

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK GERİLİM AYIRICILARININ KARMA GERİLİMLERDE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ELEKTRİK ALAN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Miraç YAZICI

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2022

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK GERİLİM AYIRICILARININ KARMA GERİLİMLERDE SONLU
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ELEKTRİK ALAN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Miraç YAZICI
(504191035)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ

ŞUBAT 2022

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 504191035 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Miraç YAZICI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK GERİLİM AYIRICILARININ KARMA GERİLİMLERDE SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ELEKTRİK ALAN ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Suat İLHAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 13 Ocak 2022
Savunma Tarihi : 1 Şubat 2022





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca danışmanlığımı yapan, desteğini ve bilgisini benden esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye; daima varlığını yanımda hissettiğim benden sevgisini ve emeğini esirgemeyen aileme; süreçteki desteklerinden ötürü emeği geçen tüm arkadaşlarıma sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Şubat 2022

Miraç Yazıcı
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Karma Gerilimler	5
1.4 Yıldırım Darbe Gerilimi	7
1.5 Yüksek Gerilim Ayırıcıları.....	7
2. ELEKTRİK ALAN	13
2.1 Coulomb Yasası	13
2.2 Elektrostatik Alan ve Alan Çizgileri	15
2.3 Elektrik Akısı ve Gauss Yasası	16
2.4 Elektrik Alanın Rotasyoneli	18
2.5 Elektrostatik Potansiyel	19
2.6 Statik Elektrikte İş ve Enerji	21
2.7 Laplace ve Poisson Denklemleri	23
2.8 Sınır Koşulları	24
3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ	27
3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi	27
3.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Adımları	28
3.2.1 Sınır koşullarının belirlenmesi	29
3.2.2 Sonlu eleman ağının seçilmesi.....	29
3.3 Elektrik Alan Problemleri için Maxwell Denklemleri	30
3.4 Dörtüzlü Sonlu Elemana İlişkin Katsayılar.....	33
3.5 Elektrik Alan Problemleri için Sonlu Elemanlar Denklemlerinin Yazılması ..	37
4. ÜÇ BOYUTLU ELEKTRİK ALAN BENZETİMLERİ	43
4.1 Model	44
4.1.1 Modelin boyutları ve malzeme tanımlamaları	45
4.1.2 Modelin sonlu elemanlara bölünmesi	49
4.2 Analiz	50
4.2.1 Yıldırım darbe geriliminin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler	50
4.2.1.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması.....	52

4.2.1.2 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması.....	59
4.2.1.3 Ayırıcı açık iken faz – toprak arası pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması.....	64
4.2.1.4 Ayırıcı açık iken faz – toprak arası negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması.....	71
4.2.1.5 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması.....	77
4.2.1.6 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması.....	83
4.2.2 Şebeke frekanslı gerilimin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler	89
4.2.2.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanması.....	89
4.2.2.2 Ayırıcı açık iken faz – toprak arası şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanması.....	96
4.2.2.3 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanması.....	102
4.2.3 İşletme geriliminin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler	108
4.2.3.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca işletme geriliminin uygulanması	109
4.2.3.2 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası işletme geriliminin uygulanması	115
4.2.4 Karma gerilimin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler	120
4.2.4.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca karma gerilimin uygulanması	120
4.2.4.2 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası karma gerilimin uygulanması..	128
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	137
KAYNAKLAR.....	141
EKLER.....	143
ÖZGEÇMİŞ.....	149

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
IEC	: International Electrotechnical Commission
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
İTÜ	: İstanbul Teknik Üniversitesi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
XLPE	: Cross-Linked Polyethylene (Çapraz Bağlı Polietilen)
YG	: Yüksek Gerilim





SEMBOLLER

B	: Manyetik akı yoğunluğu
D	: Elektriksel akı yoğunluğu
E	: Elektrik alan şiddeti
F	: Kuvvet
H	: Manyetik alan şiddeti
Hz	: Hertz
I	: Akım
J	: Akım yoğunluğu
kV	: Kilovolt
M	: Manyetizasyon vektörü
Q	: Elektrik yükü
V	: Hacim
W	: İş
ρ	: Elektriksel yük yoğunluğu
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_r	: Malzemenin bağıl dielektrik sabiti
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
μ_r	: Malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Koordinat sistemlerine göre Laplace denklemleri.....	23
Çizelge 3.1 : Maxwell denklemlerinde kullanılan semboller.	30
Çizelge 4.1 : Modelde kullanılan malzemeler ve bağıl dielektrik sabitleri.	47
Çizelge 4.2 : Modelde kullanılan yıldırım darbe gerilimleri.	50





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Karma gerilim üreten devre blok şeması.....	6
Şekil 1.2 : Pantograf ayırıcı.	8
Şekil 1.3 : Yarı pantograf ayırıcı.	9
Şekil 1.4 : Dikey açmalı ayırıcı.	9
Şekil 1.5 : Üç fazlı ortadan açmalı ayırıcı.	10
Şekil 1.6 : Ortadan açmalı ayırıcının bir fazının görünümü.	10
Şekil 2.1 : Elektrik yüklerinin birbirlerine karşı etkileri.....	14
Şekil 2.2 : Noktasal yükün konumu ve integralin alınacağı yol.	18
Şekil 2.3 : İntegralin alınacağı kapalı yol.	19
Şekil 2.4 : Q deneme yükünün hareket ettirileceği yol ve durgun elektrik yükleri...	21
Şekil 2.5 : Elektrik alan çizgilerinin farklı bir ortama geçerken durumu.	24
Şekil 2.6 : Sonsuz küçük ΔS dikdörtgeni ve deplasman bileşenleri.	25
Şekil 3.1 : İki boyutlu sonlu eleman örnekleri.....	29
Şekil 3.2 : Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri.	30
Şekil 3.3 : Sinüzoidal akım-zaman grafiği.	33
Şekil 3.4 : Histerezis eğrisi.	33
Şekil 3.5 : Dört yüzlü sonlu eleman.	34
Şekil 3.6 : Ayrık dört yüzlü sonlu elemanlar.....	41
Şekil 3.7 : Birleştirilmiş iki sonlu elemanın görünümü.....	41
Şekil 4.1 : Ayırıcı modeli (açık pozisyon).....	45
Şekil 4.2 : Ayırıcı modeli (kapalı pozisyon).....	45
Şekil 4.3 : Comsol'da oluşturulan model (açık pozisyon).....	46
Şekil 4.4 : Comsol'da oluşturulan model (kapalı pozisyon).....	46
Şekil 4.5 : Modelde kullanılan ayırıcının boyutları.	47
Şekil 4.6 : Ayırıcıda kullanılan malzemeler.	48
Şekil 4.7 : Modelin Comsol'da sonlu elemanlar ağına bölünmesi.	49
Şekil 4.8 : Standart yıldırım darbe gerilimi.	50
Şekil 4.9 : Yıldırım darbe gerilimi dalga biçimlerinin karşılaştırması.	50
Şekil 4.10 : Yıldırım darbe geriliminin uygulandığı silindir kontak.	51
Şekil 4.11 : Comsol'da oluşturulan pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği..	52
Şekil 4.12 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	53
Şekil 4.13 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	54
Şekil 4.14 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	54
Şekil 4.15 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μs sonra elektrik alan dağılımı.....	55
Şekil 4.16 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μs sonra elektrik alan dağılımı.....	55

Şekil 4.17 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	56
Şekil 4.18 : Kontak ve terminal yüzeylerinde belirlenen noktalar.	57
Şekil 4.19 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.	57
Şekil 4.20 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.	58
Şekil 4.21 : Comsol'da oluşturulan negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.	59
Şekil 4.22 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	60
Şekil 4.23 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	60
Şekil 4.24 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	61
Şekil 4.25 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	61
Şekil 4.26 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	61
Şekil 4.27 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	62
Şekil 4.28 : Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.	63
Şekil 4.29 : Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.	64
Şekil 4.30 : Comsol'da oluşturulan pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği..	65
Şekil 4.31 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	66
Şekil 4.32 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	66
Şekil 4.33 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	66
Şekil 4.34 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	68
Şekil 4.35 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	68
Şekil 4.36 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	69
Şekil 4.37 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.	70
Şekil 4.38 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.	71
Şekil 4.39 : Comsol'da oluşturulan negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.	72
Şekil 4.40 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	72
Şekil 4.41 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	73
Şekil 4.42 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	73
Şekil 4.43 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	74

Şekil 4.44 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	75
Şekil 4.45 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	75
Şekil 4.46 : Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.	76
Şekil 4.47 : Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.	77
Şekil 4.48 : Comsol’da oluşturulan pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği..	78
Şekil 4.49 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	78
Şekil 4.50 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	79
Şekil 4.51 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	79
Şekil 4.52 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	80
Şekil 4.53 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	80
Şekil 4.54 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	81
Şekil 4.55 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.	82
Şekil 4.56 : Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.	82
Şekil 4.57 : Comsol’da oluşturulan negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.	83
Şekil 4.58 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	84
Şekil 4.59 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	84
Şekil 4.60 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	85
Şekil 4.61 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	86
Şekil 4.62 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	87
Şekil 4.63 : Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.....	87
Şekil 4.64 : Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.	88
Şekil 4.65 : Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.	89
Şekil 4.66 : Comsol’da oluşturulan şebeke frekanslı deney geriliminin grafiği.....	90
Şekil 4.67 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	91
Şekil 4.68 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	91
Şekil 4.69 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	92

Şekil 4.70 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	92
Şekil 4.71 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	93
Şekil 4.72 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	93
Şekil 4.73 : Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.....	94
Şekil 4.74 : Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.....	95
Şekil 4.75 : Comsol'da oluşturulan şebeke frekanslı deney geriliminin grafiği.....	96
Şekil 4.76: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	97
Şekil 4.77 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	97
Şekil 4.78 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	98
Şekil 4.79 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	99
Şekil 4.81 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı	100
Şekil 4.82 : Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.....	101
Şekil 4.83 : Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.....	101
Şekil 4.84 : Comsol'da oluşturulan şebeke frekanslı deney geriliminin grafiği.....	102
Şekil 4.85 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	103
Şekil 4.86 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	104
Şekil 4.87 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	104
Şekil 4.88 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	105
Şekil 4.89 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	106
Şekil 4.90 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	106
Şekil 4.91 : Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.....	107
Şekil 4.92 : Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.....	108
Şekil 4.93 : Comsol'da oluşturulan şebeke frekanslı işletme gerilimi grafiği.....	109
Şekil 4.94 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	110
Şekil 4.95 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	110
Şekil 4.96 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	111

Şekil 4.97 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	112
Şekil 4.98 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	112
Şekil 4.99 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	113
Şekil 4.100 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.....	114
Şekil 4.101 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.....	114
Şekil 4.102 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	115
Şekil 4.103 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	116
Şekil 4.104 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	116
Şekil 4.105 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	117
Şekil 4.106 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.....	118
Şekil 4.107 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.	118
Şekil 4.108 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.....	119
Şekil 4.109 : Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.....	120
Şekil 4.110 : Karma gerilim uygulandıktan 1 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.....	121
Şekil 4.111 : Karma gerilim uygulandıktan 10 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.....	122
Şekil 4.112 : Karma gerilim uygulandıktan 50 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.....	122
Şekil 4.113 : Karma gerilim uygulandıktan 1 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	123
Şekil 4.114 : Karma gerilim uygulandıktan 10 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	124
Şekil 4.115 : Karma gerilim uygulandıktan 50 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	124
Şekil 4.116 : Karma gerilim altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.....	125
Şekil 4.117 : Karma gerilim altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.....	126
Şekil 4.118 : Karma gerilim uygulandıktan 3 µs sonra elektriksel potansiyelin ayırıcı yüzeyindeki dağılımı.....	127
Şekil 4.119 : Karma gerilim uygulandıktan 3 µs sonra elektrik alanının ayırıcı kontaklarındaki dağılımı.....	127
Şekil 4.120 : Karma gerilim uygulandıktan 1 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.....	129
Şekil 4.121 : Karma gerilim uygulandıktan 10 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.....	129
Şekil 4.122 : Karma gerilim uygulandıktan 50 µs sonra elektriksel potansiyel dağılımı.....	130
Şekil 4.123 : Karma gerilim uygulandıktan 1 µs sonra elektrik alan dağılımı.....	131

Şekil 4.124 :	Karma gerilim uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı.	131
Şekil 4.125 :	Karma gerilim uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.	132
Şekil 4.126 :	Karma gerilim altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.	133
Şekil 4.127 :	Karma gerilim altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.	134
Şekil 4.128 :	Karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektriksel potansiyelin ayırıcı yüzeyindeki dağılımı.	135
Şekil 4.129 :	Karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektrik alanın ayırıcı yüzeyindeki dağılımı.	135
Şekil A.1 :	Yıldırım darbe dayanım gerilimi deneyi detayları.	145
Şekil B.1 :	Şebeke frekanslı dayanım gerilimi deneyi detayları.	147



YÜKSEK GERİLİM AYIRICILARININ KARMA GERİLİMLERDE SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ELEKTRİK ALAN ANALİZİ

ÖZET

Modern dünyada elektrik enerjisi son derece önemli bir gereksinim halini almıştır ve insanoğlunun bu enerjiye olan gereksinimi her geçen gün artarak devam etmektedir. Bu gereksinimin karşılanabilmesi için enerjinin yalnızca üretiminin artırılması yeterli değildir. Enerji aynı zamanda verimli kullanılmalıdır. Elektrik enerjisinin verimli kullanabilmesi için yüksek gerilim sistemlerine gereksinim vardır.

Yüksek gerilim sistemlerinin güvenli olarak işletilebilmesi için çeşitli aygıt ve donanımlara gerek duyulmaktadır. Bu tür aygıt ve donanımların sistemlerde elverişli ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi zorunludur. Bunun için aygıt ve donanımların, maruz kalacağı koşullar önceden belirlenmeli ve bu koşullara dayanıp dayanamayacağı denenmelidir. Fakat bu deneyler, kimi zaman çok maliyetli olduğundan kimi zaman ise olanakların yetersizliğinden dolayı aksayabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, karma gerilimlerin yüksek gerilim ayırıcılarına olan etkileri araştırılmıştır. Yüksek gerilim ayırıcıları, yüksek gerilim sistemlerinde devre yüksüz iken açma kapama yapabilen ve gerekli yalıtım aralığını sağlayan aygıtlardır. Karma gerilimler ise farklı türden gerilimlerin bir araya gelmesiyle oluşan yeni gerilim biçimlerine verilen genel isimdir. Bu çalışmanın yapılmasındaki temel amaç, uygulamada oluşan fakat tip deneyleri dışında kalan koşulların ne tür etkiler meydana getirdiğinin saptanması ve değerlendirilmesidir.

Karma gerilimlerin, yüksek gerilim ayırıcıları üzerinde meydana getirdiği etkilerin incelenebilmesi için COMSOL programında bir model sunulmuştur. Yüksek gerilim ayırıcısı, şebeke frekanslı gerilim ve yıldırım darbe gerilimi modellenmiştir. Yüksek gerilim ayırıcısı modellenirken akım taşıyan kollar için alüminyum, kontaklar için bakır, izolatörler için porselen ve şase için çelik malzeme kullanılmıştır. Ayrıca analizin yapıldığı ortam malzemesi için hava tanımlanmıştır. COMSOL'da oluşturulan modele sınır koşulları uygulanmış ve model sonlu elemanlara bölünmüştür.

Modelin sonlu elemanlara bölünmesinin ardından analizler yapılmıştır. Karma gerilimin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkilerin anlaşılabilmesi için ilk etapta yıldırım darbe gerilimi ve şebeke frekanslı gerilim ayırıcıya tek tek uygulanmıştır. Yıldırım darbe gerilimi 50 μ s boyunca, şebeke frekanslı gerilim ise 20 ms boyunca ayırıcıya uygulanmıştır. Yıldırım darbe geriliminin maksimum gerilim seviyesi ayırma aralığı boyunca 860 kV, faz – toprak arası için 750 kV olarak uygulanmıştır. Şebeke frekanslı gerilimin maksimum gerilim seviyesi ayırma aralığı boyunca 375 kV, faz – toprak arası için 325 kV olarak uygulanmıştır. Ardından şebeke frekanslı gerilimden ve yıldırım darbe geriliminden oluşan karma gerilim ayırıcıya 50 μ s boyunca uygulanmıştır.

Bu analizlerin tamamı ayırıcının hem açık hem de kapalı pozisyonları için ayrı ayrı yapılmıştır. Gerilimlerin uygulanmasının ardından elde edilen elektriksel potansiyel dağılımları ve elektrik alan dağılımları belirli anlar için verilmiştir. Buna ek olarak

ayırıcının en önemli kısımları olan kontakların ve uçların yüzeylerinde birer nokta belirlenmiş ve bu noktalara ait elektriksel potansiyel – zaman grafikleri ve elektrik alan – zaman grafikleri verilmiştir.

Yıldırım darbe geriliminin ve şebeke frekanslı gerilimin uygulanmasıyla elde edilen analiz sonuçları laboratuvar koşullarında elde edilen gerçek deneye ait sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karma gerilimin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları ise çalışma boyunca elde edilen diğer analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Ayırıcı üzerinde meydana gelen elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerleri incelendiğinde en fazla zorlanmanın karma gerilim altındayken yaşandığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışma sonuçları göstermektedir ki: ayırıcılar için hali hazırda IEC standartları genel anlamda benzer çalışmaları temel alarak en zorlu koşullar için tip deneyi şartlarını hesaplamakta olsa da ülke otoritelerinin kendi çalışma alanlarına özel yapacakları incelemeler sonucunda daha başarılı sistem ve ürün modellemeleri yapılabilir. Bu sayede hem güvenli hem de maliyete oranla verimi yüksek sistemler kurulabilir.

ELECTRIC FIELD ANALYSIS OF HIGH VOLTAGE DISCONNECTORS AT COMPOSITE VOLTAGE WITH FINITE ELEMENT METHOD

SUMMARY

In the modern world, electrical energy has become an extremely important need and the need of human beings for this energy continues to increase day by day. In order to meet this need, it is not sufficient to increase the production of energy alone. Energy should also be used efficiently. High voltage systems are needed for the efficient use of electrical energy.

Various devices and equipment are required for the safe operation of high voltage systems. It is essential that such devices and equipment can be used conveniently and safely in systems. For this, the conditions that the devices and equipment will be exposed to must be determined in advance and tested whether they can withstand these conditions. However, these tests can sometimes be delayed because they are very costly and sometimes due to insufficient facilities.

In this thesis, the effects of composite voltages on high voltage disconnectors were investigated. High voltage disconnectors are devices that can open and close when the circuit is unloaded in high voltage systems and provide the required isolation distance. In this thesis, a center-break disconnector model was used. Center-break disconnectors are the disconnector model in which both contacts of both poles are movable and these contacts meet at the midpoint of the support insulators. Center-break disconnectors consist of four main parts. These are: current carrying paths, insulators, base frame and control mechanism. Composite voltage is the general name given to new voltage forms formed by the combination of different types of voltages. In order to obtain composite voltages, different types of voltage sources should be properly connected to each other or these different types of voltages should be applied to the test sample at the same time. The main purpose of this study is to determine and evaluate the effects of the conditions that occur in practice but outside the type tests.

In this study, one phase of the center-break disconnector model was used. The disconnector model was drawn in three dimensions in SolidWorks program and then transferred to COMSOL Multiphysics program for the necessary analysis. In order to examine the effects of composite voltages on high voltage disconnectors, a model is presented in the COMSOL program. High voltage disconnector, power frequency voltage and lightning impulse voltage are modeled. While modeling the high voltage disconnector, aluminum is used for the current carrying paths, copper for the contacts, porcelain for the insulators and steel for the base frame. In addition, while modeling the environment material, air is used for the environment. Boundary conditions are applied to the model created in COMSOL and the model is divided into finite elements.

The mesh is made up of tetrahedral elements and triangles. In dividing the model into finite elements, 805146 tetrahedral and 89278 triangular finite elements are used for the open position of the disconnector. In addition, the average element quality for the open position of the disconnector was 0.6108. In dividing the model into finite

elements, 793602 tetrahedral and 88897 triangular finite elements are used for the closed position of the disconnecter. In addition, the average element quality for the closed position of the disconnecter was 0.6098.

After dividing the model into finite elements, analyzes were made. In order to understand the effects of the composite voltage on the disconnecter, the lightning impulse voltage and the power frequency voltage were applied to the disconnecter one by one in the first time. While voltages are applied to the disconnecter, the cylinder contact of the disconnecter is determined as the terminal point. The lightning impulse voltage was applied to the disconnecter along 50 μ s and the power frequency voltage was applied along 20 ms. The maximum voltage level of the lightning impulse voltage was determined across the isolation distance as 860 kV, phase to earth as 750 kV. The maximum voltage level of the power frequency voltage was determined across the isolation distance as 375 kV, phase to earth as 325 kV. Then, composite voltage consisting of power frequency voltage and lightning impulse voltage was applied to the disconnecter along 50 μ s.

All of these analyzes were applied separately for both open and closed positions of the disconnecter. The electrical potential distributions and the electric field distributions obtained after the application of voltages are given for certain moments. In addition, a point has been determined on the contact and terminal surface, which is the most important parts of the disconnecter, and the electrical potential graph and the electric field graph of these points are given.

Operating conditions are considered while applying composite voltage to the disconnecter.

In the lightning impulse voltage test application for the open position of the disconnecter, the maximum electrical potential value seen on the contact surface of the voltage applied terminal was -820 kV. A negligible electrical potential value has occurred on the contact surface of the terminal without voltage applied.

On the other hand, in the composite voltage test application for the open position of the disconnecter, the maximum electric potential value seen on the contact surface of the lightning voltage applied terminal was -810 kV. The maximum electric potential value seen on the contact surface of the power frequency voltage applied terminal was 120 kV. Likewise, when the electric field values are examined; in the lightning impulse voltage test application, it has been observed that the electric field values occurring on the contact surfaces are 54 kV/cm and 27 kV/cm, in the composite voltage test application, it has been observed that the electric field values occurring on the contact surfaces are 72 kV/cm and 24 kV/cm.

In the lightning impulse voltage test application for the closed position of the disconnecter, the maximum electrical potential value seen on the terminal surface of the voltage applied terminal was 710 kV.

On the other hand, in the composite voltage test application for the closed position of the disconnecter, the maximum electric potential value seen on the terminal surface of the lightning voltage applied terminal was 760 kV. Likewise, when the electric field values are examined; in the lightning impulse voltage test application, it has been observed that the electric field values occurring on the terminal surfaces are 27 kV/cm and 16 kV/cm, in the composite voltage test application, it has been observed that the electric field values occurring on the terminal surfaces are 31 kV/cm and 18 kV/cm.

The analysis results obtained by applying the lightning impulse voltage and the power frequency voltage were compared with the results of the real experiment obtained under laboratory conditions. The analysis results obtained with the application of the composite voltage were compared with the other analysis results obtained throughout the study.

It has been observed that the maximum electrical potential values and the maximum electric field strength on the disconnecter are higher when composite voltage is applied to the disconnecter.

The results of this study show that although IEC standards for the disconnectors already determine the type test conditions for the most challenging conditions, more successful system and product modeling can be made as a result of the examinations to be made by the country authorities for their own work areas. In this way, systems that are both safe and cost – effective can be established.





1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında elektrik enerjisine olan gereksinim çeşitli sebeplerden ötürü giderek artmaktadır. Bu artan gereksinimi karşılayabilmek için daha yüksek miktarda enerji üretimine ve daha verimli enerji tüketimine gereksinim duyulmaktadır. Fakat, yeryüzündeki kaynakların sınırlı olmasından ve yüksek miktarda enerji üretiminin karbon ayakizimizi arttırmasından dolayı verimli enerji tüketimi daha fazla üzerinde durulması gereken bir konu haline gelmiştir. Daha verimli enerji tüketimini sağlayabilmek adına elektrik enerjisi üretim ve iletim sistemlerinde kullanılan gerilim seviyesinin yükseltilmesi gerekmektedir. Gerilim seviyesinin yükseltilerek iletilmesi kayıpları azaltmakta dolayısıyla da verimliliği arttırmaktadır.

Modern dünyada güç sistemleri, sanayi tesisleri ve araştırma laboratuvarları gibi birçok alanda yüksek gerilimler kullanılmaktadır. Geçen zaman içerisinde bu tür yüksek gerilim uygulamaları modern medeniyeti sürdürmek için gerekli hale gelmiştir [1].

Yüksek gerilimin kullanıldığı bu alanlarda sistemin düzgün ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayabilmek adına çeşitli aygıt ve donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aygıt ve donanımlar başlıca anahtarlama elemanları, izolatörler ve iletkenlerdir. Yüksek gerilim sistemlerinde bu tür aygıt ve donanımlar koruma ve manevra gibi roller üstlenmekte ve elektrik enerjisi verimini doğrudan etkilemektedirler. Dolayısıyla bu tür aygıt ve donanımların yalıtım seviyelerinin bilinmesi ve iyileştirilmesi, sistem güvenliği ve verimliliği açısından önem arz etmektedir.

Herhangi bir elektrik sisteminde yalıtım düzeyine karar verebilmek için öncelikle sistemin maruz kalacağı koşulların dolayısıyla sisteme uygulanan gerilim seviyesinin bilinmesi gerekmektedir. Daha sonrasında ise çeşitli analiz yöntemleri kullanılarak yalıtım seviyesi belirlenebilir. Kullanılabilecek analiz yöntemleri analitik, deneysel ve sayısal yöntemler olabilir. Bu yöntemlerden deneysel olanlar en doğru sonuçları verirken belirli standart ve yöntemler ile gerçekleştirilirler. Buna göre analitik yöntemler belirli sınırlamalara sahip matematiksel ifadeler olup sonuç verme

hususunda çeşitli zorluklara sahiptirler. Sayısal yöntemler ise geliştirilmiş bazı hesaplama tekniklerini ve bilgisayar teknolojilerini kullanarak minimum hatayla sonuca erişebilmemize imkân tanırırlar.

İstenen sonuçların deneysel olarak elde edilmesi uzun ve pahalı bir yöntemdir. Bundan dolayı ilk defa denenecek bir sistem veya aygıt üzerinde diğer iki yöntemin kullanılması daha mantıklıdır. Bu çalışmada analiz yöntemi olarak sayısal yöntemler kullanılmıştır. Bunun sebebi sayısal analiz yönteminin görece daha az hatayla yapılabilmesidir.

Herhangi bir sistem veya aygıt üzerinde yapılacak olan elektrik alan analizi o sistemin veya aygıtın yalıtım hususunda herhangi bir sorun teşkil edip etmediğini anlamamız açısından önemlidir. Elektrik alan analizi sonlu farklar yöntemi, yük benzetim yöntemi, sınır elemanları yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi gibi çeşitli yöntemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada, bu yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır [2].

1.1 Literatür Özeti

1990 yılında, M.R. Raghuveer, Z. Kolaczowski, J. Weifang ve E. Kuffel AC ve DC karma gerilimler altında işlenmiş bir levhanın yüzey elektrik dayanımıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. DC iletim sistemlerinde, dönüştürücü transformatörler karma gerilimler altında çalışmaktadırlar. Bu nedenle levhanın karma gerilimler altında yüzey dayanımının bilinmesi amaçlanmıştır. Yüzey dayanımı AC, DC, yıldırım ve anahtarlama darbe gerilimleri altında deneysel olarak bulunmuştur [3].

Ö. Kalenderli ve E. Önal karma yüksek gerilim üretim devrelerinin tasarımını araştırmıştır. Çalışmalarında İTÜ Maslak Yerleşkesi'ndeki yüksek gerilim laboratuvarı olanaklarını kullanarak karma yüksek gerilimlerin üretilmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda karma yüksek gerilim üretim devreleri bilgisayar ortamında benzetimleri yapılarak incelenmiştir. Benzetimler yapılırken AC, DC ve darbe gerilim kaynaklarının ikili olarak kullanılmaları düşünülmüştür. Sonuç olarak deneylerde ve araştırmalarda kullanılabilecek çeşitli karma yüksek gerilim üretebilen devreler tasarlanmıştır [4].

2006 yılında, Gökhan İnce kablolarla elektriksel ve ısı zorlanmaların sonlu elemanlar yöntemi ile çoklu anilizini araştırmıştır. Çalışmada kablolar ve sonlu elemanlar

yöntemi konuları detaylı olarak incelenmiştir. Ardından 20,3/35 kV XLPE (35mm² kesitli) kablonun kayıplarının ısı kaynağı olarak kullanıldığı çoklu zorlanma koşullarını incelenmiştir. Sonuç olarak ise farklı koşullar altında, yeraltı kablolarında meydana gelen elektriksel ve ısıl zorlanmalar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İnceleme sonucunda yeraltı kabloları için sıcaklık dağılımları ve akım taşıma kapasitesileri hesaplanmıştır [5].

2009 yılında, Kaan Kutucu sonlu elemanlar yöntemi ile üç boyutlu elektrik alan analizini araştırmıştır. Çalışmada yüksek gerilim sistemlerinde ve laboratuvarlarında kullanılan düzeneklerin bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak üç boyutlu elektrik alan analizi yapılmıştır. Çalışmada toplam 5 adet ürün incelenmiştir. Bunlardan bir tanesi düzlem-çubuk elektrot sisteminde elektrik alan dağılımına pürüzün etkisidir. Elektrot yüzeyindeki pürüzün farklı noktalarda bulunması durumunda elektrik alan dağılımlarının nasıl oluştuğu bulunmuştur. Pürüz çubuk elektroda ne kadar yakınsa maksimum elektrik alan değerinin de o kadar yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Pürüzün belirli bir mesafeden sonra elektrik alan dağılımına etkisinin çok azaldığı, ihmal edilebilir boyuta ulaştığı tespit edilmiştir [2].

J. H. Tian, Y. C. Sha, Y. X. Zhou, Y. Z. Sun, K. K. Sun ve Z. J. Wang'dan oluşan bir ekip 2011 yılında, 800 kV yüksek gerilim ayırıcısı için AC ve DC elektrik alan simülasyonu isimli bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada, AC ve DC elektrik alan dağılımını hesaplamak için ANSYS programı kullanılmıştır. Çalışmada AC ve DC elektrik alan dağılımları elde edilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yüksek gerilim ayırıcılarında elektrik alan hesaplaması yapmanın yapısal optimizasyonun sağlanması, korona boşalmasının kontrolü ve radyo girişim gerilimi seviyesi gibi konularda bize fayda sağlayacağından söz edilmiştir [6].

2015 yılında, Jinglan Zhang, Lei Qi, Tiebing Lu, Xingming Bian, Zhibin Zhao ve Yuke Fu, karma AC – DC gerilimlerin, korona boşalmasının özellikleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada AC – DC karma gerilimler altında elektrotların korona özelliklerini elde etmek için seri devre deney platformu kurulmuştur. Karma gerilimlerin ve geometrik boyutların elektrik alan dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda elektrik alan simülasyon sonuçlarına dayanarak, elektrik alan kuvvetinin değişiminin karma gerilimler altında korona başlangıç gerilimiyle doğru orantılı olduğu bulunmuştur [7].

F. C. Lü, Z. H. Zhang ve F. C. Wang'dan oluşan bir ekip 2016 yılında, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yüksek gerilim ayırıcıları için düzenleme halkasının tasarım optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Düzenleme halkaları korona halkalarına benzerler fakat iletkenler yerine yalıtkanları çevrelerler. Düzenleme halkaları korona boşalmasını bastırmaya çalışmalarına rağmen asıl amaçları yalıtkan boyunca potansiyel gradyanı azaltmak ve gerilim atlamasını önlemektir. Bu çalışmada yüksek gerilim ayırıcılarında izolatörlerin ve bağlantı parçalarının yüzeylerinde oluşan elektrik alan dağılımını kontrol etmek için düzenleme halkalı ve düzenleme halkasız olarak analizler yapılmıştır. Analizler yapılırken ANSYS programı kullanılmıştır. Çalışmada düzenleme halkası olan ve olmayan yüksek gerilim ayırıcı izolatörlerinin korona boşalmaları gözlemlenmiştir. Sonuç şunu göstermektedir: düzenleme halkası bulunan ayırıcının yalıtkan ve bağlantı yüzeylerinde meydana gelen elektriksel zorlanmalar azalmıştır. Düzenleme halkası kullanmanın korona boşalmasını önlemede ve çalışma güvenliğini arttırmada etkili olduğu görülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre düzenleme halkasının yüksekliğinin ve dış çapının artırılması yalıtkan ve bağlantı parçaları yüzeyindeki maksimum elektrik dayanımını arttırmaktadır [8].

2016 yılında, Tuncer Dönmez elektriksel kısmi boşalmayı etkileyen etkenlerin incelenmesi ve bu etkenlerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesini araştırmıştır. Bu çalışmada kısmi boşalma, kısmi boşalmayı etkileyen faktörler ve kısmi boşalma ölçümü incelenmiştir. Ayrıca, kısmi boşalmayı etkileyen etkenlerin belirlenebilmesi için çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler gerçekleştirilirken çubuk ve düzlem elektrotlar kullanılmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak modellemeler yapılmış, benzetim sonuçları yorumlanmıştır. Son olarak ise elde edilen analiz sonuçları, laboratuvar sonuçları ile karşılaştırılmıştır [9].

2017 yılında, Hilal Şen yıldırımdan kaynaklanan elektrik alan dağılımlarının sonlu elemanlar yöntemi ile analizini araştırmıştır. Yıldırımın enerji hatları için büyük bir tehdittir. Bir enerji hattına yıldırım düşmesi durumunda hat, aşırı yüklenir ve ciddi zararlar görebilir. Bu zararların önlenmesi için yıldırımların fiziksel boyut analizi, yıldırımın enerji hatlarına düşmesi durumunda meydana gelen geçici rejimlerin ve elektrik alan dağılımlarının analizi gibi çalışmalar yapılmaktadır. Hilal Şen, çalışmasında yıldırımları gerçeğe en yakın olacak şekilde modellemeyi hedeflemiştir. Bu doğrultuda sonlu elemanlar yönteminden yararlanmıştır. Yapılan çalışma

sonucunda elde edilen verilerle, yıldırımın izleyeceği yolun önceden belirlenebilmesi hedeflenmiştir [10].

1.2 Tezin Amacı

Günümüz mevzuat ve şartlarına göre elektrik malzemeleri belirli kuruluşlar tarafından hazırlanan standart ve şartnamelere göre üretilip kullanılmaktadırlar. Bu standart ve şartnamelerde belirtilen koşulların sağlanıp sağlanmadığı tip deneyleriyle belirlenmektedir. Tip deneyleri, tasarımın özelliklerinin doğrulanması amacıyla bir ya da birden fazla ürün üzerinde gerçekleştirilirler. Herhangi bir ürün için gerekli tip deneyleri ürünün tabi olduğu standartlarda belirtilir.

Uygulamada, bazı durumlarda nadiren de olsa tip deneylerinde belirtilen şartların dışında koşullar meydana gelebilmektedir. Bu gibi durumlar, bu tez çalışması bağlamında değerlendirildiğinde, yüksek gerilim ayırıcılarının karma gerilimlere maruz kalması ve bu gerilimler altında nasıl bir davranış sergileyecekleri sorusunu akıllara getirmektedir.

Bu tez çalışmasında, karma gerilimlerin yüksek gerilim ayırıcılarıyla ilişkisi, karma gerilimlerin yüksek gerilim ayırıcılarına olan etkileri ve bu etkilerden nasıl korunması gerektiği incelenmiştir. Karma gerilimlerin yüksek gerilim ayırıcılarında meydana getirdiği elektrik alan ve elektriksel potansiyel değerleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Ayırıcının üzerinde meydana gelen maksimum elektrik alan değeri elde edilmiştir. Karma gerilimlerin ayırıcıya etki etmesiyle birlikte ayırıcı üzerinde meydana gelen elektrik alan şiddetinin değişimi incelenmiştir.

1.3 Karma Gerilimler

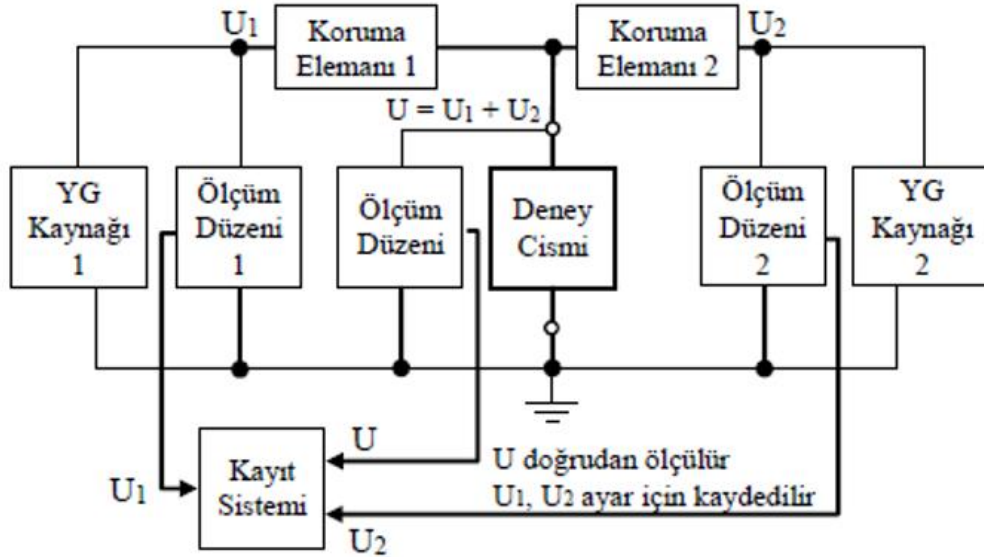
Laboratuvar şartlarında alternatif gerilimler, doğru gerilimler veya darbe gerilimleriyle deneneyen aygıtlar gerçek işletme şartlarında aynı anda birden fazla gerilime maruz kalabilmektedir. Özellikle enerji nakil hatlarına veya trafo merkezlerine yıldırım düşmesi gibi durumlarda, enerji sistemindeki anahtarlama olayları sırasında aygıtlar anma sistem gerilimi dışında bu durumlarda meydana gelen gerilimler tarafından da zorlanırlar. Bu tür olayların yaşanması halinde sistemdeki aygıtların yalıtım durumuyla ilgili herhangi bir problem oluşup oluşmayacağını önceden bilebilmek için

laboratuvar veya bilgisayar ortamında farklı tür gerilimler bir araya getirilmek suretiyle çeşitli analizler yapılmalıdır [4].

Bu tür farklı gerilimlerin bir araya gelmesiyle elde edilen yeni gerilim formuna karma gerilim denir. Karma gerilimler doğada kendiliğinden meydana gelebilirler. Bu duruma örnek olarak anma işletme gerilimi altındaki bir aygıtta veya iletim hattına yıldırım düşmesiyle birlikte oluşan yeni gerilim dalgası gösterilebilir.

Karma yüksek gerilim üretimi

Karma gerilimlerin elde edilebilmesi için farklı tür gerilim kaynaklarının birbirine uygun şekilde bağlanması veya deney numunesine bu farklı tür gerilimlerin aynı anda uygulanması gerekmektedir [11]. IEC 60060-1 standardına göre karma gerilim üreten bir devrenin blok şeması Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1: Karma gerilim üreten devre blok şeması [9].

Şekil 1.1’de gösterilen yapıda bir devre kullanılması durumunda iki farklı gerilim kaynağında üretilen gerilimler aynı anda aynı aygıtta uygulanacağı için bu iki kaynağın bir arada çalışırken birbirlerine nasıl etkileri olacağı önceden düşünülmelidir. Ayrıca, bu gerilim kaynaklarının uygun genlikte, zaman parametresinde ve dalga şeklinde gerilim üretilip üretmeyeceği de hesap edilmelidir.

Örnek olarak, herhangi bir AC gerilim dalgası üzerine herhangi bir darbe geriliminin bindirilmesi durumunda, darbe geriliminin AC gerilim dalgasının hangi anında oluştuğu (gerilimin tepesinde, gerilimin sıfır geçişinde veya bu ikisinin arasında

olabilir) ve bindirme işleminin nasıl kontrol edileceği de önemlidir. Ayrıca, bir arada kullanılan gerilim kaynaklarının birbirlerine aşırı akım veya aşırı gerilim etkilerinin önlenmesi gerekmektedir. Bu aşırı akım ve aşırı gerilim etkilerinin önlenmesi için devre benzetimi yapılarak kullanılması gereken koruma elemanları veya filtreler belirlenmelidir. Bundan dolayı, analiz çalışmalarına başlamadan önce ayırıcının üzerine düşecek gerilimlerin ve üzerinden geçecek akımların belirlenmesi için devre analizleri yapılmalıdır [4].

1.4 Yıldırım Darbe Gerilimi

Darbe gerilimleri, mevcut şebeke anma geriliminden çok daha yüksek seviyede oluşan, kısa süreli ani gerilim yükselmeleridir. Elektrik tesislerinde, bu tür gerilimler genellikle anahtarlama veya yıldırımdan kaynaklanmaktadır. Güç sisteminde kullanılan yüksek gerilim aygıtları, genellikle yıldırım darbeleri ve anahtarlama aşırı gerilimlerinden kaynaklanan çok hızlı ve geçici aşırı gerilimlere dayanacak şekilde tasarlanır.

Güç sisteminin yıldırım ve anahtarlama aşırı gerilimlerine karşı güvenilirliğini korumak için, güç sistemi ağına girmeden önce yüksek gerilim aygıtlarının elektriksel bozulma mukavemetini veya yalıtım kapasitesini denemek ve doğrulamak gerekmektedir. IEC 60060-1 ve IEEE 4-2013 gibi uluslararası standartlar, dielektrik seviyesini kontrol etmek için güç sistemi aygıtlarının yalıtım deneylerinde kullanılan yıldırım darbe gerilimlerini ve anahtarlama darbe gerilimlerini tanımlarlar. IEC 60060-1'e göre yıldırım darbe geriliminin anma cephe süresi 1,2 μ s anma sırt yarı değer süresi 50 μ s'dir [12].

1.5 Yüksek Gerilim Ayırıcıları

IEC 62271-1 standardında anahtarlama ve kontrol aygıtları şöyle tanımlanmaktadır: anahtarlama ve kontrol aygıtları ilgili sistemde kontrol, ölçme, koruma ve düzenleme gibi işlevlerin yerine getirilmesini sağlayan ekipmanlardır. Ayrıca, bu aygıtlar ara bağlantılara, aksesuarlara, muhafazalara ve destek yapılarına sahiptirler [13].

Bu aygıtların tipik bir örneği olan ayırıcılar IEC 62271-102 standardında ise şu şekilde tanımlanmıştır: ayırıcılar, istenen gereksinimlere göre bir yalıtım aralığı sağlayan mekanik aygıtlardır [14].

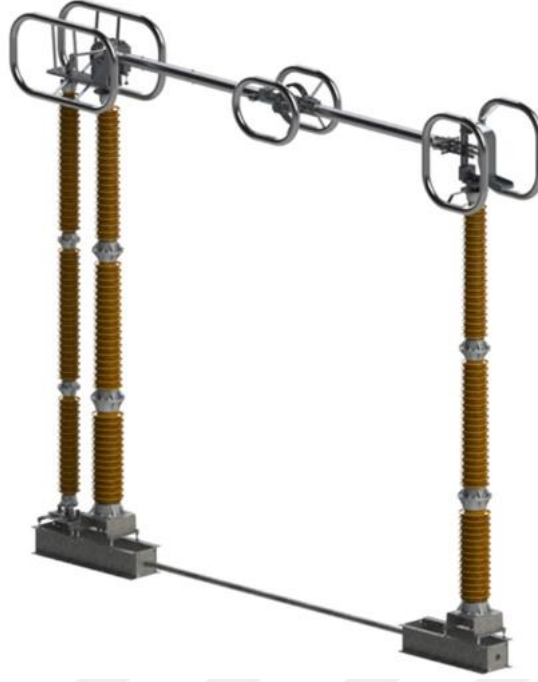
Bu tanımlamalardan yola çıkarak yüksek gerilim ayırıcılarının, yüksek gerilim sistemlerinde devre yüksüz iken açma kapama işlemi yapabilen ve açık konumda gözle görülebilen bir ayırma aralığı sağlayan şalt aygıtları olduğu söylenebilir. Ayırıcılar, herhangi bir sistemde ilgili bölümlerin birbirinden ayrılarak gerekli bakım ve kontrol işlerinin güvenli bir şekilde yapılmasını sağlarlar. Ayrıca, birden fazla ana bara bulunan sistemlerin açma ve kapama işlemlerinin yapılabilmesi için zorunludur [15].

Yüksek gerilim ayırıcıları yapılarına göre pantograf ayırıcılar, yarı pantograf ayırıcılar, dikey açmalı ayırıcılar, ortadan açmalı ayırıcılar gibi çeşitli sınıflara ayrılmışlardır. Aşağıdaki şekillerde sırasıyla; Şekil 1.2’de pantograf ayırıcı, Şekil 1.3’te yarı pantograf ayırıcı, Şekil 1.4’te dikey açmalı ayırıcı gösterilmektedir.



Şekil 1.2: Pantograf ayırıcı.

Şekil 1.2’de görüldüğü gibi pantograf ayırıcılar, dikey ekseninde çalışırlar. Bu tür ayırıcıların ayırıcıların iki kutbu bulunmaktadır. Bu kutuplardan biri sabit diğeri ise hareketli kontaklardan meydana gelir. Askı kontak, sahada ilgili baraya monte edilir.



Şekil 1.3: Yarı pantograf ayırıcı.

Yarı pantograf ayırıcılar yatay ekseninde çalışırlar. Biri sabit kontak grubu, diğeri hareketli kontak grubu olmak üzere iki kutuptan oluşurlar.

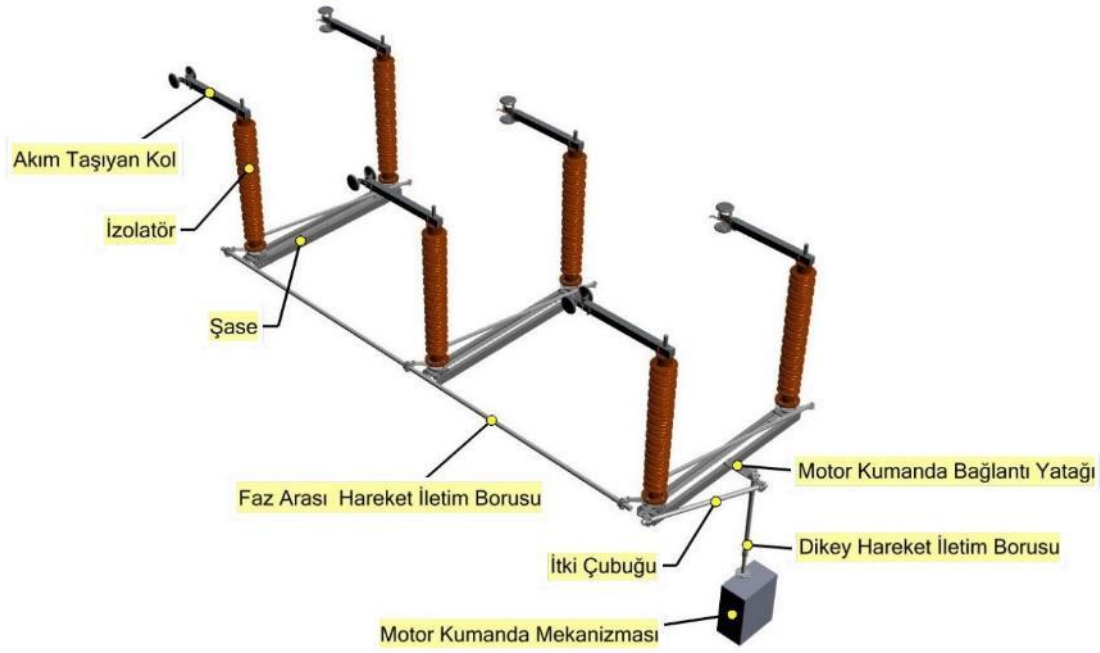


Şekil 1.4: Dikey açmalı ayırıcı.

Dikey açmalı ayırıcılar, adından da anlaşılacağı üzere dikey ekseninde çalışırlar. Sabit ve hareketli konktalardan oluşan iki kutba sahiptirler.

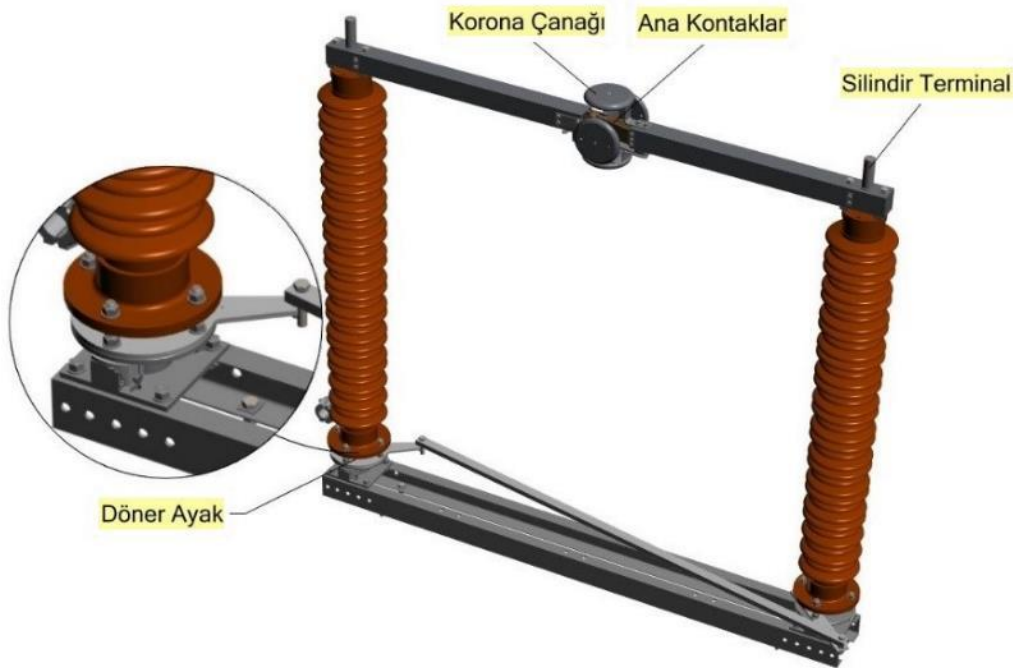
Bu tez çalışmasında örnek olarak ortadan açmalı bir ayırıcı modeli kullanılmıştır. Ortadan açmalı ayırıcılar her iki kutbun her iki kontağının da hareketli olduğu ve bu

kontakların destek izolatörlerinin orta noktasında birleştiği ayırıcı modelidir [14]. Şekil 1.5'te kumanda mekanizması A fazında bulunan üç fazlı ortadan açmalı yüksek gerilim ayırıcı örneği görülmektedir.



Şekil 1.5: Üç fazlı ortadan açmalı ayırıcı.

Şekil 1.6'da ortadan açmalı ayırıcının bir fazı yakından incelenmiş ve bazı bileşenleri şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.6: Ortadan açmalı ayırıcının bir fazının görünümü.

Ortadan açmalı ayırıcılar dört ana bölümden oluşmaktadır.

1. Akım taşıyan kollar ve kontaklar

Akım taşıyan kollar yüksek iletkenliğe ve mekanik dayanıma sahip alüminyum alaşımdan imal edilir. Kontaklar elektrolitik bakırdan imal edilip gümüş kaplanır.

2. İzolatörler

İzolatörler, elektrik yüklerinin serbest olarak akmasını engelleyen yalıtkan maddelerdir. Bundan dolayı elektrik alanın etkisi altındayken elektrik akımını iletmeleri çok zordur. Modelimizde kullanılan izolatörler, yüksek mekanik dayanımlı porselen malzemeden imal edilip sırlanırlar.

3. Şase ve döner ayaklar

Şase ve döner ayaklar çelikten imal edilirler. Profil kesitleri ve döner ayak parçaları, ayırıcıya gelecek statik ve dinamik yüklere göre boyutlandırılır. Tüm çelik parçalar korozyona karşı sıcak daldırma galvaniz ile kaplanır.

4. Kumanda mekanizması ve hareket iletim elemanları

Kumanda mekanizmalarının tipleri (motor kumanda ya da el kumanda olması) ve ek donanımlara ihtiyaca göre değişkenlik gösterir. İlgili şartnamelerde belirtilen besleme ve kontrol gerilimlerine göre kumanda mekanizmaları üretilebilir. Hareket iletim elemanları ve kumanda mekanizmaları yüksek kaliteli alaşım malzemelerden imal edilirler. İtme, çekme ve döndürme hareketlerinin iletiminde kullanılan mil vb. parçalar çalıştıracakları yüke uygun olarak boyutlandırılırlar.



2. ELEKTRİK ALAN

Elektrik alan, bir elektrik yükünün başka bir elektrik yükü üzerinde oluşturduğu itme veya çekme etkisine denir. Elektrik alanın belirli bir noktadaki büyüklüğü belirli bir noktaya koyulacak 1 Coulomb'luk deney yüküne ne kadar kuvvet uygulayacağıyla belirlenir. Elektrik alanın yönü, yüke uygulanan kuvvetin yönüyle aynıdır [16].

Yüksek gerilim uygulamalarında elektrik alan bilgisi gerekli ve önemlidir. Elektrik alan analizi, yüksek gerilim uygulamalarının geliştirilmesi, tasarımı ve analizinin yanı sıra çeşitli elektriksel boşalma olaylarının incelenmesinde de önemli bir rol oynar [17].

2.1 Coulomb Yasası

Coulomb yasası elektrostatikğin temelini oluşturur. Coulomb yasasına göre boşlukta karşı karşıya duran q_1 ve q_2 elektriksel yüklerinin arasında r kadar uzaklık varsa bunlar birbirine F kadar bir kuvvet uygular. F kuvvetinin değeri aşağıdaki (2.1) denklemi ile bulunur. F kuvvetinin birimi Newton, uzunluk birimi metre olarak alınırsa, elektrik yüklerinin birimi Coulomb (kulon) olur.

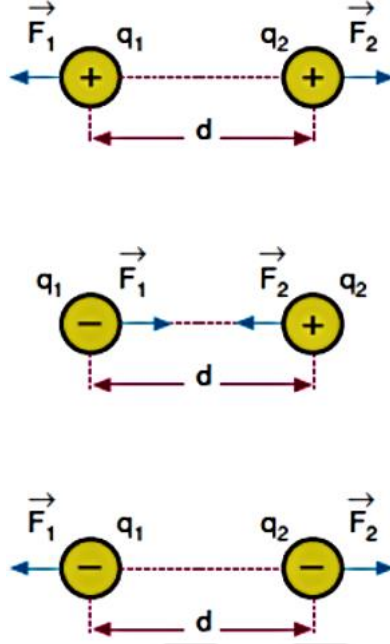
$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad (2.1)$$

Kuvvet, vektörel bir büyüklüktür. Coulomb yasasının vektörel notasyonla yazılmış biçimi denklem (2.2)'de verilmiştir.

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} e_{12} \quad (2.2)$$

$$F_{21} = -F_{12} \quad (2.3)$$

F_{12} ile q_1 yükünün, q_2 yüküne uyguladığı kuvvet gösterilmektedir. Dolayısıyla q_2 yükünün, q_1 yüküne uyguladığı kuvvet denklem (2.3)'te yazıldığı gibi aynı şiddette fakat ters yönlüdür. Şekil 2.1'de aynı işaretli yüklerin ve ters işaretli yüklerinin birbirine uyguladığı kuvvetler gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Elektrik yüklerinin birbirlerine karşı etkileri.

Denklem (2.2)'de verilen e_{12} ise q_1 yükünden q_2 yüküne giden birim vektördür. ϵ_0 'ın değeri denlem (2.4)'de verilmiştir.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} \quad (2.4)$$

Ayrıca, Coulomb yasasına göre ikiden fazla sayıdaki (i tane) yükün birbirini etkilemesi durumunda F kuvvetinin denklemi (2.5)'deki gibidir.

$$F = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{r_i^2} e_i \quad (2.5)$$

Milikan tarafından yapılan deneylere göre elektrik yükü istenildiği kadar küçük düşünülemez ve gözlemlenebilen en düşük elektrik yükü $1,602 \cdot 10^{-19}$ kulondur. Her elektrik yükü bu değerin mutlaka tam katıdır. Ayrıca, bir V hacmi içerisinde elektrik yükü taşıyan maddeler çok yoğunsa elektrik yüklerinin hacim içerisinde sürekli olarak dağıldığı kabul edilir. Bu durumda F kuvvetini veren denklem (2.6)'daki gibi olur.

$$F = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int_V \rho \frac{r'}{r^3} dV, (r'=r'e) \quad (2.6)$$

Bu denklemde ρdV ile dV hacmi içerisindeki yük miktarı gösterilmektedir [18].

2.2 Elektrostatik Alan ve Alan Çizgileri

(2.2), (2.4) ve (2.5) denklemleri dikkate alınarak bir q yüküne etki eden kuvvetin denklemi (2.7)'de verilmiştir.

$$F(x, y, z) = qE(x, y, z) \quad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de kuvvet ifadesinin yerine denklem (2.6)'da verilen ifade yazılırsa denklem (2.8) elde edilir.

$$E(x, y, z) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \int \rho(\xi, \eta, \zeta) \frac{r'}{r'^3} d\xi d\eta d\zeta \quad (2.8)$$

q elektriksel yükünün değeri 1 Coulomb olduğunda, $E(x, y, z)$ vektörü birim yüke etkiyen kuvvettir. Bu denklem, uzayın her bir noktasında bir E vektörü tanımlar. Bu özelliği ifade etmek için, E vektörü bütün uzayda tanımlı bir vektörel alan olarak ifade edilir. Hareketsiz elektrik yükleri tarafından yaratılan bu alana elektrostatik alan (statik elektrik alan) denir [2].

Bir $E(x, y, z)$ elektrostatik alanına karşılık öyle bir eğri ailesi bulunabilir ki; bu aileye ait eğrilerin teğetleri değme noktalarında elektrostatik alan vektörlerine paraleldir. Bu eğri ailesine elektrostatik alan çizgileri veya kuvvet çizgileri denir [18].

Orijindeki noktasal bir q yükünün r konumlu bir noktadaki elektrik alanı denklem (2.9)'da verilmiştir.

$$\vec{E}(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r}' \quad (2.9)$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere elektrik alan $1/r^2$ ile doğru orantılı olarak azalır. Bunun anlamı orijinden uzaklaştıkça elektrik alan vektörlerinin giderek küçüleceğidir. Bu vektörlerin birleşiminden elektrik alan çizgileri elde edilir. Elektrik alan şiddeti bu çizgilerin ne kadar sık olduğuyla alakalıdır. Çizgiler sıklaştıkça elektrik alan şiddeti artıyor demektir. Bu yüzden, elektrik yüküne yakın noktalarda elektrik alan çizgileri daha sıktır. Elektrik alan çizgileri birbirlerini hiçbir zaman kesmezler. Ayrıca, elektrik alan çizgilerinin yönü pozitiften negatife doğrudur [19].

