

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**154 kV HAVA HATTI SİLİKON KAÜÇUK İZOLATÖRDE
ALTERNATİF VE DARBE GERİLİMLERİNDE ELEKTRİK ALAN
DAĞILIMININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Can YILDIZ**

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Programı: Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**154 kV HAVA HATTI SİLİKON KAÜÇUK İZOLATÖRDE
ALTERNATİF VE DARBE GERİLİMLERİNDE ELEKTRİK ALAN
DAĞILIMININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Can YILDIZ
504001139**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih: 08 Haziran 2010

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
Prof. Dr. Ayten KUNTMAN (İÜ)**

HAZİRAN 2010

Eşime, bugünlere gelmemi sağlayan aileme ve öğretmenlerime,

ÖNSÖZ

Giderek artan tüketim nedeniyle elektrik enerjisinin üretim, iletim, dağıtım ve kullanımı gelişen dünyamızın en önemli sorunlarından biri haline gelmiştir. Enerji iletiminde temel olan iki unsur vardır: iletkenler ve yalıtkanlar. Yalıtkan ortam veya malzeme davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için, maruz kaldıkları elektrik alan şiddetlerinin belirlenmesi gerekir. Elektrik alan şiddetlerinin belirlenmesinde özellikle darbe gerilimi gibi geçici gerilimler için yapılacak çalışmalara yardımcı olacağını düşündüğüm bu tez çalışmasının, konu hakkında kısıtlı olan kaynak sıkıntısını bir nebze olsun azaltacağını umuyorum.

Çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR'e, değerli arkadaşım Araş. Gör. Elk. Y. Müh. Suat İLHAN'a ve değerli eşim Bilge Eşitgen YILDIZ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2010

Can YILDIZ

Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİK ALAN HESABI.....	3
2.1 Boşluktaki Elektrik Alanı.....	3
2.2 Üç Boyutlu Uzayda Elektrik Alanı	4
2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY).....	5
2.3.1 Sonlu elemanlar yönteminin tarihsel gelişimi.....	5
2.3.2 Sonlu elemanlar yönteminin adımları	5
2.3.3 Elektrik problemleri için sonlu sonlu elemanlar yöntemi temel denkleminin yazılması	6
2.4 Sınır Elemanları Yöntemi (SIEY)	10
2.4.1 Sınır elemanları yönteminin tarihsel gelişimi	10
2.4.2 Sınır elemanları yönteminin ilkeleri	10
2.4.3 Sınır elemanları yönteminin temelleri.....	10
2.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sınır Elemanları Yönteminin Karşılaştırılması	13
3. 154 kV SİLİKON-KAUÇUK HAVA HATTI YÜKSEK GERİLİM İZOLATÖRÜNÜN MODELLENMESİ	15
3.1 Elektrik Alan Dağılımlarının İncelenmesi	16
4. ALTERNATİF GERİLİMDE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMININ İNCELENMESİ İÇİN BENZETİM ÇALIŞMALARI	21
4.1 Temiz İzolatör Durumunda SEY ile Elektrik Alan Dağılımının İncelenmesi .	21
4.2 Temiz İzolatör İçin SEY ve SIEY Sonuçlarının Karşılaştırılması	25
4.3 Temiz İzolatörde Silikon-Hava Ortam Geçişinde Dielektrik Katsayılarının Program Tarafından Değerlendirmeye Alınışı	26
4.4 Temiz İzolatör İçin Alternatif Gerilimlerde Korona Halkası Benzetim Sonuçları.....	27
4.5 Temiz İzolatör İçin Alternatif Gerilimlerde Silikon Kauçuk Bölgesi Benzetim Sonuçları.....	30
4.6 Temiz İzolatör İçin Alternatif Gerilimde İzolatör Üzerindeki Potansiyel Dağılımı	38
4.7 Alternatif Gerilimde Kirli İzolatör Yüzeyinde (Üzerinde Su Halkası Olan) Gerilim Dağılımı.....	40
5. YILDIRIM DARBE GERİLİMİNDE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMININ İNCELENMESİ İÇİN BENZETİM ÇALIŞMALARI	45
5.1 Temiz İzolatör İçin Yıldırım Darbe Gerilimi Benzetimleri	46
5.2 Temiz İzolatör İçin Yıldırım Darbe Geriliminde İzolatör Üzerindeki Potansiyel Dağılımı	54
5.3 Kirli İzolatör Geçici Hal Korona Halkası Üzeri Elektrik Alan Dağılımı Sonuçları.....	56

5.4 Darbe Geriliminde Kirli Bir Silikon İzolatör Yüzeyinde Elektrik Alan Dağılımı	
Sonuçları	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63

KISALTMALAR

SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
SIEY	: Sınır Elemanları Yöntemi
FEM	: Finite Element Method
BEM	: Boundary Element Method

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : SEY ve SIEY ile belirlenen korona halkası etrafındaki maksimum ve minimum elektrik alan şiddeti değerlerinin karşılaştırılması	26
Çizelge 4.2 : Alternatif gerilimlerde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm)	28
Çizelge 4.3 : Farklı D/h değerleri için alternatif gerilimlerde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm).....	34
Çizelge 4.4 : D = 160-170-180 mm, h = 140 mm değerleri için, alternatif gerilimlerde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm)	35
Çizelge 4.5 : D = 170 mm ve h = 140 mm için, halka et kalınlığının alternatif gerilimlerde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetlerine etkisi (kV_{ef}/cm).....	35
Çizelge 4.6 : h = 140 mm yerleşimi için, halka çapı ve et kalınlığının maksimum alan şiddetlerine etkisi (kV_{ef}/cm)	38
Çizelge 5.1 : Darbe geriliminde, temiz izolatörlerde çeşitli bölgelerin maksimum alan şiddeti değerleri (kV/cm).....	46
Çizelge 5.2 : Optimal D/h değerleri civarında, darbe geriliminde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm).....	52
Çizelge 5.3 : Farklı korona halka çapı ve halka et kalınlığının, darbe geriliminde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetlerine etkisi (h = 150 mm)	53
Çizelge 5.4 : Temiz izolatörlerde darbe geriliminde izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımı ($U = 100 kV_{tepe}$).....	54
Çizelge 5.5 : Darbe geriliminde, üzerinde su halkası olan kauçuk silikon izolatör yüzeyinde elektrik alan şiddeti dağılımı (kV/cm)	58

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Örnek elektrik alan çizgileri.....	4
Şekil 3.1 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk hava hattı izolatörü.....	15
Şekil 3.2 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk hava hattı izolatörün autocad modeli...	16
Şekil 3.3 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk izolatörün, alan şiddeti kritik noktaları.	18
Şekil 3.4 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk izolatör modelinin 3 boyutlu görünümü	19
Şekil 4.1 : İzolatör modelinin sınır elemanları ile ayrıklaştırılmış hali	22
Şekil 4.2 : Modelin üçgen şekilli sonlu elemanlarla ayrıklaştırılmış hali	22
Şekil 4.3 : Temiz izolatörde, alternatif gerilimde SEY ile elde edilen eş potansiyel çizgileri.....	23
Şekil 4.4 : Temiz izolatörde, alternatif gerilimde SEY ile elde edilen elektrik alan çizgileri.....	23
Şekil 4.5 : Temiz izolatörde, alternatif gerilimde SIEY ile elde edilen eş potansiyel çizgiler	24
Şekil 4.6 : Temiz izolatörde, alternatif gerilimde SIEY ile elde edilen elektrik alan çizgileri.....	24
Şekil 4.7 : SEY ve SIEY ile belirlenen korona halkası etrafındaki elektrik alan şiddeti değerlerinin karşılaştırılması	25
Şekil 4.8 : Silikon-hava sınır yüzeyinde elektrik alan dağılımı (B-noktası)	27
Şekil 4.9 : Alternatif gerilimlerde temiz izolatörde korona halkası üzerindeki alan şiddetleri	29
Şekil 4.10 : 6 farklı çap / konum durumu için, alternatif gerilimlerde temiz izolatörde, korona halkası üzerindeki elektrik alan şiddetleri.....	29
Şekil 4.11 : Alternatif gerilimde temiz izolatörde silikon üzerindeki elektrik alan dağılımı.....	31
Şekil 4.12 : 6 farklı çap / konum değeri için, alternatif gerilimlerde temiz izolatörde silikon üzerindeki elektrik alan dağılımı	32
Şekil 4.13 : $h = 150$ mm konumu için, farklı korona halkası yarı çaplarında, alternatif gerilimde temiz izolatörde silikon üzerindeki elektrik alan şiddeti dağılımı.	33
Şekil 4.14 : $D = 170$ mm ve $h = 140$ mm için, halka et kalınlığının alternatif gerilimde temiz izolatörde korona halkası etrafındaki elektrik alanına etkisi	36
Şekil 4.15 : Alternatif gerilimde, temiz bir silikon izolatör yüzeyindeki gerilim dağılımı.....	39
Şekil 4.16 : İzolatör yüzeyinde yapay kir oluşumu (su damlalarının yerleşimi).....	40
Şekil 4.17 : Kirli izolatör için, alternatif gerilimde, korona halkası üzerinde elektrik alan şiddeti değişimi.....	41
Şekil 4.18 : Alternatif gerilimde, üzerinde su damlalarının bulunması durumunda silikon izolatör yüzeyindeki elektrik alan şiddeti değerleri	42
Şekil 4.19 : Alternatif gerilimde, üzerinde su damlalarının bulunması durumunda silikon izolatör yüzeyindeki gerilim dağılımı	43

Şekil 5.1 : Yıldırım darbe incelemesinde kullanılan darbe şekli	45
Şekil 5.2 : Darbe geriliminde, temiz izolatörde, korona halkası üzerinde alan şiddeti dağılımı	47
Şekil 5.3 : Yıldırım darbe geriliminde, temiz izolatörde, bazı korona halka çap ve konumları için korona halkası üzerindeki alan şiddeti dağılımı	48
Şekil 5.4 : Yıldırım darbe geriliminde, temiz izolatörde, silikon izolatör yüzeyinde alan şiddeti dağılımı	49
Şekil 5.5 : Yıldırım darbe geriliminde, temiz izolatörde, bazı korona halka çap ve konumları için silikon izolatör yüzeyindeki alan şiddeti dağılımı	50
Şekil 5.6 : Temiz izolatörlerde darbe geriliminde izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımı ($U = 100 \text{ kV}_{\text{tepe}}$)	55
Şekil 5.7 : Darbe geriliminde korona halkasının altında su olması durumunda elektrik alan şiddeti dağılımı; $r = 30 \text{ mm}$, $D = 300 \text{ mm}$, $h = 150 \text{ mm}$	58
Şekil 5.8 : Kirli izolatör, $r = 30 \text{ mm}$, $D = 300 \text{ mm}$, $h = 150 \text{ mm}$ darbe analizi yalıtkan bölgedeki elektrik alan dağılımı	59

154 kV HAVA HATTI SİLİKON KAÜÇUK İZOLATÖRDE ALTERNATİF VE DARBE GERİLİMLERİNDE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Elektrostatikğin en önemli konularından biri olan potansiyel farklarının oluşabilmesi için farklı potansiyeldeki noktaların birbirinden yalıtkan ortamlar (malzemeler) ile ayrılması gereklidir. Elektrik enerjisinin insanlık tarihinde kullanıma başlanması ile birlikte, enerjinin, üretim noktaları ile kullanım yerleri arasında iletimi mühendisliğin en önemli konularından biri olmuştur. Bu amaçla enerji iletim hatları kullanılarak yüksek gerilimle enerji iletimi yapılmaktadır. İletim hatlarında ortam koşullarına göre değişik tip ve malzemeden yapılmış izolatörler kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında 154 kV_{ef} harici tip bir silikon izolatörde, yıldırım darbe geriliminde elektrik alan dağılımları incelenmiştir. Elektrik alan dağılımı incelemesine başlamadan önce, sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ve sınır elemanları yöntemi (SIEY) hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Ayrıca, elektrik alanları ve elektrik alan hesabı konusunda genel bilgiler verilmiştir.

Tez çalışmasının son bölümünde, 154 kV harici tip bir silikon kauçuk hava hattı izolatörü, ELECTRO V7.0 isimli lisanslı benzetim programı ile modellenmiştir. ELEKTRO V7.0 programı, eksenel simetrik ve iki boyutlu alan problemlerini sonlu elemanlar veya sınır elemanları yöntemi ile çözmektedir. İzolatör ve korona halkası üzerinde, kritik olduğu düşünülen bölgelerde, şebeke frekanslı alternatif gerilimler ve yıldırım darbe gerilimleri için elektrik alan dağılımları belirlenmiştir. Alan dağılımları, izolatör elemanının temiz olması ve izolatör üzerinde belirli bölgelerde su tabakasının bulunması durumları için tekrarlanmıştır.

Benzetim çalışmalarında amaç, darbe gerilimlerinde izolatörlerde ve korona halkalarında en yüksek elektrik alan şiddeti oluşan noktaların saptanması, bu zorlanmalar sonucu oluşabilecek arızaları gidermek için, en uygun (optimal) korona halka geometrisi ve konumunun belirlenmesidir. Korona halkası tasarımının yeterli olamaması durumunda, izolatör yüzey biçimlerinde yapılacak tasarım değişikliklerine ışık tutabilmek bir diğer hedeftir.

ELECTRIC FIELD ANALYSIS OF 154 kV SILICON-RUBBER LINE INSULATOR FOR AC AND LIGHTNING IMPULSE VOLTAGES

SUMMARY

For the existence of potential differences, which can be seen as one of the most important issues of electrostatics, points with different potential values should be separated with insulated materials. Together with the extensive usage of electricity in human life, transmission of electricity between the point of production and the point of usage has become the most important issues of engineering. For this purpose, high-voltage power transmission lines are used. In these lines, various types of insulators made from various materials are used in concurrence of different environmental circumstances.

In this thesis, we will analyse the impacts of AC and the lightning impulse signal upon electric fields occurred over 154 kV_{ef} external type of silicon rubber insulator. Prior to start with the analysis of electrical fields, we would like to give a brief definition of Finite Element Method (FEM) and Boundary Element Method (BEM), electric fields, and calculations.

In the last part of this thesis, a 154 kV external type silicon rubber transmission line insulator has been modelled by means of computer program licenced under name of ELECTRO V7.0 program, resolves axial symmetry and plane based field problems by using Finite Element Method (FEM) or Boundary Element Method (BEM). Electric fields for network based AC voltages and lightning impulse signals are determined upon insulator and corona ring. Electric fields are re-analysed for different conditions such as the cases where the insulators are clean or where there is water on the surface of insulators.

The purpose of the modelling studies is to determine the points that consists the maximum electrical field values upon insulators and corona rings in the cases of impulse signal; and in order to fix any possible breakdowns, caused by such maximum electrical field values, to determine optimal corona ring geometry and position. Another purpose is to shed light on the new designs of insulator surface profiles.

1. GİRİŞ

Hızla gelişen dünyamızda tüketilen enerji miktarı sürekli olarak artmaktadır. Elektrik enerji kullanımındaki artış, diğer enerji türlerine göre daha da hızlı olmaktadır. Dolayısıyla, elektrik enerji üretim, iletim ve dağıtım olanaklarının da ihtiyaca paralel olarak arttırılması gerekmektedir.

Elektrik enerjisi üretiminde fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaktadır. Son yıllarda, tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de yenilenebilir enerji kaynaklarından yararlanma ve akıllı şebekelerin kurulmasının ilk aşaması olan dağıtılmış üretim tesislerini oluşturma çabası göze çarpmaktadır. Gerek yenilenebilir enerji tabanlı üreteçler, gerekse fosil yakıt tabanlı üreteçler birincil enerji kaynaklarının konumu ve bazı çevresel kaygılarla genelde yerleşim alanlarına ve tüketim merkezlerine uzak yerlere kurulur. Bu nedenle elektrik enerji üretim tesisleri ile kullanım noktaları arasında önemli mesafeler olmaktadır. Ekonomik açıdan, bu uzun mesafelerin yüksek gerilim enerji iletim sistemleri ile aşılması uygun olmaktadır.

Enerji iletim sistemleri, direkler (taşıyıcı veya durdurucu), iletkenler (genel olarak çelik özlü alüminyum), izolatörler, bağlantı ve gerilim düzenleme amaçlı kullanılan metal hırdavat malzemelerinden oluşmaktadır. Normal işletme koşullarında, enerji iletim hattı izolatörleri hat gerilimi ile zorlanmaktadır. Fakat zaman zaman, doğal atmosferik olaylar nedeniyle oluşan yıldırım aşırı gerilimleri, şebeke açma-kapama, yük atma vb işlemler nedeniyle oluşan açma kapama aşırı gerilimleri ve çeşitli arıza ve olağan dışı çalışmalar sonucu oluşan gerilim yükselmeleri, izolatörlerin daha yüksek gerilimlerle zorlanmalarına neden olabilmektedir. Hava hattı izolatörlerinde oluşan arızaların en önemli nedeni bu aşırı gerilimlerin yol açtığı aşırı zorlanmalardır (aşırı elektrik alan şiddetleri).

Bu tezin birincil amacı, yıldırım darbe gerilimlerinde, temiz ve kirli hava hattı izolatörlerinde elektrik alan dağılımlarını sonlu elemanlar yöntemi ve sınır elemanları yöntemini kullanarak bilgisayar destekli benzetimlerle incelemektir. Bazı

üstünlükleri nedeniyle son yıllarda porselen ve cam izolatörlerin yerini almaya başlayan ve kullanımı hızla yayılan silikon kauçuk izolatörler üzerine yoğunlaşmış ve örnek olarak ulusal elektrik iletim şebekemizde kullanılmak üzere geliştirilen 154 kV silikon kauçuk izolatörler seçilmiştir.

Bu amaçla öncelikle alternatif gerilim için benzetimler yapılmış, daha sonra yıldırım darbe geriliminde benzetimler gerçekleştirilmiştir. Silikon izolatör yüzeyinde, içinde ve korona halkası üzerinde oluşan elektrik alan dağılımları belirlenerek, aşırı zorlanmaları en aza indirecek en uygun korona halka tasarımı ve konum belirlemesi yapılmıştır. Çalışmanın uzun vadeli bir diğer hedefi de, geometri, tasarım ve malzeme seçiminde iyileştirmeler yaparak daha uzun ömürlü, maliyet-etkin 154 kV silikon kauçuk hava hattı tasarımlarına ışık tutmaktır.

2. ELEKTRİK ALAN HESABI

2.1 Boşluktaki Elektrik Alanı

Statik elektrik alanlarının varlığı bazı deneylerle ve denklemlerle açıklanır. Bunların en önemlisi Charles de Coulomb tarafından yapılan deneylerle ortaya çıkan, itme ve çekme kuvvetlerinin hesaplanmasını temel alan denklemlerdir.

Aralarındaki uzaklık r ve elektriksel yükleri q_1 ve q_2 olan boşlukta hareketsiz iki noktasal yük birbirine $q_1 q_2 / r^2$ ile orantılı bir elektriksel kuvvet uygular. Kuvvetin yönü yüklerin kutbiyetine bağlıdır. İki den fazla yük olması durumunda, her yüke etkiyen kuvvet toplamsallık ilkesi kullanılarak hesaplanır [1].

İki noktasal yük arasındaki elektriksel kuvvet, ϵ_0 kullanılan birim sistemine bağlı bir sabit olmak üzere,

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \cdot \vec{e}_{12} \quad (2.1)$$

eşitliği ile hesaplanır. (2.1) eşitliğindeki $\vec{e}_{12}$, yükleri birleştiren doğrultu boyunca birim vektörü göstermektedir. Kuvvet birimi olarak Newton, uzunluk birimi olarak metre, elektrik yük birimi olarak Coulomb alınırsa boşluğun dielektrik sabiti veya geçirgenlik olarak adlandırılan kuvvet sabiti

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \text{ F/m} \quad (2.2)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. İki den fazla yükün olması durumunda yüklerin birbirine etkilediği kuvvet,

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \cdot \vec{e}_i \quad (2.3)$$

eşitliği ile hesaplanır. Elektrik yüklerinin uzay içerisinde belli bir ρ [C/m³] hacimsel yük yoğunluğu ile dağıldığı varsayılırsa, kuvvete ilişkin denklem

$$\vec{F} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_v \frac{\rho \vec{r}}{r_i^3} dv \quad (\vec{r} = r \vec{e}) \quad (2.4)$$

haline dönüşür.

2.2 Üç Boyutlu Uzayda Elektrik Alanı

Yukarıda açıklanan denklemler doğrusal düzlemde geçerlidir. Denklemler uzayda her bir düzlem için düzenlenebilir ve tek bir denklem olarak yazılabilir. Bu durumda denklem

$$\vec{F}(x, y, z) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\xi, \eta, \zeta) \frac{\vec{r}}{r^3} d\xi d\eta d\zeta \quad (2.5)$$

şeklini alır. Uzaydaki kuvvet ve statik elektrik alanı arasındaki bağıntı kullanılarak

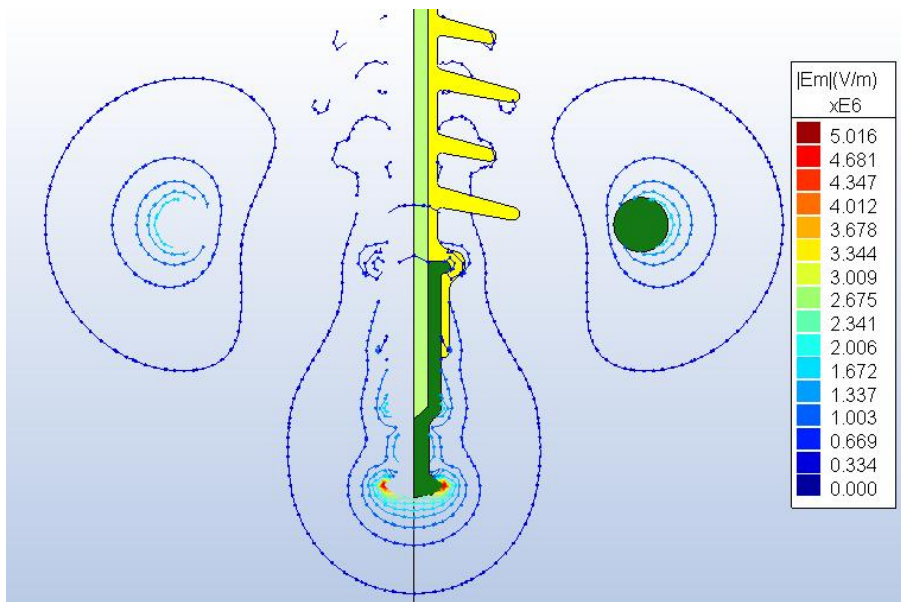
$$\vec{F}(x, y, z) = q\vec{E}(x, y, z) \quad (2.6)$$

olur. (2.5) ve (2.6) eşitliklerinden elektrik alan şiddet vektörü

$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\xi, \eta, \zeta) \frac{\vec{r}}{r^3} d\xi d\eta d\zeta \quad (2.7)$$

olarak bulunur.

