3'te bir faz toprak kısa devresi durumunda oluşan potansiyel dağılımı ve toprak üzerinde buna karşı düşen eş potansiyel 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 her bir ayağı karşı düşen potansiyellerin farkına eşittir.

İnsanların ve hayvanların eş potansiyel çizgilere dik olarak yürümesi durumunda iki ayakları arasındaki potansiyel farkı yani adım gerilimi en büyük değerdedir. Eş potansiyel çizgilere paralel olarak hareket eden insanın ayakları arasındaki adım gerilimi sıfır değerindedir. Başka yönlerdeki adım gerilimleri maksimum değer ile sıfır arasında değişir. Ayrıca adım geriliminin değeri, adım uzunluğuna da bağlıdır.



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

- 1- Madeni direk
- 2- Hava hattı
- 3- İzolatör
- 4- Potansiyel alandaki insan
- 5- Toprak
- 6- Referans toprağı
- 7- 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 bir değer alır ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım gerilimi değeri hızla düşer. Bu yüzden genellikle adım gerilimi, temas gerilimine göre daha küçük değerde olur. Adım gerilimi yüzünden bir tehlike yalnız topraklayıcı veya topraklama tesisi üzerinden bir hata akımı geçtiğinde baş göstermez, aynı zamanda topraklayıcının direnci büyük akımlar ile test edilerek ölçüldüğünde de meydana gelir. Bu nedenle bu gibi durumlarda önlem alınması gereklidir. Bir insanın adım uzunluğunun yaklaşık 1 metre olduğu ve akımın da bir ayaktan öteki ayağa doğru geçtiği kabul edilir. Bir ayaktan diğer ayağa akım geçtiğinde kalp üzerinden geçen akım şiddetinin aynı koşullar altında; bir

elden diğer ele geçerken kalp üzerinden geçen akımın 1/10'ine eşittir. Bu nedenle yönetmeliklerde izin verilen temas gerilimine göre daha büyük bir adım gerilimine izin verilir ($U_t = 65 \text{ V}$, $U_a = 90 \text{ V}$).

Bütün bu anlatılanların ışığında topraklayıcılar, yüksek gerilim alanının ne içinde ne de dışında temas ve adım gerilimleri ile bir tehlike meydana gelmeyecek şekilde yapılmalı ve yerleştirilmelidir.

2.1.2 Topraklamanın Çeşitlerine Göre Tanımlar

Dolaysız Topraklama: Topraklama direncinden başka hiçbir direnç içermeyen topraklamadır.

Dolaylı Topraklama: Topraklama iletkeni üzerine ek olarak bağlanan omik, endüktif veya kapasitif dirençlerle yapılan topraklamadır.

Açık Topraklama: Topraklama iletkeni üzerine bir parafudr veya eklatör bağlanan topraklamadır (TMMOB EMO Bursa Şubesi, 2001).

Koruma Topraklaması: Transformatörlerini kesicilerin, ayırıcıların, izolatörlerin kazanlarının, şasilerinin, hava hattı demir direklerinin, beton direklerinin, beton direklerin demir teçhizatının, binaların çelik kolon, kiriş, merdiven gibi metal kısımlarının, kabloların madeni kılıf, zırh ve ekranlarının, akım ve gerilim ölçü transformatörlerinin sekonder sargı uçlarının birinin topraklanması koruma amacı ile yapılan topraklamadır.

İşletme Topraklaması: İşletme akımı devresine ait aktif kısımlara ilişkin topraklamalardır. Generatörlerin ve transformatörlerin yıldız noktalarının, bu yıldız noktalarına bağlı direnç ve endüktansların, nötr iletkenlerinin, gerilim transformatörlerinin yüksek gerilim tarafındaki yıldız noktalarının topraklanması bu tür topraklamalardır. Yüksek gerilim şebekelerinde parafudrlar en kısa yoldan koruma topraklamasına bağlanmalıdır. Topraklayıcı gerilimi 125 Volt'u geçerse işletme topraklaması koruma topraklamasından ayrılır ve izole iletkenle topraklayıcıya bağlanır.

Dirençsiz İşletme Topraklaması: Topraklama yolu üzerinde normal topraklama empedansından başka hiçbir direnç bulunmamaktadır.

Dirençli İşletme Topraklaması: Topraklama yolu üzerinde topraklama empedansına ek olarak omik, endüktif veya kapasitif dirençler bulunmaktadır.

Fonksiyon Topraklaması: Bir iletişim tesisinin veya bir işletme elemanının istenen

fonksiyonu yerine getirmesi amacı ile yapılan topraklamadır. Fonksiyon topraklaması, toprağı dönüş iletkeni olarak iletişim cihazlarının işletme akımlarını da taşır.

Fonksiyon ve Koruma Topraklaması: Fonksiyon topraklamasının aynı topraklama iletkenini kullanarak ve aynı zamanda koruma topraklaması olarak kullanıldığı topraklamadır.

Yıldırıma Karşı Topraklama: Yıldırım düşmesi durumunda, işletme gereğı gerilim altında bulunan iletkenlere atlamaları geniş ölçüde önlemek ve yıldırım akımını toprağı iletmek için, işletme akım devresine ilişkin olmayan iletken bölümlerin topraklanmasıdır.

2.1.3 Topraklama Şekline Göre Tanımlar

Münferit (Tekil) Topraklama: İşletme elemanı veya cihazın sadece kendine ilişkin topraklayıcıya bağı olduğu topraklamadır.

Yıldız Şeklindeki Topraklama: Birçok işletme elemanının veya cihaza ilişkin topraklama iletkenlerinin topraklanmış bir noktada yıldız şeklinde toplanmasıdır.

Çoklu Topraklama: Bir işletme elemanı veya cihazın topraklanmış birçok iletken (örneğin potansiyel dengeleme iletkeni, koruma iletkeni (PE) veya fonksiyon topraklama iletkeni (FE))bağı olduğu topraklamadır. Bu topraklama iletkenleri aynı topraklama birleştirme iletkenine veya farklı topraklayıcılara bağı olabilir.

Yüzeysel Topraklama: Topraklanacak işletme elemanları veya cihazların ve iletişim tesislerinin işletme akımı taşımayan iletken kısımlarının ağ şeklinde kendi aralarında koruma topraklamasına veya fonksiyon ve koruma topraklamasına bağı olduğu topraklamadır (TMMOB EMO Bursa Şubesi, 2001).

2.1.4 Topraklama Sistemleri

Bu bölümde, günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan topraklayıcılar ele alınacaktır.

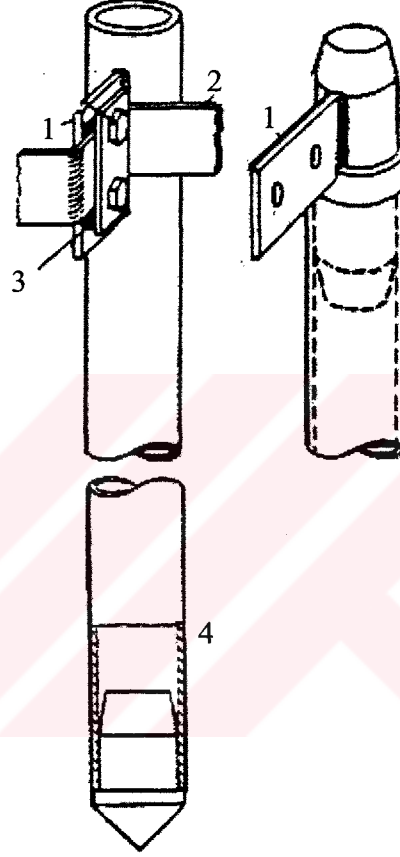
Topraklayıcılar, toprağı durumuna ve topraklayıcı olarak kullanılan malzemenin cinsine, geometrik şekillerine ve toprağı gömülme derinliğine göre birçok çeşitleri vardır. Topraklayıcı tipinin seçilmesinde ve düzenlenmesinde yerel koşullar, zeminin yapısı ve izin verilen yayılma direnci göz önüne alınır.

Buna göre yaygın kullanıma sahip topraklayıcılar aşağıda verilmektedir.

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.

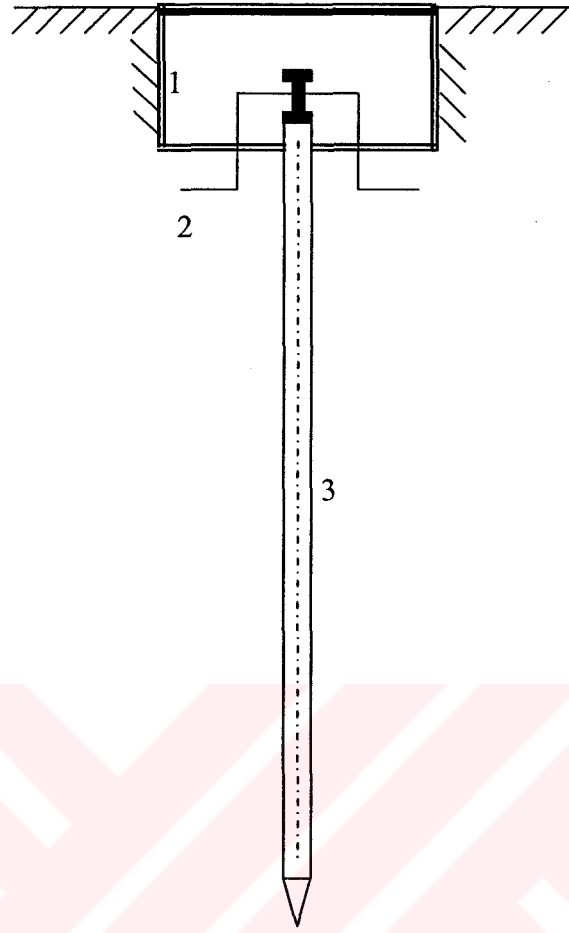
Bu topraklayıcının çapı, yayılma direnci üzerine çok az etki eder; onun için boru çapı veya profil kesiti mekanik dayanıma ve korozyon (aşınma) olaylarına göre belirlenir. Yayılma direnci, çubuk uzunluğuna, çakılacak zemine yerleştirilmesine bağlı olarak değeri küçük olur.



Şekil 2.4 Çubuk topraklayıcı

- 1- Bağlama ucu
- 2- Topraklama İletkeni
- 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.



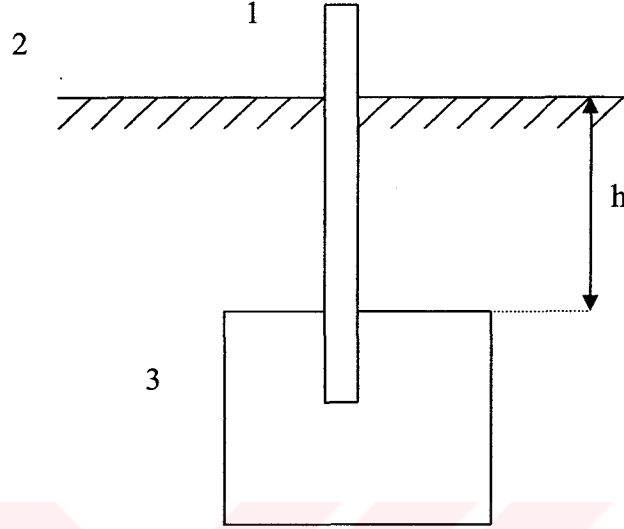
Şekil 2.5 Emdirmeli topraklayıcı

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

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; çünkü toprağın çökmesiyle levhanın altı boşlukta kalabilir.

Şekil 2.6’da levha topraklayıcı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.6 Levha topraklayıcı

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

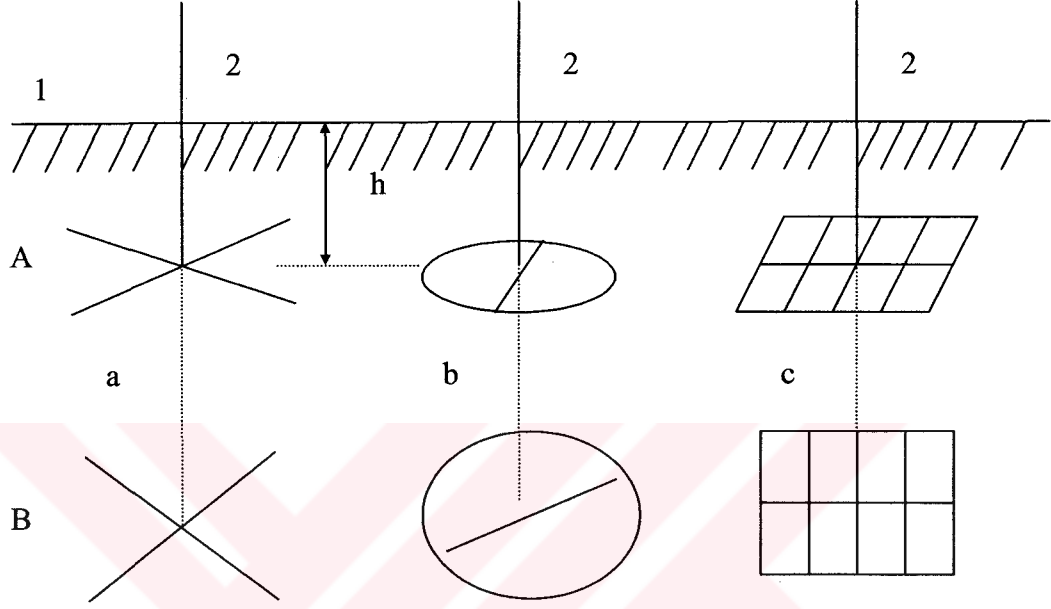
Uygulamalara bağlı olarak, levhanın alanı büyük seçilebilmektedir. Şekli ise daha çok fiziksel sınırlamalara uyum sağlayabilmesi bakımından kare ve çoğunlukla dikdörtgen biçiminde seçilir. Dikdörtgen topraklama levhalarının, kare topraklama levhaları ile karşılaştırılması bakımından sadece dikdörtgen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

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 göz önüne 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 boylu 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 döşenir; böylece toprak ile şerit arasında boşlukların kalmaması ve akımın toprağa daha iyi geçmesi sağlanır. Şerit topraklayıcıda yayılma direnci kesitten çok uzunluğa bağlıdır (Bayram,1977, 1995).



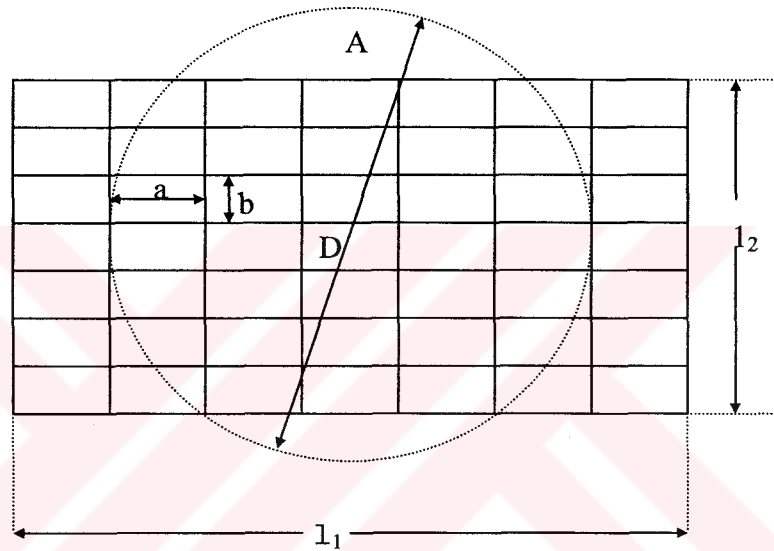
Şekil 2.7 Şerit topraklayıcıların çeşitleri

- 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 2.7’de 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 topraklayıcıların 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 düşünülemez. 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 topraklayıcın halka şeklinde veya gözlü olarak, yani hasır şeklinde döşenmesi de mümkündür.



Şekil 2.8 Gözlü topraklayıcı

- l_1 -Boyuna iletkenlerin uzunluğu
- l_2 -Enine iletkenlerin uzunluğu
- $a \times b$ -Göz boyutları
- A -Topraklayıcı alanı
- D -A alanına eşdeğer daire çapı

Gözlü topraklayıcılar da paralel şeritlerden meydana gelir. Ayrıca hem iyi bir akım dağılımını sağlamak ve hem de topraklayacak başka makine, 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.

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.

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

Bileşik Topraklayıcılar: İstenildiği kadar küçük bir yayılma direnci elde edebilmek için bazen çeşitli tip topraklayıcıların birlikte paralel bağlanması gerekir (Bayram, 1977, 1995; TMMOB EMO Bursa Şubesi, 2001).

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. Her bir topraklayıcının yayılma direnci $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ ise, toplam yayılma direnci,

$$R_{top} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + \dots + 1/R_n} \quad (2.10)$$

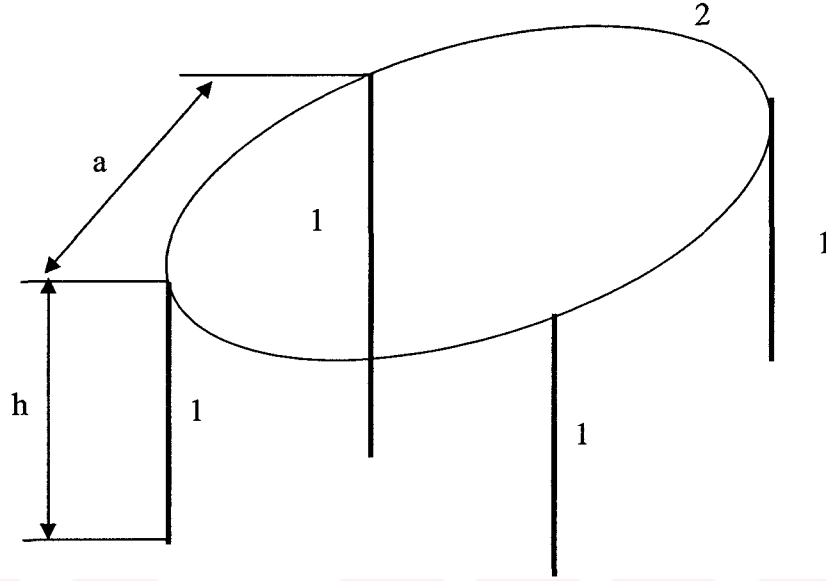
ifadesi ile hesaplanır.

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

$$R_{top} = R / n \quad (2.11)$$

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

iki katı olarak alınır. Levha topraklayıcılarda $a=3$ m normaldir.



Şekil 2.9 Paralel topraklayıcı

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

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 (Bayram, 1977, 1995).

2.2 YILDIRIM BOŞALMALARI

Lomonossov, Franklin, Richman ve yıldırım boşalmaları ile uğraşan diğer bilim adamlarının yaptıkları araştırmalar sayesinde yıldırımın elektriksel doğasının anlaşılmasından ve yıldırımın büyük bir elektriksel boşalması olduğunun belirlenmesinden bu yana iki yüzyıl geçmiştir. Özellikle son elli yılda yıldırım çok ayrıntılı olarak incelenmiştir. Çünkü yüksek gerilim şebekelerinin hızla gelişmesi, yüksek gerilim hatlarının, santral ve transformatör istasyonlarının yıldırıma karşı korunmasını gerektiriyordu. Yıldırım boşalmaları, uzun zaman şebeke arızalarının ana nedeni olarak kabul edilmiştir.

Yıldırımın incelenmesi, gazlarda elektriksel boşalmaların incelenmesi ile aynı zamanda olmuştur. Bu incelemelerin bir bölümü kanal boşalma teorisinin kurulmasına yardımcı olmuştur. Yıldırımla yüksek gerilim laboratuvarlarında elde edilen uzun kıvılcım boşalması arasındaki benzerlik, yıldırımı laboratuvarında taklit etmeye ve bu boşalmalardan çıkan bağıntıları bir yıldırım teorisinin kurulmasında kullanmaya olanak vermiştir.

Bir yıldırım, yüksek gerilim laboratuvarında üretilen bir elektrik boşalmasından yalnız boyutları bakımından değil, aynı zamanda gerilim kaynağı, yani yıldırım bulutu bakımından da farklıdır. Yıldırım bulutu ile toprak arasındaki kuvvetli elektrik alanlarının kaynağı, yıldırım bulutundaki elektrik yükleridir. Bu yüklerin henüz meydana gelmesi hakkında birçok teori olmasına karşın, olay henüz tam açıklığa kavuşturulmamıştır.

Yıldırım boşalmalarının çıkış noktası, atmosferde yüksek miktarda nem bulunması ve sıcak hava akımları nedeniyle yüklü bulutların oluşmasıdır. Hava akımları, yere yakın hava tabakalarının iyice ısınması ile oluşur. Çok büyük yüksekliklerden aşağı doğru inen soğuk hava ile bu tabaka yer değiştirir. Nem ise yüksek sıcaklıkta buharlaşma ile meydana gelir. Hava, yukarı çıkışı sırasında soğur ve belirli bir yükseklikte su buharına doyacağı bir sıcaklığa erişir. Daha fazla yükselmesi yoğuşmaya neden olur ve bulut oluşur. Serbest kalan yoğuşma ısıyı yükselen havanın daha fazla soğumasını yavaşlatır.

Yıldırım bulutunun oluşumunda üç tane karakteristik aşama vardır. Bunlar;

1- Gençlik

2- Olgunluk

3- Yaşlılık

aşamalarıdır. Bu aşamalar kısaca aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Gençlik aşamasında; aşağıdan yukarıya doğru ve kenarlardan ortaya doğru hava akımları artar. Bu durum yaklaşık olarak 10-15 dakika sürer.

Olgunluk aşamasında; yağmurlar oluşur ve sıfır dereceye yakın sıcaklıklarda bulutun kaldırma kuvveti artık yetmez ve şiddetli yağmurlar meydana gelir. Bu sırada aşağıya doğru hareket eden soğuk rüzgarlar görülür; bunlar yere ulaştıklarında kısa süreli şiddetli fırtınalara neden olurlar. Olgunluk aşamasının süresi yaklaşık olarak 15-30 dakika arasındadır.

Yaşlılık aşamasında ise; hava akımları yoktur, yağmurlar ve yıldırım boşalmaları son bulmuştur. Bu aşama yaklaşık 30 dakika sürer.

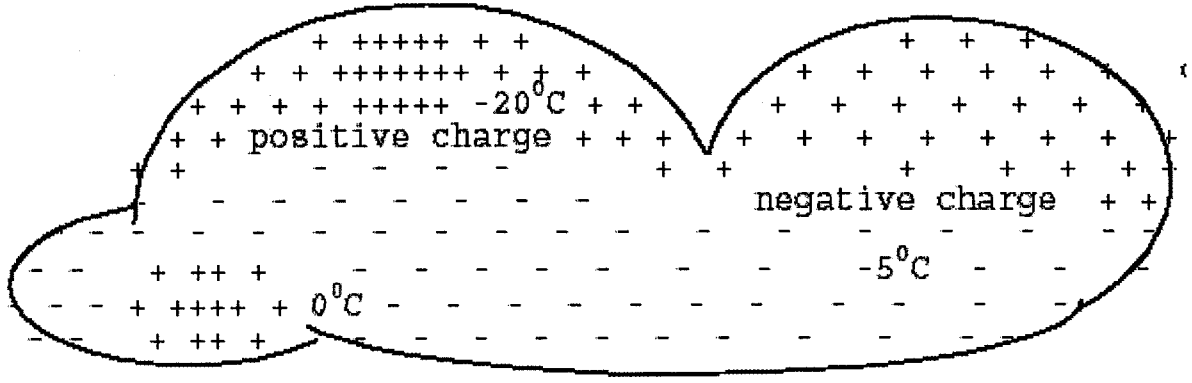
2.2.1 Yıldırım Bulutunda Elektrik Yüklerinin Meydana Gelişi

Yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin meydana gelişi hakkında birçok teori vardır. Simpson ve Lomonossov'a göre bir yıldırım bulutunda elektrik yükleri, düşey hava akımlarıyla, yani sıcak ve soğuk havanın yer değiştirmesi sırasında meydana gelir. Hava akımları buluttaki su damlacıklarının hareket ettirir ve bunların sürtünmesi sonucu elektrik yükleri meydana gelir. Meteorolojik incelemelerin gösterdiği gibi, bulutlarda bazen hızları 8 m/s'ye ulaşacak kadar erişen hava akımları vardır.

Gerçekten yıldırım bulutunun oluşumu, nemli havanın devamlı ve kuvvetli bir şekilde yukarıya doğru yükselmesine bağlıdır. Bu sırada belirli bir yükseklikten havanın nemi ince su damlacıklarına veya buz kristallerine dönüşür.

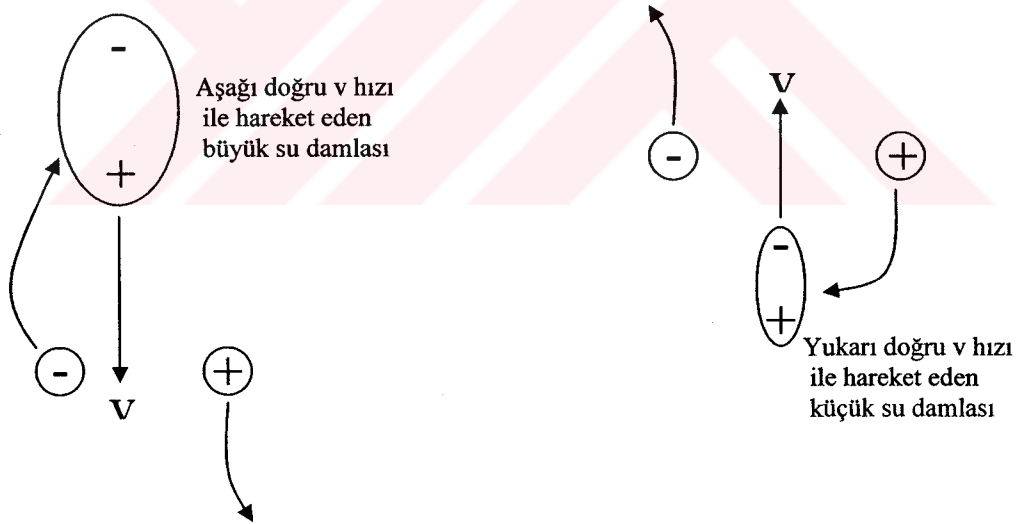
Bulutlardaki kuvvetli hava akımları büyük hızlarla su damlacıklarının devamlı olarak dağılmasına ve tekrar birleşmesine neden olurlar. Laboratuvar deneylerinden de su damlacıklarının dağılmasında elektrik yüklerinin meydana geldiği, küçük damlacıkların negatif, büyük damlacıkların da pozitif elektrik yüklerinin taşıdıkları görülmüştür. Buna göre, ağır su damlacıklarında bulunan pozitif yükler bulutun aşağı kısmında bulunmalı ve daha çok rüzgar hızının büyük olduğu bölgelerde toplanmalıdır. Buna karşılık küçük su damlacıklarında bulunan negatif yükler ise rüzgar tarafından itilmeli ve az veya çok düzgün olmak üzere bulutun üst kısmına dağılmalıdır. Şekil 2.10'da Simpson'a göre bir yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin dağılımı gösterilmiştir.

Elektrik yüklerinin bu teoriye göre üretimi durumunda yıldırım boşalmalarının pozitif polaritede olması gerekir. Oysa yıldırım boşalmalarının çoğu negatif polaritededir.



Şekil 2.10 Simpson'a göre bir yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin dağılımı

Yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin oluşumu hakkında ikinci bir teori Elster ve Geitel tarafından ortaya atılmıştır. Bu araştırmacılara göre bir yıldırım bulutunda elektrik yükleri etki ile elektrikleme sonucu meydana gelir. Dünya yüzeyindeki elektrik yükü $-5,5 \cdot 10^5$ C kabul edilirse bu yükün meydana getirdiği elektrik alanı içinde bulunan su damlacıkları Şekil 2.11'de görüldüğü gibi alt uçları pozitif ve üst uçları negatif olmak üzere kutuplanırlar.



Şekil 2.11 Elster ve Geitel'e göre bir yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin meydana gelişinin büyük ve küçük su damlası davranışına göre açıklanması

Yerçekimi etkisiyle aşağı doğru düşen su damlacıkları havanın oldukça yavaş hareket eden iyonlarına yaklaşırlar ve bu sırada su damlacığının pozitif alt ucu havanın negatif iyonunu absorbe ederken pozitif iyonunu iter, böylece ağır su damlacıkları negatif elektrikli parçacıklar haline gelir. Aynı şekilde kutuplanan küçük su damlacıkları yukarıya doğru

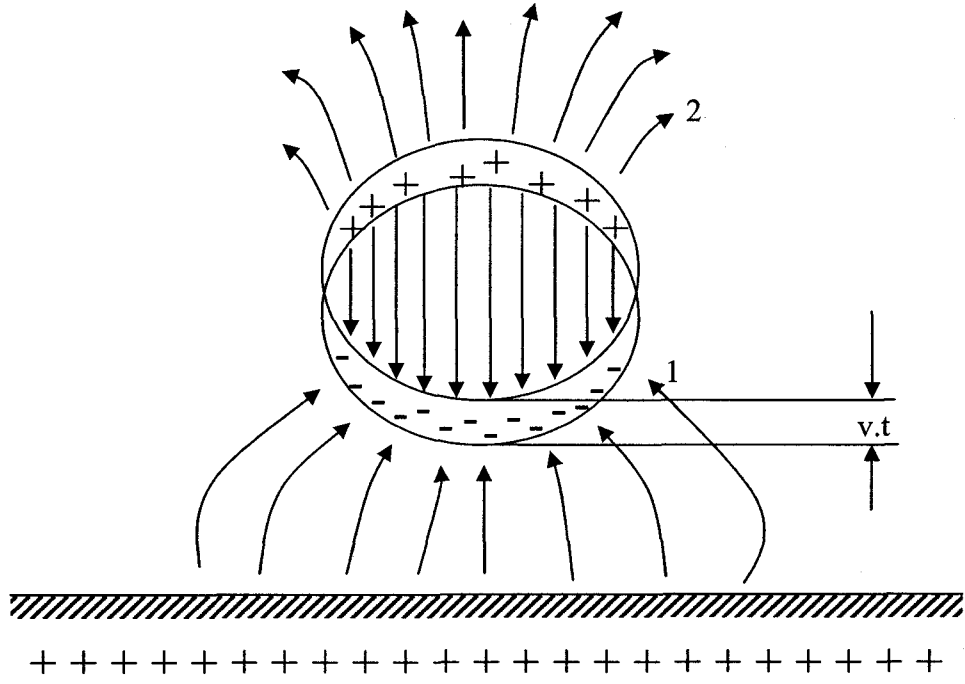
hareket ederken havanın pozitif iyonlarını absorbe ederler ve negatif iterler. Böylece hafif su damlacıkları da pozitif elektrikli parçacıklar haline gelirler.

Bu teoriye göre bulutun alt tarafında negatif elektrik yükleri bulunur. Gerçekten bu teoriyle yıldırım boşalmalarının daha çok negatif polaritede olmaları açıklanmış olur. Fakat bu teoriye de karşı çıkılabilir. Bir yıldırım bulutunun yarısından çoğu su damlacıklarından değil de buz kristallerinden ve kar parçacıklarından oluşur. Dolayısıyla bunların dünyanın elektrik alanı ile kutuplanmaları olasılığı çok küçüktür.

Yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin meydana gelişi hakkında üçüncü bir teori J.I Frenkel tarafından ortaya atılmıştır. Frenkel'e göre havada her iki işaretli iyonlar var olduğundan, dünyanın negatif elektrik yükleri kaçmaya ve iyonosferin pozitif elektrik yükleri ile birleşmeye yatkındır. Dolayısıyla dünyanın azalan elektrik yükünü sürekli olarak takviye edecek bir olayın olması gereklidir. Dünyanın elektrik yükünün sabit kalmasında ana rolü negatif yıldırım boşalmaları oynar. Bu teoriye göre her iki işaretli iyonlardan oluşan hava ile küçük su damlacıkları veya buz kristallerinden meydana gelen bir ortam göz önüne alınır ve havanın negatif iyonlarının daha küçük su damlacıklarına veya buz kristallerine konduğu varsayılır. Buna göre bulut, negatif su damlacıkları ve pozitif iyonlu havadan (pozitif iyonlara karşılık olan negatif iyonlar su damlacıkları tarafından yutulmuştur) oluşur. Yerçekimi iyonlara hemen hemen etkilediği halde su damlacıklarına etkir. Su damlacıkları etraftaki havaya göre daha ağır olduklarından, saniyedeki hızı birkaç milimetreyi bulan bir v hızı ile aşağıya doğru düşerler.

Başlangıçta su damlacıklarının ve havanın iyonlarının üst üste iki küresel bulut üzerinde oldukları kabul edilirse, Şekil 2.12'de görüldüğü gibi t zaman sonra su damlacıkları " $v.t$ " kadar aşağıya iner.

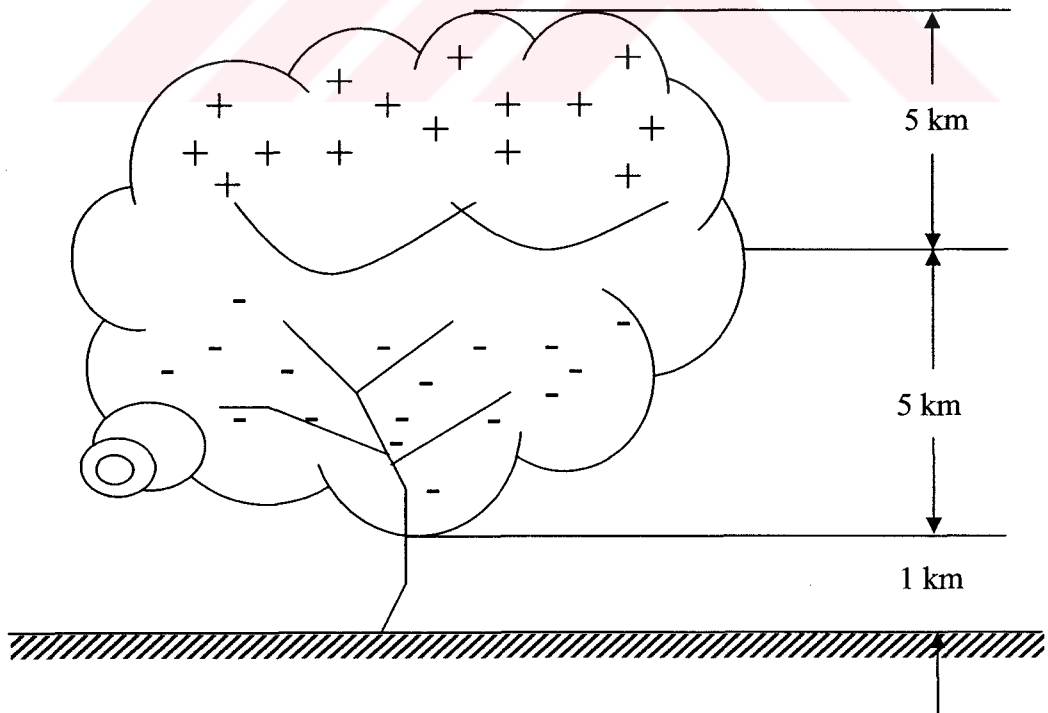
Bu durumda bulutun üst tarafında havanın pozitif yükleri ve alt tarafında da su damlacıklarının negatif yükleri bulunur. Bu şekilde Frenkel'e göre bulutun kutuplanması yerçekimi etkisiyle olur. Frenkel bazı hesaplar yapmış ve bu hesaplarda kabul ettiği mekanizmanın bulutta deneyle ölçülen alan şiddetleri büyüklüğünde alan şiddetleri verdiğini göstermiştir. Frenkel boşalmanın başlamasını su damlacıklarının büyümesine ve elektrik alanının yer yer kuvvetlenmesine bağlamaktadır. Gerçekten su damlacıklarının büyümesi, bulutun kararlı durumunu bozar. Bütün bu teorilere rağmen bulut yüklerinin meydana geliş nedenlerinin henüz tam olarak bilinmediği ve belki de gerçekte daha birçok faktörlerin aynı anda etkin oldukları söylenebilir.



Şekil 2.12 Frenkel'e göre bir yıldırım bulutunda elektrik yüklerinin meydana gelmesi

1:Negatif su damlacıklı küre

2:Havanın pozitif iyonlarından oluşan küre



Şekil 2.13 Bulut yüklerinin ayrılması

2.2.2 Yıldırım Boşalmasının Oluşumu

Yıldırımlı bulutların içinde aktif rüzgar kanallarında, yeryüzü üzerindeki alan şiddetine göre oldukça daha büyük olan alan şiddetleri meydana gelir. Buralarda alan şiddeti yaklaşık olarak 500 kV/m'yi aştığı zaman, iletken kanalların oluşumuna yol açan yüzeysel boşalmalar meydana gelir. Bunlar, yıldırımın ucunda hüküm süren yüksek alan şiddetini başlangıçta alan şiddeti küçük olan bölgelere doğru kaydırır ve yıldırımın ucunu yukarıya ve aşağıya doğru her iki yönde ilerletir. Yıldırımın alt ucu elektrostatik sebeplerden dolayı tercihen yeryüzüne doğru ilerler, yukarı ucu ise, bulut içinde yatay yönde gelişir. Fakat genellikle yıldırım izlediği yolu, daha çok uzay elektrik yüklerinin mevcut olup veya olmaması gibi rasgele bir duruma göre belirler.

Bu gibi uzay yükleri yağmur damlacıkları üzerinde bulunacağı gibi, serbest havada bir önceki yıldırım kanallarından arta kalan yükler halinde de mevcut olabilir. Yeryüzünün radyoaktif etkisi altında havada oluşan iyonlaşmalar oldukça zayıf olduğundan, bu gibi olaylar yıldırımın izleyeceği yolun ve yeryüzünde düşeceği noktanın seçilmesinde hemen hemen hiç rol oynamaz.

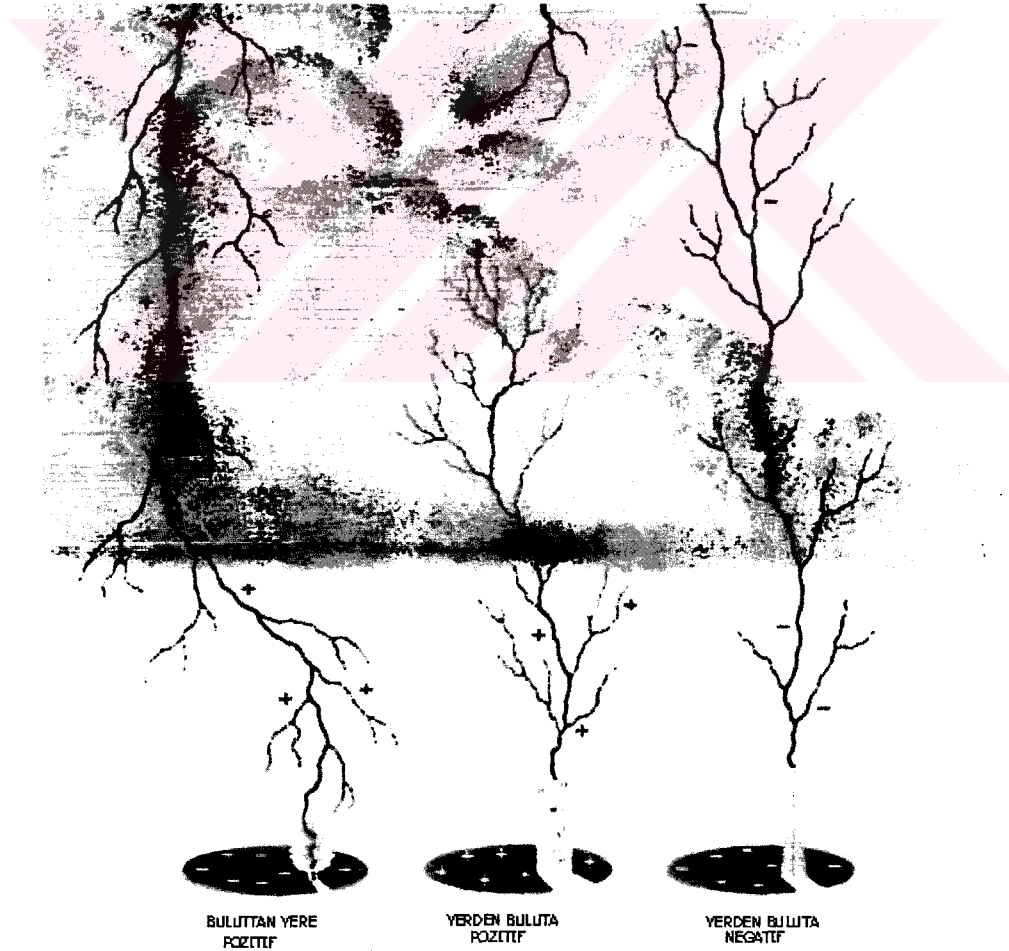
Yıldırım başının buluttan dışarı çıktıktan sonraki ilerlemesi sürekli bir şekilde cereyan etmez. Bu ilerleme daha çok kısa ve uzun süreli duraklamalarla kademeli bir şekilde ileri sıçramalar halinde olur. Yıldırım her ileri sıçrayışta 10-100 metre yol alır ve yaklaşık 50000 km/s'lik (ışık hızının 1/6'sı kadar) bir hızla ilerler. Her ileri sıçrayışta hemen hemen 30-90 mikrosaniye kadar bir duraklama devresi izler.

Yıldırımın ortalama ilerleme hızı yaklaşık 150 km/s kadardır. Genelde yıldırımlar bu gelişme safhasında yeryüzüne ulaşmadan sönerler. Bu gibi yıldırımların ışığı zayıf olup, ancak en iyi koşullar altında (geceleri hava ışıması şeklinde) görülebilir. Diğer taraftan bu gibi yıldırımlarda gök gürültüsü de meydana gelmez. Bu şekilde sessiz yıldırımların sayısı normal yıldırımların sayısından çok daha fazla olabilir. Yıldırımın başı yeryüzüne ulaştığı zaman, yeryüzünde bulunan sivrilmiş noktalardaki alan şiddetleri bu noktalarda aşağıdan yukarıya ilerleyen ve uzun süren olaylarda aynı zamanda kademeli olarak gelişen boşalmalar meydana getirecek mertebeye yükselebilirler.

Yeryüzü yıldırımları bulutta pozitif veya negatif yük merkezlerinden ya da yeryüzündeki pozitif veya negatif yüklü sivriliklerinden ileri gelebildikleri için dört tür yıldırım vardır.

2.2.2.1 Aşağıya Doğru İnen Yıldırım

Yıldırım boşalmasının mekanizması, daha sık rastlanan negatif aşağıya doğru inen yıldırımlarla açıklanabilir. Fotoğraflarla yapılan gözlemler, bulutun negatif yüklü merkezinden toprağa doğru kanalın adım adım ilerlediğini göstermiştir. Bu ilerleyişler arasında yaklaşık 10.....100 mikrosaniyelik zaman aralıkları vardır. Bu ön boşalmanın ortalama olarak saniyede 300 km kadar ilerleme hızı vardır. Ön boşalma yere yaklaştığı zaman elektrik alanı havanın delinme dayanımının üzerine çıkacak kadar artar. Böylece yeryüzünden bir boşalma yukarıya doğru ilerler ve ön boşalmanın başı ile birleşir. Yaklaşık 50000km/s'lik bir hızla aşağıdan yukarıya doğru yüksek iyonizasyonlu bir yol oluşur ve kanalda depo edilen yükü toprağa iletir. Yıldırımın isabet ettiği nesne üzerinden ana boşalma sırasında kısa süreli ve çok yüksek değerli akım darbesi geçer. Düz arazide meydana gelen yıldırımların %90'ından fazlası aşağıya doğru inen yıldırım şeklinde olur.



Şekil 2.14 Yıldırımın türleri

2.2.2.2 Yukarıya Doğru Çıkan Yıldırım

Bu tip yıldırımlar düzgün bir arazide bulunan çok yüksek kulelerin veya dağların (örneğin İsviçre’de Monte San Salvatore) tepelerinden itibaren gelişir. Bu gibi az yüksek noktalardan yukarıya doğru gelişen boşalmalar yakın noktalara düşen yıldırımlar için bir tür “yakalama boşalması” olarak etki ederler ve yıldırımın başı ile bu noktalar arasında irtibat görevi görürler. Bazı hallerde yıldırımın keskin açısı yaparak köşelere düşmesine sebep olurlar. Daha çok negatif yıldırımlar görülür. Burada sadece bir ön boşalma buluta doğru ilerler. Bu durumda akımlar daha küçüktür (101000A), fakat aşağıya doğru olan negatif yıldırımlara göre yükleri iki kat daha büyüktür. Yukarıya doğru çıkan negatif yıldırım tamamen geliştiğinde 10 kA civarında tepe değeri olan darbe akımları oluşur.

Yeryüzünden yukarıya doğru gelişen yakalayıcı boşalmasını ilerleme hızı özellikle boşalma kanalının elektrik yükü ile beslenmesine bağlıdır. İyi topraklanmış noktalarda yük akışı kolay ve süratli olacağından, bu noktalardaki yakalama boşalmaları, iyi topraklanmamış veya yalıtılmış noktalara göre daha uzun mesafelere kadar gelişir. Bu sebepten dolayı her sivrilmiş noktaya belli bir koruma sahası tekabül ettirilmez. Bir yıldırım boşalma kanalının koruma tesisatından gelişen yakalayıcı boşalma ile birleşebilmesi, yakalayıcı boşalmasının yıldırım kanalına kadar yetişip yetişmemesine, yukarıdan aşağıya doğru ilerleyen yıldırımın başının duraklayıp duraklamamasına ve bunun yer ve süresine özellikle bağlıdır. Yıldırım örneğin, iyi topraklanmamış iniş iletkenlerine ve bu iletkenlerin zemine yakın noktalarına düşebilir. Buna karşılık, örneğin yüksek gerilim hava hatlarında yıldırım düşmelerinin model deneylerden beklenenden daha fazla olarak faz hatları yerine toprak(koruma) hatlarına isabet ettiği gözlenmiştir.

Yukarıya doğru olan pozitif yıldırımlarda çok kuvvetli ön boşalmalar görülür ve bulutun alt kısmından kollara ayrılır. Bu tür yıldırım tamamen geliştiği zaman 25 ms süren 100...1000A’lık şiddetli bir akım darbesi oluşur.

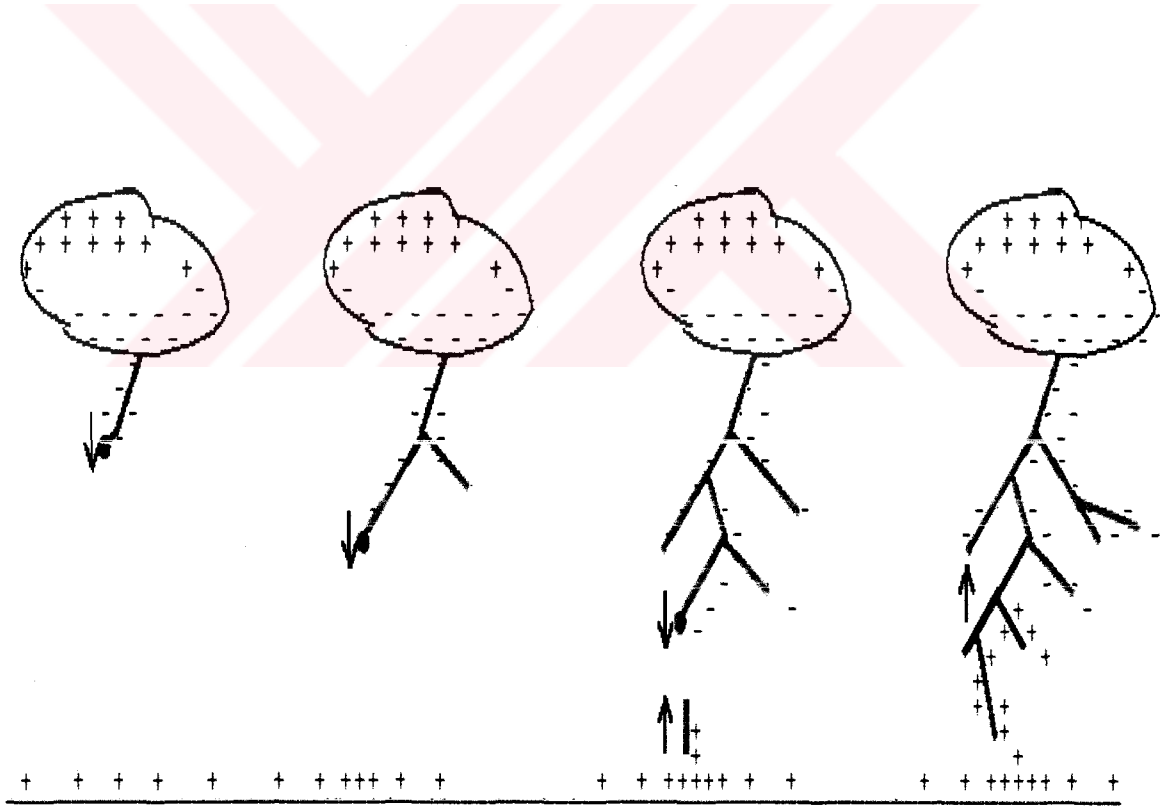
2.2.3 Yıldırım Boşalmasının Özellikleri

Bulutta var olan girdaplı hava akımları nedeni ile elektrik yükleri Şekil 2.15’te görüldüğü gibi bulut içinde ayrı ayrı yerlerde toplanırlar.

Yıldırım boşalması, elektrik alanı en büyük olan yük birikmesi halinde başlar. Birinci merkezin ön boşalması toprağa erişmediği sürece, bu merkezin potansiyeli yaklaşık olarak sabit kalır ve buluttaki yük birikmeleri arasında karşılıklı bir etki olamaz. Ana boşalmadan sonra bulutun birinci yük merkezi pratik olarak toprak potansiyelinde olur. Boşalma olan

birinci merkezle komşu merkez arasında potansiyel farkı büyür; dolayısıyla bu iki merkez arasında boşalma meydana gelir. Her ne kadar bu boşalma sırasında birinci boşalmanın kanalı deiyonize olursa da gene de belirli bir iletkenliği mevcut kalır. Boşalma komşu merkezden birinci boşalmanın kanalına eriştikten sonra, bu yol boyunca ok şeklinde bir ön boşalma oluşmaya başlar. Ok şeklindeki ön boşalma, pilot ön boşalmadan daha yüksek hızla büyür. Bu durum ok şeklindeki ön boşalmanın daha önce iyonize olmuş yol üzerinde yayılması ile açıklanır (LEC, 2003).

Ön boşalmanın kademe şeklinde oluşunu açıklamak için birçok teori ortaya atılmıştır. Fakat konu hala tam olarak açıklanmış değildir. Herhalde ön boşalmanın kademe şeklinde gelişmesi, yıldırım bulutunun gerilim kaynağı olarak kendine özgü özellikleriyle açıklanabilir. Bulut, sonsuz büyük bir güç kaynağı olarak varsayılmaz. Gerçekte yalnız boşalma bölgesindeki olayları değil, aynı zamanda buluttaki olayları da göz önünde tutmak gerekir.



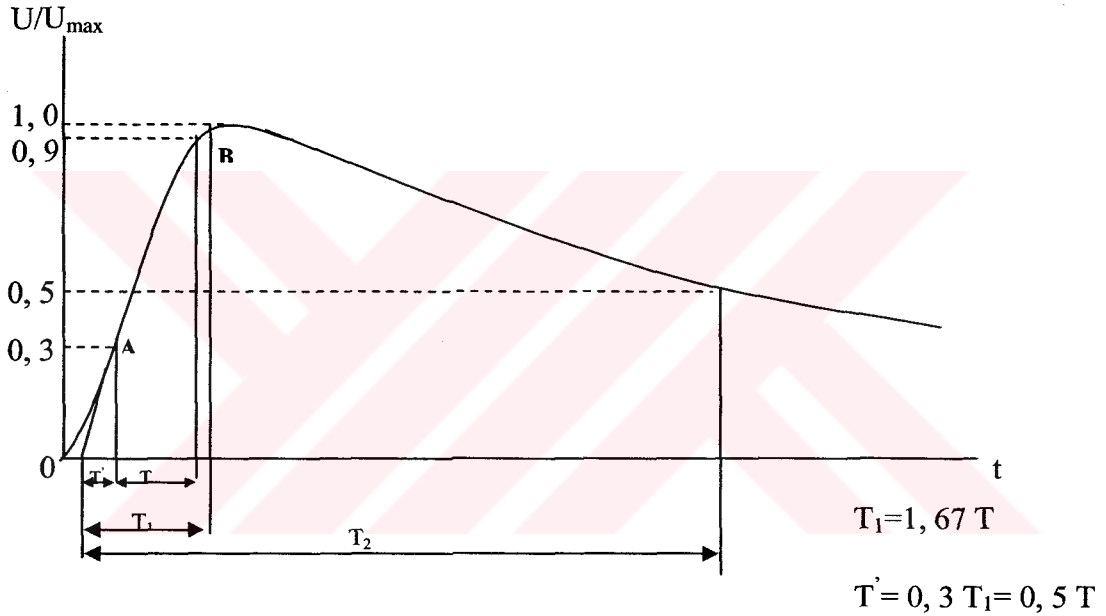
Şekil 2.15 Çok kademeli bir yıldırım boşalmasının gelişme evreleri

2.2.4 Yıldırım Akımı

Yıldırım akımı darbe karakterinde olup, değeri sıfırdan tepe değerine kadar hızla yükselir ve nispeten yavaş bir seyirle tekrar sıfır değerine düşer. Polaritesi pozitif veya negatif olabilir (%70 ila %90 negatiftir). Genel olarak yıldırım denklemi;

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha.t} - e^{-\beta.t}) \quad (2.12)$$

denklemleri ile verilir. Şekil 2.16'da $i(t)$ eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.16 Yıldırım akımı

Standart Darbe Gerilimi için; $T_1 = 1,2 \mu s \pm \%30$
 $T_2 = 50 \mu s \pm \%20$ dir.