2.3 Elektrik Akısı ve Gauss Yasası

Elektrik akısı, elektrik alana dik bir düzlemde bulunan kapalı bir S yüzeyinden elektrik alan çizgilerinin sayısı ile doğru orantılıdır. Elektrik akısını ifade eden denklem (2.10)'da verilmiştir.

$$\phi_E = \int_S E \cdot da \quad (2.10)$$

Denklem (2.10)'dan anlaşılacağı üzere da kadar sonsuz küçük bir alandan geçecek olan elektrik alan çizgilerinin sayısı, elektrik alan şiddetiyle doğru orantılıdır. Denklem (2.10)'u baz alarak noktasal bir yükün meydana getirdiği elektrik alanın r yarıçapındaki bir küreden geçen elektrik akısı denklem (2.11)'deki gibi yazılabilir.

$$\oint E \cdot da = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{r^2} \vec{r} \right) \left(r^2 \sin \theta d\theta d\phi \vec{r} \right) = \frac{1}{\epsilon_0} q \quad (2.11)$$

Denklem (2.11) incelendiğinde elektrik akısının değerinin küre çapından bağımsız olduğu görülmektedir. Buradan şu sonuç çıkarılabilir: alınan kapalı yüzeyin geometrisi, yüzey içerisinden geçen elektrik alan çizgisi sayısını etkilemez. Yüku kapsayan herhangi bir yüzeyden geçen elektrik akısı q/ϵ_0 kadardır. Birden fazla yük olması durumunda, süperpozisyon (toplama) ilkesi uygulanır ve elektrik alan ifadesi denklem (2.12)'deki gibi olur.

$$E = \sum_{i=1}^n E_i \quad (2.12)$$

Bu durumdaki akı denklemi ise denklem (2.13)'teki gibi olur.

$$\oint E \cdot da = \sum_{i=1}^n \left(\oint E_i \cdot da \right) \quad (2.13)$$

$$\phi = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\epsilon_0} q_i \right) \quad (2.14)$$

$$\phi = \frac{1}{\epsilon_0} Q_{iç} \quad (2.15)$$

(2.13) denklemi adım adım çözülürse sırasıyla denklem (2.14) ve denklem (2.15) elde edilir. Denklem (2.15)'deki $Q_{iç}$ ifadesi kapalı bir yüzey içerisinde bulunan toplam yükü ifade etmektedir. Aynı zamanda, denklem (2.15) Gauss yasasının integral olarak ifadesidir. Denklem (2.15)'e diverjans teoremi uygulandığında denklem (2.16) elde edilir.

$$\oint_S E \cdot da = \int_V (\nabla \cdot E) \cdot d\tau \quad (2.16)$$

Denklem (2.16) Gauss yasasının diferansiyel halidir. Kapalı bir yüzey içerisinde bulunan yükler, yük yoğunluğu cinsinden yazılırsa denklem (2.17) elde edilir.

$$Q_{iç} = \int_V \rho d\tau \quad (2.17)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak Gauss yasası denklem (2.18)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\int_V (\nabla \cdot E) \cdot d\tau = \int_V \left(\frac{\rho}{\epsilon_0} \right) \cdot d\tau \quad (2.18)$$

Denklem (2.18) her hacim için geçerli olduğundan, integrallerin içerisinde yer alan ifadeler birbirine eşittir. Bu eşitlik denklem (2.19)'daki gibidir.

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{\epsilon_0} \rho \quad (2.19)$$

Denklem (2.19) D deplasman vektörü olmak koşuluyla denklem (2.20)'deki gibi yazılabilir.

$$\nabla \cdot E \cdot \epsilon_0 = \rho \Rightarrow E \cdot \epsilon_0 = D \quad (2.20)$$

Bu durumda denklem (2.21) yazılabilir.

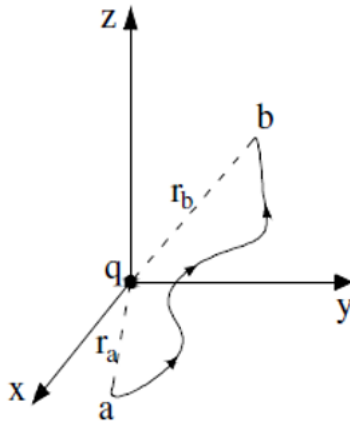
$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (2.21)$$

Düzlemsel, silindirik veya küresel geometrilerin olduğu durumlarda Gauss denklemi elektrik alan değerinin hesaplanabilmesi için pratik bir çözüm yöntemidir. Ayrıca,

bütün yük düzlemi geometrik olarak bir simetriye sahip olmasa dahi, yük düzlemi simetrik parçalara ayrılarak Gauss denklemi ile çözüm sağlanabilir [2].

2.4 Elektrik Alanın Rotasyoneli

Elektrik alanın rotasyoneli, küresel koordinatlarda referans alınan noktada bulunan herhangi bir noktasal yükün oluşturduğu elektrik alanının a ve b gibi iki nokta ile sınırlandırılmış çizgi üzerinde integralinin alınması ile açıklanacaktır [2].



Şekil 2.2: Noktasal yükün konumu ve integralin alınacağı yol.

Şekil 2.2’de gösterilen a-b yolu üzerinde (2.9) denkleminin çizgisel integrali denklem (2.22)’de verilmiştir.

$$\int_a^b E \cdot dl \quad (2.22)$$

Küresel koordinatlarda $dl = dr \cdot \vec{r} + r d\theta \cdot \vec{\theta} + r \sin \theta d\phi \cdot \vec{\phi}$ olmak üzere denklem (2.22), denklem (2.23)’teki gibi yazılabilir.

$$\int_a^b E \cdot dl = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_a^b \frac{q}{r^2} \cdot dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{q}{r_a} - \frac{q}{r_b} \right) \quad (2.23)$$

Küresel koordinatlarda $r_a - r_b = 0$ olduğundan dolayı, kapalı bir yol boyunca integralin sonucu sıfır olacaktır.

$$\oint E \cdot dl = 0 \quad (2.24)$$

Denklem (2.24)'e Stokes Teoremi uygulandığında $\nabla \times E = 0$ olur. Bir başka ifade ile $\vec{rot E} = 0$ 'dır. Birden fazla yük bulunması halinde her bir yükün meydana getirdiği elektrik alan denklem (2.25)'de ifade edildiği gibi toplanmalıdır.

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots \quad (2.25)$$

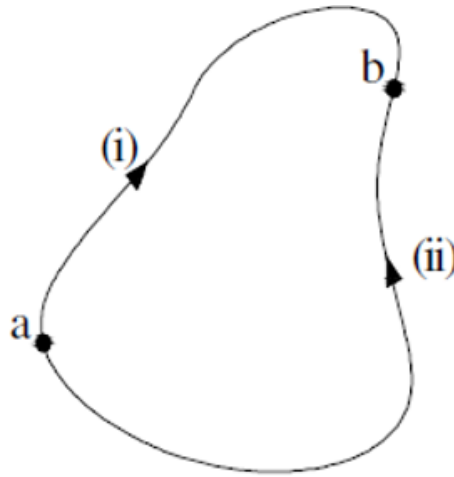
Bu durumda yukarıdaki denklemler düzenlenerek, (2.26) ve (2.27)'deki gibi sonuçlar elde edilir.

$$\nabla \times E = \nabla \times (E_1 + E_2 + E_3 + \dots) \quad (2.26)$$

$$\nabla \times E = \nabla \times E_1 + \nabla \times E_2 + \nabla \times E_3 + \dots \quad (2.27)$$

2.5 Elektrostatik Potansiyel

Elektrik alan vektörü herhangi bir vektör değildir, elektrik alan vektörünün rotasyoneli daima sıfırdır. Elektrik alanın bu özelliği kullanılarak, elektrik alan hesaplamaları basite indirgenerek skaler bir fonksiyon elde edilebilir. Elde edilen skaler fonksiyon elektrik potansiyeli (V) olarak adlandırılır [19].



Şekil 2.3: İntegralin alınacağı kapalı yol.

Bir F vektör alanının rotasyoneli sıfıra eşit ise, F bir skaler potansiyelin (V) gradyanı olarak yazılabilir. Şekil 2.3'teki a ve b noktaları arasında denklem (2.24) uygulandığında sonuç sıfır olacaktır. Alınan bu integral yoldan bağımsız olduğundan denklem (2.28)'deki gibi bir fonksiyon tanımlanabilir [2].

$$V(r) = - \int_{\varphi}^r E \cdot dl \quad (2.28)$$

Burada, φ referans noktasıdır. Bu durumda, V yalnızca r noktasına bağlı olur ve iki nokta arasındaki potansiyel fark denklem (2.29)'daki gibi olur.

$$V(b) - V(a) = - \int_{\varphi}^b E \cdot dl + \int_{\varphi}^a E \cdot dl \quad (2.29)$$

Denklem (2.28) sadeleştirilirse sırasıyla denklem (2.30) ve denklem (2.31) elde edilir.

$$V(b) - V(a) = - \int_{\varphi}^b E \cdot dl - \int_a^{\varphi} E \cdot dl \quad (2.30)$$

$$V(b) - V(a) = - \int_a^b E \cdot dl \quad (2.31)$$

Denklem (2.31)'e, elektrik alanın gradyanı ile ilgili teorem uygulandığında denklem (2.32) elde edilir.

$$V(b) - V(a) = - \int_a^b (\nabla V) \cdot dl \quad (2.32)$$

Denklem (2.32) her a ve b noktası için geçerlidir. Bundan dolayı, genel ifade denklem (2.33)'teki gibidir.

$$E = -\nabla V \quad (2.33)$$

Elektrostatik potansiyel, referans noktasına bağlı bir fonksiyondur. Referans noktasının değişmesi durumunda elektrostatik potansiyel ifadesine bir K sabiti eklenmelidir. Elektrik yükünün eski ve yeni referans noktaları arasında oluşturduğu potansiyel fark ifadeye eklenmelidir. Bu durumda, denklem (2.34) ve denklem (2.35) yazılabilir.

$$V'(r) = - \int_{\varphi_{YENI}}^r E \cdot dl \quad (2.34)$$

$$V'(r) = - \int_{\phi_{YENI}}^{\phi_{ESKI}} E \cdot dl - \int_{\phi_{ESKI}}^r E \cdot dl \quad (2.35)$$

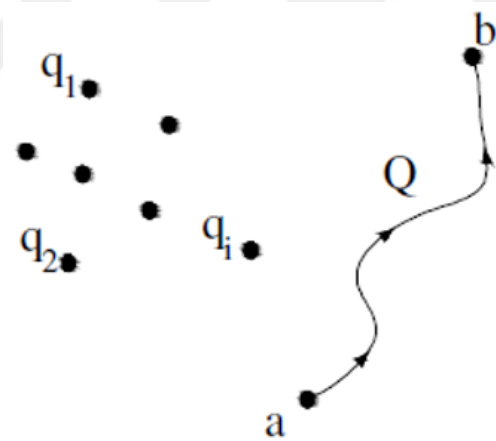
Denklem (2.35), bir K sabitine bağılı olarak yazıldığında denklem (2.36) elde edilir.

$$V'(r) = K + V(r) \quad (2.36)$$

Referans noktası değiştiğinde, elektrik yüklerinin potansiyeline K sabitinin eklenmesiyle yüklerin potansiyel farkları etkilenmeyecektir. Bunun nedeni, aynı referans noktasına göre hesaplanan potansiyellerin farklarının alınmasıdır [2].

2.6 Statik Elektrikte İş ve Enerji

Kaynak yüklerinin durağan olduğu bir uzayda, Şekil 2.4'te verilen Q deneme yükünü a noktasından b noktasına getirmek için yapılması gereken iş W durgun elektrikte iş olarak tanımlanır.



Şekil 2.4: Q deneme yükünün hareket ettirileceği yol ve durgun elektrik yükleri.

A noktasından b noktasına giden yol üzerinde herhangi bir noktada Q yüküne etkiyen kuvvet, denklem (2.7) baz alınarak yazıldığında denklem (2.37) elde edilir.

$$F = Q \cdot E \quad (2.37)$$

Yükler tarafından uygulanan bu kuvvete karşı konulabilmesi amacı ile uygulanması gereken kuvvet denklem (2.38)'de ve bunun sonucunda yapılan iş denklem (2.39)'da verilmiştir.

$$F = -Q.E \quad (2.38)$$

$$W = \int_a^b F.dl \quad (2.39)$$

Denklem (2.39)'daki F yerine, denklem (2.38)'de verilen ifade konulursa eşitliğin denklem (2.32) ile Q deneme yükünün çarpımına eşit olduğu görülür. Bu durumu gösteren durum denklem (2.40)'da verilmiştir.

$$W = Q[V(b) - V(a)] \quad (2.40)$$

Denklem (2.40)'dan anlaşılacağı üzere yapılan iş, yükün değerine (Q) ve potansiyel farka (V(b) – V(a)) bağlıdır. Bu durumda bir genelleme yapacak olursak; herhangi bir Q deneme yükünü sonsuzdan, r noktasına taşımak için yapılması gereken iş denklem (2.41)'deki gibi olur.

$$W = Q[V(r)] \quad (2.41)$$

(2.40) ve (2.41)'de verilen denklemler tek bir noktasal yük içindi, noktasal yüklerin sayısının birden fazla olması durumunda yapılması gereken iş denklem (2.42)'de verilmiştir.

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j>1}}^n \frac{q_i q_j}{r_{ij}} \quad (2.42)$$

Denklem (2.42)'nin bir başka türlü ifade edilişi de denklem (2.43)'teki gibidir.

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \left(\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_j}{r_{ij}} \right) \quad (2.43)$$

Denklem (2.43)'te parantez içindeki ifade r_i (q_i 'nin konumu) noktasında, diğer tüm yüklerin potansiyelidir. O halde denklem (2.44) yazılabilir.

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i V(r_i) \quad (2.44)$$

Belirli bir hacimde ρ yoğunluklu yük bulunması durumunda denklem (2.45)'deki gibi yazılabilir.

$$W = \frac{1}{2} \int \rho V d\tau \quad (2.45)$$

Gauss yasası kullanılarak denklem (2.45) elektrik alan ve potansiyel cinsinden yazıldığında denklem (2.46) elde edilir.

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \left(\int_v E^2 d\tau + \oint_s V E da \right) \quad (2.46)$$

Denklem (2.46)'da görüldüğü üzere hacim arttıkça E^2 'li integral giderek büyür, bu durumda toplamın sabit kalması için VE 'li integralin azalması gerekir. Yüzey elemanı r^2 olarak artarken, E alanı $1/r^2$ oranında ve V potansiyeli $1/r$ oranında azalır. O halde, yüzey integralinin yaklaşık $1/r$ oranında azalacağını söylenebilir. Denklem (2.46) tüm uzay için uygulandığında, yüzey integrali sıfır olur ve denklem (2.47) elde edilir [2,18].

$$W = \frac{\epsilon_0}{2} \int_{TUM\ UZAY} E^2 d\tau \quad (2.46)$$

2.7 Laplace ve Poisson Denklemleri

Statik elektrik alan hesabının asıl hedefi, herhangi bir durgun yük dağılımının elektrik alanının bulunmasıdır. Denklem (2.8) ile istenen hesaplama yapılabilir. Fakat, daha karmaşık sistemlerde denklem (2.8)'de verilen integralin hesaplanması zordur. Bundan dolayı, denklem (2.8)'deki ifade skaler bir büyüklük olan potansiyel ifadesine bağlı şekilde yazılabilir. Denklem (2.20), denklem (2.33) kullanılarak V potansiyeli cinsinden yazılırsa sırasıyla denklem (2.47), (2.48) ve (2.49) elde edilir [2].

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.47)$$

$$\nabla \cdot (-\nabla V) = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.48)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.49)$$

Denklem (2.49) Poisson denklemi olarak adlandırılır. Ortamda yük bulunmaması durumunda denklem (2.50)'deki gibi yazılabilir.

$$\nabla^2 V = 0 \quad (2.50)$$

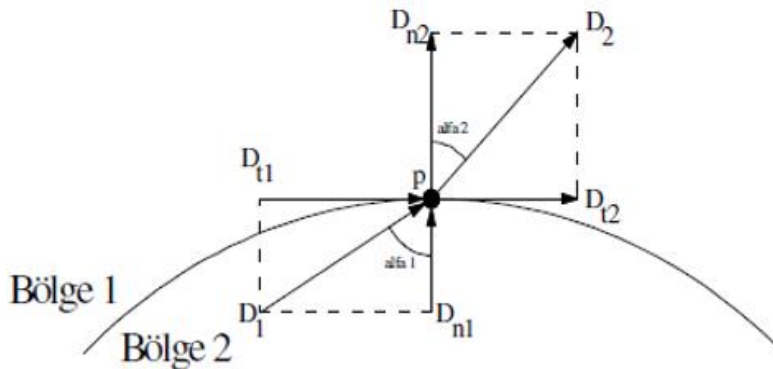
Denklem (2.50) Laplace denklemi olarak adlandırılır. Laplace denkleminin bir diğer gösterimi Δ Laplace operatörü olmak üzere $\Delta V = 0$ 'dır. Koordinat sistemlerine göre Laplace denklemleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Koordinat sistemlerine göre Laplace denklemleri.

Koordinat Sistemi	Laplace Denklemi
Bir Boyutlu	$\frac{d^2 V}{d\xi} = 0$
İki Boyutlu	$\frac{d^2 V}{d\xi} + \frac{d^2 V}{d\psi} = 0$
Üç Boyutlu	$\frac{d^2 V}{d\xi} + \frac{d^2 V}{d\psi} + \frac{d^2 V}{d\zeta} = 0$

2.8 Sınır Koşulları

Dielektrik katsayıları farklı olan izotrop, homojen iki yalıtkan ortamı ayıran sınır yüzeyde $\vec{E}$ ve $\vec{D}$ alan çizgileri kırılırlar. Kırılma olayı, kırılma araçları ile dielektrik katsayıları arasındaki bağıntı ile tanımlanır [2].



Şekil 2.5: Elektrik alan çizgilerinin farklı bir ortama geçerken durumu.

Şekil 2.5'te görülen P noktası bağıl dielektrik sabiti ϵ_1 olan Bölge 1 ve bağıl dielektrik sabiti ϵ_2 olan Bölge 2'nin sınırı üzerinde bulunmaktadır. P noktasındaki elektrik alana ilişkin eşitliğin elde edilmesi için, Şekil 2.5'te gösterildiği üzere sonsuz küçük, boyutları dl ve dh olan kapalı dikdörtgen üzerinde denklem (2.24) uygulanırsa denklem (2.51) elde edilir.

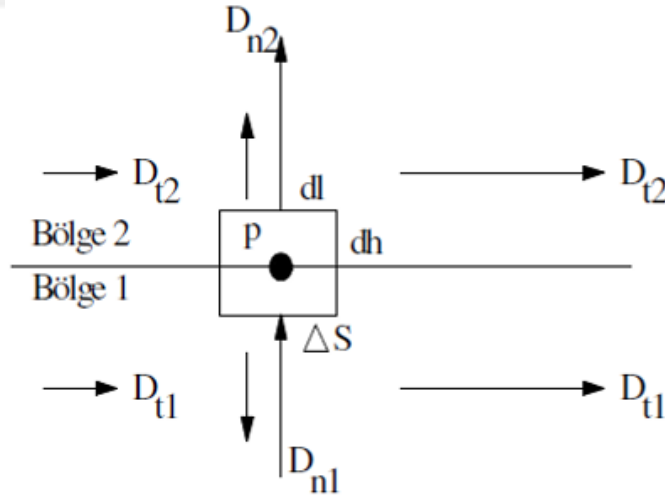
$$E_{t2}\Delta l - E_{n2}\frac{dh}{2} - E_{n1}\frac{dh}{2} - E_{t1}\Delta l + E_{n1}\frac{dh}{2} + E_{n2}\frac{dh}{2} = 0 \quad (2.51)$$

Denklem (2.51)'de gerekli sadeleştirme işlemleri yapıldığında denklem (2.52) elde edilir.

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (2.52)$$

Denklem (2.20) baz alınacak olursa, denklem (2.52), denklem (2.53)'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{D_{t1}}{D_{t2}} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \quad (2.52)$$



Şekil 2.6: Sonsuz küçük ΔS dikdörtgeni ve deplasman bileşenleri.

Şekil 2.6'da sonsuz küçük ΔS dikdörtgeni ve deplasman alan bileşenleri gösterilmiştir. Sınır yüzeyinde serbest yüklerin olmadığı göz önüne alınırsa denklem (2.53) ve denklem (2.54) yazılabilir.

$$D_{n1} = D_{n2} \quad (2.53)$$

$$\frac{E_{n1}}{E_{n2}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (2.54)$$

Laplace denklem takımının V potansiyel değerini belirleyebilmesi için uygun bir takım sınır koşullarının verilmesi gerekmektedir. Bir boyutlu Laplace denklemi göz önüne alındığında bu diferansiyel denklemin genel çözümü, örneğin kartezyen koordinatlarda denklem (2.55)'deki gibi olur.

$$V = mx + b \quad (2.55)$$

Genel çözüm, m ve b gibi iki keyfi sabit içermektedir. Bu nedenle, iki sınır koşuluna ihtiyaç duyar. Sınır koşulu olarak verilen değerlerin çözüm için yeterli olup olmadığının ispatı genellikle bir tek çözüm teoremi şeklinde sunulur. Durgun elektrikte sıklıkla kullanılan tek çözüm teoremi; sınır yüzeyi S üzerinde, V verilirse Laplace denkleminin bir v hacmi içindeki çözümü tek olarak belirlenir. Bu teorem, Laplace teoremi ile sonuca çözüme ulaşılabilmesi için hesaplamaya alınacak bölgenin her noktasındaki yük yoğunluğunu ve tüm sınırlar üzerindeki potansiyelin belirli olması gerektiğini açıklamaktadır [2].

3. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), fiziğin ve mühendisliğin hemen hemen her alanında kullanılabilen, gerçeğe yakın çözümleri en az hatayla bulmamıza yardımcı olan, işlevsel bir yöntemdir. SEY, karmaşık ve zorlu görünen problemlerin küçük parçalara ayrılarak kontrol edilebilir düzeye indirilebilmesini sağlar. SEY'in temelinde çözüme ulaştırılmak istenen geometrik bir cismin çok sayıda, küçük, basit ve birbirine bağlı sonlu elemana ayrılarak incelenmesi vardır. Fakat burada şöyle bir problem meydana çıkmaktadır: sonlu elemanlar yönteminde geometrik cisimler daha basite indirgenerek incelendiğinden dolayı elde edilen sonuçlar gerçek değerler değil yaklaşık değerler olabilmektedir. Bu durumun ilk bakışta sorun teşkil edeceği düşünülse de aslında doğru sonuçların elde edilmesi tasarımcıya bağlıdır. Şayet tasarımcı problem ayrıklaştırılmasını ve tanımlamasını detaylı yaparsa sonuç olarak gerçek değerleri de elde edebilir [20].

3.1 Sonlu Elemanlar Yönteminin Tarihçesi

Sonlu elemanlar yönteminin temelleri 1950'li yıllarda atılmıştır. SEY'in temelini oluşturan deneme fonksiyonları ile diferansiyel denklemlerin çözülmesi ise haliyle daha eski yıllardan itibaren kullanılmaktadır. Lord Rayleigh ve Ritz diferansiyel denklemlerin yaklaşık olarak çözümlerini elde edebilmek adına deneme fonksiyonlarını kullanmışlardır. Bu tür eski yöntemler, günümüzde kullanılan SEY ile karşılaştırıldığında ortaya önemli bir eksiklik çıkmaktadır. Bu eksiklik deneme fonksiyonlarının çözülmek istenen problemin belirli bir alanına uygulanamamasıdır. Deneme fonksiyonlarıyla çözüm yapılmak istenirse problemin tüm alanına uygulanmak zorundadır. 1940'lı yıllarda Courant'ın alt alanlarda parçalı sürekli fonksiyon kavramını oluşturmaya kadar, Galerkin yöntemi SEY için bir temel oluşturmaktaydı. Courant'ın bu kavramı ortaya atması SEY'in asıl başlangıcı olarak kabul edilebilir. Sonlu eleman bir terim olarak ilk kez 1960 yılında Clough tarafından bir uçak zorlanma analizi çalışmasında kullanılmıştır.

1960 ve 1970’li yıllarda SEY yeryüzü levha ve kabuklarının bükülmesinin analizinde, basınç kaplarının analizinde, üç boyutlu yapıların analizinde kullanılmaya başlanmıştır [21].

SEY’in elektrik mühendisliğinde ilk defa kullanımı da yine 1960’lı yıllara denk gelmektedir. Bu alanda önemli sayılabilecek ilk uygulama Winslow tarafından gerçekleştirilmiştir ve bu çalışmada üçgen sonlu farklar adı altında ivmelendirme mıknaatıları incelenmiştir. Helmholtz denkleminin SEY ile analizi Alta Frekuensi Konferansı’nda P. Silvester tarafından sunulmuştur. Elektrik makineleri için iki boyutlu doğrusal olmayan teknikler ilk olarak 1970’li yıllarda çalışılmıştır [22].

Günümüzde elektromanyetik ve elektrostatik problemlerin çözümünde SEY aktif olarak kullanılmaktadır. SEY o kadar önemli bir hal almıştır ki IEC tarafından Elektrik Kabloları – Akım Değerlerinin Hesaplanması – Sonlu Elemanlar Yöntemi adıyla bir standart yayımlanmıştır [23].

3.2 Sonlu Elemanlar Yönteminin Temel Adımları

Sonlu elemanlar yöntemi uygulanırken aşağıdaki adımlar sırasıyla takip edilmelidir.

1. Problem geometrisi belirlenmelidir,
2. Analizi yapılacak olan cisim kapalı bir hacim ile sınırlandırılmalıdır,
3. Sınır koşulları hem cisim için ve hem de kapalı hacim için oluşturulmalıdır,
4. Çözüm bölgesi sonlu elemanlara ayrılmalıdır (ayrıklaştırılmalıdır),
5. Her bir sonlu eleman için temel denklemler yazılmalıdır,
6. Çözüm bölgesindeki sonlu elemanlar birleştirilmelidir,
7. Sonlu elemanların birleştirilmesinin ardından elde edilen lineer cebirsel denklem takımı çözülmelidir,
8. Sonuçlar elde edilmeli ve gösterilmelidir [24].

3.2.1 Sınır koşullarının belirlenmesi

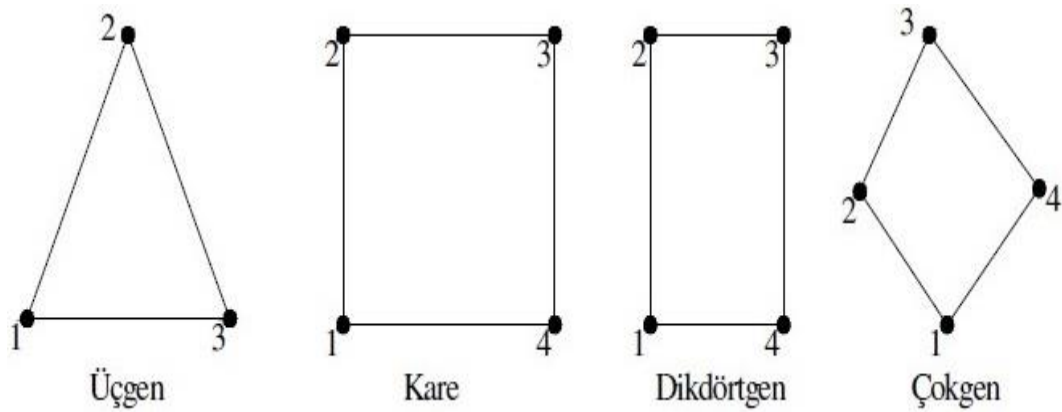
Sınır koşulları, bölgenin sınırlarında verilen değerlere denir. Üç farklı tipte sınır koşulu bulunmaktadır. Bunlar:

- Birinci Tür: Dirichlet türü sınır koşulu: Sınırlarda fonksiyonun değerinin belli olma koşuludur.
- İkinci Tür: Neuman türü sını koşulu: Sınırlarda fonksiyonun türevinin tanımlı ve belli olma koşuludur.
- Üçüncü Tür: Robbins türü sınır koşulu: Sınırlarda fonksiyonun kendisinin ve türevinin belli olma koşuludur [24].

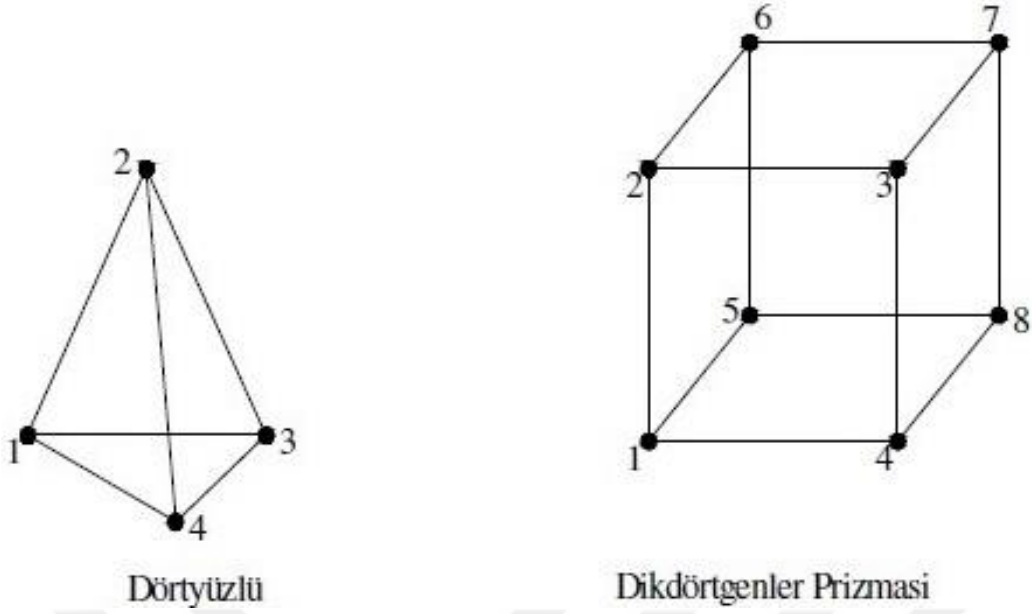
3.2.2 Sonlu eleman ağının seçilmesi

Sonlu elemanlar yönteminin temel seçim kuralına göre, seçim ilgili problemin geometrisine bağlıdır. Sonlu eleman belirlenirken geometrinin oluşturduğu boyut önemlidir. Bu sebepten ötürü SEY’de bir, iki, üç ve çok boyutlu elemanlar tanımlanarak analizler yapılabilmektedir.

Bir boyutlu sonlu elemandan kasıt iki düğüm noktası arasındaki bir çizgiden oluşan şekildir. İki boyutlu sonlu eleman ilgili problemin yapısına uygun olacak şekilde seçilebilir. Üçgen, kare, çokgen veya herhangi bir tanımlamaya uymayan kapalı bir yüzey de iki boyutlu sonlu eleman olarak seçilebilir. Problem geometrisinin simetrik olduğu durumlarda iki boyutlu sonlu elemanlar kullanılır. Problem geometrisinin karmaşık ve asimetrik olduğu durumlarda ise üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılır. Şekil 3.1’de iki boyutlu sonlu elemanlara, Şekil 3.2’de ise üç boyutlu sonlu elemanlara örnekler verilmiştir [2, 24].



Şekil 3.1: İki boyutlu sonlu eleman örnekleri [2].



Şekil 3.2: Üç boyutlu sonlu eleman örnekleri [2].

SEY ile elektrik alan analizi yapılırken genellikle iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar kullanılmaktadır.

3.3 Elektrik Alan Problemleri için Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemlerinin bazı özel halleriyle elektrik alanlar ifade edilebilirler. Bu denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.1)$$

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

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.4)$$

$$\nabla \times J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.5)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen terimlerin anlamları ve birimleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Çizelge 3.1: Maxwell denklemlerinde kullanılan semboller.

Terim	Anlamı	Birimi
E	Elektrik alan şiddeti	(V/m)
D	Elektriksel akı yoğunluğu	(C/m ²)
H	Manyetik alan şiddeti	(A/m)
B	Manyetik akı yoğunluğu	(T)
J	Akım yoğunluğu	(A/m ²)
ρ	Elektriksel yük yoğunluğu	(C/m ³)

Maxwell-Ampere yasası denklem (3.1)'de, Maxwell-Faraday yasası denklem (3.2)'de, elektrik alan için Gauss yasası denklem (3.3)'te, manyetizma için Gauss yasası denklem (3.4)'te ve sürekliliği ifade eden denklem (3.5)'te verilmiştir.

Yukarıdaki denklemlere ek olarak bazı yardımcı denklemlere de ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yardımcı denklemler aşağıda verilmiştir.

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (3.6)$$

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3.8)$$

$$J = \sigma E \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklemlerde ε_0 boşluğun dielektrik sabiti (F/m), μ_0 boşluğun manyetik geçirgenliği (H/m)'dir. SI birim sisteminde; $\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12}$ F/m ve $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H/m olarak tanımlanmıştır.

P, polarizasyon alan vektörüdür. Polarizasyon alan vektörü genellikle elektrik alanın işlevidir. P, yalıtkan malzemeler için kritik bir değerdir. Ortamda elektrik alan olmadığında dahi elektriksel polarizasyona sahip malzemeler olabilir. Elektrik polarizasyonu, yalıtkan malzeme yüzeyinde elektriksel yük birikimine sebep olur [24].

M, mıknatıslanma vektörüdür. Mıknatıslanma vektörü manyetik alanın varlığında malzemenin mıknatıslanmasını tanımlayan vektördür. Herhangi bir ferromanyetik malzemenin ayırt edici özelliklerinden birisi uygulanan manyetik alana karşı verdiği tersinmez ve doğrusal olmayan manyetizasyon tepkisidir. Ferromanyetik malzemelerin bu davranışları histerezis döngüsü ile açıklanır. Malzeme elektrik alana değil, manyetik alana tepki verir. Sürekli mıknatıslar, ortamda manyetik alan olmasa

dahi mıknatıslanmaya sahiptir. Her malzeme çeşidinin histerezis döngüsü farklıdır [24].

Doğrusal malzemelerde, elektrik alan ve manyetik alan için kullanılan denklemler (3.10) ve (3.11)'de verilmiştir.

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \varepsilon E \quad (3.10)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu H \quad (3.11)$$

Doğrusal olmayan malzemelerde, elektrik alan ve manyetik alan için kullanılan denklemler (3.12) ve (3.13)'te verilmiştir.

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E + D_r \quad (3.12)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (3.13)$$

Yukarıdaki denklemlerde μ_r malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğini, ε_r malzemenin bağıl dielektrik katsayısını ifade etmektedir.

Denklem (3.12)'de verilen D_r ifadesi malzemenin artık elektriksel akı yoğunluğunu temsil eder. Çünkü elektriksel akı yoğunluğu, doğrusal olmayan malzemelerde ortamda elektrik alan var olmasa dahi bulunabilir.

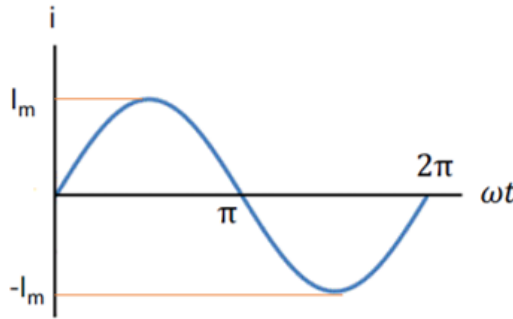
Denklem (3.13)'te verilen B_r ifadesi malzemenin artık manyetik akı yoğunluğunu temsil eder. Çünkü, manyetik akı yoğunluğu doğrusal olmayan malzemelerde ortamda manyetik alan var olmasa dahi bulunabilir.

Manyetik akı yoğunluğu (B) ve manyetik alan şiddeti (H) arasında denklem (3.14)'te verilen denklemdeki gibi bir ilişki vardır [24].

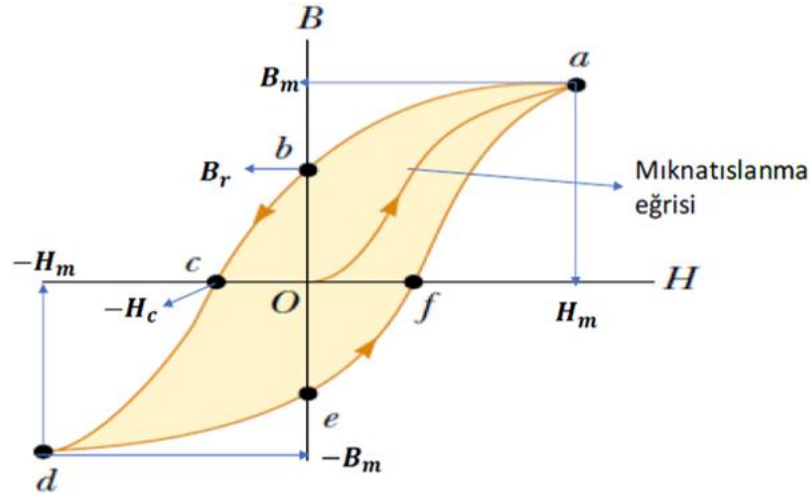
$$B = f(|H|) \quad (3.14)$$

Akımın artmasıyla birlikte manyetik alan şiddeti de doğrusal olarak artar. Fakat, manyetik akı yoğunluğu bu duruma bağlı olarak doğrusal bir şekilde artmaz. Manyetik akı yoğunluğu, Şekil 3.4'te verilen Oa yolunu izler. Bu durum histerezis olayı olarak adlandırılır. Manyetik malzemelerdeki kayıpları belirleyen en önemli faktör histerezis olayıdır.

Akım değeri Şekil 3.3'te gösterilen I_m tepe değerinden sıfır değerine düştüğünde manyetik alan şiddeti de sıfır değerine düşer. Fakat akı yoğunluğu Şekil 3.4'te verilen ab yolunu izleyerek B_r artık akı yoğunluğu değerine ulaşır. Ardından akım değeri $-I_m$ tepe değerine düştüğünde manyetik alan şiddeti de Şekil 3.4'te verilen $-H_m$ değerine düşer. Fakat, akı yoğunluğu Şekil 3.4'te verilen bcd yolunu izleyerek $-B_m$ değerine ulaşır. Daha sonra ed yolunu izleyerek akı yoğunluğunun sıfır olduğu H_c değerine ulaşır. H_c değeri, kalıcı mıknatıslığı yok etmek için ters yönde uygulanması gereken manyetik alandır. Akımla birlikte manyetik alan da sıfıra geldiğinde akı yoğunluğu def yolunu izler. Bundan sonra akım ikinci periyoduna başladığında akı yoğunluğu Oa yolunu değil fa yolunu izler. Yani ilk periyotta eğri kapanmaz [24].



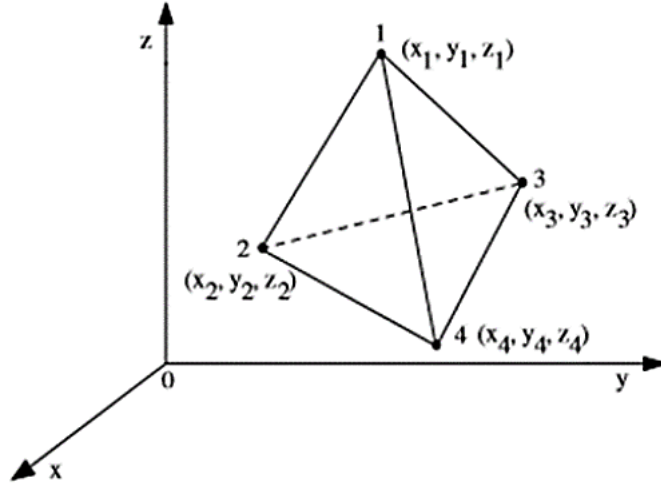
Şekil 3.3: Sinüzoidal akım-zaman grafiği.



Şekil 3.4: Histerezis eğrisi.

3.4 Dörtüzlü Sonlu Elemana İlişkin Katsayılar

Koordinat sistemi üzerinde yer alan dörtüzlü bir sonlu eleman Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Dört yüzlü sonlu eleman.

Üç boyutlu, birinci dereceden yaklaşım işlevi denklem (3.15)'te verilmiştir.

$$V(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (3.15)$$

Yaklaşım işlevini tanımlamak için a, b, c ve d katsayılarının hesaplanması gerekmektedir. Bu durumda her bir düğümdeki potansiyel değer denklem (3.16)'da verilen matrisin çözülmesiyle elde edilir.

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'da verilen matris çözüldüğünde aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$a = \frac{1}{6V} (a_1 V_1 + a_2 V_2 + a_3 V_3 + a_4 V_4) \quad (3.17)$$

$$b = \frac{1}{6V} (b_1 V_1 + b_2 V_2 + b_3 V_3 + b_4 V_4) \quad (3.18)$$

$$c = \frac{1}{6V} (c_1 V_1 + c_2 V_2 + c_3 V_3 + c_4 V_4) \quad (3.19)$$

$$d = \frac{1}{6V} (d_1 V_1 + d_2 V_2 + d_3 V_3 + d_4 V_4) \quad (3.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde V değeri, dörtyürlü sonlu elemanın hacmidir. Hacim değeri denklem (3.21)'de verilmiştir.

$$V = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

a, b, c, d katsayıları aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$a_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (x_2 y_3 z_4 + x_4 y_2 z_3 + x_3 y_4 z_2) - (x_4 y_3 z_2 + x_2 y_4 z_3 + x_3 y_2 z_4) \quad (3.22)$$

$$a_2 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (x_4 y_3 z_1 + x_3 y_1 z_4 + x_1 y_4 z_3) - (x_1 y_3 z_4 + x_4 y_1 z_3 + x_3 y_4 z_1) \quad (3.23)$$

$$a_3 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (x_1 y_2 z_4 + x_4 y_1 z_2 + x_2 y_4 z_1) - (x_4 y_2 z_1 + x_2 y_1 z_4 + x_1 y_4 z_2) \quad (3.24)$$

$$a_4 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = (x_3 y_2 z_1 + x_2 y_1 z_3 + x_1 y_3 z_2) - (x_1 y_2 z_3 + x_2 y_3 z_1 + x_3 y_1 z_2) \quad (3.25)$$

$$b_1 = - \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (y_3 z_2 + y_2 z_4 + y_4 z_3) - (y_3 z_4 + y_2 z_3 + y_4 z_2) \quad (3.26)$$

$$b_2 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (y_3 z_4 + y_1 z_3 + y_4 z_1) - (y_3 z_1 + y_4 z_3 + y_1 z_4) \quad (3.27)$$

$$b_3 = - \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = (y_2 z_1 + y_4 z_2 + y_1 z_4) - (y_2 z_4 + y_1 z_2 + y_4 z_1) \quad (3.28)$$

$$b_4 = \begin{vmatrix} 1 & y_1 & z_1 \\ 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \end{vmatrix} = (y_2 z_3 + y_1 z_2 + y_3 z_1) - (y_2 z_1 + y_3 z_2 + y_1 z_3) \quad (3.29)$$

$$c_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} = (x_4 z_2 + x_3 z_4 + x_2 z_3) - (x_2 z_4 + x_3 z_2 + x_4 z_3) \quad (3.30)$$

$$c_2 = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_3 & 1 & z_3 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} = (x_1 z_4 + x_3 z_1 + x_4 z_3) - (x_4 z_1 + x_3 z_4 + x_1 z_3) \quad (3.31)$$

$$c_3 = - \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_4 & 1 & z_4 \end{vmatrix} = (x_4 z_1 + x_2 z_4 + x_1 z_2) - (x_1 z_4 + x_2 z_1 + x_4 z_2) \quad (3.32)$$

$$c_4 = \begin{vmatrix} x_1 & 1 & z_1 \\ x_2 & 1 & z_2 \\ x_3 & 1 & z_3 \end{vmatrix} = (x_1 z_3 + x_2 z_1 + x_3 z_2) - (x_3 z_1 + x_2 z_3 + x_1 z_2) \quad (3.33)$$

$$d_1 = - \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} = (x_4 y_3 + x_3 y_2 + x_2 y_4) - (x_2 y_3 + x_3 y_4 + x_4 y_2) \quad (3.34)$$

$$d_2 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} = (x_1 y_3 + x_3 y_4 + x_4 y_1) - (x_4 y_3 + x_3 y_1 + x_1 y_4) \quad (3.35)$$

$$d_3 = - \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_4 & y_4 & 1 \end{vmatrix} = (x_4 y_2 + x_2 y_1 + x_1 y_4) - (x_1 y_2 + x_2 y_4 + x_4 y_1) \quad (3.36)$$

$$d_4 = \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = (x_1 y_2 + x_2 y_3 + x_3 y_1) - (x_3 y_2 + x_2 y_1 + x_1 y_3) \quad (3.37)$$

Yukarıdaki denklemlerde verilen sonuçlar, denklem (3.15)'te yerine konulursa denklem (3.38) elde edilir.

$$V(x, y, z) = \alpha_1 V_1 + \alpha_2 V_2 + \alpha_3 V_3 + \alpha_4 V_4 = \sum_{i=1}^4 \alpha_i V_i \quad (3.38)$$

Aşağıdaki denklemlerde biçim işlevlerinin matematiksel ifadeleri verilmiştir.

$$\alpha_1(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_1 + b_1 x + c_1 y + d_1 z) \quad (3.39)$$

$$\alpha_2(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_2 + b_2 x + c_2 y + d_2 z) \quad (3.40)$$

$$\alpha_3(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_3 + b_3 x + c_3 y + d_3 z) \quad (3.41)$$

$$\alpha_4(x, y, z) = \frac{1}{6V} (a_4 + b_4 x + c_4 y + d_4 z) \quad (3.42)$$

Biçim işlevleri interpolasyon işlevindeki Lagrange fonksiyonlarının özelliklerini taşır. Denklem (3.43)'te bu durum gösterilmiştir.

$$(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} i = j \Rightarrow 1 \\ i \neq j \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (3.43)$$

Biçim işlevlerinin sonlu eleman içindeki herhangi bir (x_k, y_k, z_k) noktasındaki toplamı 1'e eşittir.

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i(x, y, z) = 1 \quad (3.44)$$

3.5 Elektrik Alan Problemleri için Sonlu Elemanlar Denklemlerinin Yazılması

Statik elektrik alan ifadesi zamanla değişmeyen elektrik alanı ifade eder. Duran ya da sabit hızla hareket eden yükler, statik elektrik alan kaynağıdır. Şebeke frekanslı gerilimlerin (50/60 Hz) oluşturduğu elektrik alanlar, statik elektrik alan gibi incelenirler.

Sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak elektrik alan problemleri çözümlenirken ilk olarak hesaplanması istenilen potansiyel düğümü için sınırlayıcı koşullar belirlenir. Bunun için bilinen malzeme özelliklerinden ve bilinen potansiyellerden yararlanılır. Daha sonra çözüm bölgesi ayrıklaştırılarak, problem çok basit bir fonksiyonla yaklaştırılır. Matris oluştuktan sonra, yaklaşık fonksiyonlar doğrusal bir denklem sistemi oluşturmak için her bir ayırık bölgeye yazılır. Bu doğrusal sistem iteratif bir sayısal yöntemle çözülür. Her bir ayırık bölge düğümlerindeki potansiyeller hesaplanır. Ardından potansiyel yaklaşım fonksiyonları oluşturulur. Böylece her bir ayırık bölgenin köşelerindeki potansiyel büyüklüklere göre istenilen bir noktanın elektrik potansiyelini ve elektrik alan şiddetini belirlemek mümkün olur.

Fiziksel olayların yarattığı enerjiyi minimize etmek sonlu elemanlar yönteminin temel ilkesidir. Bu ilke, problemin tanımını yapan diferansiyel denklemin (örneğin; Poisson ya da Laplace denklemlerinin) çözümü ile aynı sonucu verir [24].

Denklem (3.45)'te bir sonlu eleman içerisindeki enerjiyi ifade eden formül verilmiştir.

$$W = \frac{1}{2} \int \int \int_V |\nabla V^{(e)}|^2 dV \quad (3.45)$$

Denklem (3.45)'e göre üç boyutlu çözüm bölgesinde herhangi bir yükün olmadığı kabul edilir. Her bir sonlu eleman içerisindeki potansiyel değişim denklem (3.46)'da verilen formül ile bulunur.

$$V(x, y, z) = V^e = \sum_{i=1}^4 \alpha_i V_i \quad (3.46)$$

Denklem (3.46)'da verilen potansiyel sabit olduğundan, eleman içerisindeki potansiyel gradyanı denklem (3.47)'de verilen formül yardımıyla bulunur.

$$\nabla V^{(e)} = \sum_{i=1}^4 V_i \nabla \alpha_i(x, y, z) \quad (3.47)$$

Denklem (3.45)'teki ifadeyi elde etmek için denklem (3.47)'de verilen ifadenin karesi alınmalıdır. Denklem (3.47)'nin karesi denklem (3.48)'de verilmiştir.

$$|\nabla V^{(e)}|^2 = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 V_i V_j \nabla \alpha_i \alpha_j \quad (3.48)$$

Aşağıdaki denklemde (3.49) verilen bağıntı eleman katsayılar matrisinin terimidir.

$$\iiint \nabla \alpha_i \alpha_j dV = k_{ij} \quad (3.49)$$

Bu denklemlere göre bir sonlu eleman içerisindeki enerji denklem (3.50)'de verilen eşitlik yardımıyla elde edilir.

$$W^{(e)} = \frac{1}{2} \varepsilon [V^{(e)}]^T [K^{(e)}] [V^{(e)}] \quad (3.50)$$

Düğüm potansiyelleri matrisi denklem (3.51)'de, düğüm potansiyelleri matrisinin transpozesi denklem (3.52)'de verilmiştir.

$$[V^{(e)}] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$[V^{(e)}] = [V_1 \quad V_2 \quad V_3 \quad V_4] \quad (3.52)$$

Eleman katsayılar matrisi denklem (3.53)'te verilmiştir.

$$K^{(e)} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(e)} & k_{12}^{(e)} & k_{13}^{(e)} & k_{14}^{(e)} \\ k_{21}^{(e)} & k_{22}^{(e)} & k_{23}^{(e)} & k_{24}^{(e)} \\ k_{31}^{(e)} & k_{32}^{(e)} & k_{33}^{(e)} & k_{34}^{(e)} \\ k_{41}^{(e)} & k_{42}^{(e)} & k_{43}^{(e)} & k_{44}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Katsayılar matrisi terimleri i ve j düğümleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Katsayılar matrisinin terimleri denklem (3.54)'de verilmiştir.

$$k_{ij}^{(e)} = \iiint \nabla \alpha_i \nabla \alpha_j dV \quad (3.54)$$

$\vec{i} \cdot \vec{i} = \vec{j} \cdot \vec{j} = \vec{k} \cdot \vec{k} = 1$ ve $\vec{i} \cdot \vec{j} = \vec{i} \cdot \vec{k} = \vec{j} \cdot \vec{k} = 0$ skaler çarpımları hesaba katılarak katsayılar matrisinin her bir terimi hesaplanabilir.

$$k_{11}^{(e)} = \iiint \nabla \alpha_1 \nabla \alpha_1 dV \quad (3.55)$$

$$k_{11}^{(e)} = \iiint \left[\frac{1}{6V} \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial z} \vec{k} \right) \right] \left[\frac{1}{6V} \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial z} \vec{k} \right) \right] dV \quad (3.56)$$

$$k_{11}^{(e)} = \frac{1}{36V^2} \left(b_1 \vec{i} + c_1 \vec{j} + d_1 \vec{k} \right) \left(b_1 \vec{i} + c_1 \vec{j} + d_1 \vec{k} \right) \iiint dV \quad (3.57)$$

$$k_{11}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_1^2 + c_1^2 + d_1^2) \quad (3.58)$$

$$k_{12}^{(e)} = k_{21}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_1^2 b_2^2 + c_1^2 c_2^2 + d_1^2 d_2^2) \quad (3.59)$$

$$k_{13}^{(e)} = k_{31}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_1^2 b_3^2 + c_1^2 c_3^2 + d_1^2 d_3^2) \quad (3.60)$$

$$k_{14}^{(e)} = k_{41}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_1^2 b_4^2 + c_1^2 c_4^2 + d_1^2 d_4^2) \quad (3.61)$$

$$k_{22}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_2^2 + c_2^2 + d_2^2) \quad (3.62)$$

$$k_{23}^{(e)} = k_{32}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_2^2 b_3^2 + c_2^2 c_3^2 + d_2^2 d_3^2) \quad (3.63)$$

$$k_{24}^{(e)} = k_{42}^{(e)} = (b_2^2 b_4^2 + c_2^2 c_4^2 + d_2^2 d_4^2) \quad (3.64)$$

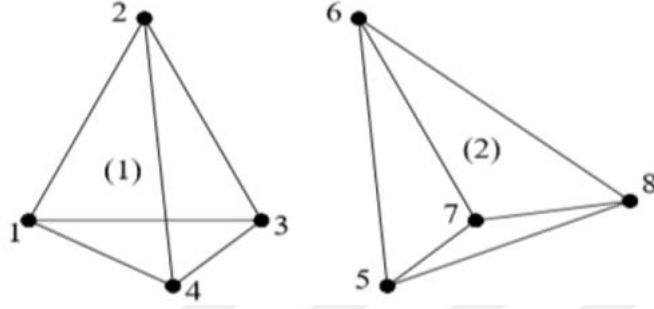
$$k_{33}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_3^2 + c_3^2 + d_3^2) \quad (3.65)$$

$$k_{34}^{(e)} = k_{43}^{(e)} = (b_3^2 b_4^2 + c_3^2 c_4^2 + d_3^2 d_4^2) \quad (3.66)$$

$$k_{44}^{(e)} = \frac{1}{36V} (b_4^2 + c_4^2 + d_4^2) \quad (3.67)$$

Sonlu elemanların birleştirilmesi

Her bir sonlu elemanın birleştirilmesi çözümün sürekliliğini sağlamak açısından gereklidir. Şekil 3.6’da gösterilen iki ayrık dörtyüzlü eleman birleştirilecektir. 1 ve 2 numaralı elemanlara ait katsayılar matrisi denklem (3.68) ve denklem (3.69)’da verilmiştir [24].

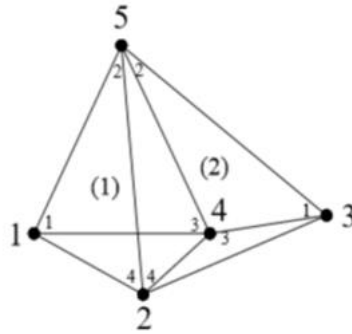


Şekil 3.6: Ayrı dörtyüzlü sonlu elemanlar.

$$K^{(1)} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{12}^{(1)} & k_{13}^{(1)} & k_{14}^{(1)} \\ k_{21}^{(1)} & k_{22}^{(1)} & k_{23}^{(1)} & k_{24}^{(1)} \\ k_{31}^{(1)} & k_{32}^{(1)} & k_{33}^{(1)} & k_{34}^{(1)} \\ k_{41}^{(1)} & k_{42}^{(1)} & k_{43}^{(1)} & k_{44}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

$$K^{(2)} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(2)} & k_{12}^{(2)} & k_{13}^{(2)} & k_{14}^{(2)} \\ k_{21}^{(2)} & k_{22}^{(2)} & k_{23}^{(2)} & k_{24}^{(2)} \\ k_{31}^{(2)} & k_{32}^{(2)} & k_{33}^{(2)} & k_{34}^{(2)} \\ k_{41}^{(2)} & k_{42}^{(2)} & k_{43}^{(2)} & k_{44}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

Birleştirilmiş iki sonlu elemanın görünümü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7: Birleştirilmiş iki sonlu elemanın görünümü.

Birleşik eleman katsayılar matrisi denklem (3.70)’de verilmiştir.

$$K^{(b)} = \begin{bmatrix} k_{11}^{(1)} & k_{14}^{(1)} & 0 & k_{13}^{(1)} & k_{12}^{(1)} \\ k_{41}^{(1)} & k_{44}^{(1)} + k_{44}^{(2)} & k_{41}^{(2)} & k_{43}^{(1)} + k_{43}^{(2)} & k_{42}^{(1)} + k_{42}^{(2)} \\ k_{31}^{(1)} & k_{34}^{(1)} + k_{34}^{(2)} & k_{31}^{(2)} & k_{33}^{(1)} + k_{33}^{(2)} & k_{32}^{(1)} + k_{32}^{(2)} \\ k_{21}^{(1)} & k_{24}^{(1)} + k_{24}^{(2)} & k_{21}^{(2)} & k_{23}^{(1)} + k_{23}^{(2)} & k_{22}^{(1)} + k_{22}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Katsayılar elde edildikten sonra denklem (3.70) uygun iteratif yöntem kullanılarak çözümlürse sonuç elde edilir.

4. ÜÇ BOYUTLU ELEKTRİK ALAN BENZETİMLERİ

COMSOL Multiphysics, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elektrik, mekanik, ısı gibi çeşitli konularda analizlerin yapılabilmesine olanak sağlayan bir benzetim (simülasyon) yazılımıdır. Bu çalışmada, COMSOL kullanılarak YG ayırıcılarının karma gerilimlerde SEY ile elektrik alan analizi yapılmıştır. Analiz yapılırken elektrik mühendisliğinin alt disiplini olan ve elektrik yüklerini inceleyen elektrostatik bilimi kullanılmıştır. Elektrostatik bilimi, sınır potansiyel koşullarının belirlendiği durumlarda yalıtkan ortamdaki potansiyel ve elektrik alan dağılımlarını hesaplamak için kullanılır. Elektrostatik bilimi, alan değişkenlerinin zamana göre değişmediği durumlarda, problemlerin çözümü için kullanılır.

COMSOL Multiphysics isimli simülasyon için önemli olan bazı tanımlar aşağıda açıklanmıştır. Programda elektrostatik bilimi için otomatik olarak sıfır yük, yük korunumu ve başlangıç değerleri tanımlanmaktadır. Gerektiğinde simülasyona, bu denklemlere ek olarak yeni denklemler de katılabilir.

Elektrik potansiyeli: Elektrik potansiyeli bilinen bölümlere uygulanır. Elektriksel potansiyel değeri belli olan sınır yüzey seçilerek, potansiyel değer yazılır.

Terminal (uç): Belirli bir elektriksel potansiyel veya yük için gerekli koşulların tanımlanmasında kullanılır.

Toprak potansiyeli: Elektriksel potansiyelin sıfır olduğu yüzeyi belirtir.

Yük korunumu: Elektrik yükünün korunumlu olduğunu yani yalıtılmış (izole) bir ortamdaki tüm elektrik yüklerinin toplamının sıfır olduğunu ifade eder.

Sıfır yük / Simetri: $n \cdot D = 0$ olan bölgeleri tanımlamak için kullanılır. Sonlu elemanlar yöntemi ile problem çözümü yapılabilmesi için kapalı bir bölgeye gereksinim vardır. Deplasman vektörünün normalinin sıfıra eşit olduğu yüzey, bu yüzeye dik elektrik alan bileşeni değerinin sıfır olduğu yüzey anlamına gelir. Bu özellik yapılacak çözümleme için oluşturulan modelin kapalı bir bölge içine alınması için kullanılır. Neuman sınır koşulunu temsil etmektedir.

Başlangıç değerleri: Modelde herhangi bir yüzeye farklı bir değer tanımlanmadıkça bulunan tüm yüzeylere başlangıç potansiyeli olarak sıfır potansiyel tanımlanır.

Süreklilik: $n \cdot (D_1 - D_2) = 0$ olan bölgeleri tanımlamak için kullanılır. Elektrik alanın sürekli olduğunu belirtir. Yalıtkan malzemelerin sınır koşulunu belirler.

En büyük eleman boyutu: Analizi yapılacak olan model üzerinde oluşturulan ağdaki sonlu elemanların en büyüğünün boyutudur. COMSOL'un kullandığı boyut, modelde bulunan en uzak mesafenin %10'u kadardır.

En küçük eleman boyutu: Analizi yapılacak olan model üzerinde oluşturulan ağdaki sonlu elemanların en küçüğünün boyutudur.

En küçük eleman kalitesi: Ağda kullanılan sonlu elemanlar için en küçük elemanın kalitesini ifade eder. İdeal durumda değeri 1'e eşittir. Yapılan analizin doğru sonuç vermesi için bu değerin 0,1'den büyük olması yeterlidir.

Maksimum eleman büyüme oranı: Ağ üzerinde, yüzeyler arasında geçiş yaparken sonlu elemanların büyüme oranını veren katsayıdır. Bu katsayı en az 1 değerini almaktadır.

Eğrilik faktörü: Eğrilik yarıçapı küçük ve keskin olan sivri yüzeyler için bu değer küçük seçilmelidir.

Dar bölge çözüm faktörü: Dar bölgelerde sonlu elemanlar ağını oluşturacak tabakaların sayısını belirtir.

Eleman sayısı: Ağı oluşturan toplam sonlu eleman sayısını belirtir.