Uzayda aynı statik elektrik alan değerine sahip noktalar birleştirilerek Şekil 2.1’de gösterildiği gibi elektrostatik alan çizgileri oluşturulur.



Şekil 2.1 : Örnek elektrik alan çizgileri.

2.3 Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY)

2.3.1 Sonlu elemanlar yönteminin tarihsel gelişimi

Sonlu elemanlar yönteminin tarihi, 1904 Nobel ödüllü İngiliz matematikçi Lord Rayleigh ve İsviçreli bilim adamı Ritz tarafından, deneme fonksiyonlarını, diferansiyel denklemlerin yaklaşık çözümlerinde kullanmasına kadar eskiye gitmektedir. Bu eski yaklaşımlarda modern SEY ile karşılaştırıldığında en önemli sakınca ve eksiklik, deneme fonksiyonlarının çözülmek istenen problemin tüm alanına uygulanmak zorunda olmasıdır. 1940'lerde Courant'ın parçalı alt alanlarda ve kısmi bölgelerde fonksiyon kavramını koymasına kadar, Galerkin yöntemi SEY için güçlü bir temel oluşturmaktaydı. Courant'ın ortaya attığı bu kavram, SEY'in gerçek başlangıcı olarak kabul edilebilir. Sonlu elemanlar terimi ise ilk olarak 1960 yılında, uçaklarda zorlanma analizi çözümlerinde Clough tarafından kullanılmıştır [3].

1960 ve 70'lerde SEY, levha kabuk bükülme, basınç kapları ve genel üç boyutlu elastik yapıların analizinde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, akışkan ve ısı taşınımı problemlerinin çözümünde uygulama alanı bulmuştur. Bu zaman dilimi içerisinde dinamik analiz için de kullanılmıştır [3].

Sonlu elemanlar yönteminin elektrik mühendisliği alanında ilk kullanımı yine 1960'ların sonlarına denk düşmektedir. Bu alanda milat kabul edilebilecek ilk uygulama, üçgen sonlu farklar adı altında ivmelendirme mıknatısları üzerine A. Winslow tarafından yapılmıştır. Helmholtz denkleminin sonlu elemanlar yöntemi ile çözümü Alta Frekuensi Konferansı'nda P. Silvester tarafından sunulmuştur. Elektrik makineleri için iki boyutlu doğrusal olmayan manyeto-statik teknikler ilk olarak 1970'lerde ortaya konulmuştur. Bu açılımları sonrasında, doğrusal olmayan Eddy akımları yöntemleri, Eddy akım kayıplarının bulunması için kullanılmıştır [4].

2.3.2 Sonlu elemanlar yönteminin adımları

SEY'in temel adımları aşağıdaki gibi sıralanır;

- Çözüm yapılacak sistem kapalı bir alan veya hacimden oluşmalıdır.
- Sistemde bulunan tüm malzemelerin fiziksel özellikleri tanımlı olmalıdır.
- Sınır koşullarının, tanımlı olması gereklidir.

Tanımlanan sistemde çözüm yapılabilmesi için, sistem sonlu elemanlara bölünür. Bu sonlu eleman üzerinde ve içerisinde bulunan yaklaşıklık değişkeninin hesaplandığı her nokta düğüm olarak adlandırılmaktadır. Elemanın üzerinde bulunmayan düğümler iç düğüm olarak adlandırılır ve diğer sonlu elemanlarla bağlanamaz. Düğüm noktası olmayan noktalardaki değerler, interpolasyon yöntemiyle bulunur [2].

2.3.3 Elektrik alan problemleri için sonlu sonlu elemanlar yöntemi temel denkleminin yazılması

SEY malzeme geometrisine bağlı olduğundan bir, iki ve üç boyutlu elemanlar tanımlanarak analiz yapılmaktadır. Elektrik alan analizleri genellikle iki ve üç boyutlu geometriler üzerinde incelenmektedir. Eksenel simetrinin mevcut olduğu durumlar için iki boyutlu analiz, geometrinin karmaşık olduğu ve simetrik olmadığı durumlarda üç boyutlu analiz kullanılmaktadır.

Sonlu elemanın belirlenmesinde temel seçim unsuru problemin geometrisidir. Örneğin geometri bir boyutlu ise bir boyutlu sonlu eleman kullanılması zorunludur. Bir boyutlu eleman iki düğüm noktasından oluşan bir çizgiden oluşmaktadır. İki boyutlu eleman ise geometrinin elvereceği şekilde seçilebilir. Üçgen, kare, çokgen veya herhangi bir geometri tanımına uyan kapalı bir yüzey sonlu eleman olarak tanımlanabilir [2].

Temel denklemin yazılabilmesi için yaklaşıklık fonksiyonunun tanımlanması gerekmektedir. (u,v,w) genel koordinat sisteminde tanımlanan yaklaşıklık değişkenleri

$$\phi_M(u, v, w) = \sum_{k=0}^{N_1^{(2)}} a_k u^i v^j w^s \quad i + j + s \leq M \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada M polinomun derecesidir. $N_1^{(2)}$ toplam terim sayısı

$$N_1^{(2)} = \left[\frac{(M+1)(M+2)}{2} \right] \quad (2.9)$$

denklemleri ile bulunur. M = 1 olduğu birinci dereceden yaklaşıklık türevi bir, iki, üç boyut için sırası ile;

$$\phi(u) = a_1 + a_2 u \quad (2.10)$$

$$\phi(u, v) = a_1 + a_2 u + a_3 v \quad (2.11)$$

$$\phi(u, v, w) = a_1 + a_2 u + a_3 v + a_4 w \quad (2.12)$$

şeklinde belirtilir. İki boyutlu yaklaşıklık ifadesi koordinatlara bağlı terimlerin bulunması için Paskal üçgeninden, üç boyutlu yaklaşıklık ifadesi koordinatlara bağlı terimlerin bulunması için ise Paskal piramidinden yararlanılır [2].

Üç boyutlu eleman olarak düzgün dörtyüzlü çoğunlukla kullanılan bir elemandır. Elemanın bağımlı değişkeninin V potansiyel değeri olduğu varsayılırsa, her noktadaki potansiyel değeri lineer yaklaşıklık kullanılarak

$$V(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (2.13)$$

genel denklemi ile yazılabilir. Bu durumda her düğümdeki potansiyel ifadesi

$$V_1 = a + bx_1 + cy_1 + dz_1 \quad (2.14)$$

$$V_2 = a + bx_2 + cy_2 + dz_2 \quad (2.15)$$

$$V_3 = a + bx_3 + cy_3 + dz_3 \quad (2.16)$$

$$V_4 = a + bx_4 + cy_4 + dz_4 \quad (2.17)$$

olur. Bu lineer denklem takımı çözülerek a, b, c, d katsayıları

$$a = \frac{1}{6V} (a_1 V_1 + a_2 V_2 + a_3 V_3 + a_4 V_4) \quad (2.18)$$

$$b = \frac{1}{6V} (b_1 V_1 + b_2 V_2 + b_3 V_3 + b_4 V_4) \quad (2.19)$$

$$c = \frac{1}{6V} (c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3 + c_4 V_4) \quad (2.20)$$

$$d = \frac{1}{6V} (d_1 V_1 + d_2 V_2 + d_3 V_3 + d_4 V_4) \quad (2.21)$$

eşitlikleri elde edilir. V, dörtyüzlünün hacmine eşittir ve değeri

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

ile bulunur. a, b, c, d katsayıların karşılıkları (2.13) denkleminde yerine konulduğunda eşitlik matrisel ifade ile;

$$V(x, y, z) = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z \end{bmatrix} \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

halini alır. İfade kapalı biçimde yazılırsa

$$V(x, y, z) = \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_2 + \alpha_3 V_3 + \alpha_4 V_4 = \sum_{i=1}^4 \alpha_i V_i \quad (2.24)$$

şeklini alır. α biçim işlevi, dört köşe arasında doğrusal interpolasyon işlevleridir. i'nci köşe üzerinde, sadece o köşenin indisine sahip olan α_i bire, diğerleri ise sıfıra eşittir.

Sık kullanılan silindirselsel ve küresel koordinatlar için sırasıyla

$$V(r, \theta, z) = a + br + c\theta + dz \quad (2.25)$$

$$V(r, \theta, \phi) = a + br + c\theta + d\phi \quad (2.26)$$

yazılarak çözülür. Biçim işlevi bulunurken polinomlardan oluşan denklem takımları ile işlem yapıldığından kartezyen koordinatlarda yapılan tüm işlemlerde (x,y,z) yerine, silindirselsel koordinatlarda (r, θ, z) , küresel koordinatlarda (r, θ, ϕ) , yazılarak sonuca ulaşılabilir [2].

Sonlu eleman içindeki elektrostatik potansiyel enerji ifadesi

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon |E|^2 dV = \frac{1}{2} \iiint_V \epsilon |\nabla V^{(e)}|^2 dV \quad (2.27)$$

şeklinde yazılır. Burada üç boyutlu çözüm bölgesi içinde serbest yüklerin bulunmadığı kabul edilirse potansiyelin gradyanı

$$\nabla V^{(e)} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 V_i \cdot V_j \cdot \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j \quad (2.28)$$

bulunur. Bu da enerji bağıntısında yerine konursa

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \epsilon \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 V_i \cdot \left| \iiint_V \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j \cdot dV \right| V_j \quad (2.29)$$

bağıntısı elde edilir.

$$\iiint \nabla \alpha_i \cdot \nabla \alpha_j \cdot dV = k_{ij}^{(e)} \quad (2.30)$$

olarak bilinirse $W^{(e)}$ bağıntısı ikinci dereceden bir matris biçiminde

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \varepsilon [V^{(e)}]^T \cdot [K^{(e)}] \cdot [V^{(e)}] \quad (2.31)$$

olarak bulunur. Katsayılar matrisinin

$$k_{ij}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_i^2 \cdot b_j^2 + c_i^2 \cdot c_j^2 + d_i^2 \cdot d_j^2) \quad (2.32)$$

eşitliğinden bulunabilir.

İki adet eşkenar dörtgen eleman birleştirildiğinde mevcut 4 köşeden 3 tanesi karşılıklı olarak ortak olmakta ve 2 adet 4 köşeli elemanın birleşmesinden bir adet 5 köşeli eleman ortaya çıkmaktadır. Yeni 5 köşeli elemanın katsayı matrisi ise

$$[K^{(b)}] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(b)} & k_{12}^{(b)} & k_{13}^{(b)} & k_{14}^{(b)} & k_{15}^{(b)} \\ k_{21}^{(b)} & k_{22}^{(b)} & k_{23}^{(b)} & k_{24}^{(b)} & k_{25}^{(b)} \\ k_{31}^{(b)} & k_{32}^{(b)} & k_{33}^{(b)} & k_{34}^{(b)} & k_{35}^{(b)} \\ k_{41}^{(b)} & k_{42}^{(b)} & k_{43}^{(b)} & k_{44}^{(b)} & k_{45}^{(b)} \\ k_{51}^{(b)} & k_{52}^{(b)} & k_{53}^{(b)} & k_{54}^{(b)} & k_{55}^{(b)} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

olur. Bu katsayı matrisi oluşturulurken, matrisin elemanları genel düğümler arasında belirlenir. Eğer genel düğümler, iki sonlu elemanın düğümlerini (yerel düğüm) içeriyorsa birleşik katsayılar matrisi elemanı, ayrık durumdaki katsayıların toplamına eşit olur. Buna göre birleşik katsayılar matrisi

$$[K^{(b)}] = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{14}^{(1)} & 0 & k_{13}^{(1)} & k_{12}^{(1)} \\ k_{41}^{(1)} & k_{44}^{(1)} + k_{44}^{(2)} & k_{41}^{(2)} & k_{43}^{(1)} + k_{43}^{(2)} & k_{42}^{(1)} + k_{42}^{(2)} \\ 0 & k_{14}^{(2)} & k_{11}^{(2)} & k_{13}^{(2)} & k_{12}^{(2)} \\ k_{31}^{(1)} & k_{34}^{(1)} + k_{34}^{(2)} & k_{31}^{(2)} & k_{33}^{(1)} + k_{33}^{(2)} & k_{32}^{(1)} + k_{32}^{(2)} \\ k_{21}^{(1)} & k_{24}^{(1)} + k_{24}^{(2)} & k_{21}^{(2)} & k_{23}^{(1)} + k_{23}^{(2)} & k_{22}^{(1)} + k_{22}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

olur. Birden fazla sonlu elemanın olması durumunda bu işlemler tüm çözüm uzayında uygulanır. Katsayıların elde edilmesinden sonra denklem uygun iteratif yöntem ile çözülerek sonuç elde edilir [2].

2.4 Sınır Elemanları Yöntemi (SIEY)

2.4.1 Sınır elemanları yönteminin tarihsel gelişimi

Sınır elemanları yönteminin 1886'lı yıllara uzanan uzun bir geçmişi vardır. İtalyan matematikçi Somigliana tarafından 1886 yılında yüzey şekil değiştirmeleri ve yüzey gerilmeleri üzerine bir integral kurulmasında sınır elemanları kullanılmıştır. 65'lerin ortasına kadar integral denklemleri analitik yöntemlerle çözülmekte ve dolayısıyla basit integral denklemlerden ötesi çözüleliyordu. 1963 yılında, sınır elemanlarının düğüm noktaları ile tanımlanmasını öngören yaklaşımı içeren 2 önemli yayın ile sınır elemanları yönteminde sıçrama yaşanmıştır. İntegral denklemleri iki boyutlu Laplace denklemi haline getirilmiştir. 1967 yılında Rizzo şekil değiştirmeler ve gerilmeler üzerine sınır integralini kurarak yeni bir yaklaşım yaratmıştır. Bu yaklaşım Cruze tarafından 3 boyutlu denklemlere de uygulanmıştır. 1970'lerin başından itibaren sınır elemanları yöntemi geliştirilerek günümüzde özellikle mekanik problemlerin çözümünde çokça kullanılan bir yöntem haline gelmiştir [5].

2.4.2 Sınır elemanları yönteminin ilkeleri

Sınır elemanları yönteminde diferansiyel denklemler, alandaki yüzeyin üzerine uygulanabilen integral değişkenlerine dönüştürölür. İntegraller, sınır elemanlarına bölünmüş olan yüzey üzerine yerleştirilirler. Eğer sınır koşulları belirtilirse tek bir sonuca ulaşan matematiksel denklemler ortaya çıkarılır [5].

2.4.3 Sınır elemanları yönteminin temelleri

Yüksüz bir elektrostatik alanda Er ile gösterilen elektrik alan şiddetinin gradyanı sıfırdır:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.35)$$

ve u ile gösterilen potansiyel fonksiyonu kullanılarak;

$$E = -\nabla u \quad (2.36)$$

eşitliği yazılabilir. Maxwell denkleminde yararlanarak; elektriksel deplasman vektörü D için

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (2.37)$$

yazılır. Dielektrik sabiti ϵ olan lineer ve izotropik bir bölge için;

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.38)$$

yazılır. Eğer bölge homojen ise denklem (2.36), (2.37) ve (2.38)'ten yararlanarak iki boyutlu problemler için;

$$\nabla^2 u = 0 \quad (2.39)$$

biçiminde bir Laplace denklemi elde edilir.

Bir ∂B sınırı ile çevrelenmiş B bölgesi için Green teoremi yazılarak;

$$\iint_B (u \nabla^2 G - G \nabla^2 u) dB = \int_{\partial B} \left(u \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial u}{\partial n} \right) dr' \quad (2.40)$$

elde edilir. Bilinmeyen potansiyel ifadesi için serbest-uzay Green fonksiyonu:

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \ln \frac{k}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \quad (2.41)$$

ve

$$-\nabla^2 G = 2\pi \delta(\vec{r}, \vec{r}') \quad (2.42)$$

olur. Buradaki δ Dirac delta fonksiyonu ve $\vec{r}'$ incelenen noktadır. Green fonksiyonundaki k , bir sabit olup fonksiyonun B bölgesi boyunca pozitif tanımlı olması için $k > \max |\vec{r}, \vec{r}'|$ olmalıdır. Denklem (2.14) ve (2.15)'den yararlanarak:

$$\int_{\partial B} \left(u \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial u}{\partial n} \right) dr' = \begin{cases} -2\pi u(\vec{r}) & \vec{r} \in B \\ 0 & \vec{r} \in B_0 \end{cases} \quad (2.43)$$

yazılır. B_0 , B bölgesinin dış tarafını temsil etmektedir. Denklem (2.43), potansiyel ve Green fonksiyonu sonsuzda sürekli olmak şartıyla sonsuz bir bölge için aşağıdaki gibi genişletilebilir:

$$-\int_{\partial B} \left(u \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial u}{\partial n} \right) dr' = \begin{cases} 0 & \vec{r} \in B \\ -2\pi u(\vec{r}) & \vec{r} \in B_0 \end{cases} \quad (2.44)$$

Denklem (2.43) ve (2.44)'ün sonuçlarından yararlanarak;

$$\int_{\partial B} (u - u_0) \frac{\partial G}{\partial n} - G \left(\frac{\partial u}{\partial n} - \frac{\partial u_0}{\partial n} \right) dr' = u(\vec{r}) \quad (2.45)$$

elde edilir. $u = u_0$ olarak seçilirse;

$$\sigma(\vec{r}) = \frac{\partial u}{\partial n} - \frac{\partial u_0}{\partial n} \quad (2.46)$$

yazılarak, Laplace denklemi için basit katlı integral denklem formülasyonu aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\int_{\partial B} G(\vec{r}, \vec{r}') \sigma(\vec{r}') d\vec{r}' = u(\vec{r}) \quad (2.47)$$

İntegral, bilinmeyen bir eşdeğer kaynağından $\sigma(\vec{r})$ ve Green fonksiyonundan $G(\vec{r}, \vec{r}')$ oluşmuştur. Denklem (2.47)'deki eşdeğer kaynak bulunduğundan sonra bölgedeki herhangi bir noktada bilinmeyen potansiyel değeri ve potansiyelin normale göre türevi hesaplanabilir.

Dirichlet sınırları için birinci tip Fredholm integralinden yararlanılır. Dirichlet sınırı için dış bölge formülasyonu:

$$u(\vec{r}) = \int_{\partial B} G(\vec{r}, \vec{r}') \sigma(\vec{r}') d\vec{r}' + C \quad (2.48)$$

olur. Buradaki C aşağıdaki yan şartlar altında tanımlanan bir sabittir:

$$\int_{\partial B} \sigma(\vec{r}') d\vec{r}' = 0 \quad (2.49)$$

Denklem (2.49), logaritmik potansiyelin sonsuzda sürekli olması için gereklidir. Neumann sınırı için ikinci tip Fredholm integralinden yararlanılır. ∂B sınırı boyunca potansiyelin normal türevi:

$$q(\vec{r}) = \int_{\partial B} H(\vec{r}, \vec{r}') \sigma(\vec{r}') d\vec{r}' + \pi \sigma(\vec{r}) \quad (2.50)$$

olarak yazılır. Buradaki $q(\vec{r})$ ve $H(\vec{r}, \vec{r}')$, sırasıyla potansiyelin $\partial u / \partial n$ ve Green fonksiyonunun $\partial G / \partial n$ normal türevidir. İntegral denklemlerindeki eşdeğer kaynağı hesaplamak için Galerkin yöntemi kullanılır [11].

Sınır elemanları yönteminin parçalı homojen bölgeler için Laplace denklemlerinin çözümünde etkili bir yöntem olduğu gösterilmiştir. Bunu sağlayan en önemli etken

ise bilinmeyenlerin sadece sınırlar ve arakesit üzerinde gösterilerek problemin boyutunun bir derece indirgenmesidir. Bu yönüyle sınır elemanları yöntemi, tüm bölgenin ayrıştırılmasını gerektiren sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemlerinden ayrılmaktadır. Eşdeğer kaynak bilinmeyendir ve bu eşdeğer kaynak bulunduğundan sonra problem bölgesindeki diğer bilinmeyen parametreler kolaylıkla hesaplanabilir. Bu yöntemde, eleman sayısının arttırılmasıyla daha doğru sonuçların elde edileceği açıktır. Karmaşık geometriler için fazla sayıda eleman kullanılacağından bir bilgisayar programlama dilinin kullanılması gereklidir [11].

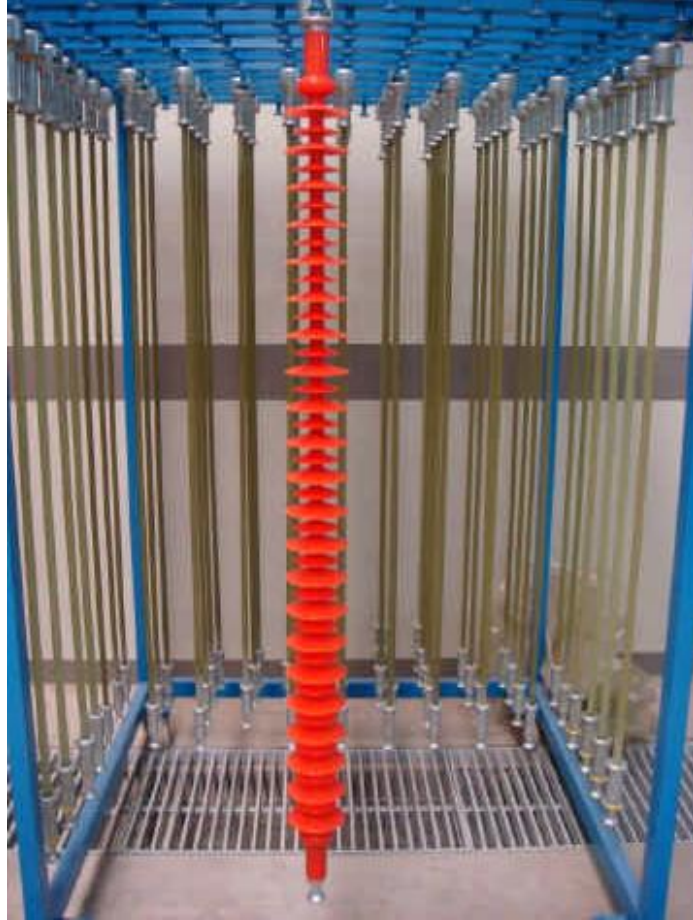
2.5 Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Sınır Elemanları Yönteminin Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar yönteminin kimi mühendislik hesaplarında ve özellikle bilgisayar tabanlı mühendislik uygulamalarında ihtiyaca cevap verememesi nedeniyle Sınır Elemanları Yöntemi'ne gereksinim duyulmuştur. Özellikle sonuçlarda kesinliğin arandığı hesaplamalarda SIEY, SEY'e göre büyük üstünlük göstermekte ve bu nedenle kullanımı kaçınılmaz bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. SEY, bilgisayar destekli mühendislik sistemlerinin çözmekte zorlandığı birçok durumda kullanışsız hale gelebilmektedir. Sonlu elemanların analizi halen istenilen parça veya alandaki ağların tanımlanmasında göreceli olarak yavaş bir yöntem olarak kalmaktadır.

