

152285

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

152285

**GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLERİN TOPRAKLANMASINDA
TOPRAK VE TOPRAKLAYICILARIN DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Okan İhsan ÖZTÜRK
(504982001)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 27 Ocak 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Kasım 2004

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Özcan KALENDERLİ

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Kevork MARDİKYAN (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Ömer USTA (İ.T.Ü.)

Prof.Dr. Celal KOCATEPE (Y.T.Ü.)

Doç.Dr. Nurettin UMURKAN (Y.T.Ü.)

KASIM 2004

ÖNSÖZ

Elektrik aygıtlarında veya elektrik tesislerinde, meydana gelen bir yalıtım hatası, yıldırım boşalmaları, açma-kapama olayları, elektrostatik boşalmalar, kısa devreler ve toprak temaslari, nükleer elektromanyetik darbe durumlarında, mikrosaniyeler içerisinde meydana gelebilen kiloamper mertebesindeki akımların sebep olduğu çok yüksek potansiyel artışlarından etkilenebilmekte ve bu gibi yerlerde bulunabilecek olan canlılar hayati tehlikelere maruz kalabilmektedir. Ortaya çıkan bu gerilimler canlılar için hayati tehlikeye yol açtığı gibi elektriksel cihazlar için de onarılamayacak hasarlar meydana getirebilmektedir. Burada göz önünde bulundurulması gereken şey toprağa karşı meydana gelen bu gerilimlerde belli bir sınırı sağlayabilmek için gerek şebekenin ve gerekse işletme araçlarının topraklanmasıdır.

Bir topraklama sistemi, basit olarak topraklama iletkeni, topraklayıcı, ve toprak olmak üzere üç temel unsurdan oluşur. Bu doktora tezinde, topraklayıcı olarak kullanılan çubuk, şerit ve küre topraklayıcıların etraflarında oluşturdıkları potansiyel dağılımı farklı bir yaklaşımla Sonlu Farklar Yöntemi, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve analitik olarak hesaplanmış ve etraflarında canlılar açısından önemli olan adım geriliminin değişimi ve boyutu incelenmiştir.

Bu tez çalışması boyunca bana her zaman her konuda destek veren, yardımlarını ve insanlığını bir gün olsun esirgemeyen, tezin oluşumu sırasında beni yönlendiren tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, İ.T.Ü Elektrik Mühendisliği bölümünde öğrenci ve araştırma görevlisi olarak geçirdiğim öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm değerli hocalarıma, tez boyunca gerek deneysel gerekse teorik olarak yapılan çalışmalar esnasında birlikte çalıştığım dostum Elk. Yük. Müh. Ersan ŞENTÜRK'e, tezin hazırlanması aşamasında bana tüm kolaylıkları gösteren Turkcell İletişim Hizmetleri A.Ş.'deki yöneticilerime ve manevi katkılarını her zaman hissettiğim sevgili arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Son olarak, her zaman benimle birlikte olduklarını bilmekten mutluluk duyduğum sevgili aileme, özellikle maddi ve manevi katkılarından dolayı ağabeyim Onur ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim.

Ocak 2004

Okan İhsan ÖZTÜRK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
SEMBOL LİSTESİ	xviii
ÖZET	xix
SUMMARY	xx
1. GİRİŞ	1
1.1. Geçici Durumlarda Toprak ve Topraklayıcıların Davranışıyla İlgili Araştırmaların Geçmişi	3
1.2. Çubuk Topraklayıcıya Uygulanan Yıldırım Darbe Gerilimi ve Topraklayıcılar İçin Sonlu Fark ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Geliştirilen Modeller	22
2. ELEKTRİKSEL TOPRAKLAMA VE YILDIRIM BOŞALMALARI	27
2.1. Topraklama İle İlgili Genel Tanımlar	27
2.2. Yıldırım Boşalmaları	35
2.2.1. Yıldırım boşalmasının oluşumu	35
2.2.2. Aşağı doğru inen yıldırım	36
2.2.3. Yukarı doğru çıkan yıldırım	37
2.2.4. Yıldırım boşalmasının özellikleri	37
2.2.5. Yıldırım akımı	38
3. ÇUBUK TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY VE SEY İLE SAYISAL ANALİZİ	42
3.1. Çubuk Topraklayıcı Hakkında Genel Bilgi	42
3.2. Potansiyel Dağılımının SFY İle İncelenmesi İçin Kurulan Modeller	43
3.3. Sonlu Farklar Yöntemi Kullanılarak Düğüm Potansiyel Denklemlerinin Yazılması	45
3.4. MS EXCEL Programı Kullanılarak Düğüm Potansiyellerinin Hesabı	47
3.5. Farklı Uzunluklardaki Çubuk Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı	52
3.5.1. 1 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile hesabı	52
3.5.2. 5 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile hesabı	58
3.5.3. 10 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile hesabı	64
3.6. Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile Hesabı	71
3.6.1. Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	73

3.6.1.1. 1 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	73
3.6.1.2. 5 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	78
3.6.1.3 10 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	83
3.6.2. Farklı gömülme derinliklerinde 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımlarının SEY ile hesabı	91
3.6.3. Farklı dielektrik sabitli toprak içine gömülmüş farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımın SEY ile hesabı	98
3.6.3.1 2 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprağa gömülmesi durumunda potansiyel dağılımının hesabı	98
3.6.3.2 5 m ve 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcıların farklı dielektrik sabitli toprağa gömülmesi durumunda potansiyel dağılımının hesabı	104
3.6.4. Farklı dielektrik tabakalı toprak içine gömülmüş 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	106
3.6.5. Çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımın analitik, SFY ve SEY ile yapılan hesaplarının karşılaştırılması	110
3.6.6. 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan potansiyel dağılımının korona olayı bakımından SEY ile incelenmesi	113
4. KÜRE TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY VE SEY İLE SAYISAL ANALİZİ	120
4.1. Küre Topraklayıcı Hakkında Genel Bilgi	120
4.2. Yarı Küre Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY, SEY ve Analitik Olarak Hesaplanması İçin Kurulan Modeller	122
4.2.1. 0,02 m çapındaki yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY kullanılarak hesaplanması	125
4.2.2. 1 m çapındaki yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ve analitik olarak hesaplanması	129
5. ŞERİT TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY VE SEY İLE SAYISAL ANALİZİ	139
5.1. Şerit Topraklayıcı Hakkında Genel Bilgi	139
5.2. Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY Kullanılarak Hesaplanması İçin Kurulan Model	140
5.3. Sonlu Farklar Yöntemi Kullanılarak Düğüm Potansiyel Denklemlerinin Yazılması	141
5.4. Farklı Uzunluklardaki Şerit Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı	144
5.4.1. 5 metre uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile hesabı	144
5.4.2. 25 metre uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile hesabı	150
5.4.3. 50 metre uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile hesabı	156
5.5. Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY İle Hesabı	163

5.5.1. Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	164
5.5.1.1. 5 metre uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	164
5.5.1.2. 25 metre uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	169
5.5.1.3. 50 metre uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	174
5.5.2. Farklı gömülme derinliklerinde 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	181
5.5.3. Farklı dielektrik sabitli toprak içine gömülmüş farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	188
5.5.3.1. 10 metre uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprağa gömülmesi durumunda potansiyel dağılımının hesabı	188
5.5.4. Farklı dielektrik tabakalı toprak içine gömülmüş 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile hesabı	194
5.5.4.1. Seri toprak yapısı içine gömülme durumu	194
5.5.4.2. Paralel toprak yapısı içine gömülme durumu	197
6. ŞERİT TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY İLE ÜÇ BOYUTLU SAYISAL ANALİZİ	202
6.1. 5 Metre Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının Üç Boyutlu SFY İle Hesabı	202
6.1.1. Şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının bulunması için üç boyutlu Laplace denkleminin sonlu farklar yöntemi çözümü	202
6.1.2. MS EXCEL programı ile üç boyutlu SFY kullanılarak elde edilen denklemlerin çözümü	204
6.1.3. 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu olarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen potansiyel dağılımı	209
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	215
KAYNAKLAR	225
EK A SONLU FARKLAR YÖNTEMİ	231
EK B SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	251
EK C DARBE GERİLİMİ DENEYİ	260
ÖZGEÇMİŞ	282

KISALTMALAR

AIEE	: American Institute of Electrical Engineers
EOU	: Elektrottan Olan Uzaklık
EMTP	: Electro Magnetic Transient Program
EMC	: Electro Magnetic Compatibility
FEMM	: Finite Element Method Magnetics
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEE	: Institute of Electrical Engineers
IFFT	: Inverse Fast Fourier Transformation
JIEE	: Japan Institute of Electrical Engineers
İ.T.Ü.	: İstanbul Teknik Üniversitesi
MS	: Microsoft
SFY	: Sonlu Farklar Yöntemi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Darbe akımı parametreleri.....	8
Tablo 2.1. Farklı tipteki topraklar için toprak öz direnci değerleri.....	29
Tablo 2.2. Yıldırım akımlarının kutbiyetinin ve yıldırım akım şiddetlerinin sıklık derecesine göre değerleri.....	41
Tablo 3.1. 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	55
Tablo 3.2. 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri.....	57
Tablo 3.3. 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	61
Tablo 3.4. 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri.....	63
Tablo 3.5. 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	67
Tablo 3.6. 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri.....	68
Tablo 3.7. Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde SFY ile bulunan potansiyel değerleri.....	69
Tablo 3.8. Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcı ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm arasında SFY ile bulunan adım gerilimi değerleri.....	71
Tablo 3.9. 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	77
Tablo 3.10. 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	82
Tablo 3.11. 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	87
Tablo 3.12. Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde SEY ile bulunan potansiyel değerleri.....	89
Tablo 3.13. Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcı ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm arasında SEY ile bulunan adım gerilimi değerleri.....	91
Tablo 3.14. Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan potansiyel değerleri.....	95
Tablo 3.15. Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri.....	97
Tablo 3.16. Toprak öz dirençleri ve karşı gelen bağıl dielektrik sabitleri....	98

Tablo 3.17.	2 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	101
Tablo 3.18.	2 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	102
Tablo 3.19.	Farklı uzunluklardaki farklı bağıl dielektrik sabitli toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri	104
Tablo 3.20.	1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan potansiyel değerleri.....	109
Tablo 3.21.	1 m, 2 m, 3 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY, SEY ve analitik olarak hesaplanan değerleri.....	111
Tablo 3.22.	2 m uzunluğunda ve farklı çaplarda çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	119
Tablo 4.1.	0,02 m çaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunan değerleri.....	128
Tablo 4.2.	0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının SEY ile bulunan potansiyel değerleri.....	133
Tablo 4.3.	0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY, SEY ve analitik olarak bulunan değerleri.....	134
Tablo 4.4.	0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının SFY, SEY ve analitik olarak bulunan potansiyel dağılımı ve gerilim değerleri.....	136
Tablo 4.5.	Farklı çaplardaki yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ve SEY ile bulunan değerleri.....	137
Tablo 5.1.	5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	147
Tablo 5.2.	5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri.....	149
Tablo 5.3.	25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	153
Tablo 5.4.	25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilim değerleri.....	155
Tablo 5.5.	50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	159
Tablo 5.6.	50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilim değerleri.....	160
Tablo 5.7.	Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde SFY ile bulunan potansiyel değerleri.....	161
Tablo 5.8.	Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcı ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm arasında SFY ile bulunan adım gerilimi değerleri.....	163
Tablo 5.9.	5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	168
Tablo 5.10.	25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	173

Tablo 5.11.	50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	177
Tablo 5.12.	Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki SEY ile bulunan potansiyel değerleri.....	179
Tablo 5.13.	Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcısı ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm arasında SEY ile bulunan adım gerilimi değerleri.....	181
Tablo 5.14.	Toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	185
Tablo 5.15.	Toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri.....	187
Tablo 5.16.	10 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	191
Tablo 5.17.	10 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri.....	192
Tablo 5.18.	4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde SEY ile bulunan potansiyel değerleri.....	196
Tablo 5.19.	Farklı kalınlıkta farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel değerleri.....	200
Tablo 6.1.	5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının ucuyla 10 m uzaklıktaki mesafe arasında üç boyutlu olarak yapılan hesaplamalar sonucu bulunan potansiyel değerleri.....	210
Tablo 6.2.	5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının 10 m ile 20 m uzaklıktaki mesafe arasında üç boyutlu olarak yapılan hesaplamalar sonucu bulunan potansiyel değerleri.....	211
Tablo A.1.	Birinci mertebeden sonlu farklar algoritmasına göre türev tanımları.....	233
Tablo C.1.	Farklı küre çaplarında değişik elektrot açıklıkları için küreler arasındaki atlama gerilimleri.....	269
Tablo C.2.	Deney-1 için elde edilen ölçüm sonuçları.....	278
Tablo C.3.	Deney-2 için elde edilen ölçüm sonuçları.....	278
Tablo C.4.	Deney-3 için elde edilen ölçüm sonuçları.....	281

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Göz potansiyeli hesaplanması için kurulan deney düzeneği.....	5
Şekil 1.2 : A. Sargent ve M. Darveniza tarafından kullanılan topraklama elektrodu şekilleri	6
Şekil 1.3 : Topraklama ağlarında etkin alan.....	7
Şekil 1.4 : h derinliğine gömülmüş yatay elektrot.....	9
Şekil 1.5 : h derinliğine gömülmüş yatay topraklayıcının elektriksel eşdeğer devresi.....	9
Şekil 1.6 : İki tabakalı toprağa gömülmüş iletken.....	11
Şekil 1.7 : Topraklayıcı yapıları.....	13
Şekil 1.8 : İki iletken durumu.....	15
Şekil 1.9 : Topraklama iletkenlerinin gösterilimi.....	17
Şekil 1.10 : Yıldırım koruma sistemi için oluşturulan konfigürasyonların bazıları.....	17
Şekil 1.11 : K. Tanabe ve A. Asakawa'nın kurdukları deney düzeneği.....	24
Şekil 1.12 : Topraklama sistemi önüne bariyer yerleştirilme durumu.....	20
Şekil 1.13 : Topraklayıcının referans toprağa göre yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımı.....	24
Şekil 2.1 : Topraklayıcının referans toprağa göre çevresinde meydana gelen potansiyel dağılımı.....	28
Şekil 2.2 : Bir yüksek gerilim tesisinde bir toprak teması olması durumunda dokunma gerilimi.....	30
Şekil 2.3 : Bir toprak kısa devresinde meydana gelen potansiyel dağılımı ve bu alanda bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi.....	34
Şekil 2.4 : Yıldırım türleri.....	36
Şekil 2.5 : Çok kademeli bir yıldırım boşalmasının gelişme evreleri.....	38
Şekil 2.6 : Yıldırım akımı.....	39
Şekil 2.7 : Birikmeli olasılık eğrileri.....	40
Şekil 3.1 : Çubuk topraklayıcının SFY modeli	44
Şekil 3.2 : SFY ile düğüm potansiyel denklemlerinin yazılması için kurulan model.....	45
Şekil 3.3 : SFY ile oluşturulan model ile MS EXCEL arasındaki benzeşimin gösterilimi.....	48
Şekil 3.4 : MS EXCEL hücre denklemi yazılımının gösterilimi.....	49
Şekil 3.5 : Düğüm potansiyel değerlerinin bulunması için MS EXCEL hücresel denklem çözümü gösterilimi.....	50
Şekil 3.6 : Düğüm potansiyellerinin MS EXCEL ile bulunması için kullanılan algoritma.....	51
Şekil 3.7 : 1 m uzunluğundaki çubuk elektrot için kurulan SFY modeli.....	53

Şekil 3.8	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımın MS EXCEL hücresele denklem yöntemi ile bulunan değerleri	54
Şekil 3.9	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	56
Şekil 3.10	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi.....	58
Şekil 3.11	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için kurulan SFY modeli	59
Şekil 3.12	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımın MS EXCEL hücresele denklem yöntemi ile bulunan değerleri.....	60
Şekil 3.13	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	62
Şekil 3.14	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi.....	63
Şekil 3.15	: 10 m uzunluğundaki çubuk elektrot için kurulan SFY modeli.....	65
Şekil 3.16	: 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımın hücresele denklem yöntemi ile bulunan değerleri.....	66
Şekil 3.17	: 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi.....	68
Şekil 3.18	: Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde SFY yöntemi ile bulunan düğüm potansiyelleri değişimi.....	70
Şekil 3.19	: Farklı uzunluklardaki çubuk elektrot için SFY ile bulunan adım gerilimi değişimi.....	71
Şekil 3.20	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	74
Şekil 3.21	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	75
Şekil 3.22	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel değişimi.....	75
Şekil 3.23	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri.....	76
Şekil 3.24	: 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	78
Şekil 3.25	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	79
Şekil 3.26	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	80
Şekil 3.27	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	80
Şekil 3.28	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri.....	81
Şekil 3.29	: 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	83
Şekil 3.30	: 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	84
Şekil 3.31	: 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	85

Şekil 3.32 : 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	85
Şekil 3.33 : 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri.....	86
Şekil 3.34 : 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	88
Şekil 3.35 : Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde SEY ile bulunan düğüm potansiyellerinin değişimi.....	90
Şekil 3.36 : Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcı için SEY ile bulunan adım gerilimi değişimi.....	91
Şekil 3.37 : 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	92
Şekil 3.38 : 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması	93
Şekil 3.39 : 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı....	94
Şekil 3.40 : 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgiler..	94
Şekil 3.41 : Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	96
Şekil 3.42 : Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım geriliminin değişimi.....	97
Şekil 3.43 : 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları için kurulan SEY modeli.....	99
Şekil 3.44 : 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	99
Şekil 3.45 : 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	100
Şekil 3.46 : 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri.....	100
Şekil 3.47 : 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı.....	103
Şekil 3.48 : Farklı uzunluklardaki, farklı bağıl dielektrik sabitli toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri	105
Şekil 3.49 : 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan model.....	106

Şekil 3.50	: 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan modelin toprak yapısının gösterilmesi.....	107
Şekil 3.51	: 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	107
Şekil 3.52	: 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içinde uzunluğu 5 m olan çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı.....	108
Şekil 3.53	: 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri.....	108
Şekil 3.54	: 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyelin değişimi.....	109
Şekil 3.55	: 1 m, 2 m, 3 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SFY, SEY ve analitik olarak bulunan potansiyel dağılımı.....	112
Şekil 3.56	: $i = f(u)$ eğrisi.....	113
Şekil 3.57	: Yarıçapı r olan bir iletkenin ışıklı zar kalınlığının hesabı.....	114
Şekil 3.58	: 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapındaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	116
Şekil 3.59	: 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapındaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	117
Şekil 3.60	: 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapında çubuk elektrot çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	117
Şekil 3.61	: 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapındaki çubuk elektrot çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri.....	118
Şekil 3.62	: 2 m uzunluğunda ve farklı çaplarda çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	119
Şekil 4.1	: Yarı küre topraklayıcı.....	120
Şekil 4.2	: Yarı küre topraklayıcı civarında gerilimin ve potansiyel dağılımının uzaklığa bağlı olarak değişimi.....	123
Şekil 4.3	: Eşmerkezli küresel elektrot sistemi.....	123
Şekil 4.4	: Yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla kullanılan model.....	125
Şekil 4.5	: 0,02 m çaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımın SFY ile bulunması amacıyla kurulan model.....	126
Şekil 4.6	: 0,02 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki SFY kullanılarak bulunan potansiyel dağılımının gösterilmesi.....	127
Şekil 4.7	: 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımın SEY ile bulunması amacıyla kurulan model.....	129
Şekil 4.8	: 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	130
Şekil 4.9	: 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	131

Şekil 4.10	: 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri.....	131
Şekil 4.11	: 0,5 m yarıçapındaki yarıküre topraklayıcının SEY ile bulunan potansiyel değişimi.....	132
Şekil 4.12	: 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının SFY, SEY ve analitik olarak bulunan potansiyel dağılımları.....	135
Şekil 4.13	: 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcı civarında gerilimin ve potansiyel dağılımının uzaklığa bağlı olarak değişimi.....	136
Şekil 5.1	: Şerit topraklayıcının SFY modeli.....	141
Şekil 5.2	: Şerit topraklayıcı için SFY ile düğüm potansiyel denklemlerinin yazılması için kurulan model.....	142
Şekil 5.3	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için kurulan SFY modeli ...	145
Şekil 5.4	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımın hücresele denklem yöntemi ile bulunan değerleri.....	146
Şekil 5.5	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	148
Şekil 5.6	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi.....	150
Şekil 5.7	: 25 m uzunluğundaki şerit elektrot için kurulan SFY modeli.....	151
Şekil 5.8	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımın hücresele denklem yöntemi ile bulunan değerleri.....	152
Şekil 5.9	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	154
Şekil 5.10	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi.....	155
Şekil 5.11	: 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için kurulan SFY modeli..	157
Şekil 5.12	: 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımın hücresele denklem yöntemiyle bulunan değerleri.....	158
Şekil 5.13	: 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi.....	160
Şekil 5.14	: Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde SFY yöntemi ile bulunan düğüm potansiyellerinin değişimi.....	162
Şekil 5.15	: Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcı için SFY ile bulunan adım gerilimi değişimi.....	163
Şekil 5.16	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	165
Şekil 5.17	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	166
Şekil 5.18	: 5 m uzunluğunda şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	166
Şekil 5.19	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri.....	167
Şekil 5.20	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	169
Şekil 5.21	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	170
Şekil 5.22	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	171

Şekil 5.23	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	171
Şekil 5.24	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri.....	172
Şekil 5.25	: 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	174
Şekil 5.26	: 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	175
Şekil 5.27	: 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	175
Şekil 5.28	: 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	176
Şekil 5.29	: 50 m uzunluğunda şerit topraklayıcı çevresindeki eşpotansiyel çizgiler.....	176
Şekil 5.30	: 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi.....	178
Şekil 5.31	: Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde SEY ile bulunan düğüm potansiyellerinin değişimi.....	180
Şekil 5.32	: Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcı için SEY ile bulunan adım gerilimi değişimi.....	181
Şekil 5.33	: 50 cm gömülme derinliğinde, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli.....	182
Şekil 5.34	: 50 cm gömülme derinliğinde, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	183
Şekil 5.35	: 50 cm gömülme derinliğinde, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı ...	183
Şekil 5.36	: 50 cm gömülme derinliğinde, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri	184
Şekil 5.37	: Toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerinin grafiksel gösterilimi.....	186
Şekil 5.38	: Toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım geriliminin değişimi.....	187
Şekil 5.39	: 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları için kurulan SEY modeli.....	189
Şekil 5.40	: 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	189
Şekil 5.41	: 10 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	190
Şekil 5.42	: 10 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgiler.....	190

Şekil 5.43	: 10 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı.....	193
Şekil 5.44	: 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan model.....	194
Şekil 5.45	: 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	195
Şekil 5.46	: 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	195
Şekil 5.47	: 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri.....	196
Şekil 5.48	: 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel değişimi.....	197
Şekil 5.49	: Farklı kalınlıktaki, farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan model.....	198
Şekil 5.50	: Farklı kalınlıktaki farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması.....	198
Şekil 5.51	: Farklı kalınlıktaki, farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı.....	199
Şekil 5.52	: Farklı kalınlıktaki farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri.....	199
Şekil 5.53	: Farklı kalınlıktaki farklı bağıl dielektrik sabitli toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel değişimi.....	200
Şekil 6.1	: Üç boyutlu ağ örneği.....	202
Şekil 6.2	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını üç boyutlu koordinat sisteminde bulmak amacıyla geliştirilen model	204
Şekil 6.3	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu koordinat sisteminden MS EXCEL programına taşınmasının gösterilimi.....	205
Şekil 6.4	: SFY kullanılarak oluşturulan üç boyutlu ağ üzerindeki düğüm potansiyellerinin MS EXCEL eşleniği gösterilimi.....	207
Şekil 6.5	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının üç boyutlu gösterilimi.....	212
Şekil 6.6	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu hesaplamalarla bulunan potansiyel dağılımının önden görünüşü...	213
Şekil 6.7	: 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu hesaplamalarla bulunan potansiyel dağılımının üstten görünüşü...	213

Şekil A.1	: Türevin tanımı.....	234
Şekil A.2	: Dikdörtgen gözlü ağ parçası.....	234
Şekil A.3	: Düzgün olmayan ağ.....	236
Şekil A.4	: Üçgen gözlü ağ.....	240
Şekil A.5	: Birbirine komşu dört düğüm.....	243
Şekil A.6	: Sınırdaki bir nokta ve komşu düğümler.....	243
Şekil A.7	: İki boyutlu silindirselsel koordinat sistemi.....	246
Şekil A.8	: Kare gözlü ağ gösterimi.....	246
Şekil A.9	: İki boyutlu silindirselsel koordinatlarda yatay sınır düğümleri gösterilimi.....	248
Şekil A.10	: İki boyutlu silindirselsel koordinatlarda düşey sınır düğümleri gösterilimi.....	249
Şekil B.1	: İki boyutlu bölge.....	251
Şekil B.2	: Silindirselsel koordinat sistemi.....	253
Şekil B.3	: Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen eleman.....	254
Şekil B.4	: Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen kesitli halka eleman.....	256
Şekil C.1	: Darbe üretici a ve b eşdeğer devreleri.....	261
Şekil C.2	: Deneyde kullanılan tek katlı b bağlamı darbe gerilimi üretici.....	263
Şekil C.3	: Tam darbe gerilimi.....	264
Şekil C.4	: Cephede kesik darbe gerilimi-Sırtta kesik darbe gerilimi.....	265
Şekil C.5	: Darbe karakteristiği.....	265
Şekil C.6	: Üç Katlı Marx bağlamı.....	266
Şekil C.7	: Belirli bir elektrot açıklığında atlama olasılığının gerilimle değişimi.....	267
Şekil C.8	: Deneysel çalışmada kullanılan metal deney kabı.....	270
Şekil C.9	: Geçit izolatörü olarak kullanılan 4 adet yalıtkan destek plaka ve yalıtkan kapağın silindirselsel metal deney kabı üzerine yerleştirilmesi.....	271
Şekil C.10	: Elektrolitik sıvının iletkenliğinin ölçülmesi.....	272
Şekil C.11	: İletkenlik ölçerin yakından görünüşü.....	272
Şekil C.12	: Darbe üreticinin kumanda masası.....	273
Şekil C.13	: Darbe tepe değeri voltmetresi.....	273
Şekil C.14	: Darbe üretici çıkışında kullanılan atlama küreleri.....	274
Şekil C.15	: Kumanda masasındaki ampermetre ve voltmetreler.....	274
Şekil C.16	: Deney düzeneğinin üstten görünüşü.....	275
Şekil C.17	: Dijital osiloskop (band genişliği 100 MHz).....	275
Şekil C.18	: Deney 1 için kullanılan deney devresi.....	276
Şekil C.19	: Deney 2 ve 3 için kullanılan deney devresi.....	279

SEMBOL LİSTESİ

V	: Elektrostatik potansiyel
E	: Elektrik alan şiddeti
$i(t)$	: Yıldırım akımı
I_g	: Yıldırım darbe akımının koruma teli üzerindeki bileşeni
I_i	: İnsan vücudundan geçen akım
I_k	: Bir faz toprak kısa devresi akımı
I_m	: Yıldırım akımının en büyük değeri
I_s	: Yıldırım darbe akımı
I_t	: Toprak akımı
I_t	: Yıldırım darbe akımının çelik direk üzerindeki bileşeni
J	: Akım yoğunluğu
$p(U_d)$	: Darbe geriliminin atlama olasılığı
P_{mn}	: Genişleme fonksiyonu
Q	: Topraklayıcı üzerindeki toplam yük
R_{ga}	: Ayaktan geçiş direnci
R_{ge}	: Elden geçiş direnci
R_i	: İnsan vücudunun direnci
R_k	: Koruma topraklaması
R_t	: Toprak direnci
R_{top}	: Toplam yayılma direnci
R_a	: Cephe direnci
R_d	: Boşalma direnci
C_d	: Darbe kondansatörü
C_y	: Yük kondansatörü
U_a	: Adım gerilimi
U_{tk}	: Topraklayıcı gerilimi
U_{ts}	: İnsan teması esnasındaki dokunma gerilimi
S	: Üçgen elemanın alanı
W	: Enerji
Z_t	: Direk darbe empedansı
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabiti
η	: Verim
σ	: İletkenlik
ρ	: Özdirenç

GEÇİCİ AŞIRI GERİLİMLERİN TOPRAKLANMASINDA TOPRAK VE TOPRAKLAYICILARIN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Elektrik güç sistemlerinde topraklamanın amacı, kısa devreler ve yıldırım boşalmaları gibi arıza koşullarında oluşan akımların gerek canlılar gerekse sistem bakımından tehlikeli olmadan toprağa akmasını sağlamaktır. Bu olaylar sırasında, topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının genlik ve değişim olarak bilinmesi canlıları tehlikeli adım ve dokunma gerilimlerinden korunmak bakımından önemlidir. Bu nedenle topraklayıcıların boyutlarının, şeklinin, gömülme derinliğinin ve çevreleyen toprak özelliklerinin topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı üzerindeki etkisinin bilinmesi gerekir. Bu istek, karşılaşılabilecek durumlara ilişkin modellerin kurulmasını ve bu modeller üzerinde hesaplar yapılmasını gerektirir.

Bu tezin amacı, çeşitli topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımlarını belirlemek için farklı modellerin kurulabileceğini ve bu modeller üzerinde hesaplamaların Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yeni bir yaklaşımla daha etkin yapılabileceğini göstermektir. Hesaplarda, mevsime, doğa, hava ve konuma bağlı olarak değişen topraklayıcı çevresindeki toprak türü ve nemlilik durumları, toprak dielektrik sabitlerindeki farklılıklarla göz önüne alınmıştır. Bu yaklaşımdaki temel ilke, nemli toprak gibi karma bir malzemenin dielektrik sabitinin, toprağın ve suyun dielektrik sabitlerine ve hacimsel oranlarına bağlı olmasıdır. Bunun için bu çalışmada, toprak öz dirençleri yerine karşılık gelen toprak dielektrik sabitleri kullanılmış ve topraklayıcı çevresindeki toprağın topraklayıcıdan uzaklıkla ve derinlikle türünün ve neminin değişimi farklı dielektrik sabitli seri ve paralel toprak tabakaları ile modellenmiştir.

Tezde, küre, çubuk, şerit gibi farklı biçim, boyut, gömülme derinliklerine sahip, seri, paralel toprak tabakası içinde bulunan topraklayıcılar için farklı koordinat sistemlerinde potansiyel dağılımı ve adım gerilimi hesapları yapılmıştır. Sonlu farklar yöntemi ile iki ve üç boyutlu potansiyel dağılımı hesapları için MS EXCEL programında, hücresel denklem çözüm yöntemi olarak adlandırılan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem ile büyük boyutlu denklem sistemlerinin çok kolay ve hızlı bir şekilde oluşturulduğu ve çözüldüğü gösterilmiştir. Söz konusu durumların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi için ayrıntılı modeller kurulmuş ve bu modeller FEMM 4.0 programı ile çözülmüştür. Her iki sayısal yöntemle ve analitik olarak bulunan sonuçlar aralarında karşılaştırılmış, sonuçların uyumu ve yöntemlerin kullanılabilirliği gösterilmiştir. Aşırı akım veya gerilimlerde topraklayıcı çevresinde oluşan iyonizasyon (korona), topraklayıcı çapının büyümesi şeklinde göz önüne alınarak potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. Ayrıca laboratuvar ortamında, toprak içine gömülü bir çubuk topraklayıcı modeli üzerinde topraklayıcıların darbe gerilimi altındaki davranışını incelemek için yıldırım darbe gerilimi deneyleri yapılmıştır.

ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF THE SOIL AND GROUNDING ELECTRODES UNDER TRANSIENT OVERVOLTAGES

SUMMARY

In the electrical power systems, the aim of grounding is to supply the currents which might be produced by fault conditions such as the short circuits and lightning discharges to the ground through the electrode in order to avoid danger to humans and systems. During fault conditions it is important to know the amplitude and the variation of voltage distribution around the grounding electrode to protect humans from dangerous step and touching voltages. Therefore the effects of size, shape and buried depth of grounding electrode, and properties of soil surrounding the grounding electrode on potential distribution around the grounding electrode have to be considered. That requires developing models for probable cases and computations on those models.

The aim of this thesis is to show that, different models can be developed to determine potential distribution around different grounding electrodes and the computations on those models can be carried out more effectively by a new approach using Finite Difference Method (FDM) and Finite Element Method (FEM). In calculations, type and humidity of the soil surrounding the grounding electrode, which changes with season, nature, weather and position, and differences in soil dielectric constants, are considered. The main principle of this approach is that, a composite material such as moistly soil has a dielectric constant which is related to the dielectric constants and volume ratio of water and soil. Therefore, in this study instead of corresponding soil resistivity soil dielectric constants are used and the change in type and humidity of soil surrounding grounding electrode with distance from the electrode and depth has been modeled by serial and parallel ground layers having different dielectric constants.

In this thesis, potential distribution and step voltages have been computed in different coordinate systems for ground electrodes which may have different shapes, such as, sphere, rod, strip, different buried depths in the serial and parallel soil layers. A new technique called Cellular Equation Solution has been developed in MS EXCELL program using the Finite Difference Method for computations of two-dimensional and three-dimensional potential distribution. It has been shown that, large scaled equation systems can be established and solved easily and in a short time by this new method. Detailed studies on the models have been carried out with Finite Element Method for analyzing systems; those models have been solved by the FEMM 4.0 packet program. The results obtained using analytical and numerical methods (FDM, FEM) have been compared and it has been shown that the results are compatible and the methods are applicable. The potential distribution calculations have been made by considering the ionization (corona) formed around the grounding electrode in cases of over currents or voltages, as the enlargement of radius of the grounding electrode. In addition, experiments of lightning impulse voltages have been performed in order to investigate the behaviors of the ground electrode under impulse voltage using a buried rod grounding electrode.

BÖLÜM 1 GİRİŞ

Yüksek gerilim tesis ve istasyonları, toprak ve faz kısa devrelerinde, yıldırım boşalmalarında, devre açma-kapama olaylarında ve elektrostatik boşalma olayları gibi olaylarda mikrosaniyeler içerisinde meydana gelebilen kiloamperler mertebesindeki akımların neden olduğu çok yüksek potansiyel artışlarından etkilenebilmektedir. Özellikle işletmede meydana gelen çeşitli olaylar, örneğin generatör yükünün kalkması, generatörün kapasitif yüklenmesi, bir hava hattının yükünün kalkması veya toprak kısa devresi, frekansta önemli bir değişiklik olmaksızın gerilim yükselmelerine neden olabilir. Ortaya çıkan bu gerilimler, canlılar için yaşamsal tehlikelere yol açtığı gibi elektriksel cihazlar için de onarılamayacak hasarlar meydana getirir. Burada göz önünde bulundurulması gereken şey toprağa karşı meydana gelen bu gerilimlerde belli bir sınırı aşmamaktır. Bunu sağlayabilmenin yollarından birisi, gerek şebekenin ve gerekse işletme araçlarının topraklanmasıdır.

Topraklama, esasen alçak gerilim tesislerinde insanları ve genel olarak canlıları tehlikeli dokunma ve adım gerilimlerine karşı korumak için kullanılan çeşitli koruma yöntemlerinden biri olarak bilinir. Fakat günümüzde alçak gerilim tesislerinde, hata akımından ve hata geriliminden yararlanarak çalışan ve topraklama yönteminden daha güvenli ve etkili koruma yöntemleri vardır. Buna karşılık yüksek gerilim tesislerinde hata gerilimlerine karşı tek koruma yöntemi topraklamadır.

Yıldırım boşalmasına maruz kalan topraklama sistemleri iki amaca hizmet eder; Bunlardan birincisi, oluşan yıldırım darbe akımını toprağa ileterek çevresindeki canlıların ve işletme cihazlarının zarar görmesini engellemek, ikincisi ise tüm elektrikli ve elektronik cihazların referans potansiyelde olmalarını sağlamaktır. 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 tesistir.

Topraklama sisteminde topraklayıcı olarak; çubuk, şerit, levha topraklayıcılar ile şerit topraklayıcıların bir çeşidi olan topraklama ağırları yaygın olarak kullanılmaktadır. Topraklanacak sistemin toprak ile bağlantısını en iyi şekilde sağlamak için topraklayıcının her noktasında toprakla iyi temas etmesini sağlamak gerekir. Mümkünse topraklayıcı yer altı suyu ile temas etmelidir. Göl ve nehir suları içerisinde erimiş maden tuzları az ve iletkenlikleri de düşük olduğundan topraklayıcının doğrudan doğruya göl veya nehir suyuna konması uygun değildir. Topraklayıcının yanında taş ve çakılın bulunması yayılma direncini arttırır. Yayılma direncinin küçük olmasını sağlamak amacıyla topraklayıcı çevresinde çakıl ve taşın bulunmamasına dikkat etmek gerekir.

Uygun topraklayıcı tipinin seçilmesinde, topraklayıcıda aranan en önemli özellik; topraklayıcının bulunduğu ortamın yani toprak yapısının öz direncinin belirlenmesinin ya da istenilen değere ayarlanmasının gerçekte mümkün olmaması nedeniyle, seçilen topraklayıcının, üzerindeki akımı en kısa yoldan toprağa verecek dağılmasını kolaylaştıracak, küçük değerde geçiş direncine ya da diğer adıyla yayılma direncine sahip olmasıdır. Toprak geçiş direnci ne kadar küçük olursa akımın toprağa geçişi o kadar kolay olacağından, $U = R.I$ temel bağıntısına göre, topraklayıcı çevresinde oluşturacağı dokunma ve adım gerilimleri de, o derecede küçük olacaktır.

Topraklanmış bir tesis kısmına bir yıldırım çarptığında geçen yıldırım akımının etkisi ile meydana gelen darbe gerilimin genliği

- Yıldırım akımının zamana bağlı olarak değişimine yani yükselme hızına (cephe dikliğine) ve süresine,
- Yıldırım akımının tepe değerine,
- Topraklama durumuna, yani topraklayıcının cinsine, yapılış şekline ve darbe yayılma direncine

bağlıdır.

"Geçici Aşırı Gerilimlerin Topraklanmasında Toprak ve Topraklayıcıların Davranışının İncelenmesi" adlı bu doktora tezinde amaç; dış aşırı gerilim çeşitlerinden olan yıldırım darbe gerilimine maruz kalan çeşitli topraklayıcıların, çevrelerinde oluşturdukları potansiyel dağılımının Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar

Yöntemi ile, toprağın ve topraklayıcıların durumlarını göz önüne alarak iki ve üç boyutlu hesaplamak ve davranışların analizlerini yaparak tehlikeli durumları görmek, güvenli ve güvenilir çalışma koşulları için koruyucu önlemlerin alınmasına katkıda bulunmaktadır. Bu amaçla deneysel ve sayısal incelemeler yapılmıştır. Çeşitli topraklayıcıların yıldırım darbesine maruz kalması durumundaki toprak empedansının, endüktansının, toprak yayılma direncinin ve toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımının hesaplanması için literatürde teorik ve deneysel birçok çalışma bulunmaktadır. 1.1 alt bölümünde yapılan bu çalışmalardan bazıları özet olarak verilmiştir [1, 2, 3].

1.1 Geçici Durumlarda Toprak ve Topraklayıcıların Davranışıyla İlgili Araştırmaların Geçmişi

Tez çalışmasının başlangıcında yapılan literatür taramasında, geçici aşırı gerilimlere maruz kalan toprak ve topraklayıcıların davranışlarının incelenmesine yönelik, topraklama ağlarının darbe empedanslarının hesabı, toprak yüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımları ve iletim hatlarının yıldırım darbe gerilimine maruz kalması halinde göstermiş oldukları davranışlarının incelenmesine yönelik farklı şekillerde gerçekleştirilmiş birçok çalışma bulunmuştur. Yıldırım direklerine, enerji iletim hatlarına düşebilir. Bu durumda oluşan akımın toprağa ulaşması sırasında izleyeceği yol direk, topraklayıcı ve toprak olabileceği gibi, enerji iletim hattına düşmesi halinde yürüyen gerilim dalgaları vasıtasıyla iletim hattı, direk, topraklayıcı ve toprak da olabilir. Bu nedenle bu akım yolu üzerindeki unsurların topraklama sisteminin davranışına olan etkisinin incelenmesi gerekir. Bu şekilde gerek direk darbe empedansının, iletim hattının ve de toprak empedansının incelenmesi için birçok çalışma yapılmıştır.

Geçmişte yapılan çalışmalar incelendiğinde enerji iletim hattı direklerinin yıldırım darbe gerilimine maruz kalması durumunda darbe cevabının hesaplanmasına yönelik direğin çeşitli geometrik modelleri kurulmuş ve bu modeller üzerinde direk darbe cevabının sayısal elektromanyetik alan analizleri yapılmıştır [4-13]. Bu çalışmaların yanı sıra enerji iletim hatlarında alan kavramı ile iletim hattına düşen yıldırım geriliminin hesaplanması, 500 kV'luk enerji iletim hattı için topraklama modelleri üzerindeki duyarlılık analizi ve iletim hatlarının yıldırım performansı analiz hesapları

için çeşitli yaklaşımlar verilmiştir [14-19]. Yıldırım akımının toprağa ulaşırken toprak ve topraklayıcıların davranışının incelenmesi amacıyla yüksek dirençli bölgelerde topraklama geçiş direncinin azaltılmasına yönelik yöntemler, karmaşık topraklama sistemlerinin analizi, topraklayıcı çevresindeki adım ve dokunma gerilimlerinin incelenmesi, çoklu tabakalı toprak yapısı içine gömülü olan topraklayıcının toprak direncinin hesaplanmasına yönelik çalışmalar yapılmıştır [20-30]. Bu bölümde ayrıca geçmişte yapılan çalışmalardan bazıları özet olarak verilerek, yapılan çalışmalar hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır.

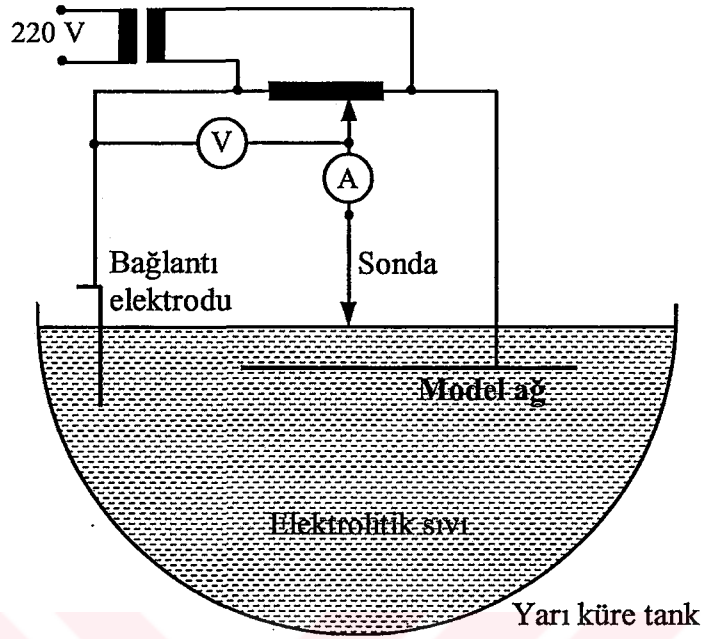
B. Thapar ve K. K. Puri'nin 1967 yılında IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'da yayınlanan "Mesh Potentials in High-Voltage Grounding Grids" adlı çalışmalarında, Şekil 1.1'de gösterilen deney düzeneğini kurarak yüksek gerilim topraklama ağlarının, göz potansiyellerinin bulunması için yaptıkları deneysel çalışmayı anlatmışlar ve deney sonuçlarını AIEE'de belirtilen yaklaşık formüllerle karşılaştırmışlardır. Bu deneysel çalışmada, 16 ve 64 gözden oluşan topraklama ağlarının göz potansiyellerinin analizi yapılmıştır. 1, 2, 3 cm çaplarındaki topraklama iletkenlerinden oluşan ağların, 0,3, 0,6, 0,8 m'lik derinliklere gömülmeleri durumundaki göz potansiyellerini hesaplamışlardır ve (1.1) denklemi ile hesapladıkları göz potansiyel değerleri ile karşılaştırmışlardır.

$$V_{göz} = (\rho I / \pi L) \left[\left(1/2 \right) \ln(D^2 / 16hd) + \ln(3/4)(5/6)(7/8) \dots \right] K_i \quad (1.1)$$

Burada, $V_{göz}$ göz potansiyeli (V), ρ toprak öz direnci ($\Omega.m$), D ağ iletkenleri arası uzaklık (m), d ağ iletken çapı (m), h gömülme derinliği (m), I topraklama ağına akan hata akımı (A), L gömülmüş iletkenin uzunluğu (m), K_i düzensizlik faktörü (0,65 + 0,172) olarak tanımlanmıştır [31]. B. Thapar ve K. K. Puri'nin yanı sıra S. Sato ve W.S. Zaengl ise 1988 yılında efektif topraklama göz potansiyeli hesaplama tekniği üzerinde çalışarak, topraklama ağlarında efektif göz potansiyelini hesaplamışlardır [32].

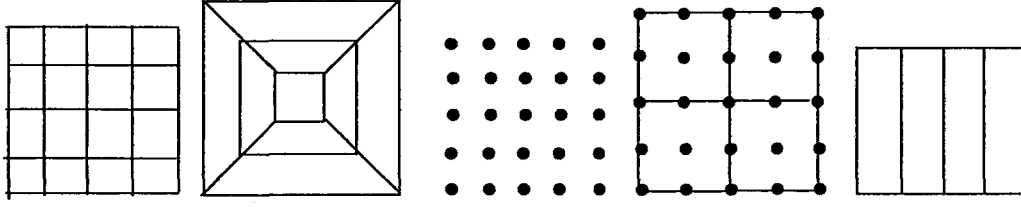
A. Sargent ve M. Darveniza'nın 1969 yılında IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'da yayınladıkları "Tower Surge Impedance" adlı çalışmada direk darbe empedansının saptanması için yapılan teorik ve deneysel çalışmaları karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada yıldırımın iletim hattına düşmesi durumunda, direk

darbe empedansının hesaplanması için direği koni ve silindir olarak modelleyerek direğin darbe empedansını buna göre hesaplamaya çalışmışlardır [33].



Şekil 1.1 Göz potansiyeli hesaplanması için kurulan deney düzeneği [32]

F. Dawalibi ve D. Mukhedkar'ın 1975 yılında IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'da yayınlamış oldukları "Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure" adlı yayının ilk kısmında iki tabakalı toprak yapısında bir noktadaki potansiyel hesabının analitik olarak hesabını toplama ve integral yöntemi ile yapmaya çalışmışlardır [34]. Aynı yayının ikinci kısmında ise 0,6 m derine gömülmüş 0,1 m çapında iletkenlerden oluşmuş 16 m x 16 m'lik bir ağ kullanılmış ve ilk toprak tabakası 4 m kalınlığında, 200 ohm.m toprak öz direncinde, ikinci toprak tabakası ise 800 ohm.m öz dirence sahip olmak üzere topraklama ağı 1, 4, 16, ve 36 göze bölünerek, toprak yüzey potansiyelini hesaplayan deney sonuçları ile teorik olarak yapılan hesap sonuçlarını karşılaştırarak, grafik olarak sonuçları vermişlerdir. Yayımlanan makalenin son kısmında ise, makalenin ikinci kısmında yapılan çalışmayı genişleterek ağıdaki göz sayısının 1, 4, 16, 64, 256 olması durumunda ve Şekil 1.2'de gösterilen farklı topraklayıcı şekilleri için topraklama performans analizlerini gerçekleştirmişlerdir. 1979 yılında yayınlamış oldukları "Influence of Ground Rods on Grounding Grids" adlı çalışmada ise topraklama ağlarındaki topraklama çubuklarının etkisini incelemişlerdir [35].



Şekil 1.2 A. Sargent ve M. Darveniza tarafından kullanılan topraklayıcı şekilleri [35]

R. J. Hepple'nin IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems dergisinde 1979'da yayınlanmış olan "Computation of Potential at Surface Above An Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution" adlı çalışmasında topraklama ağlarındaki göz potansiyelleri bulmak için uygulanan yöntem, ilk olarak ağın gözlerinde meydana gelen kaçak akım dağılımını bulduktan sonra, toprak yüzeyindeki herhangi bir noktanın potansiyelinin, L uzunluğundaki bir gözden akan kaçak akım I olmak üzere (1.2) denklemi ile bulunabileceği söylenmiştir [36].

$$V = \frac{I \cdot \rho}{2\pi \cdot L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + D^2} + x}{\sqrt{(x-L)^2 + y^2 + D^2} + x - L} \quad (1.2)$$

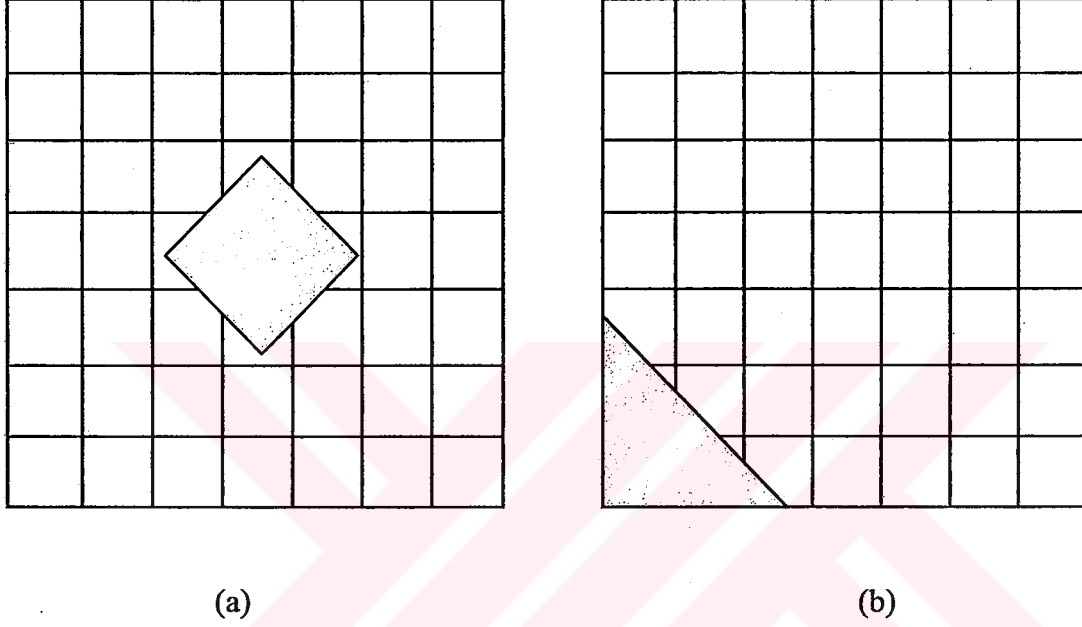
Burada ρ toprak öz direnci, D iletkenin gömülme derinliği, x ve y ise potansiyeli bulunacak noktanın toprak yüzeyindeki koordinatları olarak verilmiştir.

B. R. Gupta, B. Tapar'ın 1980 yılında IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'da yayınladıkları "Impulse Impedance of Grounding Grids" adlı çalışmada kare topraklama ağının merkezinden ve köşelerinden yıldırım akımına maruz kalması durumunda ağın empedansının hesabının bir ampirik formül ile yapılabileceğini belirtmişlerdir. Analitik yöntem ile bulmuş oldukları darbe empedansı değerleri ile deneysel olarak bulmuş oldukları darbe empedansı değerlerini karşılaştırmışlardır. Topraklama ağının merkezden ve de köşelerden yıldırım akımına maruz kalması durumunda, darbe empedansı üzerindeki etkisini göz önüne sermişlerdir. Topraklama ağlarının darbe empedans değerlerinin, yıldırım akımın ağın merkezinden ve köşelerinden uygulanması durumunda ağdaki belli bir alandan sonra çok fazla bir değişiklik göstermediğini belirtmişlerdir ve bu alana "etkin alan" adını vermişlerdir. Merkezden beslenen büyük boyutlarda ki ağların etkin alanının şekli daima kare,

köşeden beslenen ağlarda ise üçgen şeklinde olacağını göstermişlerdir.

B. R. Gupta ve B. Tapa, kare topraklama ağlarında, etkin yarıçap r_e ve darbe katsayısı A 'nın

$$r_e = K(\rho.T)^{0,5} \quad (1.3)$$



Şekil 1.3 Topraklama ağlarında etkin alan [37]

(a) Ortadan besleme

(b) Köşeden besleme

□ Etkin alan

amprlik formülü ile bulunacağını belirtmişlerdir. ρ toprak öz direnci, T ise dalga cephe süresidir. Burada K darbe katsayısını ve darbe empedansını aşağıdaki formüllerle bulunacağını söylemişlerdir [37].

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

$K = (0,6 - 0,02s)$; köşeden besleme için

$$r \leq r_e \quad \text{ise} \quad A = e^{0,333(r/r_e)^{2,3}} \quad (1.4)$$

$$Z_d = A.R$$

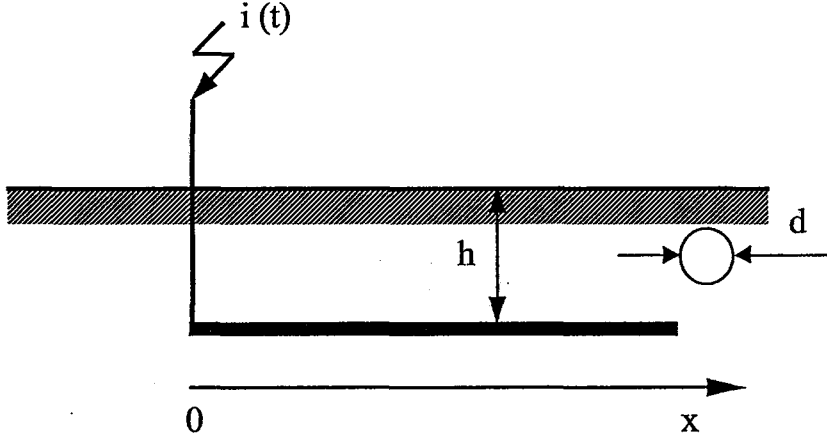
$$r > r_e \quad \text{ise} \quad R = \rho / 4r_e \quad A = e^{0,333} = 1,395 \quad (1.5)$$

$$Z_d = A.R$$

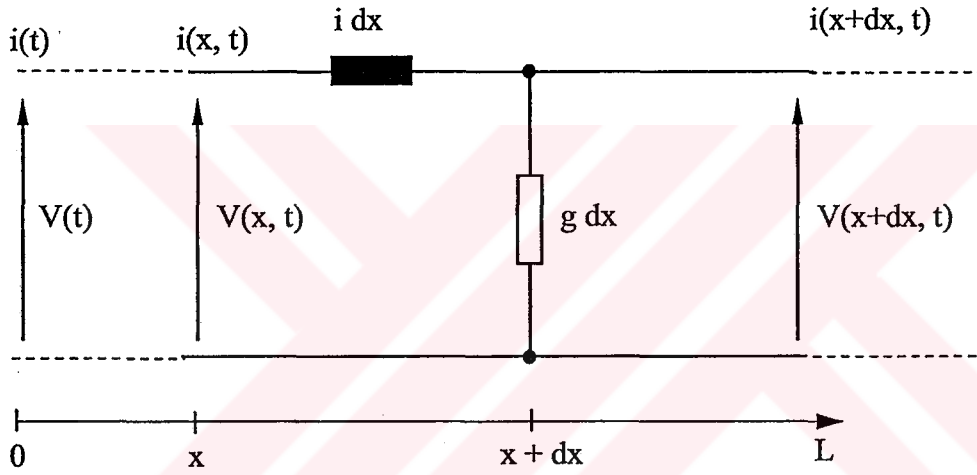
C. Mazetti, M. Giuseppe'nin 1983 yılında IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems'da yayınladıkları "Impulse Behaviour of Ground Electrodes" adlı makalede, yatay olarak gömülmüş olan bir topraklayıcının yıldırım darbe akımına maruz kalması durumundaki davranışını incelemişlerdir. Buna göre L uzunluğunda 0,5 m'den daha fazla derine gömülmüş Şekil 1.4'de görülen yatay topraklayıcı, Şekil 1.5'de görüldüğü gibi dağılmış parametrelili iletim hattı gibi modellemiştir. Bu çalışmada topraklayıcının direncini, endüktif reaktansın yanında ve kapasitif reaktansı da kaçak iletkenliğin yanında ihmal etmişlerdir. Tablo 1'de belirtilen farklı toprak öz direncinde, farklı uzunluklardaki topraklayıcı ve 5 kA'lık darbe akımı uygulanması durumunda potansiyel değerlerini hesaplamışlardır [38].

Tablo 1.1 Darbe akımı parametreleri [38]

$T_1 (\mu s)$	$T_2 (\mu s)$	$I \text{ (kA)}$
1	7	5
7	28	
25	100	
$\rho = 3; 30; 150; 300; 500; 600; 100 \text{ } \Omega \text{ m}$ $d = 3 \text{ mm}$ $h > 80 \text{ cm}$ $L > 100 \text{ m}$		



Şekil 1.4 h derinliğine gömülmüş yatay topraklayıcı [38]



Şekil 1.5 h derinliğine gömülmüş yatay topraklayıcının elektriksel eşdeğer devresi

A. D. Papalexopoulos ve A. P. Meliopoulos'un IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınlamış oldukları "Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems" adlı çalışmalarında topraklama empedansının frekansa bağlı davranışının analizini yaparak, kendilerinden önce yapılmış olan deneysel çalışmalarla sonuçları karşılaştırmışlardır. Frekansa bağlı topraklama empedansını (1.6) denklemiyle ifade etmişlerdir.

$$Z(f) = 1.0 / \int_0^{\infty} e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} \cdot ds(t) \quad (1.6)$$

Frekansa bağılı topraklama empedansını, 2500 m² ve 160000 m²'lik topraklama ağı, 75-300 ohm.m'lik topraklama direnci ve toprak bağılı dielektrik sabitlerinin 9-81 arasında değişmesi durumu için hesaplamışlardır. Söz konusu topraklama sistemine 1,2/50 mikrosaniyelik standart yıldırım darbe akımı uygulayarak toprağın frekansa bağılı geçici gerilimini ve frekansa bağılı olmayan geçici gerilimini grafik ile göstermişlerdir [39].

M. Ramamoorthy, M. M. Babu Narayanan, S. Parameswaran ve D. Mukhedkar'ın 1989 yılında IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınlamış oldukları "Transient Performance of Grounding Grids" adlı çalışmada topraklama ağlarının geçici performansının saptanması için analitik bir yöntem ortaya koymuşlardır. Tanıttıkları bu yöntemde topraklama ağının her bir elemanından toprağa akan kaçak akımı eşdeğer devre modeliyle daha gerçekçi olarak modellemişlerdir. Topraklama ağında bulunan dikey topraklama çubukları da analiz içinde düşünülmüştür. Yüksek gerilim laboratuvarında 2,4 MV, 30 kJ darbe üretici ile kurmuş oldukları deney düzeneğindeki topraklama ağına darbe akımı uygulayarak darbe empedans değerlerini ve maksimum endüklenen gerilimi karşılaştırmışlardır [40].

B. R. Gupta ve V. K. Singh'in IEEE Transactions on Power Delivery'de Ocak 1992'de yayınlamış oldukları "Impulse Impedance of Rectangular Grids" adlı çalışmalarında kare topraklama ağı için 1980'de yapmış oldukları çalışmanın benzerini, dikdörtgen yapıda olan topraklama ağının darbe empedansının hesabı için de yapmışlardır. Burada tek farklılık, (1.3)'de belirtilen amprik formülde dikdörtgen ağın uzunluk ve genişlik oranını yansıtan X^c faktörünün yer almasıdır. Dikdörtgen ağın etkin yarıçap ve darbe empedansı

$$r_e = \frac{K(\rho.T)^{0,5}}{X^c} \quad (1.7)$$

dir. Burada, ağın ortadan akım ile beslenmesi durumunda c = 0,029, köşeden beslenme durumu için c = 0,08 olarak alınacağını belirtmişlerdir. Darbe empedansı ve darbe katsayısı (1.4) ve (1.5)'de belirtilen denklemlerle aynıdır [41].

B. R. Gupta ve V. K. Singh'in IEEE Transactions on Power Delivery'de Temmuz 1992'de yayınlamış oldukları "Inductance of Rectangular Grids" adlı çalışmada

düzgün kare gözlerden oluşan dikdörtgen topraklama ağının endüktansının reaktif kVA yöntemi ile ve amprik formül ile hesaplanacağını belirtmişlerdir. Gupta ve Singh'in uyguladığı reaktif kVA yöntemine göre ağın giriş ve çıkış uçları arasındaki endüktans;

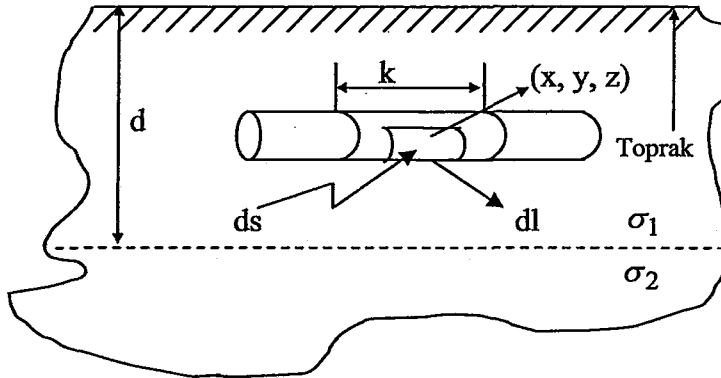
$$L_s = \frac{1}{I} \left(\sum_{k=1}^n I_k^2 L_k \right) \quad (1.8)$$

ifadesine eşittir. Burada I ağdan akan toplam akımı, I_k ve L_k ise ağda bulunan k. koldan akan akım ve endüktansı ifade etmektedir. Gupta ve Singh topraklama ağının endüktansını (1.9)'da verilen amprik formül ile hesaplanacağını belirtmişlerdir.

$$L_s = D.L.X^{0,16} \quad (1.9)$$

Burada L iletkenin özendüktansı, X ağın uzunluk/genişlik oranı, D ise göz sayısı ve akımın girişine bağlı amprik bir katsayıdır [42].

A. P. Meliopoulos, F. Xia, E. B. Joy, G. J. Cokkinides'in IEEE Transactions on Power Delivery'de 1993 yılında yayınlamış oldukları "An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis" adlı çalışmada moment yöntemini temel alan topraklama sistemlerinin analizi için bir bilgisayar modeli ve yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada Şekil 1.6'da gösterilen iki tabakalı toprak modeli içine gömülmüş topraklayıcının davranışı incelenmiştir.



Şekil 1.6 İki tabakalı toprağa gömülmüş iletken [43]

Yapmış oldukları çalışmada dS yüzeyinden akan akım dI olmak üzere (x,y,z) noktasında oluşan gerilimi Laplace yöntemi ile

$$V_i(x, y, z) = R_i(x, y, z).I_i \quad (1.10)$$

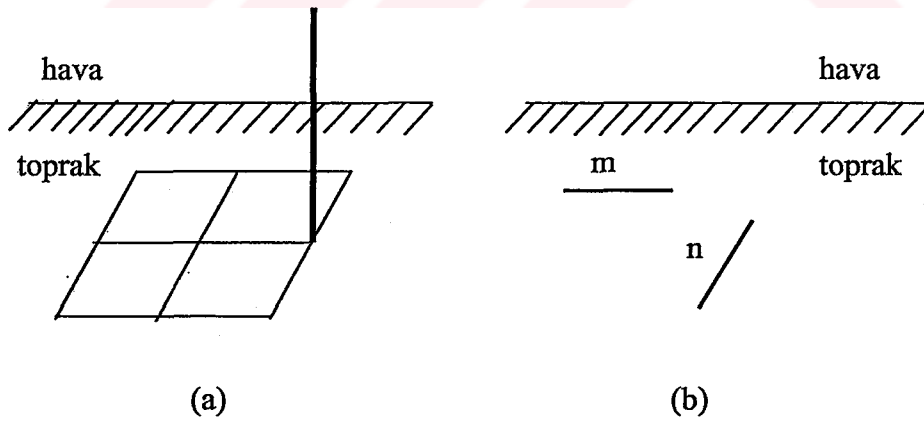
saptanacağını belirtmişlerdir. Burada I_i toprak yüzeyinden i'inci elektrota akan toplam akım, eğer iletken n tane parçaya bölünürse her bir parçanın uzunluğu $l_1, l_2, \dots, l_n$ olmak üzere (x, y, z) noktasının gerilimi her bir parçanın geriliminin toplamına eşit olacaktır. Meliopoulos ve arkadaşlarının uyguladığı SGSYS adlı bilgisayar programı ile basit ve kompleks topraklama sistemlerinin analizini yapmak mümkün olmaktadır. Bu program ile topraklama sisteminin toplam direnci, belli bir noktadaki adım ve dokunma geriliminin hesabı, toprak potansiyeli artışı, ağdaki herhangi bir gözün gerilimi bulunabilir olduğunu söylemişlerdir [43].

W. Xiong ve F. P. Dawalibi'nin IEEE Transactions on Power Delivery'de 1994 yılında yayınlamış oldukları "Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lighting and Similar Surge Currents" adlı çalışmada yıldırım darbesine maruz kalan topraklama sistemlerinin frekans ve zaman bölgesindeki performansları üzerinde çalışmışlardır. Yıldırım darbe akımının topraklama ağının merkezine ve köşelerine uygulanması durumunda frekans bölgesindeki elektromanyetik analizini yapan yazılım paketi ile topraklama sistemin davranışını incelemişlerdir. Topraklama sisteminin frekans cevabını hesaplamışlar ve topraklama tesisinin yakınında ve içinde elektromanyetik alan dağılımını, bu cevapların ters Fourier dönüşümü yardımıyla saptamışlardır [44].

L. Grcev'in Ninth International Symposium on High Voltage Engineering'de 1995 yılında yayınlamış olduğu "Transient Performance of Substation Grounding Grids During Lighting Discharge" adlı çalışmada, yıldırım darbe akımına maruz kalan topraklama ağının geçici hal performans analizi için elektromanyetik alan teorisine dayanan bir bilgisayar modeli ortaya koymuştur. Buna göre 60 m x 60 m'lik bir topraklama ağında, toprağın kuru, ıslak olması ve ağın merkezden ve köşeden yıldırım akımına maruz kalması durumunda kaçak akım yoğunluğunu ve ağın referans toprağa göre gerilimlerini grafik olarak göstermiştir [45].

J. H. Bogensperger, J. Frei ve S. Pack'in, Ninth International Symposium on High Voltage Engineering'de 1995 yılında yayınlamış oldukları "Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behaviour" adlı çalışmada topraklama sistemlerinin kararlı ve geçici hal davranışlarını incelemişlerdir. Bu amaçla topraklama direncinin ve darbe direnci hesaplanması için bilinen elektriksel topraklama modeli üzerinde yeni teoriksel formülleri ortaya koymuşlardır. Topraklama sisteminin geçici davranışını incelemek için, topraklama sisteminin geometriksel yapısından üretilen elektriksel bir modeli EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) simülasyonunda giriş verisi olarak kullanmış, algoritmayı ve sonuçları vermişlerdir. Teoriksel çalışma sonuçlarını yapılan ölçme sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır [46].

L.Grcev'in IEEE Transactions on Power Delivery'de 1996 yılında yayınlamış olduğu "Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems" adlı çalışmada geniş topraklama ağlarının geçici hal analizi için bir bilgisayar modeli ortaya koymuştur ve model, elektromagnetik alan teorisi ve düzeltilmiş görüntü teorisini temel almıştır. Modelin geçerliliği yaptığı ölçme sonuçları ile doğrulanmıştır. Aynı zamanda bu modelin, EMC (Electro Magnetic Compatibility) ve topraklama sistemine bağlı elektriksel ve elektronik sistemleri içeren yıldırımdan korunma çalışmalarına da yardımcı olabileceği belirtilmiştir [47].



Şekil 1.7 Topraklayıcı yapıları
(a) Fiziksel durum (b) Parçalanmış yapı [47]

L. Grcev ve M. Heimbach'in IEEE Transactions on Power Delivery'de 1997 yayınlamış oldukları "Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding Systems" adlı çalışmada büyük topraklama sistemlerinin

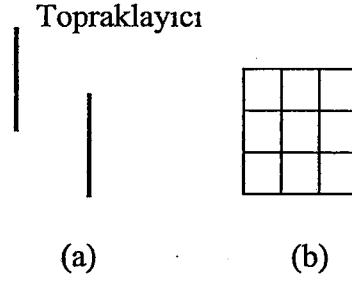
geçici hal analizinin yapan analitik modellerin olmasına rağmen, yıldırım akım darbesine maruz kalan topraklama sistemlerinin geçici performansı üzerinde farklı parametrelerin etkisinin analizini yapan daha ayrıntılı bir çalışma olmadığını söylemişler ve bu yayınlarında alanı 10 m x 10 m'den 120 m x 120 m'e kadar olan ağlar ve göz sayısı 4 ile 124 arasında olan topraklama ağlarının geçici performansı üzerinde, farklı yıldırım darbe şekillerinin, topraklama elektrodunun, toprak iletkenliğinin, besleme noktasının yerinin, topraklama ağı boyutunun ve gömülme derinliğinin etkilerinin analizlerini yapmışlardır. Maksimum geçici potansiyel yükselmesini ve frekansa bağlı empedansı, zaman ve frekans bölgesinde incelemişlerdir. Elektromanyetik alan yaklaşımını temel alan bilgisayar programı ile hesaplamaları yapmışlardır. Frekansa bağlı topraklama empedansını (1.11) denklemi ile ve potansiyeli de (1.12) denklemi ile hesaplamışlardır [48].

$$Z(j\omega) = V(j\omega) / I \quad (1.11)$$

Burada $V(j\omega)$ besleme noktasındaki potansiyel artışıdır. Eğer $Z(j\omega)$ biliniyorsa Fourier dönüşüm tekniği kullanılarak $v(t)$ gerilimi hesaplanabilir.

$$v(t) = f^{-1}\{Z(j\omega).f[i(t)]\} \quad (1.12)$$

Y. L. Chow, M. M. Elsherbiny, M. M. A. Salama'nın IEEE Transactions on Power Delivery'de 1997 yayınlamış oldukları "Surface Voltage and Resistance of Grounding Systems of Grid and Rods in Two-Layer Earth by Rapid Galerkin's Moment Method" adlı çalışmada iki tabakalı toprak içinde topraklama ağının ve topraklama çubuğundan oluşan sistemin direncini ve yüzey potansiyelini Galerkin yöntemi ile hesaplamışlardır. Bu yöntemin, boyutu ve iletkeni fazla olan topraklama sisteminin analizi için faydalı olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 1.8'de belirtilen birbirine paralel ve dikey iki topraklayıcıdan oluşan topraklama sisteminin öz ve ortak direncini ve topraklayıcıların birbirine dik olması durumundaki potansiyeli Galerkin yöntemine göre (1.14) ve (1.16)'da verilen denklemlerle hesaplanacağını belirtmişlerdir [49].



Şekil 1.8 İki iletken durumu [49]
(a) paralel
(b) dikey

Homojen olan ortamlarda topraklayıcılardan akan akım I_1 , I_2 ise gerilim matris ifadesi;

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

olacaktır. Burada

Topraklama sisteminin öz ve ortak direnci

$$R_{mn} = \frac{\rho}{I_m \cdot I_n} \int_{l_m} J_m(l_m) \left[\int_{l_n} J_n(l_n) G(\vec{r}) \cdot dl_n \right] \cdot dl_m \quad (1.14)$$

olarak ifade etmişlerdir. Burada,

$$G(\vec{r}_m) = \frac{1}{|\vec{r}_m - \vec{r}_n|} \quad (1.15)$$

Green fonksiyonu ve $m, n = 1$ veya 2 . paralel iletkenler için R_{mn} analitik olarak bulunabilir, eğer $m = n$ olursa öz direnç ifadesi elde edilir. Birbirine dik topraklayıcıların gerilimleri Galerkin yöntemine göre ifadesi

$$V(\vec{r}_m) = \frac{\rho}{4\pi} \int_{l_n} J_n(l_n) G(\vec{r}) \cdot dl_n \quad (1.16)$$

şeklinde ifade ederek iki tabakalı toprak sisteminde, potansiyel dağılımını üzerinde çalışmışlardır.

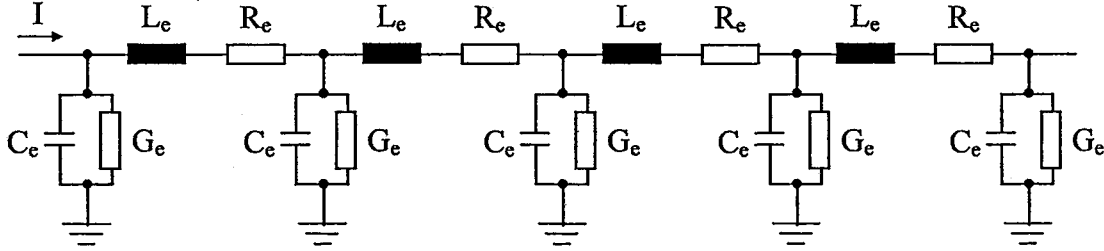
M. Heimbach ve L. Grcev'in IEEE Transactions on Power Delivery'de 1997 yayınlamış oldukları "Grounding System Analysis in Transient Programs Applying Electromagnetic Field Approach" adlı çalışmalarında, EMTP (Electromagnetic Transient Program) için frekansa bağlı topraklama empedansının rasyonel fonksiyon gösterilimi için yeni bir teknik tanımlamışlardır. Buna göre elektriksel enerji sistemlerinde meydana gelen aşırı gerilimler ve geçici toprak potansiyel artışlarının hesaplanabileceğini belirtmişlerdir [50].

K. J. Nixon, I. R. Jandrell ve H. J. Geldenhuys'un 25th International Conference on Lightning Protection'da 2000 yılında yayınlamış oldukları "Sensitivity Analysis of Parameters Influencing The Lightning Impulse Current Behaviour of Earth Electrode Components" adlı çalışmalarında, üç farklı topraklayıcı (çubuk, şerit ve aralarında uzaklık bulunan iki şerit) için eşdeğer devre modeli ve elektromanyetik analiz kullanılarak saptanan sonuçları karşılaştırmışlardır. 3,4/58 μ s ve 0,4/23 μ s'lik yıldırımın darbe akımının etkisini araştırmışlardır. Ayrıca dV/dt ve maksimum (U/I) üzerindeki toprak direncinin etkisini araştırmışlardır [51].

H. Griffiths ve A. M. Davies'i 25th International Conference on Lightning Protection'da 2000 yılında yayınlamış oldukları "Effective Length of Earth Electrodes Under High Frequency And Transient Conditions" adlı çalışmalarında yüksek frekans ve geçici durumlarda topraklayıcının etkin uzunluğu üzerinde çalışma yapmışlardır. Frekans artması veya hızlı darbe durumlarında bu uzunluğun daha da kısa olacağını belirtmişlerdir. Toprak öz direncinin 100-10000 Ω .m ve bağlı dielektrik sabitinin 1-80 olması durumunu göz önüne almışlardır. Dağılmış parametrelili devre modeli kullanılmış ve etkin uzunluğu toprak içindeki dalga boyu ile ilgili olarak tanımlamışlar ve geçici davranışlar üzerindeki daha önceki çalışmaları göstermişlerdir [52].

M. I. Lorentzou, N. D. Hatziaargyriou'nun 25th International Conference on Lightning Protection'da 2000 yılında yayınlamış oldukları "Effective Dimensioning of Extended Grounding Systems for Lightning Protection" adlı çalışmalarında, yıldırım korunmasına karşılık topraklama sistemlerinin etkin boyutlandırılması üzerinde

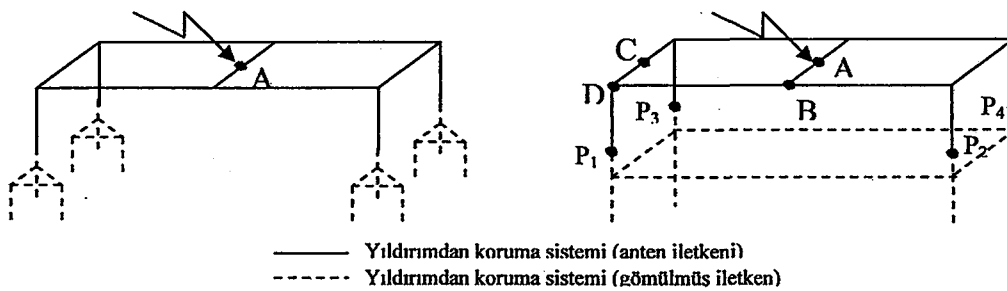
çalışmışlardır. Yıldırım darbesine maruz kalan topraklama sistemini EMTP kullanımı ile darbe cevabının hesabını yapmışlardır. Topraklayıcı modelini Şekil 1.9'de gösterildiği gibi göz önüne almışlardır. L_e , R_e birim uzunluk başına düşen endüktansı, direnci C_e ve G_e ise şönt kondansatör ve iletkenliği göstermektedir.



Şekil 1.9 Topraklama iletkenlerinin gösterilimi [53]

Genişletilmiş topraklama sistemlerinin etkin boyutlandırılması için, topraklayıcıların etkin uzunluğunun hesaplanmasını gerektirdiğini belirtmişlerdir. Topraklayıcının boyunun uzamasının, empedansının azalmasına neden olacağını göstermişlerdir [53].

S. Visacro, A. Soares, M. H. M. Vale, M. A. O. Schroeder, 25th International Conference on Lightning Protection'da 2000 yılında yayınlamış oldukları "Evaluation of Current and Potential Distribution for Lightning Protection System Including The Behaviour of Grounding Electrodes" adlı çalışmada yıldırımdan koruma sistemlerinin performansının hesabı için Şekil 1.10'da sadece iki tanesi verilen altı durumu incelemişler ve tüm durumlar için toprak öz direncinin 100 ve 1000 Ωm olması durumunda, 0,5 m derinlikte 2,5 m uzunlukta ve 1 cm çapındaki yıldırım koruma sistemine 1 kA'lık darbe akımı uygulanması durumunda anten ve gömülü topraklayıcıdan oluşan sistemin belirli noktalarındaki akım ve gerilimin tepe değerlerini ve topraklama empedansını hesaplamışlardır [54].



Şekil 1.10 Yıldırımdan koruma sistemi için oluşturulan bazı konfigürasyonlar [54]

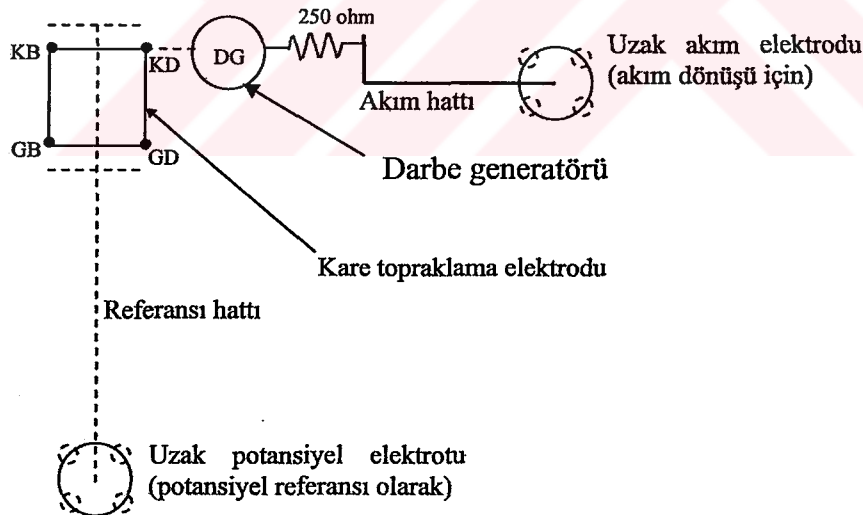
A. Geri 1999 yılında IEEE Transactions on Power Delivery'de yayınlamış olduğu "Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents" adlı çalışmada yüksek darbe akımı altındaki topraklama ağlarının davranışını incelemiş ve 25th International Conference on Lightning Protection'da 2000 yılında yayınlamış olduğu "Practical Design Criteria of Grounding System Under Surge Conditions" adlı çalışmasında ise, kendisinden önce devre yaklaşımını temel alan hesaplamaları, karmaşık ve geniş topraklama sistemlerinin geçici davranışlarının incelenmesine uygulamıştır. Kuru, ıslak toprak yapısında ve topraklama ağının köşeden ve merkezden yıldırım darbesine maruz kalması durumunda geçici potansiyelin nasıl olduğunu grafik olarak ortaya koymuştur ve bu sonuçlardan hareketle pratik tasarım kriterlerinin neler olması gerektiğini belirtmiştir [55, 56].

M. I. Lorentzou, N. D. Hatziaargyriou'nun 2003 yılında 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion'da yayınlamış oldukları "Proposed Methodology for Calculation of the Transient Response of Grounding Systems" adlı çalışmada topraklama sistemlerinin geçici davranışlarını hesaplamak için elektromanyetik teoriye dayanan bir yöntem önermişler ve topraklama sisteminin etkin boyutlandırılmasını araştırmışlardır. Bunun için topraklama sisteminin cevabının çözümünü öncelikle frekans bölgesinde yapmışlar sonrasında ise 10 MHz üzerindeki frekanslarda topraklama sistemi elemanlarının davranışını hesaplamışlar, potansiyel dağılımı hesapları için moment yöntemini kullanmışlar ve sonra IFFT (Inverse Fast Fourier Transformation) dönüşümü ile zaman bölgesine geçerek potansiyeli hesaplamışlardır [57].