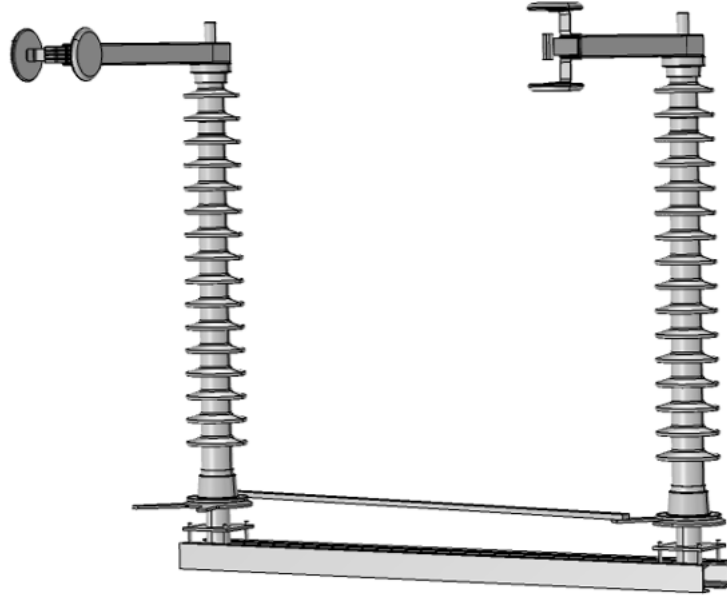
Ağ süresi: Ağı oluşturmak için geçen toplam süreyi belirtir.

Ağ düğüm sayısı: Sonlu eleman ağındaki toplam düğüm sayısını belirtir.

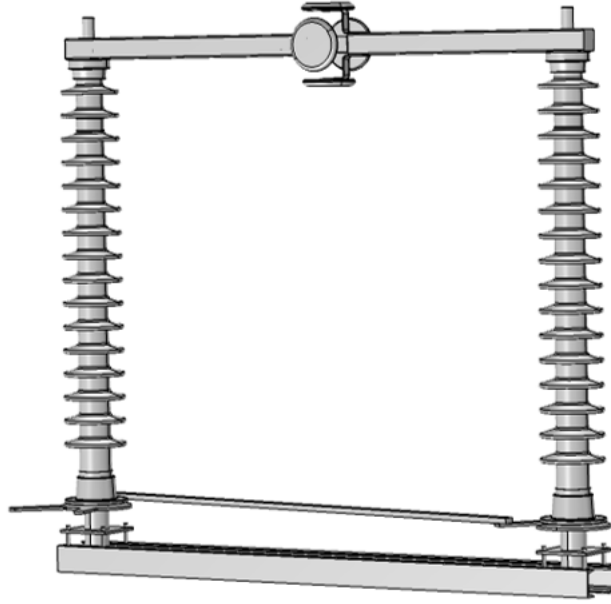
4.1 Model

Bu çalışmada ortadan açmalı ayırıcı modelinin bir fazı kullanılmıştır. Ayırıcı modeli SolidWorks programında üç boyutlu olarak çizilmiş ve daha sonra gerekli analizlerin yapılabilmesi adına Comsol Multiphysics programına aktarılmıştır.

Ayırıcı modelinin açık ve kapalı pozisyonları sırasıyla Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.



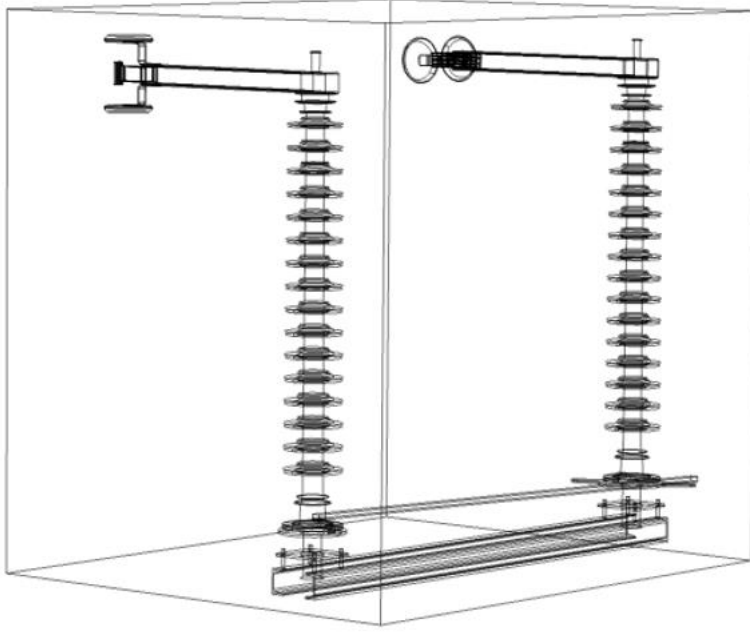
Şekil 4.1: Ayırıcı modeli (açık pozisyon).



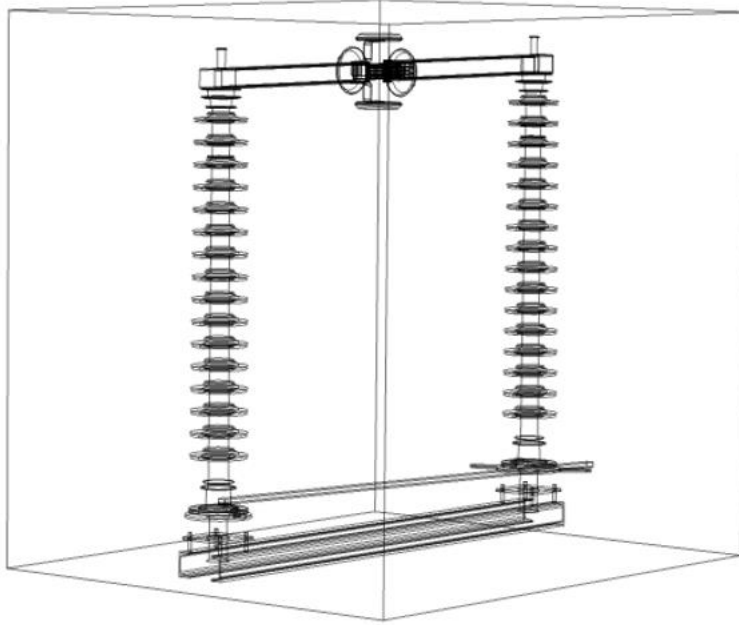
Şekil 4.2: Ayırıcı modeli (kapalı pozisyon).

4.1.1 Modelin boyutları ve malzeme tanımlamaları

Ayırıcının, Comsol'daki modeli Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'de verilmiştir. Bilindiği üzere sonlu elemanlar ile çözüm gerçekleştirilebilmesi için kapalı bir hacime ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 4.3 ve Şekik 4.4'te görülen dikdörtgenler prizmasının amacı sonlu elemanlar yönteminin uygulanacağı bölgeyi sınırlandırmaktır. Bu dikdörtgenler prizmasının iç malzemesi yani ayırıcının bulunduğu ortam, modelde hava olarak tanımlanmıştır.



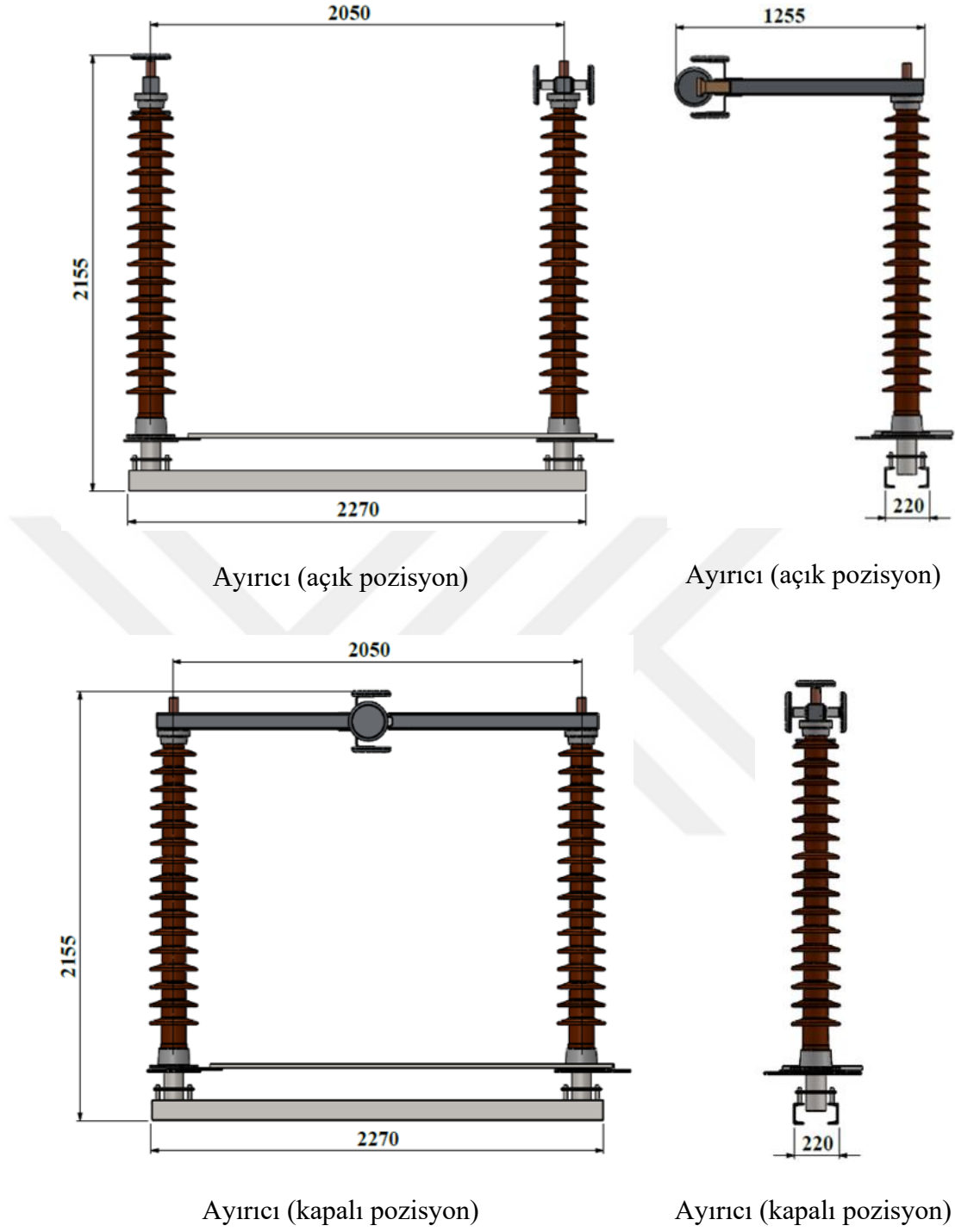
Şekil 4.3: Comsol’da oluşturulan model (kontaklar açık pozisyon).



Şekil 4.4: Comsol’da oluşturulan model (kontaklar kapalı pozisyon).

Hava olarak tanımlanan dikdörtgenler prizmasının boyutları 2 x 2.5 x 2.3 metre olarak belirlenmiştir. Analiz sonuçlarının doğruluğu açısından bakıldığında bu boyutların daha yüksek değerler olması fayda sağlayacaktır. Fakat, bilgisayar kapasitesinden ötürü boyutlar çok geniş seçilememiştir.

Modeldeki ayırıcının boyutları Şekil 4.5’te verilmiştir. Boyutlar, saha uygulamalarında kullanılan 170 kV ortadan açmalı ayırıcının bire bir aynısıdır.



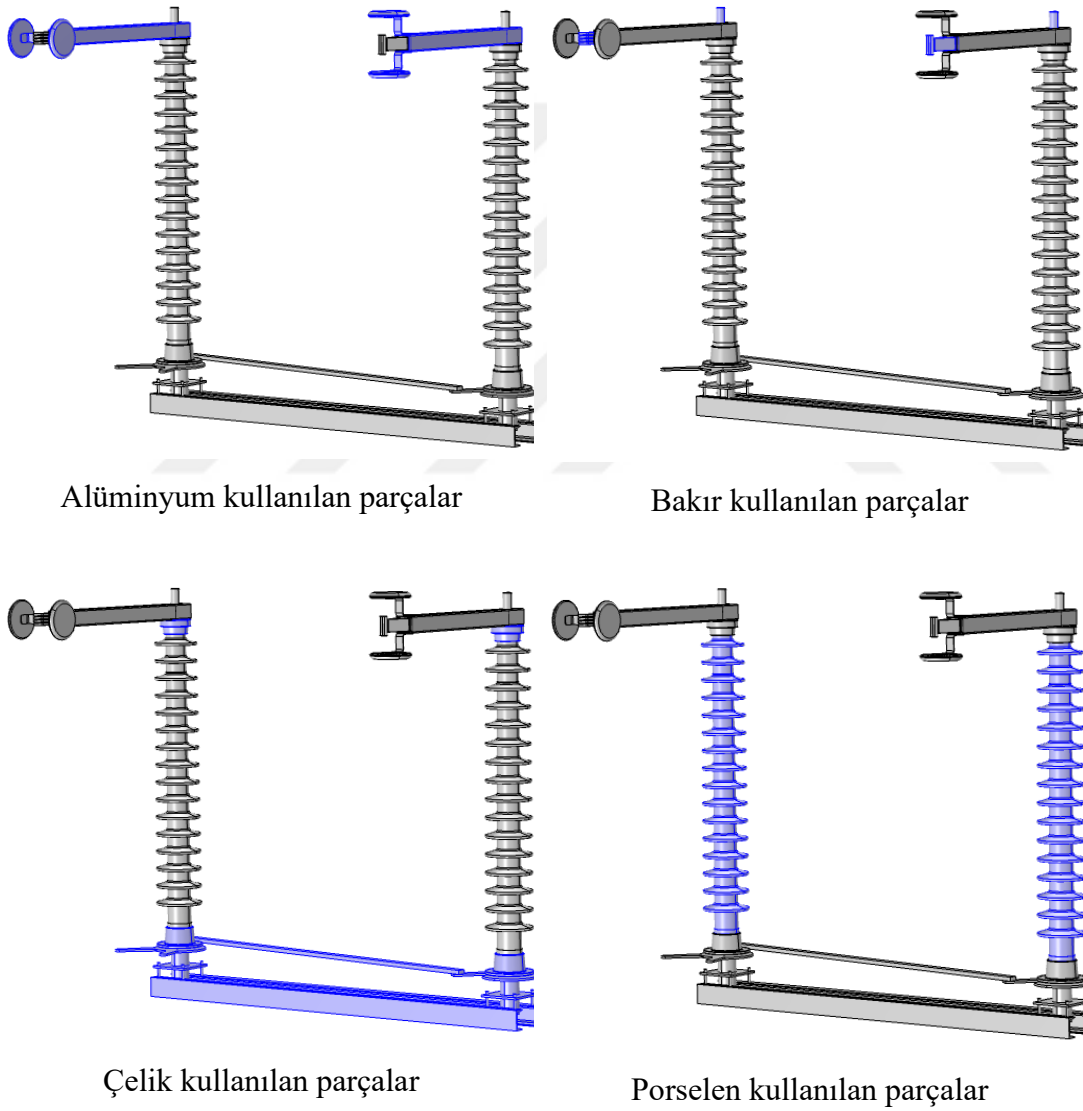
Şekil 4.5: Modelde kullanılan ayırıcının boyutları.

Ayırıcı imalatında farklı türden malzemeler kullanılmaktadır. İlgili ayırıcı modeli programa entegre edildikten sonra modelde kullanılan malzemeler tanımlanmıştır. Modelde kullanılan malzemeler ve malzemelere ait bağıl dielektrik sabitleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Modelde kullanılan malzemeler ve bağıl dielektrik sabitleri.

Malzeme adı	Bağıl dielektrik sabiti
Alüminyum	10^5
Bakır	10^5
Çelik	1
Porselen	6
Hava	1

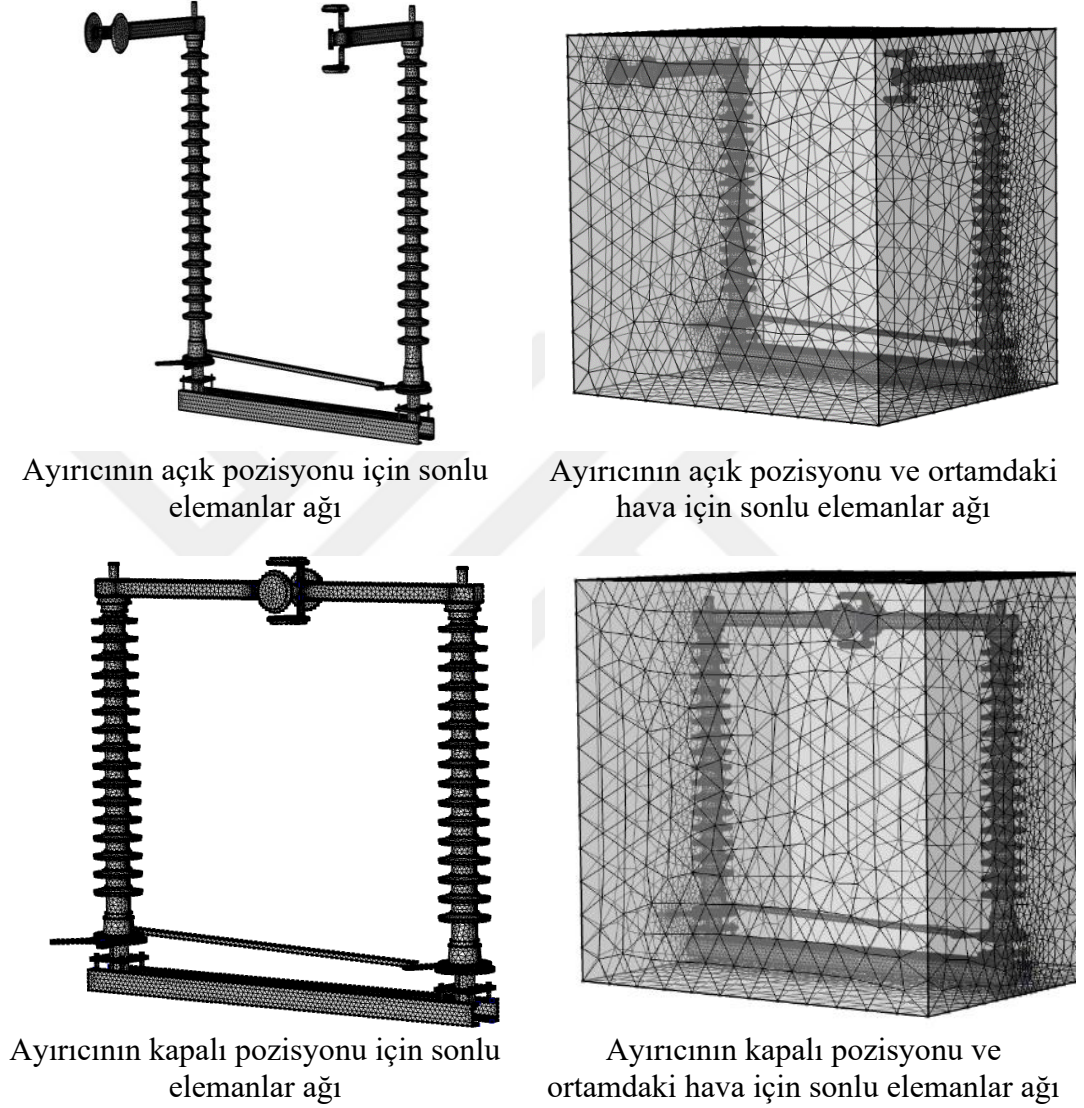
Şekil 4.6’da ayırıcıda kullanılan malzemeler ilgili açıklamanın üzerinde mavi renkle belirtilmek suretiyle gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Ayırıcıda kullanılan malzemeler (renkli olarak gösterilen kısımlar).

4.1.2 Modelin sonlu elemanlara bölünmesi

Yukarıdaki adımlar tamamlandıktan sonra çözüm bölgesi sonlu elemanlar ağına bölünmüştür. Ağ, her yüzeyi üçgen olan dörtyüzlü elemanlardan ve üçgenlerden oluşmuştur. Şekil 4.7’de sonlu elemanlara ayrılmış ayırıcı görselleri verilmiştir.



Şekil 4.7: Modelin Comsol’da sonlu elemanlar ağına bölünmesi.

Modelin sonlu elemanlara bölünmesinde ayırıcının açık pozisyonu için 805146 dörtyüzlü, 89278 üçgen sonlu eleman kullanılmıştır. Bunun yanı sıra ayırıcının açık pozisyonu için ortalama eleman kalitesi 0.6108 olmuştur.

Modelin sonlu elemanlara bölünmesinde ayırıcının kapalı pozisyonu için 793602 dörtyüzlü, 88897 üçgen sonlu eleman kullanılmıştır. Bunun yanı sıra ayırıcının kapalı pozisyonu için ortalama eleman kalitesi 0.6098 olmuştur.

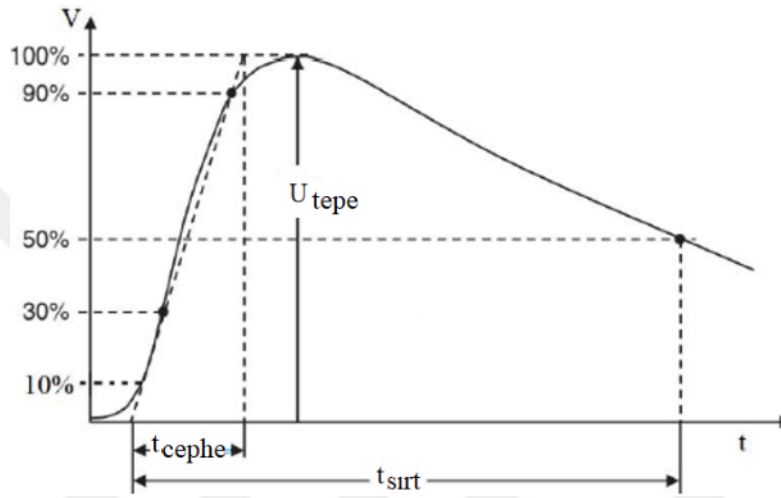
4.2 Analiz

4.2.1 Yıldırım darbe geriliminin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler

Denklem (4.1)'de verilen çift üstel fonksiyon, hem yıldırım darbe gerilimlerinin hem de anahtarlama darbe gerilimlerinin üretilmesi için yaygın olarak kullanılır [12].

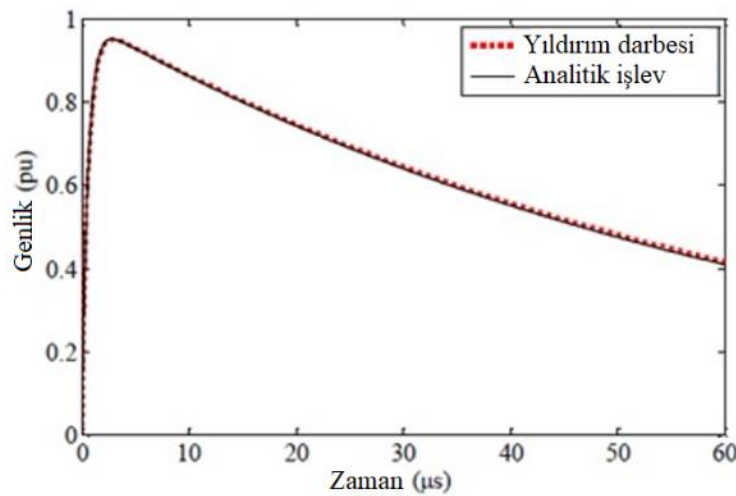
$$V(t) = V_0 K (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.1)$$

Standart yıldırım darbe geriliminin grafiği, Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8: Standart yıldırım darbe gerilimi [10].

Standart yıldırım darbe gerilimini elde edebilmek için denklem (4.1)'de α için 1.4912×10^4 , β için 1.6335×10^6 değerleri kullanılmıştır [12]. Bu değerlerin kullanılmasıyla elde edilen darbe geriliminin, yıldırım darbe gerilimiyle karşılaştırılması Şekil 4.9'da verilmiştir.



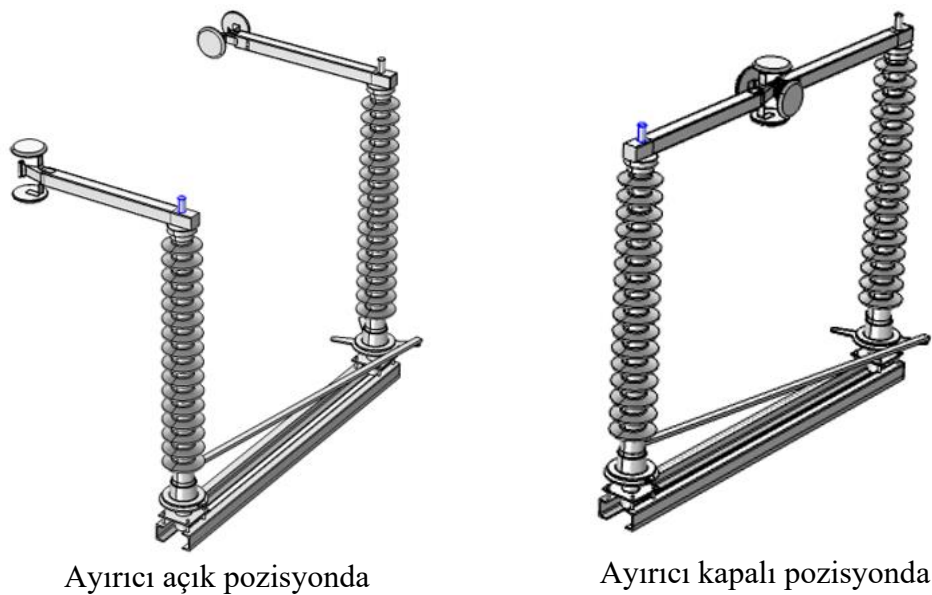
Şekil 4.9: Yıldırım darbe gerilimi dalga biçimlerinin karşılaştırması [12].

IEC 62271-1 standardında 170 kV ayırıcılar için uygulanması gereken yıldırım darbe geriliminin tepe değeri faz – toprak arası için 750 kV olarak, ayırma aralığı için 860 kV olarak verilmiştir. Bu çalışma boyunca, analizler standartta belirtildiği gibi yıldırım darbe geriliminin hem pozitif kutbu için hem de negatif kutbu için ayrı ayrı uygulanmıştır [13]. Buna istinaden denklem (4.2), (4.3), (4.4) ve (4.5)’de Comsol’da yapılan analizlerde kullanılan analitik fonksiyonlar verilmiştir. Denklemler Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: Modelde kullanılan yıldırım darbe gerilimleri.

Yıldırım darbe gerilimi	Fonksiyon	Denklem numarası
Ayırma aralığı boyunca pozitif kutuplu	$V(t) = (860 \times 10^3 (e^{-1.4912 \times 10^4 t} - e^{-1.6335 \times 10^6 t}))$	(4.2)
Ayırma aralığı boyunca negatif kutuplu	$V(t) = -(860 \times 10^3 (e^{-1.4912 \times 10^4 t} - e^{-1.6335 \times 10^6 t}))$	(4.3)
Faz – toprak arası pozitif kutuplu	$V(t) = (750 \times 10^3 (e^{-1.4912 \times 10^4 t} - e^{-1.6335 \times 10^6 t}))$	(4.4)
Faz – toprak arası negatif kutuplu	$V(t) = -(750 \times 10^3 (e^{-1.4912 \times 10^4 t} - e^{-1.6335 \times 10^6 t}))$	(4.5)

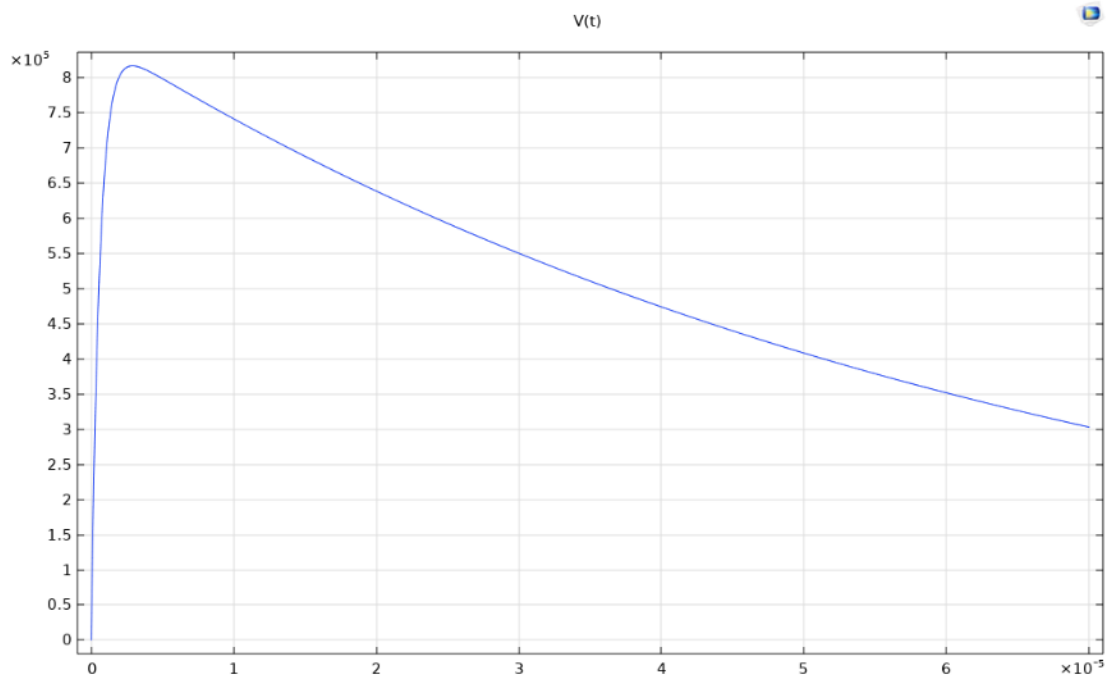
Yıldırım darbe gerilimi ayırıcıya uygulanırken, ayırıcının silindir kontağı uç noktası olarak belirlenmiştir. Darbe geriliminin uygulandığı silindir kontak, Şekil 4.10’da mavi renkle belirtilmiştir.



Şekil 4.10: Yıldırım darbe geriliminin uygulandığı silindir kontak.

4.2.1.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması

Ayırıcı açık pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının ayırma aralığının (standart deyimi ile yalıtım mesafesi / isolation distance), ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen yıldırım darbesi gerilimi altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin tepe değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 860 kV olarak verilmiştir.



Şekil 4.11: Comsol’da oluşturulan pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.

Denklem (4.2)’de fonksiyonu ve Şekil 4.11’de grafiği verilen pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken uygulanmıştır. Pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, diğer ucu topraklanmıştır. Şase topraklanmamıştır. Şasenin topraktan izole edilmesinin nedeni ayırıcının sağladığı yalıtımın koordinasyonunda ayırma aralığına atanan dayanımın, faz-toprak arası için belirlenenden büyük olması ve bu koordinasyon talebinin karşılanıp karşılanmadığının ispatı ihtiyacıdır.

Ayırıcının kullanıldığı sahalarda açık pozisyondayken ayırıcının topraklanmamış ucuna bir yıldırım darbesi ulaşması halinde, ya faz-toprak yalıtımını delemeyip yansıması, ya da bir yalıtım delinmesi oluşacaksa faz-toprak arasında bir atlama ile yaşanması için gerekli düzen sağlanmış olur.

Pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Time=1E-6 s

Surface: Electric potential (V)

max: 0.79058

min: 0.00000

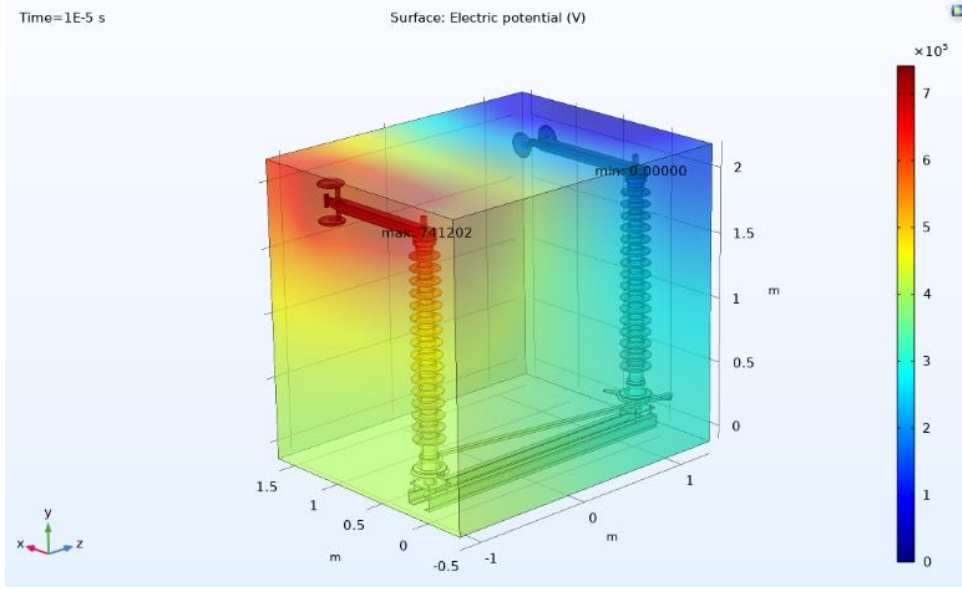
0 0.5 1 1.5 2 m

0 0.5 1 1.5 m

0 -0.5 -1 m

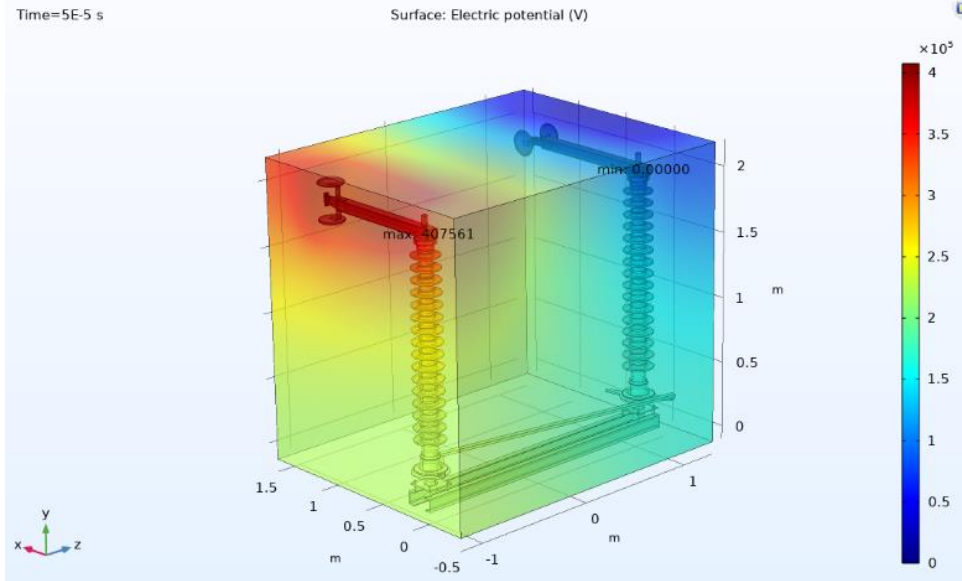
0 1 2 3 4 5 6 $\times 10^5$

Şekil 4.13'te açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.13: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

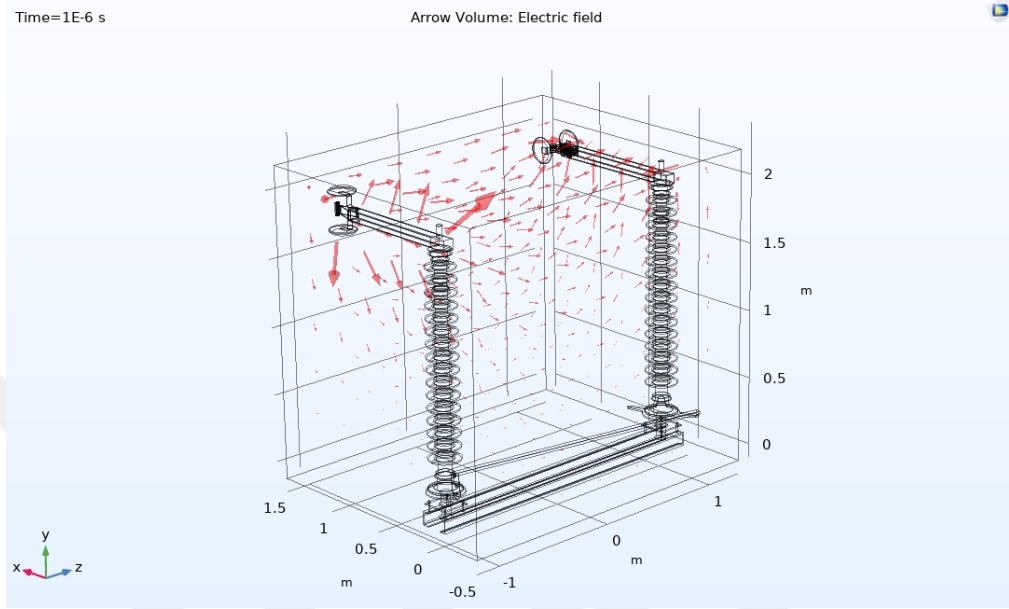
Şekil 4.14'te açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.14: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

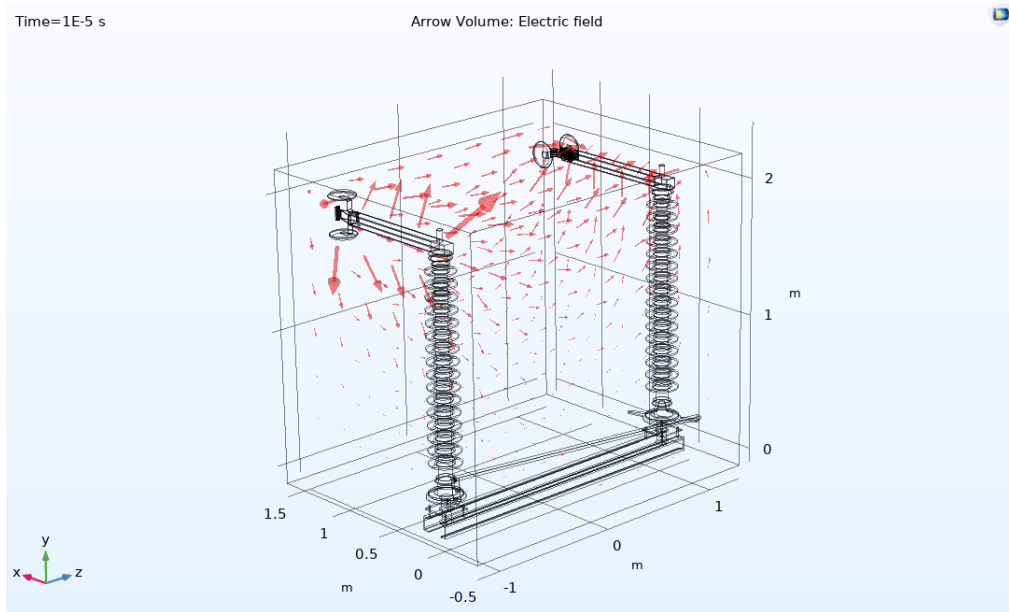
Şekil 4.12'den başlayarak Şekil 4.14'e kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel

dağılımının maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Topraklanan uçta ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır. Şekil 4.15'te açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $1 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



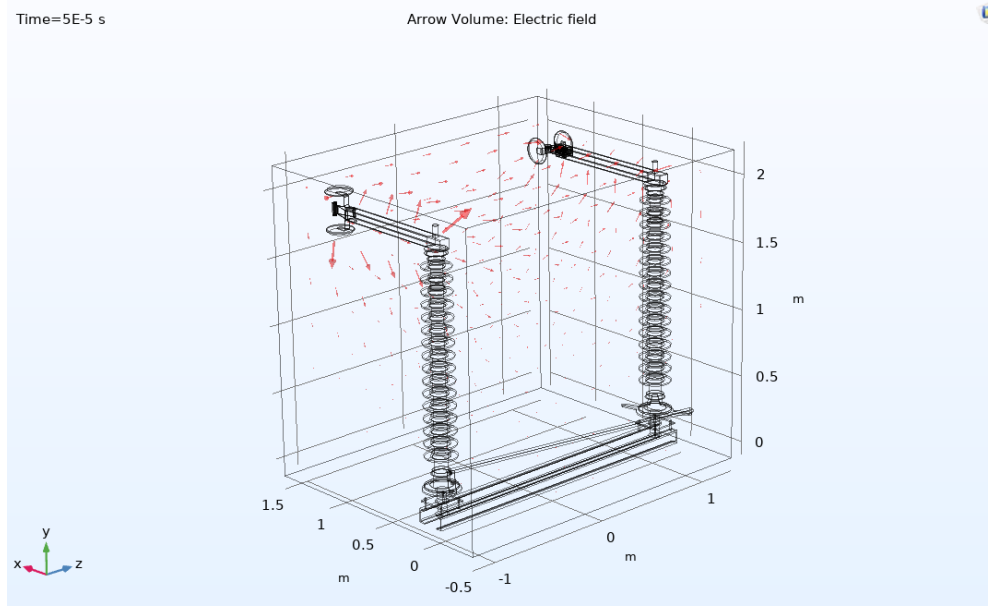
Şekil 4.15: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $1 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.16'da açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.16: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

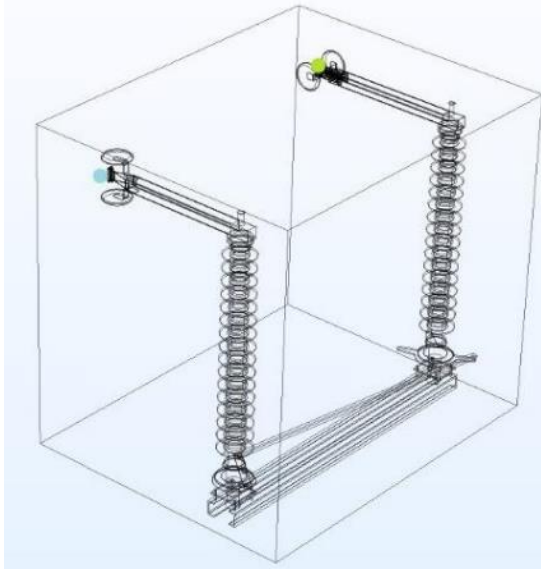
Şekil 4.17’de açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



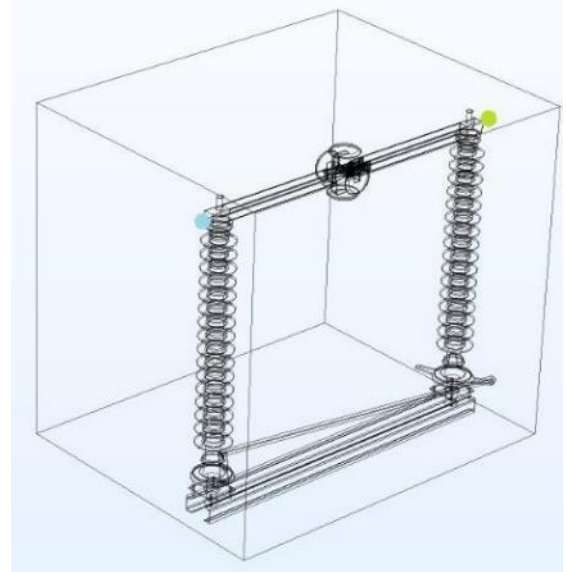
Şekil 4.17: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.15’ten başlayarak Şekil 4.17’ye kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektrik alan dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin anlık gerilim seviyesiyle doğru orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca, en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında ve geometrik olarak süreksizlik barındıran alanlarda meydana geldiği de görülmektedir.

Yukarıda verilen şekillerin dışında model üzerinde belirlenecek herhangi bir noktadaki elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri de verilebilir. Comsol’dan alınan analiz çıktıları incelenerek elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu noktalar belirlenmiştir. Buna göre ayırıcıların en fazla zorlanmaya maruz kaldığı noktalar olan kontakların ve uçların yüzeyinde birer nokta belirlenmiştir. Ayırıcının açık pozisyonu için en fazla zorlanmanın meydana geldiği yer kontaklar olurken, ayırıcının kapalı pozisyonu için en fazla zorlanmanın meydana geldiği yer uçlardır. Belirlenen bu noktalar Şekil 4.18’deki gibidir.



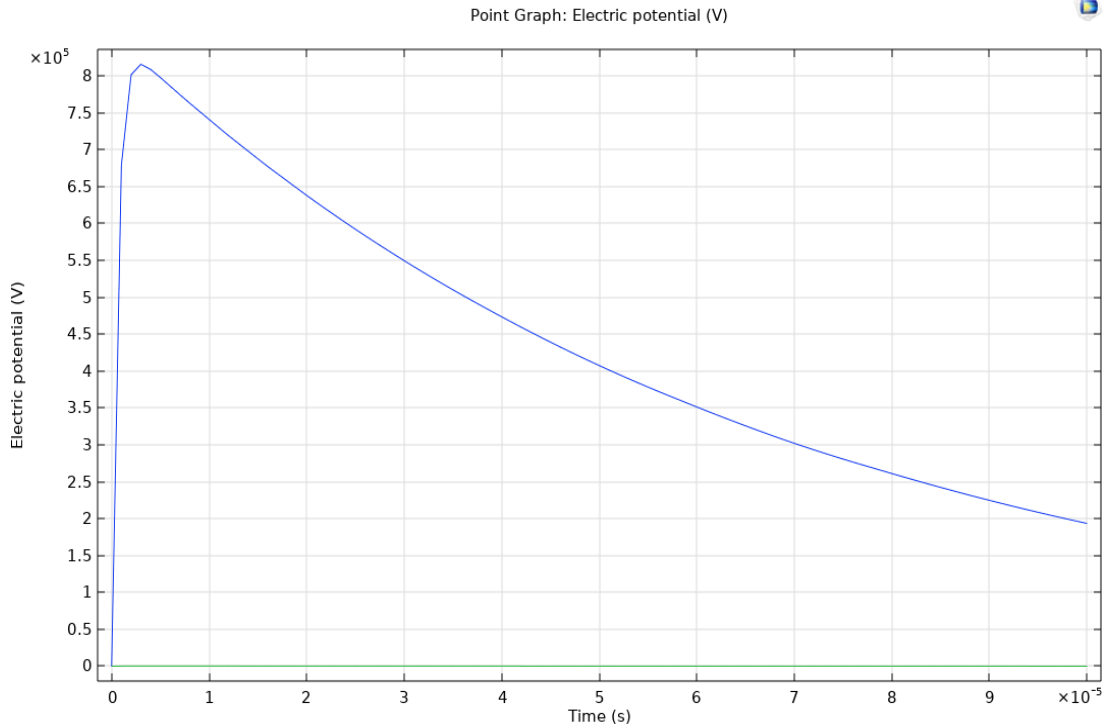
Ayırıcı açık konumda (mavi-yeşil nokta)



Ayırıcı kapalı konumda (mavi-yeşil nokta)

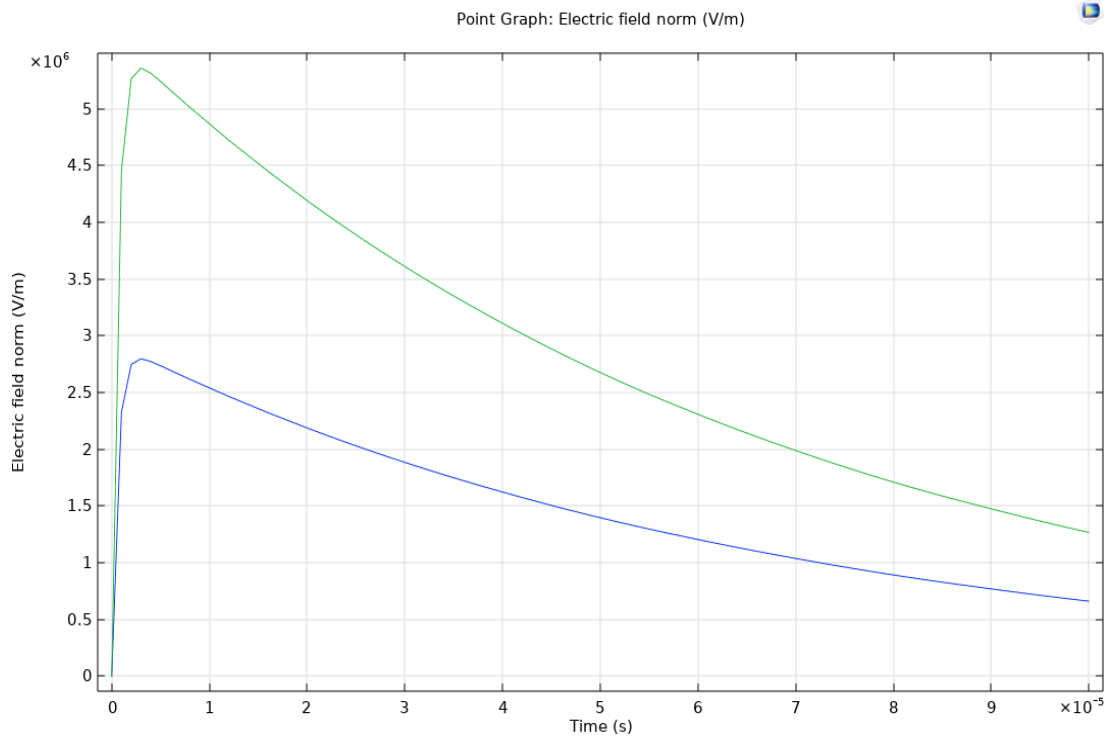
Şekil 4.18: Kontak ve terminal yüzeylerinde belirlenen noktalar.

Ayırıcının açık pozisyonu için Şekil 4.18’de belirtilen noktalara ait elektriksel potansiyel – zaman grafiği Şekil 4.19’da, elektrik alan – zaman grafiği Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.19: Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak hareket ettiği Şekil 4.19’da görülmektedir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontakta herhangi bir elektriksel potansiyelin oluşmadığı görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin 820 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



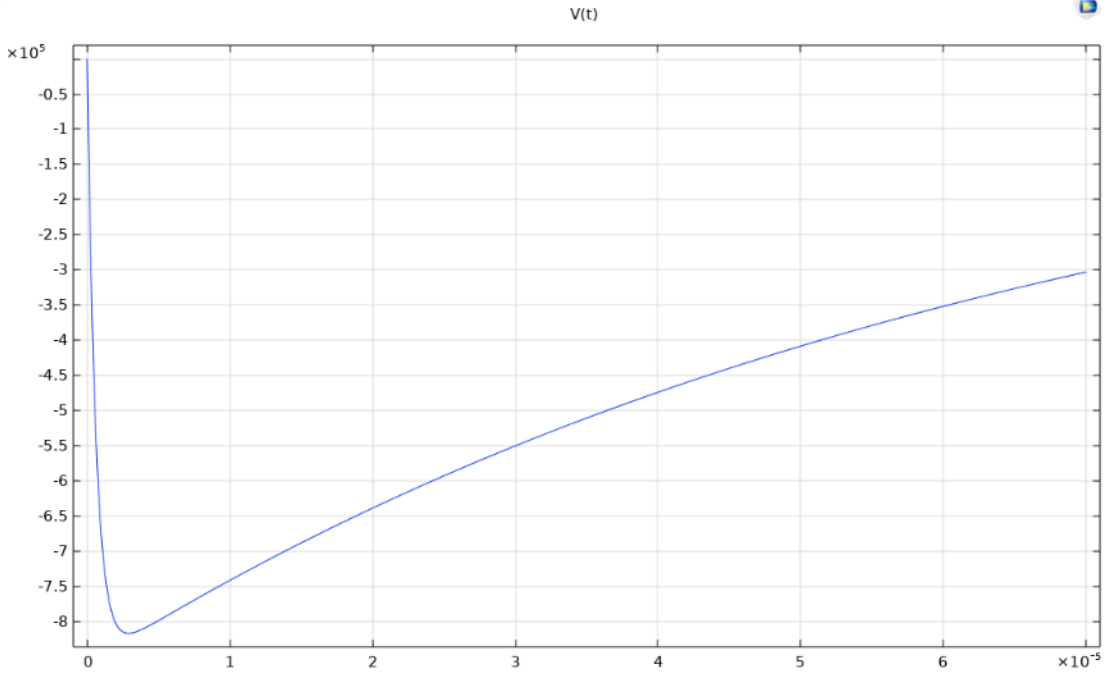
Şekil 4.20: Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktada meydana gelen elektrik alanın zamana bağı değişimi.

Uygulanan gerilime bağı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanın zamana bağı değişimi incelenmiştir. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan uçlara ait kontaklarda oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak hareket ettiği Şekil 4.20’de görülmektedir.

Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 54 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise 27 kV/cm olmuştur.

4.2.1.2 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması

Ayırıcı açık pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının ayırma aralığının (standart deyimi ile yalıtım mesafesi / isolation distance), ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen yıldırım darbesi gerilimi altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin tepe değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 860 kV olarak verilmiştir. Esasen bu deney bir önceki adımda uygulanan deney ile aynı şartlarda, aynı gerilim seviyesinde fakat yıldırım darbe gerilimi negatif kutuplu olacak şekilde uygulanmıştır. Bunun sebebi yıldırım darbe geriliminin çift kutuplu bir gerilim olması ve yıldırım darbe gerilimi deneylerinin standart tarafından her iki kutup için de yapılmasını şart koşmasıdır.

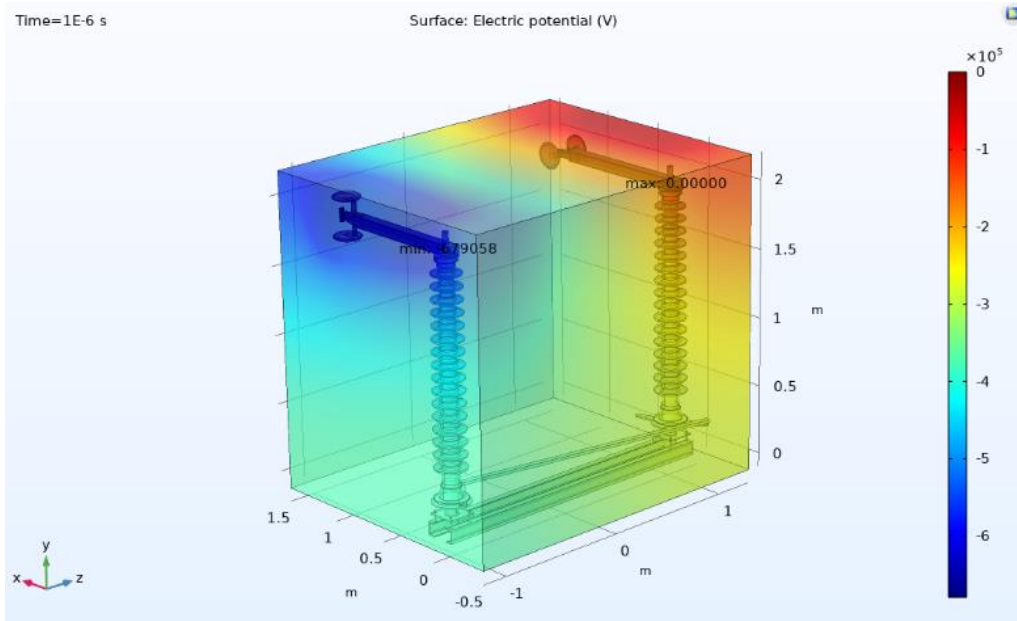


Şekil 4.21: Comsol’da oluşturulan negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.

Denklem (4.3)’te fonksiyonu ve Şekil 4.21’de grafiği verilen negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken uygulanmıştır. Negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, diğer ucu topraklanmıştır.