SIEY, SEY'e, mekanik problemlerde gerilme yığılmasının ve gerilme yüzeyinin sonsuza uzadığı durumlarda daha hassas sonuçlar verdiği için güçlü bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Sınır elemanları yönteminin en önemli özelliği, hacim yerine yüzeyin göz önüne alınmasıdır. Bu nedenle sınır eleman kodlarını oluşturan katı modeller ve ağ yapıları ile kullanmak daha kolaydır. Bu üstünlük, yöntemin özellikle sonlu elemanlarla gerçekleştirilemeyecek kadar zor dizeler içermesi halinde, tasarım yapabilme açısından önemlidir. Ağlar kolayca oluşturulabilir ve tasarım değişiklikleri, toptan yeni bir ağ yapılandırması gerektirmez. Sınır eleman ağları, özellikle üç boyutlu olanları, yapının sade ve sınırlar kullanılarak tanımlanması halinde kolayca bilgisayar destekli tasarım sistemlerine bağlanabilir. İnceleme işlemi sonlu elemanlarla kabul görmeyen, sürekli olmayan elemanların kullanılmasından dahi daha basittir [6].

3. 154 kV SİLİKON-KAUÇUK HAVA HATTI YÜKSEK GERİLİM İZOLATÖRÜNÜN MODELLENMESİ

Benzetim çalışmalarında, izolatör olarak 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk bir hava hattı bir izolatör seçilmiştir. Seçilen izolatör Şekil 3.1'den görülebilir.



Şekil 3.1 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk hava hattı izolatörü.

İzolatör, merkezinde fiber çekirdek taşıyıcı bölüm ve üzerinde etekli yapıda silikon kauçuk izolatör tabakadan oluşmaktadır. 21 adet 116 mm çaplı geniş etek ve 20 adet 90 mm çaplı dar etekten oluşmaktadır. Etekler arasındaki mesafe 32,4 mm'dir.

Korona halkasını da içeren eksenel simetrik modelin Autocad ile çizimi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk hava hattı izolatörün autocad modeli.

3.1 Elektrik Alan Dağılımlarının İncelenmesi

Hava hattı izolatörleri şebeke frekanslı AC gerilimlerle sürekli olarak ve darbe gerilimleri ile geçici olarak zorlanırlar. Bu nedenle iki farklı gerilim türü için elektrik alan dağılımları incelenmiştir. Her iki gerilim türü için de benzetimler

gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmanın son bölümünde izolatör yüzeyine su halkaları yerleştirilerek benzetimler yapılmıştır.

Bunlardan biri sürekli hal çalışmayı temsil eden 100 kV_{ef} değerli 50 Hz şebeke frekanslı alternatif gerilimdir. 100 kV_{ef} hat gerilimi için yapılan benzetimlerde, kritik noktalar için tablo ve grafikler halinde verilen alan şiddeti genlikleri efektif değerlerdir.

İkinci gerilim türü, 100 kV_m tepe değerli yıldırım darbe gerilimidir. Tepe değerine ulaşma süresi 1,2 µs, tepe değeri 100 kV ve yarı değere düşme süresi de 50 µs olarak tanımlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda kritik noktalar için, darbe gerilimi ile elde edilen elektrostatik alan değerleri anlık değerlerdir.

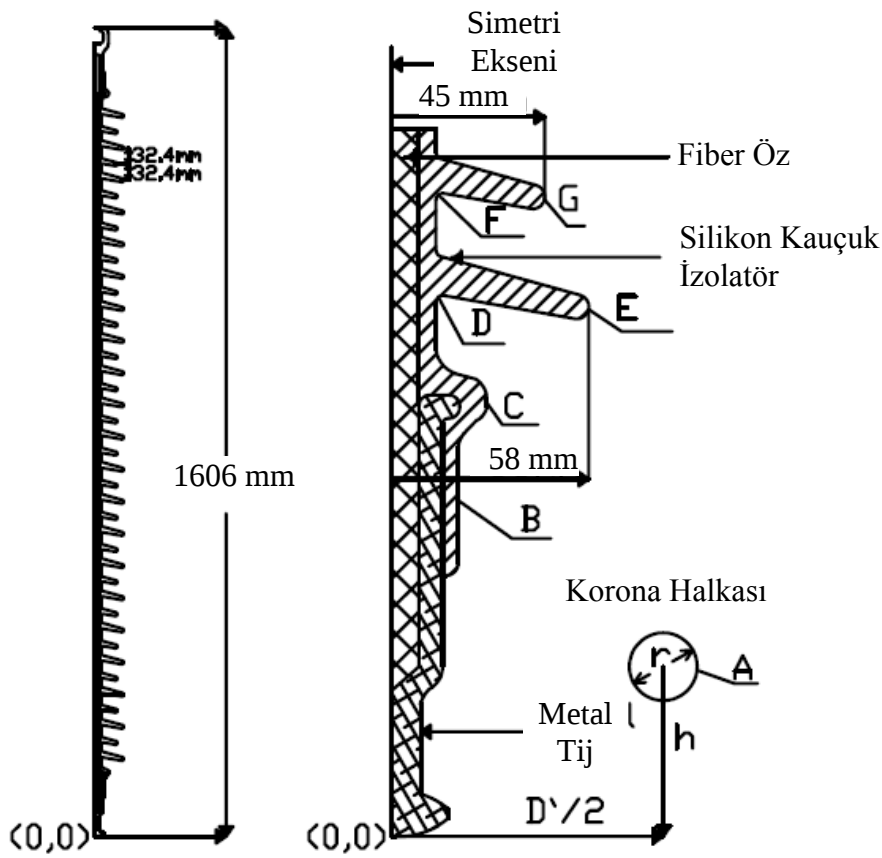
154 kV_{ef}'lik silikon-kauçuk hava hattı izolatör için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında, izolatör üzerinde, silikon içinde ve korona halkası etrafında çeşitli noktalarda alan şiddeti değerleri belirlenmiştir. Kapsamı daraltmak ve daha sağlıklı değerlendirmeler yapılabilmesi için, izolatör ve korona halkası tasarımı açısından, alan şiddeti değerinin kritik olduğu Şekil 3.3'te belirtilen noktalar için sonuçlar verilmiştir. Bilgisayarda modellenmiş olan silikon kauçuk izolatörün, bilgisayar modelinden oluşturulan üç boyutlu görüntüsü Şekil 3.4'te verilmiştir.

Geçmişte yapılan çalışmalarda, korona halka geometrisinin, izolatörlerde ve korona halkasındaki elektrik alan şiddeti dağılımlarına büyük etkisi olduğu saptanmıştır [7-8-9]. Ayrıca, korona halkası konumunun da alan dağılımlarında etkin olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, çalışmamızda silikon yüzeyinde, silikon içinde ve korona halkasının üzerinde oluşan elektrik alan şiddetlerinin korona halka geometrisi ve yerleşimine göre değişimi irdelenmiş; izolatör yalıtım performansını iyileştirmek için en uygun halka geometrisi ve konumu saptanmaya çalışılmıştır.

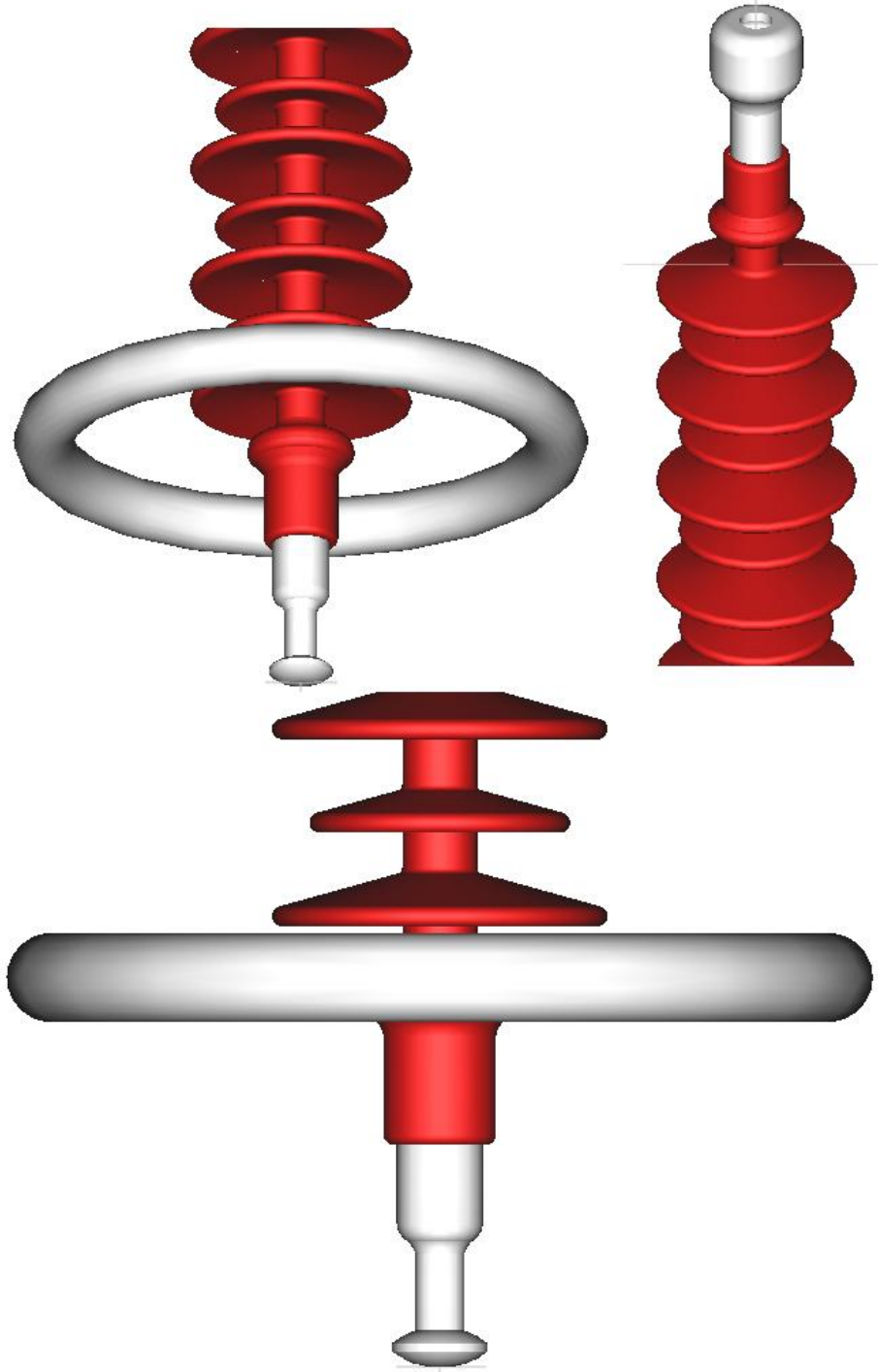
Şekil 3.3'te de görüldüğü gibi izolatör üzerinde kritik noktalar belirlenmiş ve yapılan benzetim sonuçları bu tanımlara göre sunulmuştur. Bu noktalar;

- A noktası, korona halkası üzerindedir.
- B noktası, silikon izolatörün metal tiji sardığı bölümdedir.
- C noktası, metal tijin uç bölümünde oluşan bombenin üzerindedir.
- D noktası, birince etek altı bölgededir.
- E noktası, birinci etek ucudur.

- F noktası, ikinci etek altı bölgededir.
- G noktası, ikinci etek ucu bölgedir.
- D değeri, korona halka çapıdır.
- h değeri, korona halkasının merkezinin gerilim uygulanan metal kısım alt ucundan olan dikey yüksekliğıdır.
- r değeri, korona halkası et kalınlığıdır.



Şekil 3.3 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk izolatörün, alan şiddeti kritik noktaları.



Şekil 3.4 : 154 kV, 100 kN silikon-kauçuk izolatör modelinin 3 boyutlu görünümü.

4. ALTERNATİF GERİLİMDE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMININ İNCELENMESİ İÇİN BENZETİM ÇALIŞMALARI

Alternatif gerilimler için yapılan benzetimlerde 100 kV_{ef}, 50 Hz frekanslı hat gerilim değeri dikkate alınmıştır. Benzetim çalışmaları, izolatörün kirli ve temiz olması durumları için tekrarlanmıştır. Elektrik alan dağılımları dikkate alınarak, korona halkasının en uygun boyutta ve en uygun konumda yerleştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

Alternatif gerilim benzetimlerinde, ELECTRO programının bir seçeneği olarak “hybrid” çözüm yöntemi seçilmiştir. Bu durumda çözüm yöntemi sınır elemanları yöntemini esas kabul etmektedir. Yöntemlerin etkinliği için sınır elemanları yöntemi ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde elde edilen değerlerin duyarlılığını arttırmak için korona halkasının etrafındaki bölge 2000 üçgen eleman, silikon izolatörün alt ucu ile ikinci etek arasındaki bölge 20000 üçgen eleman ilave edilerek artırılmıştır.

Elektrik alan dağılımları farklı korona halkası çapları ve düşey ekseninde farklı korona halkası konumlandırılmaları için belirlenmiştir. Bu amaçla;

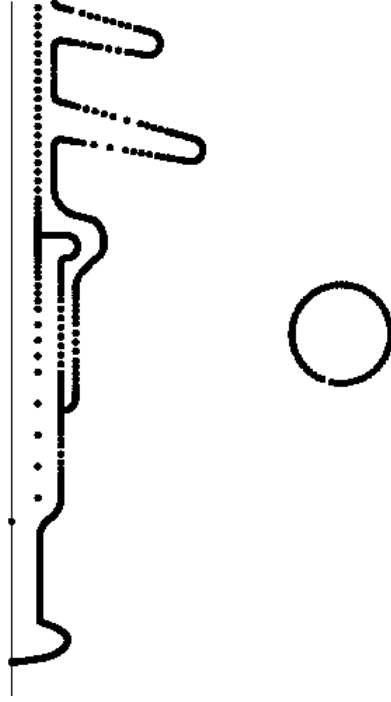
- İzolatör alt uç noktası referans alınarak ($h = 0$), korona halkası düşey ekseninde $h = 0-50-100-150-200$ mm yüksekliklere konumlandırılarak ve
- Korona halkası çapları $2r = 200-250-300-350$ mm

alınarak 20 farklı durum için benzetimler yapılmıştır. Her durum için silikon yüzeyinde YG ucundan ikinci etek ucuna kadar olan bölgede elektrik alan dağılımı, potansiyel dağılımı ve korona halkası üzerindeki elektrik alan dağılımları elde edilmiştir.

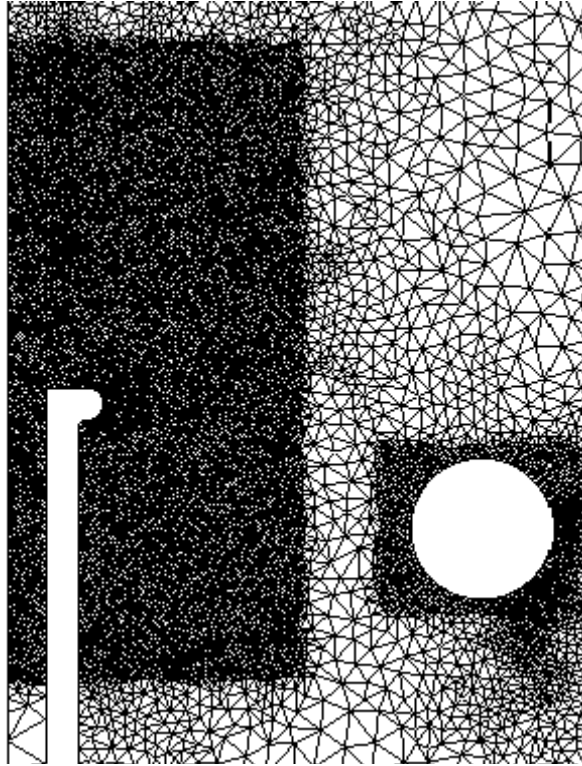
4.1 Temiz İzolatör Durumunda SEY ile Elektrik Alan Dağılımının İncelenmesi

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de, $r = 300$ mm çaplı korona halkasının $h = 100$ mm’ye konumlandırılması durumu için SEY ve SIEY uyarınca ayrıklandırılmış halleri gösterilmiştir. Şekil 4.3-4.5’de temiz bir 154 kV hava hattı silikon kauçuk izolatör

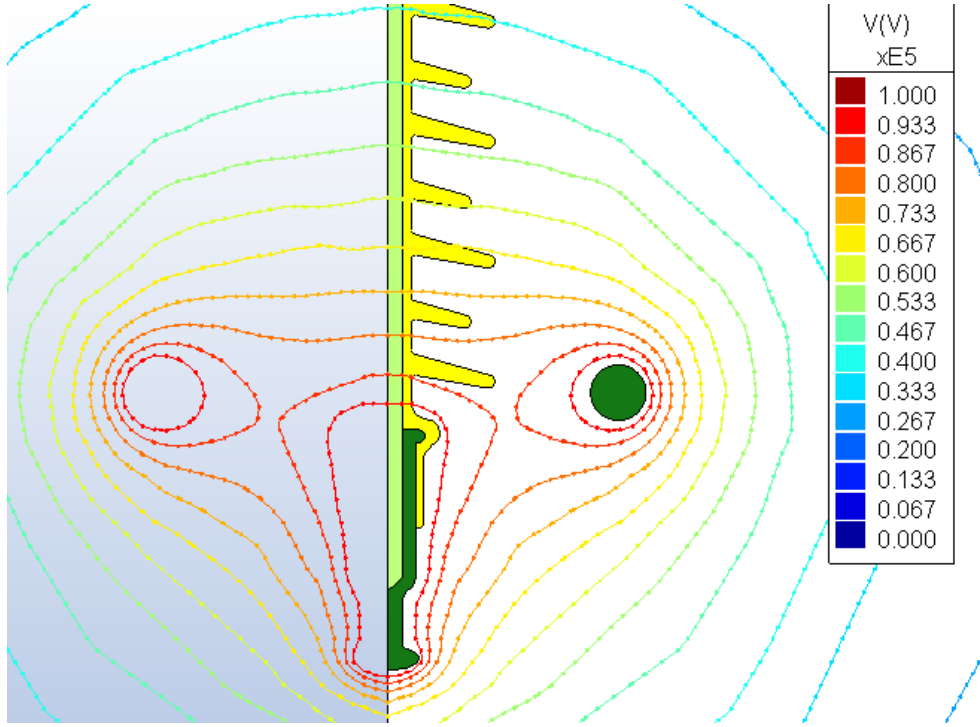
için SEY ve SIEY yöntemleriyle belirlenen elektrostatik alan ve potansiyel dağılımları verilmiştir.



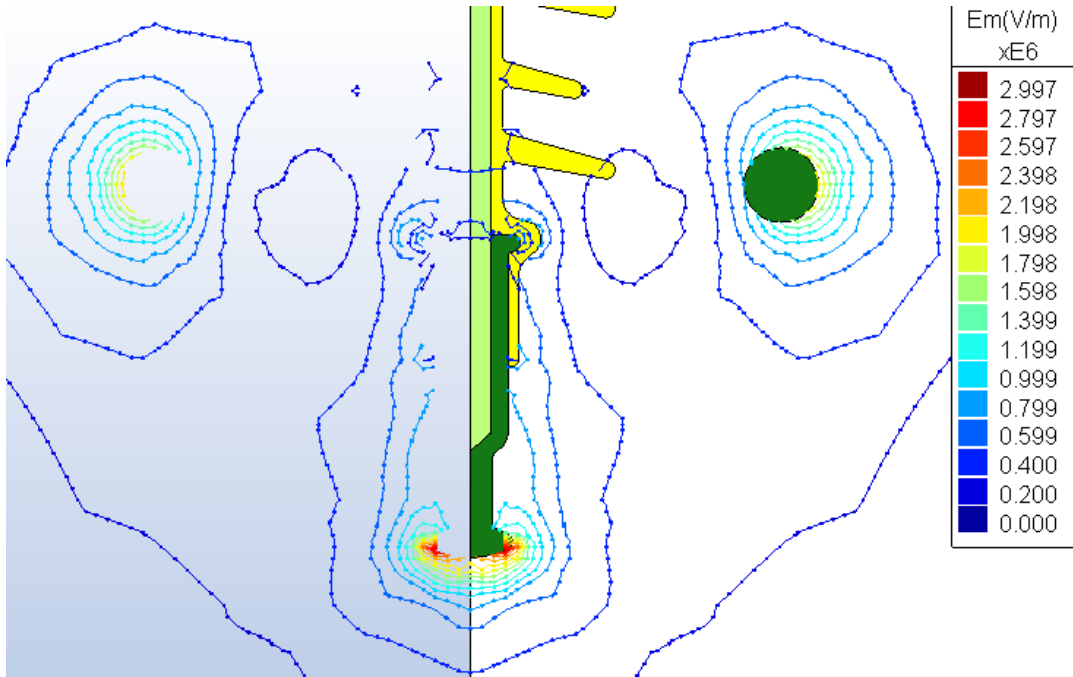
şekil 4.1 : İzolatör modelinin sınır elemanları ile ayrılaştırılmış hali.



