

**XLPE İZOLELİ GÜÇ KABLOLARINDA NÜMERİK METODLARLA
ELEKTRİK ALAN ANALİZİ**

Tamer EMRE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2007
ANKARA**

Tamer EMRE tarafından hazırlanan XLPE İZOLELİ GÜÇ KABLOLARINDA NÜMERİK METODLARLA ELEKTRİK ALAN ANALİZİ adlı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.


Prof. Dr. M. Sezai DİNÇER
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU



Üye : Prof. Dr. M. Sezai DİNÇER

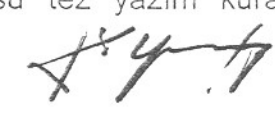


Üye : Doç. Dr. M. Ali AKCAYOL



Tarih : 02 / 02 / 2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Tamer EMRE

**XLPE İZOLELİ GÜÇ KABLOLARINDA NÜMERİK METODLARLA
ELEKTRİK ALAN ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Tamer EMRE

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Şubat 2007**

ÖZET

Bu tezde orta ve yüksek gerilim güç kabloları ilk önce tasarım ve üretim aşamalarında kullanılan çeşitli yalıtım malzemelerine göre ele alınmıştır.

Daha sonra tek fazlı ve üç fazlı güç kablolarında alan dağılımını analiz etmek için Matlab Programlarını kullanarak basit bir model geliştirilmiştir.

Model, tek ve çok yalıtım katmanlı çeşitli kablo tipleri üzerinde uygulanmış ve sonuçlar ekranlama durumunun da ele alındığı kablolarda elde edilen sınır alan büyüklüklerini karşılaştırılarak tartışılmıştır.

**Bilim Kodu : 608.0.207
Anahtar Kelimeler : XLPE Güç Kablosu, Elektrostatik Alan, Matlab ile Alan Hesabı
Sayfa Adedi : 151
Tez Yöneticisi : Prof.Dr.M.Sezai DİNÇER**

**ELECTRIC FIELD ANALYSIS BY NUMERICAL METHODS OF XLPE
INSULATED POWER CABLES**

(M. Sc. Thesis)

Tamer EMRE

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
February 2007**

ABSTRACT

In this thesis, medium and high voltage power cables are firstly discussed with respect to design, production stages together with the various insulation materials employed.

Then, in order to analyze the field distribution within the single phase and three phase power cables a simple model is developed and employed using Matlab Codes.

The model is applied to various cable types with single and multiple insulation layers and the results are discussed comparing the critical field magnitudes developed within the cables considering shielded cases as well.

Science Code	: 608.0.207
Key Words	: XLPE Power Cable, Elektrostatic Field, Field Analysis by Matlab
Number of Pages	: 151
Thesis Adviser	: Prof.Dr.M.Sezai DINCER

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, hem değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hem de lisans ve yüksek lisansta gerekli bilgi alt yapısını verdiği dersler ile sağlayan Sayın Prof.Dr.Sezai DİNÇER'e, yine lisans ve yüksek lisansta yardımcı olan Sayın Prof.Dr.Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, Pyrsnian Kablo'dan Sayın Murat TEZCAN, Sayın Zehra YALÇINKAYA, Sayın Levent TOLGAY, Sayın Erdinç YÜKSEL'e, programlama aşamasında bana yol gösteren ve öğreten TEDAŞ çalışanı mühendis arkadaşlarım Sayın Abdülkadir ONGUN ve Sayın Çetin ÇELİK'e, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli arkadaşlarım Rüya YILDIRIM, Uğur Can YOLDAŞ, Ziyaettin ERKAN ve sevgili aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1.GİRİŞ	1
2.XLPE MALZEME, KABLO ETRAFINDA ELEKTRİK ALAN.....	2
2.1.XLPE Malzeme	2
2.1.1.Polietilenlerin sınıflandırılması	2
2.1.2.Özellikleri.....	3
2.2.Güç Kablosu Tipleri	4
2.3.XLPE İzoleli Kablo İmalatı.	5
2.4.Çok Tabakalı Kablo Geometrisi.....	8
2.5.Kablo etrafında Elektrik Alan.	10
2.5.1.Dielektrik yoğunluk kavramı.....	11
3. TEK DAMARLI KABLODA ELEKTRİK ALAN HESABI.	12
3.1.Elektrik Alan Hesabında Fiziksel Yöntem	16
3.1.1.Tek damarlı kablolarda programla yardımıyla çözüm	16
3.1.2.Tek damarlı kablolarda programlama akış diyagramı.....	16

Sayfa

3.1.3.MATLAB kodları ve elektrik alan haritaları.....	17
3.1.4.Tek damarlı güç kablolarında elektrik alan haritaları üzerine değerlendirme	25
3.2. Elektrik Alan Hesabında Sayısal Yöntemler	29
3.2.1.Sonlu elemanlar yöntemi	29
3.3.Problem Çözümü ve Yaklaşım	34
3.3.1.Problemin modellenmesi	34
3.3.2.Örnekleme aralıklarının ve hücrelerin oluşturulması	35
3.3.3.Sınır koşullarının belirlenmesi	38
3.3.4.Matematiksel çözümleme	39
4. ÜÇ DAMARLI KABLODA ELEKTRİK ALAN HESABI	53
4.1. Elektrik Alan Hesabında Fiziksel Yöntem	53
4.1.1.Üç damarlı kablolarda programla yardımıyla çözüm	53
4.1.2.Üç damarlı kablolarda akış diyagramı	53
4.1.3.MATLAB kodları ve elektrik alan haritaları.....	54
4.1.4.Üç damarlı güç kablolarında elektrik alan haritaları üzerine değerlendirme	59
4.2. Elektrik Alan Hesabında Sayısal Yöntemler	61
4.2.1.Problemin modellenmesi	61
4.2.2.Örnekleme aralıklarının ve hücrelerin oluşturulması	63
4.2.3.Sınır koşullarının belirlenmesi	63
4.2.4.Matematiksel çözümleme	65
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR	79

Sayfa

EKLER	80
EK-1 Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları.....	81
EK-2 Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları	94
EK-3 Matlab kodları	114
EK-4 XLPE güç kablosu örnekleri	127
EK-5 Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları.....	138
ÖZGEÇMİŞ	151

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. XLPE malzemenin karakteristik özellikleri.....	3
Çizelge 2.2. Bazı yaygın malzemeler için dielektrik sabitleri ve dielektrik yoğunluk değerleri.....	11
Çizelge 3.1. Tek damarlı kablolarda programlama akış diyagramı	16
Çizelge 3.2. Tek damarlı kablo, tek katmanda örnekleme tablosu	23
Çizelge 3.3. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper var, $er1 > er2$ örnekleme çizelgesi.....	23
Çizelge 3.4. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper var, $er2 > er1$ örnekleme çizelgesi.....	24
Çizelge.3.5. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper yok, $er1 > er2$ örnekleme çizelgesi.....	24
Çizelge 3.6. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper yok, $er2 > er1$ örnekleme çizelgesi.....	24
Çizelge 3.7. Numaralandırma eşleşmesi	48
Çizelge 4.1. Üç damarlı kablolarda akış diyagramı	53
Çizelge 4.2. Üç damarlı kablo, bakır izoleli durum örnekleme çizelgesi.....	58
Çizelge 4.3. Üç damarlı kablo, bakır siper yok, $er1 > er2$ örnekleme çizelgesi	58
Çizelge 4.4. Üç damarlı kablo, bakır siper yok, $er2 > er1$ örnekleme çizelgesi	59

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çok tabakalı koaksiyel kablo geometrisi.....	8
Şekil 2.2. X ekseninde elektrik alan çizgileri	10
Şekil 2.3.Y ekseninde elektrik alan çizgileri	10
Şekil 2.4.Z ekseninde elektrik alan çizgileri.....	10
Şekil 2.5.Eksenlerde elektrik alan çizgileri	10
Şekil 2.6. Z ekseninde elektrik alan çizgileri.....	13
Şekil 2.7. Elektrik alan çizgileri.....	14
Şekil 3.1. Problemden tanımlanan kablonun kesiti.....	13
Şekil 3.2. Çok tabakalı kabloda elektrik alan hesabı	14
Şekil 3.3. Matlab kodu çalıştığında ekranda oluşan görüntü	18
Şekil 3.4. Matlab kodu çalıştırıldığında elde edilen E matrisi	19
Şekil 3.5. Excel formatında E matrisi	20
Şekil 3.6. Excel formatında E değerleri	20
Şekil 3.7. Farklı E değerlerinden oluşan E matrisi.....	21
Şekil 3.8. E matrisi değerlerinin renklerle şekillendirilmesi.....	22
Şekil 3.9. Sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemi karşılaştırması	30
Şekil 3.10. Çeşitli boyutlar için eleman seçimi	33
Şekil 3.11. Tek damarlı,bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu modeli.....	35
Şekil 3.12. Örneklemenin dikdörtgensel elemanlar ile yapılması durumu	36
Şekil 3.13. Örneklemenin dairesel elemanlar ile yapılması durumu.....	37
Şekil 3.14. Hücreler.....	38
Şekil 3.15. Örnekleme.....	40

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. Numaralandırma	46
Şekil 3.17. Lokal ve global numaralandırma	48
Şekil 3.18. Matlab enterpolasyonu	51
Şekil 4.1. Üç damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu modeli	62
Şekil 4.2. Hücreler.....	63
Şekil 4.3. Sınır koşulların tespiti	65
Şekil 4.4. Dörtgensel eleman koordinatları	66
Şekil 4.5. Matlab enterpolasyonu	67

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Bakır makaraları	5
Resim 2.2. Damarlandırma	5
Resim 2.3. Damarların yalıtkan ile kaplanması	6
Resim 2.4. Damarların birleştirilerek kaplanması	6
Resim 2.5. Kablo makaraları	7
Resim 2.6. Faraday Kafesi'nde bir makaranın testi	7
Resim 2.7. Sevkiyata hazır makaralar	8
Resim 2.8. Tek damarlı kablo örneği	9
Resim 2.9. Tek damarlı kablo tabakaları	9
Resim 2.10. Üç damarlı kablo örneği	9
Resim 2.11. Üç damarlı kablo tabakaları	9
Resim 3.1. Tek damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu kesiti	35
Resim 4.1. Üç damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu kesiti	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E	Elektrik Alan
Q	Birim Kesitteki Yük Yoğunluğu
R	Kesit Yarıçapı
ϵ_0	Boşlukta Dilektrik Sabiti

1. GİRİŞ

Elektrik gereksiniminin sürekli artması, daha fazla bölgeye daha düşük kayıplarla elektrik iletilmesi gereksinimini beraberinde getirmektedir. Günümüzde ekonomik sınırlar dahilinde havai hatlar, yer altı kablolarına dönüştürülmektedir. İyi tasarlanmış ve tasarıma göre üretilmiş bir yer altı hattında arıza olasılığı, havai hattan daha düşüktür. (Çevresel etkenler nedeniyle faz-toprak ve faz-faz arızaları önlenmiş olacak, yıldırım gibi olasılıklar ortadan kalkacak)

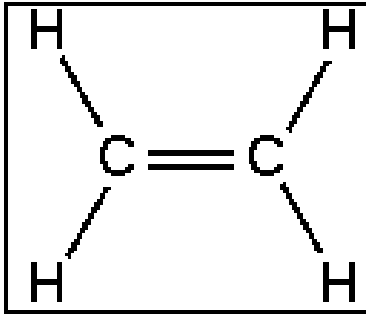
Bir “Orta Gerilim” veya “Yüksek Gerilim Kablosu”nda günümüzde en önem verilen nokta, gerilime ve çevresel koşullara dayanımdır. Bu nedenle kablo tasarımında çeşitli katmanlar özel sipariş edilmekte, yalıtkan ve yarı iletken tipleri, hatta dış kılıf cinsleri özel siparişlerle istenmektedir. Günümüzde en yaygın kullanım, XLPE tip malzeme kullanımı ile tasarlanan güç kablolarına aittir. Genelde dış kılıfı plastik olan bu kabloların ticari koşullara ve talebe göre özel tasarımı yapılır. Bu kablolar, gerek tasarımının özel oluşu, gerekse iletken çapının büyük olması nedeniyle çok pahalı kablolardır ve üretim süresi de fazladır.

Bu çalışmada XLPE izoleli güç kablolarında elektrik analizi yapılmaktadır. Sayısal olarak kullanılan yöntem, Sonlu Elemanlar Yöntemi, bilgisayar programlamasında kullanılan program, Matlab’tır.

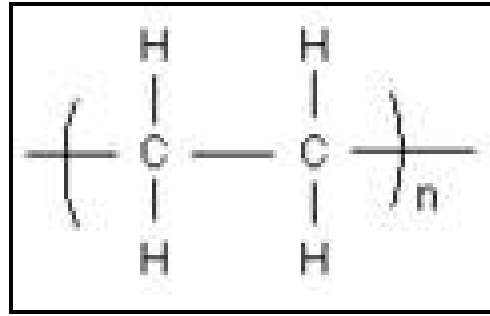
2. XLPE MALZEME, KABLO ETRAFINDA ELEKTRİK ALAN

2.1. XLPE Malzeme

Polietilen, çok çeşitli ürünlerde kullanılan bir termoplastiktir. İsmi monomer haldeki etilenden alır, etilen kullanılarak polietilen üretilir. Plastik endüstrisinde genelde ismi kısaca PE olarak kullanılır. Etilen molekülü C_2H_4 , aslında çift bağ ile bağlanmış iki CH_2 'den oluşur. $(CH_2=CH_2)$ Polietilenin üretim şekli, etilenin polimerizasyonu ile olur. Polimerizasyon metodu, radikal polimerizasyon, anyonik polimerizasyon, iyon koordinasyon polimerizasyonu ve katyonik polimerizasyon metodları ile olabilir. Bu metodların her biri farklı tipte polietilen üretimi sağlar. [1]



Etilen



Polietilen

2.1.1. Polietilenlerin sınıflandırılması

Polietilen, yoğunluk ve kimyasal özellikleri baz alınarak çeşitli kategorilerde sınıflandırılır. Mekanik özellikleri, moleküler ağırlığı, kristal yapısı ve dallanma tipine bağlıdır.

- UHMWPE (ultra yüksek moleküler ağırlıklı PE) (ultrahigh molecular weight)
- HDPE (yüksek yoğunluklu PE) (high density PE)
- HDXLPE (yüksek yoğunluklu çapraz bağlı PE) (high density cross-linked PE)
- PEX (çapraz bağlı PE) (çapraz bağlı PE)

- MDPE (orta yoğunluklu PE) (medium density PE)
- LDPE (düşük yoğunluklu PE) (low density PE)
- LLDPE (doğrusal bağlı düşük yoğunluklu PE) (linear low density PE)
- VLDPE (çok düşük yoğunluklu PE) (very low density PE) [1]

2.1.2. Özellikleri

Özellikleri tiplere göre değişiklik gösterse de dış ortam koşulları ve neme karşı iyi direnç, esneklik, zayıf mekaniksel kuvvet ve üstün kimyasal direnç genel özellikleri olarak sayılabilir. Kaplar, kutular, mutfak eşyaları, kaplamalar, boru ve tüp, oyuncak, kablolarda yalıtkan tabakalar, paketlenme ve ambalaj filmi gibi çok yaygın bir kullanım alanı olup düşük maliyetlidir. Ansiklopedik kaynaktan alınan yukarıdaki verilere göre, XLPE malzemenin raf ömrü vardır.

Çizelge 2.1. XLPE malzemenin karakteristik özellikleri [1]

Çapraz Bağlı Polietilen	
(Crosslinked Polyethylene – XLPE)	
Polimer Tipi	Termoplastik (ısıya dayanıklı plastik)
Avantajları	Artan sıcaklıklara dayanımlı. Strese hassasiyeti daha düşük.
Dezavantajları	Oksitlenmiş tipleri elektriksel olarak bozulmaya neden olabilmektedir.
Yoğunluk (g/cm ³)	0,93
Yüzey Sertlik Standardı	SD58
Gerilme Gücü (MPa)	18
Esneklik Modülü (GPa)	0,6
Noktasal Izod (kJ/m)	1.06+
Linear Expansion (/°C x 10 ⁻⁵)	20
Kesilince uzama (%)	350
Zorlukta Dayanım (%)	N/Y
Maks. İşletme Gerilimi (°C)	90
Su Tutulumu (%)	0,01
Oksijen Derecesi (%)	17
Hacimsel Direnç (log ohm.cm)	16
Dielektrik Dayanım (MV/m)	21
İsraf Faktörü 1kHz	0,0004
Dielektrik Sabiti 1kHz	3,2
HDT @ 0.45 MPa (°C)	60
HDT @ 1.80 MPa (°C)	60
Erime Sıcaklık Derecesi (°C)	150 - 170

2.2. Güç Kablosu Tipleri

Elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında kullanılan kablolarda, iletkenleri birbirinden izole eden hem de dış ortama karşı koruyan çeşitli yalıtkan kimyasal bileşimler kullanılmaktadır. Bu yalıtkan bileşimler, PE (Polietilen, PVC (Polivinil Klorür) ve XLPE (Çapraz bağlı polietilen) gibi sentetik karışımlardan oluşan yalıtkanlardır. Güç Kablolar değişik esaslara göre sınıflandırılırlar.

İşletme gerilimlerine göre kablolar,

- a-Alçak gerilim kabloları (1 KV kadar.)
 - b-Orta gerilim kabloları (1KV – 30KV)
 - c-Yüksek gerilim kabloları (380 KV kadar);
- olarak sınıflandırılabilir.

Kullanılan yalıtkan sentetik bileşimlere göre kablolar,

- a-Kağıt izolasyonlu kablolar
 - b-PVC (Polivinilklorid) kablolar
 - c-PE (Polietilen) kablolar
 - d-XLPE (Çapraz bağlı polietilen) kablolar;
- olarak gruplandırılabilir.

İletken yapıldıkları malzemeye göre,

- a-Bakır iletkenli kablolar
 - b-Alüminyum iletkenli kablolar;
- şeklinde sınıflandırılabilir.[1]

2.3. XLPE İzoleli Kablo İmalatı

XLPE izoleli kablo imalatında öncelikle damarlanmak üzere işlenmiş bakırlar makaralar halinde siparişin çapına ve boyutuna göre sınıflandırılır.



Resim 2.1. Bakır makaraları [2]

Bu bakır makaraları kablo fabrikalarında statik mukavemeti için döndürülerek damarlandırılır.



Resim 2.2. Damarlandırma [2]

Siparişin tipine göre her damara yalıtkan malzeme ile izolasyon yapılır.



Resim 2.3. Damarların yalıtkan ile kaplanması [2]

Kablo damarları bir dolgu malzemesi ile doldurulur ve XLPE malzeme ile kaplanır.



Resim 2.4. Damarların birleştirilerek kaplanması [2]

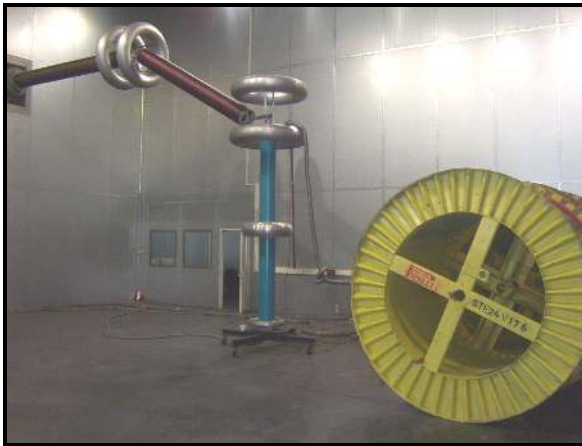
Kablolar, sevkiyat tipine ve isteğe göre demir yada ahşap makaralara sarılır. Orta gerilim ve yüksek gerilim kablolarının damar çapı ve kablo çapı büyük

olduğu için büyük makaralar kullanılır. Boyutlandırmada ağırlık esastır. Ticari olarak izin verilen ağırlık, eşit parçalara bölünerek XLPE kablolar makaralara sarılır.



Resim 2.5. Kablo makaraları [2]

Makaralara sarılan kablolar fabrikaların Faraday Kafeslerinde elektriksel testlere tabi tutulurlar. Testler tip ve karakteristik testleridir ve standartlara uygun olarak yapılmaktadır. Bu testler arasında istenen bir elektriksel alan tayini testi yoktur; ancak kablo fabrikalarında elektriksel alan karakteristikleri ölçülebilmektedir.



Resim 2.6. Faraday Kafesi'nde bir makaranın testi [2]

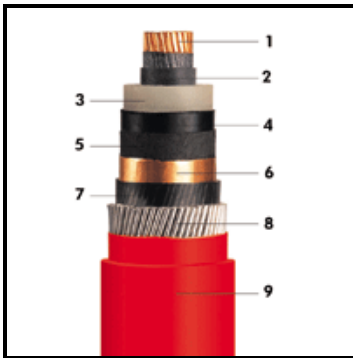
Testleri geçen makaralar sevkiyata hazır hale gelir.



Resim 2.7. Sevkiyata hazır makaralar [2]

2.4. Çok Tabakalı Kablo Geometrisi

Şekil 2.3'te tipik bir yüksek gerilim kablosu gösterilmektedir. (örnek kablo katalogları için lütfen EK-4'ü inceleyiniz.) İç iletkeni bakır veya alüminyum olan, iç iletkeni çevreleyen bir yarı iletken tabakasına sahip, örgülü polietilen (XLPE) tip yalıtkan tabakayla çevrenilmiş, üstüne dış yarı iletken tabakası geçirilmiş, toprak yada nötr iletken tabakası ve yine polietilen bir kılıfla çevrenilmiş bir kablodan söz edilebilir. Dıştaki yarı iletken tabakaları iletken tabakalar arasında kısmi boşalmaları ve alandan dolayı oluşmuş uyarılmış bölgeleri önlemek amacıyla yumuşak bir yüzey yaratır.



Şekil 2.1. Çok tabakalı koaksiyel kablo geometrisi, 1-İletken : Bakır veya alüminyum (yarıçapı a), 2-İç yarı iletken : XLPE (kalınlığı b_1), 3-İzole : XLPE (kalınlığı c), 4-Dış yarı iletken : XLPE (kalınlığı b_2), 5-Yarı iletken bant, 6-Siper : Bakır, 7-Ayrıcı kılıf : PVC veya LSF, 8-Tel zırh : Alüminyum, 9-Dış kılıf : PVC veya LSF [3]



Resim 2.8. Tek damarlı kablo örneği [2]



Resim 2.9. Tek damarlı kablo tabakaları [2]



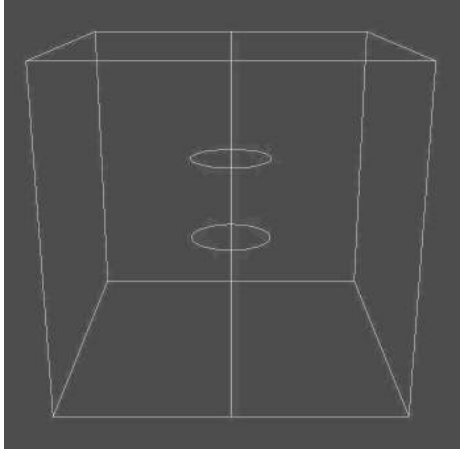
Resim 2.10. Üç damarlı kablo örneği [2]



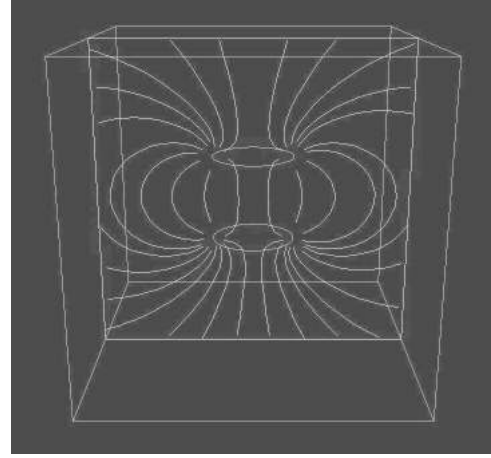
Resim 2.11. Üç damarlı kablo tabakaları [2]

2.5. Kablo Etrafında Elektrik Alan

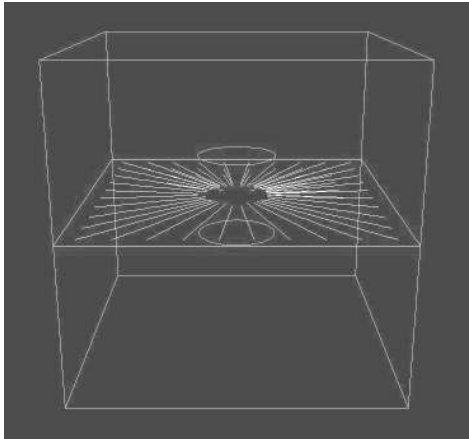
Kablonun şeklini tam silindirik kabul edersek içinden elektrik geçen bir silindirik malzeme için fiziksel elektrik alan çizgileri Elektromanyetik Alan Teorisi yardımı ile hesaplanabilir. Bu durum incelendiğinde aşağıdaki gibi yüzeylere göre tahmini olarak ulaşmaya çalıştığımız çizimleri elde edebiliriz:



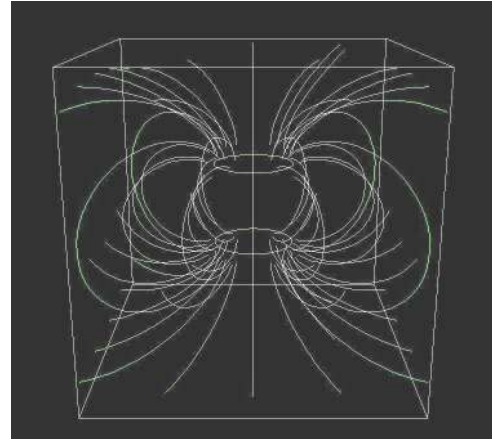
Şekil 2.2. X ekseninde elektrik alan çizgileri [4]



Şekil 2.3.Y ekseninde elektrik alan çizgileri [4]



Şekil 2.4.Z ekseninde elektrik alan çizgileri [4]



Şekil 2.5.Eksenlerde elektrik alan çizgileri [4]

2.5.1. Dielektrik yoğunluk kavramı

Elektrik alan, dielektrik malzeme içindeki sıçrama yüklerinde polarizasyonun bir sonucu olarak küçük yer değişikliklerine yol açar. Eğer elektrik alan yeterince kuvvetliyse, elektronları tamamen moleküllerden koparabilir. Elektronlar elektrik alanın etkisi altında ivme kazanır ve malzemenin hücre-molekül yapısına kalıcı olarak hasar verecek etkiler yaratırlar. İvmelenen bu elektronların çarpışmalarından çığ etkisi ve iyonlaşma dahi gerçekleşebilir. Böylelikle malzeme iletken hale gelir ve büyük akımlar akar. Bu olayın adı, “Dielektrik Delinme” dir. Bir malzemenin Dielektrik Delinmeye maruz kalmadan dayanabileceği en büyük Elektrik Alan değerine “Malzemenin Dielektrik Yoğunluğu” denir. Yaygın bazı malzemelere ilişkin yaklaşık Dielektrik Yoğunluk değerleri, aşağıdaki tabloda verilmektedir [4]:

Çizelge 2.2. Bazı yaygın malzemeler için dielektrik sabitleri ve dielektrik yoğunluk değerleri [4]

Malzeme	Dielektrik Sabiti	Dielektrik Yoğunluğu (MV/m)
Hava (atmosfer koşullarında)	1,0	3
Mineral yağlar	2,3	15
Kağıt	2~4	15
Polystyrene	2,6	20
Kauçuk	2,3~4,0	25
Cam	4~10	30
Mika	6,0	200

3. TEK DAMARLI KABLODA ELEKTRİK ALAN HESABI

3.1. Elektrik Alan Hesabında Fiziksel Yöntem

Yüklü bir cismin etrafındaki elektrik alana ilişkin hesaplamalar, uzun zamandan bu yana fiziksel olarak denklemlerle ifade edilebilir haldedir. Çok tabakalı bir güç kablosuna ilişkin herhangi bir yarıçaptaki nokta için elektrik alan değerini bulmak için malzemenin cinsi ve kablonun üzerindeki yük cinsinden bazı değişkenleri rakamsal olarak yerine koymak yeterlidir. Bu aşamada, çok tabakalı bir güç kablosunun içindeki tabakalarda görülen elektrik alan değerlerine ilişkin bir problem çözümünü incelemek, faydalı olacaktır:

Problem

İletken çapı, yük akımına göre hesaplanan çok tabakalı bir kablo, elektriksel güç taşımak için bir tesiste kullanılmaktadır. İç iletken yarıçapının 0,4cm ve yalıtım malzemesi kullanılan tabakalardan konsantre kauçuk için dielektrik sabitinin ($\epsilon_{rr} = 3,2$) ve polystyrene için dielektrik sabitinin ($\epsilon_{rp} = 2,6$) olduğunu kabul edelim. 20KV luk gerilime dayanabilecek ve normal olmayan koşullardan ve delinmeden kaçınmak amacıyla maksimum Elektrik Alanı, malzemelerin Dielektrik Yoğunluğunun %25'ini aşmayacak bir kablo tasarlayınız.

Çözüm

Tablodan kauçuk ve polystyrene için dielektrik yoğunluğunu 25×10^6 (V/m) ve 20×10^6 (V/m) olarak bulduk.

$$\text{Kauçukta Maksimum } E_r = 0,25 \times 25 \times 10^6 = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{3,2r_i} \right) \quad (3.1)$$

$$\text{Polystyrenede Maks.Er} = 0,25 \times 20 \times 10^6 = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{2,6r_p} \right) \quad (3.2)$$

Buradan; $r_p = 1,54$ $r_i = 0,616$ (cm)

Bu sonuca göre elektrik alan değerinin büyük olduğu yere dayanımı büyük olan kauçuk tabakası yerleştirilmelidir. İç kısımdaki kauçuğun üzerine sarılan polystyrene tabakası, kullanışlı olacaktır.

Kablo, iç ve dış iletkenler arasında 20 KV'luk bir potansiyel farkı taşımak üzere dizayn edilmektedir.

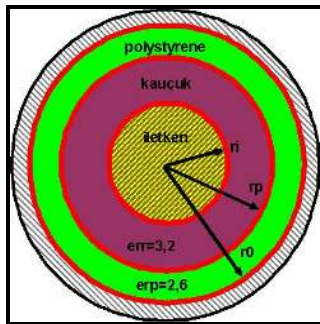
$$-\int_{r_0}^{r_p} E_p dr - \int_{r_p}^{r_i} E_r dr = 20000 \quad (3.3)$$

$$\frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\epsilon_{rp}} \ln \frac{r_0}{r_p} + \frac{1}{\epsilon_{rr}} \ln \frac{r_p}{r_i} \right) = 20000 \quad (3.4)$$

$$\frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{2,6} \ln \frac{r_0}{1,54r_i} + \frac{1}{3,2} \ln 1,54 \right) = 20000 \quad (3.5)$$

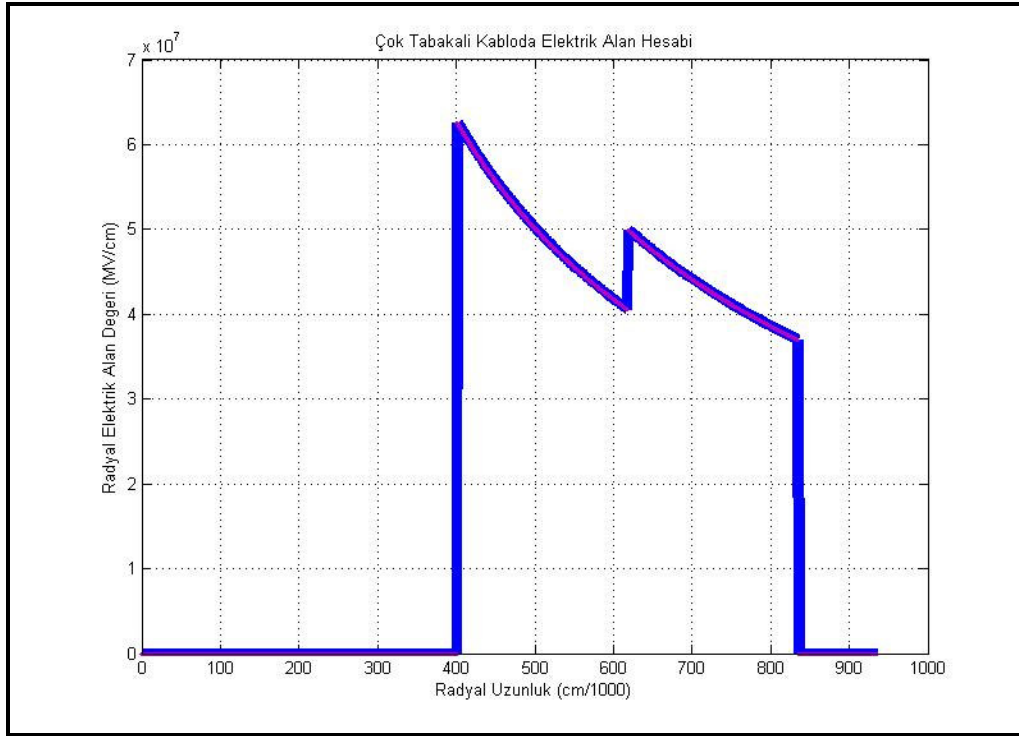
$r_i = 0,4$ cm verildiği için r_0 , $\frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0}$ faktörü bulunarak hesaplanabilir.

$\frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0} = 8 \times 10^4$ ve $r_0 = 2,08$ $r_i = 0,832$ cm olarak bulunur.



Şekil 3.1. Problemde tanımlanan kablonun kesiti [2]

Bu sonuca göre radyal elektrik alanının radyal uzunluk ile değişim grafiği, şekilde verilmektedir. Grafiği oluşturmak için yazılan program, şeklin altında görülebilir. (Program, MATLAB-m-file cinsindendir)



Şekil 3.2. Çok tabakalı kabloda elektrik alan hesabı [2]

Matlab koduyla çözüm

% ÇOK TABAKALI KABLODA ELEKTRİK ALAN HESABI

clc

format long

%% Değişkenler

a=0.4;

%Bakır veya alüminyumun iletken yarıçapı [cm]

b=0.616;

%ilk İzole kalınlığı [cm]

c=0.832;

%son izole kalınlığı [cm]

err=3.2;

%Değişken geçirgenlik katsayısı1

erp=2.6;

%Değişken geçirgenlik katsayısı2

%% Sabitler

```

e0=(10^-7)/(36*pi);      %Dielektrik sabiti [F/cm]
q=4*(10^-3)/9;           %yük
%%
i=1;
for j=0 : 0.001 : a
    Es(i)=0;
    d(i)=j;
    i=i+1;
end
for j=a : 0.001 : b
    E=q*18/((10^-10)*3.2*j);
    Es(i)=(E);
    d(i)=j;
    i=i+1;
end
for j=b : 0.001 : c
    E=q*18/((10^-10)*2.6*j);
    Es(i)=(E);
    d(i)=j;
    i=i+1;
end
for j=c : 0.001 : (c+0.1)
    Es(i)=0;
    d(i)=j;
    i=i+1;
end
plot(Es);

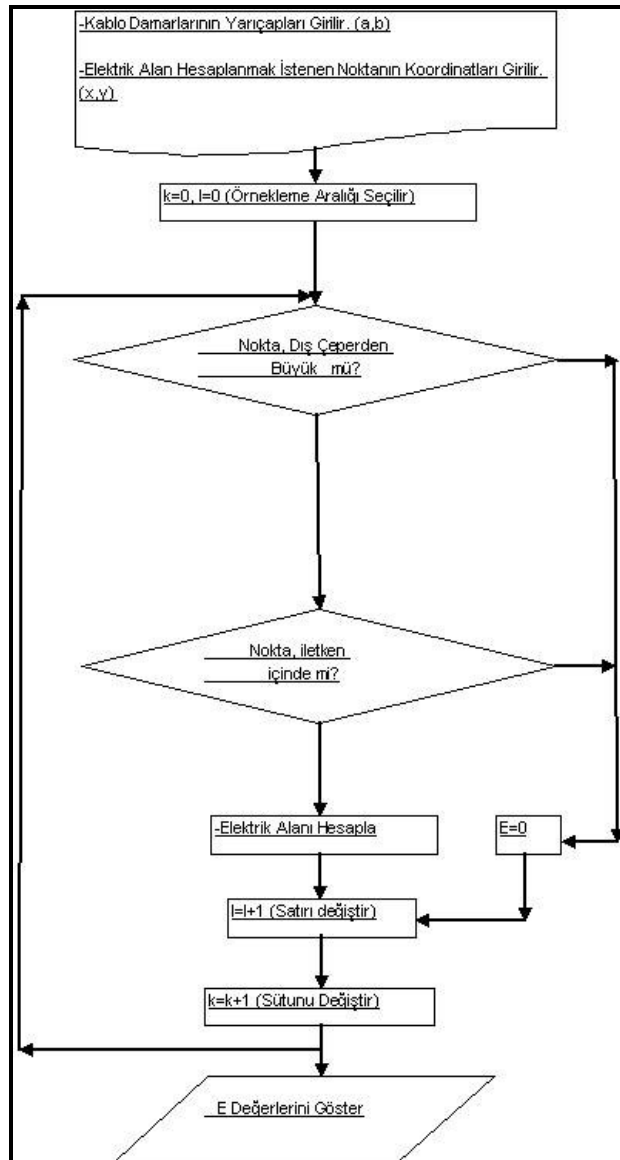
```

3.1.1. Tek damarlı kablolarda programla yardımıyla çözüm

Tek damarlı kabloda MATLAB kodu üreterek herhangi bir noktadaki Elektrik Alan Şiddeti değerini kolayca bulabiliriz. Öncelikle programlama için akış diyagramımızı çıkaralım ve seçeceğimiz örneklere göre örnekleme tabloları oluşturalım:

3.1.2. Tek damarlı kablolarda programlama akış diyagramı

Çizelge 3.1. Tek damarlı kablolarda programlama akış diyagramı [2]



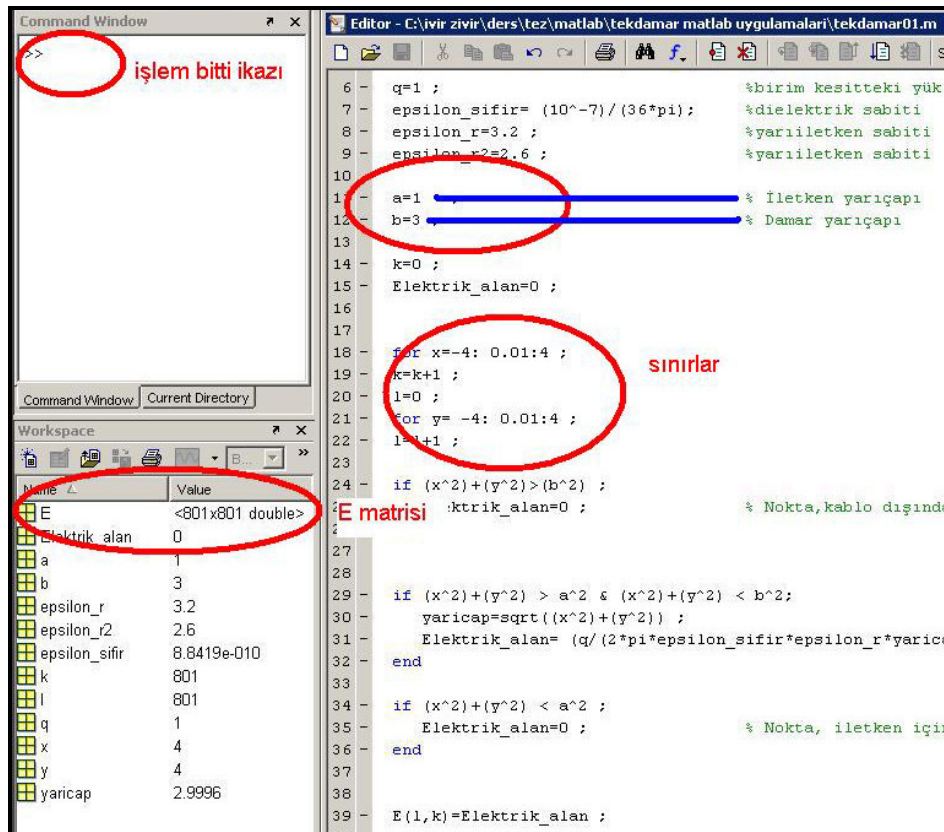
3.1.3. Matlab kodları ve elektrik alan haritaları

MATLAB kodumuz ise;

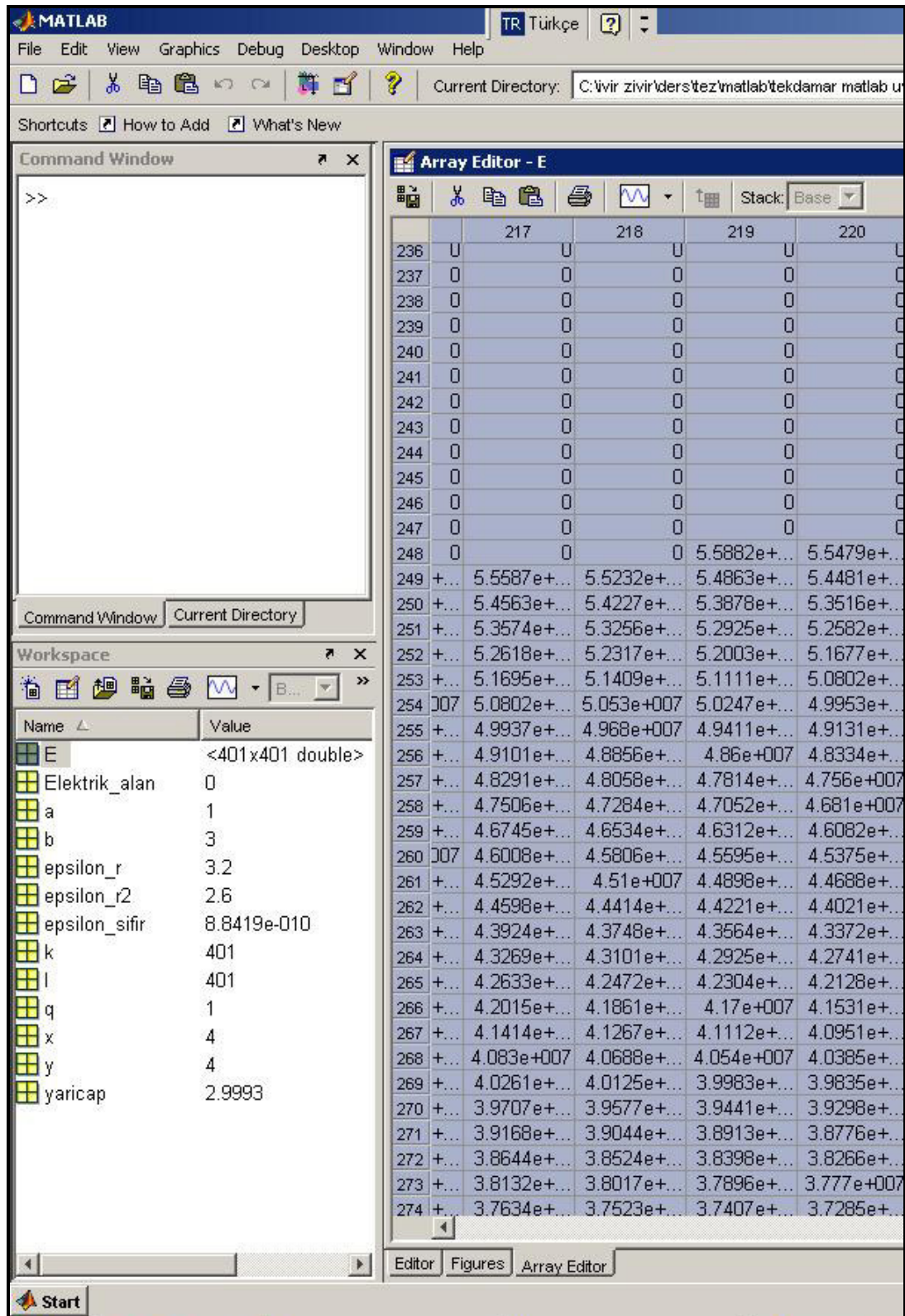
```
%% Tek Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı
clear all
q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ; %yarıiletken sabiti
a=2 ; % İletken yarıçapı
b=3.5 ; % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
for x=-3.6: 0.1: 3.6 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -3.6: 0.1: 3.6 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(b^2) ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta,kablo dışındadır.
end
if (x^2)+(y^2) > a^2 & (x^2)+(y^2) < b^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end
```

Bu kodu yazarken q , birim kesitteki yük yoğunluğunu 1 kabul ettim. a ve b değerleriyle birlikte diğer değerleri de bu kod üzerinde değiştirebilmekteyiz. Örneklemeye yaparken aşağıda seçtiğimiz örneklem tablolarını kulacağız. Her bir duruma ve örneklem tablosuna ilişkin geliştirilen Matlab Kodu, EK-3 kısmında verilmektedir. Ayrıca, örneklemelere ilişkin şekil çıktıları, EK-1 kısmında görülebilir.