V. A. Toseva. ve L. Grcev'in 2003 yılında 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion'da yayınlamış oldukları "Theoretical Aspects of High Frequency Analysis of Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil" adlı çalışmada elektromanyetik alan teorisi yaklaşımını temel alan tek düze olmayan iki tabakalı toprak içindeki, topraklama sistemlerinin yüksek frekans analizini yapmak için yeni bir model sunmuşlardır. Yaptıkları çalışmada vektörel ve skaler potansiyeller için uygun Green fonksiyonlarını oluşturmuşlardır. "High Frequency Current Distribution in Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil" adlı çalışmada ise iki tabakalı toprak içinde üst tabakaya yerleştirilmiş, kısa ve uzun topraklama iletkenlerinin

yüksek frekanslarda performanslarının analizini detaylı bir şekilde vermişler ve akım dağılımının sadece frekansa bağlı olmadığını ve üst tabakanın yüksekliğine ve de yansıma faktörüne de bağlı olduğunu göstermişlerdir [58, 59].

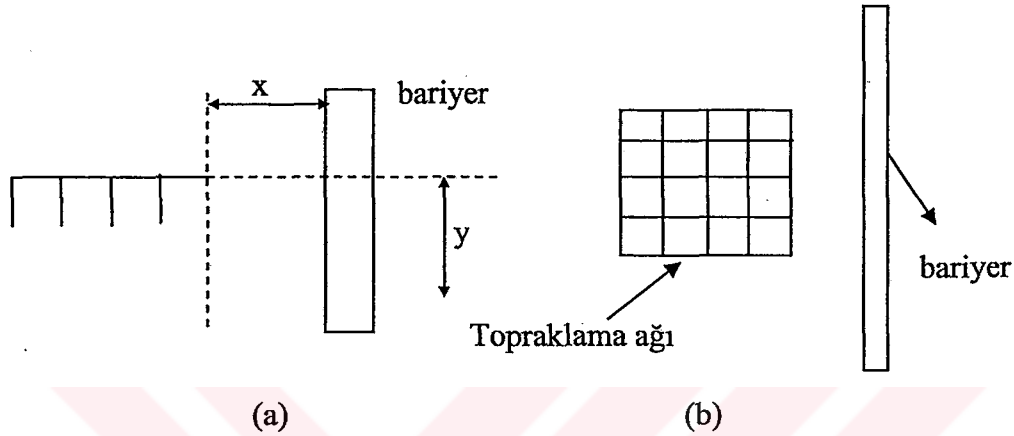
K. Tanabe 2000 yılında 25th International Conference on Lightning Protection'da yayınlamış olduğu "Calculation Results for Dynamic Behaviour of Grounding Systems Obtained Using The FD-TD Method" adlı çalışmasında FD-TD (Finite Difference Time Domain) yöntemini kullanarak topraklama sistemlerinin, iletim direği ayağındaki geçici potansiyel, geçici akım ve geçici topraklama direncinin dinamik hesaplama sonuçlarını vermiştir [60]. Bunun yanı sıra A. Asakawa ile birlikte 2003 yılında 3rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion'da yayınlamış oldukları "Computer Analysis of Transient Performance of Grounding Grid Element Based on Finite-Difference Time-Domain Method" adlı çalışmada FD-TD yöntemini temel alan bir bilgisayar analizi ile topraklama ağlarının geçici durum performanslarını incelemişlerdir. Kurdukları deney düzeneği ile (Şekil 1.11) analitik ve deneysel olarak elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır [61].



Şekil 1.11 K. Tanabe ve A. Asakawa'nın kurdukları deney düzeneği [61]

M. Osman, G. Chen, ve N. Pilling'in XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'de 2003 yılında yayınlamış oldukları "Effect of High Resistive Barrier on Earthing System" adlı çalışmada, topraklama sistemlerinin performansının

üzerindeki bariyer etkisini deneysel ve bilgisayar ortamında yaptıkları çalışma ile saptamaya çalışmışlardır. Bir su tankının içine yerleştirdikleri çubuk ve topraklama ağından oluşan sisteme akım uygulayarak topraklama sisteminin davranışını incelemişlerdir. Daha sonra topraklama sisteminin önüne Şekil 1.12'de gösterildiği gibi bir bariyer yerleştirerek bariyerin etkisini CDEGS adı verilen bilgisayar programı yardımıyla araştırmışlardır [62].



Şekil 1.12 Topraklama sistemi önüne bariyer yerleştirilme durumu [62]
(a) önden görünüş (b) üstten görünüş

F. Van Der Linde, B. Zedan, H. Griffiths, A. Haddad'ın XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'de 2003 yılında yayınlamış oldukları "The Impulse Response of Earth Grids" adlı çalışmada, topraklama ağlarının darbe analizini, toprak direnci, darbe şekli ve darbe akımını uygulanma noktasının etkisini göz önünde bulundurarak çalışmalarını yapmışlardır. Bu çalışmada ortamda toprak iyonizasyonu ve ısı etkileri gibi lineer olmayan olaylar ihmal edilmiştir [63].

L. Chonghui, H. Jin liang, G. Yanqing, Z. Rong, Z., Jun'un XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'de 2003 yılında yayınlamış oldukları "Effective Length of Extended Earthing Electrode Under Lighting Impulse" adlı çalışmada, yıldırım darbesine maruz kalan genişletilmiş topraklayıcı uzunluğunun etkisini analiz etmişlerdir. Topraklayıcı çevresindeki toprak iyonizasyonun dinamik ve lineer olmayan etkisini de analize içine katmışlardır. Yapmış oldukları analizlerden yıldırım darbesinin topraklayıcıya etki ettiğinde, topraklayıcının etkin uzunluğunun darbe empedansına etkisini gözlemlemişlerdir [64].

I. F. Gonos, V. T. Kontargyri, F. V. Topalis, I. A. Stathopoulos'un International Symposium on High Voltage Engineering'de 2003 yılında yayınlamış oldukları "Transient Behaviour of A Horizontal Electrode Under Impulse Current" adlı çalışmalarında darbe akımı altındaki yatay topraklayıcının geçici davranışını incelemişlerdir. Amaçladıkları yaklaşım, topraklama sistemlerinin tasarımı için basit, doğru ve yararlı bir metodolojidir [65].

M. A. Abdallah'ın XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering'de 2003 yılında yayınlamış olduğu "Effect of Soil Ionization on The Lightning Current Distribution in Earthing System" adlı çalışmada topraklama sistemi içindeki yıldırım akım dağılımı üzerindeki dinamik ve lineer olmayan cevapları üzerine yoğunlaşmıştır. Toprak iyonizasyonun yıldırım darbe akımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir [66]. "High Frequency Performance of An Earthing System" adlı çalışmasında ise topraklama sisteminin 50 Hz, 50 kHz, 5 MHz ve 50 MHz yüksek frekans altında performansını incelemiştir. Bunun için topraklayıcının bu frekanslar altında farklı uzunlukta, farklı çaplarda, toprağın direncinin ve iletkenliğinin değişmesi halinde ağdaki potansiyel artımını değişimini incelemiştir [67].

Literatürde olup, özetleri yukarda verilen çalışmaların çoğu, yıldırım darbe akımı altındaki topraklayıcıların performans analizlerini, toprak ve topraklayıcıları çeşitli şekilde modelleyerek yapılmıştır. Bu çalışmalarda, topraklayıcı olarak çoğunlukla topraklama ağları kullanılmıştır. Topraklama ağlarının geçici performans analizlerinde çoğunlukla üç farklı analitik yaklaşım kullanmıştır. Bu yaklaşımlar, elektriksel eşdeğer devre teorisi [40, 68], iletim hattı teorisi [39, 69, 70] ve elektromanyetik alan teorisidir [44, 71, 72]. Toprak ve topraklayıcının devre ve iletim hattı modelleri çoğunlukla toprak darbe empedansının hesaplanması için kullanılmış olmasına rağmen, elektromanyetik alan yaklaşımı ise büyük ve karmaşık topraklama ağları için iki nokta arasında toprak potansiyelinin hesaplanmasında çok daha uygun olmaktadır. Literatürde rastlanan deneysel çalışmaların çoğunda, bir topraklama ağına uygulanan darbe akımının topraklayıcı ağına merkezden ve de köşeden uygulanması durumunda ağda meydana gelen geçici darbe gerilim yükselmesi incelenmiştir.

Bu tezde ise iki aşamalı bir çalışma yürütülmüştür. Bunlardan birincisi bir çubuk topraklayıcıya laboratuvar ortamında üretilen yıldırım darbe geriliminin uygulanması

ve toprak davranışının incelenmesi, ikincisi ise çeşitli topraklayıcıların çevresinde oluşturdıkları potansiyel dağılımlarının yeni bir yaklaşımla sonlu farklar, sonlu elemanlar yöntemleriyle iki ve üç boyutlu olarak hesaplanmasıdır. Bu sayısal bölümde amaç; toprağa farklı derinliklerde gömülmüş çubuk, şerit ve yarı küresel topraklayıcıların ve farklı iletkenlikteki toprakların, topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını farklı bir yaklaşımla bularak davranışlarını doğru ve duyarlı olarak sergilemek ve güvenlik koşullarını saptamaktır. Sayısal uygulama için çubuk topraklayıcının sonlu farklar yöntemiyle yapılan hesaplamalarında, silindirselsel koordinatlardaki ifadeleri kullanılmış, şerit ve yarı küresel topraklayıcıların sonlu farklarla yapılan hesaplamalarında ise kartezyen ve küresel koordinatlardaki ifadeleri kullanılmıştır. Tezde yürütülen deneysel çalışma ve uygulanan yöntem Ek C'de kısaca açıklanmıştır.

1.2 Çubuk Topraklayıcıya Uygulanan Yıldırım Darbe Gerilimi ve Topraklayıcılar İçin Sonlu Fark ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Geliştirilen Modeller

Bir topraklayıcı çevresinde oluşan potansiyel dağılımı, dokunma ve adım gerilimlerinin büyüklüğünü belirler. Adım gerilimi, üzerinden akım geçen topraklayıcıya ilişkin potansiyel alanı içerisinde her bir ayağa karşılık gelen potansiyellerin farkına eşittir. Bu gerilim alçak gerilim tesislerinde önemli olmadığı halde, yüksek gerilim tesislerinde canlıların yaşamı bakımından önemli bir tehlike olabilir. İnsanın veya hayvanların topraklayıcı çevresindeki eş potansiyel çizgilere dik yürümeleri durumunda adım gerilimi maksimumdur, paralel yürümeleri durumunda ise sıfırdır. Dokunma gerilimi, dokunulan yer ile ondan 1 m uzaklıktaki nokta arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlanır.

Yıldırım akımının toprağa geçişi darbe şeklindedir ve zamana bağlı olarak değişir; onun için bir yürüyen dalga olayıdır. İlk anda akımın ilerlediği yerlerin ve topraklayıcının tam dalga direnci etki eder. Dalganın topraklayıcı üzerinde ilerlemesi oranında akım toprağa geçer. Akımın zamana bağlı olarak geçirilmesinde bir ölçü, darbe topraklama direncidir. Darbe topraklama direnci dendiği zaman, darbe şeklindeki akımların geçtiği sırada etkili olan topraklama direnci anlaşılır.

Bu tezde EK C'de ayrıntılı olarak anlatılan, farklı uzunluklardaki bir çubuk topraklayıcının yıldırım darbe gerilimine maruz kalması halinde toprak ve topraklayıcının davranışının analizini yapmak amacıyla İ.T.Ü. Maslak Kampüsü'ndeki Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda yıldırım darbe gerilim deneyi yapılmıştır. Bu deneysel çalışmada toprağı modellemek amacıyla 85 cm yüksekliğinde ve 57 cm çaplı bir deney kabının içine elektrolitik sıvı olarak çeşme suyu konulmuştur. Negatif ve pozitif kutbiyette yıldırım darbe gerilimi uygulanarak yapılan deneysel çalışma, üç aşamada gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışmanın birinci aşamasında, topraklama sisteminin direk olarak toprağı bağlı olduğu durumda, ölçü direnci üzerinden geçen akımın direnç üzerinde oluşturduğu gerilimin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bunu sağlayabilmek için darbe üreticinin ölçü kürelerinden toprağı bağlı olan küre ile topraklama modeli için kullanılan silindirsil metal deney kabının gövdesi birleştirilmiştir. Böylece akım yolu içerisinde deney kabı içine konulan elektrolitik sıvı olarak kullanılan çeşme suyunun yer almaması sağlanmıştır.

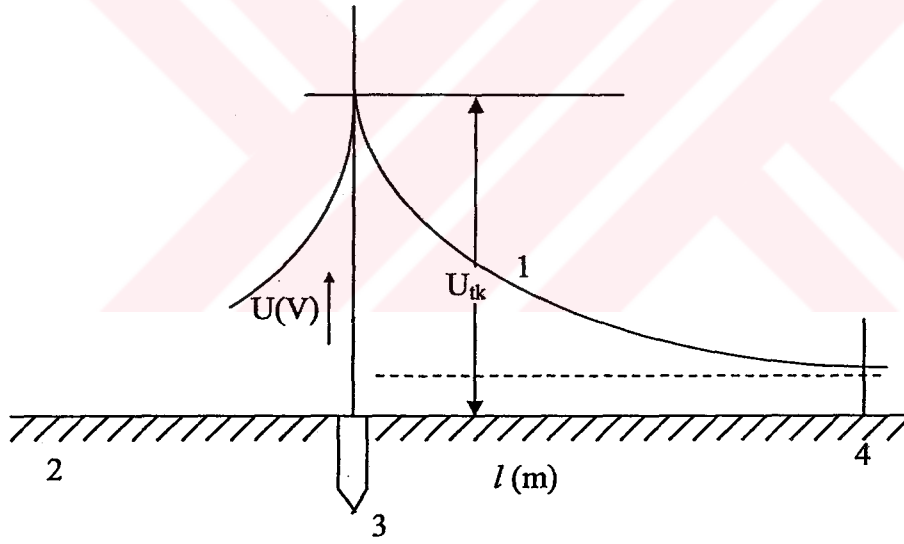
İkinci aşamada ise darbe gerilimi, içinde çeşme suyu bulunan kaba 35 cm'lik derinlikte bulunan çubuk topraklayıcıya uygulanarak akım yolu üzerinde hem topraklayıcının hem de çeşme suyunun olması sağlanarak, ölçü direnci üzerinden geçen akımın oluşturduğu gerilim ölçülmüştür.

Üçüncü aşamada ise toprağı modellemek amacıyla kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğini artırmak için suya NaCl (sodyumklorür) eklenmiş ve ikinci aşamadaki işlemler tekrarlanmıştır.

Yapılan üç deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda çalışılan topraklama direnci aralığında çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilimi, dolayısıyla akımı değiştirmenin sonuçları etkilemediği görülmüştür. Literatürde yapılan çalışmalarda, toprak öz direnci çoğunlukla 100 Ω .m'dir. 100 Ω .m'lik bir topraklama direnci elde edebilmek için deneyde kullanılan elektrolitik sıvının 0,01 siemens/metre'lik bir iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle en düşük iletkenliğe sahip elektrolitik sıvı kullanılsa bile bunun iletkenliği 20 microsiemens/metre olduğundan, buna karşılık düşen öz direnç 50000 Ω .m olacaktır.

Bu da farklı iletkenlik seviyelerinde olan toprağın davranışının analizi için yeterli düzeyde bir aralık sağlama olanağı olmadığını göstermiştir. Bu durumda toprağın öz direnç parametresinde fazla bir değişiklik yapılmadığından, deneyde kullanılan deney kabının çapının ve yüksekliğinin değiştirilmesi zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Yapılan deneysel çalışma bu ihtiyacın ortaya çıkmasından dolayı sonlandırılmış ve topraklayıcıların çevresinde oluşturdukları potansiyel dağılımın Sonlu Fark Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile hesaplanmasına karar verilmiştir.

Topraklayıcı çevresinde oluşan potansiyel dağılımı, ekseni topraklayıcı olmak üzere döneel simetrik bir konik çadır gibi düşünülebilir. Şekil 1.13'de topraklayıcıya göre meydana gelen potansiyel dağılımı gösterilmiştir. Topraklayıcıdan aynı uzaklıkta olan bütün noktaların potansiyelleri aynıdır. Uygulamada yeryüzündeki noktaların potansiyelleri önemlidir. Topraklayıcıdan yeteri kadar uzaklıkta olan yerlerde (yaklaşık olarak 20 m uzaklıkta) potansiyelin sıfıra düştüğü kabul edilir ve bu noktalara referans toprak denir.



Şekil 1.13 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; 3. Topraklayıcı;
2. Toprak; 4. Referans Toprak

Bu tezde deneysel çalışmanın yanında, farklı uzunluklarda, farklı derinliklere gömülmüş ve farklı çaplarda olan çubuk, küre ve şerit topraklayıcıların çevrelerinde

oluşturdukları potansiyel dağılımlarının sayısal hesapları EK A ve EK B'de ayrıntılı olarak açıklanan Sonlu Farklar Yöntemi (SFY), Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile ve analitik olarak hesaplanmış ve bu yöntemler sonucu elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Bunun için çubuk, küre ve şerit topraklayıcıların çevresindeki potansiyel dağılımlarının Sonlu Farklar Yöntemiyle ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle bulunması amacıyla özgün ve farklı modeller oluşturulmuş ve bu modeller üzerinde silindirsel, küresel ve kartezyen koordinat sistemlerinde Sonlu Farklar Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilen ifadeleri yazılarak topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımları çıkartılmıştır.

Çubuk, küre ve şerit topraklayıcıların SFY ile topraklayıcı ve referans toprağı arasındaki potansiyel dağılımının bulunması için, topraklayıcı ve referans topraklayıcı arasındaki alan düzgün kare gözlere bölünerek hesaplar yapılmıştır. Hesaplamalarda topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her noktanın potansiyeli 0 Volt ve topraklayıcıya uygulanan potansiyel değeri ise 100 Volt olduğu düşünülmüştür. Topraklayıcı ile referans toprak arasında kalan bölüm kare gözlere bölündükten sonra SFY ilkesine göre yazılması gereken düğüm denklemleri MS EXCEL'de yazılmış ve bu denklemlerin çözümlenmesi de yine MS EXCEL'de bu tezde "hücrel denklemler çözüm yöntemi" olarak adlandırılan yöntem ile yapılmıştır. SFY'de kare gözlerden oluşturulan ağ yapısının MS EXCEL'deki hücrel ağ yapısıyla benzeşiminden yararlanarak bu tip problemlerin MS EXCEL programıyla gerek denklemlerinin yazılması, gerekse çözümlenmesinin diğer bilgisayar programlarıyla yapılan çözümlere göre çok daha kolay ve hızlı olarak yapılabileceği gösterilmiştir.

Şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile iki ve üç boyutlu koordinat sistemlerinde hesaplamaları yapılmış, özellikle yeni bir yöntem olarak üç boyutlu potansiyel dağılımı hesapları, "hücrel denklemler çözüm yöntemi" ile yapılarak, değişik topraklayıcılar için çevrelerindeki potansiyel dağılımlarının üç boyutlu hesaplamaları için örnek oluşturulması sağlanmıştır.

Çubuk, küre ve şerit topraklayıcıların çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanmasında ise topraklayıcıların uzunluklarının, gömülme derinliklerinin, çaplarının, toprak özdirençlerine karşılık gelen toprak bağıl dielektrik sabitinin farklı olması, topraklayıcının farklı yapıdaki (seri, paralel) toprak içine gömülmüş olma

durumu ve topraklayıcı çevresindeki oluşan korona olayının etkisinin incelenmesi amacıyla modeller kurulmuş ve bu modeller SEY ilkesine göre hesap yapan FEMM (Finite Element Method Magnetics) bilgisayar programı kullanılarak çözümlenmiştir [73]. SEY'de de kapalı bölge olarak ele alınan topraklayıcının kendisi ve referans topraktan oluşan bölge üçgen sonlu elemanlara bölünerek çözümler yapılmıştır.

Bir topraklama sisteminin basit olarak topraklama iletkeni, topraklayıcı ve toprak olmak üzere üç temel elemandan oluştuğu söylenebilir. Bu yapı içerisinde kullanılan topraklayıcının özellikle yıldırım, kısa devre vs gibi olumsuz koşullarda ortaya çıkan akımların toprağa güvenli bir şekilde akıtılması sırasında çevresinde oluşan potansiyel dağılımının bilinmesi, topraklayıcı çevresinde bulunan canlılar için önem taşıyan adım ve dokunma gerilimlerinin boyutlarının ve değişiminin bilinmesi bakımından önemlidir. Bilindiği gibi bir topraklayıcıdan bir akım geçtiğinde topraklayıcı ile referans toprak arasında bir potansiyel dağılımı oluşur, bu potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalır. Topraklayıcının boyutlarının, geometrik yapısının, gömülme derinliğinin, içine gömüldüğü toprağın yapısının (bataklık, kuru kum, killi, taşlık vs) bu potansiyel dağılımı üzerindeki etkilerinin nasıl olduğunun bilinmesi bakımından önem taşımaktadır.

BÖLÜM 2 ELEKTRİKSEL TOPRAKLAMA VE YILDIRIM BOŞALMALARI

2.1 Topraklama İle İlgili Genel Tanımlar

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

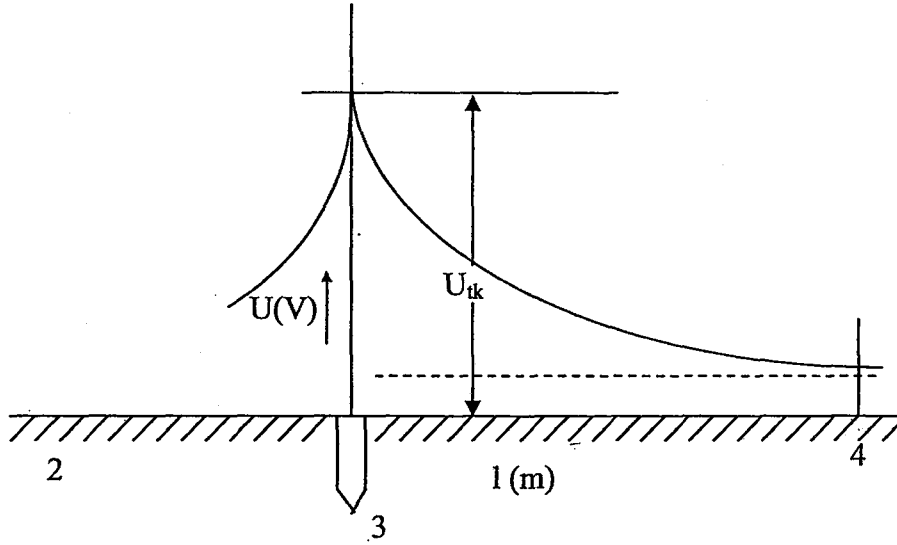
Topraklama: Topraklanacak olan iletken kısımların bir topraklama tesisi üzerinden toprağa bağlanmasıdır.

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 çarpması durumunda toprağın h kadar altına gömülmüş olan topraklama ağının referans toprağa göre yer yüzeyinde meydana getirdiği potansiyel dağılımıdır.

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



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

- $U(V)$: Gerilim Ekseni
 $l(m)$: Uzaklık ekseni
 U_{ik} : Topraklayıcı Gerilimi
 1- Potansiyel değişimi
 2- Toprak
 3- Topraklayıcı
 4- Referans Toprağı

Toprağın Özdirenci: Dünyanın doğal yapısını oluşturan maddenin yani toprağın elektriksel özdirenci olup genellikle $\text{ohm.mm}^2 / \text{m}$ veya ohm.m cinsinden verilir. Bu değer, bir kenarının uzunluğu 1 m olan toprak bir kübün karşılıklı iki yüzeyi arasındaki direnç değeridir. Toprağın özdirenci farklı tipteki topraklar için farklı değerler alır.

Topraklayıcı Yayılma Direnci: Bir topraklayıcı veya topraklama tesisi ile referans toprak 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.

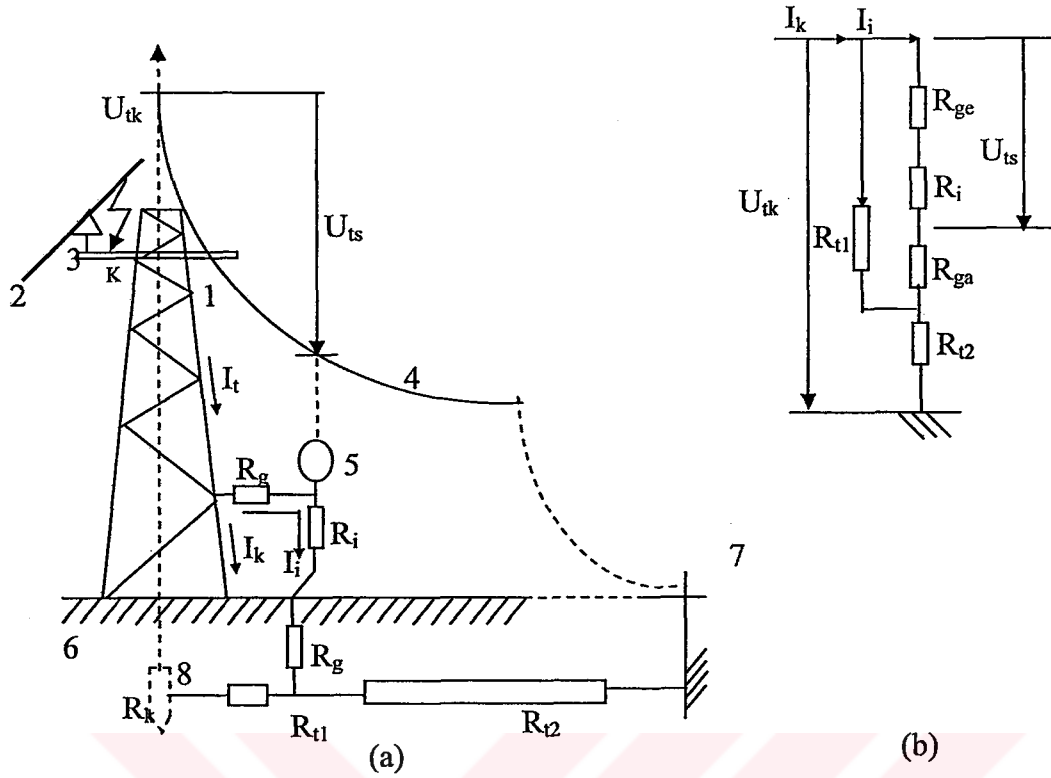
Tablo 2.1 Farklı tipteki toprakların öz dirençleri

Zemin Cinsi	Toprak Öz 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

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.

Dokunma 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 çevresinde meydana gelen potansiyel dağılımı Şekil 2.2'de gösterilmektedir.

Dokunma 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 dokunma gerilimi, topraklayıcı geriliminin büyük bir kısmını oluşturur. İnsan vücudunun direnci ile el ve ayaktaki geçiş dirençleri göz önüne alındığında meydana gelen dokunma gerilimi, topraklayıcı ile insanın durduğu yerdeki potansiyel farkından daha büyük olur.



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

- a- Tesisin şeması
- b- Eşdeğer devre
- 1- Madeni yüksek gerilim direği
- 2- Hava hattı
- 3- İzolatör
- 4- Potansiyel dağılımı
- 5- Yüksek gerilim direğine dokunan insan
- 6- Toprak
- 7- Referans toprak
- 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 - Topraklama direnci
- U_{tk} - Topraklayıcı gerilimi
- U_{ts} - İnsan teması esnasındaki dokunma gerilimi
- I_k - Bir faz toprak kısa devresi akımı
- I_i - İnsan vücudundan geçen akım
- I_t - Toprak akımı

Bu bakımdan iki cins dokunma geriliminden söz etmek mümkündür. Birincisi insan vücudunun dokunmasından önce ölçülebilen dokunma gerilimi, U_{te} ve ikincisi insan tarafından dokunma sırasında meydana gelen dokunma gerilimi, U_{ts} 'dir.

Dokunma sırasında meydana gelen dokunma 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;

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

dir.

Dokunmadan nceki dokunma gerilimi, bu durumda

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

olur. Bu bağıntı dokunma 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 dokunduğu 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 zerindeki el ile temas noktasındaki geçiş direnci R_{ge} ile ve zemin üzerindeki ayağın toprağa karşı geçiş direnci R_{ga} ile gösterilmiştir. Genellikle R_i 'ye seri olan eldeki geçiş direnci R_{ge} küçüktür ve ihmal edilebilir.

şekil 2.2'deki eşdeğer devrede gösterilen paralel akım kollarındaki akımlar, kolların dirençleri ile ters orantılı olduğundan

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

veya

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

yazılabilir. Bu eşitlikten yararlanarak insan vücudundan geçen akım için,

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

yazılabilir. Buradan da, insan vücudunun teması esnasındaki dokunma gerilimi,

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

olduğundan

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

olur veya

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

elde edilir.

Özel durumlar:

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

$R_i = \infty$ ise buna göre insan vücudunun direnci sonsuzdur. Denklem (2.9)'a göre

dokunma gerilimi olarak $U_{ts} = I_k \cdot R_{t1} = U_{te}$ elde edilir. Fakat bu durumda insanın üzerinden akım geçmeyeceği için bir kaza olmaz.

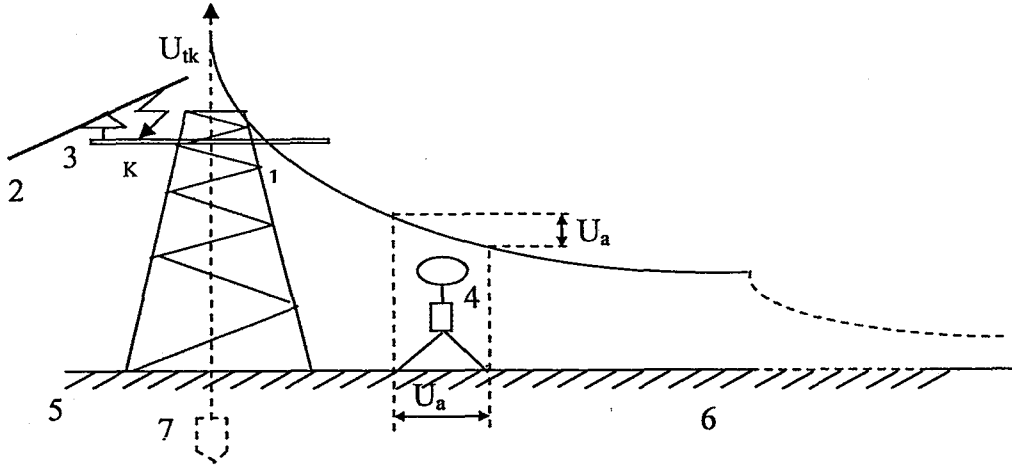
$R_{ga} = 0$ ise söz konusu insanın bastığı yer ıslaktır veya ayakkabıların tabanı madenidir. Ayrıca $R_i \gg R_{t1}$ olduğundan R_i yanında R_{t1} ihmal edilerek dokunma gerilimi $U_{ts} = I_k \cdot R_{t1} = U_{te}$ değerini alır. Zeminin ıslak olması, dokunma geriliminin büyük ve tehlikenin daha fazla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

$R_{ga} = \infty$ 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 dokunma gerilimine karşı bir koruma olanağı sağlanmış olur.

$R_{ga} = 0$ 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 yalıtım 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 eşpotansiyel çizgiler ile bu alan içinde bulunan bir insanın maruz kaldığı adım gerilimi gösterilmiştir. Bu durumda adım gerilimi, üzerinden akım geçen topraklayıcıya ait potansiyel alanı içinde her bir ayağa karşı düşen potansiyellerin farkına eşittir. İnsanın ve hayvanın eşpotansiyel çizgilere dik olarak yürümesi durumunda iki ayağı arasındaki potansiyel farkı yani adım gerilimi en büyük değerdedir. Eşpotansiyel 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 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 toprak
- 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, dokunma 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 gerekir. 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 dokunma 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 dokunma ve adım gerilimleri ile bir tehlike meydana gelmeyecek şekilde yapılmalı ve yerleştirilmelidir [1, 2, 74, 75, 76, 77, 78].

2.2 Yıldırım Boşalmaları

2.2.1 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 varolan 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 var olması 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.

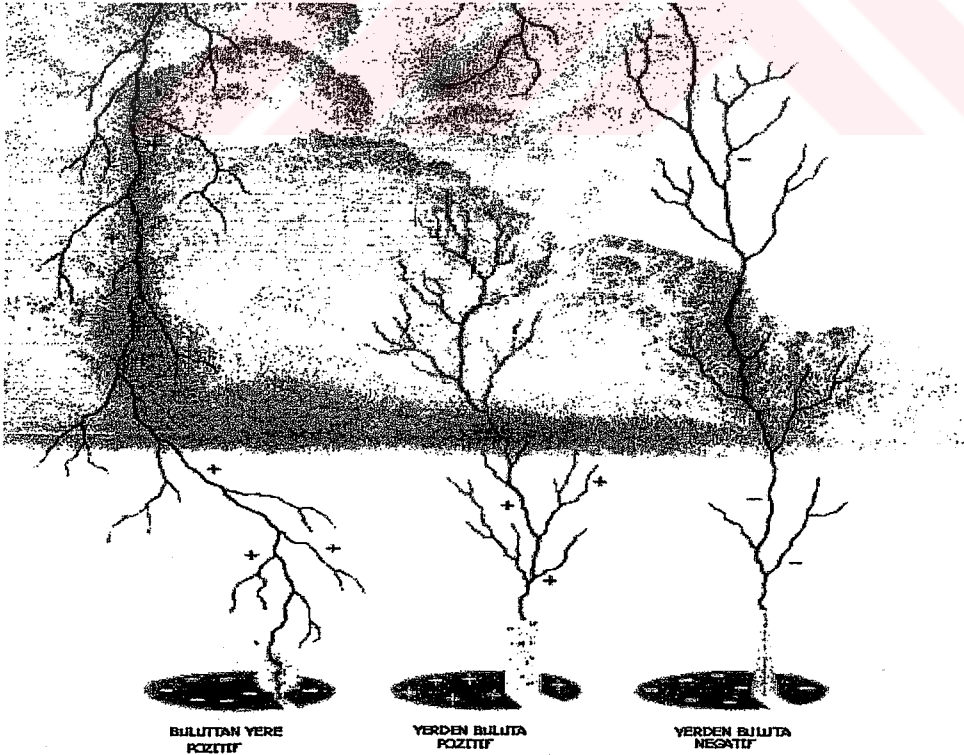
Yıldırım başının buluttan dışarı çıktıktan sonraki ilerlemesi sürekli bir şekilde olmaz. Bu ilerleme daha çok kısa ve uzun süreli duraklamalarla kademeli bir şekilde ileri sıçramalar şeklinde olur. Yıldırım her ileri sıçrayışta 10-100 metre yol alır ve yaklaşık 50000 km/s'lik (ışık hızının 1/6'sı kadar)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

Yıldırımın ortalama ilerleme hızı yaklaşık 150 km/s kadardır. Genelde yıldırımlar bu gelişme aşamasında 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 sıvriliklerinden ileri gelebildikleri için dört tür yıldırım vardır.

2.2.2 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 50000 km/s'lik bir hızla aşağıdan yukarıya doğru yüksek iyonizasyonlu bir yol oluşur ve kanalda depo edilen yükü toprağa iletir. Yıldırımın çarptığı 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 2.4 Yıldırım türleri [75]

2.2.3 Yukarıya Doğru Çıkan Yıldırım

Bu tip yıldırımlar düzgün bir arazide bulunan çok yüksek kulelerin veya dağların (örneğin İsviçre'de Monte San Salvatore) tepelerinden 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 bağlantı görevi görürler. Bazı durumlarda yıldırımın keskin açı yaparak köşelere düşmesine sebep olurlar. Daha çok negatif yıldırımlar görülür. Burada sadece bir ön boşalma buluta doğru ilerler. Bu durumda akımlar daha küçüktür (10 ... 1000 A), 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 boşalmanın 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.

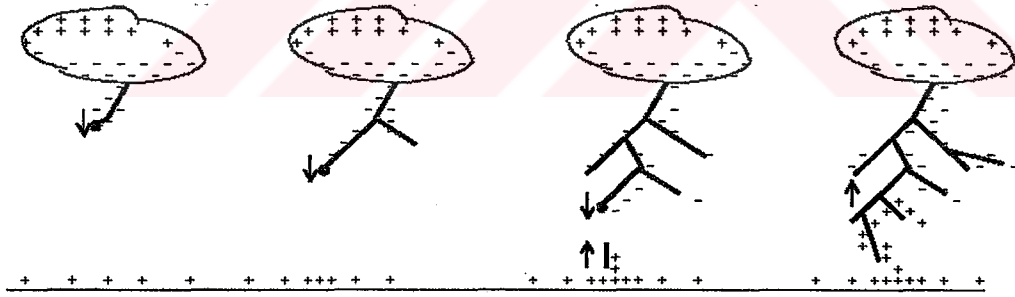
Yukarıya doğru olan pozitif yıldırımlarda çok kuvvetli ön boşalmalar görülür ve bulutun alt kısmından kollara ayrılır. Bu tür yıldırım tamamen geliştiği zaman 25 ms süren 100 ... 1000 A'lık şiddetli bir akım darbesi oluşur [75].

2.2.4 Yıldırım Boşalmasının Özellikleri

Bulutta var olan girdaplı hava akımları nedeni ile elektrik yükleri, Şekil 2.5'ten görüldüğü gibi bulut içinde ayrı ayrı yerlerde toplanırlar.

Yıldırım boşalması, elektrik alanı en büyük olan yük birikmesi durumunda 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.

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 2.5 Çok kademeli bir yıldırım boşalmasının gelişme evreleri [75]

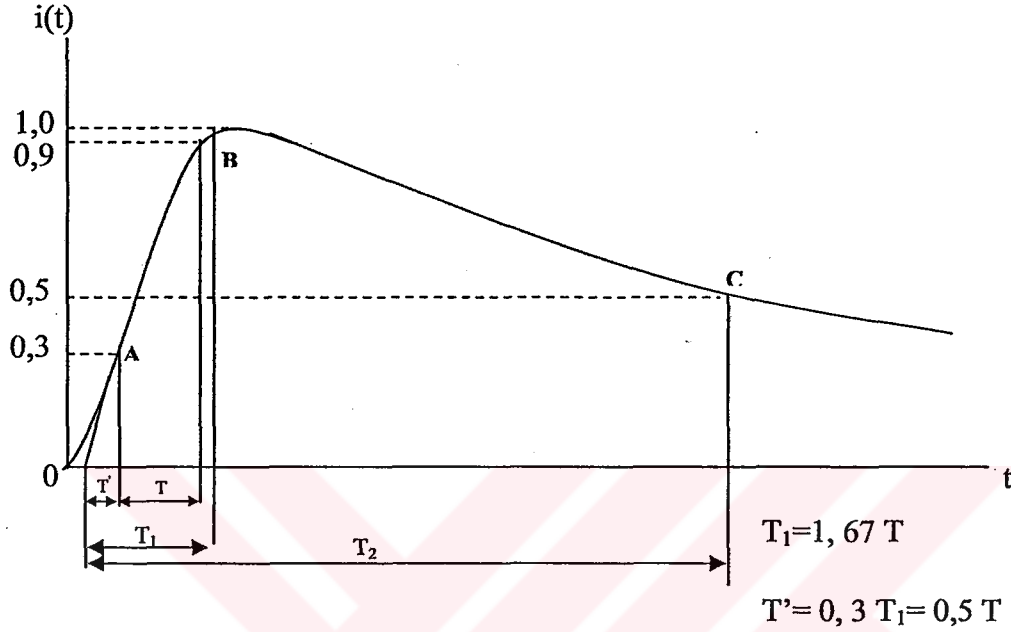
2.2.5 Yıldırım Akımı

Yıldırım akımı darbe karakterinde olup, değeri sıfırdan tepe değerine kadar hızla yükselir ve daha yavaş bir hızla tekrar sıfır değerine düşer. Kutbiyeti pozitif veya negatif olabilir (%70 ila %90 negatiftir).

Genel olarak yıldırım akımı,

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2.10)$$

denklemleri ile verilir. Şekil 2.6'da $i(t)$ eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 2.6 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 ile 100 mikrosaniye arasında bir değer olarak $T = 50 \mu s$ kabul edilirse, yıldırım akımının en büyük değeri I_m ile yıldırımdaki elektrik yükü arasında

$$Q = 50 \cdot 10^{-6} I_m \quad (2.11)$$

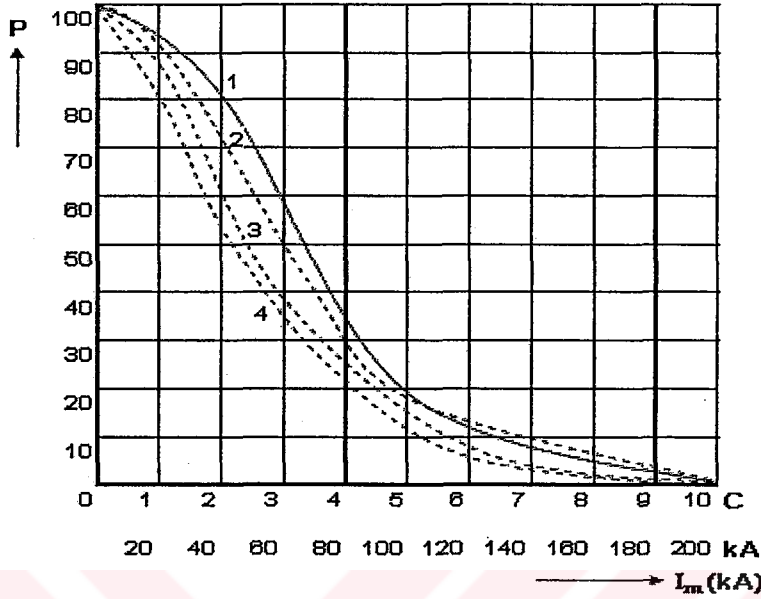
bağıntısı yazılabilir. Buna göre $I_m = 20 \text{ kA}$ olan bir yıldırımın elektrik yükü

$$Q = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^3 = 1 \text{ C} \quad (2.12)$$

olur.

Yıldırım akımları, birçok araştırmacı tarafından ölçülmüştür. İsviçre, Amerika ve İngiltere'de yapılan ölçmeler sonunda bir bölgeye düşen yıldırım akımlarının tepe

değerlerinin "birikmeli olasılık eğrileri" yani yatay eksenindeki akım değerine eşit veya bundan büyük akım değerli yıldırım sayının düşen toplam yıldırım sayısına oranları saptanmış ve birikmeli olasılık eğrileri çıkarılmıştır.



Şekil 2.7 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 kulon olacağının olasılığı kolayca saptanabilir. 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.

Yukarda anlatıldığı gibi çok kısa süren darbe akımlarında madeni iletkenler, tıpkı yüksek frekansta olduğu gibi, akım yığılma olayından dolayı doğru akımdakine göre daha yüksek bir direnç gösterirler.

Tablo 2.2 Yıldırım akımlarının kutbiyetinin ve yıldırım akım şiddetlerinin sıklık derecesine göre değerleri

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

Daha büyük bir yüzeye sahip olmalarından dolayı lama şeklindeki iletkenlerin yuvarlak kesitli iletkenlere göre daha küçük bir direnç gösterdikleri şeklinde yaygın 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 [74, 75].

BÖLÜM 3 ÇUBUK TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY VE SEY İLE SAYISAL ANALİZİ

3.1 Çubuk Topraklayıcılar Hakkında Genel Bilgi

Çubuk topraklayıcılar, genellikle 20-25 mm çapında çelik borudan veya buna eşdeğer profil çelikten veya dolu bakırdan yapılmış ve zemine dik olarak çakılan elektrotlardır. 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. Bu nedenle çubuk topraklayıcılara derin topraklayıcılar da 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. Çubuk topraklayıcılarda çubuk uzunluğuna ve çakılacak zemine yerleştirilmesine bağlı olarak yayılma direnci değeri değişir.

Bilindiği gibi bir topraklayıcıdan akım geçtiğinde topraklayıcı ile referans toprak arasında bir potansiyel dağılımı ortaya çıkar. Burada referans toprak kavramı, topraklayıcıdan yeteri kadar uzaklıkta bulunan ve yaklaşık olarak potansiyelin sıfır volt kabul edildiği toprağın ve özellikle yer yüzeyinin belirli bir bölgesidir. Topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının özellikle toprak yüzeyinde bilinmesi, canlılar için yaşamsal tehlike yaratabilen adım ve dokunma gerilimlerinden korunmak bakımından önem taşımaktadır.

Bu bölümde, bir çubuk topraklayıcı çevresinde meydana gelen potansiyel dağılımı, hem sonlu farklar yöntemi (SFY) hem de sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde SEY kullanarak topraklama sistemlerinin modellenmesi çalışmaları diğer yöntemlerle yapılan çalışmalara oran daha az sayıdadır [79]. SFY ve SEY kullanılarak yapılan hesaplamalarla, çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplarına farklı bir bakış açısı getirilmesi amaçlanmıştır. Bu hesaplamalarda, çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarda, farklı

derinliklerde ve farklı toprak yapılarında bulunması durumunda çevresindeki potansiyel değişiminin SFY ve SEY ile hesapları sunulmuştur. SFY kullanılarak yapılan potansiyel dağılımı hesaplamalarında, denklemlerin çözümlenmesinde, farklı bir çözüm yolu olarak, Microsoft (MS) EXCEL elektronik tabloları programı kullanılmıştır. Bu yolla çok daha basit ve çok daha kısa sürede çözüme ulaşılmıştır. SEY ile yapılan hesaplamalarda FEMM (Finite Element Method Magnetics) adı verilen bir bilgisayar programı kullanılarak oluşturulan topraklayıcı modelleri üzerinde potansiyel dağılımı hesapları yapılmış ve sonuçta her iki yöntemi karşılaştırılma olanağı da bulunmuştur.

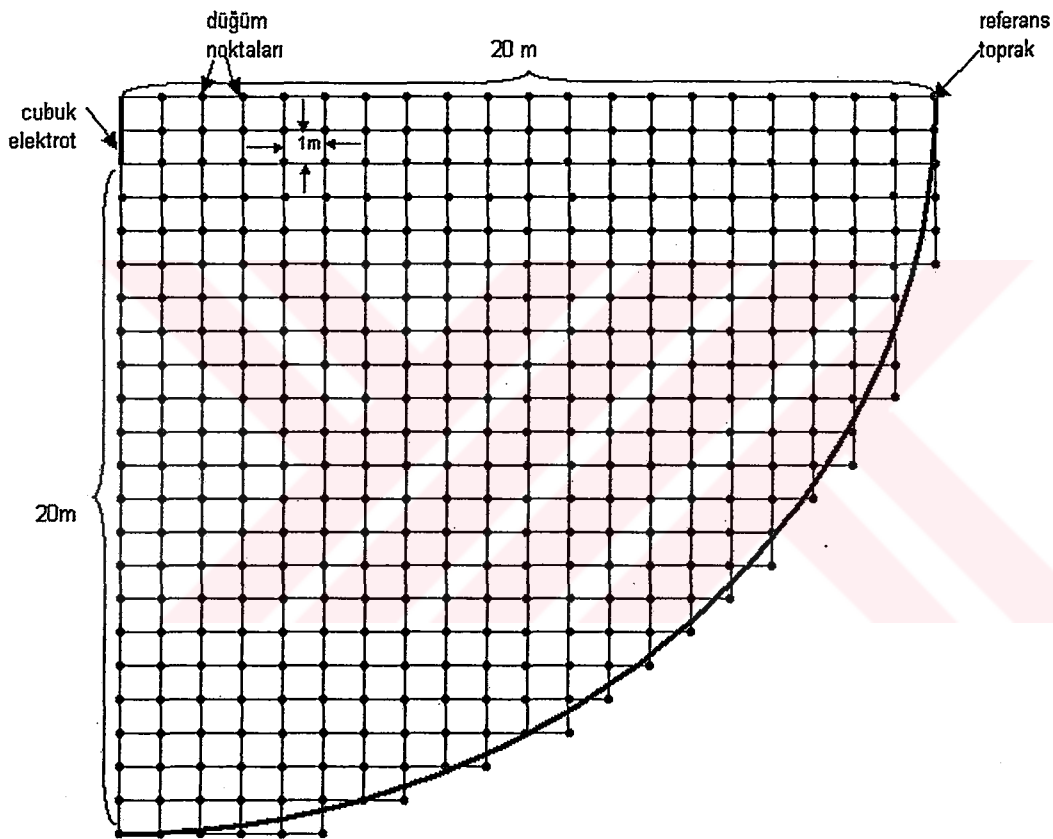
3.2 Potansiyel Dağılımının SFY İle İncelenmesi İçin Kurulan Modeller

Bir çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla geliştirilen modellerde, çubuk topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki toprak yüzeyindeki potansiyelin sıfır olduğu ve topraklayıcıya uygulanan gerilim değerinin 100 volt olduğu varsayımı yapılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan sonlu farklar yönteminde, tüm sınır koşullarının verilmesi ve incelenecek bölgenin kapalı bir bölge olması gerektiği koşulu göz önünde bulundurularak modeller oluşturulmuştur.

SFY göre incelenecek bölge, öncelikle dikdörtgen, kare, üçgen gibi şekillere sahip gözlerden oluşan bir ağ ile bölünür. Ağ, problemin tipine göre bölgenin bazı yerlerinde daha küçük ya da daha büyük gözlerden oluşturulabilir. Daha sonra ağ üzerindeki herbir düğümün potansiyeli, komşu düğümlerin potansiyellerine bağlı olarak yazılır.

Çubuk topraklayıcı için geliştirilen modellerde, topraklayıcı ile referans toprak arasındaki bölge kare gözlerden oluşan düzgün ağlara bölünmüş ve herbir ağı oluşturan düğüm potansiyelleri MS EXCEL programı kullanılarak hesaplanmıştır. Problemin çözümünde, iki boyutlu silindriyel koordinat sistemindeki Laplace denkleminin, sınır koşulları da göz önünde bulundurularak SFY ile elde edilen ifadeleri kullanılmıştır. Buna göre çubuk topraklayıcının uzunluğunun, gömülme derinliğinin değişmesi ve farklı dielektrik sabitine sahip toprak içinde bulunması durumunda, çevresindeki potansiyel değişiminin analizi SFY kullanılarak

Şekil 3.1'de çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla kurulan model görülmektedir. Modelde çubuk topraklayıcı yer yüzeyine dik olarak gömülmüş ve bir ucu yer yüzeyi ile aynı seviyede olacak şekilde tasarlanmıştır. Çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı, topraklayıcının eksenine göre simetrik olacağı için SFY ile yapılan incelemede bu durum göz önüne alınarak hesaplamalar yapılmıştır.



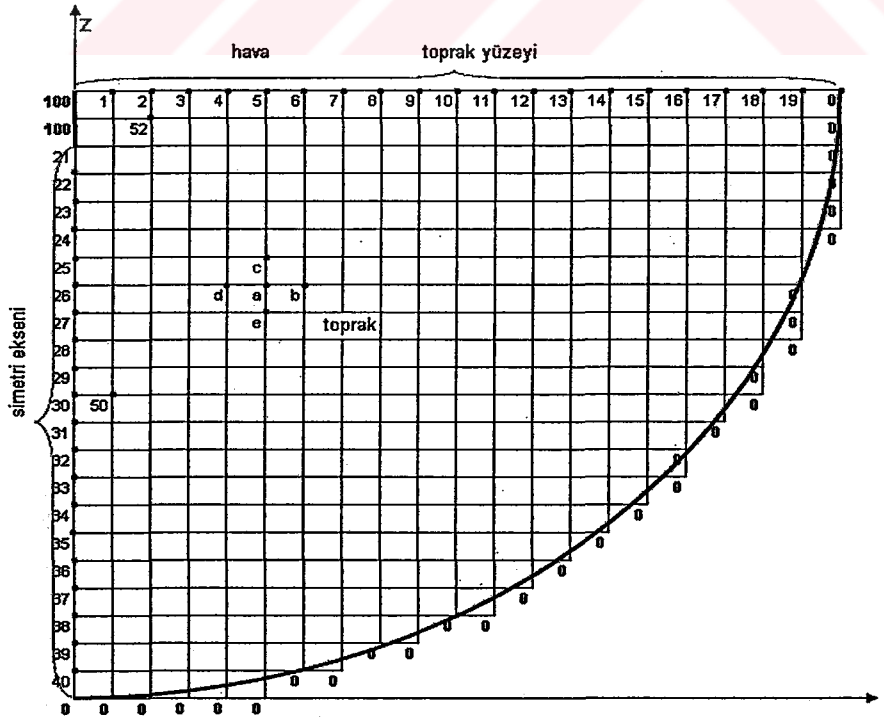
Şekil 3.1 Çubuk topraklayıcının SFY modeli

44

3.3 Sonlu Farklar Yöntemi Kullanılarak Düğüm Potansiyel Denklemlerinin Yazılması

Bir çubuk topraklayıcıda eşpotansiyel yüzeyler, z eksenine göre ekstenel simetrik elipsoidlerdir ve akım alan yüzeyleri ise hiperboloidlerdir. Bu yüzeylere ait odak noktaları çubuğun iki uçlarıdır. Çubuk topraklayıcıya çok yakın eşpotansiyel yüzeylerin küçük eksenleri, büyük eksenlerine göre çok kısadır; onun için bunlar yaklaşık olarak uçları yuvarlatılmış eş ekstenli silindirler olarak kabul edilebilirler. Bu yaklaşım göz önünde bulundurularak Şekil 3.2'de iki boyutlu silindrisel koordinat sisteminde bir çubuk topraklayıcının çevresindeki düğüm potansiyellerinin SFY kullanılarak hesaplamak amacıyla oluşturulan model görülmektedir.

Şekil 3.2'den görüleceği gibi çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilim, topraklayıcıdan geçecek olan akımın sabit olmasından dolayı herhangi bir değişiklik göstermeyeceğinden ve hesap kolaylığı açısından 100 V olarak alınmıştır. Çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinden 20 m uzaklıktaki noktanın ve toprak içerisinde çubuk topraklayıcı çevresindeki eşpotansiyel yüzeylerin silindrisel olması gerektiği göz önünde bulundurularak, topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her noktanın potansiyeli 0 Volt olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.2 SFY ile düğüm potansiyel denklemlerinin yazılması için kurulan model

Şekil 3.2'de gösterilen toprak yüzeyindeki düğüm noktalarının denklemlerini iki boyutlu silindirsil koordinatlarda SFY ile yazarken (A.65) denklemden yararlanılır. Bu denklemden görüldüğü gibi iki boyutlu silindirsil koordinat sisteminde toprak yüzeyindeki düğüm noktaları, hava ile toprak arasındaki yatay sınır düğümleri olduğu için hava ve toprağın dielektrik sabitleri de hesaplamalara katılır. Toprak içerisinde olduğu düşünülen tüm düğümlerin denklemleri SFY ile yazılırken (A.60) denklemden yararlanılır. Simetri ekseninin üzerindeki düğümlerin denklemleri SFY ile yazılırken ise (A.71) denklemi kullanılır.

(A.65) denklemi kullanılarak toprak yüzeyindeki düğümlerden 2 numaralı düğüm için SFY ifadesi şu şekilde yazılabilir;

2 numaralı düğüm, toprak ile hava arasındaki yatay sınırdaki olduğu için havanın bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_r = 1$ ve toprağın bağıl dielektrik sabiti ise $\epsilon_r = 9$ olarak alınıp, 2 numaralı düğüm için $h = 1$ ve $r = 2$ olduğundan dolayı potansiyel ifadesi

$$0,5 V_1 + 1,5 V_3 + 0,2 V_{52} + 1,8 V_{52}' - 4V_2 = 0 \quad (3.1)$$

olacak şekilde yazılır. Toprak yüzeyindeki tüm düğümler için benzer şekilde denklemler yazılabilir.

(A.60) denklemi kullanılarak toprak içindeki $h = 1$ ve $r = 5$ olan a düğümü için SFY ifadesi şu şekilde yazılabilir:

$$0,9V_d + 1,1V_b + V_c + V_e - 4V_a = 0 \quad (3.2)$$

Toprak içindeki tüm düğümler içinde benzer şekilde denklemler yazılır.

(A.71) denklemi kullanılarak simetri eksenini üzerindeki $h = 1$ ve $r = 0$ olan 30 numaralı düğüm için ise SFY ifadesi ise şu şekilde yazılabilir:

$$-4V_{50} + V_{29} + V_{31} + 6V_{30} = 0 \quad (3.3)$$

Simetri eksenini üzerindeki tüm düğümler için benzer şekilde denklemler yazılır. Şekil 3.2'den görüleceği gibi ağ yapısı $1 \times 1 \text{ m}^2$ 'lik kare gözlerden oluşturulursa, düğüm sayısı 362 olup, potansiyeli bilinen düğümlerin sayısı ise; (bunlar değeri 100 volt

olan çubuk topraklayıcıyı oluşturan düğümler ve referans toprak üzerindeki değeri 0 volt olan düğümler olup) toplam 32 adettir. Bilinmeyen düğümlerin potansiyellerini bulmak amacıyla matris olarak denklemleri yazarak çözmek mümkündür. Buna göre;

$$[A][V] = [B] \quad (3.4)$$

olacak şekilde matrisel düzenleme yapılarak çözüm yapılabilir. Burada [A] matrisi bilinmeyen düğümlerin katsayılarının oluşturduğu katsayılar matrisi, potansiyel değerleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu matris [V] ve potansiyel değerleri bilinen düğümlerin potansiyel değerlerinin oluşturduğu matris [B] olarak gösterilerek çözüm yapılabilir. Ancak bu tür çözümlemede her bir düğüm için denklemlerin ayrı ayrı yazılması ve oluşturulan n x n boyutundaki bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin oluşturduğu [V] matrisinin paket programlarla çözümü oldukça zor ve zaman alıcı olmaktadır. Bu nedenle bu tezde MS EXCEL programında kullanılan bir yöntem ile potansiyelleri bilinmeyen düğümlerin potansiyellerini, her bir düğüm için ayrı ayrı yazmadan, matrisel şekil oluşturmadan kolaylıkla bulmanın yöntemi gösterilmiştir.

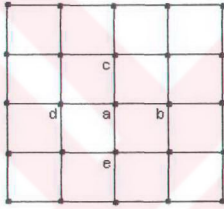
3.4 MS EXCEL Programı Kullanılarak Düğüm Potansiyellerinin Hesaplanması

Bu bölümde kullanılan bir yöntemle, çubuk topraklayıcı ile referans toprak arasındaki bölümün düzgün kare gözlere bölünerek elde edilen düğümlerin potansiyellerini bulmak amacıyla, SFY kullanılarak yazılan denklemlerinin çözümü MS EXCEL programı kullanılarak çok basit ve hızlı bir şekilde yapılmıştır. MS EXCEL programında kullanılan bu yöntem, bilinen ve bilinmeyen düğüm gerilimlerinden oluşan büyük boyutlu matrislerin yazılarak çözümünün diğer paket programlarla yapılmasından çok daha hızlı, basit bir yöntemdir. Özellikle ağ yapısı sıklaştığında düğüm sayısı artacak olup, buna bağlı olarak yazılacak olan düğüm gerilimleri ifadeleri de artacağından bu tip problemlerin çözümünde bu yöntem oldukça elverişlidir.

MS EXCEL programı, SFY kullanılarak yazılan düğüm potansiyel denklemlerinin çözümünü gerçekleştirmek için güzel bir ortamdır. MS EXCEL programındaki hücresel yapı, SFY'de kullanılan "incelenecek bölgenin öncelikle dikdörtgen, kare,

üçgen gibi şekillere sahip gözlerden oluşan bir ağ ile bölünmesi ve ağ üzerindeki her bir düğümün potansiyeli, komşu düğümlerin potansiyellerine bağlı olarak yazılır" ilkesiyle benzerlik göstermektedir. MS EXCEL'de bu benzerlikten yararlanılarak düğüm potansiyel denklemlerin kolaylıkla çözümünün yapılması mümkündür. MS EXCEL'de düğüm denklemlerinin çözümü şu şekilde yapılabilir;

Şekil 3.2'de görülen modelde toprak içindeki a düğümünün potansiyel ifadesi, SFY ile çevresindeki diğer düğümlerin potansiyel değerlerine bağlı olarak yazılır. MS EXCEL'de ise a düğümünün potansiyel değeri, bir hücreye karşılık geldiği düşünülür ve hücrenin çevresindeki diğer hücreler ise, a düğümünün çevresindeki diğer düğümlerin potansiyel değerlerine eşit hücreler olarak düşünülür. Buna göre oluşturulan yapı Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



(a)

	A	B	C	D	E
1					
2					
3					
4	d	a	b		
5		a			
6					
7					
8					
9					

(b)

Şekil 3.3 SFY ile oluşturulan model ile MS EXCEL arasındaki benzerliğin gösterimi
(a) SFY ile oluşturulan yapı
(b) MS EXCEL hücresel yapı

Şekil 3.3.a'da gösterilen a düğümünün potansiyelini bulmak için yazılan denklem daha önce (3.2) denkleminde verildiği şekildedir. Buna göre bu ifadenin MS EXCEL eşitliği ise şu şekilde yazılabilir:

$$0,9A4 + 1,1C4 + B3 + B5 + 4B4 = 0 \quad (3.5)$$

Bu denklemde belirtilen A4, C4, B3, B5, B4 ifadeleri MS EXCEL programında hücrelerin tanımlanması için kullanılan ifadelerdir. Örneğin A4 hücresi, A sütununda olup, 4. satırdaki hücreyi temsil etmektedir. Diğer hücrelerde benzer şekilde ifade de yer almışlardır. (3.2) ile (3.5) denklemleri arasındaki benzerlik göz önünde

bulundurularak, (3.2) denkleminde yer alan V_d , V_b , V_c , V_e , V_a değerleri, (3.5) denkleminde yer alan sırasıyla A4, C4, B3, B5, B4 hücrelerindeki değerlere eşit olacaktır. Buna göre MS EXCEL programının özelliğini kullanarak a düğümüne karşılık gelen B4 hücresinin denklemi

$$B4 = (0,9A4 + 1,1C4 + B3 + B5)/4 \quad (3.6)$$

olarak yazılır. Bu işlem MS EXCEL'de şu şekilde yapılır;

Şekil 3.2'de gösterilen SFY kullanılarak düğümlerin potansiyellerini bulmak üzere oluşturulan model MS EXCEL programına taşındıktan sonra a düğümüne karşılık gelen B4 hücresi seçilir ve (3.6)'da verilen hücre denklemi Şekil 3.4'de gösterildiği gibi hücre denklemi olarak girilir. Böylece a düğümünün potansiyel değerine

	A	B	C	D
1				
2				
3		c		
4	d	$= (0,9A4 + 1,1C4 + B3 + B5)$	b	
5		e		
6				
7				
8				
9				

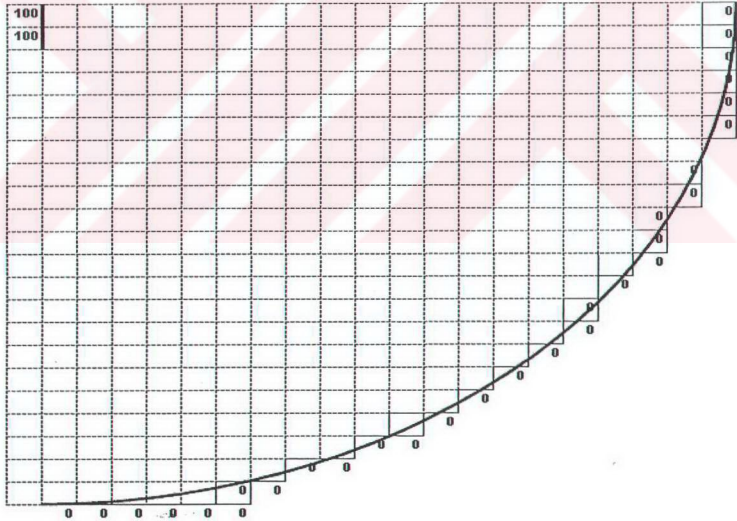
Şekil 3.4 MS EXCEL hücre denklemi yazılımının gösterimi

karşılık gelen B4 hücresinin denklemi yazılmış olur. Diğer düğümlere karşı düşen hücrelerin denklemleri ise yine MS EXCEL'in kopyalama yöntemi ile kolaylıkla yazılabilir. Kopyalama komutunun bağlı yapısından dolayı, diğer tüm hücreler düzenli olarak kendilerine komşu olan hücrelere bağlı olacaktır.

Böylece, Şekil 3.2'de belirtilen toprak içindeki tüm düğüm noktalarının potansiyellerine karşı düşen hücre denklemleri MS EXCEL'de hücresel kopyalama yapısına bağlı olarak girilmiş olur. (3.1) ve (3.3) ifadelerinde belirtilen toprak yüzeyindeki ve simetri ekseninde bulunan düğümlerin potansiyellerine karşı düşen hücre denklemleri de benzer yöntemle MS EXCEL'e tanımlanabilir. Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra MS EXCEL'de **T(ools)** menüsüne gidip, **O(ptions)**'dan **Calculation tab'** seçtikten sonra **Iteration** (yineleme) kutusunu işaretlemek gerekir.

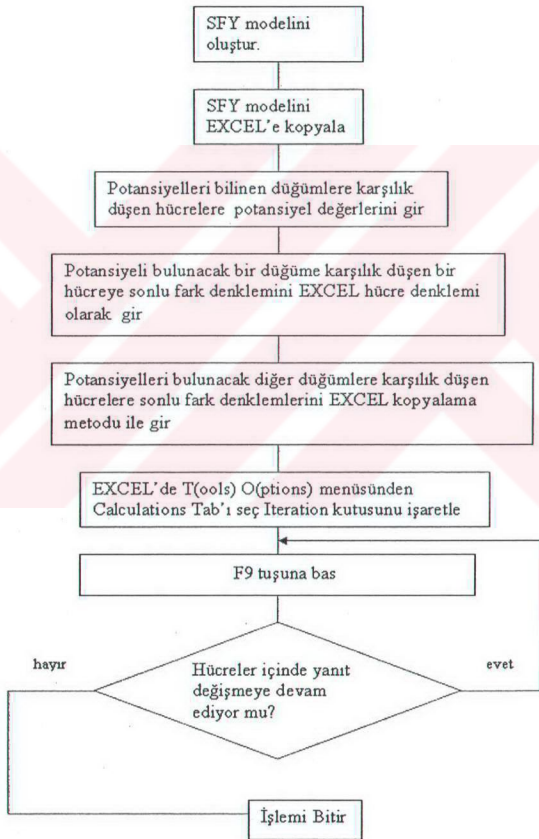
Bu özellik, Şekil 3.2'de verilen modeldeki, düğüm potansiyel denklemlerine karşı düşen hücre denklemlerin yinelemeli (iteratif) olarak çözülmesine olanak sağlayacaktır. Bu yapıldıktan sonra, düğüm potansiyellerine karşılık gelen MS EXCEL'deki hücreler içerisindeki yanıt değişmeyinceye kadar F9 tuşuna basılmalıdır. Böylece iterasyon işlemi yapılarak hücreler içerisinde, düğümlere karşılık düşen potansiyel değerleri hesaplanmış olur.

Şekil 3.2'de verilen modelde potansiyelleri bilinen düğümler, çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilim olan 100 volt ve referans toprak üzerinde bulunup değeri 0 volt olan düğümlerdir. Bu düğümlerin potansiyel değerleri, MS EXCEL modelinde kendilerine karşılık düşen hücrenin potansiyel değeridir. Buna göre MS EXCEL'e taşınan model Şekil 1.5'de gösterildiği gibi, potansiyel değerleri bilinen düğümlere karşı düşen hücrelere bu değerler girilmiş olup, potansiyel değerleri bulunacak olan düğümler için yukarıda bahsedilen biçimde hücre denklemleri yazıldıktan sonra gerekli iterasyonlar yapılarak düğüm potansiyel değerleri kolaylıkla bulunabilir.



Şekil 3.5 Düğüm potansiyel değerlerinin bulunması için MS EXCEL hücresel denklem çözümü gösterimi

Şekil 3.5'de kesik çizgilerle gösterilen hücreler, toprak içinde, toprak yüzeyinde ve simetri ekseninde bulunan düğümlere karşılık düşen hücreler olup, hücre denklemleri yukarda belirtildiği gibi yazılır ve kopyalama yöntemi ile diğer tüm hücrelerin denklemleri kolaylıkla yazılır, potansiyelleri bilinen düğümlere karşılık düşen hücelere ise 100 volt ve 0 volt değerleri MS EXCEL'e hücre potansiyel değerleri olarak girilir ve hücreler içerisinde düğüm potansiyellerine karşılık düşen değerler değişmeyene kadar F9 tuşuna basılarak çözüm yapılır.



Şekil 3.6 Düğüm potansiyellerinin MS EXCEL ile bulunması için kullanılan algoritma

Bu yöntemin en büyük kolaylığı, toprak içinde, toprak yüzeyinde ve simetri ekseninde bulunan çok sayıda düğümün potansiyel denklemlerini ayrı ayrı yazmadan sadece toprak yüzeyinde, toprak içinde ve simetri ekseninde bulunan birer düğüm için yazıp, diğer düğümler için MS EXCEL'in kopyalama özelliğinden yararlanarak kısa zamanda çözüme ulaşılmasıdır. Gerek denklem çözümleri gerekse hesaplama kolaylığı açısından bu yöntem, SFY kullanılarak çözümlenecek olan problemler için rahatlıkla kullanılabilir.

3.5 Farklı Uzunluklardaki Çubuk Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı

Bu bölümde 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 metre uzunluklarda çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının bulunması amacıyla 1, 5 ve 10 m için kurulmuş sonlu fark modelleri ve bu modellerde yer alan düğüm potansiyellerinin ise hücre sel denklem çözüm yöntemiyle bulunmuş olan değerleri verilmiştir. Diğer uzunluklar için 1, 5 ve 10 m için kurulan modellere benzer şekilde modeller kurulmuş ve hesap sonuç değerleri verilmiştir. Buna göre bir ucu toprak yüzeyinde bulunan farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının özellikle adım gerilimi bakımından önemli olan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri, düğüm denklemleri ayrı ayrı yazılmadan kolaylıkla bulunmuştur.

3.5.1 1 Metre Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı

1 metre uzunluğundaki bir çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla oluşturulan modelde $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ ’lik kare gözlerden oluşan bir ağı yapısı kurulmuş ve buna göre sonlu farklar modeli oluşturulmuştur. Bu modelin MS EXCEL’e taşınmasıyla her bir hücre $0,5 \text{ m}$ olarak düşünülmüş ve 20 m uzaklıktaki referans toprak ile çubuk topraklayıcı arasındaki düğümler için toprak yüzeyindeki bölüm, 40 adet hücreyle benzeştirilmişlerdir. Çubuk topraklayıcı 1 m uzunluğunda olup uygulanan gerilim 100 volt olduğundan, MS EXCEL’de çubuk topraklayıcı uzunluğuna karşı düşen $0,5 \text{ m}$ ’lik 2 adet hücreye 100 volt değeri girilerek benzeşim yapılmıştır. Referans toprak olarak kabul edilen 20 m uzaklıktaki düğümlere karşı düşen hücrelere ise 0 volt değerleri girilmiştir. 1 m uzunluğundaki

çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı toprak yüzeyinde, toprak içinde ve simetri eksenindeki düğümlere karşılık düşen hücrelerin değerleri bulunarak çıkartılmıştır. Buna göre SFY kullanılarak oluşturulan Şekil 3.7'deki modelin MS EXCEL'e taşındıktan sonra hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulunan potansiyel dağılımı Şekil 3.8'de verilmiştir.



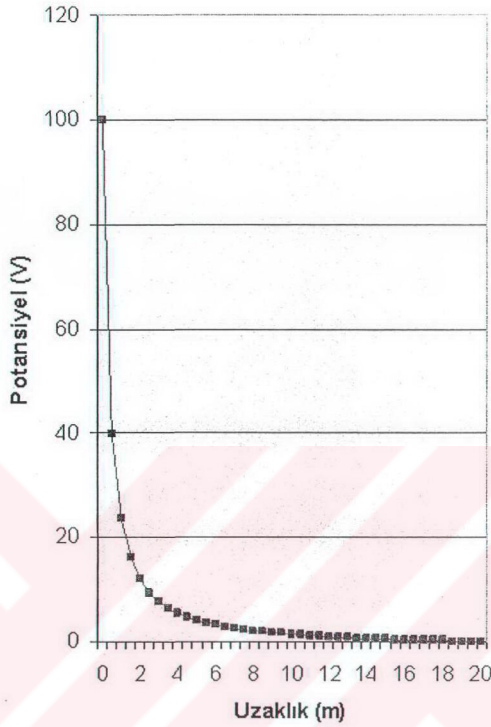
Şekil 3.7 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için kurulan SFY modeli

Şekil 3.7'de 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının sonlu farklar yöntemi ile kurulan modeli gösterilmiştir. Toprak yüzeyinde, simetri ekseninde ve toprak

Şekil 3.8'den görüldüğü gibi hücrenel denklem çözüm yöntemi ile, $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ 'lik gözlemlere sahip bir ağ yapısı kurularak 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının Şekil 3.2'de de gösterildiği gibi toprak yüzeyinde, toprak içinde ve simetri eksenindeki potansiyel dağılımı bulunmuştur. Buna göre 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının Şekil 3.8'de toprak yüzeyinde sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilen potansiyel değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri düşmektedir.

Tablo 3.1 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SFY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri
0	100
0.5	39.82225031
1	23.58066428
1.5	16.13847341
2	12.00655601
2.5	9.421399458
3	7.664106564
3.5	6.39583298
4	5.438743676
4.5	4.691353031
5	4.091775163
5.5	3.600210839
6	3.189933303
6.5	2.842341686
7	2.54409711
7.5	2.28538796
8	2.058837904
8.5	1.858795409
9	1.680857993
9.5	1.521546574
10	1.378071136
10.5	1.248176525
11	1.130012766
11.5	1.022051447
12	0.92301812
12.5	0.831841593
13	0.747614825
13.5	0.669564402
14	0.597026419
14.5	0.529427164
15	0.466267415
15.5	0.407109398
16	0.351565659
16.5	0.299289191
17	0.249964242
17.5	0.203297292
18	0.159007889
18.5	0.116819432
19	0.07645081
19.5	0.037611039
20	0



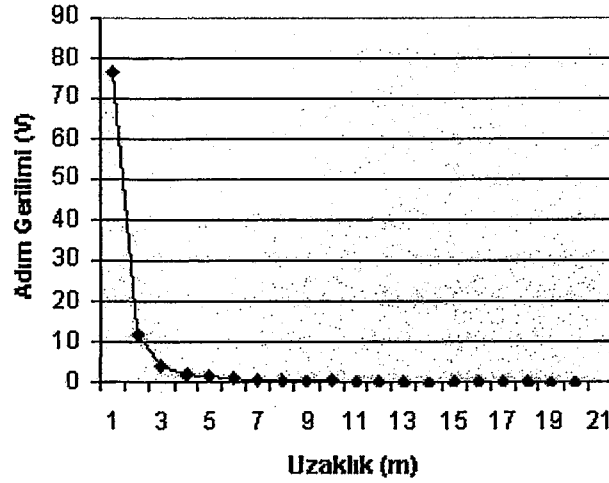
Şekil 3.9 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

Şekil 3.9'dan görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri düşmektedir. Yukarıdaki şekil simetri eksenine göre aynı değişimi göstereceğinden bu tip potansiyel değişimin oluşturduğu şekle "potansiyel çadırı" adı verilmektedir. 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı hesabı için sonlu farklar yöntemi kullanılarak yazılan düğüm denklemlerinin MS EXCEL'de hücrel denklemler benzeşim yöntemiyle kolaylık bulunduğunu ve elde edilen sonuçların literatürlerde belirtilen potansiyel değişime uygun olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi adım gerilimi, topraklayıcının yakınında potansiyel değişimi en büyük değerini aldığından, topraklayıcıya yakın olan yerlerde daha büyük bir değer alır ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım gerilimi değeri hızla düşer. 1 m'lik çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan adım gerilimi değişimi ise Tablo 3.2'de verilmiş

olup, topraklayıcı yakında belirtildiği gibi büyük, ancak uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Buradan da görüldüğü gibi bu tip problemlerin sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanması, topraklayıcı çevresindeki potansiyel değişimin topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalması gerektiği ve canlılar için önem taşıyan adım geriliminin topraklayıcı yakınında büyük, uzaklaştıkça hızla azalması gerektiği kriterlerini sağladığı için ve beklenen sonuçları verdiği için rahatlıkla kullanılabilir. Adım gerilimi yaklaşık 1 m uzunluğundaki iki ayak arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlandığı için, yapılan modellerde her bir hücre 0,5 m olarak düşünüldüğünden dolayı Tablo 3.2'de verilen değerler 1 m uzaklıkta iki düğüm arasındaki potansiyel farkını göstermektedir.