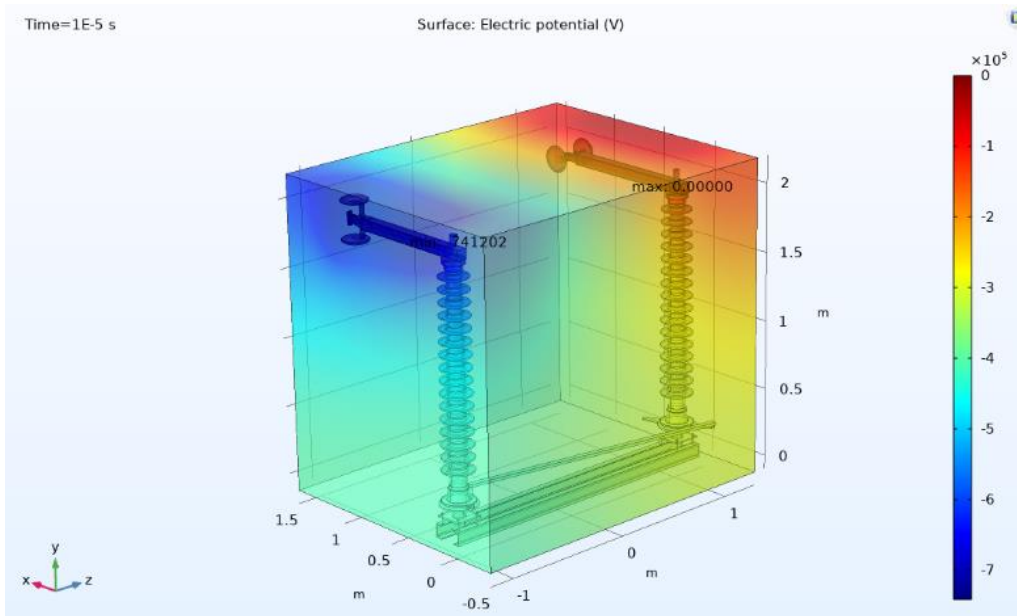
Negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.22’de açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



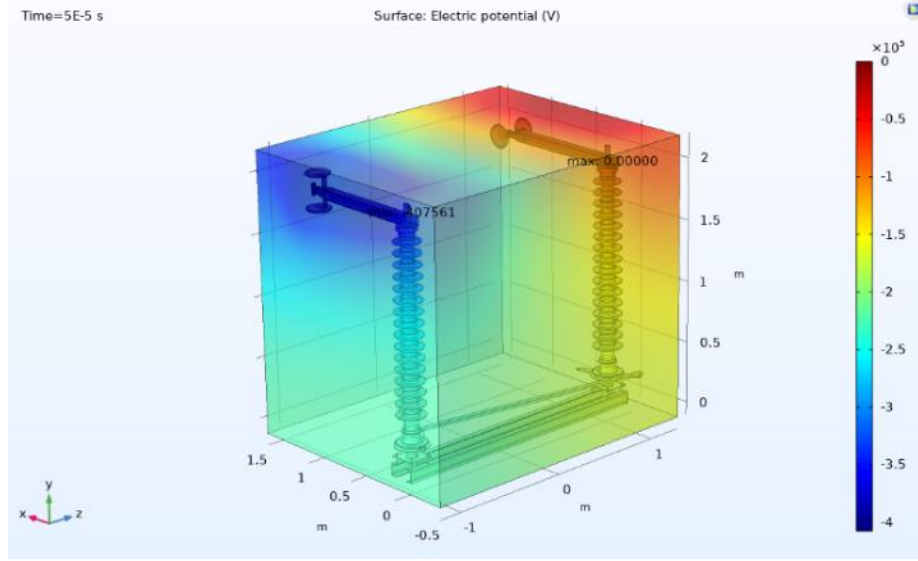
Şekil 4.22: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.23’de açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



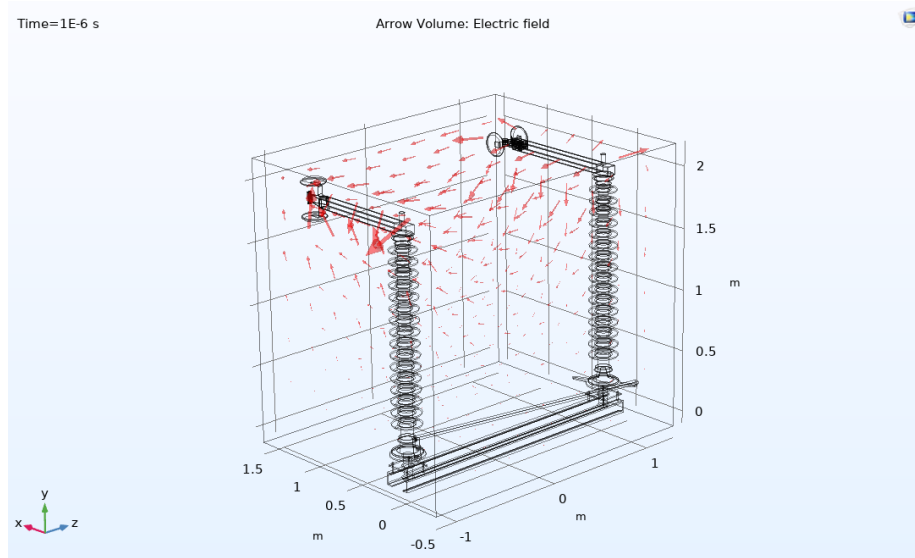
Şekil 4.23: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.24’te açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



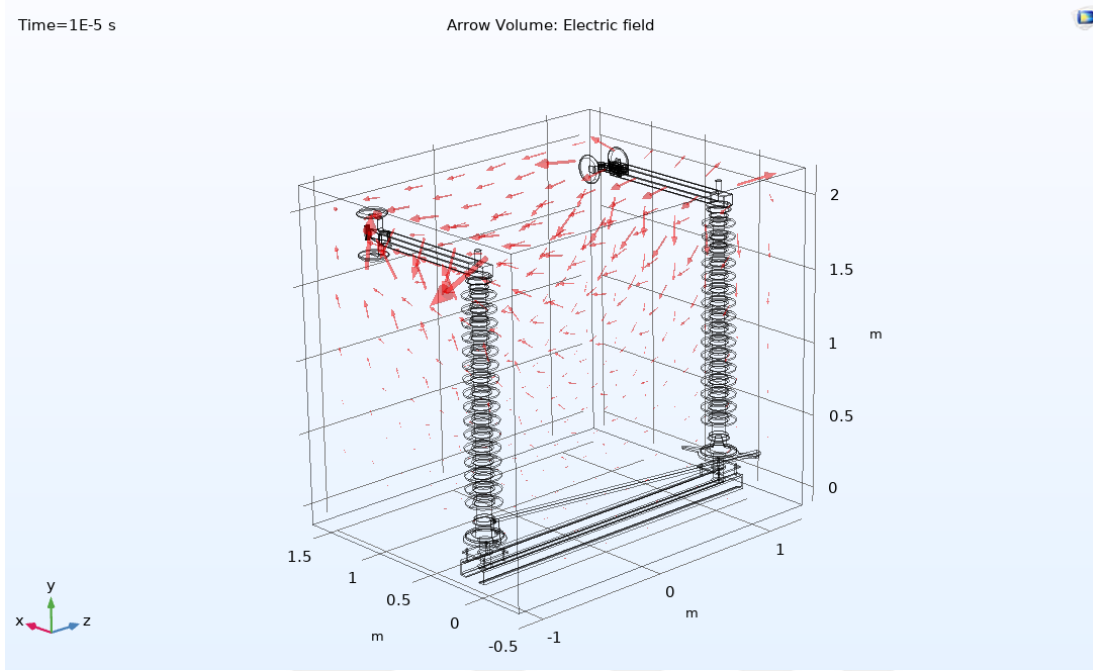
Şekil 4.24: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.22'den başlayarak Şekil 4.24'e kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının mutlak maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Topraklanan uçta ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır. Şekil 4.25'te açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



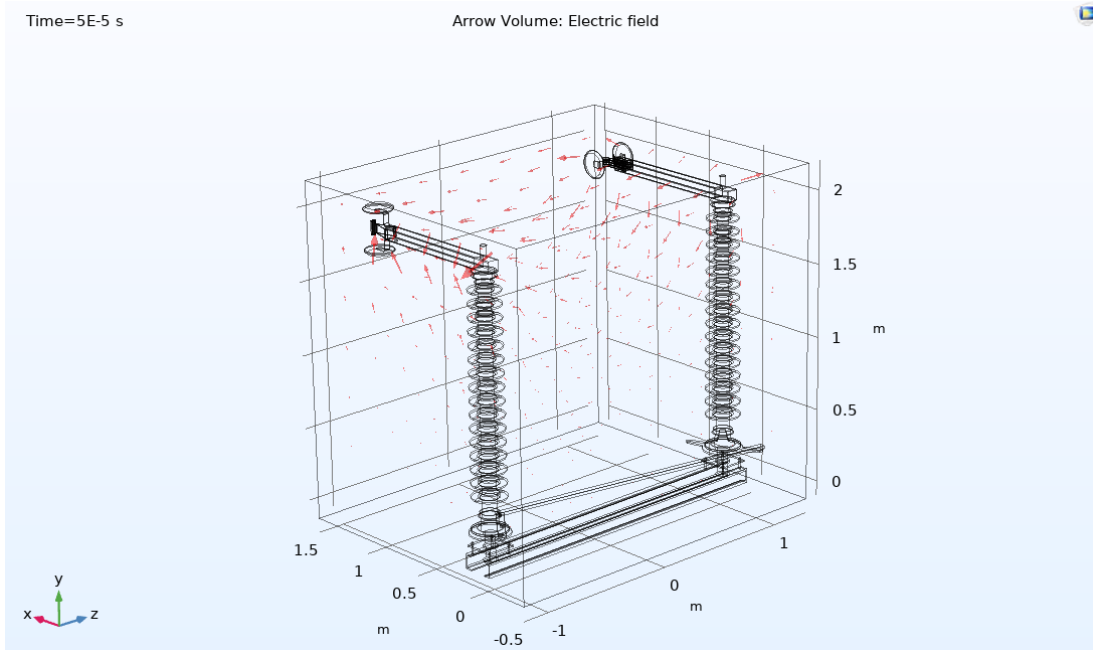
Şekil 4.25: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.26’da açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.26: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

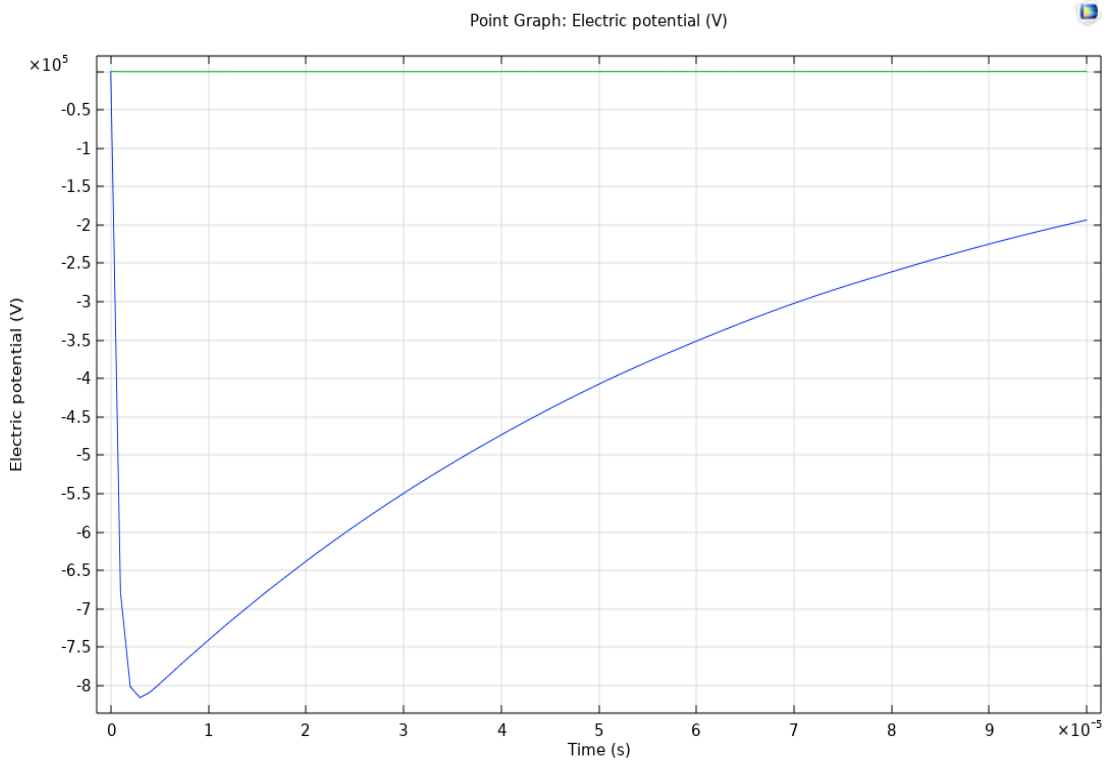
Şekil 4.27’de açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.27: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.25'ten başlayarak Şekil 4.27'ye kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzeri elektrik alan dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin anlık gerilim seviyesiyle doğru orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca, en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

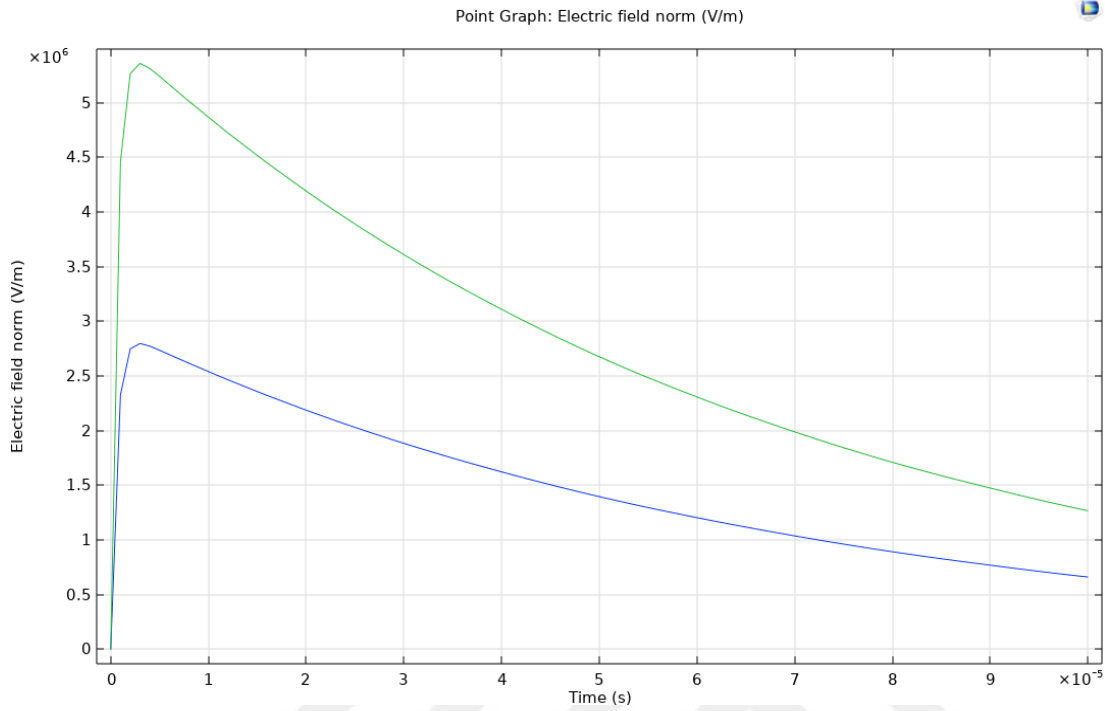
Ayırıcının açık pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18'de gösterilmiş olan noktalara ait, negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.28: Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak hareket ettiği Şekil 4.28'de görülmektedir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontakta herhangi bir elektriksel potansiyelin oluşmadığı görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında gerilim

uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin -820 kV mertebelerinde olduğu söylenebilir.



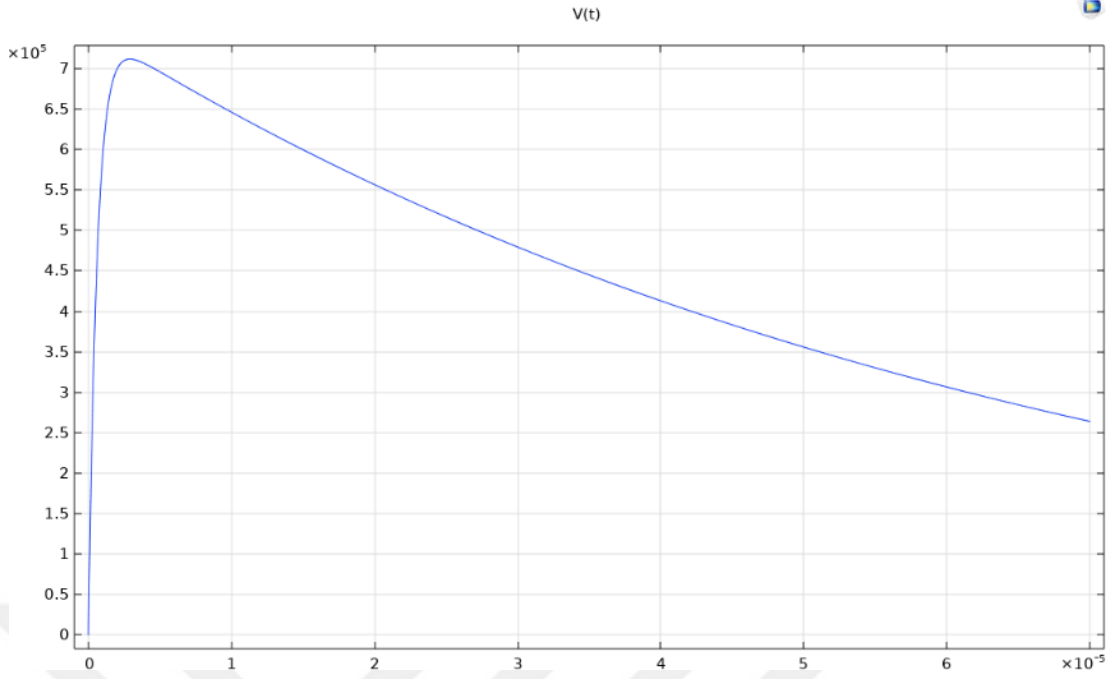
Şekil 4.29: Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan uçlara ait kontaklarda oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.29’da görülmektedir.

Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan şiddeti değerinin 54 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise 27 kV/cm olmuştur.

4.2.1.3 Ayırıcı açık iken faz – toprak arası pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması

Ayırıcı açık pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının faz – toprak arası dayanımının, ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen yıldırım darbesi gerilimi altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin tepe değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 750 kV olarak verilmiştir.



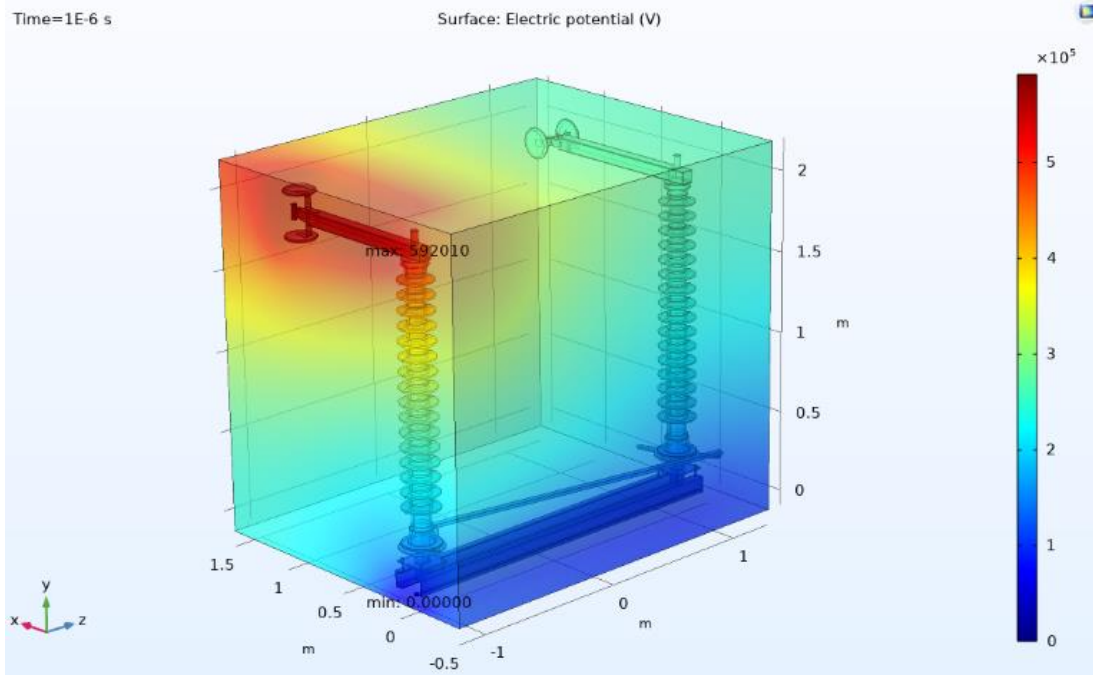
Şekil 4.30: Comsol’da oluşturulan pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.

Denklem (4.4)’te fonksiyonu ve Şekil 4.30’da grafiği verilen pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken uygulanmıştır. Pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, şasesi ise topraklanmıştır. Şasenin topraklanmasının sebebi ayırıcının sağladığı yalıtımın koordinasyonunda faz – toprak aralığına atanan dayanımın karşılanıp karşılanmadığının ispatı ihtiyacıdır.

Açık pozisyonadaki ayırıcının ucundan topraklanmış olan şasesine uygulanan gerilimin büyüklüğünün, aynı faza ait uçlar arasında uygulanan ve bir önceki kısımda incelenen büyüklükten küçük olması daha önce de açıklandığı gibi yalıtım koordinasyonu amaçlıdır. Ayırıcının kullanıldığı sahalarda açık pozisyonadaki ayırıcının topraklanmamış ucuna bir yıldırım darbesi ulaşması halinde, ya faz-toprak yalıtımını delemeyip yansıması, ya da bir yalıtım delinmesi oluşacaksa faz-toprak arasında bir atlama ile yaşanması için gerekli düzen sağlanmış olur. Böylece ayırıcının sağladığı emniyet ile diğer uç tarafında yapılması olası bakım çalışmalarını yürütecek personelin ve ekipmanın güvenliği sağlanmış olur.

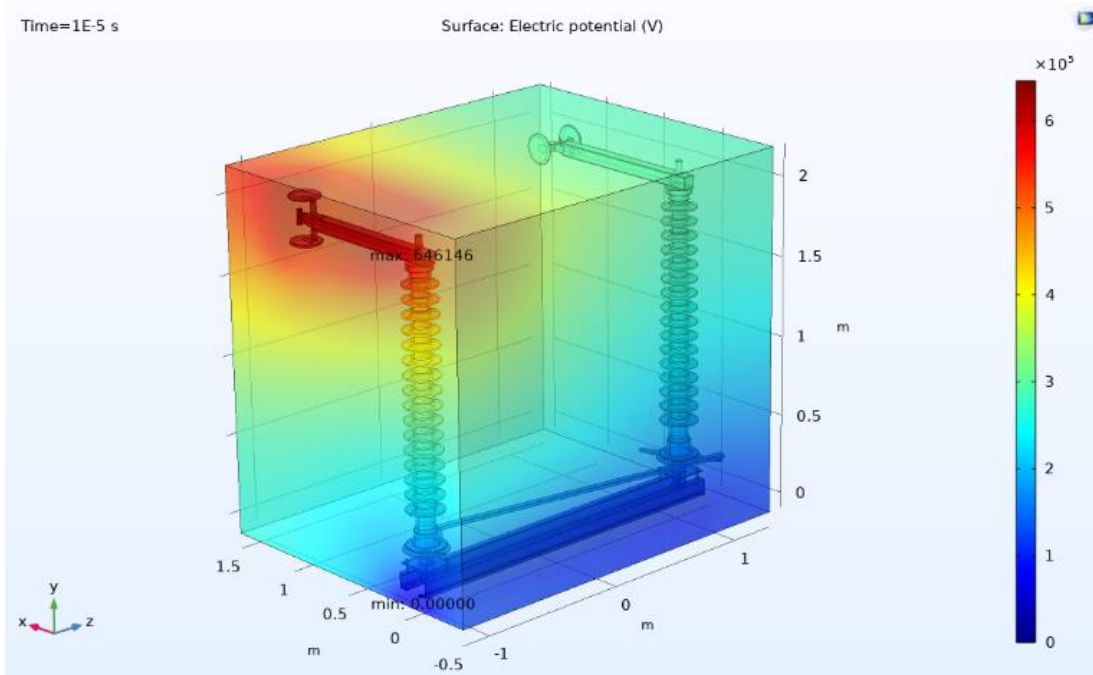
Pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.31’de açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



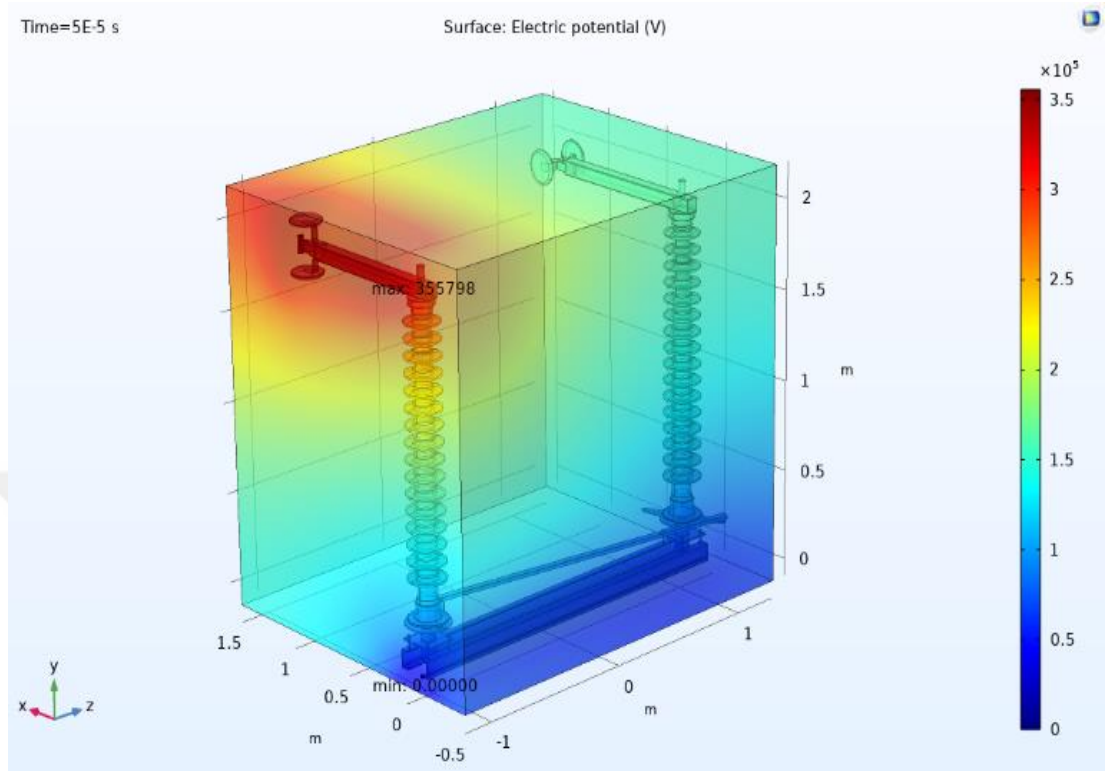
Şekil 4.31: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.32’de açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.32: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

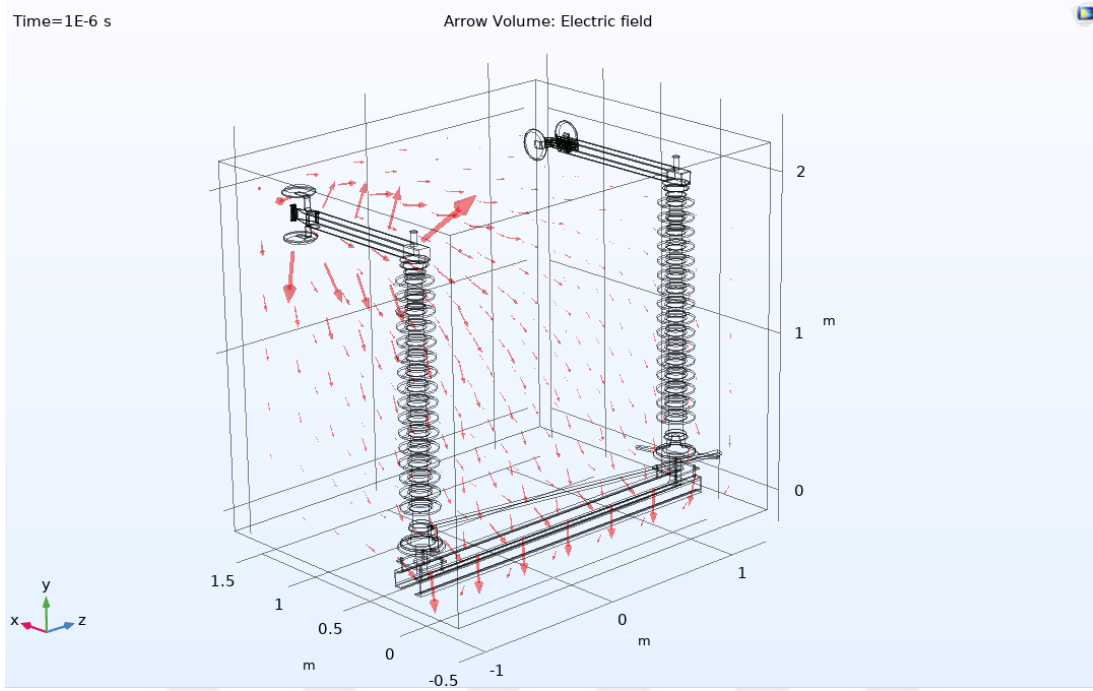
Şekil 4.33'te açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.33: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

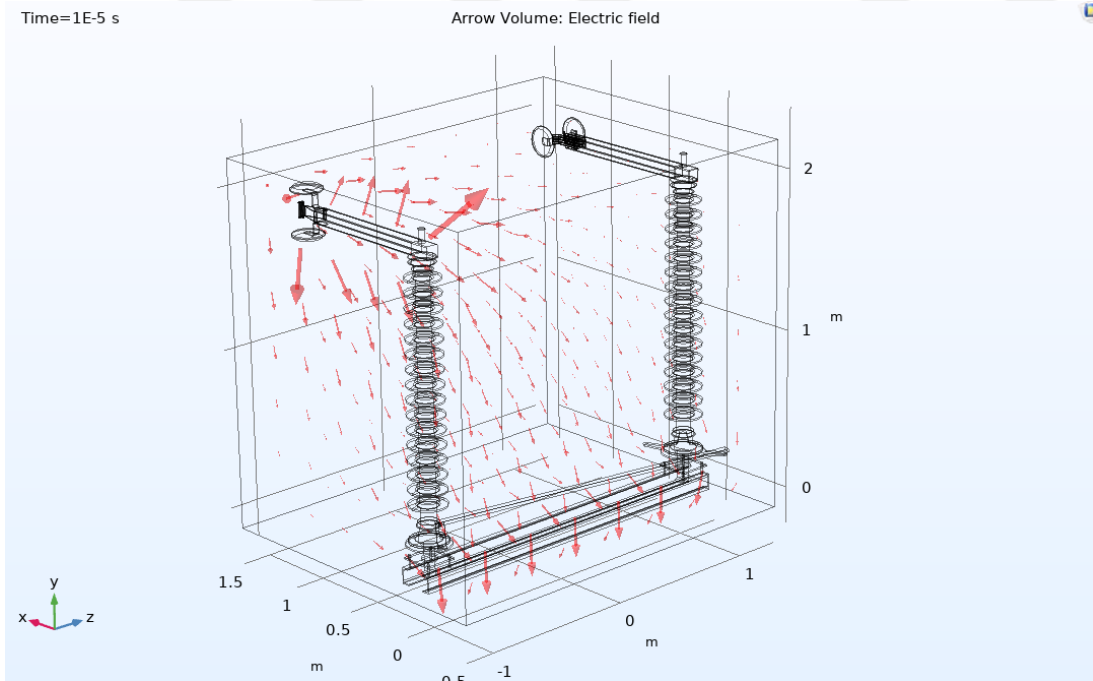
Şekil 4.31'den başlayarak Şekil 4.33'e kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Topraklanan şasede ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır.

Şekil 4.34'te açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



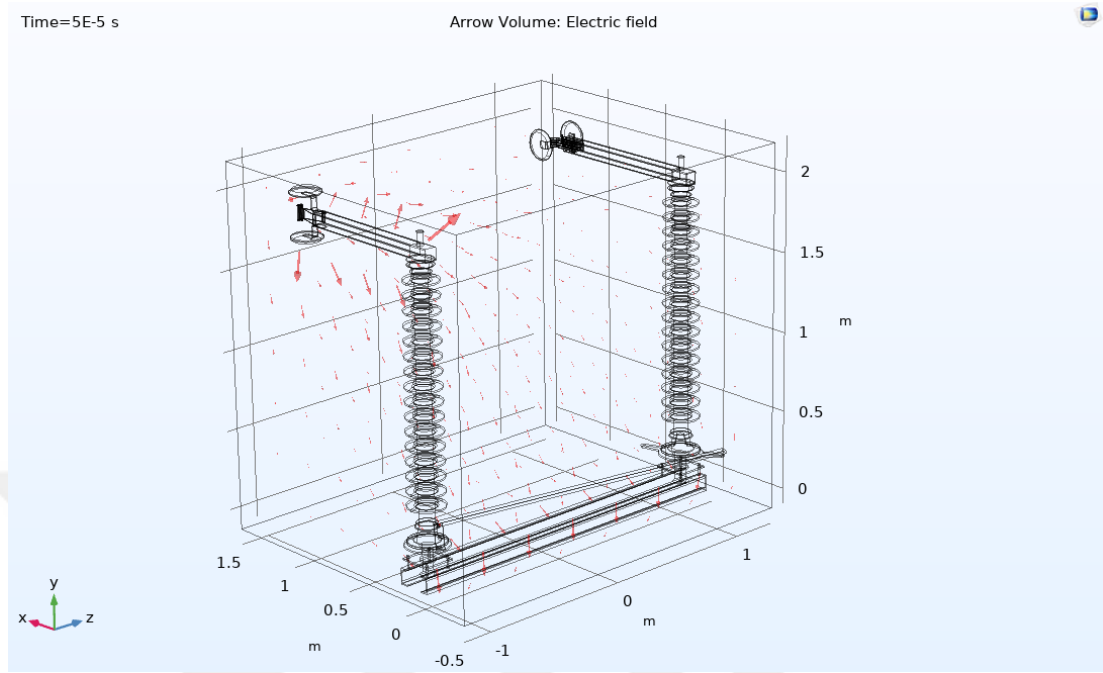
Şekil 4.34: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $1 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.35'te açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.35: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

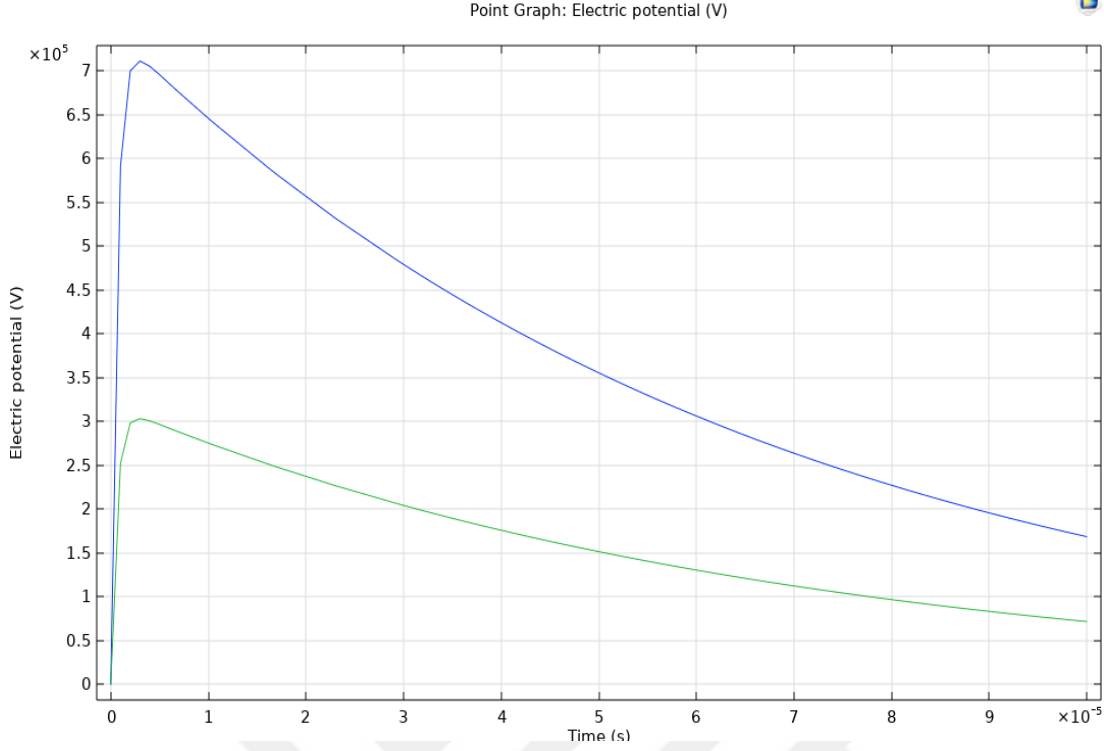
Şekil 4.36’da açık durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.36: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.34’ten başlayarak Şekil 4.36’ya kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzeri elektrik alan dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin anlık gerilim seviyesiyle doğru orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca, en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

Ayırıcının açık pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18’de gösterilmiş olan noktalara ait, pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.37 ve Şekil 4.38’de verilmiştir.

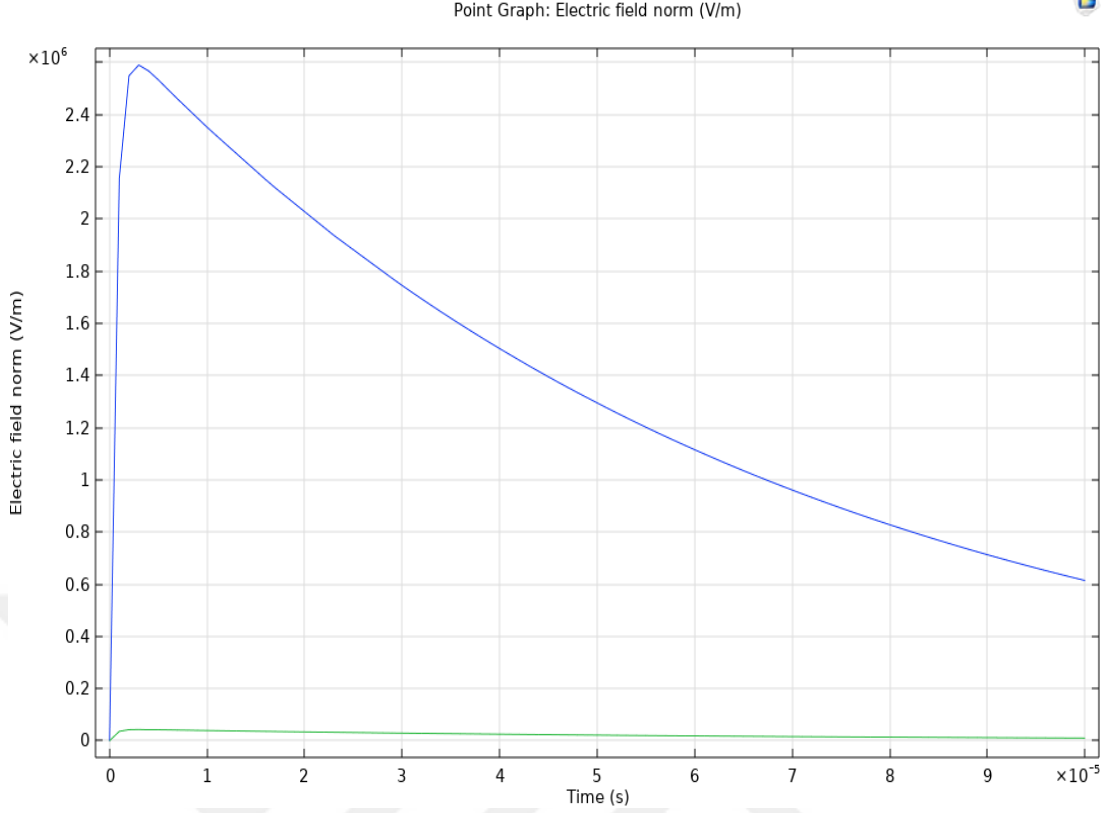


Şekil 4.37: Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.37’de görülmektedir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin de uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğu ancak değerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Tüm analiz göz önüne alındığında gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin 710 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanının zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.38’de görülmektedir.

Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 25 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise ihmal edilebilir düzeyde olmuştur.

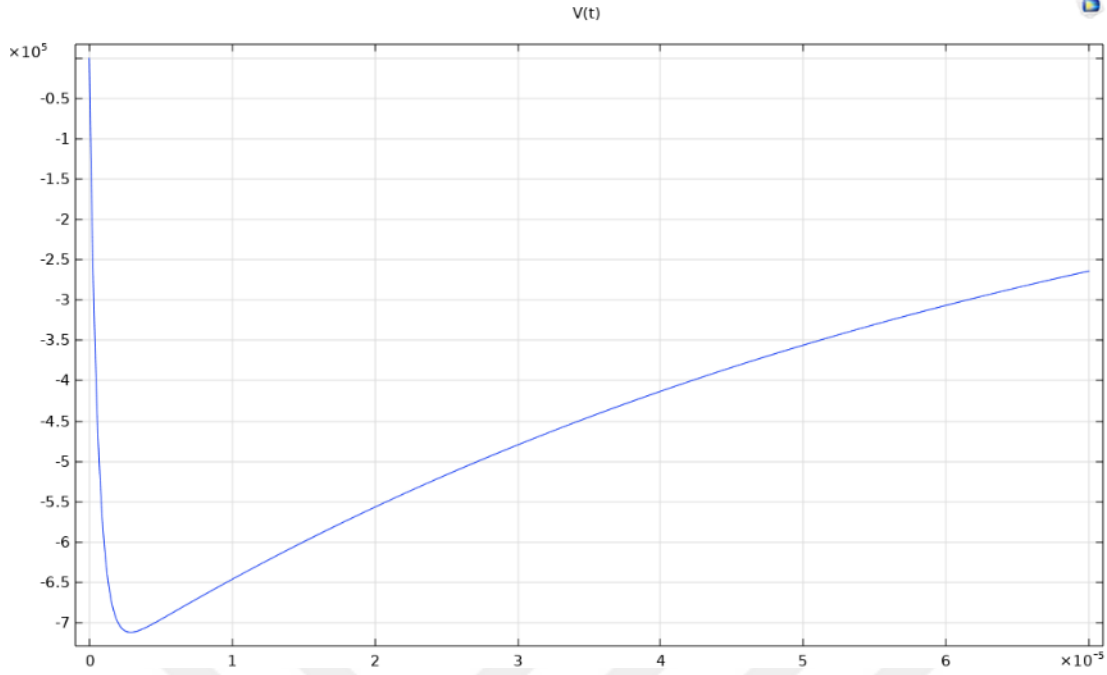


Şekil 4.38: Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

4.2.1.4 Ayırıcı açık iken faz – toprak arası negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması

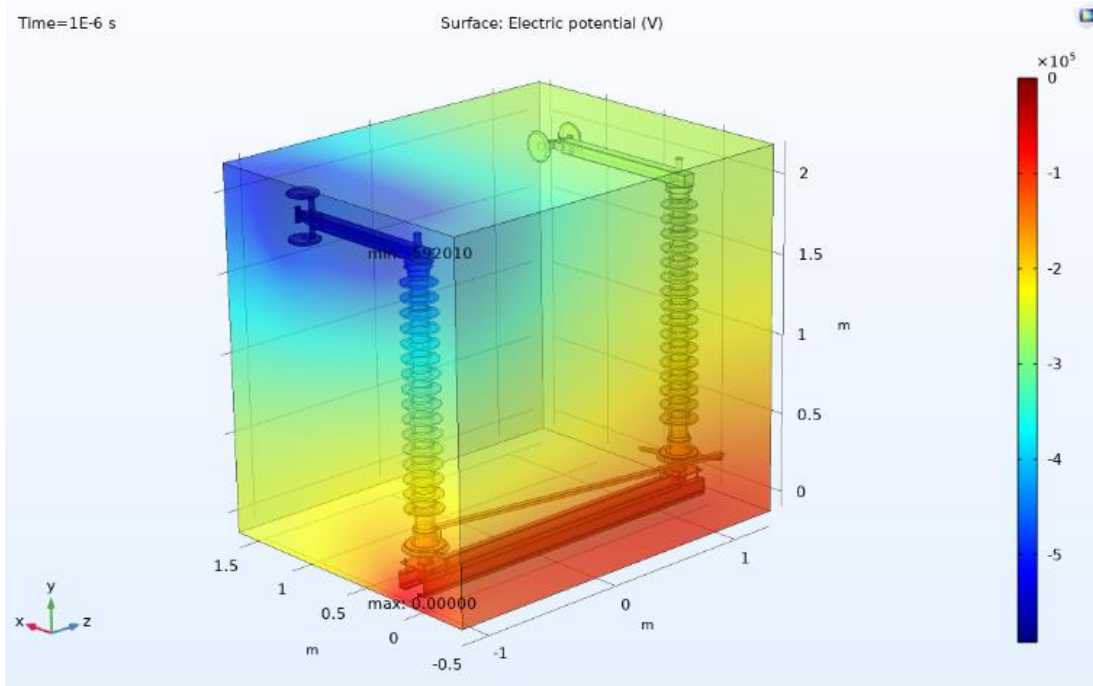
Ayırıcı açık pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının faz – toprak arası dayanımının, ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen yıldırım darbesi gerilimi altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin tepe değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 750 kV olarak verilmiştir. Esasen bu deney bir önceki adımda uygulanan deney ile aynı şartlarda, aynı gerilim seviyesinde fakat yıldırım darbe gerilimi negatif kutuplu olacak şekilde uygulanmıştır. Bunun sebebi yıldırım darbe geriliminin çift kutuplu bir gerilim olması ve yıldırım darbe gerilimi deneylerinin standart tarafından her iki kutup için de yapılmasını şart koşmasıdır.

Denklem (4.5)’te fonksiyonu ve Şekil 4.39’da grafiği verilen negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken uygulanmıştır. Negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, şasesi ise topraklanmıştır.



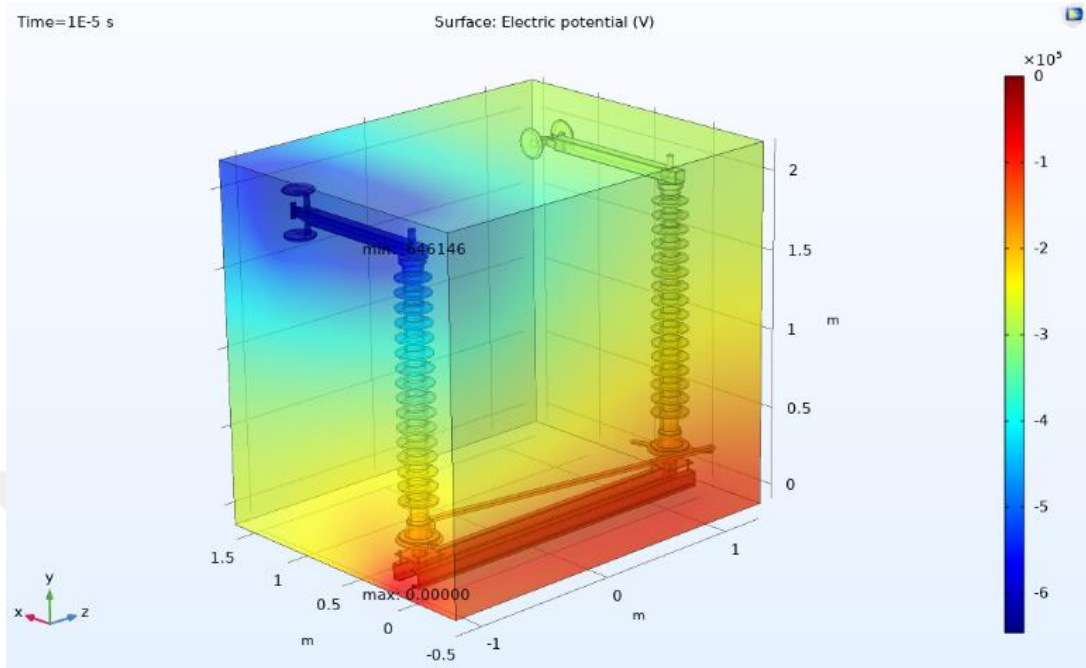
Şekil 4.39: Comsol’da oluşturulan negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.

Negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4.40’da açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



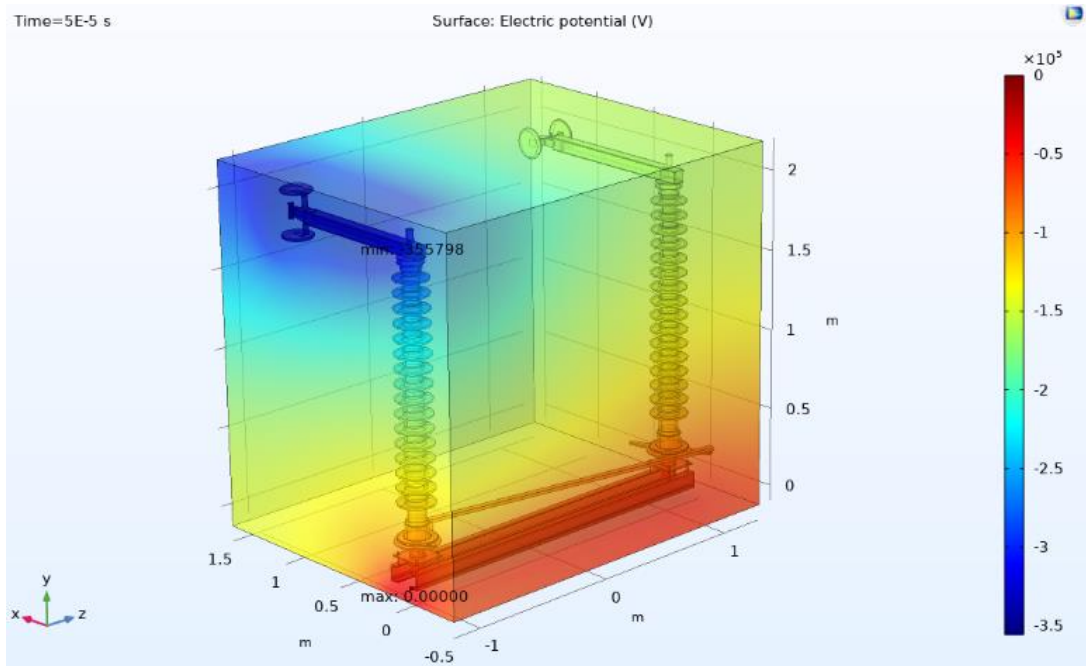
Şekil 4.40: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.41’de açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.41: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

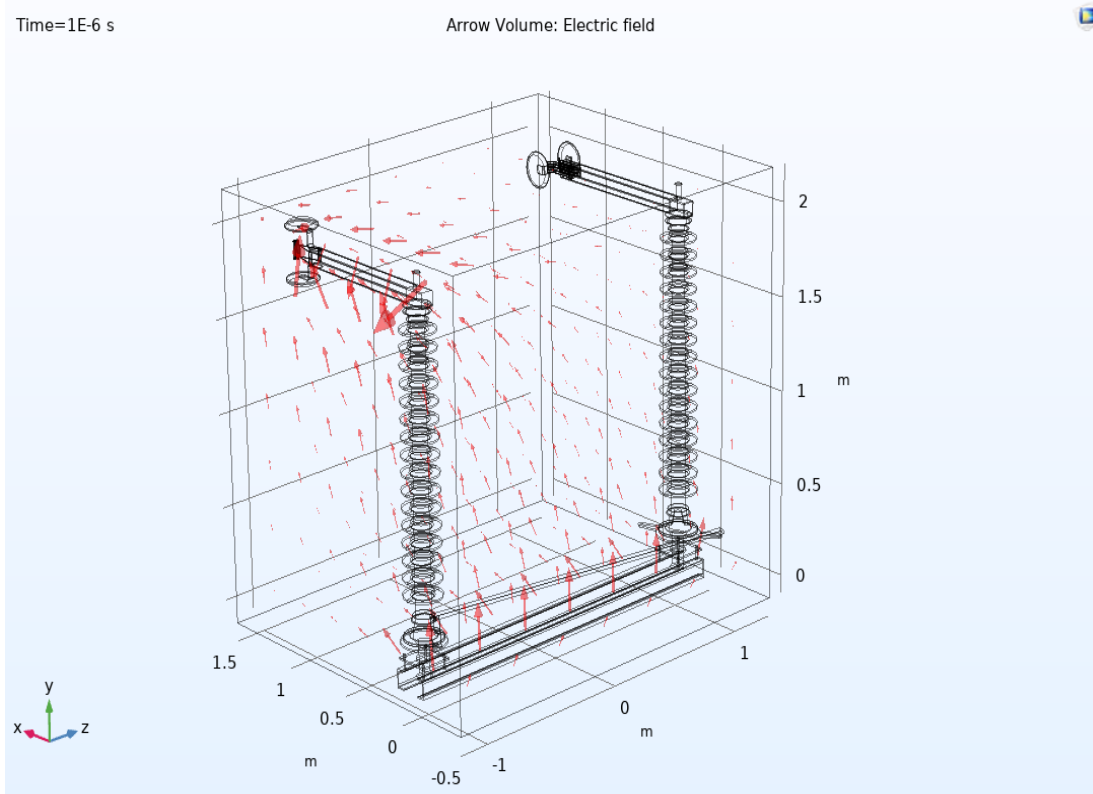
Şekil 4.42’de açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.42: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

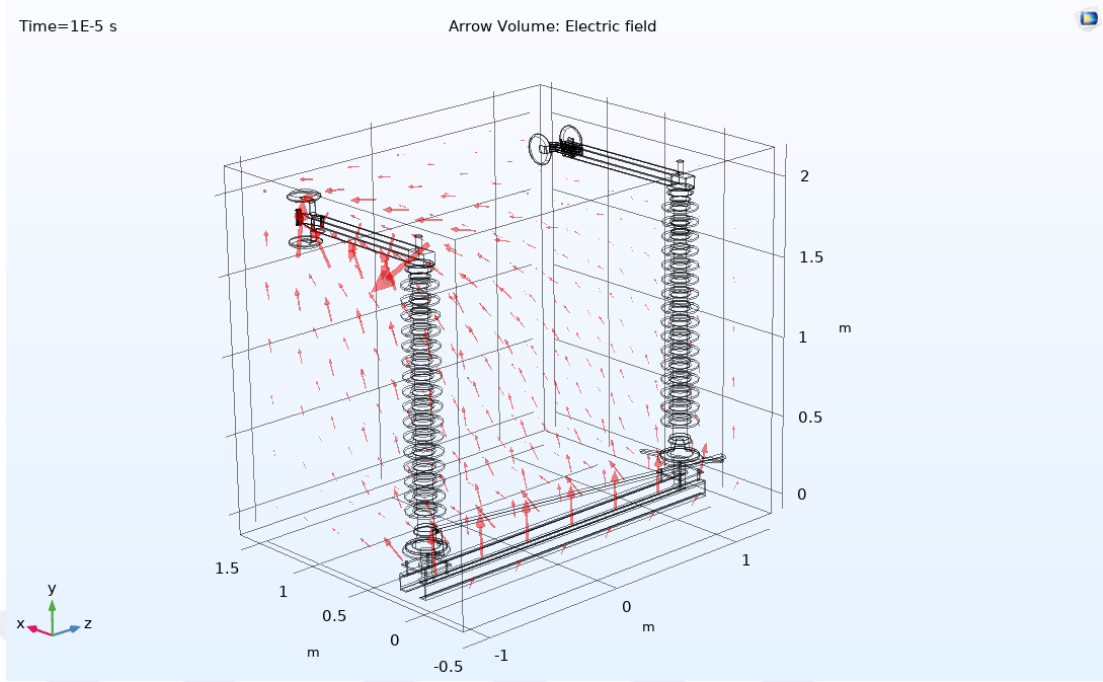
Şekil 4.40'dan başlayarak Şekil 4.42'ye kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının mutlak maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Topraklanan şasede ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır.

Şekil 4.43'te açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



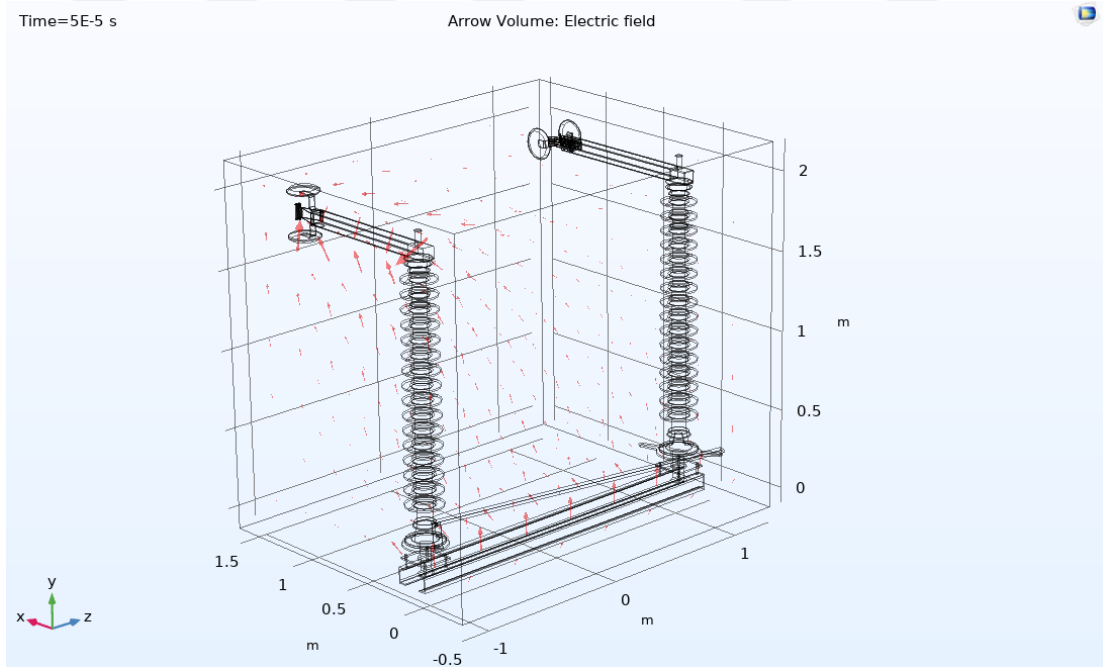
Şekil 4.43: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.44'te açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.44: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.45'te açık durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $50 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.

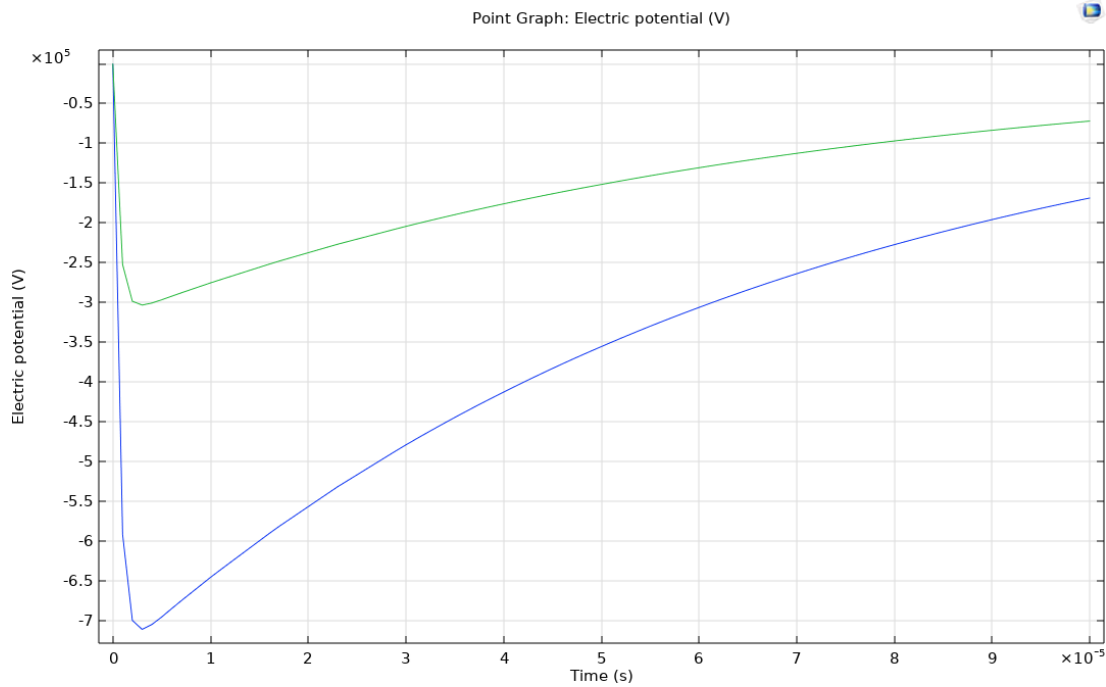


Şekil 4.45: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $50 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.43'ten başlayarak Şekil 4.45'e kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde

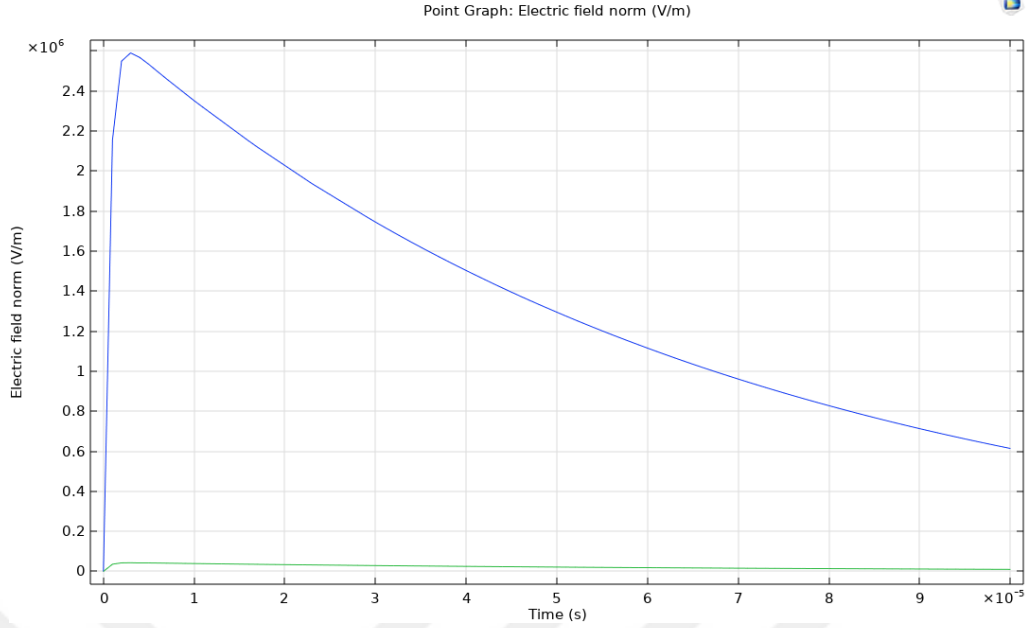
elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzeri elektrik alan dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin anlık gerilim seviyesiyle doğru orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

Ayırıcının açık pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18’de gösterilmiş olan noktalara ait, negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri de sırasıyla Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de verilmiştir.