Şekil 3.3, yukarıda gösterilen Matlab Kodu çalıştırıldığında ekrandaki görüntüyü resmetmektedir. M-File dosyası olarak yazılan programda matris olarak elde edilen sonuçlar, rakamsal olarak tek tek yer alır. (Resim 3.2.). Şekil 3.4, tek damarlı bir kabloya ilişkin oluşturulan sonuç matrisini Excel dosyası olarak göstermektedir. Şekil 3.5. ve Şekil 3.6'da Excel dosyası olarak tanımlanan sonuç matrisine yakından bakıldığında oluşan görüntü yer almaktadır.



Şekil 3.3. Matlab kodu çalıştığında ekranda oluşan görüntü [2]



Şekil 3.4. Matlab kodu çalıştırıldığında elde edilen E matrisi [2]

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with a single sheet named 'Sayfa1'. The data is organized in a grid where each cell contains a value. Most values are in scientific notation, such as $1.00E+07$, $1.00E+06$, and $1.00E+05$. There are also some zeros scattered throughout the matrix. The spreadsheet is titled 'Microsoft Excel - Kilitli' and has a standard menu bar with options like 'Dosya', 'Gözetim', 'Ekle', 'Bölüm', 'Görünüm', 'Yeni', 'Değiştir', and 'Yardım'.

Şekil 3.5. Excel formatında E matrisi [2]

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with a single sheet named 'Sayfa1'. The data is organized in a grid where each cell contains a value. Most values are in decimal format, such as $1.00E+07$, $1.00E+06$, and $1.00E+05$. There are also some zeros scattered throughout the matrix. The spreadsheet is titled 'Microsoft Excel - Kilitli' and has a standard menu bar with options like 'Dosya', 'Gözetim', 'Ekle', 'Bölüm', 'Görünüm', 'Yeni', 'Değiştir', and 'Yardım'.

Şekil 3.6. Excel formatında E değerleri [2]

Microsoft Excel - Kitap1

TR Türkçe

Dosya Düzen Görünüm Ekle Biçim Araçlar Veri Pencere

Arial Tur 10

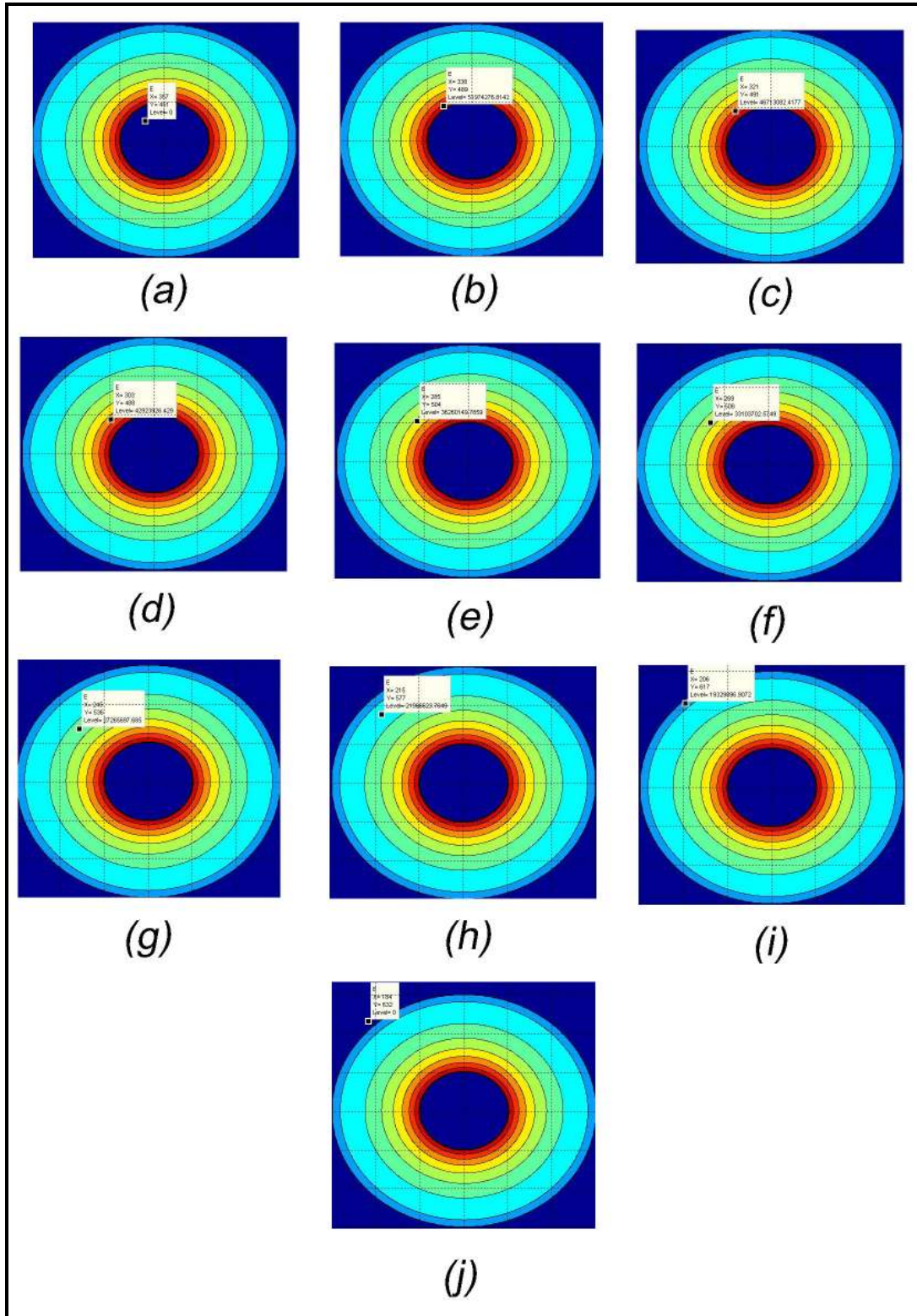
A1 fx 0

	EN	EO	EP	EQ	ER
169	4,86E+07	4,94E+07	5,03E+07	5,12E+07	5,21E+
170	4,84E+07	4,93E+07	5,01E+07	5,10E+07	5,20E+
171	4,83E+07	4,91E+07	5,00E+07	5,08E+07	5,18E+
172	4,81E+07	4,89E+07	4,98E+07	5,06E+07	5,15E+
173	4,79E+07	4,87E+07	4,96E+07	5,04E+07	5,13E+
174	4,77E+07	4,85E+07	4,93E+07	5,02E+07	5,11E+
175	4,75E+07	4,83E+07	4,91E+07	4,99E+07	5,08E+
176	4,73E+07	4,81E+07	4,89E+07	4,97E+07	5,05E+
177	4,71E+07	4,78E+07	4,86E+07	4,94E+07	5,02E+
178	4,68E+07	4,76E+07	4,83E+07	4,91E+07	5,00E+
179	4,66E+07	4,73E+07	4,81E+07	4,88E+07	4,96E+
180	4,63E+07	4,70E+07	4,78E+07	4,85E+07	4,93E+
181	4,60E+07	4,67E+07	4,75E+07	4,82E+07	4,90E+
182	4,58E+07	4,65E+07	4,72E+07	4,79E+07	4,87E+
183	4,55E+07	4,62E+07	4,69E+07	4,76E+07	4,83E+
184	4,52E+07	4,59E+07	4,66E+07	4,73E+07	4,80E+
185	4,49E+07	4,56E+07	4,62E+07	4,69E+07	4,76E+
186	4,46E+07	4,52E+07	4,59E+07	4,66E+07	4,73E+
187	4,43E+07	4,49E+07	4,56E+07	4,62E+07	4,69E+
188	4,40E+07	4,46E+07	4,52E+07	4,59E+07	4,66E+
189	4,37E+07	4,43E+07	4,49E+07	4,55E+07	4,62E+
190	4,33E+07	4,39E+07	4,45E+07	4,52E+07	4,58E+
191	4,30E+07	4,36E+07	4,42E+07	4,48E+07	4,54E+
192	4,27E+07	4,33E+07	4,38E+07	4,44E+07	4,50E+
193	4,24E+07	4,29E+07	4,35E+07	4,41E+07	4,47E+
194	4,20E+07	4,26E+07	4,31E+07	4,37E+07	4,43E+
195	4,17E+07	4,22E+07	4,28E+07	4,33E+07	4,39E+
196	4,14E+07	4,19E+07	4,24E+07	4,30E+07	4,35E+
197	4,11E+07	4,16E+07	4,21E+07	4,26E+07	4,31E+
198	4,07E+07	4,12E+07	4,17E+07	4,22E+07	4,27E+
199	4,04E+07	4,09E+07	4,14E+07	4,19E+07	4,24E+
200	4,01E+07	4,05E+07	4,10E+07	4,15E+07	4,20E+
201	3,97E+07	4,02E+07	4,06E+07	4,11E+07	4,16E+
202	3,94E+07	3,98E+07	4,03E+07	4,07E+07	4,12E+

Sayfa1 Sayfa2 Sayfa3

Çiz Otomatik Şekil

Şekil 3.7. Farklı E değerlerinden oluşan E matrisi [2]



Şekil 3.8. E matrisi değerlerinin renklerle şekillendirilmesi, (a) iletken içi (b) koyu kırmızı bölge (c) kırmızı bölge (d) turuncu bölge (e) sarı bölge (f) açık yeşil bölge (g) yeşil bölge (h) açık mavi bölge (i) mavi bölge (j) kablo dışı [2]

Şekil 3.8’de geliştirilen basit Matlab kodu ile elde edilen E matrisine ait verilerin renklendirilmesi ve gruplandırılması yöntemi ile oluşturulan şekiller görülebilir. Ekler kısmında verilen Matlab çıktıları, bu yöntem ile elde edilmiştir ve tamamen verilerin renklendirilmesine dayandığı için birbiriyle karşılaştırılması renklere dayalı olarak da yapılabilir.

Konuyu irdelemek için önemli aşamalardan biri, örnek seçimidir. Aşağıda, seçilen örneklerle ilişkin tablolar ve örneklerin genel karakteristikleri yer almaktadır.

1.Tek damarlı kablo, tek katman

Çizelge 3.2. Tek damarlı kablo, tek katmanda örnekleme tablosu [Tamer EMRE arşivinden]

No	Damar İletken Yarıçapı (a) cm	Damar Yarıçapı (b) cm	Yarıiletken Dielektrik Sabiti
1	1	3	3,2
2	2	4	3,2
3	2	5	3,2
4	3	4	3,2
5	3	5	3,2

2.Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper var, $er1 > er2$

Çizelge 3.3. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper var, $er1 > er2$ örnekleme tablosu [2]

No	İç Katman Yarıçapı (a) cm	Dış Katman Yarıçapı (b) cm	Kablo Yarıçapı (c) cm	İç Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti	Dış Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti
6	1	3	5	3,2	2,6
7	2	4	6	3,2	2,6
8	2	5	7	3,2	2,6
9	3	4	6	3,2	2,6
10	3	5	8	3,2	2,6

3. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper var, $\epsilon_2 > \epsilon_1$

Çizelge 3.4. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper var, $\epsilon_2 > \epsilon_1$ örnekleme tablosu [2]

No	İç Katman Yarıçapı (a) cm	Dış Katman Yarıçapı (b) cm	Kablo Yarıçapı (c) cm	İç Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti	Dış Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti
11	1	3	5	2,6	3,2
12	2	4	6	2,6	3,2
13	2	5	7	2,6	3,2
14	3	4	6	2,6	3,2
15	3	5	8	2,6	3,2

4. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper yok, $\epsilon_1 > \epsilon_2$

Çizelge 3.5. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper yok, $\epsilon_1 > \epsilon_2$ örnekleme tablosu [2]

No	İç Katman Yarıçapı (a) cm	Dış Katman Yarıçapı (b) cm	Kablo Yarıçapı (c) cm	İç Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti	Dış Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti
16	1	3	5	3,2	2,6
17	2	4	6	3,2	2,6
18	2	5	7	3,2	2,6
19	3	4	6	3,2	2,6
20	3	5	8	3,2	2,6

5. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper yok, $\epsilon_2 > \epsilon_1$

Çizelge 3.6. Tek damarlı kablo, çok katman, bakır siper yok, $\epsilon_2 > \epsilon_1$ örnekleme tablosu [2]

No	İç Katman Yarıçapı (a) cm	Dış Katman Yarıçapı (b) cm	Kablo Yarıçapı (c) cm	İç Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti	Dış Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti
21	1	3	5	2,6	3,2
22	2	4	6	2,6	3,2
23	2	5	7	2,6	3,2
24	3	4	6	2,6	3,2
25	3	5	8	2,6	3,2

3.1.4. Tek damarlı güç kablolarında elektrik alan haritaları üzerine değerlendirme

MATLAB kodlarıyla sanal olarak yapılan deneylerin sonuçlarını kablo kesitleri halinde EK-1’de yer almaktadır.

Örneklemelelerde ilk grup yani ilk beş örnekleme, (EK-1 Şekil 1.1, EK-1 Şekil 1.2, EK-1 Şekil 1.3, EK-1 Şekil 1.4, EK-1 Şekil 1.5) Tek damarlı kabloda tek katman olması durumunu ele almaktaydı. Seçilen malzeme, XLPE’dir. İletken kesiti büyüdükçe ve kesitten geçen akım miktarı dolayısıyla da yük miktarı arttıkça, iletkenin etrafında daha kuvvetli bir elektrik alan meydana gelmektedir. Bu durumu görmek için XLPE kalınlığı 2 cm olan örnek-2 (EK-1 Şekil 1.2) (0;4) noktasındaki E değeri $1,4133e7$ ile XLPE kalınlığı daha büyük (3 cm) olan örnek-3 (EK-1 Şekil 1.3) (0;5) noktasındaki E değeri olan $1,1295e7$ karşılaştırılabilir. Bu iki örnek arasında XLPE tabakanın 1 cm lik artmasına karşılık yüzeye en yakın bölgedeki E elektrik alan değerindeki azalma oranı %25 olarak gözlenmektedir. XLPE tabakanın kalınlığını aynı iletken kesit için artırdığımızda, dış kılıfa en yakın noktada elektrik alan değeri düşmektedir. Böylelikle günümüz sorunlarından Elektrik Alan etkisiyle dış kılıf bölgesinde “elektiriksel delinme” ile karşılaşma olasılığımız azalıyor. Tabakanın yalıtkanlık katsayısını yüksek tutarsak elektrik alan değeri daha da düşecektir; ancak burada da fiziki ve ticari koşulların bizi desteklemesi gereklidir.

İkinci grup yani tek damarlı ve bakır siperli kabloda birden fazla malzeme kullanılması durumunda dielektrik sabitimiz iç katmanda daha yüksek ise (örnek 6-10) (EK-1 Şekil 1.6, EK-1 Şekil 1.7, EK-1 Şekil 1.8, EK-1 Şekil 1.9, EK-1 Şekil 1.10) iç katmanda elektrik alan değeri, yüksek dielektrik sabiti ile dışa doğru sönümleniyor ve ikinci tabakada tekrar daha düşük oranda sönümlenerek dış kılıfa kadar en az dereceye inmektedir.

Örnek-6 (EK-1 Şekil 1.6), tabakaların ikisinin kalınlığının da iletken kesitinden büyük olduğu durumu göstermektedir. Bu durumda ilk tabakada nispeten sönümlenen alan değeri, ikinci tabakaya geçerken geçirgenlik katsayısı ve ilk tabakanın kalınlığının küçük oluşu nedeniyle tekrar yüksek değer alıp sonra tekrar azalmaktadır. (0;3) noktasındaki elektrik alan değeri $1,9002e7$ değerine düşmüşken tabakalar değişince $2,3075e7$ değerine çıkmaktadır.

Örnek-8 (EK-1 Şekil 1.8)'de ilk tabaka kalınlığı, iletken kesitinden büyük tutulurken ikinci tabaka kalınlığı, ilk tabakadan ince tutulmuştur. Tabakalar arası geçiş noktasındaki (0;5) elektrik alan değeri, $1,1341e7$ 'den $1,3736e7$ 'ye çıkmıştır.

Örnek-9 (EK-1 Şekil 1.9) da tabakalar arası geçiş noktası olan (0;4) noktasındaki E değerleri $1,4205e7$ (iç tabaka) ve 1.7136 (dış tabaka) ve kablo çevresine en yakın nokta olan (0;6) noktasındaki E değeri $1,1616e7$ ile örnek-10 (EK-1 Şekil 1.10) da tabakalar arası geçiş noktası olan (0;5) noktasındaki E değerleri $1,1340e7$ (iç tabaka) ve $1,3846e7$ (dış tabaka) ve kablo çevresine en yakın nokta olan (0;8) noktasındaki E değeri $0,8697e7$ değerlerini karşılaştıralım. Örnek-9 ile örnek-10 değerleri arasındaki azalma miktarları %25, %23 ve %33 olarak hesaplanmaktadır. Sonuçlara göre iç tabakanın kalınlığını artırdıkça, değerlerdeki sönümlenmenin daha etkin olduğu gözlenmektedir.

Örnek-10 (EK-1 Şekil 1.10), örnek-6 ve 7 ile (EK-1 Şekil 1.6 ve EK-1 Şekil 1.7) benzer bir durum içermekte olup, ilk tabakanın kalınlığının iletken yarıçapından küçük, ikinci tabakanın yarıçapının iletken yarıçapına eşit olduğu durumun temsilidir. Etkileri, örnek-6 daki gibi gözlenmek ile birlikte değerleri daha yüksektir.

Üçüncü grup yani tek damarlı ve bakır siperli kabloda birden fazla malzeme kullanılması durumunda, dielektrik sabitimiz dış katmanda daha yüksek ise (örnek 11-15) (EK-1 Şekil 1.11, EK-1 Şekil 1.12, EK-1 Şekil 1.13, EK-1 Şekil

1.14, EK-1 Şekil 1.15), örnek-14 (EK-1 Şekil 1.14) ve örnek-15 (EK-1 Şekil 1.15) değerlerini önce kendi aralarında, daha sonra da örnek-9 (EK-1 Şekil 1.9) ve örnek-10 (EK-1 Şekil 1.10) ile karşılaştıralım. Bu durumda örnek-14 için (0;4) noktasındaki E değerleri $1,7482e7$ (iç tabaka) ve $1.4062e7$ (dış tabaka) ve (0;6) noktasındaki E değeri $0,9438e7$ olurken; örnek-15 için (0;5) noktasındaki E değerleri $1,3958e7$ (iç tabaka) ve $1,1161e7$ (dış tabaka) ve kablo çeperine en yakın nokta olan (0;8) 'deki E değeri $0,7067e7$ olarak belirlenmiştir. Örnek-14 ile örnek-15 değerleri arasındaki azalma miktarı sırasıyla %20,16, %20,63 ve %25,12 olarak gözlenmiştir. Bu durumda iç tabakanın dielektrik sabitinin dış tabakaninkinden küçük olduğu durumda iletken kesiti sabitken artırılan tabaka kalınlığının elektrik alan değerlerindeki düşme oranının daha azaldığı gözlenmektedir. Dikkat edilirse, elde edilen bu sonuçlara göre aynı boyutlarda fakat tabakaların yerlerinin değiştirilmesi ile elde edilen durumda yukarıda belirtilen noktalar için elektrik alan değerlerindeki değişim miktarı sırasıyla %24 artış, %18 azalma, %18,75 azalma, %23 artış, %19,4 azalma, %18.74 olarak gözlenmiştir.

Örnek-11 (EK-1 Şekil 1.11), iki katman kalınlığının da iletken yarıçapından büyük olduğu durumu temsil etmektedir. Dielektrik sabitlerine göre geçirgenliği fazla olan iç tabakaya yerleştiren bu tip bir tasarımda (0;5) koordinatlardaki kablo çeperine en yakın noktada $1,1341e7$ değeri gözlenebilir. Tabakalar arasındaki geçiş noktası (0;3) noktasında elektrik alan değeri $2,3389e7$ 'den $1,8503e7$ değerine düşmektedir. Aynı değerlere sahip olan fakat tabakaların yer değiştiği örnek olan örnek-6 (EK-1 Şekil 1.6)'daki değerlerin (0;5) için $1,3958e7$ ve (0;3) için $1,9003e7$ den $2,2773e7$ değerine arttığını hatırlayalım.

Örnek-12 (EK-1 Şekil 1.12), iki tabaka kalınlığının da iletken yarıçapı ile aynı değerde olduğu durumu temsile etmektedir. Bu durumda dış tabakaya doğru elektrik alan değeri yine azalmaktadır. (0;6) noktasında elektrik alan değeri $0,9438e7$ değerine düşmüştür. İki tabakanın temas noktalarındaki alan

değerleri birbirine daha çok yaklaşmaktadır. (0;4) noktasındaki elektrik alan değerleri $1,7483e7$ den $1,3923e7$ değerine düşmüştür.

Örnek-13, iç tabakanın kalınlığının dış tabakanın kalınlığından fazla olduğu durumu temsil eder. Yine dış tabaka, neredeyse sönümlendirici etkiyle alan değerlerini temas ettiği noktadan itibaren düşürmektedir.

Dördüncü grup yani tek damarlı ve bakır sipersiz kabloda birden fazla malzeme kullanılması durumunda, (örnek-16, örnek-17, örnek-18, örnek-19, örnek-20) (EK-1 Şekil 1.16, EK-1 Şekil 1.17, EK-1 Şekil 1.18, EK-1 Şekil 1.19, EK-1 Şekil 1.20) beklediğimiz gibi elektrik alan değerleri, daha önce bakır siper nedeniyle sıfır olan kablo dışına etkin şekilde taşmaktadır.

Örnek-16 (Ek-1 Şekil 1.16), bakır siperin olmaması durumunda örnek-6 (EK-1 Şekil 1.6)'yı temsil etmektedir. Görüldüğü gibi, izolasyon kalınlığı düştükçe kablo etrafındaki elektrik alan değeri de yüksek olmaktadır.

Aynı şekilde örnek-17,18,19 ve 20 ye de bakarsak, Elektrik Alan değerinin havada sönümlenmek zorunda olduğunu rahatça görebiliriz. Değerlere göre renklendirilmiş Alan Haritalarında fark edilebileceği gibi izolasyon kalınlığı, bu tip kablolarda daha büyük önem taşımaktadır.

Örnek-19 (EK-1 Şekil 1.19) de kablo dışındaki (0;10) noktasında gözlenen elektrik alan değeri, $1,7176e7$ ile örnek-20 (EK-1 Şekil 1.20) de kablo dışındaki (0;10) noktasında gözlenen alan değeri, kablo dışındaki ortamın dielektrik sabitinin aynı olması nedeniyle aynı olarak hesaplanır. (iletken kesit aynı) Elektriksel delinme yada etraf ile elektriki etkileşim olasılığı, bakır siperleme yapılan duruma göre daha fazladır. Sağlıklı bir tasarım olmamasına rağmen elektrik alan değerlendirme açısından faydalı bir uygulama olduğunu düşünülerek eklenmiştir. Kablo kesiti aynı iletken kesiti için büyütülürse, temas noktası aynı oranda iletkenenden uzaklaşacak ve bu noktadaki elektrik alan değeri düşecektir. Ancak kablo kesitindeki artış,

malzemenin teknik ve fiziksel özellikleri yanında maliyeti ile de ilişkilidir. Kesiti büyük olan kabloların üretimi daha zor ve maliyetli daha fazladır.

Beşinci grup yani tek damarlı ve bakır sipersiz kabloda birden fazla malzeme kullanılması durumunu incelerken (örnek-21, örnek-22, örnek-23, örnek-24, örnek-25) (EK-1 Şekil 1.21, EK-1 Şekil 1.17, EK-1 Şekil 1.18, EK-1 Şekil 1.19, EK-1 Şekil 1.20)'te de beklenildiği gibi kablo dışındaki elektrik alan değerleri bir önceki beş örnekte elde edilen değerler ile aynı olarak elde edilmektedir.

3.2. Elektrik Alan Hesabında Sayısal Yöntemler

Genel olarak bir cismin etrafındaki Elektrik Alan hesabı için geliştirilen yöntemlerin en yaygınları:

- 1-Sonlu Farklar Yöntemi
- 2-Sonlu Elemanlar Yöntemi
- 3-Sınır Elemanları Yöntemi
- 4-Yük Simülasyonu Yöntemi
- 5-Monte Carlo Yöntemi;

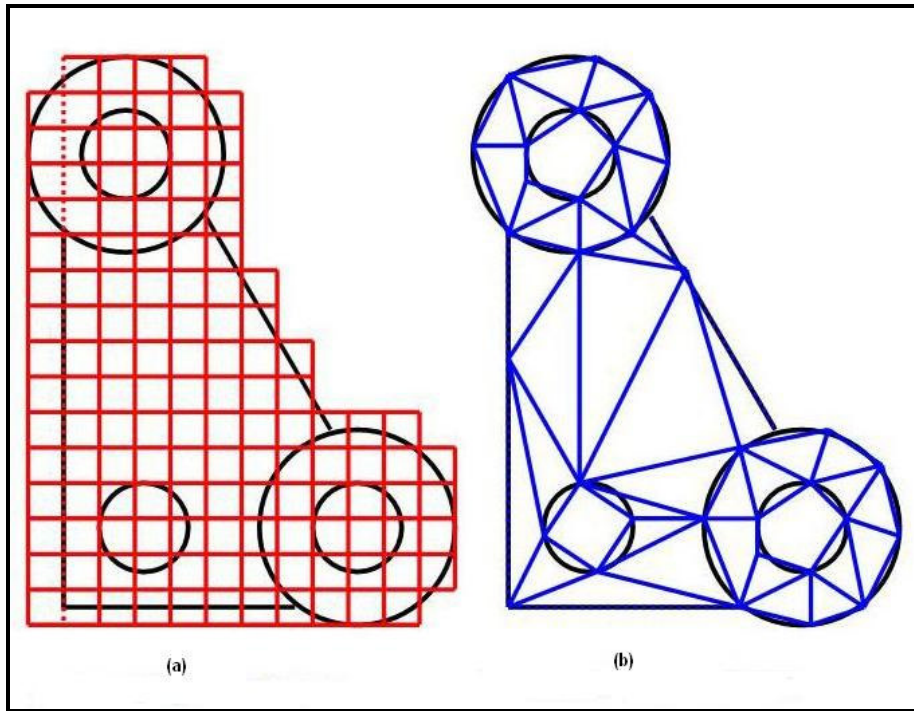
olarak bilinir [6] Bu yöntemler arasında en yaygın kullanılanı ve uygulamada en çok kolaylık sağlayanı, Sonlu Farklar Yöntemi'dir. Bugün özellikle güç kablolarının etrafındaki Elektromanyetik alan hesabında Sonlu Farklar Yöntemi'ni esas alarak geliştirilmiş programlar kullanılmaktadır.

3.2.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Anlaması kolay, bir bilgisayar programına işlemesi rahat ve tek bir simülasyonda geniş frekans aralığının hesabını yapabilen bir teknik olduğu için kullanışlıdır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi, Şekil 3.3'te görüleceği gibi Sonlu Farklar Yöntemi'nden daha doğru çözüm kümesine ulaştırabilir. Sonlu Farklar yaklaşımından farklı olarak bu yöntemde çözüm düzlemi basit şekillere yada düğümlere ayrılır. Parçalı diferansiyel denklemler, her bir düğüm için çözülür. Toplam çözüm, bu çözümlerin birleşimi olduğundan daha sağlıklı bir çözüm meydana gelir.

Parçalı düğümler kullanılırken Sonlu Farklar Yöntemindeki gibi dörtgensel elemanlar yerine herhangi basit şekiller seçilerek yüzeye daha uygun elemanlar kullanılmış olur.



Şekil 3.9. Sonlu Farklar ve Sonlu Elemanlar yöntemi karşılaştırması
(a) Sonlu Farklar Yöntemi (b) Sonlu Elemanlar Yöntemi [7]

Yöntem

Her yöntemde olması gerektiği gibi basamak basamak çözüme ulaşılmaktadır ve ilk basamak, çözüm düzlemini sonlu elemanlara

parçalamaktır. Şekil 3.4'te bir iki ve üç boyutlu malzemeler için seçilen elemanlar gösterilmektedir.

Bir sonraki adım, seçilen her eleman için denklemler geliştirmektir. Bu adım, iki basamakta gerçekleşir. İlk olarak bilinmeyen katsayılarla yaklaşık denklem oluşturulmalıdır. İkinci olarak da bu katsayıların optimum sonuç için değerleri hesaplanmalıdır.

Yaklaşık fonksiyon seçimi

Matematiksel olarak uyarılama kolaylığından dolayı genelde polinomlar kullanışlıdır. Tek boyutlu bir problem için en basit uygulama, düz çizgiye ait birinci derece polinomdur. [7]

$$u(x) = a_0 + a_1x \quad (3.6)$$

Burada $u(x)$ bağımlı değişken, a_0 ve a_1 sabitlerdir. X , bağımsız değişkendir. Bu fonksiyon, x_1 ve x_2 şeklinde iki bitim noktasından geçmek zorundadır. Bu nedenle,

$$u_1 = a_0 + a_1x_1 \quad (3.7)$$

$$u_2 = a_0 + a_1x_2 \quad (3.8)$$

$u_1 = u_1(x)$, $u_2 = u_2(x)$. Cramer yasasıyla çözüm,

$$a_0 = \frac{u_1x_2 - u_2x_1}{x_2 - x_1} \quad a_1 = \frac{u_2 - u_1}{x_2 - x_1} \quad (3.9)$$

Bu sonuçları Eş.3.6'da yerine koyarsak;

$$u = N_1u_1 + N_2u_2 \quad (3.10)$$

$$N_1 = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} \quad (3.11)$$

$$N_2 = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (3.12)$$

Eş.3.10, “yaklaşım” yada “şekil fonksiyonu” olarak adlandırılır. N_1 ve N_2 , enterpolasyon fonksiyonlarıdır. Enterpolasyon fonksiyonlarının toplamı, daima 1 e eşittir.

Buna ek olarak türev ve integral olarak bu ifadelerin anlamlarına bakalım:

Eş.3.10’un türevi;

$$\frac{du}{dx} = \frac{dN_1}{dx} u_1 + \frac{dN_2}{dx} u_2 \quad (3.13)$$

Burada Eş.3.11 ve Eş.3.12’yi uygularsak;

$$\frac{dN_1}{dx} = -\frac{1}{x_2 - x_1} \quad (3.14)$$

$$\frac{dN_2}{dx} = \frac{1}{x_2 - x_1} \quad (3.15)$$

ve böylelikle u nun türevi de;

$$\frac{du}{dx} = \frac{1}{x_2 - x_1} (-u_1 + u_2) \quad (3.16)$$

bir başka deyişle, bu noktadaki türev, düğümleri birleştiren doğrunun eğimi olan farklara bölüm anlamına gelir. İntegral ise,

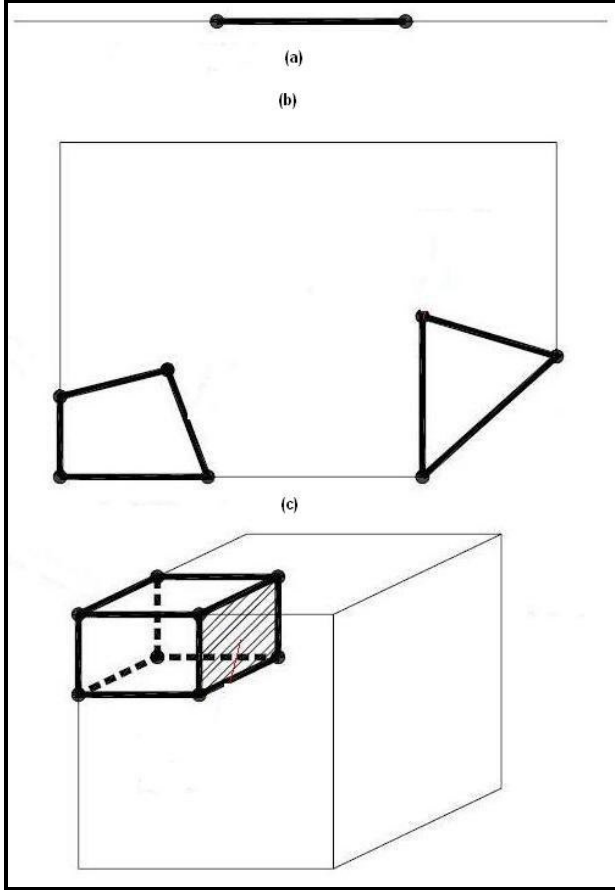
$$\int_{x_1}^{x_2} u dx = \int_{x_1}^{x_2} (N_1 u_1 + N_2 u_2) dx \quad (3.17)$$

İntegralin sağ tarafı, yüksekliği u ve tabanı $(x_2 - x_1)$ olan üçgenin alanıdır.

$$\int_{x_1}^{x_2} N u dx = \frac{1}{2} (x_2 - x_1) u \quad (3.18)$$

ve böylelikle toplam integral;

$$\int_{x_1}^{x_2} u dx = \frac{(u_1 + u_2)}{2} (x_2 - x_1) \quad (3.19)$$



Şekil 3.10. Çeşitli boyutlar için eleman seçimi, (a) Tek boyutlu çizgisel cisim, (b) İki boyutlu üçgen ve dörten elemanlar (c) Üç boyutta sekizgen eleman [7]

Çözümüne en yakın fonksiyon hesabı

Enterpolasyon fonksiyonu bir defa seçildi mi, elemanların davranışını etkileyen denklem, geliştirilmelidir. Matematiksel olarak sonuç elemanlarının denklemi, doğrusal denklemler kümesidir ve matris formunda gösterilebilir.

$$[k]\{u'\} = \{F\} \quad (3.20)$$

burada $[k]$ bir eleman özelliği yada sertlik matrisi, $\{u\}$ düğümlerdeki bilinmeyenlerin sütun matrisi, $\{F\}$ ise düğümlerdeki dış etkilerin vektörel ifadesi olan sütun matrisidir. Bazı durumlarda eşitlikler, doğrusal olmayan ifadeler olabilir [8]

3.3.Problem Çözümü ve Yaklaşım

Problemin çözümü için birkaç aşamaya gereksinimimiz var:

- 1-Problemin Modellenmesi
- 2-Örnekleme Aralıklarının ve Hücrelerin oluşturulması
- 3-Sınır Koşulların belirlenmesi
- 4-Matematiksel çözümleme

3.3.1.Problemin modellenmesi

Problemin çözümü için öncelikle kabloyu kesit olarak modellememiz gerekmektedir. Bu aşamada uzun bir güç kablosunda uzunluktan bağımsız olan elektrik alanı inceleyeceğimiz için problemi bu aşamada üç boyut yerine iki boyutta incelemek daha kolay bir çözüm yöntemi olacaktır. Şekli ele aldığımızda en uygun koordinat sisteminin silindirik koordinat sistemi olduğu açıktır.

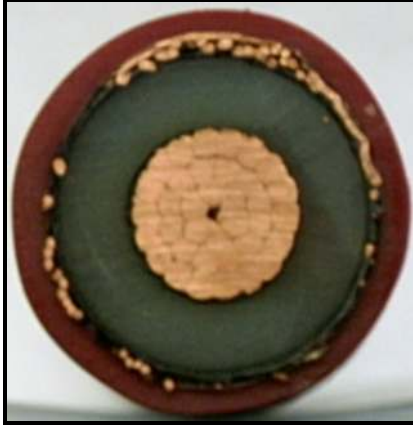
Şekil 3.6, tek damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli bir güç kablosunu modellemektedir. Burada gerçek örnek dikkate alınarak en içteki mavi bölgenin iletken bölge olduğunu ve $V=1$ p.u. bölgesi olduğunu, ortadaki yeşil bölgenin yarı iletken malzemeden yarı iletken tabaka varsayıldığını ve en dıştaki turuncu bölgenin de yalıtkan $V=0$ p.u. bölgesi olduğunu varsayalım. Daha açık bir ifade ile probleme ilişkin modelimizi belirledikten sonra, sınır koşullarımızı seçelim:

r_0 = iletken kesit yarı çapı, $V = 1\text{ p.u}$

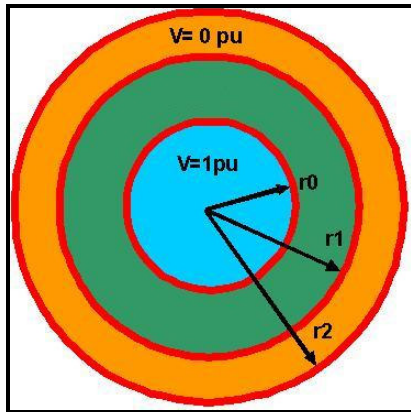
$r_0 < r < r_1$, yarı iletken yüzey

r_1 = yalıtkan yüzeyin başladığı yarı çap, $V = 0\text{ p.u}$

r_2 = kablounun dış sınırı



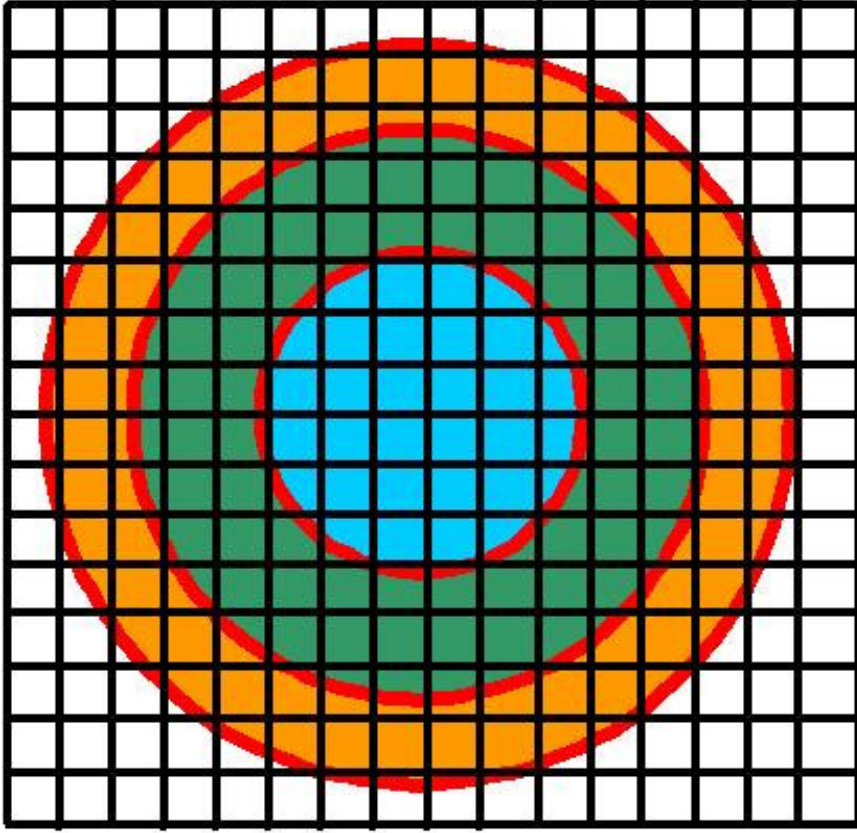
Resim 3.1. Tek damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu kesiti [2]



Şekil 3.11. Tek damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu modeli [2]

3.3.2. Örnekleme aralıklarının ve hücrelerin oluşturulması

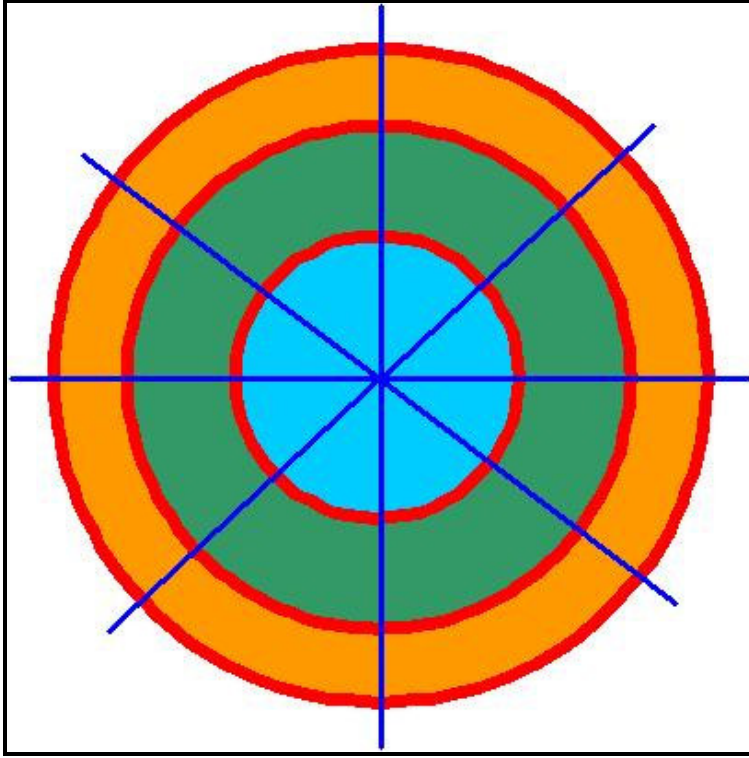
Örnekleme sayısı, seçilen aralıkta sonsuz sayıda artırılabilir. Önemli olan konu, sınır koşullarının problemin çözümünde birebir ele alınmasıdır. Şekil 3.7’de örneklemede kartezyen koordinat sistemi kullanarak dikdörtgensel elemanlar ile hücrelerin oluşumu görülmektedir.



Şekil 3.12. Örneklemenin dikdörtgensel elemanlar ile yapılması durumu [2]

Probleme ve geometriye dikkat edilirse, aynı r yarıçapı üzerinde eş potansiyel çizgileri oluşacağı açıktır. Yine de çözümümüzde bunu ihmal ederek aşağıdaki şekilde belirli sayıda örnekleme yapıldığını varsayalım. Mor çizgiler, daha önce tanıtılan geometri üzerindeki silindirik koordinatlara ilişkin r örnekleridir.