Genel olarak yıldırım akımlarının yarı değer süreleri 30 ila 100 mikrosaniye arasında değer $T=50 \mu s$ kabul edilirse, yıldırım akımının en büyük değeri I_m ile yıldırımdaki elektrik yükü arasında

$$Q = 50 \cdot 10^{-6} I_m \quad (2.13)$$

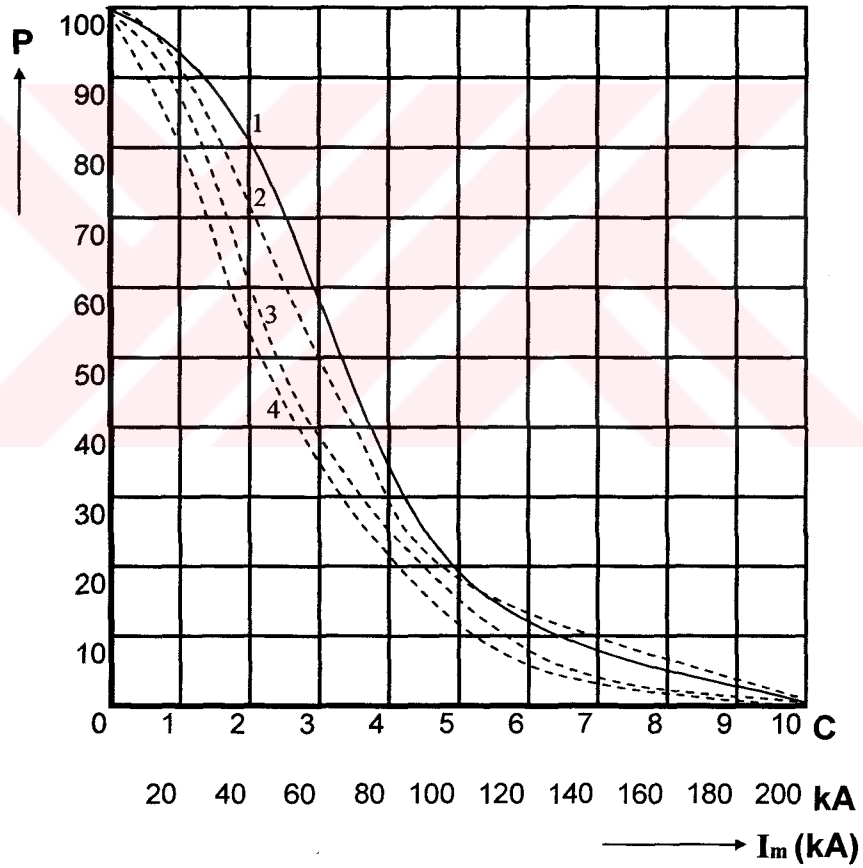
bağıntısı yazılabilir. Buna göre $I_m = 20$ kA olan bir yıldırımın elektrik yükü

$$Q=50.10^{-6} .20.10^3 = 1C$$

(2.14)

olur.

Maksimum yıldırım akımları birçok araştırmacılar tarafından ölçülmüştür. İsviçre, Amerika ve İngiltere’de yapılan ölçmeler sonunda bir bölgeye düşen yıldırım akımlarının tepe değerlerinin “birikmeli olasılık dağılımları” yani apsis eksenindeki akım değerine eşit veya bundan büyük akım değerini haiz yıldırım sayının düşen toplam yıldırım sayısına oranları tespit edilmiş ve birikmeli olasılık eğrileri çıkarılmıştır.



Şekil 2.17 Birikmeli olasılık eğrileri

- 1:İsviçre
- 2:Amerika
- 3:Almanya
- 4:İngiltere

Bu eğrilere göre, yıldırım akımları birkaç kA ile 200 kA arasında oldukça geniş sınırlar içinde değişmektedir. En çok meydana gelen yıldırım akımları 10 kA in altında olanlardır. 200 kA'den büyük yıldırım akımlarına nadiren rastlanır. Bu eğriler yardımı ile bir yere düşen yıldırımın kaç kA veya kaç coulomb olacağının olasılığı kolayca tespit edilebilir. Örneğin Almanya'da çıkarılan eğriye göre bir yere düşen yıldırımın 20 kA veya daha büyük olma olasılığı yaklaşık %55; 100 kA veya daha büyük olma olasılığı %3 ve 10 kA veya daha büyük olma olasılığı ise %85 dir.

Çizelge 2.2 Yıldırım akımlarının polaritesinin ve yıldırım akım şiddetlerinin sıklık derecesine göre değerleri

Yıldırım akımı	Sıklık derecesi
Pozitif Polarite	%14
Negatif Polarite	%80
Değişen Polarite	%6
$I_{y\max} > 20 \text{ kA}$	%80
$I_{y\max} > 30 \text{ kA}$	%50
$I_{y\max} > 80 \text{ kA}$	%5

Yukarda anlatıldığı gibi çok kısa süren şok akımlarında madeni iletkenler, tıpkı yüksek frekansta olduğu gibi, akım yığılma olayından dolayı doğru akımdakine göre daha yüksek bir direnç gösterirler. Daha büyük bir yüzeye sahip olmalarından dolayı lama şeklindeki iletkenlerin yuvarlak kesitli iletkenlere göre daha küçük bir direnç göstermeleri icap ettiği

şeklinde yayılmış olan görüş tarzı yanlıştır. Aynı kesitte olan yuvarlak kesitli bir iletken diğer bütün iletkenlere göre daha elverişlidir. Yıldırım akımlarında iletkendeki burulmanın direnç üzerine etkisi yoktur.

2.2.5 Yıldırım Boşalması ile ilgili olaylar

2.2.5.1 Atmosferik alan

Bir yıldırımın düşmesinde elektrik yükleri (genel olarak negatif yükler) arz yüzeyine taşındığından, yıldırım düşmesinin bir sonucu olarak yerküre üzerindeki atmosferik alan şiddeti yükselir.

2.2.5.2 Gök Gürültüsü

Yıldırım akımı aktığı müddetçe, boşalma kanalı elektro dinamik kuvvetlerin etkisi altında büzülerek çok dar bir bölgeye sıkışır. Yapay yıldırım ile yapılan deneylere ve sınırlı sayıda yıldırım fotoğrafı üzerinde yapılan çalışmalara dayanacak olursak, yıldırım kanalı çapının genellikle birkaç santimetreyi geçmeyeceği ve ancak istisnai hallerde (zayıf akımlı boşalmalarda) birkaç desimetreye varabileceğini söyleyebiliriz. Yıldırım kanalının içinde elektrodinamik etkilerden ileri gelen aşırı basınç 2 ila 3 atmosfer arasında olabilir. Yıldırım akımının sönmesi üzerine bu basıncı meydana getiren elektrodinamik kuvvetlerde ortadan kalkar ve böylece yıldırımın çekirdeği infilak edercesine genişler ve malum olan gök gürültüsünü meydana getirir. Gök gürültüsünün herhangi bir insan üzerindeki etkisi, o insanın yıldırım düştüğü noktaya olan uzaklığına göre farklı olabilir. Uzak mesafelerde tipik gök gürlemesi şeklinde duyulur. Yakın mesafelerde ise, bir patlama şeklinde etki eder ve bunu her zaman olmamakla beraber gök gürültüsü izler.

Diğer taraftan verilen ve birbirini teyit eden haberler göz önünde bulundurulacak olursa, yıldırımın doğrudan doğruya düştüğü noktada hiçbir gök gürültüsü duyulmamaktadır. Çok garip olan bu olayın fiziksel bakımdan açıklamasını yapan bir yayın henüz bulunmamaktadır.

2.2.6 Yıldırımın Etkileri

Yıldırım elektriksel bir olay olduğuna göre, bir iletken veya herhangi fena bir iletken veya izolatörden geçmesi halinde meydana getirdiği etkilerin aynısını meydana getirecektir.

Buna göre bir yıldırımdan aşağıdaki etkiler beklenebilir:

1. Termik etkiler (Isı meydana gelmesi)

2. Elektrodinamik etkiler (Kuvvetlerin meydana gelmesi)
3. Elektrokimyasal etkiler (Galvanik parçalanmalar)
4. Basınç ve ses etkileri
5. Işık etkisi

Bahsi geçen bu beş etkiden pratik olarak sadece termik etki büyük rol oynar. Bu arada kuvvet etkileri termik etkisinin bir sonucu olarak da düşünülebilir. Buna karşılık doğrudan doğruya meydana gelen elektrodinamik kuvvetler nispeten daha az rol oynar.

2.2.6.1 Termik Etkiler

Yıldırım olayında ısı enerjisi olarak çıkan enerji joule kanununa göre açıklanır. Bu enerji “i” akımının karesi ile, akımın t akış süresi ile ve iletkenin R omik direnci ile orantılıdır.

$$W = i^2 \cdot t \cdot R \quad (2.15)$$

veya zamana göre değişen akımlarda:

$$W = R \int i^2 \cdot dt \quad (2.16)$$

Buna göre termik etkiler ancak direncin büyük olduğu noktalarda büyük değerler alabilirler.

Kesitleri yeteri kadar büyük olan iletkenlerde görünür şekilde bir ısı etkisi meydana gelmez, erime sıcaklığına kadar çıkan ısınmalar ancak kesiti küçük olan veya özgül direnci büyük olan iletkenlerde meydana gelir. Örneğin örgülü anten tellerinde ve ince demir tellerde erime olaylarına rastlanır. Buna karşın çapları birkaç milimetre olan daha büyük kesitlerdeki demir tellerde (dikenli teller, galvanizli demir tellerde) bu gibi erime olaylarına nadiren rastlanır. Kesitleri 25 mm² ‘den büyük olan bakır iletkenlerde herhangi bir erime olayı ancak çok sayıda yıldırımların birbiri ardına düşmesi halinde, daha doğrusu bir saniye gibi kısa bir süre içinde birbirini takip eden yıldırımların aynı yıldırım yakalayıcılarına (yıldırımlıklara) isabet etmeleri halinde meydana gelebilir. Teknik esaslara göre uygulamada tespit edilmiş olan kesitlerde yıldırım yakalayıcılarının erimesine henüz rastlanmamıştır. Bu arada ağaç, duvar veya benzeri gibi yerlere nüfuz etmiş bulunan sular, ısınarak buhar haline geçebilirler. Akım geçişinin kısa bir süre içerisinde olması sonucunda meydana gelen buharlaşmada aşırı basınçların etkisi ile ağaçlar, ağaç direkleri ve duvarlar infilak edencesine parçalanırlar. Bu parçalanmalar daha çok yarıklar, ağaç içindeki su borucukları gibi rutubetin çok biriktiği yerlerde veya yıldırım akımının duvar gibi fena iletken bir maddeden iyi iletken bir maddeye

giriş ve çıkışında; ve örneğin zedelenmiş yıldırımlıkların demir kroşelerinde elektrik tesisatı hatlarındaki dübellerde, gaz ve su borularının tespit demirlerinde olduğu gibi, akım yoğunluğunun çok büyük değerlere yükseldiği noktalarda meydana gelir.

Yıldırımın bir elektrik iletkenine isabet ettiği noktalarda erimelere çok ender rastlanması dikkatleri çeken bir husustur. Bu gibi erimelere aynı şekilde yüksek gerilim hava hattı şebekelerinde de ve örneğin faz hatları, koruma hatları ve direklerde de hemen hiç rastlanmaz. Yıldırım yakalayıcılarında ise bu gibi erimeler ancak ara sıra ve daha çok çok sivri noktalarda meydana gelir. İlk bakışta sürpriz gibi görünen bu olay aslında normal bir olaydır. Zira geniş yüzeyli madeni bir iletkende akımının giriş yerinde boşalma kanalının u anot veya katot düşümü ile bu esnada iletilen toplam q elektrik yükünün çarpımına karşılık gelen ancak w kadar bir enerji ısı enerjisine dönüştüğünden, bu gibi yerlerde fazla miktarda bir ısınma meydana gelemez.

Yıldırım akımı nerede büyük ve iletken bir geçiş yüzeyi bulursa, orada tehlikeli derecede bir ısınma meydana gelmez. Bu sebeptendir ki, bu gibi noktalarda ne bir yangın tutuşması ve ne de, endirekt kuvvet etkileri meydana gelir. Yeteri derecede büyük bir kesitte sürekli ve tek bir madeni iletken tarafından iletilen bir yıldırım, yangın meydana getirmeyen ‘soğuk’ bir yıldırım çarpması olarak kalır.

Laboratuarlarda elde edilen 1 m’den uzun yıldırım boşalmaları üzerinde yapılan deneyler, bizzat yıldırım kanalının dahi kati surette her zaman bir yangın tutuşmasına sebep olmadığını göstermiştir. Büyük akımlı fakat çok kısa süren yıldırımlarda kolayca tutuşabilen maddelerden geçen bir yıldırım bu maddeleri tutuşturmayabilir ve bu esnada örneğin kağıt kırıntıları gibi maddelerin sadece etrafa dağılmasına sebebiyet verebilir. Buna karşın nispeten küçük akımlı fakat uzun süren yıldırımlar daha kolayca tutuşmalara sebebiyet verirler.

Gök gürültüsü zararsız ve fakat insan için çok etkili bir doğa olayıdır. Yıldırım kanalının basınç enerjisi herhangi bir zarar vermeye asla yeterli gelmez. Bunu tespit etmek amacıyla laboratuarda yapay olarak elde edilen büyük akımlı yıldırım boşalmaları ince kenarlı dar mukavva borulardan geçirilmiştir. Bu boruların çapları birkaç santimetreden büyük olduğu zaman, herhangi bir zarar meydana gelmediği görülmüştür. Fakat borunun çapı 2.....3 cm’den küçük seçildiği zaman, yıldırım kanalı borunun iç kısmına temas ettiğinden, burada boruyu oluşturan maddenin buharlaşmasına veya gaz haline geçmesine sebep olmakta ve böylece ısı sonucunda oluşan buhar ve gazların etkisi ile dolaylı olarak bir basınç etkisi meydana gelmektedir.

2.2.6.2 Elektrodinamik Etkiler

Yıldırım akımının endirekt olarak yaptığı kuvvet etkileri karşısında direk olarak yaptığı elektrodinamik veya manyetik kuvvet etkileri geri planda kalır. Bir iletkeninden geçen yıldırım akımının doğurduğu manyetik alan ile yeryüzünün magnetik alanı arasında oluşan kuvvetler genellikle zararsız olup en fazla 1 kP/m mertebesinde olabilir.

Daha büyük kuvvetler ancak yıldırım akım yolunun bir kısmının diğer kısmının manyetik alanı içinde bulunması halinde meydana gelir. Bu şekilde karşı karşıya gelen kısımlar arasındaki uzaklık ne kadar küçük olursa, bunlar arasında doğacak kuvvette o nispette büyük olur. Küçük halkalar büyük kuvvetlerin etkisi altında genişlemek isterler 8 mm ϕ 'luk yuvarlak kesitli iletkeninden oluşan 10 cm çapındaki bir halkadan 100 kA büyüklüğünde bir yıldırım akımı geçtiği zaman, halkanın beher çevresine 120 kP ve 1 m çapındaki bir halkada ise sadece 14 kP'luk bir kuvvet etki eder.

Bu itici kuvvetler ancak nadir hallerde iletkenin deforme olmasına neden olabilirler. Bu şekilde itici kuvvetlerden başka birde yıldırım ileten paralel iletkenler arasında ve bilhassa iletkenler arasındaki mesafe küçük olduğu zaman, çok büyük çekme kuvvetleri de meydana gelebilir. Bu sebepten dolayı, örneğin ince anten boruları ezilir ve paralel iletkenler karşılıklı çarpışırlar. Birbirine çok yakın olarak döşenmiş olan yalıtılmış elektrik hatlarına bir yıldırım isabet ettiği zaman, bu iletkenlerin arasında bulunan yalıtkan madde tamamen ezilir. 200 kA gibi büyük akımlı bir yıldırımda iletkenler arasında meydana gelen kuvvetler, iletkenler arası mesafe 5 mm olduğu zaman, 40 ton/m²'ye, 50 cm olduğu zaman 400 kP/m²'ye erişebilir. Daha büyük iletken açıklıklarında bu kuvvetler hemen hemen etkisiz olabilirler. Çivi, dübel vs. gibi küçük demir aksam üzerine manyetik kuvvetlerden çok yıldırım akımının termik etkisi ile endirekt olarak meydana gelen kuvvetler etkiler.

2.2.6.3 Elektrokimyasal Etkiler

Elektrokimyasal etkiler bakımından yıldırım akımı aynı yöntemle elektroteknikğin genel yasalarına tabidir. Bir yıldırım vasıtasıyla toplam olarak iletilen örneğin 100 As'lık bir elektrik yükü, akımın çıkış tarafında Faraday kanununa göre elektrolitik parçalanmada en fazla 30 miligram demir veya buna tekabül eden miktarda bir çinko veya kurşun açığa çıkar. Yıldırım tarafından sık sık çarpılan yıldırımdan korunma tesisatının toprak elektrotlarında, yıldırım akımı etkisi ile herhangi bir elektro kimyasal parçalanma olayı meydana gelmez.

2.2.6.4 Basınç ve Ses Etkisi

Yıldırım kanalı içindeki elektrodinamik kuvvetlerden ileri gelen 2-3 Atm basınç, bu akımın sönmesi halinde patlama şeklinde havayı genişleterek gök gürültüsünü meydana getirir. Yukarıda da sözü edildiği gibi bu gürültü yakında bulunanlara bir patlama etkisi oluştururken uzaklardan gök gürültüsü olarak duyulur. Nadiren cam kırılmaları gibi olaylarla da karşılaşmıştır. Gök gürültüsünün bir nedeni de meydana gelen ısı enerjisinin oldukça büyük ve ani bir genleşme meydana getirmesidir.

2.2.6.5 Işık Etkisi

Kılavuz akım boşalmalarının gelişip, yere yaklaşip, atlama yaptığı noktadan geriye doğru gelişen ana yakalama boşalması ile nötralizasyon başladığında oluşan bu iletken kanal çevresine çok parlak bir ışık yayar (ark olayı gibi). Bu ışık yakın mesafelerde göz kamaşması veya kısa bir an için görme zorluğu meydana getirebilir.

2.2.7 Yıldırım Çarpmasına Karşı İnsanların Korunması

İnsan üzerine doğrudan doğruya veya bulunduğu yerin yakınına bir yıldırım düştüğünde, insan vücudundan yıldırım akımının bir kısmı geçerse, aynen temas geriliminin etkisi altında kalmış bir insan gibi bir elektrik çarpması baş gösterir. İnsan vücudundan doğrudan doğruya kalp üzerine etki eder, fibrilasyon (çarpıntı) olayı sonucu kalp durur ve ölüm baş gösterir. İnsan vücudundan geçen akım, vücudun bütün bölümlerini ve merkezi sinir sistemini de tahriş eder ve bunların aşırı derecede ısınmasına neden olur. Bu arada çevre sinir sistemleri ve kaslar, özellikle nefes alma kasları felç olur ve yanıklar baş gösterir. Eğer yıldırım çarpması ölümle sonuçlanmazsa, genellikle sinir ve kas felçleri, zararlı bir etki bırakmadan, birkaç saat belki birkaç gün sonra kendiliğinden kaybolur ve insan normal durumuna döner. Bütün elektrik çarpmalarında olduğu gibi yıldırım isabet eden insana da mümkün olduğu takdirde yapay solunum (suni teneffüs) yaptırılması yararlı sonuçlar verebilir.

İnsana doğrudan doğruya isabet eden yıldırımdan başka insanın bulunduğu yerin civarına isabet eden yıldırım da hayati tehlike doğurur. Yıldırımın düştüğü yerin etrafında, aynen üzerinden akım geçen topraklayıcılarda olduğu gibi, bir gerilim çadırı meydana gelir ve insanlar ile hayvanlar için tehlikeli olan adım gerilimleri baş gösterir. Yıldırım akımının şiddetine göre, yıldırım düştüğü yerin etrafında yaklaşık olarak 30 m çapındaki bir alan tehlikeli bölge olarak kabul edilebilir. Kapalı binalardaki insanların yıldırımın tehlikeli etkilerine karşı korunmaları ancak o binanın iyi bir yıldırımdan korunma tesisatı ile korunması ile sağlanabilir. Yıldırım düşmesi sonucunda binalar içinde meydana gelen ölüm

olaylarına ancak istisnai özel durumlarda rastlanılabilmektedir. Yapılan araştırmalar madeni inşaat kısımlarını içeren ve yıldırımdan korunma tesisatı bulunmayan yüksek binalarda oturma'nın bazı hallerde oldukça büyük tehlike oluşturacağını göstermektedir.

Fırtınalı havalarda su kenarlarında, açık alanlarda, tek başına duran ağaçların altında, orman kenarlarında ve yıldırıma karşı koruma tesisatı bulunmayan ve yalnız başına duran evlerin yanında duran insanlar yıldırım tehlikesine maruz kalabilirler. Aynı şekilde inşaatın üstünde bulunan, bisiklete veya motosiklete binen kimseler ve yıldırım topraklamasının civarında bulunanlar da yıldırımdan zarar görebilirler. Buna karşılık yıldırıma karşı korunmuş binalarda, karoseri madeni olan binek arabalarda, betonarme ve çelik konstrüksiyonlu inşaatlarda, yer altındaki mağaralarda veya mahzenlerde ve ağaç yükseklikleri yaklaşık olarak eşit olan düzgün ormanlarda bulunanlar yıldırımdan korunurlar.

Dışarıda bulunanlar için yıldırımın doğurduğu tehlike, dışarıda bulunan insanın ayakta bulunması halinde kısmen büyür. Dışarıda arazi üzerinde veya ağaçların civarında bulunanlar ile yağmurdan korunmak maksadıyla arazi üzerinde bulunan ağaçların altına sığınan insanlar için yukarıda sözü edilen adım gerilimi büyük bir tehlike oluşturur. Bu gibi hallerde ayakların mümkün mertebe birbirine birleştirilmesi ve ağaçlara veya duvarlara yaslanılmaması önerilir.

Yıldırımın düştüğü yerde yanmaya elverişli maddeler olursa ayrıca yangına da sebebiyet olabilir. Önemli binalar ve tesisler, yıldırıma karşı korunmak için "yıldırımlık tesisleri" ile donatılırlar.

3. YÜKSEK GERİLİMLİ İLETİM HATLARINDA KULLANILAN ÇELİK KONSTRÜKSİYON DİREKLERİN YILDIRIM DARBE DİRENCİNİN HESAPLANMASI

Yüksek gerilimli iletim hatlarında kullanılan çelik direklerin, yıldırım boşalması gibi geçici bir olay karşısındaki davranışlarını hesaplamak, bir güç sisteminin darbe performansını hesaplama açısından çok önemli bir konudur. Bu konuda yapılmış pek çok çalışmanın temel amacı bu tip çelik direklerin darbe empedansını hesaplamak üzerine olmuştur.

Hesaplama yöntemi sonucunda literatürde karşılaşılan, geliştirilmiş tüm ifadeler teorik ifadelerdir. Çelik direklerin darbe empedansının belirlenmesi için geliştirilen bu ifadeler elektromagnetik alan teorisinin temelleri olan Maxwell denklemlerine dayanmaktadır.

İletim direkleri, yeryüzündeki diğer yapılara göre genelde daha yüksek yapılardır ve genelde topraklıdır veya potansiyelleri toprak potansiyeline yakındır. Bu durum direklerin yıldırım bulutu altında elektrik alan şiddetinin yüksek, potansiyelin düşük olduğu yerler olmalarına yol açar. Bu durum da direklere yıldırım düşme olasılığını artırır.

Direkleri yıldırımdan koruma tesisatında indirme iletkeni olarak $2 \times 50 \text{ mm}^2$ kesitli yuvarlak dolu bakır iletken kullanılmaktadır. Bu tür bir indirme iletkeni kullanılmayıp direk metal gövdesi akım yolu olarak seçilirse direğin darbe akımına karşı göstereceği direnç önem kazanır.

Yıldırım akımı, darbe şeklinde değişen, kısa süreli, büyük genlikli ve tek yönlü (pozitif veya negatif polariteli) bir akımdır. Yıldırım akımının aktığı yol boyunca karşılaştığı dirence, darbe direnci veya bu yolun omik direnci, endüktansı, kapasitesi ve frekans etkili olduğundan darbe empedansı adı verilir. Bu direnç, yıldırım akımının toprağa aktığı yol üzerinde olduğundan darbe topraklama direnci veya darbe topraklama empedansı olarak da adlandırılır.

Topraklama sistemi, yıldırım boşalması sonrasında ortaya çıkan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmadan güvenli bir şekilde toprağa akıtırken, akım yolu üzerindeki elemanların ayrı ayrı değerlendirilmesi topraklama sisteminin performans analizini yapmak anlamına gelmektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde, yıldırım boşalma akım yolu üzerinde yer alan ilk eleman olarak indirme iletkeni ve bu iletken ile darbe empedanslarının karşılaştırıldığı çelik konstrüksiyon direk ele alınmış ve direk darbe empedansının hesaplanabilmesi için yeni bir ifade elde edilmeye çalışılmıştır.

Bütün bu anlatılanlara ek olarak bir direğin darbe empedansının (veya karakteristik empedansı), ya ölçme ile deneysel olarak da belirlenir ya da kuramsal olarak belirlenmeye çalışılır. Ölçme işlemi, ya gerçek bir direk üzerinde ya da ölçekli bir direk modeli üzerinde gerçekleştirilir. Ölçme ile darbe empedansının belirlenmesinde direk tepesinden genliği ve şekli belli bir darbe akımı uygulanıp direk uçlarında oluşan gerilim ölçülür. Uygulanması çok zor olan bu yöntem ile literatürde ölçülmüş direk darbe empedansı değerleri bulunmaktadır. Bu değerler, direk darbe empedansını vermek yanında kuramsal hesap sonuçlarını doğrulamak açısından önemlidir.

Deneysel darbe empedansı belirlemenin zorluğu yanında kuramsal hesaplama kolay, ucuz ve daha az zaman alıcı olduğu için daha çok tercih edilmiştir. Kuramsal hesaplamada çelik kafes direk yapısının modellenmesi için genelde geometrik modeller veya geometrik yaklaşımlar diye adlandırılan ve daha çok ölçme sonuçları ile karşılaştırarak sonuçları uyumlu olacak şekilde belirlenmiş darbe empedansı hesaplama bağıntılarından yararlanılır.

Bu bölümde direklerin darbe empedansını hesaplamak için, geometrik modellemesinde yüksekliği direk yüksekliğine eşit ve “r” yarıçaplı silindir yaklaşımı göz önüne alınmaktadır. Bu konuda pek çok araştırmacı tarafından önerilmiş direk darbe empedansı hesaplama bağıntısı vardır. Bağıntılar arasındaki farklar, hesapta yıldırım akımının dalga şeklini ve akımın direktteki yayılma hızını göz önüne almaktan ve ölçme sonuçlarına uydurmak için kullanılmış düzeltme terimlerinden ileri gelmektedir.

3.1 Elektrik Alan Kavramları

Bu alt bölümde direk darbe empedansını hesaplayabilmek için kullanılacak temel elektrik alan ifadeleri verilmiştir.

A ve B adlı iki ayrı nokta arasındaki potansiyel farkı ifadesi;

$$V_A - V_B = \int_A^B E_x . dx \quad (3.1)$$

şeklindedir. Buradaki E_x “x” yani apsis yönündeki elektrik alandır. (3.1) ifadesinin alan teorisinde daha çok kullanılan Maxwell denklemleri formu;

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$B = \mu_0 . H \quad (3.3)$$

şeklindedir (Wagner, 1956).

Elektromagnetik vektör potansiyeli “A” (3.4) ifadesinde olduğu gibi tanımlanır.

$$\nabla \times A = \mu_0 . H \quad (3.4)$$

(3.3) ve (3.4) ifadelerinden yararlanılarak;

$$B = \nabla \times A \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilebilir. (3.5) ifadesi (3.2) ifadesinde yerine konulursa;

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times A) = -\nabla \times \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.6)$$

ifadesi elde edilir.

Stokes teoremi kullanılarak aşağıdaki ifadeler yazılabilir.

$$\int \nabla \times E . dw = \int E . dx \quad (3.7)$$

$$\int \nabla \times \frac{\partial A}{\partial t} . dw = \int \frac{\partial A}{\partial t} . dx \quad (3.8)$$

(3.7) ve (3.8) ifadelerinde kullanılan “dw” toplam alan etrafındaki çizgisel integraldir ve diferansiyel alandır. (3.7) ve (3.8) ifadeleri (3.6) ifadesinde yerlerine konulursa;

$$\int E . dx = -\int \frac{\partial A}{\partial t} . dx = V_{path} \quad (3.9)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadedeki “V_{path}” integralin hesaplandığı kapalı yol boyunca indüklenen potansiyeldir (Lundholm vd., 1958).

“V_{path}” potansiyelinin hesaplanabilmesi için, temel elektrik alan ifadelerinden biri olan ve (3.10) ve (3.11) ifadelerinde verilen “A” vektör magnetik potansiyeli ifadesi kullanılır.

$$\nabla^2 A - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \mu_0 J \quad (3.10)$$

(3.10) ifadesindeki “c” ışık hızıdır. Çünkü akım ışık hızında hareket etmektedir. “J” ise akım yoğunluğudur. Silindrisel iletkenlerde akım yoğunluğu yerine akım “I” ifadesi kullanılabileceği göz önüne alınırsa (3.10) ifadesi;

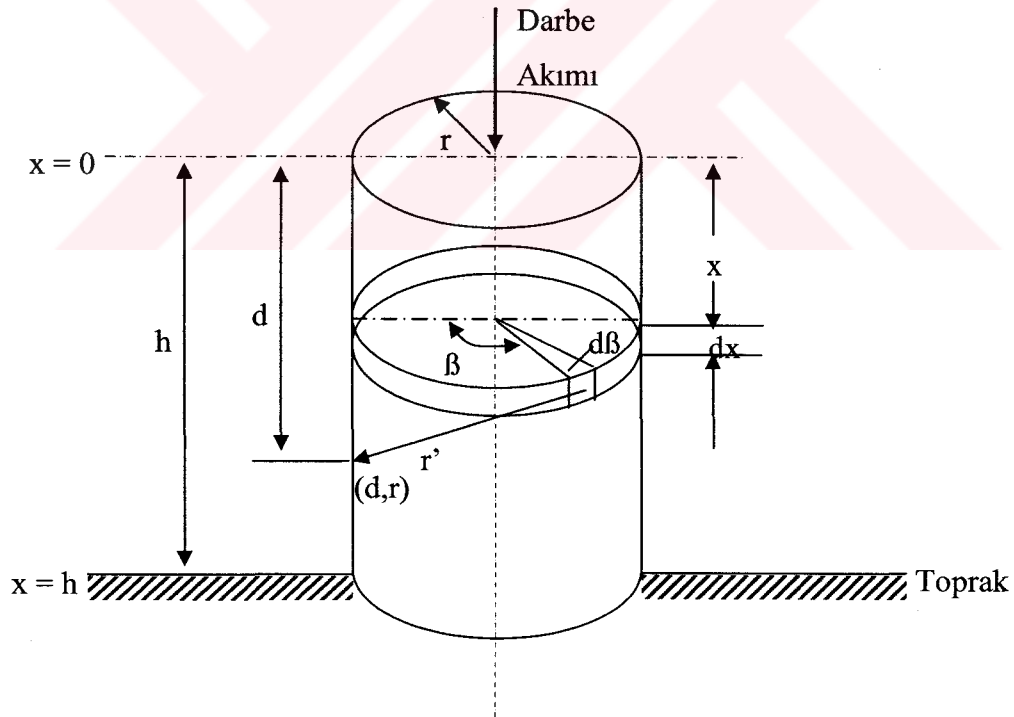
$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I(x, t - r'/c)}{r'} dx \quad (3.11)$$

şeklinde olur.

Elde edilen bu ifadelerden yararlanılarak, direk darbe empedansını hesaplamak için silindir yaklaşımı kullanılmıştır.

3.2 Direk Darbe Empedansını Hesaplamak İçin Kullanılan Silindir Yaklaşımı

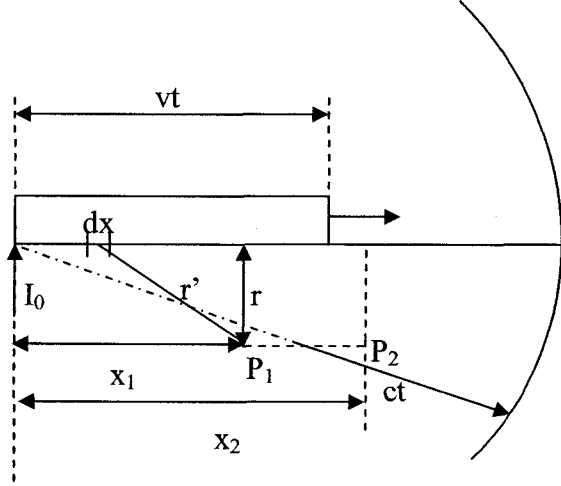
Direklerin darbe empedansını hesaplamak için, pek çok geometrik yaklaşım kullanılmıştır. Literatürde en çok bilinen yaklaşım silindir yaklaşımıdır. Bu alt bölümde, geometrik modellemesinde yüksekliği direk yüksekliğine eşit ve “r” yarıçaplı silindir yaklaşımı göz önüne alınmıştır. Yani yüksek gerilimde kullanılan çelik konstrüksiyonlu direk, Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir silindir olarak düşünülmüştür (Sargent ve Darveniza 1969).



Şekil 3.1 Elektrik alan teorisi analizinde kullanılan silindirsel direk modeli

Yüksek frekanslarda akım iletkenin her noktasından homojen olarak geçmemektedir. Yüksek frekanslarda meydana gelen deri etkisi (skin effect) olayından dolayı iletkenin dış yüzeyinden

akmaktadır. Doğrusal bir iletken etrafındaki elektrik alan şiddetini hesaplamak için silindrsel modelde Şekil 3.2'deki sistem kullanılır.



Şekil 3.2 Bir noktadaki vektör magnetik potansiyelini “A” hesaplamak için kullanılan model

Vektör magnetik potansiyelini hesaplamak için kullanılan (3.11) ifadesindeki “r” iletken diferansiyel elemanı “dx” ile vektör magnetik potansiyeli “A” olan “P” noktası arasındaki mesafedir. Eğer “P” uzayda verilen bir nokta ise akım hesaplanırken I’nın iletken boyunca x koordinatının (apsisin) ve zamanın bir fonksiyonu olduğu unutulmamalıdır (Wagner ve Hileman, 1959, 1960).

“I” akımı apsisle bağlıdır ve “r” boyunca geçen zaman “v” hızına bağlı olarak “t-r/c” olacaktır. Çünkü “r” yolu “r’ = ct” formülünde görüldüğü gibi “t’= r/c” zamanında alınır. Böylece “A” vektör magnetik potansiyeline benzer şekilde skaler potansiyel “V” (3.12) ifadesi kullanılarak hesaplanabilir.

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{q(x, t - r'/c)}{r'} dx \quad (3.12)$$

bu durumda elektrik alan ifadesi;

$$E = -\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.13)$$

olur. Vektör magnetik potansiyeli, bütün bu verilen ifadelerin ışığında hesaplanırsa;

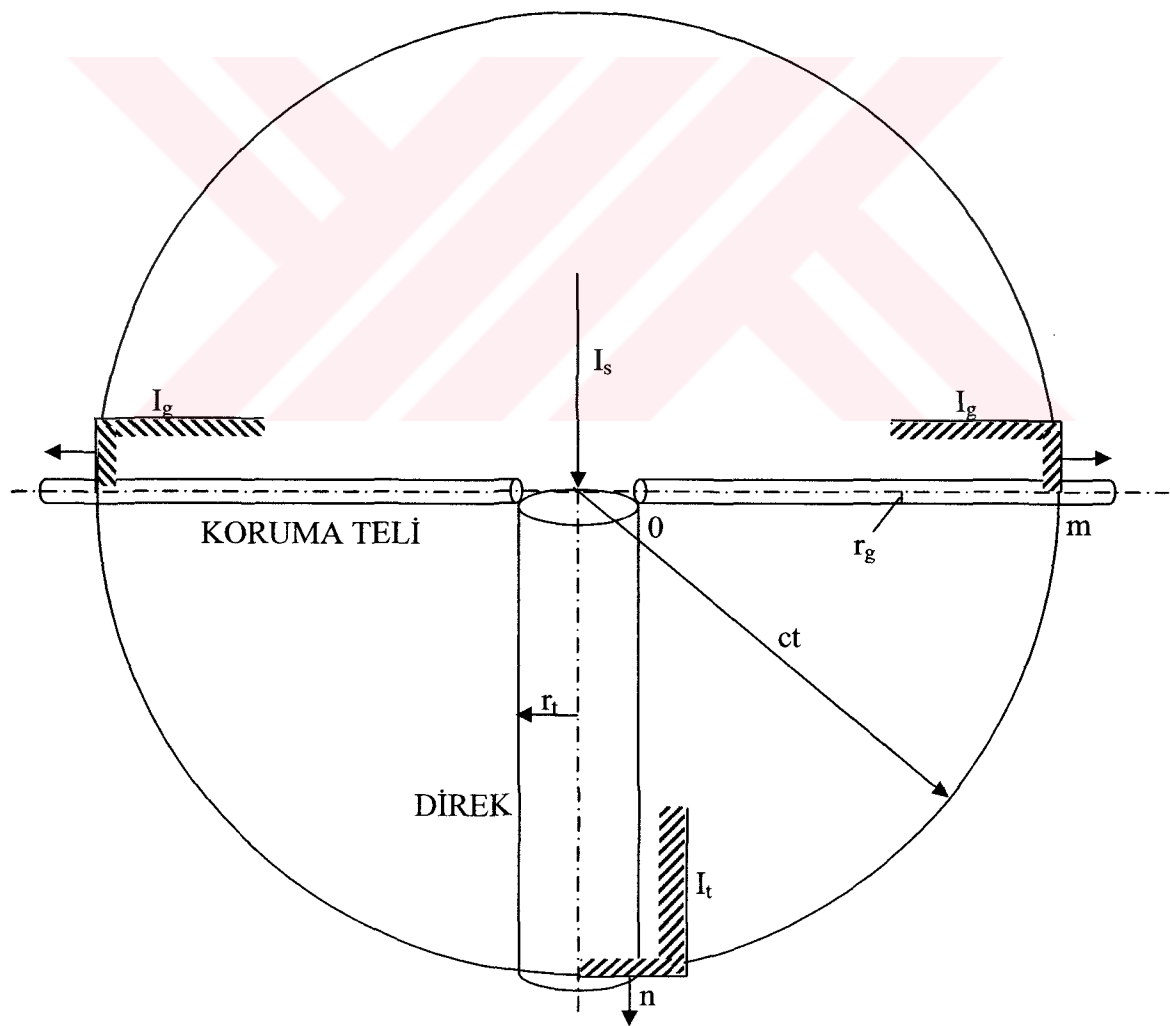
$$A = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^x \frac{dx}{\sqrt{(x-l)^2 + r^2}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \left[(x-l) + \sqrt{(x-l)^2 + r^2} \right] \Big|_0^x$$

$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \left[\left((x-l) + \sqrt{(x-l)^2 + r^2} \right) - \ln(-l + \sqrt{l^2 + r^2}) \right] \quad (3.14)$$

olur. Üst sınır olarak belirtilen x' ; bir akım elemanı olan “ dx ” ile akımın “P” noktasındaki etkisi arasındaki gecikme faktörü olarak tanımlanabilir.

3.3 Elektrik Alan Şiddetlerinden İfade Türetme

Daha önce hesaplanan (3.14) ifadesini düzgün bir hale getirmek ve bu ifade ile daha önce elde edilen ifadelerden yeni ve daha sade bir ifade elde etmek için, Şekil 3.3'ten sonra verilen değişken dönüşüm ifadeleri kullanılmıştır.



Şekil 3.3 Darbe akımına maruz kalan direk üzerindeki akım dağılımı

Sözü edilen değişken dönüşüm ifadeleri (3.15)'te verilmiştir;

$$u = \frac{c}{c+v}(vt-l) \quad ; \quad R = r \sqrt{\frac{c-v}{c+v}}$$

$$u' = \frac{u}{R} = \sqrt{\frac{c^2}{c^2-v^2}} \cdot \frac{vt-l}{r} \quad ; \quad l' = \frac{l}{r} \quad (3.15)$$

burada “v” parametresi akımın yayılma hızını ifade etmektedir.

I_t akımının ışık hızında ilerlediği göz önünde bulundurularak, Şekil 3.3'ten yararlanılarak (3.16), (3.17) ve (3.18)'de verilen ifadeler elde edilebilir.

$$(ct)^2 = (x+r_g)^2 + r_t^2 \quad (3.16)$$

r_g büyüklüğü r_t büyüklüğünün yanında çok daha küçük bir değere sahip olduğu için ihmal edilebilir. Bu durumda;

$$(ct)^2 = x^2 + r_t^2$$

$$x^2 = (ct)^2 - r_t^2 \quad (3.17)$$

(3.16) ve (3.17) ifadelerinden yararlanarak,

$$x = ct - \frac{r_t^2}{2ct} \quad (3.18)$$

ifadesi elde edilir. (3.9) ve (3.14) ifadelerinden ve Şekil 3.2'den yararlanılarak, (boşluk magnetik geçirgenliği, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m olduğunda akım tarafından meydana getirilen alanın çizgisel integrali;

$$\int_{P_1}^{P_2} E \cdot dx = \int_{x_1}^{x_2} -\frac{\partial A}{\partial t} dx = -30 \cdot I \cdot \frac{ct - x_1}{ct - x_2} \quad (3.19)$$

olarak elde edilir. P_1 ve P_2 arasındaki potansiyel;

$$\Psi_{P_2} - \Psi_{P_1} = -\int_{P_1}^{P_2} E \cdot dx \quad (3.20)$$

şeklinde tanımlanabilir. Aralık 1959'da C.F. Wagner ve A.R. Hileman tarafından AIEE (The American Institute of Electrical Engineers)'de yayınlanan “A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines-II” adlı çalışmada elektrik

alan hesabı için uyguladıkları, “Loop Voltage Method” kullanılarak;

$$\int E \cdot dx = \int_0^m E_i \cdot dx + \int_m^n E_i \cdot dx + \int_n^0 E_i \cdot dx \quad (3.21)$$

ifadesi elde edilir. m’den n’e doğru olan çizgisel integral sıfır olduğundan;

$$\int E \cdot dx = 0 = \int_0^m E_i \cdot dx + \int_n^0 E_i \cdot dx \quad (3.22)$$

olur. (3.19) ifadesini kullanarak, koruma teli için;

$$\begin{aligned} \int_0^m E_i \cdot dx &= -30 \cdot I_g \cdot \left(\ln \frac{ct - r_t}{ct - x} + \ln \frac{ct + r_t}{ct + x} \right) \\ &= -30 \cdot I_g \cdot \ln \left(\frac{(ct)^2 - r_t^2}{(ct)^2 - x^2} \right) \end{aligned} \quad (3.23)$$

ifadesi elde edilir. Buradaki “x” “0” noktasından “m” noktasına kadar olan mesafedir.

Bu durumda;

$$(ct)^2 = (x + r_t)^2 + r_g^2 \quad (3.24)$$

olur. $ct \gg r_t$ ve $x \gg r_t$ kabulleriyle,

$$\begin{aligned} (ct)^2 &= x^2 + r_g^2 \\ x^2 &= (ct)^2 - r_g^2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

olur. (3.23) ifadesi düzenlenirse;

$$\begin{aligned} \int_0^m E_i \cdot dx &= -30 \cdot I_g \cdot \ln \left(\frac{(ct)^2 - r_t^2}{(ct)^2 - x^2} \right) = -30 \cdot I_g \cdot \ln \left(\frac{ct}{r_g} \right)^2 \\ &= -I_g \cdot \left[60 \cdot \ln \frac{ct}{r_g} \right] \end{aligned} \quad (3.26)$$

ifadesi elde edilir. (3.19) ifadesi kullanılarak direk için;

$$\int_0^n E_i \cdot dx = -30 \cdot I_t \cdot \left(\ln \frac{ct - r_g}{ct - x} \right) \quad (3.27)$$

ifadesi elde edilir. Buradaki “x” “0” noktasından “n” noktasına kadar olan mesafedir.

Bu durumda;

$$(ct)^2 = (x + r_g)^2 + r_t^2 \quad (3.28)$$

olur. $ct \gg r_g$ ve $x \gg r_g$ kabulleriyle,

$$\begin{aligned} (ct)^2 &= x^2 + r_t^2 \\ x^2 &= (ct)^2 - r_t^2 \end{aligned} \quad (3.29)$$

olur. (3.27) ifadesi düzenlenirse;

$$\int_0^n E_i \cdot dx = -30 \cdot I_t \cdot \left(\ln \frac{ct - r_g}{ct - x} \right) = -30 \cdot I_t \cdot \ln \left(\frac{(ct)^2 + ct \cdot \sqrt{(ct)^2 - r_t^2}}{r_t^2} \right) \quad (3.30)$$

ifadesi elde edilir. Buradan direk darbe empedansı Kirchoff kanunundan yararlanarak “ I_t ” nin haricinde kalan kısımdır.

$$Z_t = 30 \cdot \ln \left(\frac{ct \left(ct + \sqrt{(ct)^2 - r_t^2} \right)}{r_t^2} \right) \quad (3.31)$$

Direk darbe empedansını hesaplamak için kullanılacak ifade böylece elde edilmiş olur. İfadeye yer alan;

$$\sqrt{(ct)^2 - r_t^2}$$

ifadesi, daha önce Wagner (1956) tarafından yapılan çalışmada ct 'ye eşit kabul edilmiştir. Çünkü Wagner'e göre “ r_t ” yani direk yarıçapı, direk boyunun yanında ihmal edilecek kadar küçük bir değerdedir. Ancak aslında direk yarıçapı direk boyu yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olmadığı göz önüne alınarak hesaplamaya devam edildiğinde, (3.31) ifadesi elde edilmiştir.

Yüksek gerilimli bir çelik konstrüksiyon direğin, üzerine yıldırım düşmesi sonucu akımın izleyeceği yol; direğin üzerinden toprağa ve topraktan tekrar direğin üzerine doğrudur. Aynı zamanda koruma teli üzerinden de bir akım akışı olacaktır ve bu yıldırımın düştüğü yerden itibaren koruma telinin her iki yönüne doğrudur. Bu bölümde amaçlanan direk darbe empedansını hesaplamaktır. Bu nedenle (3.31) ifadesinde yer alan ve ışık hızı ile hareket eden

yıldırım akımının aldığı yol olan “ct”, yukarıda bahsedildiği gibi direğin üzerinden toprağa ve topraktan tekrar direğin üzerine doğru ve direk boyu “h” olduğu için “2h” olarak ifade edilebilir. Bu durumda ifadenin yeni hali;

$$Z_t = 30 \cdot \ln \left(\frac{2h \left(2h + \sqrt{(2h)^2 - r_t^2} \right)}{r_t^2} \right) \quad (3.32)$$

olacaktır.

3.4 Darbe Empedansı İfadesinin Literatürde Yer Alan Çalışmalardaki ifadeler ile karşılaştırılması

Literatürde pek çok bilim adamının önerdiği direk darbe empedansı hesaplama bağıntıları ile karşılaşılmaktadır. Önerilen bu bağıntıların sonuçları arasındaki farklar akımın dalga şeklini ve akımın yayılma hızını göz önüne almaktan ve ölçme sonuçlarına yakınlığı sağlamak için kullanılan düzeltme terimlerinden ileri gelmektedir. Aşağıda bu ifadelerden bazılarının yer verilmiştir. Çizelge 3.1’de ise bu ifadeler ile elde edilen yeni ifade arasındaki farkları göz önüne sermek amaçlanmıştır. Bu ifadeler;

İfade-1: Diesendorf’un (1974) silindir yaklaşımı;

$$Z = 60 \cdot \ln(h/r) + 90 \cdot r/h - 60 \quad (3.33)$$

İfade-2: Lundholm vd. (1958), Wagner (1958), Wagner ve Hileman (1959), Wagner ve Hileman (1960) ve Sargent ve Darveniza’nın (1969) silindir yaklaşımı;

$$Z = 60 \cdot \ln \left(\sqrt{2} \cdot \frac{2h}{r} \right) \quad (3.34)$$

İfade-3: Le Roy vd. (1984) silindir yaklaşımı;

$$Z = 60 \cdot \ln(2h/r) \quad (3.35)$$

İfade-4: Hara ve Yamamoto (1996) silindir yaklaşımı;

$$Z = 60 \cdot \left(\ln(2\sqrt{2}h/r) - 2 \right) \quad (3.36)$$

olarak verilebilir.

(3.33), (3.34), (3.35) ve (3.36) ifadeleri ile bu bölümde ortaya konan (3.32) ifadesinin karşılaştırma sonuçları Çizelge 3.1’de verilmiştir. Karşılaştırma yapılırken kullanılan direğin 30,40 ve 50 metre boylarında olduğu ve taban yarıçapının 2,3 metre olduğu göz önünde bulundurulmuştur.

Yani başka bir deyişle;

$h = 30, 40$ ve 50 metre

$r_t = 2,3$ metre

olarak alınmıştır.

Çizelge 3.1 Elde edilen ifade ile literatürdeki ifadelerin karşılaştırılması

İfadeler	$Z_t (\Omega)$ Direk (30 m)	$Z_t (\Omega)$ Direk (40 m)	$Z_t (\Omega)$ Direk (50 m)
İfade-1 $Z = 60 \cdot \ln(h/r) + 90 \cdot r/h - 60$	100,9973	116,5332	128,8868
İfade-2 $Z = 60 \cdot \ln\left(\sqrt{2} \cdot \frac{2h}{r}\right)$	216,3015	233,5624	246,951
İfade-3 $Z = 60 \cdot \ln(2h/r)$	195,6861	212,9471	226,3357
İfade-4 $Z = 60 \cdot (\ln(2\sqrt{2}h/r) - 2)$	96,48054	113,7415	127,1301
Tezde Elde Edilen İfade $Z_t = 30 \cdot \ln\left(\frac{2h(2h + \sqrt{(2h)^2 - r_t^2})}{r_t^2}\right)$	216,4695	233,7353	247,1261

Çizelge 3.1 incelendiğinde tezde elde edilen ifadenin literatürde elde edilen ifadelerin çok yakınında değerler aldığı görülecektir. İfadenin oluşturulması esnasındaki ara işlemlerde ihmallerin yok denilecek kadar az yapılmış olması elde edilen ifadenin güvenilirliğini arttırmaktadır.

3.5 Sayısal Örnek

Bu alt bölümde, GSM 1800 30, 40 ve 50 metre yüksekliğindeki BEU tipi çelik kafes anten direklerinin yıldırımlardan korunma düzeni için, indirme iletkeni olarak 2 x 50 mm²'lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletken yerine doğrudan iletken kafes direk gövdesinin kullanılmasının darbe topraklama empedansı bakımından değerlendirilmesi incelenmiştir.

Çizelge 3.2 GSM 1800 BEU tipi çelik kafes anten direği özellikleri

Direk Yüksekliği (m)	30- 40- 50
Direk taban genişliği (mm)	6155
Direk tepe genişliği (mm)	2000

Aşağıda silindir yaklaşıma dayanan ve daha önce verilen İfade-1, İfade-2, İfade-3, İfade-4 ve tezde elde edilen ifadeler ile söz konusu anten direğinin farklı boyları için hesaplanan darbe empedansı değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.3 GSM 1800 BEU tipi çelik kafes anten direğinin farklı boyları için farklı ifadeler ile hesaplanan darbe topraklama empedansı değerleri

İfadeler	$Z_t (\Omega)$ Direk (30 m)	$Z_t (\Omega)$ Direk (40 m)	$Z_t (\Omega)$ Direk (50 m)
İfade-1	73,8909	88,2133	99,8389
İfade-2	183,9141	201,1751	214,5637
İfade-3	163,7258	180,9867	194,3753
İfade-4	96,4805	113,7415	127,1301
Tezde Elde Edilen İfade	184,4882	201,7631	215,1582

50 mm²'lik (r=4 mm) yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin 30, 40 ve 50 metre boyunda olması durumunda darbe topraklama empedans değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 50 mm²'lik (r=4 mm) yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin farklı boyları için farklı ifadeler ile hesaplanan darbe topraklama empedansı değerleri

İfadeler	50 mm ² yuvarlak kesitli dolu bakır iletken		
	İletken boyu 30 m Z (Ω)	İletken boyu 40 m Z (Ω)	İletken boyu 50 m Z (Ω)
İfade-1	475,3715	492,6294	506,0162
İfade-2	597,1367	614,3976	627,7862
İfade-3	576,9483	594,2093	607,5979
İfade-4	477,7427	495,0037	508,3923
Tezde Elde Edilen İfade	597,7427	615,0037	628,3923

Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te verilen hesaplama sonuçlarından BEU tipi çelik kafes anten direğinin darbe topraklama empedansı değerlerinin,

30 m yüksekliğindeki direk için $Z_t = 73,8909-184,4882$ ohm arasında,

40 m yüksekliğindeki direk için $Z_t = 88,2133-201,7631$ ohm arasında,

50 m yüksekliğindeki direk için $Z_t = 99,8389-215,1582$ ohm arasında,

değiştiği görülmektedir.

50 mm²'lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin darbe topraklama empedansı değerleri

30 m boyundaki iletken için $Z = 475,3715-597,7427$ ohm arasında,

40 m boyundaki iletken için $Z = 492,6294-615,0037$ ohm arasında,

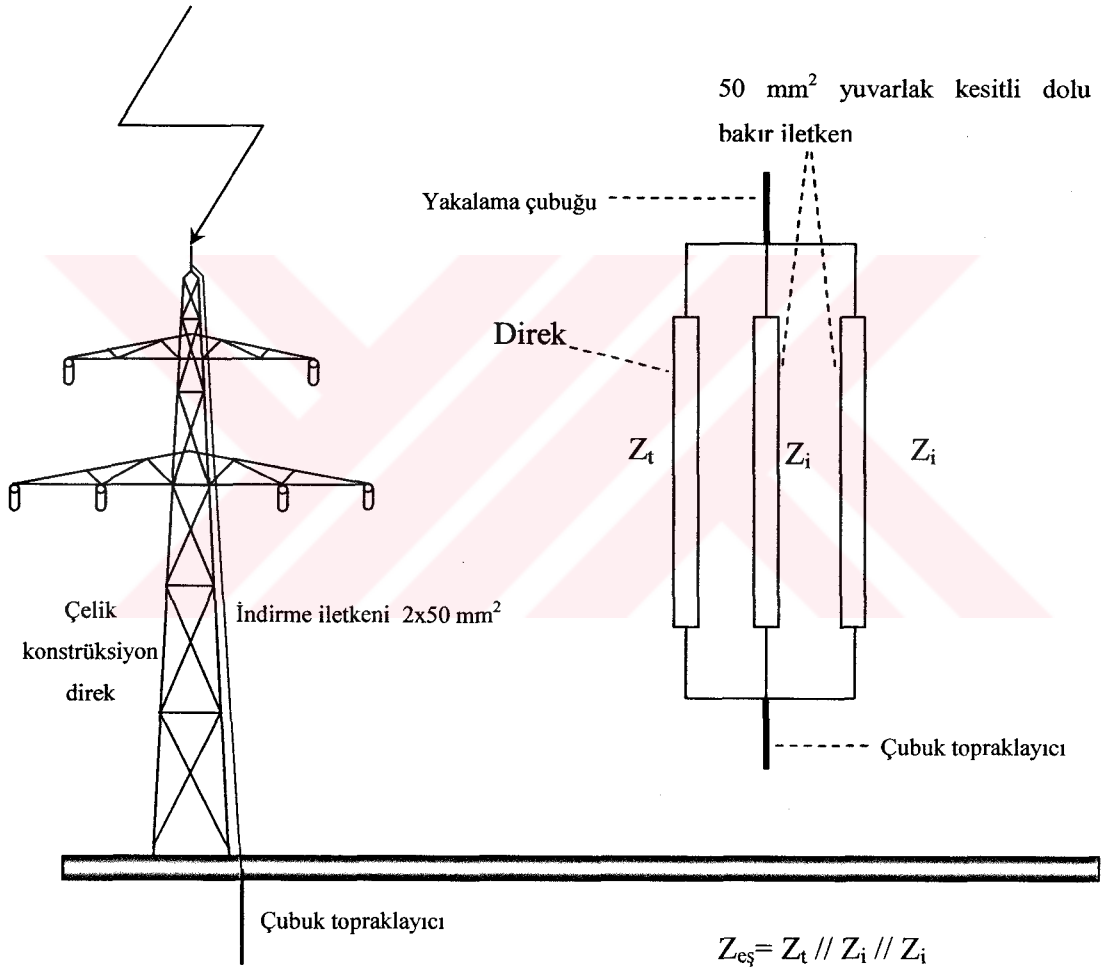
50 m boyundaki iletken için $Z = 506,0162-628,3923$ ohm arasında,

değiştiği görülmektedir.