Şekil 4.46: Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.46’da görülmektedir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin de uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğu ancak mutlak değerinin daha düşük söylenebilir. Tüm analiz göz önüne alındığında gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değer -710 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.47: Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

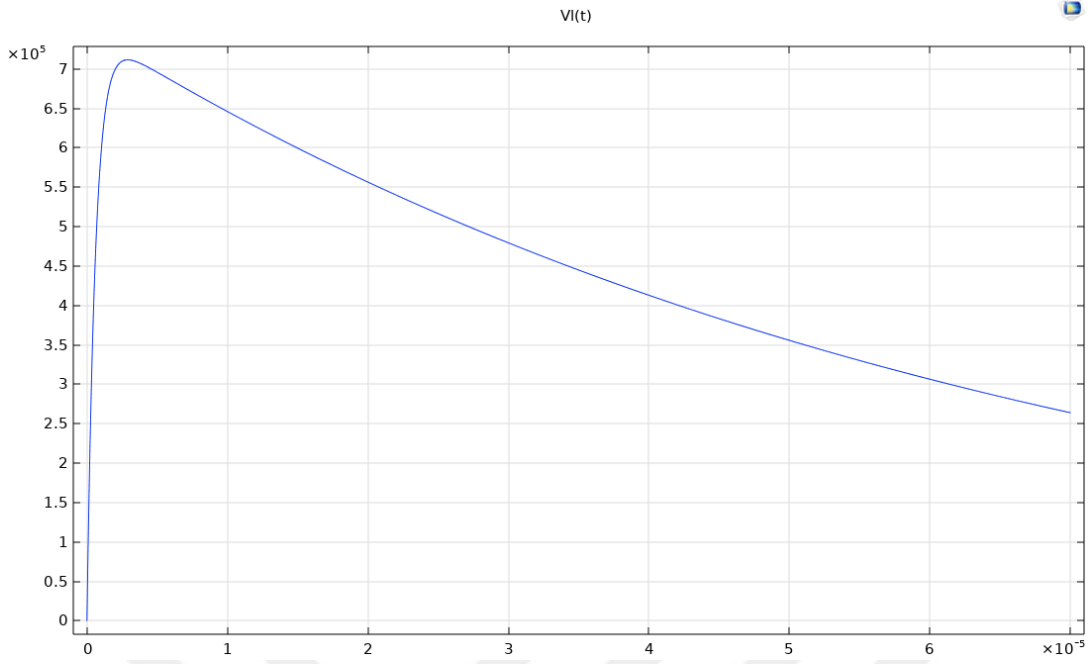
Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak hareket ettiği Şekil 4.47’de görülmektedir.

Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 25 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise ihmal edilebilir düzeyde olmuştur.

4.2.1.5 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması

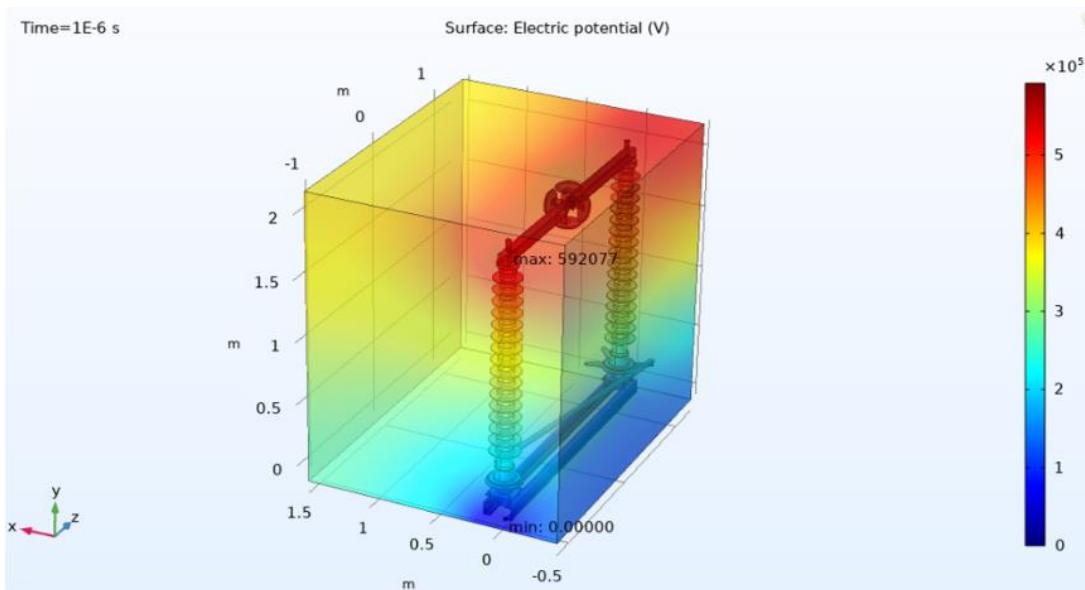
Ayırıcı kapalı pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının faz – toprak arası dayanımının, ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen yıldırım darbesi gerilimi altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin tepe değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 750 kV olarak verilmiştir.

Denklem (4.4)’te fonksiyonu ve Şekil 4.48’de grafiği verilen pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi ayırıcıya kapalı pozisyondayken uygulanmıştır. Pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, şasesi ise topraklanmıştır.



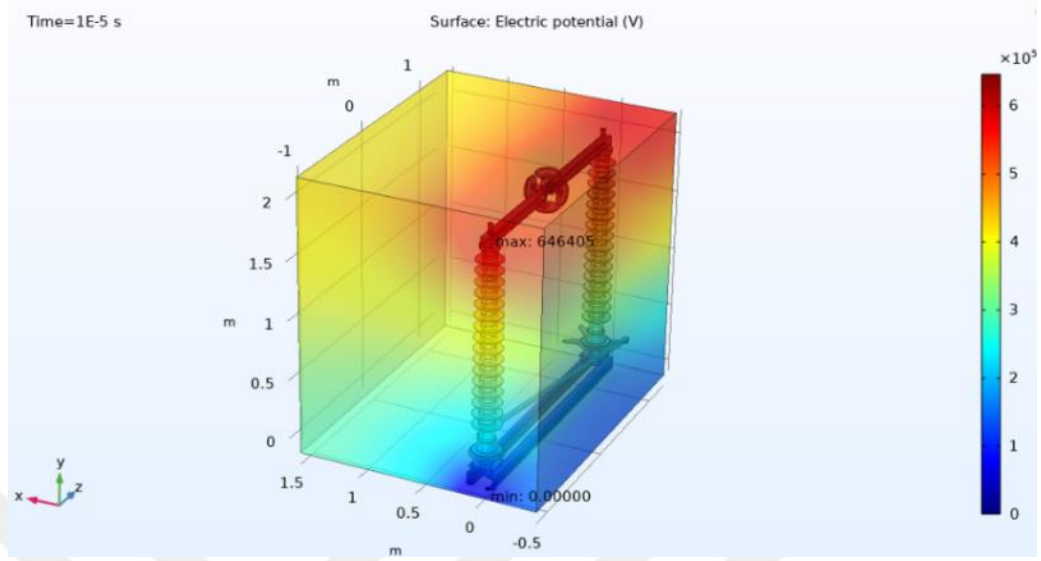
Şekil 4.48: Comsol’da oluşturulan pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.

Şasenin topraklanması sebebi ayırıcının sağladığı yalıtımın koordinasyonunda faz – toprak aralığına atanan dayanımın ayırıcının kapalı halinde oluşan yeni geometri ile karşılanıp karşılanmadığının ispatı ihtiyacıdır. Pozitif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4.49’da kapalı durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



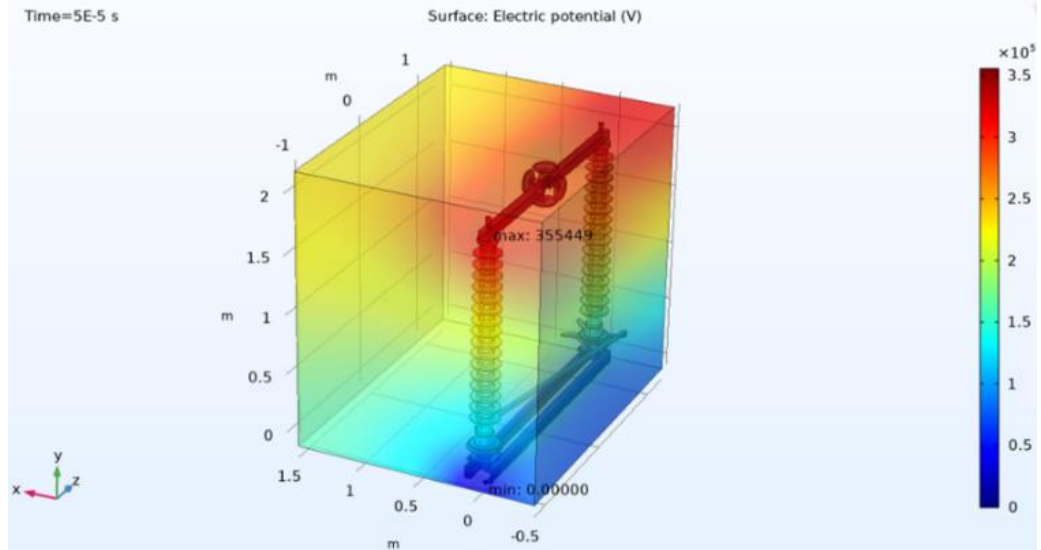
Şekil 4.49: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.50’de kapalı durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.50: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

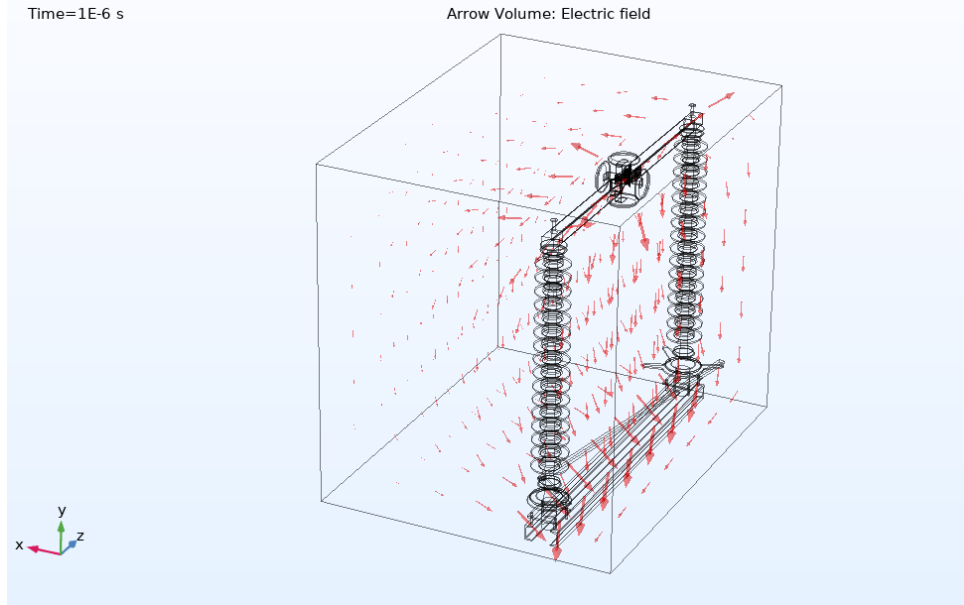
Şekil 4.51’de kapalı durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.51: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

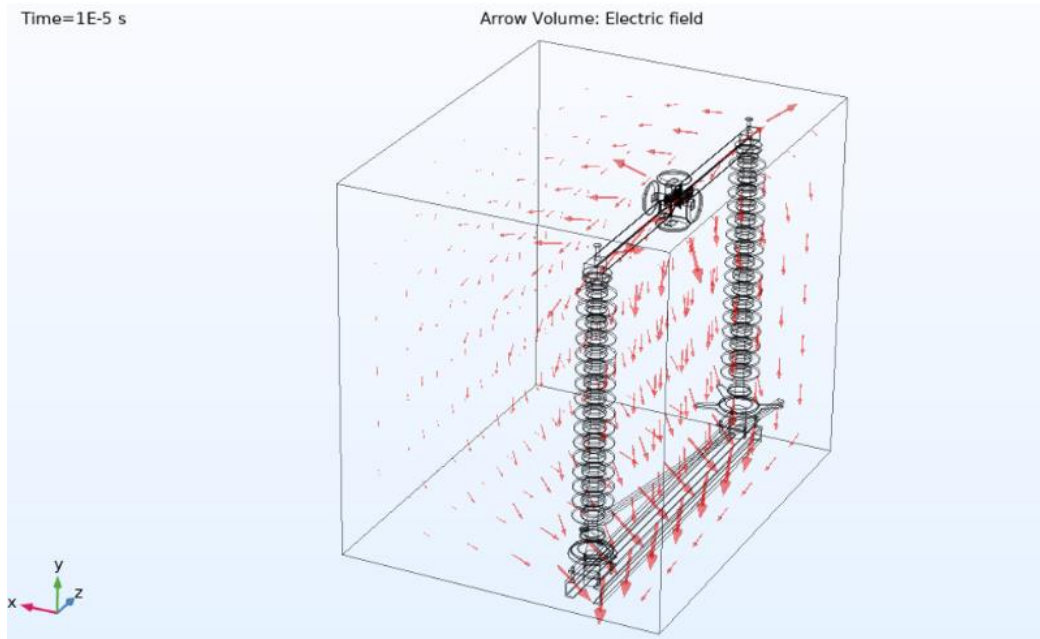
Şekil 4.49’den başlayarak Şekil 4.51’e kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel

dağılımının maksimum olduğu noktanın, gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Topraklanan şaseye ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır. Şekil 4.52’de kapalı durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $1\ \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



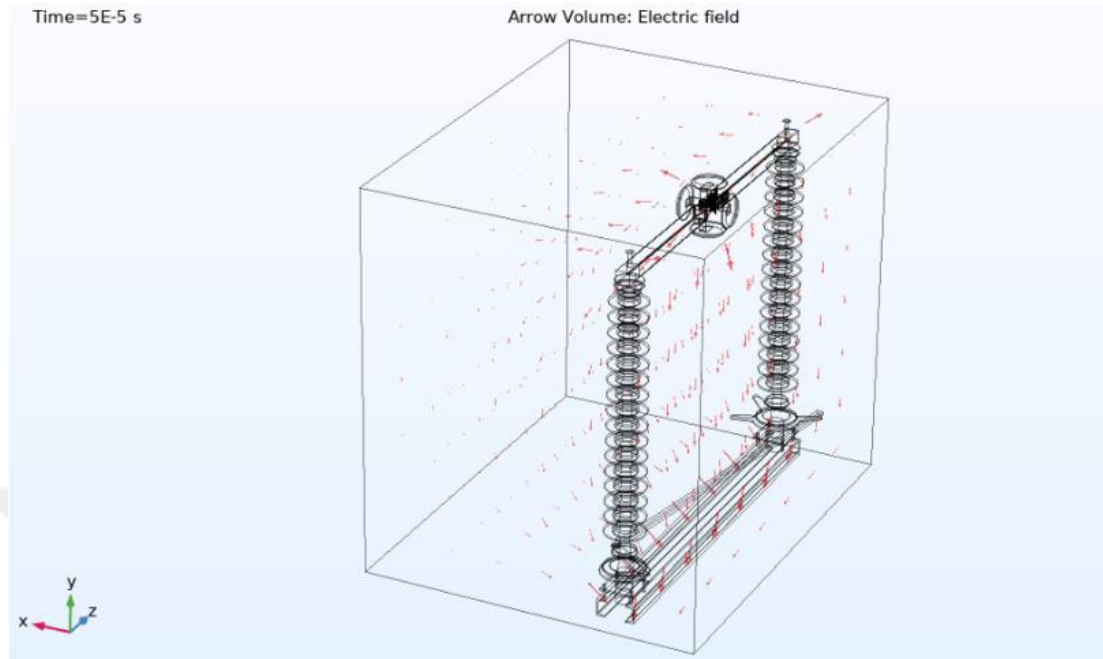
Şekil 4.52: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $1\ \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.53’te kapalı durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $10\ \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.53: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan $10\ \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.54'te kapalı durumdaki ayırıcıya pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.

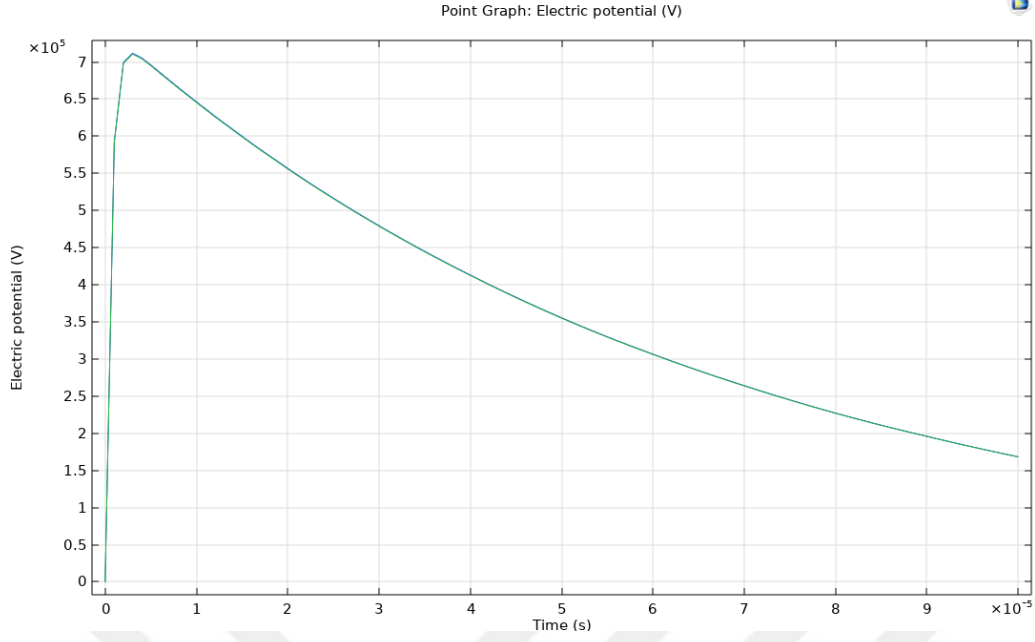


Şekil 4.54: Pozitif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.52'den başlayarak Şekil 4.54'e kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde, elektriksel potansiyel dağılımının ve elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektrik alan dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin anlık gerilim seviyesiyle doğru orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin akım taşıyan kollar olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca, en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

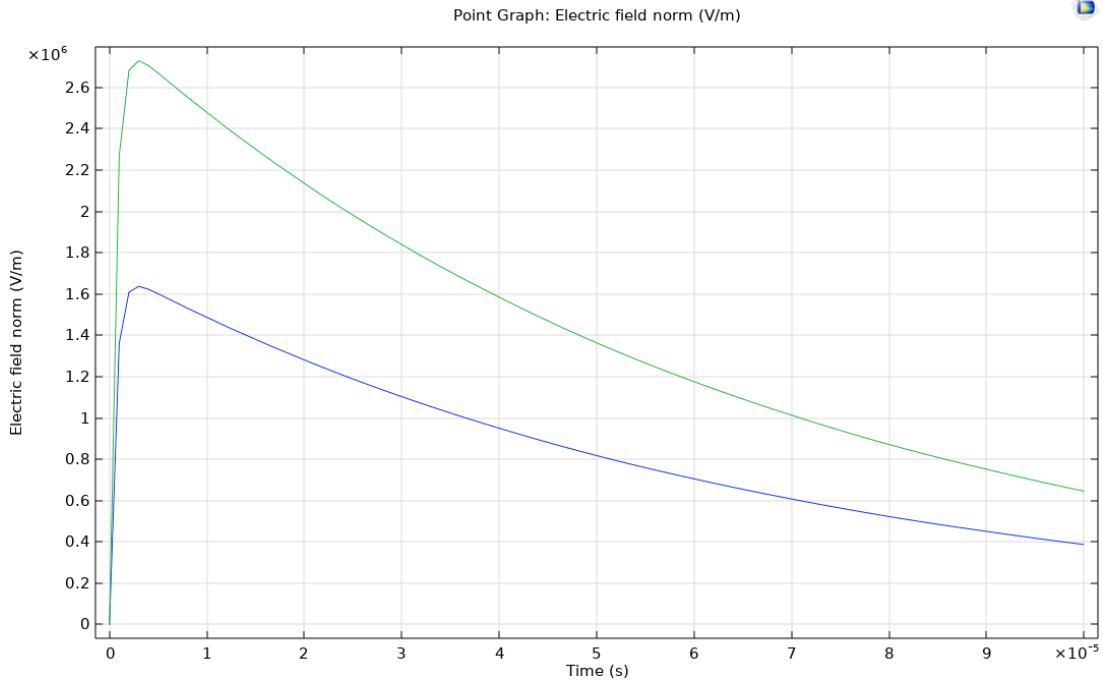
Ayırıcının kapalı pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18'de gösterilmiş olan noktalara ait, pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.55 ve Şekil 4.56'da verilmiştir.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uça oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.55'te görülmektedir.



Şekil 4.55: Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Gerilim uygulanmayan uçta oluşan elektriksel potansiyelin de uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Tüm analiz göz önüne alındığında hem gerilim uygulanan uç yüzeyinde hem de gerilim uygulanmayan uç yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değer 710 kV mertebelerinde olduğu söylenilebilir.

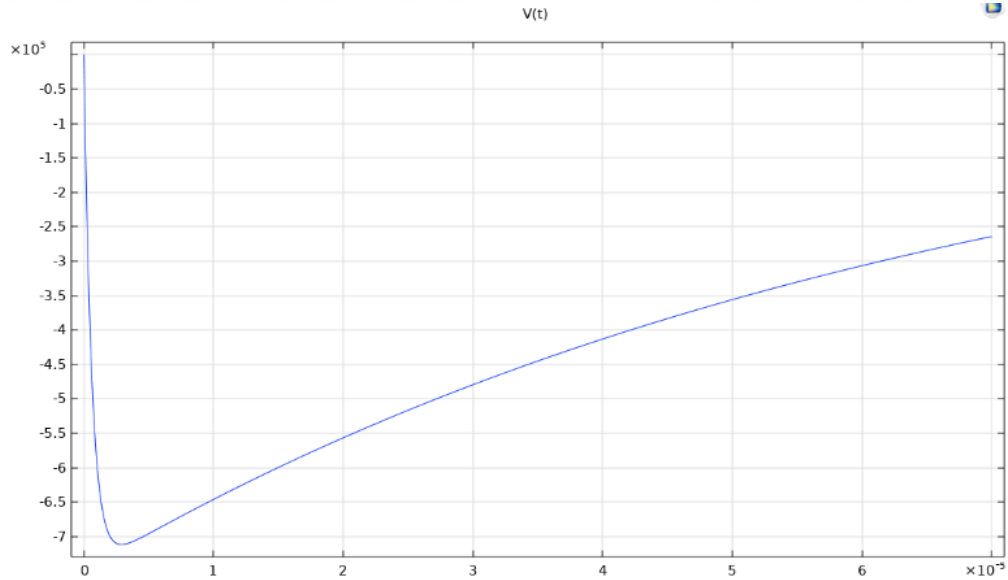


Şekil 4.56: Pozitif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağılı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektrik alanın zamana bağılı değişimi incelenmiştir. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan uçlarda oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.56’da görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 27 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uç yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uç yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise 16 kV/cm olmuştur.

4.2.1.6 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanması

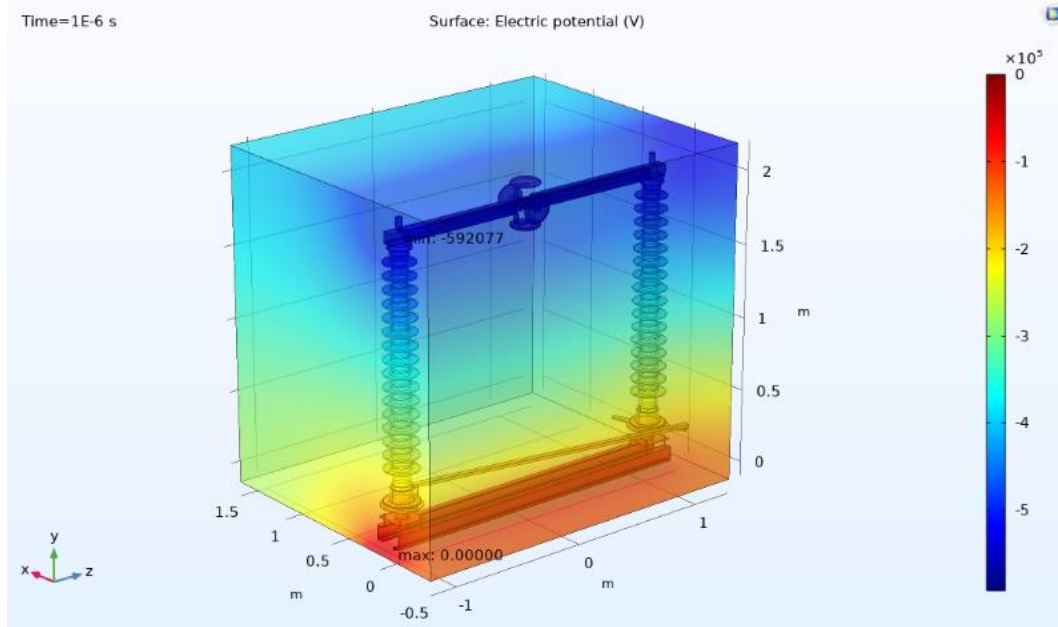
Ayırıcı kapalı pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının faz – toprak arası dayanımının, ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen yıldırım darbesi gerilimi altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin tepe değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 750 kV olarak verilmiştir. Esasen bu deney bir önceki adımda uygulanan deney ile aynı şartlarda, aynı gerilim seviyesinde fakat yıldırım darbe gerilimi negatif kutuplu olacak şekilde uygulanmıştır. Bunun sebebi, yıldırım darbe geriliminin çift kutuplu bir gerilim olması ve yıldırım darbe gerilimi deneylerinin standart tarafından her iki kutup için de yapılmasını şart koşmasıdır.



Şekil 4.57: Comsol’da oluşturulan negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi grafiği.

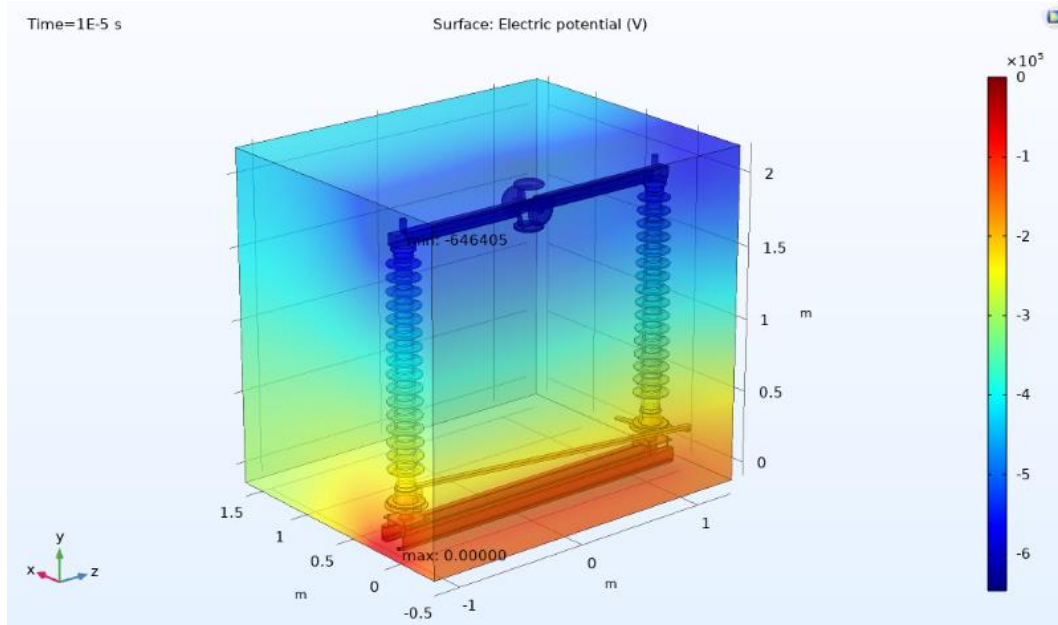
Denklem (4.5)’te fonksiyonu ve Şekil 4.57’de grafiği verilen negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi ayırıcıya kapalı pozisyondayken uygulanmıştır. Negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, şasesi ise topraklanmıştır.

Negatif kutuplu yıldırım darbe geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4.58’de kapalı durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



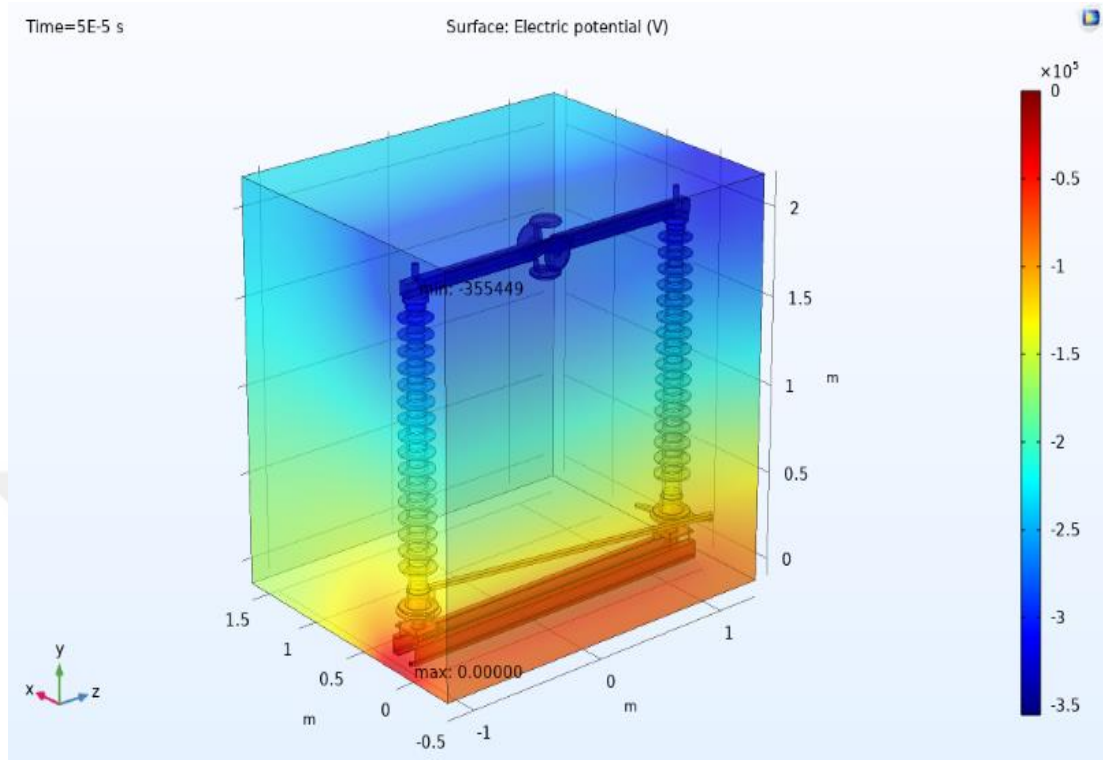
Şekil 4.58: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.59’da kapalı durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.59: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

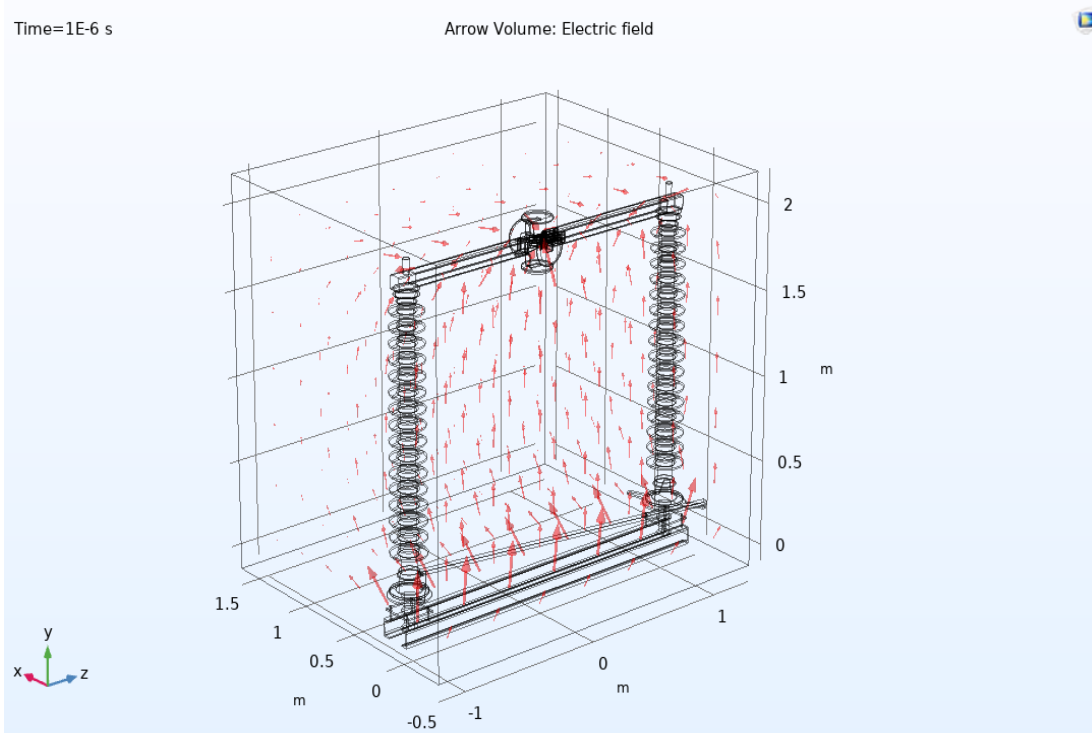
Şekil 4.60’da kapalı durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.60: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

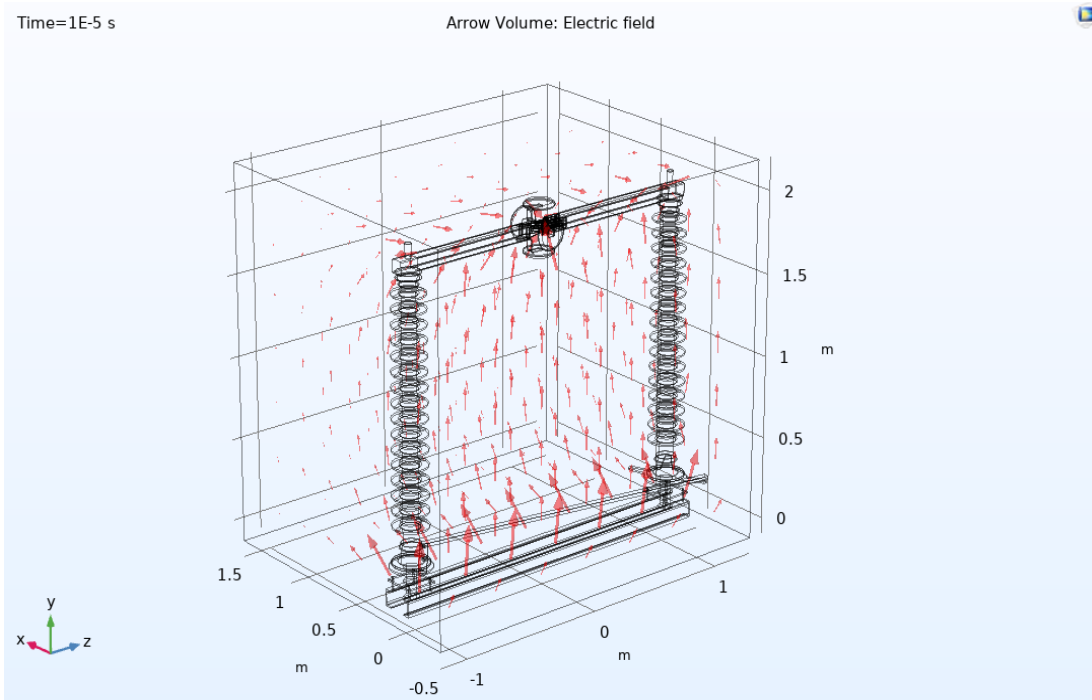
Şekil 4.58’den başlayarak Şekil 4.60’a kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının mutlak maksimum olduğu noktanın, gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Topraklanan şasede ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır.

Şekil 4.61’de kapalı durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



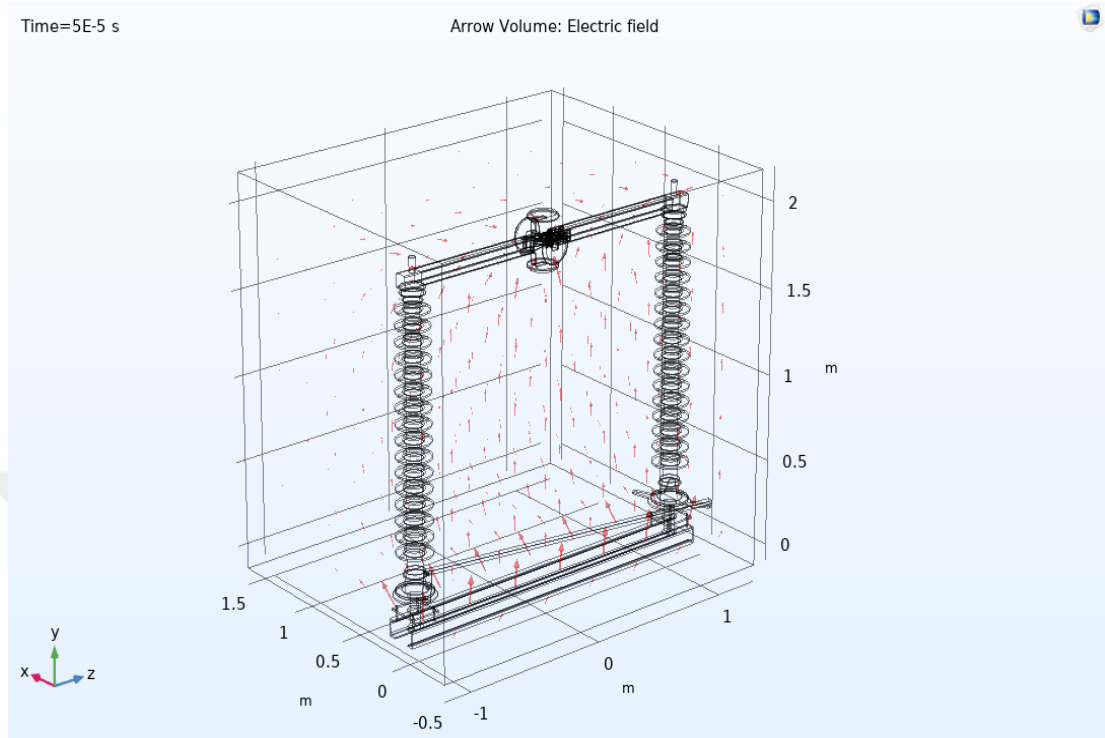
Şekil 4.61: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.62’de kapalı durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.62: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.63'te kapalı durumdaki ayırıcıya negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.

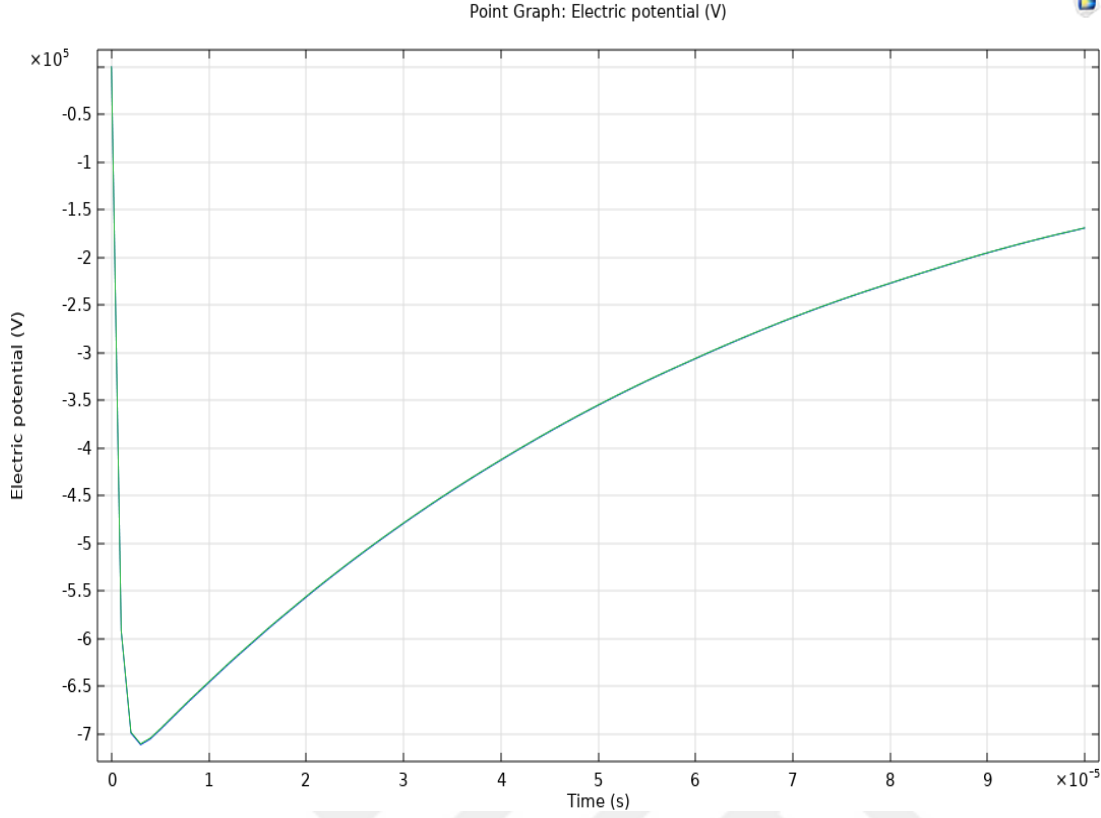


Şekil 4.63: Negatif kutuplu darbe gerilimi uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.61'den başlayarak Şekil 4.63'e kadar verilen şekillerde ise ayırıcının kapalı pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının ve elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir.

Şekillerden görüleceği üzere elektrik alan dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin anlık gerilim seviyesiyle doğru orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin akım taşıyan kollar olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

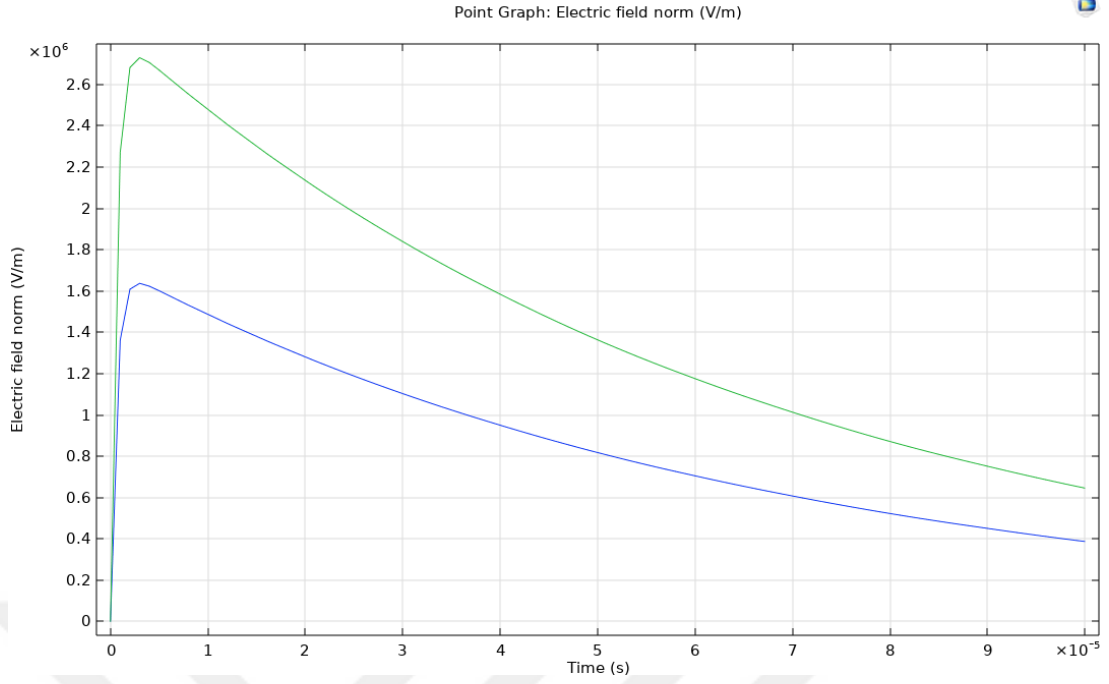
Ayırıcının kapalı pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18'de gösterilmiş olan noktalara ait, negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.64 ve Şekil 4.65'te verilmiştir.



Şekil 4.64: Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uçta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.64'te görülmektedir. Gerilim uygulanmayan uçta oluşan elektriksel potansiyelin de uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğu söylenebilir. Tüm analiz göz önüne alındığında hem gerilim uygulanan uç yüzeyinde hem de gerilim uygulanmayan uç yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değer -710 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektrik alanının zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan uçlarda oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.65'te görülmektedir.



Şekil 4.65: Negatif kutuplu darbe gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 27 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uç yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uç yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise 16 kV/cm olmuştur.

4.2.2 Şebeke frekanslı gerilimin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler

Şebeke frekanslı gerilimi ifade etmek için denklem (4.6)'da verilen fonksiyon kullanılmaktadır.

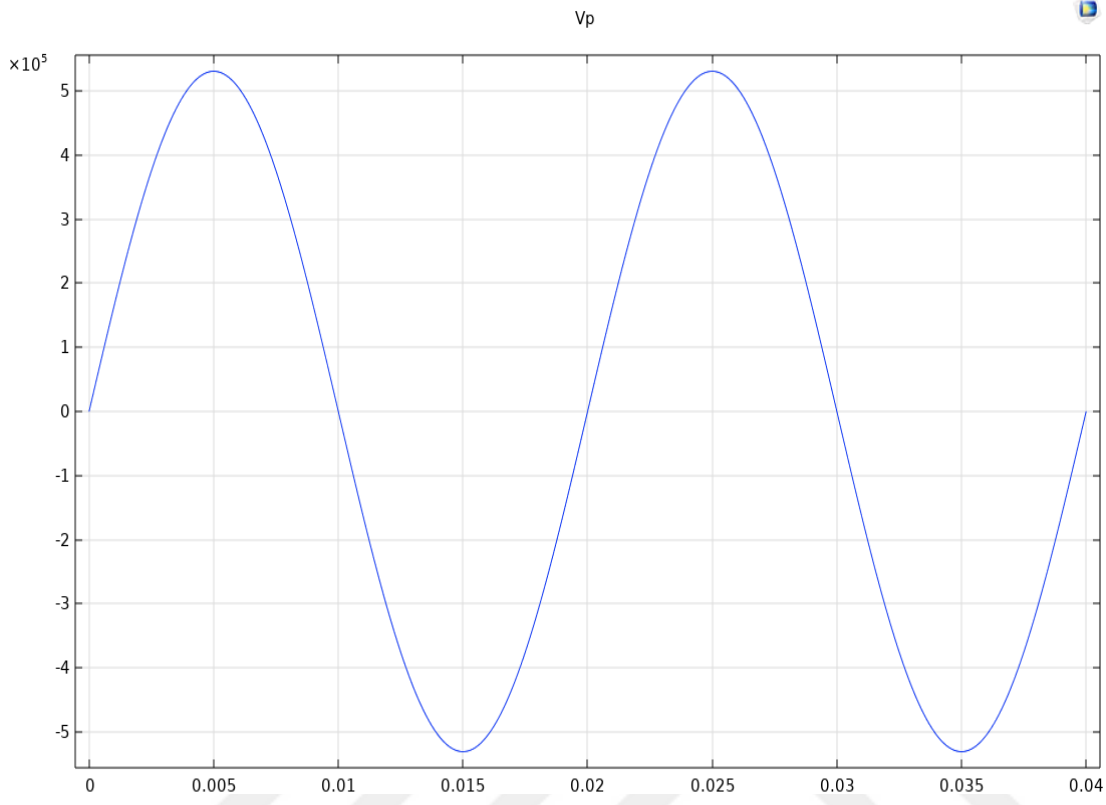
$$u(t) = V_{\max} \cdot \sin wt = V_{\max} \cdot \sin 2\pi ft \quad (4.6)$$

Türkiye için şebeke frekansı 50 Hz olduğundan dolayı çalışma boyunca f değeri 50 olarak alınmıştır.

4.2.2.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanması

Ayırıcı açık pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının ayırma aralığının, ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen şebeke frekanslı gerilim altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin faz – toprak arası etkin değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 375 kV olarak verilmiştir.

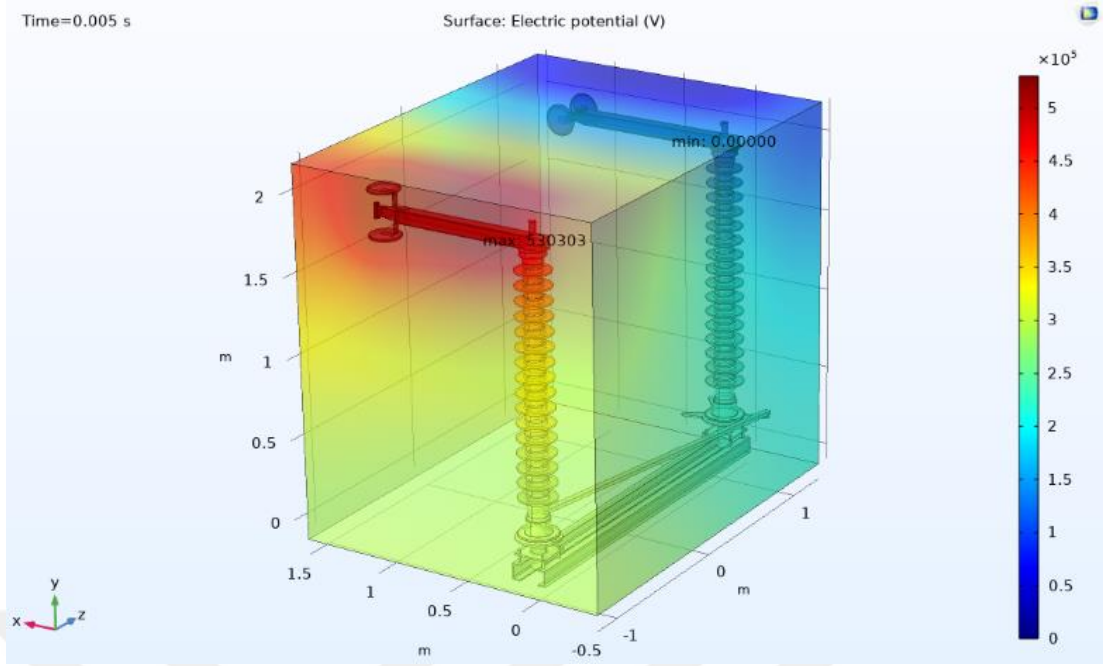
$$u(t) = 375000 \times \sqrt{2} \cdot \sin \omega t = 530330 \cdot \sin 2\pi f t \quad (4.7)$$



Şekil 4.66: Comsol’da oluşturulan şebeke frekanslı deney geriliminin grafiği.

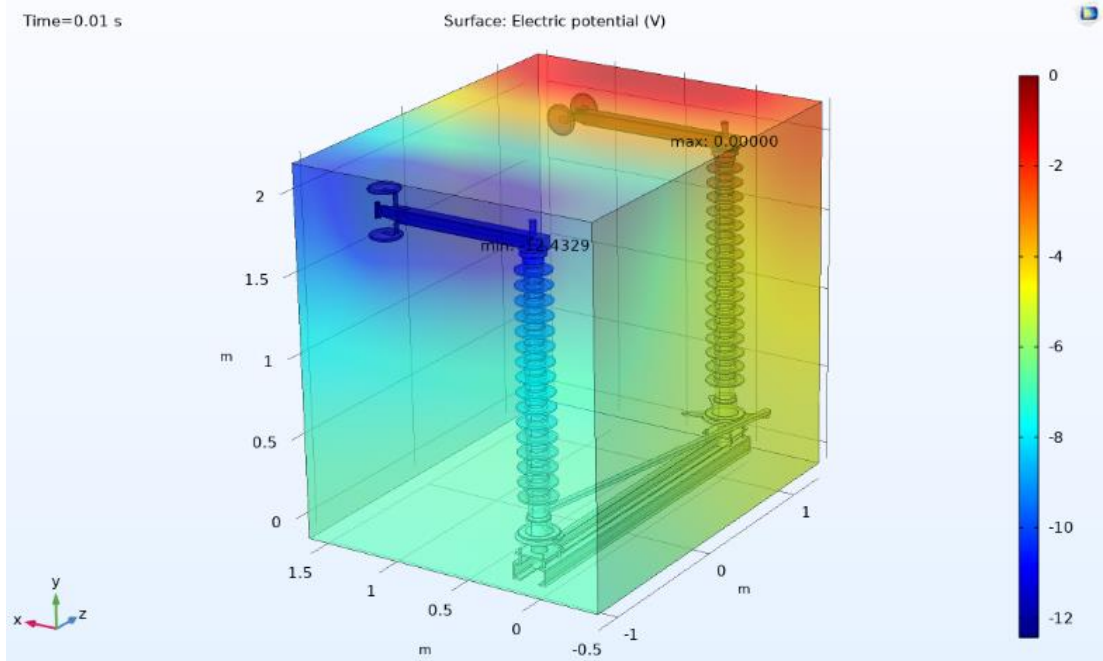
Denklem (4.7)’de fonksiyonu ve Şekil 4.66’da grafiği verilen şebeke frekanslı deney gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken uygulanmıştır. Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, diğer ucu topraklanmıştır. Böylece ayırıcının kullanıldığı sahalarda açık pozisyondayken ayırıcının topraklanmamış ucunda bir gerilim olması halinde, yalıtım delinmesi oluşacaksa ayırıcıya aralığı boyunca bir atlama ile yaşanması için gerekli düzen sağlanmış olur. Ayırıcının sağladığı emniyetle topraklanmış uç tarafında yapılması olası bakım çalışmalarını yürütecek personelin ve ekipmanın güvenliği sağlanmış olur.

Şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4.67’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



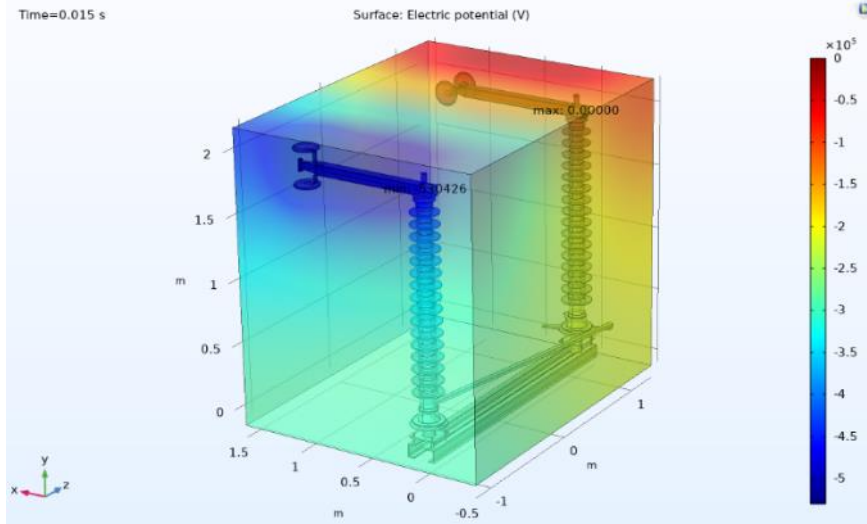
Şekil 4.67: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.68’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



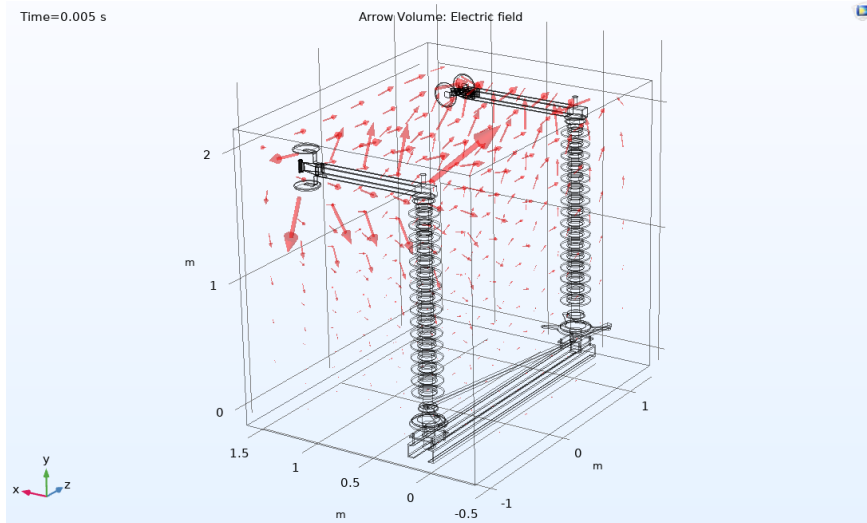
Şekil 4.68 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.69’da açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



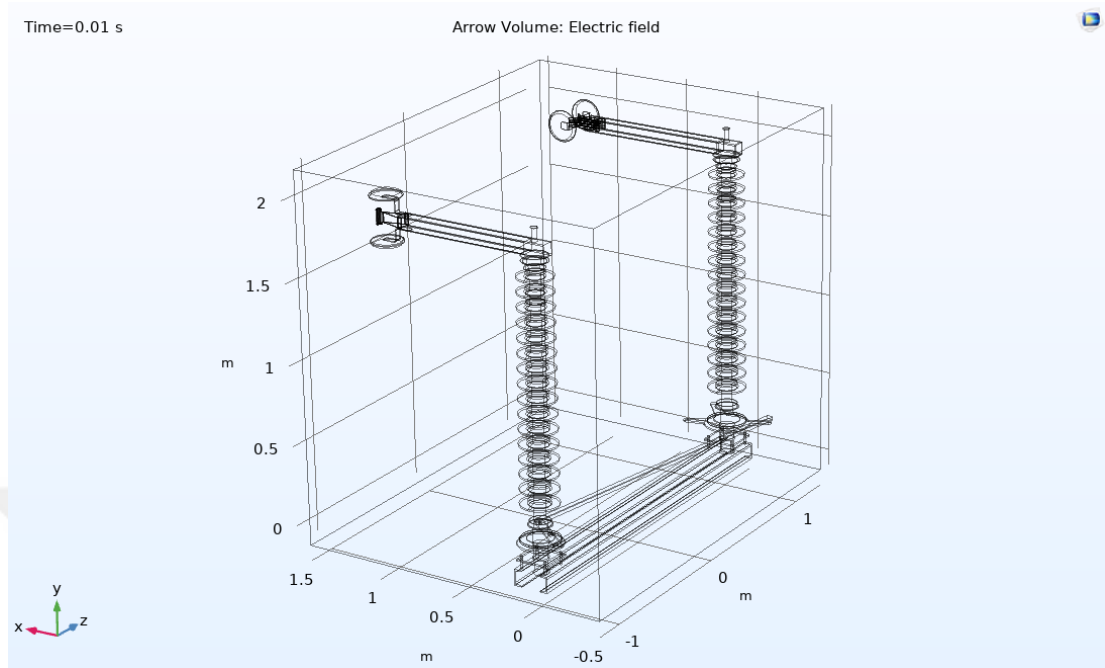
Şekil 4.69: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.67’den başlayarak Şekil 4.69’a kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı gerilimin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Elektriksel potansiyel değerin işareti ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Topraklanan uçta ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır. Şekil 4.70’te açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



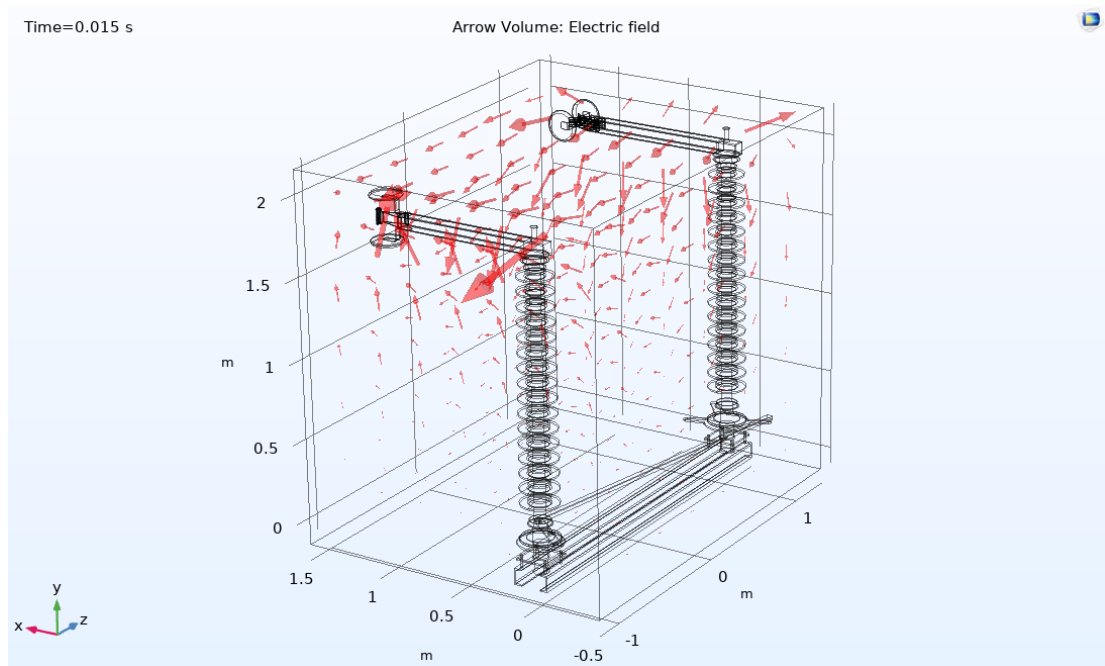
Şekil 4.70: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.71’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.71: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.72’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.