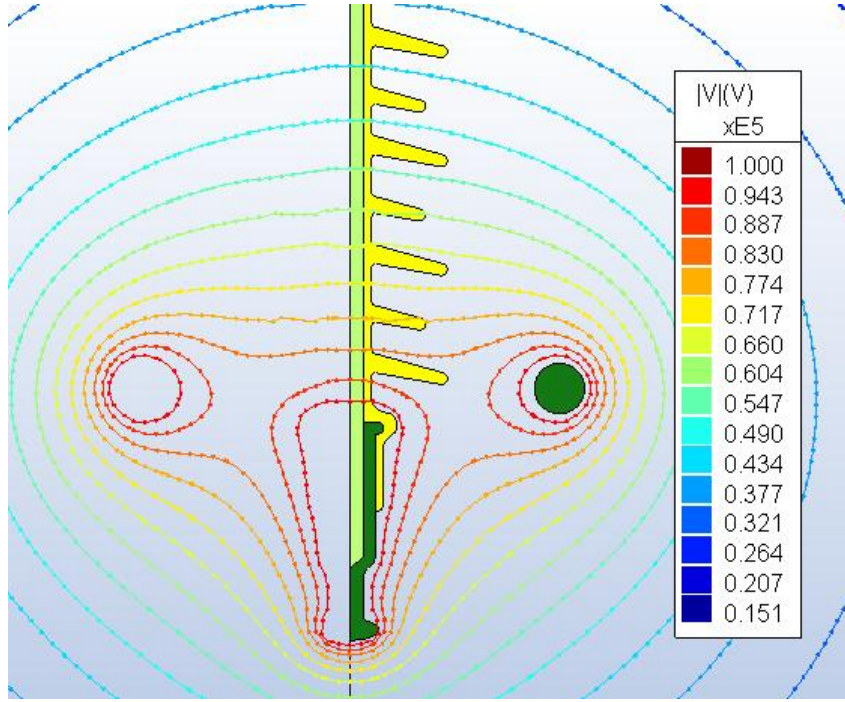
şekil 4.2 : Modelin gen sonlu elemanlarla ayrılaştırılmış hali.



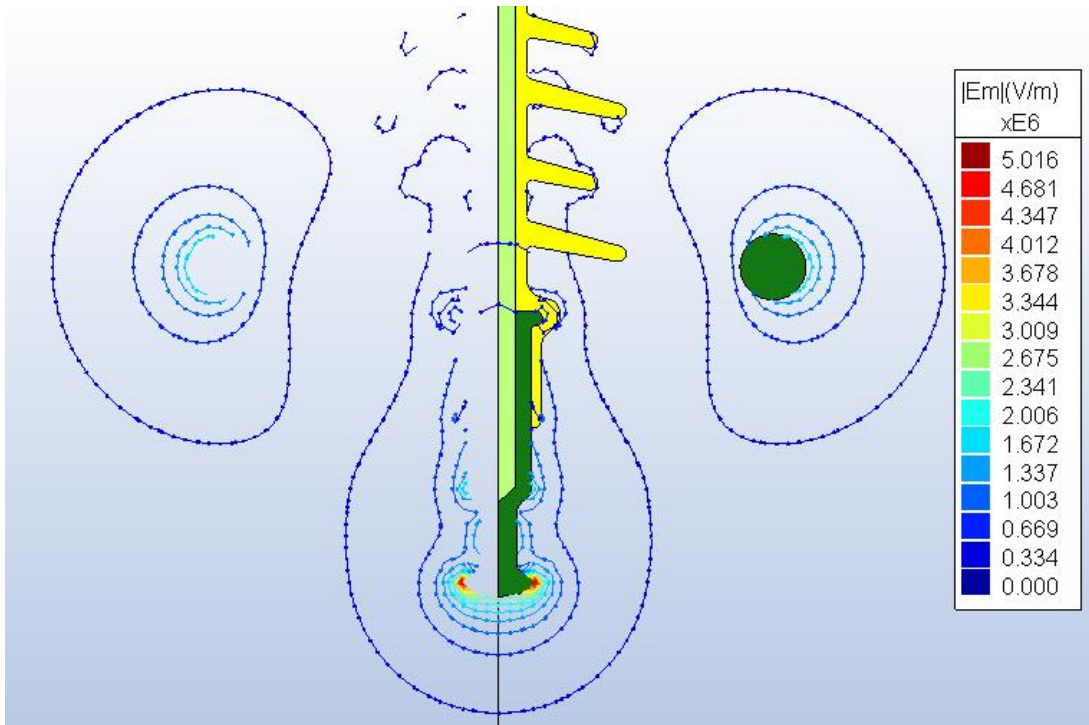
Şekil 4.3 : Temiz izolâtörde, alternatif gerilimde SEY ile elde edilen eş potansiyel çizgiler.



Şekil 4.4 : Temiz izolâtörde, alternatif gerilimde SEY ile elde edilen elektrik alan çizgileri.



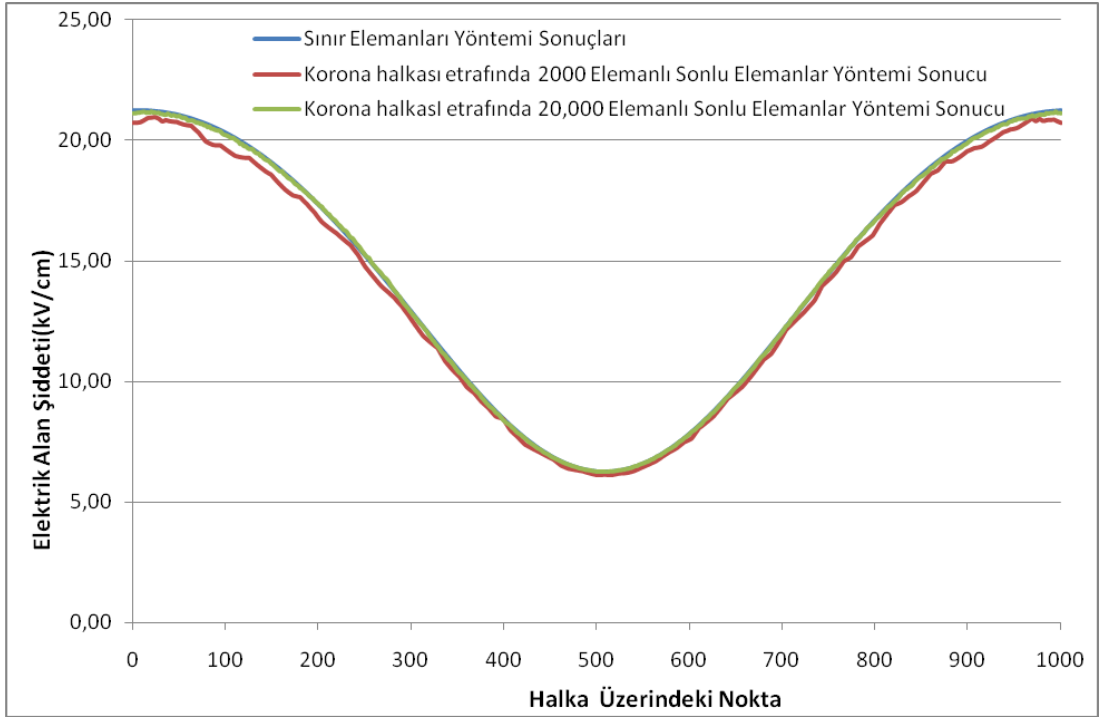
Şekil 4.5 : Temiz izolâtörde, alternatif gerilimde SIEY ile elde edilen eş potansiyel çizgiler.



Şekil 4.6 : Temiz izolâtörde, alternatif gerilimde SIEY ile elde edilen elektrik alan çizgileri.

4.2 Temiz İzolatör İçin SEY ve SIEY Sonuçlarının Karşılaştırılması

Korona halkası üzerindeki elektrik alan şiddetin, eleman sayıları (SEY için) ve çözüm yöntemleri ile değişimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Çizelge 4.1’de ise, SIEY çözümü referans alınarak, eleman sayısına bağlı olarak SEY sonuçlarının doğruluk analizi gösterilmiştir. Korona halkasının üzerinde bin adet nokta alınarak çizelgeler oluşturulmuştur.



Şekil 4.7 : SEY ve SIEY ile belirlenen korona halkası etrafındaki elektrik alan şiddeti değerlerinin karşılaştırılması.

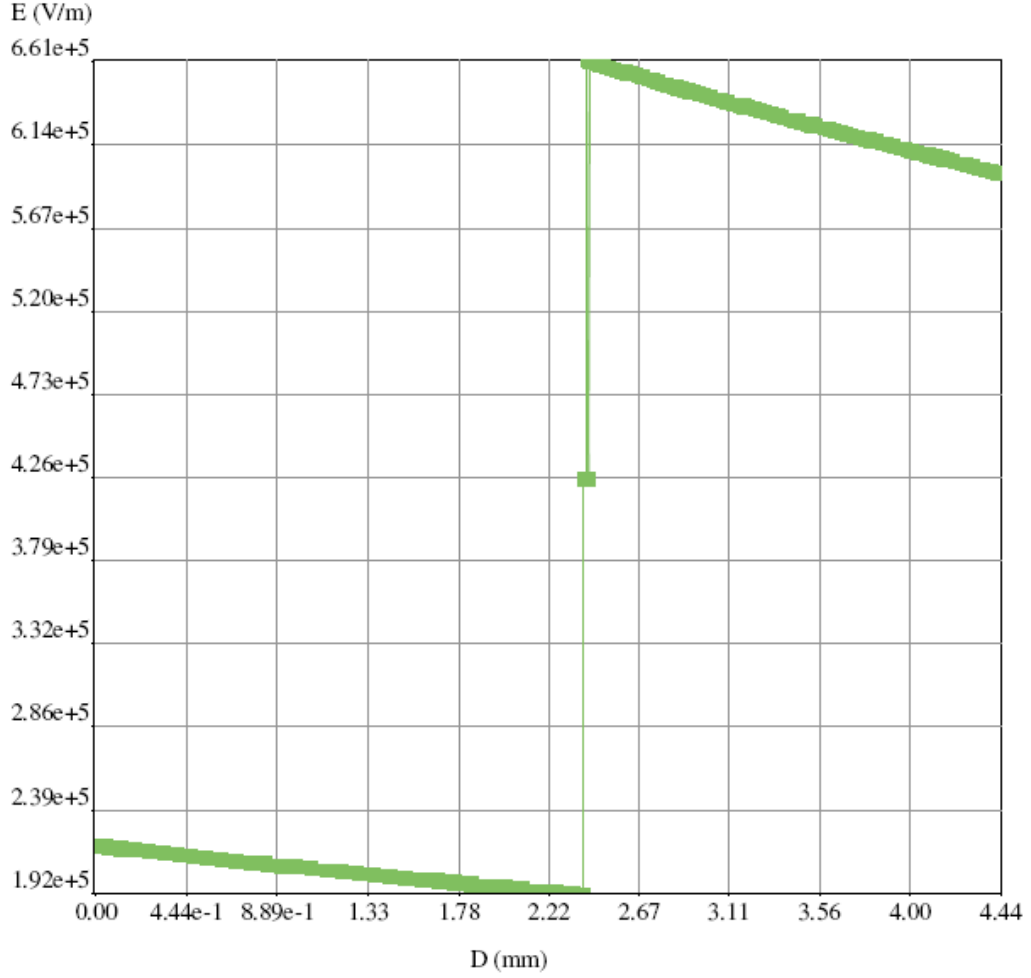
Çizelge 4.1 : SEY ve SIEY ile belirlenen korona halkası etrafındaki maksimum ve minimum elektrik alan şiddeti değerlerinin karşılaştırılması.

Tanım	Ortalama Elektrik Alan Şiddeti (kV/cm)	Minimum Elektrik Alan Şiddeti (kV/cm)	Maksimum Elektrik Alan Şiddeti (kV/cm)	SEY Sonucu ile Minimum Alan Farkı (kV/cm)	SEY Sonucu ile Maksimum Alan Farkı (kV/cm)	SEY Sonucu ile Farkların SIEY sonucuna oranının ortalaması (%)
SIEY Sonuçları	14,32	6,28	21,22	0	0	0
SIEY Halka Etrafında 2000 Eleman	13,98	6,12	20,94	0,03	0,75	2,38
SIEY Halka Etrafında 20000 Eleman	14,31	6,28	21,21	-0,13	0,09	0,11

Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi, SEY kullanılırken sonuçların inceleneceği bölgelerdeki eleman sayıları sonucun duyarlılığında önemli rol oynamaktadır.

4.3 Temiz İzolatörde Silikon-Hava Ortam Geçişinde Dielektrik Katsayılarının Program Tarafından Değerlendirmeye Alınışı

Silikon yüzeyinde, alan dağılımının düzgün olduğu bölgede, sınır yüzeyin silikon ve hava taraflarındaki elektrik alan dağılımları Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 : Silikon-hava sınır yüzeyinde elektrik alan dağılımı (B-noktası).

Sınır yüzeyin silikon tarafındaki ve hava tarafındaki elektrik alan şiddeti değerleri sırasıyla 1,92 kV/cm ve 6,60 kV/cm’dir. Silikonun bağıl dielektrik sabitinin 3,45 olduğu dikkate alınırsa;

$$\frac{\epsilon_{r1}}{\epsilon_{r2}} = \frac{1}{3,45} = 0,290 = \frac{E_2}{E_1} = \frac{1,918}{6,603} = 0,290 \quad (4.1)$$

Sınır yüzeyde elektrik alan şiddeti normal bileşenlerinin, bağıl dielektrik sabitleri ile ters orantılı olması koşulunun sağlandığı görülür.

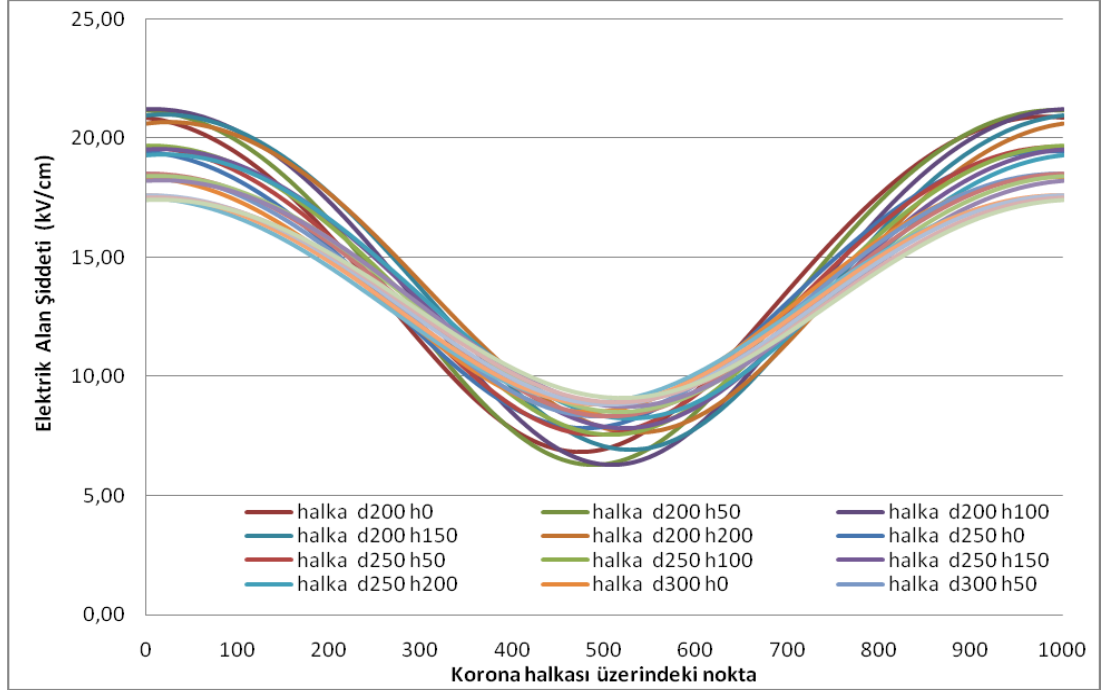
4.4 Temiz İzolatör İçin Alternatif Gerilimlerde Korona Halkası Benzetim

Sonuçları

Korona halkası konumu ve korona halkası yarıçapına bağlı olarak, daha önce tanımlanan çeşitli bölgelerdeki maksimum alan şiddeti değerleri Çizelge 4.2’de, korona halkası üzerindeki alan şiddeti değişimleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

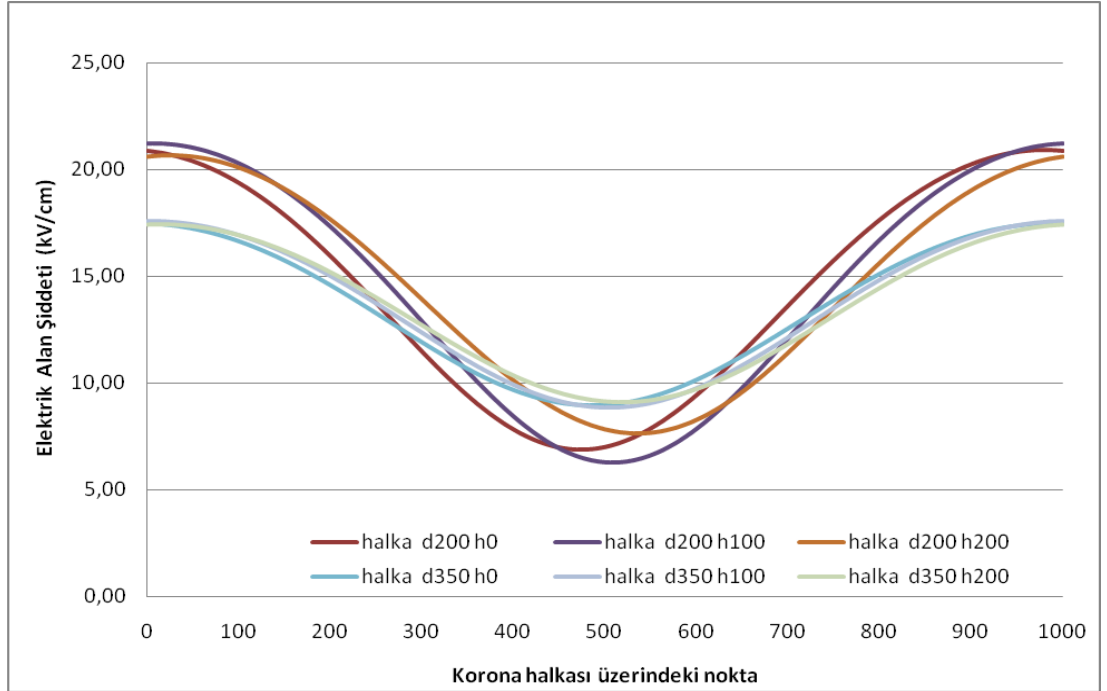
Çizelge 4.2 : Alternatif gerilimlerde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm).

Korona halkası çapı, D [mm]	Korona halkası konumu h [mm]	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	D Bölgesi	E Bölgesi	F Bölgesi	G Bölgesi
Korona halkasız		-	22,08	35,95	16,08	8,38	6,68	5,50
200	0	20,91	11,85	25,68	12,01	6,72	5,68	4,95
200	50	21,17	8,35	22,31	10,78	6,55	5,59	5,07
200	100	21,22	5,20	15,53	8,30	6,07	5,39	5,62
200	150	20,99	8,99	8,70	4,70	3,64	4,28	5,70
200	200	20,65	12,37	13,52	3,92	3,67	1,42	1,80
250	0	19,46	10,78	23,81	11,15	6,26	5,39	4,74
250	50	19,64	7,98	20,22	9,81	5,87	5,20	4,76
250	100	19,67	6,20	14,83	7,63	4,89	4,80	4,97
250	150	19,52	8,54	10,40	5,16	2,08	3,68	4,29
250	200	19,30	11,32	12,86	4,48	2,28	1,83	1,30
300	0	18,36	10,11	22,21	10,43	5,83	5,12	4,51
300	50	18,48	7,92	18,48	9,11	5,30	4,85	4,43
300	100	18,51	6,92	14,64	7,29	4,21	4,35	4,37
300	150	18,41	8,45	11,52	5,50	2,24	3,37	3,52
300	200	18,26	10,65	12,73	4,94	1,91	2,09	1,52
350	0	17,50	9,72	21,00	9,86	5,46	4,87	4,29
350	50	17,58	8,00	18,00	8,63	4,87	4,55	4,13
350	100	17,60	7,46	14,67	7,12	3,85	4,03	3,90
350	150	17,53	8,52	12,37	5,78	2,46	3,20	3,08
350	200	17,41	10,24	12,83	5,32	2,08	2,26	1,66



Şekil 4.9 : Alternatif gerilimde temiz izolatörde korona halkası üzerindeki alan şiddetleri.

20 farklı duruma ilişkin değerler Şekil 4.9'un anlaşılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle $D = 200$ mm ve $D = 350$ mm korona halka yarıçapları ve $h = 0-100-200$ mm korona halka konumları için 6 farklı duruma ilişkin eğriler Şekil 4.10'da tekrar gösterilmiştir.

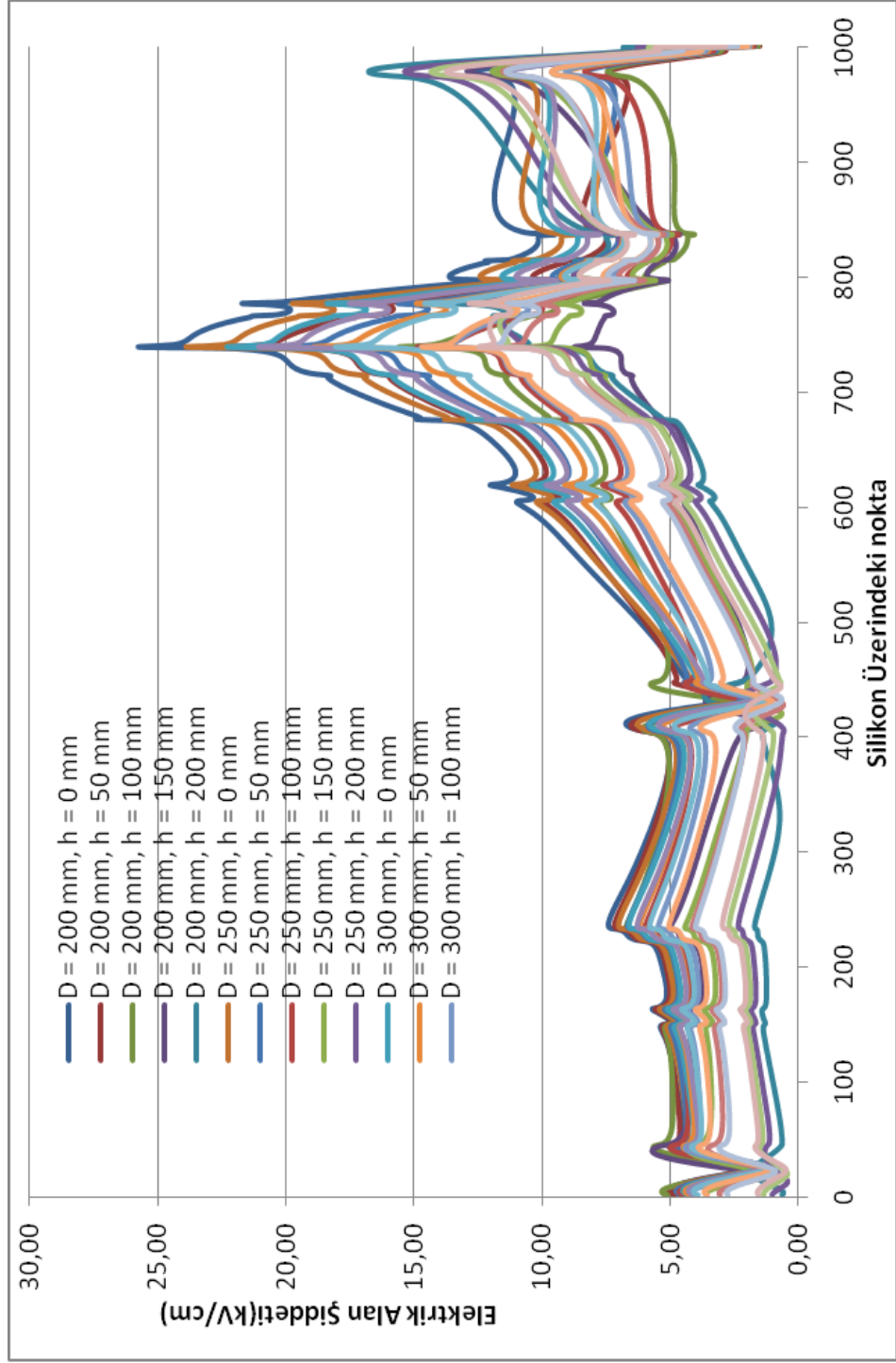


Şekil 4.10 : 6 farklı çap / konum durumu için, alternatif gerilimde temiz izolatörde, korona halkası üzerindeki elektrik alan şiddetleri.