Şekil 3.13’de örneklemede silindirik koordinat sistemi kullanarak dairesel elemanlar ile hücrelerin oluşumu görülmektedir. Örneklemeye devam ederken Θ açısını değiştirdiğimizde hesap yapabilmemiz için yine bizim seçtiğimiz sayıda bir Θ örnekleme yapılması gerekir.

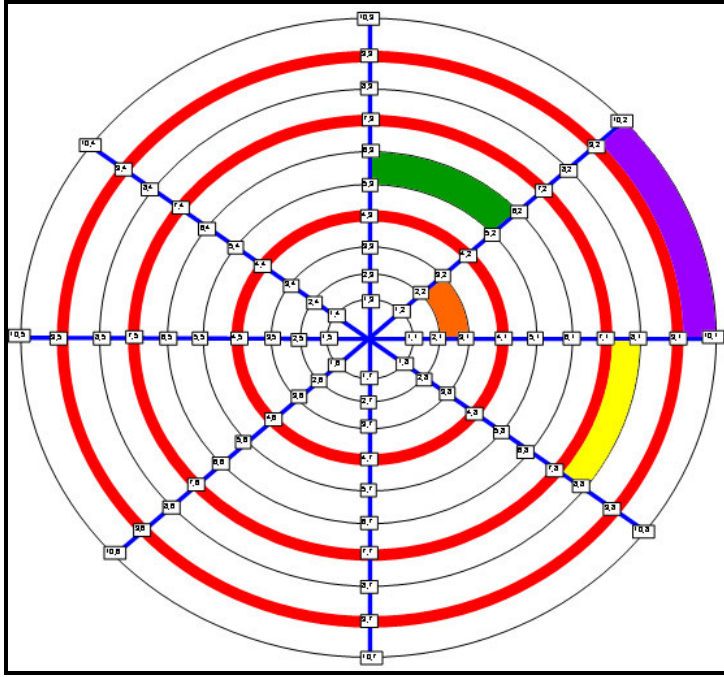


Şekil 3.13. Örneklemenin dairesel elemanlar ile yapılması durumu [2]

Seçilen $r = 0$ ile $r = R$ aralığında n sayıda çember ve seçilen $\Theta = 0$ derece ile $\Theta = 360$ derece aralığında m sayıda kesit; Şekil 3.14'te görülebileceği gibi $n \times m$ sayıda numaralandırılabilir nokta meydana getirmektedir.

Nümerik çözüm yöntemi açısından numaralandırabildiğimiz ve işaretleyebildiğimiz noktalar, aralarında hücreler meydana getirecektir. Bir sonraki şekilde örneklenen bölgelerde oluşan hücreler görülmektedir.

Noktalarda numaralandırma, (r, Θ) esasına göre yapılmaktadır ve ilk r örneklemeindeki Θ lar için koordinatlar $(1, \Theta), (2, \Theta), \dots, (n, \Theta)$ olarak isimlendirilmektedir. Buna göre Θ örneklemeindeki koordinatlar da $(0, r), (45, r), \dots, (360, r)$ olarak isimlendirilmektedir. Burada $\Theta = 360 / m$ olarak seçilmiştir. (m , açısal olarak örnekleme sayısı)



Şekil 3.14. Hücreler [2]

3.3.3. Sınır koşulların belirlenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi, herhangi bir fiziksel probleme uygulandığında, incelenen bölge sonlu sayıda elemana bölünür ve her bir elemanın köşe noktalarındaki (düğüm noktalarındaki) değerleri hesaplanır.

Sınır koşulları olarak fiziksel elektrik değerler yanında matematiksel sınır koşullarını çözüm öncesi tayin etmemiz gerekir. Bu problemin çözümünde kullanılacak sınır koşulları, Elektriksel Potansiyel Problemlerinin çözümünde kullanılan iki sınır denklemi olan Laplace ve Poisson denklemleridir [9]

Laplace Denklemi

Kaynakların bulunmadığı bir ortamda geçerlidir. Yüzey için kullanılabilir.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3.21)$$

Laplace Denklemine Göre yüzeydeki depolanan elektrik enerjisi;

$$J = \frac{1}{2} \varepsilon \iiint_V \nabla^2 V dV \quad (3.22)$$

Passion Denklemi

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} = -f \quad (3.23)$$

Elektriksel geçirgenliğin değiştiği durumlardaki matematiksel ifadedir. Enerji denklemi;

$$J = \frac{1}{2} \iiint_V (\nabla^2 V - 2fV) dV \quad (3.24)$$

Fiziksel sınırlar:

r_0 = iletken kesit yarı çapı, $V = 1$ p.u

$r_0 < r < r_1$, yarı iletken yüzey

r_1 = yalıtkan yüzeyin başladığı yarı çap, $V = 0$ p.u

r_2 = kablonun dış sınırı [9]

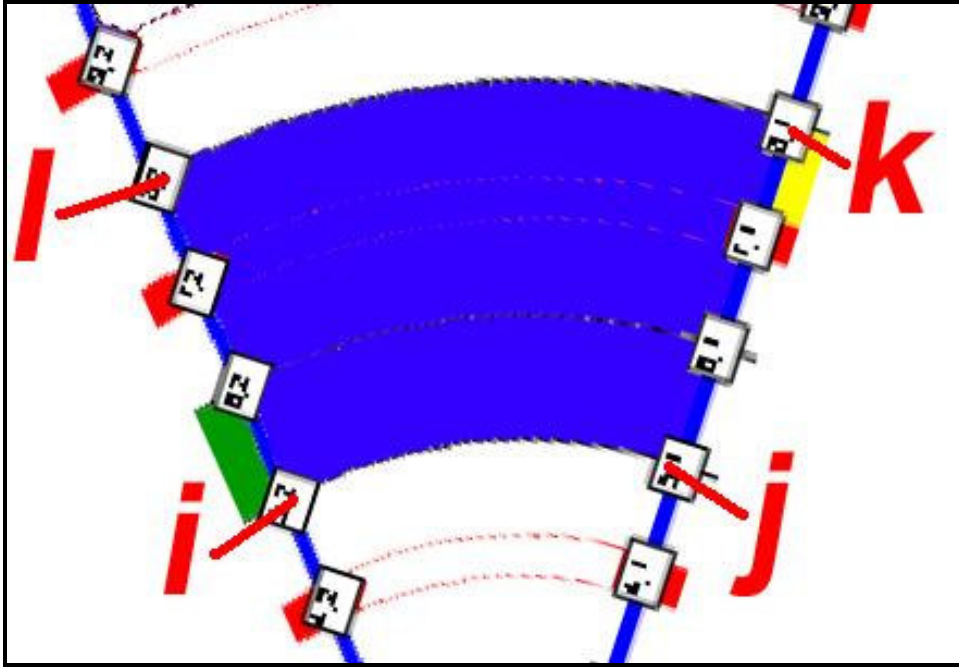
3.3.4. Matematiksel çözümleme

Öncelikle problemin çözümünde en uygun geometri olarak silindirik koordinat düzlemini kullanmaktayız.

Enterpolasyon Fonksiyonunun Seçimi

Kullandığımız geometri gereği fonksiyonumuz;

$$\phi(r, \theta) = a + br + cr\theta \quad (3.25)$$



Şekil 3.15. Örnekleme [2]

Sonlu Eleman Denklemlerinin Türetilmesi

Dönel silindirik potansiyel problemlerinde Laplace eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\nabla^2 \Phi(r, \theta, z) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) \quad (3.26)$$

Enerji eşitliğini düzenlediğimizde;

$$J = \frac{1}{2} \varepsilon \iiint_V \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) \right]^2 dV \quad (3.27)$$

Bu enerji, tüm V hacmi içinde depolanan enerjidir. Problemin çözümünde kesiti kullandık ve z bileşenini sıfıra götürelim:

$$\nabla^2 \Phi(r, \theta) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) \quad (3.28)$$

$$J = \frac{1}{2} \epsilon \iiint_V \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) \right]^2 dV \quad (3.29)$$

Elektrik Alan ve Elektrik Potansiyel ilişkisini yazalım:

$$W_e = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon (E)^2 dV, \quad E = -\nabla \phi \quad (3.30)$$

E = Elektrik Alan

Φ = Elektrik Potansiyel

$$W_e = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon (-\nabla \phi)^2 dV \quad (3.31)$$

$$W_e = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon (\nabla^2 \phi) dV \quad (3.32)$$

$$W_e = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) \right) dV \quad (3.33)$$

ϵ = dielektrik katsayısı

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

Enerjinin S yüzeyi boyunca tanımlı $\Phi = \Phi_0(r, \Theta)$ sınır koşullarını sağlayacak biçimde minimize eden potansiyel, Laplace denkleminin de çözümüdür. (ikinci türev sıfıra eşit) İncelediğimiz bölgede Laplace Denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (3.34)$$

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^3} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (3.35)$$

Böylelikle problemin çözümü bir maksimum-minimum problemi çözümüne dönüşür. Bu problemin çözümünü adım adım inceleyelim:

1.Adım

Potansiyelin tanımlı olduğu V hacmi, her biri p adet düğüm içeren M adet elemana ayrıştırılır.

2.Adım

Her bir e elemanı içindeki potansiyel alanın değişimi için bir enterpolasyon fonksiyonu tanımlanır.

$$\phi^e(r, \theta) = [N(r, \theta)] \vec{\phi}^e \quad (3.36)$$

Bu N fonksiyonları Şekil Fonksiyonlarımız olsun.

$$[N(r, \Theta)] = [N_1(r, \Theta) N_2(r, \Theta) N_3(r, \Theta) \dots N_p(r, \Theta)] \quad (3.37)$$

$[N(r, \Theta)]$ satır matrisi, e elemanının 1,2,3...p. düğüm noktaları için yazılmış şekil fonksiyonlarından oluşur.

$$\vec{\phi}^e = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \phi_p \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$\vec{\phi}^e$ sütun vektörü ise e elemanının 1,2,3...p. Düğüm noktalarındaki potansiyel değerlerinden oluşur.

$N_i(r, \Theta)$: e elemanının i. düğüm noktasındaki enterpolasyon fonksiyonu.

$\Phi_i(r, \Theta)$: e elemanının i. düğüm noktasındaki potansiyel değeri.

3.Adım

Laplace fonksiyonu olarak sıfıra eşitlediğimiz enerji denklemini, J^e elemanlarının toplamı olacak şekilde ifade edebiliriz:

$$J = \sum_{e=1}^M J^e \quad (3.39)$$

Böylelikle J^e ;

$$J^e = \frac{1}{2} \varepsilon \iiint_{V^e} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Phi^e}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi^e}{\partial \theta^2} \right) \right]^2 dV \quad (3.40)$$

Daha önce de ifade ettiğimiz gibi şimdi bu fonksiyonu minimize etmek için birinci türevini sıfıra eşitleyelim:

$$\frac{\partial J}{\partial \phi} = 0 \quad (3.41)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \phi_i} = \sum_{e=1}^M \frac{\partial J^e}{\partial \phi_i} = 0, \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3.42)$$

Burada n; potansiyel değeri bilinmeyen toplam düğüm sayısıdır.

$$\frac{\partial J}{\partial \phi_i} = \iiint_{V^e} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial \phi_i} \frac{\partial \Phi^e}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi_i} \frac{\partial^2 \Phi^e}{\partial \theta^2} \right) \right]^2 dV \quad (3.43)$$

$\phi^e(r, \theta) = [N(r, \theta)] \vec{\phi}^e$ olduğuna göre;

$$\frac{\partial \phi^e}{\partial r} = \left[\frac{\partial N_1}{\partial r} \frac{\partial N_2}{\partial r} \frac{\partial N_3}{\partial r} \dots \frac{\partial N_p}{\partial r} \right] \vec{\phi}^e \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial}{\partial \phi_i} \left(\frac{\partial \phi^e}{\partial r} \right) = \frac{\partial N_i}{\partial r} \quad (3.45)$$

$$\frac{\partial J^e}{\partial \phi^e} = [K^e] \vec{\phi}^e \quad (3.46)$$

4.Adım

$$\frac{\partial J}{\partial \phi} = \sum_{e=1}^M \frac{\partial J^e}{\partial \phi^e} = \sum_{e=1}^M [K^e] \vec{\phi}^e = \vec{0} \quad (3.47)$$

Eleman birleştirme yöntemi kullanılarak tüm elemanlar için bulunan $[K^e]$ matrisleri birleştirilir ve genel $[K]$ matrisi elde edilir. Yukarıdaki denklem böylelikle;

$$[K] \vec{\phi} = 0 \quad (3.48)$$

5.Adım

E.3.47’de sınır koşullarının ilave edilmesi ile $[K^e]$ matrisi aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$[K^e] = \iiint_{V^e} [B]^T [D] [B] dV \quad (3.49)$$

Burada $[B]$ ve $[D]$ matrisleri şu şekildedir:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial r} & \frac{\partial N_2}{\partial r} & \cdot & \cdot & \frac{\partial N_p}{\partial r} \\ \frac{\partial N_1}{\partial \theta} & \frac{\partial N_2}{\partial \theta} & \cdot & \cdot & \frac{\partial N_p}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Probleme Uyarlama

$$\phi^e = N_i \phi_i + N_j \phi_j + N_k \phi_k + N_l \phi_l \quad (3.52)$$

$$N_i=L_1, N_j=L_2, N_k=L_3, N_l=L_4 \quad (3.53)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k & N_l \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

$$[\phi^e] = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \\ \phi_k \\ \phi_l \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$r = L_1 r_i + L_2 r_j + L_3 r_k + L_4 r_l$$

$$L_1 + L_2 + L_3 + L_4 = 1$$

Kablonun geometrisi gereği iletken etrafındaki bölgede eş potansiyel çizgileri, bizim örnekleme hücrelerimiz olan dairelere uygun olarak hareket edecektir. Bu durumda her Φ_i elemanı Φ_j elemanına ve her Φ_k elemanı Φ_l elemanına eşit olacaktır. Bu durumda Θ ile açısal değişim, problemin çözümüne doğrudan bir etki getirmeyecektir. Yeni problemimizi sanki tek boyutta, yani yalnızca r düzleminde hareket eden bir tek boyutlu sonlu elemanlar yöntemi çözümü olarak ele alabiliriz.

$$r_i = r_j ; r_k = r_l$$

Sınır değerlerin tanımlanması

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0 \quad (3.56)$$

$\phi_A = 1$; A noktası, iletkenin yarıçapıdır.

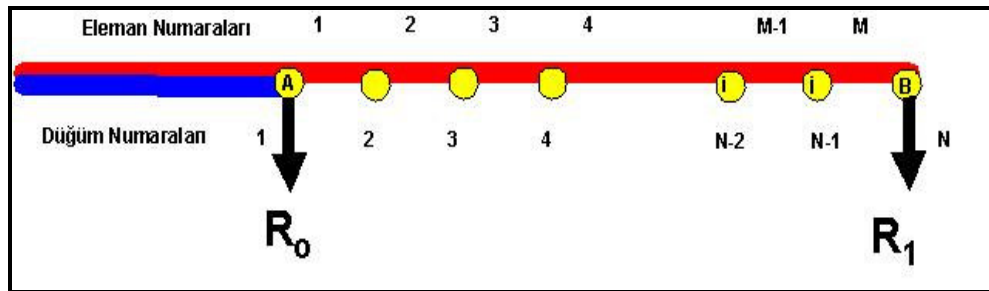
$\phi_B = 0$; B noktası, bakır siperin yarıçapıdır ki, burada potansiyel değerin 0 olduğunu kabul ediyoruz.

Burada yüzeydeki enerji değerini minimum yapmamız için enerji eşitliğinin türevini sıfıra eşitlememiz gerekiyor.

$$J = \frac{1}{2} \int kr \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} \right) dr \quad (3.57)$$

1.Adım

R_0 ile R_1 arasındaki bölgenin alt elemanlara ayrılması ve ayrılan elemanların tanımlanması gerekir.



Şekil 3.16. Numaralandırma [2]

2.Adım

Elemanlar içinde potansiyel, doğrusal olarak değişmektedir. Elemanlar için düğüm noktaları seçilir ve eleman içindeki herhangi bir noktada geçerli olan polinom yaklaşımı yazılır.

$$\phi^e(r) = \alpha_1 + \alpha_2 r \quad (3.58)$$

Düğüm noktalarındaki potansiyeller;

$$i \text{ noktasında } \phi^e(r_i) = \phi_i = \alpha_1 + \alpha_2 r_i \quad (3.59)$$

$$j \text{ noktasında } \phi^e(r_j) = \phi_j = \alpha_1 + \alpha_2 r_j \quad (3.60)$$

Burada $r_j - r_i = l^e$, eleman uzunluğu dersek;

$$\alpha_1 = \frac{1}{l^e} (r_j \phi_i - r_i \phi_j) \quad (3.61)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{l^e} (\phi_j - \phi_i) \quad (3.62)$$

Bu durumda eşitliğin son hali:

$$\phi^e(r) = \frac{1}{l^e} [(r_j - r)\phi_i + (r - r_i)\phi_j] \quad (3.63)$$

Eğer $\phi^e(r) = [N(r)]\vec{\phi}^e$ olduğunu hatırlarsak;

$$[N(r)] = [N_i(r) \quad N_j(r)] \quad (3.64)$$

$$[N(r)] = \left[\frac{1}{l^e} (r_j - r) \quad \frac{1}{l^e} (r - r_i) \right] \quad (3.65)$$

$$\vec{\phi}^e = \begin{bmatrix} \phi_i \\ \phi_j \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

$N_i(r)$ = e elemanının i. düğüm noktası için yazılmış enterpolasyon fonksiyonudur.

3.Adım

Çözüm için elemana ait eşitlik takımı oluşturularak eleman matrisleri oluşturulur.

$$[B] = \left[\frac{\partial N_i}{\partial r} \quad \frac{\partial N_j}{\partial r} \right] = \frac{1}{l^e} [-1 \quad 1]$$

$$[D] = [k] \quad k = \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

Böylelikle $[K^e]$ matrisi:

$$[K^e] = \int_{l^e} [B]^T [D] [B] dl \quad (3.67)$$

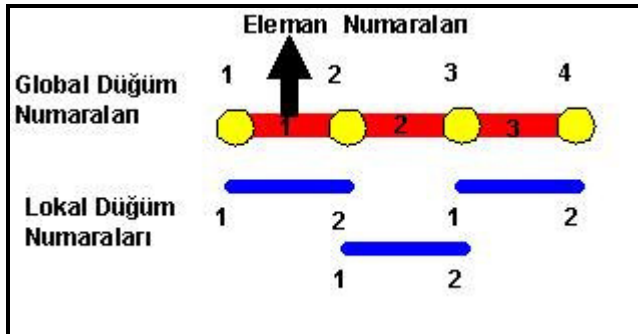
$$[K^e] = \frac{1}{(l^e)^2} \int_{l^e} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} [\epsilon_0 \epsilon_r] \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} dl \quad (3.68)$$

$$[K^e] = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{l^e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

4.Adım

Genelleştirilmiş $[K]$ matrisini elde etmek için $[K^e]$ matrisleri birleştirilir.

$$[K] = \sum_{e=1}^M [K^e] = [K^1] + [K^2] + [K^3] + \dots + [K^M] \quad (3.70)$$



Şekil 3.17. Lokal ve global numaralandırma [2]

Çizelge 3.7. Numaralandırma eşleşmesi [2]

El.No	Lok.D.No	Glob.D.No
1	1	1
	2	2
2	1	2
	2	3
3	1	3
	2	4

Böylelikle, boyutları sistemdeki düğüm sayısına eşit matrisler elde ederiz.

$$[K] = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{l^e} \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

5.Adım

Sınır koşullarımızı ekleyerek, denklemlerimizi ve formüllerimizi sonuca götürebiliriz.

Modelimizi göz önüne alırsak,

$$\phi^e(r_0) = 1$$

$$\phi^e(r_1) = 0$$

Örnek Problem

$$r_A = 0,4 \text{ cm}, V_A = 1 \text{ pu}$$

$$r_B = 0,832 \text{ cm}, V_B = 0 \text{ pu}$$

örnekleme sayısı = 3 olarak verilsin. Buradan;

$$\phi^e(r) = \alpha_1 + \alpha_2 r$$

$$l^e = r_3 - r_1 = 0,432 \text{ cm}$$

$$r_3 = 0,832 \text{ cm}$$

$$\phi^e(0,4) = \alpha_1 + \alpha_2 0,4 = 1$$

$$\phi^e(0,832) = \alpha_1 + \alpha_2 0,832 = 0$$

$$\alpha_2 = -\frac{1}{0,432} = -2,348$$

$$\alpha_1 = 1,96$$

$$\phi^e(r) = \frac{1}{0,432} [(0,832 - r)\phi_{0,4} + (-0,4 + r)\phi_{0,832}]$$

$$\phi^e(r) = 2,348[(0,832 - r)]$$

$$[N(r)] = 2,348[(0,832 - r) \quad (-0,4 + r)]$$

$$\vec{\phi}^e = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & \frac{\partial N_j}{\partial r} \end{bmatrix} = 2,348 \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[D] = [k] \quad k = \varepsilon = \varepsilon_0 3,2$$

Böylelikle $[K^e]$ matrisi:

$$[K^e] = \int_{l^e} [B]^T [D] [B] dl$$

$$[K^e] = (0,432)^2 \int_{0,432} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} [3,2\varepsilon_0] \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} dl$$

$$[K^e] = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{l^e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \frac{4\pi 10^9 3,2}{0,432} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

Burada kablonun tek tabakalı XLPE'den meydana geldiğini kabul edersek;

$\phi^e(r) = \alpha_1 + \alpha_2 r$ gereği, 0,5 noktasında değer:

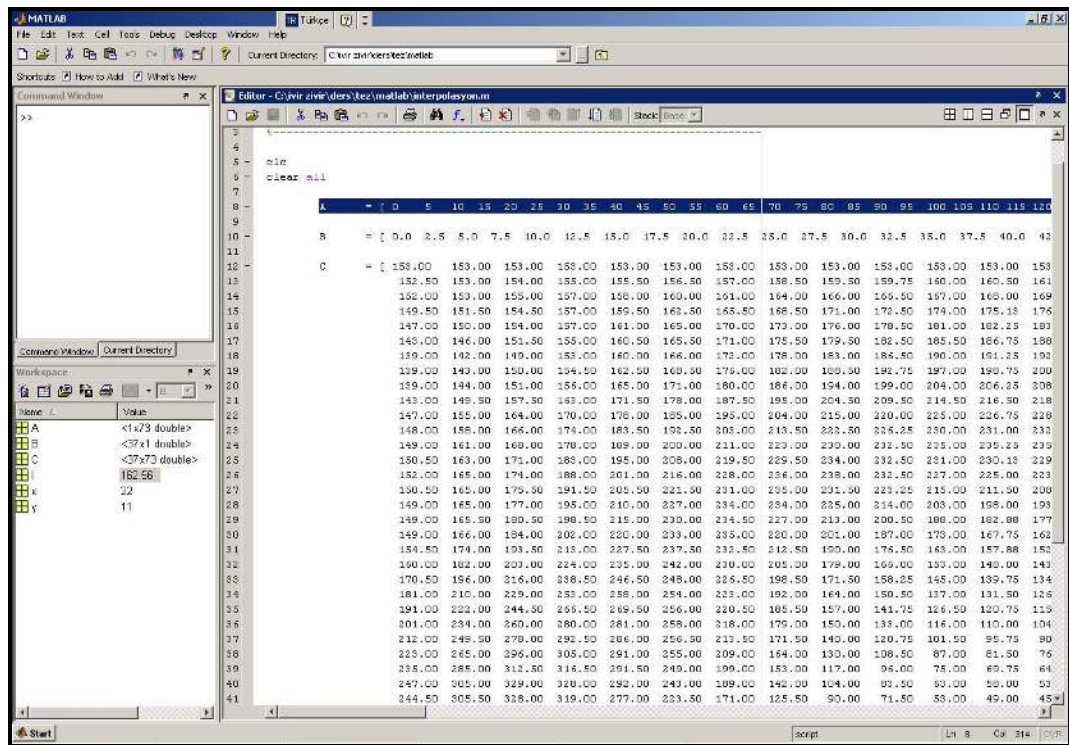
$$\phi^e(0,5) = 0,77 pu$$

Eğer fiziksel yöntem kullansaydık;

$$E = \frac{\rho_l}{2\pi\varepsilon_0 r} = \frac{2\pi\varepsilon_0 \times 2,6 \times 10^6 \times 0,7 \times 10^7}{2\pi\varepsilon_0 \times 3,2 \times 0,5} = 0,77 pu$$

Matlab interpolasyonu

Matlab ile interpolasyon yaparken öncelikle belirli 4 noktaya dair değerleri elde edilmelidir. Tasarlanan ve EK-3 te sunulan kodlar ile örnekleme aralığı değiştirilerek bu işlem yapılabilir. Daha sonra seçilen herhangi dört noktanın arasındaki herhangi bir noktaya ilişkin sonuç değeri istenir. Şekil 3.13, seçilen (x;y) noktasında programın çalışma ekranını göstermektedir.



Şekil 3.18. Matlab interpolasyonu [2]

Yukarıdaki şekle ilişkin Matlab kodu:

% İnterpolasyon örneği %

clc

clear all

A = []

B = []

C = []

x= ? ; % A vektöründe hesaplanmak istenen nokta.

y= ? ; % B vektöründe hesaplanmak istenen nokta.

I=interp2(A,B,C,x,y); % A vektörü, tablonun sütun başlıkları,

B, satır başlıkları,

C, tablonun içeriği,

x ve y aranan nokta koordinatları

(enterpolasyon sonucu bu sorunun cevabını verir. x değeri A vektörü içerisinde bir ara değer, y ise B vektörü içerisinde bir ara değerdir.)

% I değeri interpolasyon sonucunu verir. interp2 (lineer), interp3 (kuadratik)interpolasyondur.

%-----%

4. ÜÇ DAMARLI KABLODA ELEKTRİK ALAN HESABI

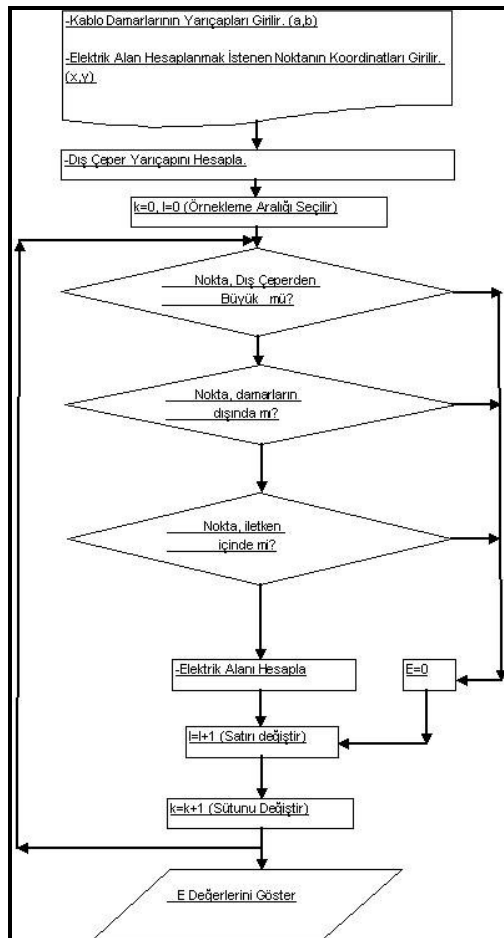
4.1. Elektrik Alan Hesabında Fiziksel Yöntem

4.1.1. Üç damarlı kablolarda programla yardımıyla çözüm

Üç damarlı kablolarda da tek damarlılarda olduğu gibi MATLAB kodu üreterek herhangi bir noktadaki Elektrik Alan Şiddeti değerini kolayca bulabiliriz. Öncelikle programlama için akış diyagramımızı çıkaralım ve seçeceğimiz örneklere göre örnekleme tabloları oluşturalım:

4.1.2. Bakır siperli kablolarda akış diyagramı

Çizelge 4.1. Üç damarlı kablolarda akış diyagramı [2]



4.1.3. Matlab kodları ve elektrik alan haritaları

MATLAB kodumuz aşağıdaki gibi olacak:

```
%% Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı
clc
clear all
q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ; %yarıiletken sabiti
epsilon_r2=2.6 ; %yarıiletken sabiti
a=2 ; % İletken yarıçapı
b=4 ; % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
c=(b+(2*b/sqrt(3))); % Kablonun dış yarıçapı
for x=-10: 0.05: 10 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -10: 0.05: 10 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(c^2) ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta,kablo dışındadır.
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 &
(x^2)+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x^2)+(y^2)<(c-0.2)^2;
Elektrik_alan=0;
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
```

```

elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt(x^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
else
end
if x^2+y^2>(c-0.2)^2 & x^2+y^2< c^2;
Elektrik_alan= 1.8e+007 ;
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif x^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < a^2
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

Bakır siperin olmadığını kabul edersek, MATLAB kodumuz ve haritalarımız:

```

%% Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı
clc
clear all
q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ; %yarıiletken sabiti
epsilon_r2=2.8 ; %yarıiletken sabiti

```

```

a=4 ; % İletken yarıçapı
b=10 ; % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
c=(b+(2*b/sqrt(3))); % Kablonun dış yarıçapı
for x=-24: 0.05:24 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -24: 0.05: 24 ;
l=l+1 ;
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x)^2+(y-
(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2 ;
yaricap1=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan1= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap1));
yaricap2=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan2= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap2));
yaricap3=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan3= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap3));
Elektrik_alan= Elektrik_alan1+Elektrik_alan2+Elektrik_alan3 ;
end
if (x)^2+(y)^2 < c^2;
elseif (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 |
(x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap1=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan1= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap1));
yaricap2=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan2= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap2));
yaricap3=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan3= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap3));
Elektrik_alan= Elektrik_alan1+Elektrik_alan2+Elektrik_alan3 ;
else
end
end

```

```

if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < a^2
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

Bu kodu yazarken q , birim kesitteki yük yoğunluğunu 1 kabul edilmiştir. a ve b değerleriyle birlikte diğer değerleri de bu kod üzerinde değiştirebilmekteyiz. Örneklem aralığı 0,01cm seçilmiştir ancak bu değer de değişebilir. Örneklem yaparken birkaç durumu göz önüne alarak karşılaştıralım:

Üç damarlı kablo, bakır izoleli durum

Çizelge 4.2. Üç damarlı kablo, bakır izoleli durum örnekleme tablosu [Tamer EMRE arşivinden]

No	Damar İletken Yarıçapı (a) cm	Damar Yarıçapı (b) cm	Kablo Yarıçapı (c) cm	Yarıiletken Dielektrik Sabiti
1	1	2	4,3094	3,2
2	1	2,5	5,3868	3,2
3	1	3	6,4641	3,2
4	2	3	6,4641	3,2
5	2	3,5	7,5415	3,2
6	2	4	8,6188	3,2
7	2	4,5	9,6962	3,2
8	2	5	10,7735	3,2
9	3	4	8,6188	3,2
10	3	5	10,7735	3,2
11	3	5,5	11,8509	3,2
12	3	6	12,9282	3,2
13	3	6,5	14,0056	3,2
14	4	6	12,9282	3,2
15	4	6,5	14,0056	3,2
16	4	7	15,0829	3,2
17	4	7,5	16,1603	3,2
18	4	8	17,2376	3,2
19	4	8,5	18,315	3,2
20	4	9	19,3923	3,2

Üç damarlı kablo, bakır siper yok, $\epsilon_1 > \epsilon_2$

Çizelge 4.3. Üç damarlı kablo, bakır siper yok, $\epsilon_1 > \epsilon_2$ örnekleme tablosu [2]

No	Damar İletken Yarıçapı (a) cm	Damar Yarıçapı (b) cm	Kablo Yarıçapı (c) cm	İç Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti	Dış Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti
21	1	2	4,3094	3,2	2,6
22	1	2,5	5,3868	3,2	2,6
23	2	4	8,6188	3,2	2,6
24	2	5	10,7735	3,2	2,6
25	3	6	12,9282	3,2	2,6
26	3	6,5	14,0056	3,2	2,6

Çizelge 4.3. (Devam) Üç damarlı kablo, bakır siper yok, $er_1 > er_2$ örnekleme tablosu [2]

27	4	8	17,2376	3,2	2,6
28	4	8,5	18,315	3,2	2,6
29	4	9	19,3923	3,2	2,6
30	4	10	21,547	3,2	2,6

Üç damarlı kablo, Bakır Siper yok, $er_2 > er_1$

Çizelge 4.4. Üç damarlı kablo, bakır siper yok, $er_2 > er_1$ örnekleme tablosu [2]

No	Damar İletken Yarıçapı (a) cm	Damar Yarıçapı (b) cm	Kablo Yarıçapı (c) cm	İç Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti	Dış Katman Yarıiletken Dielektrik Sabiti
31	1	2	4,3094	2,6	3,2
32	1	2,5	5,3868	2,6	3,2
33	2	4	8,6188	2,6	3,2
34	2	5	10,7735	2,6	3,2
35	3	6	12,9282	2,6	3,2
36	3	6,5	14,0056	2,6	3,2
37	4	8	17,2376	2,6	3,2
38	4	8,5	18,315	2,6	3,2
39	4	9	19,3923	2,6	3,2
40	4	10	21,547	2,6	3,2

4.1.4. Elektrik alan haritaları üzerine değerlendirme

MATLAB kodlarıyla elde edilen simülasyonlar sonucu elektrik alan değerleri kablo kesiti görüntüleri olarak elde edilmiştir.

Örneklemelemlerde ilk grup yani ilk yirmi örnekleme (örnek 1-20) (EK-2 Şekil 2.1, EK-2 Şekil 2.2, EK-2 Şekil 2.3, EK-2 Şekil 2.4, EK-2 Şekil 2.5, EK-2 Şekil 2.6, EK-2 Şekil 2.7, EK-2 Şekil 2.8, EK-2 Şekil 2.9, EK-2 Şekil 2.10, EK-2 Şekil 2.11, EK-2 Şekil 2.12, EK-2 Şekil 2.13, EK-2 Şekil 2.14, EK-2 Şekil 2.15, EK-2 Şekil 2.16, EK-2 Şekil 2.17, EK-2 Şekil 2.18, EK-2 Şekil 2.19, EK-2 Şekil 2.20) üç damarlı kabloda bakır siper olması halinde kesitteki elektrik alan

değerlerini göstermektedir. Bu örneklerde tıpkı tek damarlı ve bakır siperli kablolarda oluşan değerlerin aynılarını görmek mümkündür. Örnek-1 (EK-2 Şekil 2.1)'de damarın çepere en yakın noktasındaki elektrik alan değeri $2,9605e7$ olarak gözlenmiştir. Örnek-2 (EK-2 Şekil 2.2 için ise bu değer $2,3437e7$ olarak ölçülmektedir. Aynı iletken kesitteki (1 cm) iki kabloda tabaka kesitinin 0,5 cm artırıldığı örnekler arasında damar çeperine en yakın bölgedeki elektrik alan değerindeki azalma miktarı %26 olarak gerçekleşmiştir.

Örnek-4 (EK-2 Şekil 2.4) ile örnek-8 (EK-2 Şekil 2.8)'de iletken tabaka kalınlıkları, damarlar için 2 cm olarak eşittir. Örnek-4'te 1 cm olan kesit, örnek-8'de 3 cm'ye çıkarılmıştır. Örnek-4'te damarın çepere en yakın bölgesindeki elektrik alan değeri $1,9395e7$ iken örnek-8'de bu değer $1,1480e7$ olduğu gözlenmiştir. Elektrik alan değerindeki zayıflama oranı %30 civarındır.

Örnek-9 (EK-2 Şekil 2.9) ile örnek-13 (EK-2 Şekil 2.13)'te iletken tabaka kalınlıkları, damarlar için 3 cm olarak eşittir. Örnek-9'da 1 cm olan kesit, örnek-13'te 3,5 cm'ye çıkarılmıştır. Örnek-9'da damarın çepere en yakın bölgesindeki elektrik alan değeri $1,4423e7$ iken örnek-13'te bu değer $0,8789e7$ olduğu gözlenmiştir. Elektrik alan değerindeki zayıflama oranı %39 civarındır.

Burada hatırlanılacak husus, örneklemelerin birim q yükü için yapıldığıdır. Elektrik alan değerleri hesaplanırken merkezden uzaklık dikkate alınarak elektrik alan değerleri hesaplanmaktadır. Akım ve birim kesitteki q yük miktarı arttığında yarı iletken kesit içindeki elektrik alan değerleri de bağıntılı olarak değişecektir. Bu örneklerde görülen, yüksek dielektrik sabiti ile kalın yarı iletken tabakada elektrik alan değerlerinin büyük miktarlarda düşebildiğidir.

İkinci grup on örneklemede (örnek 21-30) (EK-2 Şekil 2.21, EK-2 Şekil 2.22, EK-2 Şekil 2.23, EK-2 Şekil 2.24, EK-2 Şekil 2.25, EK-2 Şekil 2.26, EK-2

Şekil 2.27, EK-2 Şekil 2.28, EK-2 Şekil 2.29, EK-2 Şekil 2.30) damar XLPE olarak seçilmiştir. Damarlar arasındaki dolgu malzemesi, XLPE malzeme olarak varsayılmıştır ve bu gruptaki örnekler için dielektrik sabiti 2,6 olarak varsayılmıştır.

Aynı iletken kesitinde (4 cm) örnek-27, 28, 29 ve 30'u inceleyelim: (0;0) noktasındaki ve kablo çeperine en yakın noktadaki elektrik alan değerleri sırasıyla $5,8838e7$ ve $1,3932e7$; $5,5342e7$ ve $1,0558e7$; $5,2231e7$ ve $1,0059e7$; $4,7029e7$ ve $0,9192e7$ olarak gözlenmektedir.

Üçüncü grup örneklemede (örnek 31-40) (EK-2 Şekil 2.31, EK-2 Şekil 2.32, EK-2 Şekil 2.33, EK-2 Şekil 2.34, EK-2 Şekil 2.35, EK-2 Şekil 2.36, EK-2 Şekil 2.37, EK-2 Şekil 2.38, EK-2 Şekil 2.39, EK-2 Şekil 2.40), damarlardaki dielektrik sabitinin damarlar arasındaki dolgu malzemesinin dielektrik sabitinden daha küçük olduğu varsayılmıştır.

Aynı iletken kesitinde (4 cm) örnek-37, 38, 39 ve 40'ı inceleyelim: (0;0) noktasındaki ve kablo çeperine en yakın noktadaki elektrik alan değerleri sırasıyla $5,8840e7$ ve $1,1782e7$; $5,5377e7$ ve $1,2058e7$; $5,2300e7$ ve $1,2381e7$; $4,7070e7$ ve $1,3114e7$ olarak gözlenmektedir.

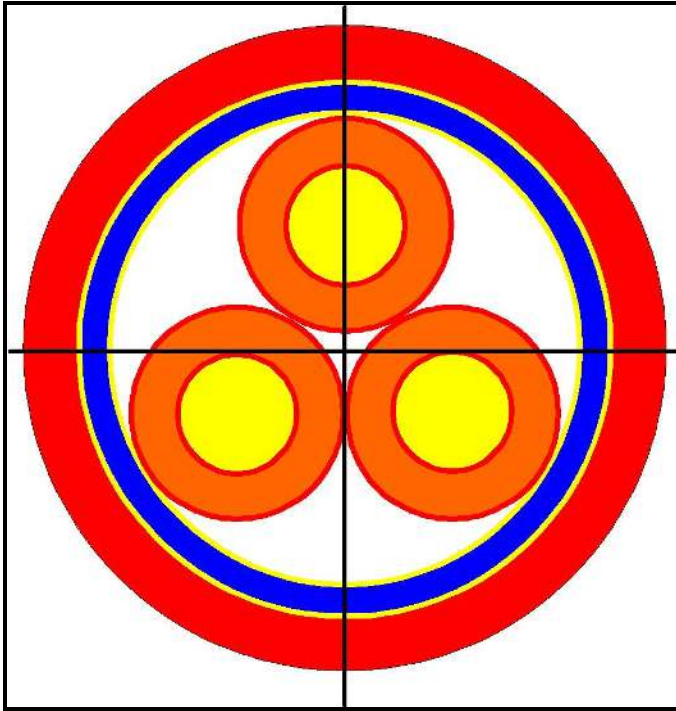
4.2. Elektrik Alan Hesabında Sayısal Yöntemler

4.2.1. Problemin modellenmesi

Öncelikle matematiksel olarak inceleyeceğimiz kabloyu modelleyelim:



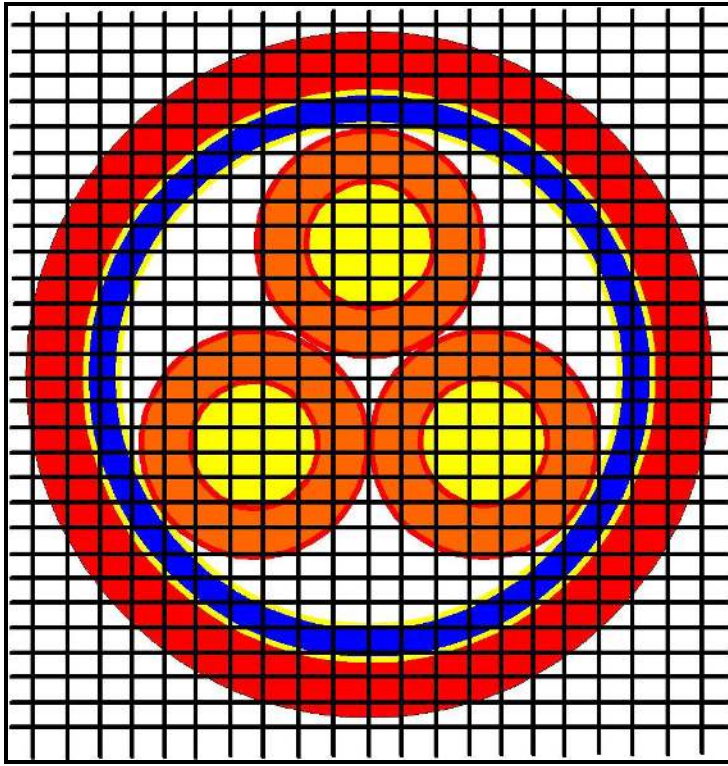
Resim 4.1. Üç damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu kesiti [Tamer EMRE arşivinden]



Şekil 4.1. Üç damarlı, bakır siperli ve XLPE izoleli güç kablosu modeli [Tamer EMRE arşivinden]

4.2.2. Örnekleme aralıklarının ve hücrelerin oluşturulması

Problemin geometrisi, tek damarlı kablodaki gibi silindirik koordinat düzlemini kullandığımızda avantaj sağlayamaya elverişli değildir. Kablonun herhangi bir noktasını dikkate alırken, kartezyen koordinat düzlemini kullanmak ve damarları da kartezyen koordinat düzlemine göre ifade etmek, çözümde kolaylık sağlayacaktır.



Şekil 4.2. Hücreler [2]

4.2.3. Sınır koşulların belirlenmesi

Kartezyen koordinatlar üzerinde sınır koşulları belirlerken yine aynı şekilde Laplace Eşitliği'nden faydalanalım:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (4.1)$$

Herhangi bir yüzeydeki sınır koşulları:

$$\phi = \phi_0(x, y) \quad (4.2)$$

Tıpkı tek damarlı kabloda uyguladığımız gibi üç damarlı kabloda da kartezyen koordinatlarda bir yüzeyde depolanan enerji:

$$J = \frac{1}{2} \iiint \left[k \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + k \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dS \quad (4.3)$$

Bu fonksiyonun sınır koşullarını sağlayacak şekilde minimum yapılması, problemin çözümünü verecektir.