Tablo 3.2 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Aralarında 1m uzaklık olan iki düğümün potansiyel değerleri		Adım Gerilimi
1.düğüm(hücre)	2.düğüm(hücre)	
100	23.58066428	76.41933572
23.58066428	12.00655601	11.57410827
12.00655601	7.664106564	4.342449451
7.664106564	5.438743676	2.225362888
5.438743676	4.091775163	1.346968513
4.091775163	3.189933303	0.90184186
3.189933303	2.54409711	0.645836193
2.54409711	2.058837904	0.485259205
2.058837904	1.680857993	0.377979912
1.680857993	1.378071136	0.302786856
1.378071136	1.130012766	0.24805837
1.130012766	0.92301812	0.206994647
0.92301812	0.747614825	0.175403295
0.747614825	0.597026419	0.150588406
0.597026419	0.466267415	0.130759004
0.466267415	0.351565659	0.114701756
0.351565659	0.249964242	0.101601417
0.249964242	0.159007889	0.090956353
0.159007889	0.07645081	0.082557079
0.07645081	0	0.07645081



Şekil 3.10 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi

3.5.2 5 Metre Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı

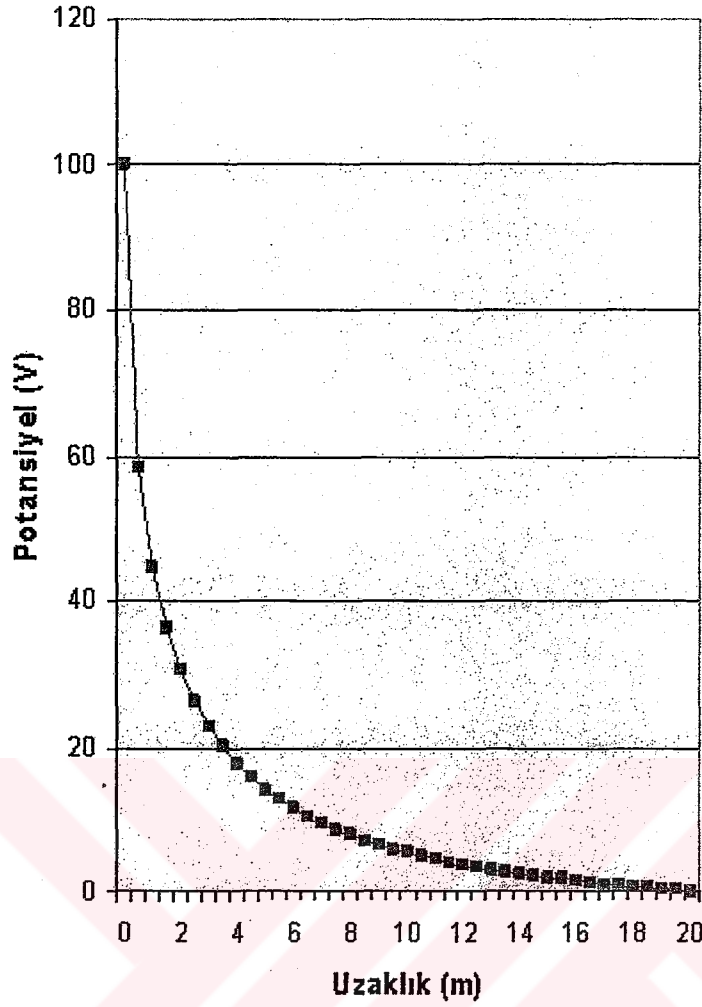
5 metre uzunluğundaki bir çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla oluşturulan modelde $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ 'lik kare gözlerden oluşan bir ağ yapısı kurulmuş ve buna göre sonlu farklar modeli oluşturulmuştur. Bu modelin MS EXCEL'e taşınmasıyla her bir hücre 0,5 m olarak düşünülmüş ve 20 m uzaklıktaki referans toprak ile çubuk topraklayıcı arasındaki düğümler için toprak yüzeyindeki bölüm, 40 adet hücreyle benzeştirilmişlerdir. Çubuk topraklayıcı 5 m uzunluğunda olup uygulanan gerilim 100 volt olduğundan, MS EXCEL'de çubuk topraklayıcı uzunluğuna karşı düşen 0,5 m'lik 10 adet hücreye 100 volt değeri girilerek benzeşim yapılmıştır. Referans toprak olarak kabul edilen 20 m uzaklıktaki düğümlere karşı düşen hücrelere ise 0 volt değerleri girilmiştir. 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı toprak yüzeyinde, toprak içinde ve simetri eksenindeki düğümlere karşılık düşen hücrelerin değerleri bulunarak çıkartılmıştır. Buna göre SFY kullanılarak oluşturulan Şekil 3.11'deki modelin MS EXCEL'e taşındıktan sonra hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulunan potansiyel dağılımı Şekil 3.12'de verilmiştir. Şekil 3.11'de verilen 5 m'lik çubuk topraklayıcı için kurulan modelde, çubuk uzunluğu 5 m olduğu için hücresel denklem çözümünde herbir hücre 0,5 m olarak düşünülürse 10 adet hücreye 100 volt değeri uygulanması gerekmektedir. Toprak yüzeyinde, toprak içinde ve simetri ekseninde sonlu farklar yöntemi kullanılarak yazılan denklemlerin çözümlenmesi sonucu oluşan potansiyel

100	59.3	44.5	39.3	30.8	26.3	22.8	20.1	17.8	15.8	14.2	12.7	11.5	10.4	9.41	8.55	7.76	7.09	6.47	5.9	5.39	4.9	4.47	4.05	3.68	3.34	3.02	2.72	2.44	2.17	1.92	1.68	1.46	1.25	1.05	0.86	0.67	0.5	0.33	0.16	0
100	59.3	44.1	39.2	30.5	26.2	22.8	20	17.7	15.6	14.1	12.7	11.4	10.4	9.38	8.54	7.77	7.08	6.45	5.88	5.37	4.88	4.46	4.05	3.68	3.34	3.02	2.72	2.43	2.17	1.92	1.68	1.46	1.25	1.05	0.86	0.67	0.5	0.32	0.16	0
100	59.1	44.2	39	30.3	26	22.6	19.9	17.6	15.6	14	12.6	11.4	10.3	9.33	8.48	7.72	7.04	6.42	5.85	5.34	4.87	4.44	4.04	3.67	3.32	3	2.7	2.42	2.16	1.91	1.68	1.45	1.24	1.04	0.85	0.67	0.49	0.32	0.16	0
100	57.8	43.9	38.6	29.9	25.6	22.3	19.6	17.3	15.4	13.8	12.4	11.2	10.2	9.23	8.39	7.64	6.97	6.36	5.8	5.29	4.83	4.4	4	3.64	3.3	2.98	2.68	2.4	2.14	1.9	1.66	1.44	1.23	1.03	0.84	0.66	0.48	0.32	0.16	0
100	57.4	43.3	38.1	29.4	25.1	21.8	19.2	17	15.1	13.6	12.2	11	10	9.09	8.27	7.54	6.87	6.28	5.73	5.23	4.77	4.35	3.95	3.58	3.26	2.95	2.65	2.38	2.12	1.88	1.64	1.43	1.22	1.02	0.83	0.65	0.48	0.32	0.16	0
100	56.7	42.5	37.2	28.6	24.3	21.2	18.7	16.5	14.8	13.2	11.9	10.8	9.8	8.97	8.17	7.46	6.79	6.21	5.67	5.17	4.7	4.29	3.88	3.53	3.22	2.91	2.62	2.35	2.09	1.85	1.62	1.41	1.2	1.01	0.82	0.64	0.47	0.31	0.15	0
100	55.7	41.3	36.1	27.6	23.6	20.5	18	16	14.3	12.9	11.6	10.5	9.55	8.69	7.93	7.24	6.61	6.05	5.53	5.05	4.61	4.21	3.83	3.49	3.16	2.86	2.57	2.31	2.06	1.82	1.59	1.38	1.18	0.99	0.81	0.63	0.46	0.3	0.15	0
100	54.2	39.6	34.6	26.3	22.5	19.6	17.3	15.4	13.8	12.4	11.2	10.2	9.26	8.45	7.71	7.05	6.45	5.9	5.4	4.94	4.51	4.12	3.76	3.42	3.1	2.8	2.52	2.26	2.01	1.78	1.55	1.35	1.15	0.97	0.79	0.62	0.45	0.3	0.15	0
100	51.5	37.1	32.5	24.2	20.5	17.6	15.1	13.2	11.5	10.3	9.2	8.19	7.38	6.67	6.07	5.54	5.04	4.57	4.13	3.72	3.34	2.99	2.67	2.37	2.1	1.84	1.59	1.34	1.1	0.9	0.74	0.58	0.43	0.28	0.14	0.09	0.03	0.01	0	
100	46.3	33.3	28.8	22.5	19.6	17.3	15.4	13.8	12.5	11.3	10.3	9.41	8.6	7.87	7.21	6.61	6.07	5.56	5.1	4.67	4.28	3.91	3.57	3.26	2.95	2.67	2.4	2.15	1.92	1.68	1.48	1.28	1.09	0.91	0.74	0.58	0.42	0.27	0.13	0
49.9	33.9	27.7	23.5	20.4	18	16	14.4	13	11.8	10.7	9.92	9.08	8.23	7.55	6.94	6.37	5.85	5.38	4.93	4.53	4.15	3.78	3.46	3.15	2.86	2.59	2.33	2.08	1.86	1.64	1.44	1.24	1.05	0.88	0.71	0.55	0.4	0.28	0.12	0
28	26.7	22.9	20.3	18.1	16.3	14.7	13.3	12.1	11.1	10.1	9.3	8.54	7.85	7.22	6.64	6.11	5.63	5.18	4.76	4.37	4.01	3.67	3.35	3.05	2.77	2.51	2.26	2.02	1.8	1.59	1.39	1.2	1.01	0.84	0.68	0.52	0.37	0.23	0.11	0
17.3	17	16.2	15.2	14.2	13.2	12.2	11.3	10.4	9.42	8.77	8.08	7.47	6.86	6.34	5.85	5.39	4.97	4.57	4.2	3.88	3.53	3.23	2.94	2.67	2.42	2.18	1.95	1.73	1.53	1.33	1.15	0.97	0.8	0.64	0.49	0.34	0.2	0.09	0	
12.8	12.5	12.2	11.8	11.2	10.7	10	9.44	8.85	8.28	7.74	7.22	6.73	6.26	5.83	5.41	5.03	4.66	4.31	3.99	3.68	3.38	3.11	2.84	2.58	2.36	2.13	1.92	1.71	1.52	1.33	1.15	0.98	0.82	0.67	0.52	0.37	0.24	0.11	0	
11.1	11	10.8	10.5	10.1	9.61	9.13	8.63	8.14	7.65	7.18	6.73	6.28	5.88	5.48	5.11	4.75	4.41	4.09	3.78	3.5	3.22	2.96	2.71	2.47	2.26	2.03	1.82	1.63	1.44	1.26	1.08	0.92	0.77	0.62	0.47	0.33	0.2	0.08	0	
9.8	9.75	9.69	9.59	9.45	9.29	9.09	8.8	8.3	7.9	7.48	7.07	6.66	6.26	5.88	5.51	5.15	4.81	4.48	4.17	3.87	3.59	3.31	3.05	2.81	2.57	2.35	2.13	1.93	1.73	1.54	1.36	1.19	1.02	0.86	0.71	0.56	0.42	0.28	0.15	0
8.74	8.7	8.68	8.64	8.18	7.88	7.55	7.22	6.87	6.52	6.17	5.82	5.48	5.15	4.82	4.51	4.21	3.93	3.65	3.38	3.13	2.89	2.66	2.44	2.22	2.02	1.82	1.64	1.45	1.28	1.12	0.96	0.8	0.65	0.51	0.37	0.24	0.12	0		
7.04	7.01	7.07	7.08	7.15	6.99	6.61	6.21	5.81	5.41	5.01	4.61	4.21	3.81	3.41	3.01	2.61	2.21	1.81	1.41	1.01	0.61	0.21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.39	6.37	6.31	6.22	6.09	5.93	5.75	5.55	5.33	5.1	4.87	4.63	4.39	4.16	3.92	3.68	3.46	3.24	3.02	2.81	2.61	2.41	2.22	2.03	1.85	1.68	1.51	1.35	1.19	1.04	0.89	0.75	0.61	0.48	0.35	0.23	0.11	0	0	0	0
5.8	5.78	5.73	5.65	5.54	5.41	5.25	5.08	4.9	4.7	4.48	4.28	4.07	3.86	3.65	3.44	3.23	3.02	2.82	2.63	2.44	2.25	2.07	1.9	1.73	1.56	1.4	1.25	1.1	0.95	0.81	0.68	0.55	0.42	0.3	0.18	0.07	0	0	0	0
5.27	5.25	5.21	5.14	5.05	4.94	4.81	4.68	4.5	4.32	4.14	3.96	3.77	3.58	3.39	3.19	3	2.82	2.63	2.45	2.27	2.1	1.93	1.77	1.61	1.45	1.3	1.15	1.01	0.87	0.74	0.61	0.49	0.36	0.24	0.12	0	0	0	0	
4.79	4.78	4.75	4.69	4.61	4.51	4.4	4.27	4.13	3.98	3.82	3.65	3.48	3.31	3.14	2.96	2.79	2.62	2.45	2.28	2.11	1.95	1.78	1.64	1.49	1.34	1.2	1.08	0.92	0.78	0.65	0.54	0.42	0.3	0.18	0.08	0	0	0	0	
4.37	4.36	4.33	4.26	4.21	4.13	4.03	3.91	3.78	3.65	3.51	3.37	3.21	3.06	2.9	2.74	2.58	2.42	2.27	2.11	1.96	1.81	1.67	1.53	1.37	1.24	1.1	0.97	0.84	0.71	0.59	0.47	0.36	0.24	0.12	0	0	0	0	0	
3.89	3.87	3.85	3.8	3.74	3.67	3.59	3.47	3.36	3.23	3.1	2.96	2.82	2.68	2.53	2.38	2.24	2.1	1.95	1.81	1.67	1.53	1.39	1.26	1.13	1	0.88	0.75	0.63	0.52	0.4	0.28	0.18	0.07	0	0	0	0	0	0	
3.63	3.62	3.6	3.56	3.51	3.45	3.37	3.28	3.18	3.08	2.97	2.86	2.72	2.6	2.46	2.33	2.2	2.08	1.93	1.8	1.66	1.53	1.4	1.28	1.15	1.03	0.91	0.79	0.67	0.56	0.44	0.34	0.23	0.12	0	0	0	0	0	0	
3.31	3.3	3.28	3.26	3.2	3.15	3.08	3	2.91	2.82	2.72	2.61	2.5	2.36	2.26	2.14	2.02	1.8	1.77	1.65	1.53	1.4	1.28	1.16	1.04	0.93	0.81	0.7	0.59	0.49	0.37	0.27	0.17	0.07	0	0	0	0	0	0	
3.02	3.01	2.99	2.98	2.92	2.87	2.81	2.74	2.66	2.56	2.49	2.39	2.29	2.19	2.07	1.96	1.85	1.74	1.62	1.51	1.39	1.28	1.16	1.05	0.94	0.83	0.72	0.61	0.51	0.41	0.31	0.21	0.11	0	0	0	0	0	0	0	
2.75	2.74	2.72	2.7	2.66	2.62	2.56	2.5	2.43	2.35	2.27	2.18	2.09	1.99	1.9	1.79	1.69	1.58	1.48	1.37	1.26	1.16	1.05	0.94	0.84	0.73	0.63	0.53	0.43	0.33	0.24	0.15	0.06	0	0	0	0	0	0	0	
2.5	2.48	2.46	2.42	2.38	2.33	2.28	2.21	2.14	2.07	1.99	1.91	1.82	1.73	1.63	1.54	1.44	1.34	1.24	1.14	1.04	0.94	0.84	0.74	0.64	0.55	0.45	0.36	0.26	0.17	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.27	2.26	2.25	2.23	2.2	2.16	2.12	2.07	2.01	1.95	1.88	1.81	1.73	1.65	1.57	1.48	1.39	1.3	1.21	1.11	1.02	0.93	0.83	0.74	0.65	0.56	0.46	0.37	0.28	0.2	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2.05	2.05	2.04	2.02	1.99	1.95	1.92	1.87	1.82	1.77	1.7	1.64	1.57	1.49	1.41	1.33	1.25	1.17	1.08	0.99	0.91	0.82	0.73	0.64	0.55	0.47	0.38	0.3	0.21	0.13	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.86	1.85	1.84	1.82	1.8	1.77	1.73	1.69	1.65	1.59	1.54	1.48	1.41	1.34	1.27	1.2	1.12	1.04	0.96	0.88	0.8	0.72	0.63	0.55	0.47	0.38	0.3	0.22	0.14	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.67	1.67	1.66	1.64	1.62	1.59	1.56	1.52	1.48	1.43	1.38	1.32	1.26	1.2	1.13	1.07	0.99	0.92	0.85	0.77	0.69	0.62	0.54	0.46	0.38	0.3	0.22	0.15	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1.5	1.5	1.49	1.47	1.45	1.43	1.4	1.36	1.32	1.28	1.23	1.18	1.13	1.08	1.01	0.94	0.88	0.81	0.74	0.67	0.59	0.52	0.45	0.37	0.3	0.22	0.16	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.34	1.34	1.33	1.32	1.3	1.27	1.25	1.22	1.18	1.14	1.09	1.05	1	0.94	0.88	0.83	0.76	0.7	0.64	0.57	0.5	0.43	0.36	0.29	0.22	0.14	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.19	1.19	1.18	1.17	1.15	1.13	1.11	1.08	1.																																

Tablo 3.3'de çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde bulunan düğüm potansiyel değerleri verilmiştir ve Şekil 3.13'de ise toprak yüzeyindeki potansiyel değişimin grafiği gösterilmiştir.

Tablo 3.3 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık (m)	SFY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)
0	100
0.5	58.32197213
1	44.49992945
1.5	36.31470098
2	30.59134923
2.5	26.26586085
3	22.84818168
3.5	20.0688735
4	17.76201067
4.5	15.81721887
5	14.15698624
5.5	12.72470821
6	11.47783138
6.5	10.3836468
7	9.416565696
7.5	8.55627828
8	7.786466549
8.5	7.09387993
9	6.467656954
9.5	5.898818587
10	5.379884118
10.5	4.904576216
11	4.467591914
11.5	4.064422977
12	3.691213685
12.5	3.344647255
13	3.021854349
13.5	2.720338747
14	2.437916429
14.5	2.17266517
15	1.922882411
15.5	1.687049645
16	1.463801988
16.5	1.251901882
17	1.050216268
17.5	0.857696804
18	0.673363078
18.5	0.496289033
19	0.32559305
19.5	0.160432096
20	0

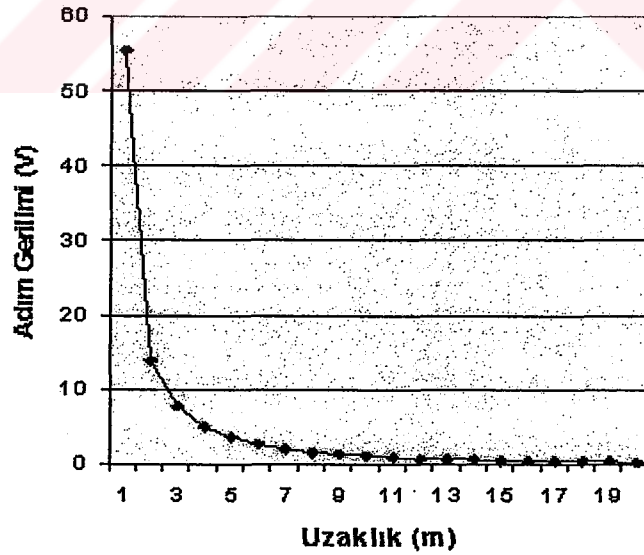


Şekil 3.13 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

5 m uzunluktaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde bulunan adım gerilimi Tablo 3.4'de verilmiştir. Tablo 3.4'den görüldüğü gibi adım gerilimi değerleri, 1 m uzunluğunda olan çubuk topraklayıcıdaki gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. 5 m'lik çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan adım gerilimi değişimi ise Tablo 3.4'de verilmiş olup, topraklayıcı yakında belirtildiği gibi büyük, ancak uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Tablo 3.4'de verilen değerler toprak yüzeyinde 1 m uzaklıktaki iki düğüm arasındaki potansiyel farkını göstermektedir.

Tablo 3.4 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Aralarında 1m uzaklık olan iki düğümün potansiyel değerleri		Adım Gerilimi
1.düğüm(hücre)	2.düğüm(hücre)	
100	44.49992945	55.50007055
44.49992945	30.59134923	13.90858021
30.59134923	22.84818168	7.743167554
22.84818168	17.76201067	5.086171012
17.76201067	14.15698624	3.605024424
14.15698624	11.47783138	2.679154869
11.47783138	9.416565696	2.061265679
9.416565696	7.786466549	1.630099147
7.786466549	6.467656954	1.318809595
6.467656954	5.379884118	1.087772835
5.379884118	4.467591914	0.912292204
4.467591914	3.691213685	0.776378229
3.691213685	3.021854349	0.669359336
3.021854349	2.437916429	0.58393792
2.437916429	1.922882411	0.515034018
1.922882411	1.463801988	0.459080423
1.463801988	1.050216268	0.41358572
1.050216268	0.673363078	0.37685319
0.673363078	0.32559305	0.347770028
0.32559305	0	0.32559305



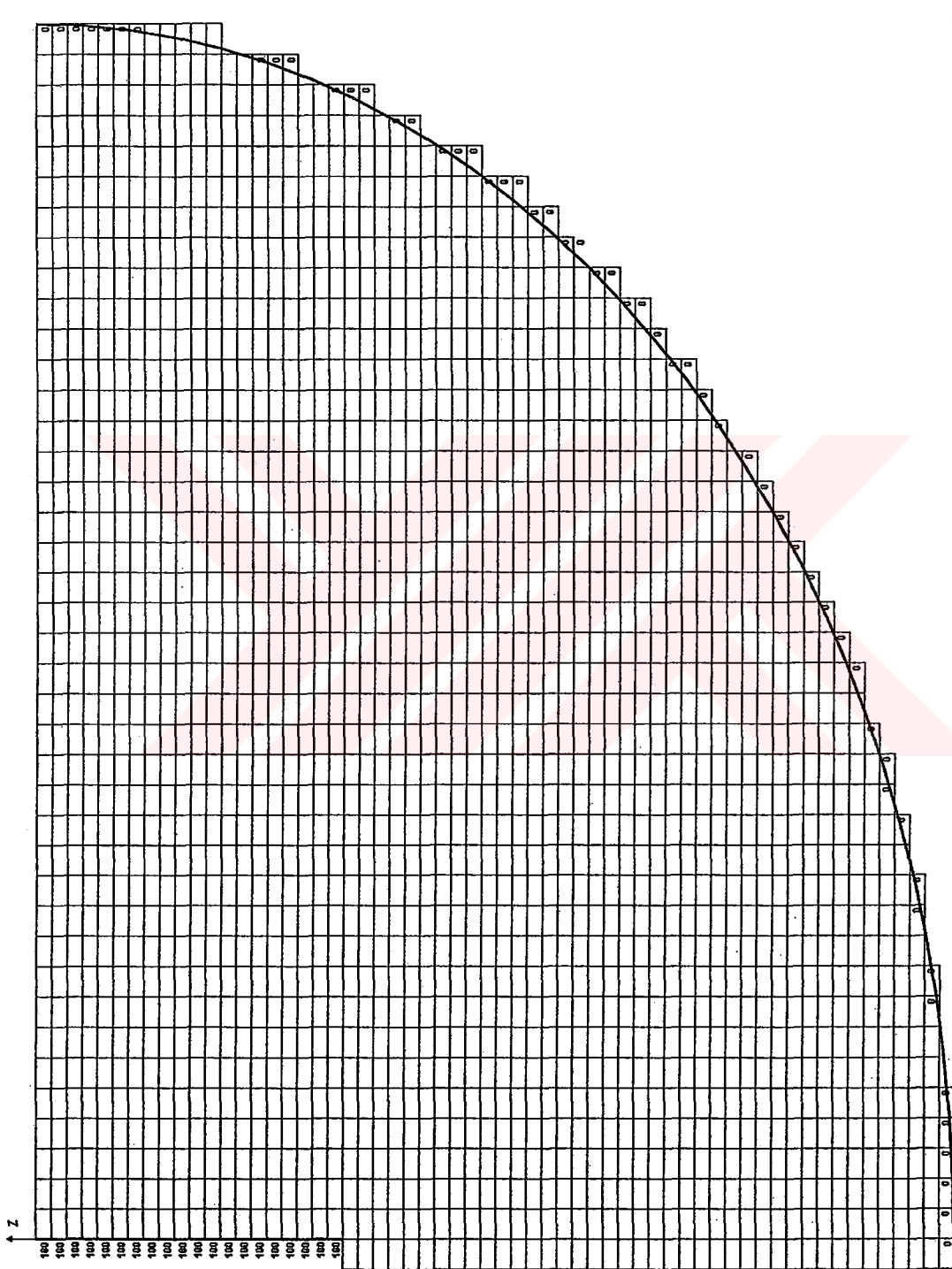
Şekil 3.14 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi

3.5.3 10 Metre Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı

10 metre uzunluğundaki bir çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla oluşturulan modelde $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ 'lik kare gözlerden oluşan bir ağ yapısı kurulmuş ve buna göre sonlu farklar modeli oluşturulmuştur. Bu modelin MS EXCEL'e taşınmasıyla her bir hücre 0,5 m olarak düşünülmüş ve 20 m uzaklıktaki referans toprak ile çubuk topraklayıcı arasındaki düğümler için toprak yüzeyindeki bölüm, 40 adet hücreyle benzeştirilmişlerdir. Çubuk topraklayıcı 10 m uzunluğunda olup uygulanan gerilim 100 volt olduğundan, MS EXCEL'de çubuk topraklayıcı uzunluğuna karşı düşen 0,5 m'lik 20 adet hücreye 100 volt değeri girilerek benzeşim yapılmıştır. Referans toprak olarak kabul edilen 20 m uzaklıktaki düğümlere karşı düşen hücrelere ise 0 volt değerleri girilmiştir. 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı toprak yüzeyinde, toprak içinde ve simetri eksenindeki düğümlere karşılık düşen hücrelerin değerleri bulunarak çıkartılmıştır. Buna göre SFY kullanılarak oluşturulan Şekil 3.15'deki modelin MS EXCEL'e taşındıktan sonra hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulunan potansiyel dağılımı Şekil 3.16'de verilmiştir. Şekil 3.15'de verilen 10 m'lik çubuk topraklayıcı için kurulan modelde, çubuk uzunluğu 10 m olduğu için hücresel denklem çözümünde herbir hücre 0,5 m olarak düşünülürse 20 adet hücreye 100 volt değeri uygulanması gerekmektedir. Toprak yüzeyinde, toprak içinde ve simetri ekseninde sonlu farklar yöntemi kullanılarak yazılan denklemlerin çözümlenmesi sonucu oluşan potansiyel dağılımı ise Şekil 3.16'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 1m'lik çubuk topraklayıcıda olduğu gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça düğüm potansiyel değerleri düşmektedir. Tablo 3.5'de 10 m'lik çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde sonlu farklar yöntemi ile bulunan düğüm potansiyel değerleri verilmiştir. Şekil 3.18'de ise toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi gösterilmiştir.

10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için toprak yüzeyinde bulunan adım gerilimi değerleri Tablo 3.6'de verilmiştir. Tablo 3.6'dan görüldüğü gibi adım gerilimi değerleri, 1 m ve 5 m uzunluğunda olan çubuk topraklayıcılardaki gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Tablo 3.6'da verilen değerler toprak yüzeyinde 1 m uzaklıktaki iki düğüm arasındaki potansiyel farkını göstermektedir.

Şekil 3.15'de 10 m'lik çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilim değerini simgelemek amacıyla 20 adet hücreye 100 volt değeri girilmiş ve silindrsel koordinat sisteminde sonlu farklar yöntemiyle herbir düğümün (hücre) potansiyel değerini hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulmak amacıyla kurulmuş olan model gösterilmiştir.



Şekil 3.15 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için kurulan SFY modeli

100	62	48.3	41.7	35.4	32.2	28.8	26	23.8	21.5	19.8	18	16.5	15.1	13.8	12.8	11.8	10.8	10	9.21	8.47	7.78	7.13	6.53	5.97	5.43	4.93	4.46	4.01	3.59	3.18	2.81	2.44	2.08	1.76	1.44	1.13	0.84	0.55	0.27	0		
100	62	48.3	41.7	35.4	32.2	28.8	26	23.8	21.5	19.8	18	16.5	15.1	13.8	12.8	11.8	10.8	10	9.21	8.47	7.78	7.13	6.53	5.97	5.43	4.93	4.46	4.01	3.59	3.18	2.81	2.44	2.08	1.76	1.44	1.13	0.84	0.55	0.27	0		
100	61.9	48.2	41.7	35.3	32.1	28.7	25.9	23.5	21.4	19.6	17.8	16.1	14.5	13.1	11.9	10.8	9.87	9.16	8.47	7.77	7.11	6.51	5.94	5.41	4.91	4.44	4	3.58	3.18	2.78	2.42	2.07	1.74	1.42	1.12	0.83	0.54	0.27	0			
100	61.8	48.2	41.8	35.2	32.1	28.7	25.9	23.4	21.3	19.5	17.8	16.1	14.5	13.1	11.9	10.8	9.83	9.13	8.47	7.77	7.07	6.48	5.92	5.39	4.89	4.42	3.98	3.58	3.18	2.78	2.42	2.07	1.74	1.42	1.12	0.83	0.54	0.27	0			
100	61.8	48.1	41.5	35.1	31.9	28.6	25.7	23.3	21.2	19.4	17.7	16.1	14.5	13.1	11.9	10.8	9.88	9.09	8.34	7.66	7.03	6.43	5.88	5.35	4.84	4.39	3.95	3.53	3.14	2.76	2.4	2.05	1.73	1.41	1.11	0.82	0.54	0.27	0			
100	61.7	48	41.4	35	31.8	28.5	25.6	23.2	21.1	19.2	17.6	16.1	14.8	13.6	12.5	11.5	10.6	9.78	9	8.26	7.6	6.97	6.38	5.83	5.31	4.82	4.35	3.92	3.5	3.07	2.7	2.36	2.04	1.71	1.4	1.1	0.81	0.53	0.26	0		
100	61.5	48.8	41.2	35.8	31.8	28.3	25.4	23	20.9	19.1	17.4	16	14.7	13.5	12.4	11.4	10.5	9.69	8.91	8.19	7.52	6.91	6.37	5.81	5.27	4.72	4.31	3.92	3.46	3.01	2.7	2.35	2.01	1.68	1.38	1.08	0.8	0.52	0.26	0		
100	61.5	48.8	41	35.5	31.4	28	25.2	22.8	20.7	18.8	17.3	15.8	14.5	13.3	12.3	11.3	10.4	9.57	8.8	8.08	7.43	6.81	6.24	5.7	5.18	4.71	4.25	3.82	3.42	3.03	2.68	2.31	1.98	1.66	1.36	1.06	0.78	0.51	0.25	0		
100	61.3	48.4	40.7	35.3	31.1	27.7	24.8	22.5	20.4	18.6	17	15.6	14.3	13.2	12.1	11.1	10.3	9.44	8.68	7.93	7.27	6.61	6.05	5.52	5.03	4.52	4.12	3.7	3.29	2.92	2.57	2.22	1.94	1.63	1.33	1.04	0.77	0.5	0.25	0		
100	61.1	48.1	40.1	34.9	30.7	27.4	24.6	22.1	19.8	18.1	16.4	14.9	13.7	12.5	11.4	10.4	9.58	8.84	8.08	7.32	6.61	6.05	5.52	5.03	4.52	4.12	3.7	3.29	2.92	2.57	2.22	1.94	1.63	1.33	1.04	0.77	0.5	0.25	0			
100	60.8	47.8	40	34.8	30.4	27	24.2	21.8	19.8	18	16.5	15.1	13.8	12.7	11.7	10.8	9.91	9.12	8.39	7.71	7.08	6.49	5.94	5.45	4.93	4.48	4.06	3.67	3.3	2.95	2.61	2.29	1.98	1.61	1.31	1.02	0.74	0.48	0.24	0		
100	60.5	47.4	39.8	34.1	29.8	26.5	23.8	21.4	19.4	17.7	16.1	14.8	13.6	12.5	11.5	10.6	9.83	9.02	8.27	7.59	6.93	6.36	5.82	5.31	4.83	4.38	3.95	3.55	3.16	2.8	2.45	2.12	1.81	1.51	1.22	0.95	0.69	0.44	0.23	0		
100	60.1	48.9	39	33.5	29.3	26	23.3	21	19	17.3	15.8	14.4	13.2	12.1	11.1	10.3	9.49	8.73	8.03	7.38	6.78	6.21	5.69	5.19	4.72	4.28	3.86	3.46	3.08	2.73	2.39	2.05	1.75	1.48	1.17	0.9	0.65	0.41	0.19	0		
100	59.8	48.2	38.3	32.8	28.7	25.4	22.7	20.4	18.5	16.8	15.4	14.1	12.9	11.9	10.9	10	9.28	8.51	7.83	7.16	6.54	6.18	5.75	5.35	4.93	4.52	4.12	3.73	3.36	3.01	2.7	2.48	2.16	1.88	1.6	1.34	1.08	0.83	0.59	0.36	0.14	0
100	59	48.5	37.5	32	27.9	24.7	22	19.8	17.8	16.3	14.9	13.7	12.5	11.5	10.6	9.78	8.99	8.26	7.62	7.01	6.43	5.9	5.39	4.92	4.47	4.05	3.65	3.27	2.91	2.57	2.24	1.93	1.63	1.34	1.07	0.8	0.54	0.28	0			
100	59.2	44.5	38.5	31	27	23.8	21.3	19.1	17.3	15.8	14.4	13.2	12.1	11.2	10.3	9.46	8.72	8.03	7.38	6.8	6.24	5.72	5.24	4.76	4.34	3.93	3.54	3.17	2.82	2.49	2.16	1.85	1.55	1.26	1.01	0.75	0.5	0.25	0			
100	57.1	43.2	35.2	29.8	25.8	22.8	20.4	18.4	16.7	15.2	13.8	12.7	11.7	10.8	9.92	9.16	8.43	7.77	7.16	6.55	6.17	5.72	5.28	4.86	4.49	4.12	3.77	3.43	3.1	2.78	2.49	2.21	1.93	1.68	1.41	1.16	0.91	0.66	0.45	0.22	0	
100	56.5	41.3	33.5	28.3	24.5	21.8	19.5	17.8	16.8	15.5	14.3	13.2	12.3	11.3	10.4	9.58	8.82	8.13	7.5	6.91	6.36	5.84	5.35	4.9	4.48	4.06	3.67	3.3	2.95	2.61	2.29	1.98	1.68	1.41	1.14	0.88	0.63	0.4	0.19	0		
100	55.1	36.7	31.3	26.5	23.1	20.5	18.4	16.7	15.2	13.9	12.7	11.7	10.8	9.94	9.18	8.47	7.72	7.08	6.43	5.86	5.35	4.86	4.38	3.91	3.53	3.17	2.83	2.5	2.19	1.88	1.61	1.33	1.07	0.81	0.57	0.34	0.13	0				
100	47.8	34.8	28.5	24.4	21.5	19.2	17.3	15.7	14.4	13.2	12.1	11.2	10.3	9.51	8.78	8.12	7.5	6.93	6.39	5.88	5.41	4.98	4.53	4.13	3.75	3.39	3.04	2.71	2.39	2.08	1.8	1.52	1.25	0.99	0.74	0.5	0.26	0				
46	35.2	29.2	26.1	22	19.7	17.7	16.1	14.7	13.5	12.4	11.5	10.6	9.78	8.98	8.28	7.76	7.17	6.63	6.12	5.64	5.18	4.75	4.35	3.95	3.59	3.24	2.91	2.58	2.28	1.99	1.7	1.43	1.17	0.91	0.67	0.43	0.21	0				
29.3	27.1	24.3	21.8	19.7	17.9	16.3	14.8	13.7	12.7	11.7	10.8	10	9.28	8.51	7.83	7.16	6.54	6.33	5.84	5.39	4.95	4.54	4.18	3.78	3.43	3.09	2.77	2.48	2.16	1.88	1.6	1.34	1.08	0.83	0.59	0.36	0.14	0				
22.5	21.8	20.5	19	17.5	16.1	14.9	13.8	12.7	11.8	11	10.2	9.44	8.71	8.15	7.57	7.02	6.51	6.02	5.57	5.13	4.72	4.33	3.98	3.61	3.27	2.94	2.63	2.33	2.05	1.77	1.5	1.26	1	0.75	0.52	0.27	0					
18.8	19.3	17.8	16.8	15.8	14.5	13.3	12.8	11.8	11	10.2	9.63	8.98	8.27	7.7	7.16	6.65	6.17	5.72	5.28	4.86	4.49	4.12	3.77	3.43	3.1	2.78	2.49	2.21	1.93	1.68	1.41	1.16	0.91	0.66	0.45	0.22	0					
15.8	15.7	15.3	14.6	13.9	13.1	12.3	11.5	10.9	10.2	9.62	9.01	8.32	7.77	7.25	6.75	6.28	5.84	5.42	5.01	4.63	4.28	3.91	3.57	3.25	2.94	2.64	2.35	2.05	1.81	1.55	1.31	1.05	0.83	0.6	0.39	0.18	0					
13.9	13.7	13.4	13	12.4	11.8	11.2	10.6	10	9.41	8.85	8.3	7.78	7.28	6.81	6.38	5.97	5.57	5.18	4.82	4.47	4.13	3.8	3.48	3.16	2.86	2.61	2.34	2.08	1.82	1.58	1.34	1.11	0.88	0.66	0.46	0.24	0					
10.8	10.8	10.8	10.4	10.1	9.7	9.3	8.88	8.48	8.02	7.6	7.17	6.76	6.38	5.97	5.58	5.22	4.87	4.53	4.2	3.88	3.58	3.28	2.99	2.72	2.45	2.18	1.94	1.69	1.46	1.23	1.01	0.79	0.59	0.38	0.18	0						
8.92	8.95	8.93	8.45	8.1	8.01	7.49	6.13	7.73	7.4	7.02	6.65	6.28	5.92	5.57	5.22	4.89	4.56	4.25	3.94	3.64	3.35	3.07	2.8	2.54	2.26	2.04	1.8	1.57	1.34	1.12	0.91	0.7	0.5	0.3	0.12	0						
7.86	7.85	7.78	7.65	7.49	7.29	7.07	6.82	6.65	6.27	5.98	5.69	5.4	5.11	4.82	4.53	4.26	3.97	3.7	3.44	3.18	2.93	2.68	2.44	2.2	1.97	1.76	1.53	1.32	1.12	0.91	0.72	0.53	0.34	0.17	0							
7.13	7.11	7.05	6.95	6.81	6.66	6.24	6.01	5.77	5.52	5.26	5	4.73	4.47	4.21	3.95	3.7	3.45	3.2	2.98	2.72	2.49	2.26	2.04	1.82	1.61	1.4	1.2	1	0.81	0.62	0.44	0.27	0.11	0								
6.48	6.46	6.41	6.32	6.21	6.08	5.9	5.72	5.52	5.3	5.09	4.85	4.62	4.38	4.14	3.9	3.66	3.43	3.2	2.97	2.74	2.52	2.3	2.08	1.86	1.67	1.47	1.27	1.08	0.89	0.71	0.53	0.35	0.16	0								
5.95	5.94	5.91	5.84	5.76	5.68	5.4	5.25	5.05	4.87	4.67	4.47	4.26	4.04	3.83	3.61	3.39	3.17	2.95	2.74	2.53	2.33	2.12	1.92	1.72	1.53	1.34	1.15	0.97	0.78	0.61	0.44	0.27	0.11	0								
4.88	4.87	4.83	4.78	4.71	4.61	4.5	4.38	4.24	4.1	3.94	3.77	3.6	3.43	3.26	3.08	2.89	2.69	2.51	2.32	2.14	1.95	1.76	1.57	1.39	1.21	1.03	0.85	0.68	0.51	0.35	0.18	0										
4.44	4.43	4.4	4.36	4.28	4.21	4.11	4	3.86	3.75	3.61	3.48	3.3	3.14	2.98	2.81	2.64	2.47	2.3	2.13	1.98	1.78	1.62	1.45	1.28	1.12	0.96	0.8	0.64	0.48	0.33	0.17	0										
4.04	4.03	4.01	3.97	3.91	3.84	3.76	3.68	3.55	3.43	3.3	3.17	3.02	2.88	2.73	2.57	2.42	2.26	2.1	1.94	1.78	1.62	1.46	1.3	1.16	0.99	0.84	0.69	0.53	0.39	0.24	0.1	0										
3.64	3.64	3.62	3.58	3.54	3.49	3.41	3.34	3.26	3.13	3.01	2.89	2.76	2.63	2.49	2.35	2.2	2.08	1.91	1.76	1.61	1.46	1.31	1.16	1.01	0.87	0.72	0.58	0.														

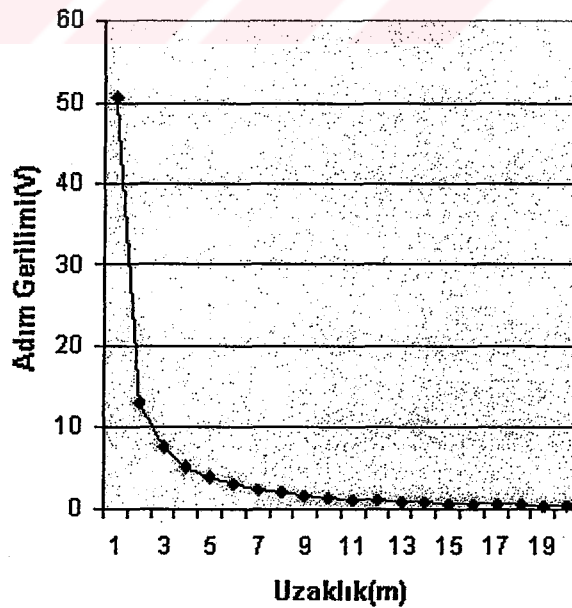
Tablo 3.5 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık (m)	SFY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)
0	100
0.5	61.98224428
1	49.32258073
1.5	41.74724401
2	36.36104338
2.5	32.199116
3	28.82273248
3.5	25.99532917
4	23.57456688
4.5	21.46791982
5	19.61166593
5.5	17.95990248
6	16.47835263
6.5	15.14065984
7	13.92606161
7.5	12.81786926
8	11.80243994
8.5	10.86846053
9	10.00643551
9.5	9.208311979
10	8.467199338
10.5	7.77715561
11	7.133021777
11.5	6.530291288
12	5.965005775
12.5	5.433670593
13	4.93318554
13.5	4.460787345
14	4.014001336
14.5	3.590600333
15	3.18856926
15.5	2.806074311
16	2.441435801
16.5	2.093104102
17	1.759638319
17.5	1.439687643
18	1.131975585
18.5	0.835287552
19	0.548462276
19.5	0.270387521
20	0

Tablo 3.5'de görüldüğü gibi 10 m'lik çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri aynen 1 m ve 5 m'lik çubuk topraklayıcıda olduğu gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır.

Tablo 3.6 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Aralarında 1m uzaklık olan iki düğümün potansiyel değerleri		Adım Gerilimi
1.düğüm(hücre)	2.düğüm(hücre)	
100	49.32258073	50.67741927
49.32258073	36.36104338	12.96153735
36.36104338	28.82273248	7.538310898
28.82273248	23.57456688	5.248165602
23.57456688	19.61166593	3.962900949
19.61166593	16.47835263	3.133313304
16.47835263	13.92606161	2.552291012
13.92606161	11.80243994	2.123621672
11.80243994	10.00643551	1.796004432
10.00643551	8.467199338	1.539236171
8.467199338	7.133021777	1.334177562
7.133021777	5.965005775	1.168016002
5.965005775	4.93318554	1.031820235
4.93318554	4.014001336	0.919184204
4.014001336	3.18856926	0.825432076
3.18856926	2.441435801	0.747133459
2.441435801	1.759638319	0.681797481
1.759638319	1.131975585	0.627662734
1.131975585	0.548462276	0.583513309
0.548462276	0	0.548462276



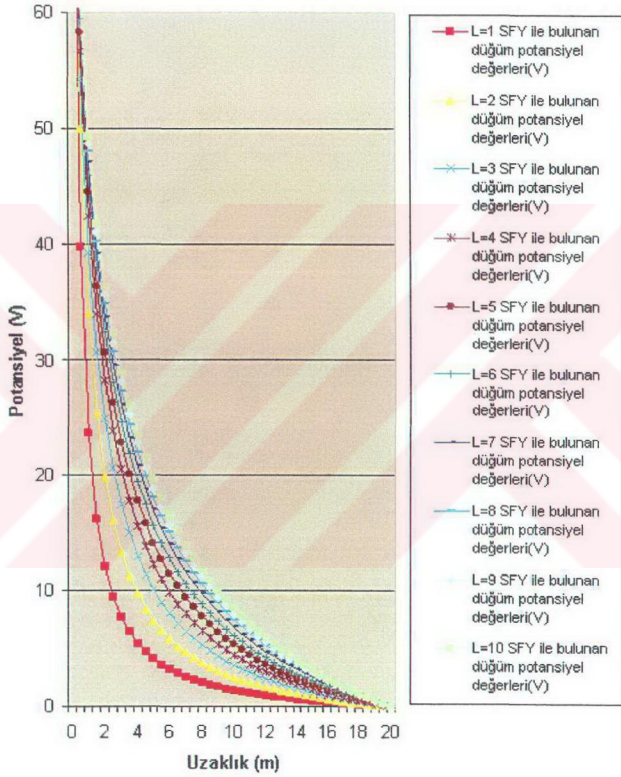
Şekil 3.17 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi

Çubuk topraklayıcının 1, 5 ve 10 m uzunluğunda olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının hücresele denklem çözümü yöntemiyle yapılan hesaplamalarından görüldüğü gibi, silindirsel koordinatlarda Laplace denkleminin sonlu farklar yöntemi ile çözülerek elde edilen ifadeleri kullanılarak bir çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı hesaplanabilir.

Tablo 3.7 Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde SFY ile bulunan potansiyel değerleri

Elektrot boyu(m)	L=1	L=2	L=3	L=4	L=5	L=6	L=7	L=8	L=9	L=10
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)	SFY ile bulunan potansiyel değerleri(V)
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	39.82225031	50.01369141	54.2688537	56.7028613	58.3219721	59.45734962	60.3374084	61.0279199	61.5366608	61.9822443
1	23.58066428	34.10293164	39.2852575	42.3944312	44.4998294	45.98810641	47.14734539	48.0594454	48.7349228	49.3225807
1.5	16.13847341	25.40623177	30.65483019	33.9533243	36.314701	37.97636504	39.28152638	40.3133309	41.079072	41.747244
2	12.00855801	19.8837905	24.84801196	28.1931901	30.5913492	32.33531385	33.72028313	34.8222557	35.642398	36.3610434
2.5	9.421399458	16.09468796	20.64619317	23.8764514	26.2658609	28.03391273	29.45636054	30.5969856	31.4487738	32.199116
3	7.664106564	13.35540056	17.46926401	20.5215998	22.8481817	24.60044263	26.03041989	27.1871321	28.0541515	28.8227325
3.5	6.39583298	11.2949778	14.99151399	17.8382075	20.088735	21.7782044	23.19341108	24.3492074	25.2188697	25.9953292
4	5.438743676	9.695383433	13.0188772	15.6459607	17.7620107	19.4091091	20.79425473	21.936103	22.798498	23.5745669
4.5	4.691353031	8.421020623	11.39863824	13.8247285	15.8172189	17.39060281	18.73374269	19.851672	20.6989471	21.4679198
5	4.091775163	7.383729047	10.06178066	12.2905513	14.1569862	15.64970969	16.94279179	18.0292786	18.8552459	19.6116859
5.5	3.600210839	6.524031044	8.937893713	10.9827104	12.7247082	14.13339622	15.37110061	16.4206022	17.2204557	17.9599025
6	3.189933303	5.800512794	7.981126778	9.85615079	11.4778314	12.80164472	13.98075666	14.9893335	15.7594227	16.4783526
6.5	2.842341686	5.183539552	7.157609923	8.87675148	10.3636468	11.62349885	12.74240179	13.707402	14.4450429	15.1406598
7	2.54409711	4.651383837	6.441848928	8.01823178	9.4165657	10.57454034	11.63280938	12.5526042	13.2559165	13.9260616
7.5	2.28538796	4.187823592	5.814331657	7.26005423	8.55627828	9.635204535	10.63328456	11.5070475	12.1748135	12.8178893
8	2.058837904	3.780438815	5.259899679	6.58596368	7.78646855	8.789612937	9.728567177	10.5560916	11.1876344	11.8024399
8.5	1.858795409	3.419641992	4.76661895	5.98294662	7.09387993	8.024738724	8.906054785	9.68760391	10.2826838	10.8848005
9	1.680857993	3.09780611	4.324969056	5.44047635	6.46765895	7.329794795	8.1552369	8.89142288	9.4501492	10.0064355
9.5	1.521545574	2.809140363	3.92726883	4.94955674	5.89881859	6.695775509	7.467273252	8.15895996	8.68171757	9.20831198
10	1.378071136	2.548571111	3.567325065	4.50430667	5.37988412	6.115107479	6.83467308	7.48289894	7.97028726	8.46719934
10.5	1.248176525	2.312219836	3.239950231	4.09764574	4.90457622	5.581379545	6.251047071	6.85896433	7.30974749	7.77715561
11	1.130012766	2.096832865	2.940905961	3.72505379	4.46759191	5.089131352	5.710912698	6.27574	6.69480653	7.13302178
11.5	1.022051447	1.899707857	2.666634779	3.38236808	4.06442298	4.633686026	5.20953953	5.73452521	6.12085585	6.53029129
12	0.92301812	1.718881547	2.414141048	3.06612318	3.69121369	4.211016457	4.742824959	5.2292189	5.58386125	5.96500578
12.5	0.831841593	1.551543551	2.180884434	2.77326661	3.34464726	3.817637499	4.307193353	4.75622554	5.08027452	5.43367059
13	0.747614825	1.396969402	1.964696223	2.5012379	3.02185435	3.450518338	3.899513479	4.31237793	4.60696097	4.93318554
13.5	0.669564402	1.253467911	1.763712878	2.24781059	2.72033875	3.107010631	3.517030261	3.89487311	4.16113925	4.46078735
14	0.597026419	1.119839313	1.57632269	2.01104999	2.43791643	2.784789057	3.157307878	3.50121882	3.74033087	4.01400134
14.5	0.529427164	0.995041572	1.401122401	1.78926459	2.17266517	2.481801586	2.818181844	3.12918827	3.34231723	3.59060033
15	0.465267415	0.878162866	1.236881431	1.58096571	1.92288241	2.196227341	2.497718229	2.7767817	2.98510259	3.18858926
15.5	0.407108398	0.768398764	1.082511846	1.38483341	1.68704965	1.92644025	2.194178521	2.44219333	2.60688147	2.80607431
16	0.351565659	0.665032919	0.937042631	1.19988701	1.46380199	1.670977023	1.905988894	2.12378292	2.26600942	2.4414358
16.5	0.299289191	0.567420395	0.799597153	1.02445925	1.25190188	1.428508179	1.63171137	1.82005088	1.94097624	2.0831041
17	0.249964242	0.474972953	0.669373001	0.8581729	1.05021627	1.197811182	1.37003049	1.52961737	1.63038088	1.75963832
17.5	0.203297292	0.387145891	0.545623751	0.6999194	0.8578988	0.977745118	1.119709835	1.25120285	1.33290811	1.43968764
18	0.159007889	0.303426338	0.427642678	0.54883954	0.67336308	0.767227046	0.879596535	0.98361358	1.04730707	1.13197559
18.5	0.116819432	0.223323287	0.314748975	0.40410677	0.49628903	0.565211096	0.648594808	0.7257285	0.77237308	0.83528755
19	0.07645081	0.14636013	0.206277694	0.2649148	0.32559305	0.370672597	0.425657503	0.47648983	0.50693454	0.54846228
19.5	0.037611039	0.072070737	0.101574999	0.13047134	0.1604321	0.182600371	0.209780134	0.23489642	0.24984788	0.27038752
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Çubuk topraklayıcının 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 metre uzunluğunda olması durumu için de, aynı şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarda olması durumunda, toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri Tablo 3.7'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça düğüm (hücre) potansiyel değerleri ve yüzeydeki adım gerilimi değerleri topraklayıcıya yakın yerlerde büyük uzaklaştıkça hızla düşmektedir.



Şekil 3.18 Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcıların toprak yüzeyinde SFY yöntemi ile bulunan düğüm potansiyellerinin değişimleri

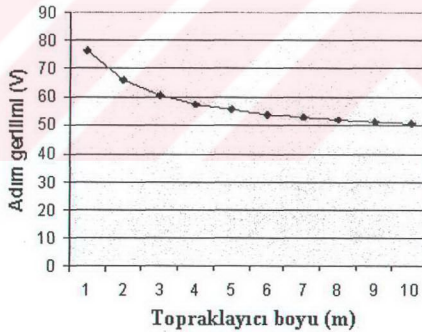
Tablo 3.8'de görüldüğü gibi topraklayıcı potansiyeli ile topraklayıcıdan 1 m uzaklıktaki düğüm noktalarının potansiyel değerleri arasındaki fark olan adım gerilim değerleri, topraklayıcı boyu uzadıkça azalmaktadır. Bu sonuçlardan

görüldüğü gibi topraklayıcı boyunun uzatılması, topraklayıcı yakınındaki canlılar için önem taşıyan adım gerilimini azaltacak yönde etki etmektedir.

Tablo 3.8 Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcı ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm arasında SFY ile bulunan adım gerilimi değerleri

Elektrot boyu(m)	Topraklayıcı üzerindeki potansiyel(V)	Topraklayıcıdan 1m uzaklıktaki düğüm potansiyeli(V)	Adım Gerilimi
1	100	23.58066428	76.4193357
2	100	34.10293164	65.8970684
3	100	39.2852575	60.7147425
4	100	42.39443121	57.6055688
5	100	44.49992945	55.5000706
6	100	45.98810641	54.0118936
7	100	47.14734539	52.8526546
8	100	48.05944538	51.9405546
9	100	48.73492284	51.2650772
10	100	49.32258073	50.6774193

Şekil 3.19'da farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcılar için adım gerilimi değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 3.19 Çubuk topraklayıcı boyu ile SFY ile bulunan adım gerilimi değişimi

3.6 Çubuk Topraklayıcının Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SEY İle Hesabı

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), elektrik veya manyetik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi (minimumlaştırma) ilkesine dayanır.

Sonlu elemanlar yönteminde de diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir.

EK B'de belirtildiği gibi kapalı bir bölgenin sonlu elemanlara bölünmesi, boyutları, konumları ve biçimleri isteğe bağlı olarak seçilen elemanlarla yapılabilir. Bu elemanlar, bir boyutlu problemlerde doğru parçaları şeklinde, iki boyutlu problemlerde üçgen, kare dikdörtgen veya çokgen gibi şekillerde, üç boyutlu problemlerde ise küp, prizma, dörtüzlü ... gibi şekillerde olabilir. Bölge içindeki eleman sayısı ve dağılımı (yoğunluğu) çözümün doğruluğuna etki eden etkenlerdir. Üçgen elemanların tanımlanması, elemanların ve köşe (düğüm) noktalarının numaralandırılması ve koordinatlarının belirlenmesi demektir. Elemanların tanımlanması ve bunların bölgenin sınırlarına uydurulması işlemi, sonlu elemanlar programında genelde bilgisayarla otomatik olarak yapılır (automatic mesh generation). Elle ayrıklaştırma az sayıda elemanla çözülecek problemler için uygun olabilir.

Sonlu elemanlar yöntemi ile bir potansiyel problemini çözmede potansiyel için yaklaşık bir çözüm elde etmek amacıyla, bölge elemanlara ayrıldıktan sonra her eleman içinde potansiyelin belirli bir bağıntı ile değiştiği kabul edilir ve bu şekilde, potansiyelin sürekli olarak değiştiği bir bölgede bölgenin tümü için yaklaşık bir çözüm elde edilir. Bir elemandaki potansiyelin değişimi olarak alınan böyle bir potansiyel işlevine yaklaşım işlevi veya interpolasyon işlevi adı verilir.

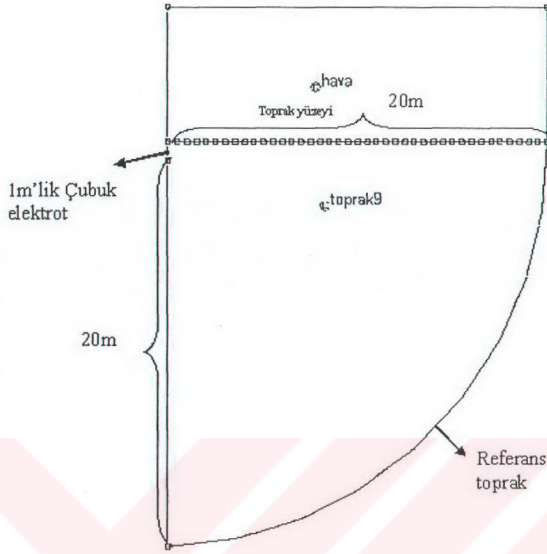
Bu bölümde, bir çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel değişimin hesaplanması amacıyla EK B'de belirtilen sonlu elemanlar yöntemi kriterlerine göre çözüm yapan FEMM (Finite Element Method Magnetics) adlı programda, topraklayıcının farklı uzunluklarda olması, farklı derinliklere gömülmesi, farklı bağıl dielektrik katsayılarına sahip toprak içinde olması durumlarında çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla modeller kurulmuş ve potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. Hesaplar eksenel simetride sınır koşulları bilinen bölge içinde yapılmıştır. Buna göre kapalı bölge sonlu elemanlara bölünmüş ve potansiyel dağılımı bulunmuştur. Kurulan modeller ve hesaplamalar bu bölümün alt bölümlerinde ayrı ayrı sunulmuştur.

3.6.1 Farklı Uzunluklardaki Çubuk Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SEY İle Hesabı

Bu bölümde, aynen SFY ile potansiyel dağılımı hesaplarında olduğu gibi 1, 5 ve 10 m uzunluklarındaki çubuk topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan modeller ve FEMM programı ile yapılan hesaplar sonucu elde edilen değerler verilmiştir. Bunun yanı sıra çubuk topraklayıcının farklı gömülme derinliğinde, farklı bağıl dielektrik sabitine sahip toprak içindeki olması durumları ve çevresinde oluşan potansiyel dağılımı hesapları da verilmiştir. Böylece gerek SFY ve gerekse SEY ile yapılan bir çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplarının birbiriyle uyumu çıkartılmaya çalışılarak, hesaplamaların doğruluğu açısından SFY’inde kullanılan hücresel denklem çözüm yöntemi ile SEY ile bulunan sonuçların karşılaştırılma olanağı sağlanmıştır.

3.6.1.1 1 Metre Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile Hesabı

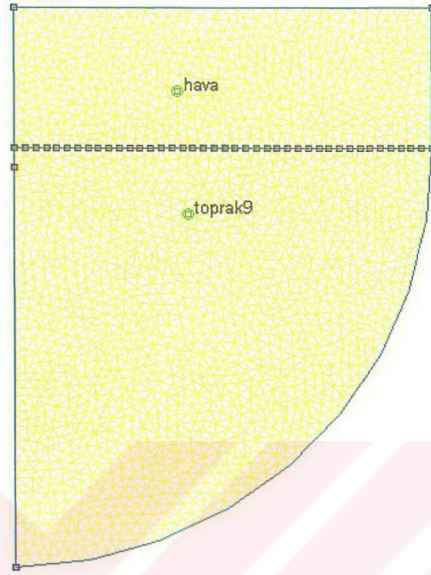
Çubuk topraklayıcının 1 m uzunluğunda olması durumunda SEY ile çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla kurulan model Şekil 3.20’de gösterilmiştir. Buna göre toprak bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r), SFY ile yapılan hesaplarla karşılaştırma yapmak amacıyla 9 olarak alınmış, havanın bağıl dielektrik sabiti ise 1 alınarak potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı yine 100 volt potansiyelinde, 20 m uzaklıktaki her nokta ise referans toprak olarak kabul edilmek suretiyle 0 volt potansiyelinde alınmıştır. Şekil 3.20’den görüldüğü gibi hava, toprak, çubuk topraklayıcı ve referans topraktan oluşan bölge SEY ile potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla gerekli olan kapalı bölgeyi oluşturmaktadır. Burada çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilim ve referans toprak gerilim değeri bilinen değerler olup, topraklayıcı çevresindeki ve toprak ile hava arasındaki toprak yüzeyinde Şekil 3.19’da gösterilen aralarında 0,5 m uzaklık bulunan her bir düğümün potansiyel değerleri ise bilinmeyen değerler olup hesaplanacak olan değerlerdir.



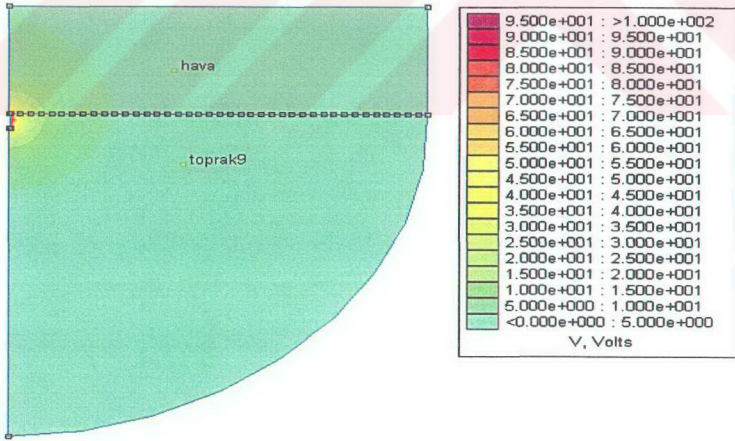
Şekil 3.20 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Topraklayıcı ve referans toprak arasında oluşan kapalı bölge öncelikli olarak üçgen elemanlara bölünerek potansiyelleri bilinmeyen değerler, potansiyeli bilinen değerler yardımı ile hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen sonlu elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi Şekil 3.21'de verilmiştir.

Kapalı bölge sonlu eleman olarak kullanılan üçgen elemanlara bölündükten sonra, hava ile toprak arasındaki toprak yüzeyinde bulunan aralarında 0,5 m uzaklık bulunan düğümlerin potansiyel değerleri ve çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır.

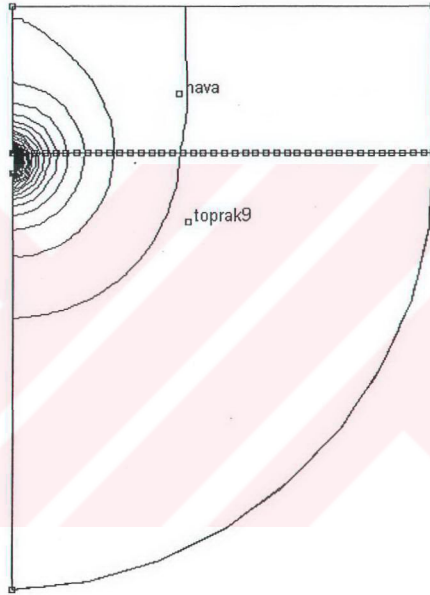


Şekil 3.21 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 3.22 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 3.22'de gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcının yakınındaki yerlerde potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. 1 m'lik çubuk topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgilerinin çizilmesi durumunda da topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel çizgilerinin yüksek değerde, uzaklaştıkça düşük değerde oldukları görülür.



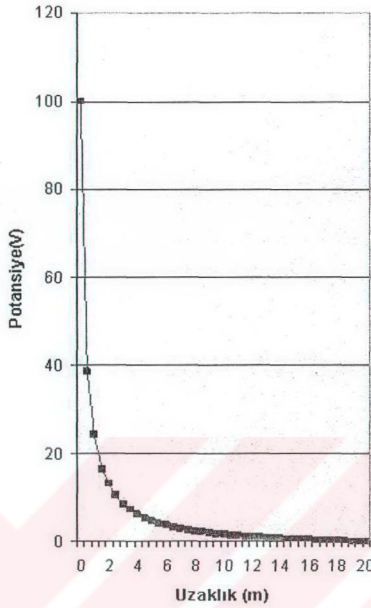
Şekil 3.23 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY kullanılarak hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 3.9'da verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.

Tablo 3.9 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)
0	100
0.5	38.4886
1	24.1868
1.5	16.3692
2	13.1382
2.5	10.4547
3	8.60309
3.5	7.2278
4	6.19725
4.5	5.38135
5	4.72189
5.5	4.17546
6	3.71809
6.5	3.32943
7	2.99465
7.5	2.70286
8	2.44578
8.5	2.21841
9	1.97875
9.5	1.83287
10	1.66778
10.5	1.51613
11	1.38126
11.5	1.2558
12	1.14016
12.5	1.03341
13	0.934349
13.5	0.842373
14	0.755442
14.5	0.675977
15	0.600293
15.5	0.528991
16	0.461811
16.5	0.397975
17	0.337202
17.5	0.279071
18	0.223096
18.5	0.157735
19	0.11476
19.5	0.0607
20	0

Tablo 3.9'dan görüldüğü gibi SEY ile bulunan potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Tablo 3.9'da verilen değerlere göre çizilen grafik Şekil 3.24'de gösterilmiştir.

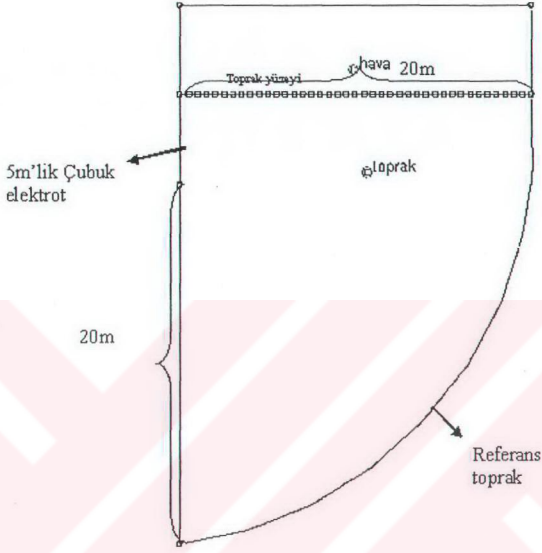


Şekil 3.24 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı için SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı

3.6.1.2 5 Metre Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile Hesabı

Çubuk topraklayıcının 5 m uzunluğunda olması durumunda SEY ile çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla kurulan model Şekil 3.25'de gösterilmiştir. Buna göre toprak bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r), SFY ile yapılan hesaplarla karşılaştırma yapmak amacıyla 9 olarak alınmış, havanın bağıl dielektrik sabiti ise 1 alınarak potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. 5 m uzunluktaki çubuk topraklayıcıya yine 100 volt gerilim değeri, 20 m uzaklıktaki her nokta ise referans toprak olarak kabul edilmek suretiyle 0 volt gerilimi değeri uygulanmıştır. Şekil 3.25'den görüldüğü gibi hava, toprak, çubuk topraklayıcı ve referans topraktan oluşan bölge SEY ile potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla gerekli olan kapalı bölgeyi oluşturmaktadır. Burada çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilim ve referans toprak gerilim değeri bilinen değerler olup, topraklayıcı çevresindeki ve

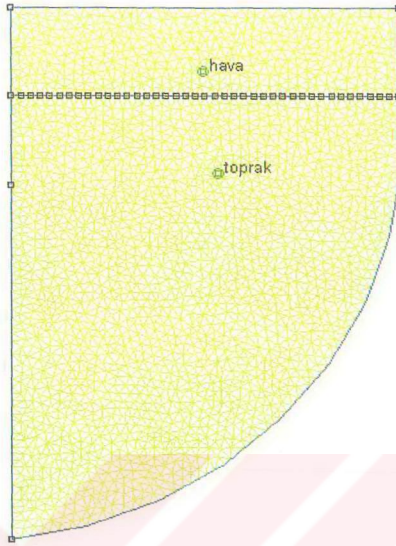
toprak ile hava arasındaki toprak yüzeyinde Şekil 3.25'de gösterilen aralarında 0,5 m uzaklık bulunan her bir düğümün potansiyel değerleri ise bilinmeyen değerler olup hesaplanacak olan değerlerdir.



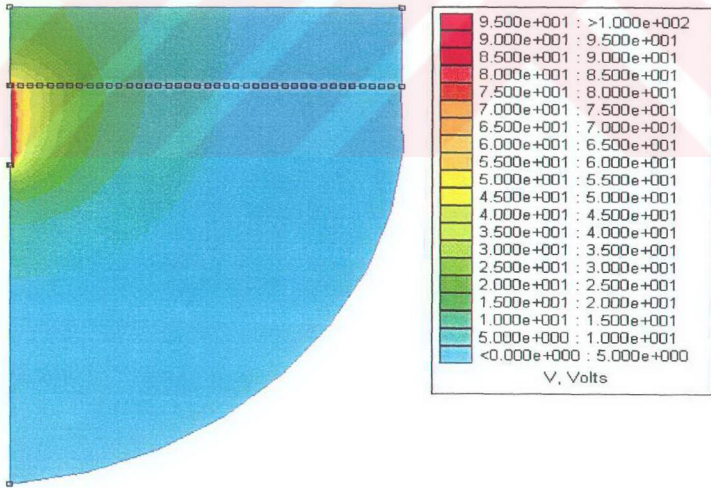
Şekil 3.25 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Topraklayıcı ve referans toprak arasındaki kapalı bölge öncelikli olarak üçgen elemanlara bölünerek potansiyelleri bilinmeyen değerler, potansiyeli bilinen değerler yardımı ile hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi 1 m'lik çubuk topraklayıcıda olduğu gibi Şekil 3.25'de verilmiştir.

Kapalı bölge sonlu eleman olarak kullanılan üçgen elemanlara bölündükten sonra, hava ile toprak arasındaki toprak yüzeyinde bulunan aralarında 0,5 m uzaklık bulunan düğümlerin potansiyel değerleri ve çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır.

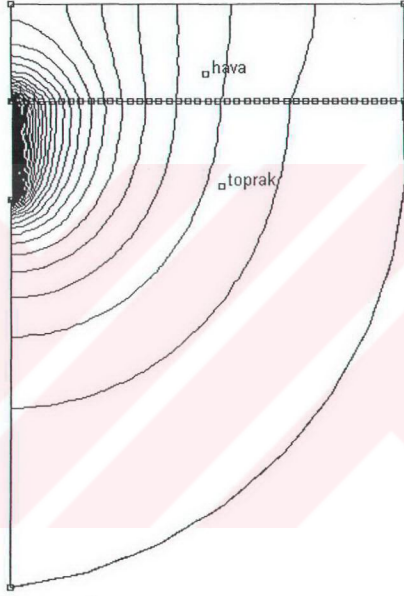


Şekil 3.26 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 3.27 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 3.27'de gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcının yakınındaki yerlerde potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. 5 m'lik çubuk topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgilerinin çizilmesi durumunda da topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel çizgilerinin yüksek değerde, uzaklaştıkça düşük değerde oldukları görülür.



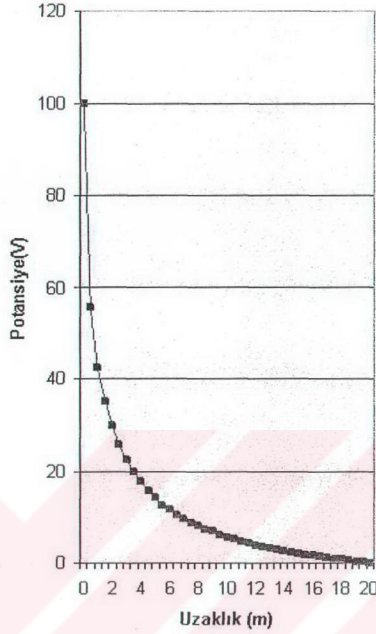
Şekil 3.28 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY kullanılarak hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 3.10'da verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.

Tablo 3.10 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)
0	100
0.5	55.3591
1	42.3532
1.5	35.0669
2	29.8099
2.5	25.7676
3	22.5484
3.5	19.915
4	17.7207
4.5	15.8607
5	14.2682
5.5	12.6384
6	11.6747
6.5	10.6074
7	9.65971
7.5	8.81188
8	8.05167
8.5	7.36347
9	6.86355
9.5	6.16873
10	5.64727
10.5	5.1676
11	4.72509
11.5	4.31582
12	3.8645
12.5	3.58169
13	3.18902
13.5	2.94158
14	2.65097
14.5	2.37722
15	2.11842
15.5	1.87345
16	1.64098
16.5	1.41937
17	1.20725
17.5	1.00313
18	0.805807
18.5	0.612783
19	0.420239
19.5	0.224818
20	0

Tablo 3.10'dan görüldüğü gibi SEY ile bulunan potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Tablo 3.10'da verilen değerlere göre çizilen grafik Şekil 3.29'da gösterilmiştir.

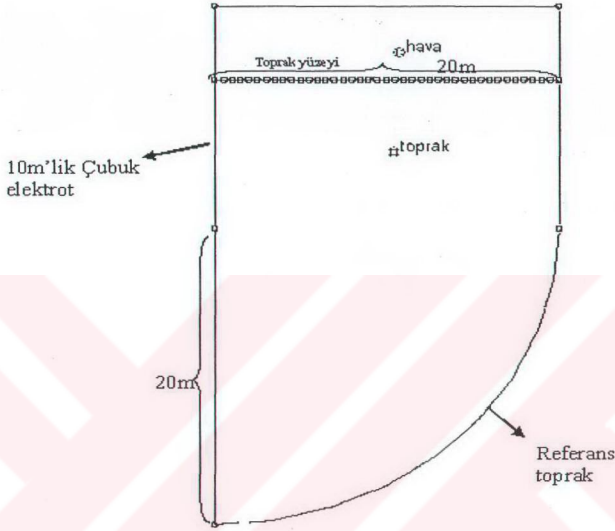


Şekil 3.29 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

3.6.1.3 10 Metre Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile Hesabı

Çubuk topraklayıcının 10 m uzunluğunda olması durumunda SEY ile çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla kurulan model Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Buna göre toprak bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r), SFY ile yapılan hesaplarla karşılaştırma yapmak amacıyla 9 olarak alınmış, havanın bağıl dielektrik sabiti ise 1 alınarak potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. 10 m uzunluktaki çubuk topraklayıcıya yine 100 volt gerilim değeri, 20 m uzaklıktaki her nokta ise referans toprak olarak kabul edilmek suretiyle 0 volt gerilimi değeri uygulanmıştır. Şekil 3.30'dan görüldüğü gibi hava, toprak, çubuk topraklayıcı ve referans topraktan oluşan bölge SEY ile potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla gerekli olan kapalı bölgeyi oluşturmaktadır. Burada çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilim ve

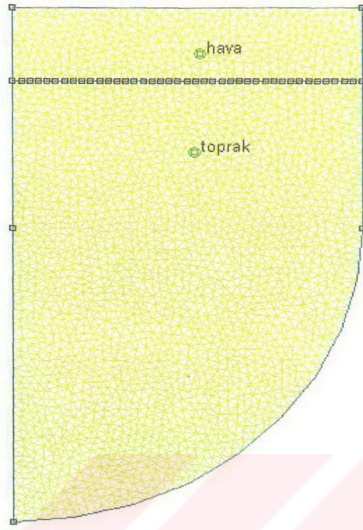
referans toprak gerilim değeri bilinen değerler olup, topraklayıcı çevresindeki ve toprak ile hava arasındaki toprak yüzeyinde Şekil 3.30'da gösterilen aralarında 0,5 m uzaklık bulunan her bir düğümün potansiyel değerleri ise bilinmeyen değerler olup hesaplanacak olan değerlerdir.



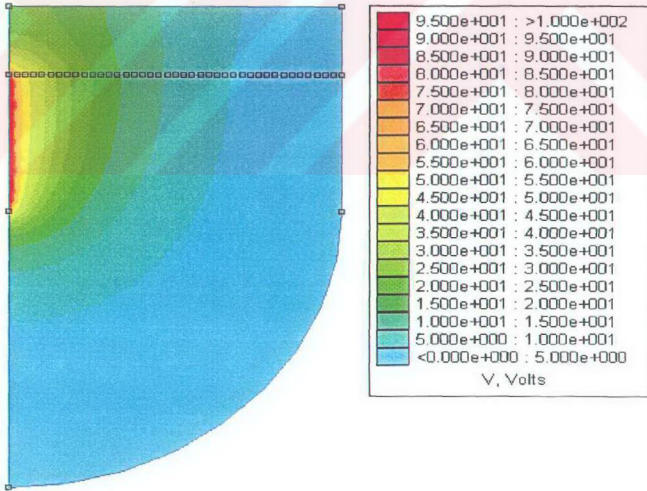
Şekil 3.30 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Topraklayıcı ile referans toprak arasındaki kapalı bölge öncelikli olarak üçgen elemanlara bölünerek potansiyelleri bilinmeyen değerler, potansiyeli bilinen değerler yardımı ile hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi 1 ve 5 m'lik çubuk topraklayıcıda olduğu gibi Şekil 3.31'de verilmiştir.

Kapalı bölge, sonlu eleman olarak kullanılan üçgen elemanlara bölündükten sonra, hava ile toprak arasındaki toprak yüzeyinde bulunan aralarında 0,5 m uzaklık bulunan düğümlerin potansiyel değerleri ve çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır.

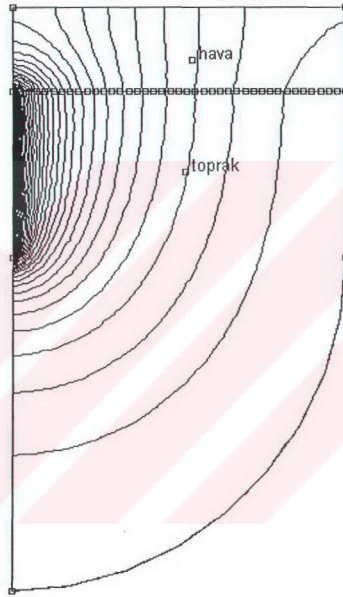


Şekil 3.31 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması



Şekil 3.32 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra FEMM programı ile 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 3.32'de gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcının yakınındaki yerlerde potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. 10 m'lik çubuk topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgilerinin çizilmesi durumunda da topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel çizgilerinin yüksek değerlerde, uzaklaştıkça düşük değerlerde oldukları görülür.



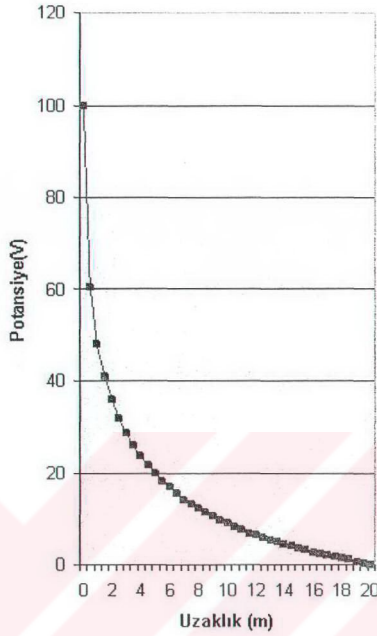
Şekil 3.33 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY ile hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 3.11'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.

Tablo 3.11 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)
0	100
0.5	60.2068
1	47.84
1.5	40.8138
2	35.7669
2.5	31.8321
3	28.6358
3.5	25.937
4	23.6228
4.5	21.6002
5	19.8152
5.5	18.2225
6	16.7886
6.5	15.486
7	14.0834
7.5	13.2175
8	12.22
8.5	11.2989
9	10.4461
9.5	9.6519
10	8.91274
10.5	8.22568
11	7.57601
11.5	6.8548
12	6.39654
12.5	5.85651
13	5.34541
13.5	4.86096
14	4.40085
14.5	3.964
15	3.54354
15.5	3.14688
16	2.764
16.5	2.39104
17	2.03965
17.5	1.69585
18	1.36077
18.5	1.03284
19	0.706174
19.5	0.375222
20	0

Tablo 3.11'den görüldüğü gibi SEY ile bulunan potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Tablo 3.11'de verilen değerlere göre çizilen grafik Şekil 3.34'de gösterilmiştir.



Şekil 3.34 10 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

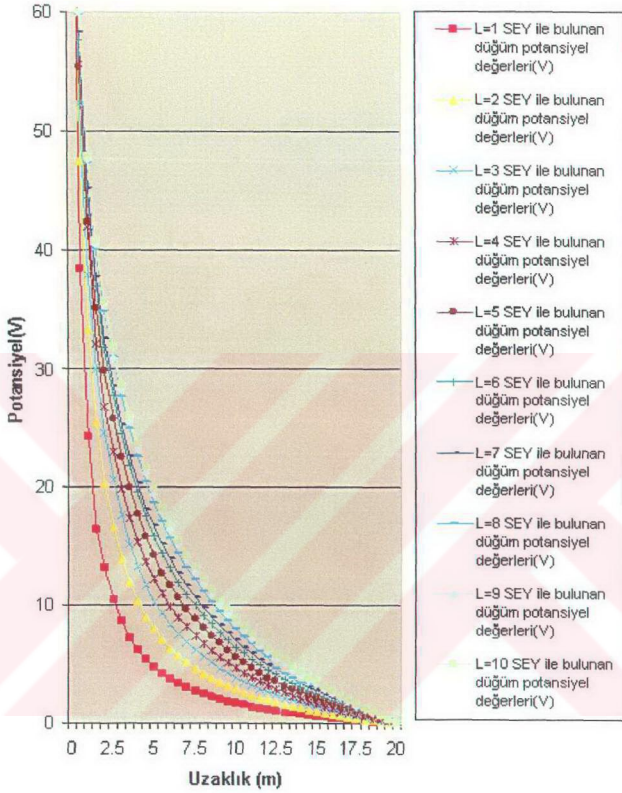
Çubuk topraklayıcının 1 m, 5 m ve 10 m olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının hesabı SFY ile bulunabildiği gibi SEY kullanılarak da bulunabilir. Çubuk topraklayıcının 2, 3 ,4, 6, 7, 8, 9 metre uzunlukta olması durumlarındaki potansiyel dağılımı hesabı, SEY ile yukarda belirtildiği gibi kolaylıkla bulunabilir. Bu amaçla farklı uzunluklarda olan çubuk topraklayıcının, toprak yüzeyinde 0,5 m aralıkla bulunan düğüm potansiyellerinin SEY ile bulunan değerleri Tablo 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.12 Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcıların toprak yüzeyindeki SEY ile bulunan potansiyel değerleri

Elektrot boyu (m)	L=1	L=2	L=3	L=4	L=5	L=6	L=7	L=8	L=9	L=10
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	38.486	47.5053	52.3802	55.6687	56.3691	57.597	58.335	59.8208	60.0309	60.2068
1	24.1868	33.2807	37.9432	41.9968	42.3532	44.4503	45.2291	47.2776	47.6374	47.84
1.5	16.3692	25.4198	29.9352	32.0609	35.0689	36.9977	37.7639	40.0803	40.5138	40.8138
2	13.1382	20.2867	24.5546	26.052	29.8099	31.7074	32.4999	34.9136	35.4379	35.7669
2.5	10.4547	16.6369	20.5878	22.9487	25.7676	27.6451	28.4665	30.9108	30.8399	31.8321
3	8.60309	13.9591	17.5843	19.8868	22.5484	24.4091	25.2511	27.6231	28.2842	28.6358
3.5	7.2278	11.9129	15.1961	17.4194	19.915	21.7235	22.5792	24.8624	25.5806	25.937
4	6.19725	10.3036	13.2877	15.3859	17.7207	19.4613	20.3105	22.5006	23.2558	23.6228
4.5	5.38135	9.01133	11.7184	13.678	15.8607	17.5221	18.0162	20.4437	21.2231	21.6002
5	4.72189	7.95029	10.1855	12.2345	14.2692	15.842	16.666	18.6333	19.4242	19.8152
5.5	4.17545	7.06571	9.30359	10.9962	12.6394	14.3761	15.1781	17.0275	17.8222	18.2225
6	3.71809	6.31417	8.35463	9.91957	11.6747	13.0769	13.8564	15.5883	16.3845	16.7886
6.5	3.32943	5.67099	7.52893	8.97796	10.6074	11.9242	12.6793	14.3051	15.0866	15.486
7	2.99465	5.11312	6.80827	8.14567	9.65971	10.8923	11.6215	13.1348	13.8972	14.0834
7.5	2.70286	4.62385	6.17351	7.40751	8.81188	9.96161	10.6649	12.0895	12.8177	13.2175
8	2.44578	4.19251	5.60979	6.74719	8.05167	9.12225	9.9823	11.0387	11.8257	12.22
8.5	2.21841	3.80877	5.10604	6.15273	7.36347	8.36234	9.00875	10.2106	10.9081	11.2389
9	1.97875	3.46081	4.65169	5.61569	6.86355	7.86716	8.26677	9.39218	10.062	10.4461
9.5	1.83287	3.0984	4.24106	5.12816	6.16873	7.02863	7.62234	8.63771	9.27822	9.6519
10	1.66778	2.87344	3.86768	4.68333	5.64727	6.44346	7.0114	7.93914	8.5488	8.91274
10.5	1.51613	2.61772	3.52374	4.27493	5.1676	5.93003	6.44568	7.2908	7.8686	8.2678
11	1.38126	2.38374	3.21427	3.89977	4.72509	5.40401	5.92062	6.68895	7.23333	7.57801
11.5	1.2568	2.16889	2.92645	3.55369	4.31582	4.94124	5.43232	6.01719	6.53739	6.8548
12	1.14016	1.97074	2.66052	3.29687	3.8645	4.50808	4.97599	5.59608	6.07774	6.39654
12.5	1.03341	1.78735	2.41409	2.935	3.58169	4.10512	4.54884	5.03419	5.45146	5.85651
13	0.934349	1.61482	2.18487	2.65755	3.18902	3.72795	4.14787	4.19544	5.05442	5.34541
13.5	0.842373	1.45852	1.97094	2.3984	2.94158	3.37426	3.77066	3.77959	4.58466	4.86096
14	0.755442	1.31021	1.7696	2.15993	2.65097	3.04146	3.41462	3.38685	4.13938	4.40065
14.5	0.675977	1.16922	1.58347	1.92816	2.37722	2.72767	3.07718	3.31172	3.71653	3.964
15	0.600293	1.04082	1.40686	1.71348	2.11842	2.43113	2.75711	3.01359	3.31432	3.54354
15.5	0.528891	0.917795	1.24062	1.51089	1.87345	2.15036	2.45184	2.68866	2.93151	3.14688
16	0.461811	0.801408	1.08315	1.3191	1.64098	1.88296	2.16057	2.32021	2.56489	2.764
16.5	0.397975	0.691014	0.933719	1.13714	1.41937	1.62815	1.88074	1.99689	2.21366	2.39104
17	0.337202	0.586843	0.791169	0.963551	1.20725	1.38439	1.61041	1.68711	1.87724	2.03965
17.5	0.279071	0.485	0.654691	0.797575	1.00313	1.14977	1.34818	1.39014	1.48963	1.69655
18	0.223066	0.388178	0.523391	0.637568	0.806807	0.922719	1.09227	1.10378	1.23819	1.36077
18.5	0.157735	0.294008	0.399925	0.4824	0.612783	0.701061	0.838911	0.826955	0.932555	1.03284
19	0.11476	0.179497	0.269692	0.328925	0.420229	0.4799	0.582369	0.569684	0.631408	0.706174
19.5	0.0607	0.104508	0.142756	0.174553	0.224818	0.255206	0.31581	0.28884	0.329518	0.375222
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 3.12'den görüldüğü gibi çubuk topraklayıcıdan uzaklaştıkça toprak yüzeyindeki düğüm potansiyel değerleri ve yüzeydeki adım gerilimi değerleri topraklayıcıya yakın yerlerde büyüktür, uzaklaştıkça ise hızla düşmektedir. Şekil 3.35'de çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarda olması ve bağlı dielektrik sabiti 9

olan bir toprak yapısı içine gömülmüş olması durumundaki toprak yüzeyindeki SEY ile elde edilen değerlerinin grafik gösterilimi verilmiştir.