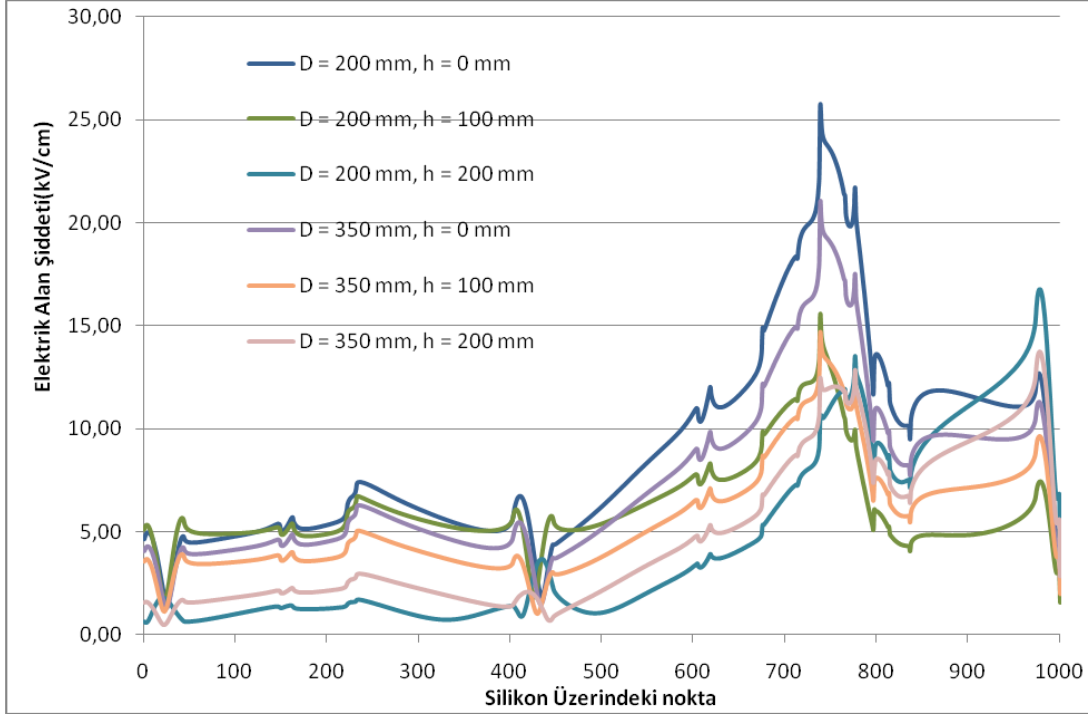
4.5 Temiz İzolatör İçin Alternatif Gerilimlerde Silikon Kauçuk Bölgesi

Benzetim Sonuçları

Korona halkası üzerinde olduğu gibi, 20 farklı çap/konum durumu için, silikon izolatör yüzeyindeki (B, C, D, E, F ve G bölgeleri) alan şiddeti değerleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Eğrilerin anlaşılabilirliğini arttırmak için yine 6 farklı çap/konum durumu için silikon yüzeyindeki alan şiddeti değerleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de, 0 noktası ikinci eteğin ucundan başlamakta ve değer büyüdükçe izolatörün yüksek gerilim uygulanan ucuna doğru hareket etmektedir. İncelenen bölgede silikon kauçuk izolatör üzerinde yüzey boyunca bin adet noktadan değerler alınmıştır. Değer alınan noktaların sırası sıfırdan başlayıp bin değerine doğru hareket etmektedir.



Şekil 4.11 : Alternatif gerilimde temiz izolatörde silikon üzerindeki elektrik alan dağılımı.

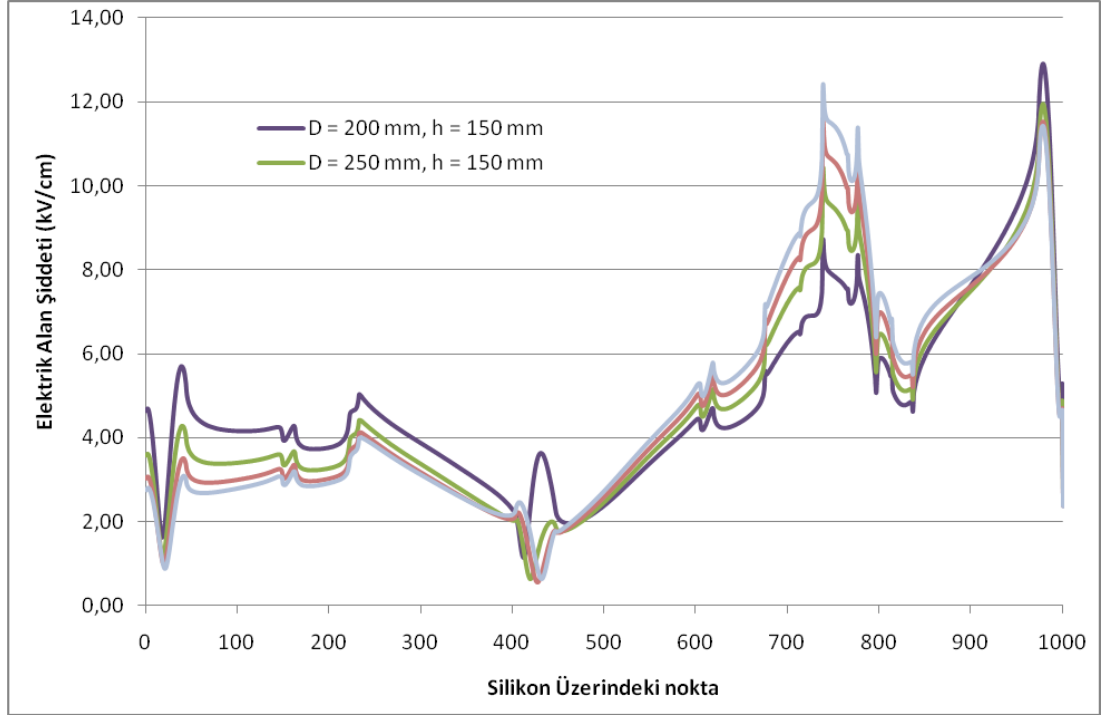


Şekil 4.12 : 6 farklı çap / konum değeri için, alternatif gerilimde temiz izolatörde silikon üzerindeki elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.11'deki eğriler ve Çizelge 4.2'deki değerler incelendiğinde:

- A (korona halkası) ve C (ilk etek altındaki şişik bölge) bölgeleri elektrik alan şiddetleri açısından en kritik bölgelerdir. A bölgesinde, halkanın izolatöre en yakın noktası ve C bölgesinde izolatörün halkaya en yakın noktası en kritik noktalarlardır.
- Bu iki kritik noktadaki alan şiddeti değerleri arasında iyi bir korelasyon yoktur. Yani, bu noktalardaki alan şiddetlerini birlikte minimum ve maksimum kılan biçim yoktur.
- B ve D bölgeleri ikinci derecede kritik bölgelerdir.
- Diğer E, F ve G bölgeleri elektrik alan şiddetleri açısından sorunsuz bölgelerdir. Ayrıca alan şiddetleri arasında iyi bir ilgileşim vardır.
- A bölgesindeki alan şiddetini küçültmek için büyük çaplı korona halkalar kullanılmalıdır.

- Silikon yüzeyinde ve özellikle C bölgesindeki alan şiddeti açısından en uygun profiller sırasıyla D [mm] / h [mm] = 200/150, 250/150, 300/150, 350/150, 300/200, 350/200, 250/200 profilleridir.
- Silikon yüzeyi açısından en iyi sonuç veren $D/h = 200$ mm/150 mm profilli halkada, $h = 150$ mm değeri sabit tutularak, farklı halka çapları için alan şiddeti değişimleri Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13 : $h = 150$ mm konumu için, farklı korona halkası yarı çaplarında, alternatif gerilimde temiz izolatörde silikon üzerindeki elektrik alan şiddeti dağılımı.

Tüm bu incelemeler ışığında, büyük çaplı korona halkalarının getireceği görsel ve mekanik kaygılar da dikkate alınarak $D/h = 200$ mm / 150 mm referans alınmış; bu parametreler etrafında daha ayrıntılı analiz yapılmıştır. $D = 180-190-200-210-220$ mm değerleri ve $h = 130-140-150-160-170$ mm değerleri için yapılan benzetim sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Farklı D/h değerleri için alternatif gerilimlerde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm).

Korona halkası çapı, D [mm]	Korona halkası konumu, h [mm]	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	D Bölgesi	E Bölgesi	F Bölgesi	G Bölgesi
180	130	21,87	7,24	10,16	6,16	6,83	5,34	6,58
180	140	21,80	8,30	8,67	5,28	6,27	5,07	6,67
180	150	21,72	9,31	7,76	4,48	5,33	4,66	6,59
180	160	21,64	10,22	8,90	3,85	4,31	4, 12	6,18
180	170	21,56	11,03	10,20	3,45	3,48	3,43	5,44
190	130	21,48	7,20	10,42	6,12	6,03	5,14	6,27
190	140	21,42	8,17	9,09	5,31	5,36	4,86	6,28
190	150	21,35	9,11	8,25	4,60	4,37	4,46	6,12
190	160	21,27	9,98	9,05	4,03	3,39	3,94	5,67
190	170	21,19	10,76	10,19	3,66	2,64	3,31	4,94
200	130	21,12	7,19	10,67	6,09	5,37	4,96	5,98
200	140	21,06	8,07	9,47	5,35	4,64	4,67	5,92
200	150	20,99	8,95	8,70	4,70	3,64	4,28	5,70
200	160	20,93	9,77	9,20	4,19	2,67	3,79	5,24
200	170	20,86	10,52	10,22	3,85	1,97	3,21	4,53
210	130	20,77	7,20	10,90	6,07	4,82	4,79	5,71
210	140	20,72	8,00	9,81	5,40	4,07	4,50	5,60
210	150	20,66	8,81	9,11	4,81	3,07	4,13	5,35
210	160	20,60	9,59	9,37	4,34	2,10	3,67	4,88
210	170	20,54	10,31	10,29	4,02	1,42	3,14	4,19
220	130	20,45	7,22	11,11	6,06	4,38	4,64	5,46
220	140	20,41	7,96	10,12	5,44	3,62	4,35	5,31
220	150	20,35	8,70	9,47	4,90	2,64	3,99	5,03
220	160	20,30	9,43	9,54	4,47	1,66	3,56	4,57
220	170	20,24	10,12	10,36	4,18	0,97	3,08	3,91

Çizelge 4.3 incelendiğinde, korona halkası üzerindeki (A bölgesi) maksimum elektrik alan şiddetlerinde fazlaca bir değişim olmadığı ve dolayısıyla en uygun halka/konum değerinin, izolatör yüzeyi boyunca alan dağılımlarına göre belirlenebileceği görülür. Bu bakış açısıyla en uygun alan şiddeti değerlerini $D = 180$ mm, $h = 140$ mm yerleşiminde olmaktadır. Bu parametrelerle, $D = 160-170-180$ mm, $h = 140$ mm değerleri için yapılan daha ayrıntılı benzetim sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

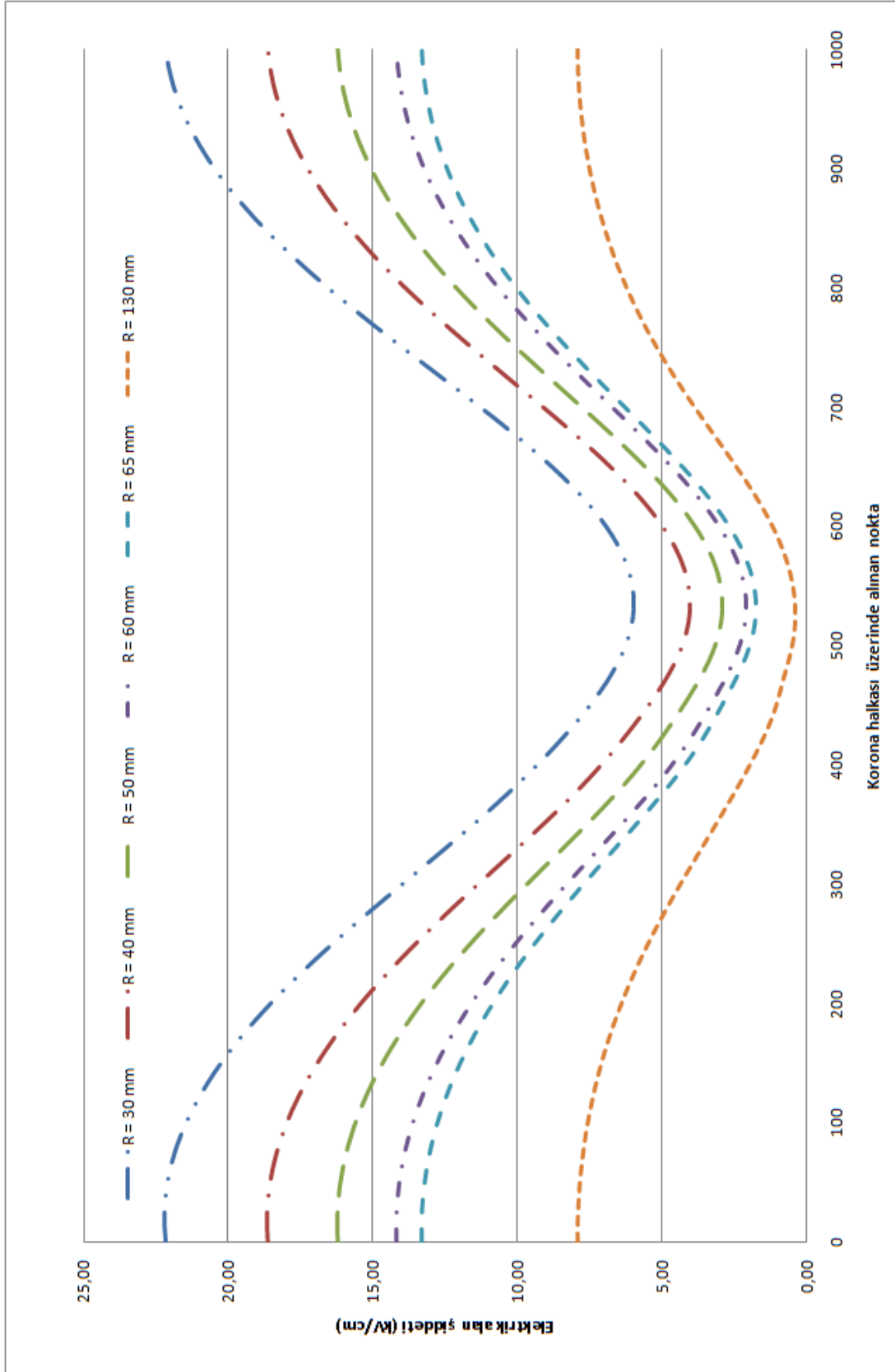
Çizelge 4.4 : $D = 160-170-180$ mm, $h = 140$ mm değerleri için, alternatif gerilimde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm).

Korona halkası çapı, D [mm]	Korona halkası konumu, h [mm]	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	D Bölgesi	E Bölgesi	F Bölgesi	G Bölgesi
180	140	21,79	8,30	8,67	5,28	6,27	5,07	6,67
170	140	22,20	8,46	8,18	5,24	7,47	5,32	7,10
160	140	22,60	8,67	7,61	5,20	9,09	5,59	7,57

Çizelge 4.4'ten görüleceği gibi, en uygun halka çapı/konum değeri $D = 170$ mm ve $h = 140$ mm'dir. Diğer yandan bu yerleşim düzeni, silikon yüzeyi açısından seçildiği için korona halkasının üzerinde oluşan elektrik alan şiddetinin minimum olduğu yerleşim değildir. Korona halkasının üzerindeki elektrik alan şiddeti değerini azaltmak için, halka et kalınlığı değiştirilerek elektrik alan şiddetinin değerindeki değişim incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Ayrıca halka et kalınlığıyla, korona halkası etrafındaki alan dağılımları Şekil 4.14'te verilmiştir.

Çizelge 4.5 : $D = 170$ mm ve $h = 140$ mm için, halka et kalınlığının alternatif gerilimde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetlerine etkisi (kV_{ef}/cm).

Tanım R [mm]	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	D Bölgesi	E Bölgesi	F Bölgesi	G Bölgesi
30	22,20	8,46	8,18	5,24	7,47	5,32	7,10
40	18,66	7,02	6,53	4,38	6,28	4,81	6,65
50	16,26	5,91	5,33	3,71	5,28	4,34	6,17
60	14,21	4,85	4,27	3,10	4,34	3,85	5,57
65	13,31	4,37	3,81	2,81	3,90	3,60	5,25
130	7,93	1,47	1,29	1,09	1,37	1,69	2,53



Şekil 4.14 : D = 170 mm ve h = 140 mm için, halka et kalınlığının alternatif gerilimde temiz izolatörde korona halkası etrafındaki elektrik alanına etkisi.

Yukarıdaki sonuçlarda da açıkça görüldüğü gibi silikon izolatör üzerinde oluşan elektrik alan şiddetleri açısından en uygun korona çapı $D = 170$ mm ve korona halkasının yerleşeceği en uygun konum $h = 140$ mm noktasıdır. Fakat bu yerleşim, korona halkası üzerindeki alan şiddetlerini kabul edilebilir değerler indirmemektedir. Korona halka çapını büyötmeksizin yapılacak tek şey halka et kalınlığını arttırmaktır.

Normal koşullarda, havada boşalma başlangıç elektrik alan şiddetini $21,2 \text{ kV}_{\text{ef}}/\text{cm}$ olduğu dikkate alınırsa, benzetimlerde $100 \text{ kV}_{\text{ef}}$ hat gerilimindeki değerler yaklaşık $20 \text{ kV}_{\text{ef}}/\text{cm}$ değerinin altında çıkmıştır. Normal koşullarda hat geriliminin benzetimde kullanılan gerilim değerinden daha düşük ($154 \text{ kV}_{\text{ef}} / \sqrt{3} = 88,9 \text{ kV}_{\text{ef}}$) olduğu dikkate alınırsa, çalışma koşullarında oluşacak olan elektrik alan şiddetlerinin değeri yaklaşık olarak uygulanan gerilim değeri oranında daha düşük olacaktır.

Yukarıda yapılan benzetimlerden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, $D = 170$ mm çaplı korona halkasının $h = 140$ mm noktasına yerleştirilmesi silikon üzerinde oluşan alan şiddetlerinin en düşük düzeye gelmesini sağladığı görölmektedir. Çizelge 4.6'da, $h = 140$ mm sabit alınarak $r = 25-30-35$ mm et kalınlığı ve $D = 170-200-250-300-350$ mm halka çapları için maksimum alan şiddeti değeri verilmiştir.

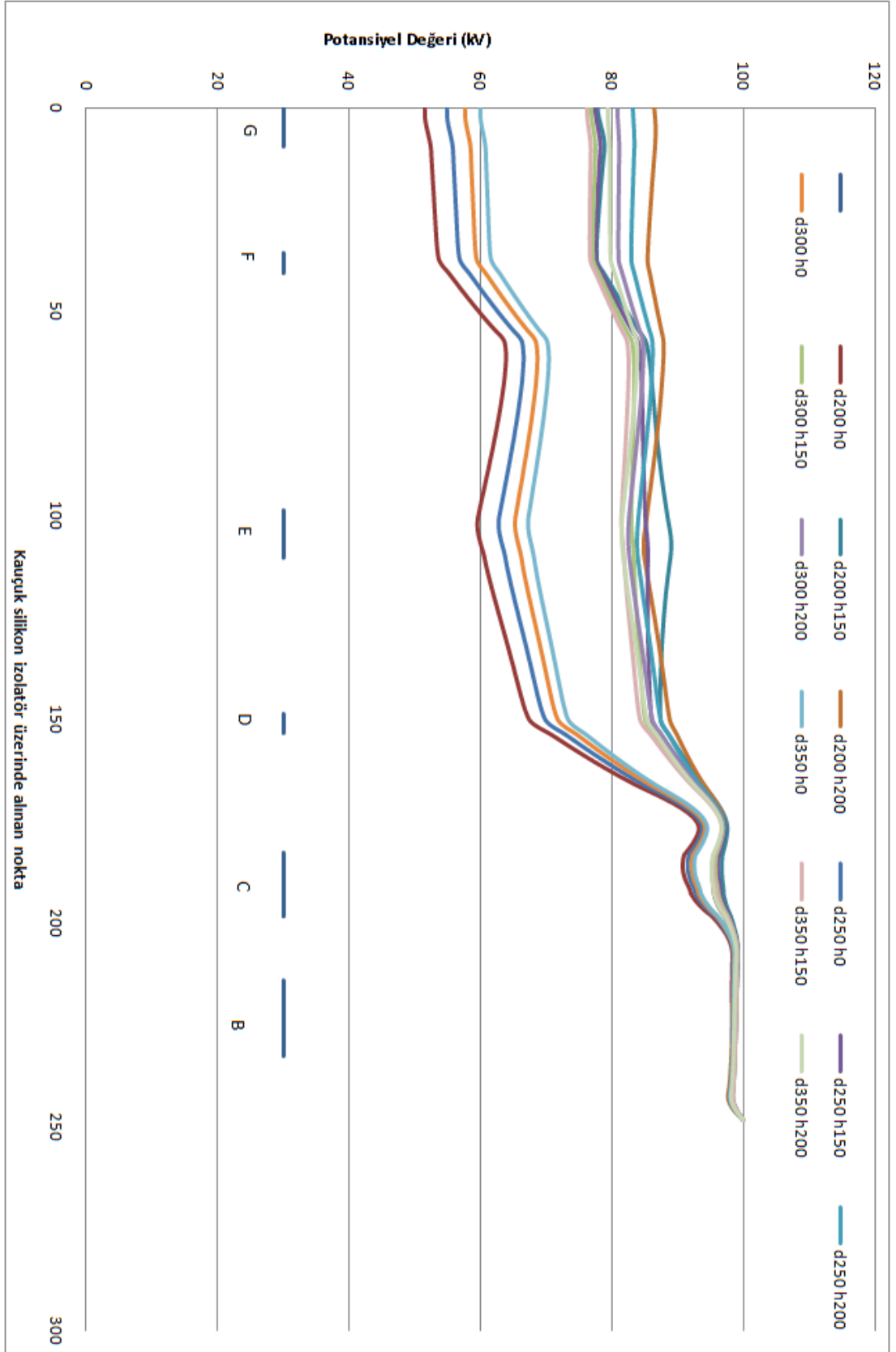
Çizelge 4.6 : $h = 140$ mm yerleşimi için, halka çapı ve et kalınlığının maksimum alan şiddetlerine etkisi (kV_{ef}/cm).