Problemin çözümünde damarların iletken kesitlerinin dışında tabakaların çeperlerinde bakır izolelerin olduğu unutulmamalıdır. Dış dolgu malzemesi olarak PVC kullanılır. Dış dolgu etrafında ara kılıf tabakası vardır. Bu tabaka PVC yada LSF malzemeden oluşur. Bu tabakanın etrafında çelik zırh, mekanik mukavemet sağlamak amacıyla standartlara göre eklenir. En dış tabaka dış kılıftır. Genellikle PVC malzemeden yapılır [9,10]

Probleme ve modele dikkatli bakılırsa, her üç damarda da bakır izole olduğu için çevredeki PVC tabakada sıfır potansiyel sınır koşulunun konulacağı belli olmaktadır. Bu da problemin tek damarlı kablo geometrisindeki çözüm ile hiç de farklı olmayacağını göstermektedir. Sınır koşul olarak;

-merkezi $(-b, -a)$ olan ve a yarıçapındaki kesit, iletkene aittir,

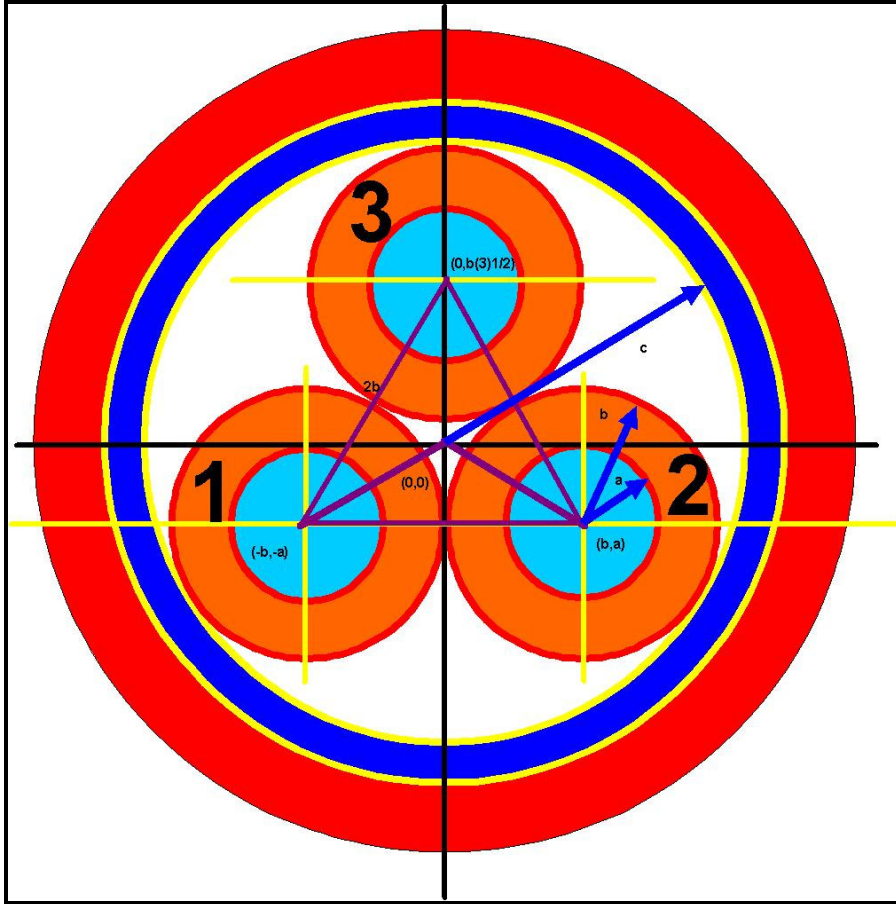
-merkezi $(b, -a)$ olan ve a yarıçapındaki kesit, iletkene aittir,

-merkezi $\left(0, b\sqrt{\frac{3}{2}}\right)$ olan ve a yarıçapındaki kesit, iletkene aittir,

-merkezi $(-b, -a)$ olan ve b ile a yarıçapı arasındaki kesit, XLPE'ye aittir,

-merkezi $(b, -a)$ olan ve b ile a yarıçapı arasındaki kesit, XLPE'ye aittir,

- merkezi $\left(0, b\sqrt{\frac{3}{2}}\right)$ olan ve b ile a yarıçapı arasındaki kesit, XLPE'ye aittir,
- merkezi (0,0) olan ve c yarıçapındaki kesit, PVC dolgu malzemesine aittir.

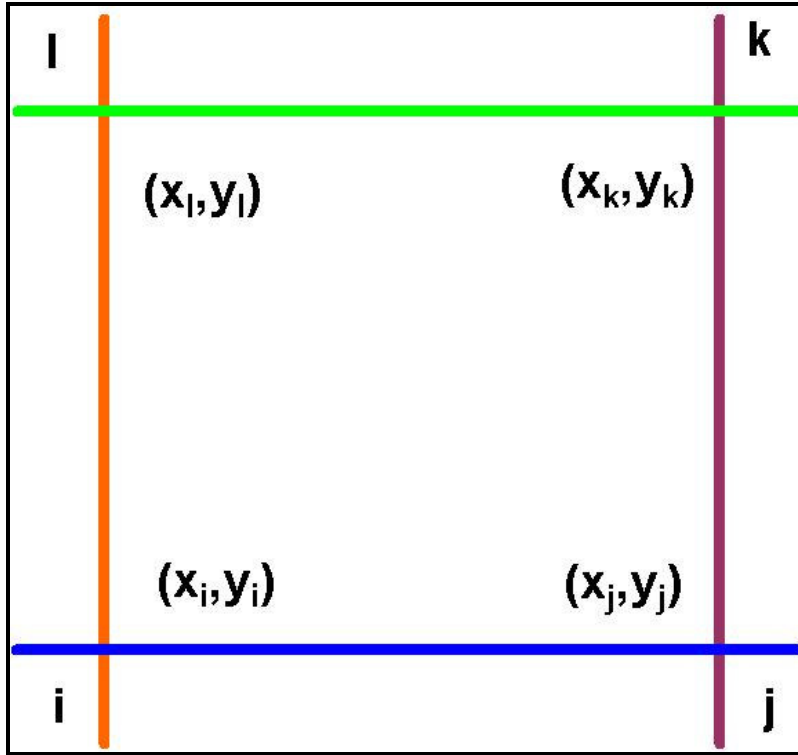


Şekil 4.3. Sınır koşulların tespiti [2]

4.2.4. Matematiksel çözümleme

1.Adım

Çözüm için hücrelerimizi Şekil 5.2'deki gibi kartezyen koordinat düzleminde ve dörtgensel seçtik. Dörtgensel elemanların koordinatlarını Şekil 5.4'te işaretleyelim:



Şekil 4.4. Dörtgensel eleman koordinatları [2]

2.Adım

i,j,k ve l düğüm noktalarımız için herhangi bir noktada geçerli olan polinomu yazalım ve potansiyel dağılım için enterpolasyon fonksiyonlarımızı oluşturalım:

$$\phi(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (4.4)$$

i noktası için, (x_i, y_i) ,

$$\phi(x_i, y_i) = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i = \phi_i \quad (4.5)$$

j noktası için, (x_j, y_j) ,

$$\phi(x_j, y_j) = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j = \phi_j \quad (4.6)$$

k noktası için, (x_k, y_k) ,

$$\phi(x_k, y_k) = \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k = \phi_k \quad (4.7)$$

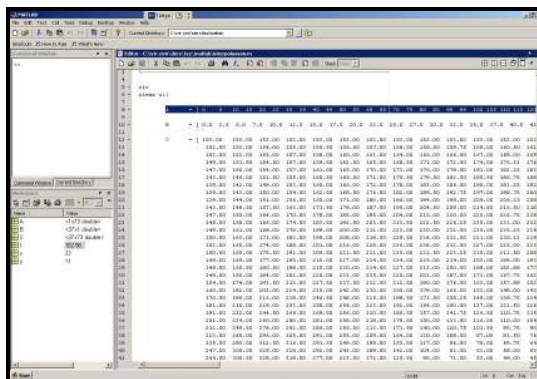
l noktası için, (x_l, y_l) ,

$$\phi(x_l, y_l) = \alpha_1 + \alpha_2 x_l + \alpha_3 y_l = \phi_l \quad (4.8)$$

Buradan α_1, α_2 ve α_3 , tek damar uygulamalarında olduğu gibi hesaplanır.

Matlab enterpolasyonu

Matlab enterpolasyonu, üç damar uygulamalarında da tek damar uygulamalarındaki gibi yapılmaktadır. Yine aynı şekilde enterpolasyon yaparken öncelikle belirli 4 noktaya dair değerleri elde edilmelidir. Tasarlanan ve EK-3 te sunulan kodlar ile örnekleme aralığı değiştirilerek bu işlem yapılabilir. Daha sonra seçilen herhangi dört noktanın arasındaki herhangi bir noktaya ilişkin sonuç değeri istenir. Şekil 4.5, seçilen (x;y) noktasında programın çalışma ekranını göstermektedir.



Şekil 4.5. Matlab enterpolasyonu [2]

Matlab kodu:

% İnterpolasyon örneği %

clc

clear all

A = []

B = []

C = []

x= ? ; % A vektöründe hesaplanmak istenen nokta.

y= ? ; % B vektöründe hesaplanmak istenen nokta.

I=interp2(A,B,C,x,y); % A vektörü, tablonun sütun başlıkları,

B, satır başlıkları,

C, tablonun içeriği,

x ve y aranan nokta koordinatları

(enterpolasyon sonucu bu sorunun cevabını verir. x değeri A vektörü içerisinde bir ara değer, y ise B vektörü içerisinde bir aradeğerdir.)

% I değeri interpolasyon sonucunu verir. interp2 (lineer), interp3 (kuadratik) interpolasyondur.

%-----%

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Öncelikle EK-1'de yer alan şekillere yönelik olarak örneklemeler, bölüm sonlarında değerlendirilmiştir. Sonuç olarak bunlardan bazılarına değinmek gerekirse;

İlk beş örnekte tek damarlı kabloda tek katman örneklemeleri yer almaktadır.

Aynı iletken kalınlığında XLPE kalınlığı 2 cm olan örnek-2 (EK-1 Şekil 1.2) (0;4) noktasındaki E değeri $1,4133e7$ ile XLPE kalınlığı daha büyük (3 cm) olan örnek-3 (EK-1 Şekil 1.3) (0;5) noktasındaki E değeri olan $1,1295e7$ karşılaştırılmış ve XLPE kalınlığının artırıldığında kablo çeperine varan noktalardaki elektrik alanın değerlerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Buna göre XLPE malzeme kalınlığını artırmak, tip testleri için optimum sınır ve ekonomik kısıtlar değerlendirildikten sonra kablonun elektrik alan değerlerinin düşük olması için faydalıdır.

Örnek-6 (EK-1 Şekil 1.6), tabakaların ikisinin kalınlığının da iletken kesitinden büyük olduğu durumu göstermektedir. Bu durumda ilk tabakada nispeten sönümlenen alan değeri, ikinci tabakaya geçerken geçirgenlik katsayısı ve ilk tabakanın kalınlığının küçük oluşu nedeniyle tekrar yüksek değer alıp sonra tekrar azalmaktadır. (0;3) noktasındaki elektrik alan değeri $1,9002e7$ değerine düşmüşken tabakalar değişince $2,3075e7$ değerine çıkmaktadır. %17,65 değerinde bir artış, iki tabaka kullanılmasını ve onun getireceği maliyet gibi avantajları geride bırakarak istenilmeyen elektrik alan değerleri ortaya koyabilir. Tip testleri geçilse dahi bu tip bir kablo tercih edilmemelidir.

Örnek-8 de ilk tabaka kalınlığı, iletken kesitinden büyük tutulurken ikinci tabaka kalınlığı, ilk tabakadan ince tutulmuştur. Tabakalar arası geçiş noktasındaki (0;5) elektrik alan değeri, $1,1341e7$ 'den $1,3736e7$ 'ye çıkmıştır. Kalınlığı dikkate alındığında artış miktarı giderek azalmaktadır. Ancak; bu

değer tehlikeli bir değer ise ikinci tabaka, tasarım ve maliyet olarak kullanışlı değildir.

Örnek-9 (EK-1 Şekil 1.9) da tabakalar arası geçiş noktası olan (0;4) noktasındaki E değerleri $1,4205e7$ (iç tabaka) ve 1.7136 (dış tabaka) ve kablo çeperine en yakın nokta olan (0;6) noktasındaki E değeri $1,1616e7$ ile örnek-10 (EK-1 Şekil 1.10) da tabakalar arası geçiş noktası olan (0;5) noktasındaki E değerleri $1,1340e7$ (iç tabaka) ve $1,3846e7$ (dış tabaka) ve kablo çeperine en yakın nokta olan (0;8) noktasındaki E değeri $0,8697e7$ değerlerini karşılaştıralım. Örnek-9 ile örnek-10 değerleri arasındaki azalma miktarları %25, %23 ve %33 olarak hesaplanmaktadır. Sonuçlara göre iç yarı iletken tabakanın kalınlığını artırdıkça, değerlerdeki sönümlenmenin daha etkin olduğu gözlenmektedir. Bu modellemenin ilk gruba göre maliyet açısından daha kullanışlı olduğunu değerlendirilebilir; ancak üretim koşulları göz önüne alındığında ve bu koşullar maliyete döküldüğünde yekpare tek tabaka ile çalışmak, fabrikalar için daha ekonomik olmaktadır. Örneğin 10 km lik bir orta gerilim kablosunu aynı hatta iki kez üretimden geçirmek ve üretim takvimini sıkıştırmak yerine üretici daha fazla malzeme kullanarak üretim yapmayı her zaman tercih etmektedir. Güç kablosunda maliyete göre fiyat oluşturulsa da üretim hattı hemen hemen hiç boş kalamadığı ve üretim takvimi daima dolu olduğu için ikinci grup üretim tercih edilmemektedir. İşçi ve çalışma zamanına vurulduğunda gerçekten de maliyetin düşük olduğu seçenek değişmektedir.

Üçüncü grup yani tek damarlı ve bakır siperli kabloda birden fazla malzeme kullanılması durumunda, dielektrik sabitimiz dış katmanda daha yüksek ise, (örnek 11-15) (EK-1 Şekil 1.11, EK-1 Şekil 1.12, EK-1 Şekil 1.13, EK-1 Şekil 1.14, EK-1 Şekil 1.15), örnek-14 (EK-1 Şekil 1.14) ve örnek-15 (EK-1 Şekil 1.15) değerlerini önce kendi aralarında, daha sonra da örnek-9 (EK-1 Şekil 1.9) ve örnek-10 (EK-1 Şekil 1.10) ile karşılaştıralım. Bu durumda örnek-14 için (0;4) noktasındaki E değerleri $1,7482e7$ (iç tabaka) ve $1.4062e7$ (dış tabaka) ve (0;6) noktasındaki E değeri $0,9438e7$ olurken; örnek-15 için (0;5)

noktasındaki E değerleri $1,3958e7$ (iç tabaka) ve $1,1161e7$ (dış tabaka) ve kablo çeperine en yakın nokta olan (0;8) 'deki E değeri $0,7067e7$ olarak belirlenmiştir. Örnek-14 ile örnek-15 değerleri arasındaki azalma miktarı sırasıyla %20,16, %20,63 ve %25,12 olarak gözlenmiştir. Bu durumda iç yarı iletkenin dielektrik sabitinin dış tabakadan küçük olduğu durumda iletken kesiti sabitken artırılan tabaka kalınlığının elektrik alan değerlerindeki düşme oranının daha azaldığı gözlenmektedir. Dikkat edilirse, elde edilen bu sonuçlara göre aynı boyutlarda fakat tabakaların yerlerinin değiştirilmesi ile elde edilen durumda yukarıda belirtilen noktalar için elektrik alan değerlerindeki değişim miktarı sırasıyla %24 artış, %18 azalma, %18,75 azalma, %23 artış, %19,4 azalma, %18,74 olarak gözlenmiştir. Bu değerler, iletkenine yakın olan tabakanın dielektrik sabiti daha düşük olan malzeme seçilmesi halinde iletkenine en yakın bölgede daha fazla elektrik alan değerinin gözlemlendiği anlamına gelir. Elektrik alan değerleri, iç bölgede daha yüksek olmakta fakat dış kılıfa doğru daha fazla sönümlenmektedir. Eğer iç bölgede yüksek elektrik alan değeri olmasına izin verirsek, elektriksel delinme olayları nedeniyle kablo yıpranabilir. Orta Gerilim ve Yüksek Gerilim güç kablolarında kısmi boşalmalar üzerine bir çok araştırma yapılmıştır ve özellikle XLPE malzemenin kullanıldığı güç kablolarında bu tip bir risk alınması uygun değildir [3] Bu nedenle üçüncü grup tasarım, elverişli bir tasarım değildir.

Örnek-11 (EK-1 Şekil 1.11), iki katman kalınlığının da iletken yarıçapından büyük olduğu durumu temsil etmektedir. Dielektrik sabitlerine göre geçirgenliği fazla olan malzemeyi iç tabakaya yerleştiren bu tip bir tasarımda (0;5) koordinatlardaki kablo çeperine en yakın noktada $1,1341e7$ değeri gözlenebilir. Tabakalar arasındaki geçiş noktası (0;3) noktasında elektrik alan değeri $2,3389e7$ 'den $1,8503e7$ değerine düşmektedir. Aynı değerlere sahip olan fakat tabakaların yer değiştiği örnek olan örnek-6 (EK-1 Şekil 1.6)'daki değerlerin (0;5) için $1,3958e7$ ve (0;3) için $1,9003e7$ den $2,2773e7$ değerine arttığını hatırlarsak ve dış bölgede pahalı malzeme kullanmanın daha fazla miktar ve daha fazla maliyet anlamına geldiğini değerlendirirsek, kullanışlı olmayan bir tasarım olduğunu değerlendirebiliriz.

Dördüncü grup yani tek damarlı ve bakır sipersiz kabloda birden fazla malzeme kullanılması durumunda iç tabakadaki dielektrik katsayısının büyük olduğu varsayılmıştır. (örnek-16, örnek-17, örnek-18, örnek-19, örnek-20) (EK-1 Şekil 1.16, EK-1 Şekil 1.17, EK-1 Şekil 1.18, EK-1 Şekil 1.19, EK-1 Şekil 1.20) beklediğimiz gibi elektrik alan değerleri, daha önce bakır siper nedeniyle sıfır olan kablo dışına etkin şekilde taşmaktadır. Örnek-19 (EK-1 Şekil 1.19) de kablo dışındaki (0;10) noktasında gözlenen elektrik alan değeri, $1,7176e7$ ile örnek-20 (EK-1 Şekil 1.20) de kablo dışındaki (0;10) noktasında gözlenen alan değeri, kablo dışındaki ortamın dielektrik sabitinin aynı olması nedeniyle aynı olarak hesaplanır. (iletken kesit aynı) Elektriksel delinme yada etraf ile elektriki etkileşim olasılığı, bakır siperleme yapılan duruma göre daha fazladır. Sağlıklı bir tasarım olmamasına rağmen elektrik alan değerlendirme açısından faydalı bir uygulama olduğunu düşünülerek eklenmiştir. Kablo kesiti aynı iletken kesiti için büyütülürse, temas noktası aynı oranda iletkeniden uzaklaşacak ve bu noktadaki elektrik alan değeri düşecektir. Ancak; kablo kesitindeki artış, malzemenin teknik ve fiziksel özellikleri yanında maliyeti ile de ilişkilidir. Kesiti büyük olan kabloların üretimi daha zor ve maliyetli daha fazladır.

Beşinci grup yani tek damarlı ve bakır sipersiz kabloda birden fazla malzeme kullanılması durumunu incelerken iç tabakadaki dielektrik katsayısının küçük olduğu varsayılmıştır. (örnek-21, örnek-22, örnek-23, örnek-24, örnek-25) (EK-1 Şekil 1.21, EK-1 Şekil 1.17, EK-1 Şekil 1.18, EK-1 Şekil 1.19, EK-1 Şekil 1.20)'te de beklenildiği gibi kablo dışındaki elektrik alan değerleri bir önceki beş örnekte elde edilen değerler ile aynı olarak elde edilmektedir. Bu durum, beklenen bir sonuçtur. (dış ortam aynı dielektrik sabitine sahip)

Elektrik alan değerlerinin dağılımı açısından bakıldığında, iç tabakadaki malzemenin dielektrik katsayısını küçük seçtiğimizde iletken kesit çevresinde diğer duruma göre daha fazla elektrik alan değeri olduğunu gözlemliyoruz. Bu tip dağılım, iletkene temas eden yüzeyin kabloya daha fazla zarar vereceği öngörülebilmektedir. Kablonun yüzeyine kadar olan her türlü

delinmeden kaçınmak için iç tabakada dielektrik katsayısı büyük olan yalıtkan malzeme (XLPE) kullanılmasının daha avantajlı olacak gibi görünmektedir ancak; iç yarı iletken elektrik alan değerini yalıtkana göre daha yüksek elde etmemize neden olsa da diğer elektriksel amaçlarla iletken sarılmalıdır. Özellikle çok telli iletkenlerde dış çeperde teller arasında girintiler çıkıntılar vardır. İç yarı iletken, öncelikle bu boşlukları doldurur. Gerilimde zincir akısı, iletkenin tam merkezindeki zayıf zincirleri çepere iter (skin effect). Çeperden kaçmak isteyen elektronlar da bu boşlukla arasında atlama yaparak kaçmak isterler. Direk izolasyonla temasta olsaydı (iç yarı iletken yerine yalıtkan XLPE kullanılsaydı), yüksek izolasyon direnci ile bu elektronlar, şiddetli stres oluşturlardı. Böylelikle de izolasyonun ömrü kısılacaktı. Bu noktada iç yarı iletkeni bir çeşit mekanik amortisör gibi düşünmek ve geçiş stresini tatlı sert önlediğini hatırlamak yerinde olacaktır.

Fiziksel bir başka fayda da, yüzeyde buluna girinti çıkıntı çapak gibi istenmeyen durumların bu tip bir izolasyon ile örtülüyor olmasından gelir. İç yarı iletkenin elektron akışında ve elektriksel alanda direnç oluşturup o noktadaki yığılma streslerini önleme görevini yerine getirir.

İzolasyondaki dipoller, tam polarizasyonlu olup, kutuplaşma için hareketlerinin durduğu ve tam polarizasyon pozisyonunu aldığı yani $+-$ kutup hareketlerinin bittiği ana kadar harcanan enerji, izolasyondaki dielektrik kaybıdır.

Simülasyondan elde ettiğimiz sonuçlara göre kabloda elektriksel delinmeye neden olacak zararların gelmemesi için, yarı iletken tabaka et kalınlığı yüksek olmalıdır. Diğer yandan yukarıdaki açıklamaları dikkate alırsak, izolasyon kalınlığı ve yarı iletken tabakaların kalınlığı, elektriksel dayanımı koruyacak sınırlar içerisinde artırılabilir.

Bakır siper, pratikte bütün üretimler için kullanılmamaktadır ancak edinilen bilgilere göre topraklanmış bakır ekranlamanın yapılmadığı kablolarda tip

testleri sırasında atlamalar görülmekte ve elektrik alan değerlerinin yanı sıra malzemenin kimyasal özellikleri için de ekranlama vaz geçilmez hale gelmekte, tabakaların en dışındaki stresi tamponlamaktadır. Özellikle et kalınlığı kısa seçilen kablolarda bakır siper kullanılması, delinmeye neden olan sebepleri azaltacak ve kablodan kaynaklanan elektrik alanın iyice azalmasına neden olacaktır.

Üç damarlı tasarımlarda ise;

Örneklemelelerde ilk grup yani ilk yirmi örnekleme (örnek 1-20) (EK-2 Şekil 2.1, EK-2 Şekil 2.2, EK-2 Şekil 2.3, EK-2 Şekil 2.4, EK-2 Şekil 2.5, EK-2 Şekil 2.6, EK-2 Şekil 2.7, EK-2 Şekil 2.8, EK-2 Şekil 2.9, EK-2 Şekil 2.10, EK-2 Şekil 2.11, EK-2 Şekil 2.12, EK-2 Şekil 2.13, EK-2 Şekil 2.14, EK-2 Şekil 2.15, EK-2 Şekil 2.16, EK-2 Şekil 2.17, EK-2 Şekil 2.18, EK-2 Şekil 2.19, EK-2 Şekil 2.20) üç damarlı kabloda bakır siper olması halinde kesitteki elektrik alan değerlerini göstermektedir. Bu örneklerde tıpkı tek damarlı ve bakır siperli kablolarda oluşan değerlerin aynılarını görmek mümkündür. Örnek-1 (EK-2 Şekil 2.1) de damarın çepere en yakın noktasındaki elektrik alan değeri $2,9605e7$ olarak gözlenmiştir. Örnek-2 (EK-2 Şekil 2.2) için ise bu değer $2,3437e7$ olarak ölçülmektedir. Aynı iletken kesitteki (1 cm) iki kabloda izolasyon kesitinin 0,5 cm artırıldığı örnekler arasında damar çeperine en yakın bölgedeki elektrik alan değerindeki azalma miktarı %26 olarak gerçekleşmiştir. Bu beklediğimiz sonuç, tıpkı tek damarda olduğu gibi bakır siperli çok damarlı kablolarda da aynı iletken kesitte damar kesiti artırıldığında dış yüzeye yakın noktadaki elektrik alan değerinin daha düşük olduğunu göstermektedir.

Örnek-4 (EK-2 Şekil 2.4) ile örnek-8 (EK-2 Şekil 2.8) da iletken tabaka kalınlıkları, damarlar için 2 cm olarak eşittir. Örnek-4'te 1 cm olan kesit, örnek-8'de 3 cm'ye çıkarılmıştır. Örnek-4'te damarın çepere en yakın bölgesindeki elektrik alan değeri $1,9395e7$ iken örnek-8'de bu değer

1,1480e7 olduğu gözlenmiştir. Elektrik alan değerindeki zayıflama oranı %30 civarındır.

Örnek-9 (EK-2 Şekil 2.9) ile örnek-13 (EK-2 Şekil 2.13)'te iletken tabaka kalınlıkları, damarlar için 3 cm olarak eşittir. Örnek-9'da 1 cm olan kesit, örnek-13'te 3,5 cm'ye çıkarılmıştır. Örnek-9'da damarın çepere en yakın bölgesindeki elektrik alan değeri 1,4423e7 iken örnek-13'te bu değerin 0,8789e7 olduğu gözlenmiştir. Elektrik alan değerindeki zayıflama oranı %39 civarındır.

Burada hatırlanılacak husus, örneklemelerin birim q yükü için yapıldığıdır. Elektrik alan değerleri hesaplanırken merkezden uzaklık dikkate alınarak elektrik alan değerleri hesaplanmaktadır. Akım ve birim kesitteki q yük miktarı arttığında kesit içindeki elektrik alan değerleri de bağıntılı olarak değişecektir. Bu örneklerde görülen, yüksek dielektrik sabiti ile kalın XLPE tabakada elektrik alan değerlerinin büyük miktarlarda indirilebildiğidir.

İkinci ve üçüncü grupta üç damarlı güç kablolarında bakır siperin olmadığı durum ele alınmıştır. Burada damarlar arası dolgu malzemesi ve damarlardaki dolgu malzemelerinin dielektrik sabitleri değiştirilerek malzemelerin yer değiştirmesi durumunda elektrik alan değerlerinde ne tip değişimler olacağı gözlenmeye çalışılmıştır. Bir kablodan beklenen, kesintisiz ve minimum kayıpla enerjiyi taşımasıdır. Bakır siper kullanılmadığında kablonun elektrik alan değerleri, kabloda fiziksel aksaklıklara sebep olabilmektedir.

İkinci grup on örneklemede (örnek 21-30) (EK-2 Şekil 2.21, EK-2 Şekil 2.22, EK-2 Şekil 2.23, EK-2 Şekil 2.24, EK-2 Şekil 2.25, EK-2 Şekil 2.26, EK-2 Şekil 2.27, EK-2 Şekil 2.28, EK-2 Şekil 2.29, EK-2 Şekil 2.30) damar izolasyonunda dielektrik sabitinin 3,2 olduğu varsayılmıştır. Damarlar arasındaki dolgu malzemesinin dielektrik sabiti ise 2,6 alınmıştır.

Aynı iletken kesitinde (4 cm) örnek-27, 28, 29 ve 30'u inceleyelim: (0;0) noktasındaki ve kablo çeperine en yakın noktadaki elektrik alan değerleri sırasıyla $5,8838e7$ ve $1,3932e7$; $5,5342e7$ ve $1,0558e7$; $5,2231e7$ ve $1,0059e7$; $4,7029e7$ ve $0,9192e7$ olarak gözlenmektedir.

Örnekler dikkatle incelenirse, tıpkı tek damarlı kablolarda olduğu gibi bu tip kablolarda da özellikle damarlardaki yarı iletken tabaka kalınlığı arttıkça elektrik alan değerlerinde damar dışına doğru azalma görüldüğü anlaşılmaktadır. Diğer bir önemli konu da üç damarın tam orta noktasında en fazla elektrik alan değerine rastlandığı gerçeğidir. Yarı iletken tabaka kalınlığı artan damarlarda merkezin iletkenlerden uzaklığı artacak ve bu problem çözümlenecektir ancak; üç damarlı kablolarda bir diğer zorluk, fiziki olarak kabloyu üretebilmektir. Büyük kesitlerdeki kablolar, tip testlerini geçemeyebilir. Bu nedenle optimum çözüm, fabrikalarda yine uygun modellemelere yönelik bilgisayar programlarıyla yapılmaktadır.

Üçüncü grup örneklemede (örnek 31-40) (EK-2 Şekil 2.31, EK-2 Şekil 2.32, Ek-2 Şekil 2.33, EK-2 Şekil 2.34, EK-2 Şekil 2.35, EK-2 Şekil 2.36, EK-2 Şekil 2.37, EK-2 Şekil 2.38, EK-2 Şekil 2.39, EK-2 Şekil 2.40), damarlardaki dielektrik sabitinin damarlar arasındaki dolgu malzemesinin dielektrik sabitinden daha küçük olduğu varsayılmıştır.

Aynı iletken kesitinde (4 cm) örnek-37, 38, 39 ve 40'ı inceleyelim: (0;0) noktasındaki ve kablo çeperine en yakın noktadaki elektrik alan değerleri sırasıyla $5,8840e7$ ve $1,1782e7$; $5,5377e7$ ve $1,2058e7$; $5,2300e7$ ve $1,2381e7$; $4,7070e7$ ve $1,3114e7$ olarak gözlenmektedir.

Bir önceki on örnekleme ile hemen hemen aynı koşulların sergilendiği bu durumda dielektrik sabitlerinin farkı oranında elektrik alan değerlerinde bir değişim gözlenmektedir ve dielektrik sabiti küçük olan malzeme üç damarın dolgusunda kullanılırsa, merkezde daha büyük elektrik alan değeri gözlenmektedir. Bu, beklenen bir sonuçtur

Kabloda delinmeye neden olacak zararların gelmemesi için, et kalınlığı yüksek olmalıdır. Fakat; damar çapının geniř olması, kablonun kesitinin artmasına ve kimsayal ve elektronik dayanımın dūřmesine, bōylelikle diğerk elektriki testlerden geçmesini zorlařarak maliyetinin artmasına neden olacaktır. Bu nedenle en kūuk kesitte en iyi elektrikselle özelliklere sahip malzeme tasarlanması dūřūnūlmelidir. Kablolarda özellikle elektriki delinme ve faz-faz arızasından kaçınmak için damar dolgu su olabildiğince kalın olmalıdır.

Bakır siperlemenin olmadığı durumlarda kablonun dolgu malzemesinin kalınlığı daha bōyūk önem kazanır.

Dielektrik sabiti yūkselle olan malzemenin iletkenin hemen dıřına sarılması, iletkenin hemen dıřında elektrik alan değerklerinin dūřmesini saėlayacaktır. Simūlasyonun bu sonucuna karřılık iletkenin doğrudan yalıtkanla teması, yukarıda anlatıldığı gibi stresi artırarak kablonun mrūnū kısaltacaktır.

Kabloların eğılip būkūlme ve diğerk mekanik etkilere uğrayacağı gōz nūne alındığında sınır değerklerde ve tehlikeli elektrik alan değerklerinde kablo tasarlamak uygun değıldir.

Orta Gerilim ve Yūkselle Gerilim seviyelerinde kullanılan gū kablolarında tek damar yada ū damar seçiliyorsa, teknik řartnameler hazırlanırken;

1-Dolgu malzemesi olarak XLPE seçilmesi, i bōlgedeki elektrik alan değerkleri yōnūnden uygundur.

2-Damar apı arttıkça elektrik alan değerkleri dūřmektedir. İzolasyonun doğru malzeme kullanılarak yapılması durumunda damar çapı daha dūřūk yapılabilecek ve bōylelikle maliyetten kaılabilecektir. Damar apı, kablonun çapını doğrudan etkileyecek ve būkūlme çapını, dolayısıyla kablo makarasının boyutlarını etkiler. En ucuza en iyi kabloyu ūretmek, esastır.

3-Kablolarda bakır siper aranmalıdır. Bakır siper, elektrik alan değerlerinin kablo dışında görülmemesini sağlar. Böylelikle kısmi boşalma ve elektriki delinme riskleri en aza indirilmektedir. Özellikle XLPE malzemenin en önemli sorunu olan delinmelerden böylelikle kaçınılabılır.

4-Kablo tasarımında damar yarı iletkeninin dielektrik katsayısı mümkün olduğu kadar yüksek tutulmak ile birlikte çok damarlı kabloların dış çeperinin bakır siperle kaplanması, kısmi boşalma riskini azaltır.

5-Bakır siperin olmadığı yada elektriki yada fiziki hasarlı üç damar kablolarda elektrik alan değerlerinin en yoğun olduğu bölge, merkezdir. Bu bölgelerde üç faz arıza ve kısmi boşalma olasılığı yüksek olmaktadır. Önerimiz, merkezdeki dolgunun yalıtkan yada dielektrik katsayısı yüksek bir yarı iletken olmasıdır.

EK-5'te Pratikte iki güç kablosu üreticisine ait standart kablo boyutları ile konu irdelenmiştir. İç ve dış yarı iletken tabaka kalınlıkları pratikte kullanılan değerler olarak kullanılmış ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır. XLPE yalıtkan kalınlığı artırılırken iç ve dış yarı iletken kalınlığı pratikte yapıldığı gibi sabit tutulduğunda ortaya çıkan değerler, program çıktılarıyla desteklenmektedir.

EK-5'te yarı iletken malzemeler için pratikte kullanılan 2,5 dielektrik sabiti uygulanırken, XLPE yalıtkan için 3,2 dielektrik sabiti kullanılarak birebir örnekleme sağlanmıştır.

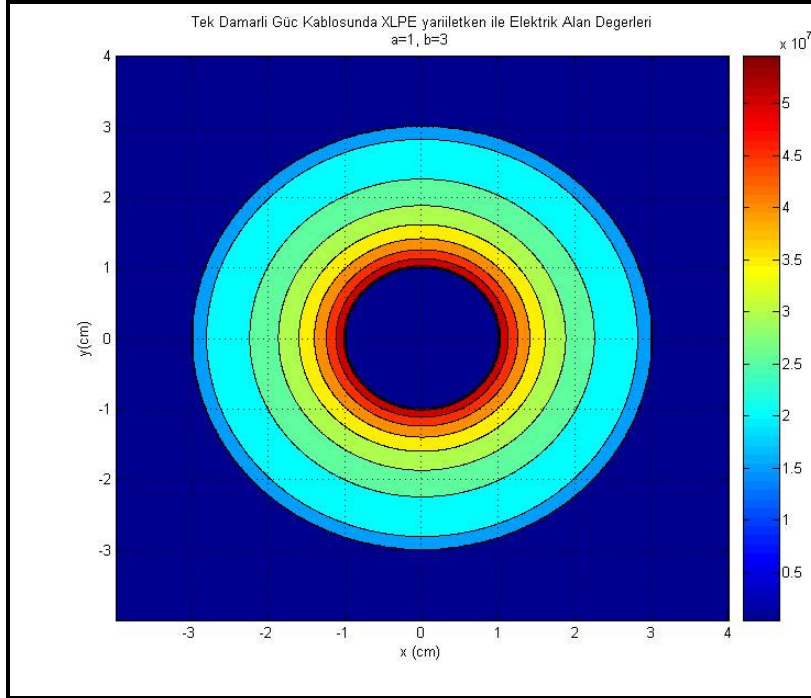
Bu tezdeki geliştirilen hassas hesap yöntemi ile optimum kalınlıkta malzeme kullanılarak daha az maliyetli bir üretim yapılmış olacaktır. Bununla birlikte elektrik alan değerlerini sınır değerlere taşımak, arıza riskini artıracaktır.

KAYNAKLAR

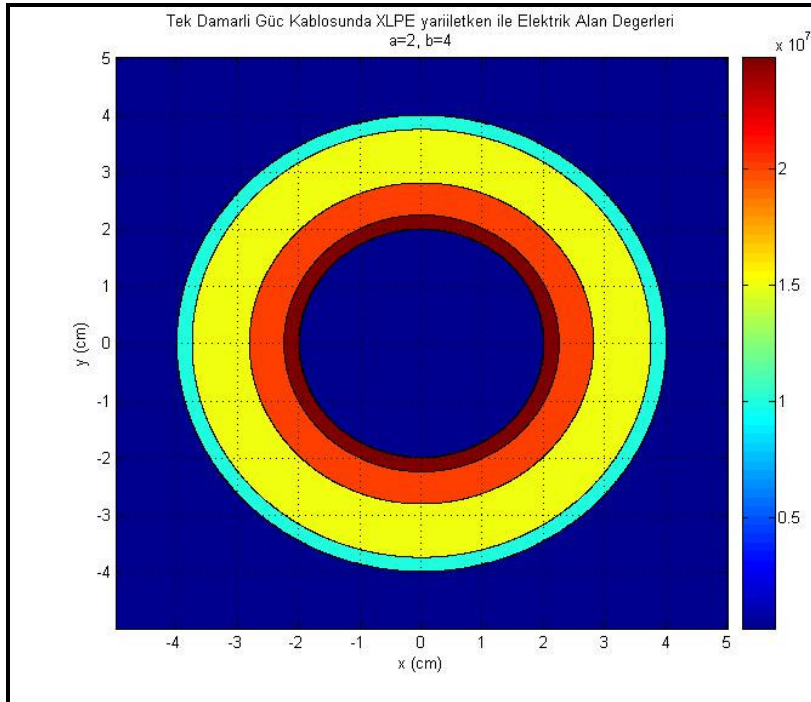
- 1- Dalkılıç, T, Akay, S.K, Avinç, A, İletim Kablolarında Dielektrik Kayıp Faktörü, **Süleyman Demirel Üniversitesi**, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 8 (2):10-12 (2004).
- 2- EMRE T. Arşivinden, (2006).
- 3- Türk Prysmian Kablo ve Sistemleri A.Ş. İletim ve Enerji Kabloları Katalogu, **Türk Prysmian Kablo ve Sistemleri A.Ş. Matbaası**, İstanbul, 40-55 (2004).
- 4- Heinrich R, Jobava R, Winfried K, Investigation and Optimization of a sensor for Partial Discharge Detection on High Voltage XLPE Cables, **III. International Seminar / Workshop Diped-98**, Tbilisi/Georgia, 134-137 (1998).
- 5- Cheng D, Field and Wave Electromagnetics, 2nd edition, **Addison-Wesley**, New York, 228-232 (1998).
- 6- Matthew, N.O, Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics, 4th edition, **CRC Pres**, New York, 62-84 (1992).
- 7- Chapra S.-Canale R, Numerical Methods for Engineers, 2nd edition **McGraw-Hill Book Company**, 218-244 (1990).
- 8- Rao, S.S, The Finite Element Method in Engineering, 2nd edition, **Pergamon Press**, Oxford, 101-198 (1992).
- 9- Chari, M.V.K, Silvester, P.P, Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems, **John Wiley and Sons**, New York, 11-105 (1980).
- 10- TSE Standardı, **TS IEC 60502-2**, (Nisan 2001).
- 11- Nexans İletişim Endüstri ve Ticaret A.Ş, Enerji Kabloları ve İletkenler Katalogu, **Nexans İletişim Endüstri ve Ticaret A.Ş. Matbaası**, İstanbul, 27-37 (2004).