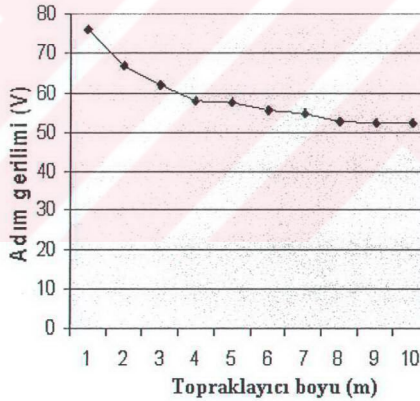
Şekil 3.35 Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcıların toprak yüzeyinde SEY ile bulunan düğüm potansiyellerinin değişimleri

Tablo 3.12'de görüldüğü gibi topraklayıcı potansiyeli ile topraklayıcıdan 1 m uzaklıktaki düğüm noktalarının potansiyel değerleri arasındaki fark olan adım gerilim değerleri, topraklayıcı boyu uzadıkça azalmaktadır. SEY ile hesaplanan sonuçlardan görüldüğü gibi topraklayıcı boyunun uzatılması, topraklayıcı yakınındaki canlılar için önem taşıyan adım gerilimini azaltacak yönde etki etmektedir.

Tablo 3.13 Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcılar ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm arasında SEY ile bulunan adım gerilimi değerleri

Elektrot boyu(m)	Topraklayıcı üzerindeki potansiyel(V)	Topraklayıcıdan 1m uzaklıktaki düğüm potansiyeli(V)	Adım Gerilimi
1	100	24.1868	75.8132
2	100	33.2807	66.7193
3	100	37.9432	62.0568
4	100	41.9958	58.0042
5	100	42.3532	57.6468
6	100	44.4503	55.5497
7	100	45.2291	54.7709
8	100	47.2776	52.7224
9	100	47.6374	52.3626
10	100	47.84	52.16

Şekil 3.36'da farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcılar için adım gerilimi değişimleri gösterilmiştir.

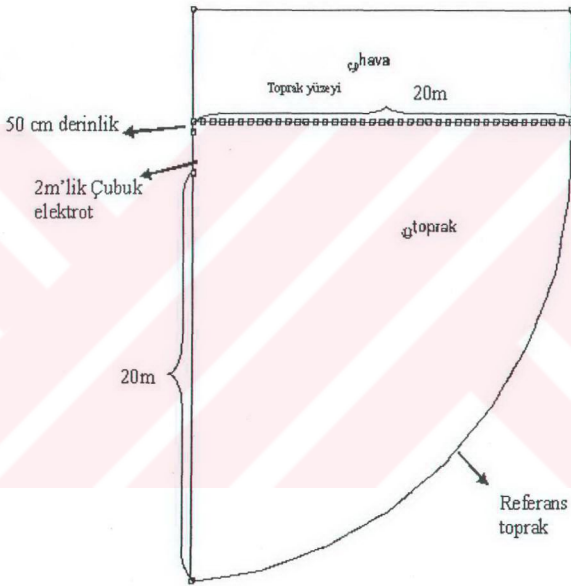


Şekil 3.36 Çubuk topraklayıcı boyu ile, SEY ile bulunan adım gerilimi değişimi

3.6.2 Farklı Gömülme Derinliğinde 2 m Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SEY İle Hesabı

Çubuk topraklayıcıların toprağa gömülme derinliğine bağlı olarak çevrelerinde oluşturdukları potansiyel dağılımının SEY kullanılarak hesaplanmasına çalışılmıştır.

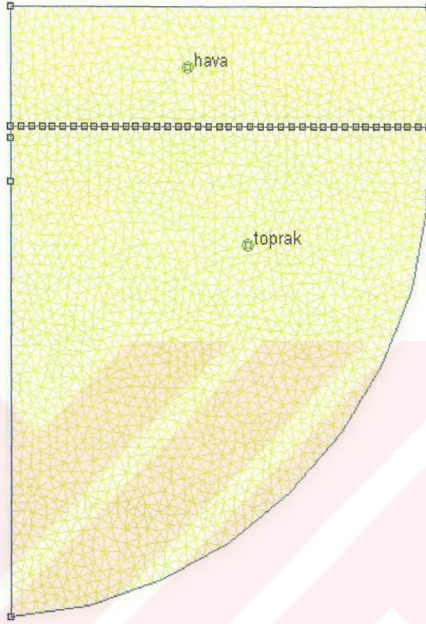
Bu amaçla 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının 50 cm derine gömülmesi durumunda toprak yüzeyinde oluşan potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır. Böylece gömme derinliğinin, canlılar için tehlikeli olabilecek toprak yüzeyindeki adım gerilimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna göre 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılım hesapları için SEY kullanılarak kurulan model Şekil 3.37'de verilmiştir. Çubuk topraklayıcı yine 100 volt ve referans toprak üzerindeki düğümlerin potansiyelleri ise 0 volt alınarak hesaplar yapılmıştır.



Şekil 3.37 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

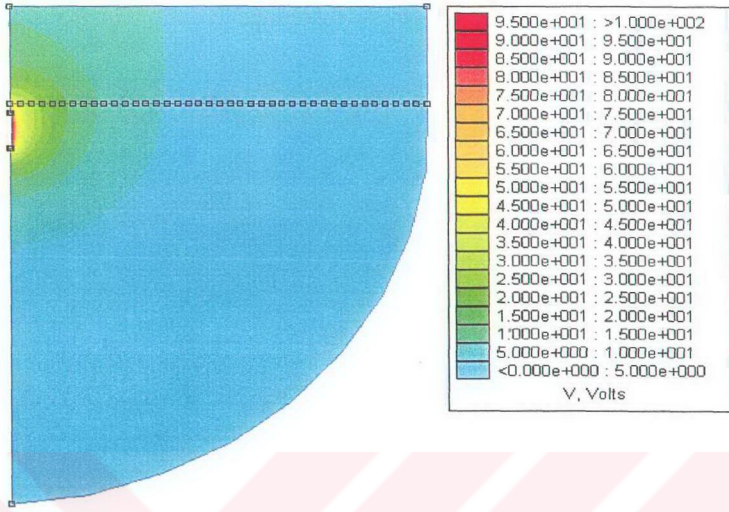
Şekil 3.37'de verilen SEY modelinin de topraklayıcı ile referans toprak arasındaki kapalı bölgenin üçgen sonlu elemanlara ayrıştırılması ile potansiyelleri bilinmeyen düğümlerin değerleri, potansiyeli bilinen düğümlere bağlı olarak hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi Şekil 3.38'de verilmiştir. Kapalı bölgeyi ayrıştırmak için

kullanılan sonlu eleman olan üçgenler ne kadar çok sayıda olursa hesaplamaların hassasiyeti de o derece artar.

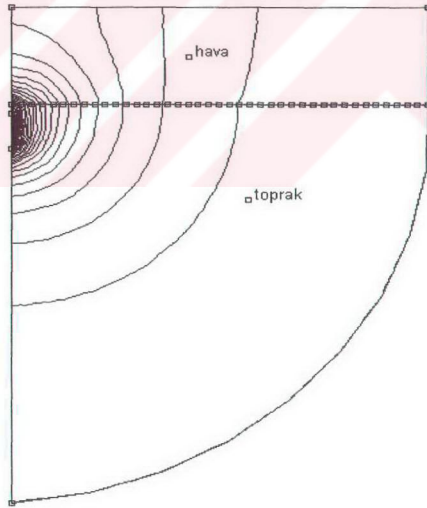


Şekil 3.38 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması

2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının, toprak yüzeyinden 50 cm derinliğe gömülmesi durumunda toprak ile havanın birleştiği sınır olan toprak yüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımı ise Şekil 3.39'dan görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır.



Şekil 3.39 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı



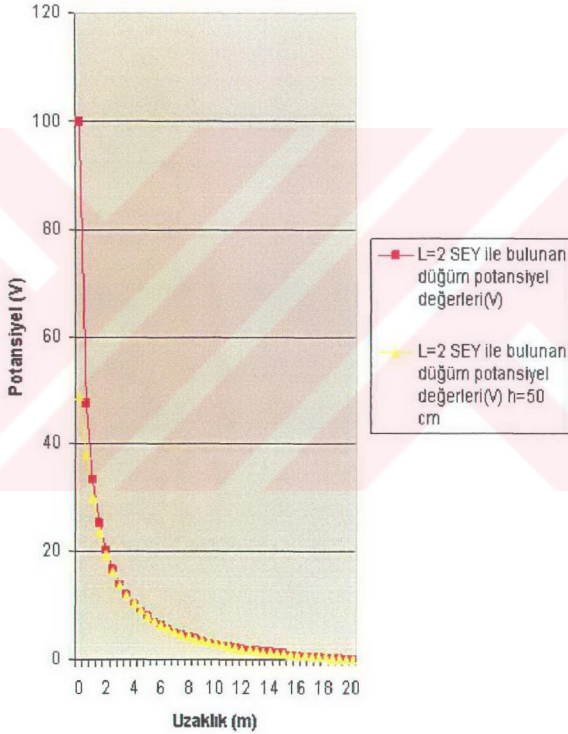
Şekil 3.40 50 cm gömülme derinliğinde, 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgiler

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY kullanarak hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 3.14'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. 2 m'lik çubuk topraklayıcının bir ucunun toprak yüzeyinde olması ve 50 cm derinliğe gömülmesi durumlarındaki, topraklayıcı ile referans toprak arasındaki potansiyel değerleri Tablo 3.14'de verilmiştir.

Tablo 3.14 Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluktaki çubuk topraklayıcıların SEY ile bulunan potansiyel değerleri

Elektrot boyu (m)	L=2	L=2
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri(V) h=50 cm
0	100	49.0699
0.5	47.5053	38.113
1	33.2807	30.0526
1.5	25.4198	23.7402
2	20.2867	19.5711
2.5	16.6369	16.3763
3	13.9591	13.9363
3.5	11.9129	12.0084
4	10.3036	10.4677
4.5	9.01133	9.20717
5	7.95029	8.15981
5.5	7.06571	7.27909
6	6.31417	6.52517
6.5	5.67099	5.87266
7	5.11312	5.19828
7.5	4.62385	4.805
8	4.19251	4.36231
8.5	3.80877	3.96775
9	3.46081	3.61216
9.5	3.0984	3.2917
10	2.87344	3.00057
10.5	2.61772	2.73508
11	2.38374	2.49191
11.5	2.16899	2.26818
12	1.97074	2.06162
12.5	1.78735	1.87026
13	1.61482	1.69242
13.5	1.45852	1.52653
14	1.31021	1.37161
14.5	1.16922	1.22628
15	1.04082	1.08938
15.5	0.917795	0.960634
16	0.801408	0.838619
16.5	0.691014	0.723
17	0.585843	0.612563
17.5	0.485	0.50708
18	0.388178	0.425887
18.5	0.294008	0.306646
19	0.179497	0.208691
19.5	0.104508	0.110422
20	0	0

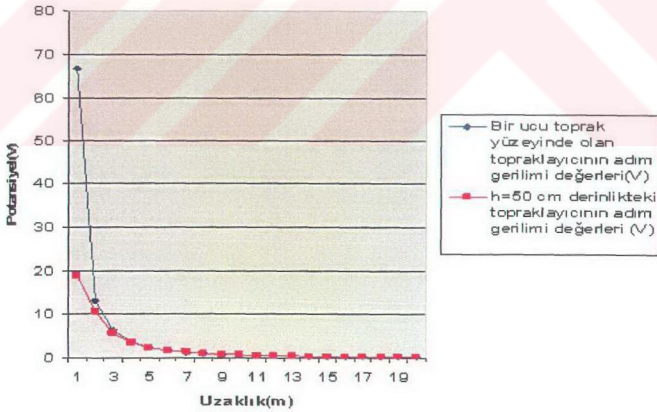
Tablo 3.14'den görüldüğü gibi 2 m uzunluğundaki topraklayıcının 50 cm'ye gömülmesi sonucunda topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel değerleri, topraklayıcının bir ucunun toprak yüzeyinde bulunması durumunda elde edilen değerlerden daha düşük olmaktadır. Aynı zamanda Tablo 3.14'de görüldüğü gibi adım gerilimi açısından topraklayıcının 50 cm derinliğe gömülmesi topraklayıcı yakınında hızlı bir azalma meydana getirmektedir. Şekil 3.41'da topraklayıcının ucunun toprak yüzeyinde ve 50 cm derinlikte olması durumundaki potansiyel değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir:



Şekil 3.41 Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcıların SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerinin değişimleri

Tablo 3.15 Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcıların SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Bir ucu toprak yüzeyinde olan topraklayıcının adım gerilimi değerleri(V)	h=50 cm derinlikteki topraklayıcının adım gerilimi değerleri (V)
66.7193	19.0173
12.994	10.4815
6.3276	5.6348
3.6555	3.4686
2.35331	2.30789
1.63612	1.63464
1.20105	1.32689
0.92061	0.83597
0.7317	0.75015
0.58737	0.61159
0.4897	0.50866
0.413	0.43029
0.35592	0.3692
0.30461	0.32081
0.26939	0.28223
0.239412	0.250761
0.215565	0.226056
0.197665	0.186676
0.208681	0.217196
0.179497	0.208691



Şekil 3.42 Bir ucu toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcıların SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimleri

Şekil 3.42'den görüldüğü gibi adım gerilimi değeri topraklayıcının 50 cm derinliğe gömülmesi durumunda, topraklayıcı yakınında hızla bir azalma göstermektedir. Topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu azalma daha yavaş hatta bazı yerlerde ise çok az miktarda arttığı görülmektedir. Adım gerilimi daha çok topraklayıcı yakınında önem kazandığı için topraklayıcının 50 cm derinliğe gömülmesi, topraklayıcının bir ucunun toprak yüzeyinde bulunması durumuna göre daha elverişlidir.

3.6.3 Farklı Dielektrik Sabitli Toprak İçine Gömülmüş Farklı Uzunluklardaki Çubuk Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SEY İle Hesabı

2 m, 5 m ve 10 m'lik çubuk topraklayıcının, bağıl dielektrik sabitleri 3, 9, 15, 36 ve 40 olan toprak içindeki potansiyel dağılımının SEY ile incelenmesi yapılmıştır. Literatürde bulunan çalışmaların bazılarında, toprak özdirençleri ile birlikte buna karşılık gelen bağıl dielektrik sabitleri verilmektedir. Literatürden bu bilgiler toplanarak Tablo 3.16'de bir araya getirilmiştir [65].

Tablo 3.16 Toprak özdirençleri ve karşılık gelen bağıl dielektrik sabitleri

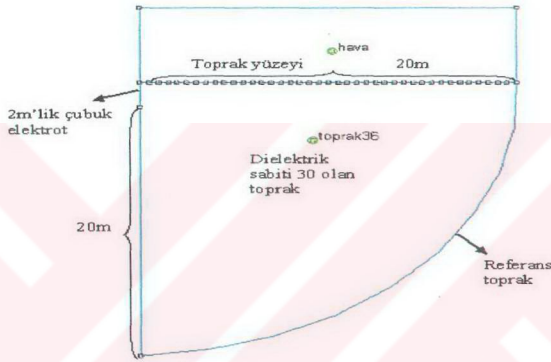
Toprak özdirenç, ρ (Ω m)	1800	1000	700	100	38
Bağıl dielektrik sabiti, ϵ_r	3	9	15	36	40

Buna göre farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının, farklı bağıl dielektrik sabitli toprak içerisinde bulunması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplanmıştır. 2 m, 5 m ve 10 m'lik çubuk topraklayıcının SEY modelleri kurulmuş ve bu modeller üzerinde gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplarda sadece toprağın bağıl dielektrik sabiti değeri değiştirilmiştir, diğer yaklaşımlar benzer olarak ele alınmıştır. Buradaki amaç toprak yapısının değişmesi durumunda, çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi ve potansiyel dağılımı değişiminin incelenmesidir.

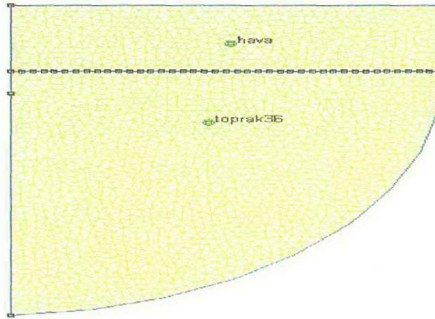
3.6.3.1 2 m Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcının Bağıl Dielektrik Sabiti 36 Olan Toprağa Gömülmesi Durumunda Potansiyel Dağılımının Hesabı

2 m'lik çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içine gömülmesi durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile incelenmesi amacıyla

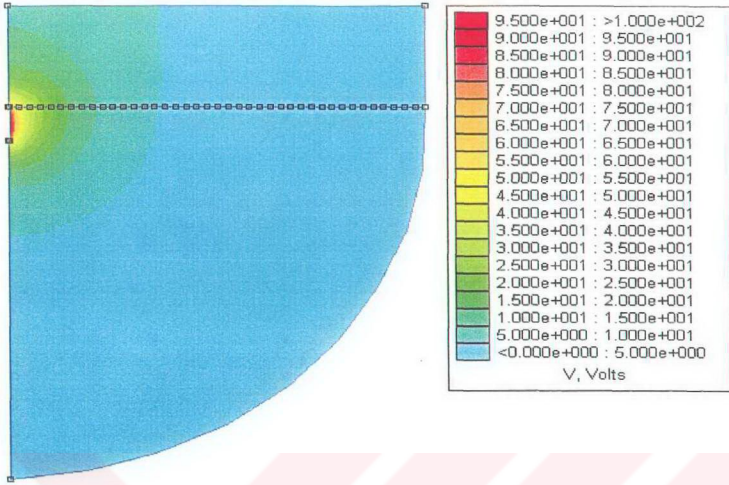
kurulan model Şekil 3.41'de verilmiştir. Burada toprak dielektrik sabiti 36 olarak alınmıştır ve yine topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her noktada potansiyelin 0 volt olduğu varsayımı yapılarak hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre oluşturulan model Şekil 3.43'de gösterilmiştir. Çubuk topraklayıcının 2 m ve toprak bağıl dielektrik sabitinin 3, 9, 15 ve 40 olması durumunda yine aynı şekilde modeller kurulmuş ve çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının çıkartılması amacıyla benzer şekilde hesaplamalar yapılarak sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Şekil 3.44'de ise SEY ile kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırma işlemi gösterilmiştir.



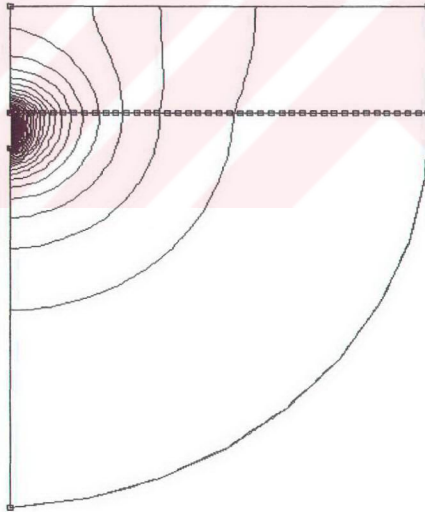
Şekil 3.43 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları için kurulan SEY modeli



Şekil 3.44 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 3.45 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı



Şekil 3.46 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgiler

2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde olması durumunda, SEY ile potansiyel dağılım hesapları için kurulan modeller çözümlendiğinde, çubuk topraklayıcının toprak yüzeyinde oluşan potansiyel dağılımı ve eşpotansiyel çizgileri Şekil 3.45 ve Şekil 3.46'daki gibi meydana gelmektedir. Bu hesaplamalardan ve şekillerden görüldüğü gibi dielektrik sabiti değeri artırılrsa da toprak yüzeyindeki 0,5 m aralıklarla oluşturulan düğümlerin potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalma göstermektedirler. Bu durum Tablo 3.17'deki değerlerden de görülmektedir.

Tablo 3.17 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

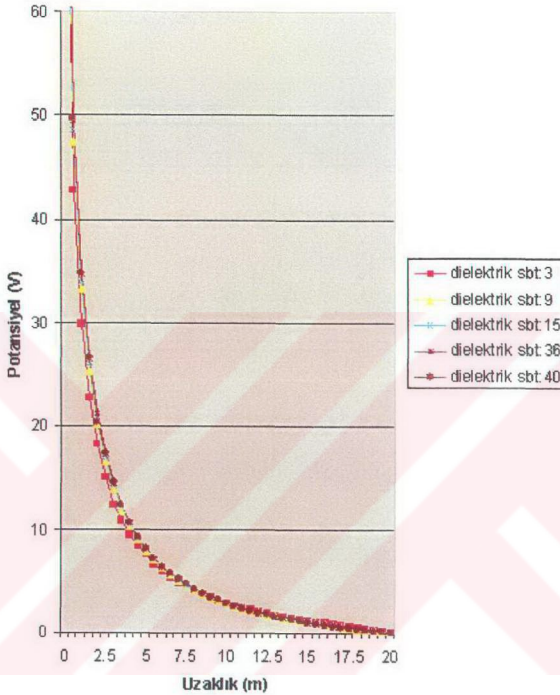
Toprak dielektrik sabiti	36
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri (V)
0	100
0,5	49.622
1	34.7936
1,5	26.6101
2	21.1871
2,5	17.3481
3	14.5066
3,5	12.3477
4	10.6504
4,5	9.28798
5	8.17187
5,5	7.24217
6	6.45239
6,5	5.77857
7	5.19519
7,5	4.68424
8	4.23506
8,5	3.83623
9	3.47977
9,5	3.15917
10	2.86816
10,5	2.60474
11	2.36421
11,5	2.14401
12	1.94114
12,5	1.75387
13	1.58042
13,5	1.41913
14	1.26864
14,5	1.12811
15	0.996314
15,5	0.872454
16	0.755678
16,5	0.645395
17	0.540898
17,5	0.441611
18	0.346752
18,5	0.255995
19	0.168612
19,5	0.0840937
20	0

2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerinden Tablo 3.17'den görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel düşmektedir. 2 m'lik çubuk topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 3, 9, 15, ve 40 olması durumundaki potansiyel dağılımı hesapları da benzer şekilde yapılmıştır. Bu hesaplar sonucunda elde edilen potansiyel değerleri Tablo 3.18'de verilmiştir.

Tablo 3.18 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak dielektrik sabiti	3	9	15	36	40
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri (V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri (V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri (V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri (V)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri (V)
0	100	100	100	100	100
0,5	42.8161	47.5053	48.6055	49.622	49.6966
1	29.9279	33.2807	34.0671	34.7936	34.8469
1,5	22.799	25.4198	26.0379	26.6101	26.6522
2	18.2878	20.2867	20.7549	21.1871	20.4246
2,5	15.0765	16.6455	17.0111	17.3481	17.3728
3	12.3533	13.9591	14.2445	14.5066	14.5258
3,5	10.9188	11.912	12.1394	12.3477	12.3629
4	9.50059	10.3026	10.4845	10.6504	10.6625
4,5	8.36089	9.01031	9.15583	9.28798	9.2976
5	7.60795	7.94925	8.05626	8.17187	8.17954
5,5	6.63548	7.06467	7.15818	7.24217	7.24825
6	5.96807	6.31314	6.38679	6.45239	6.45712
6,5	5.39326	5.66996	5.72766	5.77857	5.78221
7	4.89273	5.11211	5.15651	5.19519	5.19794
7,5	4.45247	4.62284	4.65594	4.68424	4.68623
8	4.06199	4.19151	4.21529	4.23506	4.23643
8,5	3.71319	3.80777	3.82365	3.83623	3.83708
9	3.39926	3.46404	3.47325	3.47977	3.41541
9,5	3.11498	3.09741	3.15775	3.15917	3.1592
10	2.85544	2.87245	2.87113	2.86816	2.86788
10,5	2.61859	2.61672	2.61133	2.60474	2.60419
11	2.40089	2.38274	2.37388	2.36421	2.36344
11,5	2.20003	2.16797	2.15622	2.14401	2.14306
12	2.0138	1.96971	1.9555	1.94114	1.94004
12,5	1.84072	1.78631	1.77003	1.75387	1.75265
13	1.67935	1.61606	1.59805	1.58042	1.57909
13,5	1.52831	1.45744	1.43798	1.41913	1.41771
14	1.38644	1.30911	1.28847	1.26864	1.26716
14,5	1.25282	1.17023	1.14867	1.12811	1.12657
15	1.1266	1.03968	1.01742	0.996314	0.994745
15,5	1.00212	0.91662	0.893894	0.872454	0.870864
16	0.892733	0.800203	0.777237	0.755678	0.754083
16,5	0.783452	0.689772	0.666832	0.645395	0.643813
17	0.678131	0.584565	0.561944	0.540898	0.519418
17,5	0.575843	0.483896	0.461944	0.441611	0.440117
18	0.475216	0.386804	0.385145	0.346752	0.345344
18,5	0.374632	0.292563	0.27349	0.255995	0.254716
19	0.269725	0.199338	0.183261	0.168612	0.167545
19,5	0.156242	0.105597	0.094297	0.084094	0.083354
20	0	0	0	0	0

Buna göre farklı dielektrik sabitli toprak içerisinde bulunan 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı, Şekil 3.47'de gösterilmiştir.



Şekil 3.47 2 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı

Şekil 3.47'den görüldüğü gibi bağıl dielektrik sabitinin artması durumunda toprak yüzeyindeki, topraklayıcı ile ondan 1 m uzaklıktaki noktada meydana gelen adım gerilimi değeri düşmektedir. Buradan da görülebileceği gibi toprağın bağıl dielektrik sabitinin artması adım gerilimi açısından özellikle topraklayıcıya yakın yerlerde beklenen sonuçları, yani adım geriliminin düşmesi sonucunu vermektedir.

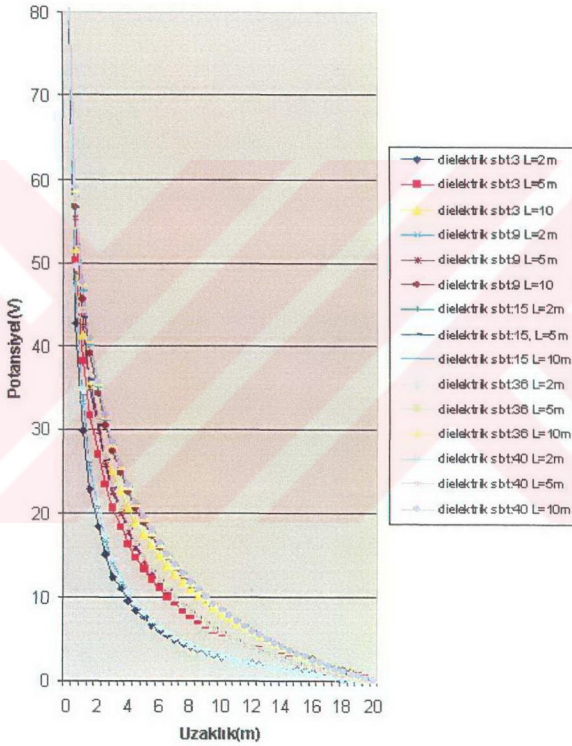
3.6.3.2 5 m ve 10 m Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcıların Farklı Dielektrik Sabitli Toprağa Gömülmesi Durumunda Potansiyel Dağılımının Hesabı

5 m ve 10 m uzunluğunda, bağlı dielektrik sabiti 3, 9, 15, 36, 40 olan toprak içinde bulunan çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı incelemesi de benzer şekilde yapılmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar Tablo 3.19'da verilmiştir.

Tablo 3.19 Farklı uzunluklardaki, farklı bağlı dielektrik sabitli toprak içindeki çubuk topraklayıcıların toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak dielektrik sabiti Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	3			9			15			36			40		
	SEY ile bulunan diğüm potansiyel değeri (V)			SEY ile bulunan diğüm potansiyel değeri (V)			SEY ile bulunan diğüm potansiyel değeri (V)			SEY ile bulunan diğüm potansiyel değeri (V)			SEY ile bulunan diğüm potansiyel değeri (V)		
	L=2m	L=5m	L=10m	L=2m	L=5m	L=10m	L=2m	L=5m	L=10m	L=2m	L=5m	L=10m	L=2m	L=5m	L=10m
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	42.9161	50.2573	51.6299	47.5063	55.3691	56.6711	48.6065	56.541	57.8365	49.622	57.6279	58.9054	49.6966	57.7075	58.9838
1	29.9279	38.2346	41.3177	33.2807	42.3632	45.6236	34.0671	43.3149	46.6254	34.7936	44.2021	47.5484	34.8469	44.2672	47.6161
1.5	22.739	31.7131	35.5011	25.4198	35.0669	39.1663	26.0379	35.8468	40.0164	26.5101	36.5662	40.7988	26.6522	36.6179	40.8561
2	18.2878	27.0298	31.1541	20.2867	29.8039	34.3118	20.7549	30.4543	35.0427	21.1871	31.0472	36.7149	20.4246	31.0907	36.7641
2.5	15.0765	23.4364	27.176	16.6465	25.7676	30.4905	17.0111	26.3064	31.128	17.3481	26.8005	31.714	17.3728	26.8378	31.757
3	12.3533	20.5953	25.0042	13.9591	22.5484	27.395	14.2445	22.9969	27.9446	14.5066	23.4802	28.4489	14.5268	23.4383	28.4658
3.5	10.9188	18.2701	22.6854	11.912	19.915	24.7754	12.1394	20.2903	25.2538	12.3477	20.6337	25.6892	12.3629	20.6687	25.7241
4	9.50059	16.3565	20.6942	10.3005	17.7207	22.5223	10.4845	18.0343	22.9386	10.6504	18.3203	23.3192	10.6625	18.3412	23.347
4.5	8.36889	14.6917	18.9544	9.01031	15.8607	20.5629	9.15633	16.123	20.9146	9.28798	16.3615	21.2447	9.2976	16.3788	21.2687
5	7.50795	13.286	17.4273	7.94925	14.2682	18.8222	8.06626	14.4866	19.1266	8.17187	14.6822	19.4206	8.17954	14.6965	19.4425
5.5	6.63648	12.0572	16.0454	7.06467	12.8829	17.2887	7.15818	13.0639	17.5419	7.24217	13.2269	17.7898	7.24825	13.2388	17.8078
6	5.96807	10.9843	14.8156	6.31314	11.6747	15.8775	6.38679	11.8238	16.1123	6.45239	11.9574	16.3246	6.45712	11.967	16.34
6.5	5.39305	10.0389	13.6881	5.68996	10.6074	14.6148	5.72766	10.7305	14.8182	5.77857	11.063	15.0015	5.78221	10.8481	15.0148
7	4.88273	9.18147	12.6654	5.11211	9.65971	13.4686	5.19551	9.75946	13.6427	5.19519	9.84594	13.7991	5.19794	9.8536	13.8104
7.5	4.45247	8.41683	11.7267	4.62284	8.81188	12.4288	4.66594	8.89257	12.5701	4.68424	8.96321	12.7036	4.68623	8.98025	12.7132
8	4.06199	7.72688	10.8579	4.19151	8.05167	11.4566	4.21529	8.11568	11.5826	4.23606	8.17107	11.6957	4.23643	8.17499	11.7038
8.5	3.71319	7.1041	10.0548	3.80777	7.23754	10.5645	3.82365	7.41333	10.6712	3.83623	7.45681	10.7658	3.83708	7.4688	10.7726
9	3.39305	6.53451	9.31117	3.46404	6.73389	9.74214	3.47325	6.77641	9.93387	3.47977	6.8007	9.93008	3.41541	6.80097	9.91467
9.5	3.11498	6.01166	8.61688	3.09741	6.16873	8.97819	3.15775	6.19577	9.05129	3.15917	6.21759	9.11507	3.15922	6.21908	9.11962
10	2.86544	5.53168	7.84942	2.87245	5.64727	8.26926	2.87113	5.66522	8.32889	2.88816	5.67885	8.3789	2.88788	5.67974	8.3825
10.5	2.61889	5.08812	7.36477	2.61672	5.1676	7.60573	2.61133	5.17771	7.65184	2.60474	5.18433	7.69113	2.60419	5.18472	7.69389
11	2.40089	4.67741	6.79932	2.38274	4.72309	6.99532	2.37388	4.72637	7.02001	2.36421	4.72889	7.04836	2.36344	4.72883	7.05097
11.5	2.20083	4.29693	6.26172	2.16797	4.31582	6.49026	2.15622	4.31323	6.42659	2.14401	4.30865	6.44819	2.14306	4.30812	6.44952
12	2.0138	3.9403	5.75844	1.96971	3.93572	5.86849	1.9655	3.92802	5.87351	1.94114	3.91885	5.88474	1.94004	3.91889	5.88546
12.5	1.84072	3.60774	5.28315	1.78631	3.58169	5.34654	1.77003	3.56956	5.35115	1.75387	3.55489	5.35482	1.75265	3.55547	5.356
13	1.67935	3.28634	4.83374	1.61806	3.25129	4.86897	1.59805	3.23531	4.86897	1.58042	3.21889	4.85583	1.57909	3.21762	4.85552
13.5	1.52831	3.0004	4.40088	1.45744	2.94158	4.40239	1.43798	2.92224	4.39453	1.41913	2.90291	4.38528	1.41771	2.90144	4.38452
14	1.38644	2.72763	4.00451	1.30911	2.65087	3.96955	1.28847	2.63871	3.95544	1.26864	2.60887	3.94062	1.26716	2.60522	3.93947
14.5	1.25282	2.46878	3.63201	1.17023	2.37722	3.58861	1.14867	2.35247	3.53994	1.12811	2.3285	3.51914	1.12657	2.3267	3.51763
15	1.1286	2.21949	3.25454	1.03688	2.11842	3.18886	1.01742	2.09148	3.14416	0.996314	2.01578	3.11986	0.994745	2.06373	3.11803
15.5	1.00272	1.98426	2.90473	0.91662	1.87345	2.79788	0.893894	1.84472	2.76688	0.872454	1.8174	2.7405	0.870064	1.81537	2.73839
16	0.882733	1.76033	2.57089	0.800203	1.64038	2.44462	0.777237	1.6107	2.41141	0.755678	1.58221	2.3797	0.754083	1.57999	2.37734
16.5	0.783452	1.56351	2.24804	0.688972	1.41937	2.1066	0.668832	1.388	2.07011	0.646395	1.36866	2.03655	0.646383	1.36638	2.03399
17	0.678131	1.33774	1.93653	0.594585	1.16629	1.78276	0.561944	1.17527	1.74376	0.540088	1.1454	1.70788	0.531818	1.1432	1.70436
17.5	0.575943	1.13595	1.63679	0.483896	1.00313	1.4716	0.461944	0.971041	1.43097	0.441611	0.941728	1.39206	0.440117	0.930222	1.39016
18	0.482516	0.930081	1.34126	0.386804	0.805807	1.17145	0.385145	0.774281	1.13032	0.366752	0.745114	1.09206	0.364544	0.742972	1.08924
18.5	0.374632	0.739721	1.04653	0.292363	0.612783	0.88061	0.27349	0.582955	0.840654	0.258995	0.555486	0.803474	0.254716	0.552485	0.80075
19	0.269725	0.533163	0.747758	0.199338	0.430239	0.594839	0.183261	0.394148	0.558978	0.168612	0.370274	0.525979	0.167545	0.369531	0.52363
19.5	0.16242	0.308281	0.421642	0.105687	0.224818	0.308471	0.094297	0.265703	0.282657	0.0848937	0.259149	0.280354	0.083544	0.187055	0.257436
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

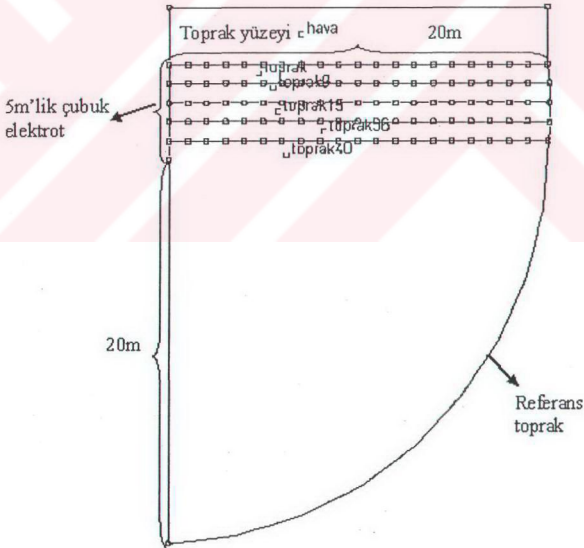
Tablo 3.19'dan görüldüğü gibi farklı uzunluklarda ve farklı bağıl dielektrik sabitli toprak içinde bulunan çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri, topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Bununla birlikte topraklayıcı yakınında, topraklayıcının uzunluğunun artması ve toprak bağıl dielektrik sabitinin artması adım geriliminin azalmasına neden olmaktadır. Çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarda ve farklı bağıl dielektrik sabitli toprak içinde olması durumunda toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları, Şekil 3.48'de verilmiştir.



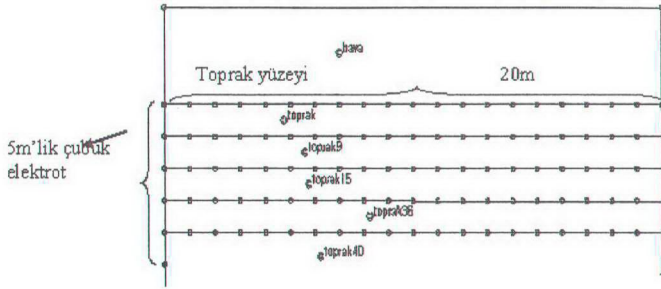
Şekil 3.48 Farklı uzunluklardaki, farklı bağıl dielektrik sabitli toprak içindeki çubuk topraklayıcıların toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları

3.6.4 Farklı Dielektrik Tabakalı Toprak İçine Gömülmüş 5 m Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcının Potansiyel Dağılımının SEY İle Hesabı

5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının farklı bağıl dielektrik sabitli tabakalı toprak yapısı içinde gömülü olması durumundaki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla Şekil 3.48'deki model kurulmuştur. Bu modelde topraklayıcının farklı bağıl dielektrik sabitli 1 m kalınlığındaki tabakalı toprak yapısı içinde olması durumu göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla öncelikli olarak bağıl dielektrik sabiti değeri en üsteki toprak tabakasından başlayarak küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olacak biçimde beş tabakalı toprak içinde, sonrasında ise büyüktен küçüğe doğru 40, 36, 15, 9, ve 3 olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. Diğer kısımlarda göz önünde bulundurulan yaklaşımlar burada da kullanılmıştır, sadece toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla aralarında 0,5 m'lik uzaklık bulunan düğümlerin yerine aralarında 1 m uzaklık bulunan düğüm noktalarının potansiyelleri hesaplanmıştır.

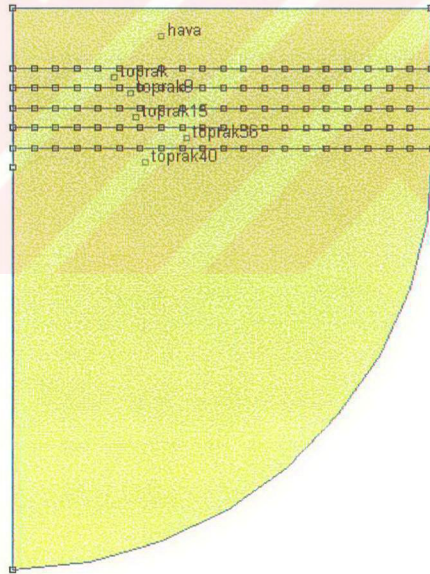


Şekil 3.49 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan model

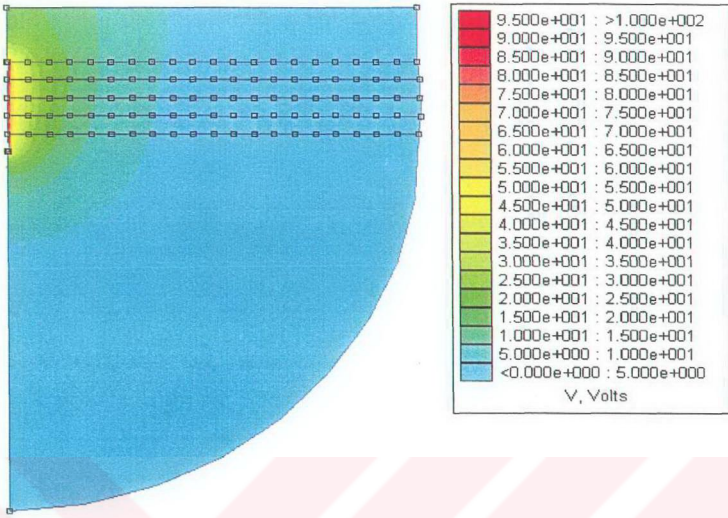


Şekil 3.50 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımın SEY ile bulunması amacıyla kurulan modelin toprak yapısının gösterimi

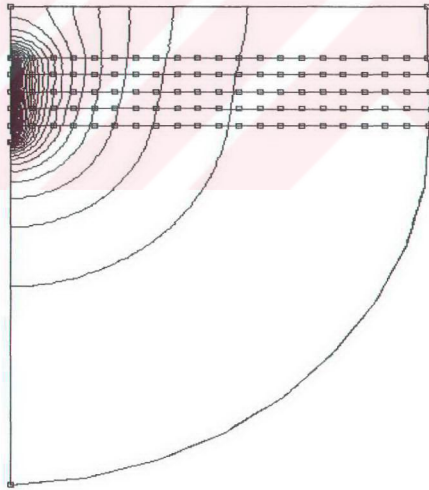
Şekil 3.48'de kurulan modelin üçgen sonlu elemanlara ayrıştırılması Şekil 3.51'de verilmiştir.



Şekil 3.51 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 3.52 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

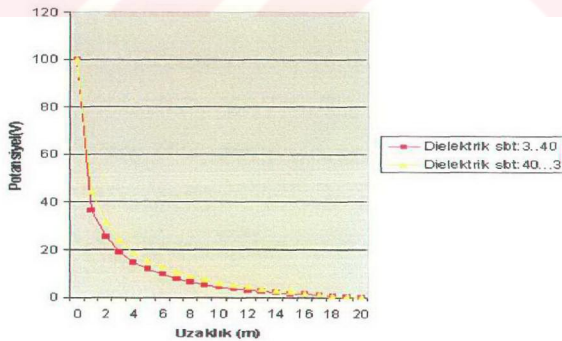


Şekil 3.53 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgiler

1 m kalınlığındaki toprak tabakalarının dielektrik sabitinin büyükten küçüğe doğru azalması durumunda, çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının hesabı da yine aynı şekilde modeller kurularak hesaplama yapılmıştır. Toprak tabakalarının dielektrik sabitlerinin değişmesine bağlı olarak yapılan tüm hesaplamaların sonuçları Tablo 3.20'de verilmiştir. Şekil 3.54'de bu durum gösterilmiştir.

Tablo 3.20 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel değerleri

Topraklayıcı uzunluğu Toprak yüzeyinde elektrota olan uzaklık (m)	L=5m	
	Dielektrik sbt:3...40	Dielektrik sbt:40...3
0	100	100
1	36.6063	44.4258
2	25.3284	31.5226
3	18.94	24.0556
4	14.7274	18.6618
5	11.723	15.4342
6	9.46987	12.6953
7	7.74095	10.556
8	6.37665	8.84025
9	5.27951	7.43087
10	4.38279	6.24999
11	3.64053	5.2458
12	3.0151	4.37392
13	2.43846	3.61345
14	2.03121	2.94024
15	1.60043	2.33891
16	1.28725	1.79541
17	0.972717	1.29987
18	0.6796	0.844372
19	0.386869	0.417781
20	0	0



Şekil 3.54 1 m kalınlığında bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakası içindeki 5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımları

Şekil 3.54'den görüldüğü gibi 1 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitine sahip toprak tabakaları içine gömülen topraklayıcıların çevresindeki potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Yine adım gerilimi değerleri de topraklayıcı yakınında hızlı sonrasında ise daha yavaş bir şekilde azalmaktadır.

3.6.5 Çubuk Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının Analitik, SFY ve SEY ile Yapılan Hesaplarının Karşılaştırılması

Uygulamada çubuk topraklayıcılar yeryüzüne dik olarak toprağa gömülürler ve bir ucu yeryüzü ile aynı seviyede bulunur. Onun için sonsuz toprak içinde gömülmüş bulunan çubuk topraklayıcının ortasından z eksenine dik x-y düzlemi ile ikiye bölündüğü düşünülür. Bunun toprak içinde kalan kısmı gerçek topraklayıcı olduğu halde ikinci yarısı toprak üstündeki görüntüsünü oluşturur ve böylece potansiyel dağılımında hiçbir değişiklik olmaz.

Çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerinin bulmak amacıyla $z = 0$ alınarak x-y düzleminde merkezden r radyal uzaklığında bulunan bir $P(x, y)$ noktası için çubuk uzunluğunun l olarak alınması durumunda, literatürde çubuk uzunluğu $2l$ olması durumunda verilen (3.7) denklemi, (3.8)'deki gibi olacaktır. Buna göre çubuk topraklayıcıdan r kadar uzaklıkta olan bir noktanın potansiyeli

$$V_r = I \cdot \frac{\rho}{4\pi l} \ln \frac{z+l+\sqrt{r^2+(z+l)^2}}{z-l+\sqrt{r^2+(z-l)^2}} \quad (3.7)$$

$$V_r = I \cdot \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l+\sqrt{r^2+l^2}}{-l+\sqrt{r^2+l^2}} \quad (3.8)$$

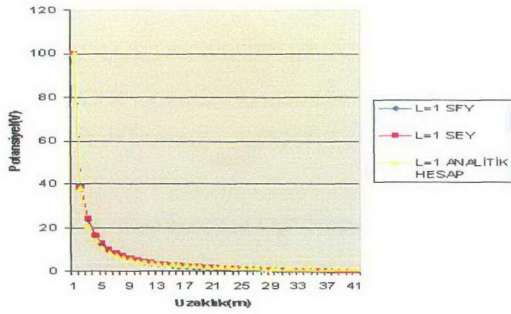
dir. Bu ifadede ρ toprağın özdirenci, I topraklayıcı akımı, r ise topraklayıcı ile potansiyeli bulunacak olan nokta arasındaki uzaklıktır [1].

SFY ve SEY ile çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilim değeri 100 volt, çubuk topraklayıcı çapı 0,02 m ve çubuk topraklayıcının boyunun 1, 2, ve 3 m olması durumunda elde edilen potansiyel değerlerinin analitik olarak da hesaplanması amacıyla (3.8) denkleminde belirtilen ifade kullanılmıştır. Burada topraklayıcı akımı

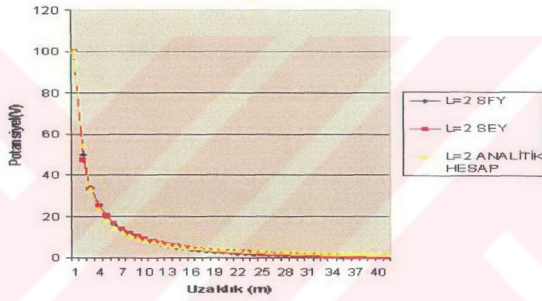
(I) değeri, çubuk topraklayıcının boyunun 1 m, 2 m, ve 3 m olması, ve topraklayıcı yüzeyinde $r = d$ olacağı için, topraklayıcı yüzeyindeki gerilim 100 volt olduğundan her bir uzunluk için ayrı ayrı hesaplanmıştır. SEY ve SFY ile yapılan hesaplamalarda toprak bağıl dielektrik sabiti 9 olarak alınmıştır. Bağıl dielektrik sabiti 9 olan toprağın, öz direnci Tablo 3.16'da belirtildiği gibi 1000 $\Omega \cdot m$ 'ye karşılık gelmektedir. Bu yaklaşımlar ışığında 1 m, 2 m, 3 m'lik çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel değerlerinin analitik olarak hesabı yapılmış ve sonuçlar Tablo 3.21'de verilmiştir.

Tablo 3.21 1 m, 2 m, 3 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının SFY, SEY ve analitik olarak hesaplanan değerleri

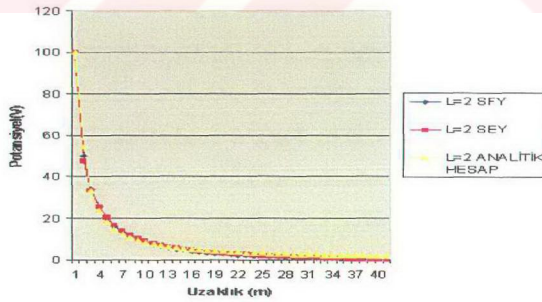
Topraklayıcı uzunluğu(m)	L=1	L=1	L=1	L=2	L=2	L=2	L=3	L=3	L=3
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SFY	SEY	ANALİTİK HESAP	SFY	SEY	ANALİTİK HESAP	SFY	SEY	ANALİTİK HESAP
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0.5	39.82225	38.4886	38.27674	50.01369	47.5053	54.49365	54.26885	52.3802	63.7627
1	23.59066	24.1868	20.89831	34.10293	33.2807	33.26979	39.28526	37.9432	41.89363
1.5	16.13847	16.3692	14.22067	25.40623	25.4198	23.59776	30.65483	29.9352	30.90482
2	12.00655	13.1382	10.7471	19.88379	20.2867	18.16462	24.84801	24.5546	24.30478
2.5	9.421399	10.4547	8.628815	16.09469	16.6369	14.72292	20.64619	20.5878	19.94549
3	7.664107	8.60309	7.204987	13.3554	13.9591	12.36048	17.46926	17.5843	16.8734
3.5	6.395833	7.2278	6.183161	11.29498	11.9129	10.64345	14.99151	15.1961	14.60189
4	5.438744	6.19725	5.414525	9.695383	10.3036	9.341279	13.01189	13.2677	12.86897
4.5	4.691353	5.38135	4.815515	8.421021	9.01133	8.320818	11.38664	11.7184	11.48184
5	4.091775	4.72189	4.335645	7.383729	7.95029	7.500086	10.06178	10.1855	10.36759
5.5	3.600211	4.17546	3.942628	6.524031	7.06571	6.825948	8.937894	9.30369	9.448264
6	3.169933	3.71809	3.614866	5.800513	6.31417	6.262508	7.981127	8.35463	8.677259
6.5	2.842342	3.32943	3.337368	5.18354	5.67099	5.784664	7.15761	7.52893	8.021629
7	2.544097	2.99465	3.099404	4.651394	5.11312	5.374347	6.441849	6.80827	7.457449
7.5	2.285388	2.70286	2.893093	4.187824	4.62385	5.018226	5.814332	6.17351	6.966946
8	2.058838	2.44578	2.712518	3.78044	4.19251	4.706255	5.2599	5.60979	6.536646
8.5	1.858795	2.21841	2.553147	3.419642	3.80877	4.43072	4.766617	5.10604	6.156157
9	1.680858	1.97875	2.411455	3.097881	3.46081	4.165601	4.324969	4.65169	5.817341
9.5	1.521546	1.83287	2.284657	2.80914	3.0984	3.966136	3.927287	4.24106	5.513731
10	1.378071	1.66778	2.170522	2.548571	2.87344	3.768502	3.567325	3.86768	5.240131
10.5	1.248177	1.51613	2.067243	2.31222	2.61772	3.589602	3.23996	3.52374	4.992314
11	1.130013	1.38126	1.973344	2.096833	2.38374	3.426896	2.940906	3.21427	4.766811
11.5	1.022051	1.2568	1.887601	1.899708	2.16899	3.278282	2.666635	2.92645	4.560745
12	0.923018	1.14016	1.808998	1.718582	1.97074	3.142008	2.414141	2.66052	4.371713
12.5	0.831842	1.03341	1.736677	1.551544	1.78735	3.016601	2.180884	2.41409	4.197692
13	0.747615	0.934349	1.669916	1.396969	1.61482	2.90081	1.964896	2.18487	4.036966
13.5	0.669564	0.842373	1.608096	1.253468	1.45852	2.793572	1.763713	1.97094	3.88807
14	0.597026	0.755442	1.550689	1.119839	1.31021	2.693974	1.576323	1.7686	3.749747
14.5	0.529427	0.675977	1.497238	0.995042	1.16922	2.601227	1.401122	1.58347	3.620911
15	0.466267	0.600293	1.447349	0.878163	1.04082	2.51465	1.236801	1.40686	3.50062
15.5	0.407109	0.528991	1.400677	0.768399	0.917795	2.433646	1.082512	1.24062	3.388053
16	0.351566	0.461811	1.35692	0.665033	0.801408	2.357695	0.937043	1.08315	3.282489
16.5	0.299269	0.397975	1.315814	0.56742	0.691014	2.266338	0.799597	0.933719	3.183297
17	0.249664	0.337202	1.277125	0.474793	0.586843	2.219172	0.689373	0.791169	3.089916
17.5	0.203297	0.279071	1.240646	0.387146	0.485	2.155837	0.545624	0.654691	3.00186
18	0.159008	0.223096	1.206192	0.303426	0.388178	2.096015	0.427643	0.523391	2.91866
18.5	0.116819	0.157735	1.173601	0.223323	0.294008	2.039421	0.314749	0.396925	2.839952
19	0.076451	0.11476	1.142724	0.14536	0.179497	1.985803	0.206278	0.289692	2.765373
19.5	0.037611	0.0607	1.113429	0.072071	0.104508	1.93493	0.101575	0.142756	2.694607
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0



(a)



(b)

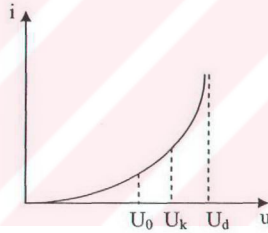


(c)

Şekil 3.55 1 m (a), 2 m (b), 3 m (c) uzunluğundaki çubuk topraklayıcıların SFY, SEY ve analitik olarak bulunan potansiyel dağılımları

3.6.6 2 m Uzunluğundaki Çubuk Topraklayıcı Çevresinde Oluşan Potansiyel Dağılımının Korona Olayı Bakımından SEY İle İncelenmesi

Küçük yarıçaplı elektrotlarda görülen, tam olmayan fakat kendi kendini besleyen boşalmalara korona boşalması denir. Hava hatlarında gerilim yavaş yavaş yükseltirirse, gerilimin belirli bir değerinde çarpma suretiyle iyonizasyon başlar ve hattı kuşatan ince bir tabakada boşalma için gerekli koşullar sağlanmış olur. Başlangıçta ışık görülmez. Çarpma suretiyle iyonizasyonun başladığı gerilim U_0 ile gösterilir. Peek'e göre normal koşullarda ($\delta = 1$) U_0 gerilimine karşı düşen E_0 elektrik alan şiddeti tepe değer olarak 30 kV/cm veya etkin değer olarak 21,2 kV_{ef}/cm'dir. Gerilim biraz daha yükseltirirse, hat parça parça daha sonra da baştan başa ışıklı duruma gelir. Bu durumda boşalma, hattın çevresinde ince bir zar boyunca kendi kendini besler. Boşalmanın kendi kendini beslediği veya hattın ışıklı duruma geldiği bu gerilime korona gerilimi denir ve U_k ile gösterilir. Şekil 3.54'de $i = f(u)$ eğrisi, dolayısıyla U_0 , U_k , U_d gerilimleri gösterilmiştir. U_d , delinme gerilimine karşı düşer.



Şekil 3.56 $i = f(u)$ eğrisi

U_0 : Çarpma suretiyle iyonizasyon gerilimi

U_k : Korona gerilimi

U_d : Delinme gerilimi

Korona gerilimine etki eden birçok faktör vardır: hatların yarıçapı, iletkenler arası açıklık, hava koşulları, hatların pürüzlülüğü gibi. Genel olarak pozitif ve negatif koronanın oluşumu, birbirinden çok farklı olmakla beraber, korona gerilimi aşağı yukarı aynıdır. U_k ile U_0 veya E_k ile E_0 arasında

$$U_k = U_0 m \delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \delta}} \right) \quad (3.9)$$

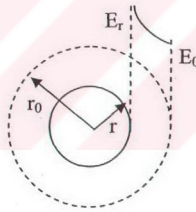
$$E_k = E_0 m \delta \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r \delta}} \right) \quad (3.10)$$

amprlik bağıntıları vardır. Burada E_0 tepe değeri olarak 30 kV/cm veya etkin değeri olarak 21.2 kV_{ef}/cm'dir. m hattın düzgünlük derecesini belirtir. δ bağıl hava yoğunluğunu gösterir ve değeri 25 °C ve 760 mmHg'da $\delta = 1$ 'dir; diğer sıcaklık ve basınçlarda

$$\delta = 0,392 \frac{P}{T} \quad (3.11)$$

denklemden hesaplanır. r , cm cinsinden iletken yarıçapını gösterir.

Işıklı zarın kalınlığı, iyonizasyon bölgesi dışında elektrik alanının $E_0 = 30$ kV/cm'ye indiği kabul edilerek hesaplanabilir. Şekil 3.55 yardımıyla (3.12)'deki denklemler yazılabilir.



Şekil 3.57 Yarıçapı r olan bir iletkende ışıklı zar kalınlığının hesabı

$$E_k = \frac{Q}{2\pi\epsilon r} \text{ ve } E_0 = \frac{Q}{2\pi\epsilon r_0} \quad (3.12)$$

Buradan

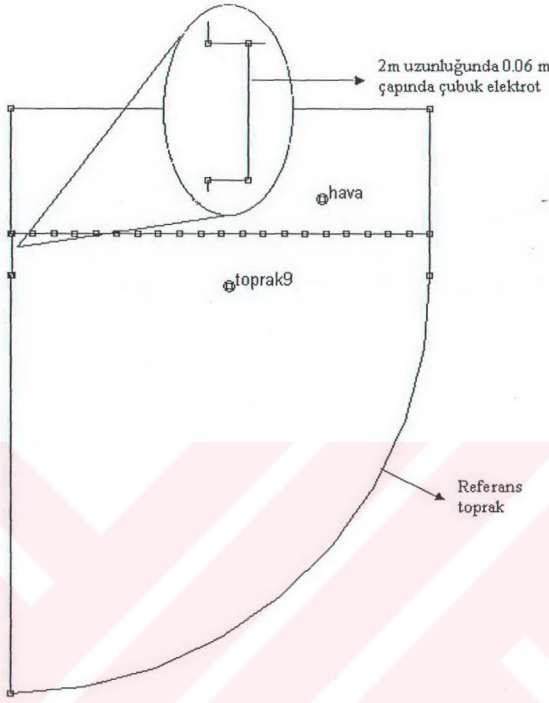
$$\frac{E_k}{E_0} = \frac{r_0}{r} \quad (3.13)$$

bulunur. $m = 1$ ve $\delta = 1$ için ışıklı zarın kalınlığı $0,301\sqrt{r}$ olur. Örneğin iletken yarıçapı $r = 1$ cm ise, ışıklı zarın kalınlığı 0,301 cm'dir.

Çubuk topraklayıcının aşırı gerilime maruz kalması durumunda, meydana gelen korona boşalmasından dolayı çevresinde, çapı topraklayıcının çapından daha büyük iyonize bir bölge oluşur. Korona boşalmasından dolayı çapı büyümüş gibi olan topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı, SEY ile incelenmiştir. SEY ile yapılan incelemede topraklayıcının çapının büyümesi korona olayında oluşan ısıtılı bölgenin çapına eşit kabul edilmiştir.

2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcıda, korona olayı sonrası meydana gelen çapı topraklayıcı çapından daha büyük olan iyonize bölgeyi, topraklayıcı çaplarının 0,02, 0,04, 0,06, 0,08 ve 0,1 m'lik farklı çaplarda olması durumuyla modelleyerek, korona olayının topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 2 m uzunluğunda ve farklı çaplardaki çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımını bulmak için SEY ile oluşturulan modeller FEMM bilgisayar programı kullanılarak çözümlenmiştir.

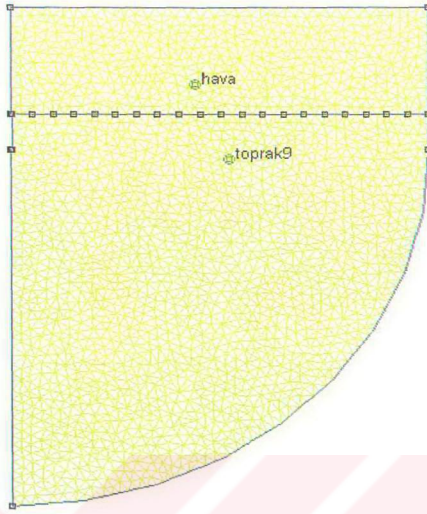
2 m uzunluğunda, 0,06m çapındaki çubuk topraklayıcının çevresinde meydana gelen potansiyel dağılımının SEY ile modelleri kurularak çözümlemesi yapılmıştır. Bu işlemler çubuk topraklayıcının farklı çaplarda olması durumunda yapılarak korona olayında meydana gelen çap büyümesi durumunun çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımına etkisi incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda çubuk topraklayıcıya 100 Volt uygulanmış ve topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her nokta, referans toprak olarak kabul edilerek potansiyeli 0 volt olarak alınmıştır. Topraklayıcının gömülü olduğu toprağın bağlı dielektrik sabiti 9 ve havanın bağlı dielektrik sabiti 1 olmak üzere, toprak yüzeyinde 2 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcı farklı çaplarda düşünülerek korona boşalmasının toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımına etkisini SEY ile incelemek amacıyla oluşturulan model Şekil 3.58'de gösterilmiştir.



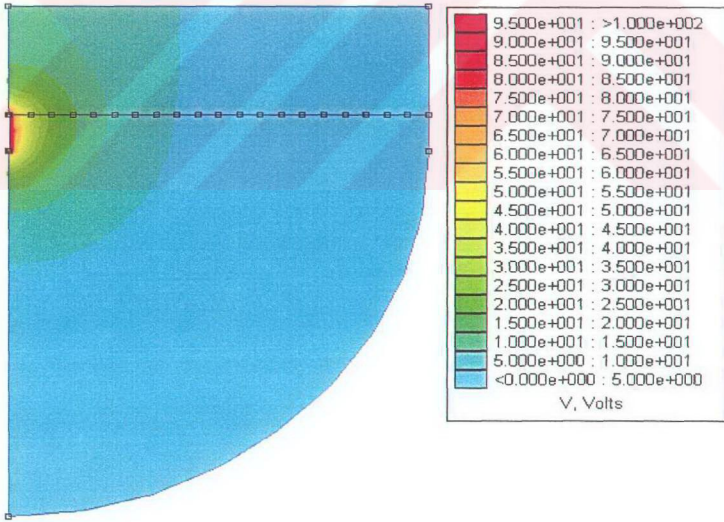
Şekil 3.58 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapındaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Çubuk topraklayıcı ve çevresindeki 20 m'lik mesafeden oluşan kapalı bölge öncelikli olarak üçgen elemanlara bölünerek potansiyelleri bilinmeyen değerler, potansiyeli bilinen değerler yardımı ile hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi Şekil 3.59'da verilmiştir.

Kapalı bölge sonlu eleman olarak kullanılan üçgen elemanlara bölündükten sonra, hava ile toprak arasındaki toprak yüzeyinde bulunan aralarında 1 m uzaklık bulunan düğümlerin potansiyel değerleri ve çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır.

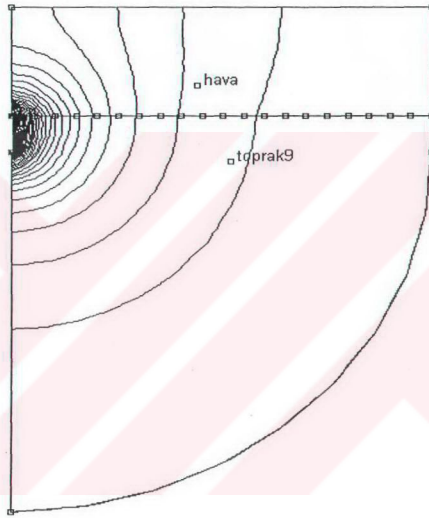


Şekil 3.59 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapındaki çubuk topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 3.60 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapında çubuk topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra 2 m uzunluğunda ve 0,06 m çapındaki çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 3.60'da gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcının yakınındaki yerlerde potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. Çubuk topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgilerin çizilmesi durumunda da topraklayıcıya yakın yerlerdeki eşpotansiyel çizgilerinin birbirlerine daha yakın, topraklayıcıdan uzaklaştıkça eşpotansiyel çizgilerinin birbirlerinden uzaklaştıkları görülür.



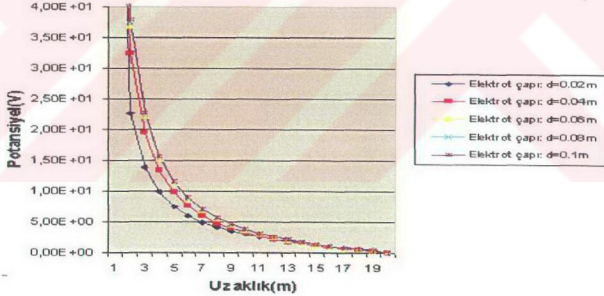
Şekil 3.61 2 m uzunluğunda, 0,06 m çapındaki çubuk topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler

Çubuk topraklayıcının aşırı gerilime maruz kalması durumunda meydana gelen korona boşalmasından dolayı oluşan, çapı topraklayıcı çapından daha büyük iyonize bölgeyi modellemek amacıyla topraklayıcının farklı çaplarda olduğu düşünülerek yapılan hesaplamalar sonucu, toprak yüzeyinde 1 m aralıklarla oluşan potansiyel değerleri Tablo 3.21'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Tablo 3.22'de 2 m uzunluğunda ve

0,02, 0,04, 0,06, 0,08 ve 0,1 m çaplarında, 100 volt gerilim uygulanmış çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri verilmiştir.

Tablo 3.22 2 m uzunluğunda ve farklı çaplarda çubuk topraklayıcıların SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Elektrot boyu (m)	L=2				
Elektrotden olan uzaklık(m)	d=0.02m	d=0.04m	d=0.06m	d=0.08m	d=0.1m
0,00E+00	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+02
1,05E+00	2,26E+01	3,25E+01	3,69E+01	3,72E+01	3,80E+01
2,10E+00	1,36E+01	1,95E+01	2,21E+01	2,23E+01	2,27E+01
3,16E+00	9,80E+00	1,33E+01	1,52E+01	1,54E+01	1,57E+01
4,21E+00	7,45E+00	9,80E+00	1,12E+01	1,13E+01	1,16E+01
5,26E+00	5,94E+00	7,52E+00	8,64E+00	8,70E+00	8,94E+00
6,31E+00	4,88E+00	5,94E+00	6,85E+00	6,88E+00	7,09E+00
7,36E+00	4,08E+00	4,79E+00	5,52E+00	5,54E+00	5,72E+00
8,42E+00	3,45E+00	3,90E+00	4,50E+00	4,52E+00	4,67E+00
9,47E+00	2,94E+00	3,20E+00	3,70E+00	3,71E+00	3,83E+00
1,05E+01	2,52E+00	2,64E+00	3,04E+00	3,05E+00	3,16E+00
1,16E+01	2,16E+00	2,17E+00	2,50E+00	2,51E+00	2,60E+00
1,26E+01	1,84E+00	1,77E+00	2,04E+00	2,05E+00	2,12E+00
1,37E+01	1,57E+00	1,43E+00	1,65E+00	1,65E+00	1,71E+00
1,47E+01	1,32E+00	1,13E+00	1,31E+00	1,31E+00	1,36E+00
1,58E+01	1,09E+00	8,73E-01	1,00E+00	1,01E+00	1,04E+00
1,68E+01	8,77E-01	6,38E-01	7,34E-01	7,36E-01	7,62E-01
1,79E+01	6,65E-01	4,24E-01	4,87E-01	4,88E-01	5,05E-01
1,89E+01	4,26E-01	2,22E-01	2,53E-01	2,53E-01	2,62E-01
2,00E+01	7,31E-07	4,46E-03	5,77E-07	5,77E-07	5,99E-07



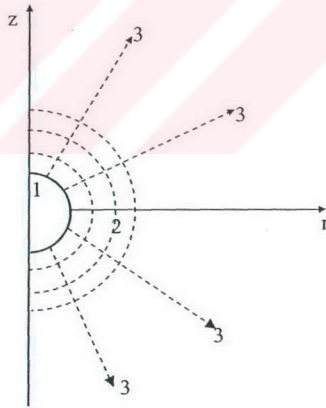
Şekil 3.62 2 m uzunluğunda ve farklı çaplarda çubuk topraklayıcıların SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimleri

Tablo 3.22'den görüldüğü gibi SEY ile bulunan potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Tablo 3.22'de verilen değerlere göre çizilen grafik, Şekil 3.62'de gösterilmiştir.

BÖLÜM 4 KÜRE TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY VE SEY İLE SAYISAL ANALİZİ

4.2 Küre Topraklayıcı Hakkında Genel Bilgi

Hem matematik hem de fizik bakımından teorik incelemeye en verişli topraklama şekli küredir. Kürenin çapı küçültülerek bir nokta haline getirilirse, bir noktasal kaynak elde edilir. Küresel elektrodun bütün özellikleri bir noktasal kaynağın özellikleri ile aynıdır. Bu bölümde tam ortadan kesilmiş yarı küre elektrot ele alınmış ve çevresindeki potansiyel dağılımı SEY, SFY, analitik olarak hesaplanmıştır. Burada akımın kürenin merkezinden verildiği ve kürenin gömüldüğü ortamın yani toprağın iletken ve homojen olduğu kabul edilir. Eşpotansiyel yüzeyler eş merkezli yarı küreler olup, kürenin dış yüzeyi de bir eşpotansiyel yüzeydir. Şekil 4.1'de yarı küre topraklayıcı ile buna ait eşpotansiyel çizgiler ve akım çizgileri gösterilmiştir [1].



Şekil 4.1 Yarı küre topraklayıcı

- 1 Topraklayıcı
- 2 Eşpotansiyel çizgiler
- 3 Akım alan çizgileri

Potansiyel dağılımını ve yayılma direncini hesaplayabilmek için toprağın yarı küre topraklayıcıyı yine küresel olarak sardığı ve pratik olarak sonsuz bir büyüklüğü olduğu, ayrıca toprağın çok uzakta çok iyi iletken bir tabaka ile kaplanmış olduğu, bundan başka topraklayıcı maddenin öz direncinin toprağının yanında ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu kabul edilir. Topraklayıcı yarı küre ile uzaklıktaki iletken tabaka arasına U_{ik} (topraklayıcı gerilimi) uygulanırsa, bu ikisi arasından I_t gibi bir toprak akımı geçer; bu akım şiddetini, bu iki eş merkezli küre elektrotlarının arasındaki toprağın direnci belirler.

Kürenin merkezinden r uzaklığında toprakta akım,

$$q = 2\pi r^2 \quad (4.1)$$

gibi bir yarı küre kesitinden geçer. Burada r , x - y düzleminde bir değişken olup $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ dir. Toprağın öz direnci ρ ise, dr kalınlığındaki bir yarı küre kabuğunun direnci

$$dR = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (4.2)$$

olup bu yarı küre kabuğundaki potansiyel değişimi

$$d\varphi = I_t \cdot dR = I_t \cdot \frac{\rho \cdot dr}{2\pi r^2} \quad (4.3)$$

dir. Çok uzaktaki iletken tabakanın potansiyelinin sıfır olduğu kabul olunursa, küre topraklayıcının merkezinden r uzaklıktaki bir noktanın potansiyeli

$$\varphi = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi} \int_{\infty}^r \frac{dr}{r^2} = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty} \right) = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi r} \quad (4.4)$$

dir. Bu denklem, yer yüzeyinde uzaklığa bağlı olarak potansiyel dağılımını verir. Kürenin çapı D olduğuna göre, eğer burada $x = D/2$ alınırsa, özellikle topraklayıcı yüzeyindeki potansiyel elde olunur, bu değer U_{ik} topraklayıcı gerilimine eşittir:

$$\varphi_0 = U_{tk} = I_t \frac{\rho}{\pi \cdot D} \quad (4.5)$$

Denklem (3.5) göz önüne alınarak denklem (3.4) yerine

$$\varphi = U_{tk} \cdot \frac{D}{2 \cdot r} \quad (4.6)$$

ifadesi de yazılabilir.

Akım alanında ve küre merkezinden r_1 ve r_2 uzaklıklarındaki iki nokta arasında potansiyel farkı veya gerilim

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = I_t \cdot \frac{\rho}{2\pi} \int_{r_2}^{r_1} \frac{dr}{r^2} = I_t \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.7)$$

dir. Bu denklem yardımıyla özellikle küre yüzeyi ile akım alanının herhangi bir noktası arasındaki gerilim

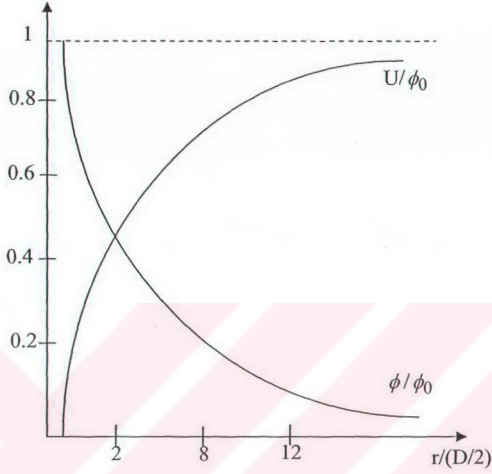
$$U = \varphi_0 - \varphi = I_t \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{D/2} - \frac{1}{r} \right) = \varphi_0 \left(1 - \frac{D}{2 \cdot r} \right) \quad (4.8)$$

olur. Şekil 4.2'de uzaklığa bağlı olarak gerilimin ve potansiyelin değişimi gösterilmiştir. Üç boyutlu olarak düşünüldüğünde gerilim değişimi bir gerilim hunisi ve potansiyel değişimi bir potansiyel çadırı şeklindedir.

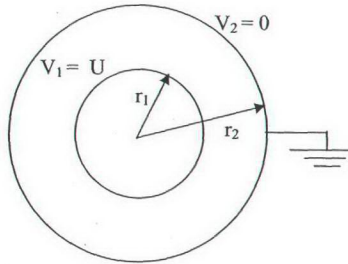
4.2 Yarı Küre Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY, SEY ve Analitik Olarak Hesaplanması İçin Kurulan Modeller

Bir yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla geliştirilen modellerde, yarı küre topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki toprak yüzeyindeki potansiyelin sıfır olduğu ve topraklayıcıya uygulanan gerilim değerinin 100 volt olduğu varsayımı yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan sonlu farklar yönteminde, küresel koordinatlarda potansiyelin r yarıçapı boyunca değiştiği göz önünde bulundurularak gerekli işlemler yapılmıştır. Buna göre çapları 0,02, 0,04,

0,06, 0,08, 0,1 ve 0,5 m olan yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY, SFY ve analitik olarak hesaplanmıştır. Bu üç yöntemle elde edilen sonuçların karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.2 Yarı küre topraklayıcı civarında gerilimin ve potansiyel dağılımının uzaklığa bağlı olarak değişimi
 U/ϕ_0 Gerilim değişimi (gerilim hunisi)
 ϕ/ϕ_0 Potansiyel değişimi (potansiyel çadırı)



Şekil 4.3 Eşmerkezli küresel elektrot sistemi

Küresel koordinatlarda bir boyutlu Laplace denklemi:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (4.9)$$

ve bu denklemin analitik çözümü

$$V = \frac{Ur_1}{r_2 - r_1} \left(\frac{r_2}{r} - 1 \right) \quad (4.10)$$

dir [80]. Laplace denklemini sonlu fark denklemine dönüştürmek için denklemdeki 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. Burada merkezi farklarla yazılım ele alınmıştır ve hesaplamalar bu yazılımla yapılmıştır:

Merkezi farklarla yazım:

$$\frac{\partial V}{\partial r} \cong \frac{V(r+h) - V(r-h)}{2h} \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} \cong \frac{V(r+h) - 2V(r) + V(r-h)}{h^2} \quad (4.12)$$

Laplace denklemi:

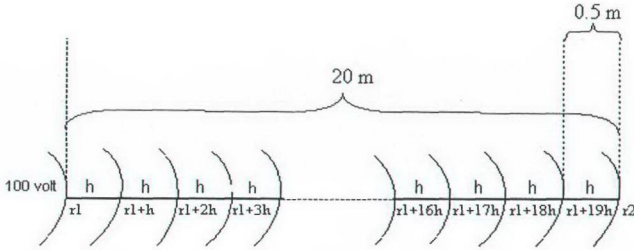
$$\frac{V(r+h) - 2V(r) + V(r-h)}{h^2} + \frac{2}{r} \frac{V(r+h) - V(r-h)}{2h} = 0 \quad (4.13)$$

veya

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

dir [81].

SFY kullanılarak farklı çaplardaki yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı r eksenini boyunca hesaplanması amacıyla kurulan model Şekil 3.4'de gösterilmiştir.

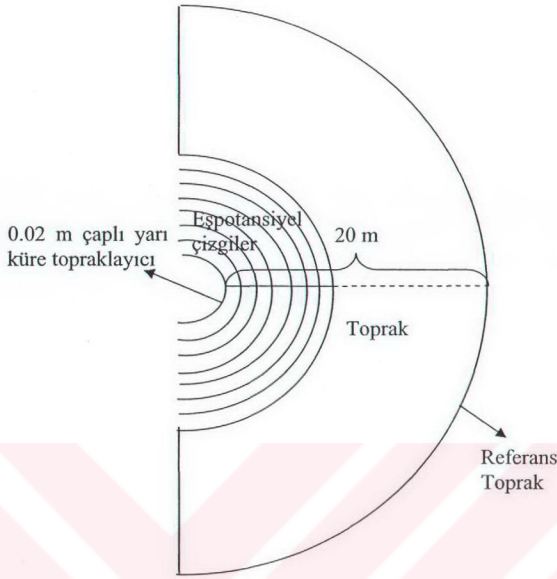


Şekil 4.4 Yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla kullanılan model

4.2.1 0,02 m Çapındaki Yarı Küre Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SFY Kullanılarak Hesabı

0,02 m çaplı yarı küre topraklayıcının SFY kullanılarak r eksenini boyunca 0,5 m aralıklarla potansiyel dağılımının bulunması için geliştirilen model Şekil 4.5'de verilmiştir. Yarı küre topraklayıcının, bağlı dielektrik sabiti 9 olan homojen toprak içinde olduğu düşünülerek hesaplar yapılmıştır. Buna göre yarı küre topraklayıcıya 100 volt uygulanmış ve 20 m uzaklıktaki referans toprak potansiyeli ise 0 volt olduğu göz önünde bulundurularak potansiyeli bilinmeyen 0,5 m aralıklı düğümlerin değerleri, potansiyeli bilinen düğümler kullanılarak bulunmuştur.

Şekil 4.5'de verilen 0,02 m çaplı yarı kürenin çevresindeki potansiyel dağılımı SFY ile bulmak amacıyla Laplace denkleminin küresel koordinatlardaki sonlu fark eşiti olan denklem (4.14)'de verilen ifade kullanılır. Buna göre yarı küre topraklayıcının yarıçapı $r_1 = 0,01$ m ve yarı küre üzerindeki potansiyel $V_0 = 100$ Volt her bir h uzunluğu ise 0,5 m olmak üzere, $r_1 + h$ uzaklığında bulunan düğümün potansiyelini (V_1) bulmak amacıyla Laplace denkleminin sonlu fark ifadesinde r yerine $r_1 + h$ konulursa;



Şekil 4.5 0,02 m çaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımın SFY ile bulunması amacıyla kurulan model

$$V(r_1 + 2h) - 2V(r_1 + h) + V(r_1) + \frac{h}{r_1 + h} [V(r_1 + 2h) - V(r_1)] = 0 \quad (4.15)$$

elde edilir. Burada $V(r_1 + 2h)$, r_1 yarıçapından $2h$ kadar uzaklıkta bulunan düğümün potansiyelini belirtir, buna karşılık gelen potansiyel ise V_2 ile gösterilir. Bu şekilde diğer denklemlerde kullanılırsa (4.15) denklemi (4.16)'da belirtildiği gibi kullanılır.

$$V_2 - 2V_1 + V_0 + \frac{h}{r_1 + h} [(V_2 - V_0)] = 0 \quad (4.16)$$

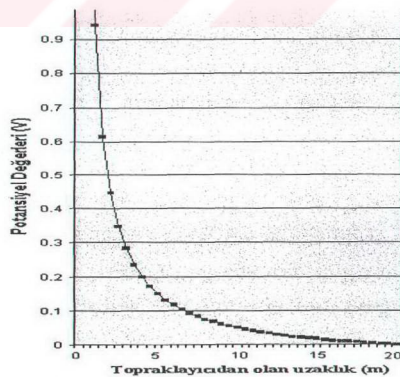
(4.16)'da belirtildiği gibi aralarında 0,5 m uzaklık bulunan her bir düğüm için bu denklemler yazılarak 0,02 m çapındaki yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı bulunmuş olur.