Anten direklerinin darbe empedanslarının hesaplamalardan 95-215 ohm arasında ortalama olarak 160 ohm civarında olacağı söylenebilir. Bunun yanında 1 x 50 mm²'lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin darbe empedansının ortalama 500 ohm civarında olacağı, bu durumda 2x50 mm²'lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin darbe topraklama empedansının da 250 ohm civarında olacağı söylenebilir. Bu sonuç; çelik kafes anten direklerinin üzerinde yer alan

elektriksel donanımın yıldırımdan korunması için çelik kafes direklerden, iletken sürekliliğinin sağlanması durumunda yararlanılabileceğini göstermektedir.

GSM 1800 30, 40 ve 50 metre yüksekliğindeki BEU tipi çelik kafes anten direklerinin yıldırımlardan korunma düzeni için, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi indirme iletkeni olarak 2x50 mm²'lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletken kullanılması durumunda, direk ve indirme iletkeninin paralel bağlı olduğu düşünülecek olursa bu durumda sistemin darbe empedansı değerleri hesaplanmış ve Çizelge 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4 Çelik konstrüksiyon yüksek gerilim direği ve bu direğin yıldırımdan korunma ve topraklama sistemi ile eşdeğer elektriksel devresinin gösterilmesi

Çizelge 3.5 $2 \times 50 \text{ mm}^2$ 'lik ($r=4 \text{ mm}$) yuvarlak kesitli dolu bakır iletken ve çelik direğin paralel bağlı olması durumunda iletken ve direğin farklı boyları için farklı ifadeler ile hesaplanan darbe topraklama empedansı değerleri

$2 \times 50 \text{ mm}^2$ yuvarlak kesitli dolu bakır iletken ve çelik konstrüksiyon direğin paralel olarak düşünülmesi			
İfadeler	İletken // Direk 30 m $Z (\Omega)$	İletken // Direk 40 m $Z (\Omega)$	İletken // Direk 50 m $Z (\Omega)$
İfade-1	56,3676	64,9520	71,5892
İfade-2	113,8092	121,5655	127,4467
İfade-3	104,4464	112,4722	118,5349
İfade-4	68,7231	77,9287	84,7463
Tezde Elde Edilen İfade	114,0729	121,8276	127,7063

Sonuçlar incelendiğinde; elektriksel iletkenlik sürekliliği sağlanmış bir çelik kafes anten direğinin darbe empedansının (ortalama 160 ohm), $2 \times 50 \text{ mm}^2$ 'lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin darbe empedansından (ortalama 250 ohm) daha küçük olduğu görülmektedir. Çelik konstrüksiyon anten direği ve $2 \times 50 \text{ mm}^2$ 'lik yuvarlak kesitli dolu bakır indirme iletkeninin paralel bağlı olduğu düşünüldüğünde, Şekil 3.4' te görüldüğü gibi oluşan yeni sistemin darbe empedansının ortalama 100 ohm civarında olacağı söylenebilir. Bu sonuç göstermektedir ki;

- İletken sürekliliği tam olarak sağlanmış çelik konstrüksiyon direklerinin, direk üzerinde yer alan elektriksel donanımın yıldırımdan korunması amacı ile kullanılmaları durumunda darbe empedanslarının 160 ohm civarında olduğu görülmüştür.
- $2 \times 50 \text{ mm}^2$ 'lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletkenin, direk üzerinde yer alan elektriksel donanımın yıldırımdan korunması amacı ile kullanılmaları durumunda darbe empedansının da 250 ohm civarında olduğu görülmüştür.
- İletken sürekliliği tam olarak sağlanmış çelik konstrüksiyon direk ve $2 \times 50 \text{ mm}^2$ 'lik

yuvarlak kesitli dolu bakır indirme iletkeninin, direk üzerinde yer alan elektriksel donanımın yıldırımdan korunması amacı ile birlikte kullanılmaları durumunda, darbe empedansının ortalama 100 ohm civarında olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; yıldırım boşalması esnasında ortaya çıkan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmada güvenli bir şekilde toprağa akıtmak için sadece indirme iletkeninden veya sadece iletken sürekliliği tam olarak sağlanmış çelik konstrüksiyon direkten değil, indirme iletkeni ile iletken sürekliliği tam olarak sağlanmış çelik konstrüksiyon direkten birlikte (paralel bağlı) yararlanmanın daha iyi bir çözüm olduğu ortaya konmuştur.



4. YILDIRIM DARBE GERİLİMLERİNDE TOPRAĞIN VE TOPRAKLAYICININ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Tez çalışmasında yıldırım darbe akımının yıldırımdan korunma sisteminde izlediği akım yolu üzerinde yer alan ikinci ve belki de en önemli eleman olarak, topraklayıcı türlerinden en yaygın kullanılan çubuk topraklayıcı ele alınmıştır.

Yıldırım darbe akımının topraklayıcıya ulaştıktan sonra topraklayıcıdan toprağa doğru akması esnasında topraklayıcı ve toprağın davranışının incelenmesi özellikle sistemin yakınlarındaki canlıların sağlıklarının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bir topraklama tesisi üzerinde ve çevresinde oluşacak gerilim değeri, topraklama tesisini oluşturan, malzemenin türüne, boyutlarına, topraklayıcının gömülme ortamına ve koşullarına yakından bağlıdır. Atlama, delinme, dokunma, bağlanma gibi olaylar sonucu devrede veya elemanlarda meydana gelen kısa devrelerde veya yıldırım gibi elektriksel boşalmanın etkisinde topraklama tesisinden yüksek değerlerde akımlar geçer. Bu akımlarla topraklama tesisi ve bağlı olduğu yapılarda ortaya çıkacak gerilim düzeyi, topraklama direncine veya genel anlamda topraklama empedansına bağlıdır. Topraklama direnci ise toprağın ve topraklayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu basit gibi görünen bağlılık zinciri pek çok araştırmaya konu olmuştur. Topraklayıcının geometrisine (çubuk, levha, şerit, boru,...), boyutlarına, gömülme derinliğine, toprağın öz direncine gibi birçok büyüklüğe bağlı olarak topraklama direncinin belirlenmesi, topraklama konusunda kuramsal ve deneysel çalışmaların ilgi odağı olmuştur.

Bu nedenle “Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi” adlı bu tez çalışmasında topraklayıcının ve toprağın davranışını incelemek üzere iki ayrı çalışma yürütülmüştür. İlk çalışma tezde “Yıldırım Darbe Deneyi” adı altında bir bölüm olarak verilmiş deneysel bir çalışmadır. İkinci çalışma ise yine bu tez çalışmasında, daha önce yapılan pek çok çalışmanın paralelinde, elektriksel topraklamada yaygın olarak kullanılan topraklayıcı türlerinden biri olan çubuk topraklayıcıların yıldırım darbesine maruz kalmaları halinde, işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı Sonlu Farklar Yöntemi kullanılarak sunulmuş ve “Yıldırım Darbe Gerilimlerinde Toprağın ve Topraklayıcının Davranışının İncelenmesi için Geliştirilen Sayısal Uygulama” adı altında bir kuramsal bir çalışma olarak ayrı bir alt bölüm olarak verilmiştir.

4.1 YILDIRIM DARBE GERİLİMİ DENEYİ

Toprağı modellemek amacı ile toprak yerine elektrolitik sıvı kullanarak, bu elektrolitik sıvı içine yerleştirilen çubuk elektrotun yıldırım darbe geriliminde davranışını ve bununla birlikte toprağın yıldırım darbe geriliminde davranışını analiz etmek için laboratuvar ortamında bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma üç ayrı deneyden meydana gelmiştir. Kullanılan deney düzeneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'ne ait İ.T.Ü. Maslak/İstanbul kampüsünde yer alan Yüksek Gerilim Laboratuvarında kurulmuştur.

Bütün deneylerin başlangıcında deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı, hava basıncı ve yüzde cinsinden ortam bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Çizelgelerde verilmiştir.

İlk olarak; topraklama sisteminin direkt olarak toprağa bağlı olduğu durumda ölçüm direnci üzerinden geçen akımın direnç üzerinde oluşturduğu gerilimin ölçülmesi amaçlanmıştır. İkinci olarak; deney kabının içi belirli bir seviyede elektrolitik sıvı olarak çeşme suyu ile dolu iken birinci deneyden farklı olarak akımın geçeceği yola topraklama çubuk elektrotu ve deney kabının içindeki çeşme suyu dahil edilmiştir. Topraklama elektrotunun derinliği belirli bir değerde tutulmuş, böylece elektrot ucu merkez kabul edilerek bir yarı daire modeli gerçekleşmiş ve akım dağılımının nasıl gerçekleşeceği ölçüm ile belirlenmeye çalışılmıştır. Üçüncü olarak ise; deneyde kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğini arttırmak için sıvıya belirli miktarda sofra tuzu eklenmiş ve sıvının iletkenliği 2 micro.siemens/cm olduktan sonra topraklama elektrotunun derinliği belirli bir değerde tutulmuş, böylece elektrot ucu merkez kabul edilerek bir yarı daire modeli gerçekleşmiş ve akım dağılımının nasıl gerçekleşeceği ölçüm ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları çizelgelere kayıt edilmiş ve üzerinde çalışılmak üzere elektronik ortamda saklanmıştır.

Deneysel çalışma sonunda elde edilen ve Ek 1'de verilen sonuçlar incelendiğinde, çalışılan topraklama direnci aralığında çubuk elektrotu uygulanan gerilimi dolayısıyla akımı değiştirmenin sonuçları etkilemediği görülmüştür. Bunun nedeni toprak modeli olarak kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğinin yüksek, karşı düşen öz direncin çok büyük olmasıdır. Çünkü uygulamada 50-100 ohmlar mertebesinde olan toprak öz dirençleri üzerindeki gerilim düşümleri geçen akımın büyüklüğü ile orantılı olarak yüksektir. Çalışmada

ise sabit genlikli darbe gerilimi için kilo ohm mertebesinde özdirenci olan elektrolitten geçen akımlar çok küçük olmuştur. Her üç deneyde direnç değerini değiştirmek özdirenci ve akımı değiştirecek ölçüde olmamıştır.

Başka bir deyişle, metal deney kabı içinde toprağı modellemek amacı ile kullanılan elektrolitik sıvının akım yoluna katılmadan gerçekleştirildiği Deney-1'in sonuç değerleri ile elektrolitik sıvının akım yoluna katılması sonucu elde edilen Deney-2 ve Deney-3 sonuç değerleri karşılaştırıldığında, değerler arasında darbe geriliminde, toprağın davranışını değerlendirmeye yarayacak seviyede farklılıklar olmadığı görülmüştür. Bu da fark yaratacak düzeyde elektrolitik ortam iletkenliği sağlanamadığını göstermiştir. Bu farkı yaratabilmek için iletkenliği azaltmak dolayısı ile özdirenci büyütmek gerekir. Ancak elektrolitik sıvının iletkenliğinin damıtık su düzeyi veya daha düşük düzeyde iletkenliğe sahip olması deneysel olarak oluşturma zorluğu yaratmıştır. Bu nedenle mevcut olanaklar içindeki iletkenlikte çalışılmış ve sonuçların değişimi ve aralarındaki farklar incelenmiştir. Bu inceleme küçük özdirençli toprak içinde çubuk topraklayıcı davranışını incelemek bakımından yararlı olmuştur. Beklendiği gibi topraklayıcının içinde bulunduğu ortamın iletkenliğinin yüksek özdirencinin küçük olması darbe topraklamasında topraklayıcı ve çevresinde oluşan potansiyel dağılımının basık ve küçük genlikli olmasına neden olmuştur.

100 ohm.metre düzeyinde toprak özdirencine eşdeğer ortam elde edebilmek için 0,01 siemens/metre iletkenliğe sahip bir ortam yaratmak gerekir. Bunun için piyasada bulunan en düşük iletkenliğe sahip sıvı kullanılacak olsa bile bunun mertebesi 20 micro.siemens/metre olduğundan bu da bize 50000 ohm metrelik bir özdirenç sağlayacaktır. Geriye, uygun çözümü; yani yayılma direncini elde etmek için, özdirenç parametresi daha fazla değiştirilemediği için boyutları değiştirmek kalmaktadır. Buradan da deney kabının çapının ve yüksekliğinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışma bu gereksinimi sağlama durumu ortaya çıkınca sona erdirilmiş ve teorik analizlere geçilmiştir.

4.2 YILDIRIM DARBE GERİLİMLERİNDE TOPRAĞIN ve TOPRAKLAYICININ DAVRANIŞININ İNCELENMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN SAYISAL UYGULAMA

Bu bölümde, elektriksel topraklamada yaygın olarak kullanılan topraklayıcı türlerinden biri olan çubuk topraklayıcıların yıldırım darbesine maruz kalmaları halinde, işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı sunulmuştur. Problemin sayısal hesabı, silindrisel koordinatlarda, iki boyutlu sonlu farklar yöntemi ile geliştirilen bir bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Geliştirilen bu yöntem; topraklayıcıların çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabına yeni bir bakış açısı getirmesinin yanında, canlıların can güvenliği bakımından önemli olan adım ve dokunma gerilimlerinin boyutunu ve değişimini vermekte ve elektriksel topraklayıcılar çevresinde potansiyel dağılımı hesapları için farklı bir yaklaşım seçeneği sunmaktadır.

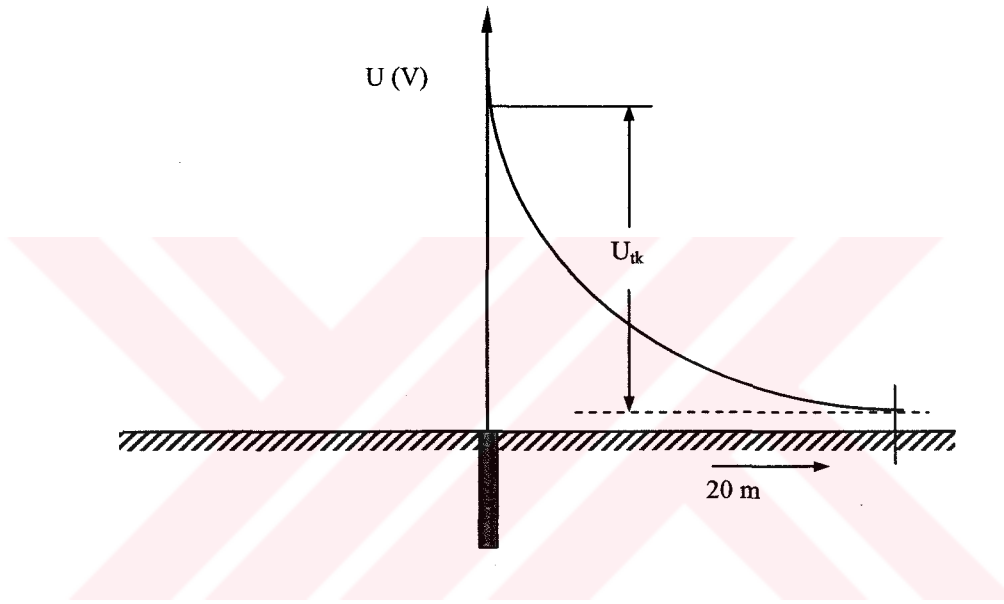
Elektriksel topraklama, başta insanlar olmak üzere, canlıları, elektrik devrelerini, elemanlarını ve kullandığımız nesneleri tehlikeli gerilimlerden korumada ve elektriksel sistemlerin işletilmesi için gereken toprak potansiyelini sağlamada kullanılan bir elektrik tesisidir. Basitçe bir topraklama tesisi, topraklanacak yerin toprakla bağlantısını sağlayan topraklama iletkenlerinden ve toprağa gömülen topraklayıcı adı verilen iletkenlerden oluşur. Koruma görevini arıza koşullarında oluşan akımları, çevresi için tehlikeli gerilimler oluşturmadan güvenli bir şekilde toprağa akıtarak yerine getirir.

Bir topraklama tesisi üzerinde ve çevresinde oluşacak gerilim değeri, topraklama tesisini oluşturan, malzemenin türüne, boyutlarına, topraklayıcının gömülme ortamına ve koşullarına yakından bağlıdır. Atlama, delinme, dokunma, bağlanma gibi olaylar sonucu devrede veya elemanlarda meydana gelen kısa devrelerde veya yıldırım gibi elektriksel boşalmanın etkisinde topraklama tesisinden yüksek değerlerde akımlar geçer. Bu akımlarla topraklama tesisi ve bağlı olduğu yapılarda ortaya çıkacak gerilim düzeyi, topraklama direncine veya genel anlamda topraklama empedansına bağlıdır. Topraklama direnci ise toprağın ve topraklayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu basit gibi görünen bağlılık zinciri pek çok araştırmaya konu olmuştur. Topraklayıcının geometrisine (çubuk, levha, şerit, boru,...), boyutlarına, gömülme derinliğine, toprağın öz direncine gibi birçok büyüklüğe bağlı olarak topraklama direncinin belirlenmesi, topraklama konusunda kuramsal ve deneysel çalışmaların ilgi odağı olmuştur.

Literatürde, yönetmelik ve standartlarda topraklama direncini hesaplamak için amprik, analitik ve sayısal birçok formül ve yöntem, verilmekte; topraklama direncini ölçerek

4.2.1 Sayısal Uygulama için Geliştirilen Model

Bilindiği gibi belli bir direnç değerine sahip bir topraklayıcıdan bir akım geçtiğinde, topraklayıcıda referans toprağa göre bir gerilim oluşur ve topraklayıcı ile referans toprak arasında bir potansiyel dağılımı ortaya çıkar. Burada sözü edilen referans toprak kavramı, topraklayıcı çevresinde oluşan bir potansiyel dağılımında potansiyelin teorik olarak sıfır kabul edildiği toprak bölümüdür. Uygulamada bir topraklayıcıdan yaklaşık 20 m uzaklıktaki toprak bölümü referans toprak olarak kabul edilir.



Şekil 4.2 Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı ve referans toprak

$U(V)$: Gerilim Ekseni
 U_{ik} : Topraklayıcı Gerilimi

Çubuk topraklayıcılar genellikle $1'' \approx 2,5$ cm çapında çelik borudan veya buna eşdeğer profil çelikten yapılırlar ve zemine dik olarak çakılırlar. Çubuk topraklayıcılar standart boylarda üretilirler ve birbirlerine vidalanabilir olduklarından boyları amaca göre uzatılabilir. Çubuk topraklayıcılar toprak zeminine dik olarak çakılırlar ve üst uçları 50 cm kadar toprak altında kalır. Çubuk topraklayıcılar oldukça derine inebildiklerinden, yaz aylarında olduğu gibi zemin kuru bile olsa topraklayıcı daima nemli zeminde olacağından çok iyi bir topraklama imkanı sağlayacaktır. Bu nedenle çubuk topraklayıcılara derin topraklayıcılar da denir. Çubuk

topraklayıcının zemine daha kolay çakılabilmesi için ucunun sivri olması gerekir. Eğer zeminin daha nemli ve yayılma direnci bakımından daha avantajlı olacağı görülürse, çubuğun yere dik olarak değil meyilli olarak gömülmesine karar verilebilir. Çubuk topraklayıcılar yere gömülmeyp çakılarak zemine yerleştirildiklerinden, toprak ile daha iyi temas ederler ve bu nedenle yayılma dirençleri çok küçük olur (Bayram 1977,1995).

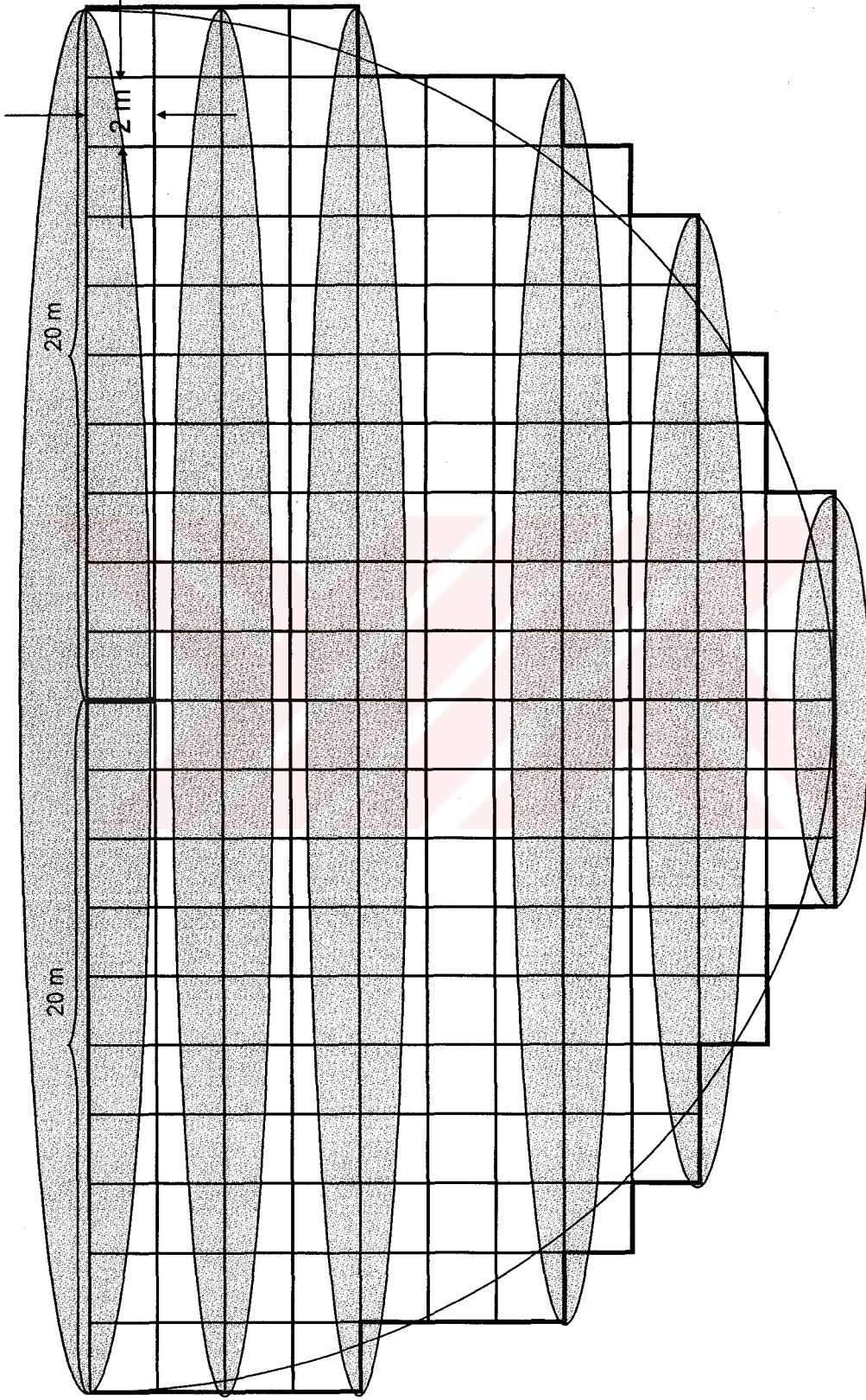
Toprak yayılma direncine en çok etki eden özelliği çubuk topraklayıcının boyu olduğundan yayılma direnci hesaplarında dikkate alınması gereken en önemli özellik topraklayıcının boyudur. Bu nedenle tez çalışması için geliştirilen modelde çubuk topraklayıcının değişik uzunlukları için hesaplar yapılmış ve bu hesap sonuçları karşılaştırılmıştır.

Modelleme için kullanılan topraklayıcı tipi; çubuk topraklayıcı olup, çubuk topraklayıcının her noktasından 20 metre uzaklıkta potansiyel değerinin 0 Volt ve kullanılan çubuk topraklayıcının standart boyunun 2 metre olduğu kabul edilmiştir.

Hesaplama için kullanılan Sonlu Farklar Yönteminde, genel olarak düzgün gözlerden oluşan ağlar kullanılır. Düzgün olmayan bir ağ ile türevsel denkleme karşılık fark denklemlerinin yazımı ve çözümü zorluk gösterir. Bu nedenle sayısal hesaplarda düzgün olmayan ağ ile çalışılmaktan kaçınılır. Bir bölgeyi örten bir ağ; kare, üçgen, altıgen veya çokgen (poligon) gözlerden oluşabilir. Fakat genelde düzgün bir ağın gözleri, kare veya eşkenar üçgendir.

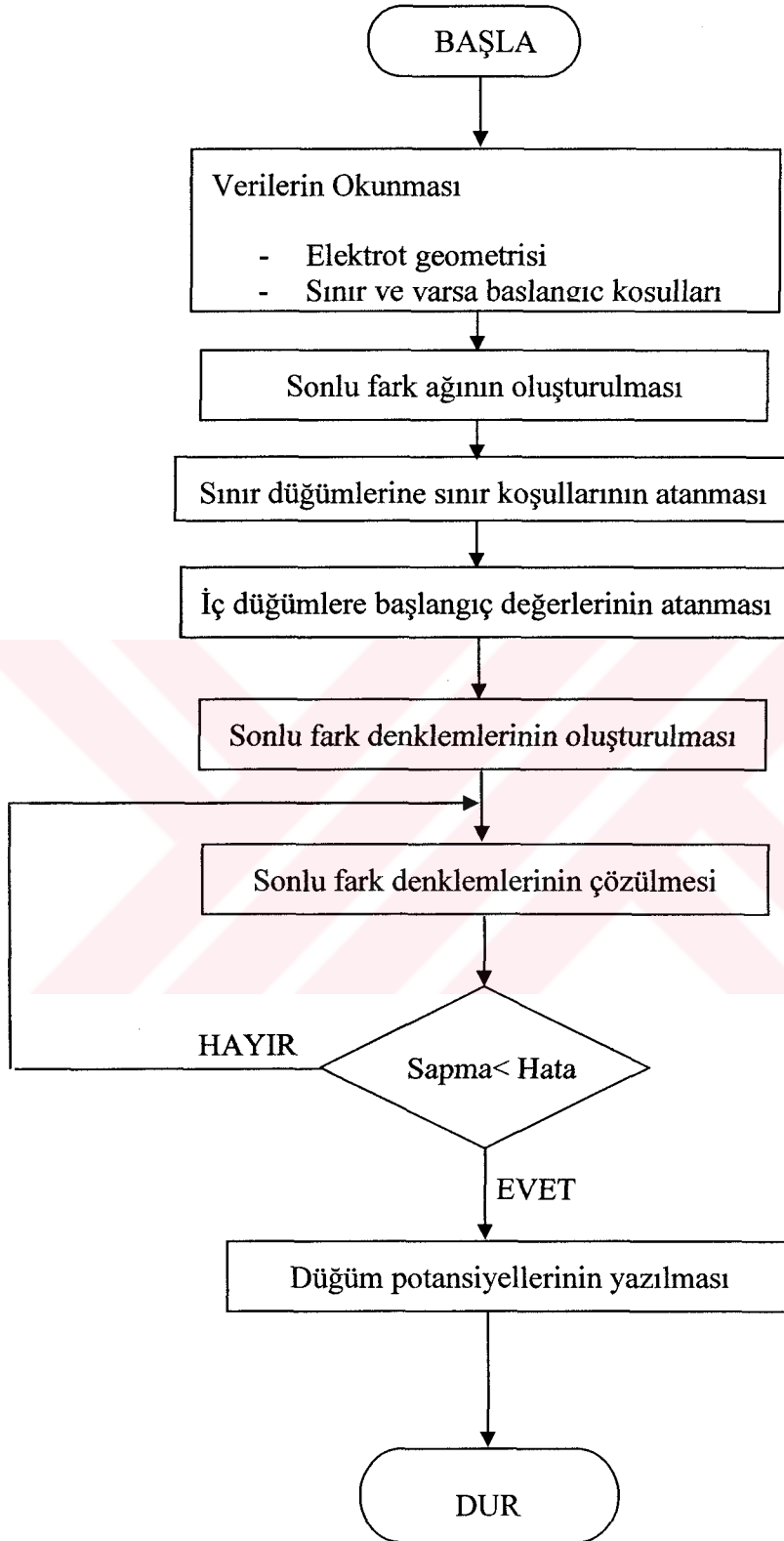
Kurulan modelde karesel gözlere sahip bir ağ tercih edilmiştir. Her ağ 2 x 2 metrelik bir kareden oluşmaktadır. Bu şekilde düşünülerek kurulmuş olan 2 metrelik tek elektrotlu sistem Şekil 4.3'te verilmiştir. Çubuk elektrot üzerindeki ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel, çubuk elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir. Hesaplamalarda daha sonraki çalışmalara referans teşkil etmesi açısından, çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki her noktada ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilerek çözüm gerçekleştirilmiştir.

Yıldırım darbe gerilimine maruz kalan bir topraklama sistemindeki potansiyel dağılımı hesabı için de aynı yöntem izlenerek çözüm yapılabilir. Ancak çözüm için sonlu farklar yöntemi kullanılırken darbe gerilimin şeklinde olduğu gibi, ayrı gerilim değerleri için çözüm yapmak gereklidir. Bunun için darbe geriliminin zamanla aldığı farklı değerleri için ayrı ayrı çözüm yapmak ve sonra bu çözüm sonuçlarını birleştirmek gereklidir.



Şekil 4.3 Çubuk topraklayıcı sonlu farklar yöntemi modeli

4.2.2 Hesaplama Algoritması



4.2.3 MODEL-1 (2 metre Derinliğe Gömülmüş 2 metrelik Çubuk Topraklayıcı)

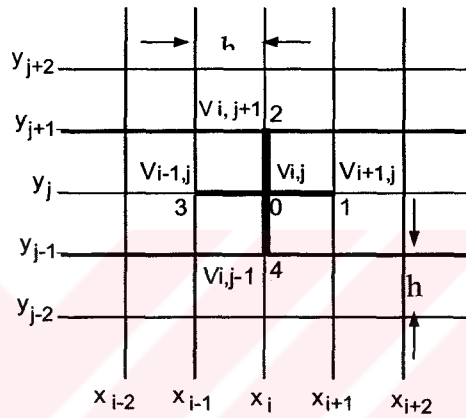
Model-1 olarak kurulan 2 metrelik tek elektrotlu sistem Şekil 4.4'te verilmiştir. Açıkça görüldüğü gibi sistem 90 karesel göz ve 112 düğümden meydana gelmiştir. Çubuk elektrot üzerindeki ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel değeri, çubuk elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir. Hesaplamalarda çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki bütün noktalarda ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilmiştir.

102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
11	22	33	44	54	64	73	82	90	97	101
10	21	32	43	53	63	72	81	89	96	100
9	20	31	42	52	62	71	80	88	95	99
8	19	30	41	51	61	70	79	87	94	98
7	18	29	40	50	60	69	78	86	93	
6	17	28	39	49	59	68	77	85	92	
5	16	27	38	48	58	67	76	84	91	
4	15	26	37	47	57	66	75	83		
3	14	25	36	46	56	65	74			
2	13	24	35	45	55					
1	12	23	34							

Şekil 4.4 2 metre derinliğe gömülmüş 2 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.

4.2.3.1 MODEL-1'in (2 metre Derinliğe Gömülmüş 2 metrelik Çubuk Topraklayıcı) Sonlu Fark Denklemlerinin Yazılması

Sonlu farklar yöntemi (SFY), potansiyel dağılımı hesaplarında da kullanılan bir sayısal yöntemdir. İlkesi, potansiyel dağılımı Laplace veya Poisson denklemiyle verilmiş kapalı bir bölgede sayısal çözümlemedeki sayısal türev konusundan bilinen türevler için sonlu fark denklemlerini kullanarak potansiyel dağılımını hesaplamaya dayanır. Bunun için örneğin iki boyutlu problemlerde, inceleme bölgesi kare, dikdörtgen veya üçgen gözleri olan bir ağı bölünür. Bu çalışmada inceleme bölgesi 2 x 2 metrelik kare gözlerle bölünmüştür.



Şekil 4.5 Kartezyen koordinatlarda, iki boyutlu, kare gözlü sonlu farklar yöntemi ağı örneği.

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

Bu çalışmada kare gözlerle sahip bir ağ yapısında, incelenen problemin geometrisine uygun olarak sonlu fark denklemleri silindirselsel koordinatlarda yazılmıştır. Silindirselsel koordinatlarda iki boyutlu Laplace denklemi;

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (4.1)$$

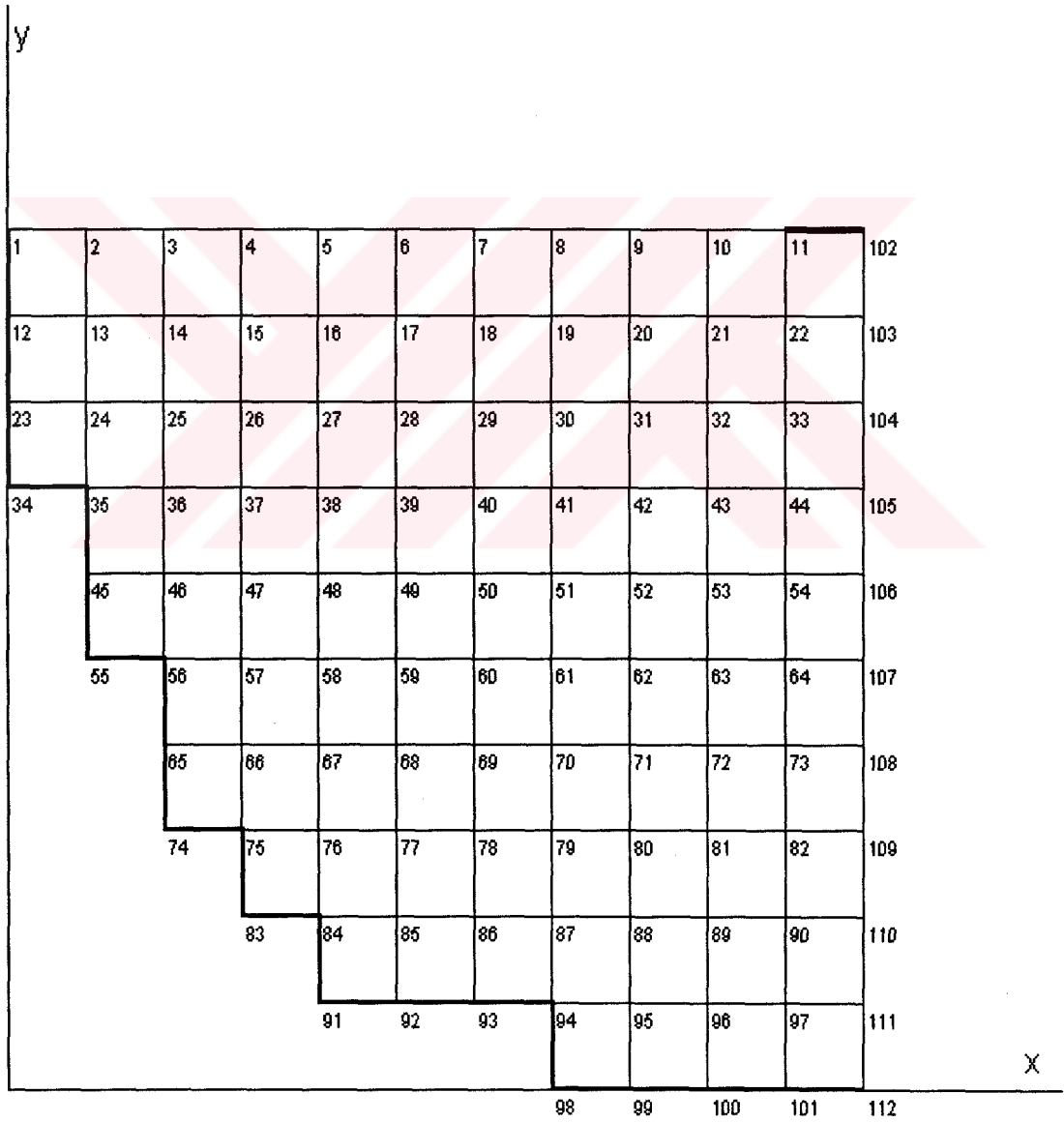
dir.

Burada, r ve z silindirselsel koordinatlar, $V = V(r, z)$ potansiyeldir. (5.4) denkleminin sonlu farklar ifadesi ise,

$$V_{i,j+1} + V_{i,j-1} + \left(1 + \frac{h}{2r}\right)V_{i+1,j} + \left(1 - \frac{h}{2r}\right)V_{i-1,j} - 4V_{i,j} = 0 \quad (4.2)$$

olacaktır. Ağın potansiyeli bilinmeyen her düğümü için yazılan bu denklemde, h ağın göz genişliği veya adım büyüklüğü, r ise denklemin yazıldığı düğümün koordinatıdır.

Hesaplamalarda kullanılan denklemlerin yazılması için silindirselsel koordinatlarda sisteme bakış yönü ve sistemdeki düğümlerin numaraları Şekil 4.6'da verildiği gibi düşünülmüştür.



Şekil 4.6 Silindirselsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.

(4.2) nolu ifadeden yararlanarak düğümlere ait denklemler yazılmıştır. Örneğin 13 nolu düğüm için sonlu fark denklemi şu şekilde yazılır;

13 nolu düğümün solunda yer alan 12 nolu düğümün potansiyel değeri, düğüm noktası çubuk elektrotta 20 metre uzaklıkta olduğu için 0 (sıfır) Volt değerindedir. 13 nolu düğüm için h (ağın göz genişliği veya adım büyüklüğü) y eksenine olan uzaklık olduğundan 2 metredir, r ise (denklemin yazıldığı düğümün koordinatı) yine 2 metredir. Bu durum da göz önünde bulundurularak 13 nolu düğüm için sonlu fark denklemi (4.2) nolu ifadeden hareketle;

$$V_2 - 4V_{13} + 1,5V_{14} + V_{24} = 0 \quad (4.3)$$

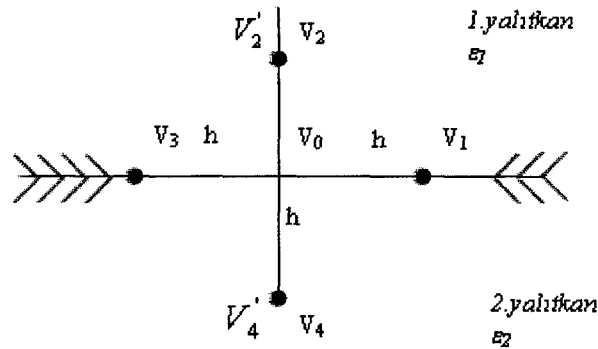
olacaktır.

Aynı mantıkla 17 nolu düğüme ait denklem yazılırsa; 17 nolu düğüm için h (ağın göz genişliği veya adım büyüklüğü) 2 metredir, r ise (denklemin yazıldığı düğümün koordinatı) 10 metredir. Bu durum da göz önünde bulundurularak 17 nolu düğüm için sonlu fark denklemi (4.2) nolu ifadeden hareketle;

$$V_6 + 0,9V_{16} - 4V_{17} + 1,1V_{18} + V_{28} = 0 \quad (4.4)$$

olacaktır.

Çubuk elektrotun 2 metre olması durumunda, elektrotun toprağa 2 metre çakıldığı varsayıldığından havadan toprağa doğru bir yalıtkan ortam değiştirme olduğu görülmektedir. Bu durumda dielektrik sabiti $\epsilon=1$ olan bir yalıtkan ortamdan, dielektrik sabiti $\epsilon=3$ olan bir başka yalıtkan ortama geçiş olmaktadır. Sınır koşulları göz önünde bulundurularak iki yalıtkan arakesitindeki düğümler için denklemler şu şekilde elde edilir;



Şekil 4.7 Yalıtkan-Yalıtkan arakesiti

Arakesitte V_0 noktasının potansiyeli;

ϵ_1 yanı için;

$$V_1 + V_3 + \left(1 + \frac{h}{2r}\right)V_2 + \left(1 - \frac{h}{2r}\right)V_4' - 4V_0 = 0 \quad (4.5)$$

ϵ_2 yanı için;

$$V_1 + V_3 + \left(1 + \frac{h}{2r}\right)V_2' + \left(1 - \frac{h}{2r}\right)V_4 - 4V_0 = 0 \quad (4.6)$$

olarak yazılır.

Elektrik alan şiddetinin arakesite dik bileşenleri

ϵ_1 yanı için;

$$E_{n1} = \frac{V_2 - V_4'}{2h} \quad (4.7)$$

ϵ_2 yanı için;

$$E_{n2} = \frac{V_2' - V_4}{2h} \quad (4.8)$$

olur.

Arakesitte $D_{n1} = D_{n2}$ olacağından

$$\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2} \quad \text{dir.}$$

ve

$$\epsilon_1 \frac{V_2 - V_4'}{2h} = \epsilon_2 \frac{V_2' - V_4}{2h} \quad \rightarrow \quad \epsilon_1 (V_2 - V_4') = \epsilon_2 (V_2' - V_4) \quad (4.9)$$

$$V_2' = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} (V_2 - V_4') + V_4 \quad (4.10)$$

olacaktır.

(4.10) denklemi (4.6) denkleminde yerine konulursa

$$V_1 + V_3 + \left(1 + \frac{h}{2r}\right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} (V_2 - V_4') + V_2 \right) + \left(1 - \frac{h}{2r}\right) V_4 - 4V_0 = 0 \quad (4.11)$$

denklemini elde edilir. (4.5) denkleminde V_4' çekilirse;

$$V_4' = \frac{4V_0 - V_1 - V_3 - \left(1 + \frac{h}{2r}\right) V_2}{\left(1 - \frac{h}{2r}\right)} \quad (4.12)$$

ifadesi elde edilir.

(4.12) ifadesi (4.11) denkleminde yerine konulursa ve denklem düzenlenirse;

$$\begin{aligned} & \left(1 + \frac{2r+h}{2r-h} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) V_1 + \left(1 + \frac{2r+h}{2r-h} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) V_3 + \\ & \left(1 + \frac{h}{2r}\right) \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} + \frac{2r+h}{2r-h} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) V_2 + \left(\frac{2r-h}{2r}\right) V_4 + 4 \left(1 + \frac{2r+h}{2r-h} \cdot \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right) V_0 = 0 \end{aligned} \quad (4.13)$$

ifadesi elde edilmiş olur.

Şekil 4.6'da verilen model üzerindeki düğümlerden 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110 ve 111 nolu düğümlerin sonlu fark denklemleri (4.13) ifadesinden yararlanılarak yazılacaktır.

Model 1 için yani 2 metre Derinliğe Gömülmüş 2 metrelik Çubuk Topraklayıcı kullanılması durumu için Şekil 4.6'da verilen düğüm numaralarına göre oluşturulan sonlu fark denklemleri Ek 3'te verilmiştir.

Oluşturulan denklem takımında bilinmeyen düğümlerin potansiyel ifadelerinin başında bulunan katsayıların oluşturduğu katsayılar matrisi [A], potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu matris [V] ve potansiyel değerleri bilinen

düğümlerin potansiyel değerlerinin oluşturduğu matris [B] olarak gösterildiğinde; bu matrisler arasında $[A] \times [V] = [B]$ şeklinde bir bağıntı elde edilir.

Bilinmeyen düğüm sayısı, çubuk elektrotun boyu 2 metre olduğunda 88 adet olduğu için oluşturulması gereken katsayılar matrisinin boyutu 88x88 olacaktır.

V 2 = 14,2416 Volt	V 52 = 35,8079 Volt
V 3 = 20,3547 Volt	V 53 = 38,8061 Volt
V 4 = 25,525 Volt	V 54 = 40,8466 Volt
V 5 = 30,667 Volt	V 57 = 9,1181 Volt
V 6 = 36,1303 Volt	V 58 = 14,7188 Volt
V 7 = 42,2681 Volt	V 59 = 19,0534 Volt
V 8 = 49,6168 Volt	V 60 = 22,7276 Volt
V 9 = 59,1647 Volt	V 61 = 25,9614 Volt
V 10 = 73,3886 Volt	V 62 = 28,7585 Volt
V 13 = 13,2172 Volt	V 63 = 30,971 Volt
V 14 = 19,4156 Volt	V 64 = 32,3964 Volt
V 15 = 24,6903 Volt	V 66 = 5,1705 Volt
V 16 = 29,8436 Volt	V 67 = 9,9174 Volt
V 17 = 35,213 Volt	V 68 = 13,8106 Volt
V 18 = 41,1102 Volt	V 69 = 16,9937 Volt
V 19 = 47,9161 Volt	V 70 = 19,6922 Volt
V 20 = 56,0837 Volt	V 71 = 21,9806 Volt
V 21 = 66,0622 Volt	V 72 = 23,7239 Volt
V 22 = 77,0727 Volt	V 73 = 24,8034 Volt
V 24 = 9,5038 Volt	V 76 = 4,8898 Volt
V 25 = 16,532 Volt	V 77 = 8,5704 Volt
V 26 = 22,2596 Volt	V 78 = 11,2615 Volt
V 27 = 27,4885 Volt	V 79 = 13,479 Volt
V 28 = 32,6413 Volt	V 80 = 15,4957 Volt
V 29 = 38,0034 Volt	V 81 = 16,986 Volt
V 30 = 43,7885 Volt	V 82 = 17,8671 Volt
V 31 = 50,0579 Volt	V 85 = 3,6824 Volt
V 32 = 56,5445 Volt	V 86 = 5,5992 Volt
V 33 = 62,0734 Volt	V 87 = 7,1653 Volt
V 36 = 11,7602 Volt	V 88 = 9,3179 Volt
V 37 = 18,5202 Volt	V 89 = 10,7274 Volt
V 38 = 23,912 Volt	V 90 = 11,4745 Volt
V 39 = 28,8088 Volt	V 95 = 3,6609 Volt
V 40 = 33,5615 Volt	V 96 = 5,0122 Volt
V 41 = 38,3196 Volt	V 97 = 5,5559 Volt
V 42 = 43,0177 Volt	V 103 = 79,484 Volt
V 43 = 47,3227 Volt	V 104 = 63,8024 Volt
V 44 = 50,5111 Volt	V 105 = 51,5883 Volt
V 46 = 7,3588 Volt	V 106 = 41,5363 Volt
V 47 = 14,1398 Volt	V 107 = 32,8698 Volt
V 48 = 19,5445 Volt	V 108 = 25,1548 Volt
V 49 = 24,1555 Volt	V 109 = 18,1463 Volt
V 50 = 28,3362 Volt	V 110 = 11,699 Volt
V 51 = 32,2389 Volt	V 111 = 5,7025 Volt

Çözüm sonucu elde edilen, potansiyel değeri bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri Şekil 4.8’de verilmektedir. Denklem takımının çözülmesi sonrası elde edilen bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri yukarıda verilmiştir.

Denklem takımının çözümü sonrası elde edilen bütün potansiyel değerlerinin Model üzerinde gösterimi Şekil 4.8’de verilmiştir.

100	79,484	63,8024	51,5883	41,5363	32,8698	25,1548	18,1463	11,699	5,7025	0
100	77,0727	62,0734	50,5111	40,8466	32,3964	24,8034	17,8671	11,4745	5,5559	0
73,3886	66,0622	56,5445	47,3227	38,8061	30,971	23,7239	16,986	10,7274	5,0122	0
59,1647	56,0837	50,0579	43,0177	35,8079	28,7585	21,9806	15,4957	9,3179	3,6609	0
49,6168	47,9161	43,7885	38,3196	32,2389	25,9614	19,6922	13,479	7,1653	0	0
42,2681	41,1102	38,0034	33,5615	28,3362	22,7276	16,9937	11,2615	5,5992	0	
36,1303	35,213	32,6413	28,8088	24,1555	19,0534	13,8106	8,5704	3,6824	0	
30,667	29,8436	27,4885	23,912	19,5445	14,7188	9,9174	4,8898	0	0	
25,525	24,6903	22,2596	18,5202	14,1398	9,1181	5,1705	0	0		
20,3547	19,4156	16,532	11,7602	7,3588	0	0	0			
14,2416	13,2172	9,5038	0	0						
0	0	0								

Şekil 4.8 Çubuk elektrotun 2 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri

4.2.3.2 Potansiyel Dağılımı Hesaplarının Bilgisayar Yardımı İle Yapılması

Hesaplamalar için izlenen algoritma şu şekilde açıklanabilir. Model için yazılan sonlu fark denklemleri MS EXCEL programı kullanılarak matris formuna getirilmiştir. Bunun için bilinmeyen düğümlerin düğüm numaraları MS EXCEL de ilk satıra soldan sağa ve ilk sütuna yukarıdan aşağıya işlenmiştir.

Her bir denklem için o denklemde yer alan düğüm numarasına karşılık gelen katsayı ilgili hücreye ve işlenen bu katsayılar haricindeki tüm hücrelerin katsayı değeri sıfır olarak matrise işlenmiştir. Oluşturulan matriste bilinmeyen düğümlerin potansiyel ifadelerinin başında bulunan katsayıların oluşturduğu katsayılar matrisi $[A]$, potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu matris $[V]$ ve potansiyel değerleri bilinen düğümlerin potansiyel değerlerinin oluşturduğu matris $[B]$ olarak gösterildiğinde; bu matrisler arasındaki $[A] \times [V] = [B]$ bağıntısından yararlanarak; potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu $[V]$ matrisinin elemanlarının değerlerinin belirlenmesi için bu bağıntının çözülmesi gerekmektedir.

Çözüm için MATLAB 6.0 programı kullanılmıştır. Ancak MATLAB 6.0 programı ile bu çözümü gerçekleştirmek için matrislerde bir takım düzenlemelerin yapılması gerekmektedir. MATLAB 6.0 programına çözümlenmesi istenilen matrisler tanımlanırken, matrisin her satırı yazılır ve bu satırı; bir sonraki satırdan ayırmak ve bu denklem takımının bir matris olduğunu tanımlayabilmek için noktalı virgül kullanılır. Bu kadar büyük bir matriste her satır sonuna noktalı virgül koymak bile çok zahmetli bir iş olduğundan bu işlem için yine MS EXCEL’de hazırlanan matrisin; son satırı hariç, her satırının sonuna noktalı virgül koymak tercih edilmiştir. Bu şekilde elde edilen matris her satır sonundaki noktalı virgüller ile birlikte kopyalanarak MS WORD programına yapıştırılmıştır. Bu aşamada MS WORD programının kullanılmasının sebebi; MS EXCEL ve MATLAB 6.0 programları arasındaki bilgisayara ait bölgesel ayar farklarını aşmak içindir.

MATLAB 6.0 programı matrisi çözülür iken matris tanımının yapılması ve matrise ait tüm değerlerin programa girilmesi gerekmektedir. Matris tanımı yapılırken programın kullanımı gereği matrise ait her satır programa satır formatında girilir ve bir sonraki satır girilmeden önce noktalı virgül kullanılır. Matrisi oluşturan değerlerde ondalıklı kısımları ayırmak için ise nokta kullanılır. Bu nedenle MS EXCEL programı kullanılarak oluşturulan matriste yer alan değerlerdeki ondalıklı kısımları tam sayı kısmından ayırmak için kullanılan virgüllerin nokta ile değiştirilmesi gerekmektedir. Bu işlem için MS EXCEL programı kullanılamamıştır. Çünkü bu virgüllerin değiştirilmesi için MS EXCEL’in kullanılması halinde değerler MS

EXCEL programının bölgesel ayarlar özelliği gereği tarihsel formata geçmektedir. Bu nedenle matris MS WORD'e aktarılmıştır. MS WORD programındaki "Edit" menüsünde yer alan "Replace" komutu sayesinde tüm virgüller nokta ile kolayca yer değiştirilmiştir. Böylece MATLAB 6.0 programının çözebileceği matrisler elde edilmiştir. Çözüm için MATLAB 6.0 programına; potansiyel değeri bilinmeyen düğümlerin potansiyel ifadelerinin başında bulunan katsayıların oluşturduğu katsayılar matrisi [A] girilmiş olacaktır. Potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu [V] matrisini oluşturan elemanların değerlerinin hesaplanması için, potansiyel değeri bilinmeyen düğümlerin potansiyel ifadelerinin başında bulunan katsayıların oluşturduğu katsayılar matrisi [A], potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu matris [V] ve potansiyel değerleri bilinen düğümlerin potansiyel değerlerinin oluşturduğu matris [B] arasındaki $[A] \times [V] = [B]$ bağıntısından yararlanılır.

[V] matrisinin elemanlarının değerlerinin belirlenmesi için bağıntının $[V] = [A] \times [B]^{-1}$ şeklinde düzenlenmesi gerekmektedir. Katsayılar matrisi [A]'nın MS EXCEL ve MS WORD programları kullanılarak MATLAB 6.0 programında çözüm için uygun hale getirilmesi ve girilmesinin ardından aynı işlemler [B] matrisi içinde tekrarlanarak MATLAB 6.0 programına girişi sağlanmıştır. [A] ve [B] matrisleri MATLAB 6.0 a girildikten sonra $[V] = [A] \times [B]^{-1}$ bağıntısı yardımıyla [V] matrisinin değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra bu [V] matrisi olduğu gibi seçilerek kopyalanmıştır ve MS WORD programına yapıştırılmıştır; bölgesel ayar farklılıklarının giderilmesi ve MS EXCEL'in kullanabileceği formata dönüştürmek için matrisi oluşturan değerlerdeki ondalıklı kısımları ayıran noktalar "Edit" menüsündeki "Replace" komutu kullanılarak virgüller ile değiştirilmiştir.

[V] matrisinde yer alan bu çözüm sonucu elde edilen değerler kopyalanmış ve MS EXCEL programında bu değerler için ayrılan ilgili hücrelere yapıştırılmıştır. Daha sonra MS EXCEL de hazırlanan model çiziminde ilgili hücrelere girilen potansiyel değerleri ile Şekil 4.8'de görüldüğü gibi potansiyel dağılımı tablosu elde edilmiştir.