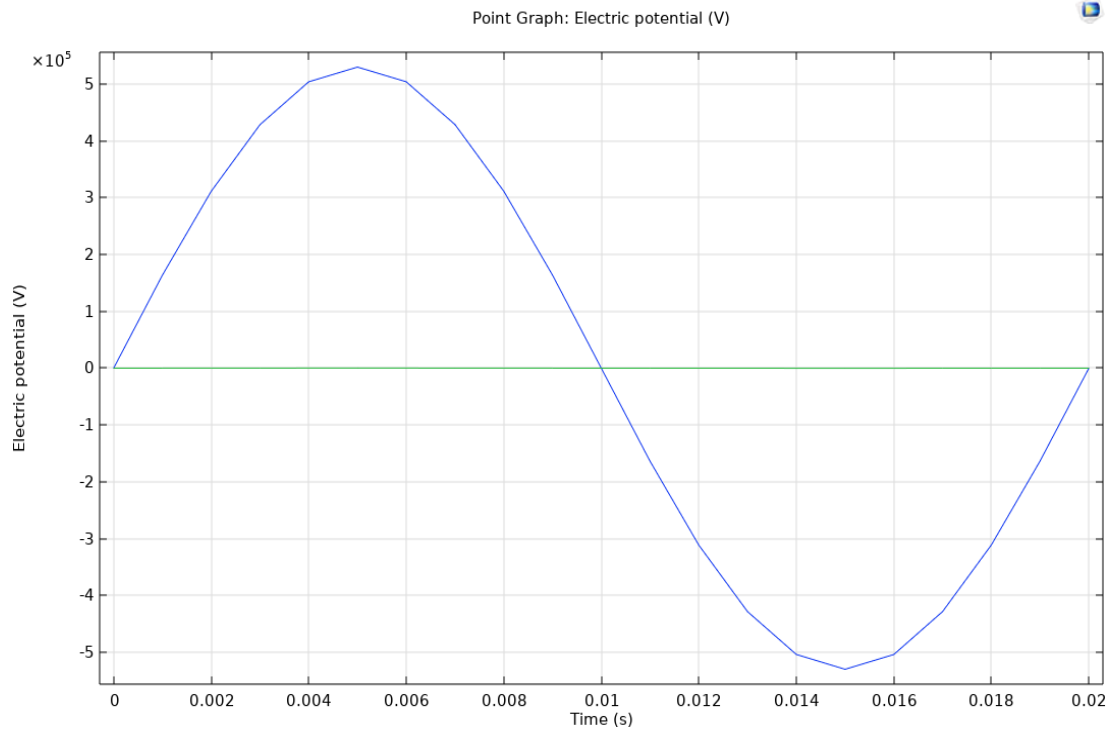


Şekil 4.72: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.70'ten başlayarak Şekil 4.72'ye kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektrik alan dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı gerilimin anlık gerilim seviyesiyle orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Şebeke frekanslı gerilimin anlık değeri 10. ms'de sıfır olduğundan dolayı, 10. ms'de ayırıcı üzerinde herhangi bir elektrik alan oluşmamaktadır. Elektrik alan çizgilerinin yönü ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca, en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

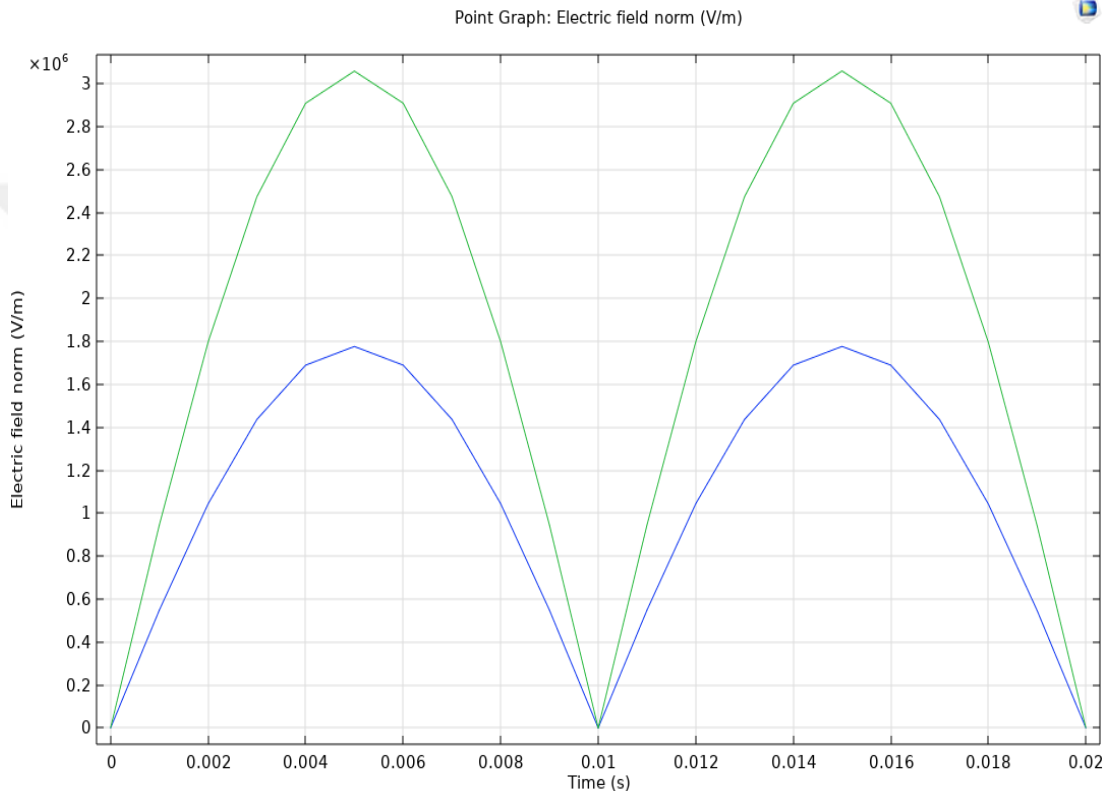
Yukarıda verilen şekillerin dışında model üzerinde belirlenecek herhangi bir noktadaki elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri de verilebilir.

Ayırıcının açık pozisyonu için Şekil 4.18'de belirtilen noktalara ait elektriksel potansiyel – zaman grafiği Şekil 4.73'te, elektrik alan – zaman grafiği Şekil 4.74'te verilmiştir.



Şekil 4.73: Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.73'te görülmektedir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontakta ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır. Tüm analiz göz önüne alındığında gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin 520 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



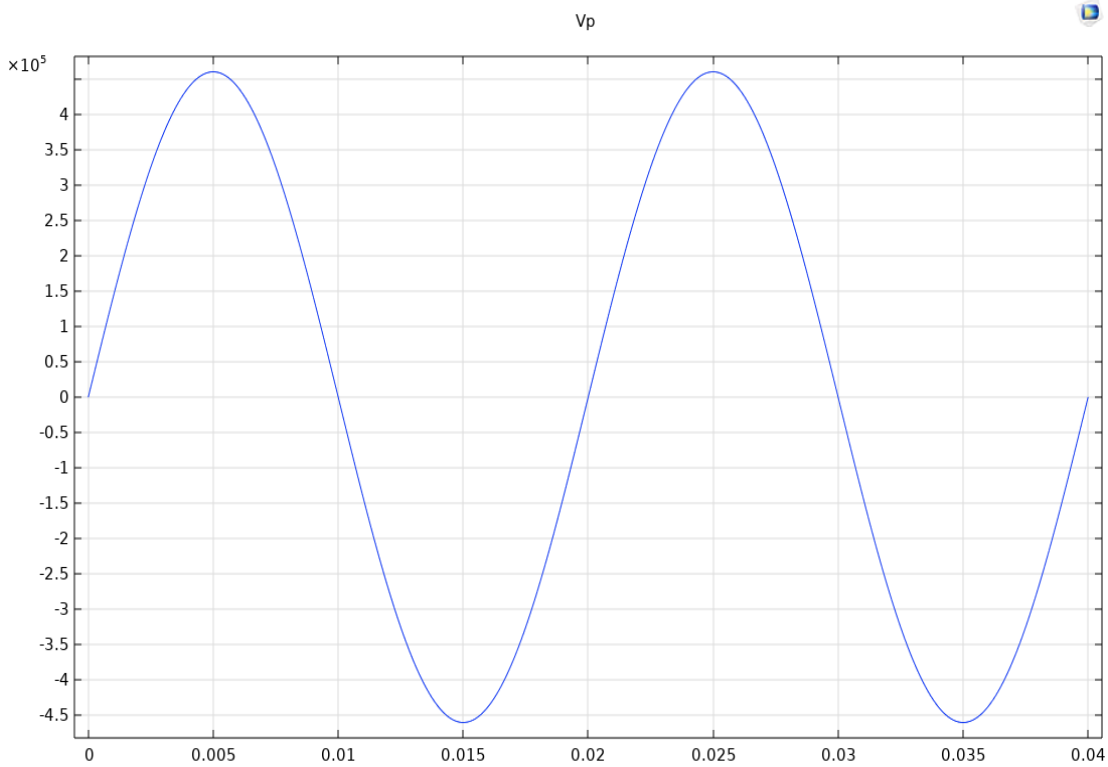
Şekil 4.74: Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağı değişimi.

Uygulanan gerilime bağı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanın zamana bağı değişimi incelenmiştir. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan uçlara ait kontaklarda oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimin şiddetiyle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.74'te görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 30 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise 18 kV/cm olmuştur.

4.2.2.2 Ayırıcı açık iken faz – toprak arası şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanması

Ayırıcı açık pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının faz – toprak arası dayanımının, ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen şebeke frekanslı gerilim altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin etkin değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 325 kV olarak verilmiştir.

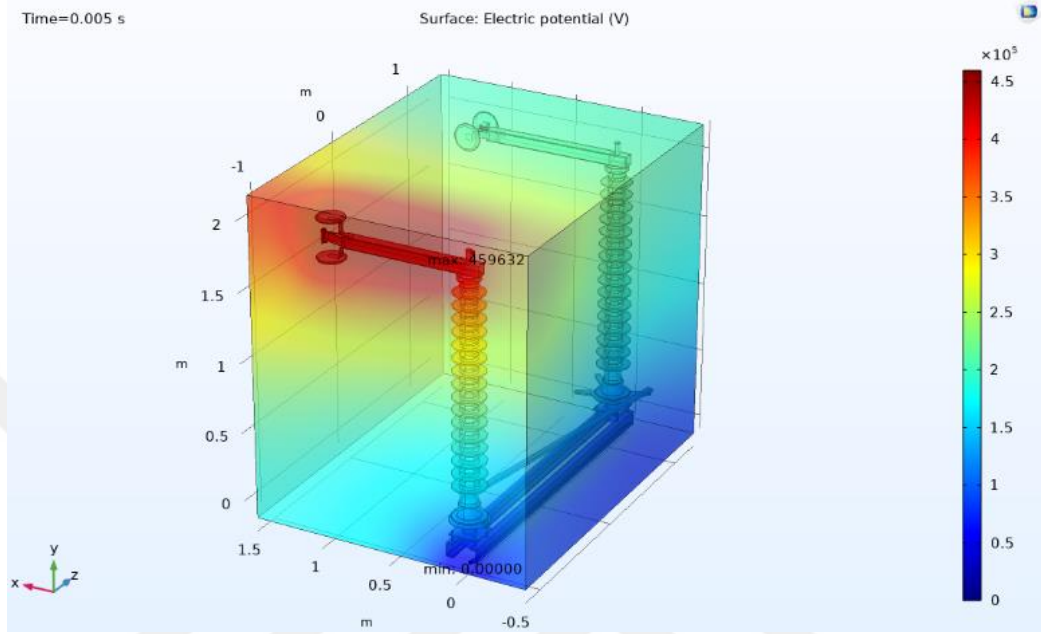
$$u(t) = 325000 \times \sqrt{2} \cdot \sin wt = 459620 \cdot \sin 2\pi ft \quad (4.8)$$



Şekil 4.75: Comsol’da oluşturulan şebeke frekanslı deney geriliminin grafiği.

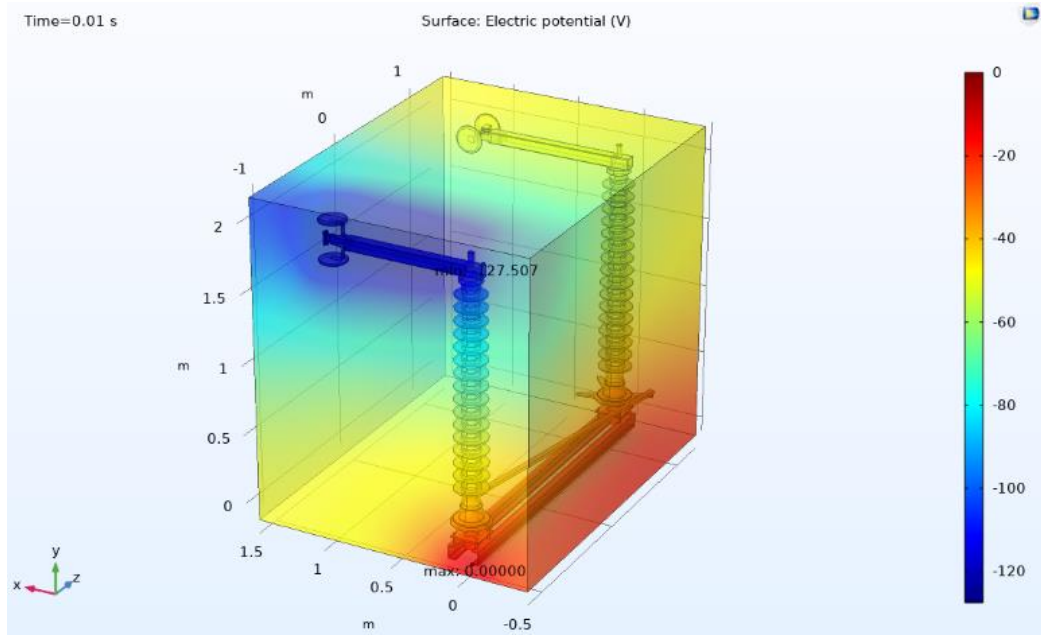
Denklem (4.8)’de fonksiyonu ve Şekil 4.75’te grafiği verilen şebeke frekanslı deney gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken uygulanmıştır. Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, şasesi ise topraklanmıştır. Şasenin topraklanması sebebi ayırıcının sağladığı yalıtımın koordinasyonunda faz – toprak aralığına atanan dayanımın karşılanıp karşılanmadığının ispatı ihtiyacıdır. Böylece ayırıcının kullanıldığı sahalarda açık pozisyondayken ayırıcının ucunda bir gerilimin var olması halinde, yalıtım delinmesi oluşacaksa faz-toprak arasında bir atlama ile yaşanması için gerekli düzen sağlanmış olur.

Şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4.76’da açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



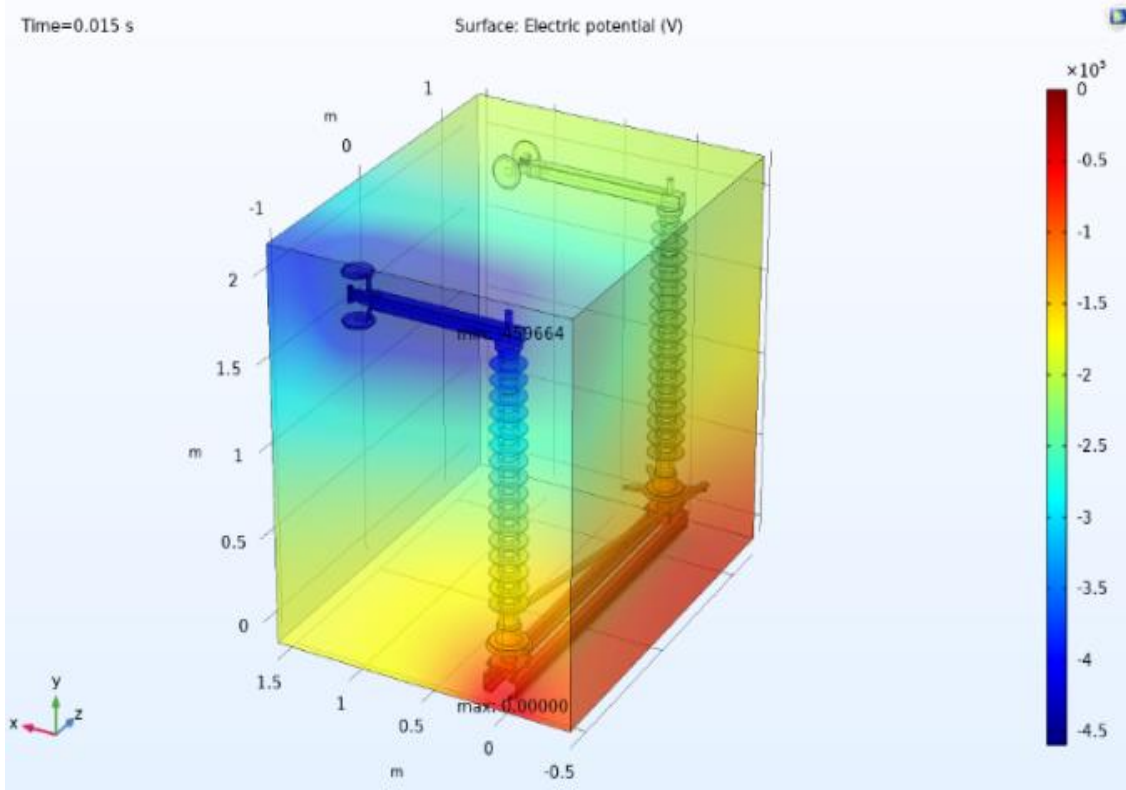
Şekil 4.76: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.77’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.77 : Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

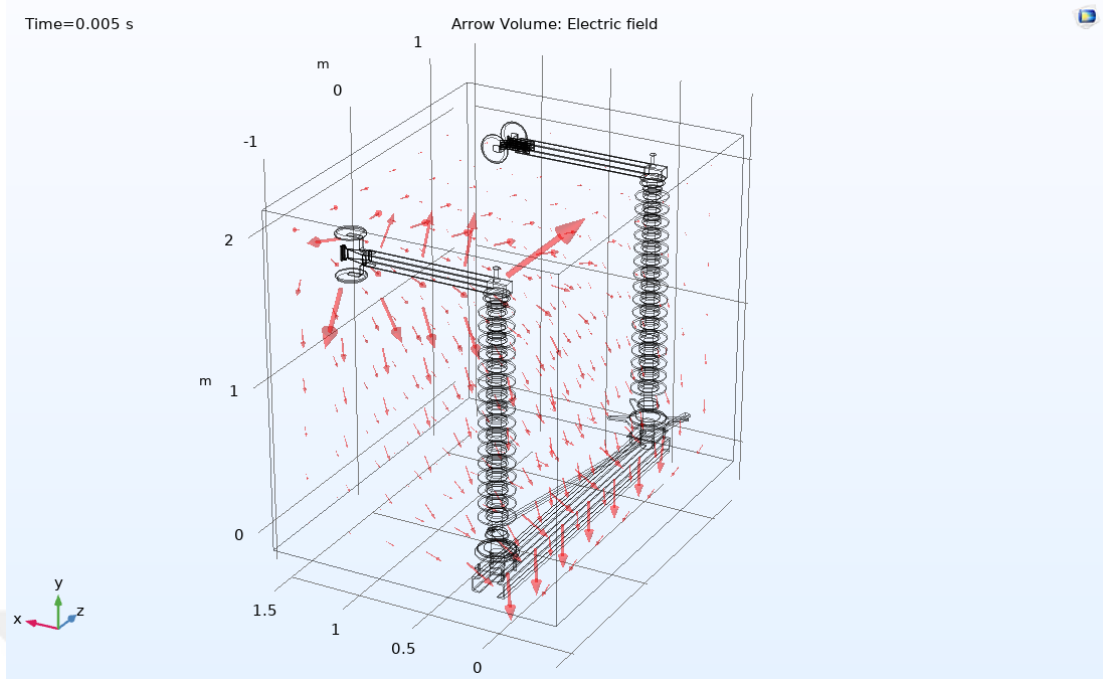
Şekil 4.78’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.78: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

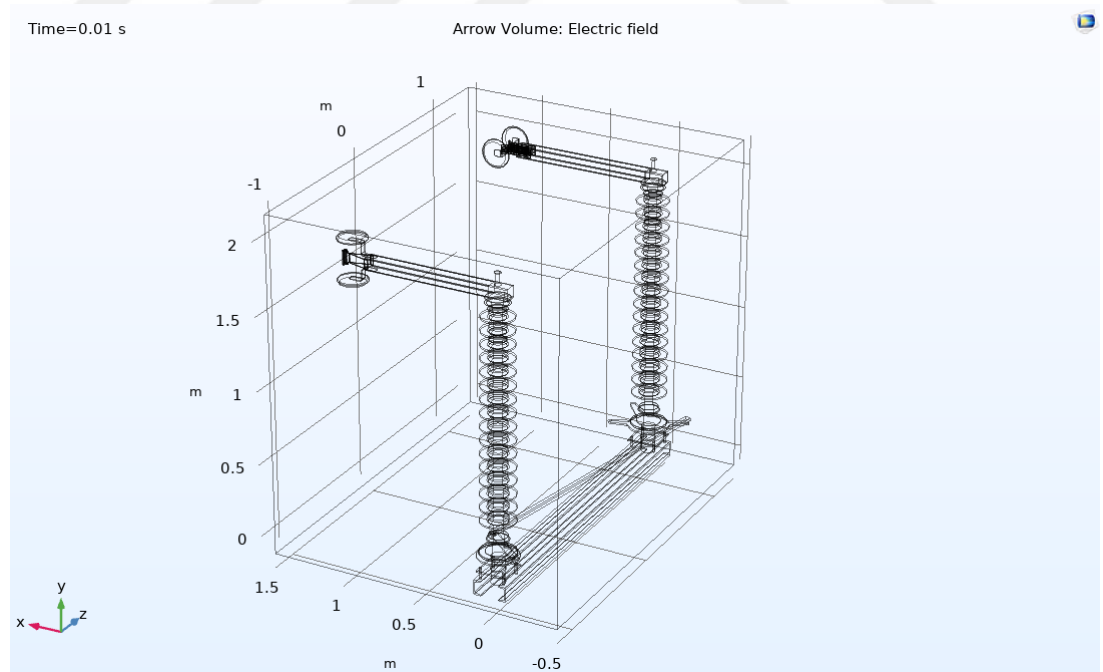
Şekil 4.76’den başlayarak Şekil 4.78’e kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde, elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı gerilimin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Elektriksel potansiyel değerin işareti ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Topraklanan şasede ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır.

Şekil 4.79’da açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



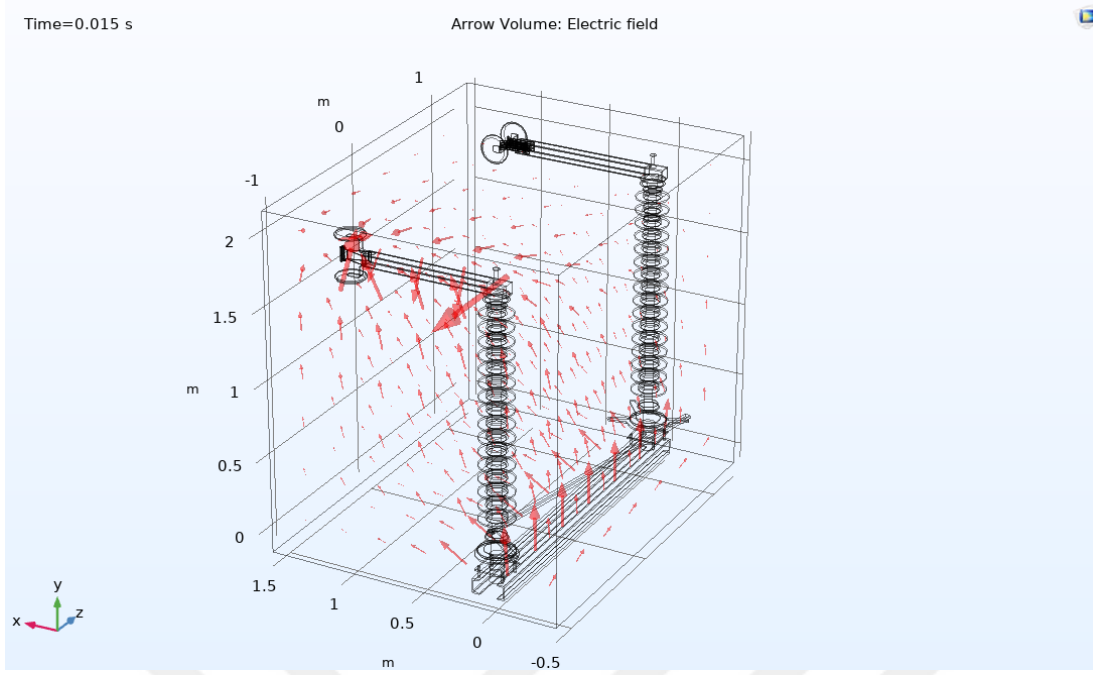
Şekil 4.79: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.80’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.80: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.

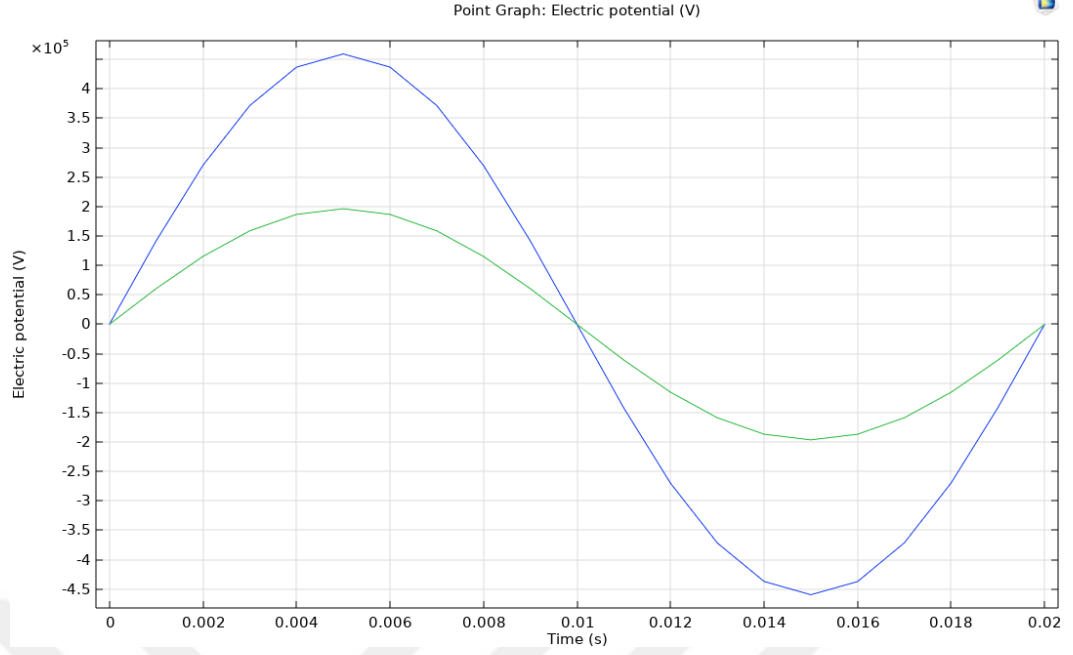
Şekil 4.81’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.81: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı.

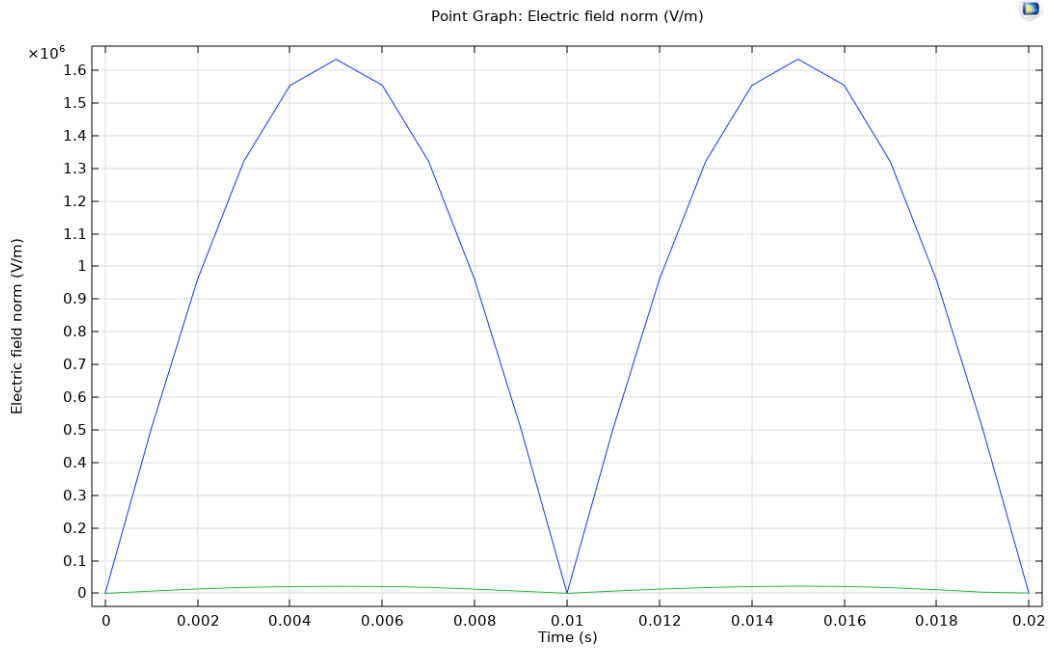
Şekil 4.79'dan başlayarak Şekil 4.81'e kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde, elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektrik alan dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı gerilimin anlık gerilim seviyesiyle orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Şebeke frekanslı gerilimin anlık değeri 10. ms'de sıfır olduğundan dolayı, 10. ms'de ayırıcı üzerinde herhangi bir elektrik alan oluşmamaktadır. Elektrik alan çizgilerinin yönü ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

Ayırıcının açık pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18'de gösterilmiş olan noktalara ait, şebeke frekanslı deney gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.82 ve Şekil 4.83'te verilmiştir. Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.82'de görülmektedir.



Şekil 4.82: Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Gerilim uygulanmayan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin de uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğu ancak değerinin daha düşük söylenebilir. Tüm analiz göz önüne alındığında gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin 450 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



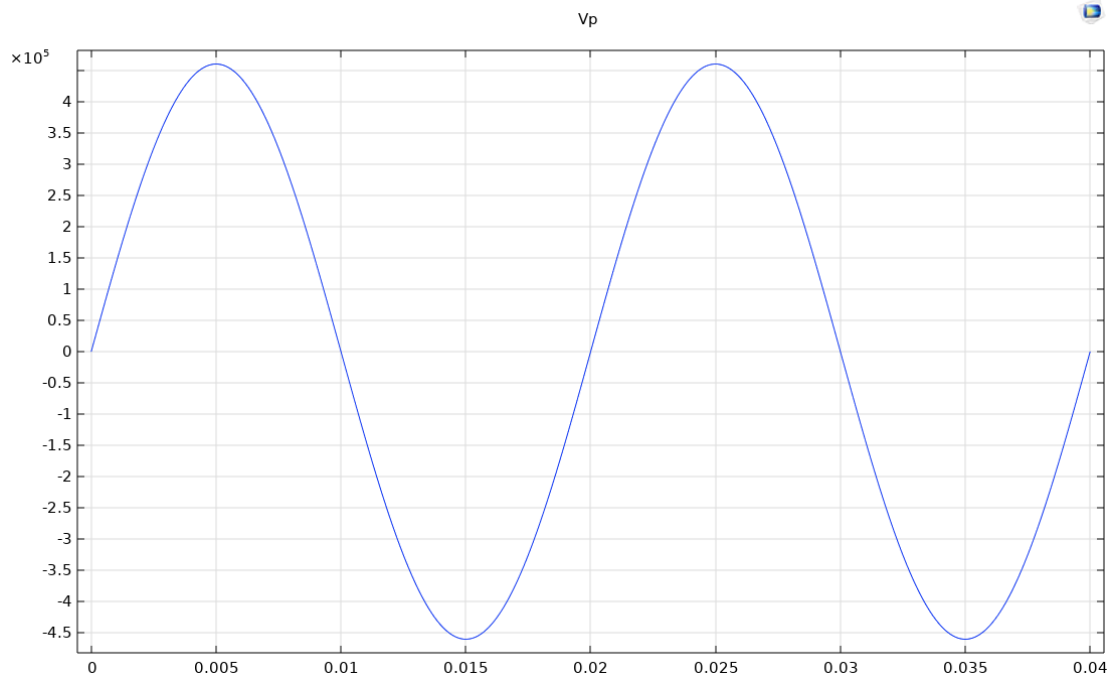
Şekil 4.83: Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağılı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanın zamana bağılı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimin şiddetiyle doğru orantılı olarak hareket ettiği Şekil 4.83'te görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 16 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise ihmal edilebilir düzeyde olmuştur.

4.2.2.3 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanması

Ayırıcı kapalı pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının faz – toprak arası dayanımının, ilgili IEC standardı tarafından dayanması talep edilen şebeke frekanslı gerilim altındaki performansı değerlendirilir. Bu gerilimin etkin değeri IEC 62271 – 1 (2017) standardının 1 numaralı tablosunda 325 kV olarak verilmiştir.

$$u(t) = 325000 \times \sqrt{2} \cdot \sin wt = 459620 \cdot \sin 2\pi ft \quad (4.8)$$

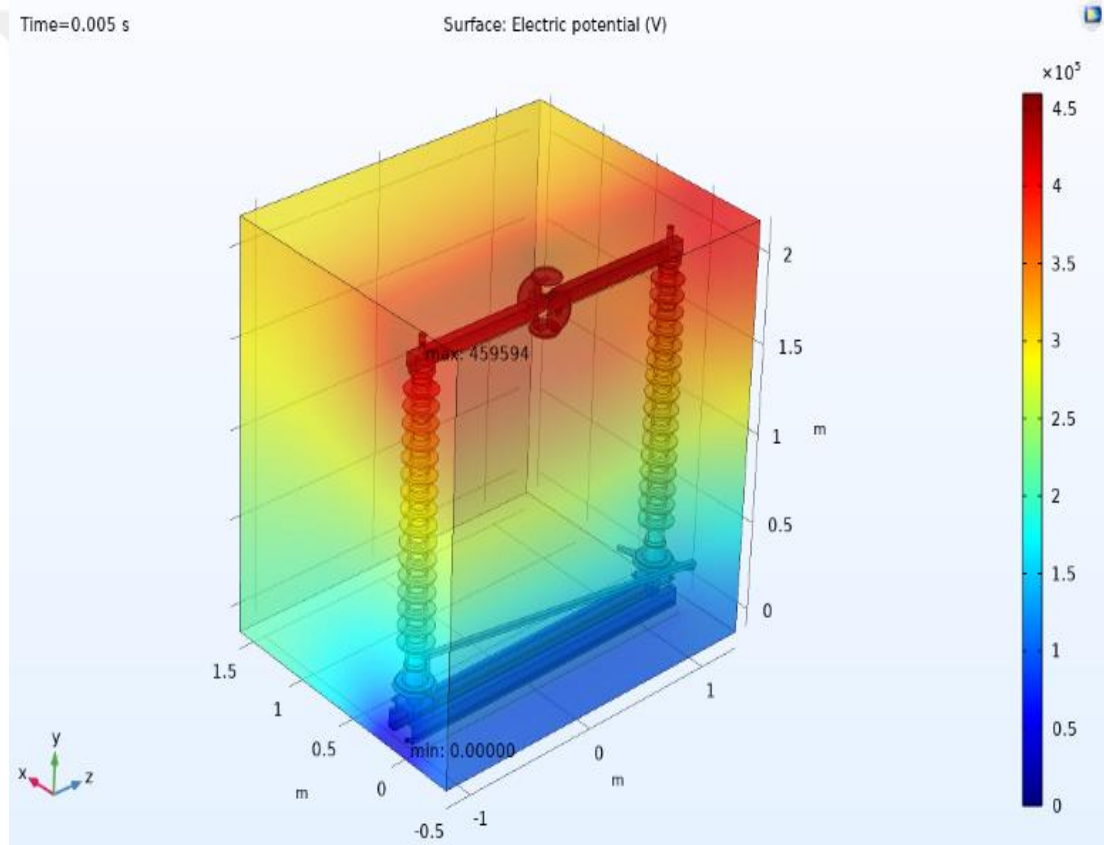


Şekil 4.84 : Comsol'da oluşturulan şebeke frekanslı deney geriliminin grafiği.

Denklem (4.8)'de fonksiyonu ve Şekil 4.84'te grafiği verilen şebeke frekanslı deney gerilimi ayırıcıya kapalı pozisyondayken uygulanmıştır. Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış,

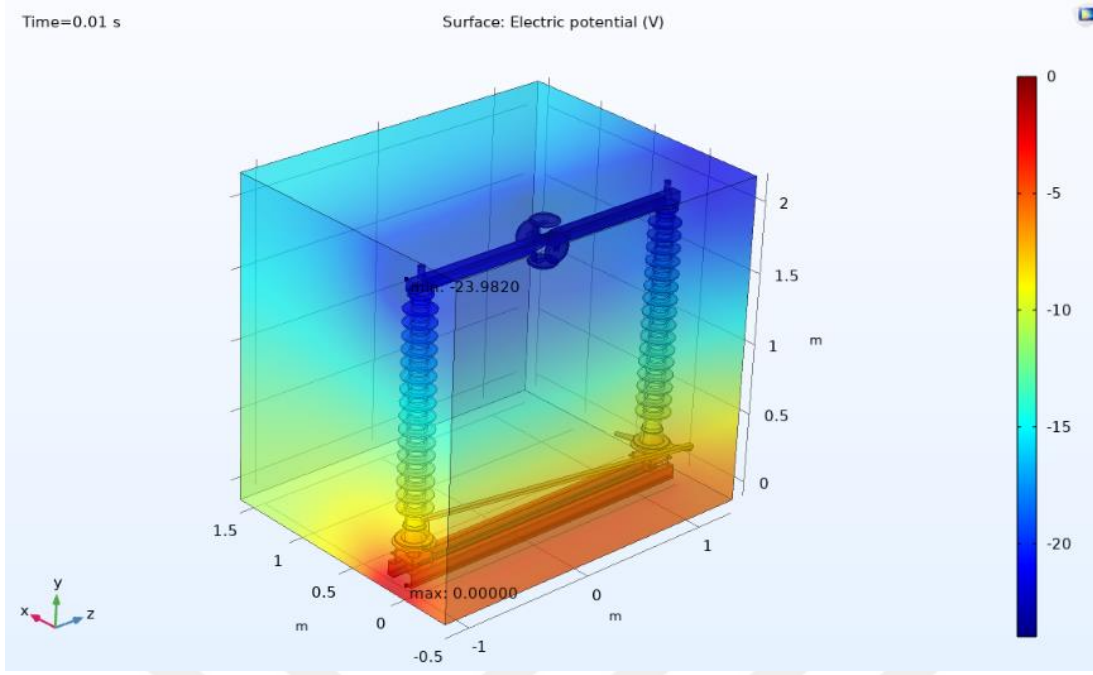
şasesi ise topraklanmıştır. Şasenin topraklanmasının sebebi ayırıcının sağladığı yalıtımın koordinasyonunda faz – toprak aralığına atanan dayanımın karşılanıp karşılanmadığının ispatı ihtiyacıdır. Böylece ayırıcının kullanıldığı sahalarda kapalı pozisyonundaki ayırıcının herhangi bir ucunda gerilimin var olması durumunda bir yalıtım delinmesi oluşacaksa faz – toprak arasında bir atlama ile yaşanması için gerekli düzen sağlanmış olur.

Şebeke frekanslı deney geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4.85'te kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



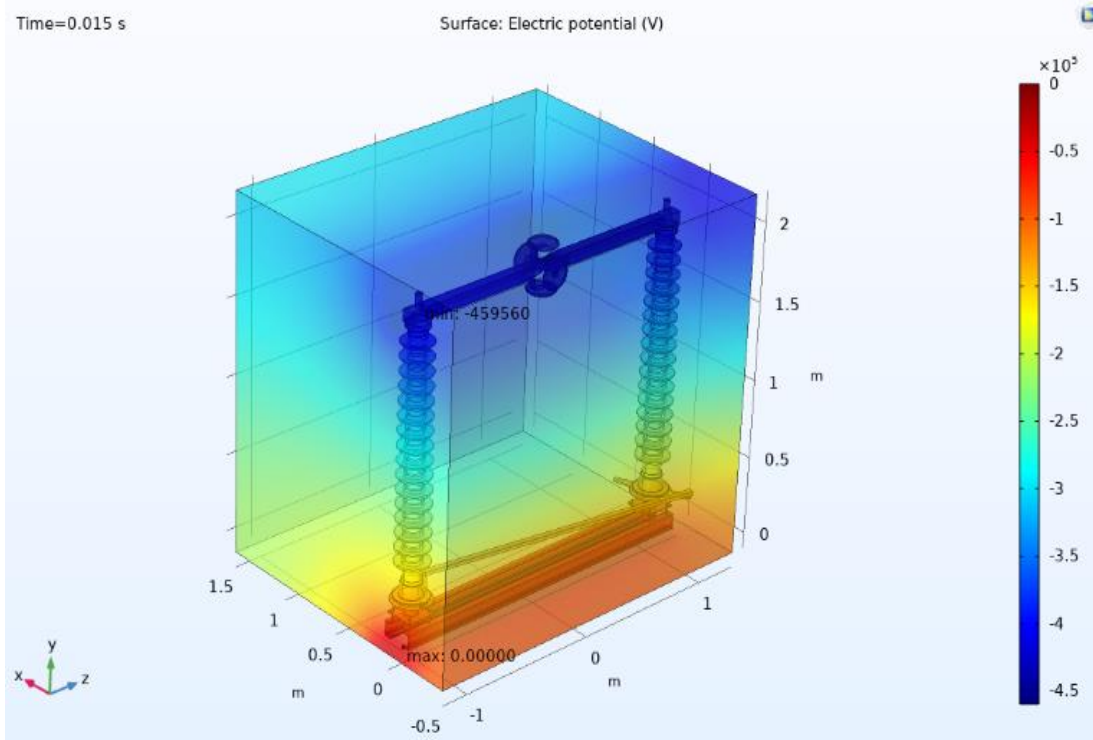
Şekil 4.85: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.86'da kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.86: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

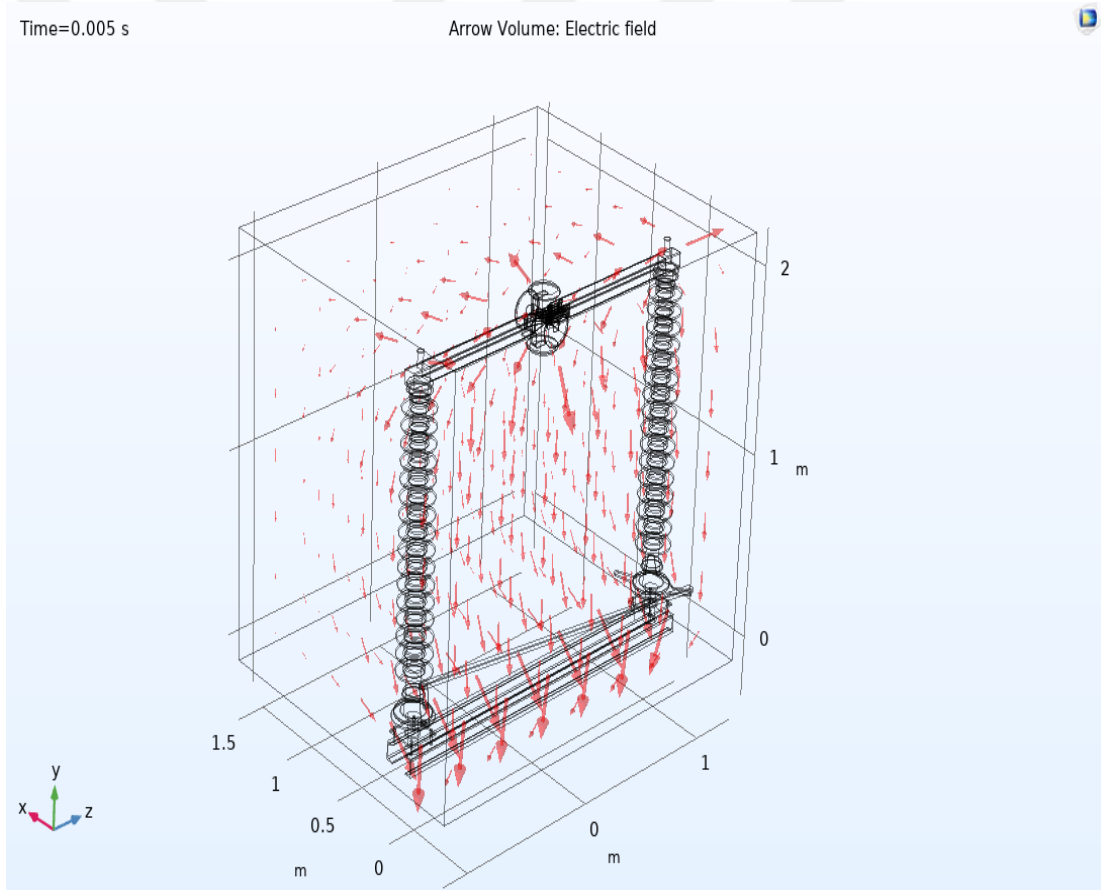
Şekil 4.87’de kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.87: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

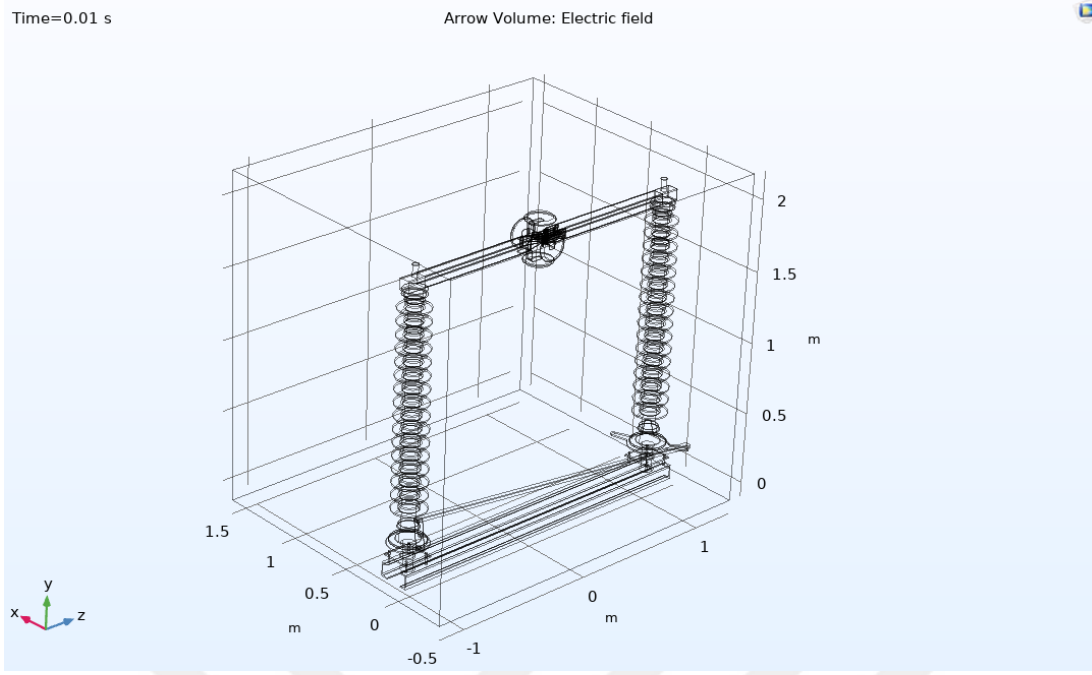
Şekil 4.85'ten başlayarak Şekil 4.87'ye kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı gerilimin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Elektriksel potansiyel değerin işareti ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Topraklanan şasede ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır.

Şekil 4.88'de kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



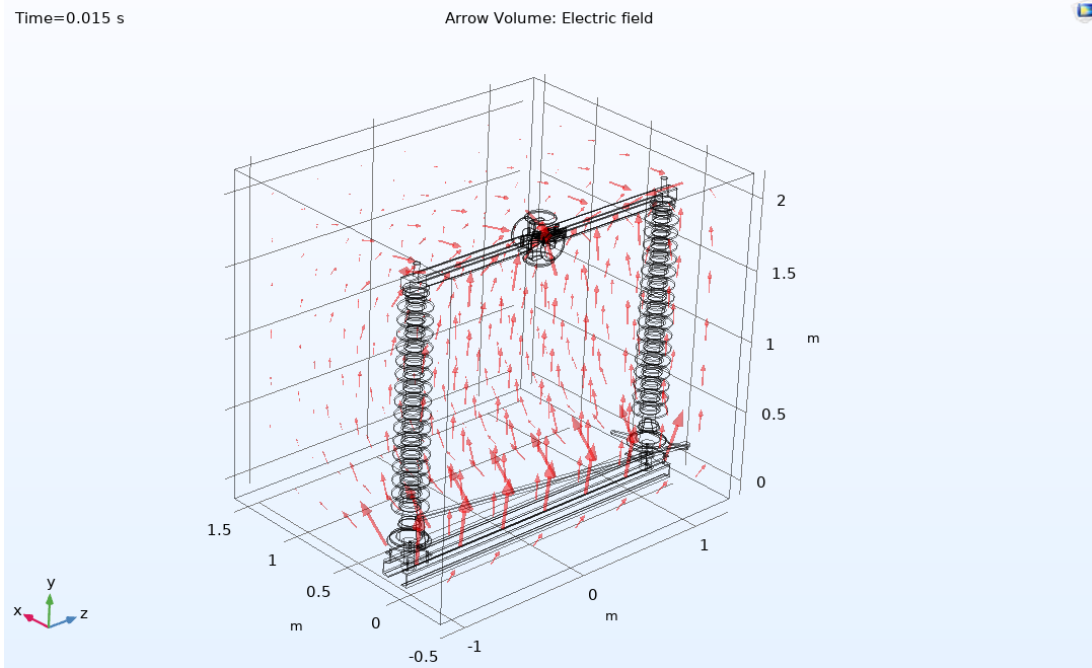
Şekil 4.88: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.89'da kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.89: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.90’da kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.

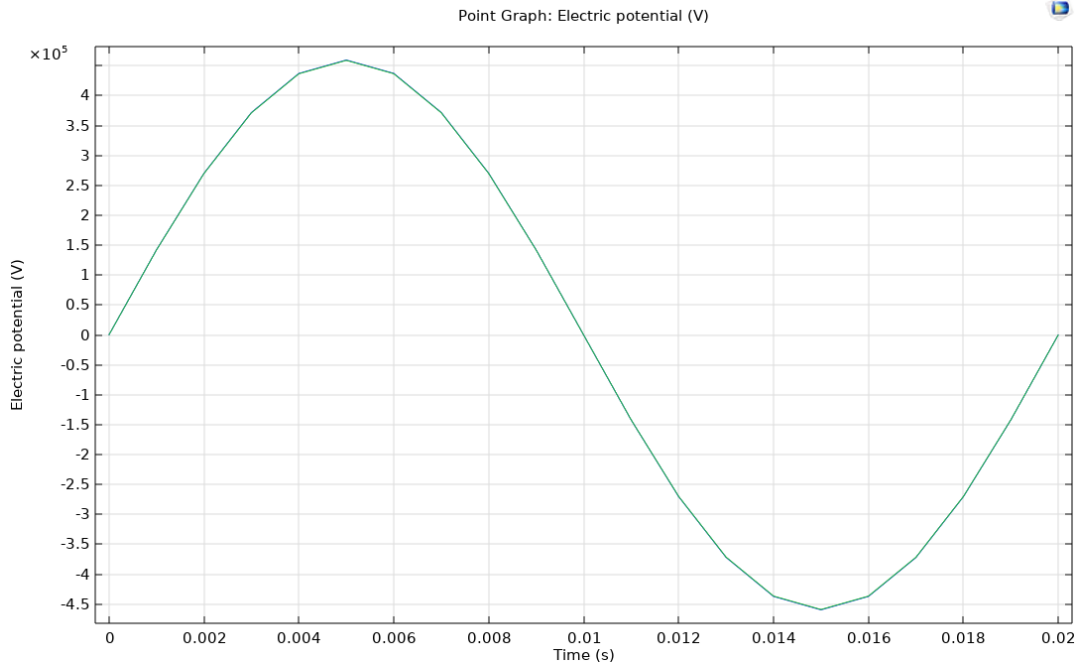


Şekil 4.90: Şebeke frekanslı deney gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.88’den başlayarak Şekil 4.90’a kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde

elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzeri elektrik alan dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı gerilimin anlık gerilim seviyesiyle orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Şebeke frekanslı gerilimin anlık değeri 10. ms’de sıfır olduğundan dolayı, 10. ms’de ayırıcı üzerinde herhangi bir elektrik alan oluşmamaktadır. Elektrik alan çizgilerinin yönü ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca, en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

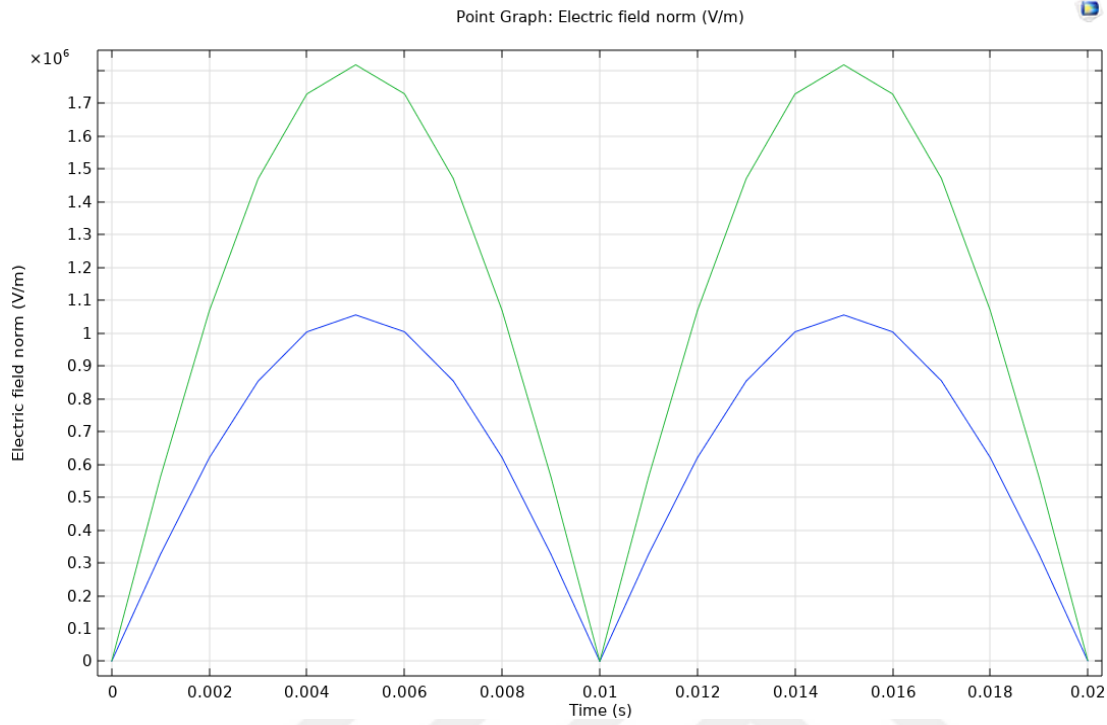
Ayırıcının kapalı pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18’de gösterilmiş olan noktalara ait, şebeke frekanslı deney gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.91 ve Şekil 4.92’de verilmiştir.



Şekil 4.91: Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uçta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak hareket ettiği Şekil 4.91’de görülmektedir. Gerilim uygulanmayan uçta oluşan elektriksel potansiyelin de uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Tüm analiz göz önüne alındığında hem gerilim uygulanan uç yüzeyinde hem de gerilim uygulanmayan uç

yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin 450 kV mertebelerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.92: Şebeke frekanslı deney gerilimi altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

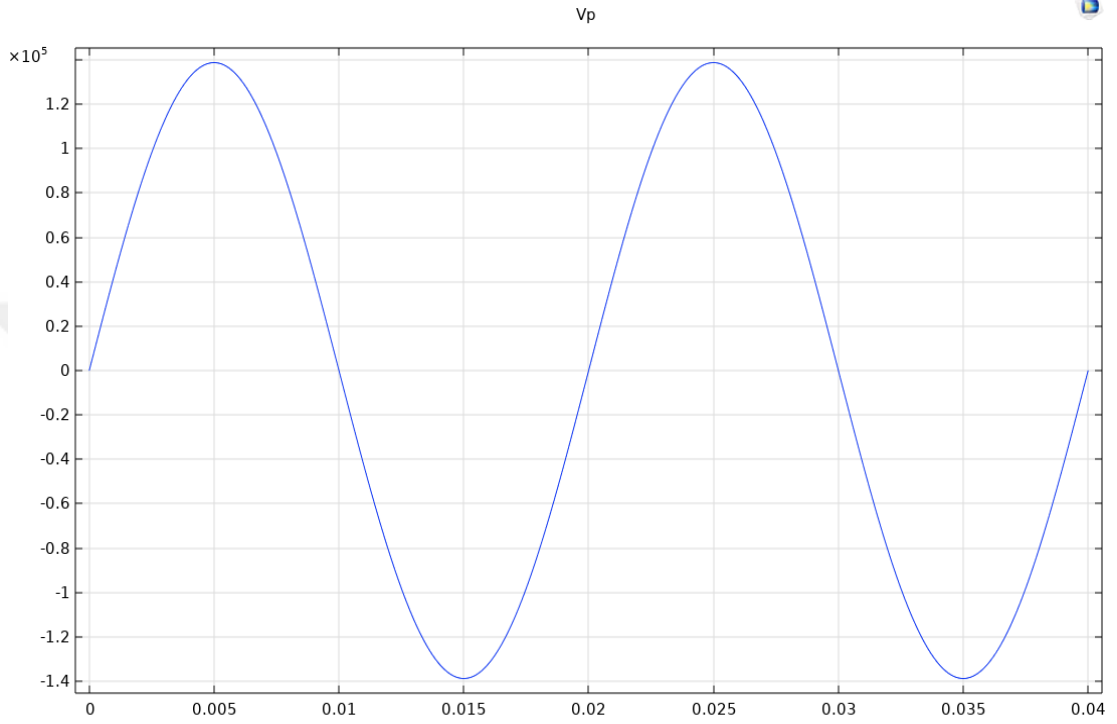
Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektrik alanın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Ayırıcının hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan uçlarında oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimin şiddetiyle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.92’de görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 18 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uç yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uç yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise 10.5 kV/cm olmuştur.