(4.15)'de verilen potansiyel dağılımını SFY kullanarak bulmak amacıyla kullanılan denklemi her bir düğüm için ayrı ayrı yazıp çözümlmek yerine, daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi MS EXCEL hücresel denklem çözüm yöntemi ile sadece bir hücreye hücre denklemi olarak girdikten sonra, denklem kopyalama yöntemiyle diğer hücelere kopyalayarak ve iterasyon yöntemi ile bilinmeyen düğümlerin potansiyellerinin kolaylıkla bulunması sağlanabilir.

Buna göre 0,02 m çaplı yarı küre çevresindeki potansiyel dağılımının SFY kullanılarak MS EXCEL'de yapılan hesaplamaları sonucu bulunan değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablo 4.1'den de görülebileceği gibi yarı küre topraklayıcının r eksenı boyunca SFY ile bulunan potansiyel dağılımı, topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmakta ve buna bağlı olarak canlılar için önemli olan adım gerilimi değerleri de azalmaktadır.

Tablo 4.1'den de görüleceği gibi yarı küre topraklayıcıdan yaklaşık 0,5 m uzaklıktaki, topraklayıcıya 100 volt uygulanması durumunda 1,9 volt'luk bir potansiyel değerine hızlı bir şekilde düşmektedir. Topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler azalmaktadır. Şekil 3.6'da 0,02 m çaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı görülmektedir.

Yarı küre topraklayıcının farklı çaplarda 0,04, 0,06, 0,08, 0,1 ve 1 m olması durumlarında çevresinde oluşacak potansiyel dağılımı, SFY ile hesaplanmıştır.



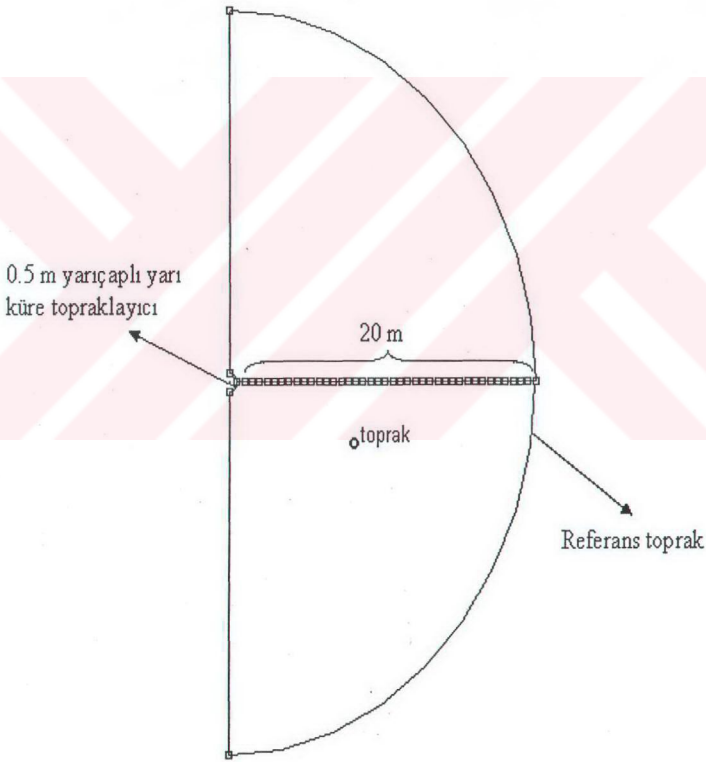
Şekil 4.6 0,02 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki SFY kullanılarak bulunan potansiyel dağılımı

Tablo 4.1 0,02 m çaplı yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunan değerleri

Elektrot Çapı (m)	0,02
Elektrottan olan uzaklık (m)	SFY ile bulunan düğüm gerilimleri
0.00E+00	100
5.10E-01	1.911764178
1.02E+00	0.940593529
1.53E+00	0.612582254
2.04E+00	0.447760671
2.55E+00	0.348605061
3.06E+00	0.282391517
3.57E+00	0.235042233
4.08E+00	0.199500754
4.59E+00	0.171839872
5.10E+00	0.149700127
5.61E+00	0.131578488
6.12E+00	0.116472099
6.63E+00	0.103686202
7.14E+00	0.09272426
7.65E+00	0.083221966
8.16E+00	0.074905978
8.67E+00	0.067567194
9.18E+00	0.061042928
9.69E+00	0.055204707
1.02E+01	0.049949726
1.07E+01	0.045194746
1.12E+01	0.040871646
1.17E+01	0.036924142
1.22E+01	0.033305325
1.28E+01	0.029975784
1.33E+01	0.026902165
1.38E+01	0.024056055
1.43E+01	0.021413094
1.48E+01	0.018952282
1.53E+01	0.016655415
1.58E+01	0.014506639
1.63E+01	0.012492078
1.68E+01	0.010599538
1.73E+01	0.008818259
1.79E+01	0.00713871
1.84E+01	0.005552418
1.89E+01	0.004051825
1.94E+01	0.002630169
1.99E+01	0.001281382
2.00E+01	0

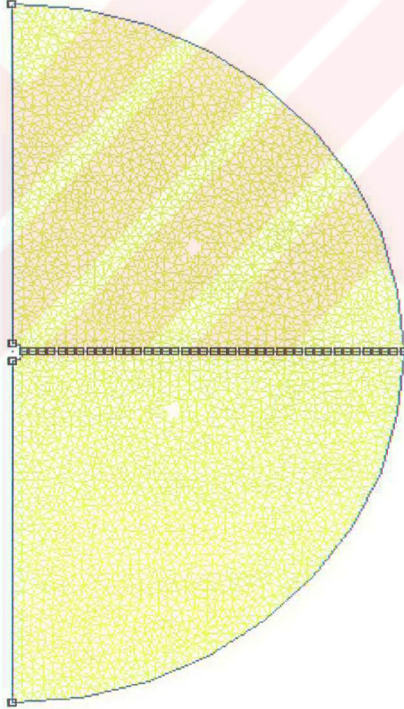
4.2.2 1 m Çapındaki Yarı Küre Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile ve Analitik Olarak Hesabı

Yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY kullanılarak hesaplanması amacıyla oluşturulan model ise Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'de verilen modelde yarıçapı 0,5 m olan yarı küre topraklayıcı göz önünde bulundurulmuş olup, yarı küre topraklayıcıya 100 volt gerilim uygulandığı ve 20 m uzaklıktaki her noktanın potansiyelinin 0 volt olduğu düşünülerek yarı küre topraklayıcının r yarıçapı boyunca meydana gelen potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır.

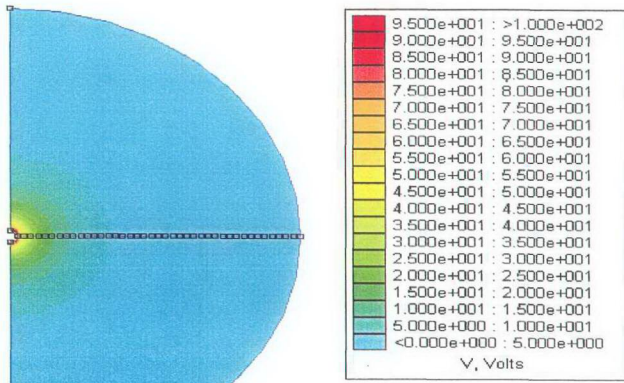


Şekil 4.7 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan model

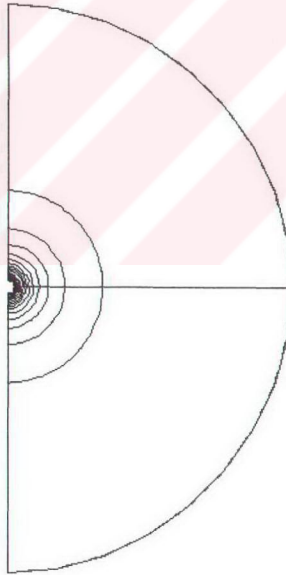
Şekil 4.7'de verilen SEY modelinde yarı küre topraklayıcının r eksenı boyunca potansiyel dağılımını bulmak amacıyla, yarı küre topraklayıcı ve referans toprak arasındaki kapalı bölge üçgen sonlu elemanlara bölünerek gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre SEY kullanılarak kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılmış hali Şekil 4.8'de verilmiştir. Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı, Şekil 4.9'da gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcının yakınındaki yerlerde potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgilerin çizilmesi durumunda da elektroda yakın yerlerdeki potansiyel çizgilerinin yüksek değerde, uzaklaştıkça düşük değerde oldukları görülür.



Şekil 4.8 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırılması



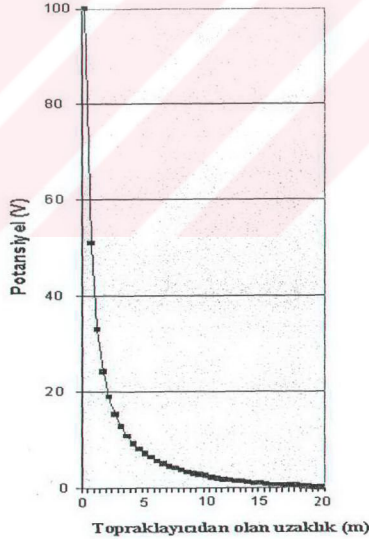
Şekil 4.9 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı



Şekil 4.10 0,5 m yarıçaplı yarı küre topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgileri

Yarı küre topraklayıcının r eksenı boyunca 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değęlerinin SEY kullanarak hesaplanması sonucunda elde edilen değęler Tablo 4.2'de verilmiştir. Bu değęlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değęleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değęlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değęleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.

Tablo 4.2'de verilen 0,5 m yarıçaplı yarıküre topraklayıcının r eksenı boyunca elde edilen potansiyel değęlerinin grafik olarak gösterilimi şekil 4.11'de verilmiştir. 0,5 m yarıçapında olan bir yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı analitik olarak (3.8) denklemlle hesaplanabilir. (3.8) denkleminde ϕ_0 gerilimi yarı küre topraklayıcıya uygulanan 100 volt, topraklayıcı çapı $D = 1$ m ve topraklayıcıdan olan uzaklık olan r değęi, yarı küre topraklayıcı yüzeyinden itibaren 0,5 m aralıklarla değışen değęler olmak üzere yarı küre topraklayıcı çevresindeki U gerilim değęi bulunur.



şekil 4.11 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcı için SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Tablo 4.2 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının SEY ile bulunan potansiyel değerleri

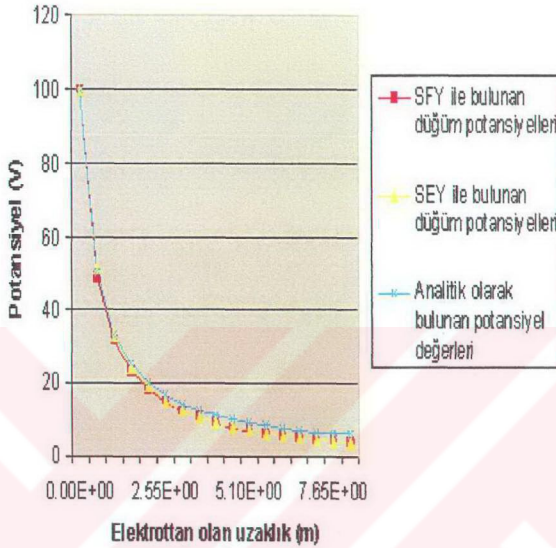
Elektrot Yarıçapı (m)	0.5
Elektrottan olan uzaklık (m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyelleri
0.00E+00	1.00E+02
5.10E-01	5.10E+01
1.02E+00	3.30E+01
1.53E+00	2.42E+01
2.04E+00	1.89E+01
2.55E+00	1.53E+01
3.06E+00	1.27E+01
3.57E+00	1.08E+01
4.08E+00	9.26E+00
4.59E+00	8.06E+00
5.10E+00	7.08E+00
5.61E+00	6.26E+00
6.12E+00	5.57E+00
6.63E+00	4.98E+00
7.14E+00	4.47E+00
7.65E+00	4.02E+00
8.16E+00	3.63E+00
8.67E+00	3.27E+00
9.18E+00	2.96E+00
9.69E+00	2.68E+00
1.02E+01	2.42E+00
1.07E+01	2.19E+00
1.12E+01	1.98E+00
1.17E+01	1.78E+00
1.22E+01	1.60E+00
1.28E+01	1.44E+00
1.33E+01	1.29E+00
1.38E+01	1.14E+00
1.43E+01	1.01E+00
1.48E+01	8.88E-01
1.53E+01	7.72E-01
1.58E+01	6.64E-01
1.63E+01	5.62E-01
1.68E+01	4.67E-01
1.73E+01	3.77E-01
1.79E+01	2.91E-01
1.84E+01	2.11E-01
1.89E+01	1.35E-01
1.94E+01	6.45E-02
1.99E+01	0.00E+00

Topraklayıcıdan belirli bir uzaklıkta bulunan bir noktanın potansiyel değeri ϕ ise U gerilim değerinden ϕ_0 potansiyel değerinin çıkarılması ile elde edilir. Tablo 4.3'de 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının küre yüzeyinde itibaren 8 m uzaklıktaki, 0,5 m aralıklarla değişen r eksenli boyunca meydana gelen potansiyel dağılımının analitik, SFY ve SEY ile elde edilmiş değerleri verilmiştir. Bu değerlerden de görüldüğü gibi topraklayıcı yakınında SFY, SEY ve analitik olarak elde edilen değerler birbirlerine oldukça yakındırlar. Bu değerlerin birbirlerine yakın olması özellikle topraklayıcı yakında, SEY ve SFY ile de potansiyel dağılım hesaplarının yapılabileceği sonucunu desteklemektedir.

Tablo 4.3 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımın SFY, SEY ve analitik olarak bulunan değerleri

Elektrot Yarıçapı (m)	0.5		
Elektrottan olan uzaklık (m)	SFY ile bulunan düğüm potansiyelleri	SEY ile bulunan düğüm potansiyelleri	Analitik olarak bulunan potansiyel değerleri
0.00E+00	100	1.00E+02	100
5.10E-01	48.74999986	5.10E+01	50
1.02E+00	31.66666648	3.30E+01	33.33333333
1.53E+00	23.12499979	2.42E+01	25
2.04E+00	17.99999978	1.89E+01	20
2.55E+00	14.58333331	1.53E+01	16.66666667
3.06E+00	12.14285691	1.27E+01	14.28571429
3.57E+00	10.31249977	1.08E+01	12.5
4.08E+00	8.888888655	9.26E+00	11.11111111
4.59E+00	7.749999768	8.06E+00	10
5.10E+00	6.81818159	7.08E+00	9.090909091
5.61E+00	6.041666442	6.26E+00	8.333333333
6.12E+00	5.384615165	5.57E+00	7.692307692
6.63E+00	4.821428357	4.98E+00	7.142857143
7.14E+00	4.333333125	4.47E+00	6.666666667
7.65E+00	3.906249798	4.02E+00	6.25
8.16E+00	3.529411569	3.63E+00	5.882352941

Tablo 4.3'de verilen 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY, SEY ve analitik olarak bulunan değerlerinin grafik gösterimi Şekil 4.12'de verilmiştir.

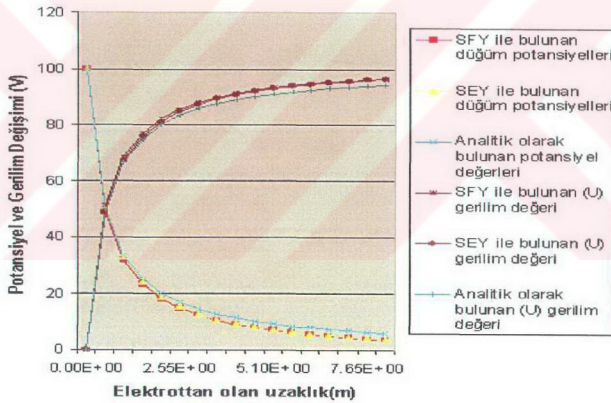


Şekil 4.12 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının SFY, SEY ve analitik olarak bulunan potansiyel dağılımları

0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının çevresinde oluşan gerilim değişiminin belirtilen yöntemlerle bulunan değerleri Tablo 4.4'de verilmiştir. Tablo 4.4'den de görüldüğü gibi yarı küre topraklayıcıdan uzaklaştıkça gerilim (U) değeri artmaktadır. U gerilim değeri yani yarı küre topraklayıcı yüzeyindeki potansiyelden, küre yüzeyinde r kadar uzaklıktaki bir noktanın potansiyeli arasındaki fark olan gerilim değeri, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi bir gerilim hunisine benzer şekilde uzaklık artıkça gerilimin değişiminin de artması beklenmektedir. SFY, SEY ve analitik olarak yapılan tüm hesaplamalarda Tablo 4.4 ve Şekil 4.13'den de görülebileceği gibi potansiyel değişimi uzaklığa bağlı olarak azalırken bir potansiyel çadırına ve gerilim değişimi uzaklığa bağlı olarak artarak bir gerilim hunisine benzeyerek beklendiği gibi bir görüntü oluşturmalarından dolayı SEY, SFY kullanılarak da bu hesaplamaların yapılabilceği görüşünü desteklemektedir.

Tablo 4.4 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının SFY, SEY ve analitik olarak bulunan potansiyel dağılımı ve gerilim değerleri

Elektrot Yarıçapı (m)	0.5					
Elektrottan olan uzaklık (m)	SFY ile bulunan düğüm potansiyelleri	SEY ile bulunan düğüm potansiyelleri	Analitik olarak bulunan potansiyel değerleri	SFY ile bulunan (U) gerilim değeri	SEY ile bulunan (U) gerilim değeri	Analitik olarak bulunan (U) gerilim değeri
0.00E+00	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5.10E-01	4.87E+01	5.10E+01	5.00E+01	5.13E+01	4.90E+01	5.00E+01
1.02E+00	3.17E+01	3.30E+01	3.33E+01	6.83E+01	6.70E+01	6.67E+01
1.53E+00	2.31E+01	2.42E+01	2.50E+01	7.69E+01	7.58E+01	7.50E+01
2.04E+00	1.80E+01	1.89E+01	2.00E+01	8.20E+01	8.11E+01	8.00E+01
2.55E+00	1.46E+01	1.53E+01	1.67E+01	8.54E+01	8.47E+01	8.33E+01
3.06E+00	1.21E+01	1.27E+01	1.43E+01	8.79E+01	8.73E+01	8.57E+01
3.57E+00	1.03E+01	1.08E+01	1.25E+01	8.97E+01	8.92E+01	8.75E+01
4.08E+00	8.89E+00	9.26E+00	1.11E+01	9.11E+01	9.07E+01	8.89E+01
4.59E+00	7.75E+00	8.06E+00	1.00E+01	9.23E+01	9.19E+01	9.00E+01
5.10E+00	6.82E+00	7.08E+00	9.09E+00	9.32E+01	9.29E+01	9.09E+01
5.61E+00	6.04E+00	6.26E+00	8.33E+00	9.40E+01	9.37E+01	9.17E+01
6.12E+00	5.38E+00	5.57E+00	7.69E+00	9.46E+01	9.44E+01	9.23E+01
6.63E+00	4.82E+00	4.96E+00	7.14E+00	9.52E+01	9.50E+01	9.29E+01
7.14E+00	4.33E+00	4.47E+00	6.67E+00	9.57E+01	9.55E+01	9.33E+01
7.65E+00	3.91E+00	4.02E+00	6.25E+00	9.61E+01	9.60E+01	9.38E+01
8.16E+00	3.53E+00	3.63E+00	5.88E+00	9.65E+01	9.64E+01	9.41E+01



Şekil 4.13 0,5 m yarıçapındaki yarı küre topraklayıcının civarında gerilimin ve potansiyel dağılımının uzaklığa bağlı olarak değişimleri

Yarı küre topraklayıcının farklı çaplarda 0,02, 0,04, 0,06, 0,08, 0,1 ve 1 m çapında olması durumunda r eksenı boyunca çevresindeki potansiyel dağılımı hesapları sonucu elde edilen değerler Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5 Farklı çaplardaki yarı küre topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ve SEY ile bulunan değerleri

Elektrot Çapı (m)	0.02		0.04		0.06		0.08		0.1		1	
Elektrottan olan uzaklık (m)	SFY	SEY	SFY	SEY	SFY	SEY	SFY	SEY	SFY	SEY	SFY	SEY
0.00E+00	100	1.00E+02	100	1.00E+02	100	1.00E+02	100	1.02E+02	100	1.00E+02	100	1.00E+02
5.10E-01	1.911764	1.89E+00	3.750001	4.34E+00	5.518868	6.19E+00	7.222222	8.33E+00	8.863636	1.07E+01	48.75	5.10E+01
1.02E+00	0.940594	9.30E-01	1.862746	2.27E+00	2.76689	3.17E+00	3.653846	4.40E+00	4.523809	5.46E+00	31.66667	3.30E+01
1.53E+00	0.612582	6.14E-01	1.217106	1.45E+00	1.813725	2.08E+00	2.402597	2.86E+00	2.983871	3.55E+00	23.125	2.42E+01
2.04E+00	0.447761	4.49E-01	0.89109	1.07E+00	1.330049	1.54E+00	1.764705	2.11E+00	2.195122	2.62E+00	18	1.89E+01
2.55E+00	0.346805	3.50E-01	0.694445	8.27E-01	1.037549	1.19E+00	1.377952	1.63E+00	1.715686	2.03E+00	14.58333	1.53E+01
3.06E+00	0.282392	2.83E-01	0.562914	6.70E-01	0.841584	9.69E-01	1.118421	1.32E+00	1.393442	1.65E+00	12.14286	1.27E+01
3.57E+00	0.235042	2.36E-01	0.468751	5.58E-01	0.701133	8.08E-01	0.932203	1.10E+00	1.161971	1.36E+00	10.3125	1.08E+01
4.08E+00	0.199501	2.00E-01	0.398011	4.73E-01	0.595533	6.85E-01	0.792079	9.35E-01	0.987654	1.17E+00	8.888889	9.26E+00
4.59E+00	0.171784	1.72E-01	0.342921	4.07E-01	0.513245	5.90E-01	0.682819	8.05E-01	0.851648	1.01E+00	7.75	8.06E+00
5.10E+00	0.1497	1.50E-01	0.298805	3.55E-01	0.447316	5.13E-01	0.595238	7.00E-01	0.742574	8.77E-01	6.818182	7.08E+00
5.61E+00	0.131578	1.31E-01	0.262682	3.11E-01	0.393309	4.51E-01	0.523465	6.15E-01	0.653193	7.71E-01	6.041666	6.26E+00
6.12E+00	0.116472	1.16E-01	0.232559	2.75E-01	0.348258	3.99E-01	0.463576	5.44E-01	0.578512	6.82E-01	5.384615	5.57E+00
6.63E+00	0.103686	1.03E-01	0.207056	2.45E-01	0.310107	3.54E-01	0.412844	4.84E-01	0.515267	6.08E-01	4.821428	4.96E+00
7.14E+00	0.092724	9.23E-02	0.185186	2.19E-01	0.277382	3.16E-01	0.369318	4.32E-01	0.460993	5.41E-01	4.333333	4.47E+00
7.65E+00	0.083222	8.27E-02	0.166224	1.96E-01	0.249004	2.83E-01	0.331585	3.87E-01	0.413907	4.85E-01	3.90625	4.02E+00
8.16E+00	0.074906	7.44E-02	0.149626	1.76E-01	0.224159	2.55E-01	0.298507	3.49E-01	0.37267	4.36E-01	3.529412	3.63E+00
8.67E+00	0.067567	6.70E-02	0.134977	1.58E-01	0.202227	2.29E-01	0.269321	3.13E-01	0.336257	3.93E-01	3.194444	3.27E+00
9.18E+00	0.061043	6.04E-02	0.121952	1.43E-01	0.182724	2.07E-01	0.243363	2.83E-01	0.303867	3.54E-01	2.894737	2.96E+00
9.69E+00	0.055205	5.45E-02	0.110295	1.29E-01	0.165267	1.88E-01	0.220126	2.55E-01	0.274889	3.19E-01	2.625	2.68E+00
1.02E+01	0.04995	4.92E-02	0.099801	1.16E-01	0.149551	1.68E-01	0.199203	2.30E-01	0.248756	2.88E-01	2.380952	2.42E+00
1.07E+01	0.045195	4.44E-02	0.090305	1.05E-01	0.135327	1.52E-01	0.180265	2.07E-01	0.225118	2.60E-01	2.159091	2.19E+00
1.12E+01	0.040872	4.01E-02	0.08167	9.45E-02	0.122393	1.37E-01	0.163043	1.87E-01	0.20362	2.34E-01	1.956522	1.98E+00
1.17E+01	0.036924	3.61E-02	0.073785	8.50E-02	0.110581	1.23E-01	0.147313	1.68E-01	0.183982	2.11E-01	1.770833	1.78E+00
1.22E+01	0.033305	3.24E-02	0.066556	7.64E-02	0.09975	1.11E-01	0.13289	1.51E-01	0.165975	1.89E-01	1.6	1.60E+00
1.26E+01	0.029976	2.91E-02	0.059904	6.84E-02	0.089784	9.91E-02	0.119617	1.35E-01	0.149402	1.70E-01	1.442308	1.44E+00
1.33E+01	0.026902	2.60E-02	0.053764	6.11E-02	0.080583	8.84E-02	0.107362	1.21E-01	0.134099	1.51E-01	1.296296	1.29E+00
1.38E+01	0.024056	2.31E-02	0.048077	5.42E-02	0.072062	7.88E-02	0.096012	1.07E-01	0.119926	1.35E-01	1.160714	1.14E+00
1.43E+01	0.021413	2.04E-02	0.042796	4.79E-02	0.064148	6.94E-02	0.08547	9.49E-02	0.106761	1.19E-01	1.034483	1.01E+00
1.48E+01	0.018952	1.80E-02	0.037879	4.20E-02	0.056779	6.09E-02	0.075653	8.32E-02	0.094052	1.04E-01	0.916667	8.88E-01
1.53E+01	0.016855	1.57E-02	0.033289	3.65E-02	0.0499	5.29E-02	0.066489	7.23E-02	0.083056	9.06E-02	0.806452	7.72E-01
1.58E+01	0.014507	1.35E-02	0.028995	3.14E-02	0.043464	4.54E-02	0.057915	6.21E-02	0.072347	7.79E-02	0.703125	6.84E-01
1.63E+01	0.012492	1.15E-02	0.024969	2.65E-02	0.03743	3.85E-02	0.049875	5.25E-02	0.062305	6.59E-02	0.606061	5.62E-01
1.68E+01	0.0106	9.55E-03	0.021187	2.20E-02	0.03176	3.19E-02	0.042322	4.36E-02	0.05287	5.46E-02	0.514706	4.87E-01
1.73E+01	0.008818	7.75E-03	0.017626	1.77E-02	0.026424	2.57E-02	0.035211	3.51E-02	0.043988	4.40E-02	0.428571	3.77E-01
1.79E+01	0.007139	6.06E-03	0.014269	1.37E-02	0.021392	1.99E-02	0.028506	2.72E-02	0.035612	3.41E-02	0.347222	2.91E-01
1.84E+01	0.005552	4.46E-03	0.011099	9.93E-03	0.016639	1.44E-02	0.022173	1.97E-02	0.027701	2.47E-02	0.27027	2.11E-01
1.89E+01	0.004052	2.96E-03	0.008099	6.37E-03	0.012142	9.23E-03	0.016181	1.26E-02	0.020216	1.58E-02	0.197368	1.35E-01
1.94E+01	0.00263	1.55E-03	0.005258	3.03E-03	0.007882	4.40E-03	0.010504	6.00E-03	0.013123	7.53E-03	0.128205	6.45E-02
1.99E+01	0.001281	2.61E-04	0.002561	0.00E+00	0.00384	0.00E+00	0.005118	0.00E+00	0.006394	0.00E+00	0.0625	0.00E+00
2.00E+01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 4.5'den de görülebileceği gibi farklı çaplarda olan yarı küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel değerleri uzaklık arttıkça hızla azalmaktadır, buna bağlı olarak da adım gerilim değerleri de düşmektedir.

BÖLÜM 5 ŞERİT TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY VE SEY İLE SAYISAL ANALİZİ

5.1 Şerit Topraklayıcı Hakkında Genel Bilgi

Şerit topraklayıcılar en az 3 mm kalınlığında ve 100 mm^2 kesitinde galvanizli demir şeritten yapılırlar; bundan başka yuvarlak iletkenler veya örgülü teller de bu amaçla kullanılabilirler. Şerit topraklayıcılar çok derine gömülmezler. Onun için bunlara yüzeysel topraklayıcı adı verilir. İklim koşulları göz önünde bulundurularak sürekli olarak nemli kalacak ve donma olmayacak şekilde bir gömme derinliği belirlenir; bu derinlik ortalama 0,5 -1 m kadardır [1].

En basit şerit topraklayıcı, boylu boyuna döşenen bir şerittir. Bunun yayılma direnci, öncelikle şeridin uzunluğuna bağlıdır. Bu nedenle yalnız yassı çelik şerit kullanılır. Yassı şeritler toprağa, yüksek kenarı yukarı 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.

Bu bölümde, bir şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının, çubuk topraklayıcıda olduğu gibi SFY ve SEY kullanılarak bulunması amaçlanmıştır. Bu nedenle uzunlukları 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 50 metre olan şerit topraklayıcıların çevresindeki potansiyel dağılımı SFY kullanılarak MS EXCEL hesaplama yöntemiyle ve SEY kullanılarak FEMM bilgisayar programı yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalar, farklı uzunluklarda, farklı derinliklerde ve farklı dielektrik sabitli toprak içerisinde bulunan şerit topraklayıcılar için yapılmıştır. Bu hesaplamalarda da çubuk topraklayıcıda kullanılan yaklaşım gereği, topraklayıcıya 100 volt uygulandığı ve topraklayıcıdan 20 m uzaklıkta bulunan her noktadaki potansiyelin 0 volt olduğu varsayımı yapılmıştır.

5.2 Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY Kullanılarak Hesaplanması İçin Kurulan Model

Bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla geliştirilen modellerde, şerit topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki toprak yüzeyindeki potansiyelin sıfır olduğu ve topraklayıcıya uygulanan gerilim değerinin 100 volt olduğu varsayımı yapılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan sonlu farklar yönteminde, tüm sınır koşullarının verilmesi ve incelenecek bölgenin kapalı bir bölge olması gerektiği koşulu göz önünde bulundurularak modeller oluşturulmuştur.

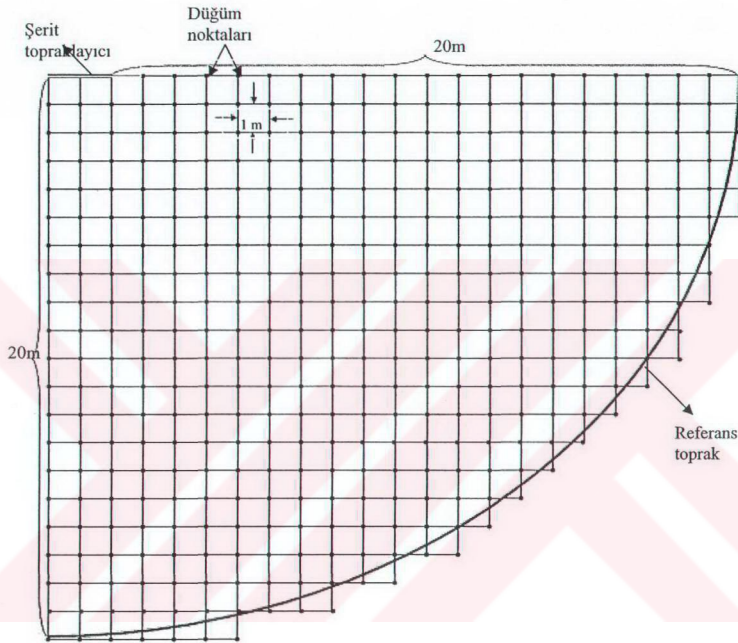
SFY göre incelenecek bölge, öncelikle dikdörtgen, kare, üçgen gibi şekillere sahip gözlerden oluşan bir ağ ile bölünür. Ağ, problemin tipine göre bölgenin bazı yerlerinde daha küçük ya da daha büyük gözlerden oluşturulabilir. Daha sonra ağ üzerindeki her bir düğümün potansiyeli, komşu düğümlerin potansiyellerine bağlı olarak yazılır.

Şerit topraklayıcı için geliştirilen modellerde, topraklayıcı ile referans toprak arasındaki bölge kare gözlerden oluşan düzgün ağlara bölünmüş ve her bir ağı oluşturan düğüm potansiyelleri MS EXCEL programı kullanılarak hesaplanmıştır. Problemin çözümünde, iki boyutlu kartezyen koordinat sistemindeki Laplace denkleminin, sınır koşulları da göz önünde bulundurularak SFY ile elde edilen ifadeleri kullanılmıştır. Buna göre şerit topraklayıcının uzunluğunun, gömülme derinliğinin değişmesi ve farklı dielektrik sabitine sahip toprak yapısı içerisinde bulunması durumunda, çevresindeki potansiyel dağılımının analizi SFY kullanılarak yapılmıştır. Bu hesaplamalara bağlantılı olarak toprak yüzeyindeki, özellikle canlılar açısından önem taşıyan adım geriliminin değişimi de gösterilmiştir.

Şekil 5.1'de şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla kurulan model görülmektedir. Modelde şerit topraklayıcı yeryüzeyine paralel olarak gömülmüş ve yeryüzeyi ile aynı seviyede olduğu düşünülmüştür.

Şekil 5.1'de şerit topraklayıcı modelinde, topraklayıcı ile 20 m uzaklıktaki referans toprak arasındaki mesafe SFY kullanabilmek amacıyla 1 m'lik düzgün kare gözlerle

bölünmüştür. Her bir kare gözü temsil eden düğüm potansiyelleri SFY ile MS EXCEL programı kullanılarak hesaplanabilir. Göz sıklığı artırılarak daha hassas hesaplamalar yapılması mümkündür. Bu amaçla SFY ile yapılan hesaplamalarda kare gözler 0,5 m'lik olarak ele alınmıştır.

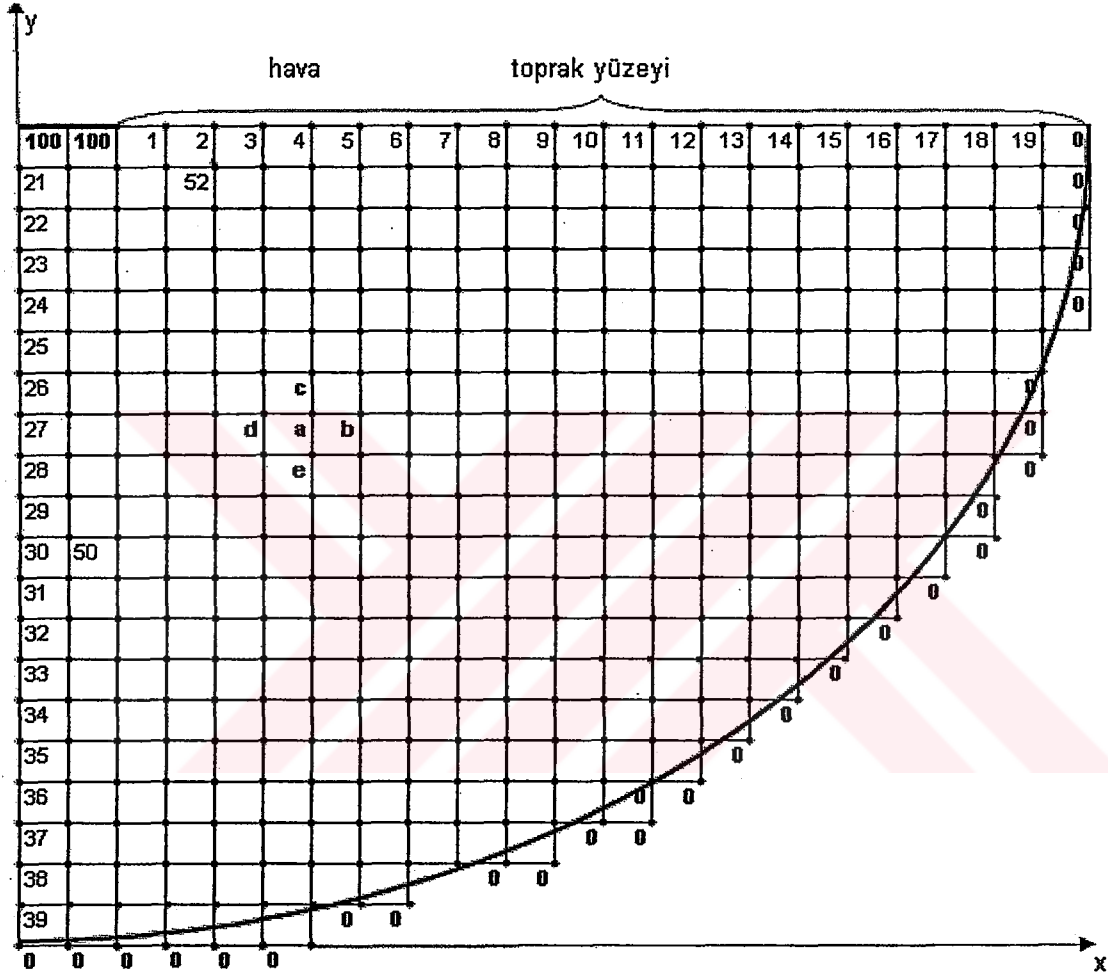


Şekil 5.1 Şerit topraklayıcının SFY modeli

5.3 Sonlu Farklar Yöntemi Kullanılarak Düğüm Potansiyel Denklemlerinin Yazılması

Şerit topraklayıcı, birçok noktasal kaynağın yanyana getirilmesi ile elde olunan bir çizgisel kaynağın özelliklerini sahiptir. Akımın bu kaynaktan eşit değerlerde toprağa geçtiği kabul edilir. Her yönden sonsuz boyutta toprakla çevrilmiş bir şerit topraklayıcıya ait potansiyel dağılımı, aynen bundan önce söz konusu olan çubuk topraklayıcıda olduğu gibidir; ancak şu farkla ki, çubuk topraklayıcı dikey olduğu halde şerit topraklayıcı yeryüzeyine yatay konumdadır. Şerit topraklayıcının

uçundaki potansiyel dağılımı x-y düzleminde kartezyen koordinat yaklaşımı yapılarak, SFY ile hesaplanmak üzere oluşturulan model Şekil 5.2'de verilmiştir. Şerit topraklayıcının yan kenarından itibaren oluşan potansiyel dağılımı ise SFY ile silindrisel koordinatlarda hesaplanabilir. Bu bölümde, şerit topraklayıcının ucundan itibaren oluşan potansiyel dağılımını bulmak amacıyla toprak yüzeyindeki düğümlerin potansiyel denklemleri SFY kullanılarak yazılması gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Şerit topraklayıcı için SFY ile düğüm potansiyel denklemlerinin yazılması için kurulan model

Şekil 5.2'den görüleceği gibi şerit topraklayıcıya uygulanan gerilim, topraklayıcıdan geçecek olan akımın sabit olmasından dolayı herhangi bir değişiklik göstermeyeceğinden ve hesap kolaylığı açısından 100 V olarak alınmıştır. Şerit topraklayıcının toprak yüzeyinden 20 m uzaklıktaki noktanın ve toprak içerisinde şerit topraklayıcı çevresindeki eşpotansiyel yüzeylerin bulunması amacıyla, topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her noktanın potansiyeli 0 Volt olarak kabul edilmiştir.

Şekil 5.2'de gösterilen toprak yüzeyindeki düğüm noktalarının denklemlerini iki boyutlu kartezyen koordinatlarda SFY ile yazarken (A.53) denkleminde de yararlanılır. Bu ifadeden görüldüğü gibi iki boyutlu kartezyen koordinat sisteminde toprak yüzeyindeki düğüm noktaları, hava ile toprak arasındaki yatay sınır düğümleri olduğu için hava ve toprağın dielektrik sabitleri de hesaplamalara katılır. Toprak içerisinde olduğu düşünülen tüm düğümlerin denklemleri SFY ile yazılırken (A.39) denkleminde yararlanılır ve y ekseninin üzerindeki düğümlerin denklemleri SFY ile yazılırken ise simetri göz önünde bulundurularak (5.3) denklemi olduğu gibi yazılır.

(A.53) denklemi kullanılarak toprak yüzeyindeki düğümlerden 2 numaralı düğüm için SFY ifadesi şu şekilde yazılabilir;

2 numaralı düğüm, toprak ile hava arasındaki yatay sınırdaki olduğu için havanın bağıl dielektrik sabiti $\epsilon_1 = 1$ ve toprağın bağıl dielektrik sabiti ise $\epsilon_2 = 9$ olarak alınıp, potansiyel ifadesi

$$V_1 + (2\epsilon_1/\epsilon_1 + \epsilon_2) V_{s2} + V_3 + (2\epsilon_2/\epsilon_1 + \epsilon_2) V_{s2} - 4V_2 = 0 \quad (5.1)$$

olacak şekilde yazılır. Toprak yüzeyindeki tüm düğümler için benzer şekilde denklemler yazılabilir.

(A.39) denklemi kullanılarak toprak içinde bulunan a düğümü için ise SFY ifadesi ise şu şekilde yazılabilir:

$$V_d + V_b + V_c + V_e - 4V_a = 0 \quad (5.2)$$

Toprak içindeki tüm düğümler içinde benzer şekilde denklemler yazılabilir. y eksenini üzerinde bulunan düğümler için ise SFY ifadesi ise şu şekilde yazılabilir;

30 numaralı düğüm sınır koşuluna göre kendisinin solunda bulunan 50 numaralı düğümün potansiyeline eşit olacaktır. Buna göre

$$V_{30} = V_{50} \quad (5.3)$$

olacak şekilde yazılabilir. y eksenini üzerindeki tüm düğümler için benzer şekilde denklemler yazılabilir.

Şekil 5.2'den görüleceği gibi ağ yapısı $1 \times 1 \text{ m}^2$ 'lik kare gözlerden oluşturulursa, düğüm sayısı 372 adet olup, potansiyeli bilinen düğümlerin sayısı ise; bunlar değeri 100 volt olan çubuk topraklayıcıyı oluşturan düğümler ve referans toprak üzerindeki değeri 0 volt olan düğümler olup toplam 32 adettir. Bilinmeyen düğümlerin potansiyellerini bulmak amacıyla çubuk topraklayıcıda olduğu gibi MS EXCEL hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu şekilde toprak yüzeyindeki, toprak içindeki potansiyel dağılımı kolaylıkla hesaplanmıştır.

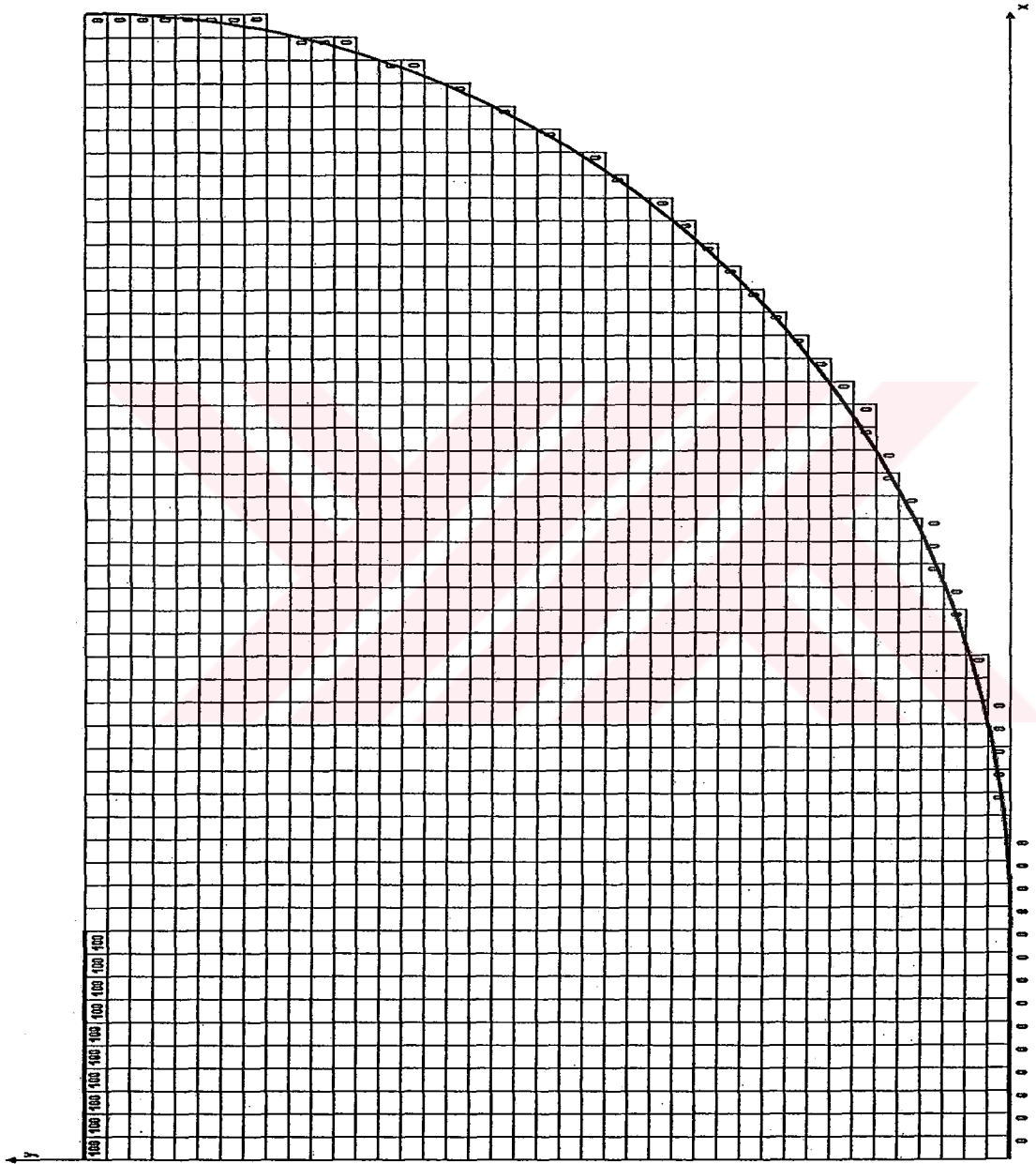
5.4 Farklı Uzunluklardaki Şerit Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SFY İle Hesabı

Bu bölümde, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 50 metre uzunluklarında şerit topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının bulunması amacıyla 5, 20 ve 50 m için kurulmuş sonlu fark modelleri ve bu modellerde yer alan düğüm potansiyellerinin ise hücresele denklem çözüm yöntemiyle bulunmuş olan değerleri verilmiştir. Diğer uzunluklar için 5, 10 ve 50 m için kurulan modellere benzer şekilde modeller kurulmuş ve hesap sonuç değerleri verilmiştir. Buna göre toprak yüzeyinde bulunan farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcının özellikle adım gerilim bakımından önemli olan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri, düğüm denklemleri ayrı ayrı yazılmadan kolaylıkla bulunmuştur.

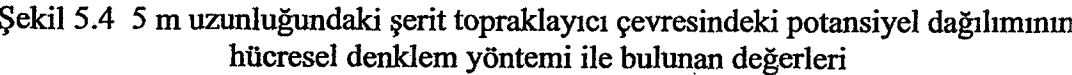
5.4.1 5 Metre Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı

5 metre uzunluğundaki bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla oluşturulan modelde $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ 'lik kare gözlerden oluşan bir ağ yapısı kurulmuş ve buna göre sonlu farklar modeli oluşturulmuştur. Bu modelin MS EXCEL'e taşınmasıyla her bir hücre 0,5 m olarak düşünülmüş ve 20 m uzaklıktaki referans toprak ile çubuk topraklayıcı arasındaki düğümler için toprak yüzeyindeki bölüm, 40 adet hücreyle benzeştirilmişlerdir. Şerit topraklayıcı 5 m uzunluğunda olup uygulanan gerilim 100 volt olduğundan, MS EXCEL'de şerit topraklayıcı uzunluğuna karşı düşen $0,5 \text{ m}$ 'lik 10 adet hücreye 100 volt değeri girilerek benzeşim yapılmıştır. Referans toprak olarak kabul edilen 20 m uzaklıktaki düğümlere karşı düşen hücrelere ise 0 volt değerleri girilmiştir. 5 m uzunluğundaki

şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı toprak yüzeyinde, toprak içinde ve y eksenindeki düğümlere karşılık düşen hücrelerin değerleri bulunarak çıkartılmıştır. Buna göre SFY kullanılarak oluşturulan Şekil 5.3'deki modelin MS EXCEL'e taşındıktan sonra hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulunan potansiyel dağılımı Şekil 5.4'de verilmiştir.



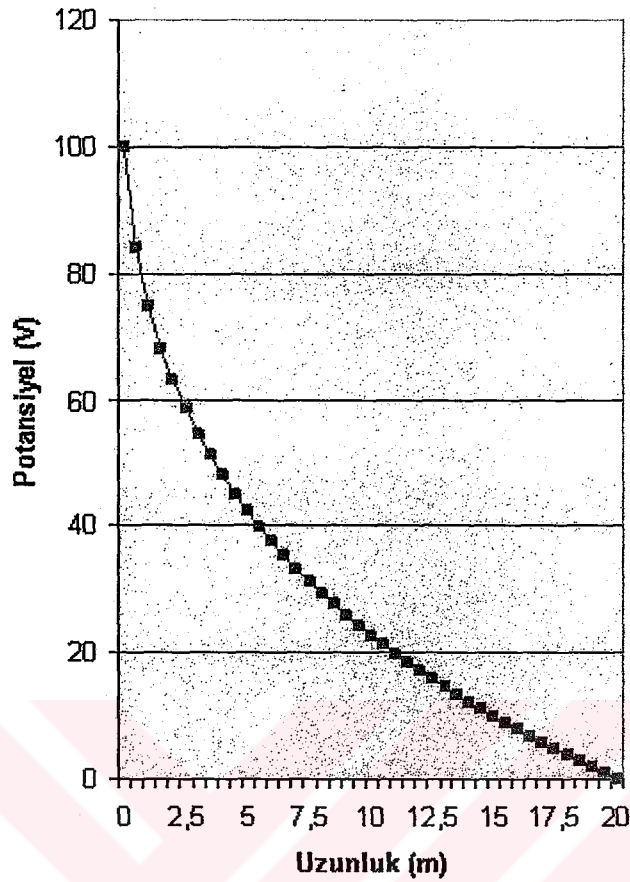
Şekil 5.3 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için kurulan SFY modeli



Şekil 5.4'den görüldüğü gibi hücresel denklem çözüm yöntemi ile 0,5 x 0,5 m²'lik gözlemlere sahip bir ağ yapısı kurularak 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının Şekil 5.2'de de gösterildiği gibi toprak yüzeyinde, toprak içinde ve y eksenini üzerindeki potansiyel dağılımı bulunmuştur. Özellikle canlılar açısından önemli olan adım geriliminin bulunabilmesi için toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Buna göre 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının Şekil 5.4'de toprak yüzeyinde sonlu farklar yöntemi kullanılarak elde edilen potansiyel değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri düşmektedir.

Tablo 5.1 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzey potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SFY
0	100
0,5	83,950884
1	74,75614
1,5	68,190032
2	62,936368
2,5	58,481855
3	54,579181
3,5	51,088222
4	47,920209
4,5	45,014462
5	42,327208
5,5	39,825582
6	37,484134
6,5	35,282658
7	33,20479
7,5	31,237044
8	29,36815
8,5	27,588568
9	25,890141
9,5	24,26582
10	22,709467
10,5	21,215691
11	19,779725
11,5	18,397322
12	17,064673
12,5	15,778338
13	14,535181
13,5	13,332322
14	12,16708
14,5	11,03693
15	9,9394361
15,5	8,8721919
16	7,8327231
16,5	6,8183531
17	5,8259892
17,5	4,8517769
18	3,8905476
18,5	2,9350273
19	1,9750988
19,5	0,9987458
20	0



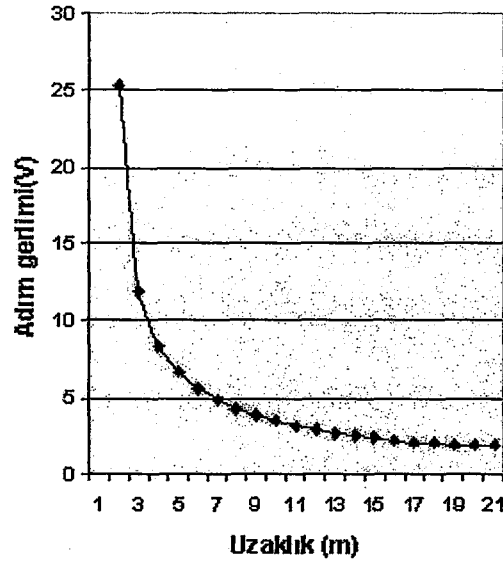
Şekil 5.5 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

Şekil 5.5'den görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri düşmektedir. Yukarıdaki şekil simetri eksenine göre aynı değişimi göstereceğinden bu tip potansiyel değişiminin oluşturduğu şekle "potansiyel çadırı" adı verilmektedir. 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı hesabı için sonlu farklar yöntemi kullanılarak yazılan düğüm denklemlerinin hücresel denklem çözüm yöntemiyle kolaylık bulunduğunu ve elde edilen sonuçların literatürde belirtilen potansiyel değişimlerine uygun olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi adım gerilimi, topraklayıcının yakınında potansiyel değişimi en büyük değerini aldığından, topraklayıcıya yakın olan yerlerde daha büyük bir değer alır ve topraklayıcıdan uzaklaştıkça adım gerilimi değeri hızla düşer. 5 m'lik çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan adım gerilimi değişimi ise Tablo 2.2'de verilmiş olup, topraklayıcı yakınında belirtildiği gibi büyük, ancak uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Buradan da görüldüğü gibi bu tip problemlerin sonlu farklar yöntemi kullanılarak hesaplanması, topraklayıcı çevresindeki potansiyel değişimin topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalması

gerektiği ve canlılar için önem taşıyan adım geriliminin topraklayıcı yakınında büyük, uzaklaştıkça hızla azalması gerektiği kriterlerini sağladığı için ve beklenen sonuçları verdiği için rahatlıkla kullanılabilir. Adım gerilimi yaklaşık 1 m uzunluğundaki iki ayak arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlandığı için, yapılan modellerde her bir hücre 0,5 m olarak düşünüldüğünden dolayı Tablo 5.2'de verilen değerler 1 m uzaklıkta iki düğüm arasındaki potansiyel farkını göstermektedir.

Tablo 5.2 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Aralarında 1m uzaklık olan iki düğümün potansiyel değerleri		Adım Gerilimi
1.düğüm(hücre)	2.düğüm(hücre)	
100	74,75613961	25,24386039
74,75613961	62,9363675	11,81977211
62,9363675	54,57918113	8,357186369
54,57918113	47,92020882	6,658972308
47,92020882	42,32720766	5,593001168
42,32720766	37,48413356	4,843074099
37,48413356	33,20479016	4,279343401
33,20479016	29,36814961	3,83664055
29,36814961	25,89014091	3,478008699
25,89014091	22,70946684	3,180674065
22,70946684	19,77972468	2,929742164
19,77972468	17,06467341	2,715051273
17,06467341	14,53518105	2,529492357
14,53518105	12,16708046	2,368100593
12,16708046	9,9394361	2,227644355
9,9394361	7,832723149	2,106712951
7,832723149	5,825989238	2,00673391
5,825989238	3,890547606	1,935441632
3,890547606	1,975098778	1,915448828
1,975098778	0	1,975098778

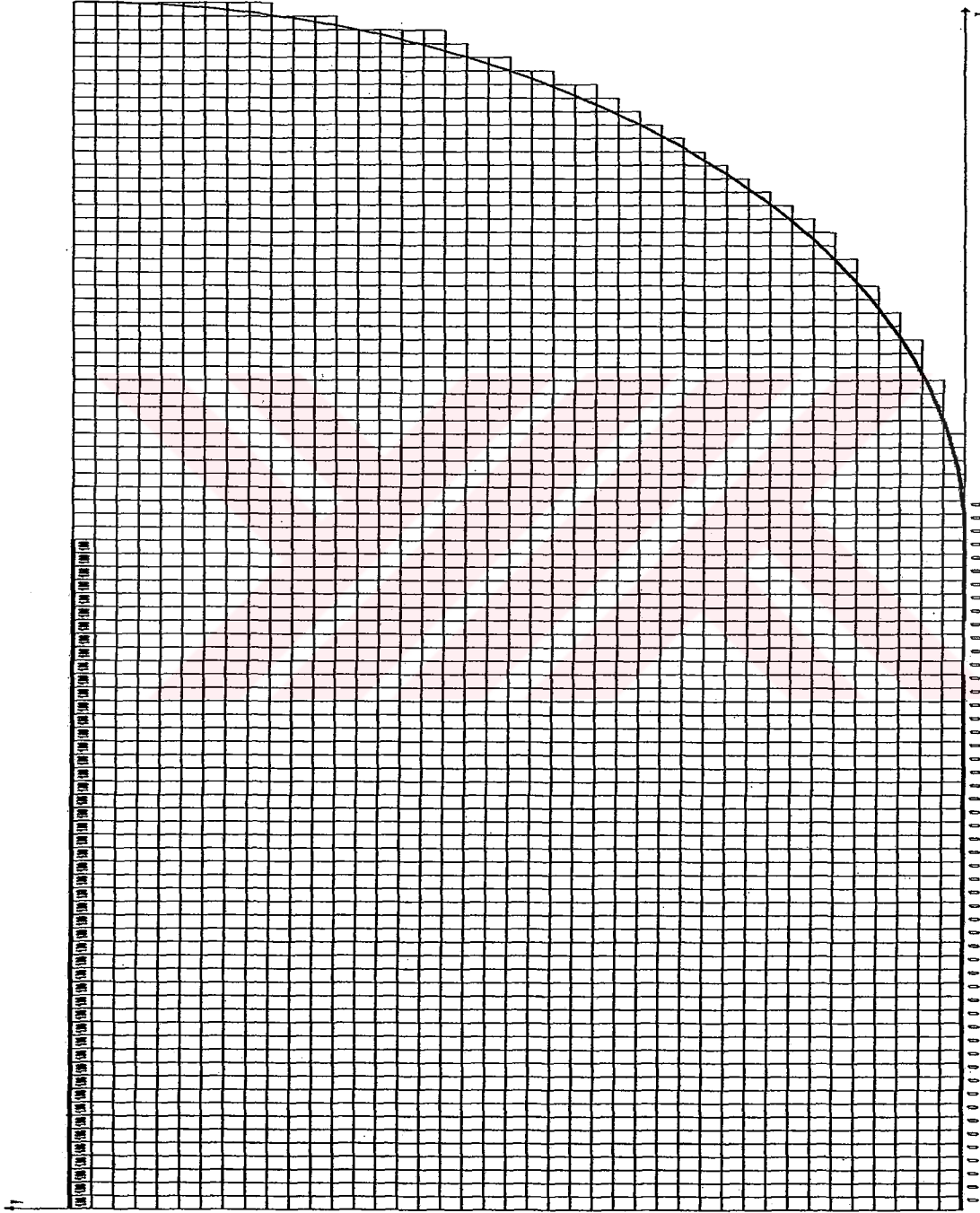


Şekil 5.6 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi

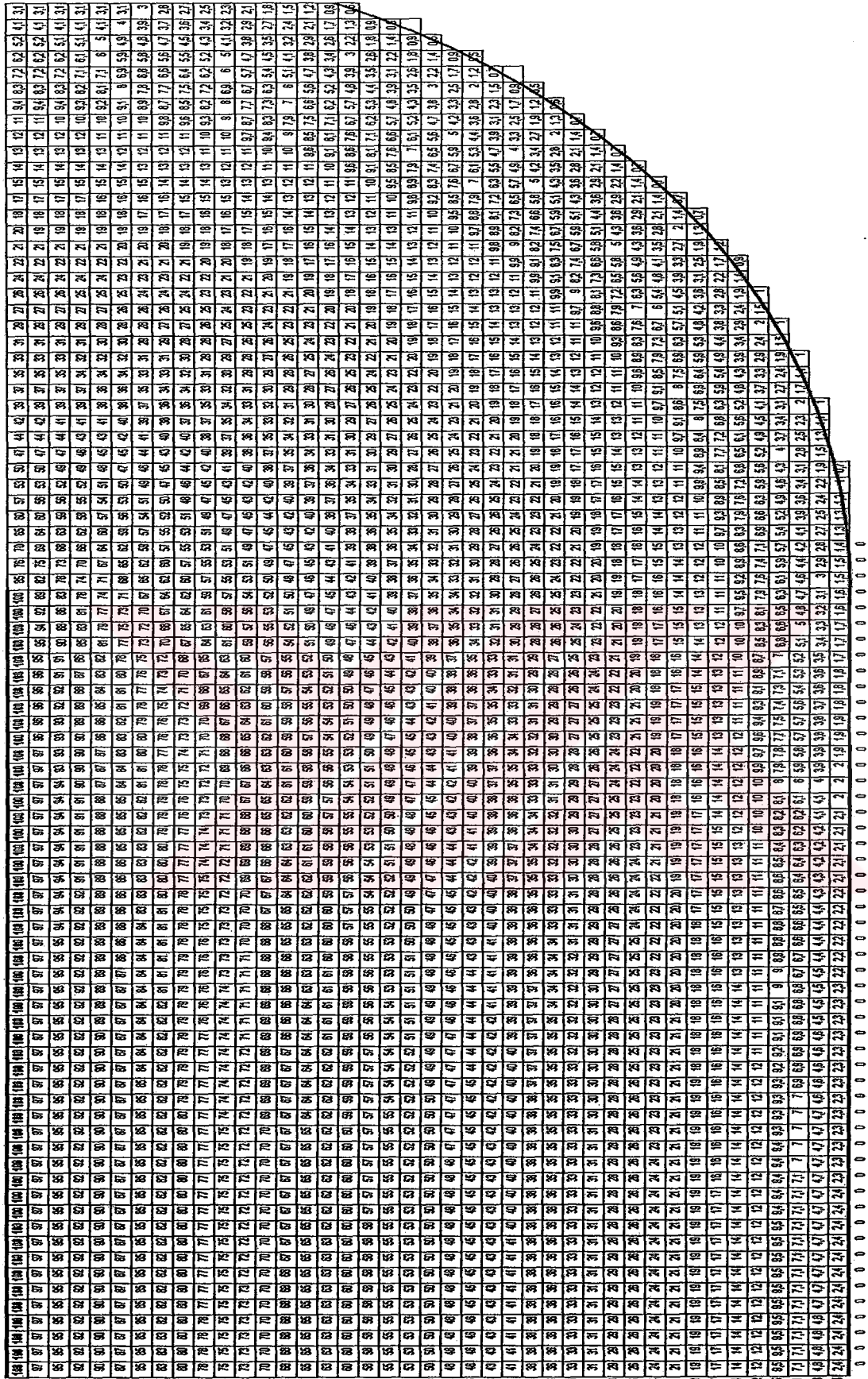
5.4.2 25 Metre Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı

25 metre uzunluğundaki bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla oluşturulan modelde $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ 'lik kare gözlerden oluşan bir ağ yapısı kurulmuş ve buna göre sonlu farklar modeli oluşturulmuştur. Bu modelin MS EXCEL'e taşınmasıyla her bir hücre $0,5 \text{ m}$ olarak düşünülmüş ve 20 m uzaklıktaki referans toprak ile çubuk topraklayıcı arasındaki düğümler için toprak yüzeyindeki bölüm, 40 adet hücreyle benzeştirilmiştir. Şerit topraklayıcı 25 m uzunluğunda olup uygulanan gerilim 100 volt olduğundan, MS EXCEL'de şerit topraklayıcı uzunluğuna karşı düşen $0,5 \text{ m}$ 'lik 50 adet hücreye 100 volt değeri girilerek benzeşim yapılmıştır. Referans toprak olarak kabul edilen 20 m uzaklıktaki düğümlere karşı düşen hücrelere ise 0 volt değerleri girilmiştir. 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı toprak yüzeyinde, toprak içinde ve y eksenindeki düğümlere karşılık düşen hücrelerin değerleri bulunarak çıkartılmıştır. Buna göre SFY kullanılarak oluşturulan Şekil 5.7'deki modelin MS EXCEL'e taşındıktan sonra hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulunan potansiyel dağılımı Şekil 5.8'de verilmiştir. Şekil 5.7'de verilen 25 m 'lik şerit topraklayıcı için kurulan modelde, şerit uzunluğu 25 m olduğu için hücresel denklem çözümünde her bir hücre $0,5 \text{ m}$ olarak düşünülürse 50 adet hücreye 100 volt değeri uygulanması gerekmektedir. Toprak yüzeyinde, toprak içinde ve y ekseninde sonlu farklar

yöntemi kullanılarak yazılan denklemlerin çözümlenmesi sonucu oluşan potansiyel dağılımı ise Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 5 m'lik şerit topraklayıcıda olduğu gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça düğüm potansiyel değerleri düşmektedir. Tablo 5.3'de 25 m'lik şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde sonlu farklar yöntemi ile bulunan düğüm potansiyel değerleri verilmiştir. Şekil 5.9'da ise toprak yüzeyinde oluşan potansiyel değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5.7 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için kurulan SFY modeli

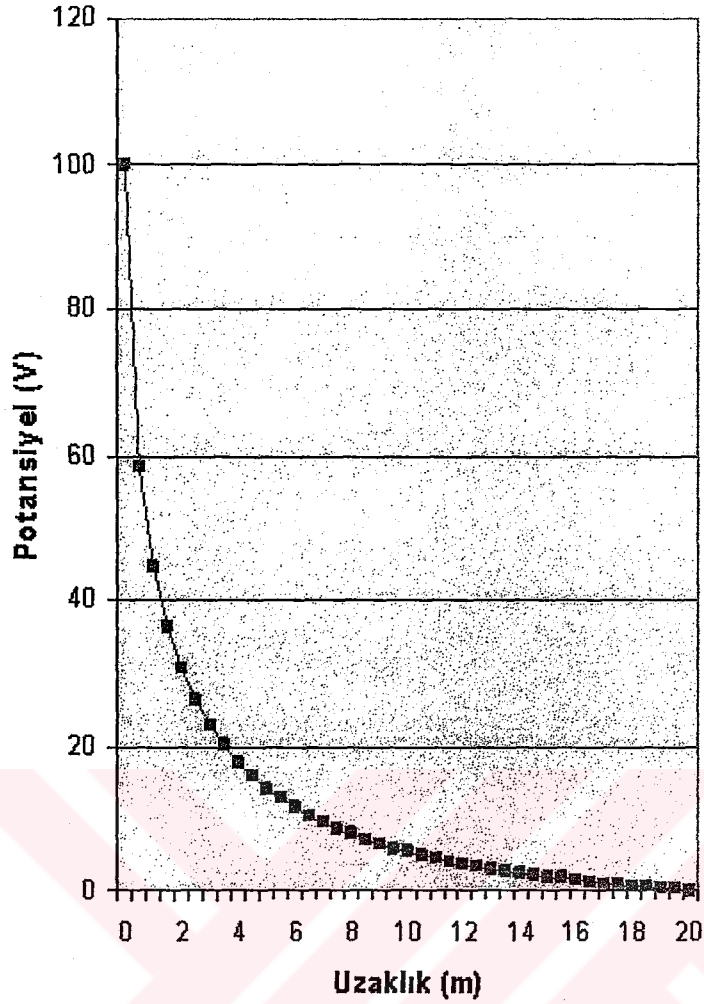


Şekil 5.8 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının hücresel denklem yöntemi ile bulunan değerleri

Tablo 5.3'de 25 m'lik şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde bulunan düğüm potansiyel değerleri verilmiştir ve Şekil 2.9'da ise toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi gösterilmiştir.

Tablo 5.3 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SFY
0	100
0,5	84,88292
1	76,139652
1,5	69,831973
2	64,736857
2,5	60,379347
3	56,531655
3,5	53,065261
4	49,899019
4,5	46,977594
5	44,26113
5,5	41,71972
6	39,330202
6,5	37,074172
7	34,9367
7,5	32,905458
8	30,970114
8,5	29,1219
9	27,353286
9,5	25,657746
10	24,02957
10,5	22,463724
11	20,955733
11,5	19,501592
12	18,097691
12,5	16,74075
13	15,427765
13,5	14,155956
14	12,922722
14,5	11,725591
15	10,562161
15,5	9,4300367
16	8,3267293
16,5	7,2495168
17	6,1952185
17,5	5,1598298
18	4,1379359
18,5	3,1218718
19	2,100939
19,5	1,0624126
20	0

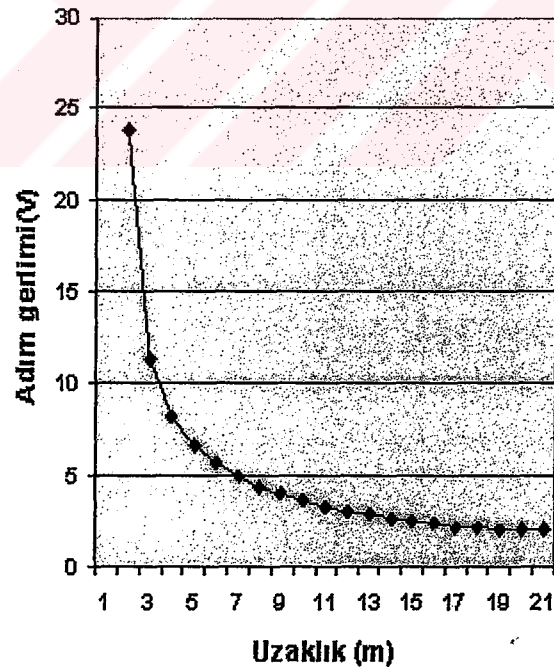


Şekil 5.9 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

25 m uzunluktaki şerit topraklayıcı için toprak yüzeyinde bulunan adım gerilimleri Tablo 5.4'de verilmiştir. Tablo 5.4'den görüldüğü gibi adım gerilimi değerleri, 5 m uzunluğunda olan şerit topraklayıcıdaki gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. 25 m'lik çubuk topraklayıcının çevresinde oluşan adım gerilimi değişimi ise Tablo 5.4'de verilmiş olup, topraklayıcı yakında belirtildiği gibi büyük, ancak uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Tablo 5.4'de verilen değerler toprak yüzeyinde 5 m uzaklıktaki iki düğüm arasındaki potansiyel farkını göstermektedir.

Tablo 5.4 25m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Aralarında 1m uzaklık olan iki düğümün potansiyel değerleri		Adım Gerilimi
1.düğüm(hücre)	2.düğüm(hücre)	
100	76,13965238	23,86034762
76,13965238	64,73685745	11,40279493
64,73685745	56,53165533	8,205202115
56,53165533	49,89901911	6,632636219
49,89901911	44,26113	5,637889111
44,26113	39,33020219	4,930927819
39,33020219	34,93670033	4,393501859
34,93670033	30,97011444	3,96658589
30,97011444	27,35328609	3,616828344
27,35328609	24,02957029	3,323715803
24,02957029	20,95573252	3,073837773
20,95573252	18,09769094	2,858041581
18,09769094	15,42776478	2,669926151
15,42776478	12,92272217	2,505042614
12,92272217	10,56216102	2,360561154
10,56216102	8,326729347	2,235431669
8,326729347	6,195218515	2,131510832
6,195218515	4,137935906	2,05728261
4,137935906	2,10093899	2,036996916
2,10093899	0	2,10093899



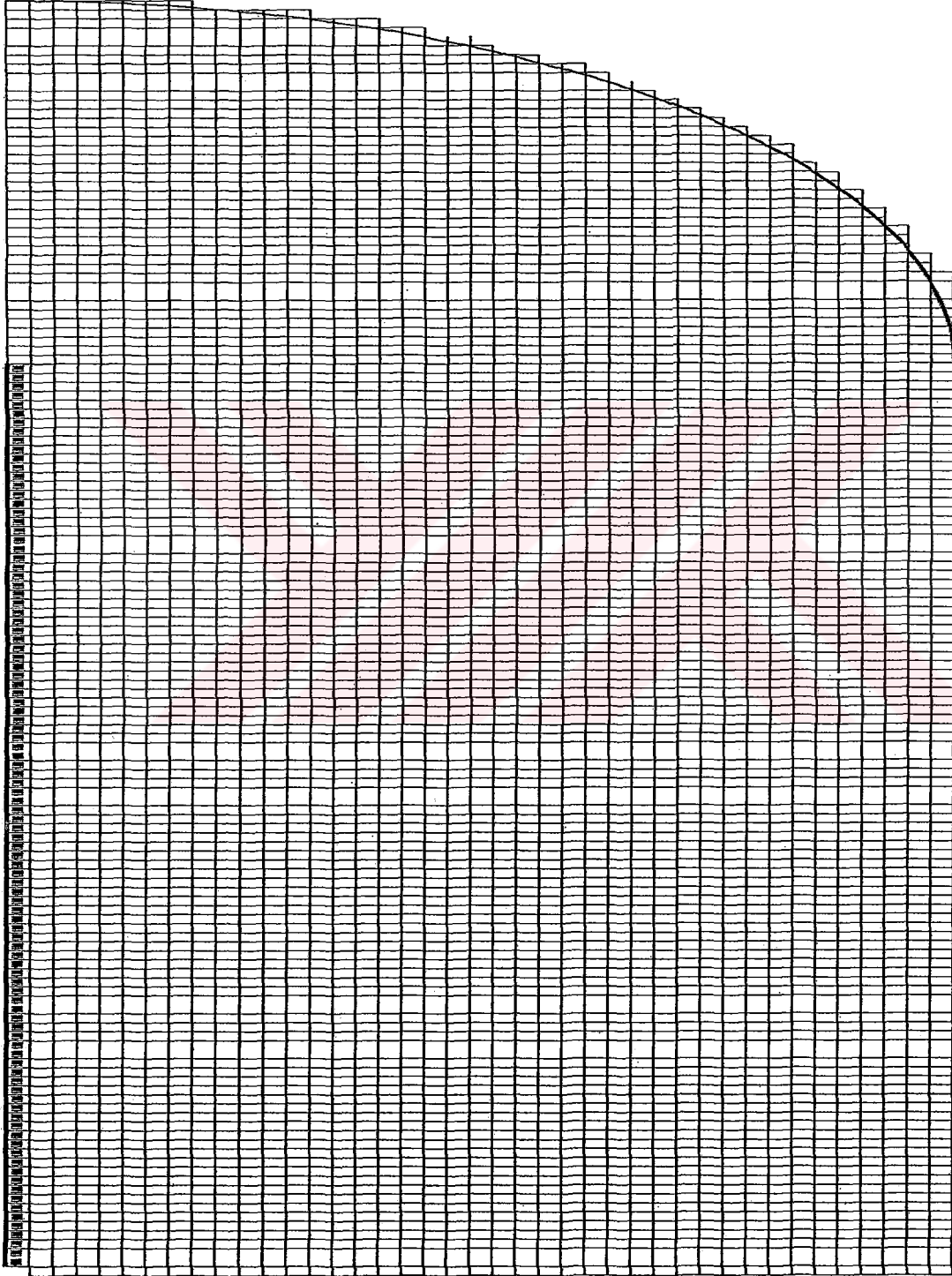
Şekil 5.10 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi

5.4.3 50 Metre Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SFY İle Hesabı

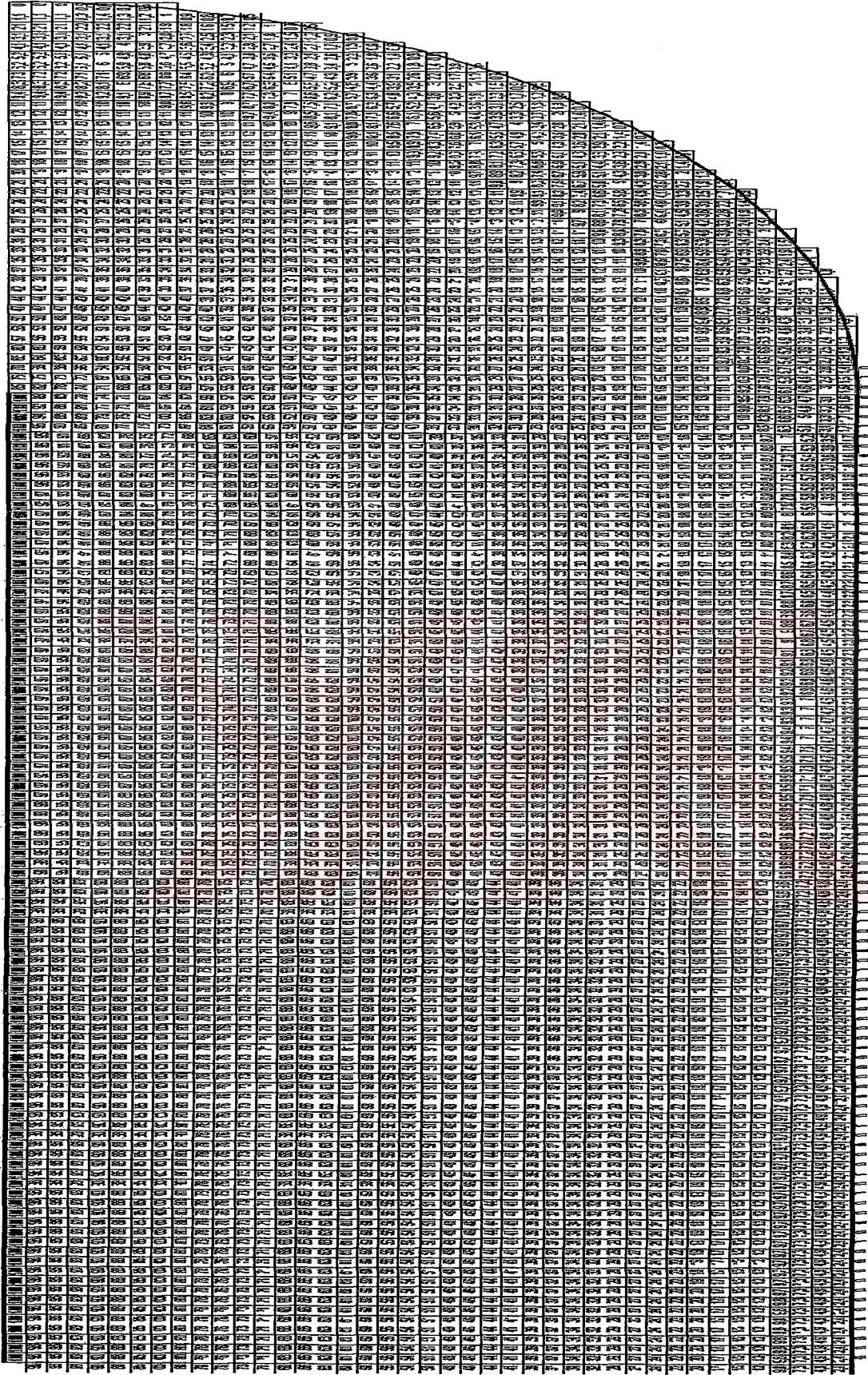
50 metre uzunluğundaki bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının SFY ile bulunması amacıyla oluşturulan modelde $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$ 'lik kare gözlerden oluşan bir ağ yapısı kurulmuş ve buna göre sonlu farklar modeli oluşturulmuştur. Bu modelin MS EXCEL'e taşınmasıyla her bir hücre 0,5 m olarak düşünülmüş ve 20 m uzaklıktaki referans toprak ile çubuk topraklayıcı arasındaki düğümler için toprak yüzeyindeki bölüm, 40 adet hücreyle benzeştirilmişlerdir. Şerit topraklayıcı 50 m uzunluğunda olup uygulanan gerilim 100 volt olduğundan, MS EXCEL'de şerit topraklayıcı uzunluğuna karşı düşen 0,5 m'lik 100 adet hücreye 100 volt değeri girilerek benzeşim yapılmıştır. Referans toprak olarak kabul edilen 20 m uzaklıktaki düğümlere karşı düşen hücrelere ise 0 volt değerleri girilmiştir. 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı toprak yüzeyinde, toprak içinde ve y eksenindeki düğümlere karşılık düşen hücrelerin değerleri bulunarak çıkartılmıştır. Buna göre SFY kullanılarak oluşturulan Şekil 5.11'deki modelin MS EXCEL'e taşındıktan sonra hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulunan potansiyel dağılımı Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekil 5.11'de verilen 50 m'lik şerit topraklayıcı için kurulan modelde, şerit uzunluğu 50 m olduğu için hücresel denklem çözümünde her bir hücre 0,5 m olarak düşünülürse 100 adet hücreye 100 volt değeri uygulanması gerekmektedir. Toprak yüzeyinde, toprak içinde ve y ekseninde sonlu farklar yöntemi kullanılarak yazılan denklemlerin çözülmesi sonucu oluşan potansiyel dağılımı ise Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 5 m'lik şerit topraklayıcıda olduğu gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça düğüm potansiyel değerleri düşmektedir. Tablo 5.5'de 50 m'lik şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde sonlu farklar yöntemi ile bulunan düğüm potansiyel değerleri verilmiştir. Şekil 5.12'de ise toprak yüzeyinde oluşan potansiyel değişimin grafik gösterilimi göz önüne konulmuştur.