EKLER

EK-1 Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

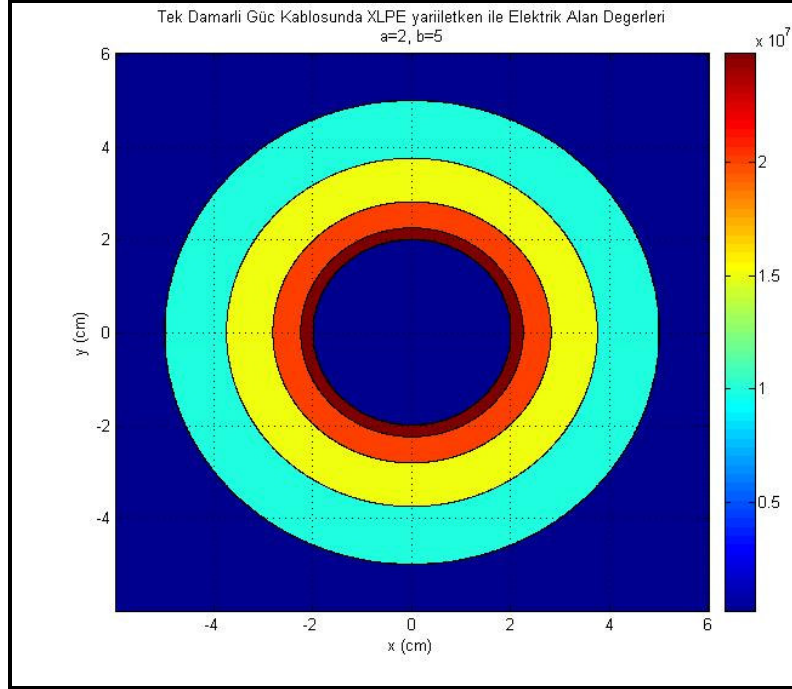


Şekil 1.1. Elektrik alan örnekleme-1, $a=1$ $b=3$

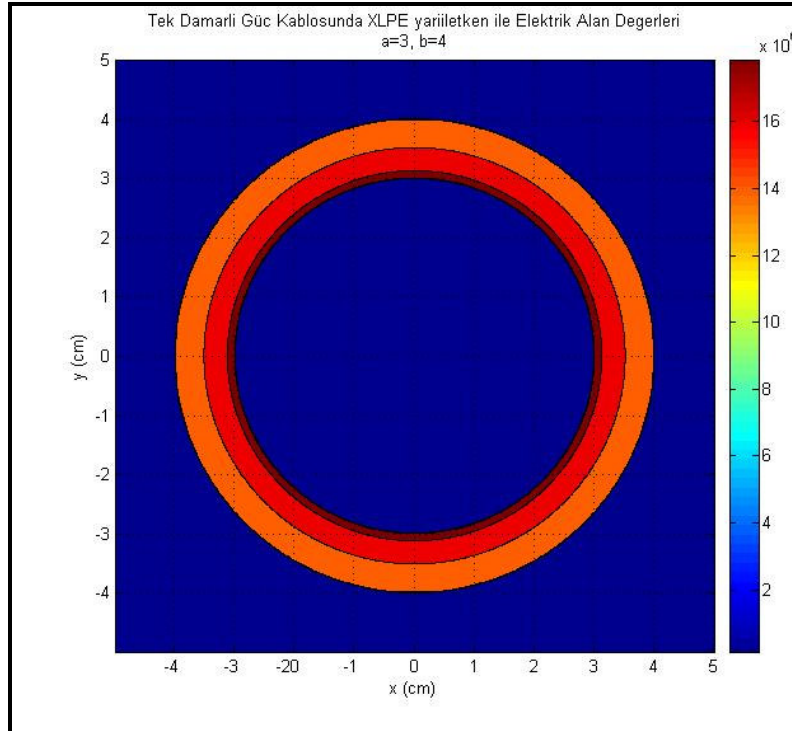


Şekil 1.2. Elektrik alan örnekleme-2, $a=2$ $b=4$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

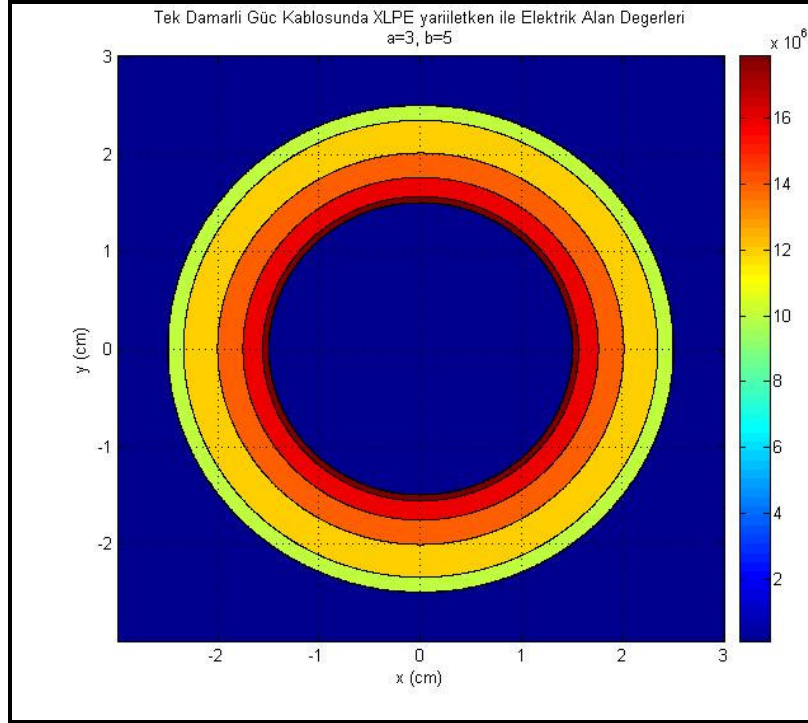


Şekil 1.3. Elektrik alan örnekleme-3, a=2 b=5

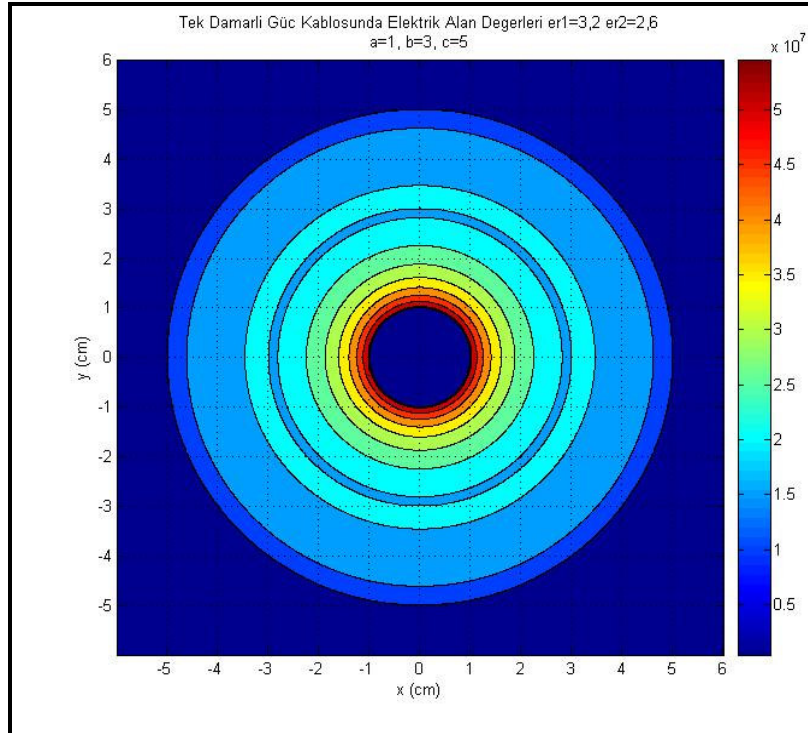


Şekil 1.4. Elektrik alan örnekleme-4, a=3 b=4

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

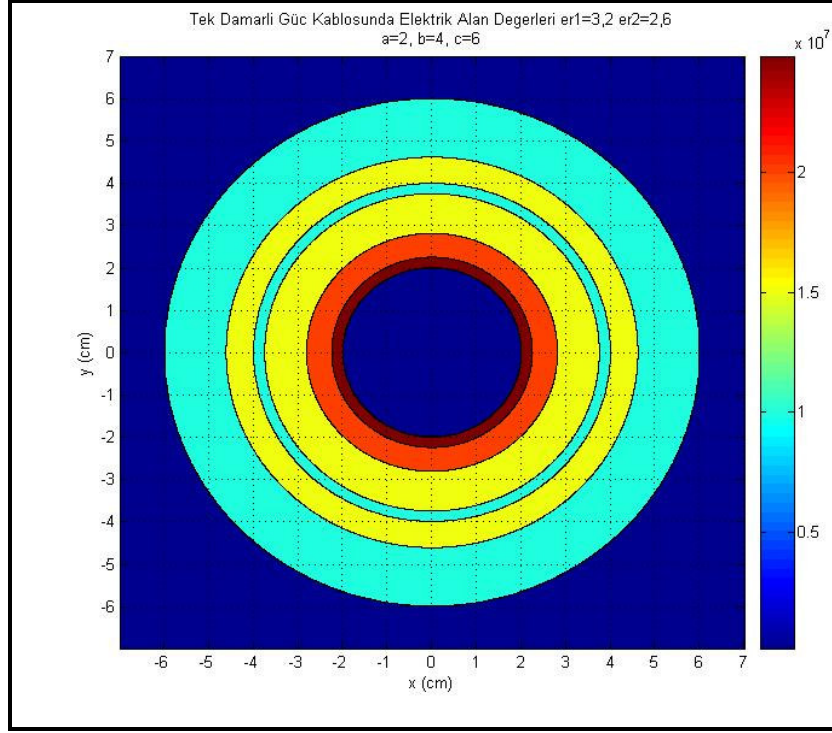


Şekil 1.5. Elektrik alan örnekleme-5, a=3 b=5

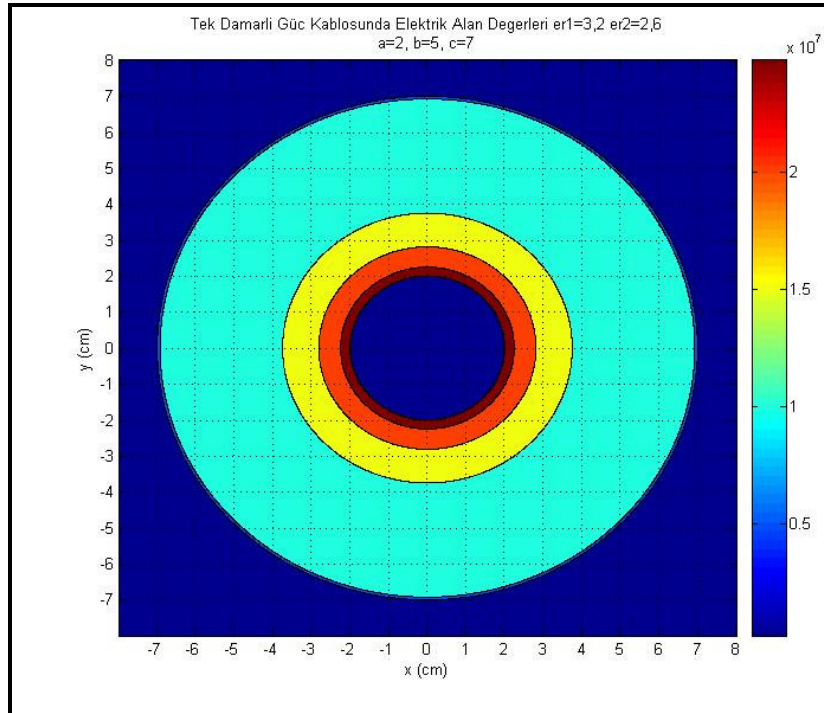


Şekil 1.6. Elektrik alan örnekleme-6, a=1 b=3 c=5

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

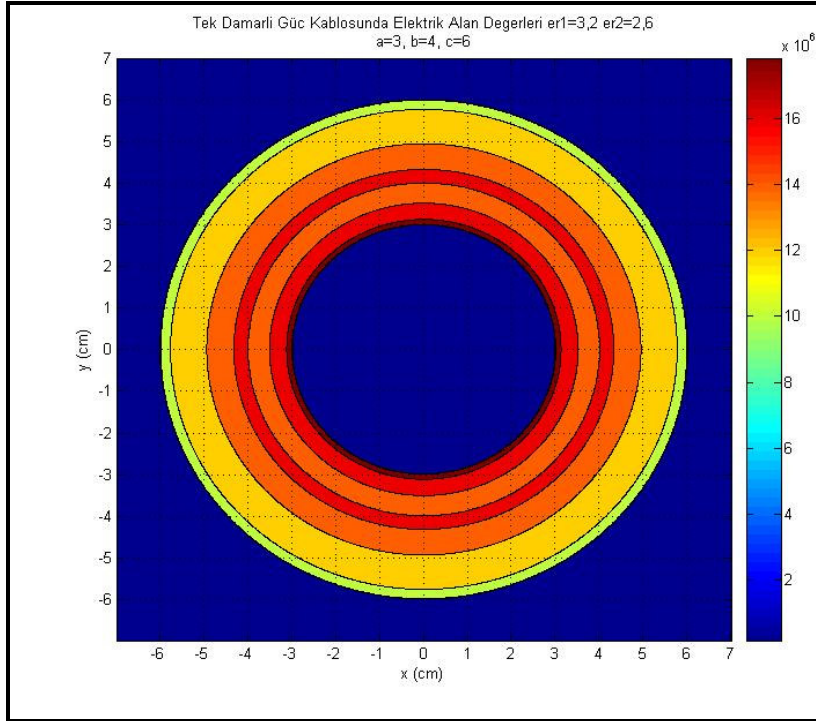


Şekil 1.7. Elektrik alan örnekleme-7, $a=2$ $b=4$ $c=6$

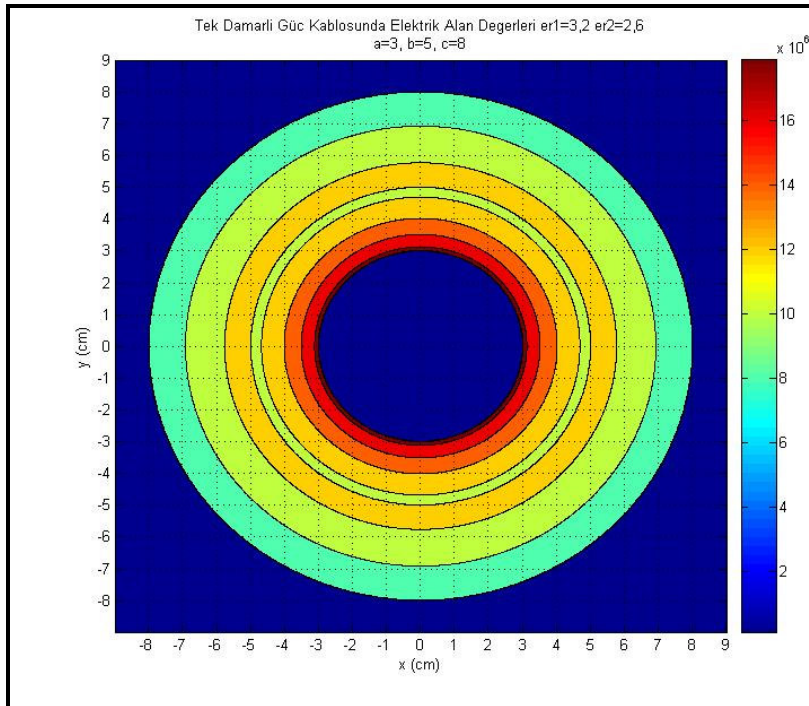


Şekil 1.8. Elektrik alan örnekleme-8, $a=2$ $b=5$ $c=7$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

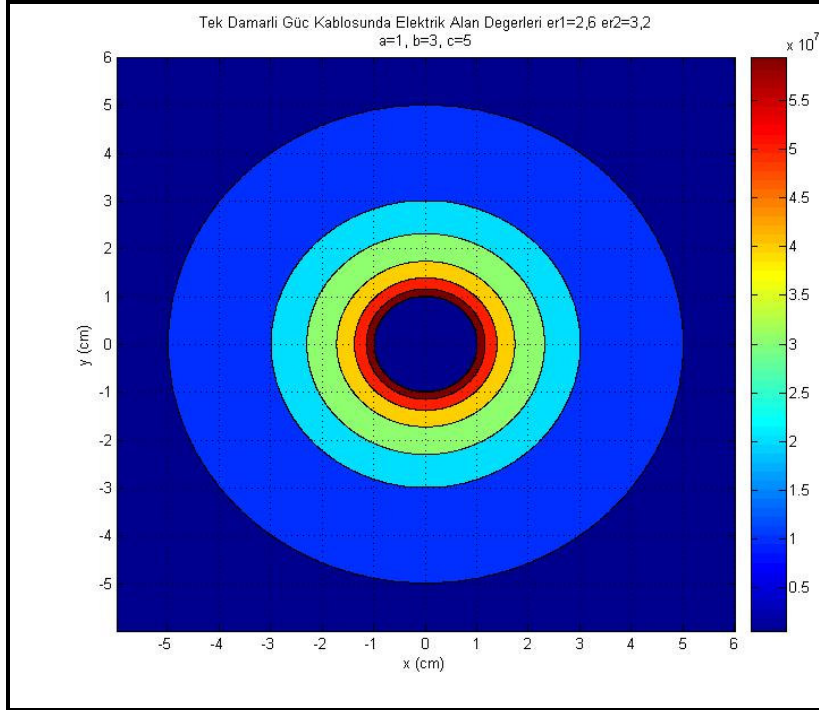


Şekil 1.9. Elektrik alan örnekleme-9, $a=3$ $b=4$ $c=6$

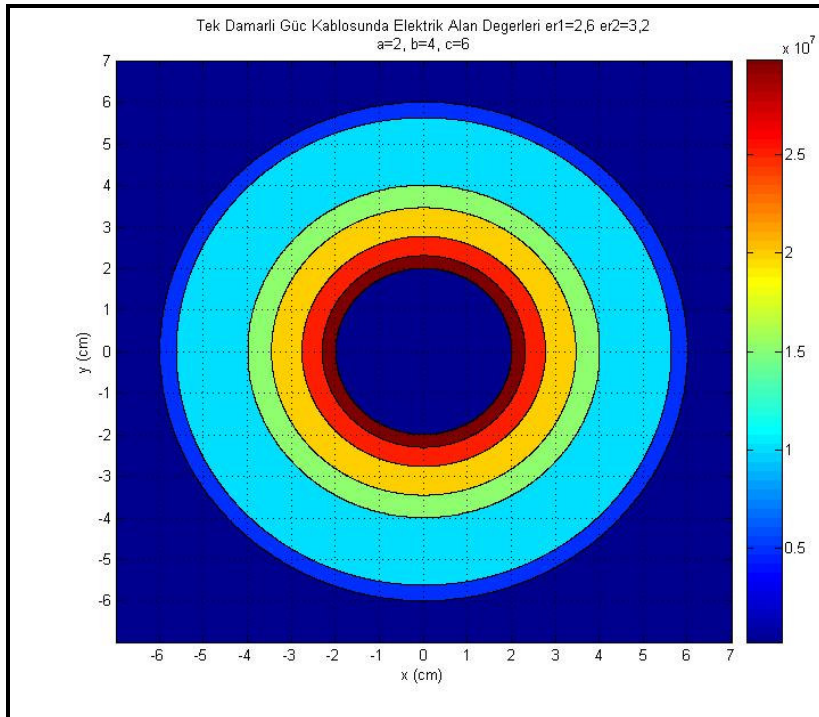


Şekil 1.10. Elektrik alan örnekleme-10, $a=3$ $b=5$ $c=8$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

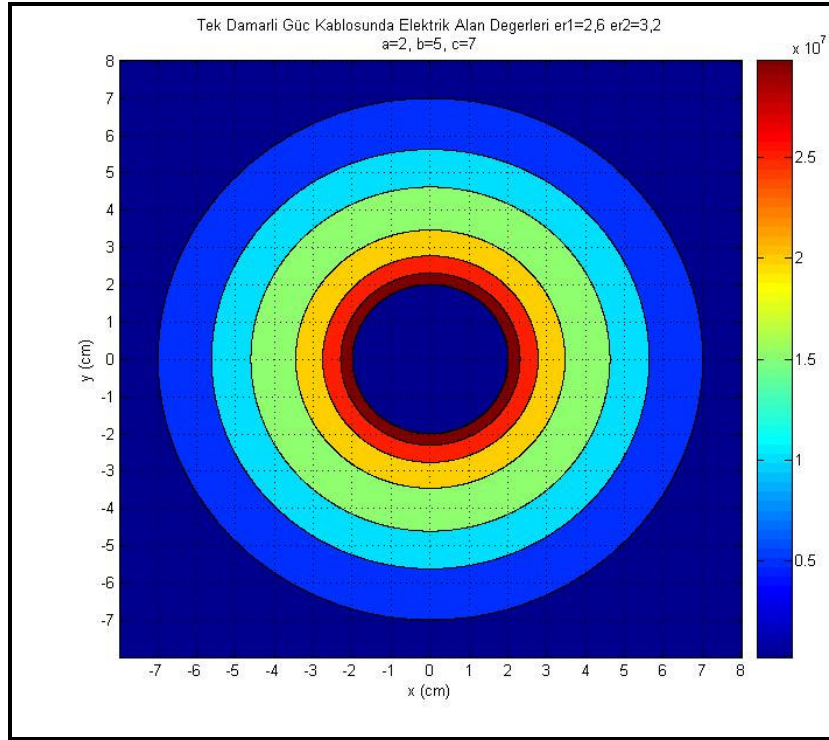


Şekil 1.11. Elektrik alan örnekleme-11, $a=1$ $b=3$ $c=5$

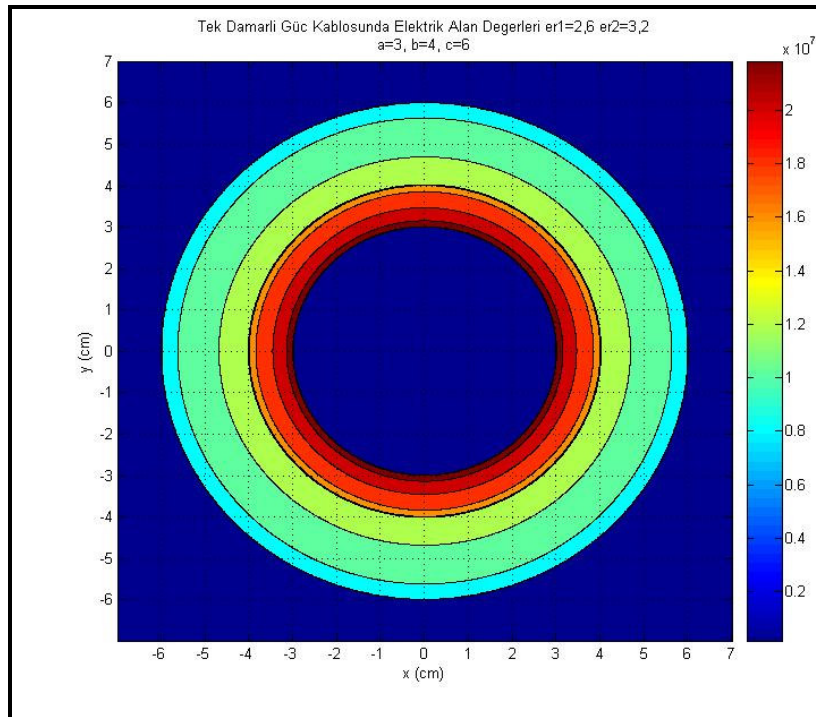


Şekil 1.12. Elektrik alan örnekleme-12, $a=2$ $b=4$ $c=6$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

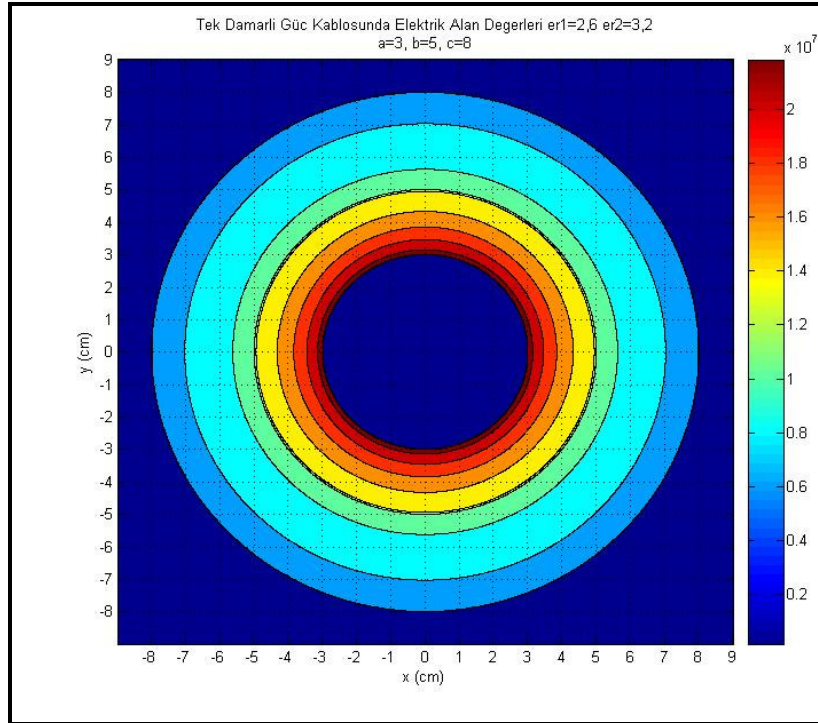


Şekil 1.13. Elektrik alan örnekleme-13, $a=2$ $b=5$ $c=7$

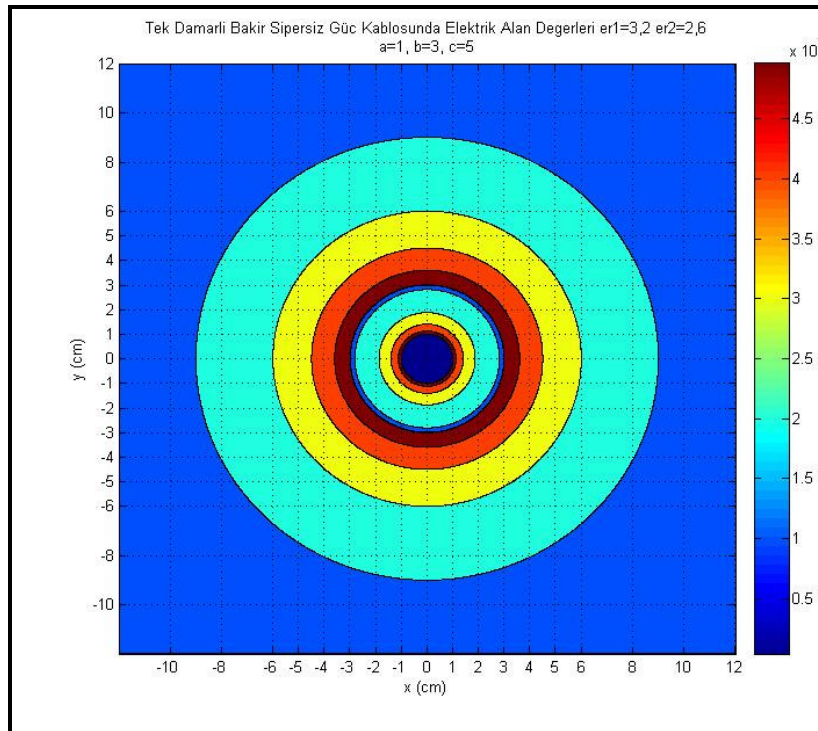


Şekil 1.14. Elektrik alan örnekleme-14, $a=3$ $b=4$ $c=6$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

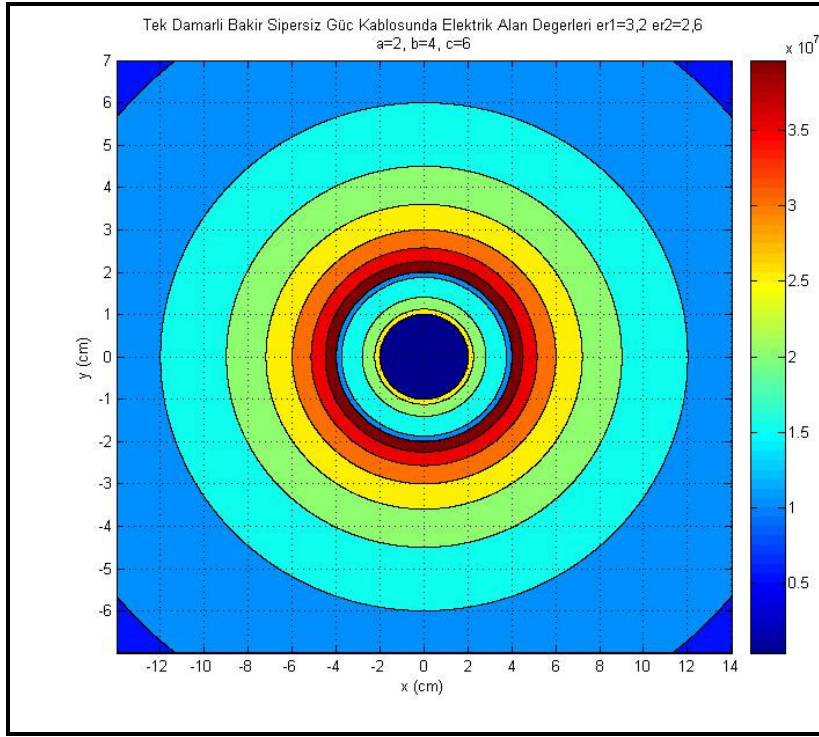


Şekil 1.15. Elektrik alan örnekleme-15, $a=3$ $b=5$ $c=8$

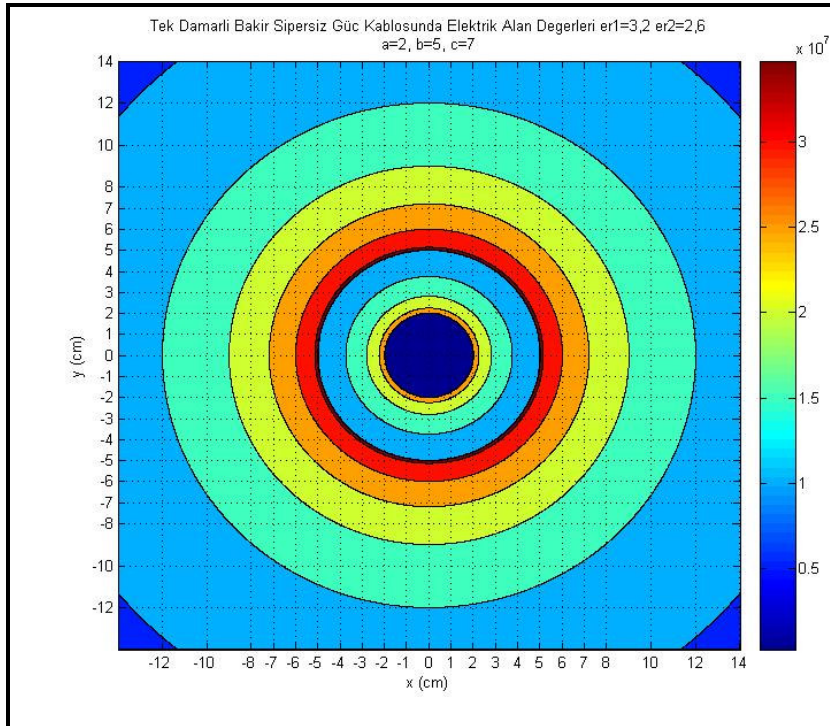


Şekil 1.16. Elektrik alan örnekleme-16, $a=1$ $b=3$ $c=5$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

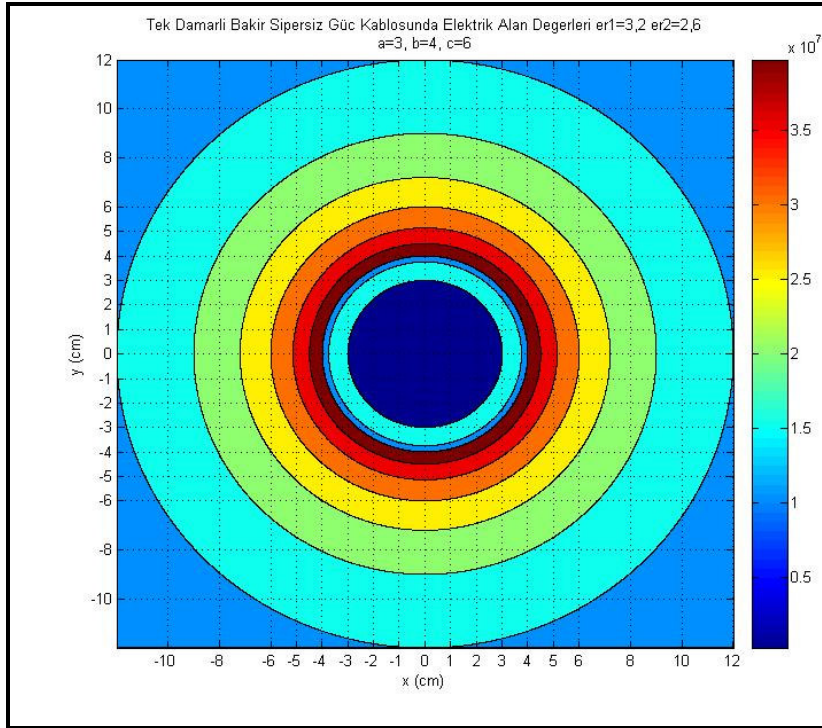


Şekil 1.17. Elektrik alan örnekleme-17, $a=2$ $b=4$ $c=6$

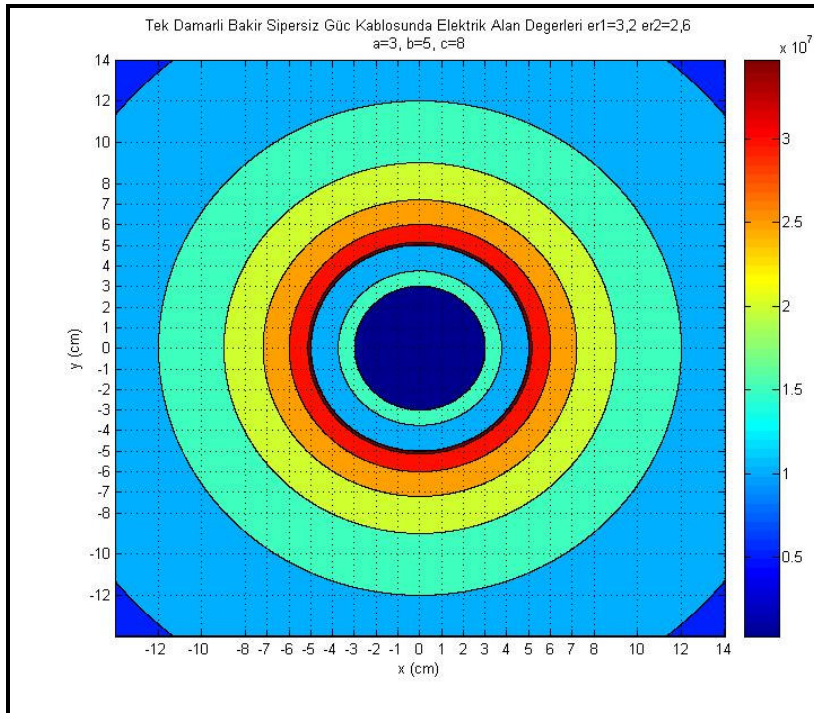


Şekil 1.18. Elektrik alan örnekleme-18, $a=2$ $b=5$ $c=7$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

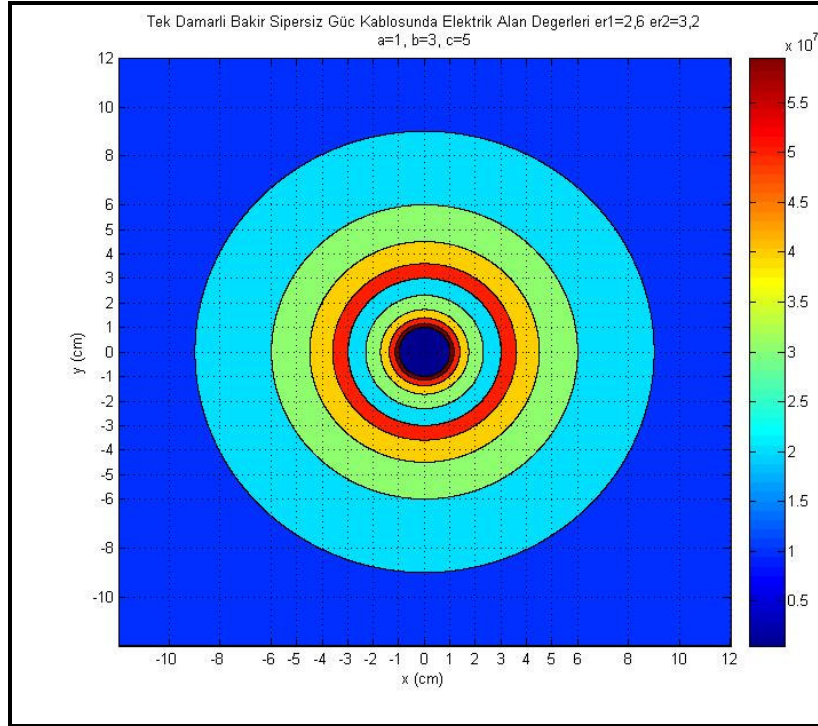


Şekil 1.19. Elektrik alan örnekleme-19, $a=3$ $b=4$ $c=6$

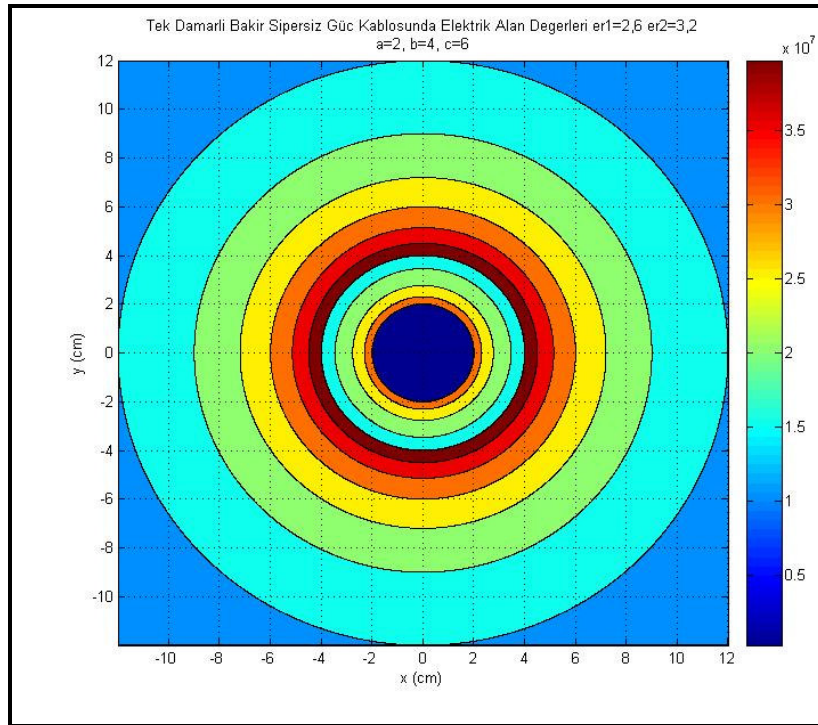


Şekil 1.20. Elektrik alan örnekleme-20, $a=3$ $b=5$ $c=8$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

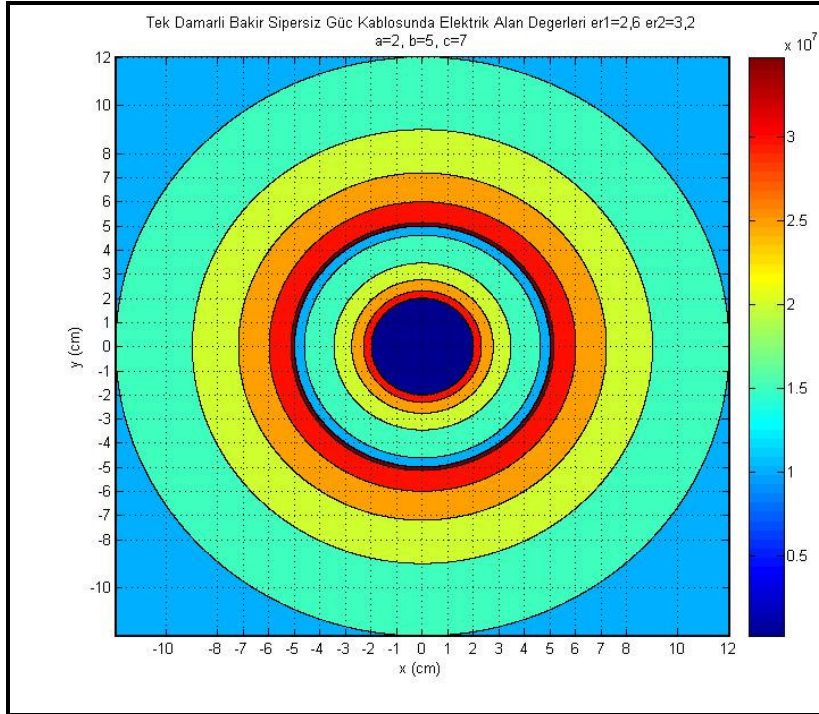


Şekil 1.21. Elektrik alan örnekleme-21, $a=1$ $b=3$ $c=5$

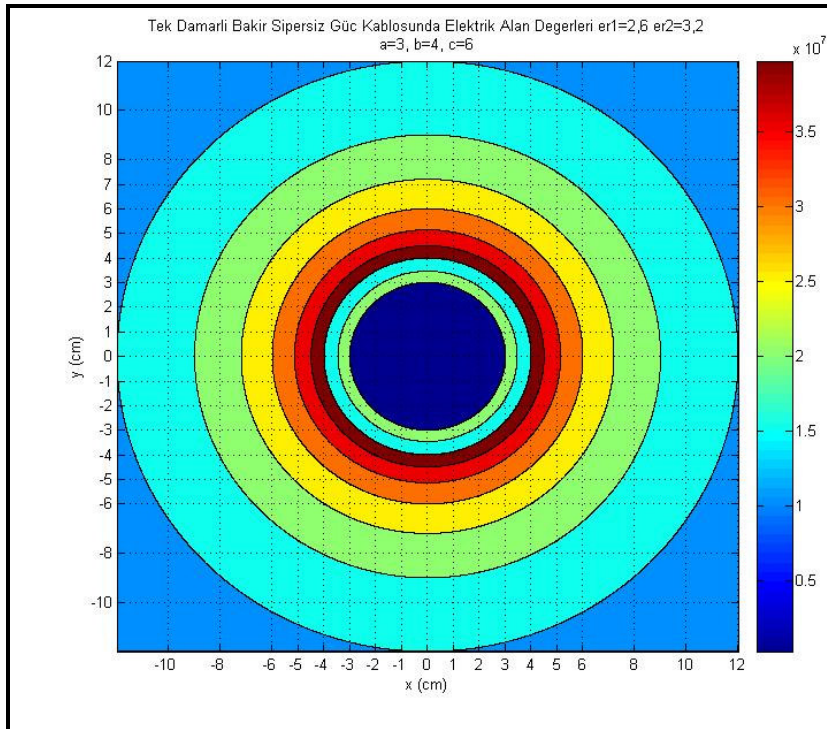


Şekil 1.22. Elektrik alan örnekleme-22, $a=2$ $b=4$ $c=6$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

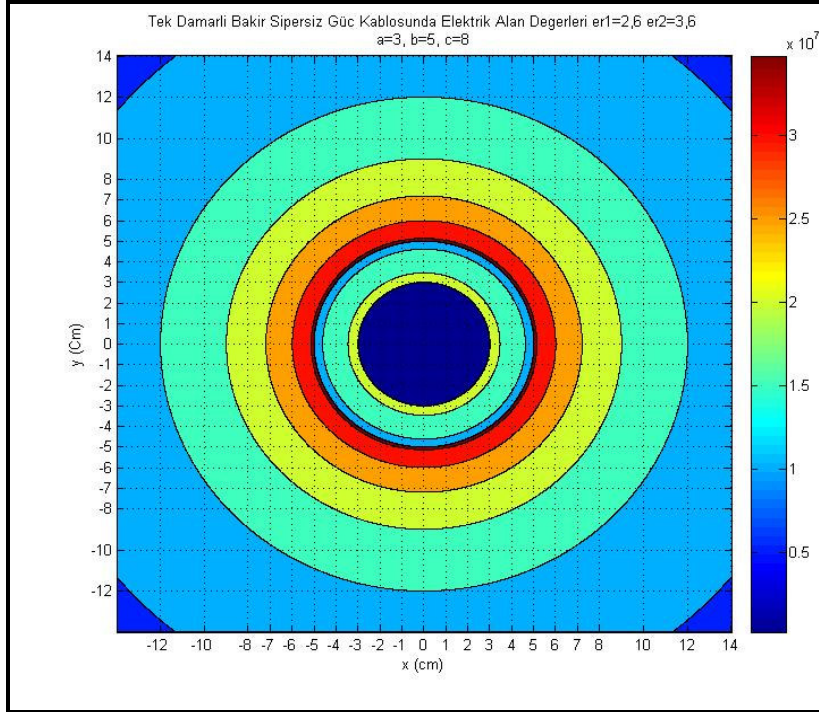


Şekil 1.23. Elektrik alan örnekleme-23, $a=2$ $b=5$ $c=7$



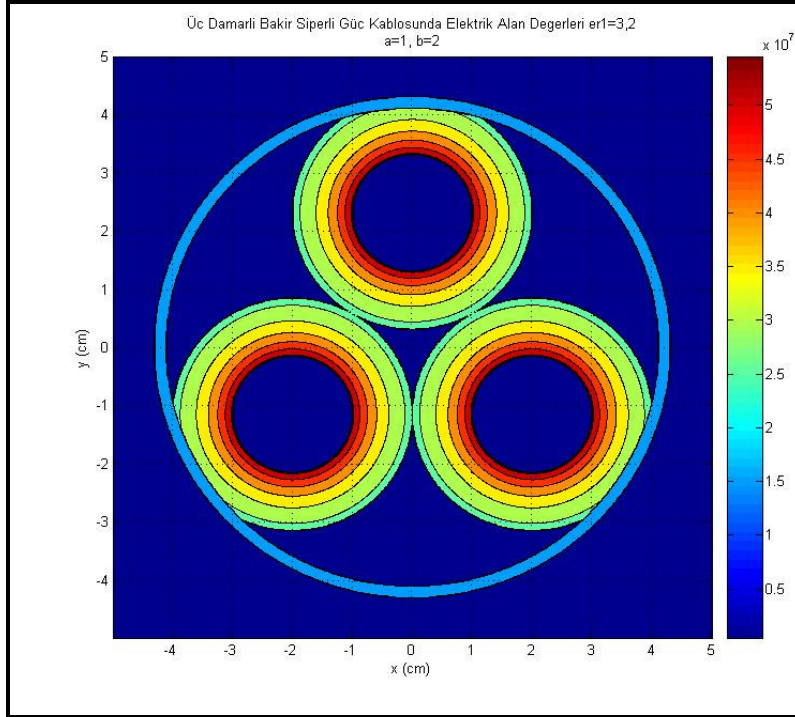
Şekil 1.24. Elektrik alan örnekleme-24, $a=3$ $b=4$ $c=6$