4.2.4 MODEL-2 (4 metre Derinliğe Gömülmüş 4 metrelik Çubuk Topraklayıcı)

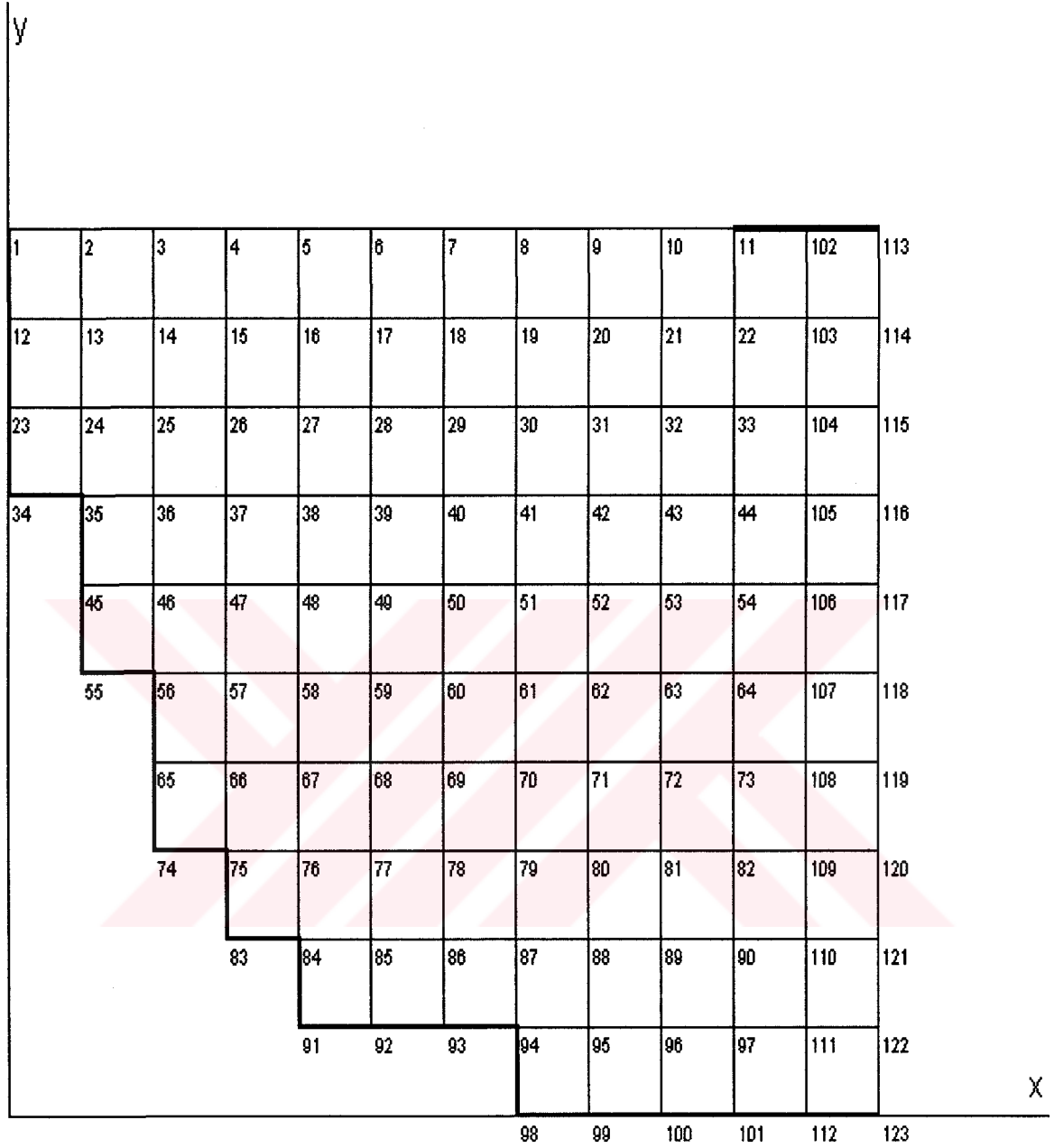
Model-2 olarak kurulan 4 metrelik tek elektrotlu sistem Şekil 4.9'da verilmiştir. Açıkça görüldüğü gibi sistem 100 karesel göz ve 123 düğümden meydana gelmiştir. 4 metrelik çubuk elektrot üzerindeki ve elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel değeri, elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir.

Hesaplamlarda çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki bütün noktalarda ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilmiştir.

113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123
102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
11	22	33	44	54	64	73	82	90	97	101
10	21	32	43	53	63	72	81	89	96	100
9	20	31	42	52	62	71	80	88	95	99
8	19	30	41	51	61	70	79	87	94	98
7	18	29	40	50	60	69	78	86	93	
6	17	28	39	49	59	68	77	85	92	
5	16	27	38	48	58	67	76	84	91	
4	15	26	37	47	57	66	75	83		
3	14	25	36	46	56	65	74			
2	13	24	35	45	55					
1	12	23	34							

Şekil 4.9 4 metre derinliğe gömülmüş 4 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.

Hesaplamlarda kullanılan denklemlerin yazılması için silindirselsel koordinatlarda sisteme bakış yönü ve sistemdeki düğümlerin numaraları Şekil 4.10'da verildiği gibi düşünülmüştür.



Şekil 4.10 Silindirselsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.

Şekil 4.10'da verilen model üzerindeki düğümlerden 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121 ve 122 nolu düğümlerin sonlu fark denklemleri (5.16) ifadesinden yararlanılarak yazılacaktır.

Model-2 için yani 4 metre Derinliğe Gömülmüş 4 metrelik Çubuk Topraklayıcı kullanılması durumu için Şekil 4.10'da verilen düğüm numaralarına göre oluşturulan sonlu fark denklemleri Ek 3'te verilmiştir.

Çözüm sonucu elde edilen, potansiyel değeri bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri Şekil 4.11’de verilmektedir. Denklem takımının çözülmesi sonrası elde edilen bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri aşağıda verilmiştir.

V 2 = 15,0738 Volt	V 52 = 38,7721 Volt	V 114 = 84,2562 Volt
V 3 = 21,539 Volt	V 53 = 42,3977 Volt	V 115 = 70,2745 Volt
V 4 = 26,9948 Volt	V 54 = 45,2606 Volt	V 116 = 58,1719 Volt
V 5 = 32,3984 Volt	V 57 = 9,7604 Volt	V 117 = 47,5792 Volt
V 6 = 38,102 Volt	V 58 = 15,7893 Volt	V 118 = 38,1174 Volt
V 7 = 44,447 Volt	V 59 = 20,4977 Volt	V 119 = 29,5001 Volt
V 8 = 51,9344 Volt	V 60 = 24,5463 Volt	V 120 = 21,5252 Volt
V 9 = 61,4563 Volt	V 61 = 28,1924 Volt	V 121 = 14,0429 Volt
V 10 = 75,2132 Volt	V 62 = 31,4717 Volt	V 122 = 6,92 Volt
V 13 = 13,9933 Volt	V 63 = 34,2648 Volt	
V 14 = 20,5537 Volt	V 64 = 36,3939 Volt	
V 15 = 26,1271 Volt	V 66 = 5,5552 Volt	
V 16 = 31,5542 Volt	V 67 = 10,6866 Volt	
V 17 = 37,1789 Volt	V 68 = 14,9376 Volt	
V 18 = 43,3093 Volt	V 69 = 18,4722 Volt	
V 19 = 50,3121 Volt	V 70 = 21,5515 Volt	
V 20 = 58,6114 Volt	V 71 = 24,278 Volt	
V 21 = 68,6292 Volt	V 72 = 26,5259 Volt	
V 22 = 79,7069 Volt	V 73 = 28,1835 Volt	
V 24 = 10,069 Volt	V 76 = 5,2916 Volt	
V 25 = 17,5218 Volt	V 77 = 9,3152 Volt	
V 26 = 23,594 Volt	V 78 = 12,3104 Volt	
V 27 = 29,1307 Volt	V 79 = 14,8507 Volt	
V 28 = 34,5747 Volt	V 80 = 17,2518 Volt	
V 29 = 40,2241 Volt	V 81 = 19,1632 Volt	
V 30 = 46,3052 Volt	V 82 = 20,5024 Volt	
V 31 = 52,903 Volt	V 85 = 4,0194 Volt	
V 32 = 59,8204 Volt	V 86 = 6,1478 Volt	
V 33 = 66,086 Volt	V 87 = 7,9377 Volt	
V 36 = 12,4893 Volt	V 88 = 10,4459 Volt	
V 37 = 19,6815 Volt	V 89 = 12,1939 Volt	
V 38 = 25,4275 Volt	V 90 = 13,2785 Volt	
V 39 = 30,6559 Volt	V 95 = 4,134 Volt	
V 40 = 35,7472 Volt	V 96 = 5,732 Volt	
V 41 = 40,8804 Volt	V 97 = 6,4708 Volt	
V 42 = 46,0302 Volt	V 103 = 83,3752 Volt	
V 43 = 50,937 Volt	V 104 = 69,335 Volt	
V 44 = 55,0061 Volt	V 105 = 57,417 Volt	
V 46 = 7,8336 Volt	V 106 = 47,0137 Volt	
V 47 = 15,076 Volt	V 107 = 37,6951 Volt	
V 48 = 20,8702 Volt	V 108 = 29,179 Volt	
V 49 = 25,8421 Volt	V 109 = 21,2788 Volt	
V 50 = 30,3923 Volt	V 110 = 13,8632 Volt	
V 51 = 34,7081 Volt	V 111 = 6,8185 Volt	

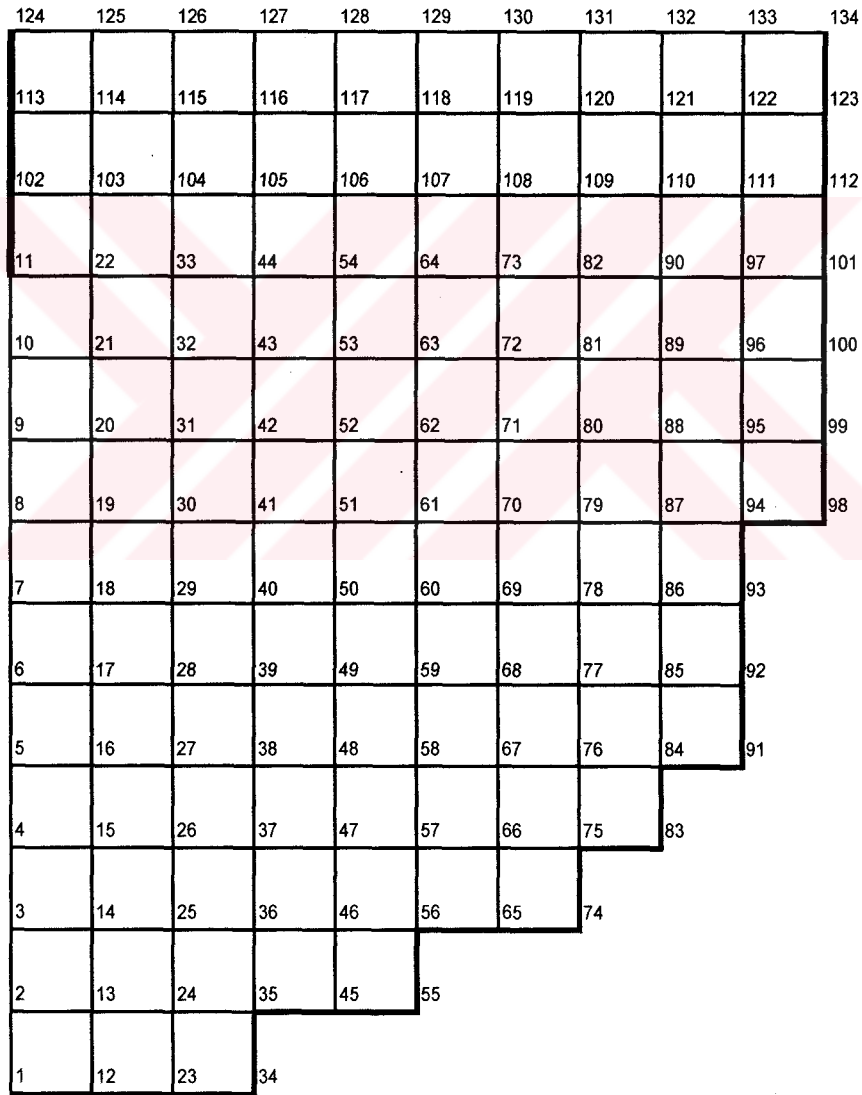
Model-2 için kurulan denklem takımının çözümü sonrası elde edilen bütün potansiyel değerlerinin Model üzerinde gösterimi Şekil 4.11’de verilmiştir.

100	84,2562	70,2745	58,1719	47,5792	38,1174	29,5001	21,5252	14,0429	6,92	0
100	83,3752	69,335	57,417	47,0137	37,6951	29,179	21,2788	13,8632	6,8185	0
100	79,7069	66,086	55,0061	45,2606	36,3939	28,1835	20,5024	13,2785	6,4708	0
75,2132	68,6292	59,8204	50,937	42,3977	34,2648	26,5259	19,1632	12,1939	5,732	0
61,4563	58,6114	52,903	46,0302	38,7721	31,4717	24,278	17,2518	10,4459	4,134	0
51,9344	50,3121	46,3052	40,8804	34,7081	28,1924	21,5515	14,8507	7,9377	0	0
44,447	43,3093	40,2241	35,7472	30,3923	24,5463	18,4722	12,3104	6,1478	0	
38,102	37,1789	34,5747	30,6559	25,8421	20,4977	14,9376	9,3152	4,0194	0	
32,3984	31,5542	29,1307	25,4275	20,8702	15,7893	10,6866	5,2916	0	0	
26,9948	26,1271	23,594	19,6815	15,076	9,7604	5,5552	0	0		
21,539	20,5537	17,5218	12,4893	7,8336	0	0	0			
15,0738	13,9933	10,069	0	0						
0	0	0	0							

Şekil 4.11 Çubuk elektrotun 4 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri

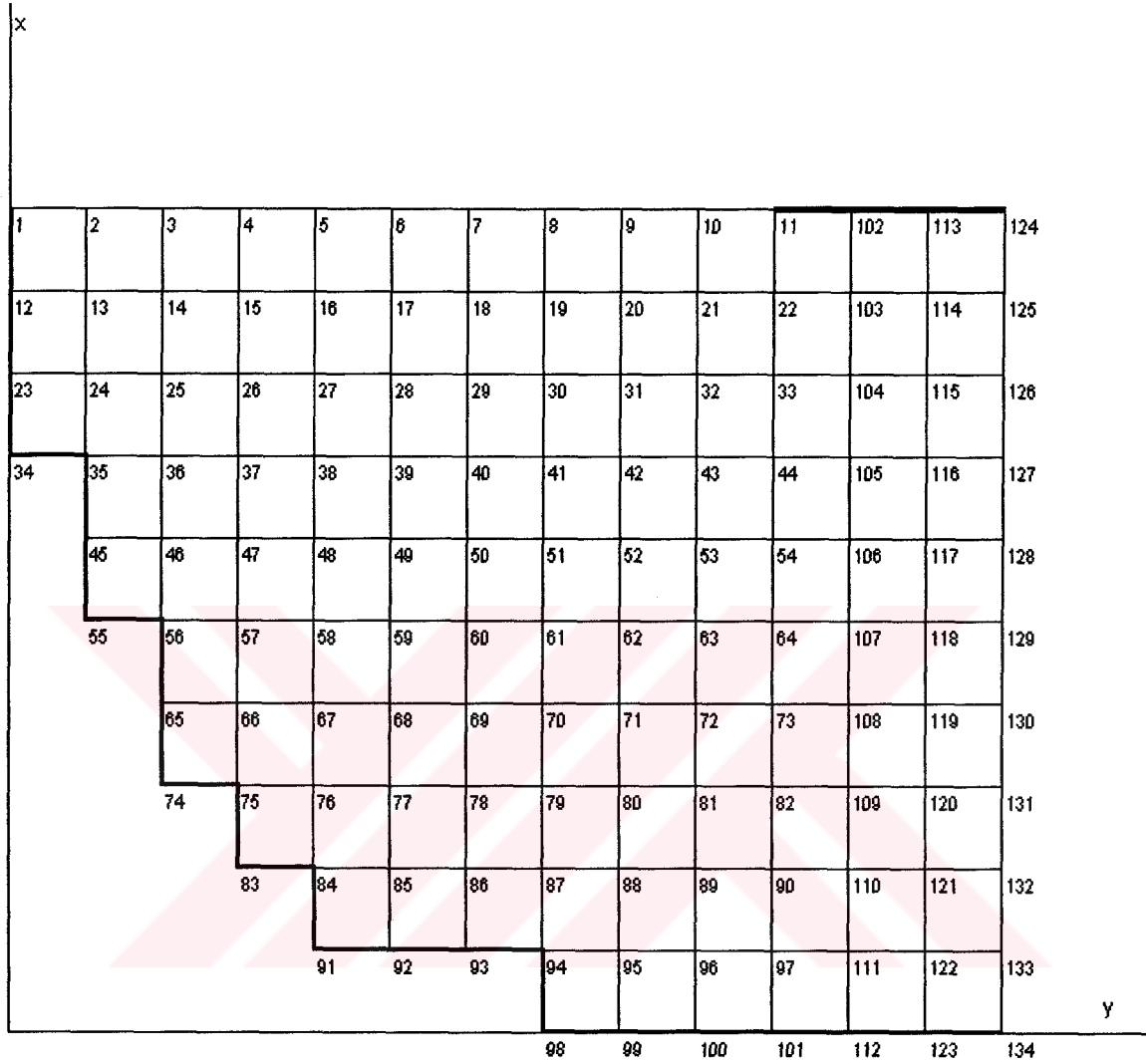
4.2.5 MODEL-3 (6 metre Derinliğe Gömülmüş 6 metrelik Çubuk Topraklayıcı)

Model-3 olarak kurulan 6 metrelik tek elektrotlu sistem Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sistem 110 karesel göz ve 134 düğümden meydana gelmiştir. 6 metrelik çubuk elektrot üzerindeki ve elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel değeri, elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir. Hesaplamalarda çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki bütün noktalarda ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.12 6 metre derinliğe gömülmüş 6 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.

Hesaplamalarda kullanılan denklemlerin yazılması için silindirselsel koordinatlarda sisteme bakış yönü ve sistemdeki düğümlerin numaraları Şekil 4.13’de verildiği gibi düşünülmüştür.



Şekil 4.13 Silindirselsel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.

Şekil 4.13’de verilen model üzerindeki düğümlerden 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132 ve 133 nolu düğümlerin sonlu fark denklemleri (5.16) ifadesinden yararlanılarak yazılacaktır.

Model-3 için yani 6 metre Derinliğe Gömülmüş 6 metrelik Çubuk Topraklayıcı kullanılması durumu için Şekil 4.13’de verilen düğüm numaralarına göre oluşturulan sonlu fark denklemleri Ek 3’te verilmiştir.

Çözüm sonucu elde edilen, potansiyel değeri bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri Şekil 4.14’te verilmektedir. Denklem takımının çözülmesi sonrası elde edilen bilinmeyen

düğümlere ait potansiyel değerleri aşağıda verilmiştir.

V 2 = 15,4535 Volt	V 52 = 40,1876 Volt	V 114 = 86,1388 Volt
V 3 = 22,079 Volt	V 53 = 44,1262 Volt	V 115 = 73,3067 Volt
V 4 = 27,6637 Volt	V 54 = 47,4107 Volt	V 116 = 61,6693 Volt
V 5 = 33,1837 Volt	V 57 = 10,064 Volt	V 117 = 51,0791 Volt
V 6 = 38,9914 Volt	V 58 = 16,2981 Volt	V 118 = 41,3352 Volt
V 7 = 45,4215 Volt	V 59 = 21,1891 Volt	V 119 = 32,2598 Volt
V 8 = 52,9578 Volt	V 60 = 25,4242 Volt	V 120 = 23,7085 Volt
V 9 = 62,4494 Volt	V 61 = 29,2809 Volt	V 121 = 15,5608 Volt
V 10 = 75,9832 Volt	V 62 = 32,8134 Volt	V 122 = 7,7015 Volt
V 13 = 14,3477 Volt	V 63 = 35,9225 Volt	V 125 = 86,526 Volt
V 14 = 21,0732 Volt	V 64 = 38,4548 Volt	V 126 = 73,8264 Volt
V 15 = 26,7821 Volt	V 66 = 5,7392 Volt	V 127 = 62,1662 Volt
V 16 = 32,3318 Volt	V 67 = 11,0573 Volt	V 128 = 51,4996 Volt
V 17 = 38,0684 Volt	V 68 = 15,4858 Volt	V 129 = 41,6741 Volt
V 18 = 44,2966 Volt	V 69 = 19,2 Volt	V 130 = 32,5263 Volt
V 19 = 51,3745 Volt	V 70 = 22,4805 Volt	V 131 = 23,9114 Volt
V 20 = 59,7088 Volt	V 71 = 25,4474 Volt	V 132 = 15,7023 Volt
V 21 = 69,7002 Volt	V 72 = 27,9858 Volt	V 133 = 7,7764 Volt
V 22 = 80,7114 Volt	V 73 = 29,9975 Volt	
V 24 = 10,3277 Volt	V 76 = 5,4876 Volt	
V 25 = 17,9753 Volt	V 77 = 9,6828 Volt	
V 26 = 24,2054 Volt	V 78 = 12,8352 Volt	
V 27 = 29,8824 Volt	V 79 = 15,5494 Volt	
V 28 = 35,4573 Volt	V 80 = 18,1659 Volt	
V 29 = 41,2327 Volt	V 81 = 20,3257 Volt	
V 30 = 47,4387 Volt	V 82 = 21,9532 Volt	
V 31 = 54,1658 Volt	V 85 = 4,1877 Volt	
V 32 = 61,2379 Volt	V 86 = 6,4256 Volt	
V 33 = 67,7501 Volt	V 87 = 8,3367 Volt	
V 36 = 12,8255 Volt	V 88 = 11,0427 Volt	
V 37 = 20,2179 Volt	V 89 = 12,9895 Volt	
V 38 = 26,1285 Volt	V 90 = 14,2846 Volt	
V 39 = 31,5106 Volt	V 95 = 4,3879 Volt	
V 40 = 36,7582 Volt	V 96 = 6,1261 Volt	
V 41 = 42,0624 Volt	V 97 = 6,9833 Volt	
V 42 = 47,4152 Volt	V 103 = 84,6478 Volt	
V 43 = 52,5872 Volt	V 104 = 71,4982 Volt	
V 44 = 57,0399 Volt	V 105 = 60,039 Volt	
V 46 = 8,0542 Volt	V 106 = 49,7411 Volt	
V 47 = 15,5131 Volt	V 107 = 40,2711 Volt	
V 48 = 21,4914 Volt	V 108 = 31,4244 Volt	
V 49 = 26,6355 Volt	V 109 = 23,0679 Volt	
V 50 = 31,3637 Volt	V 110 = 15,1066 Volt	
V 51 = 35,8804 Volt	V 111 = 7,4559 Volt	

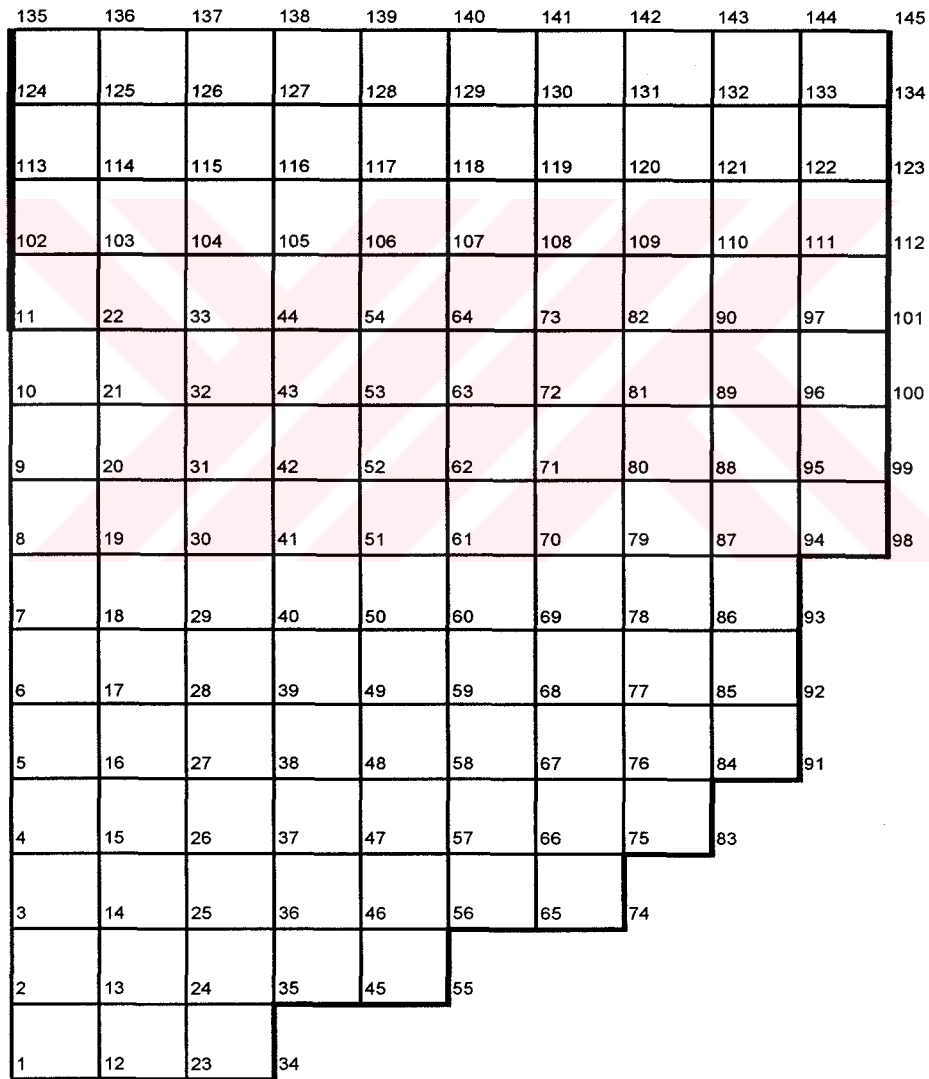
Model-3 için kurulan denklem takımının çözümü sonrası elde edilen bütün potansiyel değerlerinin Model üzerinde gösterimi Şekil 4.14'te verilmiştir.

100	86,526	73,8264	62,1662	51,4996	41,6741	32,5263	23,9114	15,7023	7,7764	0
100	86,1388	73,3067	61,6693	51,0791	41,3352	32,2598	23,7085	15,5608	7,7015	0
100	84,6478	71,4982	60,039	49,7411	40,2711	31,4244	23,0679	15,1066	7,4559	0
100	80,7114	67,7501	57,0399	47,4107	38,4548	29,9975	21,9532	14,2846	6,9833	0
75,9832	69,7002	61,2379	52,5872	44,1262	35,9225	27,9858	20,3257	12,9895	6,1261	0
62,4494	59,7088	54,1658	47,4152	40,1876	32,8134	25,4474	18,1659	11,0427	4,3879	0
52,9578	51,3745	47,4387	42,0624	35,8804	29,2809	22,4805	15,5494	8,3367	0	0
45,4215	44,2966	41,2327	36,7582	31,3637	25,4242	19,2	12,8352	6,4256	0	
38,9914	38,0684	35,4573	31,5106	26,6355	21,1891	15,4858	9,6828	4,1877	0	
33,1837	32,3318	29,8824	26,1285	21,4914	16,2981	11,0573	5,4876	0	0	
27,6637	26,7821	24,2054	20,2179	15,5131	10,064	5,7392	0	0	0	
22,079	21,0732	17,9753	12,8255	8,0542	0	0	0	0	0	
15,4535	14,3477	10,3277	0	0	0					
0	0	0	0							

Şekil 4.14 Çubuk elektrotun 6 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri

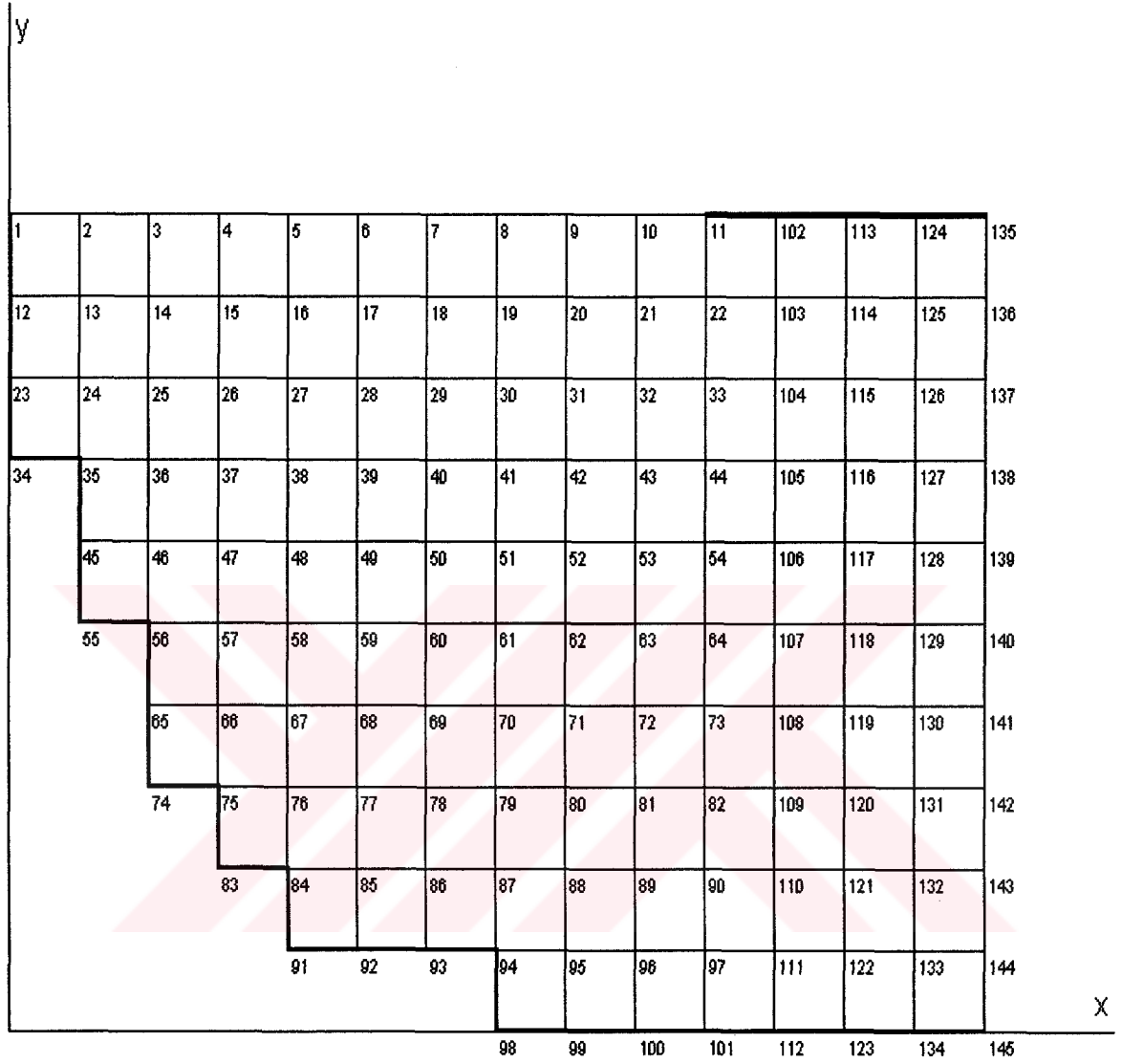
4.2.6 MODEL-4 (8 metre Derinliğe Gömülmüş 8 metrelik Çubuk Topraklayıcı)

Model-4 olarak kurulan 8 metrelik tek elektrotlu sistem Şekil 4.15’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sistem 120 karesel göz ve 145 düğümden meydana gelmiştir. 8 metrelik çubuk elektrot üzerindeki ve elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel değeri, elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir. Hesaplamalarda çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki bütün noktalarda ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 4.15 8 metre derinliğe gömülmüş 8 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.

Hesaplamalarda kullanılan denklemlerin yazılması için silindrisel koordinatlarda sisteme bakış yönü ve sistemdeki düğümlerin numaraları Şekil 4.16’da verildiği gibi düşünülmüştür.



Şekil 4.16 Silindrisel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.

Şekil 4.16’da verilen model üzerindeki düğümlerden 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143 ve 144 nolu düğümlerin sonlu fark denklemleri (5.16) ifadesinden yararlanılarak yazılacaktır.

Model-4 için yani 8 metre Derinliğe Gömülmüş 8 metrelik Çubuk Topraklayıcı kullanılması durumu için Şekil 4.16’da verilen düğüm numaralarına göre oluşturulan sonlu fark denklemleri Ek 3’te verilmiştir.

Çözüm sonucu elde edilen, potansiyel değeri bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri

Şekil 4.17’de verilmektedir. Denklem takımının çözülmesi sonrası elde edilen bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri aşağıda verilmiştir.

V 2 = 15,6409 Volt	V 52 = 40,8999 Volt	V 114 = 86,8689 Volt
V 3 = 22,3455 Volt	V 53 = 44,9968 Volt	V 115 = 74,6083 Volt
V 4 = 27,9935 Volt	V 54 = 48,4946 Volt	V 116 = 63,3196 Volt
V 5 = 33,5703 Volt	V 57 = 10,2165 Volt	V 117 = 52,8614 Volt
V 6 = 39,4281 Volt	V 58 = 16,5544 Volt	V 118 = 43,0685 Volt
V 7 = 45,898 Volt	V 59 = 21,5385 Volt	V 119 = 33,8033 Volt
V 8 = 53,4552 Volt	V 60 = 25,8697 Volt	V 120 = 24,9564 Volt
V 9 = 62,928 Volt	V 61 = 29,8358 Volt	V 121 = 16,4361 Volt
V 10 = 76,3499 Volt	V 62 = 33,5012 Volt	V 122 = 8,1524 Volt
V 13 = 14,5228 Volt	V 63 = 36,7783 Volt	V 125 = 87,5792 Volt
V 14 = 21,3297 Volt	V 64 = 39,5285 Volt	V 126 = 75,6414 Volt
V 15 = 27,1053 Volt	V 66 = 5,8321 Volt	V 127 = 64,3876 Volt
V 16 = 32,7151 Volt	V 67 = 11,2453 Volt	V 128 = 53,8273 Volt
V 17 = 38,5057 Volt	V 68 = 15,7654 Volt	V 129 = 43,8862 Volt
V 18 = 44,7801 Volt	V 69 = 19,5733 Volt	V 130 = 34,4655 Volt
V 19 = 51,8917 Volt	V 70 = 22,9604 Volt	V 131 = 25,4652 Volt
V 20 = 60,238 Volt	V 71 = 26,0571 Volt	V 132 = 16,7882 Volt
V 21 = 70,2077 Volt	V 72 = 28,7554 Volt	V 133 = 8,3355 Volt
V 22 = 81,1695 Volt	V 73 = 30,9677 Volt	V 136 = 87,7752 Volt
V 24 = 10,4556 Volt	V 76 = 5,5877 Volt	V 137 = 75,9423 Volt
V 25 = 18,1996 Volt	V 77 = 9,8717 Volt	V 138 = 64,7112 Volt
V 26 = 24,5079 Volt	V 78 = 13,1068 Volt	V 139 = 54,1274 Volt
V 27 = 30,2539 Volt	V 79 = 15,9144 Volt	V 140 = 44,1437 Volt
V 28 = 35,893 Volt	V 80 = 18,6491 Volt	V 141 = 34,6752 Volt
V 29 = 41,7294 Volt	V 81 = 20,9486 Volt	V 142 = 25,6261 Volt
V 30 = 47,9942 Volt	V 82 = 22,7439 Volt	V 143 = 16,8987 Volt
V 31 = 54,7799 Volt	V 85 = 4,2748 Volt	V 144 = 8,3924 Volt
V 32 = 61,9178 Volt	V 86 = 6,5704 Volt	
V 33 = 68,5292 Volt	V 87 = 8,5469 Volt	
V 36 = 12,9923 Volt	V 88 = 11,3616 Volt	
V 37 = 20,4844 Volt	V 89 = 13,4208 Volt	
V 38 = 26,4768 Volt	V 90 = 14,8397 Volt	
V 39 = 31,9353 Volt	V 95 = 4,5248 Volt	
V 40 = 37,2601 Volt	V 96 = 6,3413 Volt	
V 41 = 42,6483 Volt	V 97 = 7,2679 Volt	
V 42 = 48,0992 Volt	V 103 = 85,1919 Volt	
V 43 = 53,3969 Volt	V 104 = 72,4742 Volt	
V 44 = 58,0275 Volt	V 105 = 61,2946 Volt	
V 46 = 8,1641 Volt	V 106 = 51,1194 Volt	
V 47 = 15,7313 Volt	V 107 = 41,6309 Volt	
V 48 = 21,802 Volt	V 108 = 32,6482 Volt	
V 49 = 27,033 Volt	V 109 = 24,0638 Volt	
V 50 = 31,8512 Volt	V 110 = 15,807 Volt	
V 51 = 36,4695 Volt	V 111 = 7,8168 Volt	

Model-4 için kurulan denklem takımının çözümü sonrası elde edilen bütün potansiyel değerlerinin Model üzerinde gösterimi Şekil 4.17’de verilmiştir.

100	87,7752	75,9423	64,7112	54,1274	44,1437	34,6752	25,6261	16,8987	8,3924	0
100	87,5792	75,6414	64,3876	53,8273	43,8862	34,4655	25,4652	16,7882	8,3355	0
100	86,8689	74,6083	63,3196	52,8614	43,0685	33,8033	24,9564	16,4361	8,1524	0
100	85,1919	72,4742	61,2946	51,1194	41,6309	32,6482	24,0638	15,807	7,8168	0
100	81,1695	68,5292	58,0275	48,4946	39,5285	30,9677	22,7439	14,8397	7,2679	0
76,3499	70,2077	61,9178	53,3969	44,9968	36,7783	28,7554	20,9486	13,4208	6,3413	0
62,928	60,238	54,7799	48,0992	40,8999	33,5012	26,0571	18,6491	11,3616	4,5248	0
53,4552	51,8917	47,9942	42,6483	36,4695	29,8358	22,9604	15,9144	8,5469	0	0
45,898	44,7801	41,7294	37,2601	31,8512	25,8697	19,5733	13,1068	6,5704	0	
39,4281	38,5057	35,893	31,9353	27,033	21,5385	15,7654	9,8717	4,2748	0	
33,5703	32,7151	30,2539	26,4768	21,802	16,5544	11,2453	5,5877	0	0	
27,9935	27,1053	24,5079	20,4844	15,7313	10,2165	5,8321	0	0		
22,3455	21,3297	18,1996	12,9923	8,1641	0	0	0			
15,6409	14,5228	10,4556	0	0						
0	0	0	0							

Şekil 4.17 Çubuk elektrotun 8 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri

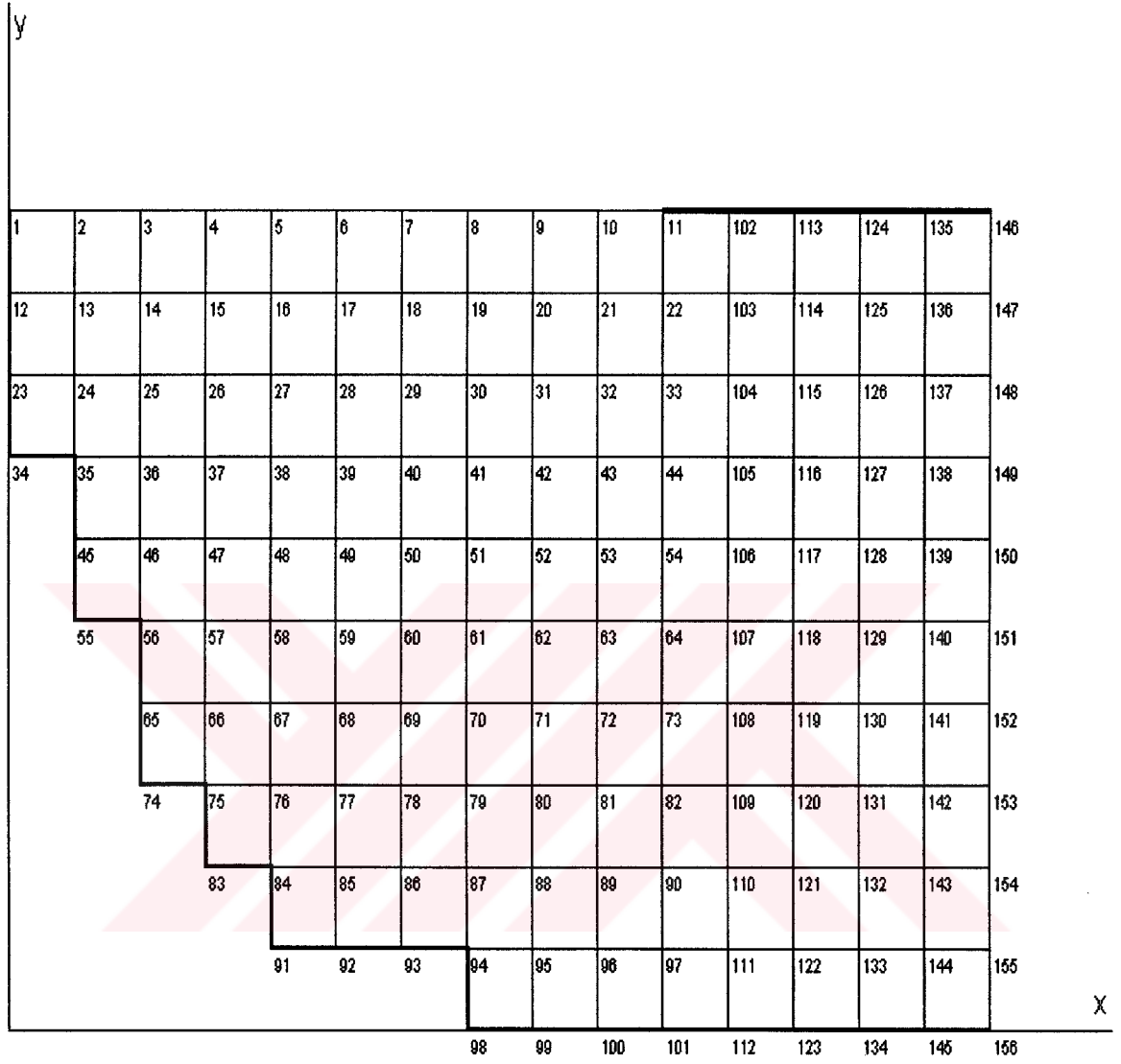
4.2.7 MODEL-5 (10 metre Derinliğe Gömülmüş 10 metrelik Çubuk Topraklayıcı)

Model-5 olarak kurulan 10 metrelik tek elektrotlu sistem Şekil 4.18’de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi sistem 130 karesel göz ve 156 düğümden meydana gelmiştir. 10 metrelik çubuk elektrot üzerindeki ve elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel değeri, elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir. Hesaplamalarda çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki bütün noktalarda ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilmiştir.

146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156
135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145
124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134
113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123
102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112
11	22	33	44	54	64	73	82	90	97	101
10	21	32	43	53	63	72	81	89	96	100
9	20	31	42	52	62	71	80	88	95	99
8	19	30	41	51	61	70	79	87	94	98
7	18	29	40	50	60	69	78	86		93
6	17	28	39	49	59	68	77	85		92
5	16	27	38	48	58	67	76	84		91
4	15	26	37	47	57	66	75	83		
3	14	25	36	46	56	65	74			
2	13	24	35	45	55					
1	12	23	34							

Şekil 4.18 10 metre derinliğe gömülmüş 10 metrelik çubuk topraklayıcı kullanılması halinde elektrot çevresindeki potansiyel dağılımını hesaplamak için kurulan model.

Hesaplamalarda kullanılan denklemlerin yazılması için silindrisel koordinatlarda sisteme bakış yönü ve sistemdeki düğümlerin numaraları Şekil 4.19’da verildiği gibi düşünülmüştür.



Şekil 4.19 Silindrisel koordinatlarda sonlu fark denklemlerinin yazılması için kurulan modelin iki boyutlu koordinat düzleminde gösterilmesi ve düğümlerin numaralandırılması.

Şekil 4.19’da verilen model üzerindeki düğümlerden 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154 ve 155 nolu düğümlerin sonlu fark denklemleri (5.16) ifadesinden yararlanılarak yazılacaktır.

Model-5 için yani 10 metre Derinliğe Gömülmüş 10 metrelik Çubuk Topraklayıcı kullanılması durumu için Şekil 4.19’da verilen düğüm numaralarına göre oluşturulan sonlu fark denklemleri Ek 3’te verilmiştir.

Çözüm sonucu elde edilen, potansiyel değeri bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri

Şekil 4.20’de verilmektedir. Denklem takımının çözülmesi sonrası elde edilen bilinmeyen düğümlere ait potansiyel değerleri aşağıda verilmiştir.

V 2 = 15,7362 Volt	V 52 = 41,2651 Volt	V 114 = 87,2016 Volt
V 3 = 22,4809 Volt	V 53 = 45,4429 Volt	V 115 = 75,2218 Volt
V 4 = 28,161 Volt	V 54 = 49,0493 Volt	V 116 = 64,1295 Volt
V 5 = 33,7664 Volt	V 57 = 10,2947 Volt	V 117 = 53,7709 Volt
V 6 = 39,6494 Volt	V 58 = 16,6861 Volt	V 118 = 43,983 Volt
V 7 = 46,139 Volt	V 59 = 21,7183 Volt	V 119 = 34,6389 Volt
V 8 = 53,706 Volt	V 60 = 26,0994 Volt	V 120 = 25,6444 Volt
V 9 = 63,1683 Volt	V 61 = 30,1225 Volt	V 121 = 16,924 Volt
V 10 = 76,5331 Volt	V 62 = 33,8575 Volt	V 122 = 8,4052 Volt
V 13 = 14,6117 Volt	V 63 = 37,2227 Volt	V 125 = 88,0299 Volt
V 14 = 21,4601 Volt	V 64 = 40,0881 Volt	V 126 = 76,4652 Volt
V 15 = 27,2695 Volt	V 66 = 5,88 Volt	V 127 = 65,4613 Volt
V 16 = 32,9096 Volt	V 67 = 11,3423 Volt	V 128 = 55,0165 Volt
V 17 = 38,7274 Volt	V 68 = 15,9099 Volt	V 129 = 45,0673 Volt
V 18 = 45,0248 Volt	V 69 = 19,7669 Volt	V 130 = 35,5343 Volt
V 19 = 52,1527 Volt	V 70 = 23,2102 Volt	V 131 = 26,339 Volt
V 20 = 60,5038 Volt	V 71 = 26,3759 Volt	V 132 = 17,4053 Volt
V 21 = 70,4605 Volt	V 72 = 29,1601 Volt	V 133 = 8,6545 Volt
V 22 = 81,3937 Volt	V 73 = 31,4814 Volt	V 136 = 88,4099 Volt
V 24 = 10,5206 Volt	V 76 = 5,6396 Volt	V 137 = 77,0795 Volt
V 25 = 18,3138 Volt	V 77 = 9,9697 Volt	V 138 = 66,1584 Volt
V 26 = 24,6618 Volt	V 78 = 13,2484 Volt	V 139 = 55,6949 Volt
V 27 = 30,4429 Volt	V 79 = 16,1056 Volt	V 140 = 45,672 Volt
V 28 = 36,1144 Volt	V 80 = 18,9038 Volt	V 141 = 36,0394 Volt
V 29 = 41,9814 Volt	V 81 = 21,2796 Volt	V 142 = 26,7314 Volt
V 30 = 48,2755 Volt	V 82 = 23,1679 Volt	V 143 = 17,6755 Volt
V 31 = 55,0895 Volt	V 85 = 4,3201 Volt	V 144 = 8,7931 Volt
V 32 = 62,2581 Volt	V 86 = 6,6461 Volt	V 147 = 88,5206 Volt
V 33 = 68,9143 Volt	V 87 = 8,6577 Volt	V 148 = 77,2627 Volt
V 36 = 13,0773 Volt	V 88 = 11,5308 Volt	V 149 = 66,3714 Volt
V 37 = 20,6202 Volt	V 89 = 13,6517 Volt	V 150 = 55,9059 Volt
V 38 = 26,6544 Volt	V 90 = 15,1401 Volt	V 151 = 45,8623 Volt
V 39 = 32,1518 Volt	V 95 = 4,5979 Volt	V 152 = 36,1992 Volt
V 40 = 37,516 Volt	V 96 = 6,4572 Volt	V 153 = 26,8557 Volt
V 41 = 42,9466 Volt	V 97 = 7,4228 Volt	V 154 = 17,7609 Volt
V 42 = 48,4466 Volt	V 103 = 85,4506 Volt	V 155 = 8,8368 Volt
V 43 = 53,8064 Volt	V 104 = 72,9472 Volt	
V 44 = 58,5236 Volt	V 105 = 61,919 Volt	
V 46 = 8,2202 Volt	V 106 = 51,8236 Volt	
V 47 = 15,8428 Volt	V 107 = 42,343 Volt	
V 48 = 21,961 Volt	V 108 = 33,3024 Volt	
V 49 = 27,2365 Volt	V 109 = 24,6043 Volt	
V 50 = 32,101 Volt	V 110 = 16,1911 Volt	
V 51 = 36,7716 Volt	V 111 = 8,0158 Volt	

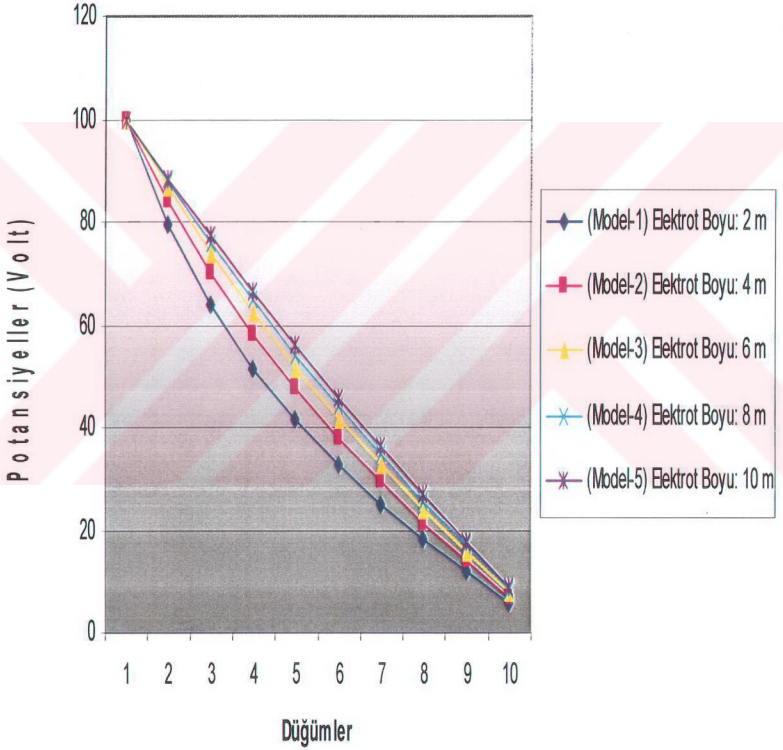
Model-5 için kurulan denklem takımının çözümü sonrası elde edilen bütün potansiyel değerlerinin Model üzerinde gösterimi Şekil 4.20’de verilmiştir.

100	88,5206	77,2627	66,3714	55,9059	45,8623	36,1992	26,8557	17,7609	8,8368	0
100	88,4099	77,0795	66,1584	55,6949	45,672	36,0394	26,7314	17,6755	8,7931	0
100	88,0299	76,4652	65,4613	55,0165	45,0673	35,5343	26,339	17,4053	8,6545	0
100	87,2016	75,2218	64,1295	53,7709	43,983	34,6389	25,6444	16,924	8,4052	0
100	85,4506	72,9472	61,919	51,8236	42,343	33,3024	24,6043	16,1911	8,0158	0
100	81,3937	68,9143	58,5236	49,0493	40,0881	31,4814	23,1679	15,1401	7,4228	0
76,5331	70,4605	62,2581	53,8064	45,4429	37,2227	29,1601	21,2796	13,6517	6,4572	0
63,1683	60,5038	55,0895	48,4466	41,2651	33,8575	26,3759	18,9038	11,5308	4,5979	0
53,706	52,1527	48,2755	42,9466	36,7716	30,1225	23,2102	16,1056	8,6577	0	0
46,139	45,0248	41,9814	37,516	32,101	26,0994	19,7669	13,2484	6,6461	0	
39,6494	38,7274	36,1144	32,1518	27,2365	21,7183	15,9099	9,9697	4,3201	0	
33,7664	32,9096	30,4429	26,6544	21,961	16,6861	11,3423	5,6396	0	0	
28,161	27,2695	24,6618	20,6202	15,8428	10,2947	5,88	0	0		
22,4809	21,4601	18,3138	13,0773	8,2202	0	0	0			
15,7362	14,6117	10,5206	0	0						
0	0	0	0							

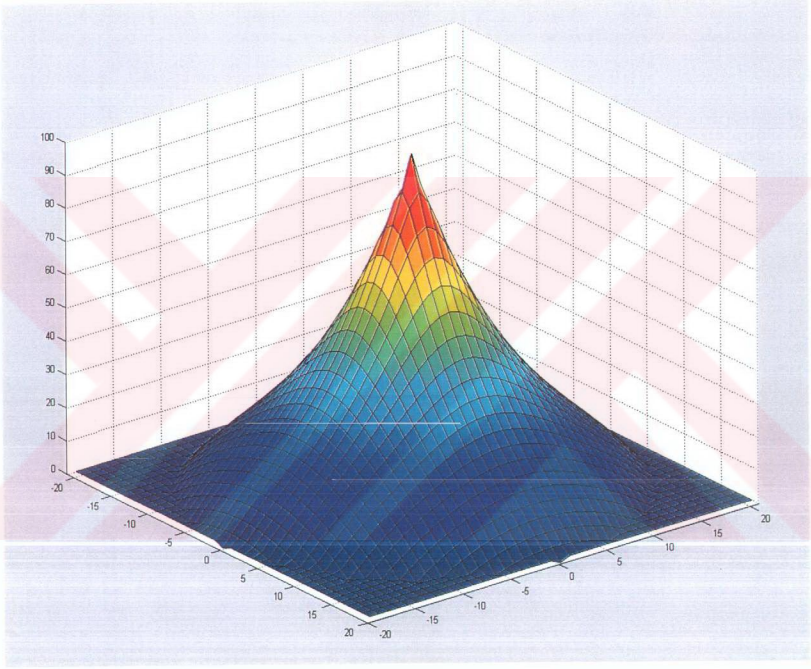
Şekil 4.20 Çubuk elektrotun 10 m derinlikte olması halinde düğümlerin SFY ile bulunan Volt cinsinden potansiyel değerleri

4.2.8 Sayısal Uygulama Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bütün modeller için elde edilen potansiyel değerleri ile çizilecek toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı, adım ve dokunma gerilimlerinin hesaplanması açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 4.21'de bütün modellerin, yapılan sonlu fark yöntemi çözümlemesi ile elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları gösterilmiştir. Şekil 4.22'de ise bir çubuk topraklayıcının etrafındaki potansiyel dağılımının aşında ne şekilde olduğu üç boyutlu olarak gösterilmiştir.