50 m uzunluktaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde bulunan adım gerilimi değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir. Tablo 5.6'dan görüldüğü gibi adım gerilimi değerleri, 5 m ve 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcılarda olduğu gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. Tablo 5.6'da verilen değerler toprak yüzeyinde 1 m uzaklıktaki iki düğüm arasındaki potansiyel farkını göstermektedir.

Şekil 5.11'de 50 m'lik şerit topraklayıcıya uygulanan gerilim değerini simgelemek amacıyla 100 adet hücreye 100 volt değeri girilmiş ve kartezyen koordinat sisteminde sonlu farklar yöntemiyle her bir düğümün (hücre) potansiyel değerini hücresel denklem çözüm yöntemi ile bulmak amacıyla kurulmuş olan model gösterilmiştir.



Şekil 5.11 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için kurulan SFY modeli



Şekil 5.12 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının hücresel denklem yöntemiyle bulunan değerleri

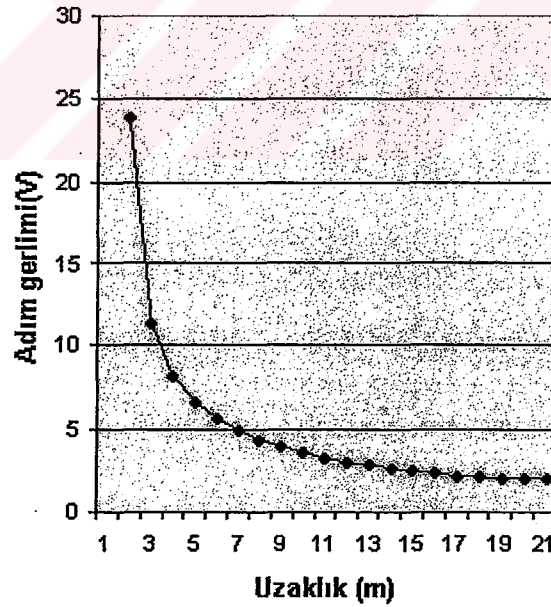
Tablo 5.5 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SFY
0	100
0,5	84,88467
1	76,142266
1,5	69,835093
2	64,740297
2,5	60,382991
3	56,535421
3,5	53,069091
4	49,902867
4,5	46,981425
5	44,264916
5,5	41,723439
6	39,33837
6,5	37,077708
7	34,940126
7,5	32,908765
8	30,973296
8,5	29,12495
9	27,356201
9,5	25,660523
10	24,032208
10,5	22,46622
11	20,958088
11,5	19,503805
12	18,099763
12,5	16,742682
13	15,429558
13,5	14,157612
14	12,924242
14,5	11,726977
15	10,563415
15,5	9,4311605
16	8,3277248
16,5	7,2503859
17	6,1959629
17,5	5,160451
18	4,1384349
18,5	3,1222486
19	2,1011929
19,5	1,062541
20	0

Tablo 5.5'de görüldüğü gibi 50 m'lik şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri aynen 5 m ve 25 m'lik şerit topraklayıcıda olduğu gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır.

Tablo 5.6 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Aralarında 1m uzaklık olan iki düğümün potansiyel değerleri		Adım Gerilimi
1.düğüm(hücre)	2.düğüm(hücre)	
100	76,14226576	23,85773424
76,14226576	64,74029722	11,40196853
64,74029722	56,53542144	8,204875787
56,53542144	49,90286687	6,63255457
49,90286687	44,26491594	5,637950932
44,26491594	39,33383663	4,931079305
39,33383663	34,94012622	4,393710416
34,94012622	30,97329586	3,966830356
30,97329586	27,35620144	3,617094417
27,35620144	24,03220785	3,32399359
24,03220785	20,95808751	3,074120345
20,95808751	18,09976343	2,858324077
18,09976343	15,42955823	2,670205195
15,42955823	12,9242423	2,505315936
12,9242423	10,56341494	2,360827356
10,56341494	8,327724806	2,235690137
8,327724806	6,195962936	2,13176187
6,195962936	4,138434859	2,057528076
4,138434859	2,101192851	2,037242009
2,101192851	0	2,101192851



Şekil 5.13 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimi

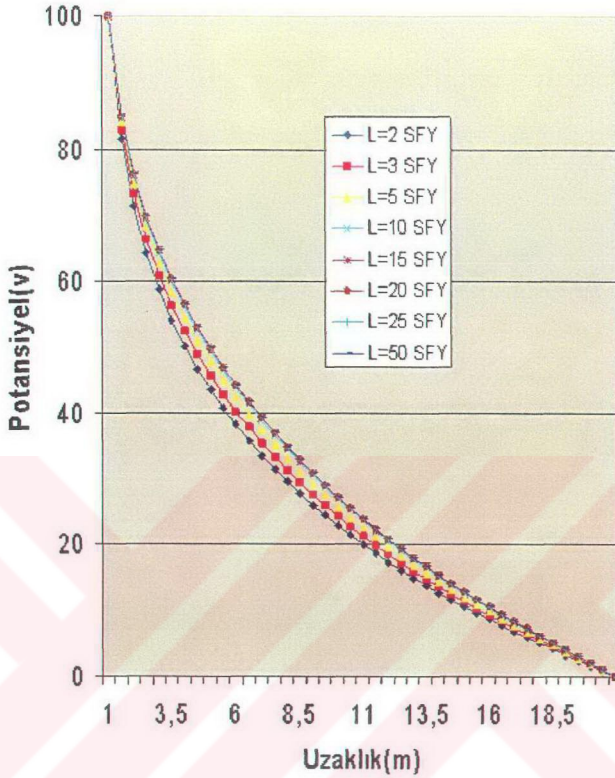
Şerit topraklayıcının 5, 25 ve 50 m uzunluğunda olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımın hücresel denklem çözüm yöntemiyle yapılan hesaplamalarından

görüldüğü gibi, kartezyen koordinatlarda Laplace denkleminin sonlu farklar yöntemi ile çözümlenerek elde edilen ifadeleri kullanılarak bir şerit topraklayıcının ucundan itibaren çevresinde oluşan potansiyel dağılımı hesaplanabilir.

Şerit topraklayıcının 2, 3, 10, 15, 20 metre uzunluğunda olması durumu için de, aynı şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre şerit topraklayıcının farklı uzunluklarda olması durumunda, canlılar için önem taşıyan toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı değerleri Tablo 5.7'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça düğüm (hücre) potansiyel değerleri ve yüzeydeki adım gerilimi değerleri topraklayıcıya yakın yerlerde büyük, uzaklaştıkça hızla düşmektedir.

Tablo 5.7 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde SFY ile bulunan potansiyel değerleri

Elektrot boyu (m)	L=2	L=3	L=5	L=10	L=15	L=20	L=25	L=50
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SFY	SFY	SFY	SFY	SFY	SFY	SFY	SFY
0	100	100	100	100	100	100	100	100
0,5	81,63203	82,8625	83,96088	84,70609	84,84857	84,87816	84,88292	84,88467
1	71,40179	73,15027	74,75614	75,87583	76,08856	76,13275	76,13965	76,14227
1,5	64,30198	66,31091	68,19003	69,51737	69,77127	69,82401	69,83197	69,83509
2	58,76199	60,90203	62,93637	64,39033	64,67029	64,72842	64,73686	64,7403
2,5	54,16464	56,36255	58,48186	60,01266	60,30926	60,37082	60,37935	60,38299
3	50,21094	52,42107	54,57918	56,15293	56,45968	56,5233	56,53166	56,53542
3,5	46,73114	48,9234	51,08822	52,68046	52,9926	53,05729	53,06526	53,06909
4	43,61788	45,77176	47,92021	49,51267	49,82661	49,89159	49,89902	49,90287
4,5	40,79804	42,89934	45,01446	46,59321	46,90616	46,97085	46,97759	46,98143
5	38,2192	40,258	42,32721	43,88147	44,19125	44,25517	44,26113	44,26492
5,5	35,84226	37,81167	39,82568	41,34699	41,65187	41,71465	41,71972	41,72344
6	33,63722	35,53253	37,48413	38,96613	39,26476	39,32611	39,3302	39,33384
6,5	31,58044	33,39854	35,28266	36,72016	37,01145	37,07113	37,07417	37,07771
7	29,65297	31,39193	33,20479	34,59384	34,87695	34,93478	34,9367	34,94013
7,5	27,83934	29,49812	31,23704	32,57461	32,8489	32,90472	32,90546	32,90877
8	26,12672	27,70498	29,36815	30,65196	30,91693	30,97063	30,97011	30,9733
8,5	24,50439	26,00227	27,58857	28,81695	29,07224	29,12372	29,1219	29,12495
9	22,96322	24,38131	25,89014	27,06193	27,30728	27,35648	27,35329	27,3562
9,5	21,49544	22,83462	24,26582	25,38025	25,61551	25,66238	25,65775	25,66052
10	20,09429	21,3557	22,70947	23,76611	23,99119	24,03571	24,02957	24,03221
10,5	18,75393	19,9389	21,21569	22,21441	22,4293	22,47143	22,46372	22,46622
11	17,46918	18,57922	19,77972	20,7206	20,92534	20,96509	20,95573	20,95809
11,5	16,23551	17,27226	18,39732	19,28063	19,4753	19,51267	19,50159	19,50381
12	15,04884	16,01406	17,06467	17,89084	18,07558	18,11057	18,09769	18,09976
12,5	13,9055	14,80108	15,77834	16,54792	16,72288	16,75551	16,74075	16,74268
13	12,80219	13,63012	14,53518	15,24882	15,4142	15,44449	15,42776	15,42956
13,5	11,73584	12,49823	13,33232	13,99075	14,14675	14,17473	14,15596	14,15761
14	10,70362	11,40271	12,16708	12,77108	12,91793	12,94361	12,92272	12,92424
14,5	9,70286	10,34102	11,03693	11,58734	11,72522	11,74865	11,72559	11,72698
15	8,730987	9,310707	9,939436	10,4371	10,5662	10,5874	10,56216	10,56341
15,5	7,785474	8,309403	8,872192	9,31797	9,438404	9,457415	9,430037	9,43116
16	6,86378	7,334671	7,832723	8,22746	8,339237	8,356089	8,326729	8,327725
16,5	5,963276	6,383908	6,818353	7,162855	7,265813	7,280536	7,249517	7,250386
17	5,081175	5,45413	5,825989	6,120991	6,214698	6,227321	6,195219	6,195963
17,5	4,214482	4,541654	4,851777	5,09789	5,181521	5,192066	5,15983	5,160451
18	3,359972	3,641578	3,890548	4,088188	4,16036	4,16884	4,137936	4,138435
18,5	2,514269	2,747036	2,935027	3,084295	3,142923	3,149337	3,121872	3,122249
19	1,674077	1,848609	1,975099	2,075629	2,117867	2,122193	2,100939	2,101193
19,5	0,8366	0,934707	0,998746	1,049607	1,07212	1,074311	1,062413	1,062541
20	0	0	0	0	0	0	0	0



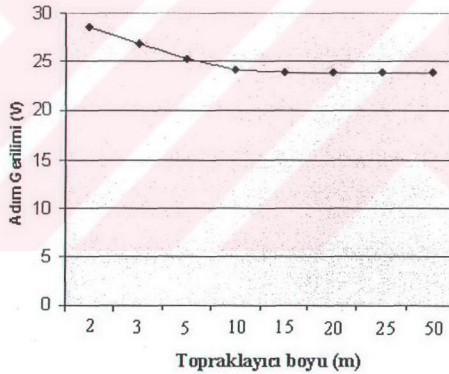
Şekil 5.14 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcıların toprak yüzeyinde SFY yöntemi ile bulunan düğüm potansiyeli değişimleri

Tablo 5.8'de görüldüğü gibi topraklayıcı potansiyeli ile topraklayıcıdan 1 m uzaklıktaki düğüm noktalarının potansiyel değerleri arasındaki fark olan adım gerilim değerleri, topraklayıcı boyu uzadıkça azalmaktadır. Bu sonuçlardan görüldüğü gibi topraklayıcı boyunun uzatılması, topraklayıcı yakınındaki canlılar için önem taşıyan adım gerilimini azaltacak yönde etki etmektedir.

Tablo 5.8 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm arasında SFY ile bulunan adım gerilimi değerleri

Elektrot boyu (m)	Topraklayıcı üzerindeki potansiyel(V)	Topraklayıcıda 1m uzaklıktaki düğüm	Adım Gerilimi (V)
2	100	71,4017928	28,5982072
3	100	73,15026961	26,84973039
5	100	74,75613961	25,24386039
10	100	75,87583383	24,12416617
15	100	76,08856226	23,91143774
20	100	76,13274925	23,86725075
25	100	76,13965238	23,86034762
50	100	76,14226576	23,85773424

Şekil 5.15'de farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar için adım gerilimi değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar için SFY ile bulunan adım gerilimi değişimleri

5.5 Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY İle Hesabı

Bu bölümde, bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının belirlenmesi amacıyla EK B'de belirtilen sonlu elemanlar yöntemi ilkesine göre çözüm yapan FEMM (Finite Element Method Magnetics) adlı programda, topraklayıcının farklı

uzunluklarda olması, farklı derinliklere gömülmesi, farklı dielektrik katsayılarına sahip toprak içinde olması durumlarında şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla modeller kurulmuş ve potansiyel dağılımları hesaplanmıştır. Hesaplamalar sınır koşulları bilinen bölge içinde yapılmıştır. Buna göre kapalı bölge sonlu elemanlara bölünmüş ve potansiyel dağılımı hesabı yapılmıştır. Kurulan modeller ve hesaplamalar bu bölümün alt bölümlerinde ayrı ayrı sunulmuştur.

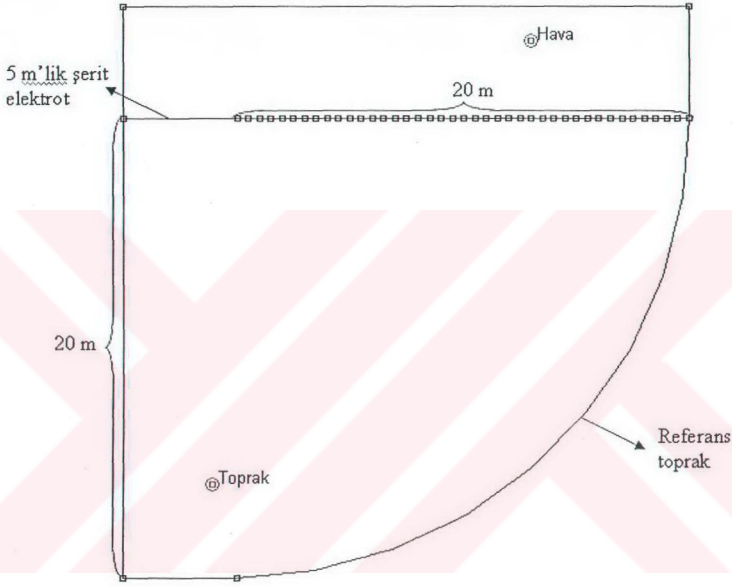
5.5.1 Farklı Uzunluklardaki Şerit Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SEY İle Hesabı

Bu bölümde, aynen SFY ile potansiyel dağılımı hesaplarında olduğu gibi 5, 25 ve 50 m uzunluklarındaki şerit topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan modeller ve yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen değerler verilmiştir. Bunun yanısıra şerit topraklayıcının farklı gömülme derinliğinde, farklı dielektrik sabitine sahip toprak içindeki olması durumları ve çevresinde oluşan potansiyel dağılımı hesapları da verilmiştir. Böylece gerek SFY ve gerekse SEY kullanılarak yapılan bir şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplarının birbiriyle uyumu çıkartılmaya çalışılarak, hesaplamaların doğruluğu açısından SFY'de kullanılan hücresel denklem çözüm yöntemi ile SEY'de kullanılan FEMM programı ile bulunan sonuçların karşılaştırılma olanağı sağlanmıştır.

5.5.1.1 5 Metre Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile Hesabı

Şerit topraklayıcının 5 m uzunluğunda olması durumunda SEY ile çevresindeki potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla kurulan model Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Buna göre toprak bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r), SFY ile yapılan hesaplarla karşılaştırma yapmak amacıyla 9 olarak alınmış, havanın bağıl dielektrik sabiti ise 1 alınarak potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcıya yine 100 volt gerilim değeri, 20 m uzaklıktaki her nokta ise referans toprak olarak kabul edilmek suretiyle 0 volt gerilimi değeri uygulanmıştır. Şekil 5.16'dan görüldüğü gibi hava, toprak, çubuk topraklayıcı ve referans topraktan

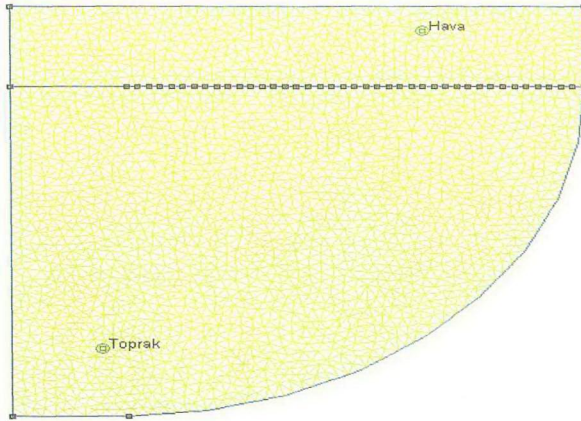
oluşan bölge SEY ile potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla gerekli olan kapalı bölgeyi oluşturmaktadır. Burada şerit topraklayıcıya uygulanan gerilim ve referans toprak gerilim değeri bilinen değerler olup, topraklayıcı çevresindeki ve toprak ile hava arasındaki toprak yüzeyinde Şekil 5.16'de gösterilen aralarında 0,5 m uzaklık bulunan her bir düğümün potansiyel değerleri ise bilinmeyen değerler olup hesaplanacak olan değerlerdir.



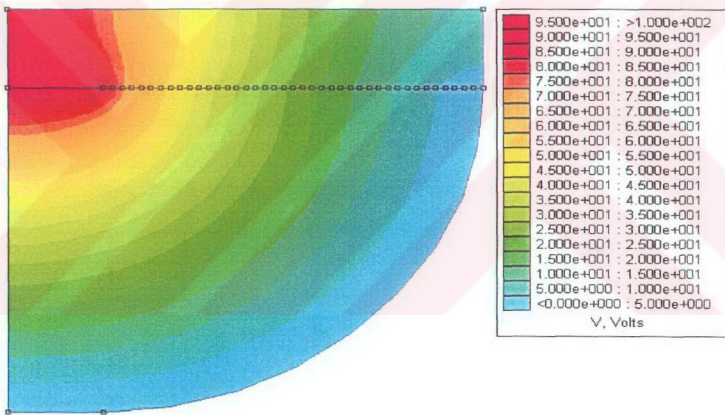
Şekil 5.16 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Topraklayıcı ve referans toprak arasındaki kapalı bölge öncelikli olarak üçgen elemanlara bölünerek potansiyelleri bilinmeyen değerler, potansiyeli bilinen değerler yardımı ile hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi Şekil 5.17'de verilmiştir.

Kapalı bölge sonlu eleman olarak kullanılan üçgen elemanlara bölündükten sonra, hava ile toprak arasındaki toprak yüzeyinde bulunan aralarında 0,5 m uzaklık bulunan düğümlerin potansiyel değerleri ve şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır.



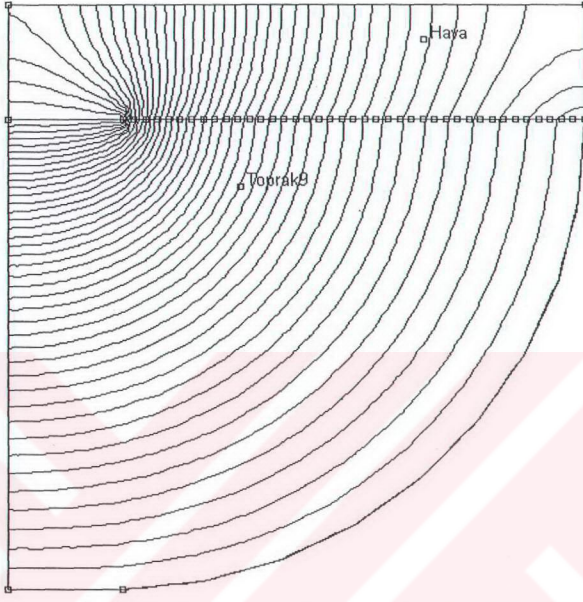
Şekil 5.17 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 5.18 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra FEMM programı ile 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 5.18 gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcının yakınındaki yerlerde potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. 5 m'lik şerit topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgilerinin çizilmesi

durumunda da topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel çizgilerinin yüksek değerde, uzaklaştıkça düşük değerde oldukları görülür.



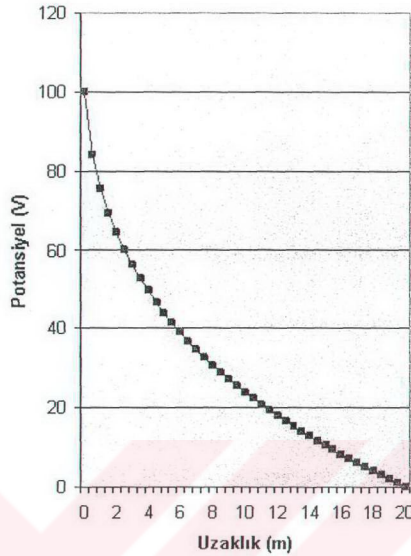
Şekil 5.19 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY kullanarak hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.9'da verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.

Tablo 5.9 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY
0	100
0,5	84,0743
1	75,6229
1,5	69,3451
2	64,2957
2,5	59,9495
3	56,1256
3,5	52,6819
4	49,5398
4,5	46,6378
5	43,9432
5,5	41,4243
6	39,055
6,5	36,8149
7	34,6905
7,5	32,6758
8	30,7566
8,5	28,9213
9	27,1665
9,5	25,483
10	23,8676
10,5	22,3137
11	20,8115
11,5	19,3681
12	17,9769
12,5	16,627
13	15,3258
13,5	14,0628
14	12,8364
14,5	11,6504
15	10,4954
15,5	9,37271
16	8,27875
16,5	7,21014
17	6,16647
17,5	5,1431
18	4,13485
18,5	3,13832
19	2,13763
19,5	1,12179
20	0

Tablo 5.9'dan görüldüğü gibi SEY ile bulunan potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Tablo 5.9'da verilen değerlere göre çizilen grafik Şekil 5.20'de gösterilmiştir.

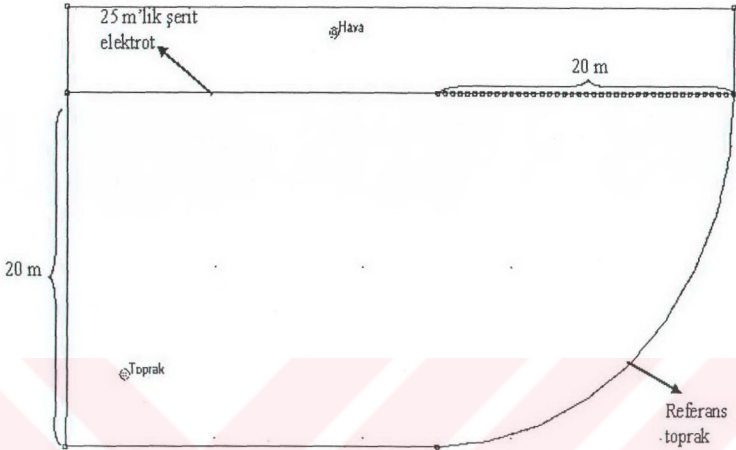


Şekil 5.20 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

5.5.1.2 25 Metre Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile Hesabı

Şerit topraklayıcının 25 m uzunluğunda olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla kurulan model Şekil 5.21'de gösterilmiştir. Buna göre toprak bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) SFY ile yapılan hesaplarla karşılaştırma yapmak amacıyla 9 olarak alınmış, havanın bağıl dielektrik sabiti ise 1 alınarak potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. 25 m uzunluktaki şerit topraklayıcıya yine 100 volt gerilim değeri, 20 m uzaklıktaki her nokta ise referans toprak olarak kabul edilmek suretiyle 0 volt gerilimi değeri uygulanmıştır. Şekil 5.21'den görüldüğü gibi hava, toprak, şerit topraklayıcı ve referans topraktan oluşan bölge SEY ile potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla gerekli olan kapalı bölgeyi oluşturmaktadır. Burada şerit topraklayıcıya uygulanan gerilim ve referans toprak gerilim değeri bilinen değerler olup, topraklayıcı çevresindeki ve toprak ile hava arasındaki toprak yüzeyinde Şekil 5.21'de gösterilen aralarında 0,5 m uzaklık

bulunan her bir düğümün potansiyel değerleri ise bilinmeyen değerler olup hesaplanacak olan değerlerdir.



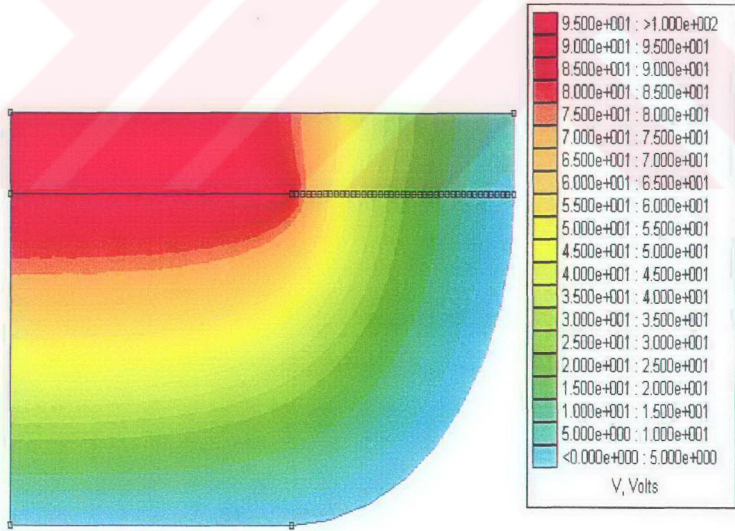
Şekil 5.21 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Topraklayıcı ve referans toprak arasındaki kapalı bölge öncelikli olarak üçgen elemanlara bölünerek potansiyelleri bilinmeyen değerler, potansiyeli bilinen değerler yardımı ile hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi 5 m'lik şerit topraklayıcıda olduğu gibi Şekil 5.22'de verilmiştir.

Kapalı bölge sonlu eleman olarak kullanılan üçgen elemanlara bölündükten sonra, hava ile toprak arasındaki toprak yüzeyinde bulunan aralarında 0,5 m uzaklık bulunan düğümlerin potansiyel değerleri ve şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır.

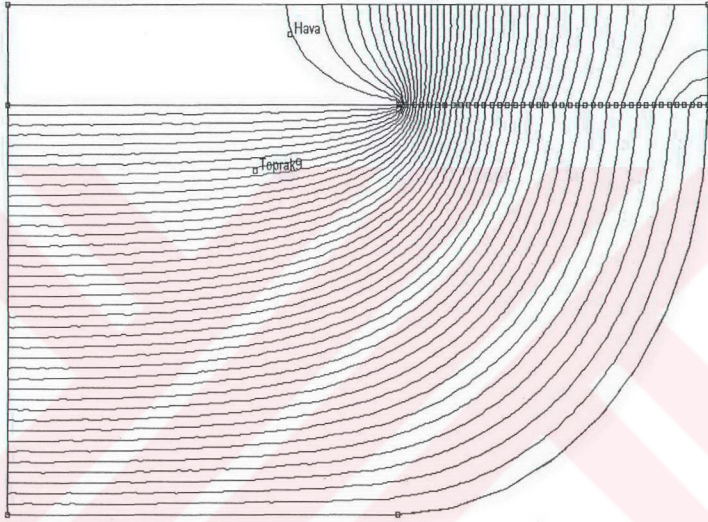


Şekil 5.22 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 5.23 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra, 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının çevresinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 2.23' de gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcının yakınındaki yerlerde potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. 25 m'lik şerit topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgilerinin çizilmesi durumunda da topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel çizgilerinin yüksek değerde, uzaklaştıkça düşük değerde oldukları görülür.



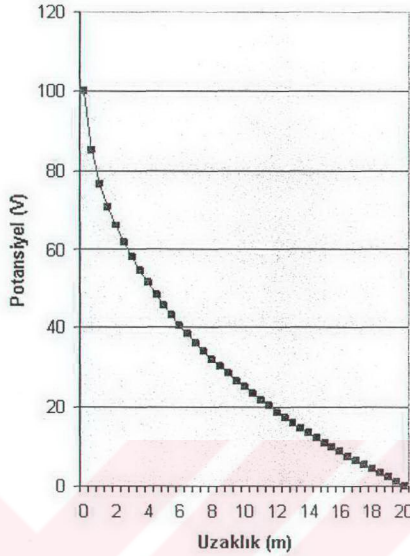
Şekil 5.24 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY kullanılarak hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.10'da verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.

Tablo 5.10 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY
0	100
0,5	85,0307
1	76,6472
1,5	70,6741
2	65,7977
2,5	61,544
3	57,7477
3,5	54,3549
4	51,2072
4,5	48,3052
5	45,5745
5,5	43,0236
6	40,6217
6,5	38,3412
7	36,1682
7,5	34,1038
8	32,1214
8,5	30,2323
9	28,4172
9,5	26,6726
10	24,9939
10,5	23,3787
11	21,8197
11,5	20,3137
12	18,8601
12,5	17,4537
13	16,0899
13,5	14,7665
14	13,4859
14,5	12,2399
15	11,0283
15,5	9,84984
16	8,70135
16,5	7,57919
17	6,48228
17,5	5,40431
18	4,34867
18,5	3,2971
19	2,24818
19,5	1,17796
20	0

Tablo 5.10'dan görüldüğü gibi SEY ile bulunan potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Tablo 5.10'da verilen değerlere göre çizilen grafik Şekil 5.25'de gösterilmiştir.

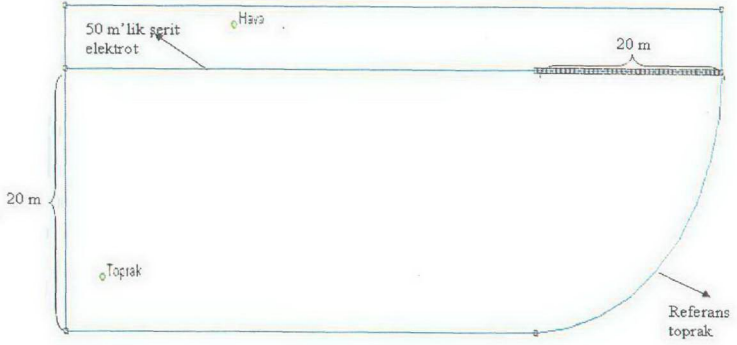


Şekil 5.25 25 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değişimi

5.5.1.3 50 Metre Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY ile Hesabı

Şerit topraklayıcının 50 m uzunluğunda olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla kullanılmak üzere kurulan model Şekil 5.26'da gösterilmiştir. Buna göre toprak bağlı dielektrik sabiti (ϵ_r) SFY ile yapılan hesaplarla karşılaştırma yapmak amacıyla 9 olarak alınmış, havanın bağlı dielektrik sabiti ise 1 olarak alınarak potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. 50 m uzunluktaki şerit topraklayıcıya yine 100 volt gerilim değeri, 20 m uzaklıktaki her nokta ise referans toprak olarak kabul edilmek suretiyle 0 volt gerilimi değeri uygulanmıştır. Şekil 5.26'dan görüldüğü gibi hava, toprak, çubuk topraklayıcı ve referans topraktan oluşan bölge SEY ile potansiyel dağılımının hesaplanması amacıyla gerekli olan kapalı bölgeyi oluşturmaktadır. Burada şerit topraklayıcıya uygulanan gerilim ve referans toprak gerilim değeri bilinen değerler olup, topraklayıcı çevresindeki ve toprak ile hava arasındaki toprak yüzeyinde Şekil

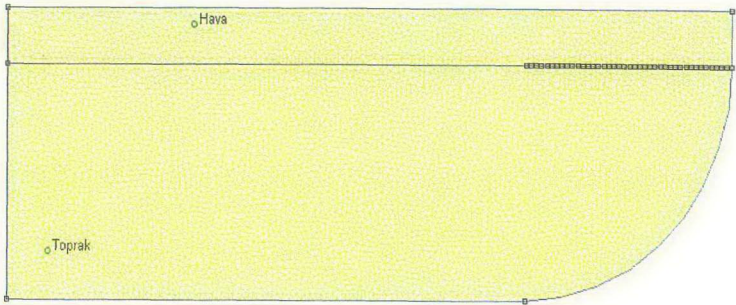
2.26'da gösterilen aralarında 0,5 m uzaklık bulunan her bir düğümün potansiyel değerleri ise bilinmeyen değerler olup hesaplanacak olan değerlerdir.



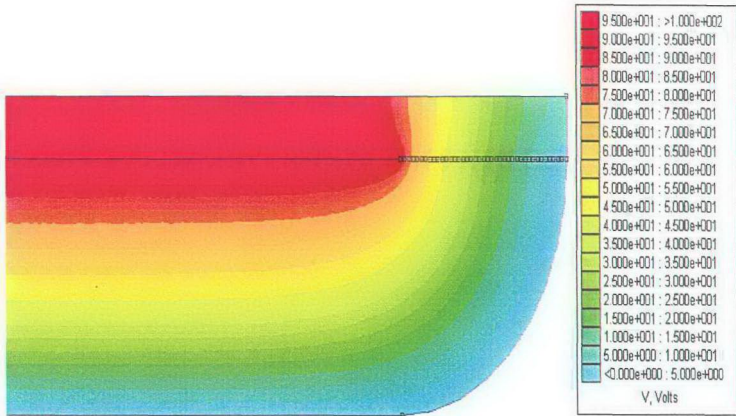
Şekil 5.26 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Topraklayıcı ile referans toprak arasındaki kapalı bölge öncelikle üçgen elemanlara bölünerek potansiyelleri bilinmeyen değerler, potansiyeli bilinen değerler yardımı ile hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilmesi 5 ve 25 m'lik şerit topraklayıcıda olduğu gibi Şekil 5.27'de verilmiştir.

Kapalı bölge, sonlu eleman olarak kullanılan üçgen elemanlara bölündükten sonra, hava ile toprak arasındaki toprak yüzeyinde bulunan aralarında 0,5 m uzaklık bulunan düğümlerin potansiyel değerleri ve çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır.

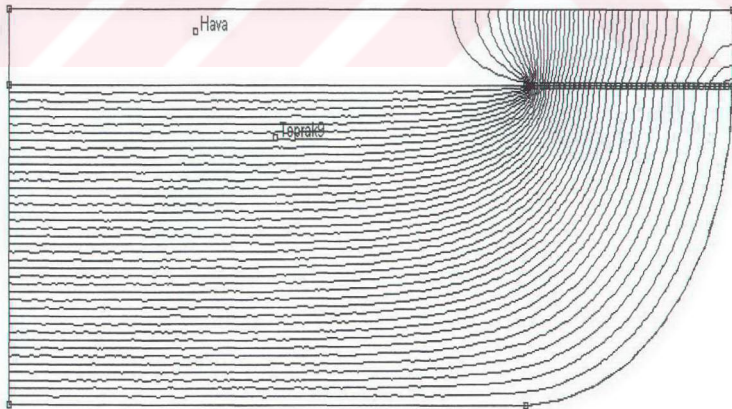


Şekil 5.27 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 5.28 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

Kapalı bölge üçgen elemanlarla ayrıştırıldıktan sonra, 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde oluşan potansiyel dağılımı Şekil 5.28'de gösterildiği gibi elde edilir. Buna göre topraklayıcı yakınında potansiyel değeri yüksek, topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu değerler düşmektedir. 50 m'lik şerit topraklayıcı çevresindeki eşpotansiyel çizgilerinin çizilmesi durumunda da topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel çizgilerinin yüksek değerde, uzaklaştıkça düşük değerde oldukları görülür.



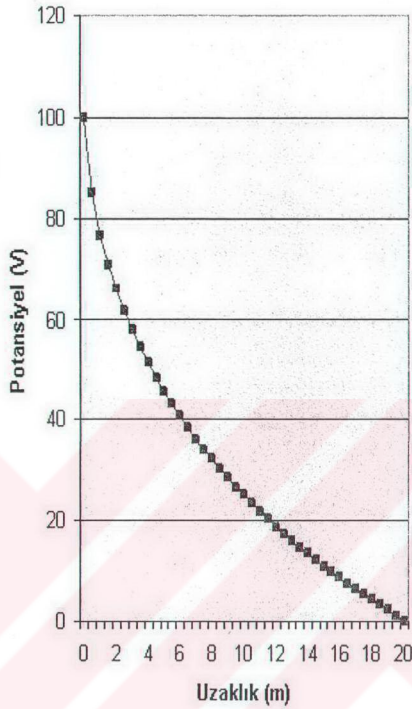
Şekil 5.29 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY kullanarak hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.11'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır.

Tablo 5.11'den görüldüğü gibi SEY ile bulunan potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Tablo 5.11'de verilen değerlere göre çizilen grafik Şekil 5.30'de gösterilmiştir

Tablo 5.11 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY
0	100
0,5	85,0489
1	76,6531
1,5	70,6859
2	65,8072
2,5	61,5522
3	57,7532
3,5	54,3615
4	51,2133
4,5	48,3103
5	45,58
5,5	43,0266
6	40,6261
6,5	38,3461
7	36,1735
7,5	34,1073
8	32,1251
8,5	30,2358
9	28,4214
9,5	26,6763
10	24,997
10,5	23,3813
11	21,8223
11,5	20,3159
12	18,8626
12,5	17,4628
13	16,0918
13,5	14,7681
14	13,4871
14,5	12,2413
15	11,0295
15,5	9,85082
16	8,7017
16,5	7,57937
17	6,46324
17,5	5,40396
18	4,34629
18,5	3,29664
19	2,2476
19,5	1,17795
20	0



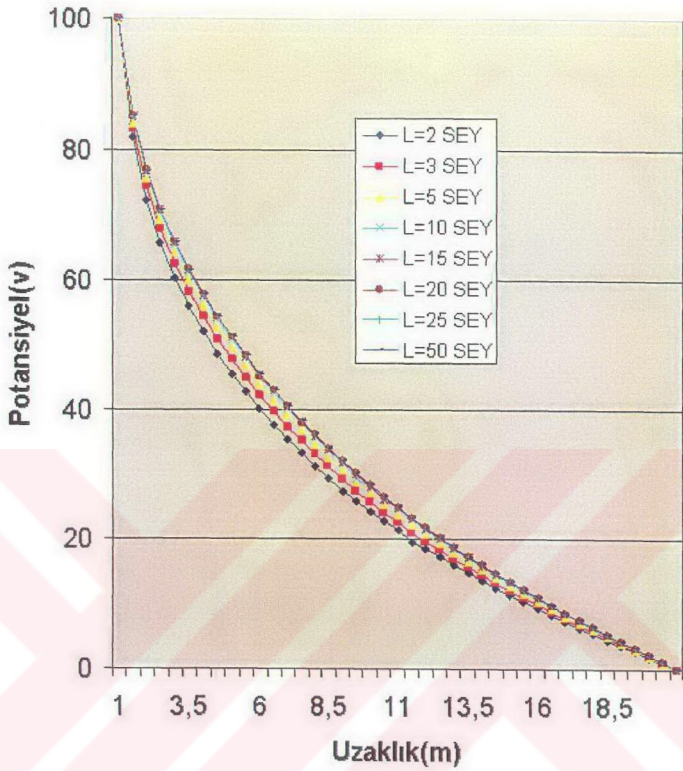
Şekil 5.30 50 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı

Şerit topraklayıcının 5 m, 25 m ve 50 m olması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının hesabı SFY ile bulunabildiği gibi SEY kullanılarak da bulunabilir. Şerit topraklayıcının 2, 3, 10, 15, 20 metre uzunlukta olması durumlarındaki potansiyel dağılımı hesabı, SEY kullanılarak yukarıda belirtildiği gibi kolaylıkla bulunabilir. Bu amaçla farklı uzunluklarda olan şerit topraklayıcıların, toprak yüzeyinde 0,5 m aralıkla bulunan düğüm potansiyellerinin SEY ile bulunan değerleri Tablo 1.12'de verilmiştir.

Tablo 5.12 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcıların toprak yüzeyindeki SEY ile bulunan potansiyel değerleri

Elektrot boyu (m)	L=2	L=3	L=5	L=10	L=15	L=20	L=25	L=50
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY	SEY	SEY	SEY	SEY	SEY	SEY	SEY
0	100	100	100	100	100	100	100	100
0,5	81,6894	83,2363	84,0743	84,7953	84,9463	85,1074	85,0307	85,0489
1	72,122	74,3041	75,6229	76,1275	76,5722	76,8977	76,6472	76,6531
1,5	65,5647	67,7978	69,3451	70,2736	70,6092	70,7964	70,6741	70,6859
2	60,3237	62,5895	64,2957	65,3782	65,7261	65,8227	65,7977	65,8072
2,5	55,8941	58,1591	59,9495	61,1402	61,4736	61,584	61,544	61,5522
3	52,0643	54,2906	56,1256	57,3724	57,6732	57,8135	57,7477	57,7532
3,5	48,6388	50,8369	52,6819	53,9504	54,2823	54,3942	54,3549	54,3615
4	45,5501	47,7018	49,5398	50,8236	51,1355	51,2417	51,2072	51,2133
4,5	42,7401	44,8221	46,6378	47,9192	48,2326	48,3291	48,3052	48,3103
5	40,1505	42,1648	43,9432	45,2119	45,5032	45,0996	45,5745	45,58
5,5	37,7483	39,6901	41,4243	42,6683	42,9535	43,058	43,0236	43,0286
6	35,5052	37,3727	39,055	40,2654	40,5538	40,6481	40,6217	40,6261
6,5	33,4023	35,1888	36,8149	37,9946	38,2747	37,9273	38,3412	38,3461
7	31,4197	33,1252	34,6905	35,8374	36,1048	36,1865	36,1682	36,1735
7,5	29,546	31,3594	32,6758	33,7816	34,0422	34,1157	34,1038	34,1073
8	27,4245	29,3179	30,7566	31,8187	32,062	32,1383	32,1214	32,1251
8,5	26,0751	27,5494	28,9213	29,583	30,1765	30,2456	30,2323	30,2358
9	24,4634	25,8612	27,1665	28,1384	28,3637	28,4299	28,4172	28,4214
9,5	22,9231	24,2442	25,483	26,4103	26,286	26,6849	26,6726	26,6763
10	21,45	22,6958	23,8676	24,746	24,945	25,0046	24,9939	24,997
10,5	19,7631	21,2075	22,3137	23,1442	23,3328	23,3877	23,3787	23,3813
11	18,6764	19,7535	20,8115	21,599	21,7763	21,8288	21,8197	21,8223
11,5	17,3695	18,3929	19,3681	20,1059	20,2725	20,3236	20,3137	20,3159
12	16,1101	17,0661	17,9769	18,6643	18,8221	18,8674	18,8601	18,8626
12,5	14,8914	15,7796	16,627	17,2702	17,4178	17,4611	17,4537	17,1828
13	13,7192	14,5409	15,3258	15,9202	16,0567	16,0974	16,0899	16,0918
13,5	12,5837	13,3395	14,0628	14,6123	14,7357	14,7747	14,7655	14,7681
14	11,4824	12,1736	12,8364	13,343	13,4574	13,4924	13,4859	13,4871
14,5	10,417	11,0471	11,6504	12,1103	12,2143	12,244	12,2399	12,2413
15	9,38342	9,95043	10,4954	10,9118	11,005	11,0323	11,0283	11,0295
15,5	8,37737	8,8849	9,37271	9,74589	9,8289	9,85267	9,84984	9,85082
16	7,3981	7,84681	8,27875	8,60835	8,6823	8,70297	8,70135	8,7017
16,5	6,4436	6,83432	7,21014	7,499	7,56245	7,58261	7,57919	7,57937
17	5,51034	5,84439	6,16647	6,41289	6,46843	6,48359	6,48228	6,48324
17,5	4,59537	4,87422	5,1431	5,13942	5,39188	5,40716	5,40431	5,40396
18	3,69373	3,91873	4,13485	4,29972	4,33657	4,34578	4,34867	4,34629
18,5	2,80507	2,97441	3,13832	3,26498	3,28928	3,29706	3,2971	3,29664
19	1,91132	2,02625	2,13763	2,22426	2,24259	2,24937	2,24818	2,2476
19,5	1,00309	1,06346	1,12179	1,16701	1,17534	1,17873	1,17796	1,17795
20	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 5.12'den görüldüğü gibi şerit topraklayıcıdan uzaklaştıkça toprak yüzeyinde düğüm potansiyel değerleri ve yüzeydeki adım gerilimi değerleri topraklayıcıya yakın yerlerde büyük uzaklaştıkça hızla düşmektedir. Şekil 5.31'de şerit topraklayıcının farklı uzunluklarda olması ve bağlı dielektrik sabiti 9 olan bir toprak



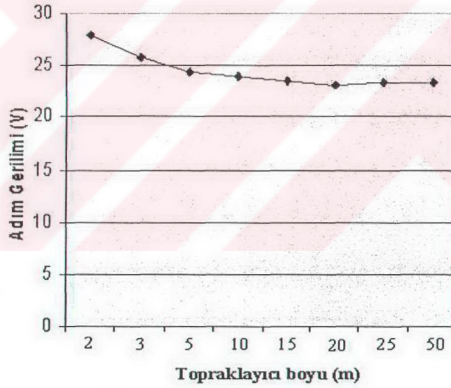
Şekil 5.31 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcıların toprak yüzeyinde SEY ile bulunan düğüm potansiyelleri dağılımı

Tablo 5.13'de görüldüğü gibi topraklayıcı potansiyeli ile topraklayıcıdan 1 m uzaklıktaki düğüm noktalarının potansiyel değerleri arasındaki fark olan adım gerilim değerleri, topraklayıcı boyu uzadıkça azalmaktadır. SEY ile hesaplanan sonuçlardan görüldüğü gibi topraklayıcı boyunun uzatılması, topraklayıcı yakınındaki canlılar için önem taşıyan adım gerilimini azaltacak yönde etki etmektedir.

Tablo 5.13 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar ile kendisinden 1 m uzaklıktaki düğüm noktası arasında SEY ile bulunan adım gerilimi değerleri

Elektrot boyu	Topraklayıcı üzerindeki potansiyel(V)	Topraklayıcıdan 1m uzaklıktaki düğüm potansiyeli(V)	Adım Gerilimi (V)
2	100	72,122	27,878
3	100	74,3041	25,6959
5	100	75,6229	24,3771
10	100	76,1275	23,8725
15	100	76,5722	23,4278
20	100	76,8977	23,1023
25	100	76,6472	23,3528
50	100	76,6531	23,3469

Şekil 5.32'de farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar için adım gerilimi değişimleri gösterilmiştir.

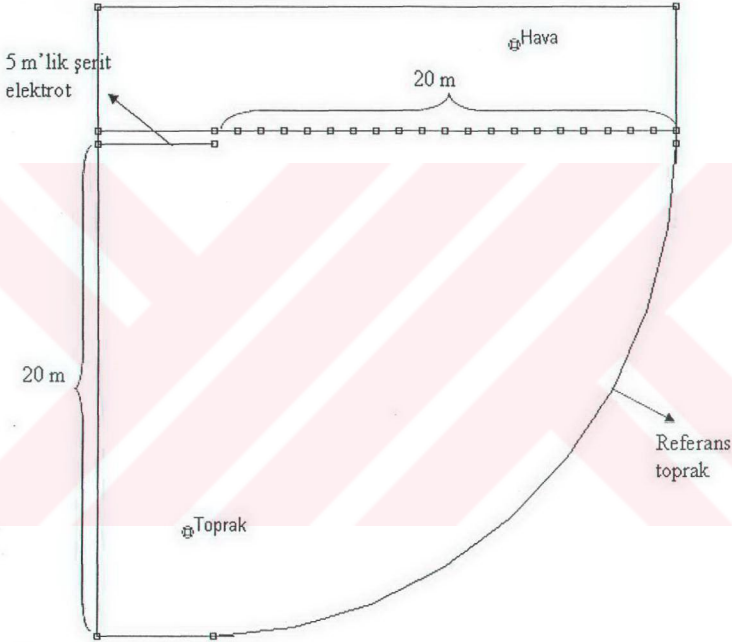


Şekil 5.32 Farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcılar için SEY ile bulunan adım gerilimi değişimleri

5.5.2 Farklı Gömülme Derinliklerinde 5 m Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımın SEY İle Hesabı

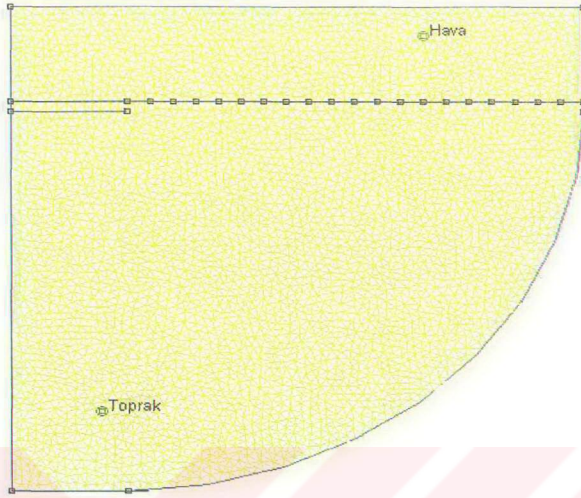
Şerit topraklayıcıların toprağa gömülme derinliğine bağlı olarak çevrelerinde oluşturdukları potansiyel dağılımının SEY kullanılarak hesaplanmasına çalışılmıştır. Bu amaçla 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının 50 cm gömülme derinliğinde

olması durumunda toprak yüzeyinde oluşan potansiyel dağılımı SEY kullanılarak hesaplanmıştır. Böylece gömme derinliğinin, canlılar için tehlikeli olabilecek toprak yüzeyindeki adım gerilimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buna göre 50 cm derinliğe gömülmüş 5 m uzunluktaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılım hesapları için SEY kullanılarak kurulan model Şekil 5.33'de verilmiştir. Şerit topraklayıcıya yine 100 volt ve referans toprak üzerindeki düğümlerin gerilimi ise 0 volt olarak düşünülerek hesaplar yapılmıştır.



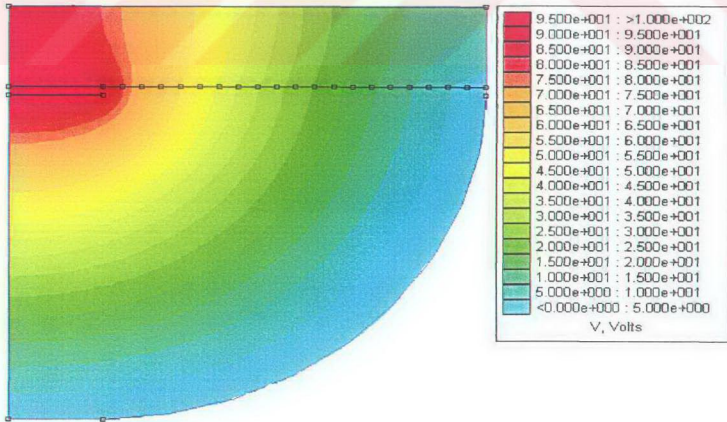
Şekil 5.33 50 cm gömülme derinliğinde, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla kurulan SEY modeli

Şekil 5.33'de verilen SEY modelindeki kapalı bölgenin üçgen sonlu elemanlara ayrıştırılması ile potansiyelleri bilinmeyen düğümlerin değerleri, potansiyeli bilinen düğümlere bağlı olarak hesaplanır. Buna göre kapalı bölgenin üçgen elemanlara bölünmüş olarak gösterilimi, Şekil 5.34'de verilmiştir. Kapalı bölgeyi ayrıştırmak için kullanılan sonlu eleman olan üçgenler ne kadar çok sayıda olursa hesaplamaların hassasiyeti de o derece artar.

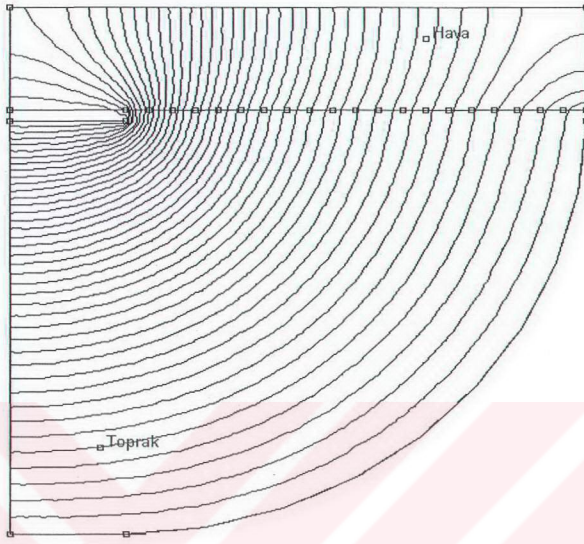


Şekil 5.34 50 cm gömülme derinliğinde, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması

5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının, toprak yüzeyinden 50 cm derine gömülmesi durumunda toprak ile havanın birleştiği sınır olan toprak yüzeyinde meydana gelen potansiyel dağılımı ise Şekil 5.35'dan görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır.



Şekil 5.35 50 cm derine gömülmüş, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı



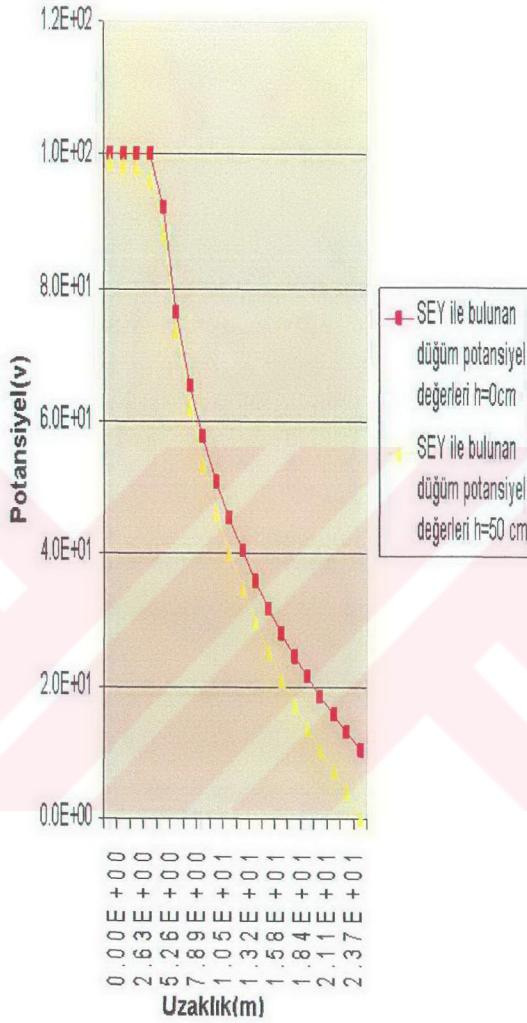
Şekil 5.36 50 cm derine gömülmüş, 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri

Toprak ile hava arasındaki sınır üzerindeki 0,5 m aralıklı olarak yerleştirilmiş olan düğümlerin potansiyel değerlerinin SEY kullanarak hesaplanması sonucunda elde edilen değerler Tablo 5.14'de verilmiştir. Bu değerlerden görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. SFY'de olduğu gibi düğüm potansiyel değerlerinin azalmasının yanında toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri de topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızla azalmaktadır. 5 m'lik şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde olması ve 50 cm derine gömülmesi durumlarındaki, topraklayıcı ile referans toprak arasındaki potansiyel değerleri Tablo 5.14'de verilmiştir.

Tablo 5.14 Toprak yüzeyinde ve 50 cm derine gömülmüş 5 m uzunluktaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

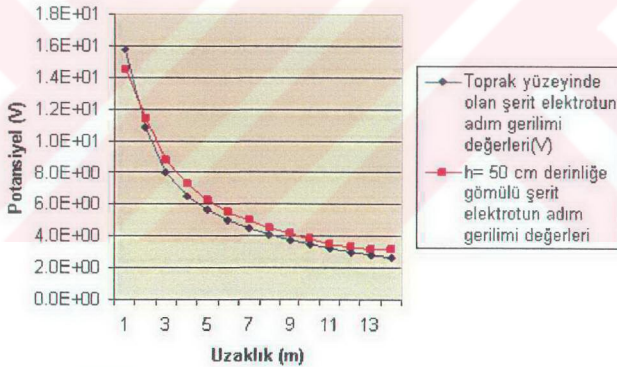
Elektrot boyu(m)	L=5m	
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri h=0cm	SEY ile bulunan düğüm potansiyel değerleri h=50 cm
0.00E+00	1.0E+02	9.9E+01
1.32E+00	1.0E+02	9.9E+01
2.63E+00	1.0E+02	9.8E+01
3.95E+00	1.0E+02	9.6E+01
5.26E+00	9.2E+01	8.8E+01
6.58E+00	7.63E+01	7.38E+01
7.89E+00	6.55E+01	6.24E+01
9.21E+00	5.75E+01	5.37E+01
1.05E+01	5.10E+01	4.64E+01
1.18E+01	4.54E+01	4.02E+01
1.32E+01	4.04E+01	3.46E+01
1.45E+01	3.59E+01	2.97E+01
1.58E+01	3.18E+01	2.52E+01
1.71E+01	2.80E+01	2.10E+01
1.84E+01	2.46E+01	1.73E+01
1.97E+01	2.13E+01	1.37E+01
2.11E+01	1.83E+01	1.04E+01
2.24E+01	1.55E+01	7.25E+00
2.37E+01	1.29E+01	4.09E+00
2.50E+01	1.04E+01	6.66E-06

Tablo 5.14 den görüldüğü gibi 5 m uzunluğundaki topraklayıcının 50 cm'ye gömülmesi sonucunda topraklayıcıya yakın yerlerdeki potansiyel değerleri, topraklayıcının toprak yüzeyinde bulunması durumunda elde edilen değerlerden daha düşük olmaktadır. Aynı zamanda Tablo 5.15'de görüldüğü gibi adım gerilimi açısından topraklayıcının 50 cm derinliğe gömülmesi topraklayıcı yakınında hızlı bir azalma meydana getirmektedir. Şekil 5.37'de topraklayıcının ucunun toprak yüzeyinde ve 50 cm derinlikte olması durumundaki potansiyel değerleri grafiksel olarak gösterilmiştir.



Tablo 5.15 Toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 5 m uzunluktaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım gerilimi değerleri

Toprak yüzeyinde olan şerit elektrotun adım gerilimi değerleri(V)	h= 50 cm derinliğe gömülü şerit elektrotun adım gerilimi değerleri
1.6E+01	1.45E+01
1.1E+01	1.14E+01
8.0E+00	8.73E+00
6.5E+00	7.26E+00
5.6E+00	6.24E+00
5.0E+00	5.54E+00
4.5E+00	4.97E+00
4.1E+00	4.50E+00
3.8E+00	4.13E+00
3.5E+00	3.80E+00
3.2E+00	3.52E+00
3.0E+00	3.31E+00
2.8E+00	3.16E+00
2.7E+00	3.16E+00



Şekil 5.38 Toprak yüzeyinde ve 50 cm derinliğe gömülmüş 5 m uzunluktaki şerit topraklayıcının SEY ile bulunan toprak yüzeyindeki adım gerilimi değişimleri

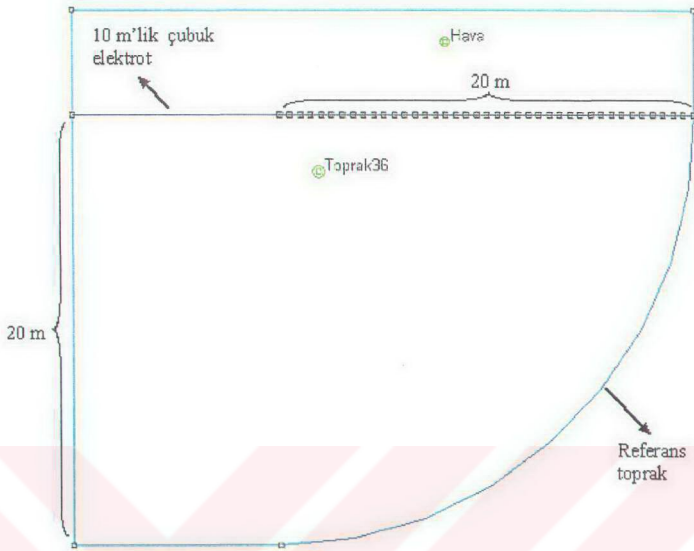
Şekil 5.38'den görüldüğü gibi adım gerilimi değeri, şerit topraklayıcının 50 cm derinliğe gömülmesi durumunda, topraklayıcı yakınında hızla bir azalma göstermektedir. Topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu azalma daha yavaş hatta bazı yerlerde ise çok az miktarda arttığı görülmektedir. Adım gerilimi daha çok topraklayıcı yakınında önem kazandığı için topraklayıcının 50 cm derinliğe

5.5.3 Farklı Dielektrik Sabitli Toprak İçine Gömülmüş Farklı Uzunluklardaki Şerit Topraklayıcılar Çevresindeki Potansiyel Dağılımının SEY İle Hesabı

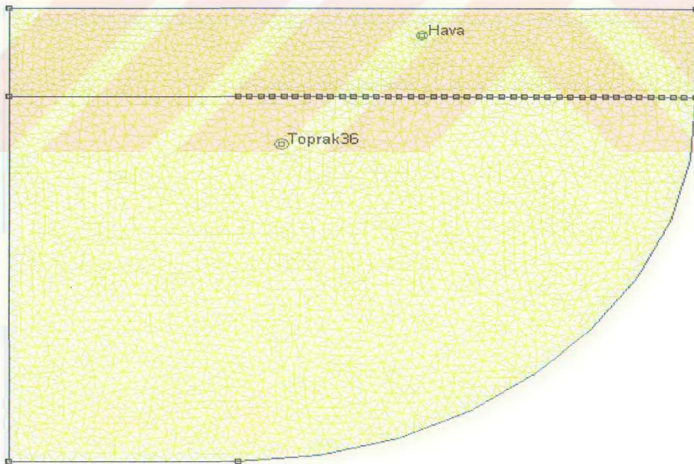
5 m, 10 m ve 20 m'lik şerit topraklayıcının, bağıl dielektrik sabitleri 3, 9, 15, 36 ve 40 olan toprak içindeki potansiyel dağılımının SEY ile incelenmesi yapılmıştır. Toprak bağıl dielektrik sabitleri için, Tablo 3.15'de belirtilen değerler göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre farklı uzunluklardaki şerit topraklayıcının, farklı dielektrik sabitli toprak içerisinde bulunması durumunda çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplanmıştır. 5 m, 10 m ve 20 m'lik şerit topraklayıcının SEY modelleri kurulmuş ve bu modeller üzerinde gerekli hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalarda sadece toprağın bağıl dielektrik sabiti değeri değiştirilmiştir, diğer yaklaşımlar benzer olarak ele alınmıştır. Buradaki amaç toprak yapısının değişmesi durumunda, şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki adım gerilimi ve potansiyel dağılımı değişiminin incelenmesidir.

5.5.3.1 10 m Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcının Bağıl Dielektrik Sabiti 36 Olan Toprağa Gömülmesi Durumundaki Potansiyel Dağılımının Hesabı

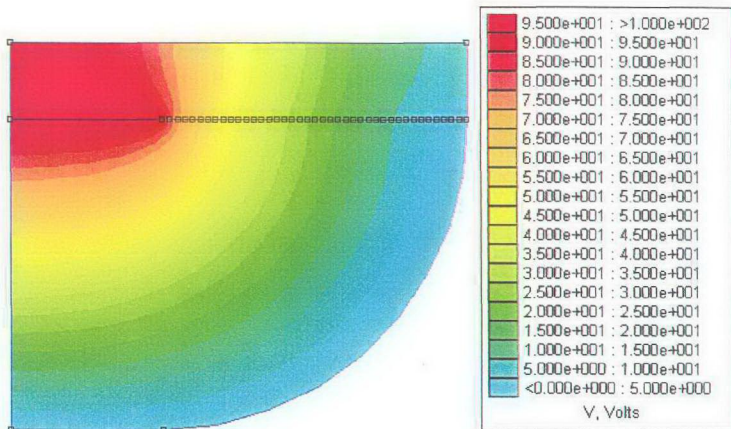
10 m'lik şerit topraklayıcının bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içine gömülmesi durumunda çevresindeki potansiyel dağılımının SEY ile incelenmesi amacıyla kurulan model Şekil 5.39'da verilmiştir. Burada yine topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her mesafede potansiyelin 0 volt olduğu varsayımı yapılmıştır. Buna göre oluşturulan model Şekil 5.39'da gösterilmiştir. Şerit topraklayıcının 10 m ve toprak bağıl dielektrik sabitinin 3, 9, 15 ve 40 olması durumunda yine aynı şekilde modeller kurulmuş ve şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının çıkartılması amacıyla benzer şekilde hesaplamalar yapılarak sonuçlar tablolar halinde verilmiştir. Şekil 5.40'da ise SEY ile kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrıştırma işlemi gösterilmiştir.



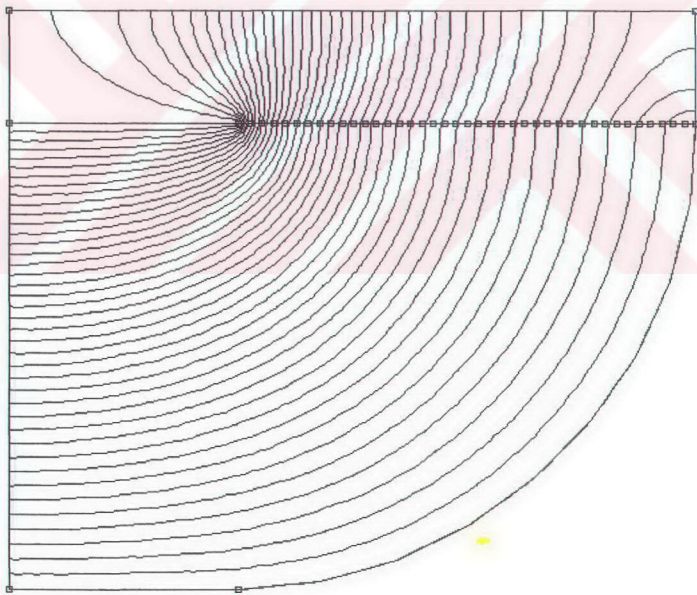
Şekil 5.39 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları için kurulan SEY modeli



Şekil 5.40 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı için bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 5.41 10 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı



Şekil 5.42 10 m uzunluğunda bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgiler

10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının dielektrik sabiti 36 olan toprak içinde olması durumunda, SEY ile potansiyel dağılım hesapları için kurulan modeller çözümlendiğinde, şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde oluşan potansiyel dağılımı ve eşpotansiyel çizgileri Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'deki gibi meydana gelmektedir. Bu hesaplamalardan ve şekillerden görüldüğü gibi bağıl dielektrik sabiti değeri artsa da toprak yüzeyindeki 0,5 m aralıklarla oluşturulan düğümlerin potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalma göstermektedirler. Bu durum Tablo 5.16'deki değerlerden de görülmektedir.

Tablo 5.16 10 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

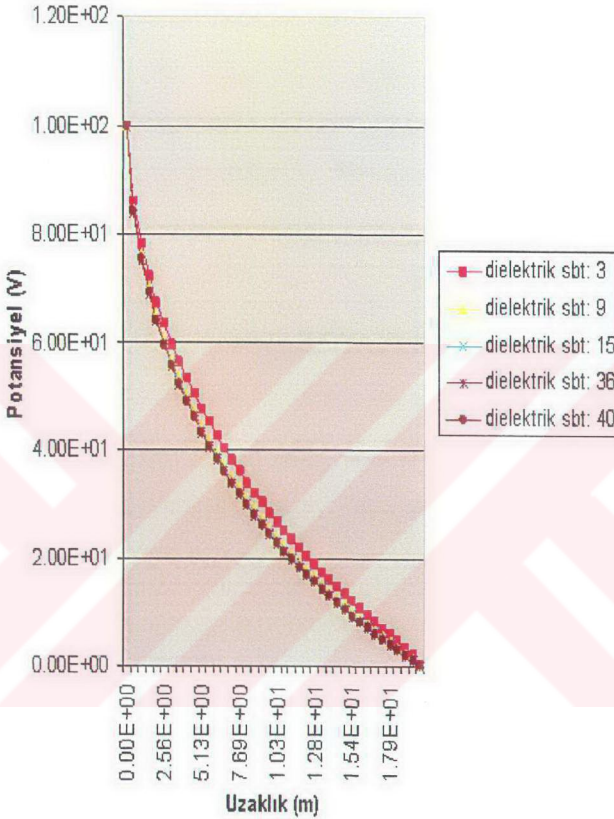
Toprak dielektrik sabiti	36
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY
0.00E+00	1.00E+02
5.13E-01	8.40E+01
1.03E+00	7.53E+01
1.54E+00	6.90E+01
2.05E+00	6.40E+01
2.56E+00	5.96E+01
3.08E+00	5.57E+01
3.59E+00	5.22E+01
4.10E+00	4.90E+01
4.62E+00	4.60E+01
5.13E+00	4.33E+01
5.64E+00	4.07E+01
6.15E+00	3.83E+01
6.67E+00	3.60E+01
7.18E+00	3.39E+01
7.69E+00	3.18E+01
8.21E+00	2.98E+01
8.72E+00	2.80E+01
9.23E+00	2.62E+01
9.74E+00	2.45E+01
1.03E+01	2.28E+01
1.08E+01	2.13E+01
1.13E+01	1.97E+01
1.18E+01	1.83E+01
1.23E+01	1.68E+01
1.28E+01	1.55E+01
1.33E+01	1.42E+01
1.38E+01	1.29E+01
1.44E+01	1.16E+01
1.49E+01	1.04E+01
1.54E+01	9.26E+00
1.59E+01	8.13E+00
1.64E+01	7.03E+00
1.69E+01	5.95E+00
1.74E+01	4.90E+00
1.79E+01	3.88E+00
1.85E+01	2.88E+00
1.90E+01	1.90E+00
1.95E+01	9.43E-01
2.00E+01	4.54E-06

10 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti 36 olan toprak içindeki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerinden Şekil 5.41'de görüldüğü gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel düşmektedir. 10 m'lik şerit topraklayıcının bağıl dielektrik sabitleri 3, 9, 15 ve 40 olması durumundaki potansiyel dağılımı hesapları da benzer şekilde yapılmıştır. Bu hesaplar sonucunda elde edilen potansiyel değerleri Tablo 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.17 10 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri

Toprak dielektrik sabiti	3	9	15	36	40
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	SEY	SEY	SEY	SEY	SEY
0.00E+00	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02	1.00E+02
5.13E-01	8.57E+01	8.47E+01	8.44E+01	8.40E+01	8.42E+01
1.03E+00	7.80E+01	7.63E+01	7.59E+01	7.53E+01	7.55E+01
1.54E+00	7.22E+01	7.01E+01	6.96E+01	6.90E+01	6.92E+01
2.05E+00	6.75E+01	6.51E+01	6.45E+01	6.40E+01	6.40E+01
2.56E+00	6.33E+01	6.08E+01	6.02E+01	5.96E+01	5.96E+01
3.08E+00	5.97E+01	5.70E+01	5.63E+01	5.57E+01	5.57E+01
3.59E+00	5.63E+01	5.35E+01	5.28E+01	5.22E+01	5.22E+01
4.10E+00	5.32E+01	5.03E+01	4.96E+01	4.90E+01	4.90E+01
4.62E+00	5.03E+01	4.74E+01	4.67E+01	4.60E+01	4.60E+01
5.13E+00	4.76E+01	4.46E+01	4.40E+01	4.33E+01	4.33E+01
5.64E+00	4.50E+01	4.21E+01	4.14E+01	4.07E+01	4.07E+01
6.15E+00	4.26E+01	3.96E+01	3.90E+01	3.83E+01	3.83E+01
6.67E+00	4.03E+01	3.73E+01	3.67E+01	3.60E+01	3.60E+01
7.18E+00	3.81E+01	3.52E+01	3.45E+01	3.39E+01	3.38E+01
7.69E+00	3.60E+01	3.31E+01	3.24E+01	3.18E+01	3.18E+01
8.21E+00	3.40E+01	3.11E+01	3.05E+01	2.98E+01	2.98E+01
8.72E+00	3.20E+01	2.92E+01	2.86E+01	2.80E+01	2.80E+01
9.23E+00	3.01E+01	2.74E+01	2.68E+01	2.62E+01	2.62E+01
9.74E+00	2.83E+01	2.56E+01	2.50E+01	2.45E+01	2.45E+01
1.03E+01	2.66E+01	2.40E+01	2.34E+01	2.28E+01	2.28E+01
1.08E+01	2.49E+01	2.23E+01	2.18E+01	2.13E+01	2.12E+01
1.13E+01	2.33E+01	2.08E+01	2.02E+01	1.97E+01	1.97E+01
1.18E+01	2.17E+01	1.93E+01	1.88E+01	1.83E+01	1.82E+01
1.23E+01	2.02E+01	1.78E+01	1.73E+01	1.68E+01	1.68E+01
1.28E+01	1.87E+01	1.64E+01	1.59E+01	1.55E+01	1.55E+01
1.33E+01	1.73E+01	1.51E+01	1.46E+01	1.42E+01	1.41E+01
1.38E+01	1.59E+01	1.38E+01	1.33E+01	1.29E+01	1.29E+01
1.44E+01	1.45E+01	1.25E+01	1.20E+01	1.16E+01	1.16E+01
1.49E+01	1.32E+01	1.12E+01	1.08E+01	1.04E+01	1.04E+01
1.54E+01	1.19E+01	1.00E+01	9.63E+00	9.26E+00	9.25E+00
1.59E+01	1.07E+01	8.85E+00	8.48E+00	8.13E+00	8.11E+00
1.64E+01	9.42E+00	7.71E+00	7.35E+00	7.03E+00	7.01E+00
1.69E+01	8.20E+00	6.59E+00	6.26E+00	5.95E+00	5.94E+00
1.74E+01	6.99E+00	5.49E+00	5.18E+00	4.90E+00	4.89E+00
1.79E+01	5.78E+00	4.42E+00	4.13E+00	3.88E+00	3.87E+00
1.85E+01	4.56E+00	3.35E+00	3.10E+00	2.88E+00	2.87E+00
1.90E+01	3.28E+00	2.28E+00	2.08E+00	1.90E+00	1.89E+00
1.95E+01	1.87E+00	1.19E+00	1.06E+00	9.43E-01	9.35E-01
2.00E+01	7.34E-06	5.62E-06	5.27E-06	4.54E-06	4.94E-06

Buna göre farklı dielektrik sabitli toprak içerisinde bulunan 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı, Şekil 5.43'de gösterilmiştir.



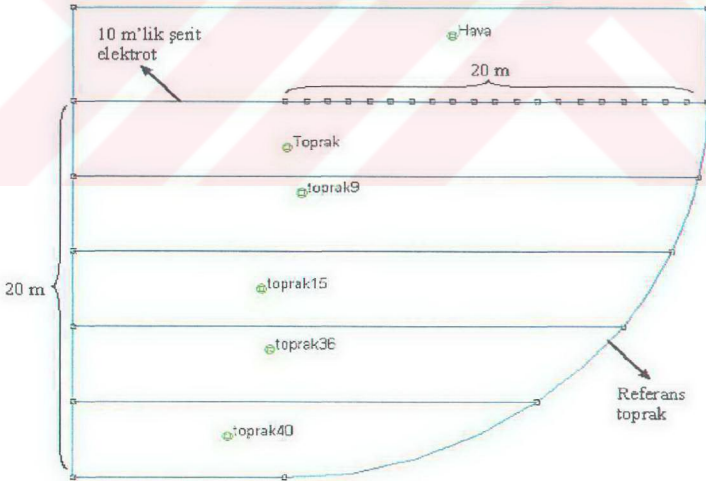
Şekil 5.43 10 m uzunluğunda, bağıl dielektrik sabiti farklı olan toprak içindeki şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımları

Şekil 5.43'den görüldüğü gibi dielektrik sabitinin artması durumunda toprak yüzeyindeki, topraklayıcı ile ondan 1 m uzaklıktaki noktada meydana gelen adım gerilimi değeri düşmektedir. Buradan da görülebileceği gibi toprağın bağıl dielektrik sabitinin artması adım gerilimi açısından özellikle topraklayıcıya yakın yerlerde beklenen sonuçları, yani adım geriliminin düşmesi sonucunu vermektedir.

5.5.4 Farklı Dielektrik Tabakalı Toprak İçine Gömülmüş 10 m Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcının Potansiyel Dağılımın SEY İle Hesabı

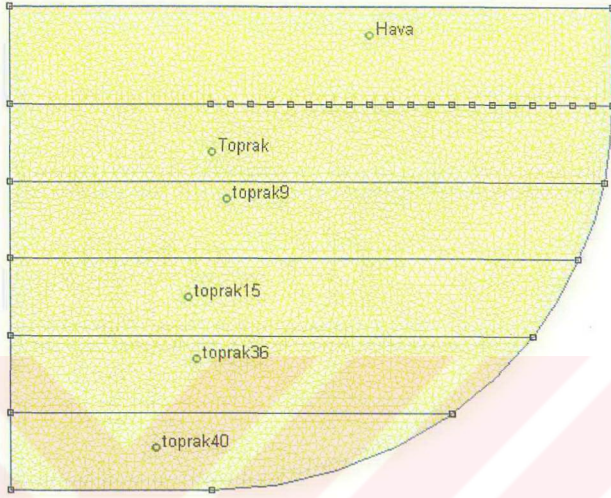
5.5.4.1 Seri Toprak Yapısı İçine Gömülme Durumu

10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının farklı bağıl dielektrik sabitli seri tabakalı toprak yapısı içinde gömülü olması durumundaki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla Şekil 5.44'deki model kurulmuştur. Bu modelde topraklayıcının farklı bağıl dielektrik sabitli 4 m kalınlığındaki tabakalı toprak yapısı içinde olması durumu göz önünde bulundurulmuştur. Bu amaçla öncelikli olarak bağıl dielektrik sabitleri en üsteki toprak tabakasından başlayarak küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olacak biçimde beş tabakalı toprak içinde, sonrasında ise büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9 ve 3 olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. Diğer kısımlarda göz önünde bulundurululan yaklaşımlar burada kullanılmıştır, sadece toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla aralarında 0,5 m'lik uzaklık bulunan düğümlerin yerine aralarında 1 m uzaklık bulunan düğüm noktalarının potansiyelleri hesaplanmıştır.

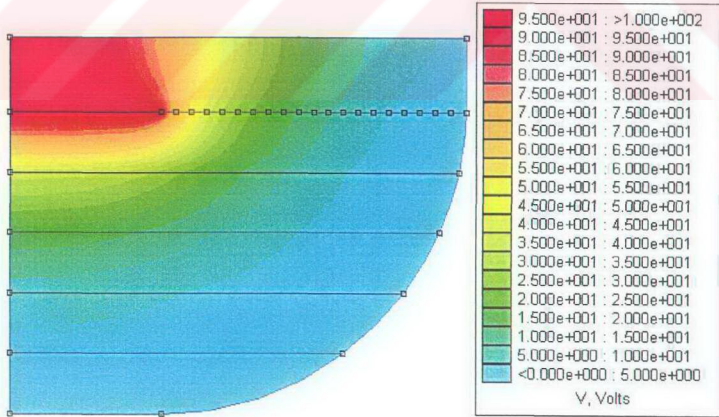


Şekil 5.44 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımın SEY ile bulunması amacıyla kurulan model

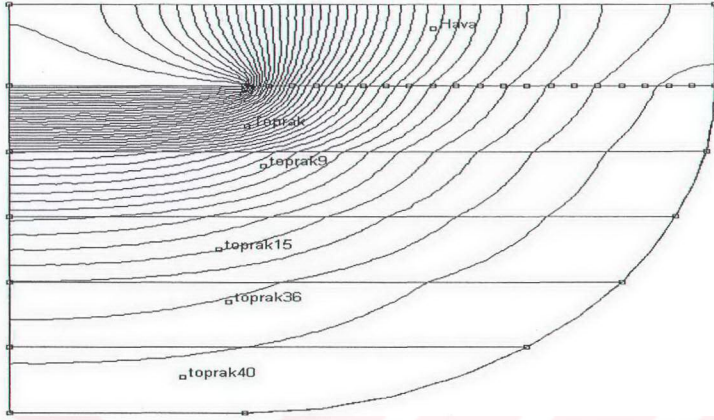
Şekil 5.44'de kurulan modelin üçgen sonlu elemanlara ayrıklaştırılması Şekil 5.45'de verilmiştir.