EK-1 (Devam) Tek damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

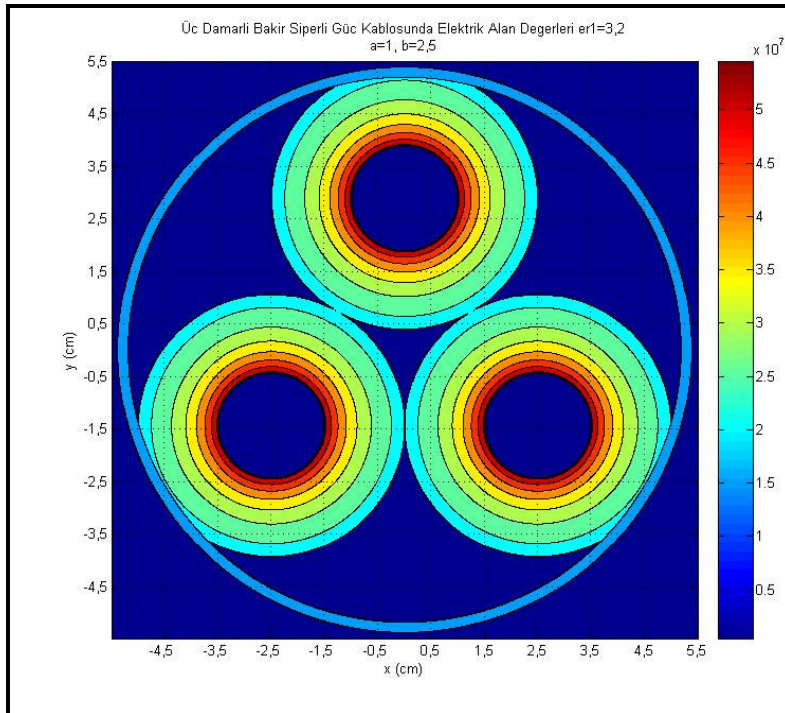


Şekil 1.25. Elektrik alan örnekleme-25, $a=3$ $b=5$ $c=8$

EK-2 Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

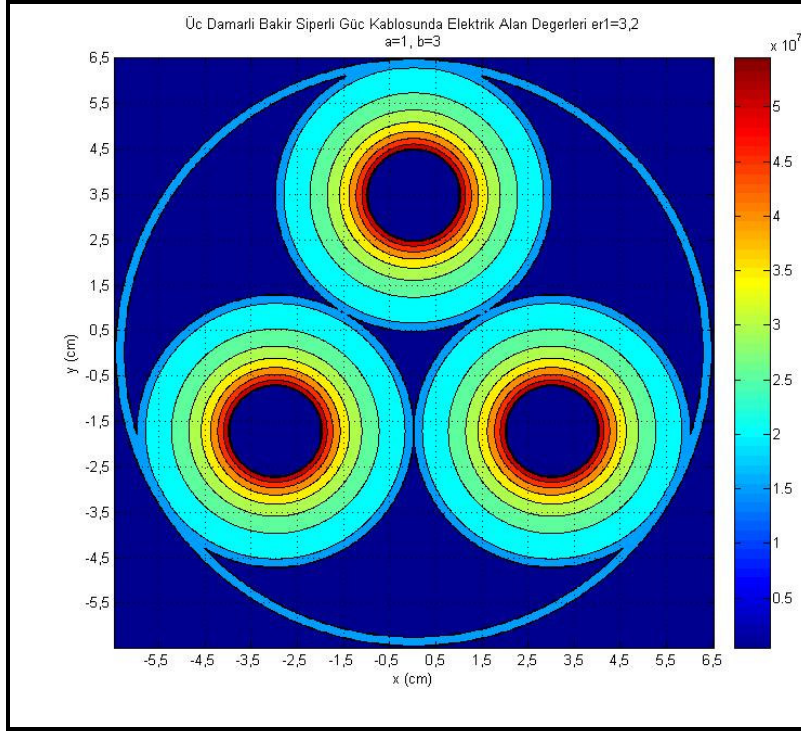


Şekil 2.1. Elektrik alan örnekleme-1, $a=1$ $b=2$

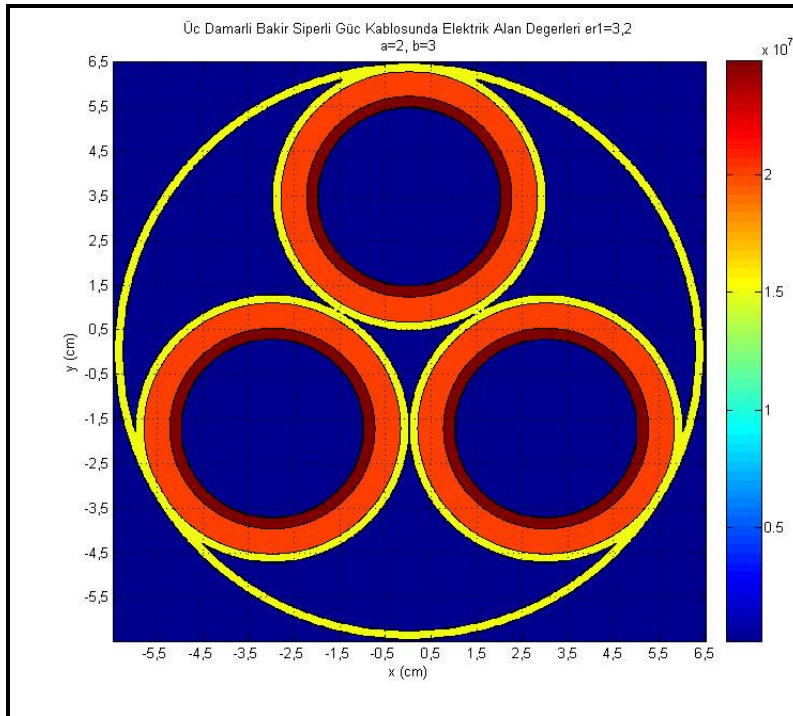


Şekil 2.2. Elektrik alan örnekleme-2, $a=1$ $b=2,5$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

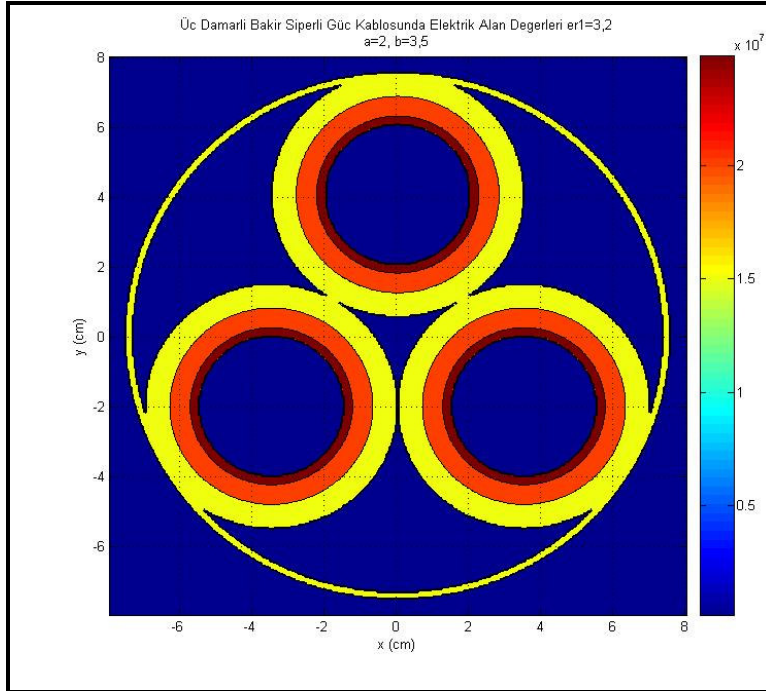


Şekil 2.3. Elektrik alan örnekleme-3, $a=1$ $b=3$

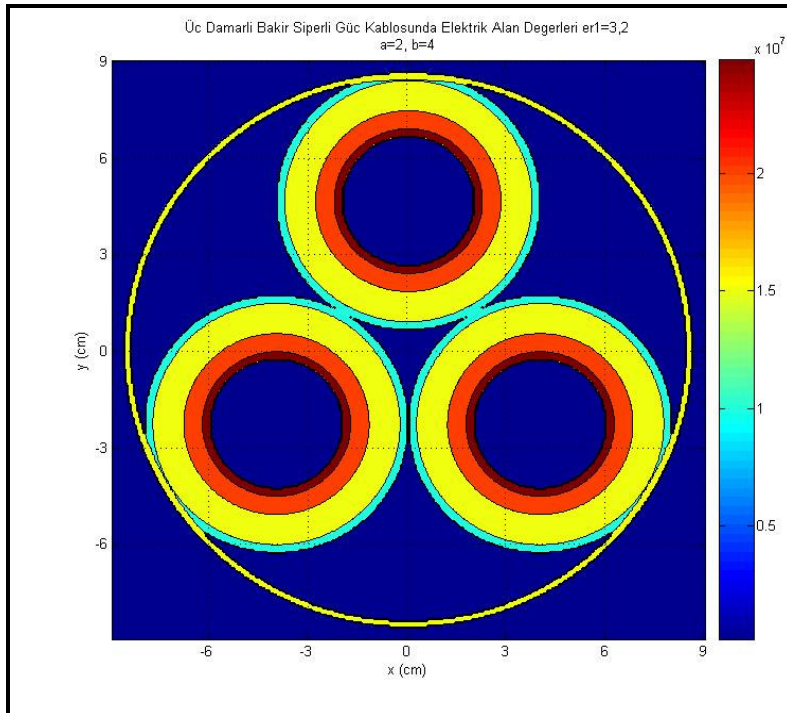


Şekil 2.4. Elektrik alan örnekleme-4, $a=2$ $b=3$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

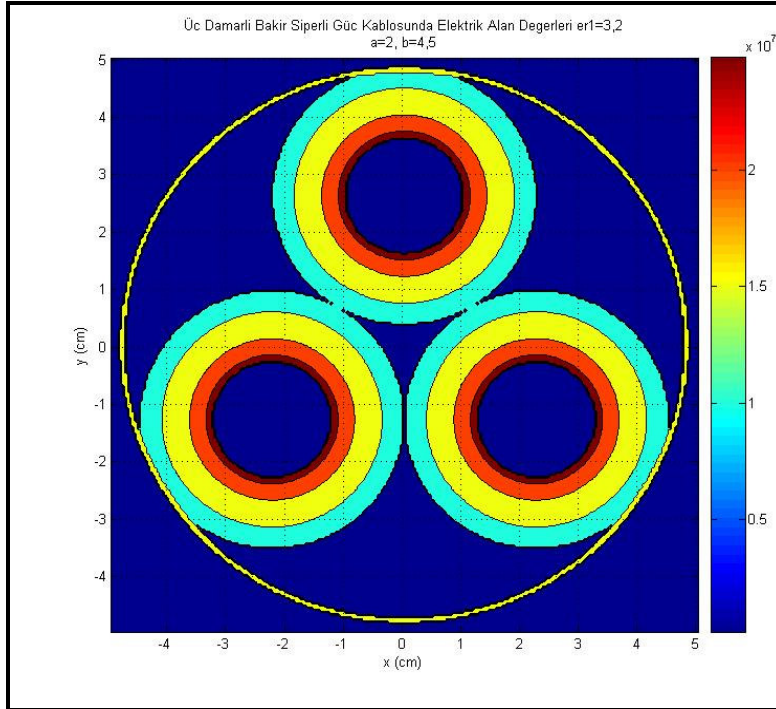


Şekil 2.5. Elektrik alan örnekleme-5, $a=2$ $b=3,5$

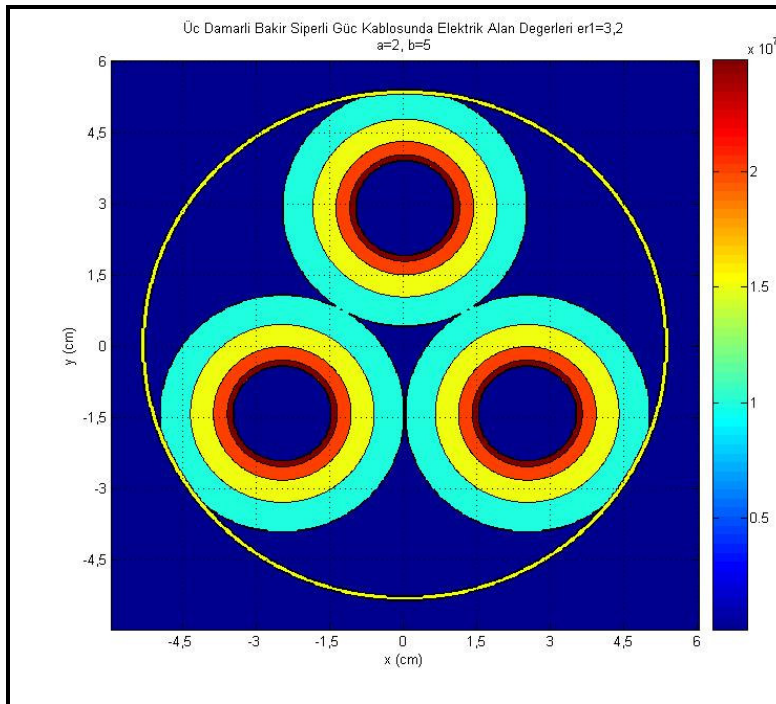


Şekil 2.6. Elektrik alan örnekleme-6, $a=2$ $b=4$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

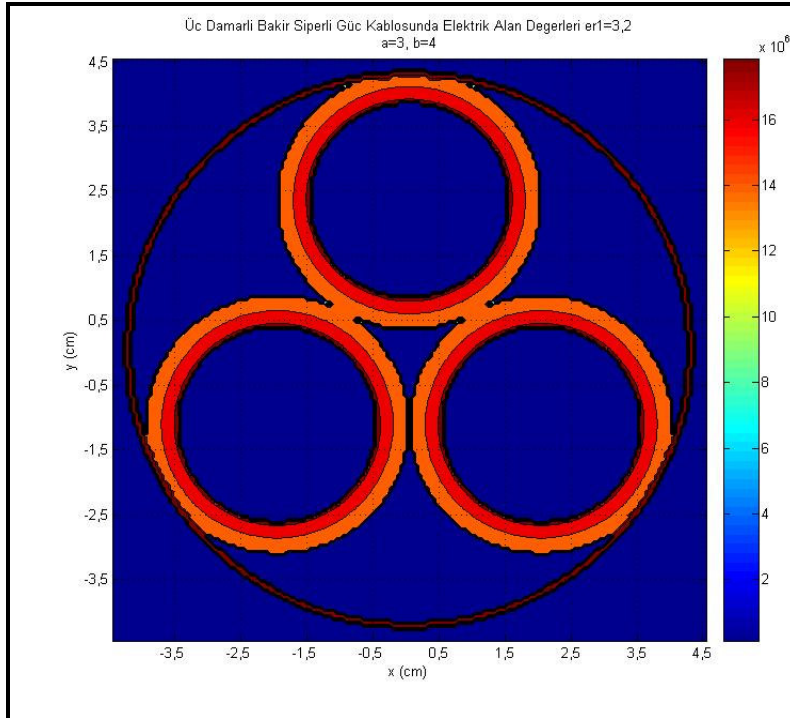


Şekil 2.7. Elektrik alan örnekleme-7, $a=2$ $b=4,5$

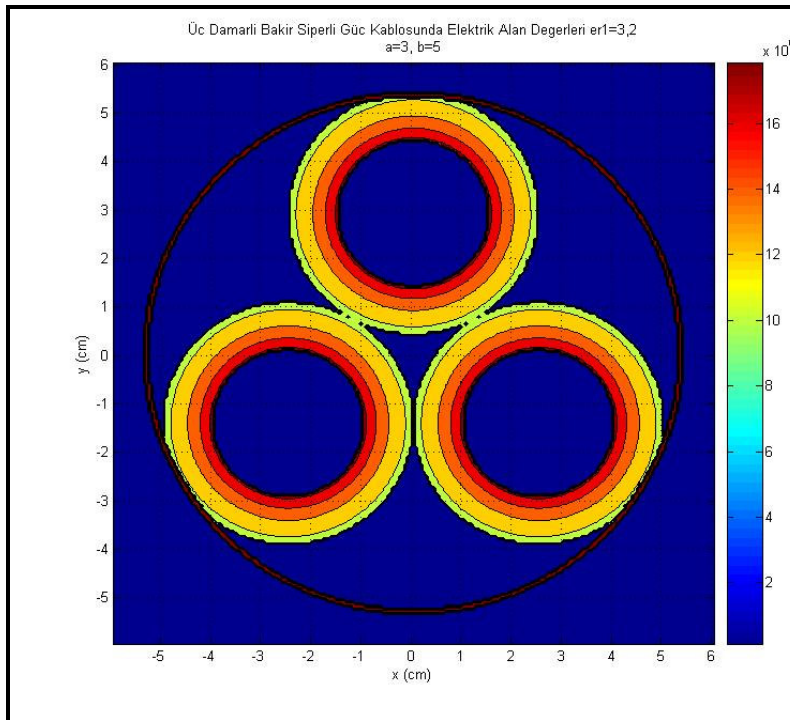


Şekil 2.8. Elektrik alan örnekleme-8, $a=2$ $b=5$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

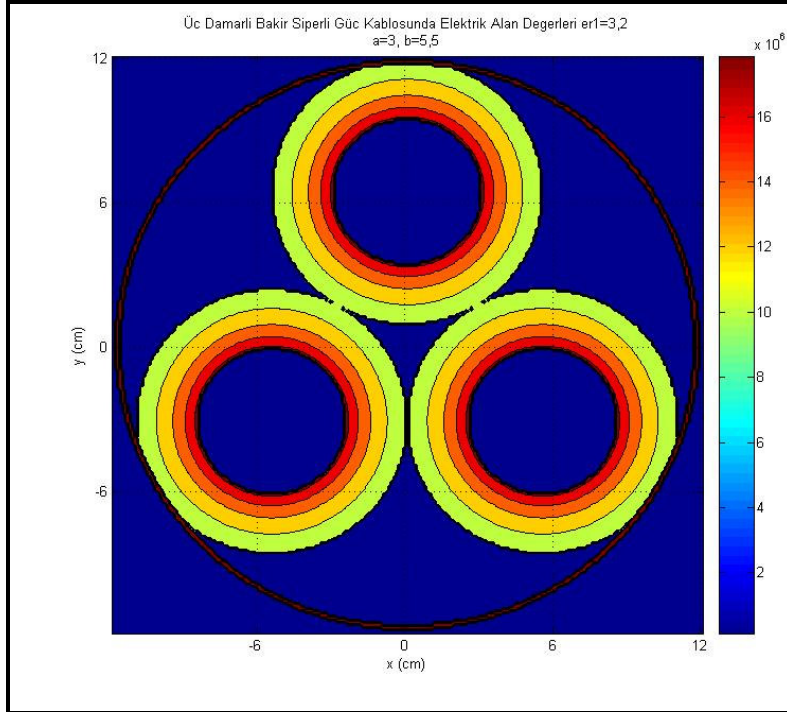


Şekil 2.9. Elektrik alan örnekleme-9, $a=3$ $b=4$

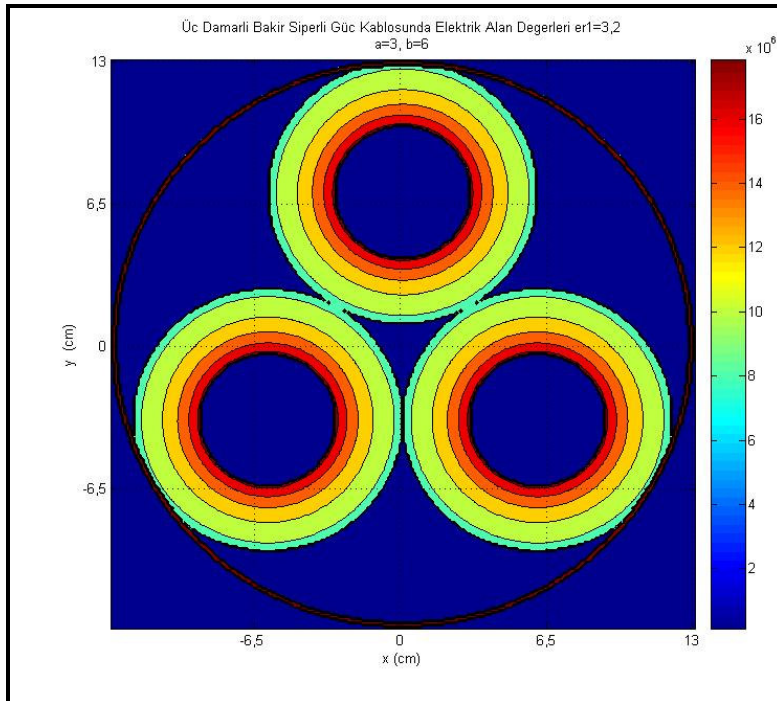


Şekil 2.10. Elektrik alan örnekleme-10, $a=3$ $b=5$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

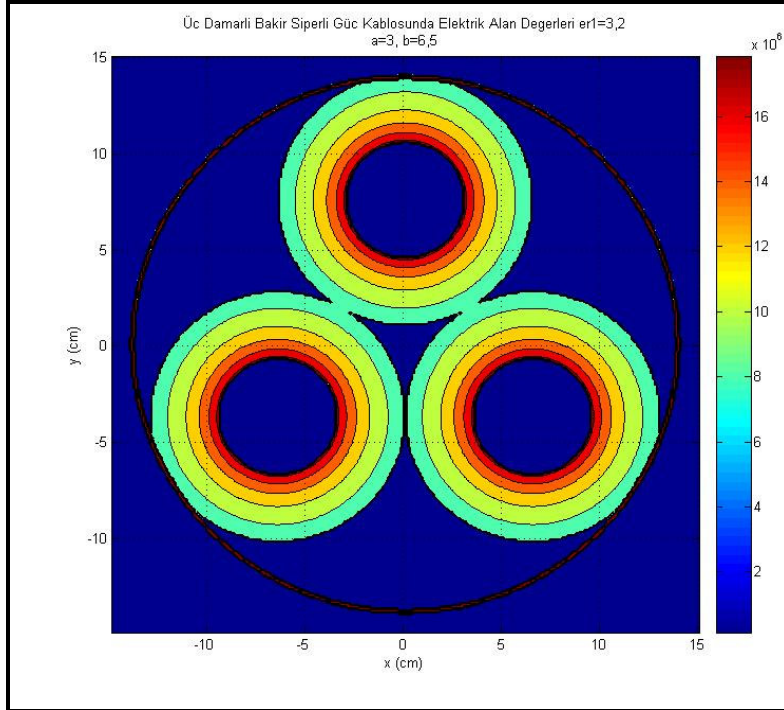


Şekil 2.11. Elektrik alan örnekleme-11, $a=3$ $b=5,5$

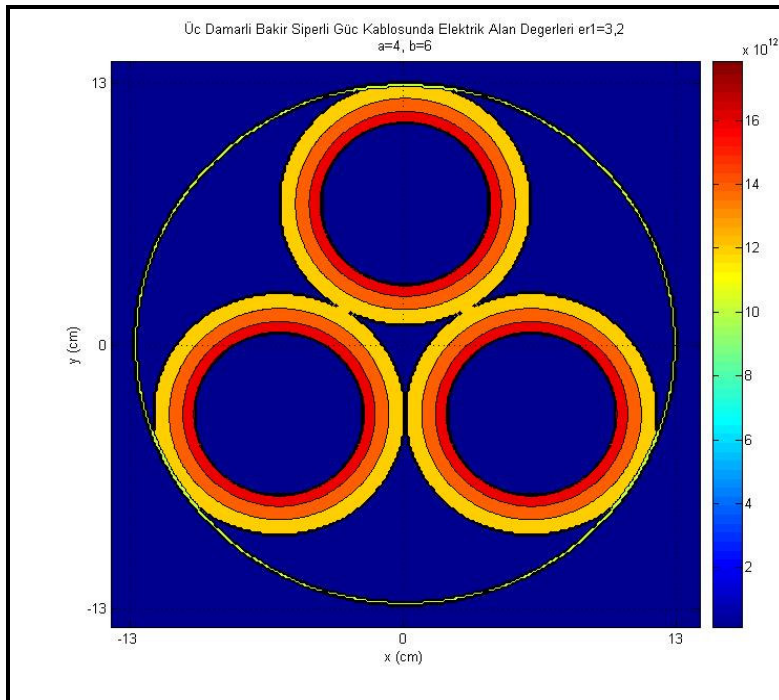


Şekil 2.12. Elektrik alan örnekleme-12, $a=3$ $b=6$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

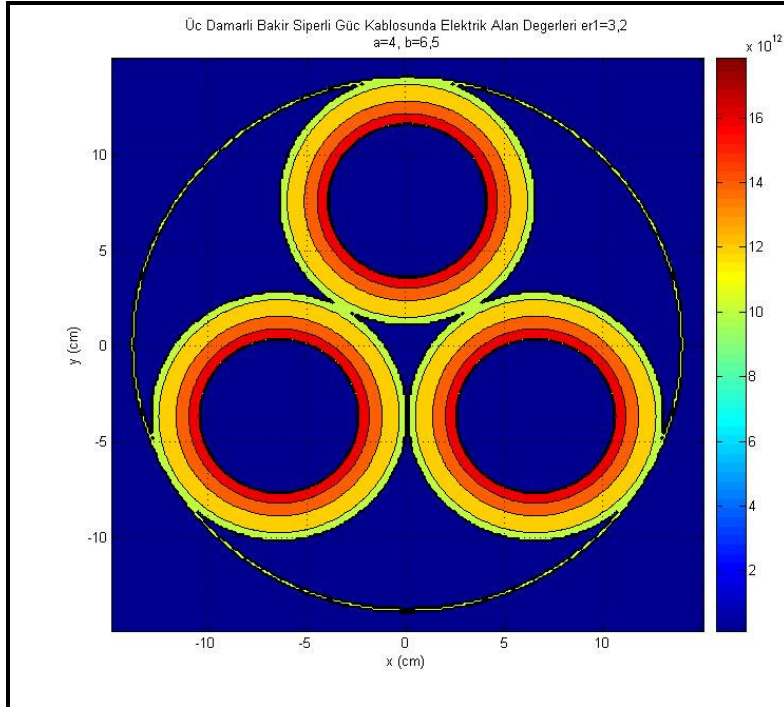


Şekil.2.13. Elektrik alan örnekleme-13, $a=3$ $b=6,5$

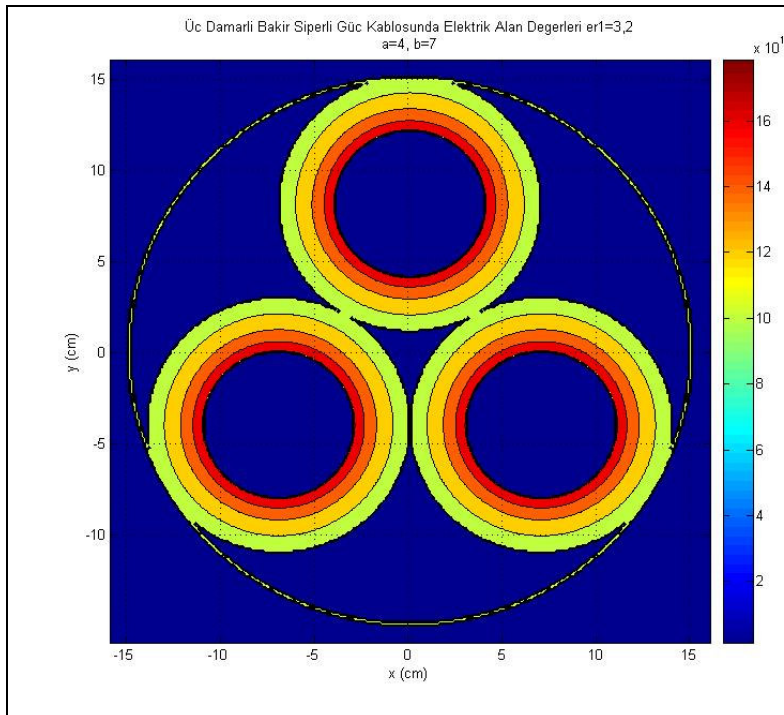


Şekil 2.14. Elektrik alan örnekleme-14, $a=4$ $b=6$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

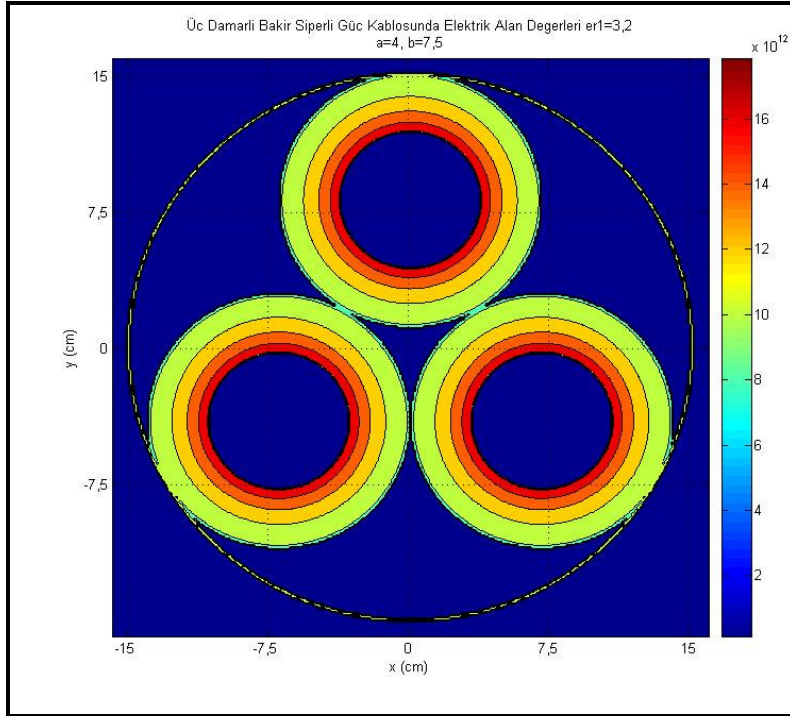


Şekil 2.15. Elektrik alan örnekleme-15, $a=4$ $b=6,5$

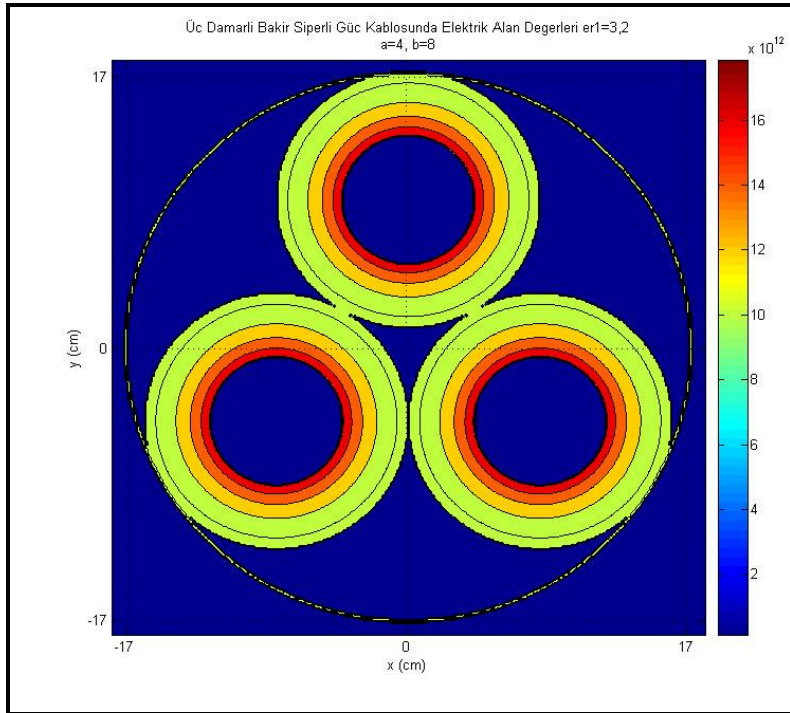


Şekil 2.16. Elektrik alan örnekleme-16, $a=4$ $b=7$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

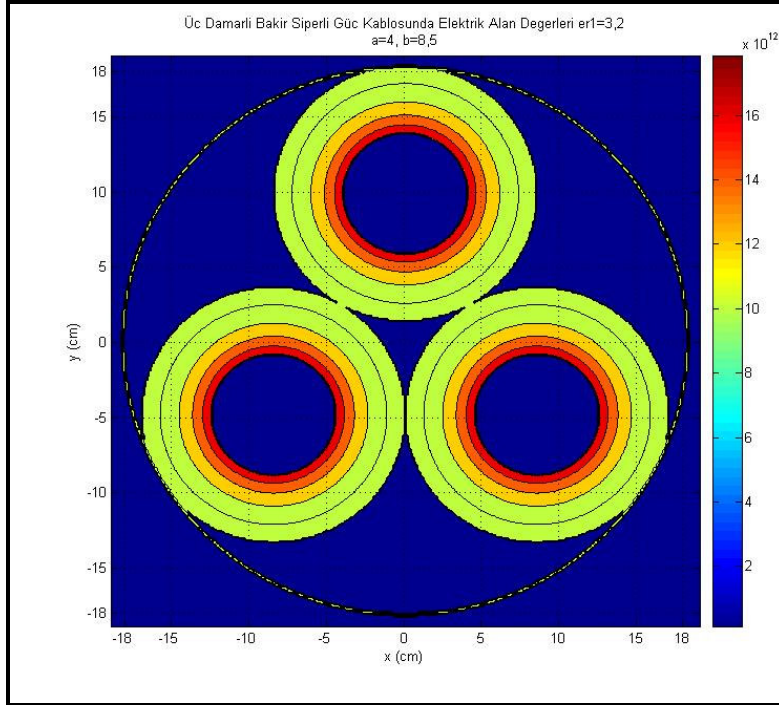


Şekil 2.17. Elektrik alan örnekleme-17, $a=4$ $b=7,5$

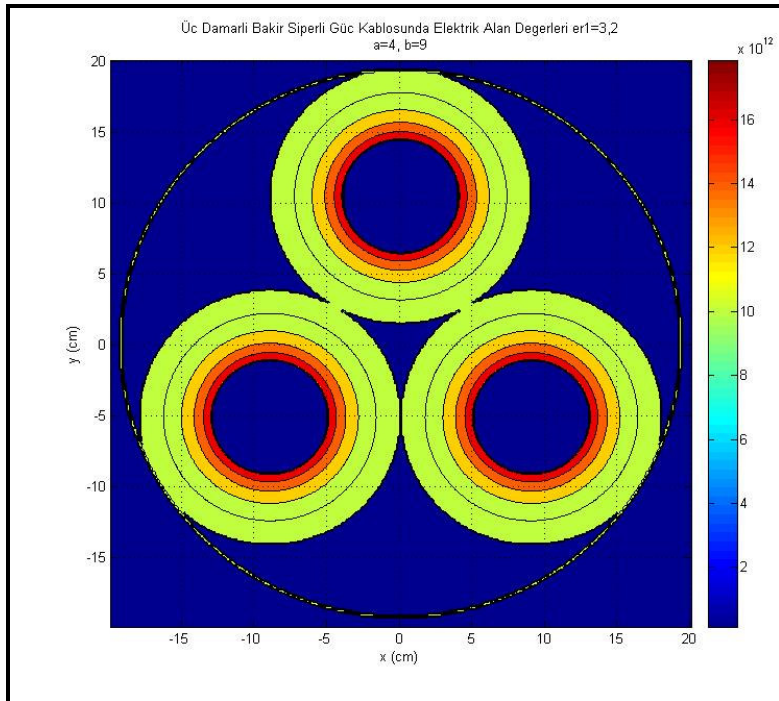


Şekil 2.18. Elektrik alan örnekleme-18, $a=4$ $b=8$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

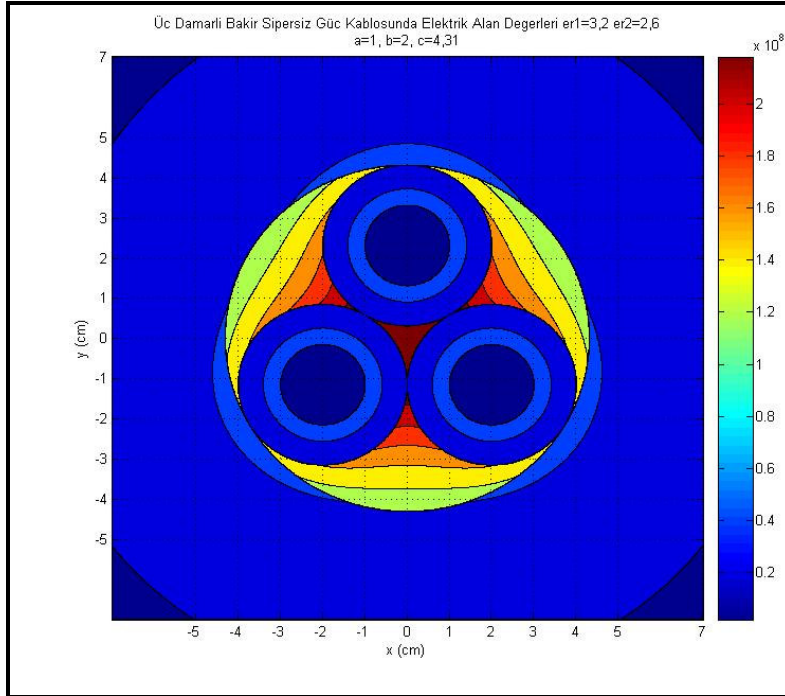


Şekil 2.19. Elektrik alan örnekleme-19, $a=4$ $b=8,5$

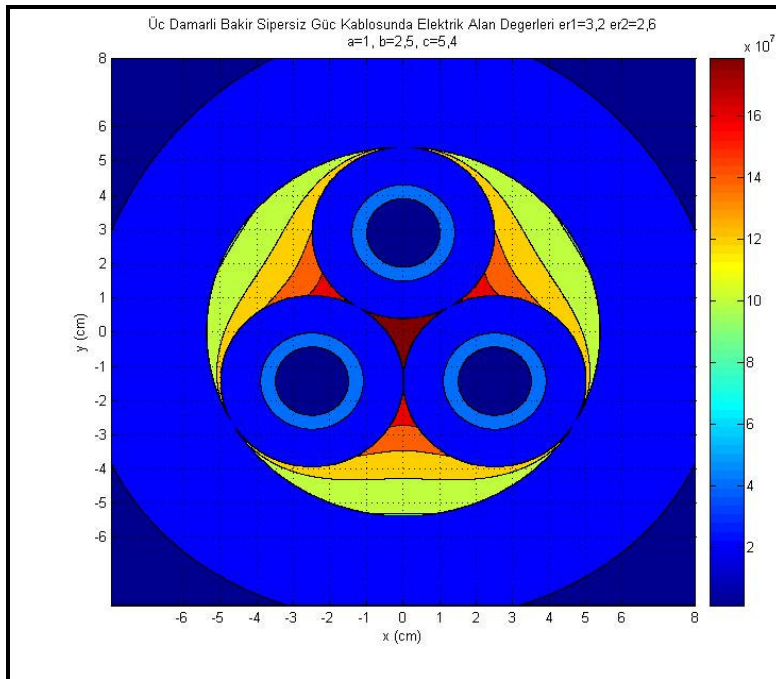


Şekil 2.20. Elektrik alan örnekleme-20, $a=4$ $b=9$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

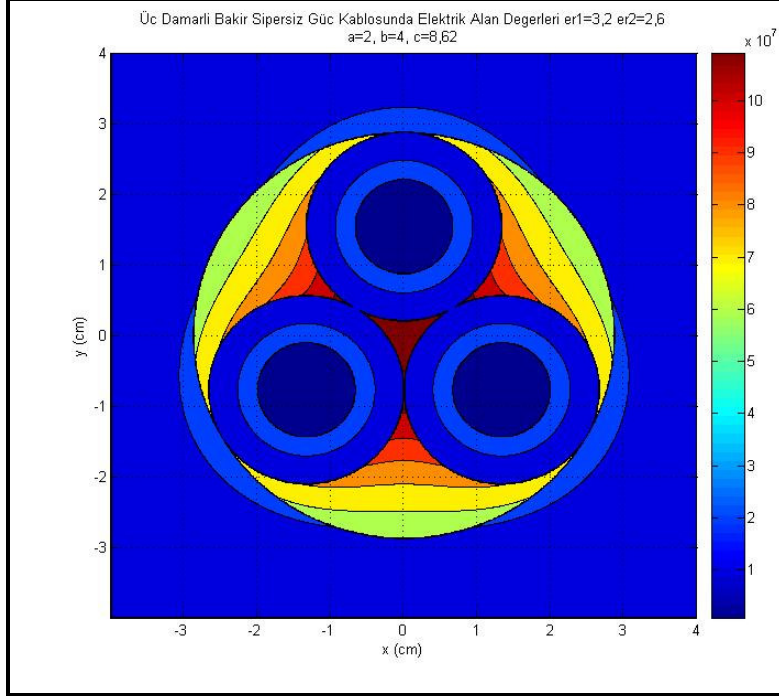


Şekil 2.21. Elektrik alan örnekleme-21, $a=1$ $b=2$ $c=4,31$

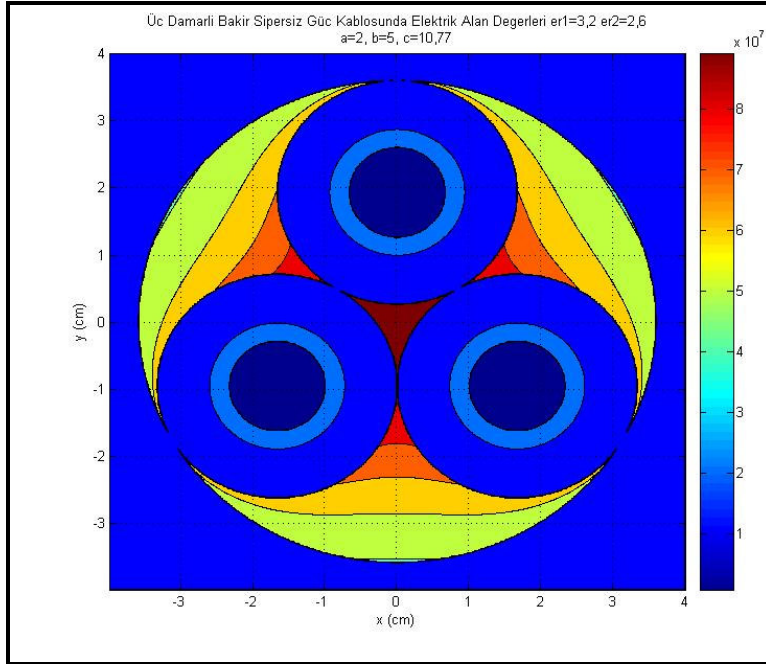


Şekil 2.22. Elektrik alan örnekleme-22, $a=1$ $b=2,5$ $c=5,4$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