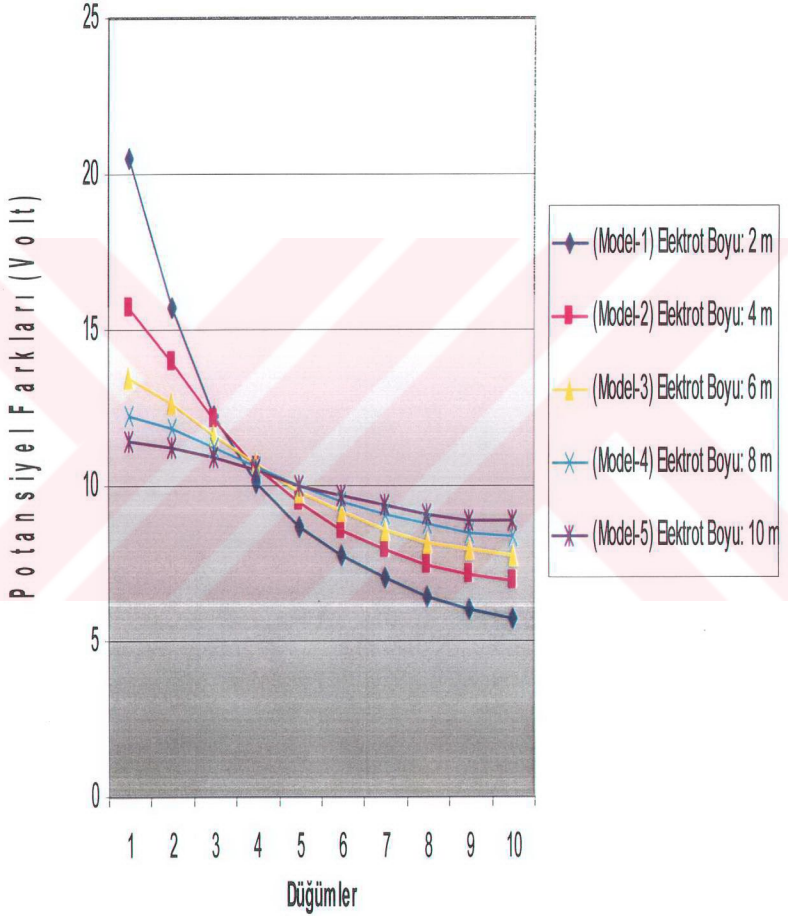


Şekil 4.21 Sayısal uygulama için kurulan, bütün modellerin, yapılan sonlu fark yöntemi çözümlemesi ile elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları



Şekil 4.22 Bir çubuk topraklayıcı etrafında ve toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımının 3 boyutlu olarak gösterimi

Bütün modellerin, yapılan sonlu fark yöntemi çözümlemesi ile elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımlarının ardından bu potansiyel değerleri arasındaki farklar hesaplanmış ve Şekil 4.23'te görüldüğü gibi toprak yüzeyindeki potansiyel farkları dağılımları gösterilmiştir.



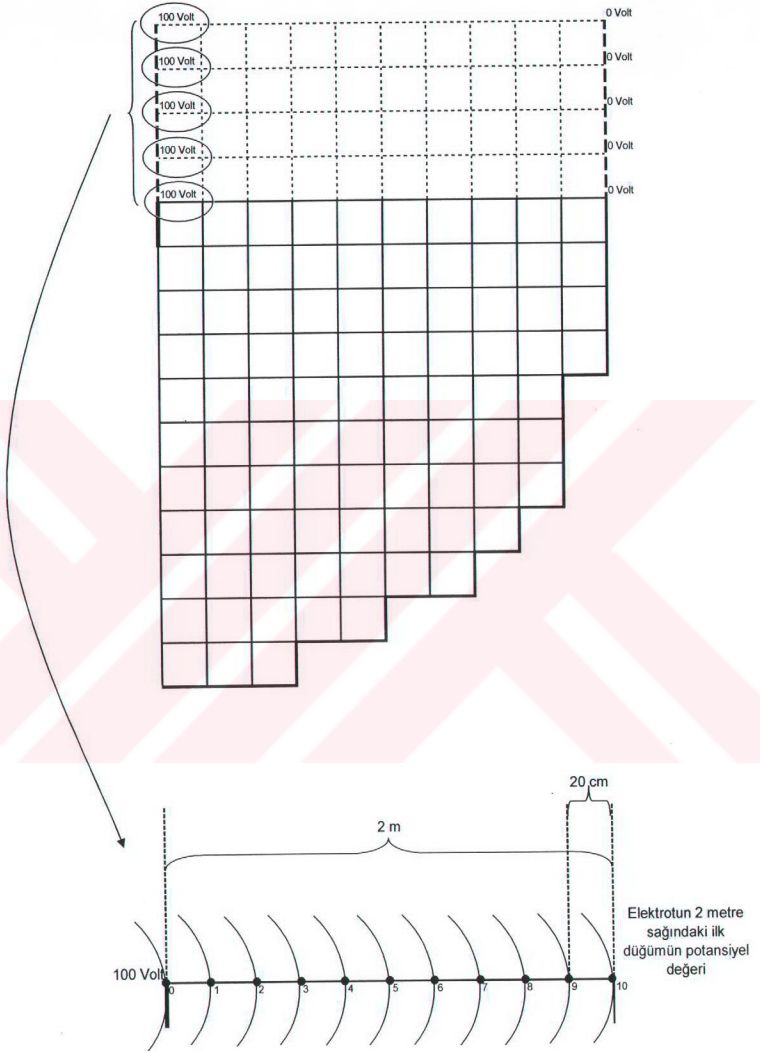
Şekil 4.23 Sayısal uygulama için kurulan, bütün modellerin, yapılan sonlu fark yöntemi çözümlemesi ile elde edilen toprak yüzeyindeki potansiyel farkları dağılımları

4.2.9 Toprak Yüzeyinde Topraklama Elektrotu ile Elektrotla En Yakın İlk Düğüm Arasındaki Potansiyel Dağılımının Hesaplanması

Bir topraklayıcıdan bir akım geçtiğinde, topraklayıcıda referans toprağa göre bir gerilim oluştuğu ve topraklayıcı ile referans toprak arasında Şekil 4.1’de görüldüğü gibi bir potansiyel dağılımı ortaya çıktığı deneysel ve teorik olarak bilinen bir gerçektir. Burada sözü edilen referans toprak kavramı, topraklayıcı çevresinde oluşan bir potansiyel dağılımında potansiyelin teorik olarak sıfır kabul edildiği toprak bölümüdür. Uygulamada bir topraklayıcıdan yaklaşık 20 m uzaklıktaki toprak bölümü referans toprak olarak kabul edilir.

Ancak bu potansiyel dağılımı eğrisi incelenirse eğrisel olarak azalan bu dağılımda en fazla azalmanın toprak yüzeyindeki elektrot düğümü ile, bu düğüme en yakın ilk düğümde, yani başka bir deyişle ilk 2 metrelik mesafede gerçekleştiği görülecektir. Tez çalışması için kurulan modellerin tümünde, hesaplamalar gerçekleştirildikten sonra; modelde yer alan bütün düğümler için sonuç değerler (Şekil 4.8, Şekil 4.11, Şekil 4.14, Şekil 4.17 ve Şekil 4.20’de görüldüğü gibi) verilmiştir. Bu alt bölümde ise, bu hesaplamalara ek olarak, bütün modellerin toprak yüzeyinde yer alan elektrot düğümü ile, bu düğümden 2 metre sonraki ilk düğümleri arasındaki potansiyel dağılımları hesaplanmış ve bir grafik olarak verilmiştir. Burada, potansiyel dağılımı eğrisindeki en büyük azalmanın olduğu ilk 2 metrelik kısımdaki potansiyel eğrilerini göz önüne sermek amaçlanmıştır.

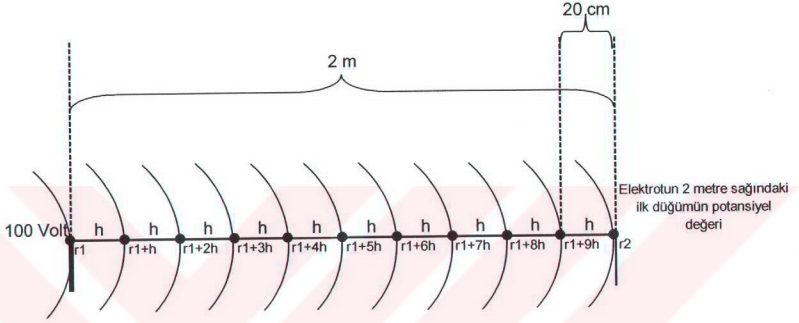
Hesaplamalar için yine Sonlu Farklar Yöntemi kullanılmıştır. Bu hesaplamalarda bir boyutlu eşeksenli silindirel elektrot sistemlerinde kullanılan çözüm yönteminden yararlanılmıştır. Hesaplamalarda modellerin çözümü sonunda elde edilen ve Şekil 4.8, Şekil 4.11, Şekil 4.14, Şekil 4.17 ve Şekil 4.20’de verilen potansiyel değerlerinden yararlanılmıştır. Çözüm için bütün modellerde aynı yöntem izlenmiştir. Modellerin hepsi için modellerde yer alan elektrotun toprak yüzeyindeki düğümündeki potansiyel değeri 100 Volt’tur. Burada önemli olan bu düğüme en yakın olan ve toprak yüzeyinde bulunan ilk düğümdeki potansiyel değeridir. Bu değerler her düğüm için daha önceki çözüm safhalarında verilmiştir. Söz konusu bu iki düğüm arasındaki 2 metrelik mesafe 20 cm’lik 10 ayrı parçaya bölünmüş ve 10 ayrı denklem takımı oluşturulmuştur. Oluşturulan bu denklem takımlarının çözümlenebilmesi için daha önceki çözümlerde olduğu gibi MATLAB 6.0 programı kullanılmıştır. Şekil 4.21’de toprak yüzeyindeki elektrot ile elektrotun sağındaki ilk düğüm arasındaki potansiyel dağılımını hesaplamak için kullanılan model görülmektedir.



Şekil 4.24 Çubuk elektrot ile çubuk elektrotun sağında yer alan ilk düğüm arasındaki potansiyel dağılımını hesaplamak için kullanılan model

4.2.10 Potansiyel Dağılımı Hesapları İçin Sonlu Fark Denklemlerinin Yazılması

Modellerin toprak yüzeyinde yer alan ve Şekil 4.23'te gösterildiği gibi topraklama elektrotunun toprak yüzeyindeki düğümü ile bu düğümüne en yakın olan ve toprak yüzeyinde bulunan, ilk düğüm arasındaki 2 metrelik mesafe 20 cm'lik 10 ayrı parçaya bölünmüştür. Elde edilen ve Şekil 4.24'te gösterilen modelde eşksenli silindirsiz elektrot sistemi için yazılacak sonlu farklar denklemlerinde (5.17) ifadesi kullanılmıştır.



Şekil 4.25 Çubuk elektrot ile çubuk elektrotun sağında yer alan ilk düğüm arasındaki potansiyel dağılımını hesaplamak için sonlu farklar denklemlerini yazmak için kullanılan eşksenli silindirsiz model

$$V(r+h) - 2V(r) + V(r-h) + \frac{h}{2r} [V(r+h) - V(r-h)] = 0 \quad (4.14)$$

Sayısal uygulamada kurulan bütün modeller için (Model-1, Model-2, Model-3, Model-4 ve Model-5) denklemler aynı olacaktır. Ancak denklemlerde, eşitliğin sağ tarafında yer alan potansiyel değerlerinden “ r_1+9h düğümü için” yazılan ifade, düğümün potansiyel değeri, her model için farklılık göstereceğinden farklı olacaktır.

Denklemler yazılırken;

$$r_1 = 20 \text{ cm}$$

$$h = 20 \text{ cm}$$

$$r_2 = 2 \text{ m}$$

olacaktır.

Bu durumda sonlu farklar denklemleri;

r_1+h düğümü için;

$$-2V_1 + 1,5V_2 = -50 \text{ Volt}$$

r_1+2h düğümü için;

$$0,75V_1 - 2V_2 + 1,25V_3 = 0$$

r_1+3h düğümü için;

$$0,8333V_2 - 2V_3 + 1,666V_4 = 0$$

r_1+4h düğümü için;

$$0,875V_3 - 2V_4 + 1,125V_5 = 0$$

r_1+5h düğümü için;

$$0,9V_4 - 2V_5 + 1,1V_6 = 0$$

r_1+6h düğümü için;

$$0,9166V_5 - 2V_6 + 1,083V_7 = 0$$

r_1+7h düğümü için;

$$0,9285V_6 - 2V_7 + 1,0714V_8 = 0$$

r_1+8h düğümü için;

$$0,9375V_7 - 2V_8 + 1,0625V_9 = 0$$

r_1+9h düğümü için;

$$0,9444V_8 - 2V_9 = Vr_2$$

olacaktır. Vr_2 değeri her model için farklı bir değer olacaktır.

Model-1 için Vr_2 değeri: -83,8953 Volt

Model-2 için Vr_2 değeri: -88,9324 Volt

Model-3 için Vr_2 değeri: -91,3282 Volt

Model-4 için Vr_2 değeri: -92,6467 Volt

Model-5 için V_{r2} değeri: -93,4334 Volt

olacaktır.

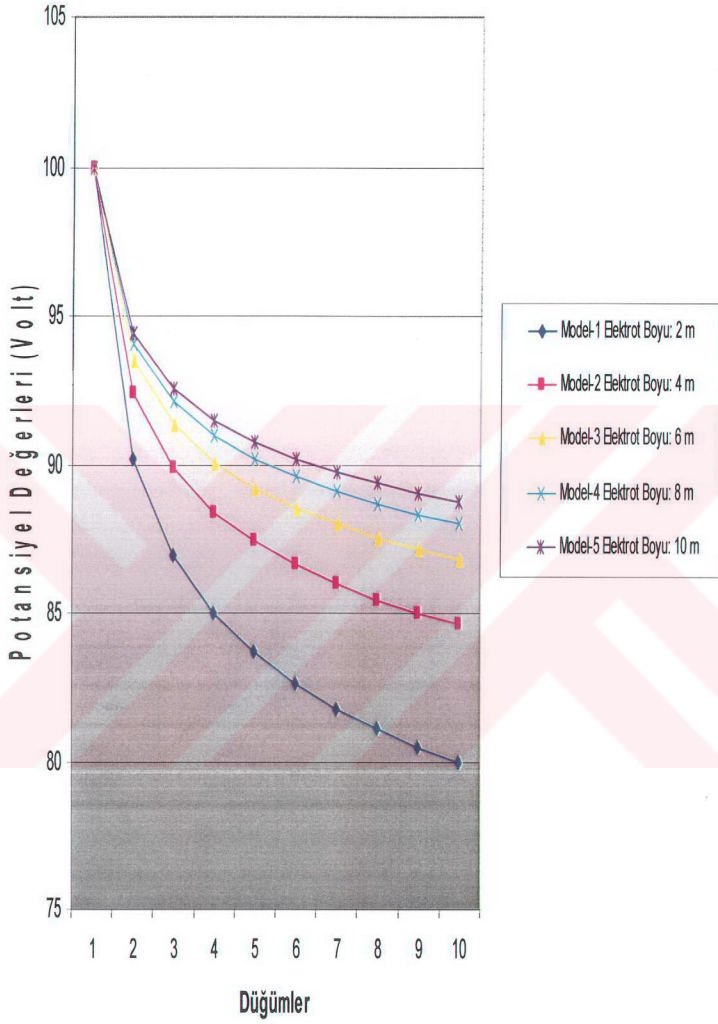
Denklem takımları her bir model için ayrı ayrı çözümlerse potansiyel değerleri Çizelge 4.1’de gösterildiği gibi olacaktır.

Çizelge 4.1 Bütün modellerin, çubuk elektrot ile çubuk elektrota 2 metre mesafedeki ilk düğümleri arasındaki potansiyel değerlerinin 20 cm aralıklı olarak değişimleri

	Potansiyel Değerleri (Volt)				
	Model-1 Elektrot Boyu: 2 m	Model-2 Elektrot Boyu: 4 m	Model-3 Elektrot Boyu: 6 m	Model-4 Elektrot Boyu: 8 m	Model-5 Elektrot Boyu: 10 m
1	100	100	100	100	100
2	90,2149	92,4448	93,5053	94,0891	94,4373
3	86,9532	89,9264	91,3404	92,1187	92,5831
4	84,9961	88,4153	90,0415	90,9366	91,4706
5	83,6709	87,4116	89,1907	90,17	90,7542
6	82,6402	86,631	88,529	89,5738	90,197
7	81,7969	85,9923	87,9877	89,0859	89,7412
8	81,0909	85,4598	87,5377	88,6814	89,3637
9	80,4866	85,0063	87,1559	88,3391	89,045
10	79,9534	84,6062	86,8191	88,0371	88,7637

Çizelge 4.1’deki değerleri grafiksel olarak Şekil 4.25’te görüldüğü gibi gösterildiğinde, çubuk elektrot ile çubuk elektrota 2 metre mesafedeki ilk düğümleri arasındaki potansiyel değerlerinin 20 cm aralıklı olarak değişimleri daha açık bir şekilde görülmektedir.

Böylece potansiyel dağılımında en fazla azalmanın topraklama elektrotundan 2 metrelik mesafede gerçekleştiği, sayısal hesaplama yöntemlerinden biri olan sonlu farklar yöntemi kullanılarak ortaya konmuştur.



Şekil 4.26 Bütün modellerin, çubuk elektrot ile çubuk elektrotta 2 metre mesafedeki ilk düğümleri arasındaki potansiyel dağılımları

Elde edilen hesap sonuçları incelendiğinde topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyelin ve birim uzunluk başına düşen potansiyel farkının azaldığı görülmektedir. Hesaplar farklı topraklayıcı uzunlukları ve dolayısı ile farklı gömülme derinlikleri için de yapıldığı için gömülme derinliğinin yüzeyde meydana gelen potansiyel farkı dağılımına etkisi görülmüştür. Bu durumun yayılma direncini ve adım gerilimini azaltıcı etkileri olduğu açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılan bu çalışmanın ayrıcalığı ise potansiyel dağılımının ve potansiyel farklarının sözü edilen büyüklüklerle değişimini elde etmek ve görmek olmuştur.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

“Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi” adlı bu tez çalışmasında ortaya konmak istenen en önemli konu; topraklama sistemlerini oluşturan elemanların yıldırım boşalmasına maruz kaldıklarında gösterdikleri davranışların yeni bir bakış açısıyla incelenmesidir. Sistemin işlevi; yıldırım boşalması sonunda maruz kalınan bir darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmaktan güvenli bir şekilde toprağa akıtmaktır.

Topraklama sistemi yıldırım boşalması sonrasında ortaya çıkan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve sistem yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmaktan güvenli bir şekilde toprağa akıtırken, akım yolu üzerindeki elemanların ayrı ayrı değerlendirilmesi topraklama sisteminin performans analizini gerçekleştirmek anlamına gelmektedir.

1. Adım: Tez çalışmasında yıldırım darbe akımının koruma sisteminde izlediği akım yolu üzerinde yer alan ilk eleman olarak indirme iletkeni ve bu iletken ile darbe empedanslarının karşılaştırıldığı çelik konstrüksiyon direk ele alınmıştır.

Bölüm 3’te yüksek gerilimli iletim hatlarında kullanılan çelik konstrüksiyon direklerin yıldırım darbe direncinin hesaplanması için, geometrik modellemesinde yüksekliği direk yüksekliğine eşit ve “ r ” yarıçaplı silindir yaklaşımı göz önüne alınmıştır.

Tez çalışmasının ilk adımı olan bu çalışmada direk darbe empedansını hesaplamak için yeni bir ifade elde edilmeye çalışılmıştır. Amaç; elde edilen ifade ile birlikte daha önce literatürde kullanılan tüm ifadelerin sonuçlarını sayısal bir örnek üzerinde irdelemektir. Çalışmada kullanılan yaklaşım ile hesaplamalar yapılırken yıldırım boşalmasının direğin en üst noktasında meydana geldiği varsayılmış ve tüm hesaplamalar bu varsayımdan hareketle gerçekleştirilmiştir. Yıldırım darbe akımının ışık hızında hareket ettiğinden yola çıkarak akımın direğin tepe noktasından toprağa doğru akarken izlediği yolun sadece direk yüksekliği kadar olmadığı, yürüyen dalgalarda olduğu gibi yansıma ile yoluna devam ettiği dikkate alınmıştır. Yani yürüyen dalga yansıyan ilk bileşenin en yüksek değerde olduğu düşünülmüş ve diğer bileşenleri hesaplamaya dahil edilmemiştir. Işık hızında hareket eden akımın, yıldırım boşalması sona erene kadar “ t ” zamanında izlediği yol bu durumda akımın kendisi ve ilk yansıması ile birlikte “ $2h$ ” olarak kabul edilmiştir. Çalışmada temel olarak Maxwell denklemlerinden yararlanılmıştır. Elektrik alanın eğrisel bir yol boyunca bir noktadaki integrali o noktadaki vektör magnetik potansiyelinin zamana göre türevinin o

noktadaki integraline eşit olduğu bilinen bir gerçektir. Dolayısı ile öncelikle vektör magnetik potansiyeli ifadesi silindrsel koordinatlarda kurulan modelden faydalanılarak elde edilmiştir. Daha sonra Vektör magnetik potansiyelinin zamana göre türevi alınmıştır. Elde edilen ifadenin yüzey üzerindeki herhangi bir noktadaki integrali bize o noktadaki potansiyel farkını vereceği gerçeğinden yola çıkılmıştır. Potansiyel farkı Ohm kanunundan da bilindiği gibi empedans ile akımın çarpımına eşittir.

Günümüzde özellikle de Türkiye’de direkleri yıldırımdan koruma tesisatında indirme iletkeni olarak $2 \times 50 \text{ mm}^2$ kesitli yuvarlak dolu bakır iletken kullanıldığı bilinmektedir. Bu tür bir indirme iletkeni ile birlikte, direk metal gövdesi de akım yolu olarak seçilirse direğin darbe akımına karşı göstereceği empedans büyük önem kazanmaktadır. Tez çalışmasında yapılmak istenen direk darbe empedansı ifadelerinden yararlanarak piyasada kullanılan bir direğin darbe empedansını hesaplamak ve indirme iletkeni olarak $2 \times 50 \text{ mm}^2$ kesitli yuvarlak dolu bakır iletken kullanılması durumundaki iletkenin darbe empedansı ile karşılaştırmak olmuştur. Karşılaştırma sonucuna göre yıldırımdan korunma sisteminde kullanılan indirme iletkeninin fonksiyonu incelenmiştir. Ayrıca çelik kafes anten direklerinin yıldırımdan korunmasına ilişkin gerçekte kullanılan bir çelik kafes direk için bölüm sonunda yapılan sayısal örnekte de bu ifade kullanılarak elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış olan çalışmalarda ortaya konan ifadeler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; çelik konstrüksiyon direklerin üzerinde yer alan elektriksel donanımın yıldırımdan korunmasında iletken sürekliliği sağlandığı takdirde, direktten yararlanılabileceği sonucu ortaya konmuştur.

Ayrıca, indirme iletkeni olarak $2 \times 50 \text{ mm}^2$ ’lik yuvarlak kesitli dolu bakır iletken kullanılması durumunda, direk ve indirme iletkeninin paralel bağlı olduğu düşünülecek olursa bu durumda oluşan yeni koruma sisteminin darbe empedansı değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan darbe empedansı değerleri; indirme iletkeni ve direğin, yıldırımdan korunma tesisatında ayrı ayrı tek başlarına kullanılması halinde elde edilen darbe empedansı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucuna göre; direk ve indirme iletkeninin birlikte kullanılması durumunda yıldırımdan korunma sisteminin darbe empedansı, direk ve indirme iletkeninin ayrı ayrı ve tek başlarına kullanılması durumundaki darbe empedansı değerlerinden daha düşük degerdedir. Bu sonuca göre, yıldırım boşalması sonrasında ortaya çıkan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve yıldırımdan korunma sistemi yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmaktan güvenli bir şekilde toprağa akıtmak için, sadece indirme iletkeninden veya iletken sürekliliği tam olarak sağlanmış çelik konstrüksiyon direktten değil, her ikisinin birlikte kullanıldığı durumda yararlanmanın daha iyi bir çözüm olduğu ortaya konmuştur.

2. Adım: Yıldırım darbe akımının koruma sisteminde izlediği akım yolu üzerinde yer alan ikinci ve belki de en önemli eleman olarak topraklayıcılardan en yaygın kullanılan çubuk topraklayıcı ele alınmıştır. Yıldırım darbe akımının topraklayıcıya ulaştıktan sonra topraklayıcıdan toprağa doğru akıtılması esnasında topraklayıcı ve toprağın davranışının incelenmesi özellikle sistemin yakınlarındaki canlıların sağlıklarının korunması açısından büyük önem taşımaktadır.

Bir topraklama tesisi üzerinde ve çevresinde oluşacak gerilim değeri, topraklama tesisini oluşturan, malzemenin türüne, boyutlarına, topraklayıcının gömülme ortamına ve koşullarına yakından bağlıdır. Atlama, delinme, dokunma, bağlanma gibi olaylar sonucu devrede veya elemanlarda meydana gelen kısa devrelerde veya yıldırım gibi elektriksel boşalmanın etkisinde topraklama tesisinden yüksek değerlerde akımlar geçer. Bu akımlarla topraklama tesisi ve bağlı olduğu yapılarda ortaya çıkacak gerilim düzeyi, topraklama direncine veya genel anlamda topraklama empedansına bağlıdır. Topraklama direnci ise toprağın ve topraklayıcının özelliklerine bağlıdır. Bu basit gibi görünen bağlılık zinciri pek çok araştırmaya konu olmuştur. Topraklayıcının geometrisine (çubuk, levha, şerit, boru,...), boyutlarına, gömülme derinliğine, toprağın öz direncine gibi birçok büyüklüğe bağlı olarak topraklama direncinin belirlenmesi, topraklama konusunda kuramsal ve deneysel çalışmaların ilgi odağı olmuştur.

Bu nedenle tez çalışmasının 4. bölümünde, topraklayıcının ve toprağın davranışını incelemek üzere iki ayrı çalışma yürütülmüştür. İlk çalışma tezde “Yıldırım Darbe Deneyi” adı altında verilmiş olan deneysel bir çalışmadır. İkinci çalışma ise yine tezde “Yıldırım Darbe Gerilimlerinde Toprağın ve Topraklayıcının Davranışının İncelenmesi için Geliştirilen Sayısal Uygulama” adı altında bir bölüm olarak verilen kuramsal bir çalışmadır. Bu sayısal uygulamada, çubuk topraklayıcılar ele alınmış ve yıldırım darbesine maruz kalmaları halinde, işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı Sonlu Farklar Yöntemi kullanılarak sunulmuştur.

Bölüm 4’ün ilk kısmında kısaca bahsedilen ve Ek 1’ de geniş bir şekilde anlatılan, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneysel çalışmada amaç; toprağı modellemek amacı ile toprak yerine elektrolitik sıvı kullanarak, bu elektrolitik sıvı içine yerleştirilen çubuk elektrotun yıldırım darbe geriliminde davranışını ve bununla birlikte toprağın yıldırım darbe geriliminde davranışını analiz etmek olmuştur. Deneysel çalışma üç ayrı deneyden meydana gelmiştir. Kullanılan deney düzeneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü’ne ait İ.T.Ü. Maslak kampüsünde yer alan Yüksek Gerilim Laboratuvarında kurulmuştur.

Deneyler gerçekleştirildikten sonra elde edilen tüm sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, çalışılan topraklama direnci aralığında çubuk elektrotta uygulanan gerilimi dolayısıyla akımı değiştirmenin sonuçları etkilemediği göstermiştir. Bunun nedeni toprak modeli olarak kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğinin yüksek, karşı düşen öz direncin çok büyük olmasıdır. Bu durumda toprağın davranışını değerlendirmeye yarayacak seviyede farklılıklar olmadığı açıktır. Bu da fark yaratacak düzeyde elektrolitik ortam iletkenliği sağlanamadığını göstermiştir. Bu farkı yaratabilmek için iletkenliği azaltmak dolayısı ile öz direnci büyütmek gerekir. Ancak elektrolitik sıvının iletkenliğinin damıtık su düzeyi veya daha düşük düzeyde iletkenliğe sahip olması deneysel olarak oluşturma zorluğu yaratmıştır. Bu nedenle mevcut olanaklar içindeki iletkenlikte çalışılmış ve sonuçların değişimi ve aralarındaki farklar incelenmiştir. Bu inceleme küçük öz dirençli toprak içinde çubuk topraklayıcı davranışını incelemek bakımından yararlı olmuştur. Ayrıca farklı iletkenlik seviyelerindeki toprağın davranışını incelemeye yetecek düzeyde bir aralık sağlanmasına imkan olmadığı gözlenmiştir. Yayılma direncini deneysel olarak hesaplamak için, öz direnç parametresi daha fazla değiştirilemediğinden, boyutları değiştirmek gerekmektedir. Buradan da deney kabının çapının ve yüksekliğinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışma bu gereksinimi sağlama durumu ortaya çıkınca sona erdirilmiş ve teorik analizlere geçilmiştir.

Bölüm 4'ün ikinci kısmında ise, daha önce yapılan pek çok çalışmanın paralelinde, elektriksel topraklamada yaygın olarak kullanılan topraklayıcı türlerinden biri olan çubuk topraklayıcıların yıldırım darbesine maruz kalmaları halinde, işlevlerini yerine getirirken çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabı Sonlu Farklar Yöntemi kullanılarak sunulmuştur.

Problemin sayısal hesabı, silindrisel koordinatlarda, iki boyutlu sonlu farklar yöntemi ile geliştirilen bir bilgisayar programı metodolijisi kullanılarak yapılmıştır. Geliştirilen bu yöntem; topraklayıcıların çevrelerinde oluşan potansiyel dağılımının sayısal hesabına yeni bir bakış açısı getirmesinin yanında, canlıların can güvenliği bakımından önemli olan adım ve dokunma gerilimlerinin boyutunu ve değişimini vermekte ve elektriksel topraklayıcılar çevresinde potansiyel dağılımı hesapları için farklı bir yaklaşım seçeneği sunmaktadır.

Bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı, dokunma ve adım gerilimlerinin büyüklüğünü belirler. Dokunulan yer ile ondan 1 m uzaklıktaki nokta arasındaki potansiyel farkı, dokunma gerilimi olarak; 1 m uzunluğundaki bir adımda iki ayak arasındaki potansiyel farkı da adım gerilimi olarak adlandırılır. Her iki gerilimin de tehlikeli olmayacak sınırlarda

olması gerekir. Bu gerilimler hakkında bir şey söyleyebilmek için potansiyel dağılımını bilmek gerekir.

Hesaplama için kullanılan Sonlu Farklar Yönteminde, karesel gözlere sahip bir ağ tercih edilmiştir. Her ağ 2 x 2 metrelik bir kareden oluşmaktadır. Çubuk elektrot üzerindeki ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki potansiyel değerlerinin bilindiği kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. Çubuk elektrotun üzerindeki potansiyel, çubuk elektrotun üzerinden geçen akıma bağlı olarak sabit bir değerdedir. Hesaplamalarda daha sonraki çalışmalara referans teşkil etmesi açısından, çubuk elektrot üzerindeki potansiyel değeri 100 Volt ve çubuk elektrotun her noktasından 20 metre uzaklıktaki her noktada ise potansiyel değerinin 0 Volt olduğu kabul edilerek çözüm gerçekleştirilmiştir.

Elektriksel topraklamada yaygın olarak kullanılan bir topraklayıcı türü olan çubuk topraklayıcı için açıklanan ve yapılan hesaplardan görüldüğü gibi bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak kolaylıkla bulunabileceği ortaya konmuştur. Bilgisayar yardımı ile yapılan bu hesaplarla potansiyel dağılımını dokunma ve adım gerilimi bakımından, hem doğru hem de saniyeler ile ölçülebilecek düzeyde hızlı bir şekilde elde etmenin mümkün olduğu gözlenmiştir.

Kurulan beş ayrı model için elde edilen hesap sonuçları incelendiğinde topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyelin ve birim uzunluk başına düşen potansiyel farkının azaldığı görülmektedir. Hesaplar farklı topraklayıcı uzunlukları ve dolayısı ile farklı gömülme derinlikleri için de yapılarak gömülme derinliğinin yüzeyde meydana gelen potansiyel farkı dağılımına etkisi görülmüştür. Bu durumun yayılma direncini ve adım gerilimini azaltıcı etkileri olduğu açıktır. Bu yöntemle yapılan çalışmanın ayrıcalığı ise potansiyel dağılımının ve potansiyel farklarının sözü edilen büyüklüklerle değişimini elde etmek ve görmek olmuştur. Böylece güvenli ve doğru topraklama tasarımının yapılabilmesi için önemli bir adım atılmıştır.

Tez çalışması sonunda özetle;

Elde Edilen Sonuçlar;

- Yıldırım boşalması esnasında ortaya çıkan darbe akımını, elektriksel devre elemanları ve yıldırımdan korunma sistemi yakınlarındaki canlı organizmalar için tehlikeli gerilimler oluşturmada güvenli bir şekilde toprağa akıtmak için sadece indirme iletkeninden veya sadece iletken sürekliliği tam olarak sağlanmış çelik konstrüksiyon

direkten değil, indirme iletkeni ile birlikte iletken sürekliliği tam olarak sağlanmış çelik konstrüksiyon direkten yararlanmanın daha iyi bir çözüm olduğu ortaya konmuştur.

- Topraklama sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir topraklayıcı türü olan çubuk topraklayıcı için açıklanan ve yapılan hesaplardan görüldüğü gibi bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak kolaylıkla bulunabilir. Bilgisayar yardımı ile yapılan bu hesaplarla potansiyel dağılımını dokunma ve adım gerilimi bakımından, hem doğru hem de saniyeler ile ölçülebilecek düzeyde hızlı bir şekilde elde etmenin mümkündür. Aynı mantık ile farklı geometrilerde, boyutlarda ve derinliklerdeki topraklayıcılar için potansiyel dağılımı hesabı ile davranışlarının sonlu farklar yöntemi uygulanarak sağlıklı bir şekilde değerlendirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuca Ulaşılamayan Çalışmalar;

- Tez çalışmasında “Yıldırım Darbe Deneyi” adı altında gerçekleştirilen deneysel çalışmada amaç; toprağı modellemek amacı ile toprak yerine elektrolitik sıvı kullanarak, bu elektrolitik sıvı içine yerleştirilen çubuk elektrotun yıldırım darbe geriliminde davranışını ve bununla birlikte toprağın yıldırım darbe geriliminde davranışını analiz etmek olmuştur. Ancak çalışma sonuçları incelendiğinde, yayılma direncini deneysel olarak hesaplamak için, öz direnç parametresi daha fazla değiştirilemediğinden, deney düzeneğinin boyutlarını değiştirmek gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu durum da deney kabının çapının ve yüksekliğinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Deneysel çalışma bu gereksinimi sağlama durumu ortaya çıkınca sona erdirilmiş ve teorik analizlere geçilmiştir.(Eğer toprak yayılma direncini deneysel olarak hesaplamak için, öz direnç parametresi daha fazla değiştirilebilseydi, ölçü direnci uçlarında ölçülen gerilimlerden yararlanarak darbe akımları hesaplanabilecek ve ölçülen gerilim değerinin bu gerilime karşılık gelen darbe akımları oranlanarak toprak yayılma dirençleri ölçüm yapılan her durum için hesaplanabilecekti.)

İleride Yapılması Olası Çalışmalar İçin Öneriler;

- Yüksek gerilimli iletim hatlarında kullanılan çelik konstrüksiyon direklerin yıldırım darbe direncinin hesaplanması için, geometrik modellemesinde yüksekliği direk yüksekliğine eşit ve “r” yarıçaplı silindir yaklaşımı yerine, direğin doğal

formuna daha yakın farklı geometrik modellemelerin göz önüne alınması düşünülebilir.

- Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının sonlu farklar yöntemi ile sayısal olarak kolaylıkla bulunabileceği bu tez çalışmasında ortaya konmuştur. Aynı mantık ile farklı geometrilerde, boyutlarda ve derinliklerdeki topraklayıcı türleri için yeni modeller kurarak potansiyel dağılımı hesabı ile davranışlarının sonlu farklar yöntemi (vb.) uygulanarak yapılması düşünülebilir.
- Farklı geometrilerde, boyutlarda ve derinliklerdeki topraklayıcılar için potansiyel dağılımı hesabı ile davranışlarının matematiksel olarak modellenmesinin kolaylığı gözlemlendiğinden herhangi bir programlama dili kullanılarak bir paket program oluşturulması düşünülebilir.



KAYNAKLAR

- AIEE Committee, (1950), "A Method of Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 69:1187-1196.
- Abdallah, M.A., (2003), "Effect of soil ionisation on the lightning current distribution in earthing system", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.
- Abdallah, M.A., (2003), "High frequency performance of an earthing system", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.
- Alperöz, N., (1987), "Elektrik Enerjisi Dağıtımı", Nesil Matbaacılık ve Yayıncılık San.Tic. A.Ş., İstanbul.
- Baba, Y. ve Ishii, M., (2001), "Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures", IEEE Transactions on Power Delivery, 16:324-328.
- Bayram, M., (1977), "Elektrik Tesislerinde Topraklama", İTÜ Elektrik Fakültesi, İstanbul.
- Bayram, M., (1995), "Elektrik Tesislerinde Güvenlik", Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- Bogensperger, J.H., Frei, J. ve Pack, S., (1995), "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behaviour", Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria.
- Breuer, G.D., Shultz, A. J., Schlomann, R. H. Ve Price, W. S., (1958), "Field Studies of a 345-kV Transmission Tower and Ground Wire", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 77:1932-1936.
- Brown, G.W., (1978), "Lightning Performance II Updating Backflash Calculations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 97:39-52.
- Chisholm, W.A., Chow, Y.L. ve Srivastava, K. D., (1983), "Lightning Surge Response of Transmissions Towers", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 102:3232-3242.
- Dawalibi, F. ve Mukhedkar, D., (1975), "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 94:252-270.
- Dawalibi, F. ve Mukhedkar, D., (1979), "Influence of Ground Rods on Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 98:2089-2098.
- Dawalibi, F.P., Southey, R.D. ve Baishiki, R.S., (1990) "Validity of Conventional Approaches for Calculating Body Currents Resulting From Electric Shocks", IEEE Transactions on Power Delivery, 5:613-626.
- Dawalibi, F.P., Xiong, W. ve Ma, J., (1993), "Effects of Deteriorated and Contaminated Substation Surface Covering Layers on Foot Resistance Calculations", IEEE Transactions on Power Delivery, 8:104-113.
- Denno, K., (1992), "High Voltage Engineering in Power Systems", CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Diesendorf, W., (1974), "Insulation Co-ordination in High Voltage Electric Power Systems", Butterworth.

- Ergeneli, A., (1986), "Elektromagnetik Alan Teorisi-I Birinci Kitap Elektrik Alanı Teorisi", Yıldız Üniversitesi Yayınları, İstanbul.
- Fisher, F.A., Anderson, J.G. ve Hagenguth, J.H., (1960), "Determination of Lightning Response of Transmissions Lines by Means of Geometrical Models", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 79:1725-1736.
- Geri, A., (1999), "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation", IEEE Transactions on Power Delivery, 14:1008-1017.
- Gonos, I.F., Kontargyri, V.T., Topalis, F.V. ve Stathopoulos, I.A., (2003), "Transient behaviour of a horizontal electrode under impulse current", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.
- Grcev, L.D. ve Heimbach, M., (1997), "Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 12:172-178.
- Gupta, B.R. ve Singh, V.K., (1992), "Impulse Inductance of Rectangular Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, 7:214-217.
- Gupta, B.R. ve Singh, V.K., (1992), "Inductance of Rectangular Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, 7:1218-1221.
- Gupta, B.R. ve Thapar, B., (1980), "Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 99:2357-2362.
- Hara, T. ve Yamamoto, O., (1996), "Modelling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis", IEE Proceeding Generation, Transmission, Distribution, 143:283-289.
- Hara, T., Yamamoto, O., Kitagawa, M. ve Ono, S., (1995), "Flashover Analysis of 500 kV Transmission Tower When Struck by Lightning", Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria.
- Harrington, R.F., (1968), "Field Computation by Moment Methods", Mac Milan, New York.
- Hasse, P., (2000), "Overvoltage Protection of Low Voltage Systems", IEE Power and Energy Series 33, London.
- He, J., Yu, G., Gao, Y., Zou, J. ve Guan, Z., (2003), "Lightning transient characteristics of substation considering soil ionization around grounding conductors of grounding System", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.
- Heimbach, M. ve Grcev, L.D., (1997), "Grounding System Analysis in Transient Programs Applying Electromagnetic Field Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, 12:186-193.
- Heppe, R.J., (1979), "Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode Allowing for Non-uniform Current Distribution", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 98:1978-1987.
- Higuchi, T., (1995), "Method of Determining Surge Waveforms on Transmission Line Based on Differences in Ground Resistance", Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, Graz, Austria.
- Ishii, M. ve Baba, Y., (1997), "Numerical Electromagnetic Field Analysis of Tower Surge Response", IEEE Transactions on Power Delivery, 12:483-488.

Ishii, M., (1991), "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, 6:1327-1335.

Jordan, C.A., (1934), "Lightning Computations for Transmission Lines with Overhead Wires", General Electric Review, 37:130-137.

Jose Alberto Gutierrez, R., Jose Luis Naredo, V. ve Pablo Moreno, V., (1999), "Transmission Line Tower Modelling for Lightning Performance Analysis", IEEE Power Engineering Review.

Kalenderli, Ö., (2003), "Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi Ders Notları", İ.T.Ü., İstanbul.

Kontargyri, V.T., Gonos, I.F., Topalis, F.V. ve Stathopoulos, I.A., (2002), "Transient behaviour of a horizontal grounding grid under impulse current", 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion MED POWER 2002, Athens, Greece.

Kostic, M.B., (1998), "Analysis of Complex Grounding Systems Consisting of Foundation Grounding Systems With External Grids", IEEE Transactions on Power Delivery, 13:752-756.

Lorentzou, M.I. ve Hatziargyriou, N.D., (2002), "Proposed Methodology for Calculation of the Transient Response of Grounding Systems", 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion MED POWER 2002, Athens, Greece.

Lorentzou, M.I. ve Hatziargyriou, N.D., (2002), "Effective Design of Large Grounding Systems", 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion MED POWER 2002, Athens, Greece.

Lu, C., He, J., Gao, Y., Zeng, R. ve Zou, J., (2003), "Effective length of extended earthing electrode under lightning impulse", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.

Lundholm, R., Finn, R.B. ve Price, W.S., (1958), "Calculation of Transmission Line Lightning Voltages by Field Concepts", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1958 Section:1271-1283.

Meliopoulos, A.P.S., Xia, F., Joy, E.B. ve Cokkinides, G.J., (1993), "An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, 8:13-23.

Meng, Q., He, J., Dawalibi, F.P. ve Ma, J., (1999), "A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions", Transactions on Power Delivery, 14:911-916.

Miller, C.J.Jr., (1956), "Anomalous Flashovers on Transmission Lines", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 75:897-907.

Osman, M., Chen, G. ve Pilling, N., (2003), "Effect of High Resistive Barrier on earthing system", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.

Özkaya, M., (1984), "Yüksek Gerilim Tekniğinde Ölçme", İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi Sayı:1282, İstanbul.

Özkaya, M., (1996), "Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 1 Statik Elektrik Alanları ve Boşalma

Olayları", Birsen Yayınevi, İstanbul.

Özkaya, M., (1996), "Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 2 Aşırı Gerilimler ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma", Birsen Yayınevi, İstanbul.

Sargent, M.A. ve Darveniza, M., (1967), "The Calculation of Double Circuit Outage Rate of Transmission Lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 86:665-678.

Sargent, M.A. ve Darveniza, M., (1969), "Tower Surge Impedance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 88:680-687.

Sato, S. ve Zaengl, W.S., (1988), "Effective Grounding Mesh Calculation Technique", IEEE Transactions on Power Delivery, 3:173-182.

Sverak, J.G., (1984), "Simplified Analysis of Electrical Gradients Above a Grounding Grid-I How Good Is The Present IEEE Method? (A Special Report For WG 78.1)", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 103:7-25.

Sverak, J.G., (1998), "Progress in Step and Touch Voltage Equations of ANSI/IEEE Std 80-Historical Perspective", IEEE Transactions on Power Delivery, 13:762-767.

Takahashi, T. ve Kawase, T., (1991), "Calculation of Earth Resistance for a Deep-Driven Rod in a Multi-Layer Structure", IEEE Transactions on Power Delivery, 6:No-2.

Tanabe, K. ve Asakawa, A., (2003), "Computer Analysis of Transient Performance of Grounding Grid Element Based on the Finite-Difference Time-Domain Method", The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), İstanbul.

Thapar, B. ve Puri, K.K., (1967), "Mesh Potentials in High Voltage Grounding Grids", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 86:249-254.

Thapar, B., Gerez, V. ve Emmanuel, P., (1993), "Ground Resistance of the Foot in Substation Yards", IEEE Transactions on Power Delivery, 8:1-6.

Thapar, B., Gerez, V. ve Kejriwal, H., (1994), "Reduction Factor for the Ground Resistance of the Foot in Substation Yards", IEEE Transactions on Power Delivery, 9:360-368.

Thapar, B., Gerez, V. ve Singh, V., (1993), "Effective Ground Resistance of the Human Feet in High Voltage Switchyards", IEEE Transactions on Power Delivery, 8:7-12.

Thapar, B., Gerez, V., Balakrishnan, A. ve Blank, D.A., (1992), "Finite Expression and Models for Footing Resistance in Substations", IEEE Transactions on Power Delivery, 7:219-224.

The Substation Committee of the IEEE Power Engineering Society, (1986), "An American National Standard IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding", IEEE, New York.

TMMOB, Elektrik Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, (2001), "Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği", Bursa (21 Ağustos 2001 tarih ve 24500 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanmıştır).

Toseva, V.A. ve Grcev, L., (2003), "Theoretical Aspects of High Frequency Analysis of Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil", The 2003 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), İstanbul.

Toseva, V.A. ve Grcev, L., (2003), "High Frequency Current Distribution in Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil", The 2003 IEEE International Symposium on

Electromagnetic Compatibility (EMC), İstanbul.

Umurkan, N., (1995), "Enerji İletim Hatlarında Elektrik ve Magnetik Alan Hesabı ve Biyolojik Etkilerin Değerlendirilmesi", Doktora Tezi YTÜ, İstanbul.

Uzunoğlu, M., Kızıl, A. ve Onar, Ö.Ç., (2002), "Kolay Anlatımı ile İleri Düzeyde MATLAB 6.0-6.5", Türkmen Kitabevi, İstanbul.

Van Der Linde, F., Zedan, B., Griffiths, H., Haddad, A., Walker, K., Frame, D., MacDonald, N., Horne, C. Ve Porter, J., (2003), "The impulse response of Earth grids", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherland

Wagner, C. F. ve Hileman, A. R., (1959), "A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines-II", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 78:996-1021.

Wagner, C. F. ve Hileman, A. R., (1960), "A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines III-A", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 79:589-603.

Wagner, C. F., (1956), "A New Approach to the Calculation of the Lightning Performance of Transmission Lines", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 75:1233-1256.

Wahab, M.A.A., Matsubara, I. ve Kinoshita, H., (1987), "An Experimental Evaluation of Some Factors Affecting Tower Surge Impedance", Transactions on Institute of Electrical Engineers Japan, 77:171-177.

Yasuda, Y., Hirakawa, Y., Shiraishi, K. ve Hara, T., (2001), "Sensitivity Analysis on Grounding Models for 500 kV Transmission Lines", Transactions on Institute of Electrical Engineers Japan, 121:1386-1393.

Yıldırım, H., Kalenderli, Ö., Türkay, B. ve Çelikyay, M., (1995), "Topraklama Ağlarının Bilgisayar Destekli Analizi", Elektrik - Elektronik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa.

Yung, E.K.N., (1993), "Analysis of a Rectangular Earthing Plate", IEE Proceedings-C, 140:381-388.

Zeng R., He J., Wang Z., Gao Y., Sun W. ve Su Q., (2000), "Analysis on Influence of Vertical Grounding Electrodes on Grounding Systems for Substation", 2000 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2000, The University of Western Australia, Perth, Australia.

Zou, J., Guo, J., He, J.L. ve Zeng, R., (2003), "Speedy analysis of transient voltages in large grounding systems", XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands.

INTERNET KAYNAKLARI

[1]www.ieee.org

[2]www.erico.com

[3]www.grounding.com

[4]www.lightningeliminators.com

[5]www.mit.edu

EKLER

- Ek 1 YILDIRIM DARBE GERİLİMİ DENEYİ
Ek 2 SONLU FARKLAR YÖNTEMİ
Ek 3 MODELLER İÇİN YAZILAN SONLU FARK DENKLEMLERİ



Ek 1 YILDIRIM DARBE GERİLİMİ DENEYİ

Toprağı modellemek amacı ile toprak yerine elektrolitik sıvı kullanarak, bu elektrolitik sıvı içine yerleştirilen çubuk elektrotun yıldırım darbe geriliminde davranışını ve bununla birlikte toprağın yıldırım darbe geriliminde davranışını analiz etmek için laboratuvar ortamında bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma üç ayrı deneyden meydana gelmiştir. Kullanılan deney düzeneği, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'ne ait İ.T.Ü. Maslak/İstanbul kampüsünde yer alan Yüksek Gerilim Laboratuvarında kurulmuştur.

Ek 1.1 Deneyde Kullanılan Donanım

Geçici rejimlerde topraklama sistemlerinin davranışını incelemek amacı ile İstanbul Teknik Üniversitesi Maslak Kampüsü Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılan donanım aşağıda verilmiştir;

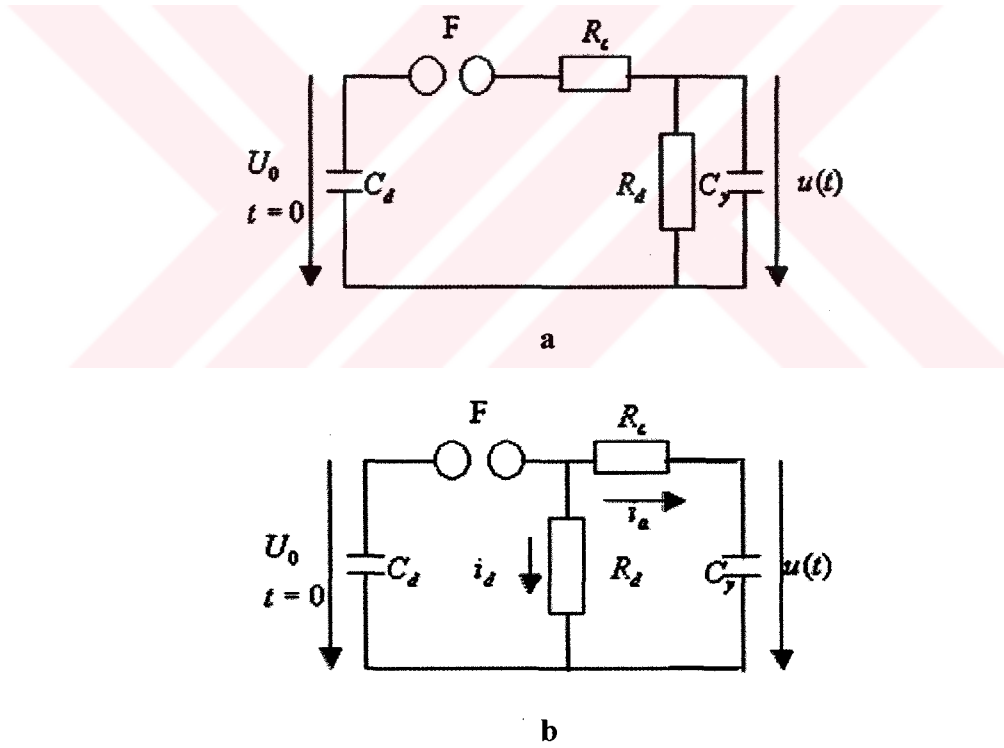
- B bağılamı türünde darbe generatörü
- Toprak modeli oluşturmak amacı ile kullanılan 57 cm çaplı 85 cm boyunda sıvı seviye göstergeli ve tahliye musluklu silindirselsel metal deney kabı
- 1,6 mm çaplı 1,5 m uzunluğundaki bakır çubuk topraklama elektrotu (topraklayıcı)
- Geçit izolatörü olarak kullanılan 8mm kalınlığında 20 cm eninde 120 cm boyunda 4 adet yalıtkan destek plaka
- Topraklama elektrodunu deney kabına eksenlemek ve model toprak olarak kullanılan elektrolitik sıvının tozlanmasını engellemek amacı ile kullanılan 20 cm derinliğinde 70 cm çapında yalıtkan kapak
- Osiloskop proplarının bağlantısına imkan veren 2,5 mΩ'luk ölçü direnci
- 2,5 mΩ'luk ölçü direncinden topraklama sistemine bağlantı yapmayı sağlayan (30x0,5mm²) bakır şerit iletken
- Darbe gerilimi generatöründen kurulan model sisteme bağlantı sağlamak amacı ile kullanılan (95 mm²) şerit örgülü bakır iletken.
- Dijital Osiloskop (Band genişliği 100 MHz)

Ek 1.2 Deneyde Kullanılan Darbe Gerilim Generatörü

Bir hava hattının üzerine veya yakınına düşen yıldırım, hattın iletkenleri üzerinde aşırı gerilimler doğurur. Bu aşırı gerilimler, iletkenler boyunca yürüyen dalgalar halinde ışık hızı ile ilerleyerek elektrik tesis ve cihazlarını zorlarlar.

Araştırma ve deneylerde, yüksek kapasiteli bir gerilim kaynağının deney cismine ani olarak bağlanması ile, söz konusu deney cismi üzerinde yıldırımın doğuracağı yürüyen dalga etkisi yapay olarak oluşturulabilir. Ancak bu tür bir düzenekle çalışmak yer ve zaman açısından uygun olmadığı için, istenen darbe gerilimi direnç ve kondansatörlerden oluşan darbe gerilimi generatörleri ile sağlanır.

Şekil Ek 1.1’de darbe gerilimi üretiminde en çok kullanılan, **a** ve **b** eşdeğer devreleri olarak bilinen temel eşdeğer devreleri gösterilmiştir.



Şekil Ek 1.1 Darbe gerilimi **a** ve **b** eşdeğer devreleri

“ C_d ” darbe kondansatörü yüksek ohmlu bir yük direnci üzerinden “ U_0 ” doğru gerilimine doldurulur ve “ F ” küresel elektrotlarının atlama ile boşalır. İstenen “ $u(t)$ ” gerilimi “ C_y ” yük kapasitesinin uçları arasında meydana gelir. **a** ve **b** eşdeğer devreleri, birbirinden “ R_d ” boşalma direncinin bir defa “ R_a ” amortisman direncinin arkasında bir defa da önünde olmaları

ile ayırt edilirler. Devre elemanlarının büyüklüğü, darbe geriliminin şeklini tayin eder. Her iki eşdeğer devrenin çalışma tarzı prensip itibarıyla şu şekilde açıklanabilir; Cephe süresinin kısa olması için “ C_y ” yük kapasitesinin “ U_m ” tepe değeriyle hızla dolması ve sırt süresinin uzun olması için de yük kapasitesinin nispeten yavaş boşalması gerekir. Bunun için $R_d \gg R_a$ olmalıdır. “F” elektrotlarının tutuşmasından sonraki ilk anda, yani $t=0$ anında, her iki eşdeğer devrede “ U_0 ” gerilimi seri bağlı “ R_a ” ve “ C_y ” elemanlarına uygulanmış olur. $u(t)$ gerilimi, “ $R_a C_y$ ” terimi ne kadar küçükse, o kadar çabuk tepe değerine erişir. “ U_m ” tepe değeri, başlangıçta mevcut olan “ U_0 ”, “ C_d ” elektrik yükünün “ $C_d + C_y$ ” kapasitesine bölünmesinden ileri gelen gerilimden daha büyük olamaz. Bu nedenle devrenin “ h ” verimi

$$\eta = \frac{U_m}{U_0} \leq \frac{C_d}{C_d + C_y} \quad (\text{Ek 1.1})$$

dir.