Şekil 5.45 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı hesabı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 5.46 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

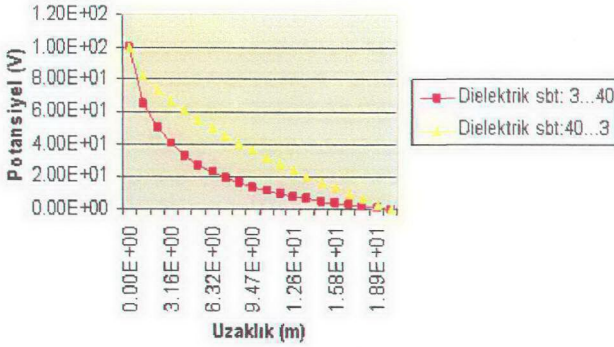


Şekil 5.47 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgiler

4 m kalınlığındaki toprak tabakalarının dielektrik sabitinin büyüktür küçüğe doğru azalması durumunda, şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının hesabı da yine aynı şekilde modeller kurularak yapılmıştır. Toprak tabakalarının bağıl dielektrik sabitlerinin değişmesine bağlı olarak yapılan tüm hesaplamaların sonuçları Tablo 5.18'de verilmiştir. Şekil 5.48'de grafiksel olarak bu durum gösterilmiştir.

Tablo 5.18 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde SEY ile bulunan potansiyel değerleri

Topraklayıcı uzunluğu (m)	L=10	
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	Dielektrik sbt: 3---40	Dielektrik sbt: 40---3
0.00E+00	1.00E+02	1.00E+02
1.05E+00	6.50E+01	8.23E+01
2.11E+00	5.03E+01	7.35E+01
3.16E+00	4.05E+01	6.67E+01
4.21E+00	3.31E+01	6.07E+01
5.26E+00	2.75E+01	5.53E+01
6.32E+00	2.29E+01	5.03E+01
7.37E+00	1.92E+01	4.56E+01
8.42E+00	1.61E+01	4.09E+01
9.47E+00	1.35E+01	3.65E+01
1.05E+01	1.13E+01	3.23E+01
1.16E+01	9.41E+00	2.82E+01
1.26E+01	7.80E+00	2.42E+01
1.37E+01	6.40E+00	2.04E+01
1.47E+01	5.18E+00	1.67E+01
1.58E+01	4.10E+00	1.31E+01
1.68E+01	3.12E+00	9.63E+00
1.79E+01	2.20E+00	6.31E+00
1.89E+01	1.27E+00	3.11E+00
2.00E+01	2.69E-06	6.94E-06

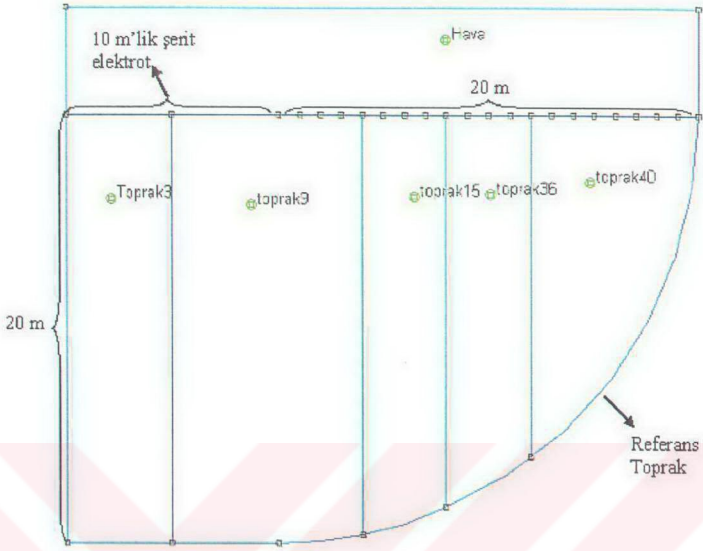


Şekil 5.48 4 m kalınlığında farklı bağıl dielektrik sabitli seri toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı

Şekil 5.48'den görüldüğü gibi 4 m kalınlıkta farklı bağıl dielektrik sabitlerine sahip toprak tabakaları içine gömülen topraklayıcıların çevresindeki potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Yine adım gerilimi değerleri de topraklayıcı yakında hızlı sonrasında ise daha yavaş bir şekilde azalmaktadır.

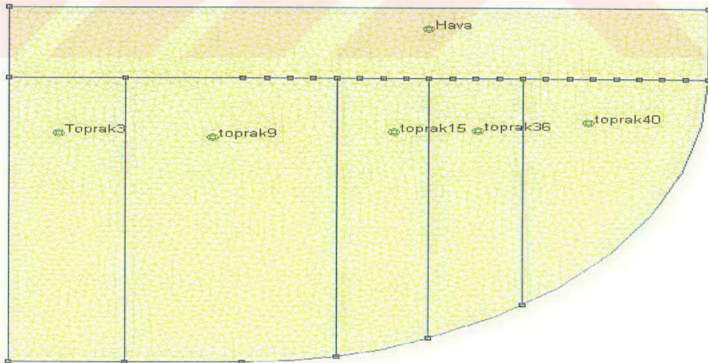
5.5.4.2 Paralel Toprak Yapısı İçine Gömülme Durumu

10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının farklı bağıl dielektrik sabitli paralel tabakalı toprak yapısı içinde gömülü olması durumundaki potansiyel dağılımının SEY ile hesaplanması amacıyla Şekil 5.49'deki model kurulmuştur. Bu modelde topraklayıcının farklı bağıl dielektrik sabitli farklı kalınlıktaki paralel tabakalı toprak yapısı içinde olması durumu göz önünde bulundurulmuştur. 10 m'lik şerit topraklayıcının yarısından itibaren toprak yapısının yani bağıl dielektrik sabitinin değiştiği düşünülerek model oluşturulmuştur. Bu amaçla öncelikli olarak dielektrik sabitleri en soldaki toprak tabakasından başlayarak küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36, 40 olacak biçimde beş tabakalı toprak içinde, sonrasında ise büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9 ve 3 olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları yapılmıştır. Diğer kısımlarda göz önünde bulundurululan yaklaşımlar burada kullanılmıştır, sadece toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımını bulmak amacıyla aralarında 0,5 m'lik uzaklık bulunan düğümlerin yerine aralarında 1 m uzaklık bulunan düğüm noktalarının potansiyelleri hesaplanmıştır.

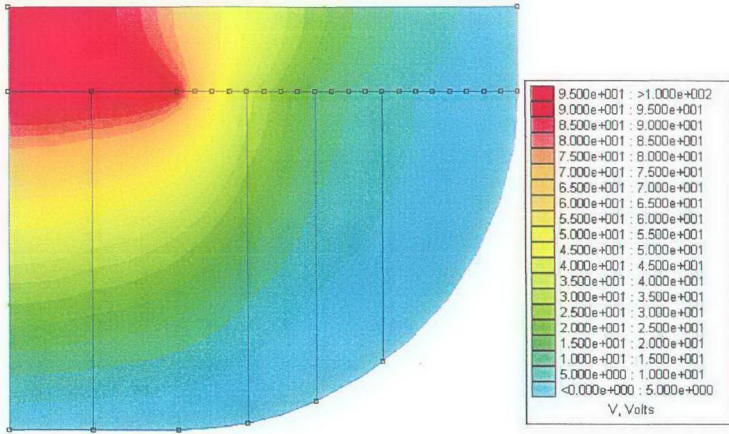


Şekil 5.49 Farklı kalınlıktaki, farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımının SEY ile bulunması amacıyla kurulan model

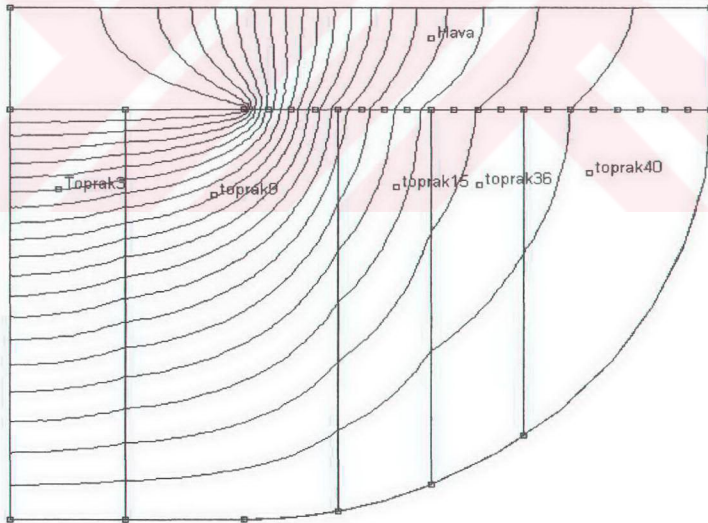
Şekil 5.49'da kurulan modelin üçgen sonlu elemanlara ayrıştırılması, Şekil 5.50'de gösterilmiştir.



Şekil 5.50 Farklı kalınlıktaki farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımı için kapalı bölgenin üçgen elemanlara ayrılması



Şekil 5.51 Farklı kalınlıktaki, farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel dağılımı

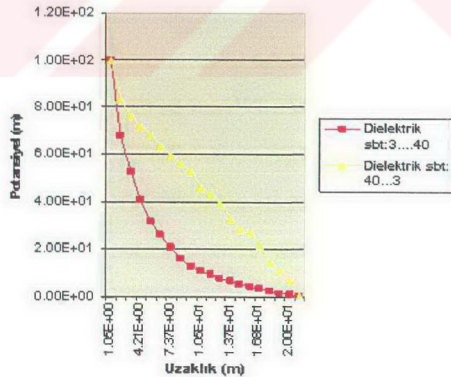


Şekil 5.52 Farklı kalınlıktaki farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan eşpotansiyel çizgileri

Farklı kalınlıklardaki paralel toprak tabakalarının bağıl dielektrik sabitinin büyükten küçüğe doğru azalması durumunda, şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının hesabı da yine aynı şekilde modeller kurularak yapılmıştır. Toprak tabakalarının dielektrik sabitlerinin değişmesine bağlı olarak yapılan tüm hesaplamaların sonuçları Tablo 5.19'da verilmiştir. Şekil 5.53'de grafik olarak bu durum gösterilmiştir.

Tablo 5.19 Farklı kalınlıkta, farklı bağıl dielektrik sabitli paralel toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki SEY ile bulunan potansiyel değerleri

Topraklayıcı boyu (m)	L=10m	
Toprak yüzeyinde elektrottan olan uzaklık(m)	3e-40e	40e-3e
0.0000000e+000	9.99999704e+001	9.99999844e+001
1.05263158e+000	6.78201685e+001	8.29852166e+001
2.10526316e+000	5.25231801e+001	7.59705292e+001
3.15789474e+000	4.08307735e+001	7.15799824e+001
4.21052632e+000	3.13567450e+001	6.81067241e+001
5.26315789e+000	2.57224717e+001	6.31944711e+001
6.31578947e+000	2.06718891e+001	5.91368114e+001
7.36842105e+000	1.59908998e+001	5.58172725e+001
8.42105263e+000	1.24947388e+001	5.24740247e+001
9.47368421e+000	1.07481442e+001	4.87263050e+001
1.05263158e+001	9.17101728e+000	4.54624985e+001
1.15789474e+001	7.72340911e+000	4.26126346e+001
1.26315789e+001	6.46177374e+000	3.78329202e+001
1.36842105e+001	5.34783037e+000	3.20473829e+001
1.47368421e+001	4.31062369e+000	2.65746924e+001
1.57894737e+001	3.34567033e+000	2.13739105e+001
1.68421053e+001	2.43791264e+000	1.63589042e+001
1.78947368e+001	1.58305344e+000	1.14621714e+001
1.89473684e+001	7.71551126e-001	6.44940516e+000
2.00000000e+001	1.94924760e-006	1.23164716e-005



Şekil 5.53 Farklı kalınlıktaki farklı bağıl dielektrik sabitli toprak tabakası içindeki 10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel değişimi

Şekil 5.53'den görüldüğü gibi farklı kalınlıkta farklı dielektrik sabitlerine sahip paralel toprak tabakaları içine gömülen topraklayıcıların çevresindeki potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmaktadır. Yine adım gerilimi değerleri de topraklayıcı yakında hızlı, sonrasında ise daha yavaş bir şekilde azalmaktadır.

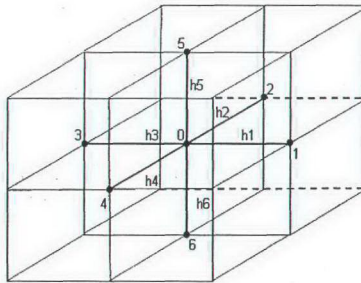


BÖLÜM 6 ŞERİT TOPRAKLAYICI ÇEVRESİNDEKİ POTANSİYEL DAĞILIMININ SFY İLE ÜÇ BOYUTLU SAYISAL ANALİZİ

6.1 5 m Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının Üç Boyutlu SFY ile Hesaplanması

5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı, üç boyutlu kartezyen koordinatlardaki SFY ile bulunan denklemler kullanılarak, bu bölümde verilen MS EXCEL'de geliştirilmiş yöntem ile kolaylıkla bulunabilir. Bu amaçla geliştirilen modelde de iki boyutlu incelemelerde olduğu gibi şerit topraklayıcıya 100 Volt uygulandığı ve şerit topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki her noktada potansiyelin 0 volt olduğu varsayımı yapılarak incelemeler yapılmıştır. Şekil 6.1'de üç boyutlu olarak inceleme yapılabilmesi amacıyla kullanılan ağ örneği görülmektedir. Bu örnek ağ modeli kullanılarak bir şerit topraklayıcının kartezyen koordinatlardaki potansiyel dağılımı için gerekli denklemler yazılabilir. Bu bölümde şerit topraklayıcının üç boyutlu sonlu farklar yöntemi ile elde edilen denklemleri ve bu üç boyutlu denklemlerin çözülmesi amacıyla MS EXCEL programında geliştirilen yöntem açıklanmaktadır.

6.1.1 Şerit Topraklayıcı Çevresindeki Potansiyel Dağılımının Bulunması İçin Üç Boyutlu Laplace Denkleminin Sonlu Farklar Yöntemi Çözülmesi



Şekil 6.1 Üç boyutlu ağ örneği

Kartezyen koordinatlarda üç boyutlu Laplace denklemi

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (6.1)$$

dir. Bu denklemin sonlu fark yazılımından yararlanılarak

$$\begin{aligned} & \frac{1}{h_1^2 + h_1 h_2} (V_1 + \frac{h_1}{h_2} V_2) - \frac{1 + \frac{h_1}{h_2}}{h_1^2 + h_1 h_2} V_0 + \frac{1}{h_3^2 + h_3 h_4} (V_3 + \frac{h_3}{h_4} V_4) - \frac{1 + \frac{h_3}{h_4}}{h_3^2 + h_3 h_4} V_0 + \\ & \frac{1}{h_5^2 + h_5 h_6} (V_5 + \frac{h_5}{h_6} V_6) - \frac{1 + \frac{h_5}{h_6}}{h_5^2 + h_5 h_6} V_0 = 0 \end{aligned} \quad (6.2)$$

elde edilir. Bu denklem düzenlenirken

$$\begin{aligned} h_{12} &= \frac{1}{h_1^2 + h_1 h_2} & h_{21} &= \frac{1}{h_2^2 + h_2 h_1} & h_{34} &= \frac{1}{h_3^2 + h_3 h_4} \\ h_{43} &= \frac{1}{h_3^2 + h_4 h_3} & h_{56} &= \frac{1}{h_5^2 + h_5 h_6} & h_{65} &= \frac{1}{h_6^2 + h_6 h_5} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Eşitlikleri kullanılırsa üç boyutlu düzgün olmayan bir ağda bir noktanın potansiyeli için

$$V_0 = \frac{h_{12} V_1 + h_{21} V_2 + h_{34} V_3 + h_{43} V_4 + h_{56} V_5 + h_{65} V_6}{h_{12} + h_{21} + h_{34} + h_{43} + h_{56} + h_{65}} \quad (6.4)$$

eşitliği elde edilir veya genel olarak

$$V_0 = \sum_{i=1}^6 k_i V_i \quad (6.5)$$

yazılır. Düzenli üç boyutlu (küplere bölünmüş) bir ağ $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 = h_5 = h_6 = h$

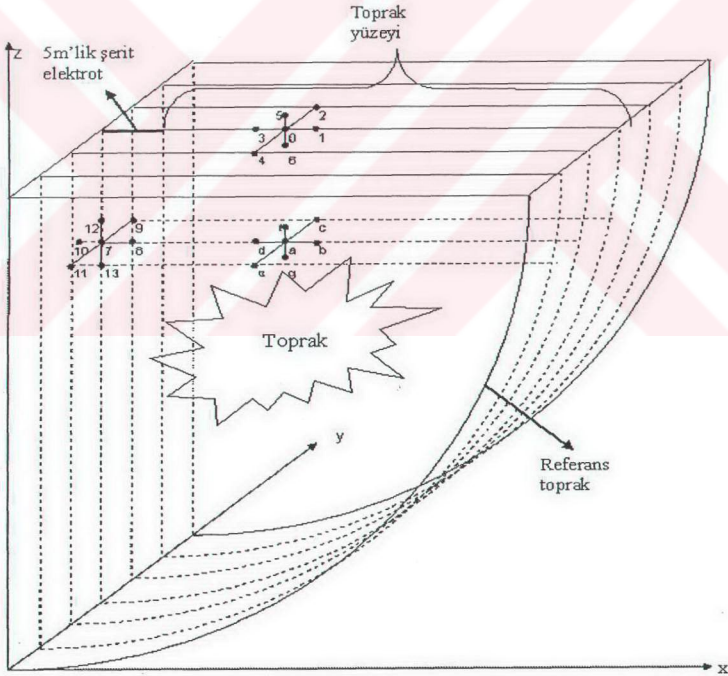
$$V_0 = \frac{1}{6} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6) \quad (6.6)$$

Farklı iki ortam olması durumunda, sınır koşulları gereği ortamların dielektrik sabitlerinin de etkilerinin göz önüne alınarak üç boyutlu sonlu farklar ifadesi (6.7) denkleminde verildiği gibi elde edilir.

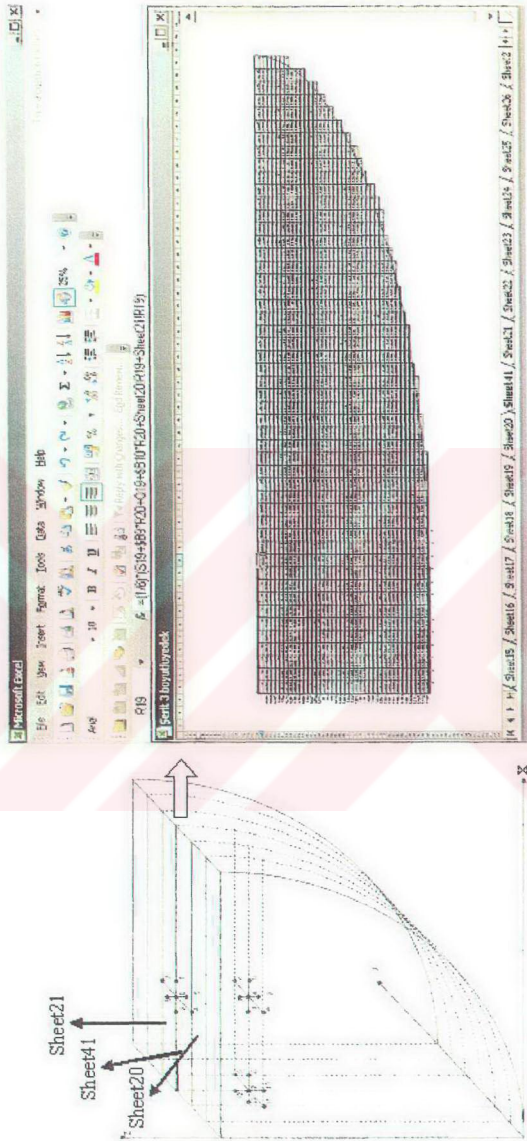
$$V_0 = \frac{1}{6}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}V_5 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}V_6) \quad (6.7)$$

(6.7) denkleminde verilen bağımlı dielektrik sabitleri ε_1 ve ε_2 değerleri sırasıyla havanın ve toprağın değerleri olan 1 ve 9 olarak alınmıştır [81].

6.1.2 MS EXCEL Programı İle Üç Boyutlu SFY Kullanılarak Elde Edilen Denklemlerin Çözümlemesi



Şekil 6.2 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının potansiyel dağılımını üç boyutlu koordinat sisteminde bulmak amacıyla geliştirilen model



Şekil 6.3 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu koordinat sisteminden MS EXCEL programına taşınmasının gösterilmesi

Şekil 6.2'de gösterilen modelde, toprak yüzeyinde bulunan 1, 2, 3, 4, 5 ve 6'ncı düğüm noktalarının potansiyelleri, düğüm noktaları farklı iki ortam olan toprak ve havanın sınırında yer aldıkları için (6.7) verilen denklem ile toprak içinde gösterilen a, b, c, d, e ve f düğüm noktalarının potansiyeli ise (6.6)'da verilen denklemle ve 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 numaralı düğüm noktalarının potansiyeli de yine (6.6)'da verilen denklem yardımıyla sadece 8 ve 10 numaralı düğüm noktalarının potansiyelleri simetrik olduğu için (6.6) denkleminde birbirlerine eşit olarak alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Her bir düğüm arasındaki uzaklık (h) değeri 0,5 m alınmıştır.

Şekil 6.2'de verilen üç boyutlu modeldeki şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının bulunması amacıyla SFY ile yazılan denklemlerin MS EXCEL programı kullanılarak hesaplanması amacıyla oluşturulan benzeşim modeli Şekil 6.3'de verilmiştir.

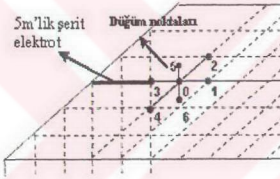
Üç boyutlu sonlu farklar yöntemi çözümlemesi ile potansiyeli bulunacak olan bir düğümün denklemi, çevresindeki h kadar uzaklıktaki 6 adet düğümün potansiyelin aritmetik ortalamasına yada eğer düğüm sınır noktasında ise sınır koşullarının da göz önüne alınarak yazılan denklemlerin çözülmesi ile bulunur.

Şekil 6.3'de belirtilen modelin düğüm denklemlerinin çözülmesi amacıyla MS EXCEL programına taşınma aşamaları aşağıdaki gibi açıklanabilir;

- Şekil 6.3'de üç boyutlu ağ gösteriliminde Şerit topraklayıcının bulunduğu tabaka, MS EXCEL programında bir sayfaya (sheet) taşınır. 5m'lik şerit topraklayıcının hesaplarında Şekil 6.3'de görüldüğü gibi elektrotun bulunduğu tabaka 41.sayfa (Sheet 41) olarak MS EXCEL'e taşınmıştır.
- Şerit topraklayıcının bulunduğu tabakanın y eksenine göre önünde ve arkasında bulunan tabakalar, MS EXCEL'de şerit topraklayıcının bulunduğu sayfanın solunda ve sağında bulunan sayfalar olarak taşınır. Bu şekilde şerit topraklayıcının yan kenarlarından (y eksenini üzerinde) 20 m uzaklıktaki mesafe, aralarında h (0,5 m) uzaklığı bulunan bu tabakalar vasıtasıyla bölünerek SFY'de kullanılan üç boyutlu gözlü ağ yapısı oluşturulmuş olur. Bu tabakaların her birinin MS EXCEL programındaki sayfalar (sheet) olarak taşınması ise SFY kullanılarak elde edilen düğüm denklemlerinin üç boyutlu olarak MS EXCEL programı vasıtasıyla kolay bir şekilde çözülmesini

sağlar. Şekil 6.3'de görüldüğü gibi üç boyutlu ağ modelinde y eksenine göre , şerit topraklayıcının bulunduğu tabakanın önünde ve arkasında bulunan tabakalar, MS EXCEL programında Sheet 41'in solunda ve sağındaki Sheet 20 ve Sheet 21 sayfaları olarak modellenir. Böylece şerit topraklayıcının bulunduğu tabakanın y eksenine göre önünde ve arkasındaki 20 m'lik mesafe her birinin arasında 0,5 m olan toplam 41 adet tabakanın, MS EXCEL programında yukarıda bahsedilen şekilde her bir tabakaya bir sayfa denk getirilmesiyle, şerit topraklayıcıda bulunduğu Sheet 41 dahil olmak üzere toplam 41 sayfa ile modellenir.

- Şekil 6.3'de gösterilen SFY çözümlemesinde kullanılan üç boyutlu ağ gösterilimin de toprak yüzeyinde bulunan "0" düğüm noktasının potansiyel denklemi çevresindeki diğer 6 düğüm noktasının potansiyel değerine bağlı olarak yazılabilir.



(1)

	Q	R	S	T
"5" düğümüne karşılık gelen hücre				
"3" düğümüne karşılık gelen hücre	100	44.14364	27.05149	19.58205
"0" düğümüne karşılık gelen hücre	50.40522	34.46318	24.65088	18.78184
"1" düğümüne karşılık gelen hücre	33.50684	26.940		
"6" düğümüne karşılık gelen hücre	25.40001	21.83181		

(2)

	Q	R	S	T
"4" düğümüne karşılık gelen hücre				
"0" düğümüne karşılık gelen hücre	50.33324	34.4016	24.60538	18.74
"1" düğümüne karşılık gelen hücre	39.28837	30.25844	23.08694	18.10
"2" düğümüne karşılık gelen hücre	30.3109	25.19472	20.47991	16.72
"3" düğümüne karşılık gelen hücre	24.16724	20.99621	17.85459	15.10
"6" düğümüne karşılık gelen hücre	19.84087	17.71443	16.53322	13.60

(3)

	Q	R	S	T
"2" düğümüne karşılık gelen hücre				
"0" düğümüne karşılık gelen hücre	50.45392	34.49526	24.67913	18.8
"1" düğümüne karşılık gelen hücre	39.40871	30.36194	23.16047	18.1
"2" düğümüne karşılık gelen hücre	30.4302	25.28739	20.5528	16.7
"3" düğümüne karşılık gelen hücre	24.28471	21.08747	17.92639	15.1

(4)

Şekil 6.4 SFY kullanılarak oluşturulan üç boyutlu ağ üzerindeki düğüm potansiyellerinin MS EXCEL eşleniği gösterilimi

- (1) Toprak yüzeyindeki düğümlerin üç boyutlu ağ gösterilimi
- (2) 0, 1, 3, 5, 6 numaralı düğümlere karşılık gelen hücrelerin EXCEL gösterilimi
- (3) Şerit topraklayıcının y eksenine göre önündeki tabakada yer alan 4 numaralı düğüme karşılık gelen hücrenin EXCEL sayfasal ve hücresel gösterilimi
- (4) Şerit topraklayıcının y eksenine göre arkasındaki tabakada yer alan 2 numaralı düğüme karşılık gelen hücrenin EXCEL sayfasal ve hücresel gösterilimi

- Şekil 6.4'de verilen yöntem ile toprak yüzeyinde bulunan "0" noktasının potansiyel denklemi 6.7'de verildiği gibi SFY kullanılarak yazıldıktan sonra, bu ifade MS EXCEL'de "0" düğüm noktasına karşılık gelen hücreye, MS EXCEL hücresel denklem yazılım metoduyla girilir. Buna göre Şekil 6.4 (2)'de verilen hücreye yazılacak olan "0" düğümünün potansiyeline karşılık gelecek olan hücresel denklem ifadesi;

$$(1/6)*(S19+0.2*R20+Q19+1.8*R20+Sheet20!R19+Sheet21!R19) \quad (6.8)$$

dir.

(6.8) denkleminde verilen ifadelerde S19 ifadesi MS EXCEL'de, Bölüm 3'de de açıklandığı gibi 6.7 ifadesindeki "1" düğümünün potansiyel değerine (V_1) eşit olan hücreyi, R20, Q19 ise sırasıyla "6" ve "3" düğümlerinin potansiyel değerine eşit olan hücreleri, Sheet20!R19 ve Sheet21!R19 ifadeleri ise "2" ve "4" düğümünün potansiyel değerlerine eşit olan hücreleri göstermektedir. "0" düğümünün önündeki düğüm olan "4" numaralı düğümün MS EXCEL'de tanımlanması Sheet20!R19 hücresine yani sayfa 20'deki R kolonundaki 19'uncu satırda bulunan hücre olacak şekilde girilir. 0,2 ve 1,8 değerleri "0" düğümü hava ve toprak arasındaki sınır yüzeyde bulunduğu için dielektrik sabitlerinden hesaplanan katsayılardır. (6.8) ifadesinde yer alan R20 ifadesi "5" ve "6" düğümleri simetrik olduğu için $R18 = R20$ olacağından R18 yerine R20 alınarak ifade yazılabilir. Böylece üç boyutlu olarak SFY kullanılarak elde edilen (3.7) denkleminin MS EXCEL'de hücresel denklem olarak yazılımı bu şekilde yapılabilir.

- Toprak yüzeyinde, toprak içinde ve y eksenine göre simetrik olan yerlerdeki tüm düğüm noktaları için aynı şekilde MS EXCEL hücresel denklemleri yazılır. MS EXCEL'de sadece bir düğüme karşılık gelen bir hücre için, hücresel denklem ifadesi girilmesi ve MS EXCEL'in kopyalama metodu kullanılarak diğer tüm düğümlere karşılık gelen hücrelere, SFY kullanılarak bulunan düğüm potansiyel ifadelerine karşılık gelen hücresel denklemleri kolaylıkla girilmiş olur. Q19 hücresi potansiyeli bilinen "3" nolu düğüm olduğu için bu hücreye şerit topraklayıcıya uygulanan 100 volt değeri girilir

ve 20 m uzaklıktaki referans toprağı temsil eden hücrelere ise 0 volt değerleri girilir.

- Tüm bu işlemler tamamlandıktan sonra MS EXCEL'de **T(ools)** menüsüne gidip, **O(ptions)**'dan **Calculation tab'**ı seçtikten sonra **Iteration** kutusunu işaretlemek gerekir. Bu özellik, Şekil 3.2'de verilen modeldeki, düğüm potansiyel denklemlerine karşı düşen hücre denklemlerin iteratif olarak çözülmesine olanak sağlayacaktır. Bu yapıldıktan sonra, düğüm potansiyellerine karşılık gelen MS EXCEL'deki hücreler içerisindeki yanıt değişmeyinceye kadar F9 tuşuna basılmalıdır. Böylece iterasyon işlemi yapılarak hücreler içerisinde, düğümlere karşılık düşen potansiyel değerleri hesaplanmış olur.

6.1.3 5 m Uzunluğundaki Şerit Topraklayıcının Üç Boyutlu Olarak Yapılan Hesaplamalar Sonucu Elde Edilen Potansiyel Dağılımı

5 m uzunluğunda ve 100 volt gerilim uygulanmış şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının üç boyutlu olarak MS EXCEL hücresel denklem metodu kullanılarak hesaplanması sonucu, toprak yüzeyindeki potansiyel dağılımı Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilmiştir. İki tablo halinde verilmesindeki amaç potansiyel değerlerinin gösterilim kolaylığının sağlanmasıdır. Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'deki değerler şerit topraklayıcının toprak yüzeyindeki meydana gelen potansiyel dağılım değerlerini göstermektedir. Tablo 6.1, toprak yüzeyinde 5 m'lik şerit topraklayıcıdan itibaren 10 m uzaklıktaki 0,5 m aralıklarla ve MS EXCEL'deki her bir sayfada elde edilen potansiyel değerlerini göstermektedir. Tablo 6.2'de ise toprak yüzeyinde şerit topraklayıcıdan uzaklığı 10 m ve 20 m arasında 0,5 m aralıklı olarak bulunan noktaların MS EXCEL'deki her bir sayfada elde edilen potansiyel değerleri gösterilmektedir.

Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilen değerler şerit topraklayıcının üç boyutlu olarak çevresindeki potansiyel dağılımının MS EXCEL'de incelenmesi hesaplarında toprak yüzeyinde bulunan potansiyel değerleridir. Tablo 6.1 ve Tablo 6.2'de verilen E.O.U. ifadesi "Elektrottan olan uzaklık" ifadesinin kısaltması olarak kullanılmıştır.

Tablo 6.1 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının ucuyla 10 m uzaklıktaki mesafe arasında üç boyutlu yapılan hesaplamalar sonucu bulunan potansiyel değerleri

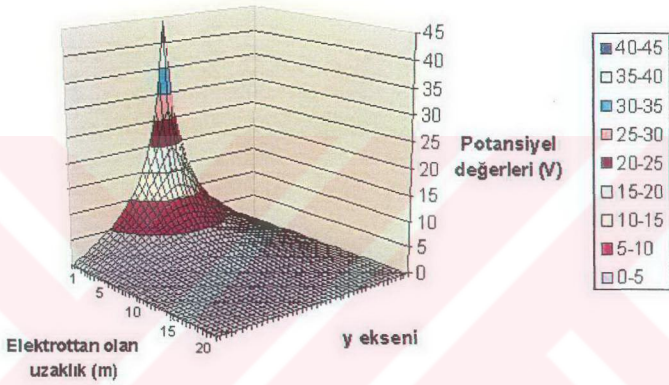
EOU (m)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10
Sheet1																				
Sheet2	0,543	0,5338	0,5108	0,4858	0,4595	0,4324	0,4051	0,378	0,3513	0,3255	0,3007	0,277	0,2547	0,2336	0,2139	0,1956	0,1785	0,1627	0,1481	0,1346
Sheet3	1,1161	1,0744	1,0274	0,9766	0,9232	0,8683	0,8128	0,7569	0,7001	0,652	0,602	0,5544	0,5094	0,4671	0,4278	0,3908	0,3565	0,3249	0,2966	0,2686
Sheet4	1,6931	1,6284	1,5558	1,4774	1,3951	1,3098	1,2228	1,1418	1,0598	0,9845	0,9045	0,8223	0,7404	0,6471	0,5647	0,4827	0,4023	0,3238	0,2482	0,1764
Sheet5	2,2693	2,203	2,102	1,9933	1,8755	1,7533	1,6268	1,5317	1,4197	1,3077	1,206	1,111	0,9931	0,8529	0,7085	0,5605	0,4086	0,2529	0,0934	0,0
Sheet6	2,8359	2,8462	2,8728	2,9236	2,9803	3,0422	3,1097	3,1829	3,2617	3,3464	3,4371	3,5339	3,6368	3,7459	3,8613	3,9831	4,1114	4,2462	4,3874	4,5349
Sheet7	3,6011	3,6066	3,6273	3,6527	3,6833	3,7188	3,7593	3,8048	3,8553	3,9108	3,9713	4,0368	4,1073	4,1828	4,2633	4,3488	4,4393	4,5348	4,6353	4,7408
Sheet8	4,331	4,344	4,3618	4,3862	4,4119	4,4386	4,4663	4,4950	4,5247	4,5554	4,5871	4,6198	4,6535	4,6882	4,7239	4,7606	4,7983	4,8370	4,8767	4,9174
Sheet9	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303	5,1303
Sheet10	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161	6,0161
Sheet11	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121	7,0121
Sheet12	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455	8,1455
Sheet13	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572	9,4572
Sheet14	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856	10,856
Sheet15	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356	12,356
Sheet16	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957	13,957
Sheet17	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658	15,658
Sheet18	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461	17,461
Sheet19	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364	19,364
Sheet20	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367	21,367
Sheet21	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470	23,470
Sheet22	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673	25,673
Sheet23	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976	27,976
Sheet24	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279	30,279
Sheet25	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582	32,582
Sheet26	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885	34,885
Sheet27	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188	37,188
Sheet28	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491	39,491
Sheet29	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794	41,794
Sheet30	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097	44,097
Sheet31	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400	46,400
Sheet32	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703	48,703
Sheet33	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006	51,006
Sheet34	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309	53,309
Sheet35	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612	55,612
Sheet36	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915	57,915
Sheet37	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218	60,218
Sheet38	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521	62,521
Sheet39	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824	64,824
Sheet40	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127	67,127

Tablo 6.2 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının 10 m ile 20 m uzaklıktaki mesafe arasında üç boyutlu olarak yapılan hesaplamalar sonucu bulunan potansiyel değerleri

E.O.U (m)	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19,5	20
Sheet1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sheet2	0,1221	0,1106	0,1	0,0803	0,0813	0,0728	0,0653	0,0561	0,0515	0,0454	0,0397	0,0343	0,0293	0,0246	0,0201	0,0159	0,0117	0,0077	0,0034	0
Sheet3	0,2437	0,2207	0,1995	0,1801	0,1621	0,1455	0,1302	0,116	0,1028	0,0905	0,0791	0,0695	0,0594	0,049	0,0401	0,0315	0,0233	0,0154	0,008	0
Sheet4	0,3843	0,3299	0,2992	0,269	0,2421	0,2173	0,1944	0,1731	0,1535	0,1352	0,1181	0,1027	0,0872	0,0731	0,0598	0,0471	0,0348	0,023	0,011	0
Sheet5	0,4834	0,4376	0,3955	0,3567	0,3209	0,286	0,2575	0,2284	0,2033	0,1791	0,1565	0,1353	0,1155	0,0969	0,0792	0,0623	0,0461	0,0304	0,015	0
Sheet6	0,6005	0,5434	0,4909	0,4426	0,3981	0,3571	0,3193	0,2844	0,252	0,2219	0,1939	0,1677	0,1432	0,12	0,0981	0,0772	0,0571	0,0377	0,019	0
Sheet7	0,7149	0,6466	0,5933	0,5426	0,4932	0,4424	0,3794	0,3348	0,2878	0,2635	0,2235	0,1911	0,1617	0,1425	0,1254	0,10816	0,0878	0,0678	0,0442	0
Sheet8	0,8262	0,7488	0,6704	0,6073	0,5459	0,4894	0,4374	0,3834	0,3498	0,3037	0,2653	0,2304	0,1958	0,1741	0,1541	0,1355	0,1168	0,0978	0,0761	0,0516
Sheet9	0,9336	0,8434	0,7608	0,6851	0,6157	0,5518	0,493	0,4388	0,3868	0,342	0,2987	0,2583	0,2204	0,1847	0,1509	0,1188	0,0878	0,0658	0,0428	0
Sheet10	1,0395	0,9367	0,8437	0,7594	0,6821	0,6111	0,5459	0,4857	0,43	0,3765	0,3305	0,2857	0,2438	0,2043	0,1688	0,133	0,0972	0,0643	0,0392	0
Sheet11	1,1341	1,0232	0,923	0,8294	0,7447	0,667	0,5958	0,5288	0,4691	0,4128	0,3679	0,3314	0,2857	0,2228	0,1819	0,1431	0,1059	0,0695	0,035	0
Sheet12	1,2258	1,1022	0,9952	0,8948	0,8031	0,7191	0,6418	0,5708	0,5051	0,4444	0,3919	0,3533	0,286	0,2337	0,1958	0,154	0,1114	0,0752	0,037	0
Sheet13	1,3108	1,1809	1,0628	0,9552	0,8569	0,7669	0,6843	0,6094	0,5393	0,4735	0,4133	0,3572	0,3048	0,2552	0,2095	0,164	0,1214	0,0801	0,04	0
Sheet14	1,3882	1,2489	1,1242	1,0089	0,9056	0,8102	0,7227	0,6423	0,5682	0,4987	0,4361	0,3768	0,3214	0,2682	0,2199	0,173	0,128	0,0845	0,042	0
Sheet15	1,4574	1,3179	1,1789	1,0585	0,9488	0,8465	0,7567	0,6747	0,5947	0,5229	0,4583	0,3942	0,3362	0,2816	0,23	0,1809	0,1339	0,0884	0,044	0
Sheet16	1,5178	1,3647	1,2262	1,1005	0,9881	0,8817	0,7861	0,6993	0,6175	0,5428	0,4736	0,4081	0,3489	0,2922	0,2387	0,1877	0,1389	0,0917	0,048	0
Sheet17	1,5681	1,4084	1,2688	1,1357	1,0173	0,9093	0,8105	0,7189	0,6385	0,5594	0,4898	0,4216	0,3584	0,301	0,2458	0,1934	0,1431	0,0944	0,047	0
Sheet18	1,6083	1,4449	1,2973	1,1635	1,0418	0,9311	0,8298	0,7369	0,6514	0,5725	0,4984	0,4313	0,3677	0,308	0,2515	0,1979	0,1463	0,0966	0,048	0
Sheet19	1,6378	1,4709	1,3202	1,1838	1,0598	0,947	0,8438	0,7492	0,6623	0,582	0,5078	0,4384	0,3737	0,313	0,2556	0,201	0,1487	0,0981	0,049	0
Sheet20	1,6595	1,487	1,3344	1,1963	1,0703	0,9567	0,8524	0,7568	0,6689	0,5878	0,5126	0,4427	0,3774	0,316	0,2589	0,2029	0,1501	0,0991	0,049	0
Sheet21	1,6828	1,4929	1,3396	1,2009	1,0749	0,9602	0,8555	0,7595	0,6712	0,5898	0,5144	0,4442	0,3787	0,3171	0,2589	0,2036	0,1506	0,0994	0,049	0
Sheet22	1,6591	1,4587	1,3359	1,1975	1,0719	0,9575	0,8531	0,7573	0,6693	0,5861	0,5129	0,4429	0,3776	0,3162	0,2582	0,203	0,1502	0,0991	0,049	0
Sheet23	1,6419	1,4743	1,3314	1,1861	1,0618	0,9465	0,8451	0,7503	0,6631	0,5827	0,5092	0,4388	0,3741	0,3132	0,2558	0,2012	0,1488	0,0982	0,049	0
Sheet24	1,5761	1,4159	1,2712	1,1309	1,0207	0,912	0,8127	0,7216	0,6378	0,5605	0,4889	0,4222	0,3593	0,3014	0,2461	0,1935	0,1432	0,0945	0,047	0
Sheet25	1,4692	1,3202	1,1861	1,0543	0,9535	0,8524	0,7598	0,6748	0,5966	0,5244	0,4574	0,3951	0,3368	0,2821	0,2304	0,1812	0,1341	0,0885	0,044	0
Sheet26	1,3725	1,2326	1,1057	0,9903	0,885	0,7887	0,7004	0,6192	0,5441	0,4746	0,4059	0,3485	0,2927	0,239	0,188	0,139	0,0918	0,048	0	0
Sheet27	1,2568	1,1223	1,0163	0,9108	0,8144	0,7261	0,6419	0,5612	0,4841	0,4104	0,3404	0,2747	0,2114	0,1504	0,0921	0,0368	0,017	0,0077	0,004	0
Sheet28	1,1932	1,0712	0,962	0,8624	0,7714	0,6879	0,6112	0,5406	0,4752	0,4147	0,3578	0,3021	0,2488	0,1963	0,1442	0,0921	0,0368	0,017	0,0077	0,004
Sheet29	1,2387	1,1155	1,0039	0,9019	0,8068	0,7237	0,6455	0,5737	0,5073	0,4462	0,3894	0,3364	0,2868	0,2333	0,1824	0,1335	0,0841	0,0368	0,017	0,0077
Sheet30	1,1471	1,0399	0,9307	0,8365	0,7505	0,6716	0,5953	0,5227	0,4713	0,4145	0,3617	0,3128	0,2666	0,2233	0,1824	0,1435	0,1062	0,0701	0,035	0
Sheet31	1,0492	0,9462	0,8522	0,7663	0,6877	0,6157	0,5485	0,4866	0,4333	0,3803	0,3319	0,2868	0,2446	0,2049	0,1674	0,1317	0,0974	0,0643	0,0332	0
Sheet32	0,9457	0,8534	0,769	0,69318	0,621	0,5581	0,4965	0,4415	0,3908	0,3438	0,3001	0,2584	0,2212	0,1854	0,1514	0,1191	0,0881	0,0582	0,029	0
Sheet33	0,8375	0,7581	0,6816	0,6134	0,5509	0,4938	0,4406	0,3919	0,3469	0,3053	0,2665	0,2304	0,1965	0,1647	0,1345	0,1059	0,0783	0,0519	0,026	0
Sheet34	0,7251	0,655	0,5907	0,5318	0,4777	0,428	0,3823	0,3401	0,3011	0,265	0,2314	0,2	0,1706	0,143	0,1188	0,0919	0,068	0,0449	0,022	0
Sheet35	0,6093	0,5506	0,4968	0,4474	0,402	0,3603	0,3218	0,2854	0,2536	0,2231	0,1949	0,1685	0,1437	0,1204	0,0984	0,0774	0,0573	0,0378	0,019	0
Sheet36	0,4907	0,4436	0,4004	0,3606	0,3241	0,2905	0,2596	0,231	0,2046	0,18	0,1572	0,1359	0,116	0,0972	0,0794	0,0625	0,0462	0,0305	0,015	0
Sheet37	0,3699	0,3345	0,302	0,2721	0,2446	0,2193	0,1959	0,1744	0,1544	0,1359	0,1187	0,1028	0,0878	0,0734	0,06	0,0472	0,0349	0,0231	0,011	0
Sheet38	0,2475	0,2239	0,2021	0,1821	0,1637	0,1468	0,1312	0,1168	0,1034	0,091	0,0795	0,0688	0,0587	0,0492	0,0402	0,0316	0,0234	0,0154	0,008	0
Sheet39	0,124	0,1122	0,1013	0,0913	0,0821	0,0736	0,0658	0,0585	0,0518	0,0456	0,0398	0,0345	0,0294	0,0247	0,0201	0,0153	0,0117	0,0077	0,004	0
Sheet40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

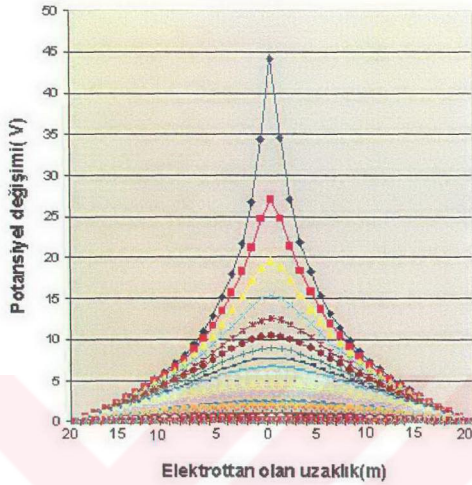
5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının SFY kullanılarak üç boyutlu olarak yapılan hesaplamaları sonucu elde edilen potansiyel değerleri grafik olarak Şekil 6.5'de

gösterilmiştir. Şekil 6.5'den görüldüğü gibi şerit topraklayıcının ucundan itibaren toprak yüzeyinde potansiyel değer uzaklık arttıkça azalmaktadır. Üç boyutlu olarak çizilen Şekil 6.5'den de görülebileceği gibi şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel değerleri topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalarak potansiyel çadırına benzer şekilde bir görünüm oluşturmaktadır. Aynı zamanda özellikle canlılar bakımından önemli olan adım gerilimi bakımından da incelendiğinde potansiyel değerleri azalmaktadır.



Şekil 6.5 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının üç boyutlu gösterilimi

Şekil 6.5'den de görüldüğü gibi şerit topraklayıcının bulunduğu noktadan itibaren uzaklaştıkça potansiyel değerleri azalmaktadır. Potansiyel dağılımın y eksenine göre simetrik olduğu düşünülürse şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının bir çadıra benzediği söylenebilir ve bu çadıra "potansiyel çadırı" adı verilir. Şekil 6.6'da ise y eksenı boyunca şerit topraklayıcının önden görünüşü gösterilmektedir. Buna göre şerit topraklayıcının yan kenarlarından ve öne doğru olan mesafelerdeki potansiyel değişimi görülmektedir. Şekil 6.6'dan da anlaşılacağı üzere şerit topraklayıcının yan kenarından ve ucundan itibaren potansiyel değerleri azalmaktadır.



Şekil 6.6 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu hesaplamalarla bulunan potansiyel dağılımının önden görünüşü



Şekil 6.7 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu hesaplamalarla bulunan potansiyel dağılımının üstten görünüşü

Şekil 6.7'de 5 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının üç boyutlu hesaplamalarla bulunan potansiyel dağılımının üstten görünüşü verilmiştir. Şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının üstten görünüşünden de anlaşılacağı üzere, şerit topraklayıcının çevresindeki eşpotansiyel çizgileri simetri olma özelliği de göz önünde bulundurularak bir elipse benzediği söylenebilir.

Şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının, üç boyutlu Laplace denkleminin SFY kullanılarak yazılan ifadelerinin, MS EXCEL'de tezin bu bölümünde önerilen hücresel denklem çözüm yöntemi ile hesaplanması oldukça kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilir. Bu yöntem ile bulunan sonuçlardan da görülebileceği gibi bir şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı üç boyutlu olarak EXCEL hücresel denklemi çözüm yöntemi ile kolaylıkla bulunabilir ve diğer kullanılan topraklayıcılar için benzer şekilde çözümlemeler yapılarak topraklayıcıların çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplanabilir.

BÖLÜM 7 SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu doktora tezinde, yapısı ve bağıl dielektrik sabiti farklı toprak tabakaları içinde uzunlukları, çapları, gömülme derinlikleri farklı çubuk, küre ve şerit topraklayıcıların çevrelerinde oluşturdıkları potansiyel dağılımlarının hesabı iki boyutlu ve üç boyutlu silindirselsel, küresel ve kartezyen koordinat sistemlerinde Sonlu Farklar Yöntemi (SFY), Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ve analitik olarak hesaplanmış ve bu yöntemler sonucu elde edilen değerler karşılaştırılarak potansiyel hesaplarına yeni bir yaklaşım getirilmiştir. Bunun için çubuk, küre ve şerit topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımlarının bulunması amacıyla modeller oluşturulmuş ve bu modeller üzerinde Laplace denkleminin Sonlu Farklar Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile elde edilen ifadeleri yazılarak topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımları çıkartılmıştır.

Sonlu Farklar Yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalarda, iki boyutlu ve üç boyutlu koordinat sistemlerinde Laplace denkleminin sonlu fark karşılıkları yazılarak çözümleme yapılmıştır. Bu yöntem sonucu elde edilen ifadelerde potansiyel değerleri bilinmeyen noktalardaki değerlerin, kendisine komşu olan potansiyel değerleri bilinen noktalara bağlı olarak bulunabileceği görülür. Sonlu farklar yönteminde kapalı bölge kare, dikdörtgen veya üçgen şeklinde gözle bölünerek bir gözlü ağ yapı oluşturulur.

Bu tez çalışmasında, SFY'deki kare gözlü ağ yapısı MS EXCEL programındaki hücreler ağ yapıyla benzeştirilmiş ve sonlu farklar yöntemi ile elde edilen topraklayıcı çevresindeki potansiyeli bilinmeyen düğümlerin denklemlerinin yazılması ve denklem sisteminin çözülmesi işlemi söz konusu benzeşimden yararlanılarak MS EXCEL programı ile yapılarak, bu tip problemlerin çözümünde kullanılabilecek diğer bilgisayar programlarına göre (MATLAB vb.) matrisel ifadeler yazılmadan çok kolay ve hızlı bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir.

Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılarak yapılan topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplarında topraklayıcı modelleri kurulmuş ve ilkesi "kapalı bir bölge içinde enerjinin minimumlaştırılması ilkesine" göre hesap yapan FEMM 4.0 (Finite Element Method Magnetic) bilgisayar programından yararlanılmıştır.

Potansiyel dağılımı hesaplarında ilerde yapılabilecek olan bu tip çalışmalarda kolaylık olması açısından topraklayıcıya 100 volt uygulandığı varsayımı yapılmış ve literatürde yer alan referans toprak kavramı olarak da topraklayıcıdan 20 m uzaklıktaki yeryüzeyi alınarak topraklayıcı ile referans toprak arasında kalan bölge içerisinde potansiyel dağılımları incelenmiştir.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiş ve değerlendirilmiştir:

Topraklayıcı çeşitlerinden biri olan çubuk topraklayıcının 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 metre uzunluklarda olması durumunda SFY ile yapılan hesaplamalar sonucu özellikle canlılar açısından önem taşıyan toprak yüzeyindeki potansiyel değerleri, topraklayıcıdan yaklaşık olarak 5,5 metre uzaklıkta 100 Volt'luk bir potansiyel düzeyinden tek haneli potansiyel değerlerine düşerek, topraklayıcı yakınında hızlı bir azalma göstermiş ve daha sonra bu azalma yavaşlaşmıştır. Bu durum literatürde belirtilen çalışmalar sonucu Şekil 1.10'da verilen topraklayıcıdan uzaklaştıkça toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerin azaldığını gösteren grafiğe uymaktadır.

Çubuk topraklayıcının farklı uzunluklarda olması durumunda topraklayıcı ile ondan 1 m uzaklıktaki adım gerilimi değerleri incelendiğinde, topraklayıcı boyunun uzaması adım gerilimini de Tablo 3.8'den görülebileceği gibi düşürmektedir. Bu özellikle çubuk topraklayıcının boyunun 1 m'den 2 m'ye çıkması durumunda adım gerilimi üzerinde yaklaşık %13,8'lik bir azalmaya neden olmakla birlikte, çubuk topraklayıcı boyunun 3 m'den sonra her 1 m'lik artışına karşılık adım gerilimindeki azalmaların daha yavaş bir seyir izlediği görülmektedir. Görüldüğü gibi çubuk topraklayıcının 3-5 m arasında seçilmesi topraklama yapılacak yerde maliyet göz önünde bulundurulursa yeterli olabilmektedir. Genel olarak çubuk topraklayıcı boyunun uzatılması canlılar için tehlikeli olabilecek adım geriliminin düşmesine neden olmaktadır.

Çubuk topraklayıcının farklı uzunlukta olması durumunda SEY kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu elde edilen değerler, SFY ile yapılan hesaplamalara yakın sonuçlar vermiştir. Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcının toprak yüzeyindeki potansiyel değerlerinin SFY ve SEY kullanılarak elde edilen değerleri arasında yapılan ortalama bağıl hata oranı özellikle topraklayıcı yakınında 0,02846 olarak elde edilir. Bu orandan da görülebileceği gibi topraklayıcı yakınında her iki yöntem ile elde edilen değerler birbirlerine yakındırlar. Farklı uzunluklardaki çubuk topraklayıcı için SEY ile elde edilen adım gerilimi SFY'de olduğu gibi topraklayıcı boyu arttıkça azalmakta ve bu azalma topraklayıcı boyunun 3 m'den sonra her 1 m'lik artışına karşılık daha yavaş bir seyir izlemektedir

SEY kullanılarak elde edilen çubuk topraklayıcı çevresindeki eşpotansiyel çizgilerden görülebileceği gibi, topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı z eksenine göre simetrik elipsoidlerdir. Çubuk topraklayıcıya çok yakın eş potansiyel yüzeylerin küçük eksenleri, büyük eksenlerine göre çok kısadır, onun için bunlar yaklaşık olarak silindirler olarak kabul edilebilirler. Çubuk boyunun uzaması, topraklayıcıyla referans toprak arasındaki bölge içinde oluşan eşpotansiyel çizgilerinin de birbirlerine daha sık olmasına yani toprak yüzeyinde iki nokta arasındaki potansiyel farkının daha az olmasına neden olmaktadır.

Çubuk topraklayıcının 50 cm derinliğe gömülmesi durumunda çevresinde oluşan potansiyel dağılımı sonucu elde edilen adım gerilimi değerleri topraklayıcıdan 1 m uzaklıkta topraklayıcının toprak yüzeyinde olması haline göre adım gerilimi üzerinde yaklaşık %71,49'luk topraklayıcıdan 2 m uzaklıkta %19,33'lük ve 3 m uzaklıkta olması durumunda ise %10,94'lük bir azalmaya neden olmaktadır. Topraklayıcıdan uzaklaştıkça bu azalma daha yavaş olmakta ve topraklayıcıdan 5 m'lik uzaklıktan sonra ise adım gerilimi değerleri topraklayıcının yüzeyde ve 50 cm derinliğe gömülme durumunda olmasına göre birbirlerine çok daha yakınlaşarak azalma oranının düşmesine neden olmaktadır. Topraklama sistemlerinde adım geriliminin topraklayıcı yakınında düşük olması amaçlandığından topraklayıcının 50 cm derinliğe gömülmesi daha uygundur.

Çubuk topraklayıcı boyunun 1, 2 ve 3 m olması durumunda analitik olarak çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplanarak, SEY ve SFY kullanılarak yapılan

hesaplamaların doğruluğunun karşılaştırılması yapılmıştır. Bu karşılaştırmalar sonucunda özellikle topraklayıcıdan 10 m uzaklığa kadar toprak yüzeyinde aralarında 0,5 m uzaklık bulunan yerlerin SEY ve SFY kullanılarak elde edilen potansiyel değerleri ile analitik olarak hesaplanan değerleri arasında yapılan ortalama bağıl hata oranı 0,036 olarak elde edilmiştir. Buradan da görülebileceği gibi topraklayıcı yakınında potansiyel dağılımı hesapları SEY ve SFY ile kolaylıkla yapılabilir ve doğru olan sonuçlara ulaşılabilir.

Çubuk topraklayıcının görevini yerine getirirken çevresinde meydana gelebilecek korona olayı ise SEY kullanılarak modellenmiştir. Korona olayında topraklayıcı çevresinde oluşan iyonize bölgenin kalınlığı SEY'de çubuk topraklayıcının çapının artmasıyla benzeştirilerek hesaplamalar yapılmıştır. Buna göre topraklayıcıya uygulanan gerilim değişmediği göz önünde bulundurulursa, topraklayıcı çapının artması yani korona olayı toprak yüzeyinde potansiyel dağılımının artmasına neden olmaktadır.

Küre topraklayıcılar çevresindeki potansiyel dağılımının bulunması amacıyla 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1 ve 1 m çapındaki (uygulamada çok büyük çaplı küre elektrotlar kullanılmamakla birlikte sadece hesaplamalar açısından karşılaştırma yapmak amacıyla küre çapı 1 m'ye kadar çıkılmıştır) küre topraklayıcılar düşünülerek SFY, SEY ve analitik olarak çözümlemeler yapmak amacıyla modeller kurulmuş ve farklı çaplardaki küre topraklayıcılar için hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda küre topraklayıcıdan itibaren toprak yüzeyinde oluşan gerilim hunisi ve potansiyel çadırı şekillerinden görülebileceği gibi topraklayıcıdan uzaklaştıkça potansiyel azalmakta, gerilim değişimi ise artmaktadır. SFY ve SEY kullanılarak elde edilen 0,25 m yarıçapındaki küre topraklayıcının r eksenini boyunca oluşan potansiyel ve gerilim dağılımının uzaklığa bağlı olarak değişimlerini gösteren Şekil 4.13'ün, daha önce farklı yöntemlerle yapılan çalışmalar sonucu bir küre topraklayıcı çevresindeki potansiyel ve gerilim dağılımının uzaklığa bağlı olarak değişimini gösteren Şekil 4.2 ile örtüştüğü görülmektedir. Bu durum yapılan hesaplamaların doğruluğunun bir göstergesidir.

Küre topraklayıcıda, kürenin r eksenini boyunca potansiyel dağılımı hesaplarında, topraklayıcıdan 8 m uzaklığa kadar SFY, SEY ve analitik olarak elde edilen değerler

arasında yapılan ortalama bağıl hata oranı 0,0090 olarak elde edilmiştir. Farklı çaplardaki küre topraklayıcıların SEY ve SFY ile elde edilen potansiyel değerlerinde yapılan bağıl hata oranı ise yaklaşık 0,011 olarak bulunmuştur. Küre çapının artması toprak yüzeyinde adım gerilimin azalmasına neden olmaktadır. Bu azalma özellikle küre çapının en az olduğu 0,02 m ile en fazla olduğu 1 m durumlarına bakıldığında daha belirgin olarak kendini göstermektedir. Ancak küre çapının çok büyütülmesi, maliyeti de artıracığından, çok elverişli bir çözüm yöntemi değildir.

Küre topraklayıcı çevresinde meydana gelen, SEY kullanılarak elde edilen eşpotansiyel çizgilerinin de küresel bir yapı gösterdiği görülmektedir. Küre çapı arttıkça, eş potansiyel çizgilerinin de birbirlerine yakınlaştıkları görülür.

Topraklayıcıların diğer bir çeşidi olan şerit topraklayıcının 2, 3, 5, 10, 15, 20, 25 ve 50 metre uzunluklarda olması durumunda iki boyutlu koordinat sisteminde SFY ile yapılan hesaplamalar sonucu çubuk topraklayıcıda olduğu gibi topraklayıcı ucundan referans toprağa doğru gidildikçe toprak yüzeyinde bulunan potansiyel değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu azalma şerit topraklayıcıda, çubuk topraklayıcıda da olduğu gibi topraklayıcıya uygulandığı varsayılan 100 volt'luk potansiyel değerinden tek haneli potansiyel değerlerine, topraklayıcıdan yaklaşık 5,5 m mesafeden itibaren değil de yaklaşık 14,5 - 15 m mesafeden itibaren inmektedir. Buradan da görülebileceği gibi şerit topraklayıcı için potansiyel dağılımı azalması çubuk elektrota göre keskin bir şekilde değil de daha yavaş olmaktadır.

SFY kullanılarak yapılan hesaplamalarda, şerit topraklayıcının topraklayıcı ile ondan 1 m uzaklıkta elde edilen adım gerilimi topraklayıcı boyu arttıkça azaldığı görülmektedir. Şerit topraklayıcı boyunun 50 m olması durumunda adım gerilimi değeri topraklayıcının 2 m olması durumuna göre % 16,5'luk bir azalma göstermektedir. Aynı uzunluktaki çubuk ve şerit topraklayıcının toprak yüzeyinde meydana getirdiği adım gerilimi karşılaştırıldığında şerit topraklayıcı kullanılması durumunda adım gerilimi değeri, çubuk topraklayıcıya göre yaklaşık % 57 oranında daha az bir değer almaktadır. Bu nedenle topraklayıcının, topraklama yapılacak olan yerin boyutunun da göz önünde bulundurularak şerit topraklayıcı olarak kullanılması tehlikeli gerilimlerden olan adım gerilimi açısından daha uygundur.

Şerit topraklayıcı çevresindeki SEY kullanılarak elde edilen potansiyel değerleri ile SFY kullanılarak elde edilen potansiyel değerleri arasında yapılan ortalama bağıl hata oranı 0,0086 olarak elde edilmiştir.

Şerit topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımının üç boyutlu sonlu farklar yöntemi çözümlenmesi amacıyla MS EXCEL tablolama programında Bölüm 6'da geniş bir şekilde açıklanan bir çözümleme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem ile üç boyutlu olarak sonlu farklar denklemlerinin yazılmasının, çözümlenmesinin oldukça kolay ve hızlı bir şekilde yapılabileceği gösterilmiştir. Bu amaçla yapılan üç boyutlu çalışma sonucunda şerit topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımı, Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da verilen gerek üç boyutlu gerekse iki boyutlu grafiksel gösterilimden de görülebileceği gibi azalmakta ve bu azalmanın şekli bir çadıra benzemektedir.

Bu tez çalışmasında, gerilime maruz kalmış bir topraklayıcının çevresinde oluşturduğu potansiyel dağılımı hesaplarının yanısıra, toprağın yapısının ve bağıl dielektrik sabitinin değişmesi durumunda bu dağılıma olan etkileri de incelenmiştir. Topraklayıcıların davranışı, mevsimsel ve yerel toprak iletkenliğinin değişmesinden etkilenir. Bu tezde bu durumları incelemek amacıyla, farklı bir yaklaşım ve yöntem kullanarak yapılan, seri ve paralel tabakalı toprağa gömülü topraklayıcılar çevresinde sonlu elemanlar yöntemi ile potansiyel dağılımı hesaplamaları da yapılmıştır.

Literatürde, bu tezde de Kaynaklar bölümünde de bazıları verilen gerek topraklama direncinin gerekse potansiyel dağılımının belirlenmesine yönelik deneysel, analitik ve sayısal bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların bazısında, çalışılan toprak öz direnci ile birlikte buna karşı gelen dielektrik sabitleri de verilmektedir. Literatürden bu bilgiler toplanarak Tablo 3.16'da bir araya getirilmiştir. Bu tablodan yararlanarak şerit ve çubuk topraklayıcıların sonlu elemanlar yöntemi ile potansiyel dağılımı hesaplanmıştır. Hesaplarda topraklayıcı çevresinde toprak yapısı için, mevsimsel hava değişimlerine, doğa ve konum durumlarına bağlı olarak olabilecek değişik toprak durumları göz önüne alınmıştır. Örneğin yazın sıcaktan toprağın üst tabakaları kurumaya başlarken alt bölümler daha nemli kalır veya yağışlı mevsimlerde toprağın üst bölümleri alt bölümlerden daha nemli olur veya topraklayıcı çevresinde iletkenlik bakımından değişik iletkenlikli topraklar bulunabilir, konulabilir veya topraklayıcı böyle bir toprak içine yerleştirilmek

durumunda kalınabilir. Bu tür durumlarda topraklayıcının davranışını bilebilmek için gerçeğe uygun olarak problemi modellemek ve incelemek gerekir. Bu doktora tezinde bu durumlar modellenmeye çalışılmış ve incelemeler bu modeller üzerinden yapılmıştır.

Toprak ve su, dielektrik sabitleri farklı malzemelerdir. Toprak ile suyun bir arada bulunduğu yani nemli toprak veya çamur gibi farklı su içeren topraklar, karma malzeme gibi davranırlar. Karma malzemenin dielektrik sabiti, bir arada bulunan malzemelerin (toprağın ve suyun) dielektrik sabitlerine ve hacimsel oranlarına bağlıdır. Toprak su emdikçe iletkenliği artar, direnci azalır ve artan su oranı ile birlikte dielektrik sabiti büyür. Buna karşılık toprak kurudukça iletkenliği azalır, direnci artar ve azalan su oranı ile dielektrik sabiti küçülür. Bütün bu bilgilerin yanında sayısal olarak topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımını sonlu elemanlar yöntemi ile statik elektrik alan ve potansiyel hesabından yararlanarak bulurken malzeme (toprak) özelliği olarak öz direnç yerine dielektrik sabitini kullanmak gerekir. Bu aşamada Tablo 3.16'daki verilerden yararlanılabilir.

10 m uzunluğundaki şerit topraklayıcının birbirine seri farklı dielektrik sabatine sahip ve yer yüzeyine dik birbirine paralel toprak yapısı içinde olması durumunda potansiyel dağılımı hesapları SEY kullanarak yapılmıştır. Buna göre seri toprak yapısı içinde toprak bağıl dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren küçükten büyüğe doğru 3, 9, 15, 36 ve 40 olması durumunda elde edilen potansiyel dağılımı topraklayıcıdan uzaklaştıkça hızlı bir şekilde parabolik olarak azalmakta, toprak tabakalarının bağıl dielektrik sabitinin üst tabakadan itibaren büyükten küçüğe doğru 40, 36, 15, 9 ve 3 olması durumunda ise potansiyel değerleri yine topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmakta ancak bu azalmanın doğrusal bir azalmaya daha yakın olduğu görülmektedir. Buna bağlı olarak adım gerilimi değerlerinin de topraklayıcıdan uzaklaştıkça azalmakta olduğu görülür. Topraklayıcının yerleştirildiği toprak tabakalarının yeryüzüne dik paralel olması durumunda da, benzer sonuçlar elde edilmiş olmakla birlikte, paralel toprak tabakasında, seri toprak tabakasına göre topraklayıcı çevresindeki potansiyel değerleri yaklaşık %2,9 daha büyüktür.

Seri ve paralel toprak tabakası içindeki bir şerit topraklayıcı çevresinde oluşan eşpotansiyel çizgiler, topraklayıcı yakınında birbirlerine yaklaşmakta,

topraklayıcıdan uzaklaştıkça ise birbirlerinden uzaklaşmaktadırlar. Toprağın dielektrik sabitinin değişmesi eşpotansiyel çizgilerin seyrinin değişmesine bir çeşit dalgalanmasına neden olmaktadır. Paralel toprak yapısındaki eşpotansiyel çizgiler, seri tabakalı toprak yapısına göre topraklayıcı yakınında daha sık oldukları görülmüştür.

5 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının farklı dielektrik sabitli toprak yapısı içinde olması durumunda da, şerit topraklayıcıda olduğu gibi SEY kullanarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucu, çubuk topraklayıcının toprak tabakalarının bağıl dielektrik sabitlerinin üst tabakadan başlayarak büyükten küçüğe doğru azalması ve artması durumunda da şerit topraklayıcıda olduğu gibi sonuçlar elde edilmekle birlikte, çubuk topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı, bağıl dielektrik sabitinin her iki durumu içinde topraklayıcıdan uzaklaştıkça parabolik bir azalma gösterdiği görülmüştür.

Tezin Ek C bölümünde, toprağı modellemek amacı ile toprak yerine elektrolitik sıvı kullanarak, bu elektrolitik sıvı içine yerleştirilen çubuk topraklayıcının ve toprağın yıldırım darbe gerilimindeki davranışı analiz edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla yapılan Deney-1, Deney-2 ve Deney-3 gerçekleştirildikten sonra elde edilen ve Tablo 3.2, Tablo 3.3 ile Tablo 3.4'te verilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, çalışılan topraklama direnci aralığında çubuk topraklayıcıya uygulanan gerilimi dolayısıyla akımı değiştirmenin sonuçları etkilemediği görülmüştür. Bunun nedeni toprak modeli olarak kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğinin yüksek, karşı düşen öz direncin çok küçük olmasıdır. Çünkü uygulamada 50-100 Ω 'lar mertebesinde olan toprak öz dirençleri üzerindeki gerilim düşümleri geçen akımın büyüklüğü ile orantılı olarak yüksektir. Çalışmada ise sabit genlikli darbe gerilimi için k Ω mertebesinde öz direnci olan elektrolitten geçen akımlar çok küçük olmuştur. Her üç deneyde direnç değerini değiştirmek öz direnci, akımı değiştirecek ölçüde olmadığından sonuçlarda bu durum görülmüştür.

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 dolayısıyla 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 Ω m düzeyinde toprak özdirencine eşdeğer ortam elde edebilmek için 0,01 S/m iletkenliğe sahip bir ortam yaratmak gerekir. Bunun için piyasada bulunan en düşük iletkenliğe sahip sıvı kullanılacak olsa bile bunun mertebesi 20 μ S/m olduğundan bu da bize 50000 Ω m'lik bir özdirenç sağlayacaktır. Bu da deneyin amacına uymamaktadır. Geriye, uygun çözümü; yani yayılma direncini elde etmek için, özdirenç parametresi daha fazla değiştirilemediği için boyutları değiştirmek seçeneğini kullanmak kalmaktadır. Buradan da deney kabının çapının ve yüksekliğinin artırılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

Bu tez çalışması sonucu ilerde yapılabilecek çalışmalar için yapılan öneriler aşağıdadır:

Bu doktora tezinde yapılan çalışmalarla bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı hesaplarının SFY ve SEY kullanılarak yapılabileceği ortaya konmuştur. Bu yöntemlerle yapılan hesaplamalarda kullanılan denklemlerin yazılması ve bu denklemlerin çözümlenmesi MS EXCEL programındaki ve bu tezde "hücrel denklemler çözüm yöntemi" adı verilen yeni bir yöntemle diğer yöntemlere göre çok daha kolay ve hızlı bir biçimde yapılabileceği gösterilmiştir. Örneğin 1 m uzunluğundaki çubuk topraklayıcının çevresindeki potansiyel dağılımının SFY kullanılarak çözümlenmesi amacıyla oluşturulan gözlü ağ modelinde 362 adet düğüm denklemi yazılmalı ve bu denklemlerde bilinmeyen düğümlerin

katsayılarından oluşan matrisin diğer bilgisayar programlarında (MATLAB v.b) çözümlenmesi için tek tek katsayıların girilmesi gerekmektedir. Oysa tezde iki boyutlu çözümlmelerde Bölüm 3'de ve üç boyutlu çözümlmelerde Bölüm 6'da geniş olarak anlatılan yöntem ile sadece bir düğüm denklemi yazılarak ve MS EXCEL özelliklerini kullanarak çok hızlı, kolay olarak çözümlmeler yapılabileceği gösterilmiştir. Bu özellik kullanılarak bir programlama dili ile yazılabilecek (Visual Basic gibi) bir yazılım ile bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı hesapları ve grafiksel olarak gösterilimi yapılabilir.

Bir topraklayıcı çevresindeki potansiyel dağılımı hesapları, yük benzetim yöntemi gibi farklı yöntemler kullanılarak da yapılabilir ve bu tezde elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılabilir. Bu tezde topraklayıcılar olarak çubuk, şerit ve küre göz önünde bulundurulmuştur. Ancak yatay ve dikey topraklayıcıların birlikte kullanılarak oluşturulan topraklama ağlarının potansiyel dağılımı hesaplamaları yapılmamış olup tezde açılan yöntemler ve bilgiler ışığında SFY ve SEY kullanılarak bu hesaplamalarda yapılabilir.

Tez çalışmasında yapılan yıldırım darbe gerilimi deneyi yukarda açıklandığı gibi özdirenç parametresi daha fazla değiştirilemediği için, deney düzeneğinin yani deney kabının çapının ve yüksekliğinin artırılması gerekliliği ortaya çıktıktan sonra, deneysel çalışma sonlandırılmış ve teoriksel çalışmaya geçilmiştir. Eğer deney kabı boyutu deney için gerekli olacak boyuta çıkartılabilseydi, farklı topraklayıcı çeşitleri için topraklayıcıya pozitif ve negatif kutbiyetli yıldırım darbe gerilim uygulanarak topraklayıcının su ile modellenen toprak içinde olması ve olmaması durumlarına göre toprağın davranışı incelenebilecekti.

KAYNAKLAR

- [1] Bayram, M., 1977. Elektrik Tesislerinde Topraklama, İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi, İstanbul.
- [2] Bayram, M., 1995. Elektrik Tesislerinde Güvenlik, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.
- [3] Kaşıkçı, İ., 2002. Elektrik Tesislerinde Topraklama Yönetmeliği Uygulama Kitabı, İstanbul.
- [4] Chisholm, W. A., Chow, Y. L., Srivastava, K. D., 1983. Lightning Surge Response of Transmissions Towers, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **102**, 3232-3242.
- [5] Fisher, F. A., Anderson, J. G., 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.
- [6] Hara, T., Yamamoto, O., 1996. Modelling of a Transmission Tower for Lightning Surge Analysis, *IEE Proceeding Generation, Transmission, Distribution*, **143**, 283-289.
- [7] Hara, T., Yamamoto, O., Kitagawa, M., Ono, S., 1995. Flashover Analysis of 500 kV Transmission Tower When Struck by Lightning, *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, Austria.
- [8] Ishii, M., Baba, Y., 1997, Numerical Electromagnetic Field Analysis of Tower Surge Response, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**, 483-488.
- [9] Ishii, M., 1991. Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **6**, 1327-1335.
- [10] Baba, Y., Ishii, M., 2001. Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **16**, 324-328.
- [11] Wahab, M. A. A., Matsubara, I., Kinoshita, H., 1987. An Experimental Evaluation of Some Factors Affecting Tower Surge Impedance, *Transactions on Institute of Electrical Engineers Japan*, **77**, 171-177.
- [12] Jose Alberto Gutierrez, R., Jose Luis Naredo, V., Pablo Moreno, V., 1999, Transmission Line Tower Modelling for Lightning Performance Analysis, *IEEE Power Engineering Review*.
- [13] Lundholm, R., Finn, R. B., Price, W. S., 1958. Calculation of Transmission Line Lightning Voltages by Field Concepts, *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1271-1283.
- [14] Miller, C. J. Jr., 1956. Anomalous Flashovers on Transmission Lines, *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **75**, 897-907.

- [15] Yasuda, Y., Hirakawa, Y., Shiraishi, K., Hara, T., 2001. Sensitivity Analysis on Grounding Models for 500 kV Transmission Lines, *Transactions on Institute of Electrical Engineers Japan*, **121**, 1386-1393.
- [16] Wagner, C. F., 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.
- [17] Wagner, C. F., 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.
- [18] 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.
- [19] Sargent, M. A., Darveniza, M., 1967. The Calculation of Double Circuit Outage Rate of Transmission Lines, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **86**, 665-678.
- [20] Meng, Q., He, J., Dawalibi, F. P., Ma, J., 1999. A New Method to Decrease Ground Resistances of Substation Grounding Systems in High Resistivity Regions, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **14**, 911-916.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Takahashi, T., 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.
- [24] Thapar, B., Gerez, V. Emmanuel, P., 1993. Ground Resistance of the Foot in Substation Yards, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **8**, 1-6.
- [25] Thapar, B., Gerez, V., Kejriwal, H., 1994. Reduction Factor for the Ground Resistance of the Foot in Substation Yards, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **9**, 360-368.
- [26] Thapar, B., Gerez, V., Singh, V., 1993. Effective Ground Resistance of the Human Feet in High Voltage Switchyards, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **8**, 7-12.
- [27] Yung, E. K. N., 1993. Analysis of a Rectangular Earthing Plate, *IEE Proceedings-C*, **140**, 381-388.
- [28] Jin liang, H., Gang, Y., Jun, Z., Zhicheng, G., 2003 Lightning Transient Characteristics of Substation Considering Soil Ionization Around Grounding Conductors of Grounding System, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.

- [29] Jun, Z., Gito, J., Jin liang, H., Zeng, R., 2003. Speedy Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- [30] 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.
- [31] Thapar, B., Puri, K., 1967. Mesh Potentials in High Voltage Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **86**, 249-254.
- [32] Sato, S., Zaengl, W. S., 1988., Effective Grounding Mesh Calculation Technique, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **3**, 173-182.
- [33] Sargent, M. A., Darveniza, M., 1969. Tower Surge Impedance, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **88**, 680-687.
- [34] Dawalibi, F., Mukhedkar, D., 1975. Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Earth Structure, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **94**, 252-270.
- [35] Dawalibi, F., Mukhedkar, D., 1979. Influence of Ground Rods on Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **98**, 2089-2098.
- [36] 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.
- [37] Gupta, B. R., Thapar, B., 1980. Impulse Impedance of Rectangular Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **99**, 2357-2362.
- [38] Carlo, M., Ciuseppe, M., 1983. Impulse Behaviour of Ground Electrodes, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **102**, 3148-3156.
- [39] Papalexopoulos, A. D., Meliopoulos, A. P., 1987. Frequency Dependent Characteristics, of Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **2**, 1073-1081.
- [40] Ramamoorthy, M., Narayanan, M.,M., Parameswaran, S., Mukhedkar, D., 1989. Transient Performance of Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 2053-2059.
- [41] Gupta, B. R., Singh, V. K., 1992. Impulse Inductance of Rectangular Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **7**, 214-217.
- [42] Gupta, B. R., Singh, V. K., 1992. Inductance of Rectangular Grids, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **7**, 1218-1221.
- [43] Meliopoulos, A. P. S., Xia, F., Joy, E. B., Cokkinides, G. J., 1993. An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **8**, 13-23.
- [44] Xiong, W., Dawalibi, F.P., 1994. Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lightning and Similar Surge Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **9**, 1412-1420.

- [45] Grcev, L. D., Transient Performance of Substation Grounding grids During Lightning Discharge, 1995. Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, Austria.
- [46] Bogensperger, J. H., Frei, J., Pack, S., 1995. Resistance of Grounding Systems Stationary and Transient Behaviour, *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering*, Graz, Austria.
- [47] Grcev, L., 1996. Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11, 815-823.
- [48] Grcev, L. D., Heimbach, M., 1997. Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substation Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12, 172-178.
- [49] Chow, Y. L., Elsherbiny, M. M., Salama, M. M. A., 1997. Surface Voltages and Resistance of Grounding Systems of Grid and Rods in Two Layer Earth by the Rapid Galerkin's Moment Method, 1997. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12, 179-185
- [50] Heimbach, M., Grcev, L. D., 1997. Grounding System Analysis in Transient Programs Applying Electromagnetic Field Approach, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12, 186-193.
- [51] Nixon, K. J., Jandrell, I. R., Geldenhuys, H. J., 2000. Sensitivity Analysis of Parameters Influencing The Lightning Impulse Current Behaviour of Earth Electrode Components, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- [52] Griffiths, H., Davies, A. M., 2000. Effective Length of Earth Electrodes Under High Frequency And Transient Conditions, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- [53] Lorentzou, M. I., Hatziargyriou, N. D., 2000. Effective Dimensioning of Extended Grounding Systems For Lightning Protection, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- [54] Visacro, S., Soares, A., Vale, M. H. M., Schroeder, M. A. O., 2000. Evaluation of Current and Potential Distribution For Lightning Protection System Including The Behaviour of Grounding Electrodes, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- [55] 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.
- [56] Geri, A., 2000. Practical Design Criteria of Grounding System Under Surge Conditions, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- [57] Lorentzou, M. I., 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*, Greece.
- [58] Toseva, V.A., Grcev, L., 2003. Theoretical Aspects of High Frequency Analysis of Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Istanbul.

- [59] Toseva, V.A., Grcev, L., 2003. High Frequency Current Distribution in Horizontal Grounding Systems in Two-Layer Soil, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Istanbul.
- [60] Tanabe, K., 2000. Calculation Results For Dynamic Behaviour of Grounding Systems Obtained Using The FD-TD Method, *25th International Conference on Lightning Protection*, Greece.
- [61] Tanabe, K., Asakawa, A., 2003. Computer Analysis of Transient Performance of Grounding Grid Element Based on the Finite-Difference Time-Domain Method, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Istanbul.
- [62] Chen, G., Pilling, N., Osman, M., 2003. Effect of High Resistive Barrier on Earthing System, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- [63] Van der Linde, F., Zedan, B., Griffiths, H., Haddad, A., 2003. The Impulse Response of Earth Grids, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- [64] Chonghui, L., Jin liang, H., Yanqing, G., Rong, Z., Jun, Z., 2003. Effective Length of Extended Earthing Electrode Under Lighting Impulse, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- [65] Gonos, I. F., Kontargyri, V. T., Topalis, F. V., Stathopoulos, I. A., 2003. Transient Behaviour of a Horizontal Electrode Under Impulse Current, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- [66] Abdallah, M. A., 2003. High Frequency Performance of An Earthing System, *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- [67] Abdallah, M. A., 2003. Effect of Soil Ionization on the Lightning Current Distribution in Earthing System *XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering*, Rotterdam, Netherlands.
- [68] Verma, R., Mukhedkar, D., 1981. Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **100**, 1023-1030.
- [69] Meliopolous, A. P., Moharam, M. G., 1983. Transient Analysis of Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **102**, 389-399.
- [70] Menter, F., Grcev, L., 1994. EMTP Based Model for Grounding System Analysis, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **9**, 1838-1849.
- [71] Grcev, L., Dawalibi, F., 1990. An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 1773-1781.
- [72] Grcev, L., 1992. Computation of Transient Voltages Near Complex Grounding Systems Caused by Lightning Currents, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 393-400.