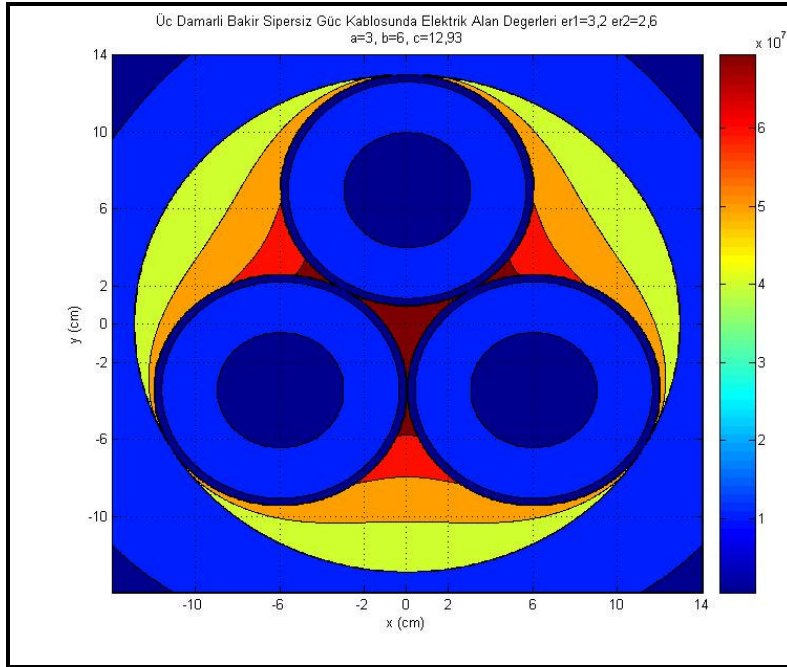


Şekil 2.23. Elektrik alan örnekleme-23, $a=2$ $b=4$ $c=8,62$

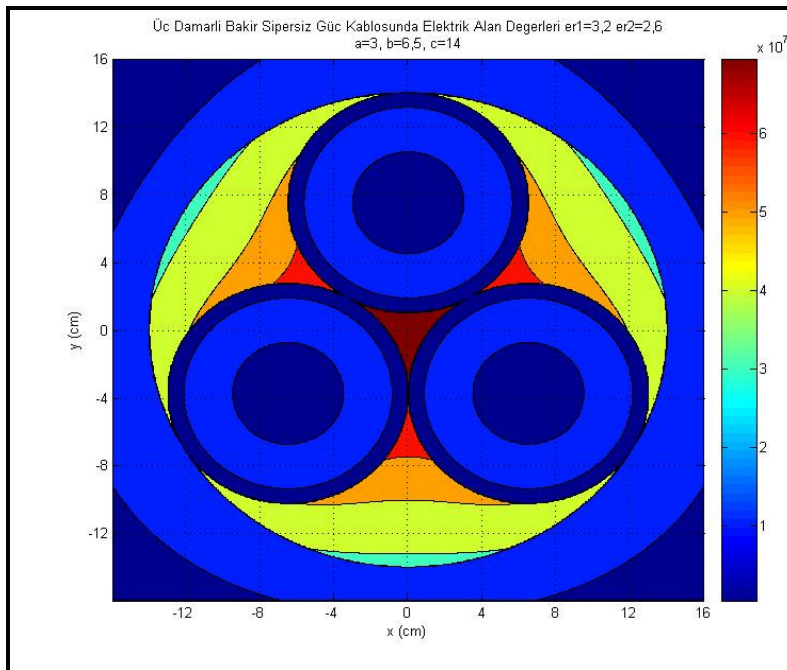


Şekil 2.24. Elektrik alan örnekleme-24, $a=2$ $b=5$ $c=10,77$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

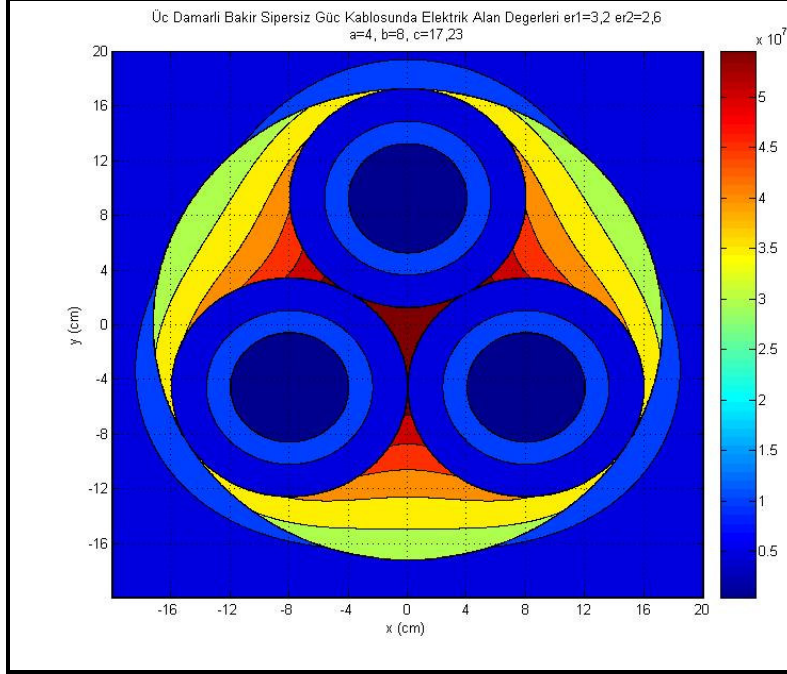


Şekil 2.25. Elektrik alan örnekleme-25, $a=3$ $b=6$ $c=12,93$

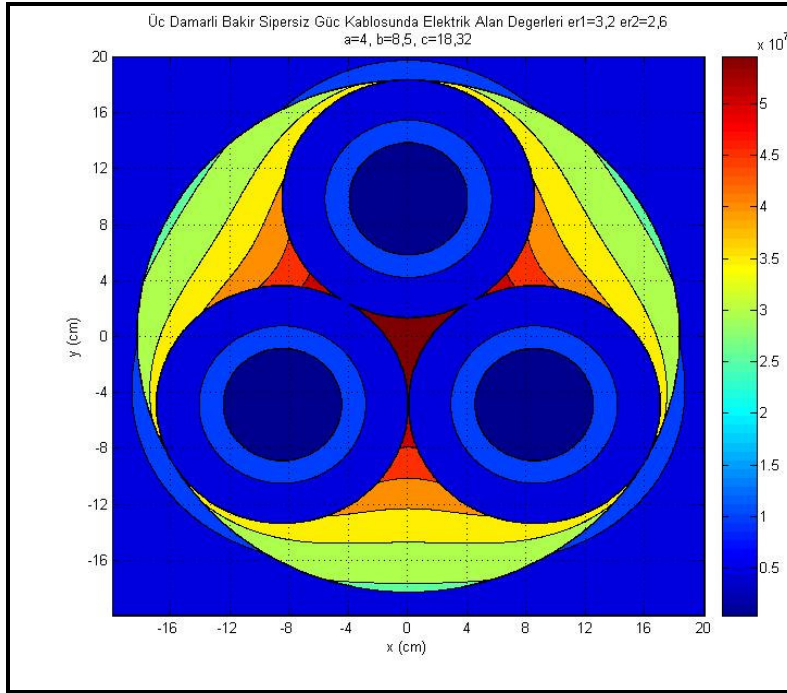


Şekil 2.26. Elektrik alan örnekleme-26, $a=3$ $b=6,5$ $c=14$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

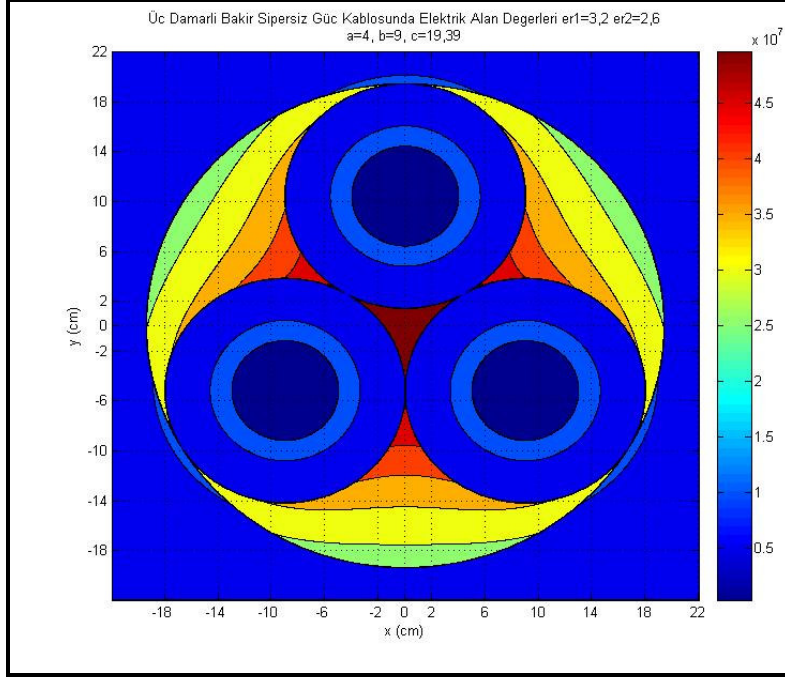


Şekil 2.27. Elektrik alan örnekleme-27, $a=4$ $b=8$ $c=17,23$

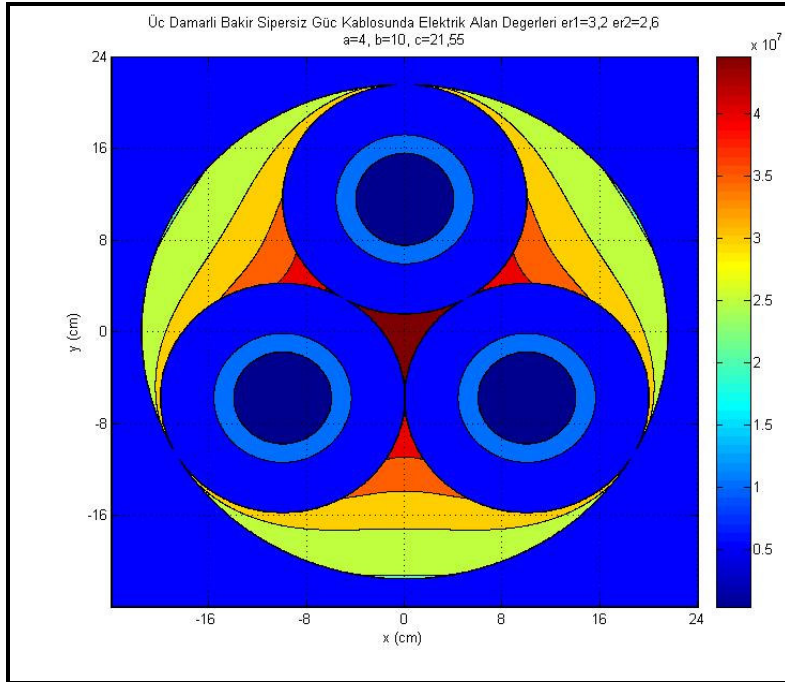


Şekil 2.28. Elektrik alan örnekleme-28, $a=4$ $b=8,5$ $c=18,32$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

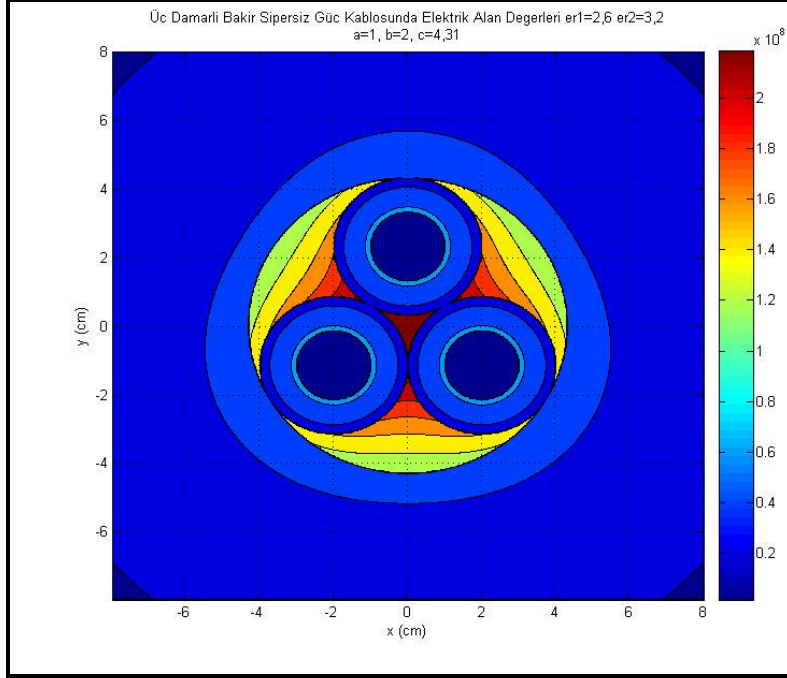


Şekil 2.29. Elektrik alan örnekleme-29, $a=4$ $b=9$ $c=19,39$

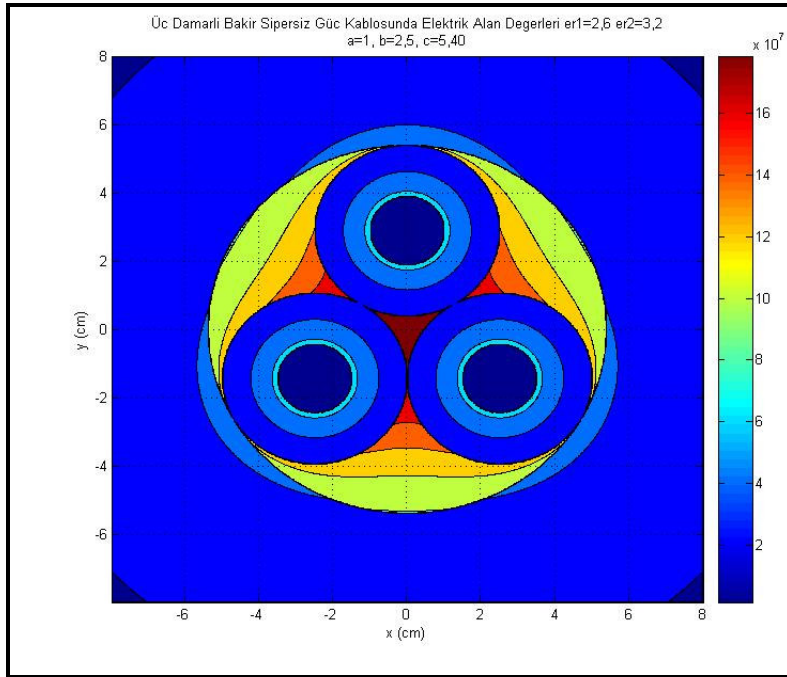


Şekil 2.30. Elektrik alan örnekleme-30, $a=4$ $b=10$ $c=21,55$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

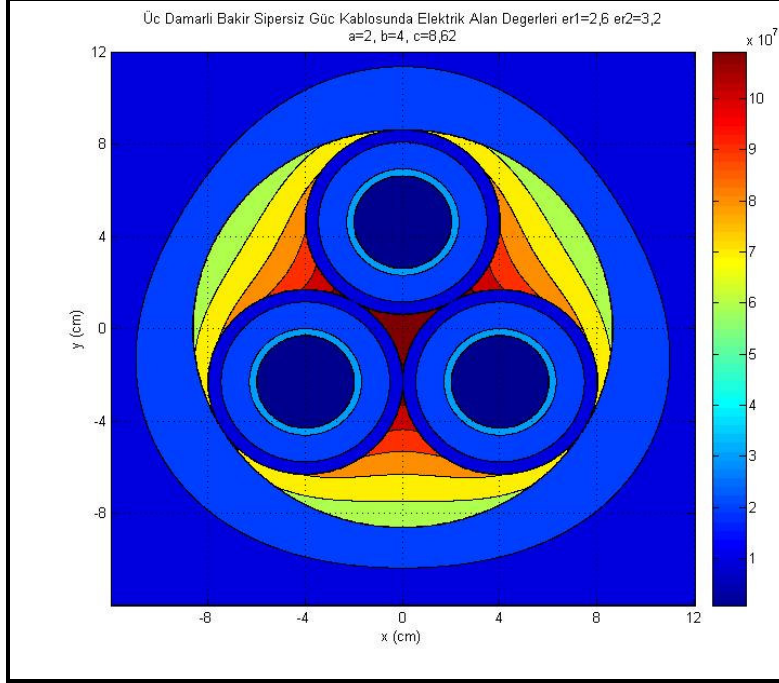


Şekil 2.31. Elektrik alan örnekleme-31, $a=1$ $b=2$ $c=4,31$

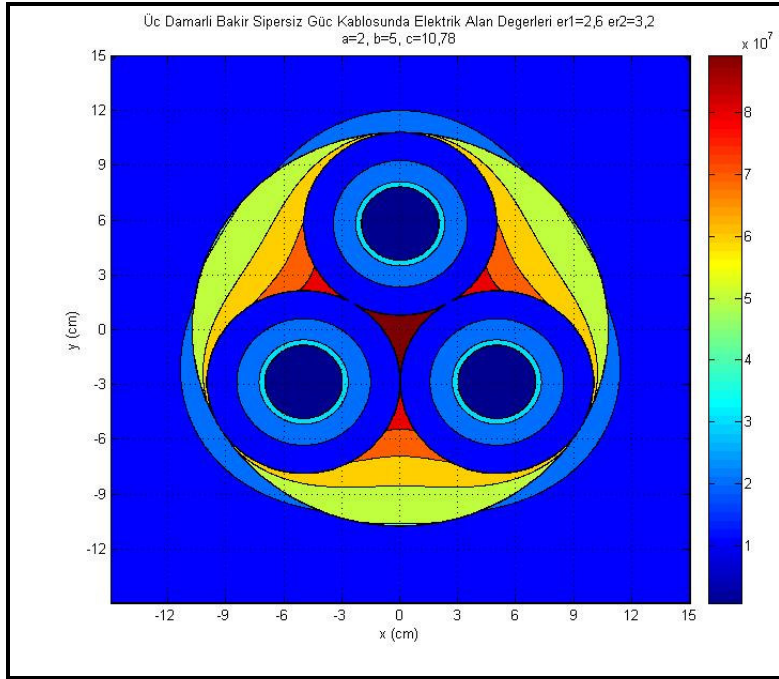


Şekil 2.32. Elektrik alan örnekleme-32, $a=1$ $b=2,5$ $c=5,40$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

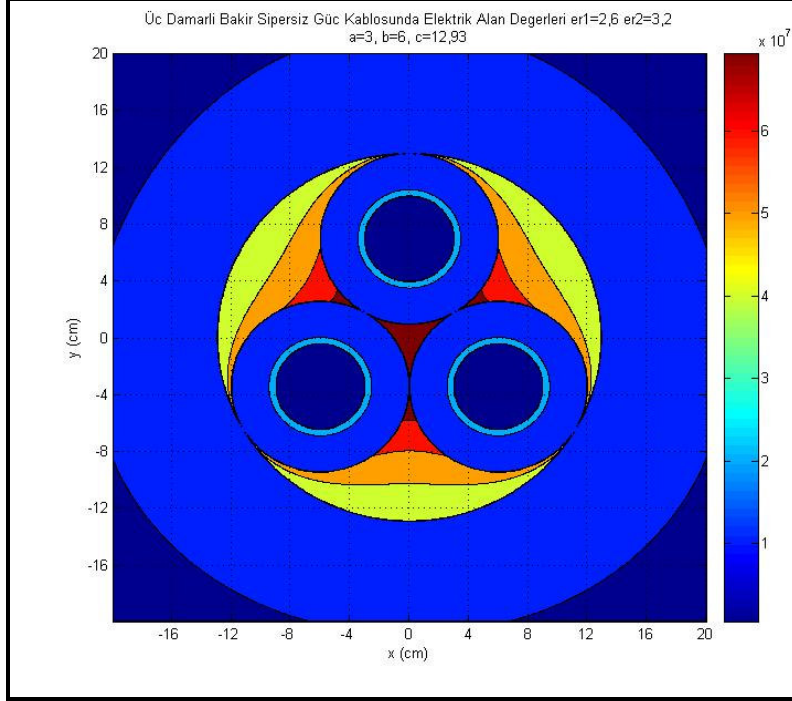


Şekil 2.33. Elektrik alan örnekleme-33, $a=2$ $b=4$ $c=8,62$

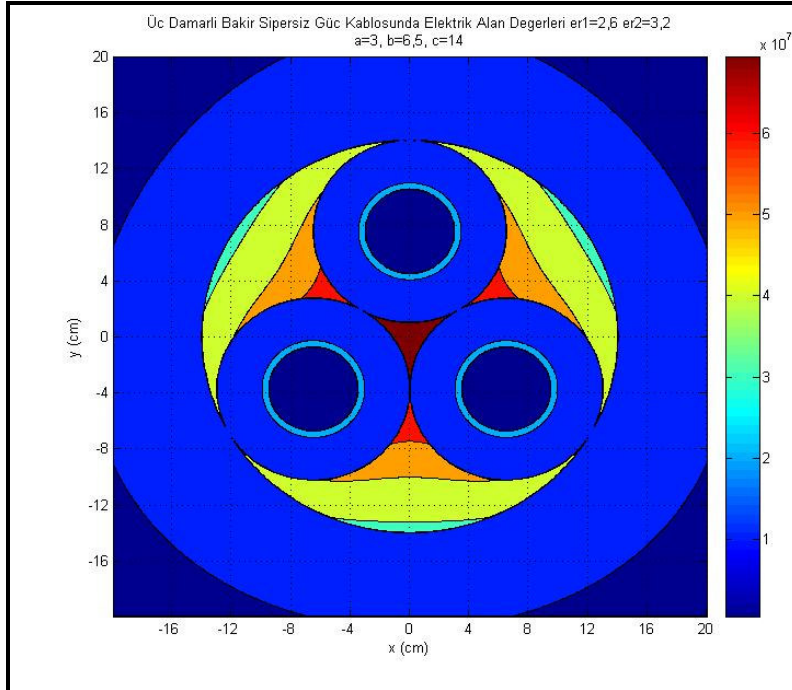


Şekil 2.34. Elektrik alan örnekleme-34, $a=2$ $b=5$ $c=10,78$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

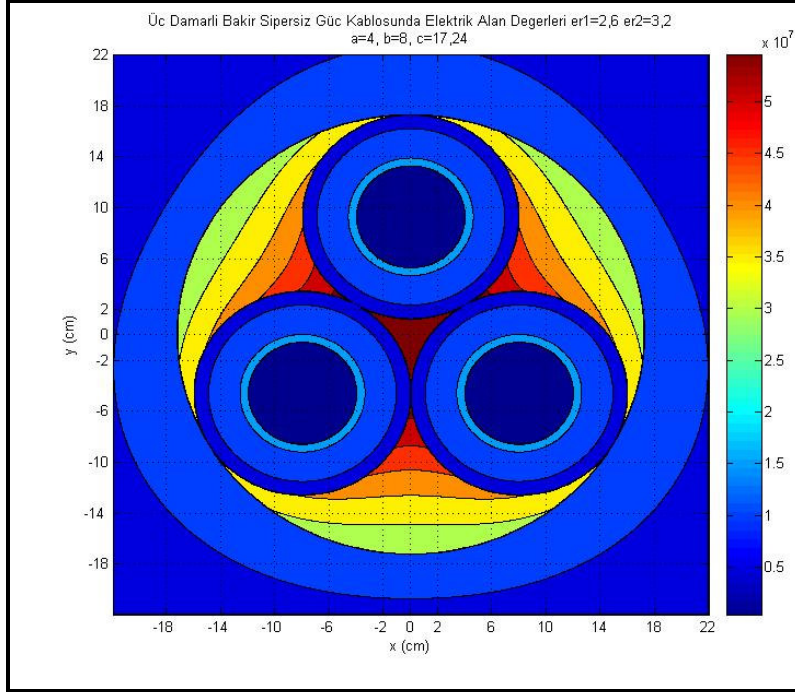


Şekil 2.35. Elektrik alan örnekleme-35, $a=3$ $b=6$ $c=12,93$

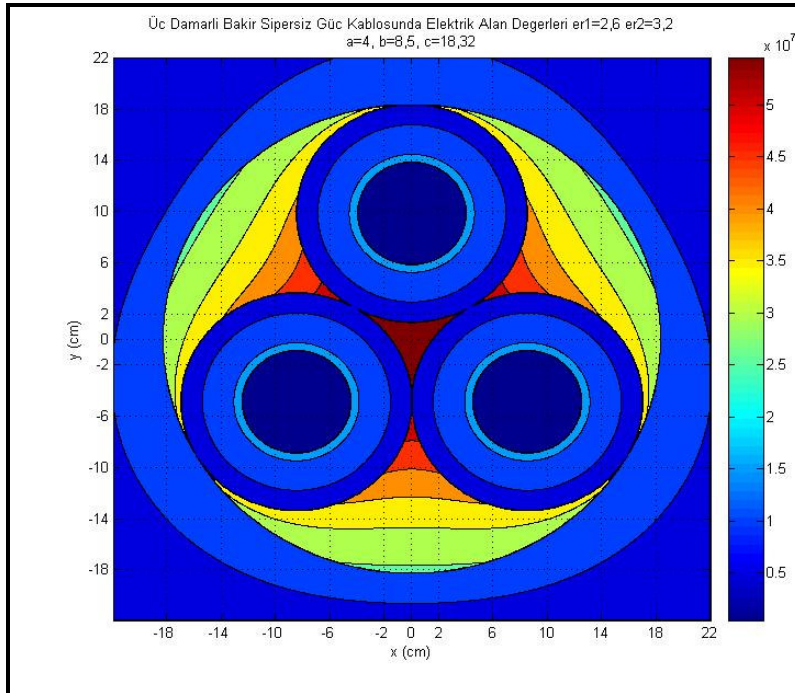


Şekil 2.36. Elektrik alan örnekleme-36, $a=3$ $b=6,5$ $c=14$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları

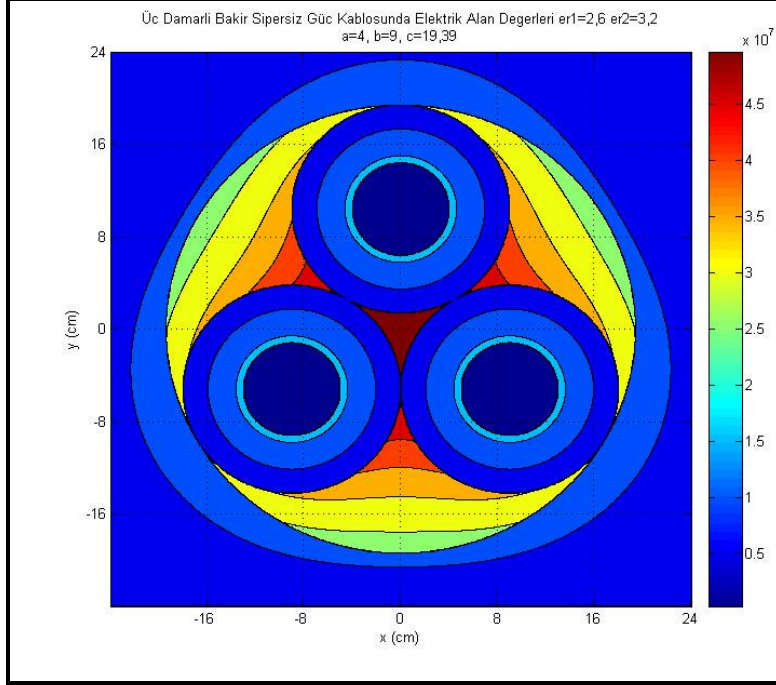


Şekil 2.37. Elektrik alan örnekleme-37, $a=4$ $b=8$ $c=17,24$

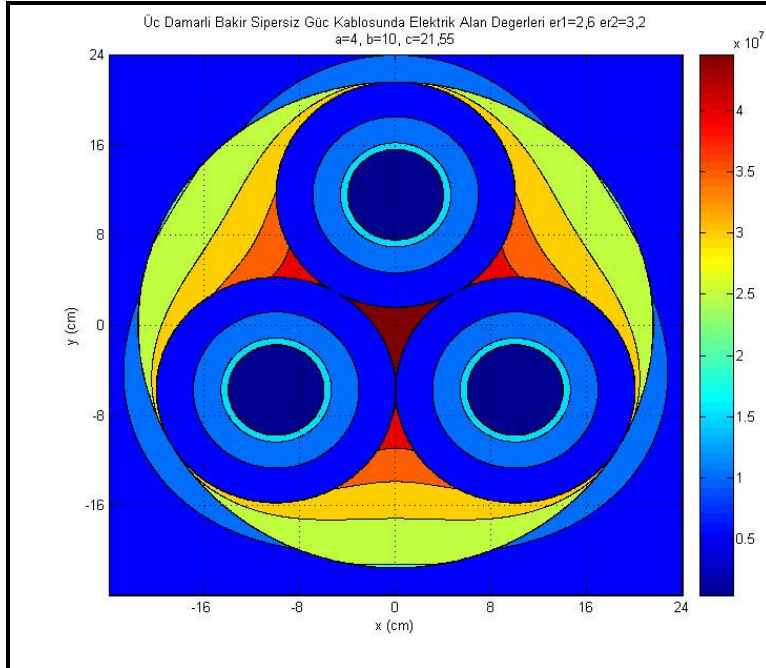


Şekil 2.38. Elektrik alan örnekleme-38, $a=4$ $b=8,5$ $c=18,32$

EK-2 (Devam) Üç damarlı kablolarda elektrik alan haritaları



Şekil 2.39. Elektrik alan örnekleme-39, $a=4$ $b=9$ $c=19,39$



Şekil 2.40. Elektrik alan örnekleme-40, $a=4$ $b=10$ $c=21,55$

EK-3 Matlab kodları

```

%% Tek Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı
clc
clear all
q=1 ;                                %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi);      %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ;                      %yalıtkan sabiti
epsilon_r2=2.6 ;                    %yarıiletken sabiti
a=1 ;                                % İletken yarıçapı
b=3 ;                                % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
for x=-5.2: 0.08: 5.2 ;
    k=k+1 ;
    l=0 ;
    for y= -5.2: 0.08: 5.2 ;
        l=l+1 ;
        if (x^2)+(y^2)>(b^2) ;
            Elektrik_alan=0 ;          % Nokta,kablo dışındadır.
        end
        if (x^2)+(y^2) > a^2 & (x^2)+(y^2) < b^2;
            yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
            Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
        end
        if (x^2)+(y^2) < a^2 ;
            Elektrik_alan=0 ;          % Nokta, iletken içindedir
        end
    end
    E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

%% Tek damar kabloda çok tabaka bakır siper var iken
clc
clear all
q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=2.6 ; %yarıiletken sabiti
epsilon_r2=3.2 ; %yalıtkan sabiti
a=3 ; % İletken yarıçapı
b=4 ; % Damar yarıçapı
c=6 ; % kablo yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
for x=-9: 0.01:9 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -9: 0.01:9 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(c^2) ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta,kablo dışındadır.
end
if (x^2)+(y^2) > a^2 & (x^2)+(y^2) < b^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) > b^2 & (x^2)+(y^2) < c^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r2*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

%% Tek damar kabloda çok tabaka bakır siper yok iken
clc
clear all
q=1 ;                               %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi);      %dielektrik sabiti
epsilon_r=2.6 ;                      %yarıiletken sabiti
epsilon_r2=3.2 ;                     %yalıtkan sabiti
a=1 ;                               % İletken yarıçapı
b=3 ;                               % Damar yarıçapı
c=5 ;                               % kablo yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
for x=-12:0.01:12;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -12:0.01:12 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(c^2) ;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) > a^2 & (x^2)+(y^2) < b^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
end

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

if (x^2)+(y^2) > b^2 & (x^2)+(y^2) < c^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r2*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) > b^2 & (x^2)+(y^2) < c^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ;                               % Nokta, iletken içindedir
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

%% Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı

```

clc
clear all
q=1300000 ;                               %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi);           %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ;                             %yalıtkan sabiti
epsilon_r2=2.6 ;                             %yarıiletken sabiti
a=4 ;                                       % İletken yarıçapı
b=9 ;                                       % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
c=(b+(2*b/sqrt(3)));                       % Kablonun dış yarıçapı
for x=-20: 0.1: 20 ;
k=k+1 ;

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

l=0 ;
for y= -20: 0.1: 20 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(c^2) ;
Elektrik_alan=0 ;                                % Nokta,kablo dışındadır.
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 &
(x^2)+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x^2)+(y^2)<(c-0.2)^2;
Elektrik_alan=0;
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt(x^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
else
end
if x^2+y^2>(c-0.2)^2 & x^2+y^2< c^2;
Elektrik_alan= 1e+013 ;
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ;                                % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2;
Elektrik_alan=0 ;                                % Nokta, iletken içindedir
elseif x^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < a^2

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

%% Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı
clc
clear all
q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=2.6 ; %yarıiletken sabiti
epsilon_r2=3.2 ; %yalıtkan sabiti
a=1 ; % İletken yarıçapı
b=2 ; % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
c=(b+(2*b/sqrt(3))); % Kablonun dış yarıçapı
for x=-8: 0.02:8 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -8: 0.02:8 ;
l=l+1 ;
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x)^2+(y-
(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2 ;
yaricap1=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan1= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap1));
yaricap2=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan2= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap2));

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

yaricap3=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan3= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap3));
Elektrik_alan= Elektrik_alan1+Elektrik_alan2+Elektrik_alan3 ;
end
if (x)^2+(y)^2 < c^2;
elseif (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 |
(x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap1=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan1= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap1));
yaricap2=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan2= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap2));
yaricap3=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan3= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap3));
Elektrik_alan= Elektrik_alan1+Elektrik_alan2+Elektrik_alan3 ;
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2;

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < a^2
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

%% Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı
clc
clear all
q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ; %yalıtkan sabiti
epsilon_r2=2.6 ; %yarıiletken sabiti
a=1 ; % İletken yarıçapı
b=2 ; % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
c=(b+(2*b/sqrt(3))); % Kablonun dış yarıçapı
for x=-10: 0.05: 10 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -10: 0.05: 10 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(c^2) ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta,kablo dışındadır.
end

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 &
(x^2)+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x^2)+(y^2)<(c-0.2)^2;
Elektrik_alan=0;
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt(x^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
else
end
if x^2+y^2>(c-0.2)^2 & x^2+y^2< c^2;
Elektrik_alan= 1.8e+007 ;
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif x^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < a^2
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

%% Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı

clc

clear all

```

q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ; %yalıtkan sabiti
epsilon_r2=2.8 ; %yarıiletken sabiti
a=3 ; % İletken yarıçapı
b=6 ; % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
c=(b+(2*b/sqrt(3))); % Kablonun dış yarıçapı
for x=-4: 0.05:12 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -12: 0.05: 12 ;
l=l+1 ;
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x)^2+(y-
(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2 ;
yaricap1=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan1= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap1));
yaricap2=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan2= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap2));
yaricap3=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan3= (q/(2*pi*epsilon_sifir*yaricap3));
Elektrik_alan= Elektrik_alan1+Elektrik_alan2+Elektrik_alan3 ;
end
if (x)^2+(y)^2 < c^2;

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

elseif (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 | (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 |
(x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap1=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan1= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap1));
yaricap2=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan2= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap2));
yaricap3=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan3= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap3));
Elektrik_alan= Elektrik_alan1+Elektrik_alan2+Elektrik_alan3 ;
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < a^2
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
end

```

EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

```

%% Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı

```

```

clc
clear all
q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=3.2 ; %yalıtkan sabiti
epsilon_r2=2.6 ; %yarıiletken sabiti
a=2 ; % İletken yarıçapı
b=4 ; % Damar yarıçapı
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
c=(b+(2*b/sqrt(3))); % Kablonun dış yarıçapı
for x=-10: 0.05: 10 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -10: 0.05: 10 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(c^2) ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta,kablo dışındadır.
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > b^2 &
(x^2)+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x^2)+(y^2)<(c-0.2)^2;
Elektrik_alan=0;
else
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;