Korona halkası et kalınlığı, r [mm]	Korona halkası çapı, D [mm]	A Bölgesi	B Bölgesi	C Bölgesi	D Bölgesi	E Bölgesi	F Bölgesi	G Bölgesi
25	170	24,64	9,17	9,55	5,80	7,39	5,45	7,00
25	200	23,42	8,75	10,75	5,87	4,55	4,81	5,89
25	250	21,85	8,54	12,07	6,03	2,98	4,14	4,59
25	300	20,66	8,61	12,97	6,20	2,87	3,75	3,78
25	350	19,73	8,76	13,66	6,36	2,94	3,53	3,28
30	170	22,21	8,42	8,18	5,24	7,47	5,32	7,06
30	200	21,06	8,03	9,47	5,35	4,64	4,67	5,90
30	250	19,56	7,88	10,91	5,55	2,80	4,00	4,57
30	300	18,43	7,98	11,91	5,75	2,67	3,61	3,74
30	350	17,55	8,17	12,66	5,94	2,73	3,38	3,23
35	170	20,43	7,75	7,02	4,75	7,47	5,18	7,09
35	200	19,34	7,42	8,41	4,91	4,68	4,54	5,89
35	250	17,92	7,31	9,95	5,14	2,78	3,87	4,53
35	300	16,84	7,45	11,02	5,37	2,49	3,48	3,70
35	350	16,00	7,67	11,83	5,58	2,56	3,26	3,18

Pratikte korona halkasının çapının $D = 300$ mm değerinden daha fazla olması istenen bir durum değildir. Yine aynı şekilde korona halkası et kalınlığı olarak $r = 30$ mm değerinden daha fazla olması da pek uygun değildir. Diğer yandan $r = 30$ mm ve $D = 300$ mm yerleşiminde elde edilen tüm elektrik alan şiddetleri kabul ettiğimiz 20 kV/cm korona başlangıç alan şiddetinin altında kalmaktadır. Dolayısı ile bu yerleşimin uygun olduğu söylenebilir.

4.6 Temiz İzolatör İçin Alternatif Gerilimde İzolatör Üzerindeki Potansiyel Dağılımı

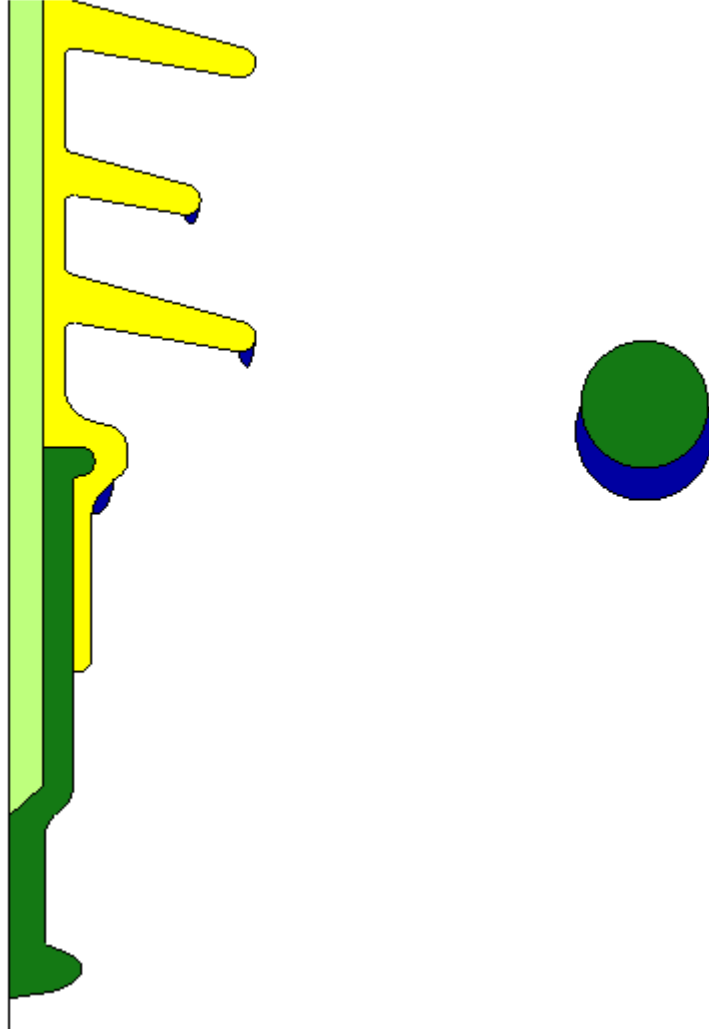
Çeşitli korona halka çapları ve yerleşimlerine göre silikon izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımları Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15 : Alternatif gerilimde, temiz bir silikon izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımı.

4.7 Alternatif Gerilimde Kirli İzolatör Yüzeyinde (Üzerinde Su Halkası Olan) Gerilim Dağılımı

İzolatör üzerine su halkaları eklenerek kirlenme durumu modellenmiş ve bu durumun elektrik alan şiddetlerine olan etkileri incelenmiştir. Şekil 4.16’da koyu renkli olarak görülen kısımlar, su halkalarını belirtmektedir.

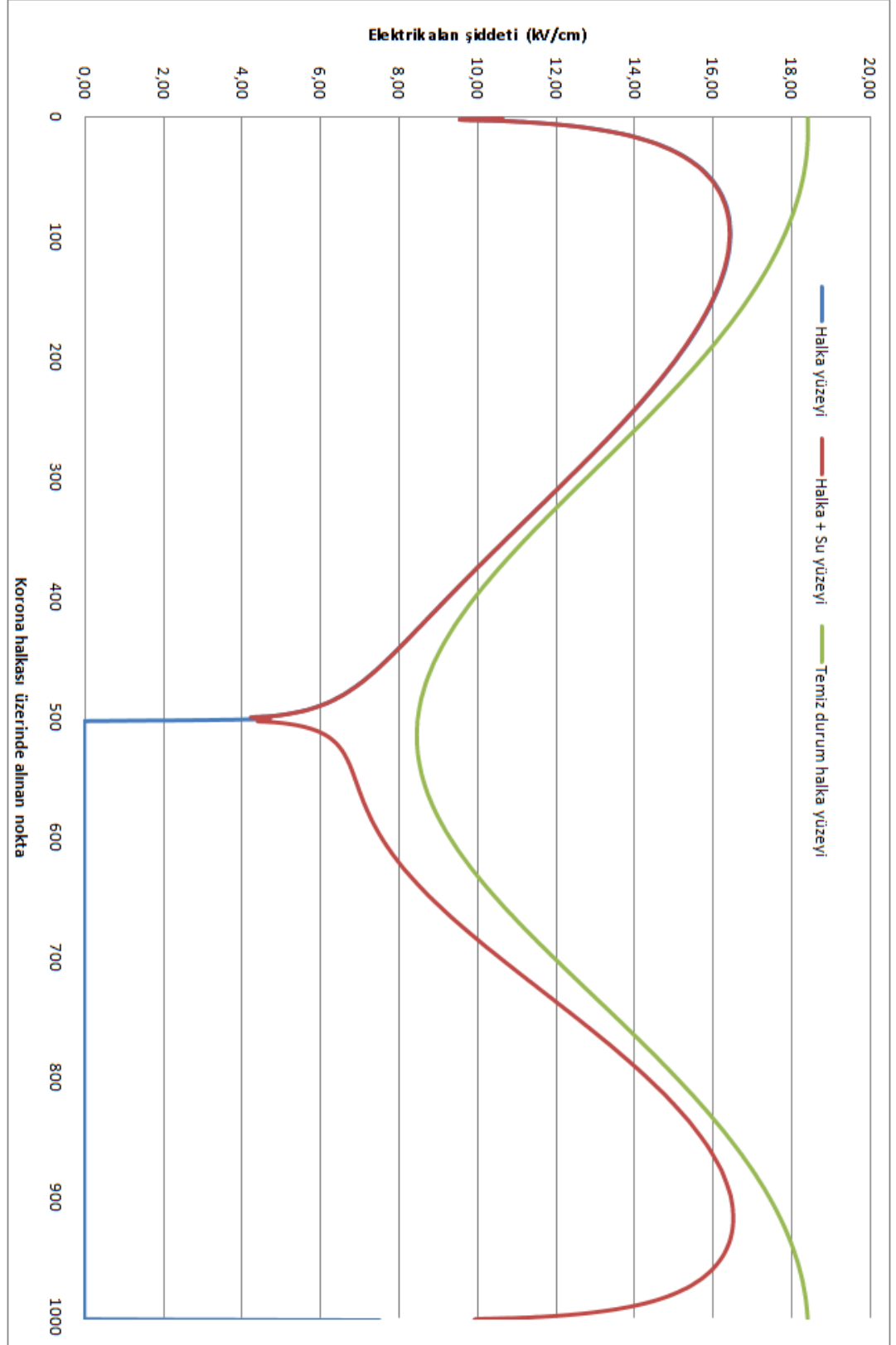


Şekil 4.16 : İzolatör yüzeyinde yapay kir oluşumu (su damlalarının yerleşimi).

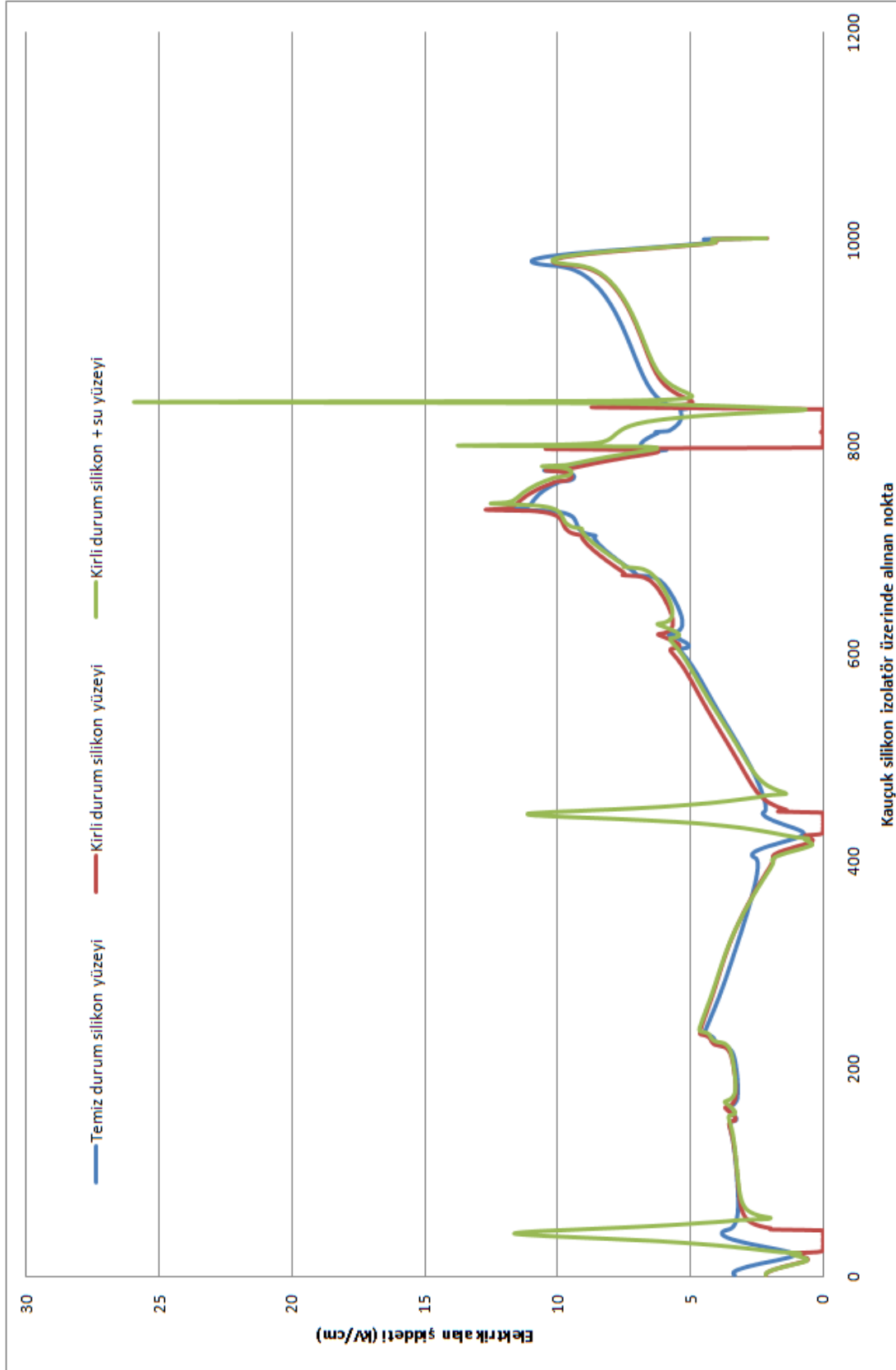
Yapılan analizlerde korona halkasının üzerinde bulunan su tabakasının bulunduğu yüzeylerde korona halkasının et kalınlığının artmasına benzer sonuçlar vererek, elektrik alan şiddetinin değerinde ciddi azalmalar gözlenmiştir. Bu durumda, korona halkası üzerindeki elektrik alan şiddeti değişimi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

Bunun yanında su damlalarının silikon eteklerinden sivri uç şeklindeki sarkmaları yüksek elektrik alanlarının oluşmasına sebep olmuştur. Bu durumla ilgili sonuçlar

Şekil 4.18’de silikon kauçuk izolatör üzerindeki elektrik alan sonuçlarında görülmektedir.

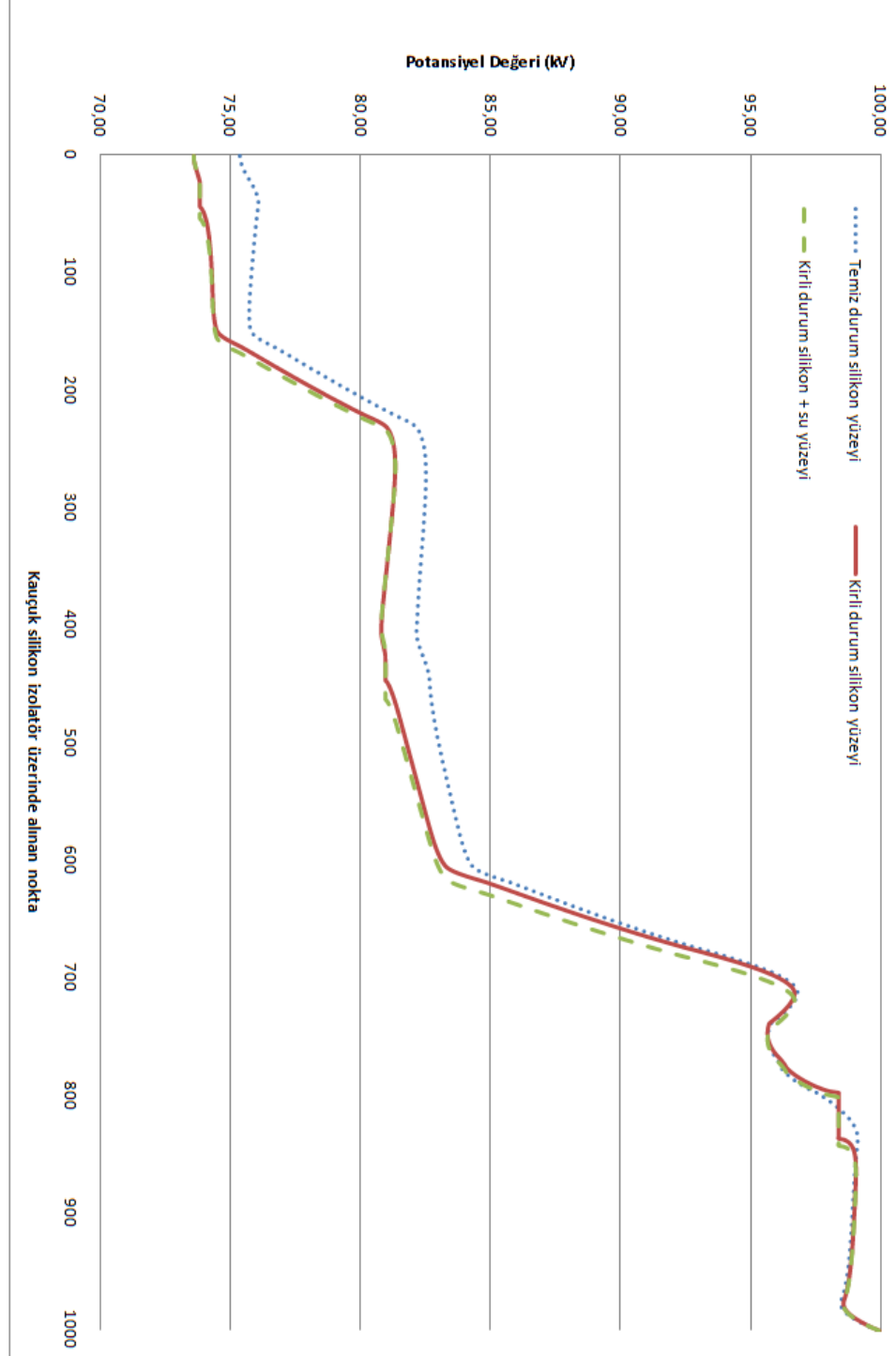


Şekil 4.17 : Kirli izolatör için, alternatif gerilimde, korona halkası üzerinde elektrik alan şiddeti değişimi.



Şekil 4.18 : Alternatif gerilimde, üzerinde su damlalarının bulunması durumunda silikon izolatör yüzeyindeki elektrik alan şiddeti değerleri.

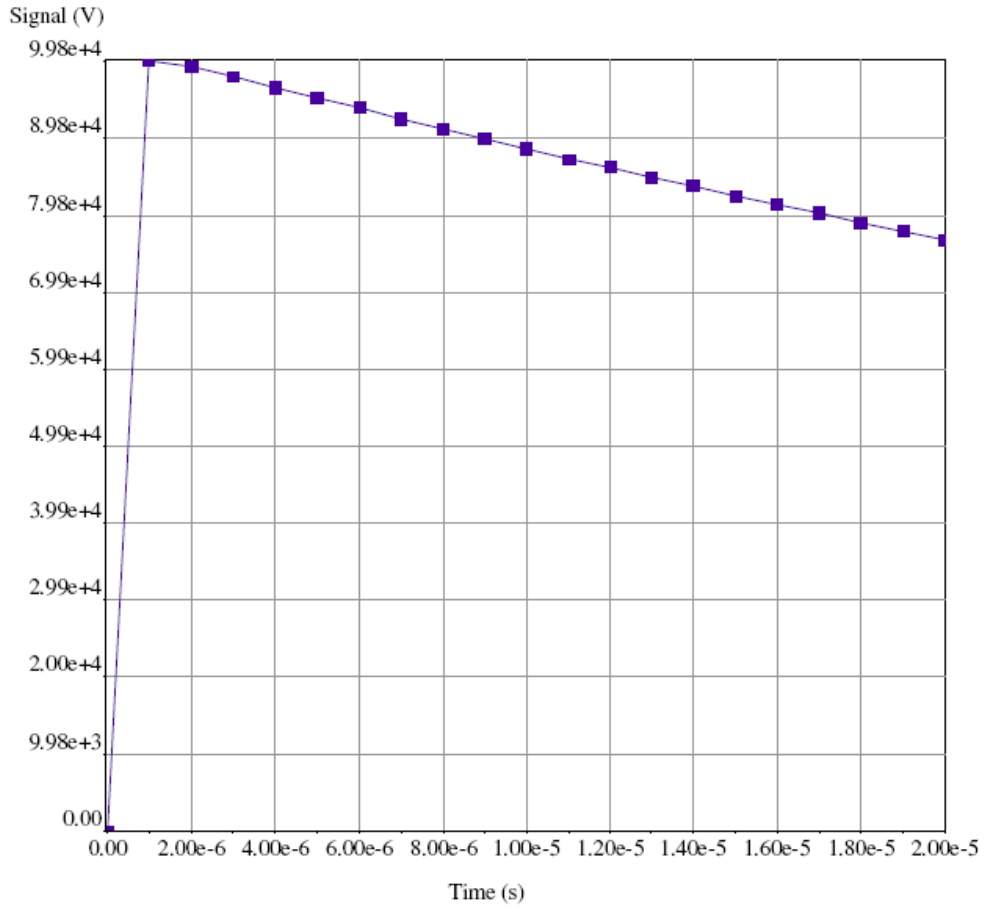
İzolatör üzerinde su halkalarının olması durumundaki potansiyel dağılımı Şekil 4.19'da görülmektedir.



Şekil 4.19 : Alternatif gerilimde, üzerinde su damlalarının bulunması durumunda silikon izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımı.