- [73] Meeker, D., 2004. FEMM 4.0 Finite Element Method Magnetism Software.
- [74] Özkaya, M., 1996. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 2: Aşırı Gerilimler ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [75] Şentürk, E., 2004. Geçici Rejimlerde Topraklama Sistemlerinin Performans Analizi, *Doktora Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [76] Çelikyay, M., 1995. Enerji Sistemlerinde Topraklama Ağlarının Bilgisayar Destekli Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [77] Hasse, P., 2000. Overvoltage Protection of Low Voltage Systems, *IEEE Power and Energy Series 33*, London.
- [78] TMMOB, 2001. Elektrik Tesislerinde Topraklamalar Yönetmeliği, Elektrik Mühendisleri Odası Bursa Şubesi, Bursa.
- [79] Cardoso, J. S., 1994. FEM Modelling of Grounding Systems With Unbounded Approach, *IEEE Transactions on Magnetism*, **30**, 2893-2896.
- [80] Özkaya, M., 1996. Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1: Statik Elektrik Alanları ve Boşalma Olayları, Birsan Yayınevi, İstanbul
- [81] Kalenderli, Ö., 2003. Elektrik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, Ders Notları, İ.T.Ü., İstanbul.
- [82] Sadiku, M. N. O., 1992. Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [83] Kalenderli, Ö., Özdemir, A., 1990. Yüksek Gerilim Laboratuvarı Deneyleri, İ.T.Ü., Elektrik-Elektronik Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.
- [84] Özkaya, M., 1984. Yüksek Gerilim Tekniğinde Ölçme, İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi Sayı:1282, İstanbul.

EK A SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Ek A.1 Sonlu Farklar Yöntemi

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 manyetik 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.

Burada Laplace denklemini 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 ağı 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 dikdörtgen gözlerden oluşmuş bir ağ için fark denklemleri çıkarılacaktır. Kare, dikdörtgenin özel bir durumu olduğundan, elde edilen sonuçlar istenirse kare gözlü ağlara uygulanabilir. Bu çıkarımla düzensiz ağ kullanmanın getireceği zorluklar da görülmüş olacaktır.

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 işleçler 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

$$\Delta f_i = f_{i+1} - f_i \quad (A.1)$$

ikinci mertebeden ileri fark,

$$\Delta^2 f_i = f_{i+2} - 2f_{i+1} + f_i \quad (A.2)$$

n. mertebeden ileri fark,

$$\Delta^n f_i = \Delta(\Delta^{n-1} f_i) = \Delta^{n-1} f_{i+1} - \Delta^{n-1} f_i \quad (A.3)$$

birinci mertebeden geri fark,

$$\nabla f_i = f_i - f_{i-1} \quad (A.4)$$

ikinci mertebeden geri fark,

$$\nabla^2 f_i = f_i - 2f_{i-1} + f_{i-2} \quad (A.5)$$

n. mertebeden geri fark,

$$\nabla^n f_i = \nabla^{n-1} f_i - \nabla^{n-1} f_{i-1} \quad (\text{A.6})$$

birinci mertebeden merkezi fark,

$$\delta f_i = \delta f_{i+1/2} - \delta f_{i-1/2} \quad (\text{A.7})$$

n. mertebeden merkezi fark,

$$\delta^n f_i = \delta^{n-1} f_{i+1/2} - \delta^{n-1} f_{i-1/2} \quad (\text{A.8})$$

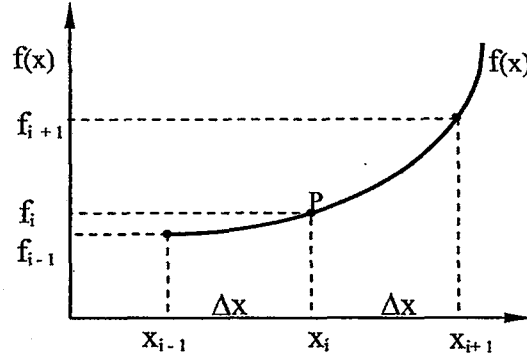
olarak tanımlanır. İndisli gösterimle yapılan bu tanımlamalarda, h noktalar arasındaki uzaklığı veya fark aralığını veya adım büyüklüğünü göstermek üzere

$$\begin{aligned} f_i &= f(x) \\ f_{i+1} &= f(x+h) \\ f_{i-1} &= f(x-h) \\ f_{i+1/2} &= f(x+h/2) \\ f_{i-1/2} &= f(x-h/2) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

dir. Tablo A.1'de birinci mertebeden sonlu farklar algoritmasına göre, örnek olarak çok kullanılan, birinci ve ikinci mertebe türev tanımları verilmiştir. Şekil A1, bu tanımlardaki gösterimin ve yapılan işlemlerin anlaşılmasına yardımcı olması amacıyla çizilmiştir.

Tablo A.1 Birinci mertebeden sonlu farklar algoritmasına göre türev tanımları

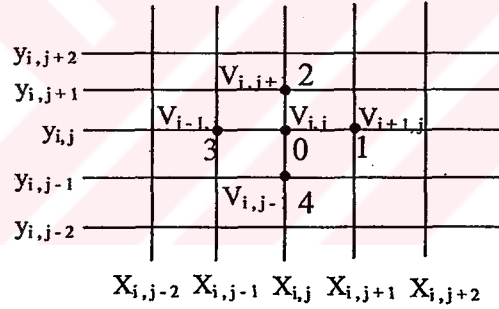
Sonlu farklar	Birinci mertebe türev	İkinci mertebe türev
İleri farklar	$\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f_{i+1} - f_i}{ x_{i+1} - x_i } = \frac{f_{i+1} - f_i}{\Delta x}$	$\frac{d^2 f}{dx^2} \cong \frac{f_{i+2} - 2f_{i+1} + f_i}{(\Delta x)^2}$
Geri farklar	$\frac{df(x)}{dx} \cong \frac{f_i - f_{i-1}}{ x_i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



Şekil A.1 Türevin tanımı

Ek A.2 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 A.2 Dikdörtgen göznlü ağ parçası

Şekil A.2'de x-y düzleminde, kenarları x ve y eksenlerine paralel dikdörtgen gözlerden oluşmuş düzgün olmayan bir ağ parçası gösterilmiştir. Yatay ve dikey çizgilerin kesişim noktaları ağı 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 yazılması gerekir. Bu yazımı elde etmek için bir $f(x)$ işlevinin bir x_n noktasında

ileriye ve geriye doğru Taylor serisine açılımları olan

$$\begin{aligned} f(x_n + h) &= f(x_n) + hf'(x_n) + \frac{h^2}{2!} f''(x_n) + \frac{h^3}{3!} f'''(x_n) + \dots \\ f(x_n - h) &= f(x_n) - hf'(x_n) + \frac{h^2}{2!} f''(x_n) - \frac{h^3}{3!} f'''(x_n) + \dots \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

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

$$f''(x_n) = \frac{[f(x_n + h) - 2f(x_n) + f(x_n - h)]}{h^2} + R(h^2) = \frac{d^2 f}{dx^2} \Big|_{x=x_n} \quad (\text{A.11})$$

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. (A.11) denklemi, y sabit tutularak x için yazılmıştır. Benzer şekilde x sabit tutularak y için de yazılabilir [81].

$$f''(y_n) = \frac{[f(y_n + h) - 2f(y_n) + f(y_n - h)]}{k^2} + R(h^2) = \frac{d^2 f}{dy^2} \Big|_{y=y_n} \quad (\text{A.12})$$

Kartezyen koordinat sisteminde Laplace denklemi,

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{A.13})$$

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

$$\nabla^2 V_{i,j} = \frac{(V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j})}{h^2} + \frac{(V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1})}{k^2} = 0 \quad (\text{A.14})$$

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,

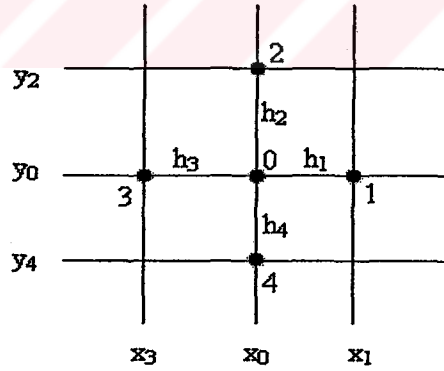
$$\nabla^2 V_{i,j} = \frac{1}{h^2} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} - 4V_{i,j}) = 0 \quad (\text{A.15})$$

olur. Bu eşitlikten

$$V_{i,j} = \frac{1}{4} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1}) \quad (\text{A.16})$$

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 A.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 A.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

$$\begin{aligned}
V(x, y) = & V(x_0, y_0) + \frac{1}{1!} [(x - x_0)V_x(x_0, y_0) + (y - y_0)V_y(x_0, y_0)] \\
& + \frac{1}{2!} [(x - x_0)^2 V_{xx}(x_0, y_0) + 2(x - x_0)(y - y_0)V_{xy}(x_0, y_0) + (y - y_0)^2 V_{yy}(x_0, y_0)] \\
& + \frac{1}{3!} [(x - x_0)^3 V_{xxx}(x_0, y_0) + 3(x - x_0)^2 (y - y_0)V_{xxy}(x_0, y_0) \\
& + 3(x - x_0)(y - y_0)^2 V_{xyy}(x_0, y_0) + (y - y_0)^3 V_{yyy}(x_0, y_0)] + R_{xy}(x_0, y_0)
\end{aligned} \quad (A.17)$$

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

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

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 (A.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.

$$V(1) = V(x_0, y_0) + h_1 V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_1^2 V_{xx}(x_0, y_0) \quad (A.18)$$

$$V(2) = V(x_0, y_0) + h_2 V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_2^2 V_{yy}(x_0, y_0) \quad (A.19)$$

$$V(3) = V(x_0, y_0) + h_3 V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_3^2 V_{xx}(x_0, y_0) \quad (A.20)$$

$$V(4) = V(x_0, y_0) + h_4 V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2} h_4^2 V_{yy}(x_0, y_0) \quad (A.21)$$

Sırasıyla (A.18) ile (A.20)'nin ve (A.19) ile (A.21)'in toplamlarından aşağıdaki iki denklem elde edilir.

$$V(1) + V(3) - 2V(x_0, y_0) = (h_1 - h_3)V_x(x_0, y_0) + \frac{1}{2}(h_1^2 + h_3^2)V_{xx}(x_0, y_0) \quad (A.22)$$

$$V(2) + V(4) - 2V(x_0, y_0) = (h_2 - h_4)V_y(x_0, y_0) + \frac{1}{2}(h_2^2 + h_4^2)V_{yy}(x_0, y_0) \quad (A.23)$$

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

$$\begin{aligned} V_x(x_0, y_0) &= \frac{\frac{h_3}{h_1}[V(1) - V(x_0, y_0)] + \frac{h_1}{h_3}[V(x_0, y_0) - V(3)]}{(h_1 + h_3)} \\ &= \frac{h_3}{h_1(h_1 + h_3)}V(1) + \frac{(h_1 - h_3)}{h_1 h_3}V(x_0, y_0) - \frac{h_1}{h_3(h_1 + h_3)}V(3) \end{aligned} \quad (A.24)$$

$$\begin{aligned} V_y(x_0, y_0) &= \frac{\frac{h_4}{h_2}[V(2) - V(x_0, y_0)] + \frac{h_2}{h_4}[V(x_0, y_0) - V(4)]}{(h_2 + h_4)} \\ &= \frac{h_4}{h_2(h_2 + h_4)}V(2) + \frac{(h_2 - h_4)}{h_2 h_4}V(x_0, y_0) - \frac{h_2}{h_4(h_2 + h_4)}V(4) \end{aligned} \quad (A.25)$$

(A.24) denklemi (A.22)'de ve (A.25) denklemi (A.21)'de yerine konursa, sonuçta x'e ve y'ye göre ikinci mertebe türevlerin genel olarak sonlu fark eşitlikleri

$$V_{xx}(x_0, y_0) = \frac{2V(1)}{h_1(h_1 + h_3)} + \frac{2V(3)}{h_3(h_1 + h_3)} - \frac{2V(x_0, y_0)}{h_1 h_3}, \quad (A.26)$$

$$V_{yy}(x_0, y_0) = \frac{2V(2)}{h_2(h_2 + h_4)} + \frac{2V(4)}{h_4(h_2 + h_4)} - \frac{2V(x_0, y_0)}{h_2 h_4} \quad (A.27)$$

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.

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

$$\nabla^2 V = V_{xx} + V_{yy} = -f(x, y) \quad \text{Poisson denklemi} \quad (\text{A.28})$$

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

$$D_1.V(1) + D_2.V(2) + D_3.V(3) + D_4.V(4) + D.V(x_0, y_0) + \frac{1}{2}f(x_0, y_0) = 0 \quad (\text{A.29})$$

elde edilir. Bu eşitlikte

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

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

$$D = -\left(\frac{1}{h_1.h_3} + \frac{1}{h_2.h_4}\right) \quad (\text{A.30})$$

dir.

(A.29) eşitliği, Poisson denkleminin sonlu fark denklemi biçiminde yazılmış karşılığıdır. Ancak bu eşitlik göz önüne alınan (x_0, y_0) noktası için yazılmıştır. Bir problemin çözümü için bu tür bir denklemin ağıdaki her bir düğüm noktası için benzer şekilde yazılması gerekir.

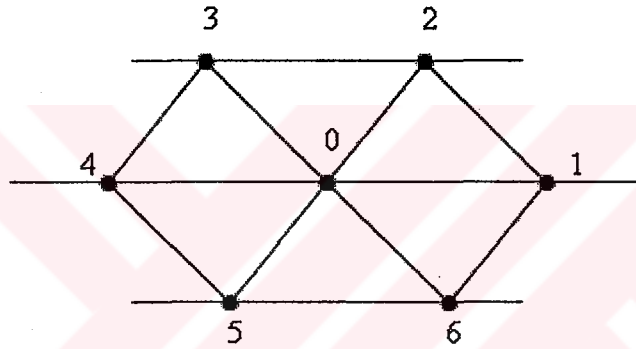
Diğer bilgileri vermeden önce, burada da daha önce yapılan genel basitleştirmeden söz edilecektir. İki boyutlu problemlerin çoğunda, alanın incelendiği bölge kare gözlerden oluşmuş düzgün bir ağı ile bölmelendirilir. Bu durumda $h_1 = h_2 = h_3 = h_4 =$

h olacağından (A.29) eşitliği

$$V(1) + V(2) + V(3) + V(4) - 4V(x_0, y_0) + h^2 \cdot f(x_0, y_0) = 0 \quad (\text{A.31})$$

şeklinde kısılır.

Denklem (A.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 A.4'deki gibi bir ağda Laplace denkleminin sonlu fark denklemi biçiminde yazılımı



Şekil A.4 Üçgen gözlü ağ.

$$V_0 = \frac{1}{6}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6) \quad (\text{A.32})$$

biçiminde olur.

Kısmi türevli denklemlerin sonlu fark denklemi biçiminde tanımlanmasında bir yaklaşıklık yapılmaktadır. Bu yaklaşıklıkta hata örneğin

$$V_{i+1,j} = V_{i,j} + h \frac{\partial V}{\partial x} \Big|_{i,j} + \frac{h^2}{2!} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \Big|_{i,j} + \frac{h^3}{3!} \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \Big|_{i,j} + \dots \quad (\text{A.33})$$

şeklindeki bir Taylor açılımından yararlanılarak elde edilebilir. Bu Taylor açılımından birinci türev

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{i,j} = \frac{V_{i+1,j} - V_{i,j}}{h} - \frac{1}{h} \left(\frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{i,j} + \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \right|_{i,j} + \dots \right) \quad (\text{A.34})$$

olarak yazılabilir. Burada eşitliğin sağındaki birinci terim türevin ileri fark eşiti olarak alınır, yapılan kesme hatası

$$H = -\frac{1}{h} \left(\frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{i,j} + \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \right|_{i,j} + \dots \right) \quad (\text{A.35})$$

olur. Benzer biçimde geri fark işleminde yapılan hata da

$$H = \frac{1}{h} \left(\frac{h^2}{2!} \left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{i,j} - \frac{h^3}{3!} \left. \frac{\partial^3 V}{\partial x^3} \right|_{i,j} + \dots \right) \quad (\text{A.36})$$

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.

(A.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 (A.29)'a uygun n adet benzer denklemlerden oluşan bir denklem sistemi elde edilir. Böyle bir denklem sistemi matris şeklinde yazılabilir.

$$[A] \times [x] = [B] \quad (\text{A.37})$$

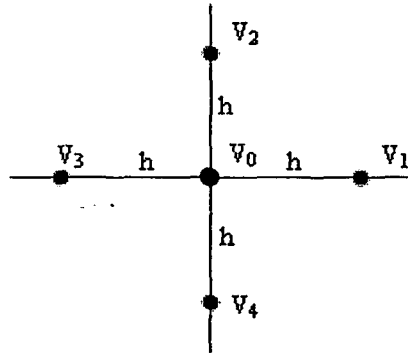
Burada $[A]$ $n \times n$ boyutlu katsayılar matrisi, $[x]$ bilinmeyen potansiyellerden oluşan sütun matris ve $[B]$ (Poisson denklemi için) $f(x_0, y_0)/2$ terimleri ile bilinen potansiyellerin toplamından oluşan sütun matristir. $[A]$ matrisinin her satırında az

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 A.3 Yalıtkan-Yalıtkan Arakesitinde Laplace Denkleminin Sonlu Fark Yazılımı

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 (A.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 (A.29)'a uygulanırsa sınır üzerindeki bir nokta için sonlu fark denklemi bulunabilir.

Sonlu farklar yönteminde göre Laplace denkleminin Şekil A.5'teki gibi bir noktanın kendisine komşu dört düğümün potansiyeli ile ilişkisi



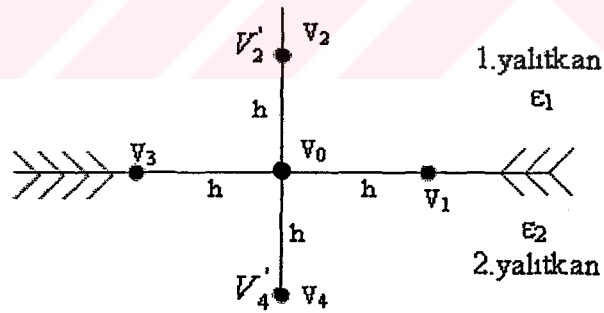
Şekil A.5 Birbirine komşu dört düğüm

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.38})$$

veya

$$V_0 = \frac{1}{4}(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad (\text{A.39})$$

bağıntısı ile verilir. Bu temel bağıntıdan yararlanarak iki yalıtkanın arakesitindeki noktalar için bu bağıntının yazılımı şu şekilde elde edilir (Şekil A.6).



Şekil A.6 Sınırdaki bir nokta ve komşu düğümler

Arakesitte V_0 noktasının potansiyeli

1) ϵ_1 yanı için

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4' - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.40})$$

2) ϵ_2 yanı için

$$V_1 + V_2' + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.41})$$

olarak yazılır.

Elektrik alan şiddetinin arakesite dik bileşenleri

1) ϵ_1 yanı için

$$E_{n1} = \frac{V_2 - V_4'}{2h} \quad (\text{A.42})$$

2) ϵ_2 yanı için

$$E_{n2} = \frac{V_2' - V_4}{2h} \quad (\text{A.43})$$

olur.

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

$$\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2} \quad (\text{A.44})$$

$$\epsilon_1 \frac{V_2 - V_4'}{2h} = \epsilon_2 \frac{V_2' - V_4}{2h} \rightarrow \epsilon_1 (V_2 - V_4') = \epsilon_2 (V_2' - V_4) \quad (\text{A.45})$$

$$V_2' = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} (V_2 - V_4') + V_4 \quad (\text{A.46})$$

olur ve bu son eşitlik (A.41) eşitliğinde yerine koyulursa

$$V_1 + \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_2 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_4' + V_4 \right) + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.47})$$

$$V_1 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_2 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} V_4' + V_3 + 2V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.48})$$

olur. Buradan

$$V_4' = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_1 + V_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_3 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_4 - 4 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_0 \quad (\text{A.49})$$

elde edilir. Bu (A.40) eşitliğinde yerine koyulursa

$$V_1 + V_2 + V_3 + \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_1 + V_2 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_3 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_4 - 4 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_0 \right) - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.50})$$

$$\left(1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) V_1 + 2V_2 + \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) V_3 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1} V_4 - 4 \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right) V_0 = 0 \quad (\text{A.51})$$

eşitliğin her iki yanını $1 + \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ ile bölünürse

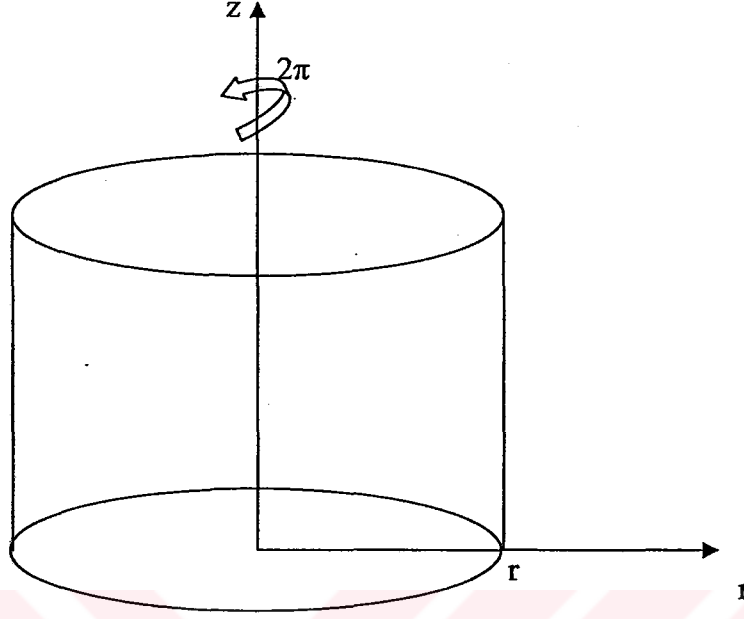
$$V_1 + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_2 + V_3 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_4 - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.52})$$

ve

$$V_0 = \frac{1}{4} \left(V_1 + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_2 + V_3 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} V_4 \right) \quad (\text{A.53})$$

elde edilir.

Ek A.4 İki Boyutlu Silindrsel Koordinatlarda Laplace Denkleminin Sonlu Farklar Yöntemi İle Çözümü

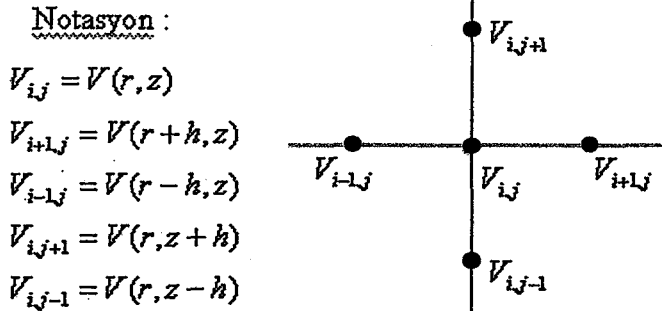


Şekil A.7 İki boyutlu silindrsel koordinat sistemi

Şekil A.7'deki gibi iki boyutlu silindrsel koordinatlarda Laplace denklemi:

$$\frac{\partial^2 V(r,z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V(r,z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r,z)}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{A.54})$$

Kare gözlü ağ gösterimi göz önünde bulundurularak Laplace denklemindeki terimlerin merkezi sonlu farklarla karşılıkları:



Şekil A.8 Kare gözlü ağ gösterimi

$$\frac{d^2V}{dr^2} = \frac{V(r+h,z) - 2V(r,z) + V(r-h,z)}{h^2} = \frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{h^2} \quad (\text{A.55})$$

$$\frac{dV}{dr} = \frac{V(r+h,z) - V(r-h,z)}{2h} = \frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{2h} \quad (\text{A.56})$$

$$\frac{d^2V}{dz^2} = \frac{V(r,z+h) - 2V(r,z) + V(r,z-h)}{h^2} = \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{h^2} \quad (\text{A.57})$$

Bu karşılıklar Laplace denkleminde yerine konursa

$$\frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{h^2} + \frac{1}{r_{i,j}} \frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{2h} + \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{h^2} = 0 \quad (\text{A.58})$$

(A.58)'de verilen denklemin her iki yanı h^2 ile çarpılıp, düzenlenirse

$$\left(1 + \frac{h}{2r_{i,j}}\right)V_{i+1,j} - 4V_{i,j} + \left(1 - \frac{h}{2r_{i,j}}\right)V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} = 0 \quad (\text{A.59})$$

bulunur. Bu denklem silindrsel koordinatlarda iki boyutlu Laplace denkleminin merkezi sonlu farklar karşılığıdır. Bu denklemlerden bir noktadaki potansiyel

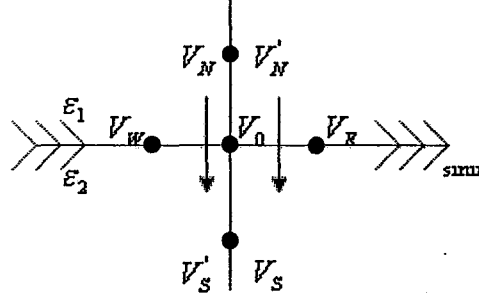
$$V_{i,j} = \frac{1}{4} \left[\left(\left(1 + \frac{h}{2r_{i,j}}\right)V_{i+1,j} + \left(1 - \frac{h}{2r_{i,j}}\right)V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} \right) \right] \quad (\text{A.60})$$

olur. Bunu pusula gösterimi ile yazarsak

$$V_0 = \frac{1}{4} \left[\left(1 + \frac{h}{2r_0}\right)V_E + \left(1 - \frac{h}{2r_0}\right)V_W + V_N + V_S \right] \quad (\text{A.61})$$

olur.

İki boyutlu silindrsel koordinatlarda yatay sınır düğümlerinde sonlu farklar denkleminin merkezi farklarla yazılımı:



Şekil A.9 İki boyutlu silindirselsel koordinatlarda yatay sınır düğümleri gösterimi

V_0 potansiyelini bulmak için ε_1 yanından

$$(1 - \frac{h}{2r})V_W + (1 + \frac{h}{2r})V_W + V_N + V'_S - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.62})$$

ε_2 yanından

$$(1 - \frac{h}{2r})V_W + (1 + \frac{h}{2r})V_E + V_S + V'_N - 4V_0 = 0 \quad (\text{A.63})$$

sınırdaki $D_{n1} = D_{n2}$ ve $\varepsilon_1 E_{n1} = \varepsilon_2 E_{n2}$ koşulundan

$$\varepsilon_1 \frac{V_N - V'_S}{2h} = \varepsilon_2 \frac{V'_N - V_S}{2h} \quad \varepsilon_1 (V_N - V'_S) = \varepsilon_2 (V'_N - V_S)$$

yazılır.

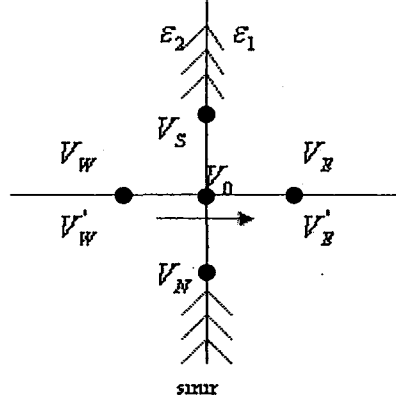
Yukarıdaki denklemler düzenlenirse iki boyutlu silindirselsel koordinatlarda yatay sınırdaki bir noktadaki potansiyel ifadesi:

$$V_0 = \frac{1}{4} \left[(1 - \frac{h}{2r_0})V_W + (1 + \frac{h}{2r_0})V_E + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}V_N + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}V_S \right] \quad (\text{A.64})$$

$$V_{i,j} = \frac{1}{4} \left[\left((1 - \frac{h}{2r_{i,j}})V_{i-1,j} + (1 + \frac{h}{2r_{i,j}})V_{i+1,j} + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}V_{i,j+1} + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}V_{i,j-1} \right) \right] \quad (\text{A.65})$$

olur.

İki boyutlu silindrsel koordinatlarda düşey sınır düğümlerinde sonlu farklar denkleminin merkezi farklarla yazılımı:



Şekil A.10 İki boyutlu silindrsel koordinatlarda düşey sınır düğümleri gösterimi

V_0 potansiyelini bulmak için ϵ_1 yanından

$$(1 - \frac{h}{2r})V'_W + (1 + \frac{h}{2r})V_E + V_N + V_S - 4V_0 = 0 \quad (A.66)$$

ϵ_2 yanından

$$(1 - \frac{h}{2r})V_W + (1 + \frac{h}{2r})V'_E + V_S + V_N - 4V_0 = 0 \quad (A.67)$$

sınırdaki $D_{n1} = D_{n2}$ ve $\epsilon_1 E_{n1} = \epsilon_2 E_{n2}$ koşulundan

$$\epsilon_1 \frac{V_E - V'_W}{2h} = \epsilon_2 \frac{V'_E - V_W}{2h} \quad \epsilon_1 (V_E - V'_W) = \epsilon_2 (V'_E - V_W)$$

yazılır.

Çözümü basitleştirmek için $B = 1 - h/2r$ ve $F = 1 + h/2r$ olacak şekilde yukarıdaki denklemler düzenlenirse iki boyutlu silindrsel koordinatlarda düşey sınırdaki bir noktadaki potansiyel ifadesi

$$V_{ij} = \frac{1}{4} \left[\left(\frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_2(1-\frac{h}{2r}) + \varepsilon_1(1+\frac{h}{2r})} (1-\frac{h}{2r}) V_{i-1,j} + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2(1-\frac{h}{2r}) + \varepsilon_1(1+\frac{h}{2r})} (1+\frac{h}{2r}) V_{i+1,j} \right) \right. \\ \left. + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} \right] \quad (A.68)$$

$$V_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_2 B + \varepsilon_1 F} B V_w + \frac{2\varepsilon_1}{\varepsilon_2 B + \varepsilon_1 F} F V_E + V_N + V_S \right) \quad (A.69)$$

olur.

$r = 0$ simetri eksenindeki noktalar için denklemin uygulanması için, $r = 0$ için $V(h, z) = V(h, -z)$, $\partial V / \partial r = 0$ olduğunu göz önüne alarak L'hospital kuralı ile

$$\lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2}$$

yazılarak $r = 0$ 'da Laplace denklemi

$$2 \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (A.70)$$

$$2 \frac{V(r+h, z) - 2V(r, z) + V(r-h, z)}{h^2} + \frac{V(r, z+h) - 2V(r, z) + V(r, z-h)}{h^2} = 0$$

$$V(r, z) = \frac{1}{6} [2V(r+h, z) + 2V(r-h, z) + V(r, z+h) + V(r, z-h)] \quad (A.71)$$

elde edilir [81, 82].

EK B SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE EKSENEL SİMETRİLİ ALAN PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

Ek B.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

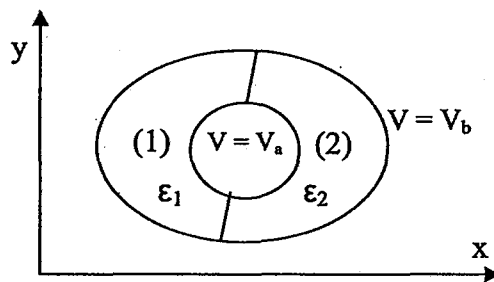
Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) elektrik alanı incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi (minimumlaştırılması) ilkesine dayanır. Bölge içindeki alan Laplace veya Poisson tipinde bir elektrik alan olabilir.

Sonlu elemanlar yönteminde de diğer sayısal yöntemlerde olduğu gibi bir sistemin sonlu sayıdaki bilinmeyen büyüklüğünün sistemin bilinen büyüklükleri cinsinden bulunması yolu izlenir.

Şekil B.1'de iki boyutlu, sınırlardaki potansiyel değerleri (V_a ve V_b) verilmiş (Dirichlet tipi) bir A bölgesi gösterilmiştir. Bölge kesikli çizgi ile (1) ve (2) alt bölgelerine ayrılmıştır. Alt bölgelerin ara kesitinde serbest yüklerin bulunmadığı ve koşulların bilindiği varsayılır. Bölge içindeki toplam enerji

$$W = z \iint \left\{ \frac{1}{2} \left[\epsilon_x \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \epsilon_y \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (B.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada z sabittir. Buradan yazılacak $w = W / z$ bağıntısı z uzunluğu başına enerji yoğunluğunu gösterir. ϵ_x ve ϵ_y elektrik alanın yönüne bağlı olarak değer alan dielektrik katsayılarıdır.



Şekil B.1 İki boyutlu bölge

Enerji bağıntısından yararlanarak enerjiyi minimum yapan potansiyel değerlerini bulabilmek için öncelikle katsayıları henüz bilinmeyen ve basit işlevlerin toplamından oluşmuş bir $V(x,y)$ potansiyel yaklaşım işlevinin tanımlanmış olması gerekir. Tanımlanacak bu potansiyel işlevinin bölge içinde sürekli olduğu ve sonlu sayıda türevi bulunacağı göz önünde tutulmalıdır.

Bir çözüm bölgesi içinde sınır koşullarını sağlayan birden fazla potansiyel işlevi elde etmek olasıdır, ancak bunlardan bir tanesi

$$\nabla^2 V = \Delta V = 0 \quad (B.2)$$

Laplace denklemini sağlar ve bu işlev tektir. Laplace denklemini sağlayan bu çözüm aynı zamanda bölge içindeki potansiyel enerjiyi minimum yapan çözümdür. Bunun tersi de söylenebilir, yani, bölge içinde enerjiyi minimum yapan potansiyel çözümü, Laplace denklemini sağlayan potansiyel çözümdür.



Bu nedenle sonlu elemanlar yönteminde Laplace denklemini çözmek yerine, enerji denklemini minimum yapan bir potansiyel çözümünü bulmak yoluna gidilir. Herhangi bir problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü temel olarak dört adımda gerçekleştirilir:

- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara veya alt bölgelere ayrılması
- Herbir eleman için temel denklemlerin yazılması
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi
- Elde edilen denklem sisteminin çözümü

B.2 Problemin Silindirselsel Koordinat Sisteminde İncelenmesi

Koordinat sisteminde, silindirselsel koordinat sistemi olarak ele alındığında, dönel simetri nedeniyle herhangi bir (r, θ, z) noktasındaki potansiyelin değeri r ve z sabit kalmak koşuluyla θ ile değişmez. Bu durumda problem üç boyutlu bir uzay yerine iki boyutlu bir düzlem üzerinde izlenebilir.

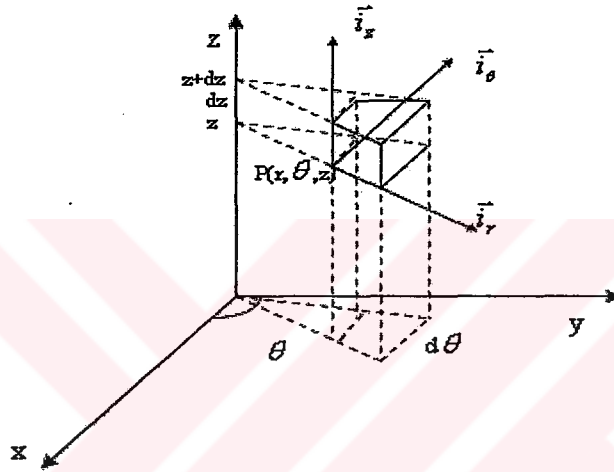
Silindirsel koordinatlarda üç boyutlu alan

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{i}_z \quad (\text{B.3})$$

şeklindedir. Burada potansiyelin θ dönme açısından bağımsız ($\partial V / \partial \theta = 0$) ve dolayısıyla $V = V(r, z)$ olması nedeniyle iki boyutlu olarak alan

$$\nabla V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{i}_z \quad (\text{B.4})$$

Bişiminde yazılabilir.



Şekil B.2 Silindirsel koordinat sistemi

Ek B.3 Elektrostatik Enerji

İncelenen elektrot sisteminin simetri ekseninden geçen düzlem üzerindeki B çözüm bölgesinin yarısının simetri eksenini etrafında 2π kadar döndürülmesiyle oluşan V hacmi içerisinde depolanan potansiyel enerji

$$W = \iiint \frac{1}{2} \epsilon E^2 dV, E = -\text{grad } V, dV = r dr d\theta dz$$

$$W = \frac{\epsilon}{2} \iiint |\text{grad } V|^2 r dr d\theta dz \quad (\text{B.5})$$

dir. Burada $r dr d\theta dz$ sonsuz küçük dV hacmidir. (B.4) eşitliği (B.5) eşitliğinde yerine konur ve $\theta = 0 - 2\pi$ arasında integre edilirse enerji

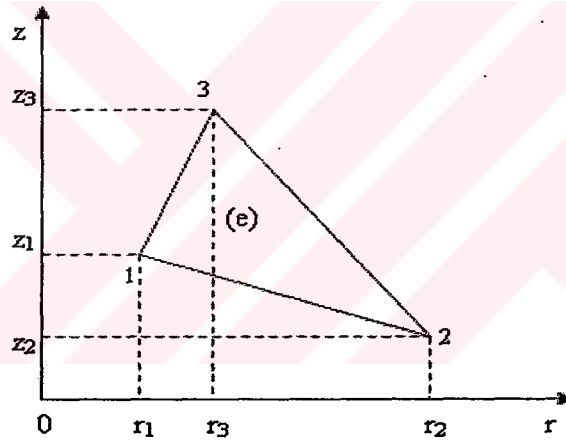
$$W = \frac{\varepsilon}{2} \iint \int_0^{2\pi} \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right) \bar{i}_r + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right) \bar{i}_z \right]^2 d\theta . r . dr . dz$$

$$W = \varepsilon \pi \iint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r . dr . dz \quad (B.6)$$

olarak bulunur.

Ek B.4 Problemin Formülasyonu

Potansiyelin, dönme açısı θ dan bağımsız olması dolayısıyla üçgen elemanlar r-z koordinat sisteminde tanımlanırlar. Şekil B.3'de bir üçgen elemanın bu koordinat sisteminde tanımlanması gösterilmiştir. Burada r ve z radyal ve eksenel koordinatları göstermektedir.



Şekil B.3 Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen eleman

Üçgen elemanlar içinde potansiyelin doğrusal değişeceği kabul edilirse potansiyel

$$V = a + br + cz \quad (B.7)$$

şeklinde bir bağıntı ile verilebilir. (B.7)'deki potansiyel işlevi her düğüm için yazılırsa

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (B.8)$$

elde edilir. (B.8)'deki denklem takımından a, b, ve c katsayıları örneğin Cramer kuralı ile bulunabilir. Katsayı matrisinin determinanı

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{vmatrix} = 2S = (r_2 z_3 - r_3 z_2) + (r_3 z_1 - r_1 z_3) + (r_1 z_2 - r_2 z_1) \quad (\text{B.9})$$

dir. S üçgen elemanın alanı olmak üzere, bu determinant üçgeninin alanının iki katına (2S) eşittir. a, b, ve c katsayıları Cramer yöntemine göre

$$a = \frac{\begin{vmatrix} V_1 & r_1 & z_1 \\ V_2 & r_2 & z_2 \\ V_3 & r_3 & z_3 \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad b = \frac{\begin{vmatrix} 1 & V_1 & z_1 \\ 1 & V_2 & z_2 \\ 1 & V_3 & z_3 \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad c = \frac{\begin{vmatrix} 1 & r_1 & V_1 \\ 1 & r_2 & V_2 \\ 1 & r_3 & V_3 \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (\text{B.10})$$

eşitliklerinden bulunur. (B.10) eşitliğindeki işlemlerin sonucunda

$$a = \frac{1}{2S} [(r_2 z_3 - r_3 z_2)V_1 + (r_3 z_1 - r_1 z_3)V_2 + (r_1 z_2 - r_2 z_1)V_3]$$

$$a = \frac{1}{2S} [a_1 V_1 + a_2 V_2 + a_3 V_3]$$

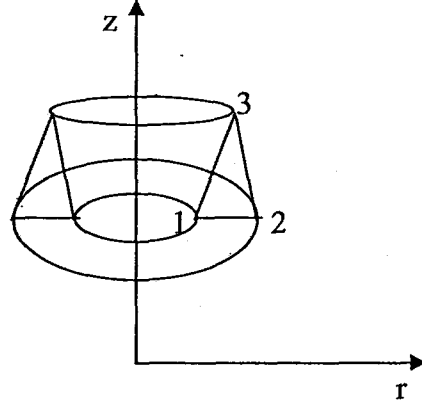
$$b = \frac{1}{2S} [(z_2 - z_3)V_1 + (z_3 - z_1)V_2 + (z_1 - z_2)V_3]$$

$$b = \frac{1}{2S} [b_1 V_1 + b_2 V_2 + b_3 V_3]$$

$$c = \frac{1}{2S} [(r_3 - r_2)V_1 + (r_1 - r_3)V_2 + (r_2 - r_1)V_3]$$

$$c = \frac{1}{2S} [c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3] \quad (\text{B.11})$$

olarak bulunur.



Şekil B.4 Radyal-eksenel koordinatlarda bir üçgen kesitli halka eleman

$V = a + b.r + c.z$ 'nin $\partial V / \partial r$ ve $\partial V / \partial z$ şeklindeki türevleri düzenlenerek (B.6)'da yerine konursa, bir üçgen elemanın z-ekseni etrafında 2π kadar döndürülmesiyle Şekil B.4'de gösterilen üçgen kesitli bir elemanın oluşturduğu hacim içerisindeki enerji

$$V = a + br + cz$$

$$dv/dr = b, \quad dv/dz = c$$

$$W^{(e)} = \varepsilon^{(e)} \pi \iint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r.dr.dz$$

$$W^{(e)} = \varepsilon^{(e)} \pi (b^2 + c^2) \iint_{S^{(e)}} r.dr.dz$$

$$\varepsilon^{(e)} = \varepsilon_o . \varepsilon_r^{(e)}$$

$$W^{(e)} = \varepsilon_o . \varepsilon_r^{(e)} . \pi . (b^2 + c^2) \iint_{S^{(e)}} r.dr.dz \quad (B.12)$$

$\varepsilon_r^{(e)}$: Eleman içindeki ortamın bağıl dielektrik sabiti

ε_o : Boşluğun dielektrik sabiti

olarak bulunur. Şekil B3'deki üçgen elemanın $S^{(e)}$ yüzeyi üzerinden yapılan integrasyon işleminin sonucu

$$\iint_{S^{(e)}} r \cdot dr \cdot dz = \frac{S}{3} (r_1 + r_2 + r_3) = S \cdot r_c \quad (\text{B.13})$$

$$r_c = \frac{1}{3} (r_1 + r_2 + r_3)$$

olur, (B.12)'de yerine konulursa bir üçgen kesitli halka elemanı içinde biriken enerji

$$W^{(e)} = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r^{(e)} \cdot \pi \cdot (b^2 + c^2) \cdot S \cdot r_c = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r^{(e)} \cdot \pi \cdot E^2 \cdot S \cdot r_c \quad (\text{B.14})$$

olur. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), tüm bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenmesi ilkesine dayanır. Ele alınan bir elemanın enerjisi elemanın düğüm potansiyellerine bağlı olarak yazılabildiğinden düğüm potansiyellerine göre enerjinin minimum değeri

$$\frac{\partial W^{(e)}}{\partial V_i} = 0 \dots (i = 1, 2, 3) \quad (\text{B.15})$$

yapılırsa

$$\frac{\partial W^{(e)}}{\partial V_i} = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r^{(e)} \cdot \pi \cdot S \left[2b \frac{\partial b}{\partial V_i} + 2c \frac{\partial c}{\partial V_i} \right] \cdot r_c = 0 \quad (\text{B.16})$$

i = 1, 2, 3 olmak üzere

$$[K^{(e)}] [V^{(e)}] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(e)} & k_{12}^{(e)} & k_{13}^{(e)} \\ k_{21}^{(e)} & k_{22}^{(e)} & k_{23}^{(e)} \\ k_{31}^{(e)} & k_{32}^{(e)} & k_{33}^{(e)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{B.17})$$

3x3 boyutunda "eleman katsayılar matrisi" $[K^{(e)}]$ elde edilir. (B.16)'deki cebirsel işlemler sonucunda simetrik bir matris olan katsayılar matrisinin elemanları

$$k_{11}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \pi}{2S} (b_1^2 + c_1^2) r_c$$

$$k_{12}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \pi}{2S} (b_1 b_2 + c_1 c_2) r_c$$

$$k_{13}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \pi}{2S} (b_1 b_3 + c_1 c_3) r_c$$

$$k_{21}^{(e)} = k_{12}^{(e)}$$

$$k_{22}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \pi}{2S} (b_2^2 + c_2^2) r_c$$

$$k_{23}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \pi}{2S} (b_2 b_3 + c_2 c_3) r_c$$

$$k_{33}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \pi}{2S} (b_3^2 + c_3^2) r_c$$

veya genel olarak

$$k_{ij}^{(e)} = \frac{\varepsilon^{(e)} \pi}{2S^{(e)}} (b_i b_j + c_i c_j) r_c^{(e)}$$

Bişiminde bulunur. Bu eşitliklerde

$$a_1 = r_2 z_3 - r_3 z_2$$

$$a_2 = r_3 z_1 - r_1 z_3$$

$$a_3 = r_1 z_2 - r_2 z_1$$

$$b_1 = z_2 - z_3$$

$$b_2 = z_3 - z_1$$

$$b_3 = z_1 - z_2$$

$$c_1 = r_3 - r_2$$

$$c_2 = r_1 - r_3$$

$$c_3 = r_2 - r_1$$

$$r_c = \frac{1}{3}(r_1 + r_2 + r_3)$$

$$\varepsilon^{(e)} = \varepsilon_o . \varepsilon_r^{(e)}$$

$$S = \frac{1}{2}(b_2 c_3 - b_3 c_2) \quad (B.18)$$

dir. Yukarda anlatılan minimumlaştırma ilkesi çözümün yapılacağı bölgedeki elemanlara aynı anda uygulanacak olursa, tanımlanan tüm elemanların düğüm potansiyelleri arasındaki bağıntı bir lineer denklem sistemine dönüşür.

$$[K][V] = 0 \quad (B.19)$$

Burada $[V]$, sistemin düğüm noktalarının potansiyellerinden oluşan bir sütun matristir. $[K]$ matrisi simetrik, tekil olmayan ve seyrek bir matristir.

(B.19)'da elde edilen lineer denklem sistemindeki katsayılar matrisinin seyrek bir matris olması nedeniyle, doğrudan matris tersi alma yöntemlerinden yararlanmak hem gereksiz bellek kaybına neden olacak, hem de büyük boyutlu matrislerde bilgisayarın yuvarlatma hatası dolayısıyla hata miktarı artacaktır. Bu nedenle bu gibi bilinmeyen sayısının birkaç yüzü geçtiği durumlarda yinelemeli yöntemler önem kazanır [81].

Ek C 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 incelemek 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 Kampüsü'nde yer alan Yüksek Gerilim Laboratuvarında kurulmuştur.

Ek C.1 Deneyde Kullanılan Donanım

Deneyde kullanılan donanım aşağıda verilmiştir;

- B bağlamı türünde darbe üretici
- Toprak modeli oluşturmak amacı ile kullanılan 57 cm çaplı 85 cm boyunda sıvı seviye göstergeli ve tahliye musluklu silindrsel metal deney kabı
- 1,6 mm çaplı 1,5 m uzunluğundaki bakır çubuk topraklayıcı
- Geçit izolatörü olarak kullanılan 8 mm kalınlığında 20 cm eninde 120 cm boyunda 4 adet yalıtkan destek plaka
- Topraklayıcıyı deney kabına eksenlemek ve model toprak olarak kullanılan elektrolitik sıvının tozlanmasını engellemek amacı ile kullanılan 20 cm derinliğinde 70 cm çapında yalıtkan kapak
- 2,5 mΩ'luk ölçü direnci
- Ölçü direncinden topraklama sistemine bağlantı yapmayı sağlayan (30x0,5 mm²) bakır şerit iletken

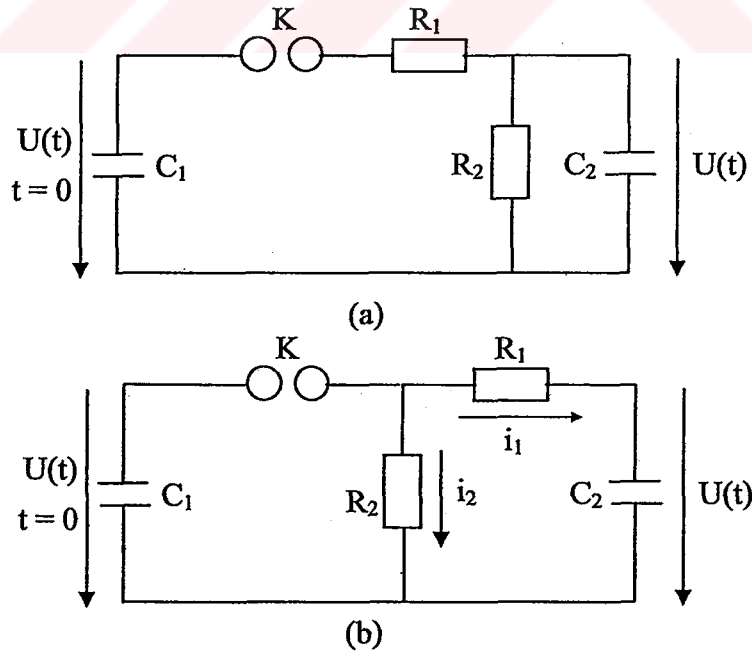
- Darbe gerilimi üreticiden kurulan model sisteme bağlantı sağlamak amacı ile kullanılan (95 mm^2) şerit örgülü bakır iletken.
- Dijital osiloskop (band genişliği 100 MHz)

Ek C.2 Deneyde Kullanılan Darbe Gerilim Üreteci

Bir hava hattının üzerine veya yakınına düşen yıldırım, hattın iletkenleri üzerinde aşırı gerilimler doğurur. Bu aşırı gerilimler, iletkenler boyunca yürüyen dalgalar şeklinde 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 üreteçleri ile sağlanır.

Şekil C.1'de darbe gerilimi üretiminde en çok kullanılan, a ve b eşdeğer devreleri olarak bilinen temel eşdeğer devreleri gösterilmiştir.



Şekil C.1 Darbe gerilimi a ve b eşdeğer devreleri

"C₁" darbe kondansatörü yüksek ohmlu bir yük direnci üzerinden "U₀" doğru gerilimine doldurulur ve "K" küresel elektrotlarının atlaması ile boşalır. İstenen "u(t)" gerilimi "C₂" yük kapasitesinin uçları arasında meydana gelir. a ve b eşdeğer devreleri, birbirinden "R₂" boşalma direncinin bir defa "R₁" amortisman direncinin arkasında bir defa da önünde olmaları ile ayırt edilirler. Devre elemanlarının büyüklüğü, darbe geriliminin şeklini belirler. Her iki eşdeğer devrenin çalışma şekli ilke olarak şu şekilde açıklanabilir; cephe süresinin kısa olması için "C₁" yük kapasitesinin "U_m" tepe değeriyle hızla dolması ve sırt süresinin uzun olması için de yük kapasitesinin nispeten yavaş boşalması gerekir. Bunun için R₂ >> R₁ olmalıdır. "K" elektrotlarındaki atlamadan sonraki ilk anda, yani t = 0 anında, her iki eşdeğer devrede "U₀" gerilimi seri bağlı "R₁" ve "C₂" elemanlarına uygulanmış olur. u(t) gerilimi, "R₁C₂" terimi ne kadar küçükse, o kadar çabuk tepe değerine erişir. "U_m" tepe değeri, başlangıçta mevcut olan "U₀", "C₁" elektrik yükünün "C₁ + C₂" kapasitesine bölünmesinden ileri gelen gerilimden daha büyük olamaz. Bu nedenle devrenin "η" verimi

$$\eta = \frac{U_m}{U_0} \leq \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (C.1)$$

olur.

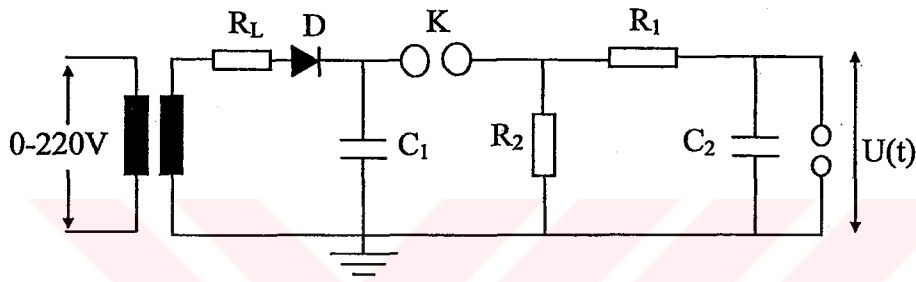
Genel olarak gerilimin "U_m" tepe değerinin verilen bir "U₀" yük gerilimine göre, mümkün olduğu kadar büyük olması için C₁ >> C₂ seçilir. Bundan sonra darbe geriliminin sırtındaki üstel azalma, a eşdeğer devresi için "C₁ (R₁ + R₂)" zaman sabitiyle ve b eşdeğer devresi için de "C₁R₂" zaman sabitiyle olur. Bir boşalma da söz konusu olan darbe enerjisi,

$$W = \frac{1}{2} C_1 U_0^2 \quad (C.2)$$

olur. Burada, "U₀" için mümkün olan en yüksek dolma gerilimi konursa, bir darbe üreticinin en önemli tanım büyüklüğü olan maksimum "darbe enerjisi" elde edilir.

Eşdeğer devrelerin çalışma prensipleri hakkında yukarıda verilen açıklamalarda, t = 0 anında "C₁" darbe kondansatörünün "U₀" gerilimi ile dolu olduğu kabul edilmiştir.

U_0 gerilimi, "K" küresel elektrotlarında atlama olduğu veya yardımcı bir boşalma ile tuttuğu andaki dolma gerilimidir. Bu nedenle kendi kendine ateşleyen üreteçlerde, " U_m " darbe geriliminin tepe değerinde bir yükselme, ancak "K" küresel elektrotlar arası açıklığın büyütülmesi ile mümkün olur. Yük direnci önündeki doğru gerilimde bir yükselme ise ancak " C_1 " darbe kondansatörünün " U_0 " gerilimi ile daha çabuk dolmasını ve "K" 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 C.2'de deneysel çalışmada kullanılan tek katlı bir "b" bağlamı darbe gerilimi üretici devresi verilmiştir.



Şekil C.2 Deneyde kullanılan tek katlı "b" bağlamı darbe gerilimi üretici

Bu devrede bir doğru gerilim kaynağından beslenen " C_1 " yük kondansatörünün uçlarındaki gerilim belli bir " U_0 " gerilimine eriştiğinde küreler arasındaki hava delinir. Başlangıçta boş olan " C_2 " kondansatörü " R_1 " direnci üzerinden dolar ve daha sonra " $R_1 + R_2$ " üzerinden boşalır. " C_2 " darbe kondansatörünün uçlarında oluşan darbe geriliminin hızla yükselen ve yavaş yavaş düşen bir dalga şekline sahip olması için $R_2 \gg R_1$ olmalıdır.

Ek C.3 Darbe Gerilimleri

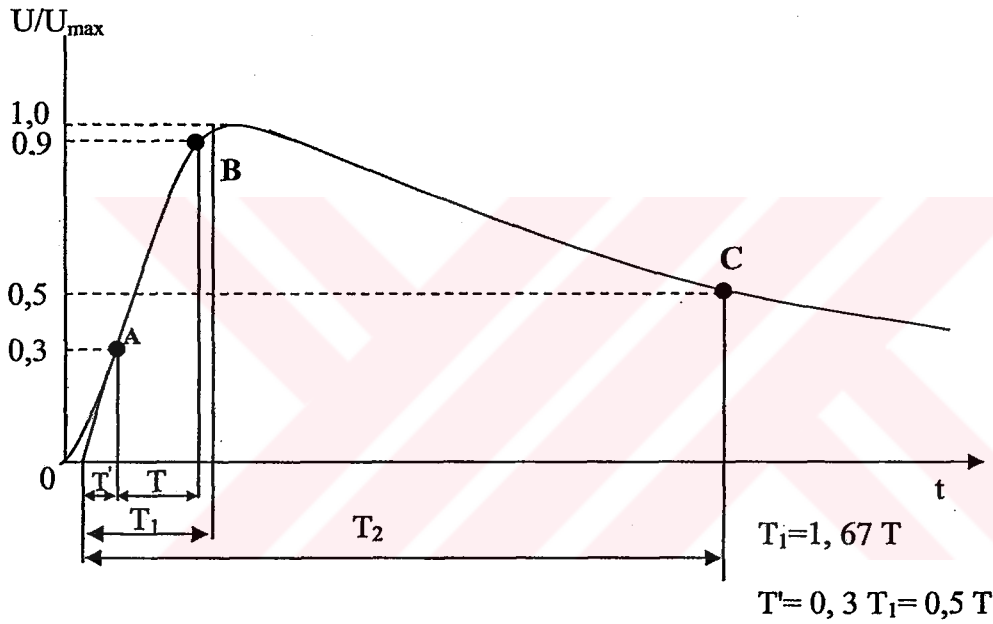
Bugüne kadar yapılan tüm ölçmeler; atmosferik aşırı gerilimlerin sıfırdan başlayarak hızla en yüksek değere çıkıp daha sonra üstel olarak yavaş yavaş sıfır değerine doğru düştüğünü göstermiştir. Bu gerilimler en kötü koşullarda 1 mikrosaniye civarında tepe değerine yükselmekte ve yaklaşık 50 mikrosaniyede 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'ın meydana geldiği anlar arasındaki T süresinin 1,67 katıdır.

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

Tepe Değeri, U_{max} : Gerilimin maksimum değeridir.



Standart Darbe Gerilimi için; $T_1 = 1,2 \mu s \pm \%30$

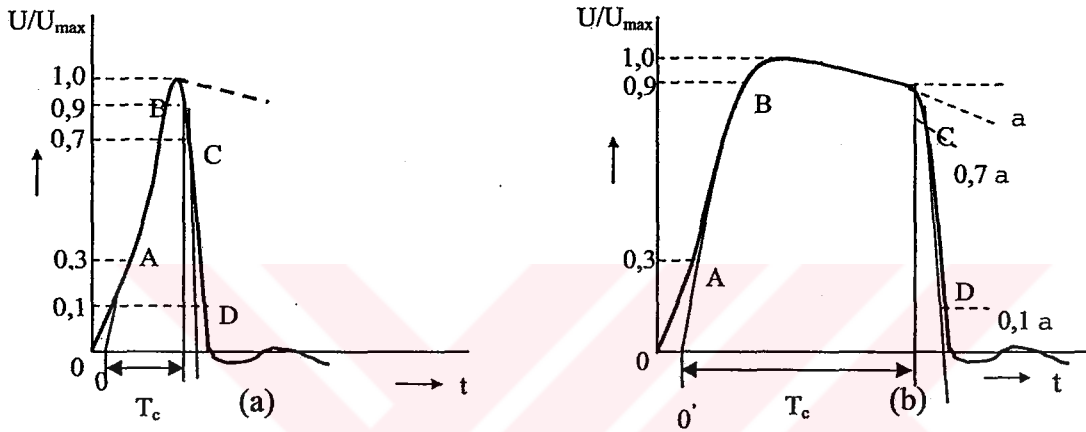
$T_2 = 50 \mu s \pm \%20$ dir.

Şekil C.3 Tam darbe gerilimi

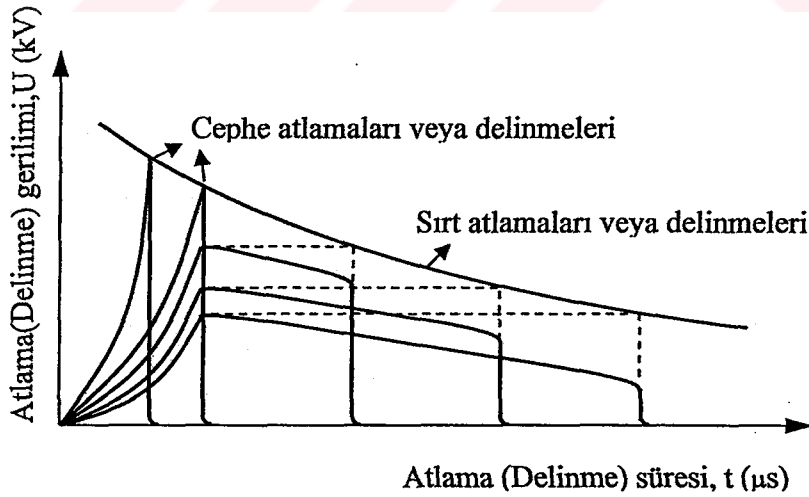
Bir elektriksel sistemin darbe gerilimi ile zorlanması sırasında bir atlama veya delinme olursa gerilim aniden kesilir. Bu gerilime "kesik darbe gerilimi" adı verilir. Kesilmenin olduğu ana göre, bu gerilimleri cephede kesik ve sırtta kesik darbe gerilimleri olarak sınıflayabiliriz. Kesik darbe gerilimlerine ilişkin en önemli büyüklüklerden biri de T_0 anma delinme süresidir.

Ek C.4 Darbe Karakteristikleri

Bir yalıtkandan çok sayıda ve pratik olarak birbirlerinin aynı örnekler hazırlayıp bunlara, delinmeyi sağlayacak en küçük değerden başlayarak, farklı tepe değerli darbe gerilimleri uygulandığında; herbir deney gerilimi için kaydedilen U_0 delinme (atlama) gerilimi ve T_0 delinme (atlama) süresi bir eksen takımına taşınırsa Şekil Ek 1.5'teki gibi bir eğri elde edilir. Bu eğriye söz konusu yalıtkanın "Darbe Karakteristiği" denir.



Şekil C.4 a) Cephede kesik darbe gerilimi
b) Sırtta kesik darbe gerilimi



Şekil C.5 Darbe karakteristiği

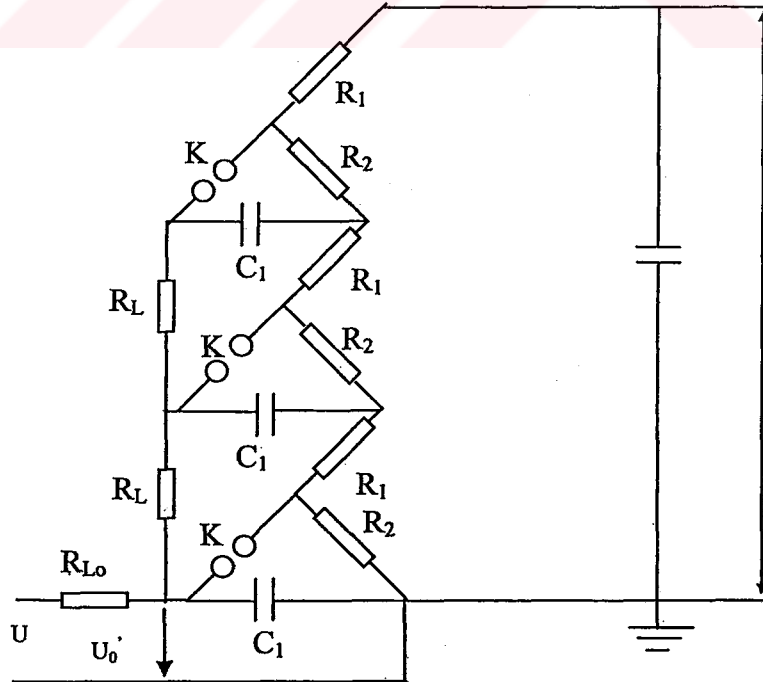
Ek C.5 Darbe Gerilimlerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi

Bir tek "C₁" kondansatörünün yükleme gerilimi (U₀) sınırlı olduğu için, belirli bir doğru gerilimden yüksek tepe değerli darbe gerilimleri üretebilmek için çok katlı bağlamalar kullanılır. Şekil C.6'da verilen Marx Bağlamı diye adlandırılan devre, "C₁" 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;

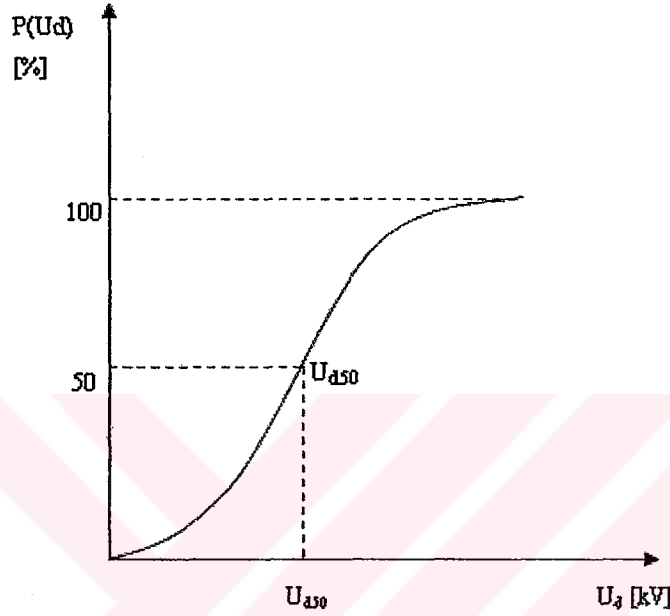
$$P(U_{di}) = \frac{n_i}{n} \quad (C.3)$$

olarak hesaplanır. Bu şekilde bir dizi farklı tepe değerli darbe gerilimleri uygulanarak, bunların belirli bir elektrot açıklığına ilişkin atlama olasılıkları hesaplanır ise Şekil C.7'deki gibi bir eğri elde edilir.



Şekil C.6 Üç katlı Marx bağlamı.

Uygulamada atlama olasılığı %50 olan U_{d50} tepe değeri darbe gerilimi esas alınır ve standart cetvelleri bu değerlere göre hazırlanır. U_{d50} atlama geriliminin bulunmasında özel olasılık kağıtlarından ve/veya interpolasyondan faydalanılır. Olasılık eksen takımında Şekil C.7'deki eğri bir doğruya dönüşür ve dolayısıyla U_{d50} nin bulunması kolaylaşır. Küresel elektrotlarla ölçmede olduğu gibi, bir yalıtım elemanının (örneğin izolatör) atlama gerilimi de genelde %50 atlama gerilimi olarak verilir.



Şekil C.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 osiloskoba ve darbe voltmetresine uygulanabilecek bir değere düşüren cihazlardır. Omik, kapasitif veya karma türden olabilirler. Gerilim yansımalarının önlenmesi için sonlandırmanın uygun bir şekilde yapılması gerekir. [83, 84]

Ek C.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 tablo ile, Tablo C.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 silindirsil 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 eksenlendikten sonra montaj ve demontaj işlemlerinde daha rahat hareket etmek amacı ile parçaların hepsinin pozisyonları markalanmıştır.

Her deney başlangıcında deneyin gerçekleştiği 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 C.18 ile Şekil C.19'da verilen deney düzenekleri kurulmuştur.

Deney düzeneğinde yer alan elemanların birbirlerine elektriksel olarak bağlanması sırasında, 2,5 mΩ'luk ölçü direncinden topraklama sistemine bağlantı yapmayı sağlayan (30 x 0,5mm²) bakır şerit iletken ve darbe gerilimi üreticiden kurulan model sisteme bağlantı sağlamak amacı ile kullanılan (95 mm²) şerit örgülü bakır iletken kullanılmıştır. Bu iletkenlerin bağlantı noktalarına temasının tam olması için civatalı bağlantı kullanılmıştır. B bağlamı türündeki darbe üreticinin çıkışında yer alan atlama küreleri arasındaki açıklık, Şekil C.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 tepe 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.

Tablo C.1 Farklı küre çaplarında değişik elektrot açıklıkları için küreler arasındaki atlama gerilimleri

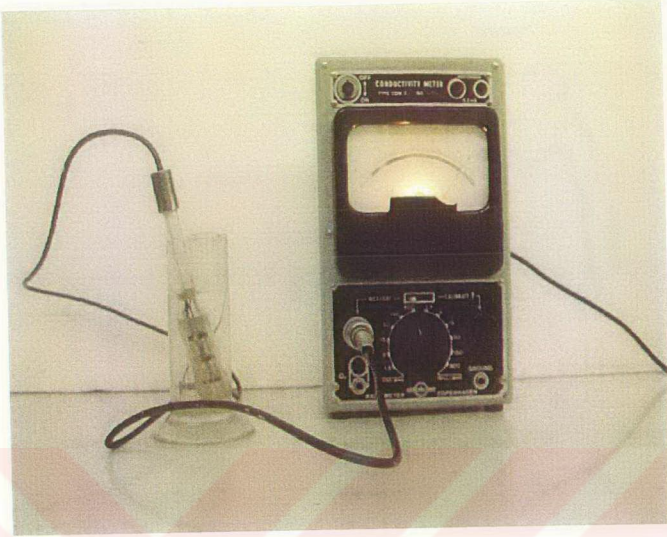
Küreler arası açıklık (cm)	Tepe değer cinsinden atlama gerilimleri (kV _{tepe})											
	Küre Çapı (cm)											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,1	4,7											
0,15	6,4											
0,2	8	8										
0,25	9,6	9,6										
0,3	11,2	11,2										
0,4	14,4	14,3	14,2									
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	99	99	



Şekil C.8 Deneysel çalışmada kullanılan metal deney kabı



Şekil C.9 Geçit izolatörü olarak kullanılan 4 adet yalıtkan destek plaka ve yalıtkan kapağın silindirs el metal deney kabı üzerine yerleştirilmesi.



Şekil C.10 Elektrolitik sıvının iletkenliğinin ölçülmesi



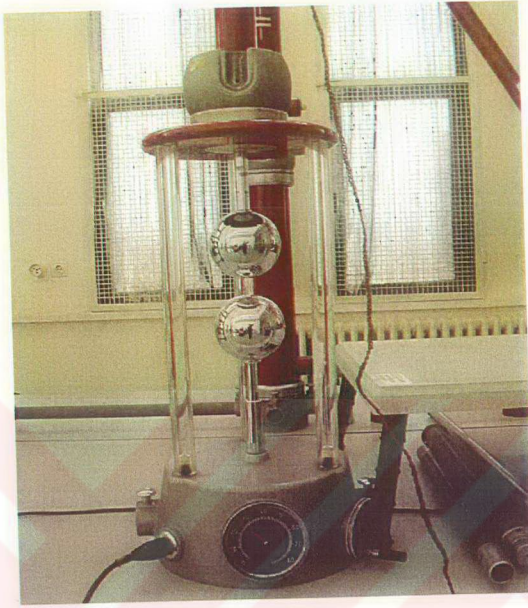
Şekil C.11 İletkenlik ölçerin yakından görünüşü



Şekil C.12 Darbe üreticinin kumanda masası



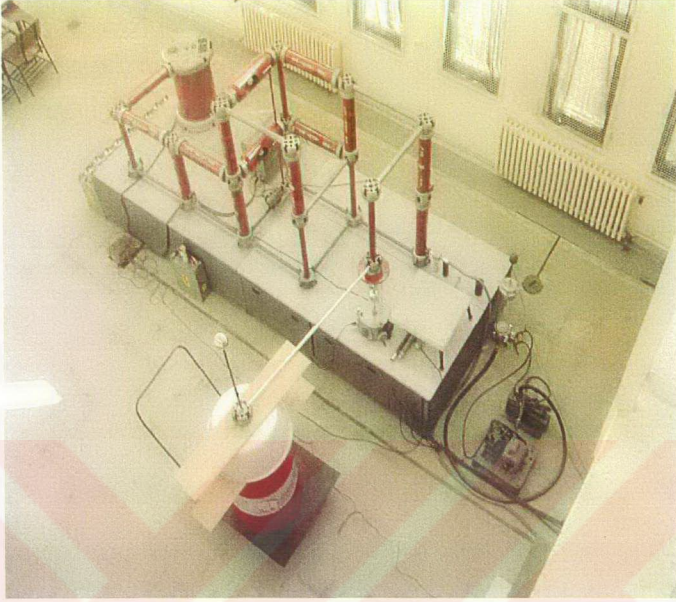
Şekil C.13 Darbe tepe değeri voltmetresi



Şekil C.14 Darbe üretici çıkışında kullanılan atlama küreleri



Şekil C.15 Kumanda masasındaki ampermetre ve voltmetreler

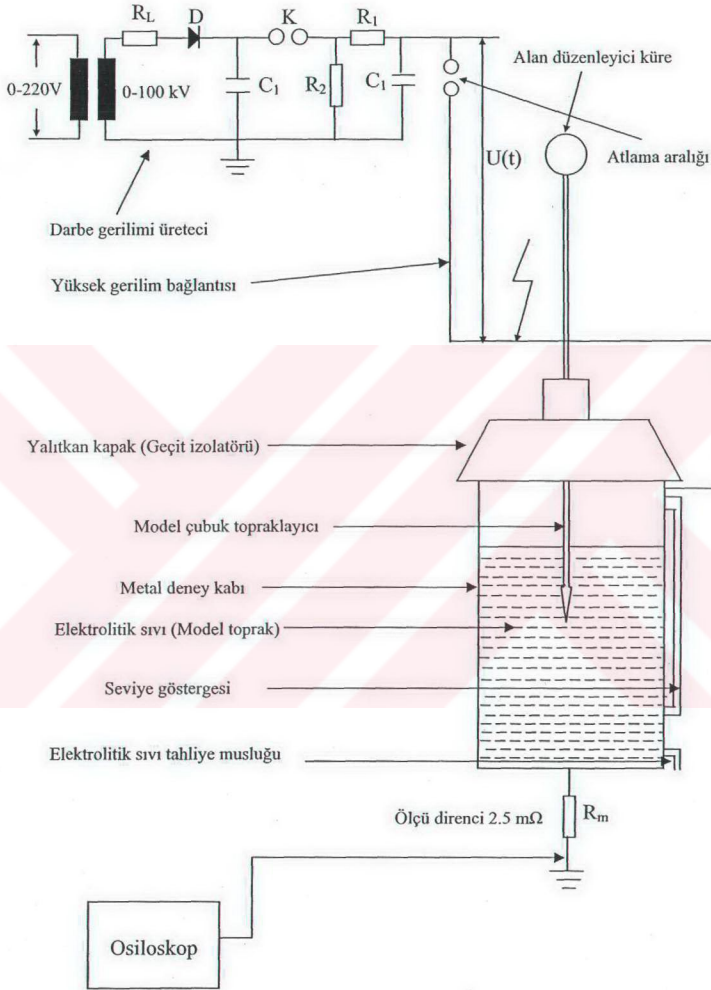


Şekil C.16 Deney düzeneginin üstten görüntüsü



Şekil C.17 Dijital osiloskop (band genişliği 100 MHz)

Ek C.7 Deney-1 için Kurulan Deney Devresi



Şekil C.18 Deney 1 için kullanılan deney devresi

Deney-1 başlangıcında deneyin gerçekleştirildiği ortamın sıcaklığı, hava basıncı ve bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Tablo C.2'nin 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 üreticinin ölçü kürelerinden toprağa bağlı olan küre ile topraklama modeli için kullanılan silindrisel metal deney kabının gövdesinin temas etmesi sağlanmıştır. Böylece akım yolu içerisinde deney kabı içine konulan elektrolitik sıvı olarak kullanılan çeşme suyunun yer alması 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 üreticinin 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.

Tablo C.2 Deney-1 için elde edilen ölçüm sonuçları

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

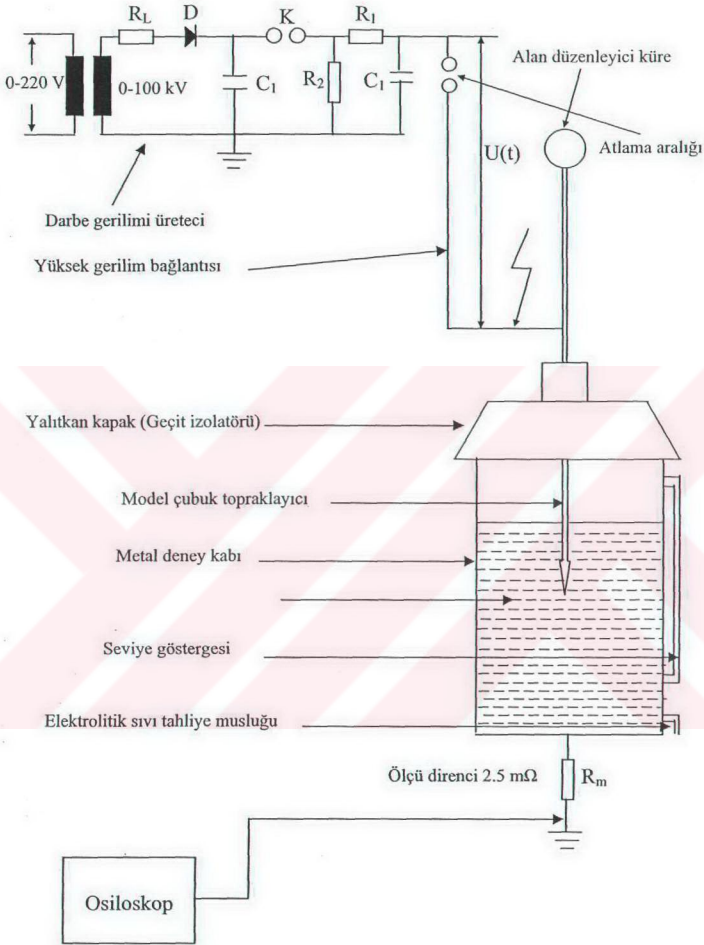
Nem: %54,5; Hava Basıncı: 996 hPa/mbar; Sıcaklık: 13 °C

Tablo C.3 Deney-2'den elde edilen ölçüm sonuçları

$\sigma_{su} = 440 \mu\text{.siemens/cm}$			
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 V	a = 5 mm	87,5 V
	139,1 V		65,62 V
	118,8 V		89,06 V
a = 7 mm	123,4 V	a = 7 mm	104,7 V
	107,8 V		117,2 V
	128,1 V		118,8 V
a = 9 mm	148,4 V	a = 9 mm	120,3 V
	137,5 V		126,6 V
	135,9 V		104,7 V
a = 11 mm	151,2 V	a = 11 mm	154,7 V
	156,2 V		146,9 V
	162,5 V		145,3 V
a = 13 mm	123,4 V	a = 13 mm	159,4 V
	107,8 V		156,2 V
	96,88 V		157,8 V
a = 15 mm	137,5 V	a = 15 mm	187,5 V
	175 V		157,8 V
	142,2 V		195,3 V

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

Ek C.8 Deney-2 ve 3 için Kurulan Deney Devresi



Şekil C.19 Deney 2 ve 3 için kullanılan deney devresi

Deney-2 başlangıcında deneyin gerçekleştiği ortamın sıcaklığı, hava basıncı ve bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Tablo C.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 çubuk topraklayıcı ve deney kabının içindeki çeşme suyu dahil edilmiştir. Topraklayıcının derinliği suyun üst seviyesinden aşağıya doğru 35 cm'dir. Bu durumda topraklayıcı, deney kabı tabanından 30 cm yukarıda ve deney kabının ekseninden geçmektedir. Böylece topraklayıcı 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 üreticinin 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-3 başlangıcında deneyin gerçekleştiği ortamın sıcaklığı, hava basıncı ve bağıl nemi ölçülmüş ve ölçüm sonuçlarının kayıt edildiği Tablo C.4'ün altında verilmiştir.

Üçüncü olarak yapılan deneyde kullanılan elektrolitik sıvının iletkenliğini arttırmak için sıvıya belirli miktarda soda 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. Topraklayıcının derinliği suyun üst seviyesinden aşağıya doğru 35 cm'dir. Bu durumda topraklayıcı, 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 üreticinin 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. [75]

Tablo C.4 Deney-3'ten elde edilen ölçüm sonuçları

$\sigma_{su} = 440 \mu\text{.siemens/cm}$			
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 V	a = 5 mm	71,88 V
	90,62 V		75 V
	92,19 V		93,75 V
a = 7 mm	106,2 V	a = 7 mm	128,1 V
	125 V		98,44 V
	121,9 V		109,4 V
a = 9 mm	154,7 V	a = 9 mm	126,6 V
	120,3 V		118,8 V
	168,8 V		132,8 V
a = 11 mm	132,8 V	a = 11 mm	151,6 V
	139,1 V		165,6 V
	145,3 V		148,4 V
a = 13 mm	143,8 V	a = 13 mm	175 V
	156,2 V		162,5 V
	193,8 V		167,2 V
a = 15 mm	157,8 V	a = 15 mm	150 V
	181,2 V		140,6 V
	173,4 V		156,2 V

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

ÖZGEÇMİŞ

Okan İhsan Öztürk, 19.06.1973 yılında Tokat'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini tamamladıktan sonra 1990 yılında İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 1994 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik Mühendisliği Programına yüksek lisans eğitimine başladı. 1998-2000 yılları arasında İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü Yüksek Gerilim Birimi'nde araştırma görevlisi olarak görev yaptı. Halen 1998 yılında başladığı doktora öğrenimine devam etmekle birlikte, 2000 yılından beri özel bir şirkette sistem destek mühendisi olarak görev yapmaktadır.