Genel olarak gerilimin “ U_m ” tepe değerinin verilen bir “ U_0 ” yük gerilimine göre, mümkün olduğu kadar büyük olması için $C_d \gg C_y$ seçilir. Bundan sonra darbe geriliminin sırtındaki üstel azalma, **a** eşdeğer devresi için “ $C_d(R_a + R_d)$ ” zaman sabitiyle ve **b** eşdeğer devresi için de “ $C_d R_d$ ” zaman sabitiyle olur. Bir boşalma da söz konusu olan darbe enerjisi,

$$W = \frac{1}{2} C_d U_0^2 \quad (\text{Ek 1.2})$$

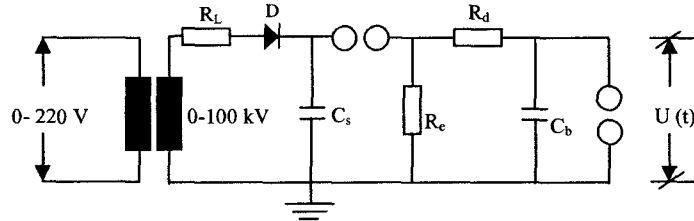
dir.

Burada, “ U_0 ” için mümkün olan en yüksek dolma gerilimi konursa, bir darbe generatörünün en önemli tanım büyüklüğü olan maksimum “darbe enerjisi” elde edilir.

Eşdeğer devrelerin çalışma prensipleri hakkında yukarıda verilen açıklamalarda, $t=0$ anında “ C_d ” darbe kondansatörünün “ U_0 ” gerilimi ile dolu olduğu kabul edilmiştir.

U_0 gerilimi, “F” küresel elektrotlarında atlama olduğu veya yardımcı bir boşalma ile tutuştuğu andaki dolma gerilimidir. Bu nedenle kendi kendine ateşleyen generatörlerde, “ U_m ” darbe geriliminin tepe değerinde bir yükselme, ancak “F” küresel elektrotlar arası açıklığın büyütülmesi ile mümkün olur. Yük direnci önündeki doğru gerilimde bir yükselme ise ancak “ C_d ” darbe kondansatörünün “ U_0 ” gerilimi ile daha çabuk dolmasını ve “F” küresel elektrotlarının da daha kısa zaman aralıkları ile kendi kendine çalışmasını sağlar. Yani bu şekilde, üretilen darbe geriliminin yüksekliği değil de, darbe sıklığı büyür.

Şekil Ek 1.2’de deneysel çalışmada kullanılan tek katlı bir “b” bağlamı darbe gerilimi generatörü devresi verilmiştir.



Şekil Ek 1.2 Deneyde kullanılan tek katlı “b” bağlamı darbe gerilim generatörü

Bu devrede bir doğru gerilim kaynağından beslenen “ C_s ” yük kondansatörünün uçlarındaki gerilim belli bir “ U_s ” gerilimine eriştiğinde küreler arasındaki hava delinir. Başlangıçta boş olan “ C_b ” kondansatörü “ R_d ” direnci üzerinden dolar ve daha sonra “ $R_e + R_d$ ” üzerinden boşalır. “ C_b ” darbe kondansatörünün uçlarında oluşan darbe geriliminin hızla yükselen ve yavaş yavaş düşen bir dalga şekline sahip olması için $R_e \gg R_d$ olmalıdır.

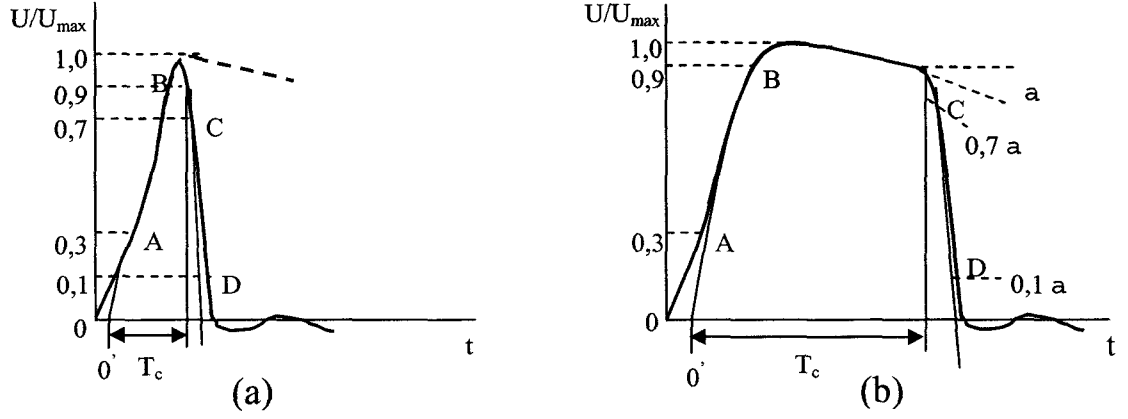
Ek 1.3 Darbe Gerilimleri

Bugüne kadara yapılan tüm ölçmeler; atmosferik aşırı gerilimlerin sıfırdan başlayarak hızla en yüksek değere çıkıp daha sonra üstel olarak yavaş yavaş sıfır değerine doğru düştüğünü göstermiştir. Bu gerilimler en kötü koşullarda 1 mikro saniye civarında tepe değerine yükselmekte ve yaklaşık 50 mikro saniyede bu değer yarısına düşmektedir. Bu doğal zamanlamadan esinlenerek, bir çok ülkede olduğu gibi, Türkiye’de de darbe gerilimi deneyleri için bir “Standart Darbe Gerilimi” belirlenmiştir. Darbe gerilimleri tam ve kesik darbe gerilimleri olarak sınıflandırılabilir. Bir darbe gerilimini tanımlayan en önemli büyüklükler;

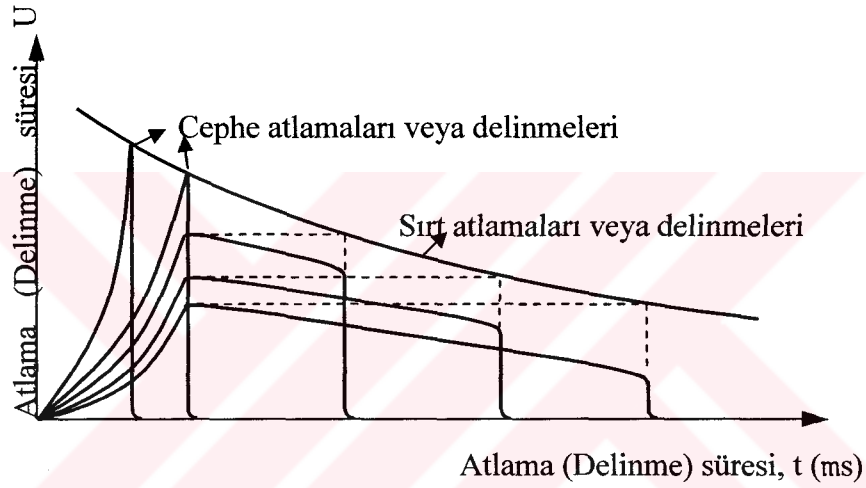
Anma Cephe Süresi, T_1 : Darbe gerilimi tepe değerinin %30 ve %90 ının meydana geldiği anlar arasındaki T süresinin 1,67 katıdır.

Anma Sırt Yarı Değer Süresi, T_2 : Anma başlangıç noktası (0) ile sırtta tepe değerin yarısına düştüğü ana karşılık gelen noktalar arasındaki zamandır.

Tepe Değeri, U_{max} : Gerilimin maksimum değeridir (Özkaya,1996).



Şekil Ek 1.4 a.) Cephede kesik darbe gerilimi
b.) Sırtta kesik darbe gerilimi



Şekil Ek 1.5 Darbe karakteristiği

Darbe karakteristiği, uygulanan darbe geriliminin şekline bağlı olup her türlü işletme aracı (transformatör, makina vb.) için ve özellikle de parafudr gibi yüksek gerilim koruma cihazlarının seçiminde büyük önem taşır. Kısaca, parafudrun darbe karakteristiği, koruyacağı cihazın darbe karakteristiğinin altında kalmalıdır (Özkaya, 1996).

Ek 1.5 Darbe Gerilimlerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi

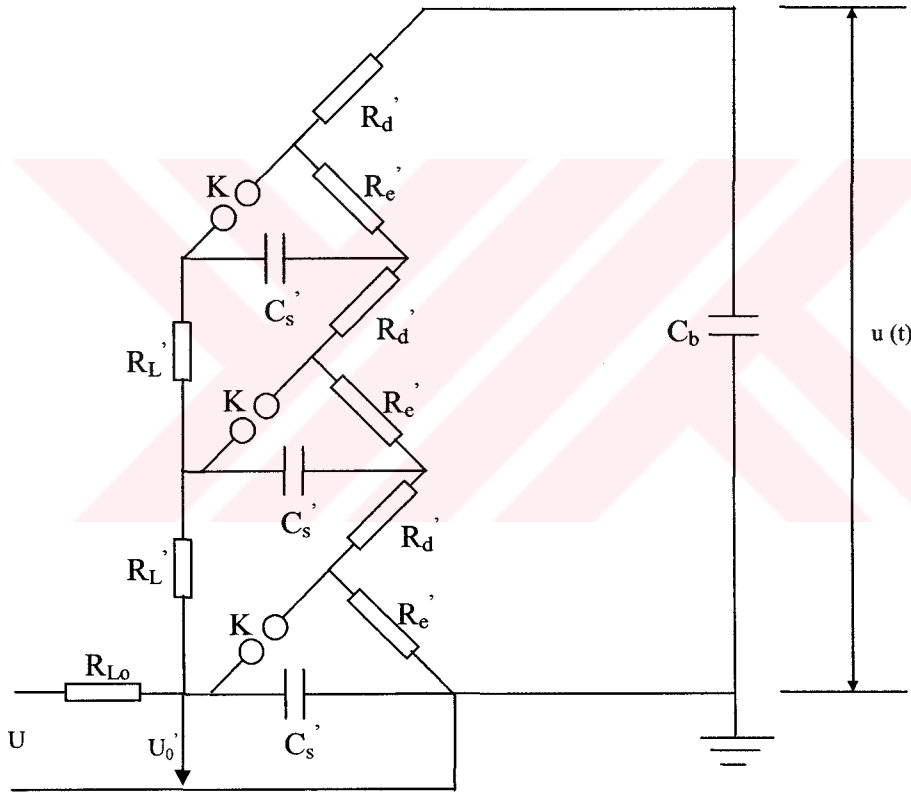
Bir tek " C_s " kondansatörünün yükleme gerilimi (U_{smax}) sınırlı olduğu için, belirli bir doğru gerilimden yüksek tepe değerli darbe gerilimleri üretebilmek için çok katlı bağlamalar kullanılır. Şekil Ek 1.6'da verilen Marx Bağlamı diye adlandırılan devre, " C_d " kondansatörlerinin paralel yüklenip, seri halde boşaltılması ilkesine göre çalışır.

Darbe gerilimi ölçmelerinde küresel elektrotların kullanımı biraz farklılıklar gösterir. Belirli

bir elektrot açıklığına aynı koşullarda uygulanan aynı tepe değerli darbelerin etkisi farklı olabilir. Örneğin uygulanan “ U_{di} ” tepe değerli “ n ” darbe geriliminin “ n_i ” tanesinde küreler arasında bir atlama oluyorsa, söz konusu “ U_{di} ” geriliminde atlama olasılığı;

$$P(U_{di}) = \frac{n_i}{n} \quad (\text{Ek 1.3})$$

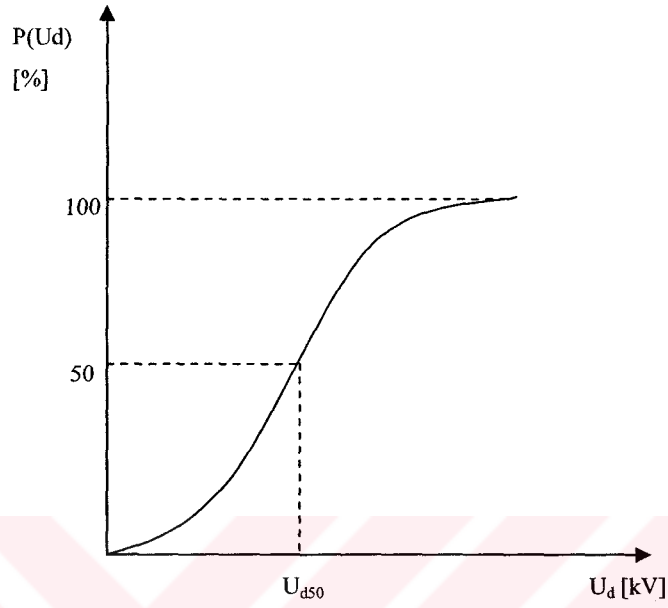
olarak hesaplanır. Bu şekilde bir dizi farklı tepe değerli darbe gerilimleri uygulanarak, bunların belirli bir elektrot açıklığına ilişkin atlama olasılıkları hesaplanır ise Şekil Ek 1.7’deki gibi bir eğri elde edilir.



Şekil Ek 1.6 Üç Katlı Marx bağlamı.

Uygulamada atlama olasılığı %50 olan U_{d50} tepe değerli darbe gerilimi esas alınır ve standart cetvelleri bu değerlere göre hazırlanır. U_{d50} atlama geriliminin bulunmasında özel olasılık kağıtlarından ve/veya enterpolasyondan faydalanılır. Olasılık eksen takımında Şekil Ek 1.7’deki eğri bir doğruya dönüşür ve dolayısı ile U_{d50} nin bulunması kolaylaşır. Küresel elektrotlarla ölçmede olduğu gibi, bir yalıtım elemanının (örneğin izolatör) atlama gerilimi de

genelde %50 atlama gerilimi olarak verilir (Özkaya, 1996).



Şekil Ek 1.7 Belirli bir elektrot açıklığında atlama olasılığının gerilimle değişimi

Darbe deneylerinde genellikle darbe şeklinin gözlemlenebilmesi istendiği için gerilim bölücü ve osiloskoplardan oluşan ölçme sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Gerilim bölücüler darbe geriliminin şeklini bozmaksızın, tepe değerini osiloskopa ve darbe voltmetresine uygulanabilecek bir değere düşüren cihazlardır. Omik, kapasitif veya karma türden olabilirler. Gerilim yansımalarının önlenmesi için sonlandırmanın uygun bir şekilde yapılması gerekmektedir (Özkaya, 1996).

Ek 1.6 Deneyin Yapılışı

Küresel elektrotlar ile gerilim ölçülmesinin temeli; belirli elektrot açıklığı, küre çapı, kürelerin düzeni ve hava koşulları için elektrotlar arasındaki atlama geriliminin belirli olmasına dayanır. Farklı küre çaplarında değişik elektrot açıklıkları için küreler arasındaki atlama gerilimleri standart bir çizelge ile, Çizelge Ek 1.1’de verilmiştir.

Duyarlı ölçme yöntemleri ile değişik çaplı standart elektrotlarda elektrot açıklığına bağlı

olarak atlama gerilimleri alternatif, darbe ve doğru gerilimler için normal koşullarda belirlenmiş olup, küresel elektrotlarla gerilim şu şekilde ölçülür; ölçülmesi istenilen gerilime karşılık gelen elektrot açıklığı sabit tutulur ve gerilim atlama oluncaya kadar yavaş yavaş yükseltilir. Atlama anındaki gerilim, ölçülmesi istenen gerilimdir. Elektrotlara başlangıçta ölçülmesi istenen gerilimin yarısı civarında bir gerilim uygulanır. Atlama oluncaya kadar geçen zaman en az 30 saniye olmalıdır.

Deney düzeneğinde yer alan elemanlar birbirlerine elektriksel olarak bağlanmadan önce topraklama çubuğunun silindirselsel metal deney kabının ekseninden geçmesini sağlamak gerekmektedir. Bu geçişi sağlamak için geçit izolatörü olarak kullanılan ve eksenin ortalanmasını sağlayan bir yalıtkan kapaktan ve yalıtkan kapağa destek olan 4 adet yalıtkan plakadan yararlanılmıştır.

Topraklama çubuğunu deney kabına eksenledikten sonra montaj ve demontaj işlemlerinde daha rahat hareket etmek amacı ile parçaların hepsinin pozisyonları markalanmıştır.

Her deney başlangıcında deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı, hava basıncı ve yüzde cinsinden ortam bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği çizelgelerin altında verilmiştir. Geçici rejimlerde topraklama sistemlerinin davranışlarının incelenmesi amacı ile tasarlanan ve Şekil Ek 1.18 ile Şekil Ek 1.19’da verilen deney düzenekleri kurulmuştur.

Deney düzeneğinde yer alan elemanların birbirlerine elektriksel olarak bağlanması sırasında, $2,5 \text{ m}\Omega$ ’luk ölçü direncinden topraklama sistemine bağlantı yapmayı sağlayan ($30 \times 0,5 \text{ mm}^2$) bakır şerit iletken ve darbe gerilimi generatöründen kurulan model sisteme bağlantı sağlamak amacı ile kullanılan (95 mm^2) şerit örgülü bakır iletken kullanılmıştır. Bu iletkenlerin bağlantı noktalarına temasının tam olması için civatalı bağlantı kullanılmıştır. B bağlantı türündeki darbe generatörünün çıkışında yer alan atlama küreleri arasındaki açıklık, Şekil Ek 1.14’te görüldüğü gibi kürelerin yerleştirildiği platformda yer alan dairesel kol yardımı ile ayarlanmıştır. Açıklık istenilen mesafeye ayarlandıktan sonra deney düzeneğinden uzaklaşarak, Faraday kafesi ile ayrılan kumanda masasına geçilmiştir. Deney düzeneğinin yakınında yani kafesle ayrılmayan bölmede herhangi bir kimsenin kalmamasına dikkat edilmiştir. Kat küreleri arasındaki mesafenin kumanda masasındaki step motora kumanda eden düğmeler vasıtası ile ayarlanması sonucu istenilen gerilim değeri elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu gerilim değerlerinde, atlama kürelerinde atlama meydana geldiğinde, osiloskop ekranından darbe şeklinin pik değeri okunarak kayıt edilmiştir.

Bu deneysel çalışmada amaç; toprağı modellemek amacı ile toprak yerine elektrolitik sıvı

kullanarak, bu elektrolitik sıvı içine yerleştirilen çubuk elektrotun yıldırım darbe geriliminde davranışını ve bununla birlikte toprağın yıldırım darbe geriliminde davranışını analiz etmektir.

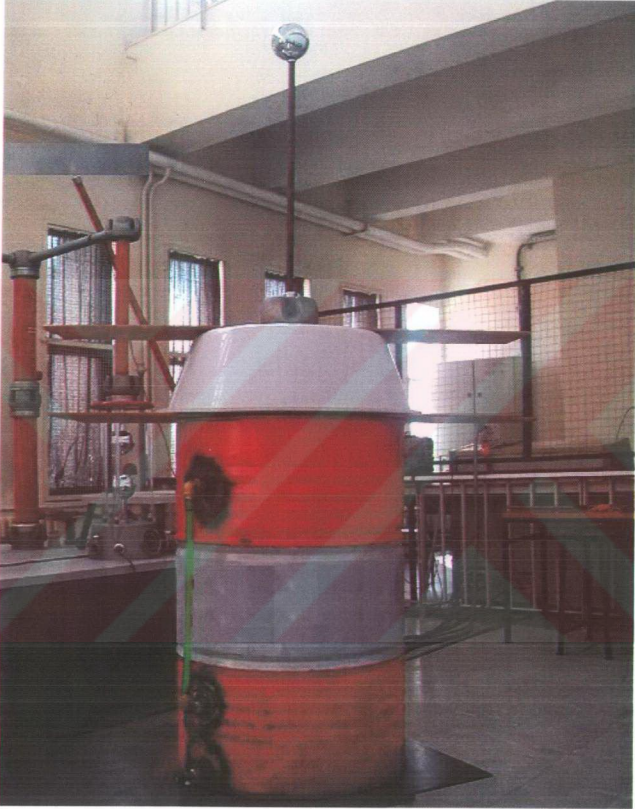
Bütün bu yapılan işlemler sonucunda elde edilen ölçüm sonuçları çizelgelere kayıt edilmiş ve üzerinde çalışılmak üzere elektronik ortamda saklanmıştır.

Ölçümler yapılırken kullanılan deney düzeneklerinin dijital fotoğraf makinası ile çekilmiş fotoğraflarından bir kısmı bu bölümde verilmiştir. Kullanılan deney düzeneği, bölümün başında da belirtildiği gibi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü'ne ait İ.T.Ü Maslak / İstanbul kampüsünde yer alan Yüksek Gerilim Laboratuvarında kurulmuştur. Deney düzeneği fotoğraflarının yanında deneyde kullanılan ekipmana ait fotoğraflar da bu bölümde verilmiştir.



Çizelge Ek 1.1 Farklı küre çaplarında değişik elektrot açıklıkları için küreler arasındaki atlama gerilimleri

Küreler arası açıklık (cm)	Maksimum kilovolt değerleri (20 °C; 1013 milibar hava basıncı)											
	Küre Çapı (cm)											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,1	4,7											
0,15	6,4											
0,2	8	8										
0,25	9,6	9,6										
0,3	11,2	11,2										
0,4	14,4	14,3	14,2									
0,5	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,6	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,7	23,2	23,4	23,2	23	23	23						
0,8	25,8	26,3	26,2	26	26	26						
0,9	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1	30,7	32	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	35,1	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	38,5	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	40	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		53	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5					
2		57,5	58,5	59	59	59	59	59	59			
2,2		61,5	63	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		65,5	67,5	69,5	70	70	70	70	70			
2,6		69	72	74,5	75	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		72,5	76	79,5	79,5	80	81	81	81			
3		75,5	79,5	84	85	85,5	86	86	86	86		
3,5		82,5	87,5	95	97	98	99	99	99	90		



Şekil Ek 1.8 Deneysel çalışmada kullanılan metal deney kabı



Şekil Ek 1.9 Geçit izolatörü olarak kullanılan 4 adet yalıtkan destek plaka ve yalıtkan kapağın silindriyel metal deney kabı üzerine yerleştirilmesi.



Şekil Ek 1.10 İletkenlik ölçmek için kullanılan iletkenlik ölçer (Conductivity meter)



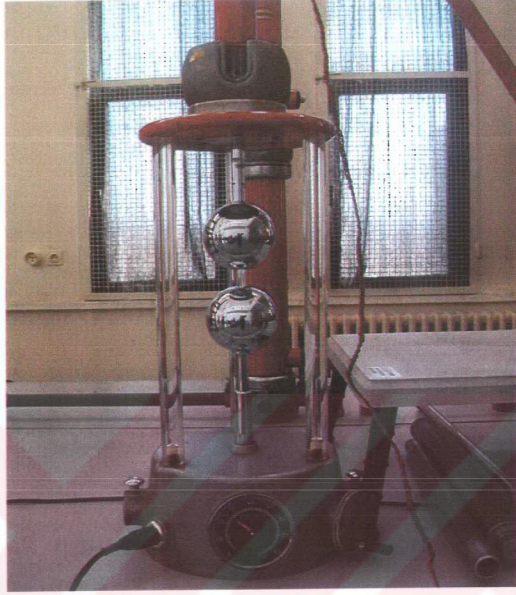
Şekil Ek 1.11 İletkenlik ölçer (Conductivity meter) cihazının yakından görüntüsü



Şekil Ek 1.12 “b” Bağlımlı Darbe generatörünün kumanda masası



Şekil Ek 1.13 Darbe gerilimini ölçmeye yarayan darbe voltmetresi



Şekil Ek 1.14 Darbe generatörü çıkışındaki atlama küreleri



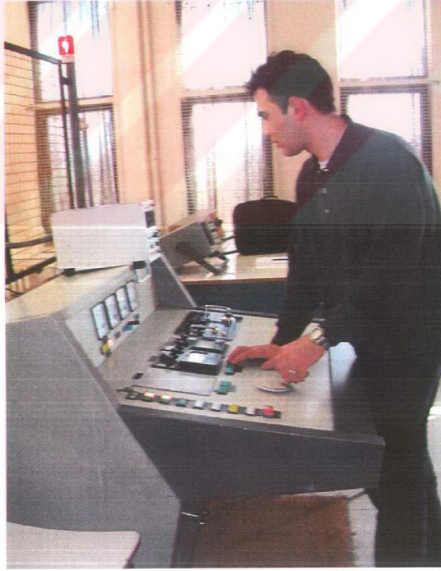
Şekil Ek 1.15 Kumanda masasında yer alan ölçü ampermetre ve voltmetreleri



Şekil Ek 1.16 Kurulu deney düzeneği

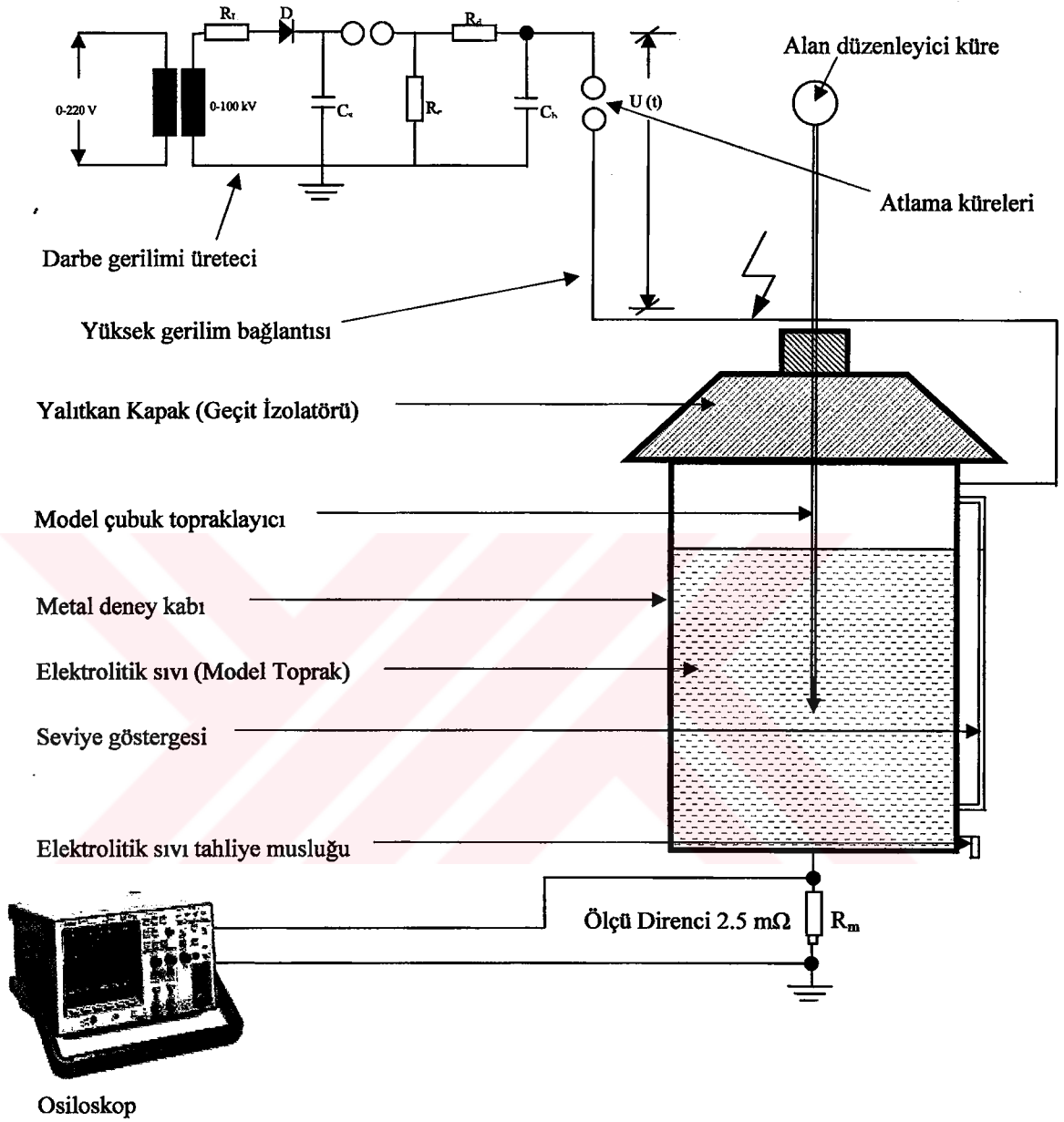


Şekil Ek 1.17 Dijital Osiloskop (Band genişliği 100 MHz)



Şekil Ek 1.18 Deney düzeneğinin kumanda masasından kontrol edilmesi

Ek 1.7 Deney-1 için Kurulan Deney Devresi



Şekil Ek 1.19 Geçici Rejimlerde Topraklama sistemlerinin performans analizi için geliştirilen ve Deney 1 için kullanılan deney devresi

Ek 1.8 Deney-1

Deney-1 başlangıcında deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı, hava basıncı ve yüzde cinsinden ortam bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Çizelge Ek 1.2'in altında verilmiştir.

İlk olarak topraklama sisteminin direkt olarak toprağa bağlı olduğu durumda ölçüm direnci üzerinden geçen akımın direnç üzerinde oluşturduğu gerilimin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bunu sağlayabilmek için darbe generatörünün ölçü kürelerinden toprağa bağlı olan küre ile topraklama modeli için kullanılan silindrsel metal deney kabının gövdesinin temas etmesi sağlanmıştır. Böylece akım yolu içerisinde deney kabı içine konulan elektrolitik sıvı olarak kullanılan çeşme suyunun yer almaması sağlanmıştır. Ölçüm yapılırken pozitif ve negatif darbe olmak üzere iki ayrı darbe gerilimi uygulanmış ve pozitif ve negatif darbe gerilimleri için ölçümler yapıp, ölçüm sonuçları kayıt edilmiştir. Ölçüm küreleri arasındaki havanın darbe gerilimi etkisi ile delinmesi sonucu meydana gelen atlamanın oluşmasından sonra, akım deney kabının gövdesini kullanarak ölçüm direnci üzerinden toprağa akıtılmış ve osiloskoptan ölçüm sonuçları alınarak kayıt edilmiştir.

Deney-1 yapılırken izlenen işlem sırası şu şekildedir; Darbe generatörünün pozitif darbe durumu için; öncelikle 10 cm çaplı ölçü küreleri arasındaki açıklık 0,5 cm ye ayarlanmış ve bu açıklıkta atlamanın gerçekleşeceği darbe gerilimi için ölçü direnci uçlarındaki gerilim çizelgeye kayıt edilmiştir. Daha sonra ölçü küreleri arasındaki açıklık 0,7 cm, 0,9 cm, 1,1 cm, 1,3 cm ve 1,5 cm değerlerine ayarlanarak ölçü direnci uçlarındaki gerilimler kaydedilmiştir. Aynı deney negatif darbe gerilimi için tekrarlanmış ve yine ölçüm sonuçları ayrı bir çizelgeye kaydedilmiştir.

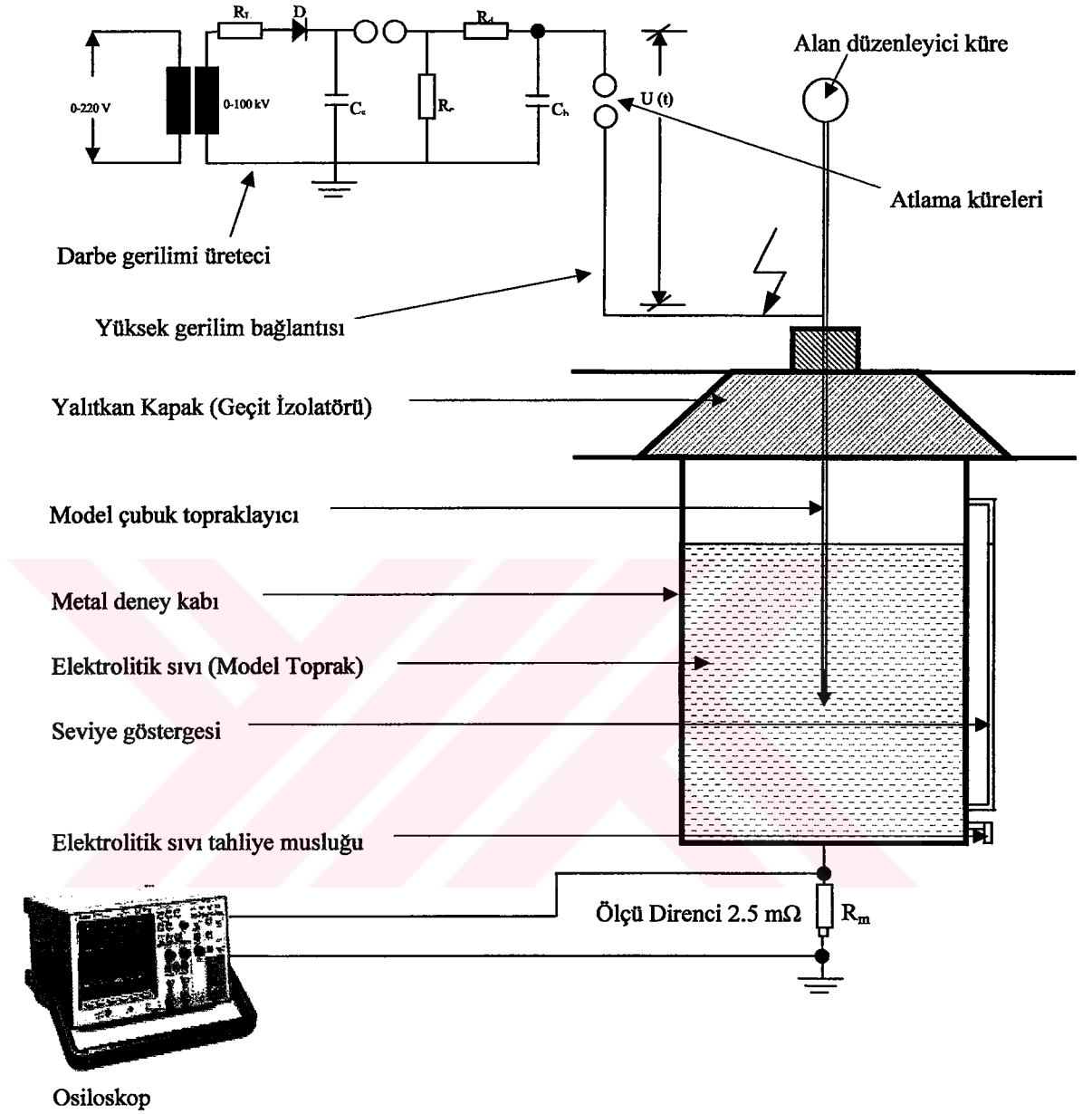
Deney-1 ile topraklama sisteminin direkt olarak toprağa bağlı olduğu durumda ölçüm direnci üzerinden geçen akımın direnç üzerinde oluşturduğu gerilimin ölçülmesi amaçlanmıştır. Böylece topraklama modeli akım yoluna katıldığında, geçen akımın ölçüm direnci üzerinde oluşturduğu gerilim değerlerinin karşılaştırılması mümkün olacaktır.

Çizelge Ek 1.2 Deney-1 için elde edilen ölçüm sonuç değerleri

NEGATİF DARBE		POZİTİF DARBE	
REFERANS TOPRAK		REFERANS TOPRAK	
a: küre açıklığı		a: küre açıklığı	
Rölçme=2,5 mΩ		Rölçme=2,5 mΩ	
a=5 mm	109,1 kV	a=5 mm	106,2 kV
	68,75 kV		79,69 kV
	100,00 kV		84,38 kV
a=7 mm	126,6 kV	a=7 mm	96,88 kV
	125 kV		109,4 kV
	107 kV		132,8 kV
a=9 mm	129,7 kV	a=9 mm	120,3 kV
	165,6 kV		126,6 kV
	112,5 kV		131,2 kV
a=11 mm	164,1 kV	a=11 mm	132,8 kV
	112,5 kV		128,1 kV
	96,88 kV		162,5 kV
a=13 mm	182,8 kV	a=13 mm	159,4 kV
	151,6 kV		173,4 kV
	184,4 kV		159,4 kV
a=15mm	195,3 kV	a=15mm	176,6 kV
	162,5 kV		150 kV
	190,6 kV		118,8 kV

Nem:%54.5, Hava Basıncı:996 hPa, Sıcaklık: 13 °C

Ek 1.9 Deney-2 ve 3 için Kurulan Deney Devresi



Şekil Ek 1.20 Geçici Rejimlerde Topraklama sistemlerinin performans değerlendirmesi için geliştirilen ve Deney 2 ve 3 için kullanılan deney devresi

Ek 1.10 Deney-2

Deney-2 başlangıcında deneyin gerçekleştirildiği ortam sıcaklığı, hava basıncı ve yüzde cinsinden ortam bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Çizelge Ek 1.3'ün altında verilmiştir.

Bu durumda deney kabının içi 65 cm seviyede elektrolitik sıvı olarak çeşme suyu ile dolu iken deney 1 den farklı olarak akımın geçeceği yola topraklama çubuk elektrotu ve deney kabının içindeki çeşme suyu dahil edilmiştir. Topraklama elektrotunun derinliği suyun üst seviyesinden aşağıya doğru 35 cm dir. Bu durumda elektrot, deney kabı tabanından 30 cm yukarıda ve deney kabının ekseninden geçmektedir. Böylece elektrot ucu merkez kabul edilerek bir yarı daire modeli gerçekleştirilmiş ve akım dağılımının nasıl gerçekleşeceği ölçüm ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney-2 yapılırken izlenen işlem sırası şu şekildedir; Darbe generatörünün pozitif darbe durumu için; öncelikle 10 cm çaplı ölçü küreleri arasındaki açıklık 0,5 cm ye ayarlanmış ve bu açıklıkta atlamanın gerçekleşeceği darbe gerilimi için ölçü direnci uçlarındaki gerilim çizelgeye kayıt edilmiştir. Daha sonra ölçü küreleri arasındaki açıklık 0,7 cm, 0,9 cm, 1,1 cm, 1,3 cm ve 1,5 cm değerlerine ayarlanarak ölçü direnci uçlarındaki gerilimler kaydedilmiştir. Aynı deney negatif darbe gerilimi için tekrarlanmış ve yine ölçüm sonuçları ayrı bir çizelgeye kaydedilmiştir.

Çizelge Ek 1.3 Deney-2 için elde edilen ölçüm sonuç değerleri

$\sigma_{su}=440$ micro.siemens/cm			
NEGATİF DARBE		POZİTİF DARBE	
MODEL TOPRAK		MODEL TOPRAK	
a: küre açıklığı		a: küre açıklığı	
Rölçme=2,5 mΩ		Rölçme=2,5 mΩ	
a=5 mm	118,8 kV	a=5 mm	87,5 kV
	139,1 kV		65,62 kV
	118,8 kV		89,06 kV
a=7 mm	123,4 kV	a=7 mm	104,7 kV
	107,8 kV		117,2 kV
	128,1 kV		118,8 kV
a=9 mm	148,4 kV	a=9 mm	120,3 kV
	137,5 kV		126,6 kV
	135,9 kV		104,7 kV
a=11 mm	151,2 kV	a=11 mm	154,7 kV
	156,2 kV		146,9 kV
	162,5 kV		145,3 kV
a=13 mm	123,4 kV	a=13 mm	159,4 kV
	107,8 kV		156,2 kV
	96,88 kV		157,8 kV
a=15mm	137,5 kV	a=15mm	187,5 kV
	175 kV		157,8 kV
	142,2 kV		195,3 kV

Nem:%57, Hava Basıncı:996 hPa, Sıcaklık: 13 °C

Ek 1.11 Deney-3

Deney-3 başlangıcında deneyin gerçekleştiği ortam sıcaklığı, hava basıncı ve yüzde cinsinden ortam bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Çizelge Ek 1.4'ün altında verilmiştir.

Üçüncü olarak yapılan deneyde kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğini arttırmak için sıvıya belirli miktarda sofra tuzu eklenmiş ve sıvının iletkenliği 2 micro.siemens/cm olunca Deney-2'de yapılan işlemler tekrarlanmıştır.

Bu durumda deney kabının içi 65 cm seviyede elektrolitik sıvı olarak çeşme suyu ile dolu iken Deney-1'den farklı olarak akımın geçeceği yola topraklama çubuk elektrotu ve deney kabının içindeki çeşme suyu dahil edilmiştir. Topraklama elektrotunun derinliği suyun üst seviyesinden aşağıya doğru 35 cm dir. Bu durumda elektrod, deney kabı tabanından 30 cm yukarıda ve deney kabının ekseninden geçmektedir. Böylece elektrot ucu merkez kabul edilerek bir yarı daire modeli gerçekleştirilmiş ve akım dağılımının nasıl gerçekleşeceği ölçüm ile belirlenmeye çalışılmıştır.

Deney-3 yapılırken izlenen işlem sırası şu şekildedir; Darbe generatörünün pozitif darbe durumu için; öncelikle 10 cm çaplı ölçü küreleri arasındaki açıklık 0,5 cm ye ayarlanmış ve bu açıklıkta atlamanın gerçekleşeceği darbe gerilimi için ölçü direnci uçlarındaki gerilim çizelgeye kayıt edilmiştir. Daha sonra ölçü küreleri arasındaki açıklık 0,7 cm, 0,9 cm, 1,1 cm, 1,3 cm ve 1,5 cm değerlerine ayarlanarak ölçü direnci uçlarındaki gerilimler kaydedilmiştir. Aynı deney negatif darbe gerilimi için tekrarlanmış ve yine ölçüm sonuçları ayrı bir çizelgeye kaydedilmiştir.

Çizelge Ek 1.4 Deney-3 için elde edilen ölçüm sonuç değerleri

$\sigma_{su} = 2 \text{ micro.siemens/cm}$			
NEGATİF DARBE		POZİTİF DARBE	
MODEL TOPRAK		MODEL TOPRAK	
a: küre açıklığı		a: küre açıklığı	
Rölçme=2,5 mΩ		Rölçme=2,5 mΩ	
a=5 mm	57,81 kV	a=5 mm	71,88 kV
	90,62 kV		75 kV
	92,19 kV		93,75 kV
a=7 mm	106,2 kV	a=7 mm	128,1 kV
	125 kV		98,44 kV
	121,9 kV		109,4 kV
a=9 mm	154,7 kV	a=9 mm	126,6 kV
	120,3 kV		118,8 kV
	168,8 kV		132,8 kV
a=11 mm	132,8 kV	a=11 mm	151,6 kV
	139,1 kV		165,6 kV
	145,3 kV		148,4 kV
a=13 mm	143,8 kV	a=13 mm	175 kV
	156,2 kV		162,5 kV
	193,8 kV		167,2 kV
a=15mm	157,8 kV	a=15mm	150 kV
	181,2 kV		140,6 kV
	173,4 kV		156,2 kV

Nem:%57, Hava Basıncı:996 hPa, Sıcaklık: 13 °C

Ek 2 SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Sonlu farklar yöntemi, kısmi türevli denklemlerin çözümünde kullanılan bir sayısal yöntemdir. Yöntem, diferansiyel denklemlerdeki türevler yerine sonlu fark karşılıklarının kullanılmasına dayanır. Başlangıcı C. F. Gauss'a (1777-1855) kadar uzanan bu yöntem, Boltzmann'ın 1892'de Münih'te öğrencilerine Laplace denkleminin çözümünde fark denklemlerinin kullanımını göstermiş olmasına rağmen, 1940'lardan sonra yaygın olarak kullanılmaya başlamış bir yöntemdir. Literatürde SFY ile genel kısmi türevli denklemlerin çözümü ve elektrik ve magnetik alan problemlerinin incelenmesi üzerine pekçok çalışma bulunmaktadır. SFY yönteminin, basit aritmetik ve trigonometrik bilgi ile uygulanabilmesi, direnç benzetim yöntemi ile benzerliği ve bilgisayara kolay uyarlanıp programlanabilmesi, bu sayısal yöntemin daha kolay anlaşılmasını ve yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Kolaylıkla anlaşılması bakımından burada öncelikle Laplace ve Poisson denklemlerini sağlayan iki boyutlu problemlerin sonlu farklar yöntemi ile çözümü açıklanacaktır. SFY ile bir alan problemleri, sınır koşulları verilen, yani sınırları üzerinde bazı alan büyüklükleri bilinen, sınırlı bir bölge içinde incelenir. Göz önüne alınan bölgede potansiyel dağılımının sürekli olduğu kabul edilir. Elektrik alan dağılımının bulunacağı bölgede belirli noktalar için yazılan sonlu fark eşitliklerinin oluşturduğu doğrusal denklem sisteminin çözülmesiyle bu noktalardaki potansiyel değerleri elde edilir. Bu değerlerden yararlanılarak eş potansiyel çizgileri çizilebilir, alan dağılımı elde edilebilir, alan şiddetinin maksimum olduğu nokta bulunabilir. Ancak her sayısal işlemle sınırlı bilgi sağlanabilir. Bölgedeki veya küçük bir bölümündeki alan bilgilerini elde edebilmek için, bölgede öncelikle düğüm noktaları adı verilen belirli noktaların gösterilmesi gerekir. Bu noktalar, bölge üzerine çizilen ağ veya ızgaranın düğüm noktalarıdır. SFY'de, genel olarak düzgün gözlerden oluşan ağlar kullanılır. Düzgün olmayan bir ağ ile türevsel denkleme karşılık fark denklemlerinin yazımı ve çözümü zorluk gösterir. Bu nedenle sayısal hesaplarda düzgün olmayan ağ ile çalışılmaktan kaçınılır. Bir bölgeyi örten bir ağ, kare, üçgen, altıgen veya çokgen(poligon) gözlerden oluşabilir. Fakat genelde düzgün bir ağın gözleri, kare veya eşkenar üçgendir. Bu kare veya üçgen gözlerden oluşan ağlar her zaman problemin sınırları içine tam olarak uymayabilir. Bu yüzden, öncelikle düğümleri sınırlara yerleştirilebilen ve bölgeye uyan dikkörtgen gözlerden oluşmuş bir ağ için fark denklemleri çıkarılacaktır. Kare, dikkörtgenin özel bir durumu olduğundan, elde edilen sonuçlar istenirse kare gözlü ağlara uygulanabilir. Bu çıkarımla düzensiz ağ kullanmanın getireceği zorluklar da görülmüş olacaktır (Kalenderli, 2003).

Sonlu Farklar yöntemi ile çözümde, ayrık noktalar kümesinde çözüm elde etmek için sayısal

çözümlemede geniş kullanım alanına sahip olan sonlu fark işlemlerinden yararlanılır. Bu yöntemde sonlu fark işlemlerinin ileri, geri ve merkezi sonlu farklar gibi farklı türleri kullanılarak çözüm yapılabilir. Sonlu fark işlemleri, kısaca, yapılan fark işleminin türünü gösteren işlemler ile gösterilebilir. İleri fark Δ (büyük delta) işleci ile, geri fark ∇ (nabla) işleci ile ve merkezi fark δ (küçük delta) işleci ile gösterilirse, sırasıyla bir $f(x)$ işlevi için genel olarak birinci mertebeden ileri fark;

$$\Delta f_i = f_{i+1} - f_i \quad (\text{Ek 2.1})$$

ikinci mertebeden ileri fark,

$$\Delta^2 f_i = f_{i+2} - 2f_{i+1} + f_i \quad (\text{Ek 2.2})$$

n. mertebeden ileri fark,

$$\Delta^n f_i = \Delta(\Delta^{n-1} f_i) = \Delta^{n-1} f_{i+1} - \Delta^{n-1} f_i \quad (\text{Ek 2.3})$$

birinci mertebeden geri fark,

$$\nabla f_i = f_i - f_{i-1} \quad (\text{Ek 2.4})$$

ikinci mertebeden geri fark,

$$\nabla^2 f_i = f_i - 2f_{i-1} + f_{i-2} \quad (\text{Ek 2.5})$$

n. mertebeden geri fark,

$$\nabla^n f_i = \nabla^{n-1} f_i - \nabla^{n-1} f_{i-1} \quad (\text{Ek 2.6})$$

birinci mertebeden merkezi fark,

$$\delta f_i = \delta f_{i+1/2} - \delta f_{i-1/2} \quad (\text{Ek 2.7})$$

n. mertebeden merkezi fark,

$$\delta^n f_i = \delta^{n-1} f_{i+1/2} - \delta^{n-1} f_{i-1/2} \quad (\text{Ek 2.8})$$

olarak tanımlanır. İndisli notasyonla yapılan bu tanımlamalarda, h noktalar arasındaki uzaklığı veya fark aralığını veya adım büyüklüğünü göstermek üzere;

$$f_i = f(x)$$

$$f_{i+1} = f(x+h)$$

$$f_{i-1} = f(x-h)$$

$$f_{i+1/2} = f(x+h/2)$$

$$f_{i-1/2} = f(x-h/2)$$

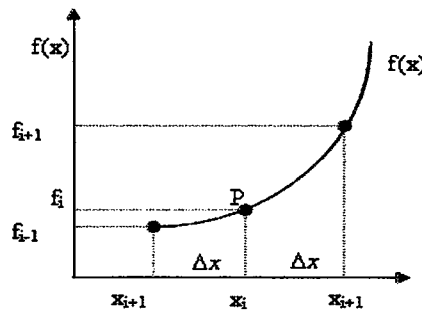
(Ek 2.9)

dir.

Çizelge Ek 2.1’de birinci mertebeden sonlu farklar algoritmasına göre, örnek olarak çok kullanılan, birinci ve ikinci mertebe türev tanımları verilmiştir. Şekil Ek 2.1 bu tanımlardaki notasyonun ve yapılan işlemlerin anlaşılmasına yardımcı olması amacıyla çizilmiştir.

Çizelge Ek 2.1 Birinci mertebeden sonlu farklar algoritmasına göre türev tanımları

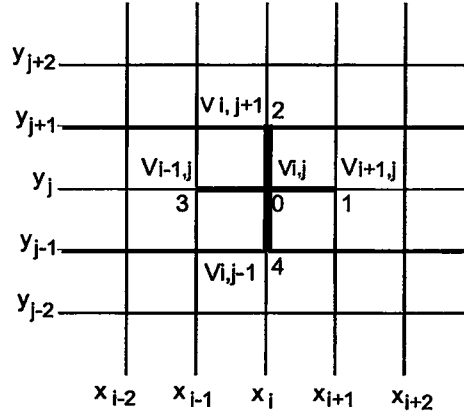
Sonlu farklar	Birinci mertebe türev	İkinci mertebe türev
İleri farklar	$\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f_{i+1} - f_i}{ x_{i+1} - x_i } = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x}$	$\frac{d^2 f}{dx^2} \cong \frac{f_{i+2} - 2f_{i+1} - f_i}{(\Delta x)^2}$
Geri farklar	$\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f_i - f_{i-1}}{ x_i - x_{i-1} } = \frac{f_i - f_{i-1}}{\Delta x}$	$\frac{d^2 f}{dx^2} \cong \frac{f_i - 2f_{i-1} + f_{i-2}}{(\Delta x)^2}$
Merkezi farklar	$\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f_{i+1} - f_i}{ x_{i+1} - x_{i-1} } = \frac{f_{i+1} - f_{i-1}}{2\Delta x}$	$\frac{d^2 f}{dx^2} \cong \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{(\Delta x)^2}$



Şekil Ek 2.1 Türevin tanımı

Ek 2.1 Sonlu Farklar Yöntemi İle Statik Elektrik Alan Hesabı

Sonlu farklar yönteminde, tüm sınır koşullarının verilmesi ve incelenecek bölgenin kapalı bir bölge olması gerekmektedir. Bu yöntemle göre incelenecek bölge, öncelikle, dikdörtgen, kare, üçgen gibi şekillere sahip gözlerden oluşan bir ağ ile bölünür.



Şekil Ek 2.2 Dikdörtgen gözlü ağ parçası

Şekil Ek 2.2’de x-y düzleminde, kenarları x ve y eksenleri paralel dikdörtgen gözlerden oluşmuş düzgün olmayan bir ağ parçası gösterilmiştir. Yatay ve düşey çizgilerin kesişim noktaları ağın düğüm noktalarını oluşturur. Ağ, problemin tipine göre bölgenin bazı yerlerinde daha küçük ya da daha büyük gözlerden oluşturulabilir. Daha sonra ağ üzerindeki her bir düğümün potansiyeli, komşu düğümlerin potansiyellerine bağlı olarak yazılır. Böylece bu işlem her düğüm için yapıldığında düğüm potansiyelleri için çözülmesi gereken bir doğrusal denklem takımı elde edilir.

Kartezyen koordinatlarda bir düğüme ilişkin potansiyel bağıntısını yazmak için; öncelikle Laplace denkleminin Taylor serisi yardımıyla fark denklemi biçiminde yazımını bilmek gerekir. Bu yazımı elde etmek için bir $f(x)$ işlevinin bir x_n noktasında ileriye ve geriye doğru Taylor serisine açılımları olan

$$f(x_n + h) = f(x_n) + hf'(x_n) + \frac{h^2}{2!} f''(x_n) + \frac{h^3}{3!} f'''(x_n) + \dots$$

$$f(x_n - h) = f(x_n) - hf'(x_n) + \frac{h^2}{2!} f''(x_n) - \frac{h^3}{3!} f'''(x_n) + \dots$$

(Ek 2.10)

açılımları göz önüne alınır. Bu iki denklem taraf tarafa toplanır ve ikinci türeve göre düzenlenirse ikinci türev için merkezi fark denklemi

$$f''(x_n) = \frac{[f(x_n + h) - 2f(x_n) + f(x_n - h)]}{h^2} + R(h^2) = \frac{d^2 f}{dx^2} \Big|_{x=x_n} \quad (\text{Ek 2.11})$$

elde edilir. Burada, $R(h^2)$ ikinci mertebeden türevin sonlu fark yazılımında açılımın alınmayan terimlerinden gelen kesme hatasını göstermektedir. Bu hata serinin ihmal edilen kısmının ilk ve en büyük terimine eşit olarak alınabilir. Denklem (Ek 2.11) y sabit tutularak x için yazılmıştır. Benzer şekilde x sabit tutularak y için de yazılabilir (Kalenderli, 2003).

$$f''(y_n) = \frac{[f(y_n + h) - 2f(y_n) + f(y_n - h)]}{k^2} + R(h^2) = \frac{d^2 f}{dy^2} \Big|_{y=y_n} \quad (\text{Ek 2.12})$$

Kartezyen koordinat sisteminde Laplace denklemi,

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{Ek 2.13})$$

dir. Bu denklemde ikinci mertebeden türevler yerine yukarıda yazılan sonlu fark eşitleri kullanılarak denklem sonlu fark denklemi biçimine getirilebilir. Buna göre Laplace denkleminin indisli notasyonla sonlu fark denklemi biçiminde yazılımı,

$$\nabla^2 V_{i,j} = \frac{(V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j})}{h^2} + \frac{(V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1})}{k^2} = 0 \quad (\text{Ek 2.14})$$

olur. Bağıntılarda; h, x yönündeki artım (adım büyüklüğü) ve k, y yönündeki artımdır. Genelde problemin çözümünde kolaylık sağlaması ve düzgün(kare gözlü) bir ağ çalışmak bakımından $k=h$ seçilir. Bu durumda Laplace denkleminin sonlu fark yazılımı,

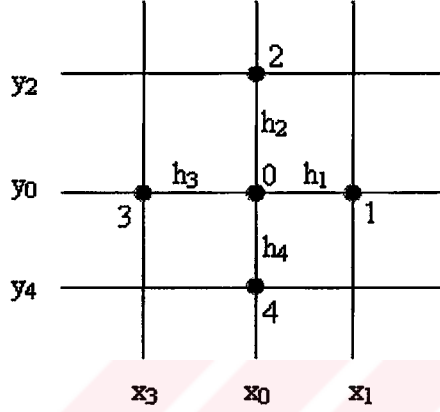
$$\nabla^2 V_{i,j} = \frac{1}{h^2} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} - 4V_{i,j}) = 0 \quad (\text{Ek 2.15})$$

olur. Bu eşitlikten

$$V_{i,j} = \frac{1}{4} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1}) \quad (\text{Ek 2.16})$$

yazılabilir. Bu eşitlikten de görüldüğü gibi bir noktadaki potansiyelin bulunmasında bizi özellikle birbirine komşu beş nokta ilgilendirir.