```

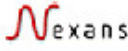
EK-3 (Devam) Matlab kodları

```

yaricap=sqrt((x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
else
end
if x^2+y^2>(c-0.2)^2 & x^2+y^2< c^2;
Elektrik_alan= 1.8e+007 ;
end
if (x+b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-b)^2+(y+(b/sqrt(3)))^2 < a^2;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x)^2+(y-(2*b/sqrt(3)))^2 < a^2
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

EK-4 XLPE güç kablosu örnekleri [11]



CU/XLPE/SC/AWA/PVC (BS)



6,35/11 kV XLPE izoleli,tek damarlı,alüminyum tel zırlı,bakır veya alüminyum iletkenli kablolar

Standartlar

Ulusal BS 6622;BS 7835

[Teknik bilgi](#)

[Bizi arayın](#)

Açıklama

Uygulama Alanı

Mekanik zorlamalara dayanıklı ve dielektrik kaybı çok düşük olan bu kablolar, yerleşme ve endüstri bölgelerinde,haricte,toprak altında ve kablo kanallarında ani yük değişimlerinin olduğu enerji tesislerinde kullanılır.

Yapısı

1. İletken : Bakır veya alüminyum
2. İç yarı iletken : XLPE
3. İzole : XLPE
4. Dış yarı iletken : XLPE
5. Yarı iletken bant
6. Siper : Bakır
7. Ayırıcı kılıf : PVC veya LSF
8. Tel zırh : Alüminyum
9. Dış kılıf : PVC veya LSF

Özellikler

[Sık kullanılanlara bak](#)

Yapısal Özellikler	
İletken malzemesi	Bakır
İletken tipi	Yuvarlak çok telli (Rm)
İç yarı iletken malzemesi	XLPE
İzole malzemesi	XLPE
Dış yarı iletken malzemesi	XLPE
Siper	Bakır teller
Zırh tipi	Alüminyum zırh
Dış kılıf	PVC
Boyutsal özellikler	
Damar Sayısı	1
Elektriksel özellikler	
Anma gerilimi	6.35 / 11 kV
Mekanik özellikler	
Mekanik darbelerle karşı direnç	İyi
Kullanım Özellikleri	
Paketleme	Makara
İşletme ortam sıcaklığı	-20 .. 60 °C
İşletme ortam sıcaklığı (maks.)	90 °C
Kısa devre iletken sıcaklığı (maks.)	250 °C
Alev geciktirme	IEC 60332-1&3, BS 4066 Part 1&3
Serme anındaki bükme çapı (min.)	15 (xD)

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

YXC7V (TSE) / 2XSY (IEC) 3,6/6 kV



3,6/6 kV XLPE izoleli, tek damarlı, bakır veya alüminyum iletkenli kablolar

Nexans

[Teknik bilgi](#)

[Sizi arayın](#)

Standartlar

Uluslararası IEC 60502
Ulusal BS 6622

Açıklama

Uygulama Alanı

Dielektrik kaybı çok düşük olan bu kablolar, yerleşme ve endüstri bölgelerinde, hariçte, toprak altında ve kablo kanallarında ani yük değişimlerinin olduğu enerji tesislerinde kullanılır.

Yapısı

1. İletken : Bakır veya alüminyum
2. İç yarı iletken : XLPE
3. İzole : XLPE
4. Dış yarı iletken : XLPE
5. Yarı iletken bant
6. Siper: Bakır
7. Dış kılıf : PVC

Özellikler

[Sık kullanılanlara göz at](#)

Yapısal Özellikler	
İletken malzemesi	Bakır
İletken tipi	Yuvarlak çok telli (Rm)
İç yarı iletken malzemesi	XLPE
İzole malzemesi	XLPE
Dış yarı iletken malzemesi	XLPE
Siper	Bakır teller
Dış kılıf	PVC
Boyutsal Özellikler	
Damar Sayısı	1
Elektriksel Özellikler	
Anma gerilimi	3.6 / 6 kV
Kullanım Özellikleri	
Paketleme	Makara
İşletme ortam sıcaklığı	-20 .. 60 °C
İşletme ortam sıcaklığı (maks.)	90 °C
Kısa devre iletken sıcaklığı (maks.)	250 °C
Alev geciktirme	IEC 60332-1&3, BS 4066 Part 1&3
Serme anındaki bükme çapı (min.)	

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

CU/XLPE/SC/SWA/PVC (BS) (3 damarlı)

Nexans

Teknik Bilgi

[Bizi arayın](#)



6,35/11 kV XLPE izoleli, üç damarlı, çelik tel zırlı, bakır veya alüminyum iletkenli kablolar

Standartlar

Ulusal BS 6622; BS 7835

Açıklama

Uygulama Alanı

Mekanik zorlamalara dayanıklı ve dielektrik kaybı çok düşük olan bu kablolar, yerleşme ve endüstri bölgelerinde, hariçte, toprak altında ve kablo kanallarında ani yük değişimlerinin olduğu enerji tesislerinde kullanılır.

Yapısı

1. İletken : Bakır veya alüminyum
2. İç yarı iletken : XLPE
3. İzole : XLPE
4. Dış yarı iletken : XLPE
5. Yarı iletken bant
6. Siper : Bakır
7. Dolgu
8. Ayırıcı kılıf : PVC veya LSF
9. Tel zırh : Alüminyum
10. Dış kılıf : PVC veya LSF

Özellikler

Sık kullanılanlar

Yapısal Özellikler	
İletken malzemesi	Bakır
İletken tipi	Yuvarlak çok telli (Rm)
İç yarı iletken malzemesi	XLPE
İzole malzemesi	XLPE
Dış yarı iletken malzemesi	XLPE
Koruma	Dolgu
Zırh tipi	Galvanizli çelik tel
Dış kılıf	PVC
Boyutsal özellikler	
Damar Sayısı	3
Elektriksel özellikler	
Anma gerilimi	6.35 / 11 kV
Mekanik özellikler	
Mekanik darbelerle karşı direnç	İyi
Kullanım özellikleri	
Paketleme	Makara
İşletme ortam sıcaklığı	-20 .. 60 °C
İşletme ortam sıcaklığı (maks.)	90 °C
Kısa devre iletken sıcaklığı (maks.)	250 °C
Alev geciktirme	IEC 60332-1&3, BS 4066 Part 1&3
Serme anındaki bükme çapı (min.)	15 (xD)

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

YXC7V (TSE) / N2XSY (IEC) 18/30 kV



18/30 kV XLPE izoleli, tek damarlı, bakır veya alüminyum iletkenli kablolar

Nexans

[Teknik Bilgi](#)

[Bizi arayın](#)

Standartlar

Uluslararası IEC 60502

Ulusal BS 6622; DIN VDE 0276

Açıklama

Uygulama Alanı

Dielektrik kaybı çok düşük olan bu kablolar, yerleşme ve endüstri bölgelerinde, hariçte, toprak altında ve kablo kanallarında ani yük değişimlerinin olduğu enerji tesislerinde kullanılır.

Yapısı

1. İletken : Bakır
2. İç yarı iletken : XLPE
3. İzole : XLPE
4. Dış yarı iletken : XLPE
5. Yarı iletken bant
6. Siper : Bakır
7. Dış kılıf : PVC

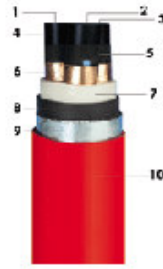
Özellikler

[Sık kullanılanlar eklen](#)

Yapısal Özellikler	
İletken malzemesi	Bakır
İletken tipi	Yuvarlak çok telli (Rm)
İç yarı iletken malzemesi	XLPE
İzole malzemesi	XLPE
Dış yarı iletken malzemesi	XLPE
Siper	Bakır tel + Bakır bant
Dış kılıf	PVC
Boyutsal Özellikler	
Damar Sayısı	1
Elektriksel Özellikler	
Anma gerilimi	18 / 30 kV
Kullanım Özellikleri	
İşletme ortam sıcaklığı	-20 .. 60 °C
İşletme ortam sıcaklığı (maks.)	90 °C
Kısa devre iletken sıcaklığı (maks.)	250 °C
Alev geciktirme	IEC 60332-1&3, BS 4066 Part 1&3
Serme anındaki bükme çapı (min.)	15 (xD)

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

YXC8VZ3V (TSE) / 2XSEYFGY (IEC) 18/30 kV



18/30 kV XLPE izoleli, çelik tel zırlı, üç damarlı, bakır veya alüminyum iletkenli kablolar

Nexans

[Teknik Bilgi](#)

[Bizi arayın](#)

Standartlar

Uluslararası IEC 60502

Ulusal BS 6622; DIN VDE 0276

Açıklama

Uygulama Alanı

Mekanik zorlamalara dayanıklı ve dielektrik kaybı çok düşük olan bu kablolar, yerleşme ve endüstri bölgelerinde hariçte, toprak altında ve kablo kanallarında ani yük değişimlerinin olduğu enerji tesislerinde kullanılır.

Yapısı

1. İletken : Bakır veya alüminyum
2. İç yarı iletken : XLPE
3. İzole : XLPE
4. Dış yarı iletken : XLPE
5. Yarı iletken bant
6. Siper : Bakır
7. Dolgu
8. Ayırıcı kılıf : PVC veya LSF
9. Tel zırh : Galvanizli çelik
10. Dış kılıf : PVC veya LSF

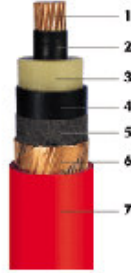
Özellikler

[Sık kullanılanlar](#)

Yapısal Özellikler	
İletken malzemesi	Bakır
İletken tipi	Yuvarlak çok telli (Rm)
İç yarı iletken malzemesi	XLPE
İzole malzemesi	XLPE
Dış yarı iletken malzemesi	XLPE
Siper	Bakır bant
Koruma	Dolgu
Zırh tipi	Galvanizli çelik tel
Dış kılıf	PVC
Boyutsal özellikler	
Damar Sayısı	3
Elektriksel özellikler	
Anma gerilimi	18 / 30 kV
Mekanik özellikler	
Mekanik darbelere karşı direnç	İyi
Kullanım Özellikleri	
Paketleme	Makara

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

YXC7V (TSE) 20.3/35 kV



20,3/35 kV XLPE izoleli,tek damarlı,bakır veya alüminyum iletkenli kablolar

[Bizi arayın](#)

Standartlar

Ulusal TSEK

Açıklama

Uygulama Alanı

Dielektrik kaybı çok düşük olan bu kablolar, yerleşme ve endüstri bölgelerinde, hariçte, toprak altında ve kablo kanallarında ani yük değişimlerinin olduğu enerji tesislerinde kullanılır.

Yapısı

1. İletken : Bakır veya Alüminyum
2. İç yarı iletken : XLPE
3. İzole : XLPE
4. Dış yarı iletken : XLPE
5. Yarı iletken bant
6. Siper : Bakır
7. Dış kılıf : PVC

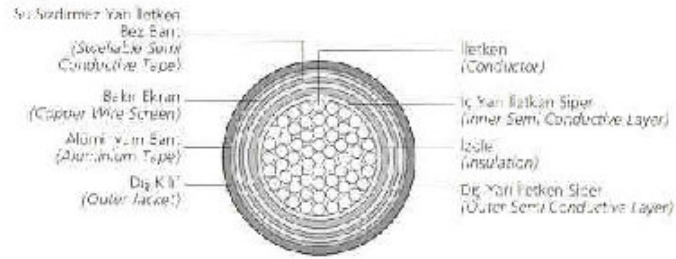
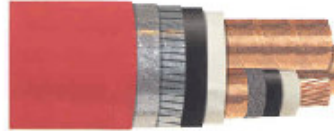
Özellikler

Sık kullanılanlara ekli

Yapısal Özellikler	
İletken malzemesi	Bakır
İletken tipi	Yuvarlak çok telli (Rm)
İç yarı iletken malzemesi	XLPE
İzole malzemesi	XLPE
Dış yarı iletken malzemesi	XLPE
Siper	Bakır tel + Bakır bant
Dış kılıf	PVC
Boyutsal Özellikler	
Damar Sayısı	1
Elektriksel Özellikler	
Anma gerilimi	20.3 / 35 kV
Kullanım Özellikleri	
İşletme ortam sıcaklığı	-20 .. 60 °C
İşletme ortam sıcaklığı (maks.)	90 °C
Kısa devre iletken sıcaklığı (maks.)	250 °C
Alev geciktirme	IEC 60332-1&3, BS 4066 Part 1&3
Serme anındaki bükme çapı (min.)	15 (xD)

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

40/69kV 2XS(FL)2Y (YE3S(AL)E)



Kod

YE3S(AL)E, 2XS2Y.

Standartlar

IEC 640.

Teknik Veriler

Maksimum çalışma sıcaklığı : 90 °C.

Maksimum kısa devre sıcaklığı: 250 °C (max. 5 sn. süreli).

Anma Gerilimi : 40/69 kV.

Kullandığı Yerler

Dielektrik kayıpları düşük olan bu kablolar, ani yük değişimlerinin olduğu şebekeler ile kısa devre akımlarının büyük olduğu yerleşme ve endüstri bölgelerinde, kablo kanallarında, toprak altında ve hatta açıkta kullanılır.

Yapısı

1. Çok telli bakır iletken.
2. İç yarı iletken tabaka.
3. XLPE izole.
4. Dış yarı iletken tabaka.
5. Su sızdırmaz yarı iletken bant.

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

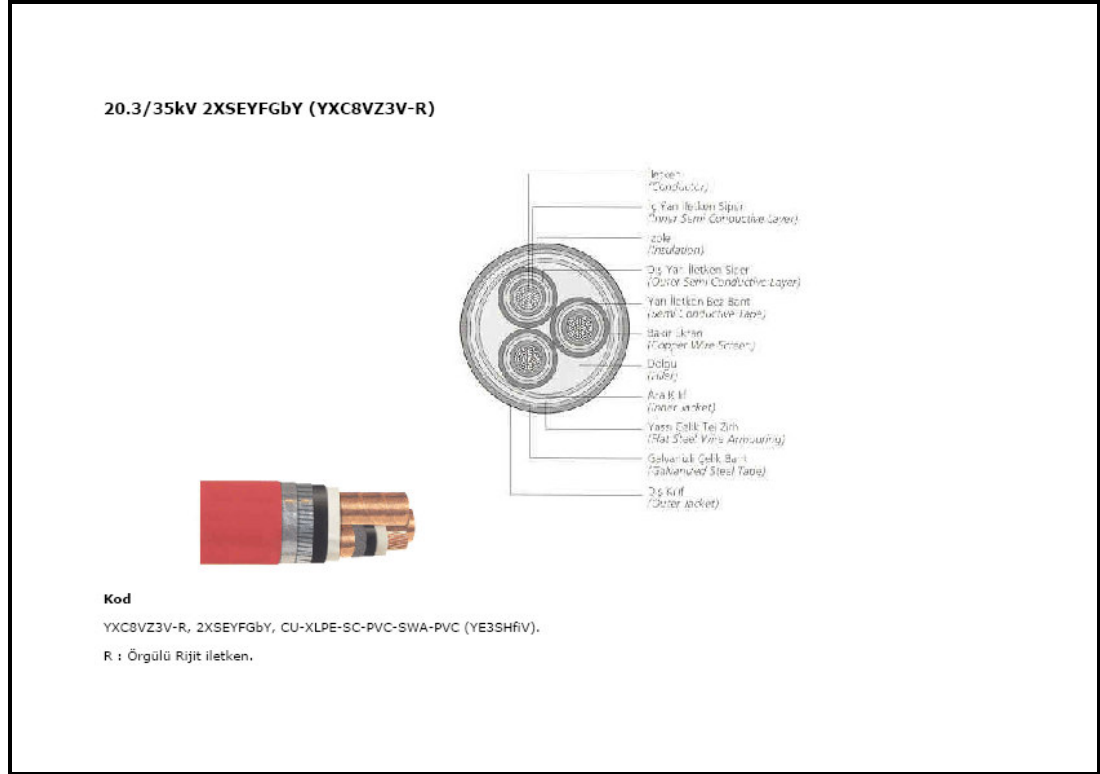
Çizelge 4.1. Tek damarlı XLPE kablosu örnek elektriksel özellikler [11]

ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER				
İletken direnci (Ohm/km)	Çalışma İndüktansı (mH/km)	İşletme Kap.	Akım Taşıma Kapasitesi Toprakta 20°C'de	Akım Taşıma Kapasitesi Havada 30°C'de
0.13	545	544	724	665
0.14	605	612	822	758
0.15	672	692	941	874
0.16	743	780	1073	1003
0.18	812	872	1212	1145

Çizelge 4.2. Tek damarlı XLPE kablosu örnek boyut ve ağırlıklar [11]

BOYUT VE AĞIRLIKLAR				
Nominal Kesit (mm ²)	Dış Çapı (mm)	Net Ağırlık (kg/km)	Sevk Uzunluğu (m)	Makara kodu
1x240/25	70.0	5240	0.0754	0.64
1x300/25	72.0	5940	0.0601	0.62
1x400/35	76.0	7030	0.0470	0.60
1x500/35	79.0	8210	0.0366	0.58
1x630/35	84.0	9850	0.0283	0.55

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]



Standartlar

TSEK, IEC 60502, BS 6622.

Teknik Veriler

Maksimum çalışma sıcaklığı : 90 °C.

Maksimum kısa devre sıcaklığı : 250 °C (maksimum. 5 sn. süreli).

Anma gerilimi : 20,3 / 35 kV.

Kullanıldığı Yerler

Dielektrik kayıpları düşük olan bu kablolar, ani yük değişimlerinin olduğu şebekeler ile kısa devre akımlarının büyük olduğu yerleşme ve endüstri bölgelerinde, kablo kanallarında, toprak altında ve hariçte kullanılır.

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

Yapısı

1. Çok telli bakır iletken.
2. iç yarı iletken tabaka.
3. XLPE izole.
4. Dış yarı iletken tabaka.
5. Yarı iletken bant.
6. Bakır bant ekran.
7. PVC dolgu.
8. Ara kılıf.
9. Galvanizli yassı çelik tel zırh.
10. Helisel galvanizli çelik bant.
11. PVC dış kılıf.

EK-4 (Devam) XLPE güç kablosu örnekleri [11]

Çizelge 4.3. Üç damarlı XLPE kablosu örnek elektriksel özellikler [11]

ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLER				
İletken direnci (ohm/km)	Çalışma İndüktansı (mH/km)	İşletme Kap.	Akım Taşıma Kapasitesi Toprakta 20°C'de (A)	Akım Taşıma Kapasitesi Havada 30°C'de (A)
0.524	0.46	0.11	180	176
0.387	0.45	0.12	213	209
0.268	0.41	0.13	260	261
0.193	0.39	0.14	313	317
0.153	0.38	0.16	356	363
0.124	0.37	0.17	401	418
0.0991	0.36	0.18	440	477
0.0754	0.35	0.19	509	562

Çizelge 4.4. Üç damarlı XLPE kablosu örnek elektriksel özellikler [11]

BOYUT VE AĞIRLIKLAR				
Nominal Kesit (mm²)	Dış Çapı (mm)	Net Ağırlık (kg/km)	Sevk Uzunluğu (m)	Makara kodu
3x35/16	79.3	8692	500	240
3x50/16	83.0	9694	250	210
3x70/16	88.4	11261	250	220
3x95/16	92.5	12674	250	220
3x120/16	96.4	14040	250	240
3x150/25	100.3	15582	250	240
3x185/25	104.5	17309	250	240
3x240/25	110.8	20060	250	240

EK-5 Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

Pratikte XLPE malzeme kullanarak üretim yapan kablo üreticilerinin standart üretim boyutlarına bakalım:

Çizelge 5.1. Pratikteki üretim boyutları (Firma-1)

FİRMA 1 STANDART KABLO KESİT KALINLIKLARI								
İletken Yarıçapı	İletken Kesiti	İç Yarı İletken Bant Kalınlığı	XLPE Tabaka Kalınlığı (yalıtkan)					Dış Yarı İletken Bant Kalınlığı
mm	mm ²	mm	mm					mm
			7,2 kV	12 kV	17,5 kV	24 kV	36 kV	
1,8	10	0,5	2,5					0,4
2,3	16	0,5	2,5	3,4				0,4
2,8	25	0,5	2,5	3,4	4,5			0,4
3,3	35	0,5	2,5	3,4	4,5	5,5		0,4
4	50	0,5	2,5	3,4	4,5	5,5	8	0,4
7,7	185	0,5	2,5	3,4	4,5	5,5	8	0,4
8,7	240	0,5	2,5	3,4	4,5	5,5	8	0,4
9,8	300	0,7	2,5	3,4	4,5	5,5	8	0,4
11,3	400	0,7	2,5	3,4	4,5	5,5	8	0,4
12,6	500	0,7	2,5	3,4	4,5	5,5	8	0,4
17,8	1.000	0,7	2,5	3,4	4,5	5,5	8	0,4

Çizelge 5.1’de standart üretimi yapılan kablolarla ilişkin değerler gösterilmektedir. Firma 1, bu çizelgedeki değerlerle TS IEC 60502-2 TSE [12] standartlarında üretim yapmakla birlikte aynı konudaki diğer uluslar arası standartları da karşılamaktadır. Tasarımda iç yarı iletken malzeme ve dış yarı iletken malzeme için 2,6 veya 2,5; XLPE yalıtkan için 3,2 olarak dielektrik katsayısı kullanılmaktadır. Kabloların tasarım aşamasında yarı iletken tabaka kalınlıkları değişirken iç yarı iletken bant ve dış yarı iletken bant kalınlığı genelde sabit tutulmaktadır. Hesaplamalarda bu tabakalar ihmal edilmektedir. Bu bantların ihmal edilmediği testler, tanδ testleridir. [11]

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

Çizelge 5.2. Pratikteki üretim boyutları (Firma-2)

Firma 2 STANDART KABLO KESİT KALINLIKLARI								
Damar Sayısı	İletken Yarıçapı	İletken Kesiti	İç Yarı İletken Bant Kalınlığı	XLPE Tabaka Kalınlığı (yalıtkan)				Dış Yarı İletken Bant Kalınlığı
	mm	mm ²	mm	mm				mm
1	6,2	120	0,6		3,4	4,5	9	0,6
1	8,7	240	0,6		3,4	4,5	9	0,6
3	6,2	120	0,6	2,5	3,4	4,5	9	0,6
3	8,7	240	0,6	2,6	3,4	4,5	9	0,6

Çizelge 5.2’de bir diğer firmanın standart üretim boyutları görülebilir. Firma, iç ve dış yarı iletken bant kalınlığı olarak her gerilim ve her boyutta 0,6mm sabit değerini kullanmakta ve elektrik alan değerlerini hesaplarken bu tabakaları ihmal etmektedir.

Aşağıda tek damarlı kabloya ilişkin geliştirilen MATLAB kodu incelenebilir:

%% Kablo Fabrikası Uygulamaları Tek damar kabloda çok tabaka bakır siper var iken

clc

clear all

q=1 ;

%birim kesitteki yük yoğunluğu

epsilon_sifir= (10⁻⁷)/(36*pi);

%dielektrik sabiti

epsilon_r=2.6 ;

%yarıiletken sabiti(iç yarı iletken bant)

epsilon_r2=3.2 ;

%yalıtkan sabiti

epsilon_r3=2.6 ;

%yarıiletken sabiti(dış yarı iletken bant)

a=17.8 ;

% İletken yarıçapı

b=18.5 ;

% iç yarı iletken bant ile birlikte iletken yarıçapı

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

```

c=26.5 ;                                % XLPE ile birlikte yarıçap
d=26,9;                                % dış yarıiletken bant ile birlikte yarıçap
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
for x=-30: 0.05:30 ;
k=k+1 ;
l=0 ;
for y= -30: 0.05:30 ;
l=l+1 ;
if (x^2)+(y^2)>(d^2) ;
Elektrik_alan=0 ;                        % Nokta,kablo dışındadır.
end
if (x^2)+(y^2) > a^2 & (x^2)+(y^2) < b^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) > b^2 & (x^2)+(y^2) < c^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r2*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) > c^2 & (x^2)+(y^2) < d^2;
yaricap=sqrt((x^2)+(y^2)) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r3*yaricap));
end
if (x^2)+(y^2) < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ;                        % Nokta, iletken içindedir
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

Üç damarlı uygulamalar için MATLAB kodumuz:

%% Kablo Fabrikası Uygulamaları Üç Damar Kabloda Elektrik Alan Hesabı

clc

clear all

```

q=1 ; %birim kesitteki yük yoğunluğu
epsilon_sifir= (10^-7)/(36*pi); %dielektrik sabiti
epsilon_r=2.6 ; %yarıiletken sabiti (iç yarı iletken bant)
epsilon_r2=3.2 ; %yalıtkan sabiti
epsilon_r3=2.6 ; %yarıiletken sabiti (dış yarı iletken bant)
a=17.8 ; % iletken yarıçapı
b=18.5 ; % iç yarı iletken bant ile birlikte iletken yarıçapı
c=26.5 ; % XLPE ile birlikte yarıçap
d=26,9; % dış yarıiletken bant ile birlikte yarıçap
k=0 ;
Elektrik_alan=0 ;
f=(d+(2*d/sqrt(3))); % Kablonun dış yarıçapı
for x=-60: 0.1: 60 ;
    k=k+1 ;
    l=0 ;
    for y= -60: 0.1: 60 ;
        l=l+1 ;
        if (x^2)+(y^2)>(f^2) ;
            Elektrik_alan=0 ; % Nokta,kablo dışındadır.
        end
        if (x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 > d^2 & (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 > d^2 &
            (x^2)+(y-(2*d/sqrt(3)))^2 > d^2 & (x^2)+(y^2)<(f-0.2)^2;
            Elektrik_alan=0;
        else
            end
    end
end

```

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

```

if ((x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) > a^2 & ((x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) < b^2;
yaricap=sqrt((x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif ((x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) > b^2 & ((x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) < c^2;
yaricap=sqrt((x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r2*yaricap));
elseif (x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 > c^2 & (x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 < d^2;
yaricap=sqrt((x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r3*yaricap));
elseif (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 > a^2 & (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 < b^2;
yaricap=sqrt((x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 > b^2 & (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 < c^2;
yaricap=sqrt((x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r2*yaricap));
elseif (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 > c^2 & (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 < d^2;
yaricap=sqrt((x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r3*yaricap));
elseif (x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) > a^2 & (x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) < b^2;
yaricap=sqrt(x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r*yaricap));
elseif (x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) > b^2 & (x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) < c^2;
yaricap=sqrt(x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r2*yaricap));
elseif (x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) > c^2 & (x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) < d^2;
yaricap=sqrt(x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2) ;
Elektrik_alan= (q/(2*pi*epsilon_sifir*epsilon_r3*yaricap));
else
end
if (x^2+y^2>(f-0.2)^2) & (x^2+y^2< f^2) ;

```

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

```

Elektrik_alan= 2e+06 ;
end
if (x+d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 < a^2 ;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x-d)^2+(y+(d/sqrt(3)))^2 < a^2;
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
elseif (x^2+(y-(2*d/sqrt(3)))^2 < a^2
Elektrik_alan=0 ; % Nokta, iletken içindedir
else
end
E(l,k)=Elektrik_alan ;
end
end

```

Bu kodları kullanarak Çizelge 5.3. örnekleme uzunlukları üzerinden simülasyon yaptığımızda ilerleyen şekillerde gösterilen değerleri elde ettik. Bu değerlerden seçilen birkaç nokta için karşılaştırma yapmak için Çizelge 5.4 oluşturulmuştur.

Çizelge 5.3.Simülasyonda seçilen örneklerin yarı çapları

	a	b	c	d
	mm			
Örnek-1	4	4,5	7	7,4
Örnek-2	9,8	10,5	13	13,4
Örnek-3	17,8	18,5	21	21,4
Örnek-4	4	4,5	12,5	12,9
Örnek-5	9,8	10,5	18,5	18,9
Örnek-6	17,8	18,5	26,5	26,9

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

Çizelge 5.4.Simülasyonda seçilen örneklerin değerleri

	Ea	Eb1	Eb2	Ec1	Ec2	Ed
	birim					
Örnek-1	1,7094xe7	1,5557xe7	1,2363xe7	8,0935xe6	9,82xe6	9,4192xe6
Örnek-2	7,0285xe6	6,625xe6	5,3318xe6	4,3436xe6	5,305xe6	5,1858xe6
Örnek-3	3,8806xe6	3,7463xe6	3,0307xe6	2,6837xe6	3,2904xe6	3,2411xe6
Örnek-4	1,7094xe7	1,5557xe7	1,2363xe7	4,5181xe6	5,5164xe6	5,3876xe6
Örnek-5	7,0285xe6	6,625xe6	5,3318xe6	3,0438xe6	3,7301xe6	3,6669xe6
Örnek-6	3,8806xe6	3,7463xe6	3,0307xe6	2,1307xe6	2,6027xe6	2,5832xe6

Çizelge 5.4 üzerinde;

Ea, iletken ile iç yarı iletken bantın temas ettiği düşey eksen üzerindeki ilk noktanın değeri, Eb1, iç yarı iletken bant ile yalıtkan XLPE temas yüzeyinin iç yarı iletken bant içindeki düşey eksenindeki son noktanın değeri, Eb2, iç yarı iletken bant ile yalıtkan XLPE temas yüzeyinin yalıtkan XLPE içindeki düşey eksenindeki ilk noktanın değeri, Ec1, yalıtkan XLPE ile dış yarı iletken bant yüzeyinin yalıtkan XLPE içindeki düşey eksenindeki son noktanın değeri, Ec2, yalıtkan XLPE ile dış yarı iletken bant yüzeyinin dış yarı iletken bant içindeki düşey eksenindeki ilk noktanın değeri, Ed, dış yarı iletken bantın temas ettiği düşey eksen üzerindeki son noktanın değerini temsil etmektedir.

Örnek-1,2 ve 3 için Ea ile Eb1 değerleri oranlanırsa, farklı a ve b yarı çapları için pratikteki kalınlıklarda elektrik alan değerlerinin değişiminin %10 değerinin altında kaldığı görülmektedir. Sabit yarı iletken bant kalınlığı kullanımı, böylelikle elektriksel olarak kabul edilebilir değerlerle gözlemlenmiştir.

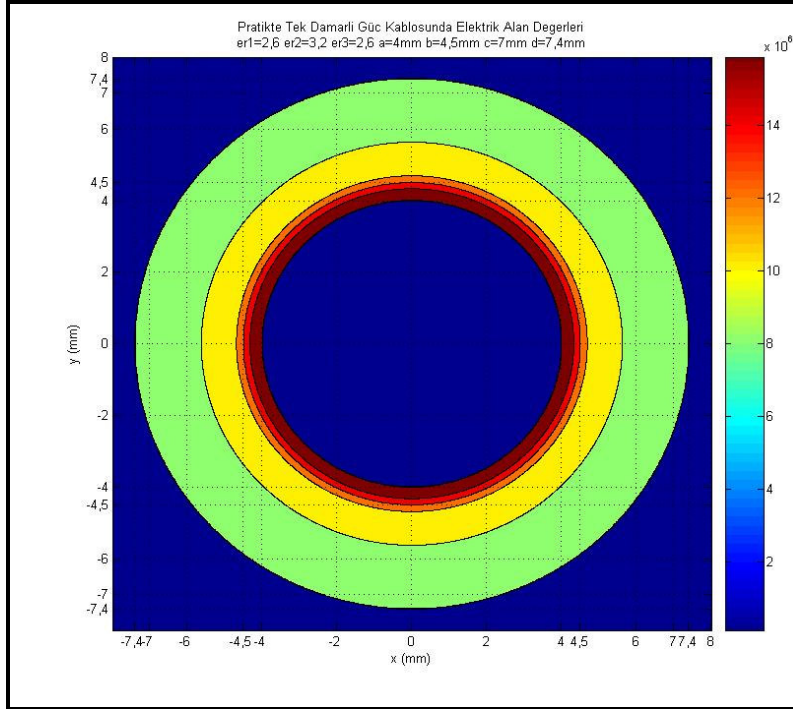
Merkezden uzaklaştıkça sınırlardaki elektrik alan değerlerinin birbirine oranı 1'e yaklaşmaktadır. Bu sonucu bekliyoruz; çünkü merkezden uzaklaştıkça elektrik alan değerlerimiz düşmektedir.

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

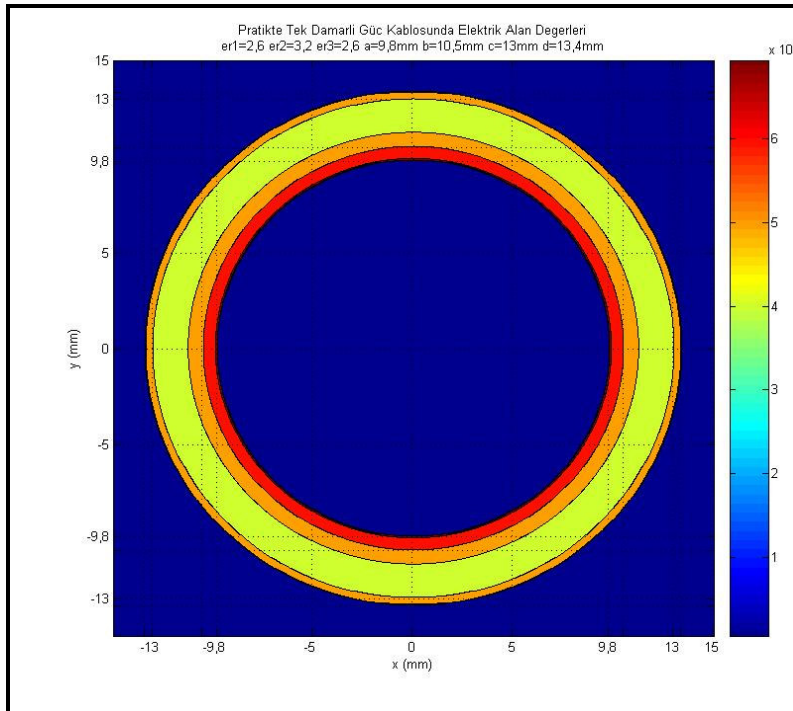
Örneklerde E_a ile E_{b1} ve E_{c2} ile E_d değerleri karşılaştırıldığında, değerlerin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. İç ve dış yarı iletken tabakaların kalınlığı az tutulduğu için bu kısa mesafede değerlerin çok değişmemesi, beklediğimiz bir sonuçtur.

E_{b2} ile başlayıp E_{c1} ile son bulan XLPE yalıtkan içindeki değerler dielektrik sabitinin değişiminden dolayı daha küçük çıkmaktadır. Yalıtkan izolasyon kalınlığı ne kadar büyütülürse dışta elde edilebilecek elektrik alan değeri o kadar az olacaktır.

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

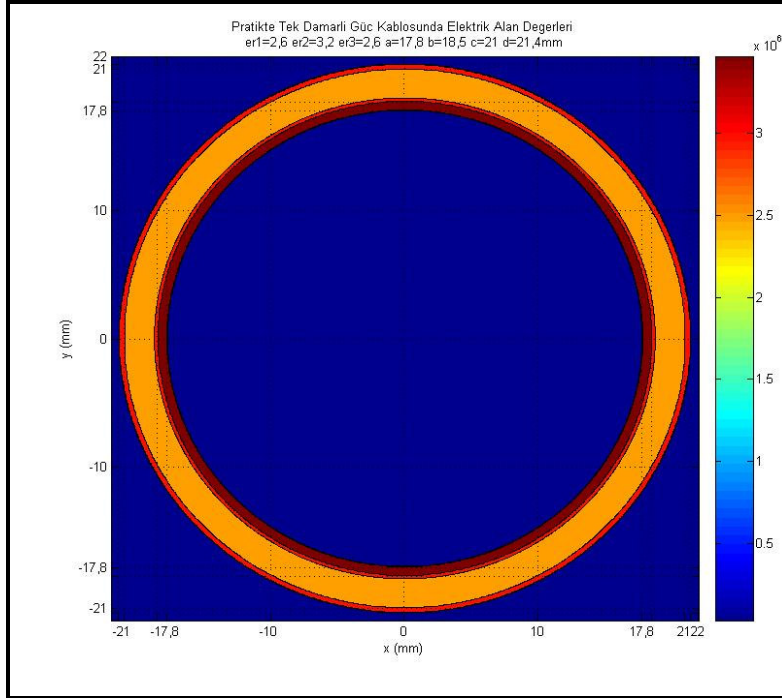


Şekil 5.1. Elektrik alan örnekleme-1, $a=4$ $b=4,5$ $c=7$ $d=7,4$ (mm)

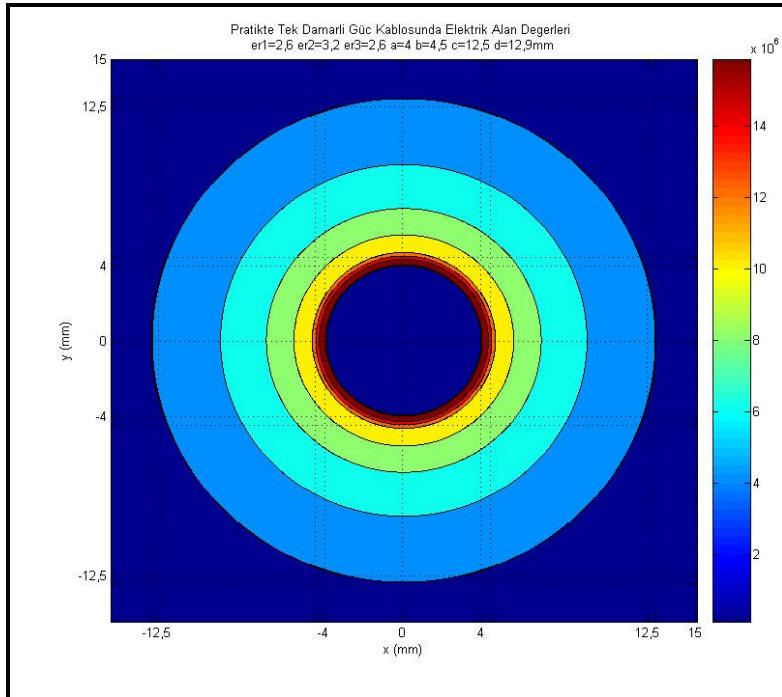


Şekil 5.2. Elektrik alan örnekleme-2, $a=9,8$ $b=10,5$ $c=13$ $d=13,4$ (mm)

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

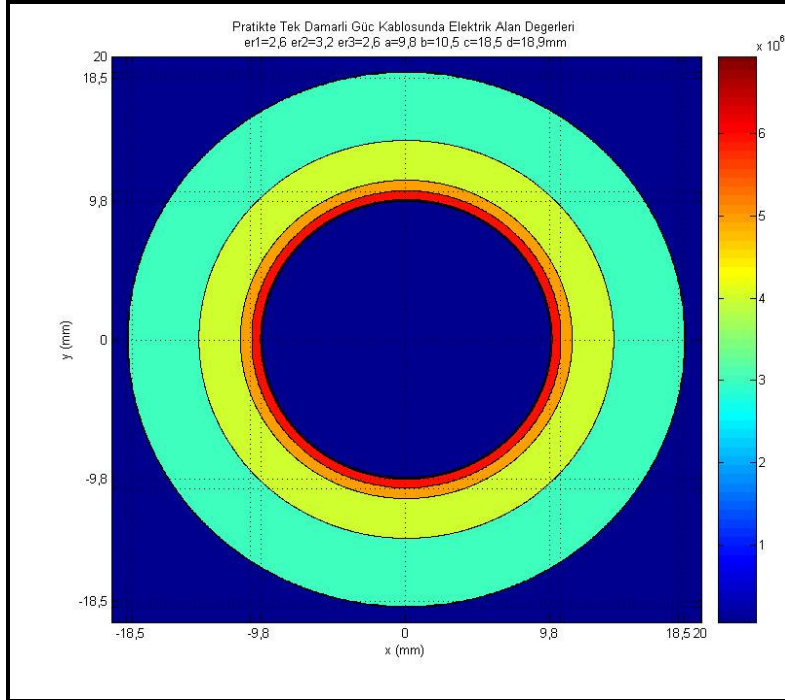


Şekil 5.3. Elektrik alan örnekleme-3, $a=17,8$ $b=18,5$ $c=21$ $d=21,4$ (mm)

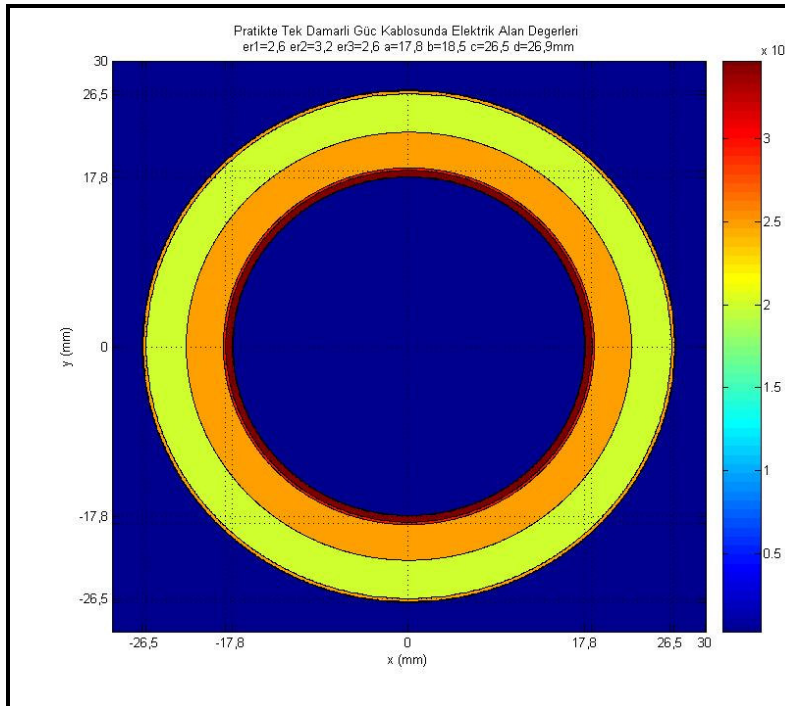


Şekil 5.4. Elektrik alan örnekleme-4, $a=4$ $b=4,5$ $c=12$ $d=12,4$ (mm)

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

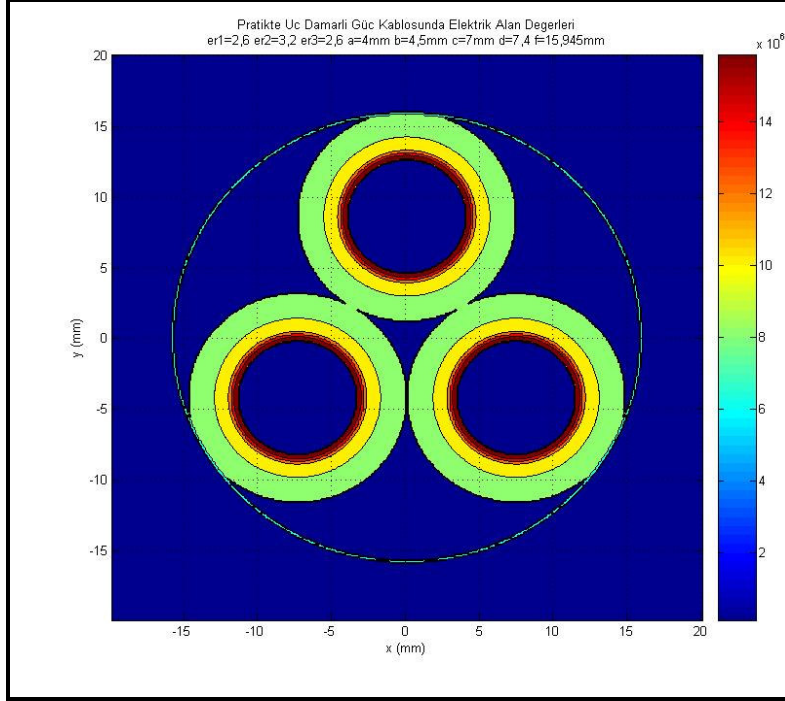


Şekil 5.5. Elektrik alan örnekleme-5, $a=9,8$ $b=10,5$ $c=18,5$ $d=18,9$ (mm)

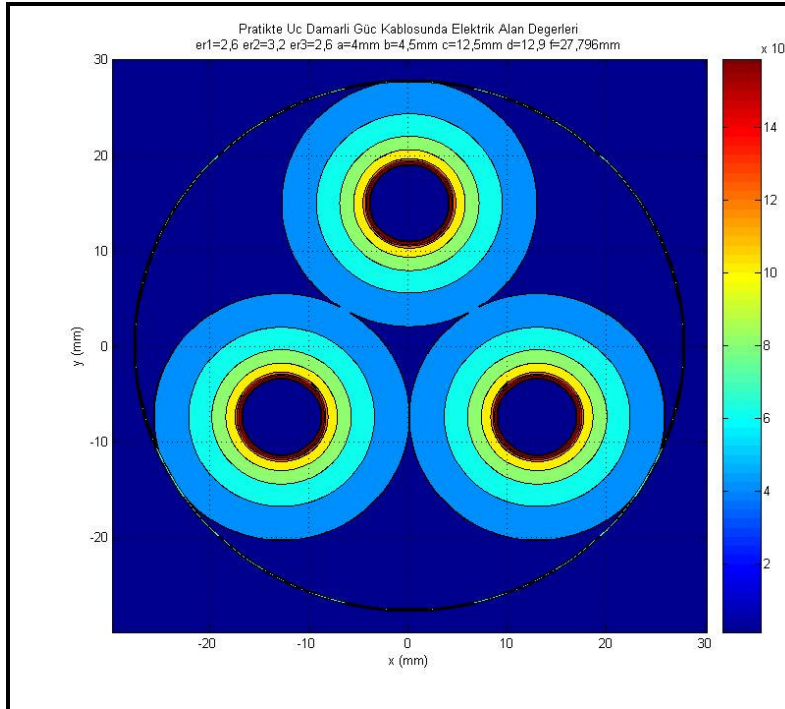


Şekil 5.6. Elektrik alan örnekleme-6, $a=17,8$ $b=18,5$ $c=26,5$ $d=26,9$ (mm)

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları

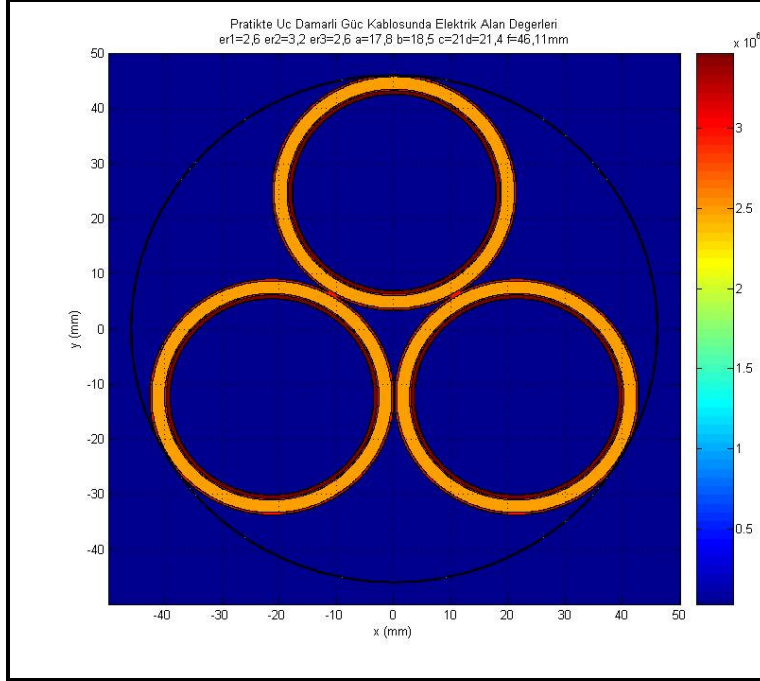


Şekil 5.7. Elektrik alan örnekleme-7, $a=4$ $b=4,5$ $c=7$ $d=7,4$ $f=15,945$ (mm)

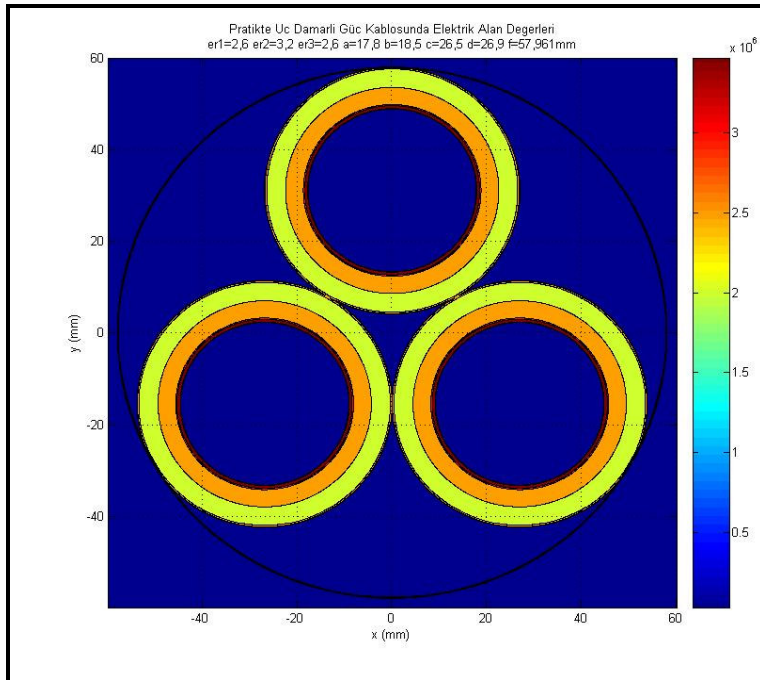


Şekil 5.8. Elektrik alan örnekleme-8, $a=4$ $b=4,5$ $c=12,5$ $d=12,9$ $f=27,796$ (mm)

EK-5 (Devam) Pratikteki güç kablosu boyutları ve elektrik alan simülasyonları



Şekil 5.9. Elektrik alan örnekleme-9, $a=17,8$ $b=18,5$ $c=21$ $d=21,4$ $f=46,11$ (mm)



Şekil 5.10. Elektrik alan örnekleme-9, $a=17,8$ $b=18,5$ $c=26,5$ $d=26,9$ $f=57,961$ (mm)

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : EMRE, Tamer
 Uyuğu : T.C.
 Doğum yeri, tarihi : 15.04.1978 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 212 69 15 / 35 00
 Faks : 0 (312) 215 98 09
 e-mail : tameremre@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/Müh.-Mim.Fak./ Elek.Elek.Müh.Bölümü	2001
Lise	Sokullu Mehmet Paşa Lisesi	1994

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-	TEİAŞ Genel Müdürlüğü	Mühendis
2005-2006	TEDAŞ Genel Müdürlüğü	Mühendis
2004-2005	GAMA Holding, Tic.Tur.A.Ş.	Dış.Tic.Uzmanı

Yabancı Dil

İngilizce, Japonca

Hobiler

Basketbol