5. YILDIRIM DARBE GERİLİMİNDE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMININ İNCELENMESİ İÇİN BENZETİM ÇALIŞMALARI

1,2/50 μ s cephe ve sırt yarıdeğer sürelerine sahip, 100 kV tepe değerli yıldırım darbe gerilimleri için benzetimler yapılmıştır. Bu benzetimlerde Electro programının seçeneği olan “impulse signal” seçeneği seçilmiştir. Bu seçenekte darbe sinyalinin tepe değere ulaşma ve yarı değere inme zamanları seçilebilmektedir. Tepe değere ulaşması için 1,2 μ s ve yarı değere ulaşması için ise 50 μ s değerleri seçilmiştir. Bunun sonucunda oluşan darbe gerilimi Şekil 5.1’de verilmiştir. Benzetimlerde darbe başlangıcı olarak sıfır saniye kabul edilmiş ve analizler 20 μ s’ye kadar devam ettirilmiştir. Bunun yanında darbenin 1,2 μ s saniye anına karşı düşen değerleri kaydedilmiştir.



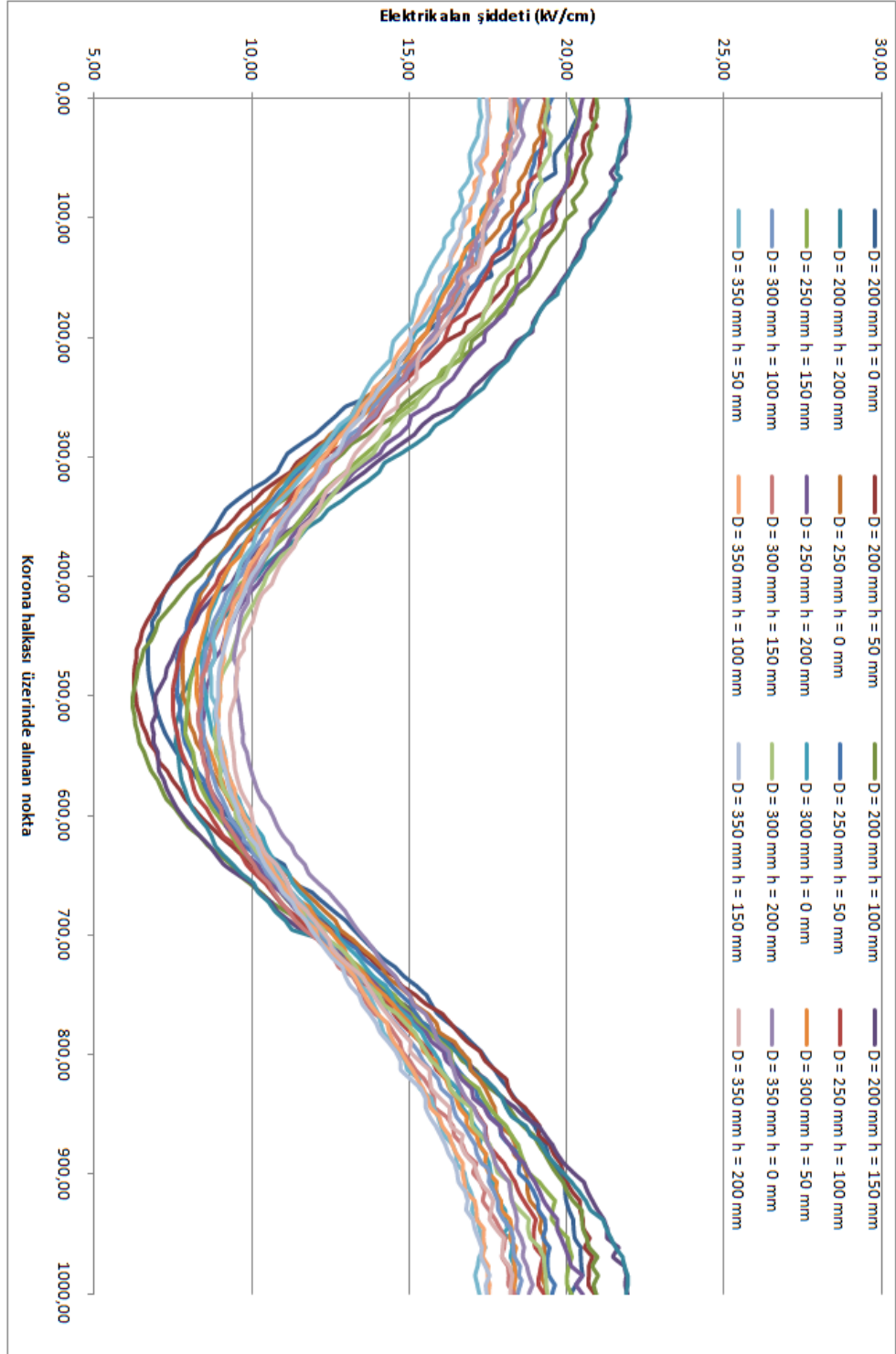
Şekil 5.1 : Yıldırım darbe gerilimi incelemesinde kullanılan darbe şekli.

5.1 Temiz İzolatör İçin Yıldırım Darbe Gerilimi Benzetimleri

Alternatif gerilimlerindeki benzer şekilde öncelikle çeşitli korona halka çapları ve konumları ile elektrik alan şiddeti değişimleri incelenmiştir. $D = 200-250-300-350$ mm çaplı korona halkalarının, izolatör alt uç noktasından $h = 0-50-100-150-200$ mm uzaklıklara yerleşimine ilişkin 20 farklı durum için benzetimler yapılmıştır. Bu durumlarda, çeşitli bölgelerdeki maksimum alan şiddeti değerleri Çizelge 5.1’de, korona halkası üzerindeki elektrik alan dağılımları Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

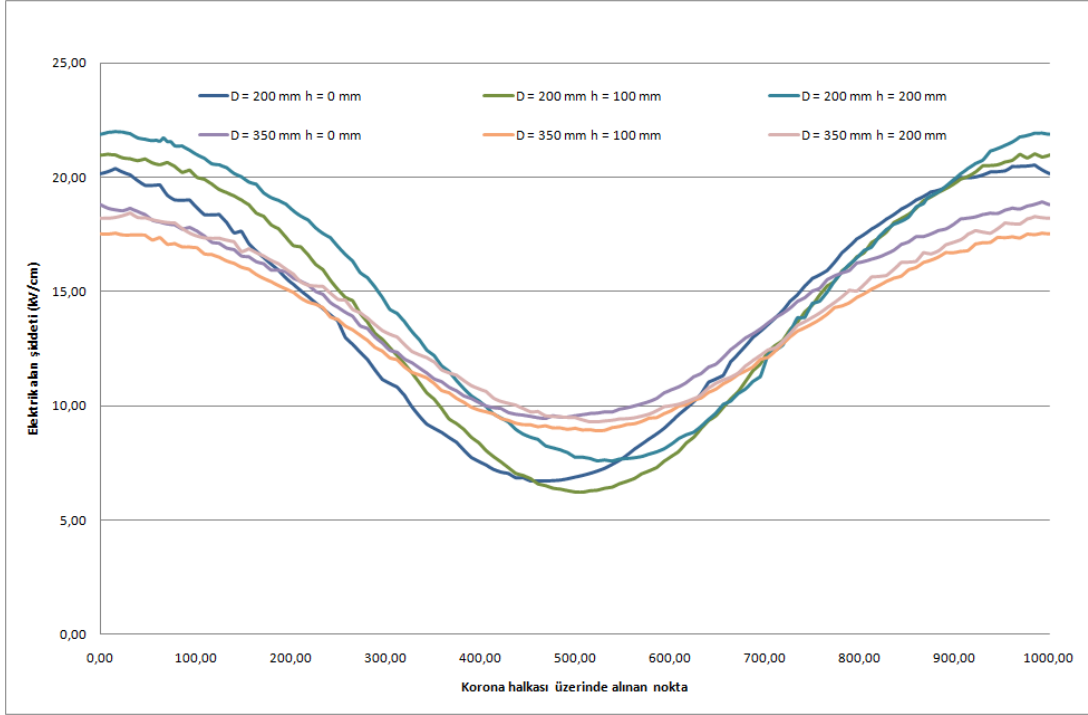
Çizelge 5.1 : Darbe geriliminde, temiz izolatörlerde çeşitli bölgelerin maksimum alan şiddeti değerleri (kV/cm).

Korona halkası çapı, D [mm]	Korona halkası konumu, h [mm]	A Noktası	B Noktası	C Noktası	D Noktası	E Noktası	F Noktası	G Noktası
Korona halkasız			21,86	32,30	15,16	7,82	6,32	5,02
200	0	20,52	11,80	23,48	11,62	6,46	5,54	4,77
200	50	20,98	8,21	19,21	10,21	6,11	5,37	4,75
200	100	21,02	4,79	13,39	7,97	5,73	5,21	5,24
200	150	21,99	7,57	7,62	4,59	3,38	4,23	5,37
200	200	22,02	10,40	12,49	3,74	3,65	1,34	1,67
250	0	19,37	10,09	20,81	10,54	5,85	5,18	4,44
250	50	19,62	7,31	17,76	9,40	5,58	5,01	4,43
250	100	19,46	5,67	12,84	7,33	4,62	4,62	4,64
250	150	20,39	7,45	9,39	5,04	2,10	3,62	4,02
250	200	20,50	9,88	11,57	4,31	2,17	1,78	1,20
300	0	18,34	9,66	19,78	9,98	5,43	4,92	4,21
300	50	18,48	7,60	16,52	8,62	5,00	4,67	4,14
300	100	18,59	6,50	12,78	6,90	3,96	4,18	4,08
300	150	18,37	7,56	10,09	5,20	2,11	3,24	3,29
300	200	19,52	8,18	11,40	4,74	1,84	2,02	1,41
350	0	18,92	9,64	18,92	9,43	5,27	4,70	4,02
350	50	17,42	7,77	15,88	8,26	4,62	4,38	3,84
350	100	17,57	7,07	12,77	6,77	3,62	3,89	3,65
350	150	17,54	7,91	11,00	5,52	2,28	3,07	2,88
350	200	18,46	8,94	11,71	5,10	1,95	2,20	1,58



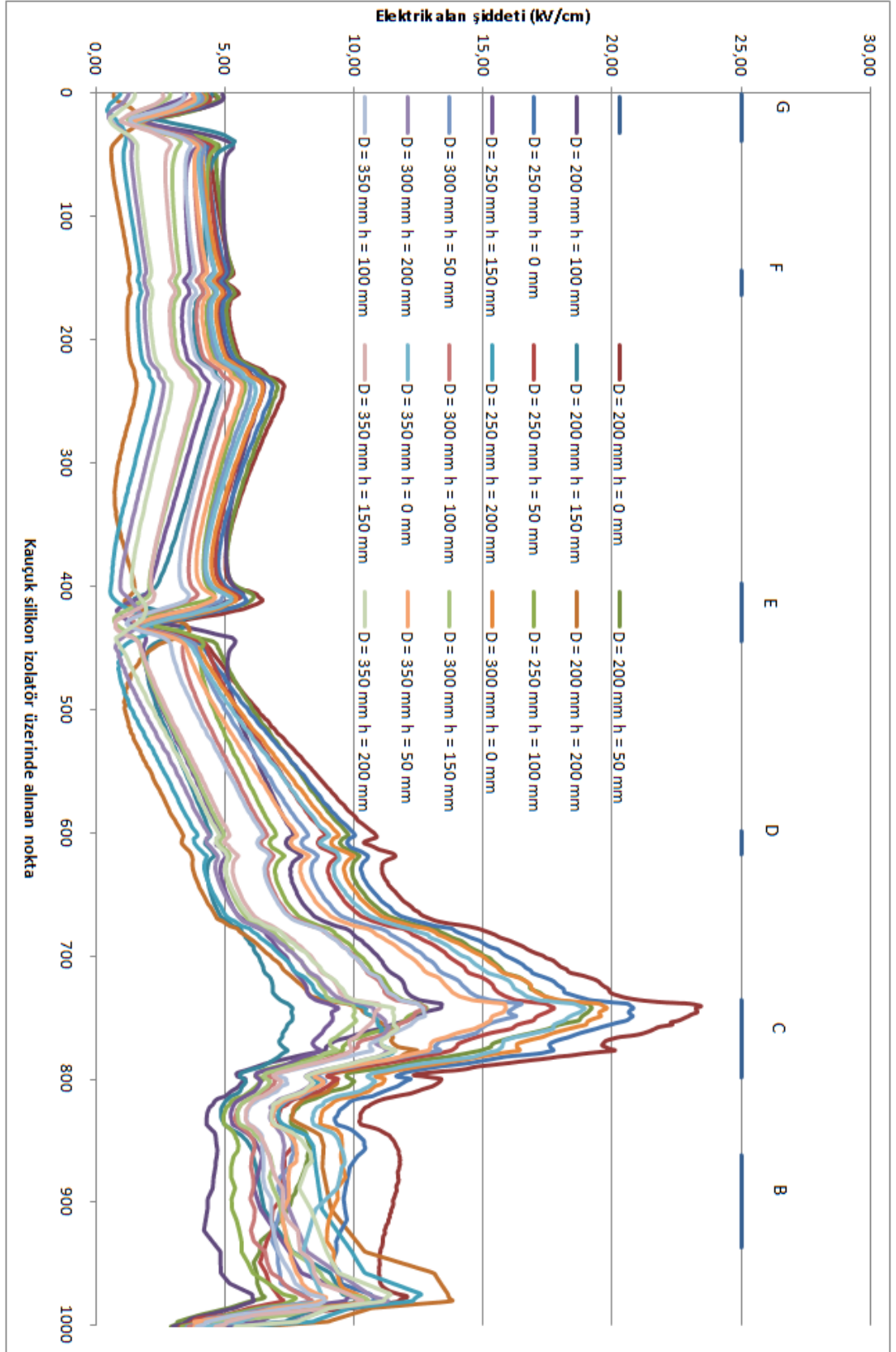
Şekil 5.2 : Darbe geriliminde, temiz izolatörde, korona halkası üzerinde elektrik alan şiddeti dağılımı.

Şekil 5.3'te verilen 20 farklı duruma ilişkin eğrinin yoğunluğundan dolayı eğriler tam olarak izlenememektedir. Bu nedenle bazı özel durumlar ayrıca ele alınmıştır. Şekil 5.4'te $D = 200-350$ mm çapları ve $h = 0-100-200$ mm konum değerleri için korona halkası etrafındaki alan şiddeti değerleri verilmiştir.

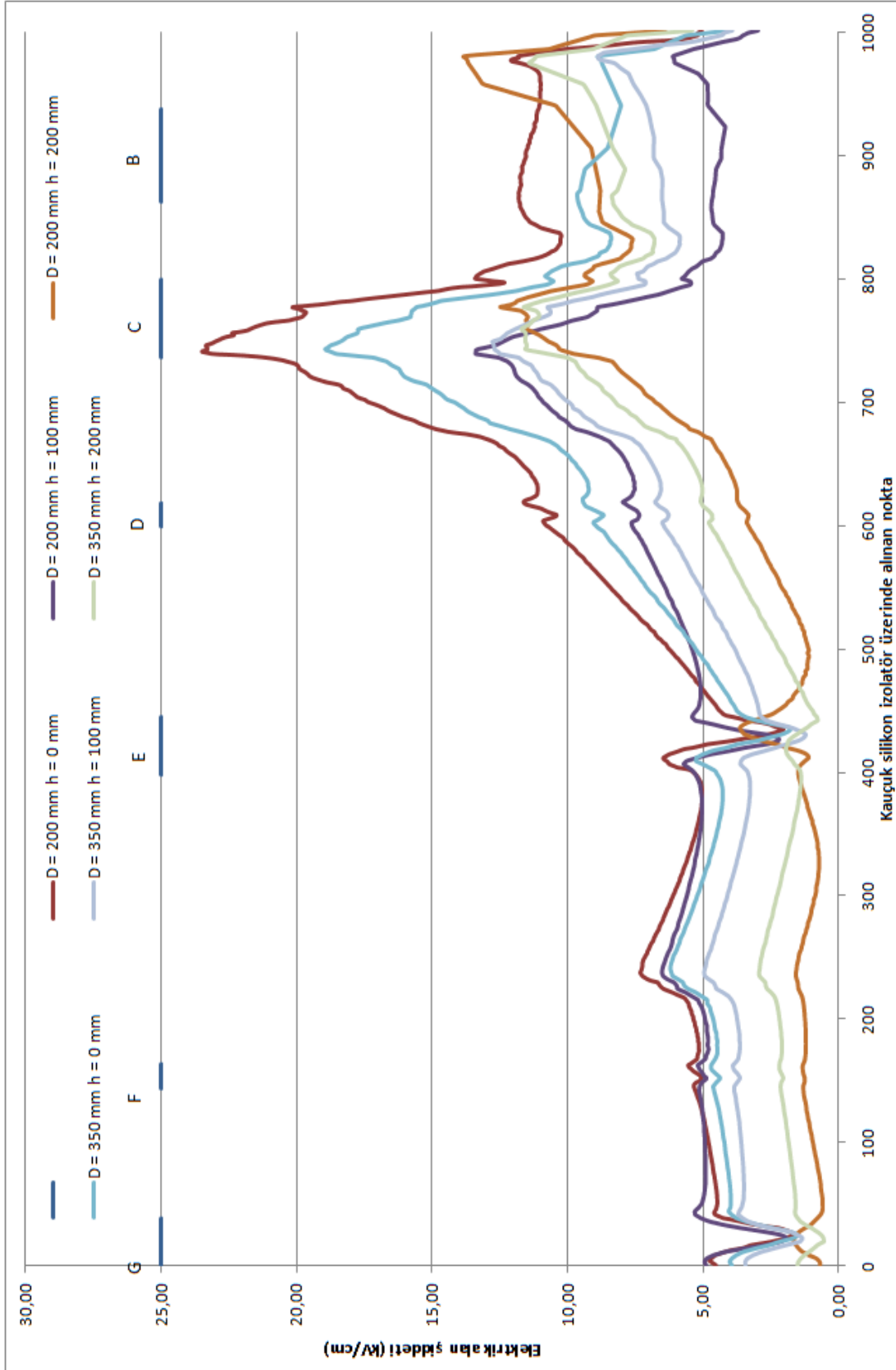


Şekil 5.3 : Yıldırım darbe geriliminde, temiz izolatörde, bazı korona halka çap ve konumları için korona halkası üzerindeki alan dağılımı.

Çizelge 5.2’de tüm korona halka çap ve konumları, Çizelge 5.3’te ise bazı özel korona halka çap ve konumları için silikon izolatör yüzeyindeki elektrik alan şiddeti değerleri verilmiştir.



Şekil 5.4 : Yıldırım darbe geriliminde, temiz izolatörde, silikon izolatör yüzeyinde alan dağılımı.



Şekil 5.5 : Yıldırım darbe geriliminde, temiz izolatörde, bazı korona halka çap ve konumları için silikon izolatör yüzeyindeki alan dağılımı.

Alternatif gerilimlerdekine benzer şekilde A ve C bölgesindeki maksimum alan şiddetleri diğerlerine göre yüksek çıkmaktadır. A bölgesindeki (korona halkası) maksimum alan şiddeti değerlerinin korona halka çapı ve konumundan daha az etkilendiği ve değişim aralığının dar olduğu; buna karşılık C bölgesindeki maksimum alan şiddetlerinin halka çapı ve konumuna bağlı olarak geniş bir aralıkta değişim gösterdiği göze çarpmaktadır. Dolayısıyla, A bölgesi için daha sonraki korona halka et kalınlığı parametresini kullanmak üzere, silikon üzerindeki (C bölgesi) elektrik alan şiddeti değerlerinin minimum olduğu düzenin $D = 200 \text{ mm}$ $h = 150 \text{ mm}$ yerleşimi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu değer etrafında daha ayrıntılı bir inceleme Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : Optimal D/h değerleri civarında, darbe geriliminde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetleri (kV_{ef}/cm).

Korona halkası çapı, D [mm]	Korona halkası konumu, h [mm]	A Noktası	B Noktası	C Noktası	D Noktası	E Noktası	F Noktası	G Noktası
170	130	23,41	7,29	8,54	6,05	7,36	5,46	6,45
170	140	22,15	8,07	6,97	5,02	6,84	5,19	6,59
170	150	22,11	9,42	6,54	4,17	6,07	4,82	6,66
170	160	23,64	10,69	8,06	3,63	5,15	4,38	6,48
170	170	21,87	11,13	8,92	3,12	4,23	3,51	5,42
180	130	23,60	7,28	8,73	5,95	6,40	5,26	6,17
180	140	23,08	8,36	7,43	5,20	5,85	5,07	6,36
180	150	21,67	9,22	6,65	4,29	4,88	4,57	6,09
180	160	22,73	10,30	7,98	3,79	3,96	4,14	5,80
180	170	21,53	10,79	8,86	3,28	3,19	3,36	4,87
190	130	22,74	7,43	9,07	5,96	5,58	5,08	5,89
190	140	22,99	8,25	8,05	5,22	4,98	4,85	5,87
190	150	22,65	9,19	7,31	4,55	4,14	4,47	5,98
190	160	21,18	9,92	7,85	3,85	3,19	3,87	5,17
190	170	20,98	10,55	8,82	3,47	2,46	3,25	4,47
200	130	22,34	7,07	9,21	5,98	4,99	4,86	5,41
200	140	22,55	7,98	8,19	5,22	4,27	4,63	5,73
200	150	21,99	7,57	7,62	4,59	3,38	4,23	5,37
200	160	20,60	9,63	8,02	3,98	2,44	3,71	4,77
200	170	21,50	10,40	8,82	3,70	1,81	3,18	4,10
210	130	21,98	7,19	9,73	5,92	4,53	4,71	5,20
210	140	22,13	7,97	8,67	5,28	3,77	4,45	5,13
210	150	21,56	8,69	8,09	4,67	2,81	4,07	4,98
210	160	22,01	9,49	8,18	4,19	1,93	3,61	4,51
210	170	22,56	10,16	9,25	3,89	1,34	3,13	3,90
220	130	21,35	7,12	9,56	5,89	4,07	4,59	5,07
220	140	21,75	7,93	8,98	5,26	3,40	4,29	5,01
220	150	21,67	8,58	8,44	4,75	2,40	3,93	4,58
220	160	21,51	9,35	8,48	4,35	1,53	3,55	4,25
220	170	21,60	10,17	8,99	4,07	0,89	3,06	3,62

Yukarıdaki çizelgede $D = 200$ mm, $h = 150$ mm değerleri silikon izolatör yüzeyinde en düşük elektrik alan şiddetlerini oluşturan değerler olarak saptanmıştır. Fakat korona halkası üzerindeki elektrik alan şiddetleri göreceli olarak yüksek değerlerdedir. Bunu azaltmak için korona halka et kalınlığı veya korona halka çapı artırılabilir. $h = 150$ mm konumu sabit alınmak koşuluyla, korona halka et kalınlığı ve korona halka çapının elektrik alan şiddeti değişimine etkisi Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3 : Farklı korona halka çapı ve halka et kalınlığının, darbe geriliminde temiz izolatörde maksimum elektrik alan şiddetlerine etkisi ($h = 150$ mm).