4.2.3 İşletme geriliminin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler

Daha önce de belirtildiği üzere bu çalışmada 170 kV anma gerilim seviyesine sahip ortadan açmalı ayırıcı kullanılmıştır. İşletme şartları açısından düşünüldüğünde 170 kV gerilim seviyesi fazlar arası izin verilen en yüksek gerilim seviyesinin etkin değeri olduğundan ve bu analizde tek fazlı ayırıcı kullanıldığından dolayı gerilimin etkin değeri için $170000/\sqrt{3} \approx 98150$ V bulunur. Denklem (4.6) göz önüne alındığında işletme gerilimi denklem (4.9)’daki gibi ifade edilir.

$$u(t) = 98150 \times \sqrt{2} \cdot \sin \omega t = 138805 \cdot \sin 2\pi ft \quad (4.9)$$

Denklem (4.9)'da frekans için 50 Hz kullanılarak istenilen şebeke frekanslı gerilim elde edilmiştir. Comsol'da oluşturulan şebeke frekanslı gerilimin grafiği Şekil 4.93'te verilmiştir.



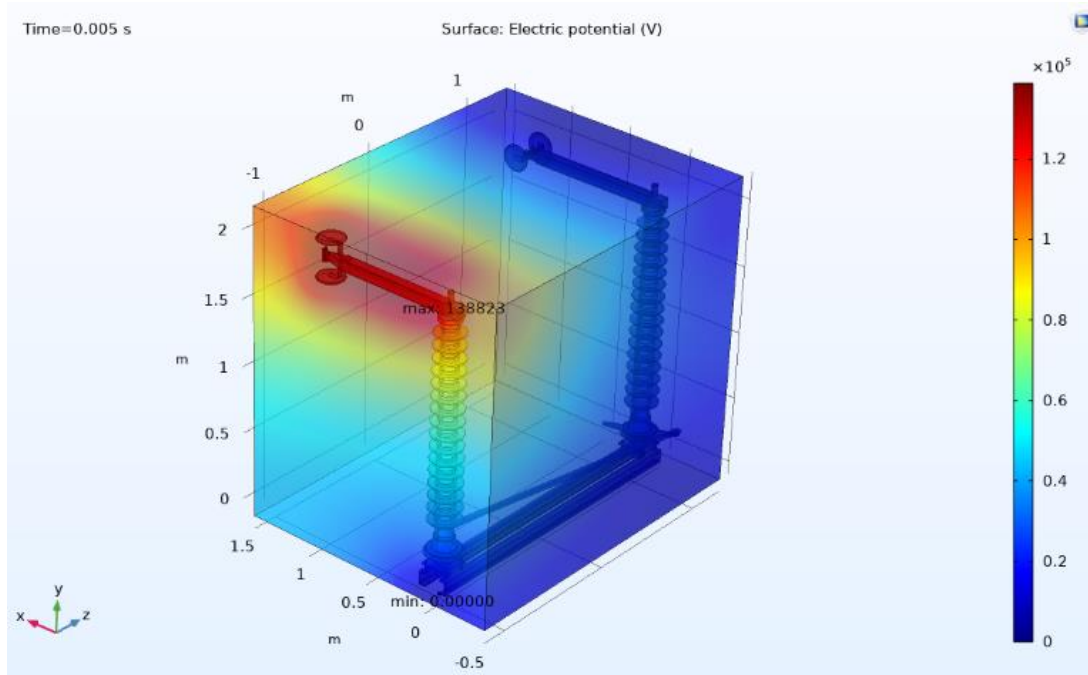
Şekil 4.93: Comsol'da oluşturulan şebeke frekanslı işletme gerilimi grafiği.

4.2.3.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca işletme geriliminin uygulanması

Denklem (4.9)'da fonksiyonu ve Şekil 4.93'te grafiği verilen şebeke frekanslı işletme gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken uygulanmıştır. Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine gerilim uygulanmış, diğer ucu ve şasesi topraklanmıştır. Şasenin topraklanmasının nedeni analizin, gerçek işletme koşullarına uyum sağlamasıdır. Böylece ayırıcının kullanıldığı sahalarda açık pozisyondayken ayırıcının topraklanmamış ucunda bir gerilimin var olması halinde ayırıcı hem ayırma aralığı boyunca hem de faz – toprak arası boyunca zorlanır. Fakat, tip deneylerinde bu koşullar daha yüksek gerilimler altında denenmiş olduğundan dolayı herhangi bir yalıtım delinmesinin oluşması beklenmez.

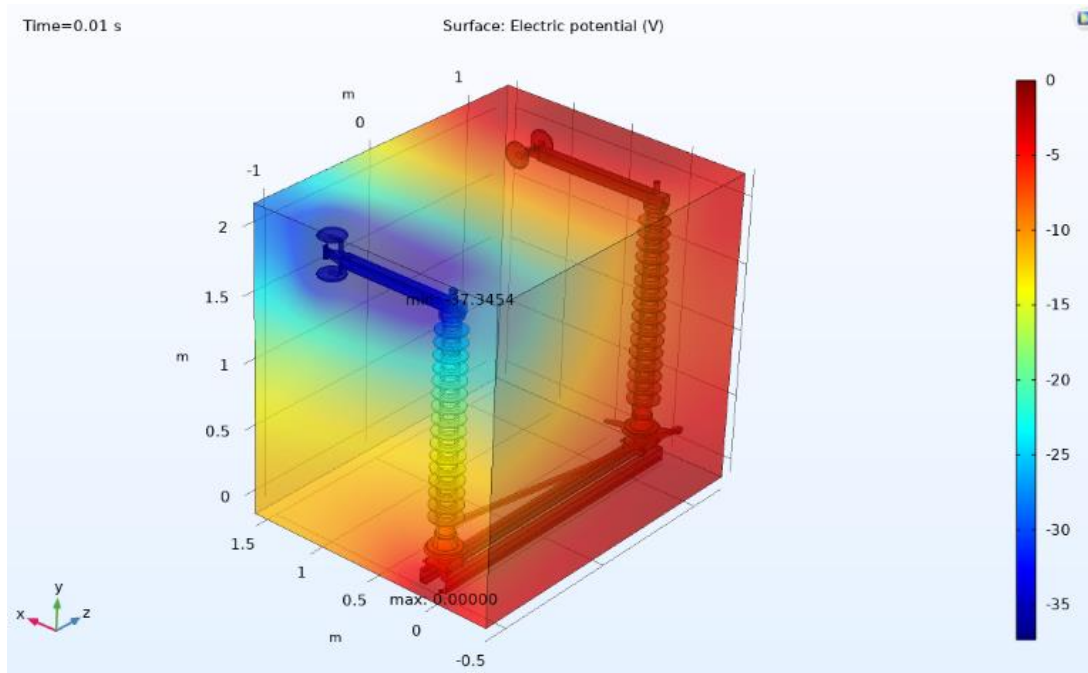
Şebeke frekanslı işletme geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.94'te açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



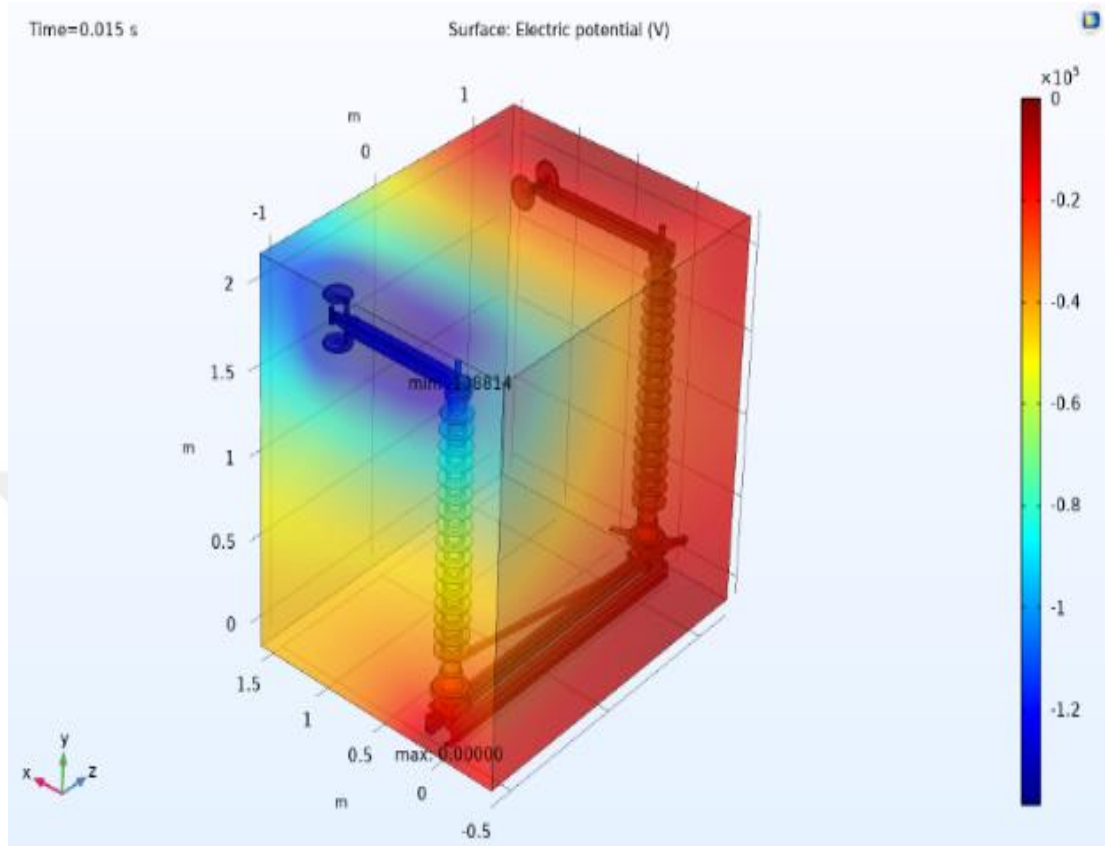
Şekil 4.94: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.95'te açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.95: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

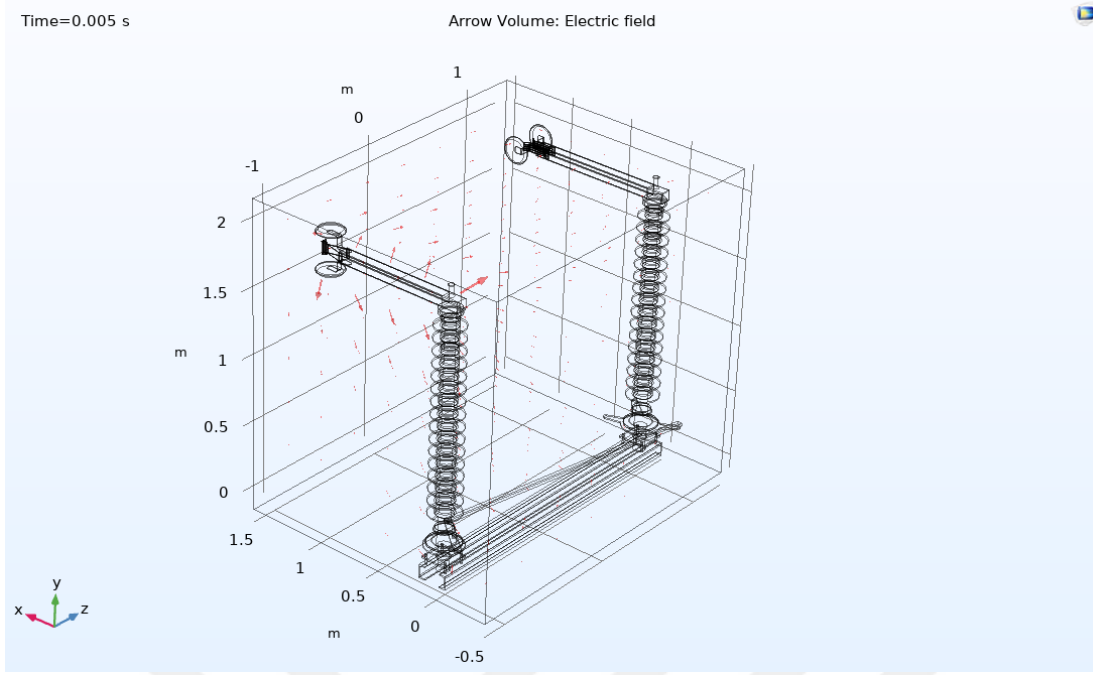
Şekil 4.96’da açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.96: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

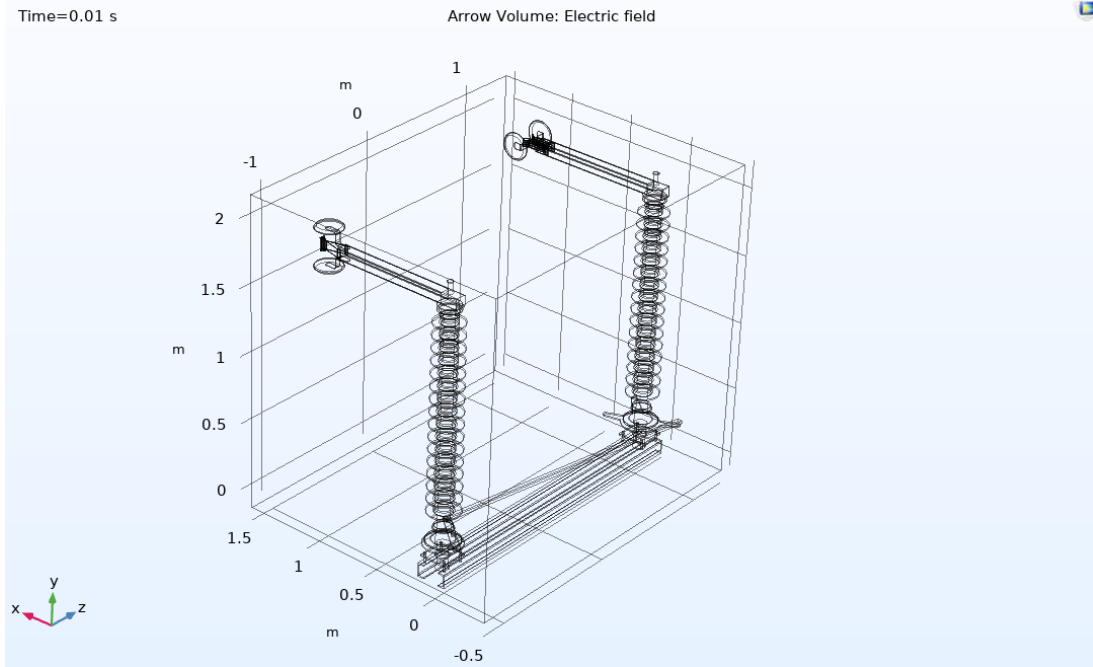
Şekil 4.94’ten başlayarak Şekil 4.96’ya kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı işletme geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Elektriksel potansiyel değerin işareti ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Topraklanan uç ve şasede ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır.

Şekil 4.97’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



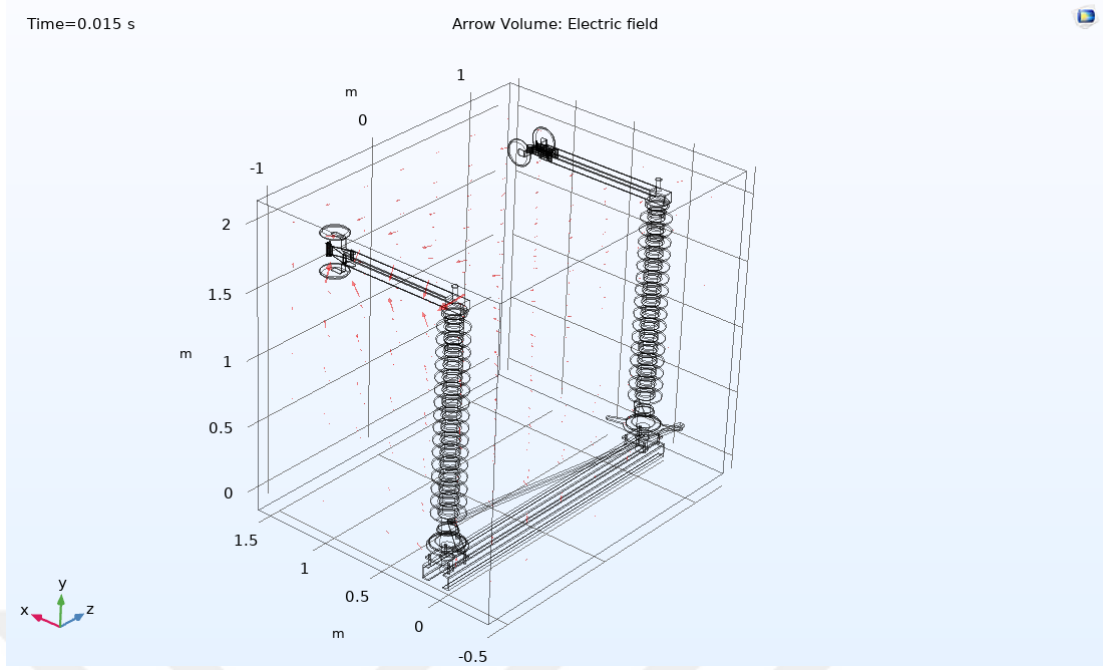
Şekil 4.97: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.98’de açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.98: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.

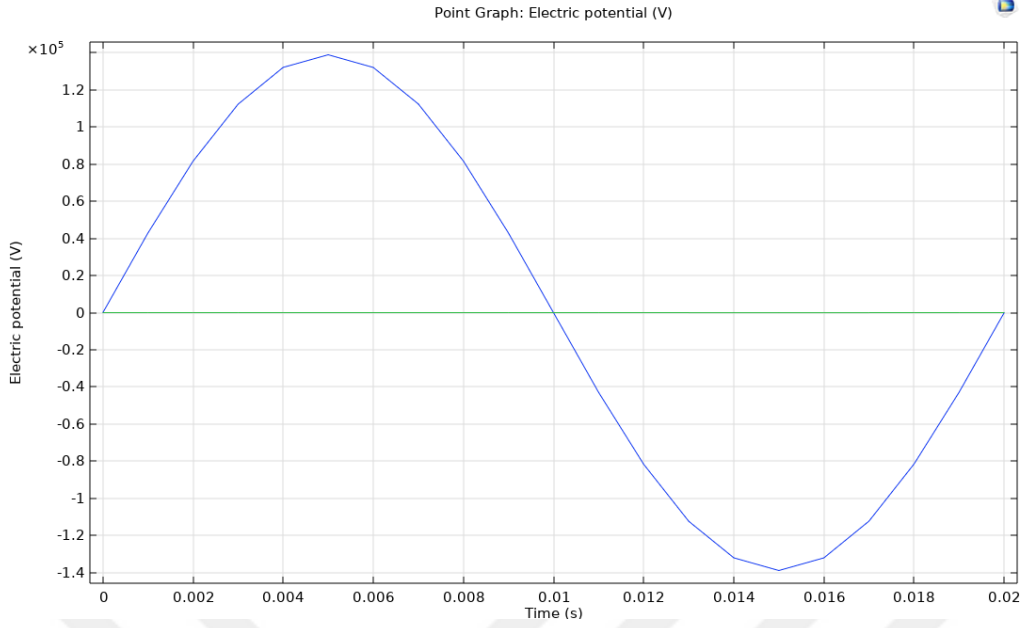
Şekil 4.99’da açık durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.99: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

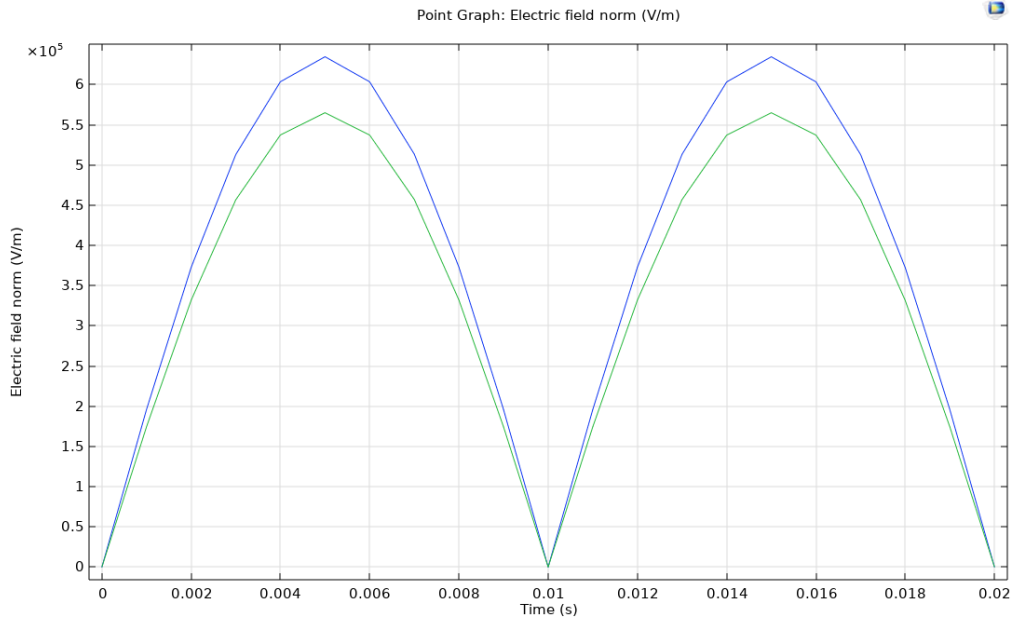
Şekil 4.97’den başlayarak Şekil 4.99’a kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzeri elektrik alan dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı işletme geriliminin anlık gerilim seviyesiyle orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Şebeke frekanslı gerilimin anlık değeri 10. ms’de sıfır olduğundan dolayı, 10. ms’de ayırıcı üzerinde herhangi bir elektrik alan oluşmamaktadır. Elektrik alan çizgilerinin yönü ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uca ait akım taşıyan kol olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

Ayırıcının açık pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18’de gösterilmiş olan noktalara ait, şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.100 ve Şekil 4.101’de verilmiştir. Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.100’de görülmektedir.



Şekil 4.100: Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Gerilim uygulanmayan uca ait kontakta herhangi bir elektriksel potansiyel değerin oluşmadığı görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin 130 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.

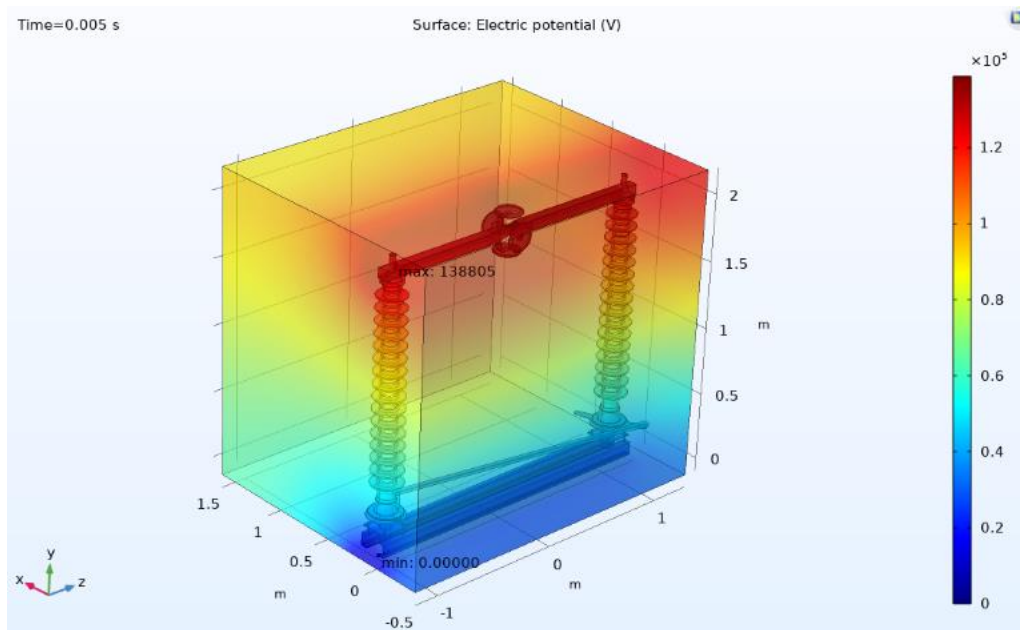


Şekil 4.101: Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanının zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanının zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan

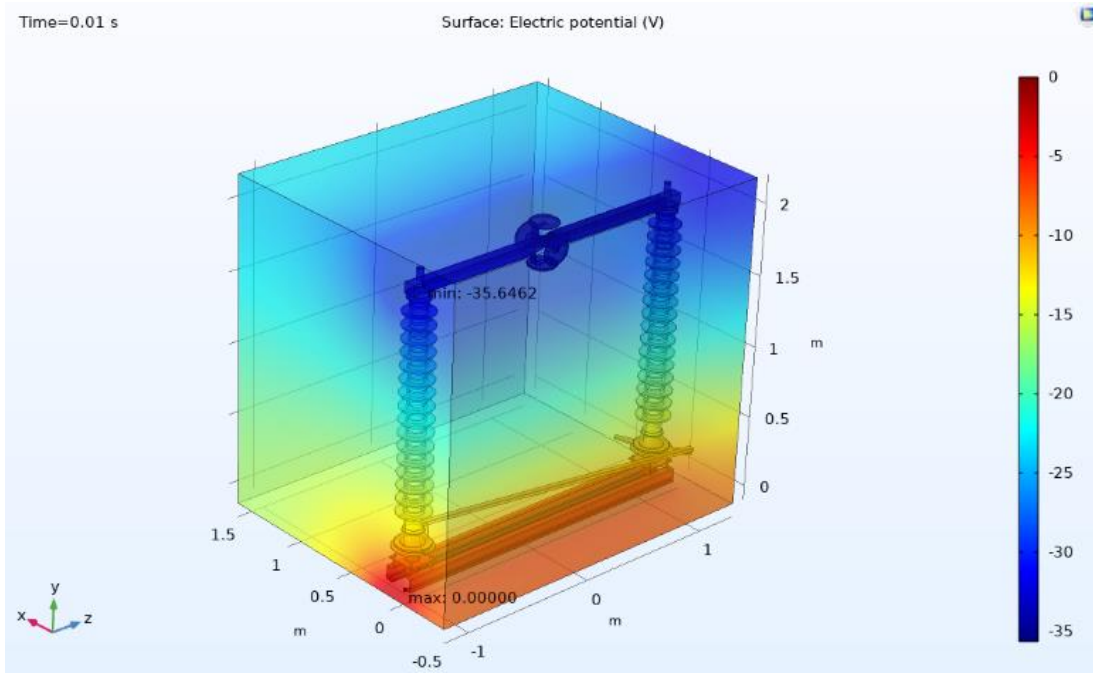
4.2.3.2 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası işletme geriliminin uygulanması

Şebeke frekanslı işletme geriliminin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir. Şekil 4.102’de kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir



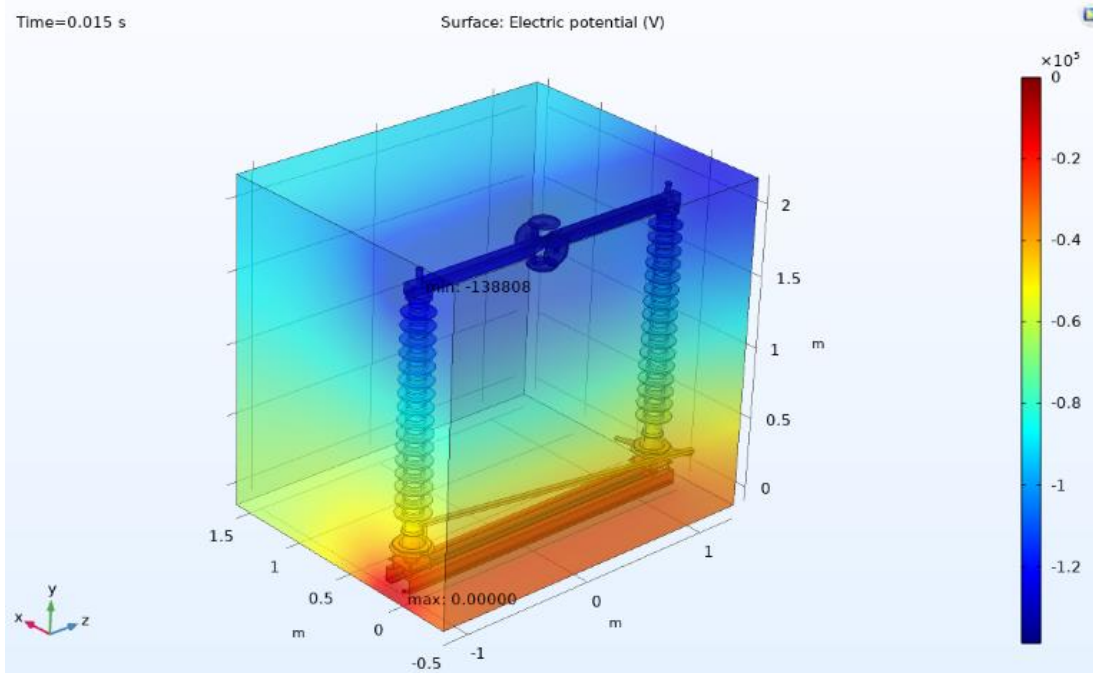
115

Şekil 4.103'te kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.103: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

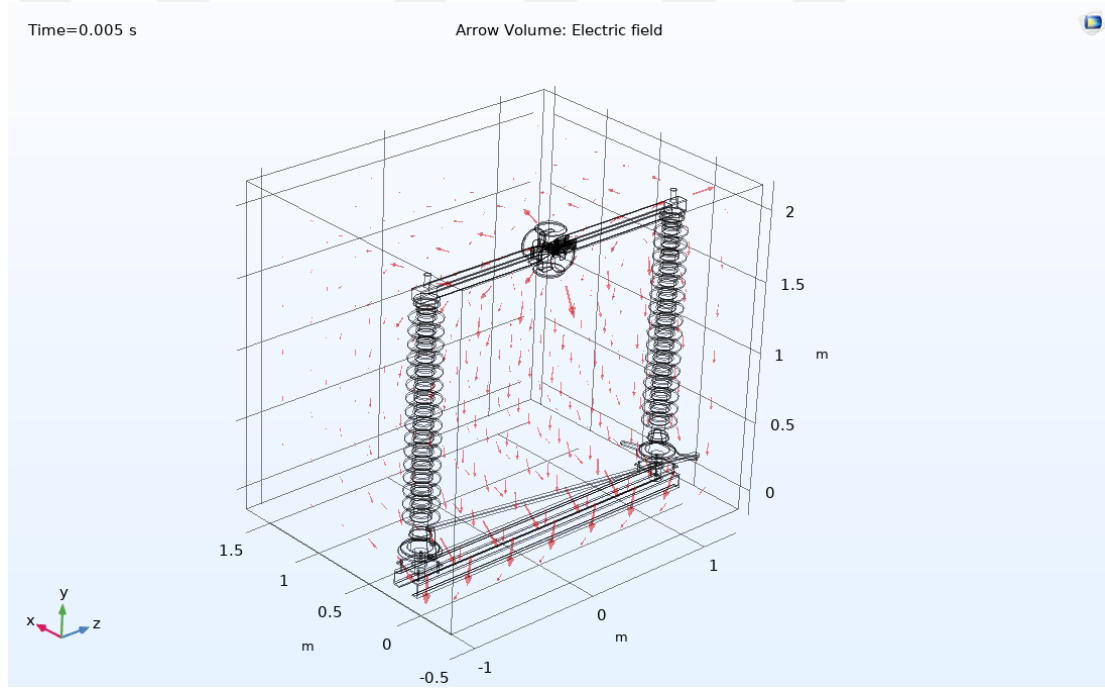
Şekil 4.104'te kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.104: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

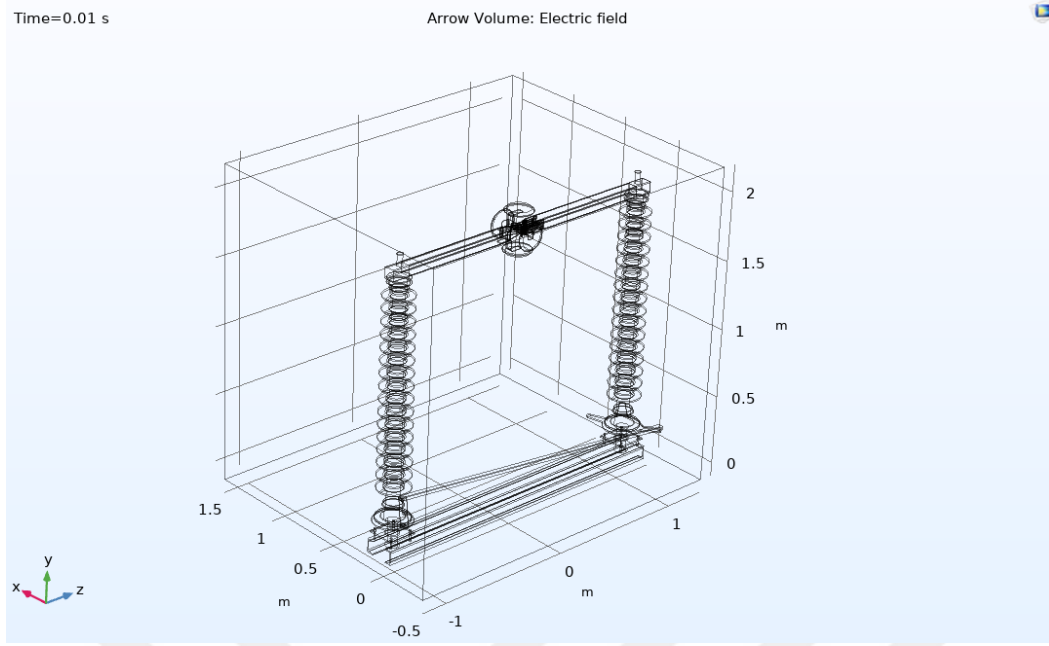
Şekil 4.102’den başlayarak Şekil 4.104’e kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı işletme geriliminin dalga şekline uygun bir dağılım göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın gerilim uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Elektriksel potansiyel değerin işareti ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Topraklanan şasede ise herhangi bir elektriksel potansiyel oluşmamıştır.

Şekil 4.105’te kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



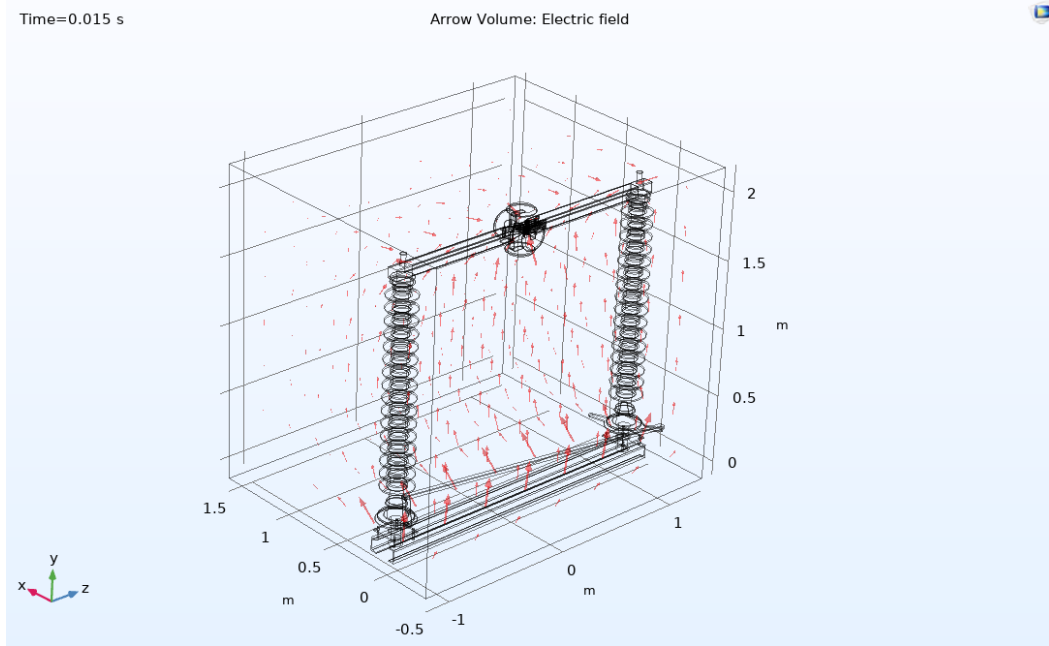
Şekil 4.105: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 5 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.106’da kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.106: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 10 ms sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.107’de kapalı durumdaki ayırıcıya şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.

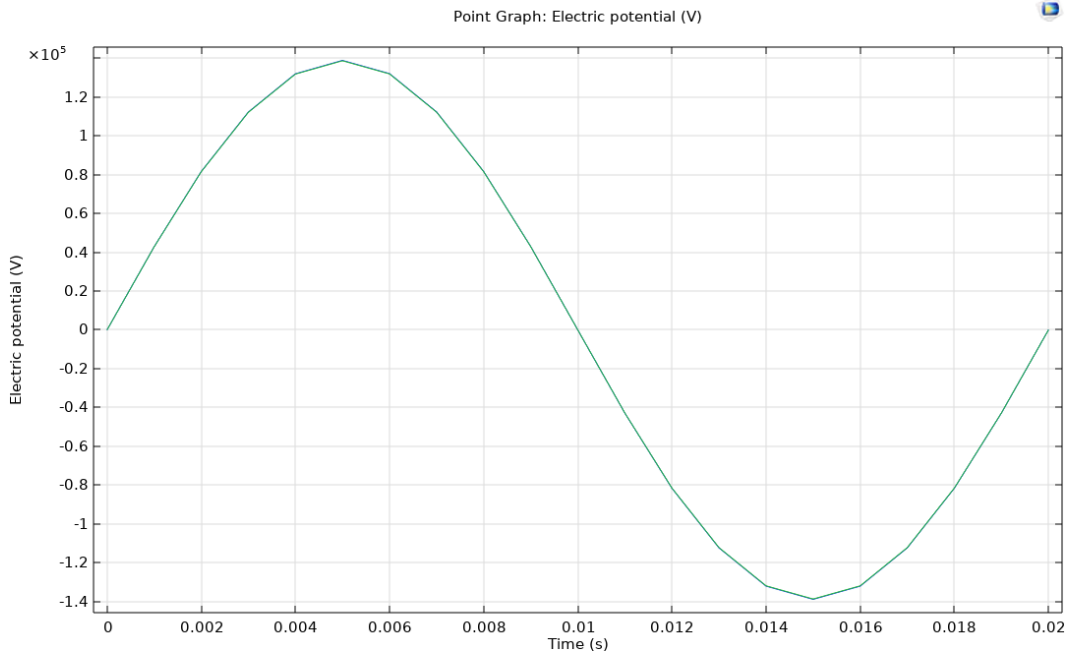


Şekil 4.107: Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulandıktan 15 ms sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.105’ten başlayarak Şekil 4.107’ye kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden

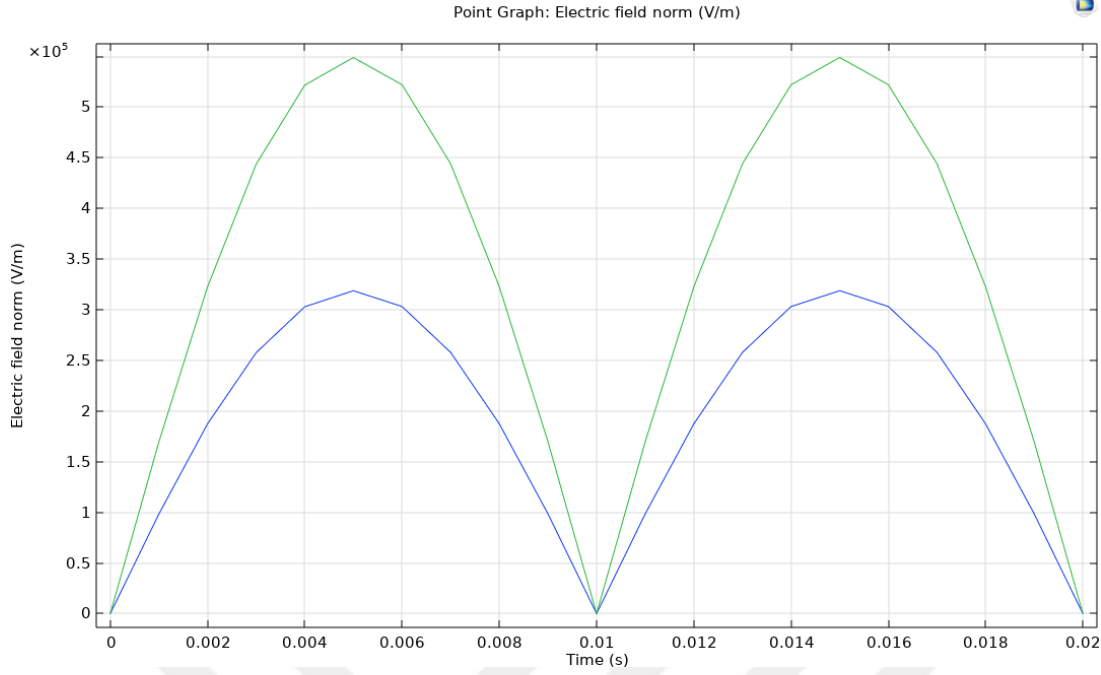
görülebileceği üzeri elektrik alan dağılımı, uygulanan şebeke frekanslı işletme geriliminin anlık gerilim seviyesiyle orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Şebeke frekanslı gerilimin anlık değeri 10. ms’de sıfır olduğundan dolayı, 10. ms’de ayırıcı üzerinde herhangi bir elektrik alan oluşmamaktadır. Elektrik alan çizgilerinin yönü ise gerilimin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin akım taşıyan kollar olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

Ayırıcının kapalı pozisyonu için model üzerinde belirlenmiş ve Şekil 4.18’de gösterilmiş olan noktalara ait, şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulaması süresince gözlemlenmiş elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri sırasıyla Şekil 4.108 ve Şekil 4.109’da verilmiştir.



Şekil 4.108: Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uçta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak hareket ettiği Şekil 4.108’de görülmektedir. Hem gerilim uygulanmayan uçta oluşan elektriksel potansiyelin hem de gerilim uygulanan uçta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. Tüm analiz göz önüne alındığında uçlarda oluşan maksimum elektriksel potansiyel değerin 130 kV mertebelerinde olduğu söylenebilir.



Şekil 4.109: Şebeke frekanslı işletme gerilimi altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilime bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektrik alanın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Hem gerilim uygulanan hem de gerilim uygulanmayan uçlarda oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimin şiddetiyle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.109’da görülmektedir.

Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 5.5 kV/cm olduğu ve gerilim uygulanan uç yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Gerilim uygulanmayan uç yüzeyinde meydana gelen elektrik alan değeri ise 3.2 kV/cm olmuştur.

4.2.4 Karma gerilimin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkiler

Ayırıcılar gerçek işletme şartları altında aynı anda birden fazla gerilime maruz kalabilirler. İşletme gerilimi altındayken yıldırım düşmesi yaşanabilecek durumlardan biridir. Bu tür bir durumun oluşması halinde ayırıcılar tip deneylerinde denenen durumların haricinde karma gerilimler ile zorlanırlar.

4.2.4.1 Ayırıcı açık iken ayırma aralığı boyunca karma gerilimin uygulanması

Ayırıcı açık pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının ayırma aralığının, işletme gerilimine ek olarak ayırıcıya yıldırım darbe geriliminin ulaşması durumundaki performansı değerlendirilir.

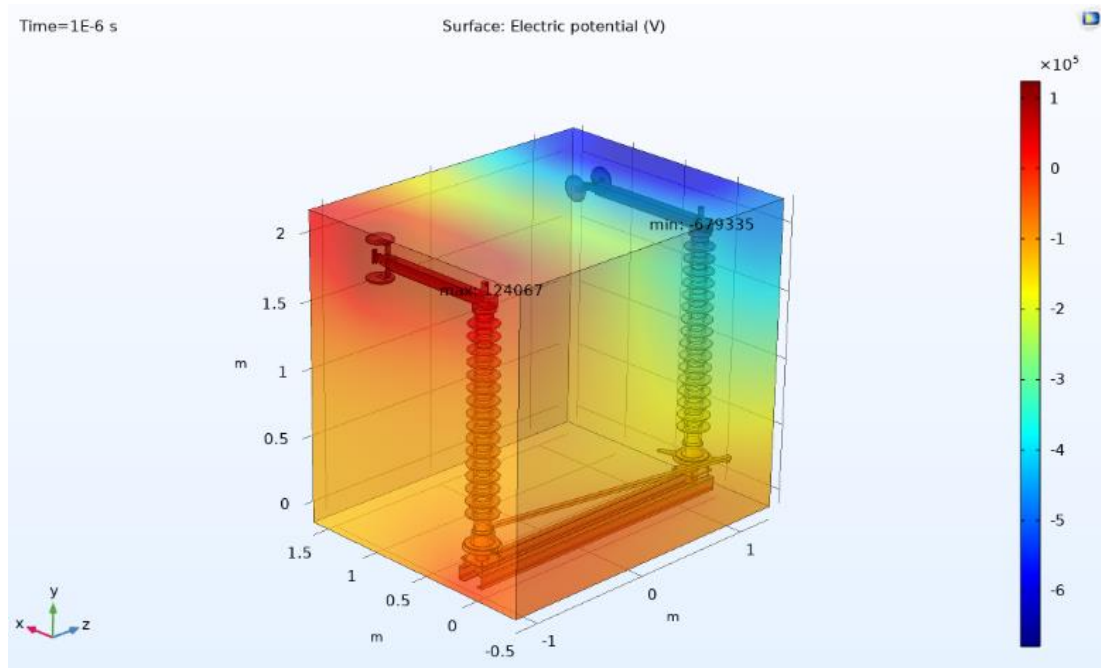
Daha önceki adımlarda izah edildiği üzere işletme geriliminin tepe değeri 138,8 kV, ayırma aralığı için yıldırım darbe geriliminin tepe değeri 860 kV olarak uygulanmıştır.

Yıldırım darbe gerilimi ve işletme gerilimi ayırıcıya açık pozisyondayken eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Gerilimler ayırıcıya uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine yıldırım darbe gerilimi uygulanmış, diğer uca işletme gerilimi uygulanmıştır. Şase topraklanmıştır. Şasenin topraklanmasının nedeni analiz, gerçek işletme koşullarına uyum sağlamasıdır. Böylece ayırıcının kullanıldığı sahalarda açık pozisyondayken ayırıcının uçlarından birinde gerilim varken, diğer uca yıldırım düşmesi durumu simüle edilmiş olur.

Gerilimler uygulanırken, en olumsuz durumu gözlemleyebilmek adına yıldırım darbe gerilimi, şebeke frekanslı işletme geriliminin maksimum olduğu anda uygulanmıştır. Negatif kutuplu yıldırım darbe gerilimi, şebeke frekanslı işletme geriliminin pozitif kutbuna denk gelecek şekilde ayarlanmıştır. Böylece uçlar arasındaki potansiyel farkın maksimum olması dolayısıyla zorlanmanın da maksimuma ulaşması amaçlanmıştır.

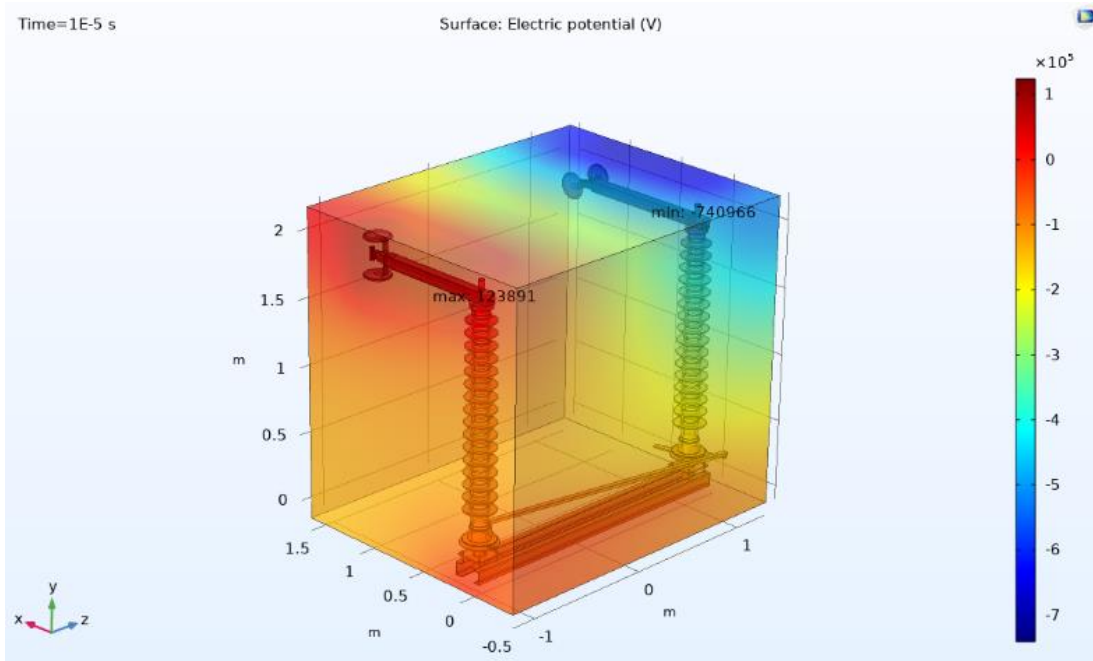
Gerilimlerin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimlerin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.110'da açık durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



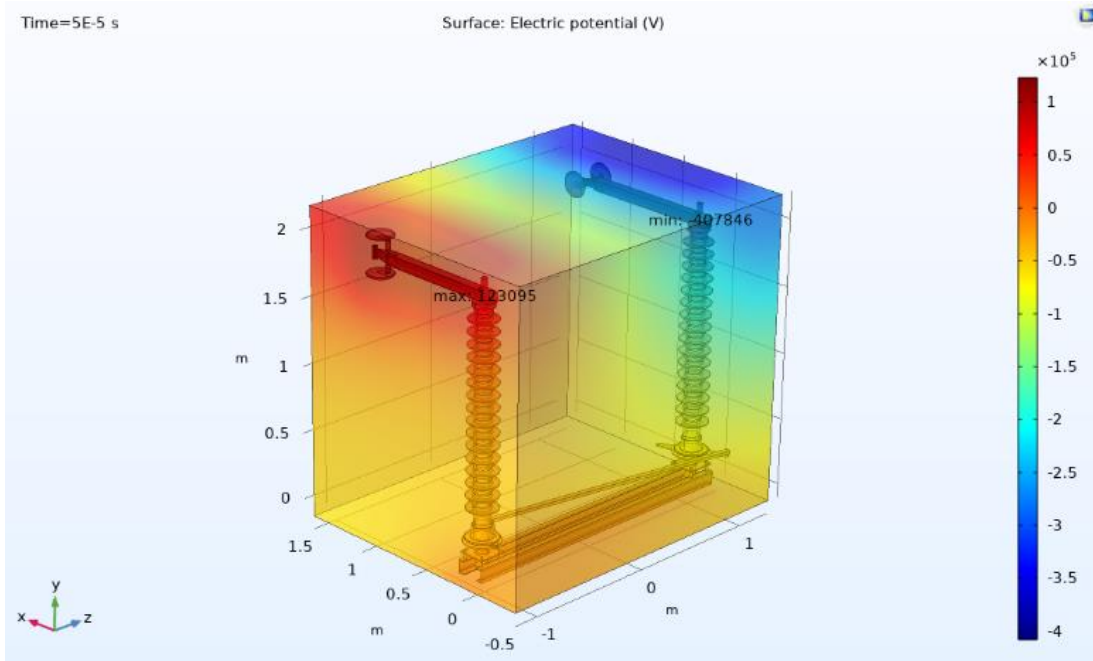
Şekil 4.110: Karma gerilim uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.111’de açık durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.111: Karma gerilim uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

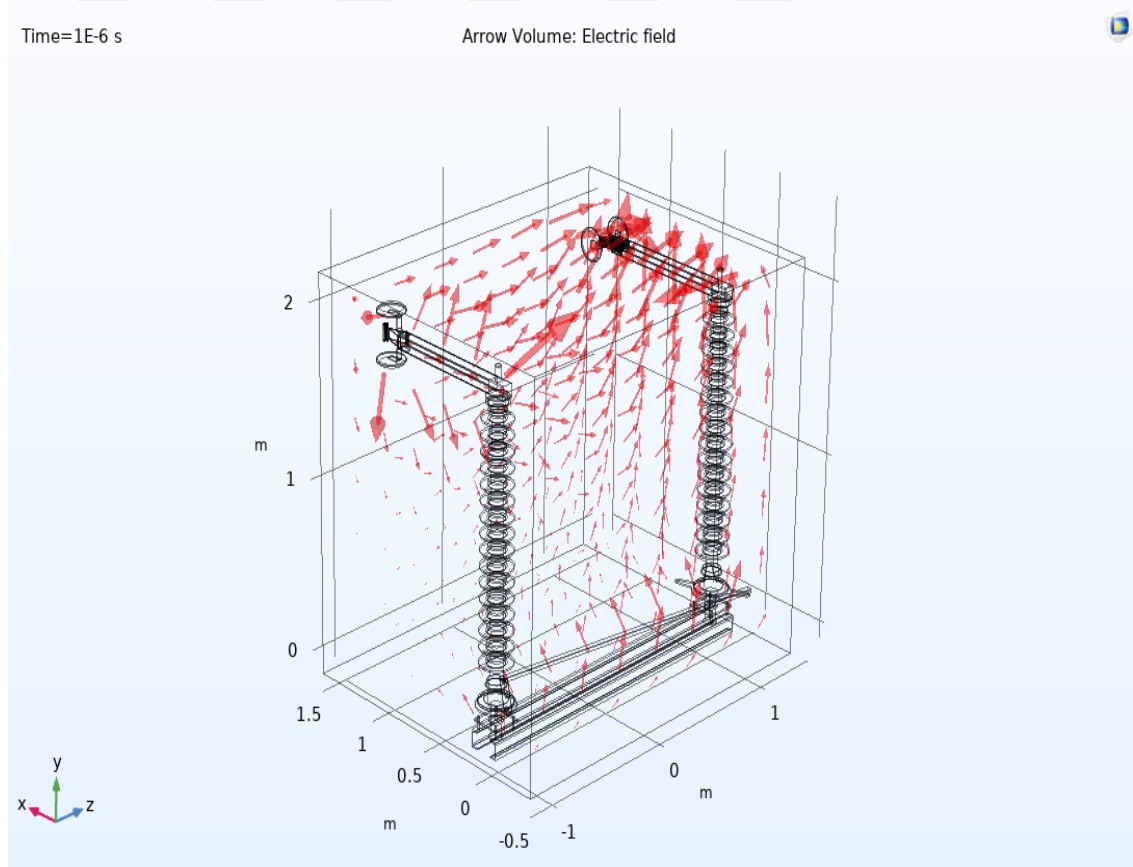
Şekil 4.112’de açık durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.112: Karma gerilim uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

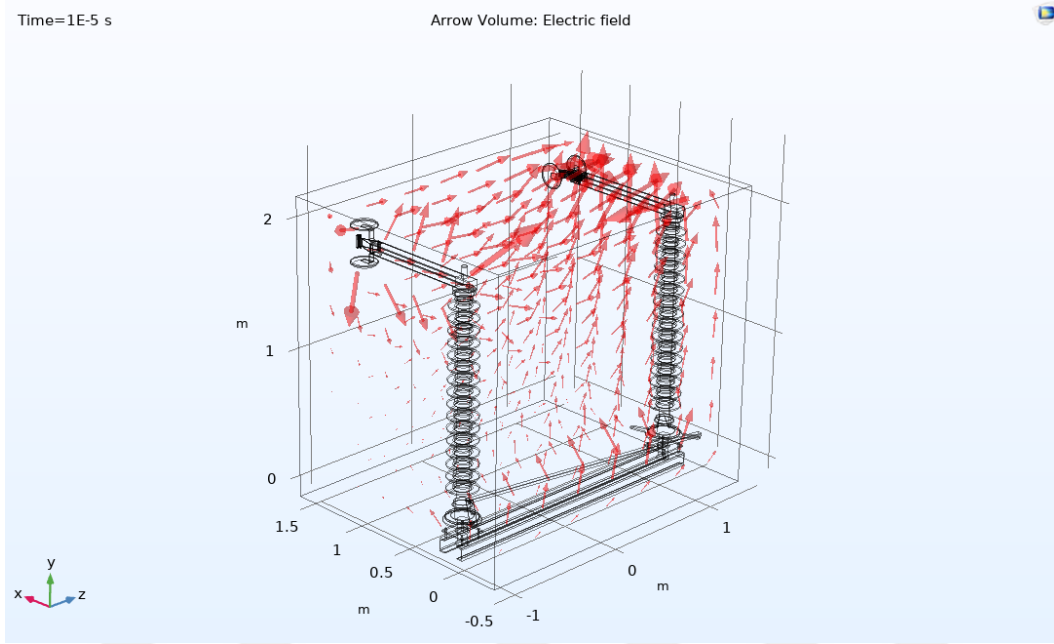
Şekil 4.110'dan başlayarak Şekil 4.112'ye kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanan uçtaki elektriksel potansiyel değerin 50 μ s boyunca değişmediği söylenebilir. Öte yandan yıldırım darbe gerilimi uygulanan uçta oluşan elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir değişim göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın yıldırım darbe gerilimi uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Elektriksel potansiyel değerin işareti ise gerilimlerin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 4.113'te açık durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



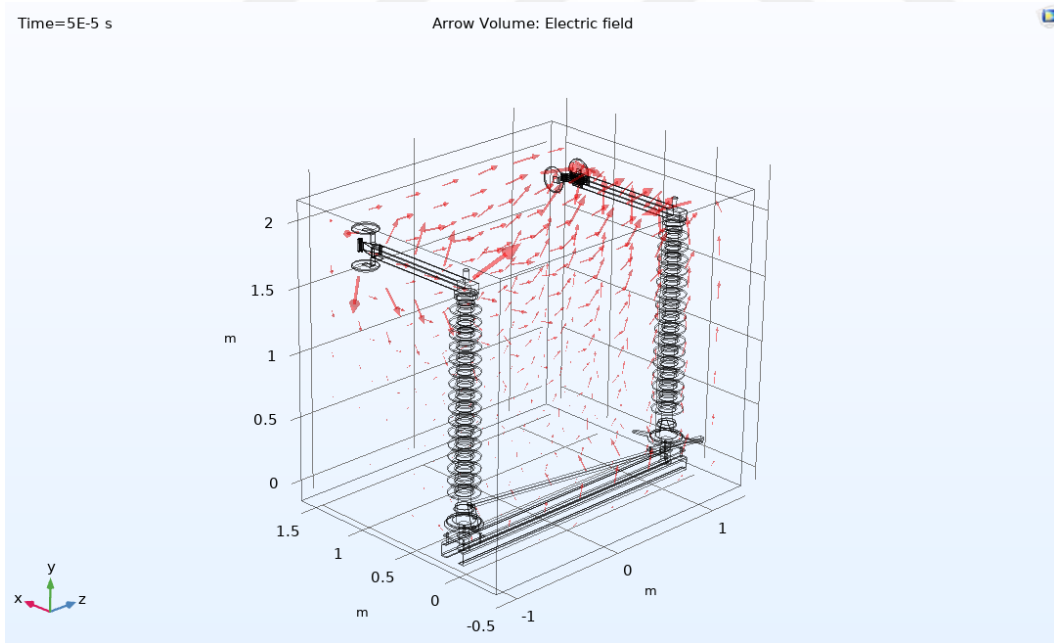
Şekil 4.113: Karma gerilim uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.114'te açık durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 10 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.114: Karma gerilim uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.115'te açık durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan $50 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



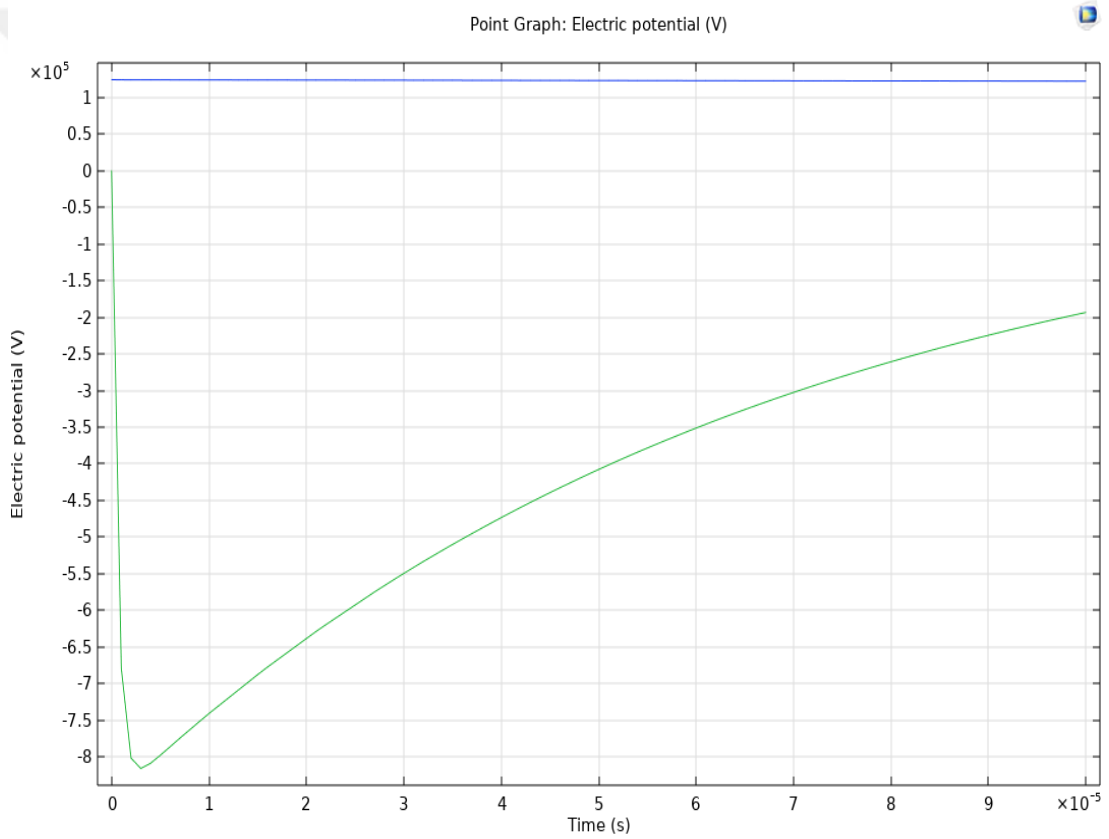
Şekil 4.115: Karma gerilim uygulandıktan $50 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.113'ten başlayarak Şekil 4.115'e kadar verilen şekillerde ayırıcının açık pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektrik alan dağılımı, uygulanan gerilimlerin anlık gerilim

seviyesiyle orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uçlara ait akım taşıyan kollar olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir.