Bu bağıntı daha genel olarak bütün göz kenar uzunluklarının (dört yöndeki adım büyüklüklerinin) farklı olması durumu için şu şekilde elde edilebilir. Örneğin Şekil Ek 2.3'te görüldüğü gibi 1, 2, 3 ve 4 bir 0 noktasına komşu dört nokta olsun. Bu noktaların $V(1)$, $V(2)$, $V(3)$ ve $V(4)$ potansiyellerinin verilen sınır koşullarından veya diğer hesap sonuçlarından bilindiğini kabul edilsin.



Şekil Ek 2.3 Düzgün olmayan ağ

Bölge içinde potansiyel sürekli olduğundan, herhangi bir (x,y) noktasındaki potansiyeli Taylor serisine açmak mümkündür. Bu nokta, 0 noktası ile aynı nokta ise, x ve y değişkenleri cinsinden (iki boyutlu) seri

$$\begin{aligned}
 V(x,y) = & V(x_0,y_0) + \frac{1}{1!}[(x-x_0)V_x(x_0,y_0) + (y-y_0)V_y(x_0,y_0)] \\
 & + \frac{1}{2!}[(x-x_0)^2 V_{xx}(x_0,y_0) + 2(x-x_0)(y-y_0)V_{xy}(x_0,y_0) + (y-y_0)^2 V_{yy}(x_0,y_0)] \\
 & + \frac{1}{3!}[(x-x_0)^3 V_{xxx}(x_0,y_0) + 3(x-x_0)^2(y-y_0)V_{xxy}(x_0,y_0) \\
 & + 3(x-x_0)(y-y_0)^2 V_{xyy}(x_0,y_0) + (y-y_0)^3 V_{yyy}(x_0,y_0)] + R_{xy}(x_0,y_0)
 \end{aligned} \tag{Ek 2.17}$$

olacaktır. Burada da $R_{xy}(x_0,y_0)$ terimi, serinin geri kalan daha yüksek dereceli terimlerinin toplamını göstermektedir. Bu eşitlikteki türevler

$$V_x(x_0, y_0) = \left[\frac{\partial V(x, y)}{\partial x} \right]_{x_0, y_0}, V_y(x_0, y_0) = \left[\frac{\partial V(x, y)}{\partial y} \right]_{x_0, y_0}, V_{xy}(x_0, y_0) = \left[\frac{\partial^2 V(x, y)}{\partial x \partial y} \right]_{x_0, y_0}, \text{vb.}$$

Şeklinde kısaltılmıştır. (x_0, y_0) düğümü civarında Taylor serisi şeklinde yazılan $V(x, y)$ potansiyel eşitliğinde, üçüncü mertebeden türevleri içeren terimler, küçük bir h uzunluğunun üç veya daha büyük kuvvetleri ile çarpıldığından ihmal edilirse, denklem (Ek 2.17) yeterli doğrulukla yeniden yazılabilir. Böylece, 1, 2, 3 ve 4 düğümlerinin potansiyelleri, $(x - x_0)$ ve $(y - y_0)$ uzunlukları yerine h_1, h_2, h_3 ve h_4 yazılarak aşağıdaki denklemlerle verilebilir.

$$V(1) = V(x_0, y_0) + h_1 V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_1^2 V_{xx}(x_0, y_0) \quad (\text{Ek 2.18})$$

$$V(2) = V(x_0, y_0) + h_2 V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_2^2 V_{yy}(x_0, y_0) \quad (\text{Ek 2.19})$$

$$V(3) = V(x_0, y_0) + h_3 V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_3^2 V_{xx}(x_0, y_0) \quad (\text{Ek 2.20})$$

$$V(4) = V(x_0, y_0) + h_4 V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_4^2 V_{yy}(x_0, y_0) \quad (\text{Ek 2.21})$$

Sırasıyla (Ek 2.18) ile (Ek 2.20)'nin ve (Ek 2.19) ile (Ek 2.21)'in toplamlarından aşağıdaki iki denklem elde edilir.

$$V(1) + V(3) - 2V(x_0, y_0) = (h_1 - h_3) V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2} (h_1^2 + h_3^2) V_{xx}(x_0, y_0) \quad (\text{Ek 2.22})$$

$$V(2) + V(4) - 2V(x_0, y_0) = (h_2 - h_4) V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} (h_2^2 + h_4^2) V_{yy}(x_0, y_0) \quad (\text{Ek 2.23})$$

$V_x(x_0, y_0)$ ve $V_y(x_0, y_0)$ türevleri, birinci dereceden yaklaşıklıkları ile verilebilir.

$$\begin{aligned} V_x(x_0, y_0) &= \frac{\frac{h_3}{h_1} [V(1) - V(x_0, y_0)] + \frac{h_1}{h_3} [V(x_0, y_0) - V(3)]}{(h_1 + h_3)} \\ &= \frac{h_3}{h_1(h_1 + h_3)} V(1) + \frac{(h_1 - h_3)}{h_1 h_3} V(x_0, y_0) - \frac{h_1}{h_3(h_1 + h_3)} V(3) \end{aligned} \quad (\text{Ek 2.24})$$

$$V_y(x_0, y_0) = \frac{\frac{h_4}{h_2} [V(2) - V(x_0, y_0)] + \frac{h_2}{h_4} [V(x_0, y_0) - V(4)]}{(h_2 + h_4)}$$

$$= \frac{h_4}{h_2(h_2 + h_4)} V(2) + \frac{(h_2 - h_4)}{h_2 h_4} V(x_0, y_0) - \frac{h_1}{h_4(h_2 + h_4)} V(4) \quad (\text{Ek 2.25})$$

(Ek 2.24) denklemi (Ek 2.22)'de ve (Ek 2.25) denklemi (Ek 2.23)'de yerine konursa, sonuçta x'e ve y'ye göre ikinci mertebe türevlerin genel olarak sonlu fark eşitlikleri

$$V_{xx}(x_0, y_0) = \frac{2V(1)}{h_1(h_1 + h_3)} + \frac{2V(3)}{h_3(h_1 + h_3)} - \frac{2V(x_0, y_0)}{h_1 h_3}, \quad (\text{Ek 2.26})$$

$$V_{yy}(x_0, y_0) = \frac{2V(2)}{h_2(h_2 + h_4)} + \frac{2V(4)}{h_4(h_2 + h_4)} - \frac{2V(x_0, y_0)}{h_2 h_4} \quad (\text{Ek 2.27})$$

elde edilir. Artık, (x_0, y_0) noktası için, potansiyel işlevinin x'e ve y'ye göre ikinci türevlerin bu yaklaşık eşitlikleri ile Laplace ve Poisson denklemlerini çözmek mümkündür.

$$\nabla^2 V = V_{xx} + V_{yy} = 0 \quad \text{Laplace denklemi}$$

$$\nabla^2 V = V_{xx} + V_{yy} = -f(x, y) \quad \text{Poisson denklemi} \quad (\text{Ek 2.28})$$

Burada $f(x, y) = \rho / \varepsilon$, olup ε ortamın dielektrik sabiti, ρ da ortamdaki elektriksel yük yoğunluğudur. Türevlerin sonlu fark yaklaşıklıkları örneğin Poisson denkleminde yerine yazılacak olursa,

$$D_1 V(1) + D_2 V(2) + D_3 V(3) + D_4 V(4) + D V(x_0, y_0) + \frac{1}{2} f(x_0, y_0) = 0 \quad (\text{Ek 2.29})$$

elde edilir. Bu eşitlikte

$$D_1 = \frac{1}{h_1(h_1 + h_3)}, \quad D_2 = \frac{1}{h_2(h_2 + h_4)}$$

$$D_3 = \frac{1}{h_3(h_1 + h_3)}, \quad D_4 = \frac{1}{h_4(h_2 + h_4)}$$

$$D = -\left(\frac{1}{h_1 h_3} + \frac{1}{h_2 h_4} \right) \quad (\text{Ek 2.30})$$

dir.

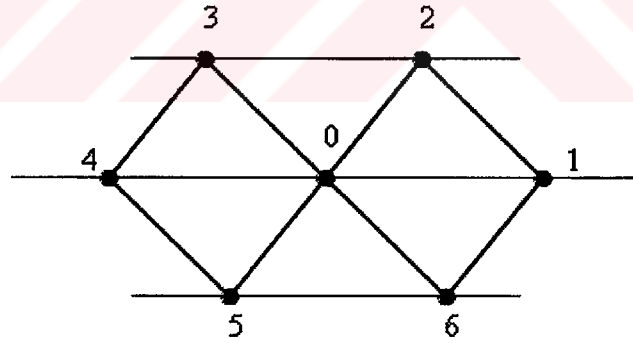
(Ek 2.29) eşitliği, Poisson denkleminin sonlu fark denklemi biçiminde yazılmış karşılığıdır. Ancak bu eşitlik gözönüne alınan (x_0, y_0) noktası için yazılmıştır. Bir problemin çözümü için bu tür bir denklemin ağdaki her bir düğüm noktası için benzer şekilde yazılması gerekir.

Diğer bilgileri vermeden önce, burada da daha önce yapılan genel basitleştirmeden söz edilecektir. İki boyutlu problemlerin çoğunda, alanın incelendiği bölge kare gözlerden oluşmuş düzgün bir ağ ile bölmelendirilir. Bu durumda $h_1=h_2=h_3=h_4=h$ olacağından (Ek 2.29) eşitliği

$$V(1) + V(2) + V(3) + V(4) - 4V(x_0, y_0) + h^2 \cdot f(x_0, y_0) = 0 \quad (\text{Ek 2.31})$$

şeklinde kısılır.

Denklem (Ek 2.29)'a benzer fark denklemleri, hazır çıkarılmış bağıntılardan da yararlanılarak ağdaki diğer düğümler için yazılabilir. Bütün durumlarda, bilinmeyen $V(x_0, y_0)$ potansiyeli, fark denkleminde bilindiği kabul edilen, çevresindeki potansiyeller yardımı ile belirlenir. Bu ilkeye göre örneğin, düzgün(eşkenar) üçgen gözlerden oluşan Şekil Ek 2.4'deki gibi bir ağda Laplace denkleminin sonlu fark denklemi biçiminde yazılımı



Şekil Ek 2.4 Üçgen gözlü ağ.

$$V_0 = \frac{1}{6}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6) \quad (\text{Ek 2.32})$$

biçiminde olur.

Kısmi türevli denklemlerin sonlu fark denklemi biçiminde tanımlanmasında bir yaklaşıklık yapılmaktadır. Bu yaklaşıklıkta hata örneğin

$$V_{i+1,j} = V_{i,j} + h \left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{i,j} + \frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{i,j} + \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \right|_{i,j} + \dots \quad (\text{Ek 2.33})$$

şeklindeki bir Taylor açılımından yararlanılarak elde edilebilir. Bu Taylor açılımından birinci türev

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{V_{i+1,j} - V_{i,j}}{h} - \frac{1}{h} \left(\frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{i,j} + \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \right|_{i,j} + \dots \right) \quad (\text{Ek 2.34})$$

olarak yazılabilir. Burada eşitliğin sağındaki birinci terim türevin ileri fark eşiti olarak alınır, yapılan kesme hatası

$$H = -\frac{1}{h} \left(\frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{i,j} + \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \right|_{i,j} + \dots \right) \quad (\text{Ek 2.35})$$

olur. Benzer biçimde geri fark işleminde yapılan hata da

$$H = \frac{1}{h} \left(\frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{i,j} - \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \right|_{i,j} + \dots \right) \quad (\text{Ek 2.36})$$

olarak bulunur. Görüldüğü gibi hatalar h 'nin büyüklüğüne bağlıdır. Genelde h küçük seçilerek hatalar azaltılabilir. Bu hatalar, kesme hatası olarak bilinir ve h değerleri özel olarak seçilmemişse bu hatanın doğru bir şekilde belirlenmesi yöntemin doğruluğu bakımından önemlidir.

(Ek 2.31) fark denkleminin sayısal olarak çözümü basit fakat zaman alıcıdır. Sınırlarında, örneğin potansiyelleri bilinen elektrot sınırlarında, düzgün olmayan elemanlarla tanımlanmış herhangi bir alan problemi çözülürken, ağ düzlemin sınırlı küçük bir bölgesinde (özel durumlarda karelere bölünerek daha düzgün bir ağ şekline getirilir. Ağın tamamı, $V(x_0, y_0)$ potansiyelleri bilinmeyen n düğümden oluşur. Kare gözlerden oluşan bir ağda, fark denklemlerindeki katsayılarının çoğu birbirine eşit olacağından, denklem (Ek 2.29)'a uygun n adet benzer denklemlerden oluşan bir denklem sistemi elde edilir. Böyle bir denklem sistemi matris şeklinde yazılabilir.

$$[A] \times [x] = [B] \quad (\text{Ek 2.37})$$

Burada $[A]$ $n \times n$ boyutlu katsayılar matrisi, $[x]$ bilinmeyen potansiyellerden oluşan sütun

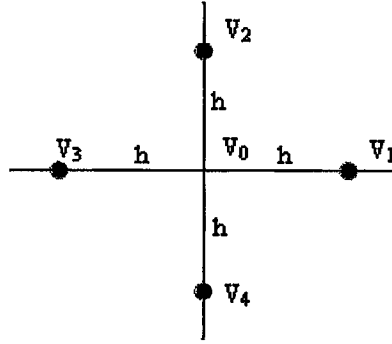
matris ve [B] (Poisson denklemi için) $f(x_o, y_o)/2$ terimleri ile bilinen potansiyellerin toplamından oluşan sütun matristir. [A] matrisinin her satırında az sayıda terim vardır ve bu matris köşegene göre simetrik bir matristir.

Ağdaki düğüm sayısı ile orantılı olarak bilinmeyenlerin sayısı genelde çok büyük olduğundan, yöntemde çok büyük boyutlu doğrusal denklem sistemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Genellikle bu doğrusal denklem sistemlerinin doğrudan çözülmesi yoluna gidilmez. Ayrıca katsayılar matrisi genellikle seyrek bir matris olduğundan, doğrudan çözüm yöntemlerinin kullanılması bilgisayarda çözüm süresinin uzamasına ve büyük bellek gereksinimine yol açar. Bu durumda genellikle katsayılar matrisinin tamamını bellekte saklamayı gerektirmeyen dolaylı(iteratif)yöntemler kullanılır. Düğüm sayısı az olan basit problemlerde, katsayılar ve potansiyeller doğrudan elle hesaplanabilir. Bu durum nedeniyle bilgisayarların kullanılmaya başlamasından önce SFY daha basit problemlere uygulanıyordu. Fakat daha büyük problemlerin çözümü için bilgisayar ile hesap yapmak gerekir.

Ek 2.2 Yalıtkan-Yalıtkan Arakesitinde Laplace Denkleminin Sonlu Fark Yazılı

Bu bölümde, dielektrik sabitleri farklı ortamların arakesitlerindeki elektrik alanların incelenmesinde söz edilecektir. Dielektrik sabitleri alanın yönüne bağlı olmayan (izotrop) ortamlarda hesap yapmada esas olarak bir zorluk yoktur. Bu, Laplace denklemi ($f=0$) şeklinde yazılmış (Ek 2.29) denklemini ϵ ile çarparak kolaylıkla yapılabilir. Şimdi dielektrik sabitleri ϵ_1 ve ϵ_2 olan iki farklı yalıtkan ortamın arakesitinde 1, 0 ve 3 düğüm noktalarının ve ϵ_1 'li ortamda 2 düğümünün, ϵ_2 'li ortamda da 4 düğümünün olduğunu varsayalım. Sınır yüzeyde (arakesitte)potansiyelin sürekli olduğu düşünülürse, deplasman vektörünün yalnızca normal bileşeni söz konusudur. Sınır üzerindeki noktalarda bileşke alan, iki Laplace alanının birleşiminden oluşturulabilir. Bu ilke, denklem(Ek 2.29)'a uygulanırsa sınır üzerindeki bir nokta için sonlu fark denklemi bulunabilir.

Sonlu farklar yönteminde göre Laplace denkleminde bir noktanın kendisine komşu dört düğümün potansiyeli ile ilişkisi

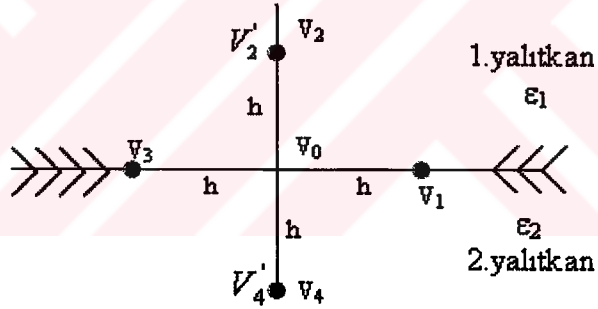


$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.38})$$

veya

$$V_0 = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (\text{Ek 2.39})$$

bağıntısı ile verilir. Bu temel bağıntıdan yararlanarak iki yalıtkanın arakesitindeki noktalar için bu bağıntının yazılımı şu şekilde elde edilir.



Arakesitte V_0 noktasının potansiyeli

1) ϵ_1 yanı için

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4' - 4V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.40})$$

2) ϵ_2 yanı için

$$V_1 + V_2' + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.41})$$

olarak yazılır.

Elektrik alan şiddetinin arakesite dik bileşenleri

1) ϵ_1 yanı için

$$E_{n1} = \frac{V_2 - V_4'}{2h} \quad (\text{Ek 2.42})$$

2) ϵ_2 yanı için

$$E_{n2} = \frac{V_2' - V_4}{2h} \quad (\text{Ek 2.43})$$

olur.

Arakesitte $D_{n1} = D_{n2}$ olacağından

$$\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2} \quad (\text{Ek 2.44})$$

$$\epsilon_1 \frac{V_2 - V_4'}{2h} = \epsilon_2 \frac{V_2' - V_4}{2h} \rightarrow \epsilon_1 (V_2 - V_4') = \epsilon_2 (V_2' - V_4) \quad (\text{Ek 2.45})$$

$$V_2' = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} (V_2 - V_4') + V_4 \quad (\text{Ek 2.46})$$

olur ve bu son eşitlik (Ek 2.41) eşitliğinde yerine koyulursa

$$V_1 + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_2 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_4' + V_4 \right) + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.47})$$

$$V_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_2 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_4' + V_3 + 2V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.48})$$

olur. Buradan

$$V_4' = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} V_1 + V_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} V_3 + \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1} V_4 - 4 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} V_0 \quad (\text{Ek 2.49})$$

elde edilir. Bu (Ek 2.40) eşitliğinde yerine koyulursa

$$V_1 + V_2 + V_3 + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} V_1 + V_2 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} V_3 + \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1} V_4 - 4 \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} V_0 \right) - 4V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.50})$$

$$\left(1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) V_1 + 2V_2 + \left(1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) V_3 + \frac{2\epsilon_2}{\epsilon_1} V_4 - 4 \left(1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \right) V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.51})$$

eşitliğin her iki yanını $1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ ile bölünürse

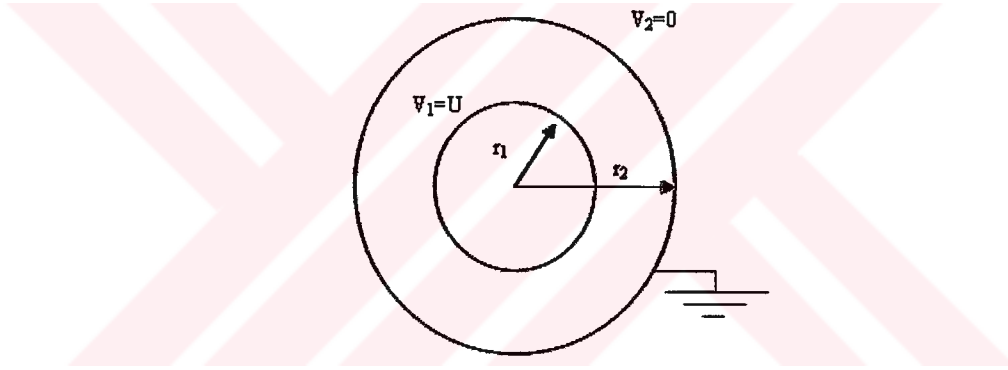
$$V_1 + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_2 + V_3 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{Ek 2.52})$$

ve

$$V_0 = \frac{1}{4} \left(V_1 + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_2 + V_3 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_4 \right) \quad (\text{Ek 2.53})$$

elde edilir.

Ek 2.3 Silindrisel koordinatlarda Laplace denkleminin sonlu farklar yazılımı



Şekil Ek 2.5 Eşeksenli silindrisel elektrot sistemi

Silindrisel koordinatlarda bir boyutlu Laplace denklemi:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (\text{Ek 2.54})$$

ve bu denklemin analitik çözüm

$$V = \frac{U}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{Ek 2.55})$$

dir. Laplace denklemini sonlu fark denklemine dönüştürmek için denklemdaki türev terimleri yerine sonlu fark karşılıklarını yazmak gerekir. Bunun için uygulanan sonlu fark işlemi türüne

göre Laplace denklemi üç türlü sonlu fark denklemi şeklinde yazılabilir.

1) İleri farklarla yazım:

$$\frac{\partial V}{\partial r} \cong \frac{V(r+h) - V(r)}{h} \quad (\text{Ek 2.56})$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cong \frac{V(r+2h) - 2V(r+h) + V(r)}{h^2} \quad (\text{Ek 2.57})$$

Laplace denklemi:

$$\frac{V(r+2h) - 2V(r+h) + V(r)}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{V(r+h) - V(r)}{h} = 0 \quad (\text{Ek 2.58})$$

veya

$$V(r+2h) - 2V(r+h) + V(r) + \frac{h}{r} [V(r+h) - V(r)] = 0 \quad (\text{Ek 2.59})$$

2) Merkezi farklarla yazılım:

$$\frac{\partial V}{\partial r} \cong \frac{V(r+h) - V(r-h)}{2h} \quad (\text{Ek 2.60})$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cong \frac{V(r+h) - 2V(r) + V(r-h)}{h^2} \quad (\text{Ek 2.61})$$

Laplace denklemi:

$$\frac{V(r+h) - 2V(r) + V(r-h)}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{V(r+h) - V(r-h)}{2h} = 0 \quad (\text{Ek 2.62})$$

veya

$$V(r+h) - 2V(r) + V(r-h) + \frac{h}{2r} [V(r+h) - V(r-h)] = 0 \quad (\text{Ek 2.63})$$

3) Geri farklarla yazılım:

$$\frac{\partial V}{\partial r} \cong \frac{V(r) - V(r-h)}{h} \quad (\text{Ek 2.64})$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cong \frac{V(r) - 2V(r-h) + V(r-2h)}{h^2} \quad (\text{Ek 2.65})$$

Laplace denklemi:

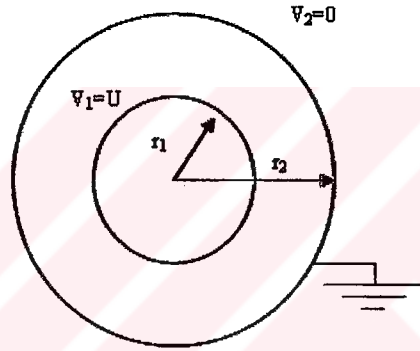
$$\frac{V(r) - 2V(r-h) + V(r-2h)}{h^2} + \frac{1}{r} \frac{V(r) - V(r-h)}{h} = 0 \quad (\text{Ek 2.66})$$

veya

$$V(r) - 2V(r-h) + V(r-2h) + \frac{h}{r} [V(r) - V(r-h)] = 0 \quad (\text{Ek 2.67})$$

elde edilir.

Ek 2.4 Küresel koordinatlarda Laplace denkleminin sonlu farklar yazılımı



Şekil Ek 2.6 Eşmerkezli küresel elektrot sistemi

Küresel koordinatlarda bir boyutlu Laplace denklemi:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (\text{Ek 2.68})$$

ve bu denklemin analitik çözümü

$$V = \frac{Ur_1}{r_2 - r_1} \left(\frac{r_2}{r} - 1 \right) \quad (\text{Ek 2.69})$$

dir. Laplace denklemini sonlu fark denklemine dönüştürmek için denklemdaki türev terimleri yerine sonlu fark eşitlerini yazmak gerekir. Bunun için uygulanan sonlu fark işlemi türüne göre Laplace denklemi üç türlü sonlu fark denklemi şeklinde yazılabilir.

1) İleri farklarla yazım:

$$\frac{\partial V}{\partial r} \cong \frac{V(r+h) - V(r)}{h} \quad (\text{Ek 2.70})$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cong \frac{V(r+2h) - 2V(r+h) + V(r)}{h^2} \quad (\text{Ek 2.71})$$

Laplace denklemi:

$$\frac{V(r+2h) - 2V(r+h) + V(r)}{h^2} + \frac{2}{r} \frac{V(r+h) - V(r)}{h} = 0 \quad (\text{Ek 2.72})$$

veya

$$V(r+2h) - 2V(r+h) + V(r) + \frac{2h}{r} [V(r+h) - V(r)] = 0 \quad (\text{Ek 2.73})$$

2) Merkezi farklarla yazım:

$$\frac{\partial V}{\partial r} \cong \frac{V(r+h) - V(r-h)}{2h} \quad (\text{Ek 2.74})$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cong \frac{V(r+h) - 2V(r) + V(r-h)}{h^2} \quad (\text{Ek 2.75})$$

Laplace denklemi:

$$\frac{V(r+h) - 2V(r) + V(r-h)}{h^2} + \frac{2}{r} \frac{V(r+h) - V(r-h)}{2h} = 0 \quad (\text{Ek 2.76})$$

veya

$$V(r+h) - 2V(r) + V(r-h) + \frac{h}{r} [V(r+h) - V(r-h)] = 0 \quad (\text{Ek 2.77})$$

3) Geri farklarla yazılım:

$$\frac{\partial V}{\partial r} \cong \frac{V(r) - V(r-h)}{h} \quad (\text{Ek 2.78})$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cong \frac{V(r) - 2V(r-h) + V(r-2h)}{h^2} \quad (\text{Ek 2.79})$$

Laplace denklemi:

$$\frac{V(r) - 2V(r-h) + V(r-2h)}{h^2} + \frac{2}{r} \frac{V(r) - V(r-h)}{h} = 0 \quad (\text{Ek 2.80})$$

veya

$$V(r) - 2V(r-h) + V(r-2h) + \frac{2h}{r} [V(r) - V(r-h)] = 0 \quad (\text{Ek 2.81})$$

elde edilir.

Ek 2.5 Magnetik Alan Problemlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü

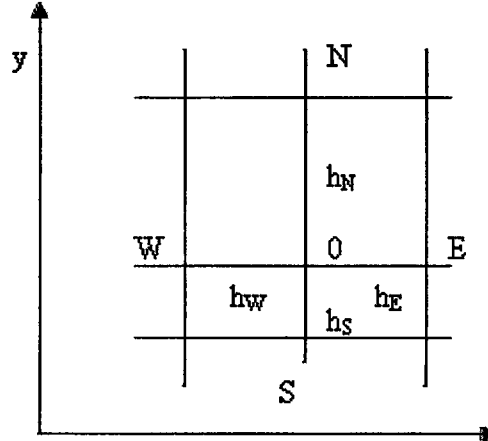
Magnetik alan problemleri özellikle elektrik makinalarının analizi ve tasarımında önemli bir yer tutmaktadır. Bu incelemeler problemin durumuna göre magnetik Laplace veya Poisson denklemi ile yapılır. Bu bölümde daha genel olması nedeniyle Poisson denklemi ile inceleme ele alınmıştır. Laplace denklemi, Poisson denkleminin özel durumudur ve bu durumda akım yoğunluğu $J=0$ 'dır. Problemler lineer ve lineer olmayan problemler olmak üzere iki başlıkta incelenebilir.

Ek 2.5.1 Lineer problemler

A vektörel magnetik potansiyelin z bileşeni, $\nu (\nu = 1/\mu)$ malzemenin magnetik direnci (relüktivitesi), μ magnetik geçirgenlik ve J akım yoğunluğunun z bileşeni olmak üzere Kartezyen koordinatlarda iki boyutlu magnetik Poisson denklemi

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\frac{J}{\nu} = -\mu J \quad (\text{Ek 2.82})$$

dir. Bu denklemin sonlu fark yöntemi ile çözümlemede kullanılabilmesi için sonlu fark denklemi biçimine getirilmesi gerekir.



W: West(batı); E: East(doğu); N: North(kuzey); S: South(güney)

Şekil Ek 2.7 Düzgün olmayan ağ ve pusula notasyonu

Birinci mertebeden sonlu fark algoritmasına göre magnetik Poisson denkleminin sonlu fark denklemi biçimi

$$A_0 = \frac{\left(J_0 + \sum_{i=1}^4 \alpha_i A_i \right)}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i} \quad (\text{Ek 2.83})$$

olarak elde edilir. Problemin çözüm ağının Şekil Ek 2.7’de gösterilen gibi düzgün olmayan bir ağ olduğu göz önüne alınırsa, bu denklemdeki büyüklükler

$$J_0 = \frac{1}{4} (J_E h_S h_E + J_N h_E h_N + J_W h_N h_W + J_S h_W h_S) \quad (\text{Ek 2.84})$$

$$\alpha_E = \frac{1}{2h_E} (\nu_E h_S + \nu_N h_N) \quad (\text{Ek 2.85})$$

$$\alpha_W = \frac{1}{2h_W} (\nu_W h_N + \nu_S h_S) \quad (\text{Ek 2.86})$$

$$\alpha_N = \frac{1}{2h_N} (\nu_N h_E + \nu_W h_W) \quad (\text{Ek 2.87})$$

$$\alpha_S = \frac{1}{2h_S} (\nu_S h_W + \nu_E h_E) \quad (\text{Ek 2.88})$$

dir. Burada α katsayıları sabit katsayılardır.

Ek 2.5.2 Lineer olmayan problemler

Bir malzemenin magnetik direnci $\nu(\nu=1/\mu)$, magnetik akı yoğunluğu (B)'nin işlevi ise, magnetik vektör potansiyeli ile yazılan iki boyutlu Poisson denklemi

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -J \quad (\text{Ek 2.89})$$

olur. Akım yoğunluğunu ve ortamın magnetik direncini bölgenin her noktasında sabit kabul ederek, sonlu fark denklemi elde edilebilir. Sonuç olarak düzgün olmayan bir ağ için lineer problemlerdekine benzer olarak

$$A_0 = \frac{\left(J_0 + \sum_{i=1}^4 \alpha_i A_i \right)}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i} \quad (\text{Ek 2.90})$$

$$A_0 = [J_0 + (\alpha_W A_W + \alpha_E A_E + \alpha_S A_S + \alpha_N A_N)] / (\alpha_W + \alpha_E + \alpha_S + \alpha_N) \quad (\text{Ek 2.91})$$

bulunur. Burada da

$$J_0 = \frac{1}{4} (J_E h_S h_E + J_N h_E h_N + J_W h_N h_W + J_S h_W h_S) \quad (\text{Ek 2.92})$$

$$\alpha_E = \frac{1}{2h_E} (\nu_E h_S + \nu_N h_N) \quad (\text{Ek 2.93})$$

$$\alpha_W = \frac{1}{2h_W} (\nu_W h_N + \nu_S h_S) \quad (\text{Ek 2.94})$$

$$\alpha_N = \frac{1}{2h_N} (\nu_N h_E + \nu_W h_W) \quad (\text{Ek 2.95})$$

$$\alpha_S = \frac{1}{2h_S} (\nu_S h_W + \nu_E h_E) \quad (\text{Ek 2.96})$$

dir. Düzgün ağ durumunda $h_W = h_E = h_S = h_N = h$ için

$$A_0 = \frac{\left(J_0 + \sum_{i=1}^4 \alpha_i A_i \right)}{\sum_{i=1}^4 \alpha_i} \quad (\text{Ek 2.97})$$

$$A_0 = [J_0 + (\alpha_W A_W + \alpha_E A_E + \alpha_S A_S + \alpha_N A_N)] / (\alpha_W + \alpha_E + \alpha_S + \alpha_N) \quad (\text{Ek 2.98})$$

$$J_0 = \frac{h^2}{4} (J_E + J_N + J_W + J_S) \quad (\text{Ek 2.99})$$

$$\alpha_E = \frac{1}{2} (\nu_E + \nu_N) \quad (\text{Ek 2.100})$$

$$\alpha_W = \frac{1}{2} (\nu_W + \nu_S) \quad (\text{Ek 2.101})$$

$$\alpha_N = \frac{1}{2} (\nu_N + \nu_W) \quad (\text{Ek 2.102})$$

$$\alpha_S = \frac{1}{2} (\nu_S + \nu_E) \quad (\text{Ek 2.103})$$

olur.

Ek 2.6 Başlangıç Değer Problemlerinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü

Bu konu bir örnek üzerinde açıklanacaktır. Örneğin $f(0)=1$ başlangıç koşulu ile verilen

$$\frac{df(x)}{dx} + f(x) = 0 \quad (\text{Ek 2.104})$$

şeklindeki bir diferansiyel denklemin sonlu farklar ile çözümü yapılmak istenirse öncelikle bu diferansiyel denklemin sonlu fark denklemi biçimine getirilmesi gerekir. Buna göre birinci mertebeden ileri fark işleminden yararlanılırsa

$$\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (\text{Ek 2.105})$$

yazılır. Bu (Ek 2.104) diferansiyel denkleminde yerine yazılırsa

$$\frac{f(x+h) - f(x)}{h} + f(x) = 0 \quad (\text{Ek 2.106})$$

veya

$$f(x+h) + hf(x) - f(x) = 0 \quad (\text{Ek 2.107})$$

elde edilir. Bu denklem

$$f(x+h) = (1-h)f(x) \quad (\text{Ek 2.108})$$

veya indisli notasyonla

$$f_{i+1} = (1-h)f_i \quad (\text{Ek 2.109})$$

yazılarak sonlu farklar yöntemi çözümünde kullanılabilir. Örneğin burada adım büyüklüğünü $h=0,25$ alacak olursak

$x = 0$ için

$$f(h) = f(0,25) = (1-h)f(0) = (1-0,25).1 = 0,75$$

$x = h = 0,25$ için

$$f(2h) = f(0,5) = (1-h)f(h) = (1-0,25).0,75 = 0,5625$$

$x = 2h = 0,5$ için

$$f(3h) = f(0,75) = (1-h)f(2h) = (1-0,25).0,5625 = 0,421875$$

$x = 3h = 0,75$ için

$$f(4h) = f(1) = (1-h)f(3h) = (1-0,25).0,421875 = 0,31640625$$

bulunur. İşlemlere benzer şekilde devam edilebilir. Verilen diferansiyel denklemin analitik çözümü

$$f(x) = f(0)e^{-x} \quad (\text{Ek 2.110})$$

dir. Yukarıda sayısal yöntemle bulunan sonuçları analitik yöntemle karşılaştırmak ve böylelikle kullanılan yöntemin doğruluğunu görmek amacıyla aynı x değerleri için bulunan $f(x)$ değerleri aşağıda verilmiştir.

$$f(0,25) = e^{-0,25} = 0,7788$$

$$f(0,5) = e^{-0,5} = 0,6065$$

$$f(0,75) = e^{-0,75} = 0,47236$$

$$f(1) = e^{-1} = 0,36788$$

Ek 2.7 Zamanla Değişen Problemlerin Sonlu Farklar Yöntemi ile Çözümü

Örneğin aşağıdaki gibi verilen bir boyutlu difüzyon denklemini göz önüne alalım.

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - a \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad (\text{Ek 2.111})$$

Bu denklemi sonlu fark denklemi biçimine getirirken x 'teki artım Δx , t 'deki artım Δt olsun.

Buna göre merkezi farklarla x 'e göre ikinci mertebe türev;

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \cong \frac{\varphi(x + \Delta x, t) - 2\varphi(x, t) + \varphi(x - \Delta x, t)}{(\Delta x)^2} \quad (\text{Ek 2.112})$$

ve ileri farklarla t 'ye göre birinci mertebede türev;

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} \cong \frac{\varphi(x, t + \Delta t) - \varphi(x, t)}{\Delta t} \quad (\text{Ek 2.113})$$

olur. Bunları difüzyon denkleminde kullanırsak,

$$\frac{\varphi(x + \Delta x, t) - 2\varphi(x, t) + \varphi(x - \Delta x, t)}{(\Delta x)^2} - a \left(\frac{\varphi(x, t + \Delta t) - \varphi(x, t)}{\Delta t} \right) = 0 \quad (\text{Ek 2.114})$$

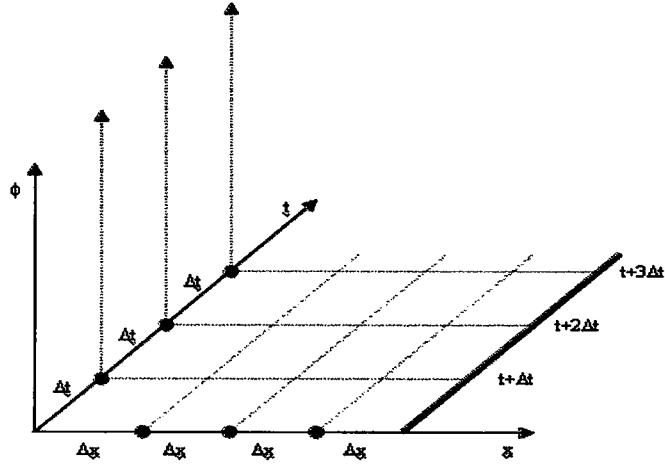
veya

$$\varphi(x, t + \Delta t) = \frac{\Delta t}{a(\Delta x)^2} \varphi(x + \Delta x, t) + \left(1 - 2 \frac{\Delta t}{a(\Delta x)^2} \right) \varphi(x, t) + \frac{\Delta t}{a(\Delta x)^2} \varphi(x - \Delta x, t) \quad (\text{Ek 2.115})$$

Bu denklemde de $k = \frac{\Delta t}{a(\Delta x)^2}$ yazarak,

$$\varphi(x, t + \Delta t) = k \cdot \varphi(x + \Delta x, t) + (1 - 2k) \varphi(x, t) + k \cdot \varphi(x - \Delta x, t) \quad (\text{Ek 2.116})$$

elde edilir.



Şekil Ek 2.8 Zamanla değişen bir boyutlu problemlerin sonlu farklar yöntemi çözümünün gösterilimi.

Bu örnekteki benzer bir denklem de düzgün manyetik alanda bir magnetik malzeme de magnetik alan dağılımını incelemek için kullanılan

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} - \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (\text{Ek 2.117})$$

denklemdir. Bu denklemde H magnetik alan şiddeti, μ malzemenin magnetik geçirgenliği, σ da malzemenin elektriksel iletkenliğidir. Bu denklem örnekteki benzer işlemlerle sonlu fark denkleme biçimine getirilerek çözümlenerek kullanılabilir (Kalenderli, 2003).

Ek 3 MODELLER İÇİN YAZILAN SONLU FARK DENKLEMLERİ

Model-1 İçin Yazılan Sonlu Fark Denklemleri

2 no'lu düğüm için;

$$-4V_2 + 1,5V_3 + 2V_{13} = 0$$

3 no'lu düğüm için;

$$0,75V_2 - 4V_3 + 1,25V_4 + 2V_{14} = 0$$

4 no'lu düğüm için;

$$0,8333V_3 - 4V_4 + 1,666V_5 + 2V_{15} = 0$$

5 no'lu düğüm için;

$$0,875V_4 - 4V_5 + 1,125V_6 + 2V_{16} = 0$$

6 no'lu düğüm için;

$$0,9V_5 - 4V_6 + 1,1V_7 + 2V_{17} = 0$$

7 no'lu düğüm için;

$$0,9166V_6 - 4V_7 + 1,083V_8 + 2V_{18} = 0$$

8 no'lu düğüm için;

$$0,9285V_7 - 4V_8 + 1,0714V_9 + 2V_{19} = 0$$

9 no'lu düğüm için;

$$0,9375V_8 - 4V_9 + 1,0625V_{10} + 2V_{20} = 0$$

10 no'lu düğüm için;

$$0,9444V_9 - 4V_{10} + 2V_{21} = -105,555$$

13 no'lu düğüm için;

$$V_2 - 4V_{13} + 1,5V_{14} + V_{24} = 0$$

14 no'lu düğüm için;

$$V_3 + 0,75V_{13} - 4V_{14} + 1,25V_{15} + V_{25} = 0$$

15 no'lu düğüm için;

$$V_4 + 0,8333V_{14} - 4V_{15} + 1,166V_{16} + V_{26} = 0$$

16 no'lu düğüm için;

$$V_5 + 0,875V_{15} - 4V_{16} + 1,125V_{17} + V_{27} = 0$$

17 no'lu düğüm için;

$$V_6 + 0,9V_{16} - 4V_{17} + 1,1V_{18} + V_{28} = 0$$

18 no'lu düğüm için;

$$V_7 + 0,9166V_{17} - 4V_{18} + 1,083V_{19} + V_{29} = 0$$

19 no'lu düğüm için;

$$V_8 + 0,9285V_{18} - 4V_{19} + 1,0714V_{20} + V_{30} = 0$$

20 no'lu düğüm için;

$$V_9 + 0,9375V_{19} - 4V_{20} + 1,0625V_{21} + V_{31} = 0$$

21 no'lu düğüm için;

$$V_{10} + 0,94444V_{20} - 4V_{21} + 1,0555V_{22} + V_{32} = 0$$

22 no'lu düğüm için;

$$0,95V_{21} - 4V_{22} + V_{33} + 1,05V_{103} = -100$$

24 no'lu düğüm için;

$$V_{13} - 4V_{24} + 1,5V_{25} = 0$$

25 no'lu düğüm için;

$$V_{14} + 0,75V_{24} - 4V_{25} + 1,25V_{26} + V_{36} = 0$$

26 no'lu düğüm için;

$$V_{15} + 0,8333V_{25} - 4V_{26} + 1,166V_{27} + V_{37} = 0$$

27 no'lu düğüm için;

$$V_{16} + 0,875V_{26} - 4V_{27} + 1,125V_{28} + V_{38} = 0$$

28 no'lu düğüm için;

$$V_{17} + 0,9V_{27} - 4V_{28} + 1,1V_{29} + V_{39} = 0$$

29 no'lu düğüm için;

$$V_{18} + 0,9166V_{28} - 4V_{29} + 1,083V_{30} + V_{40} = 0$$

30 no'lu düğüm için;

$$V_{19} + 0,9285V_{29} - 4V_{30} + 1,0714V_{31} + V_{41} = 0$$

31 no'lu düğüm için;

$$V_{20} + 0,9375V_{30} - 4V_{31} + 1,0625V_{32} + V_{42} = 0$$

32 no'lu düğüm için;

$$V_{21} + 0,9444V_{31} - 4V_{32} + 1,0555V_{33} + V_{43} = 0$$

33 no'lu düğüm için;

$$V_{22} + 0,95V_{32} - 4V_{33} + V_{44} + 1,05V_{14} = 0$$

36 no'lu düğüm için;

$$V_{25} - 4V_{36} + 1,25V_{37} + V_{46} = 0$$

37 no'lu düğüm için;

$$V_{26} + 0,8333V_{36} - 4V_{37} + 1,166V_{38} + V_{47} = 0$$

38 no'lu düğüm için;

$$V_{27} + 0,875V_{37} - 4V_{38} + 1,125V_{39} + V_{48} = 0$$

39 no'lu düğüm için;

$$V_{28} + 0,9V_{38} - 4V_{39} + 1,1V_{40} + V_{49} = 0$$

40 no'lu düğüm için;

$$V_{29} + 0,9166V_{39} - 4V_{40} + 1,83V_{41} + V_{50} = 0$$

41 no'lu düğüm için;

$$V_{30} + 0,9284V_{40} - 4V_{41} + 1,0714V_{42} + V_{51} = 0$$

42 no'lu düğüm için;

$$V_{31} + 0,9375V_{41} - 4V_{42} + 1,0625V_{43} + V_{52} = 0$$

43 no'lu düğüm için;

$$V_{32} + 0,9444V_{42} - 4V_{43} + 1,0555V_{44} + V_{53} = 0$$

44 no'lu düğüm için;

$$V_{33} + 0,95V_{43} - 4V_{44} + V_{54} + 1,05V_{105} = 0$$

46 no'lu düğüm için;

$$V_{36} - 4V_{46} + 1,25V_{47} = 0$$

47 no'lu düğüm için;

$$V_{37} + 0,8333V_{46} - 4V_{47} + 1,166V_{48} + V_{57} = 0$$

48 no'lu düğüm için;

$$V_{38} + 0,875V_{47} - 4V_{48} + 1,125V_{49} + V_{58} = 0$$

49 no'lu düğüm için;

$$V_{39} + 0,9V_{48} - 4V_{49} + 1,1V_{50} + V_{59} = 0$$

50 no'lu düğüm için;

$$V_{40} + 0,9166V_{49} - 4V_{50} + 1,083V_{51} + V_{60} = 0$$

51 no'lu düğüm için;

$$V_{41} + 0,9285V_{50} - 4V_{51} + 1,714V_{52} + V_{61} = 0$$

52 no'lu düğüm için;

$$V_{42} + 0,9375V_{51} - 4V_{52} + 1,0625V_{53} + V_{62} = 0$$

53 no'lu düğüm için;

$$V_{43} + 0,9444V_{52} - 4V_{53} + 1,0555V_{54} + V_{63} = 0$$

54 no'lu düğüm için;

$$V_{44} + 0,95V_{53} - 4V_{54} + V_{64} + 1,05V_{106} = 0$$

57 no'lu düğüm için;

$$V_{47} - 4V_{57} + 1,166V_{58} + V_{66} = 0$$

58 no'lu düğüm için;

$$V_{48} + 0,875V_{57} - 4V_{58} + 1,125V_{59} + V_{67} = 0$$

59 no'lu düğüm için;

$$V_{49} + 0,9V_{58} - 4V_{59} + 1,1V_{60} + V_{68} = 0$$

60 no'lu düğüm için;

$$V_{50} + 1,9166V_{59} - 4V_{60} + 1,083V_{61} + V_{69} = 0$$

61 no'lu düğüm için;

$$V_{51} + 0,9285V_{60} - 4V_{61} + 1,0714V_{62} + V_{70} = 0$$

62 no'lu düğüm için;

$$V_{52} + 0,9375V_{61} - 4V_{62} + 1,0625V_{63} + V_{71} = 0$$

63 no'lu düğüm için;

$$V_{53} + 0,9444V_{62} - 4V_{63} + 1,0555V_{64} + V_{72} = 0$$

64 no'lu düğüm için;

$$V_{54} + 0,95V_{63} - 4V_{64} + V_{73} + 1,05V_{107} = 0$$

66 no'lu düğüm için;

$$V_{57} - 4V_{66} + 1,166V_{67} = 0$$

67 no'lu düğüm için;

$$V_{58} + 0,875V_{66} - 4V_{67} + 1,125V_{68} + V_{76} = 0$$

68 no'lu düğüm için;

$$V_{59} + 0,9V_{67} - 4V_{68} + 1,1V_{69} + V_{77} = 0$$

69 no'lu düğüm için;

$$V_{60} + 0,9166V_{68} - 4V_{69} + 1,083V_{70} + V_{78} = 0$$

70 no'lu düğüm için;

$$V_{61} + 0,9285V_{69} - 4V_{70} + 1,0714V_{71} + V_{79} = 0$$

71 no'lu düğüm için;

$$V_{62} + 0,9375V_{70} - 4V_{71} + 1,0625V_{72} + V_{80} = 0$$

72 no'lu düğüm için;

$$V_{63} + 0,9444V_{71} - 4V_{72} + 1,0555V_{73} + V_{81} = 0$$

73 no'lu düğüm için;

$$V_{64} + 0,95V_{72} - 4V_{73} + V_{82} + 1,05V_{108} = 0$$

76 no'lu düğüm için;

$$V_{67} - 4V_{76} + 1,125V_{77} = 0$$

77 no'lu düğüm için;

$$V_{68} + 0,9V_{76} - 4V_{77} + 1,1V_{78} + V_{85} = 0$$

78 no'lu düğüm için;

$$V_{69} + 0,9166V_{77} - 4V_{78} + 1,083V_{79} + V_{86} = 0$$

79 no'lu düğüm için;

$$V_{70} + 0,9285V_{78} - 4V_{79} + 1,0714V_{80} + V_{87} = 0$$

80 no'lu düğüm için;

$$V_{71} + 0,9375V_{79} - 4V_{80} + 1,0625V_{81} + V_{88} = 0$$

81 no'lu düğüm için;

$$V_{72} + 0,9444V_{80} - 4V_{81} + 1,0555V_{82} + V_{89} = 0$$

82 no'lu düğüm için;

$$V_{73} + 0,95V_{81} - 4V_{82} + V_{90} + 1,05V_{109} = 0$$

85 no'lu düğüm için;

$$V_{77} - 4V_{85} + 1,1V_{86} = 0$$

86 no'lu düğüm için;

$$V_{78} + 0,9166V_{85} - 4V_{86} + 1,083V_{87} = 0$$

87 no'lu düğüm için;

$$V_{79} + 0,9285V_{86} - 4V_{87} + 1,0717V_{88} = 0$$

88 no'lu düğüm için;

$$V_{80} + 0,9375V_{87} - 4V_{88} + 1,0625V_{89} + V_{95} = 0$$

89 no'lu düğüm için;

$$V_{81} + 0,9444V_{88} - 4V_{89} + 1,0555V_{90} + V_{96} = 0$$

90 no'lu düğüm için;

$$V_{82} + 0,95V_{89} - 4V_{90} + V_{97} + 1,05V_{110} = 0$$

95 no'lu düğüm için;

$$V_{88} - 4V_{95} + 1,0625V_{96} = 0$$

96 no'lu düğüm için;

$$V_{89} + 0,9444V_{95} - 4V_{96} + 1,0555V_{97} = 0$$

97 no'lu düğüm için;

$$V_{90} + 0,95V_{96} - 4V_{97} + 1,05V_{111} = 0$$

103 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{22} - 5,4603V_{103} + 1,365V_{104} = - 136,5$$

104 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{33} + 1,365V_{103} - 5,4603V_{104} + 1,365V_{105} = 0$$

105 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{44} + 1,365V_{104} - 5,4603V_{105} + 1,365V_{106} = 0$$

106 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{54} + 1,365V_{105} - 5,4603V_{106} + 1,365V_{107} = 0$$

107 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{64} + 1,365V_{106} - 5,4603V_{107} + 1,365V_{108} = 0$$

108 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{73} + 1,365V_{107} - 5,4603V_{108} + 1,365V_{109} = 0$$

109 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{82} + 1,365V_{108} - 5,4603V_{109} + 1,365V_{110} = 0$$

110 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{90} + 1,365V_{109} - 5,4603V_{110} + 1,365V_{111} = 0$$