Korona halka et kalınlığı, r [mm]	Korona halka çapı, D [mm]	A Noktası	B Noktası	C Noktası	D Noktası	E Noktası	F Noktası	G Noktası
25	200	24,69	9,43	8,98	5,11	3,30	4,38	5,36
25	250	23,36	8,94	10,29	5,48	2,38	3,83	4,06
25	300	20,02	8,73	10,71	5,60	2,34	3,44	3,23
25	350	19,45	8,78	11,63	5,85	2,46	3,26	2,82
30	200	21,99	7,57	7,62	4,59	3,38	4,23	5,37
30	250	21,54	8,44	9,29	5,02	2,12	3,64	4,07
30	300	18,52	8,28	10,10	5,20	2,09	3,24	3,29
30	350	17,77	8,33	10,78	5,44	2,27	3,07	2,86
35	200	20,56	8,16	6,63	4,11	3,48	4,10	5,23
35	250	19,30	7,95	8,27	4,52	1,88	3,47	4,01
35	300	16,87	7,71	9,20	4,81	1,91	3,12	3,20
35	350	10,07	7,80	10,14	5,08	2,10	2,94	2,78

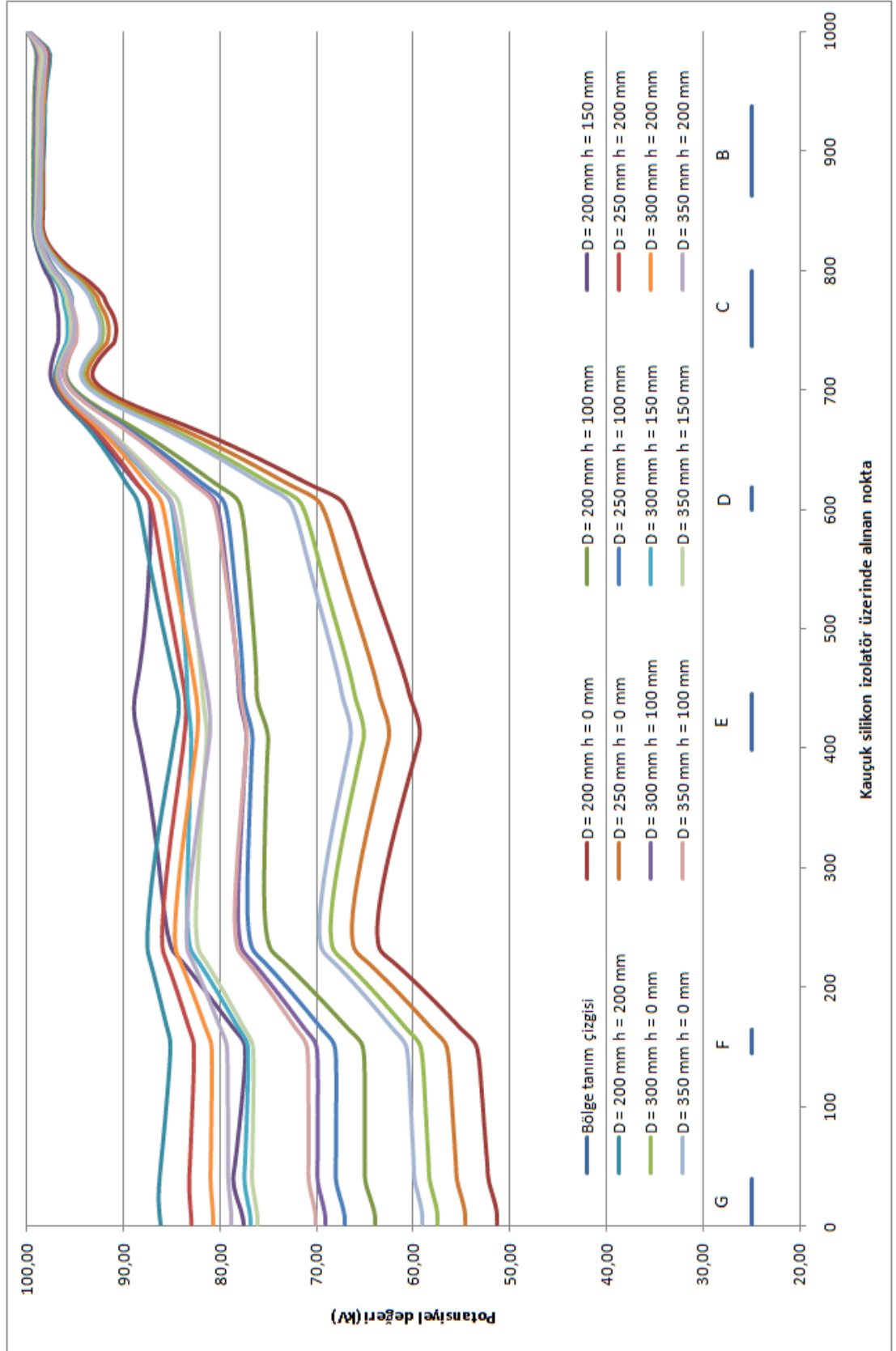
Çizelge 5.3'ten de görüleceği gibi $D = 350$ mm çaplı ve $r = 35$ mm et kalınlıklı korona halkasının $h = 150$ mm konumuna yerleştirilmesi durumunda, korona halkası üzerindeki alan şiddetleri en uygun değerlere gelmektedir. Fakat $D = 350$ mm korona halka çapı estetik ve mekanik açıdan biraz fazlaca büyüktür.

5.2 Temiz İzolatör İçin Yıldırım Darbe Geriliminde İzolatör Üzerindeki Potansiyel Dağılımı

Şekil 5.6 ve Çizelge 5.4'te farklı çaplı korona halkalarının yerleşim konumlarına bağlı olarak silikon izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımları verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Temiz izolatörlerde darbe geriliminde izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımı ($U = 100 \text{ kV}_{\text{tepe}}$).

Korona halka çapı, D [mm]	Korona halka konumu, h [mm]	A Noktası	B Noktası	C Noktası	D Noktası	E Noktası	F Noktası	G Noktası
200	0	100	98,33	95,40	70,56	60,43	55,17	52,21
200	100	100	99,29	97,83	80,22	76,17	66,85	64,97
200	150	100	99,05	98,15	88,49	88,88	78,67	78,60
200	200	100	98,55	97,13	89,62	84,96	85,56	86,41
250	50	100	98,47	95,81	72,72	63,59	58,22	55,52
250	100	100	99,15	97,67	81,61	77,57	69,60	68,03
250	200	100	98,64	97,28	88,49	83,91	83,32	83,26
300	0	100	98,55	96,09	74,49	66,09	60,79	58,30
300	100	100	99,05	97,55	82,37	78,05	71,36	69,94
300	150	100	98,98	97,75	86,53	83,35	78,10	77,45
300	200	100	98,71	97,31	87,40	82,51	81,50	80,97
350	0	100	98,57	96,24	75,52	67,49	62,33	59,98
350	100	100	98,96	97,42	82,60	77,89	72,21	70,81
350	150	100	98,93	97,59	85,82	81,83	77,59	76,71
350	200	100	98,74	97,27	86,43	81,29	79,96	79,11



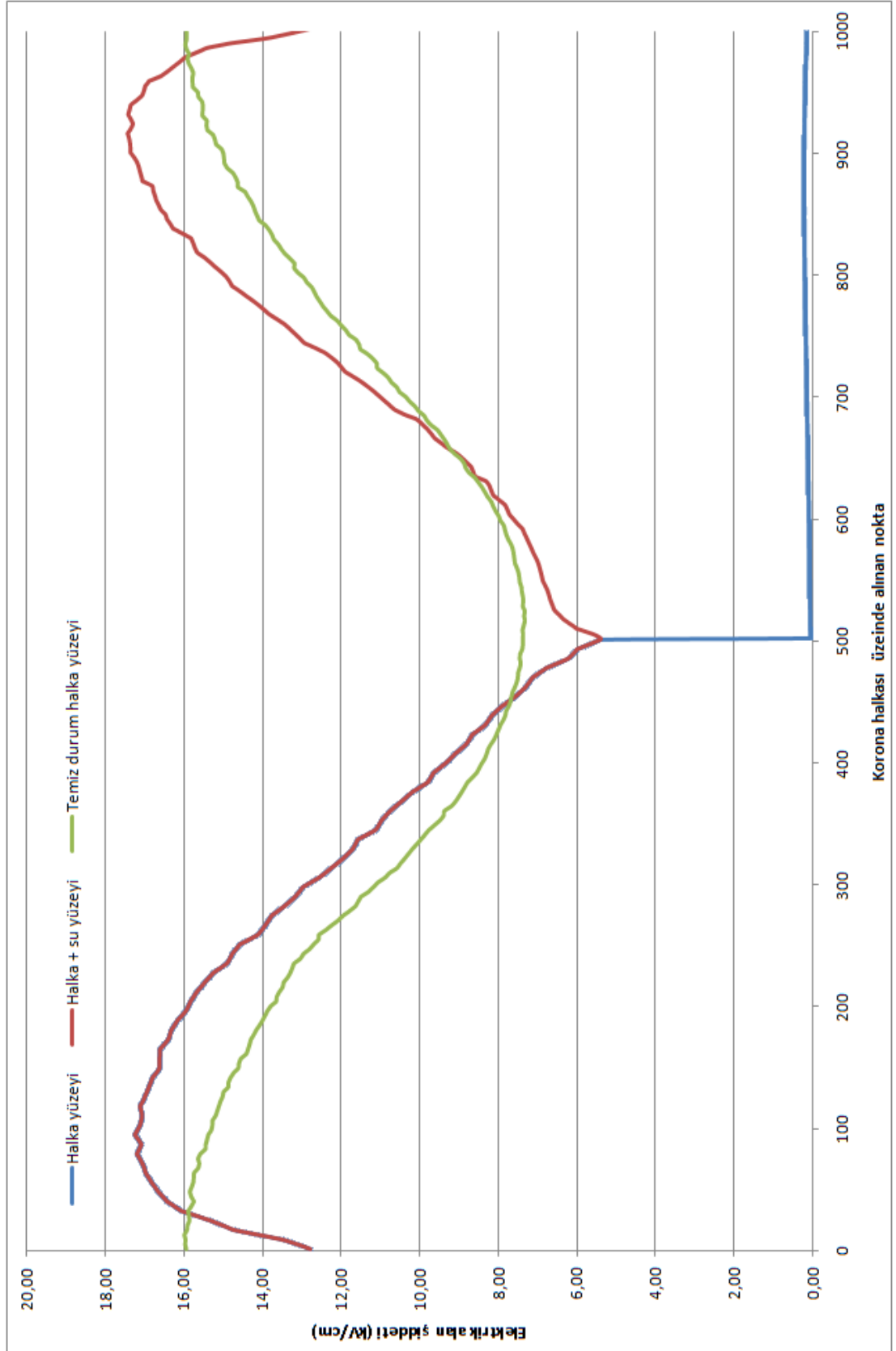
Şekil 5.6 : Temiz izolatörlerde darbe geriliminde izolatör yüzeyindeki potansiyel dağılımı ($U = 100 \text{ kV}_{\text{tepe}}$).

5.3 Kirli İzolatör Geçici Hal Korona Halkası Üzeri Elektrik Alan Dağılımı

Sonuçları

Yapılan incelemelerde korona halkası üzerindeki maksimum elektrik alan şiddeti değeri, su halkasının etkisiyle, halka et kalınlığının artmasına benzer bir etkileşime girdiği ve üzerindeki elektrik alan şiddetlerinde azalmalar olduğu tespit edilmiştir.

Korona halkasının yüzeyindeki su tabakası korona halkasının kalınlığının artmasına benzer sonuçlar doğurmuştur. Korona halkasının üzerinde su damlasının bulunması durumunda elektrik alan şiddetlerinde temiz duruma göre azalmaya sebep olmuştur. Bu durumda, korona halkası üzerindeki elektrik alan şiddeti değişimi Şekil 5.7’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Darbe geriliminde korona halkasının altında su olması durumunda elektrik alan dağılımı; $r = 30$ mm, $D = 300$ mm, $h = 150$ mm.

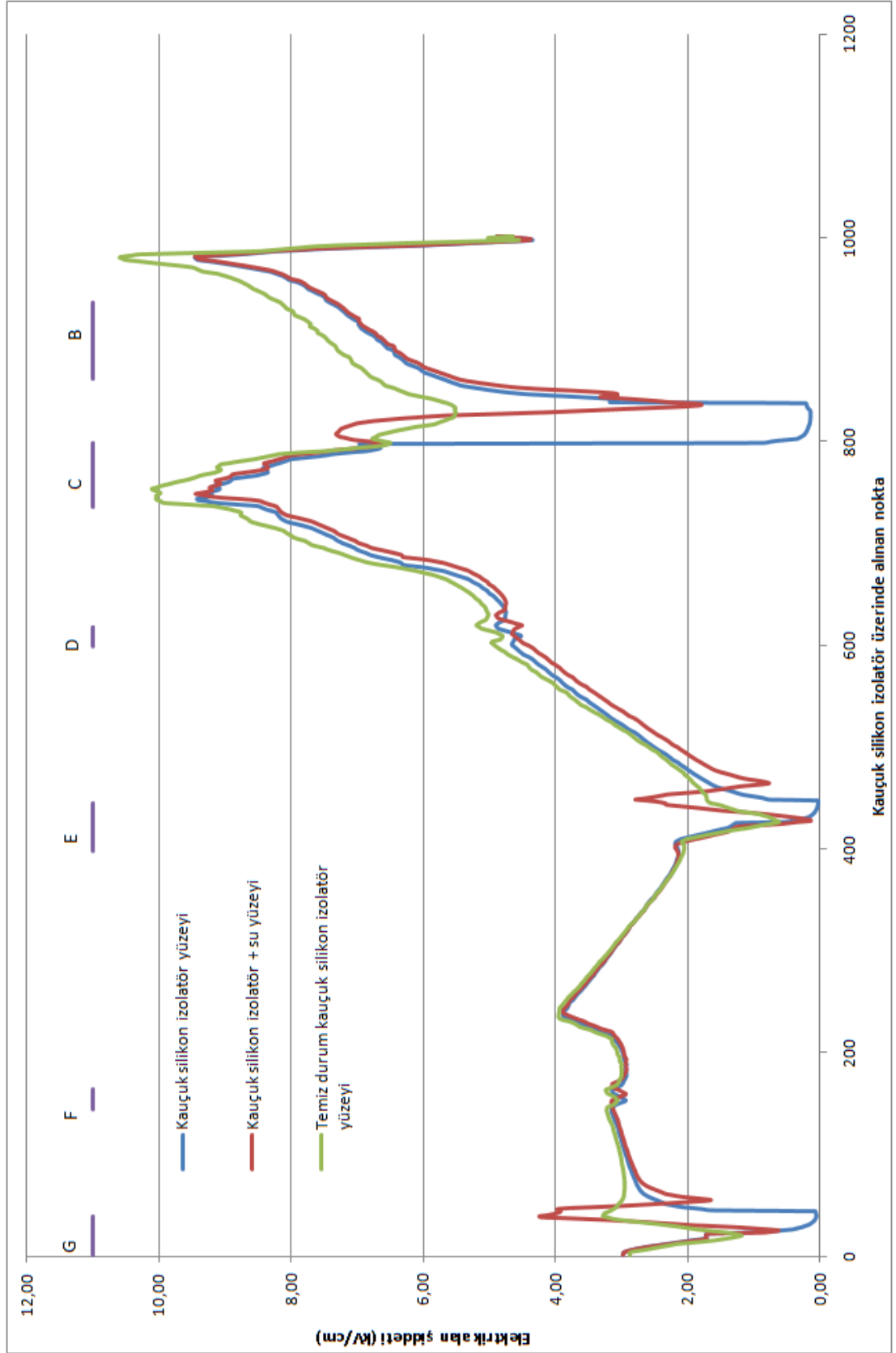
5.4 Darbe Geriliminde Kirli Bir Silikon İzolatör Yüzeyinde Elektrik Alan

Dağılımı Sonuçları

Su halkaları ile kirlenmiş bir izolatörde, darbe geriliminde, izolatör yüzeyindeki alan şiddeti dağılımı Çizelge 5.5 ve Şekil 5.8’de sunulmuştur. Silikon üzerine yerleştirilen su halkalarının, silikon etek uçlarında sivri uç şeklindeki sarkmaları elektrik alan şiddetinde artmaya neden oldukları saptanmıştır.

Çizelge 5.5 : Darbe geriliminde, üzerinde su halkası olan kauçuk silikon izolatör yüzeyinde elektrik alan şiddeti dağılımı (kV/cm).

Tanım	B Noktası	C Noktası	D Noktası	E Noktası	F Noktası	G Noktası
Kirli silikon yüzey r = 30 mm, D = 300 mm, h = 150 mm	7,48	9,43	4,90	2,19	3,15	2,98
Kirli silikon + su yüzeyi r = 30 mm, D = 300 mm, h = 150 mm	7,44	9,46	4,66	2,63	3,16	4,25
Temiz silikon yüzeyi r = 30 mm, D = 300 mm, h = 150 mm	8,28	10,10	5,20	2,09	3,24	3,29



Şekil 5.8 : Kirlı izolatör, $r = 30$ mm, $D = 300$ mm, $h = 150$ mm darbe analizi yalıtkan bölgedeki elektrik alan dağılımı.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sayısal yöntemler modern mühendislik çalışmalarında her geçen gün daha fazla yer almaktadır. Sayısal yöntemler ile fiziki olarak ölçümleri yapılamayan durumlar için de sonuçlar elde edilebilmektedir. Diğer yandan ölçüm teknikleri olarak her ölçüm tekniği ortamı doğallığından bir miktar uzaklaştırmaktadır. Ayrıca yapılmak istenen ölçümlerin pek çoğu teknik olarak mümkün olamamaktadır. Bu durumlarda sayısal yöntemler ile elde edilen sonuçlar büyük önem kazanmaktadır.

Yapılan çalışmada, alternatif ve yıldırım darbe gerilimlerinde 154 kV hava hattı silikon-kauçuk izolatörün üzerinde oluşan elektrik alan şiddetleri ve potansiyel dağılımlar incelenmiştir. İncelemelerde izolatörün alternatif ve darbe gerilimleri yalıtım performansı açısından korona halkasının et kalınlığı, çapı ve yerleşiminin en uygun değerleri saptanmıştır.

Yapılan benzetimlerde, belirli koşullar ile elektrik alan şiddetlerine ilişkin sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçların doğruluğunun kanıtlanabilmesi için yapılan çalışmalara ilişkin deneysel değerlerin elde edilmesi büyük önem kazanmaktadır. Konu ile ilgili çeşitli sayısal yöntemler ile yapılan çalışmalar ile elde edilen sonuçlar ile tez kapsamında benzetimlerde elde edilen sonuçlar büyük oranda örtüşmektedir. Sayısal yöntemler ile elde edilen sonuçların bilimsel kabul edilebilirliği konusunda şüpheye yer kalmamaktadır. Bunun en büyük kanıtı olarak IEC tarafından yayınlanan TR 62095-Electric Cables-Calculation of current ratings isimli rapordur [2].

Her ne kadar benzetimleri yaptığımız yazılımda izolatör 3 boyutlu olarak irdelense de, izolatör üzerindeki kirlilik etkenleri net olarak benzetilememektedir. Yapılan benzetimlerde bir su damlası benzetilememekte, ancak su halkası şeklinde benzetimler yapılabilmektedir. Oysa gerçek izolatör çalışma koşullarında su damlaları, kirlenmeler, diğer faz iletkenlerinin etkisi gibi etkenlerde olmaktadır. İleriki çalışmalarda izolatör üzerinde düzensiz kirlenme modelleri yapılarak gerçek çalışma koşullarına daha yakın benzetim sonuçları elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **İdemen, M.**, 1996: *Elektromanyetik Alan Teorisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Literatür Yayıncılık, İstanbul, pp. 55-60.
- [2] **Kutucu, K.**, 2009: *Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Elektrik Alan Analizi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, ELE UZ2009 KUT, pp. 5-25.
- [3] **Hutton, V. D.**, 2004: *Fundamentals of Finite Element Analysis*, Mc Graw Hill, Boston, pp. 45-114.
- [4] **Chari, K. V. M., Bedrosian, G., D'Angelo, J., Konrad, A.**, 1993: *Finite Element Applications*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, No. 2, pp. 1306-1314.
- [5] **Url-1** <http://www.md.kth.se/~ulfs/Research/LIC/LIC1_B.pdf>, alındığı tarih 25.12.2009.
- [6] **Saatçioğlu, E. S.**, 1997: *Sınır Elemanları Metodu*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, MAK UZ781 SAA.
- [7] **Xing-Ming, B., Li-Ming, W., Zhi-Cheng, G., Lai, W., Yong, C., Xue-wei, B., Gui-qing, R.**, 2009: *Design of Grading Rings for 1000 kV AC Composite Insulator*, Proceedings of Symposium on High Voltage Engineering, Johannesburg, ISBN 978-0-620-44584-9.
- [8] **Sima, W., Espino-Cortes, F. P., Cherney, E. A. and Jayaram, S. H.**, 2004: *Optimization of Corona Ring Design for Long Insulators using FEM based Computational Analysis*, Conference record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Indianapolis, USA 43-53.
- [9] **Ilhan, S., Özdemir, A., Sima, W., Wu, K., Yang, Q., Sun, C.**, 2007: Effects of Corona Ring Design On Electric Field Intensity And Potential Distribution Along an Insulator String, Eleco'2007 5th International Conference On Electrical And Electronics Engineering Papers.
- [10] **Integrated Engineering Software** - Users and Technical Manual for Electro 2D, Version 7.0, Winnipeg: Enginia Research Inc., 2008.
- [11] **Ekici, S., Yıldırım, S.**, 2005: *İndirekt Sınır Elemanları Yöntemi ile İki Boyutlu Potansiyel Dağılımının Hesaplanması*, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 17 (1), 1-9, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Can YILDIZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Tekirdağ

Adres: canyildiz77@gmail.com +90545 849 97 92

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi

Elektrik Mühendisliği Bölümü 1995-2000

Yüksek Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi

Elektrik Mühendisliği Programı 2000-2010