Yukarıda verilen şekillerin dışında model üzerinde belirlenecek herhangi bir noktadaki elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri de verilebilir.

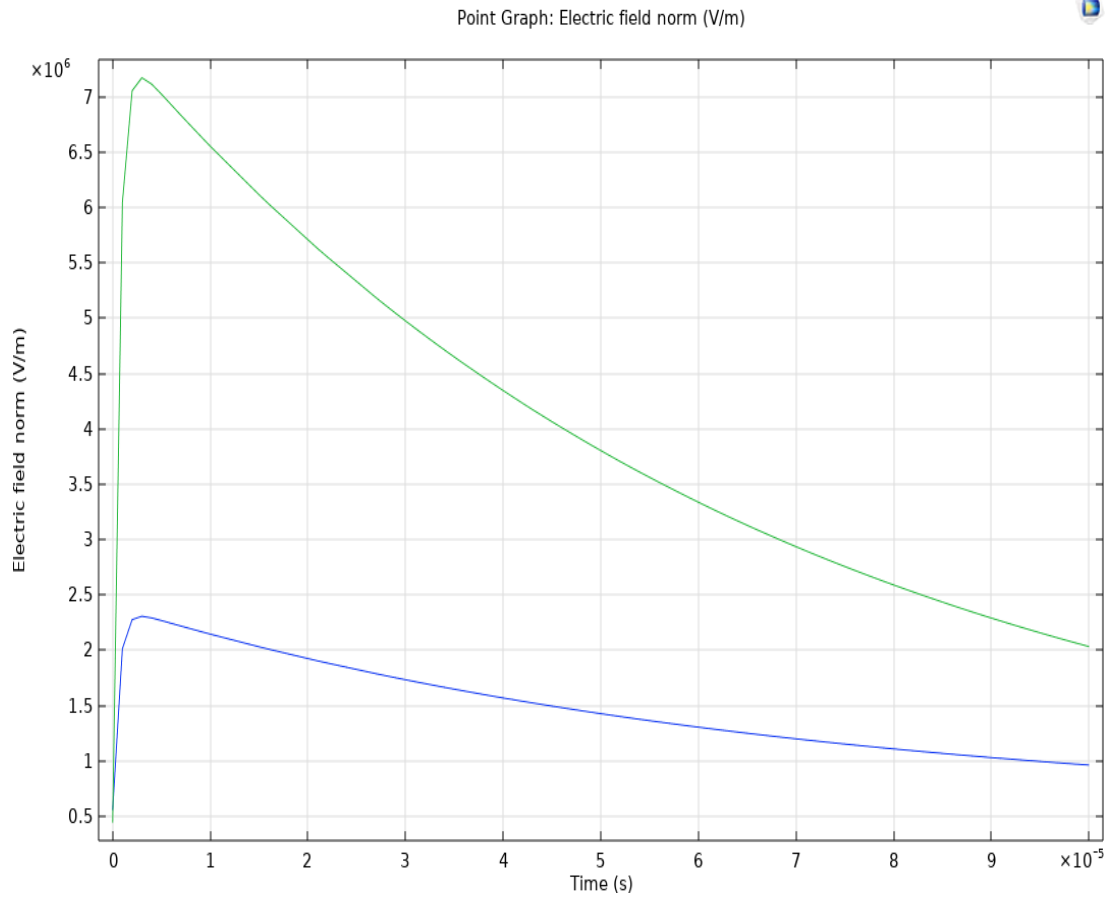
Ayırıcının kapalı pozisyonu için Şekil 4.18’de belirtilen noktalara ait elektriksel potansiyel – zaman grafiği Şekil 4.116’da, elektrik alan – zaman grafiği Şekil 4.117’de verilmiştir.



Şekil 4.116: Karma gerilim altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilimlere bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Yıldırım darbe gerilimi uygulanan uca ait kontakta oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.116’da görülmektedir. Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanan uca ait kontakta oluşan maksimum elektriksel potansiyelin değerin 120 kV

mertebelerinde olduğu ve şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Tüm analiz göz önüne alındığında yıldırım darbe gerilimi uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerin -810 kV mertebelerinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.117: Karma gerilim altındayken mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilimlere bağlı olarak ayırıcı kontaklarında oluşan elektrik alanın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Hem yıldırım darbe gerilimi uygulanan uca hem de şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanan uca ait kontaklarda oluşan elektrik alan değerlerinin uygulanan gerilimin şiddetiyle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.117de görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 72 kV/cm olduğu ve yıldırım darbe gerilimi uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanan uca ait kontak yüzeyinde meydana gelen maksimum elektrik alan değeri ise 24 kV/cm olmuştur.

Ayırıcıya açık pozisyondayken karma gerilim uygulanmasıyla elde edilen sonuçlarda, en fazla elektriksel zorlanmanın 3. μ s'de olduğu gözlemlenmiştir. Bundan ötürü, Şekil 4.118'de karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektriksel potansiyelin ayırıcı yüzeyindeki dağılımı, Şekil 4.119'da karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektrik alanının ayırıcı kontaklarındaki dağılımı verilmiştir.

4.2.4.2 Ayırıcı kapalı iken faz – toprak arası karma gerilimin uygulanması

Ayırıcı kapalı pozisyondayken uygulanan bu deney ile ayırıcının faz – toprak arası dayanımının, işletme gerilimine ek olarak ayırıcıya yıldırım darbe geriliminin ulaşması durumundaki performansı değerlendirilir.

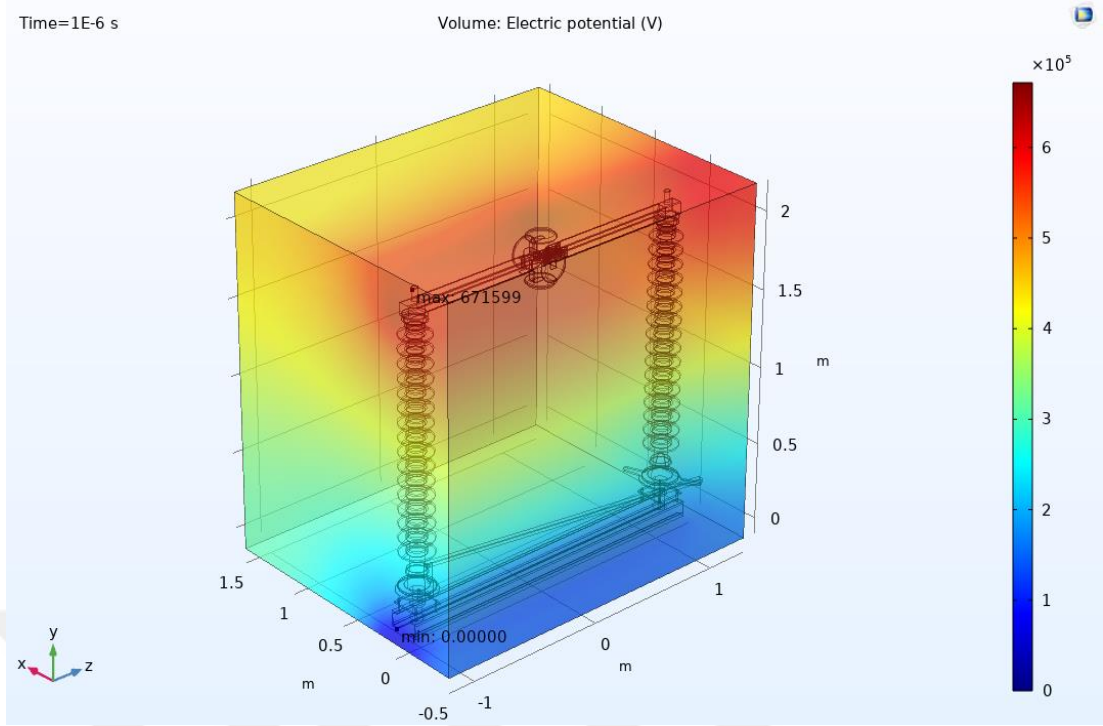
Daha önceki adımlarda izah edildiği üzere işletme geriliminin tepe değeri 138,8 kV, faz – toprak arası yıldırım darbe geriliminin tepe değeri 750 kV olarak uygulanmıştır.

Yıldırım darbe gerilimi ve işletme gerilimi ayırıcıya kapalı pozisyondayken eş zamanlı olarak uygulanmıştır. Gerilimler ayırıcıya uygulanırken ayırıcının aynı fazına ait uçlarından birine yıldırım darbe gerilimi uygulanmış, diğer uca işletme gerilimi uygulanmıştır. Şase topraklanmıştır. Şasenin topraklanmasının nedeni analizin, gerçek işletme koşullarına uyum sağlamasıdır. Böylece ayırıcının kullanıldığı sahalarda kapalı pozisyondayken ayırıcının uçlarından birinde gerilim varken, diğer uca yıldırım düşmesi durumu simüle edilmiş olur.

Gerilimler uygulanırken, en olumsuz durumu gözlemleyebilmek adına yıldırım darbe gerilimi, şebeke frekanslı işletme geriliminin maksimum olduğu anda uygulanmıştır. Pozitif kutuplu yıldırım darbe gerilimi, şebeke frekanslı işletme geriliminin pozitif kutbuna denk gelecek ayarlanmıştır. Böylece ayırıcı kolları ile toprak potansiyelindeki şase arasındaki potansiyel farkın maksimum olması dolayısıyla zorlanmanın da maksimuma ulaşması amaçlanmıştır.

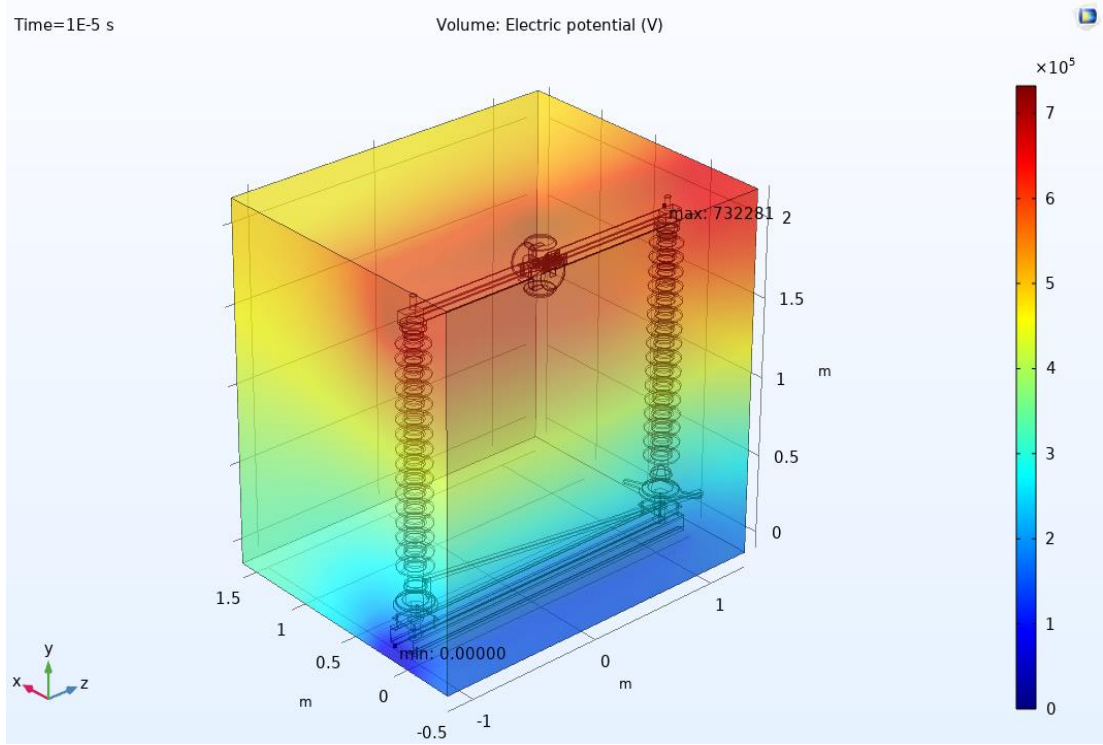
Gerilimlerin uygulanmasıyla birlikte elde edilen analiz sonuçları, gerilimlerin uygulanmasından sonra geçen süre ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Şekil 4.120'de kapalı durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



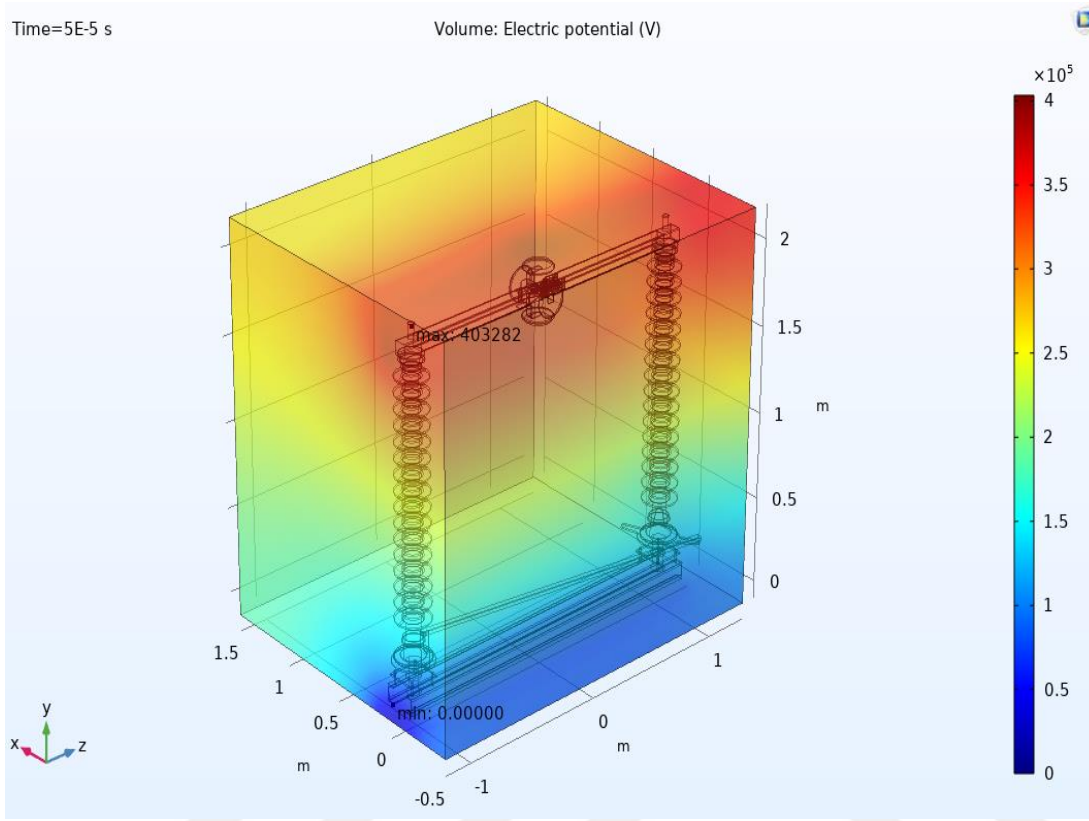
Şekil 4.120: Karma gerilim uygulandıktan 1 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

Şekil 4.121’de kapalı durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.121: Karma gerilim uygulandıktan 10 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

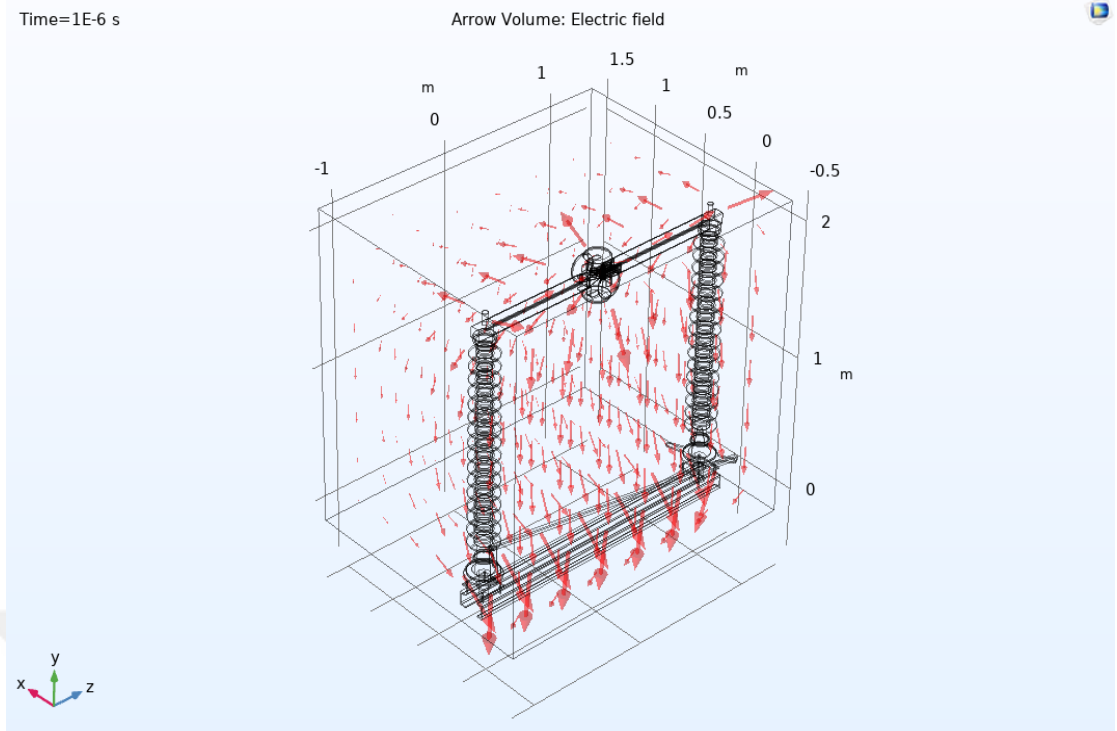
Şekil 4.122’de kapalı durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.122: Karma gerilim uygulandıktan 50 μ s sonra elektriksel potansiyel dağılımı.

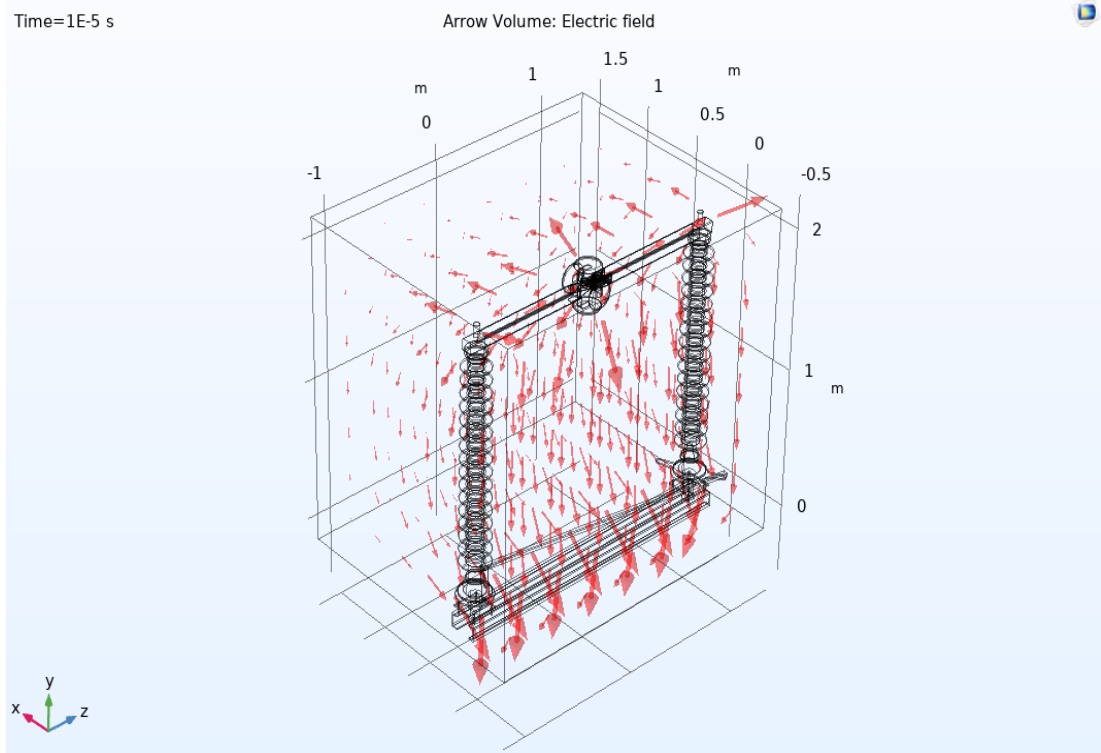
Şekil 4.120’den başlayarak Şekil 4.122’ye kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektriksel potansiyel dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektriksel potansiyel dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere yıldırım darbe gerilimi uygulanan uçta oluşan elektriksel potansiyel dağılımı, uygulanan yıldırım darbe geriliminin dalga şekline uygun bir değişim göstermiştir. Elektriksel potansiyel dağılımının maksimum olduğu noktanın yıldırım darbe gerilimi uygulanan uç olduğu da yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Elektriksel potansiyel değerin işareti ise gerilimlerin o anki kutbuna bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 4.123’te kapalı durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 1 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



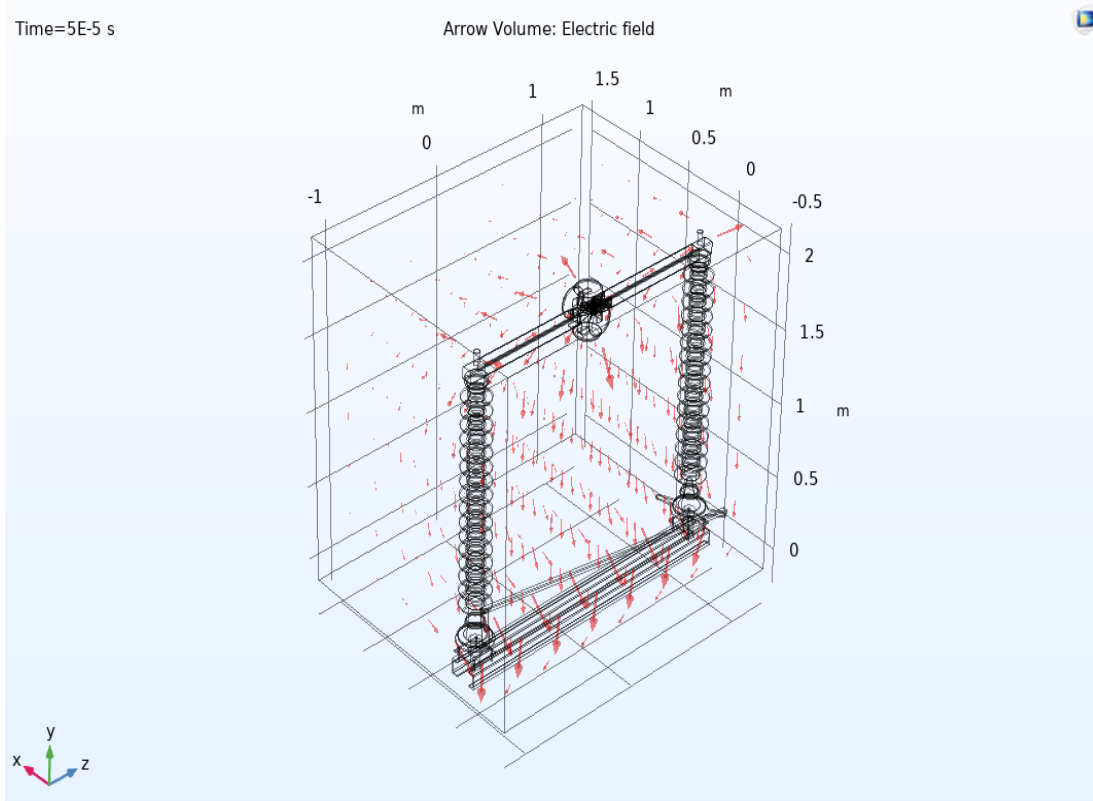
Şekil 4.123: Karma gerilim uygulandıktan $1 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

Şekil 4.124'te kapalı durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.124: Karma gerilim uygulandıktan $10 \mu\text{s}$ sonra elektrik alan dağılımı.

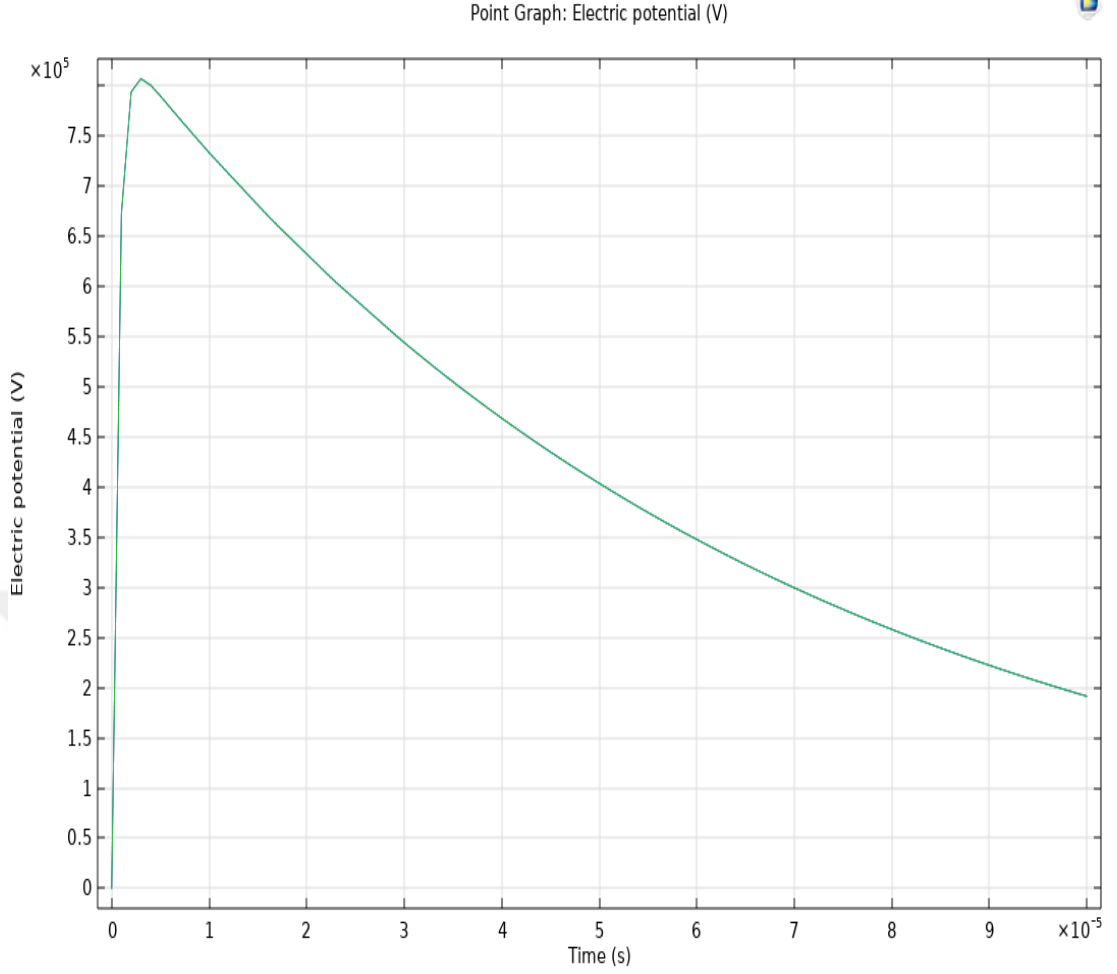
Şekil 4.125'te kapalı durumdaki ayırıcıya karma gerilim uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.125: Karma gerilim uygulandıktan 50 μ s sonra elektrik alan dağılımı.

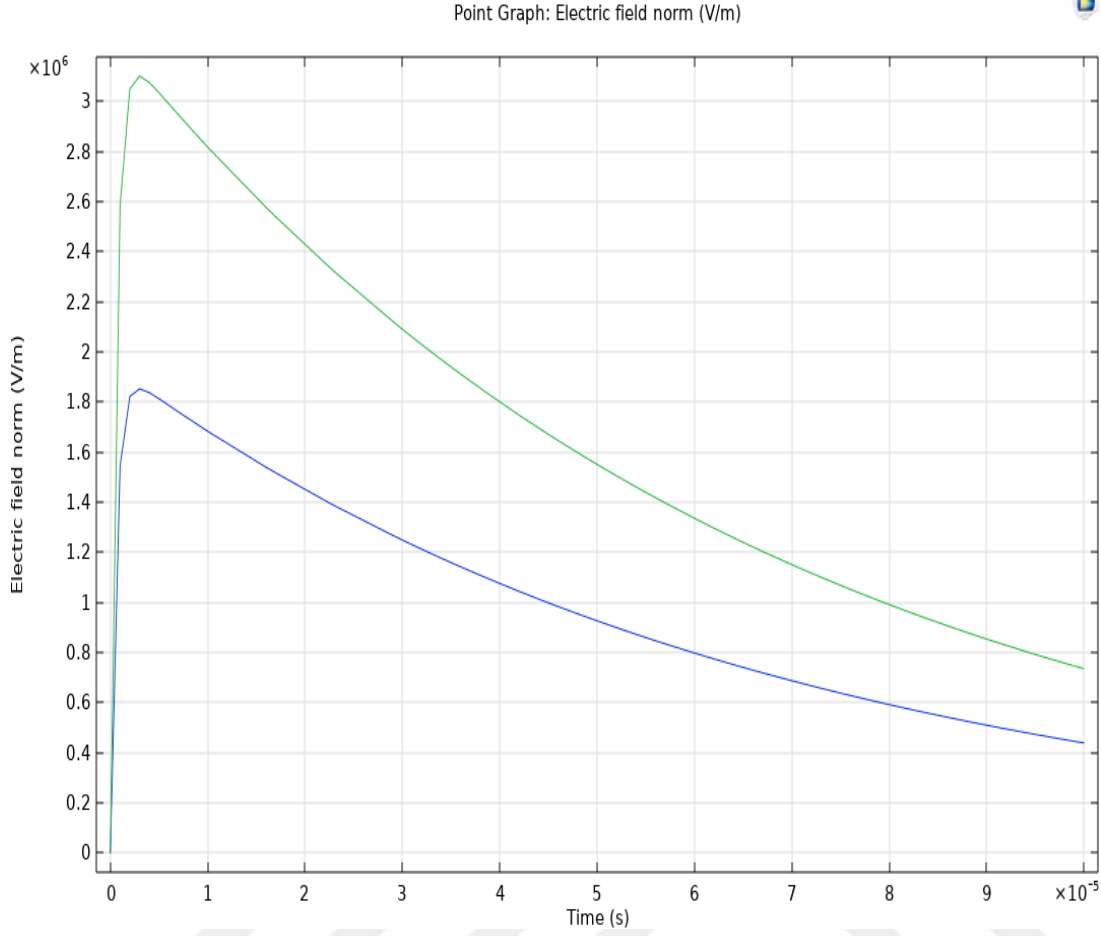
Şekil 4.123'ten başlayarak Şekil 4.125'e kadar verilen şekillerde ayırıcının kapalı pozisyonu için elektrik alan dağılımının nasıl oluştuğu görülmektedir. Bu şekillerde elektrik alan dağılımının belirli anlara ait görüntüleri verilmiştir. Şekillerden görüleceği üzere elektrik alan dağılımı, uygulanan gerilimlerin anlık gerilim seviyesiyle orantılı olacak şekilde bir dağılım göstermiştir. Elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu bölgenin gerilim uygulanan uçlara ait akım taşıyan kollar olduğu yukarıdaki şekillerde görülmektedir. Ayrıca en fazla zorlanmanın ayırıcının kontaklarında meydana geldiği de görülmektedir. Yukarıda verilen şekillerin dışında model üzerinde belirlenecek herhangi bir noktadaki elektriksel potansiyel ve elektrik alan değerlerinin zamana bağlı grafikleri de verilebilir.

Ayırıcının kapalı pozisyonu için Şekil 4.18'de belirtilen noktalara ait elektriksel potansiyel – zaman grafiği Şekil 4.126'da, elektrik alan – zaman grafiği Şekil 4.127'de verilmiştir.



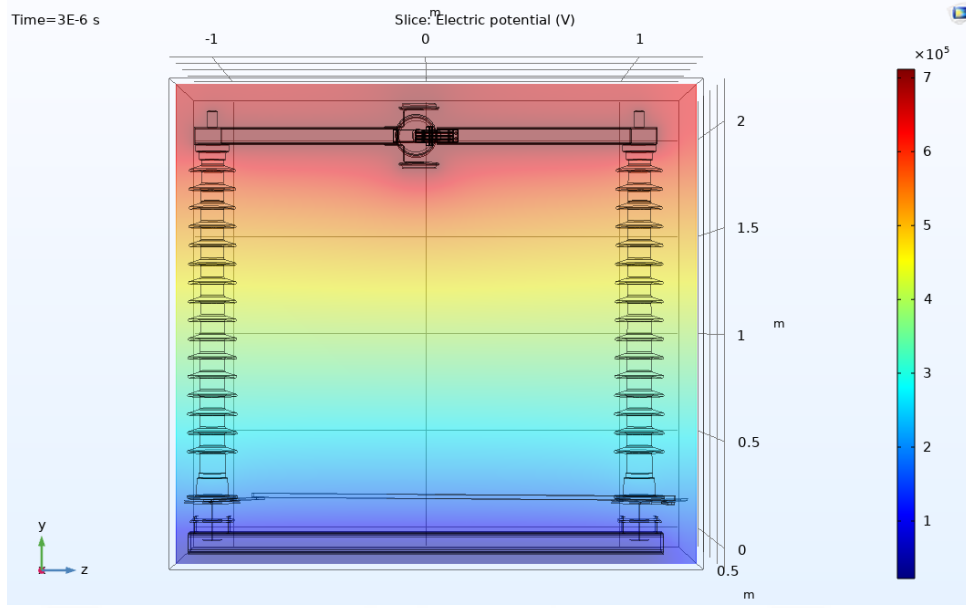
Şekil 4.126: Karma gerilim altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilimlere bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektriksel potansiyelin zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Ayırıcının uçlarında oluşan elektriksel potansiyelin uygulanan gerilimle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.126'da görülmektedir. Ayırıcı uç yüzeylerinde oluşan maksimum elektriksel potansiyel değerin eşit olduğu gözlemlenmiştir. Tüm analiz göz önüne alındığında uçlarda oluşan maksimum elektriksel potansiyel değerin 800 kV mertebelerinde olduğu görülmektedir.

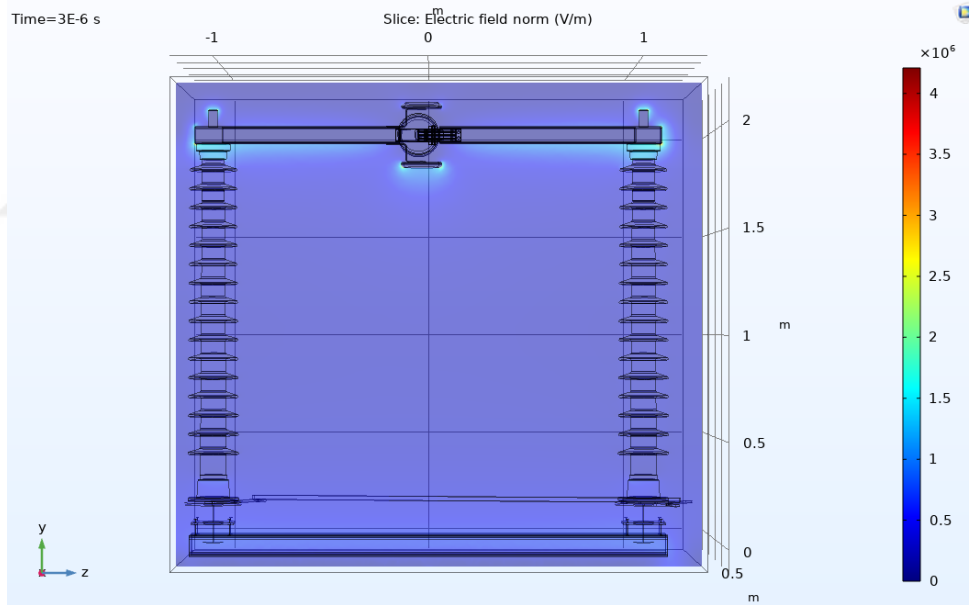


Şekil 4.127: Karma gerilim altında mavi ve yeşil noktalarda meydana gelen elektrik alanın zamana bağlı değişimi.

Uygulanan gerilimlere bağlı olarak ayırıcı uçlarında oluşan elektrik alanın zamana bağlı değişimi incelenmiştir. Gerilim uygulanan uçlarda oluşan elektrik alan değerinin uygulanan gerilimin şiddetiyle doğru orantılı olarak değiştiği Şekil 4.127’de görülmektedir. Tüm analiz göz önüne alındığında maksimum elektrik alan değerinin 31 kV/cm olduğu ve yıldırım darbe gerilimi uygulanan uç yüzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanan uç yüzeyinde meydana gelen maksimum elektrik alan değeri ise 18 kV/cm olmuştur.



Şekil 4.128: Karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektriksel potansiyelin ayırıcı yüzeyindeki dağılımı.



Şekil 4.129: Karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektrik alanının ayırıcı yüzeyindeki dağılımı.

Ayırıcıya kapalı pozisyondayken karma gerilim uygulanmasıyla elde edilen sonuçlarda, en fazla elektriksel zorlanmanın 3. μ s'de olduğu gözlemlenmiştir. Bundan ötürü, Şekil 4.129'de karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektriksel potansiyelin ayırıcı yüzeyindeki dağılımı, Şekil 4.129'da karma gerilim uygulandıktan 3 μ s sonra elektrik alanının ayırıcı yüzeyindeki dağılımı verilmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek gerilim sistemleri, elektrik enerjisinin yüksek bir verimle kullanılabilmesi için gereklidir. Bu tür sistemlerin kurulabilmesi için ise çeşitli aygıt ve düzenlere ihtiyaç vardır. Yüksek gerilim ayırıcıları bu tür aygıt ve düzenlerden bir tanesidir ve yüksek gerilim sistemlerinin olmazsa olmaz donanımlarındandır. Bu özelliğinden dolayı, yüksek gerilim ayırıcıları bağlı bulundukları sistemlerde sorunsuz ve hasarsız olarak çalışmalıdır. Böylesi güvenli bir çalışmanın yapılabilmesi için ise ürünlerin tasarımlarının uygun bir şekilde yapılması ve ürünlerin çeşitli deneylerden geçirilmesi gerekmektedir.

Bu tür ürünlerin uygulama esnasında nadiren de olsa tip deneylerinde belirtilen koşulların dışında koşullara maruz kaldığı bilinmektedir. Bu tez çalışmasında, bu tür durumlardan biri olan ayırıcının karma gerilimlere maruz kalması durumu incelenmiştir. Karma gerilimin elde edilebilmesi için yıldırım darbe gerilimi ile şebeke frekanslı gerilim bir arada kullanılmıştır. Karma gerilimin ayırıcı üzerinde meydana getirdiği etkilerin incelenebilmesi için ilk olarak ayırıcının yıldırım darbe gerilimi altındaki durumu analiz edilmiş daha sonra şebeke frekanslı gerilim altındaki elektriksel potansiyel ve elektrik alan dağılımları analiz edilmiştir. Son olarak, ayırıcının karma gerilim altındaki elektriksel potansiyel ve elektrik alan dağılımları analiz edilmiştir.

Ayırıcı yıldırım darbe gerilimi ve şebeke frekanslı gerilim ile analiz edilirken IEC 62271 – 1 ve IEC 62271 – 102 standartlarında belirtilen tip deneyi esaslarına göre analizler gerçekleştirilmiştir.

Ayırıcıya karma gerilim uygulanırken işletme şartları düşünülmüştür. Ayırıcıya karma gerilim uygulanmasıyla birlikte ayırıcı üzerinde meydana gelen maksimum elektriksel potansiyel değerlerin ve maksimum elektrik alan şiddetinin daha önceki adımlarda gerçekleştirilen yıldırım darbe gerilimi ve şebeke frekanslı gerilim analizlerinde elde edilen değerlerden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayırıcının açık pozisyonu için yıldırım darbe gerilimi tip deneyi uygulamasında, gerilim uygulanan uca ait kontak yüzeyinde görülen maksimum elektriksel potansiyel değer -820 kV olmuştur. Gerilim

uygulanmayan uca ait kontak yüzeyinde ise herhangi bir elektriksel potansiyel değer oluşmamıştır. Bu durumda kontaklar arasında meydana gelen en büyük potansiyel farkın değeri 820 kV olmuştur diyebiliriz. Öte yandan ayırıcının açık pozisyonu için karma gerilim uygulamasında, yıldırım darbe gerilimi uygulanan uca ait kontak yüzeyinde maksimum elektriksel potansiyel değer -810 kV, şebeke frekanslı işletme gerilimi uygulanan uca ait kontak yüzeyinde maksimum elektriksel potansiyel değer 120 kV olmuştur. Bu durumda, kontaklar arasında meydana gelen en büyük potansiyel farkın değeri 930 kV olmuştur diyebiliriz. Aynı şekilde, elektrik alan değerleri incelendiğinde; yıldırım darbe gerilimi tip deneyi uygulamasında kontak yüzeylerinde meydana gelen elektrik alan değerlerinin 54 kV/cm ve 27 kV/cm olduğu, karma gerilim uygulamasında kontak yüzeylerinde meydana gelen elektrik alan değerlerinin 72 kV/cm ve 24 kV/cm olduğu gözlemlenmiştir.

Ayırıcın kapalı pozisyonu için yıldırım darbe gerilimi tip deneyi uygulamasında, gerilim uygulanan uç yüzeyinde görülen maksimum elektriksel potansiyel değer 710 kV olmuştur. Buna göre uçlar ile topraklı şase arasında meydana gelen en büyük potansiyel fark 710 kV olmuştur diyebiliriz. Öte yandan ayırıcının kapalı pozisyonu için karma gerilim uygulamasında, yıldırım darbe gerilimi uygulanan uç yüzeyinde maksimum elektriksel potansiyel değer 760 kV olmuştur. Bu durumda uçlar ile topraklı şase arasında meydana gelen en büyük potansiyel fark 760 kV olmuştur diyebiliriz. Aynı şekilde elektrik alan değerleri incelendiğinde; yıldırım darbe gerilimi tip deneyi uygulamasında uç yüzeylerinde meydana gelen elektrik alan değerlerinin 27 kV/cm ve 16 kV/cm olduğu, karma gerilim uygulamasında uç yüzeylerinde meydana gelen elektrik alan değerlerinin 31 kV/cm ve 18 kV/cm olduğu gözlemlenmiştir.

Yıldırım darbe gerilimi ve şebeke frekanslı gerilimin birleşmesiyle elde edilen karma gerilimin, hem yıldırım darbe geriliminin meydana getirdiği zorlanmadan hem de şebeke frekanslı gerilimin meydana getirdiği zorlanmadan, ayırıcıyı elektriksel olarak daha fazla zorladığı görülmektedir.

Tek fazlı ayırıcı için gerçekleştirilen yıldırım darbe gerilimi tip deney analizleri ve şebeke frekanslı gerilim tip deney analizleri, üç fazlı toprak bıçaklı ayırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Nisan 2021 tarihinde İTÜ Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen tip deneylerine ait deney sonuçlarını gösteren tablolar Ek A'da verilmiştir. İTÜ Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda üç

fazlı, toprak bıçaklı ayırıcı üstünde gerçekleştirilen tip deneyleri bu çalışmaya konu olan tek fazlı ayırıcı için gerçekleştirilen tip deney analizlerini kapsamaktadır. Laboratuvar koşullarında hem yıldırım darbe gerilimi tip deneylerinde hem de şebeke frekanslı gerilim tip deneylerinde herhangi bir gerilim atlaması veya olumsuz durum yaşanmamıştır. Bu durum, bu çalışmada tip deney analizlerinde elde edilen sonuçların güvenli çalışmanın sağlanabildiği sonuçlar olduğunu tescil etmektedir. Öte yandan yapılan karma gerilim analizlerinde, sözü geçen sonuç değerlerin aşıldığı buna bağlı olarak da ayırıcının elektriksel olarak daha fazla zorlanmaya maruz kaldığı aşıkardır.

Bu çalışma sonucunda elde edilen analiz sonuçları, ülkelerin iletim sistemlerini yöneten otorite kurumlarca kendi sistemleri için kullanılabilir ya da analizler sistemlerine ait özelliklere göre uyarlanacak parametrelerle yeniden yapılabilir. Böylece, üzerinde çalışılan sistemde ulaşılması hedeflenen koruma seviyesine uygun zorlanma değerleri tespit edilerek, laboratuvar deneylerinde aynı sonuçları verecek deney gerilimi büyüklükleri hesaplanabilir. Devamında ise, hesaplanan değerlerin üzerinde kalan ve bu değere en yakın olan, standartlarca tanımlı bir dayanım gerilimi değerleri ülkeye ait şartnamelere işlenebilir. Böylece, en zor koşullar kapsanırken, pratikte tip deneyleri kapsamında laboratuvarlarca uygulanabilecek hale getirilmiş olur. Hali hazırda IEC standartları genel anlamda benzer çalışmaları temel alarak değerlerini hesaplamakta olsa da ülke otoritelerinin kendi çalışma alanlarına özel yapacakları incelemeler sonucunda daha başarılı sistem ve ürün modellemeleri yapılabilir. Bu sayede hem güvenli hem de maliyete oranla verimi yüksek sistemler kurulabilir.

İleri bir çalışma olarak, yüksek gerilim ayırıcısı üzerindeki her bir noktada meydana gelen elektrik alan şiddeti hesaplanabilir. Alternatif gerilimin yarı dalgasına göre darbe gerilimi kutbunun değişimi göz önüne alınabilir. Örneğin negatif yarıdalga pozitif darbe gerilimi incelenebilir.

Analizler yapılırken, izolatör yüzeylerinin kuru olduğu varsayılmıştır. Fakat, IEC standartlarına göre şebeke frekanslı gerilim tip testleri hem kuruda hem de yağta gerçekleştirilir. Yağta şebeke frekanslı gerilim tip testi yapılırken standardın belirlediği esaslar doğrultusunda yağmurlama yapılır. Nemli ve yağışlı havalarda havanın gerilim dayanımı düştüğünden dolayı şebeke frekanslı gerilim analizleri yapılırken yağmurun oluşturduğu etki analize dahil edilebilir.

Ayırıcı için üç fazı bir arada elektrik alan incelemeleri yapılabilir. Dahası ayırıcının gerçek işletme bağlantısı durumunda alan incelemelerine devam edilebilir. Gerilimi, yapısı, izolatörleri farklı türden ayırıcılar için incelemeler yapılabilir.

Ayrıca modelde kullanılan karma gerilimin hangi yollardan geçeceğinin ve bu sırada ayırıcı üzerinden akan akımın nasıl sonuçlar doğuracağının tespiti için modele manyetik alan analizleri eklenebilir.

Ayırıcılar için karma gerilim ve akımlarda ortaya çıkan sıcaklık dağılımları incelenebilir, ısı analizleri yapılabilir.

Alternatif gerilim - yüksek darbe akımı karma uygulaması incelenebilir. Yani yüksek gerilim ayırıcılarının gerçek uygulamada ve işletmede karşılaşılabileceği durumlarda ortaya çıkabilecek her türlü zorlanma için incelemeler yapılarak zorlama dereceleri ve bu zorlanma derecelerinin yaratabileceği sorunlar için çözümler incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Naidu, M. S. ve Kamaraju, V.**, High Voltage Engineering, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2004.
- [2] **Kutucu, K.** (2009). Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Üç Boyutlu Elektrik Alan Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [3] **Raghuveer, M. R., Kolaczowski, Z., Weifang, J., & Kuffel, E.** (1990). Surface electric strength of processed pressboard under composite AC and DC and conventional stresses. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, no. 2, pp. 341-350, April 1990.
- [4] **Kalenderli, Ö., Önal, E.**, (2016, December). Design of composite high voltage generation circuits. *National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa, pp. 363-367.
- [5] **Karaca, G.** (2006). Kablolarda Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çoklu Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [6] **Tian, J. H., Sha, Y. C., Zhou, Y. X., Sun, Y. Z., Sun, K. K., & Wang, Z. E.** (2011). Simulation of AC and DC electric field for 800 kV grade high voltage disconnecter. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 37(5), pp. 1216-1223.
- [7] **Zhang, J., Qi, L., Lu, T., Bian, X., Zhao, Z., & Fu, Y.** (2015). The impact of composite AC – DC voltage on characteristics of corona discharge in rod-plane air gaps. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 350-353, 20151616.
- [8] **Lü, F. C., Zhang, Z. H., & Wang, F. C.** (2016). Design optimization of grading ring for electric multiple unit high voltage disconnecter. *Transactions of China Electrotechnical Society*, vol. 31, no. 19, pp. 218-223.
- [9] **Dönmez, T.** (2016). Elektriksel Kısmi Boşalmayı Etkileyen Etkenlerin İncelenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [10] **Şen, H.** (2017). Yıldırımından Kaynaklanan Elektrik Alan Dağılımlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [11] **IEC 60060-1**: High voltage test techniques - General definitions and test requirements, 2010.
- [12] **Ramarao, G., Chandrasekaran, K.** (2017). Evaluation of circuit and its analytical function parameters for lightning and switching impulse. *International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)*, pp. 302-305.

- [13] **IEC 62271-1:** High voltage switchgear and controlgear – Part 1: Common specifications for alternating current switchgear and controlgear, General terms and definitions, 2017.
- [14] **IEC 62271-102:** High voltage switchgear and controlgear – Part 102: Alternating current disconnectors and earthing switches, Switching devices, 2018.
- [15] **Url-1** <<https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/inceleme-ayiricilar/4193#ad-image-0>>, erişim tarihi 07.05.2021.
- [16] **Url-2** <https://tr.wikipedia.org/wiki/Elektrik_alan%C4%B1>, erişim tarihi 06.06.2021.
- [17] **Jamil, M. K. M.** (2018). Effect of Different Edge Radius of Electrode on Electric Field Distribution Using Finite Element Method (FEM). *IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)*, pp. 94-98.
- [18] **İdemen, M.,** (2004). *Elektromagnetik Alan Teorisinin Temelleri*. İstanbul.
- [19] **Griffiths, J. D.,** (1996). *Elektromagnetik Teori*. (B. Karaoğlu, Çev.). İstanbul: Arte Reklamcılık ve Tanıtım Ltd. Şti.
- [20] **de Weck, O., ve Kim, I.Y.** (2004). Finite Element Method. *Eng. Des. Rapid Prototyp*, 810.
- [21] **Hutton, V. D.,** (2004). *Fundamentals of Finite Element Analysis*, Mc Graw Hill, Boston, pp. 45-114.
- [22] **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.
- [23] **IEC Technical Report,** (2003). Electric Cables – Calculations for Current Ratings – Finite Element Method, IEC TR 62095-2003.
- [24] **Semen, M.** (2019). Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yıldırımın Uçaklara Olan Etkilerinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [25] Reference Manual of “COMSOL Multiphysics”.
- [26] Blogs of “COMSOL Multiphysics”.
- [27] **İlhan, S., Üçkol, İ. H.** “Test Report 2021/SHI23”. *İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik – Elektronik Fakültesi*, 2021.

EKLER

EK A: İTÜ Elektrik – Elektronik Fakültesi 2021/SHI23 Deney Raporu, Tablo 7:
Yıldırım darbe dayanım gerilimi deneyi detayları

EK B: İTÜ Elektrik – Elektronik Fakültesi 2021/SHI23 Deney Raporu, Tablo 1:
Şebeke frekanslı dayanım gerilimi deneyi detayları





EK A

Table 7. Test details for lightning impulse withstand voltage test.

Test Object	Test Date and Ambient Conditions	Test Application						Description
		Position of the Test Object	Voltage Applied to	Earthed	Isolated from Earth	Applied Voltage [kVpeak]	Result Number of Impulses / breakdowns	
CIBDE 2500 type 170 kV, 2500 A, 50 kA - 1s Centre-Break Disconnecter with Earthing Switch	June 08, 2021, t = 21.3 °C p = 1012 mbar RH = 65 % K _s = 1.01	Closed	A, a	B, b, C, c, F	-	+ 750 - 750	15 / 0 15 / 0	Phase-to-earth & Between phases
		Closed	B, b	A, a, C, c, F	-	+ 750 - 750	15 / 0 15 / 0	Phase-to-earth & Between phases
		Open	A	a, B, b, C, c, F	-	+ 750 - 750	15 / 0 15 / 0	Phase-to-earth & Between phases
		Open	a	A, B, b, C, c, F	-	+ 750 - 750	15 / 0 15 / 0	Phase-to-earth & Between phases
		Open	B	A, a, b, C, c, F	-	+ 750 - 750	15 / 0 15 / 0	Phase-to-earth & Between phases
		Open	b	A, a, B, C, c, F	-	+ 750 - 750	15 / 0 15 / 0	Phase-to-earth & Between phases
		Open	A	a	B, b, C, c, F	+ 860 - 860	15 / 0 15 / 0	Across the isolating distance
		Open	a	A	B, b, C, c, F	+ 860 - 860	15 / 0 15 / 0	Across the isolating distance
		Open	B	b	A, a, C, c, F	+ 860 - 860	15 / 0 15 / 0	Across the isolating distance
		Open	b	B	A, a, C, c, F	+ 860 - 860	15 / 0 15 / 0	Across the isolating distance

t: Ambient temperature, p: Atmospheric pressure, RH: Relative humidity. Voltage values were corrected to standard reference atmosphere.

Note: Lightning impulse withstand voltage tests were not applied for phase "C" due to the symmetry condition of the disconnector.

Şekil A.1: Yıldırım darbe dayanım gerilimi deneyi detayları.



EK B

Table 1. Test details for power-frequency withstand voltage test (dry).

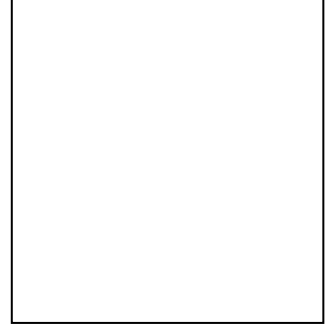
Test Object	Test Date and Ambient Conditions	Test Application						
		Position of the Test Object	Voltage Applied to	Earthed	Isolated from Earth	Applied Voltage [kVrms]	Test duration / flashover	Description
CBDE 2500 type 170 kV, 2500 A, 50 kA - 1 s Centre-Break Disconnecter with Earthing Switch	June 01, 2021. $t = 20.4^{\circ}\text{C}$ $p = 1010$ mbar $\text{RH} = 62\%$ $K_1 = 0.99$	Closed	A, a	B, b, C, c, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Closed	B, b	A, a, C, c, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Closed	C, c	A, a, B, b, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Open	A	a, B, b, C, c, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Open	a	A, B, b, C, c, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Open	B	A, a, b, C, c, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Open	b	A, a, B, C, c, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Open	C	A, a, B, b, c, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Open	c	A, a, B, b, C, F	-	325	60 s / no	Phase-to-earth & Between phases
		Open	A	a	B, b, C, c, F	375	60 s / no	Across the isolating distance
		Open	a	A	B, b, C, c, F	375	60 s / no	Across the isolating distance
		Open	B	b	A, a, C, c, F	375	60 s / no	Across the isolating distance
		Open	b	B	A, a, C, c, F	375	60 s / no	Across the isolating distance
		Open	C	c	A, a, B, b, F	375	60 s / no	Across the isolating distance
		Open	c	C	A, a, B, b, F	375	60 s / no	Across the isolating distance

t: Ambient temperature, p: Atmospheric pressure, RH: Relative humidity. Voltage values were corrected to standard reference atmosphere.

Şekil B.1: Şebeke frekanslı dayanım gerilimi deneyi detayları.



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Miraç Yazıcı

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2019, Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM:

- Güral Elektrik Malzemeleri, Ar-Ge Mühendisi