111 no'lu düğüm için;

$$2,730V_{97} + 1,365V_{110} - 5,4603V_{111} = 0$$

Model-2 İçin Yazılan Sonlu Fark Denklemleri**2 no'lu düğüm için;**

$$-4V_2 + 1,5V_3 + 2V_{13} = 0$$

3 no'lu düğüm için;

$$0,75V_2 - 4V_3 + 1,25V_4 + 2V_{14} = 0$$

4 no'lu düğüm için;

$$0,8333V_3 - 4V_4 + 1,666V_5 + 2V_{15} = 0$$

5 no'lu düğüm için;

$$0,875V_4 - 4V_5 + 1,125V_6 + 2V_{16} = 0$$

6 no'lu düğüm için;

$$0,9V_5 - 4V_6 + 1,1V_7 + 2V_{17} = 0$$

7 no'lu düğüm için;

$$0,9166V_6 - 4V_7 + 1,083V_8 + 2V_{18} = 0$$

8 no'lu düğüm için;

$$0,9285V_7 - 4V_8 + 1,0714V_9 + 2V_{19} = 0$$

9 no'lu düğüm için;

$$0,9375V_8 - 4V_9 + 1,0625V_{10} + 2V_{20} = 0$$

10 no'lu düğüm için;

$$0,9444V_9 - 4V_{10} + 2V_{21} = -105,555$$

13 no'lu düğüm için;

$$V_2 - 4V_{13} + 1,5V_{14} + V_{24} = 0$$

14 no'lu düğüm için;

$$V_3 + 0,75V_{13} - 4V_{14} + 1,25V_{15} + V_{25} = 0$$

15 no'lu düğüm için;

$$V_4 + 0,8333V_{14} - 4V_{15} + 1,166V_{16} + V_{26} = 0$$

16 no'lu düğüm için;

$$V_5 + 0,875V_{15} - 4V_{16} + 1,125V_{17} + V_{27} = 0$$

17 no'lu düğüm için;

$$V_6 + 0,9V_{16} - 4V_{17} + 1,1V_{18} + V_{28} = 0$$

18 no'lu düğüm için;

$$V_7 + 0,9166V_{17} - 4V_{18} + 1,083V_{19} + V_{29} = 0$$

19 no'lu düğüm için;

$$V_8 + 0,9285V_{18} - 4V_{19} + 1,0714V_{20} + V_{30} = 0$$

20 no'lu düğüm için;

$$V_9 + 0,9375V_{19} - 4V_{20} + 1,0625V_{21} + V_{31} = 0$$

21 no'lu düğüm için;

$$V_{10} + 0,94444V_{20} - 4V_{21} + 1,0555V_{22} + V_{32} = 0$$

22 no'lu düğüm için;

$$0,95V_{21} - 4V_{22} + V_{33} + 1,05V_{103} = -100$$

24 no'lu düğüm için;

$$V_{13} - 4V_{24} + 1,5V_{25} = 0$$

25 no'lu düğüm için;

$$V_{14} + 0,75V_{24} - 4V_{25} + 1,25V_{26} + V_{36} = 0$$

26 no'lu düğüm için;

$$V_{15} + 0,8333V_{25} - 4V_{26} + 1,166V_{27} + V_{37} = 0$$

27 no'lu düğüm için;

$$V_{16} + 0,875V_{26} - 4V_{27} + 1,125V_{28} + V_{38} = 0$$

28 no'lu düğüm için;

$$V_{17} + 0,9V_{27} - 4V_{28} + 1,1V_{29} + V_{39} = 0$$

29 no'lu düğüm için;

$$V_{18} + 0,9166V_{28} - 4V_{29} + 1,083V_{30} + V_{40} = 0$$

30 no'lu düğüm için;

$$V_{19} + 0,9285V_{29} - 4V_{30} + 1,0714V_{31} + V_{41} = 0$$

31 no'lu düğüm için;

$$V_{20} + 0,9375V_{30} - 4V_{31} + 1,0625V_{32} + V_{42} = 0$$

32 no'lu düğüm için;

$$V_{21} + 0,9444V_{31} - 4V_{32} + 1,0555V_{33} + V_{43} = 0$$

33 no'lu düğüm için;

$$V_{22} + 0,95V_{32} - 4V_{33} + V_{44} + 1,05V_{14} = 0$$

36 no'lu düğüm için;

$$V_{25} - 4V_{36} + 1,25V_{37} + V_{46} = 0$$

37 no'lu düğüm için;

$$V_{26} + 0,8333V_{36} - 4V_{37} + 1,166V_{38} + V_{47} = 0$$

38 no'lu düğüm için;

$$V_{27} + 0,875V_{37} - 4V_{38} + 1,125V_{39} + V_{48} = 0$$

39 no'lu düğüm için;

$$V_{28} + 0,9V_{38} - 4V_{39} + 1,1V_{40} + V_{49} = 0$$

40 no'lu düğüm için;

$$V_{29} + 0,9166V_{39} - 4V_{40} + 1,83V_{41} + V_{50} = 0$$

41 no'lu düğüm için;

$$V_{30} + 0,9284V_{40} - 4V_{41} + 1,0714V_{42} + V_{51} = 0$$

42 no'lu düğüm için;

$$V_{31} + 0,9375V_{41} - 4V_{42} + 1,0625V_{43} + V_{52} = 0$$

43 no'lu düğüm için;

$$V_{32} + 0,9444V_{42} - 4V_{43} + 1,0555V_{44} + V_{53} = 0$$

44 no'lu düğüm için;

$$V_{33} + 0,95V_{43} - 4V_{44} + V_{54} + 1,05V_{105} = 0$$

46 no'lu düğüm için;

$$V_{36} - 4V_{46} + 1,25V_{47} = 0$$

47 no'lu düğüm için;

$$V_{37} + 0,8333V_{46} - 4V_{47} + 1,166V_{48} + V_{57} = 0$$

48 no'lu düğüm için;

$$V_{38} + 0,875V_{47} - 4V_{48} + 1,125V_{49} + V_{58} = 0$$

49 no'lu düğüm için;

$$V_{39} + 0,9V_{48} - 4V_{49} + 1,1V_{50} + V_{59} = 0$$

50 no'lu düğüm için;

$$V_{40} + 0,9166V_{49} - 4V_{50} + 1,083V_{51} + V_{60} = 0$$

51 no'lu düğüm için;

$$V_{41} + 0,9285V_{50} - 4V_{51} + 1,714V_{52} + V_{61} = 0$$

52 no'lu düğüm için;

$$V_{42} + 0,9375V_{51} - 4V_{52} + 1,0625V_{53} + V_{62} = 0$$

53 no'lu düğüm için;

$$V_{43} + 0,9444V_{52} - 4V_{53} + 1,0555V_{54} + V_{63} = 0$$

54 no'lu düğüm için;

$$V_{44} + 0,95V_{53} - 4V_{54} + V_{64} + 1,05V_{106} = 0$$

57 no'lu düğüm için;

$$V_{47} - 4V_{57} + 1,166V_{58} + V_{66} = 0$$

58 no'lu düğüm için;

$$V_{48} + 0,875V_{57} - 4V_{58} + 1,125V_{59} + V_{67} = 0$$

59 no'lu düğüm için;

$$V_{49} + 0,9V_{58} - 4V_{59} + 1,1V_{60} + V_{68} = 0$$

60 no'lu düğüm için;

$$V_{50} + 1,9166V_{59} - 4V_{60} + 1,083V_{61} + V_{69} = 0$$

61 no'lu düğüm için;

$$V_{51} + 0,9285V_{60} - 4V_{61} + 1,0714V_{62} + V_{70} = 0$$

62 no'lu düğüm için;

$$V_{52} + 0,9375V_{61} - 4V_{62} + 1,0625V_{63} + V_{71} = 0$$

63 no'lu düğüm için;

$$V_{53} + 0,9444V_{62} - 4V_{63} + 1,0555V_{64} + V_{72} = 0$$

64 no'lu düğüm için;

$$V_{54} + 0,95V_{63} - 4V_{64} + V_{73} + 1,05V_{107} = 0$$

66 no'lu düğüm için;

$$V_{57} - 4V_{66} + 1,166V_{67} = 0$$

67 no'lu düğüm için;

$$V_{58} + 0,875V_{66} - 4V_{67} + 1,125V_{68} + V_{76} = 0$$

68 no'lu düğüm için;

$$V_{59} + 0,9V_{67} - 4V_{68} + 1,1V_{69} + V_{77} = 0$$

69 no'lu düğüm için;

$$V_{60} + 0,9166V_{68} - 4V_{69} + 1,083V_{70} + V_{78} = 0$$

70 no'lu düğüm için;

$$V_{61} + 0,9285V_{69} - 4V_{70} + 1,0714V_{71} + V_{79} = 0$$

71 no'lu düğüm için;

$$V_{62} + 0,9375V_{70} - 4V_{71} + 1,0625V_{72} + V_{80} = 0$$

72 no'lu düğüm için;

$$V_{63} + 0,9444V_{71} - 4V_{72} + 1,0555V_{73} + V_{81} = 0$$

73 no'lu düğüm için;

$$V_{64} + 0,95V_{72} - 4V_{73} + V_{82} + 1,05V_{108} = 0$$

76 no'lu düğüm için;

$$V_{67} - 4V_{76} + 1,125V_{77} = 0$$

77 no'lu düğüm için;

$$V_{68} + 0,9V_{76} - 4V_{77} + 1,1V_{78} + V_{85} = 0$$

78 no'lu düğüm için;

$$V_{69} + 0,9166V_{77} - 4V_{78} + 1,083V_{79} + V_{86} = 0$$

79 no'lu düğüm için;

$$V_{70} + 0,9285V_{78} - 4V_{79} + 1,0714V_{80} + V_{87} = 0$$

80 no'lu düğüm için;

$$V_{71} + 0,9375V_{79} - 4V_{80} + 1,0625V_{81} + V_{88} = 0$$

81 no'lu düğüm için;

$$V_{72} + 0,9444V_{80} - 4V_{81} + 1,0555V_{82} + V_{89} = 0$$

82 no'lu düğüm için;

$$V_{73} + 0,95V_{81} - 4V_{82} + V_{90} + 1,05V_{109} = 0$$

85 no'lu düğüm için;

$$V_{77} - 4V_{85} + 1,1V_{86} = 0$$

86 no'lu düğüm için;

$$V_{78} + 0,9166V_{85} - 4V_{86} + 1,083V_{87} = 0$$

87 no'lu düğüm için;

$$V_{79} + 0,9285V_{86} - 4V_{87} + 1,0717V_{88} = 0$$

88 no'lu düğüm için;

$$V_{80} + 0,9375V_{87} - 4V_{88} + 1,0625V_{89} + V_{95} = 0$$

89 no'lu düğüm için;

$$V_{81} + 0,9444V_{88} - 4V_{89} + 1,0555V_{90} + V_{96} = 0$$

90 no'lu düğüm için;

$$V_{82} + 0,95V_{89} - 4V_{90} + V_{97} + 1,05V_{110} = 0$$

95 no'lu düğüm için;

$$V_{88} - 4V_{95} + 1,0625V_{96} = 0$$

96 no'lu düğüm için;

$$V_{89} + 0,9444V_{95} - 4V_{96} + 1,0555V_{97} = 0$$

97 no'lu düğüm için;

$$V_{90} + 0,95V_{96} - 4V_{97} + 1,05V_{111} = 0$$

103 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{22} - 4V_{103} + V_{104} + 1,04545V_{114} = -100$$

104 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{33} + V_{103} - 4V_{104} + V_{105} + 1,04545V_{115} = 0$$

105 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{44} + V_{104} - 4V_{105} + V_{106} + 1,04545V_{116} = 0$$

106 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{54} + V_{105} - 4V_{106} + V_{107} + 1,04545V_{117} = 0$$

107 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{64} + V_{106} - 4V_{107} + V_{108} + 1,04545V_{118} = 0$$

108 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{73} + V_{107} - 4V_{108} + V_{109} + 1,04545V_{119} = 0$$

109 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{82} + V_{108} - 4V_{109} + V_{110} + 1,04545V_{120} = 0$$

110 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{90} + V_{109} - 4V_{110} + V_{111} + 1,04545V_{121} = 0$$

111 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{97} + V_{110} - 4V_{111} + V_{112} + 1,04545V_{122} = 0$$

114 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{103} - 5,4492V_{114} + 1,3623V_{115} = -136,23$$

115 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{104} + 1,3623V_{114} - 5,4492V_{115} + 1,3623V_{116} = 0$$

116 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{105} + 1,3623V_{115} - 5,4492V_{116} + 1,3623V_{117} = 0$$

117 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{106} + 1,3623V_{116} - 5,4492V_{117} + 1,3623V_{118} = 0$$

118 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{107} + 1,3623V_{117} - 5,4492V_{118} + 1,3623V_{119} = 0$$

119 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{108} + 1,3623V_{118} - 5,4492V_{119} + 1,3623V_{120} = 0$$

120 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{109} + 1,3623V_{119} - 5,4492V_{120} + 1,3623V_{121} = 0$$

121 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{110} + 1,3623V_{120} - 5,4492V_{121} + 1,3623V_{122} = 0$$

122 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{111} + 1,3623V_{121} - 5,4492V_{122} = 0$$

Model-3 İçin Yazılan Sonlu Fark Denklemleri**2 no'lu düğüm için;**

$$-4V_2 + 1,5V_3 + 2V_{13} = 0$$

3 no'lu düğüm için;

$$0,75V_2 - 4V_3 + 1,25V_4 + 2V_{14} = 0$$

4 no'lu düğüm için;

$$0,8333V_3 - 4V_4 + 1,666V_5 + 2V_{15} = 0$$

5 no'lu düğüm için;

$$0,875V_4 - 4V_5 + 1,125V_6 + 2V_{16} = 0$$

6 no'lu düğüm için;

$$0,9V_5 - 4V_6 + 1,1V_7 + 2V_{17} = 0$$

7 no'lu düğüm için;

$$0,9166V_6 - 4V_7 + 1,083V_8 + 2V_{18} = 0$$

8 no'lu düğüm için;

$$0,9285V_7 - 4V_8 + 1,0714V_9 + 2V_{19} = 0$$

9 no'lu düğüm için;

$$0,9375V_8 - 4V_9 + 1,0625V_{10} + 2V_{20} = 0$$

10 no'lu düğüm için;

$$0,9444V_9 - 4V_{10} + 2V_{21} = -105,555$$

13 no'lu düğüm için;

$$V_2 - 4V_{13} + 1,5V_{14} + V_{24} = 0$$

14 no'lu düğüm için;

$$V_3 + 0,75V_{13} - 4V_{14} + 1,25V_{15} + V_{25} = 0$$

15 no'lu düğüm için;

$$V_4 + 0,8333V_{14} - 4V_{15} + 1,166V_{16} + V_{26} = 0$$

16 no'lu düğüm için;

$$V_5 + 0,875V_{15} - 4V_{16} + 1,125V_{17} + V_{27} = 0$$

17 no'lu düğüm için;

$$V_6 + 0,9V_{16} - 4V_{17} + 1,1V_{18} + V_{28} = 0$$

18 no'lu düğüm için;

$$V_7 + 0,9166V_{17} - 4V_{18} + 1,083V_{19} + V_{29} = 0$$

19 no'lu düğüm için;

$$V_8 + 0,9285V_{18} - 4V_{19} + 1,0714V_{20} + V_{30} = 0$$

20 no'lu düğüm için;

$$V_9 + 0,9375V_{19} - 4V_{20} + 1,0625V_{21} + V_{31} = 0$$

21 no'lu düğüm için;

$$V_{10} + 0,94444V_{20} - 4V_{21} + 1,0555V_{22} + V_{32} = 0$$

22 no'lu düğüm için;

$$0,95V_{21} - 4V_{22} + V_{33} + 1,05V_{103} = -100$$

24 no'lu düğüm için;

$$V_{13} - 4V_{24} + 1,5V_{25} = 0$$

25 no'lu düğüm için;

$$V_{14} + 0,75V_{24} - 4V_{25} + 1,25V_{26} + V_{36} = 0$$

26 no'lu düğüm için;

$$V_{15} + 0,8333V_{25} - 4V_{26} + 1,166V_{27} + V_{37} = 0$$

27 no'lu düğüm için;

$$V_{16} + 0,875V_{26} - 4V_{27} + 1,125V_{28} + V_{38} = 0$$

28 no'lu düğüm için;

$$V_{17} + 0,9V_{27} - 4V_{28} + 1,1V_{29} + V_{39} = 0$$

29 no'lu düğüm için;

$$V_{18} + 0,9166V_{28} - 4V_{29} + 1,083V_{30} + V_{40} = 0$$

30 no'lu düğüm için;

$$V_{19} + 0,9285V_{29} - 4V_{30} + 1,0714V_{31} + V_{41} = 0$$

31 no'lu düğüm için;

$$V_{20} + 0,9375V_{30} - 4V_{31} + 1,0625V_{32} + V_{42} = 0$$

32 no'lu düğüm için;

$$V_{21} + 0,9444V_{31} - 4V_{32} + 1,0555V_{33} + V_{43} = 0$$

33 no'lu düğüm için;

$$V_{22} + 0,95V_{32} - 4V_{33} + V_{44} + 1,05V_{14} = 0$$

36 no'lu düğüm için;

$$V_{25} - 4V_{36} + 1,25V_{37} + V_{46} = 0$$

37 no'lu düğüm için;

$$V_{26} + 0,8333V_{36} - 4V_{37} + 1,166V_{38} + V_{47} = 0$$

38 no'lu düğüm için;

$$V_{27} + 0,875V_{37} - 4V_{38} + 1,125V_{39} + V_{48} = 0$$

39 no'lu düğüm için;

$$V_{28} + 0,9V_{38} - 4V_{39} + 1,1V_{40} + V_{49} = 0$$

40 no'lu düğüm için;

$$V_{29} + 0,9166V_{39} - 4V_{40} + 1,83V_{41} + V_{50} = 0$$

41 no'lu düğüm için;

$$V_{30} + 0,9284V_{40} - 4V_{41} + 1,0714V_{42} + V_{51} = 0$$

42 no'lu düğüm için;

$$V_{31} + 0,9375V_{41} - 4V_{42} + 1,0625V_{43} + V_{52} = 0$$

43 no'lu düğüm için;

$$V_{32} + 0,9444V_{42} - 4V_{43} + 1,0555V_{44} + V_{53} = 0$$

44 no'lu düğüm için;

$$V_{33} + 0,95V_{43} - 4V_{44} + V_{54} + 1,05V_{105} = 0$$

46 no'lu düğüm için;

$$V_{36} - 4V_{46} + 1,25V_{47} = 0$$

47 no'lu düğüm için;

$$V_{37} + 0,8333V_{46} - 4V_{47} + 1,166V_{48} + V_{57} = 0$$

48 no'lu düğüm için;

$$V_{38} + 0,875V_{47} - 4V_{48} + 1,125V_{49} + V_{58} = 0$$

49 no'lu düğüm için;

$$V_{39} + 0,9V_{48} - 4V_{49} + 1,1V_{50} + V_{59} = 0$$

50 no'lu düğüm için;

$$V_{40} + 0,9166V_{49} - 4V_{50} + 1,083V_{51} + V_{60} = 0$$

51 no'lu düğüm için;

$$V_{41} + 0,9285V_{50} - 4V_{51} + 1,714V_{52} + V_{61} = 0$$

52 no'lu düğüm için;

$$V_{42} + 0,9375V_{51} - 4V_{52} + 1,0625V_{53} + V_{62} = 0$$

53 no'lu düğüm için;

$$V_{43} + 0,9444V_{52} - 4V_{53} + 1,0555V_{54} + V_{63} = 0$$

54 no'lu düğüm için;

$$V_{44} + 0,95V_{53} - 4V_{54} + V_{64} + 1,05V_{106} = 0$$

57 no'lu düğüm için;

$$V_{47} - 4V_{57} + 1,166V_{58} + V_{66} = 0$$

58 no'lu düğüm için;

$$V_{48} + 0,875V_{57} - 4V_{58} + 1,125V_{59} + V_{67} = 0$$

59 no'lu düğüm için;

$$V_{49} + 0,9V_{58} - 4V_{59} + 1,1V_{60} + V_{68} = 0$$

60 no'lu düğüm için;

$$V_{50} + 1,9166V_{59} - 4V_{60} + 1,083V_{61} + V_{69} = 0$$

61 no'lu düğüm için;

$$V_{51} + 0,9285V_{60} - 4V_{61} + 1,0714V_{62} + V_{70} = 0$$

62 no'lu düğüm için;

$$V_{52} + 0,9375V_{61} - 4V_{62} + 1,0625V_{63} + V_{71} = 0$$

63 no'lu düğüm için;

$$V_{53} + 0,9444V_{62} - 4V_{63} + 1,0555V_{64} + V_{72} = 0$$

64 no'lu düğüm için;

$$V_{54} + 0,95V_{63} - 4V_{64} + V_{73} + 1,05V_{107} = 0$$

66 no'lu düğüm için;

$$V_{57} - 4V_{66} + 1,166V_{67} = 0$$

67 no'lu düğüm için;

$$V_{58} + 0,875V_{66} - 4V_{67} + 1,125V_{68} + V_{76} = 0$$

68 no'lu düğüm için;

$$V_{59} + 0,9V_{67} - 4V_{68} + 1,1V_{69} + V_{77} = 0$$

69 no'lu düğüm için;

$$V_{60} + 0,9166V_{68} - 4V_{69} + 1,083V_{70} + V_{78} = 0$$

70 no'lu düğüm için;

$$V_{61} + 0,9285V_{69} - 4V_{70} + 1,0714V_{71} + V_{79} = 0$$

71 no'lu düğüm için;

$$V_{62} + 0,9375V_{70} - 4V_{71} + 1,0625V_{72} + V_{80} = 0$$

72 no'lu düğüm için;

$$V_{63} + 0,9444V_{71} - 4V_{72} + 1,0555V_{73} + V_{81} = 0$$

73 no'lu düğüm için;

$$V_{64} + 0,95V_{72} - 4V_{73} + V_{82} + 1,05V_{108} = 0$$

76 no'lu düğüm için;

$$V_{67} - 4V_{76} + 1,125V_{77} = 0$$

77 no'lu düğüm için;

$$V_{68} + 0,9V_{76} - 4V_{77} + 1,1V_{78} + V_{85} = 0$$

78 no'lu düğüm için;

$$V_{69} + 0,9166V_{77} - 4V_{78} + 1,083V_{79} + V_{86} = 0$$

79 no'lu düğüm için;

$$V_{70} + 0,9285V_{78} - 4V_{79} + 1,0714V_{80} + V_{87} = 0$$

80 no'lu düğüm için;

$$V_{71} + 0,9375V_{79} - 4V_{80} + 1,0625V_{81} + V_{88} = 0$$

81 no'lu düğüm için;

$$V_{72} + 0,9444V_{80} - 4V_{81} + 1,0555V_{82} + V_{89} = 0$$

82 no'lu düğüm için;

$$V_{73} + 0,95V_{81} - 4V_{82} + V_{90} + 1,05V_{109} = 0$$

85 no'lu düğüm için;

$$V_{77} - 4V_{85} + 1,1V_{86} = 0$$

86 no'lu düğüm için;

$$V_{78} + 0,9166V_{85} - 4V_{86} + 1,083V_{87} = 0$$

87 no'lu düğüm için;

$$V_{79} + 0,9285V_{86} - 4V_{87} + 1,0717V_{88} = 0$$

88 no'lu düğüm için;

$$V_{80} + 0,9375V_{87} - 4V_{88} + 1,0625V_{89} + V_{95} = 0$$

89 no'lu düğüm için;

$$V_{81} + 0,9444V_{88} - 4V_{89} + 1,0555V_{90} + V_{96} = 0$$

90 no'lu düğüm için;

$$V_{82} + 0,95V_{89} - 4V_{90} + V_{97} + 1,05V_{110} = 0$$

95 no'lu düğüm için;

$$V_{88} - 4V_{95} + 1,0625V_{96} = 0$$

96 no'lu düğüm için;

$$V_{89} + 0,9444V_{95} - 4V_{96} + 1,0555V_{97} = 0$$

97 no'lu düğüm için;

$$V_{90} + 0,95V_{96} - 4V_{97} + 1,05V_{111} = 0$$

103 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{22} - 4V_{103} + V_{104} + 1,04545V_{114} = -100$$

104 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{33} + V_{103} - 4V_{104} + V_{105} + 1,04545V_{115} = 0$$

105 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{44} + V_{104} - 4V_{105} + V_{106} + 1,04545V_{116} = 0$$

106 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{54} + V_{105} - 4V_{106} + V_{107} + 1,04545V_{117} = 0$$

107 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{64} + V_{106} - 4V_{107} + V_{108} + 1,04545V_{118} = 0$$

108 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{73} + V_{107} - 4V_{108} + V_{109} + 1,04545V_{119} = 0$$

109 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{82} + V_{108} - 4V_{109} + V_{110} + 1,04545V_{120} = 0$$

110 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{90} + V_{109} - 4V_{110} + V_{111} + 1,04545V_{121} = 0$$

111 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{97} + V_{110} - 4V_{111} + V_{112} + 1,04545V_{122} = 0$$

114 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{103} - 5,4492V_{114} + 1,3623V_{115} = -136,23$$

115 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{104} + 1,3623V_{114} - 5,4492V_{115} + 1,3623V_{116} = 0$$

116 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{105} + 1,3623V_{115} - 5,4492V_{116} + 1,3623V_{117} = 0$$

117 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{106} + 1,3623V_{116} - 5,4492V_{117} + 1,3623V_{118} = 0$$

118 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{107} + 1,3623V_{117} - 5,4492V_{118} + 1,3623V_{119} = 0$$

119 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{108} + 1,3623V_{118} - 5,4492V_{119} + 1,3623V_{120} = 0$$

120 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{109} + 1,3623V_{119} - 5,4492V_{120} + 1,3623V_{121} = 0$$

121 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{110} + 1,3623V_{120} - 5,4492V_{121} + 1,3623V_{122} = 0$$

122 no'lu düğüm için;

$$0,9583V_{111} + V_{21} - 4V_{122} + 1,04166V_{133} = 0$$

125 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{114} - 5,44V_{125} + 1,36V_{126} = -136$$

126 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{115} + 1,36V_{125} - 5,44V_{126} + 1,36V_{127} = 0$$

127 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{116} + 1,36V_{126} - 5,44V_{127} + 1,36V_{128} = 0$$

128 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{117} + 1,36V_{127} - 5,44V_{128} + 1,36V_{129} = 0$$

129 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{118} + 1,36V_{128} - 5,44V_{129} + 1,36V_{130} = 0$$

130 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{119} + 1,36V_{129} - 5,44V_{130} + 1,36V_{131} = 0$$

131 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{120} + 1,36V_{130} - 5,44V_{131} + 1,36V_{132} = 0$$

132 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{121} + 1,36V_{131} - 5,44V_{132} + 1,36V_{133} = 0$$

133 no'lu düğüm için;

$$2,72V_{122} + 1,36V_{132} - 5,44V_{133} = 0$$

Model-4 İçin Yazılan Sonlu Fark Denklemleri**2 no'lu düğüm için;**

$$-4V_2 + 1,5V_3 + 2V_{13} = 0$$

3 no'lu düğüm için;

$$0,75V_2 - 4V_3 + 1,25V_4 + 2V_{14} = 0$$

4 no'lu düğüm için;

$$0,8333V_3 - 4V_4 + 1,666V_5 + 2V_{15} = 0$$

5 no'lu düğüm için;

$$0,875V_4 - 4V_5 + 1,125V_6 + 2V_{16} = 0$$

6 no'lu düğüm için;

$$0,9V_5 - 4V_6 + 1,1V_7 + 2V_{17} = 0$$

7 no'lu düğüm için;

$$0,9166V_6 - 4V_7 + 1,083V_8 + 2V_{18} = 0$$

8 no'lu düğüm için;

$$0,9285V_7 - 4V_8 + 1,0714V_9 + 2V_{19} = 0$$

9 no'lu düğüm için;

$$0,9375V_8 - 4V_9 + 1,0625V_{10} + 2V_{20} = 0$$

10 no'lu düğüm için;

$$0,9444V_9 - 4V_{10} + 2V_{21} = -105,555$$

13 no'lu düğüm için;

$$V_2 - 4V_{13} + 1,5V_{14} + V_{24} = 0$$

14 no'lu düğüm için;

$$V_3 + 0,75V_{13} - 4V_{14} + 1,25V_{15} + V_{25} = 0$$

15 no'lu düğüm için;

$$V_4 + 0,8333V_{14} - 4V_{15} + 1,166V_{16} + V_{26} = 0$$

16 no'lu düğüm için;

$$V_5 + 0,875V_{15} - 4V_{16} + 1,125V_{17} + V_{27} = 0$$

17 no'lu düğüm için;

$$V_6 + 0,9V_{16} - 4V_{17} + 1,1V_{18} + V_{28} = 0$$

18 no'lu düğüm için;

$$V_7 + 0,9166V_{17} - 4V_{18} + 1,083V_{19} + V_{29} = 0$$

19 no'lu düğüm için;

$$V_8 + 0,9285V_{18} - 4V_{19} + 1,0714V_{20} + V_{30} = 0$$

20 no'lu düğüm için;

$$V_9 + 0,9375V_{19} - 4V_{20} + 1,0625V_{21} + V_{31} = 0$$

21 no'lu düğüm için;

$$V_{10} + 0,94444V_{20} - 4V_{21} + 1,0555V_{22} + V_{32} = 0$$

22 no'lu düğüm için;

$$0,95V_{21} - 4V_{22} + V_{33} + 1,05V_{103} = -100$$

24 no'lu düğüm için;

$$V_{13} - 4V_{24} + 1,5V_{25} = 0$$

25 no'lu düğüm için;

$$V_{14} + 0,75V_{24} - 4V_{25} + 1,25V_{26} + V_{36} = 0$$

26 no'lu düğüm için;

$$V_{15} + 0,8333V_{25} - 4V_{26} + 1,166V_{27} + V_{37} = 0$$

27 no'lu düğüm için;

$$V_{16} + 0,875V_{26} - 4V_{27} + 1,125V_{28} + V_{38} = 0$$

28 no'lu düğüm için;

$$V_{17} + 0,9V_{27} - 4V_{28} + 1,1V_{29} + V_{39} = 0$$

29 no'lu düğüm için;

$$V_{18} + 0,9166V_{28} - 4V_{29} + 1,083V_{30} + V_{40} = 0$$

30 no'lu düğüm için;

$$V_{19} + 0,9285V_{29} - 4V_{30} + 1,0714V_{31} + V_{41} = 0$$

31 no'lu düğüm için;

$$V_{20} + 0,9375V_{30} - 4V_{31} + 1,0625V_{32} + V_{42} = 0$$

32 no'lu düğüm için;

$$V_{21} + 0,9444V_{31} - 4V_{32} + 1,0555V_{33} + V_{43} = 0$$

33 no'lu düğüm için;

$$V_{22} + 0,95V_{32} - 4V_{33} + V_{44} + 1,05V_{14} = 0$$

36 no'lu düğüm için;

$$V_{25} - 4V_{36} + 1,25V_{37} + V_{46} = 0$$

37 no'lu düğüm için;

$$V_{26} + 0,8333V_{36} - 4V_{37} + 1,166V_{38} + V_{47} = 0$$

38 no'lu düğüm için;

$$V_{27} + 0,875V_{37} - 4V_{38} + 1,125V_{39} + V_{48} = 0$$

39 no'lu düğüm için;

$$V_{28} + 0,9V_{38} - 4V_{39} + 1,1V_{40} + V_{49} = 0$$

40 no'lu düğüm için;

$$V_{29} + 0,9166V_{39} - 4V_{40} + 1,83V_{41} + V_{50} = 0$$

41 no'lu düğüm için;

$$V_{30} + 0,9284V_{40} - 4V_{41} + 1,0714V_{42} + V_{51} = 0$$

42 no'lu düğüm için;

$$V_{31} + 0,9375V_{41} - 4V_{42} + 1,0625V_{43} + V_{52} = 0$$

43 no'lu düğüm için;

$$V_{32} + 0,9444V_{42} - 4V_{43} + 1,0555V_{44} + V_{53} = 0$$

44 no'lu düğüm için;

$$V_{33} + 0,95V_{43} - 4V_{44} + V_{54} + 1,05V_{105} = 0$$

46 no'lu düğüm için;

$$V_{36} - 4V_{46} + 1,25V_{47} = 0$$

47 no'lu düğüm için;

$$V_{37} + 0,8333V_{46} - 4V_{47} + 1,166V_{48} + V_{57} = 0$$

48 no'lu düğüm için;

$$V_{38} + 0,875V_{47} - 4V_{48} + 1,125V_{49} + V_{58} = 0$$

49 no'lu düğüm için;

$$V_{39} + 0,9V_{48} - 4V_{49} + 1,1V_{50} + V_{59} = 0$$

50 no'lu düğüm için;

$$V_{40} + 0,9166V_{49} - 4V_{50} + 1,083V_{51} + V_{60} = 0$$

51 no'lu düğüm için;

$$V_{41} + 0,9285V_{50} - 4V_{51} + 1,714V_{52} + V_{61} = 0$$

52 no'lu düğüm için;

$$V_{42} + 0,9375V_{51} - 4V_{52} + 1,0625V_{53} + V_{62} = 0$$

53 no'lu düğüm için;

$$V_{43} + 0,9444V_{52} - 4V_{53} + 1,0555V_{54} + V_{63} = 0$$

54 no'lu düğüm için;

$$V_{44} + 0,95V_{53} - 4V_{54} + V_{64} + 1,05V_{106} = 0$$

57 no'lu düğüm için;

$$V_{47} - 4V_{57} + 1,166V_{58} + V_{66} = 0$$

58 no'lu düğüm için;

$$V_{48} + 0,875V_{57} - 4V_{58} + 1,125V_{59} + V_{67} = 0$$

59 no'lu düğüm için;

$$V_{49} + 0,9V_{58} - 4V_{59} + 1,1V_{60} + V_{68} = 0$$

60 no'lu düğüm için;

$$V_{50} + 1,9166V_{59} - 4V_{60} + 1,083V_{61} + V_{69} = 0$$

61 no'lu düğüm için;

$$V_{51} + 0,9285V_{60} - 4V_{61} + 1,0714V_{62} + V_{70} = 0$$

62 no'lu düğüm için;

$$V_{52} + 0,9375V_{61} - 4V_{62} + 1,0625V_{63} + V_{71} = 0$$

63 no'lu düğüm için;

$$V_{53} + 0,9444V_{62} - 4V_{63} + 1,0555V_{64} + V_{72} = 0$$

64 no'lu düğüm için;

$$V_{54} + 0,95V_{63} - 4V_{64} + V_{73} + 1,05V_{107} = 0$$

66 no'lu düğüm için;

$$V_{57} - 4V_{66} + 1,166V_{67} = 0$$

67 no'lu düğüm için;

$$V_{58} + 0,875V_{66} - 4V_{67} + 1,125V_{68} + V_{76} = 0$$

68 no'lu düğüm için;

$$V_{59} + 0,9V_{67} - 4V_{68} + 1,1V_{69} + V_{77} = 0$$

69 no'lu düğüm için;

$$V_{60} + 0,9166V_{68} - 4V_{69} + 1,083V_{70} + V_{78} = 0$$

70 no'lu düğüm için;

$$V_{61} + 0,9285V_{69} - 4V_{70} + 1,0714V_{71} + V_{79} = 0$$

71 no'lu düğüm için;

$$V_{62} + 0,9375V_{70} - 4V_{71} + 1,0625V_{72} + V_{80} = 0$$

72 no'lu düğüm için;

$$V_{63} + 0,9444V_{71} - 4V_{72} + 1,0555V_{73} + V_{81} = 0$$

73 no'lu düğüm için;

$$V_{64} + 0,95V_{72} - 4V_{73} + V_{82} + 1,05V_{108} = 0$$

76 no'lu düğüm için;

$$V_{67} - 4V_{76} + 1,125V_{77} = 0$$

77 no'lu düğüm için;

$$V_{68} + 0,9V_{76} - 4V_{77} + 1,1V_{78} + V_{85} = 0$$

78 no'lu düğüm için;

$$V_{69} + 0,9166V_{77} - 4V_{78} + 1,083V_{79} + V_{86} = 0$$

79 no'lu düğüm için;

$$V_{70} + 0,9285V_{78} - 4V_{79} + 1,0714V_{80} + V_{87} = 0$$

80 no'lu düğüm için;

$$V_{71} + 0,9375V_{79} - 4V_{80} + 1,0625V_{81} + V_{88} = 0$$

81 no'lu düğüm için;

$$V_{72} + 0,9444V_{80} - 4V_{81} + 1,0555V_{82} + V_{89} = 0$$

82 no'lu düğüm için;

$$V_{73} + 0,95V_{81} - 4V_{82} + V_{90} + 1,05V_{109} = 0$$

85 no'lu düğüm için;

$$V_{77} - 4V_{85} + 1,1V_{86} = 0$$

86 no'lu düğüm için;

$$V_{78} + 0,9166V_{85} - 4V_{86} + 1,083V_{87} = 0$$

87 no'lu düğüm için;

$$V_{79} + 0,9285V_{86} - 4V_{87} + 1,0717V_{88} = 0$$

88 no'lu düğüm için;

$$V_{80} + 0,9375V_{87} - 4V_{88} + 1,0625V_{89} + V_{95} = 0$$

89 no'lu düğüm için;

$$V_{81} + 0,9444V_{88} - 4V_{89} + 1,0555V_{90} + V_{96} = 0$$

90 no'lu düğüm için;

$$V_{82} + 0,95V_{89} - 4V_{90} + V_{97} + 1,05V_{110} = 0$$

95 no'lu düğüm için;

$$V_{88} - 4V_{95} + 1,0625V_{96} = 0$$

96 no'lu düğüm için;

$$V_{89} + 0,9444V_{95} - 4V_{96} + 1,0555V_{97} = 0$$

97 no'lu düğüm için;

$$V_{90} + 0,95V_{96} - 4V_{97} + 1,05V_{111} = 0$$

103 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{22} - 4V_{103} + V_{104} + 1,04545V_{114} = -100$$

104 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{33} + V_{103} - 4V_{104} + V_{105} + 1,04545V_{115} = 0$$

105 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{44} + V_{104} - 4V_{105} + V_{106} + 1,04545V_{116} = 0$$

106 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{54} + V_{105} - 4V_{106} + V_{107} + 1,04545V_{117} = 0$$

107 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{64} + V_{106} - 4V_{107} + V_{108} + 1,04545V_{118} = 0$$

108 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{73} + V_{107} - 4V_{108} + V_{109} + 1,04545V_{119} = 0$$

109 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{82} + V_{108} - 4V_{109} + V_{110} + 1,04545V_{120} = 0$$

110 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{90} + V_{109} - 4V_{110} + V_{111} + 1,04545V_{121} = 0$$

111 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{97} + V_{110} - 4V_{111} + V_{112} + 1,04545V_{122} = 0$$

114 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{103} - 5,4492V_{114} + 1,3623V_{115} = -136,23$$

115 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{104} + 1,3623V_{114} - 5,4492V_{115} + 1,3623V_{116} = 0$$

116 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{105} + 1,3623V_{115} - 5,4492V_{116} + 1,3623V_{117} = 0$$

117 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{106} + 1,3623V_{116} - 5,4492V_{117} + 1,3623V_{118} = 0$$

118 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{107} + 1,3623V_{117} - 5,4492V_{118} + 1,3623V_{119} = 0$$

119 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{108} + 1,3623V_{118} - 5,4492V_{119} + 1,3623V_{120} = 0$$

120 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{109} + 1,3623V_{119} - 5,4492V_{120} + 1,3623V_{121} = 0$$

121 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{110} + 1,3623V_{120} - 5,4492V_{121} + 1,3623V_{122} = 0$$

122 no'lu düğüm için;

$$0,9583V_{111} + V_{21} - 4V_{122} + 1,04166V_{133} = 0$$

125 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{114} - 4V_{125} + V_{126} + 1,03846V_{136} = -100$$

126 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{115} + V_{125} - 4V_{126} + V_{127} + 1,03846V_{137} = 0$$

127 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{116} + V_{126} - 4V_{127} + V_{128} + 1,03846V_{138} = 0$$

128 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{117} + V_{127} - 4V_{128} + V_{129} + 1,03846V_{139} = 0$$

129 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{118} + V_{128} - 4V_{129} + V_{130} + 1,03846V_{140} = 0$$

130 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{119} + V_{129} - 4V_{130} + V_{131} + 1,03846V_{141} = 0$$

131 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{120} + V_{130} - 4V_{131} + V_{132} + 1,03846V_{142} = 0$$

132 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{121} + V_{131} - 4V_{132} + V_{133} + 1,03846V_{143} = 0$$

133 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{122} + V_{132} - 4V_{133} + 1,03846V_{144} = 0$$

136 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{125} - 5,432V_{136} + 1,358V_{137} = -135,8$$

137 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{126} + 1,358V_{136} - 5,432V_{137} + 1,358V_{138} = 0$$

138 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{127} + 1,358V_{137} - 5,432V_{138} + 1,358V_{139} = 0$$

139 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{128} + 1,358V_{138} - 5,432V_{139} + 1,358V_{140} = 0$$

140 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{129} + 1,358V_{139} - 5,432V_{140} + 1,358V_{141} = 0$$

141 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{130} + 1,358V_{140} - 5,432V_{141} + 1,358V_{142} = 0$$

142 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{131} + 1,358V_{141} - 5,432V_{142} + 1,358V_{143} = 0$$

143 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{132} + 1,358V_{142} - 5,432V_{143} + 1,358V_{144} = 0$$

144 no'lu düğüm için;

$$2,716V_{133} + 1,358V_{143} - 5,432V_{144} = 0$$

Model-5 İçin Yazılan Sonlu Fark Denklemleri**2 no'lu düğüm için;**

$$-4V_2 + 1,5V_3 + 2V_{13} = 0$$

3 no'lu düğüm için;

$$0,75V_2 - 4V_3 + 1,25V_4 + 2V_{14} = 0$$

4 no'lu düğüm için;

$$0,8333V_3 - 4V_4 + 1,666V_5 + 2V_{15} = 0$$

5 no'lu düğüm için;

$$0,875V_4 - 4V_5 + 1,125V_6 + 2V_{16} = 0$$

6 no'lu düğüm için;

$$0,9V_5 - 4V_6 + 1,1V_7 + 2V_{17} = 0$$

7 no'lu düğüm için;

$$0,9166V_6 - 4V_7 + 1,083V_8 + 2V_{18} = 0$$

8 no'lu düğüm için;

$$0,9285V_7 - 4V_8 + 1,0714V_9 + 2V_{19} = 0$$

9 no'lu düğüm için;

$$0,9375V_8 - 4V_9 + 1,0625V_{10} + 2V_{20} = 0$$

10 no'lu düğüm için;

$$0,9444V_9 - 4V_{10} + 2V_{21} = -105,555$$

13 no'lu düğüm için;

$$V_2 - 4V_{13} + 1,5V_{14} + V_{24} = 0$$

14 no'lu düğüm için;

$$V_3 + 0,75V_{13} - 4V_{14} + 1,25V_{15} + V_{25} = 0$$

15 no'lu düğüm için;

$$V_4 + 0,8333V_{14} - 4V_{15} + 1,166V_{16} + V_{26} = 0$$

16 no'lu düğüm için;

$$V_5 + 0,875V_{15} - 4V_{16} + 1,125V_{17} + V_{27} = 0$$

17 no'lu düğüm için;

$$V_6 + 0,9V_{16} - 4V_{17} + 1,1V_{18} + V_{28} = 0$$

18 no'lu düğüm için;

$$V_7 + 0,9166V_{17} - 4V_{18} + 1,083V_{19} + V_{29} = 0$$

19 no'lu düğüm için;

$$V_8 + 0,9285V_{18} - 4V_{19} + 1,0714V_{20} + V_{30} = 0$$

20 no'lu düğüm için;

$$V_9 + 0,9375V_{19} - 4V_{20} + 1,0625V_{21} + V_{31} = 0$$

21 no'lu düğüm için;

$$V_{10} + 0,94444V_{20} - 4V_{21} + 1,0555V_{22} + V_{32} = 0$$

22 no'lu düğüm için;

$$0,95V_{21} - 4V_{22} + V_{33} + 1,05V_{103} = -100$$

24 no'lu düğüm için;

$$V_{13} - 4V_{24} + 1,5V_{25} = 0$$

25 no'lu düğüm için;

$$V_{14} + 0,75V_{24} - 4V_{25} + 1,25V_{26} + V_{36} = 0$$

26 no'lu düğüm için;

$$V_{15} + 0,8333V_{25} - 4V_{26} + 1,166V_{27} + V_{37} = 0$$

27 no'lu düğüm için;

$$V_{16} + 0,875V_{26} - 4V_{27} + 1,125V_{28} + V_{38} = 0$$

28 no'lu düğüm için;

$$V_{17} + 0,9V_{27} - 4V_{28} + 1,1V_{29} + V_{39} = 0$$

29 no'lu düğüm için;

$$V_{18} + 0,9166V_{28} - 4V_{29} + 1,083V_{30} + V_{40} = 0$$

30 no'lu düğüm için;

$$V_{19} + 0,9285V_{29} - 4V_{30} + 1,0714V_{31} + V_{41} = 0$$

31 no'lu düğüm için;

$$V_{20} + 0,9375V_{30} - 4V_{31} + 1,0625V_{32} + V_{42} = 0$$

32 no'lu düğüm için;

$$V_{21} + 0,9444V_{31} - 4V_{32} + 1,0555V_{33} + V_{43} = 0$$

33 no'lu düğüm için;

$$V_{22} + 0,95V_{32} - 4V_{33} + V_{44} + 1,05V_{14} = 0$$

36 no'lu düğüm için;

$$V_{25} - 4V_{36} + 1,25V_{37} + V_{46} = 0$$

37 no'lu düğüm için;

$$V_{26} + 0,8333V_{36} - 4V_{37} + 1,166V_{38} + V_{47} = 0$$

38 no'lu düğüm için;

$$V_{27} + 0,875V_{37} - 4V_{38} + 1,125V_{39} + V_{48} = 0$$

39 no'lu düğüm için;

$$V_{28} + 0,9V_{38} - 4V_{39} + 1,1V_{40} + V_{49} = 0$$

40 no'lu düğüm için;

$$V_{29} + 0,9166V_{39} - 4V_{40} + 1,83V_{41} + V_{50} = 0$$

41 no'lu düğüm için;

$$V_{30} + 0,9284V_{40} - 4V_{41} + 1,0714V_{42} + V_{51} = 0$$

42 no'lu düğüm için;

$$V_{31} + 0,9375V_{41} - 4V_{42} + 1,0625V_{43} + V_{52} = 0$$

43 no'lu düğüm için;

$$V_{32} + 0,9444V_{42} - 4V_{43} + 1,0555V_{44} + V_{53} = 0$$

44 no'lu düğüm için;

$$V_{33} + 0,95V_{43} - 4V_{44} + V_{54} + 1,05V_{105} = 0$$

46 no'lu düğüm için;

$$V_{36} - 4V_{46} + 1,25V_{47} = 0$$

47 no'lu düğüm için;

$$V_{37} + 0,8333V_{46} - 4V_{47} + 1,166V_{48} + V_{57} = 0$$

48 no'lu düğüm için;

$$V_{38} + 0,875V_{47} - 4V_{48} + 1,125V_{49} + V_{58} = 0$$

49 no'lu düğüm için;

$$V_{39} + 0,9V_{48} - 4V_{49} + 1,1V_{50} + V_{59} = 0$$

50 no'lu düğüm için;

$$V_{40} + 0,9166V_{49} - 4V_{50} + 1,083V_{51} + V_{60} = 0$$

51 no'lu düğüm için;

$$V_{41} + 0,9285V_{50} - 4V_{51} + 1,714V_{52} + V_{61} = 0$$

52 no'lu düğüm için;

$$V_{42} + 0,9375V_{51} - 4V_{52} + 1,0625V_{53} + V_{62} = 0$$

53 no'lu düğüm için;

$$V_{43} + 0,9444V_{52} - 4V_{53} + 1,0555V_{54} + V_{63} = 0$$

54 no'lu düğüm için;

$$V_{44} + 0,95V_{53} - 4V_{54} + V_{64} + 1,05V_{106} = 0$$

57 no'lu düğüm için;

$$V_{47} - 4V_{57} + 1,166V_{58} + V_{66} = 0$$

58 no'lu düğüm için;

$$V_{48} + 0,875V_{57} - 4V_{58} + 1,125V_{59} + V_{67} = 0$$

59 no'lu düğüm için;

$$V_{49} + 0,9V_{58} - 4V_{59} + 1,1V_{60} + V_{68} = 0$$

60 no'lu düğüm için;

$$V_{50} + 1,9166V_{59} - 4V_{60} + 1,083V_{61} + V_{69} = 0$$

61 no'lu düğüm için;

$$V_{51} + 0,9285V_{60} - 4V_{61} + 1,0714V_{62} + V_{70} = 0$$

62 no'lu düğüm için;

$$V_{52} + 0,9375V_{61} - 4V_{62} + 1,0625V_{63} + V_{71} = 0$$

63 no'lu düğüm için;

$$V_{53} + 0,9444V_{62} - 4V_{63} + 1,0555V_{64} + V_{72} = 0$$

64 no'lu düğüm için;

$$V_{54} + 0,95V_{63} - 4V_{64} + V_{73} + 1,05V_{107} = 0$$

66 no'lu düğüm için;

$$V_{57} - 4V_{66} + 1,166V_{67} = 0$$

67 no'lu düğüm için;

$$V_{58} + 0,875V_{66} - 4V_{67} + 1,125V_{68} + V_{76} = 0$$

68 no'lu düğüm için;

$$V_{59} + 0,9V_{67} - 4V_{68} + 1,1V_{69} + V_{77} = 0$$

69 no'lu düğüm için;

$$V_{60} + 0,9166V_{68} - 4V_{69} + 1,083V_{70} + V_{78} = 0$$

70 no'lu düğüm için;

$$V_{61} + 0,9285V_{69} - 4V_{70} + 1,0714V_{71} + V_{79} = 0$$

71 no'lu düğüm için;

$$V_{62} + 0,9375V_{70} - 4V_{71} + 1,0625V_{72} + V_{80} = 0$$

72 no'lu düğüm için;

$$V_{63} + 0,9444V_{71} - 4V_{72} + 1,0555V_{73} + V_{81} = 0$$

73 no'lu düğüm için;

$$V_{64} + 0,95V_{72} - 4V_{73} + V_{82} + 1,05V_{108} = 0$$

76 no'lu düğüm için;

$$V_{67} - 4V_{76} + 1,125V_{77} = 0$$

77 no'lu düğüm için;

$$V_{68} + 0,9V_{76} - 4V_{77} + 1,1V_{78} + V_{85} = 0$$

78 no'lu düğüm için;

$$V_{69} + 0,9166V_{77} - 4V_{78} + 1,083V_{79} + V_{86} = 0$$

79 no'lu düğüm için;

$$V_{70} + 0,9285V_{78} - 4V_{79} + 1,0714V_{80} + V_{87} = 0$$

80 no'lu düğüm için;

$$V_{71} + 0,9375V_{79} - 4V_{80} + 1,0625V_{81} + V_{88} = 0$$

81 no'lu düğüm için;

$$V_{72} + 0,9444V_{80} - 4V_{81} + 1,0555V_{82} + V_{89} = 0$$

82 no'lu düğüm için;

$$V_{73} + 0,95V_{81} - 4V_{82} + V_{90} + 1,05V_{109} = 0$$

85 no'lu düğüm için;

$$V_{77} - 4V_{85} + 1,1V_{86} = 0$$

86 no'lu düğüm için;

$$V_{78} + 0,9166V_{85} - 4V_{86} + 1,083V_{87} = 0$$

87 no'lu düğüm için;

$$V_{79} + 0,9285V_{86} - 4V_{87} + 1,0717V_{88} = 0$$

88 no'lu düğüm için;

$$V_{80} + 0,9375V_{87} - 4V_{88} + 1,0625V_{89} + V_{95} = 0$$

89 no'lu düğüm için;

$$V_{81} + 0,9444V_{88} - 4V_{89} + 1,0555V_{90} + V_{96} = 0$$

90 no'lu düğüm için;

$$V_{82} + 0,95V_{89} - 4V_{90} + V_{97} + 1,05V_{110} = 0$$

95 no'lu düğüm için;

$$V_{88} - 4V_{95} + 1,0625V_{96} = 0$$

96 no'lu düğüm için;

$$V_{89} + 0,9444V_{95} - 4V_{96} + 1,0555V_{97} = 0$$

97 no'lu düğüm için;

$$V_{90} + 0,95V_{96} - 4V_{97} + 1,05V_{111} = 0$$

103 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{22} - 4V_{103} + V_{104} + 1,04545V_{114} = -100$$

104 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{33} + V_{103} - 4V_{104} + V_{105} + 1,04545V_{115} = 0$$

105 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{44} + V_{104} - 4V_{105} + V_{106} + 1,04545V_{116} = 0$$

106 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{54} + V_{105} - 4V_{106} + V_{107} + 1,04545V_{117} = 0$$

107 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{64} + V_{106} - 4V_{107} + V_{108} + 1,04545V_{118} = 0$$

108 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{73} + V_{107} - 4V_{108} + V_{109} + 1,04545V_{119} = 0$$

109 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{82} + V_{108} - 4V_{109} + V_{110} + 1,04545V_{120} = 0$$

110 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{90} + V_{109} - 4V_{110} + V_{111} + 1,04545V_{121} = 0$$

111 no'lu düğüm için;

$$0,9545V_{97} + V_{110} - 4V_{111} + V_{112} + 1,04545V_{122} = 0$$

114 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{103} - 5,4492V_{114} + 1,3623V_{115} = -136,23$$

115 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{104} + 1,3623V_{114} - 5,4492V_{115} + 1,3623V_{116} = 0$$

116 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{105} + 1,3623V_{115} - 5,4492V_{116} + 1,3623V_{117} = 0$$

117 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{106} + 1,3623V_{116} - 5,4492V_{117} + 1,3623V_{118} = 0$$

118 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{107} + 1,3623V_{117} - 5,4492V_{118} + 1,3623V_{119} = 0$$

119 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{108} + 1,3623V_{118} - 5,4492V_{119} + 1,3623V_{120} = 0$$

120 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{109} + 1,3623V_{119} - 5,4492V_{120} + 1,3623V_{121} = 0$$

121 no'lu düğüm için;

$$2,7246V_{110} + 1,3623V_{120} - 5,4492V_{121} + 1,3623V_{122} = 0$$

122 no'lu düğüm için;

$$0,9583V_{111} + V_{21} - 4V_{122} + 1,04166V_{133} = 0$$

125 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{114} - 4V_{125} + V_{126} + 1,03846V_{136} = -100$$

126 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{115} + V_{125} - 4V_{126} + V_{127} + 1,03846V_{137} = 0$$

127 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{116} + V_{126} - 4V_{127} + V_{128} + 1,03846V_{138} = 0$$

128 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{117} + V_{127} - 4V_{128} + V_{129} + 1,03846V_{139} = 0$$

129 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{118} + V_{128} - 4V_{129} + V_{130} + 1,03846V_{140} = 0$$

130 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{119} + V_{129} - 4V_{130} + V_{131} + 1,03846V_{141} = 0$$

131 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{120} + V_{130} - 4V_{131} + V_{132} + 1,03846V_{142} = 0$$

132 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{121} + V_{131} - 4V_{132} + V_{133} + 1,03846V_{143} = 0$$

133 no'lu düğüm için;

$$0,9615V_{122} + V_{132} - 4V_{133} + 1,03846V_{144} = 0$$

136 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{125} - 4V_{136} + V_{137} + 1,0357V_{147} = -100$$

137 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{126} + V_{136} - 4V_{137} + V_{138} + 1,03571V_{148} = 0$$

138 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{127} + V_{137} - 4V_{138} + V_{139} + 1,03571V_{149} = 0$$

139 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{128} + V_{138} - 4V_{139} + V_{140} + 1,03571V_{150} = 0$$

140 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{129} + V_{139} - 4V_{140} + V_{141} + 1,03571V_{151} = 0$$

141 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{130} + V_{140} - 4V_{141} + V_{142} + 1,03571V_{152} = 0$$

142 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{131} + V_{141} - 4V_{142} + V_{143} + 1,03571V_{153} = 0$$

143 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{132} + V_{142} - 4V_{143} + V_{144} + 1,03571V_{154} = 0$$

144 no'lu düğüm için;

$$0,9642V_{133} + V_{143} - 4V_{144} + V_{145} + 1,03571V_{155} = 0$$

147 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{136} - 5,4252V_{147} + 1,3563V_{148} = -135,63$$

148 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{137} + 1,3563V_{147} - 5,4252V_{148} + 1,3563V_{149} = 0$$

149 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{138} + 1,3563V_{148} - 5,4252V_{149} + 1,3563V_{150} = 0$$

150 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{139} + 1,3563V_{149} - 5,4252V_{150} + 1,3563V_{151} = 0$$

151 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{140} + 1,3563V_{150} - 5,4252V_{151} + 1,3563V_{152} = 0$$

152 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{141} + 1,3563V_{151} - 5,4252V_{152} + 1,3563V_{153} = 0$$

153 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{142} + 1,3563V_{152} - 5,4252V_{153} + 1,3563V_{154} = 0$$

154 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{143} + 1,3563V_{153} - 5,4252V_{154} + 1,3563V_{155} = 0$$

155 no'lu düğüm için;

$$2,7126V_{144} + 1,3563V_{154} - 5,4252V_{155} = 0$$

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 03.12.1973

Doğum yeri İstanbul

Lise 1987-1990 Konya Gazi Lisesi

Lisans 1990-1994 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği BölümüYüksek Lisans 1994-1996 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Anabilim DalıDoktora 1996-2004 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**Çalıştığı kurumlar**1995-2000 YTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri
Anabilim Dalı Araştırma görevlisi

2000-Devam ediyor Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş.