



**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**R410A GAZININ TRANSFORMATÖR YALITIM  
MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

Doktora Tezi

**Ezgi GÜNEY**

Danışman  
**Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL**

SAMSUN

2021

**T.C.  
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**R410A GAZININ TRANSFORMATÖR YALITIM  
MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI**

Doktora Tezi

**Ezgi GÜNEY**

Danışman

**Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL**

SAMSUN

2021



## TEZ KABUL VE ONAYI

**Ezgi GÜNEY** tarafından, **Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL** danışmanlığında hazırlanan “**R410A Gazının Transformatör Yalıtım Malzemesi Olarak Kullanılması**” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 30.12.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	<b>Unvanı Adı Soyadı</b>		
	<b>Üniversitesi</b>		
	<b>Ana Bilim/Ana Sanat Dalı</b>	<b>İmza</b>	<b>Sonuç</b>
<b>Başkan</b>	Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM		<input checked="" type="checkbox"/>
	Samsun Üniversitesi		Kabul
	Elektrik-elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ		<input checked="" type="checkbox"/>
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Doç. Dr. Ünal KURT		<input checked="" type="checkbox"/>
	Amasya Üniversitesi		Kabul
	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Ret
<b>Üye</b>	Doç. Dr. Suat İLHAN		<input checked="" type="checkbox"/>
	İstanbul Teknik Üniversitesi		Kabul
	Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı		<input type="checkbox"/> Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT  
Enstitü Müdürü

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi ?

Evet  (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır

İmza

18 /11/ 2021

Ezgi GÜNEY

## TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

**Tez Başlığı :** R410A Gazının Transformatör Yalıtım Malzemesi Olarak Kullanılması

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 18.11.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 22

Tek kaynak oranı : % 2 çıkmıştır.

İmza

18 /11 / 2021

Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL

# ÖZET

## R410A GAZININ TRANSFORMATÖR YALITIM MALZEMESİ OLARAK KULLANILMASI

Ezgi GÜNEY

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Doktora, Aralık/2021

Danışman: Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL

Bu tez çalışmasında, günümüz koşullarında, büyük şehirlerdeki elektrik gücü talebindeki keskin artışın üstesinden gelmek için enerji sistemlerinin en önemli ekipmanlarından biri olan dağıtım transformatörlerinin, yalıtım maddesi olan transformatör yağı ve SF<sub>6</sub> gazına karşı güçlü bir alternatif olduğu öngörülen R410A gazı ile en ekonomik ve çevre dostu yolla yolla karşılanabilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, R410A gaz yalıtımlı transformatörlerin tasarım ve imalatının gerçekleştirilebilmesi için gerekli olan ön-bilgi deneysel ve bilgisayar benzetim çalışmaları ile sağlanmıştır.

Tasarım için, işletmelerde kullanılmakta olan 34.5 / 0.4 kV 50 kVA gücünde dağıtım transformatörünün gerçek boyutları dikkate alınarak AutoCAD ortamında çizilmiş bire bir modeli kullanılmıştır. Modele sargılar dışında, transformatörün tankı, demir çekirdeği, boyundurukları, geçit izolatörleri, ark boynuzu ve yalıtkan destek gibi ayrıntılar eklenmiştir. Ana tankı, tasarım yüksek basınca dayanabilmesi ve gazın homojen bir biçimde dağılmasına olanak verebilmesi için silindirel yapıda yapılmıştır.

Tezin benzetim çalışmaları, tasarlanan R410A yalıtımlı dağıtım transformatörünün elektrostatik, darbe gerilimleri ve ısı analizlerini kapsamaktadır. Elektrostatik ve darbe gerilim analizleri için 3 boyutlu modelleme, ısı analiz için ise 2 boyutlu aksel model kullanılmıştır. Elektrostatik analiz için sabit bir çözüm, darbe gerilimleri ve ısı analiz için ise zamana bağlı çözümler kullanılmıştır. Analizlerin tamamı COMSOL® Multiphysics 5.2a benzetim programında gerçekleştirilmiştir.

Tezin deneysel çalışmaları için, daha önceden SF<sub>6</sub> için tasarlanmış olan gaz yalıtımlı gerilim ölçü transformatörü kullanılmıştır. R410A'nın performansını karşılaştırmak için transformatör hava, SF<sub>6</sub> ve R410A ile doldurulmuş ve her bir gaz için kısmi deşarj testi yapılmıştır.

Gerek benzetim gerek deneysel çalışmaların sonucunda, R410A gazının yalıtım ve soğutmada performansı yağ ve SF<sub>6</sub> gazına paralellik göstermiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda R410A yalıtımlı transformatörünün risksiz, düşük maliyetli, kompakt ve çevre dostu bir transformatör olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** R410A, Dağıtım transformatörü, Elektrostatik analiz, Isı iletimi, Gaz yalıtımlı transformatör.

## ABSTRACT

USING R410A GAS AS TRANSFORMER INSULATION MATERIAL

Ezgi GÜNEY

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical Electronics Engineering

Ph.D., August/2021

Supervisor: Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL

In this thesis, in today's conditions, distribution transformers, which are one of the most important equipment of energy systems to overcome the sharp increase in electrical power demand in big cities, are used in the most economical and environmentally friendly way with R410A gas, which is predicted to be a strong alternative to insulating transformer oil and SF<sub>6</sub> gas. For this purpose, the preliminary information that is required for the design and manufacture of R410A gas-insulated transformers has been provided by experimental and computer simulation studies.

For the design, the actual dimensions of the 34,5/0,4 kV 50 kVA power distribution transformer that is used in the industries were taken into account and the identical model drawn in the AutoCAD environment was used. In addition to the wires, details such as the transformer's tank, iron core, yokes, bushings, arc horn, and dielectric support have been added to the model. The main tank is made in a cylindrical structure so that the design can withstand high pressure and allow the gas to be distributed homogeneously.

The simulation studies of the thesis cover the electrostatic, impulse voltages and thermal analyzes of the designed R410A insulated distribution transformer. 3D modeling was used for electrostatic and impulse voltage analysis, and 2D axial model was used for thermal analysis. A stationary solution was used for electrostatic analysis, and time dependent solutions were used for impulse voltages and thermal analysis. All analyzes were performed in the COMSOL®Multiphysics 5.2a simulation program.

For the experimental studies of the thesis, a gas insulated voltage transformer, which was previously designed for SF<sub>6</sub>, was used. In order to compare the performance of R410A, the transformer was filled with air, SF<sub>6</sub> and R410A and a partial discharge test was performed for each gas.

As a result of both simulation and experimental studies, the performance of R410A gas in insulation and cooling showed parallelism with oil and SF<sub>6</sub> gas. In line with these results, it has been found that the R410A insulated transformer is a risk-free, low-cost, compact and environmentally friendly transformer.

**Keywords:** R410A, distribution transformer, electrostatic analysis, heat transfer, gas insulated transformer.

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Başından itibaren desteğini benden esirgemeyen, çalışmalarım da her daim bana destek olan ve değerli zamanını ayıran danışmanım olmasından onur duyduğum, birlikte çalışma fırsatını bulduğum, her alanda kendime rehber edindiğim, değerli hocam Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimle ilgili değerli yorumları ve tavsiyelerini bildiren jüri üyelerinden başta danışmanım Prof. Dr. Okan ÖZGÖNENEL olmak üzere Prof. Dr. Mustafa AKTAŞ, Doç. Dr. Ünal KURT ve Doç. Dr. Suat İLHAN hocalarıma sonsuz teşekkür ederim.

Test hücrelerinin tasarım ve imalatını büyük bir titizlikle gerçekleştiren Emre OVALI'ya ve teknik desteği için Mustafa YILMAZ'a teşekkür ederim.

GYT deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmemde her türlü desteği sağlayan başta Esitaş Elektrik Genel Müdürü Sayın Burcu CİLSAL olmak üzere tüm şirket çalışanlarına teşekkür ederim.

Ferdi olmaktan gurur duyduğum, varlıklarından güç aldığım canım aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Ezgi GÜNEY

# İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL ONAYI .....	İV
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI .....	V
ÖZET.....	İİİ
ABSTRACT.....	İV
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER .....	VI
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	Vİİİ
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	Xİ
TABLOLAR DİZİNİ .....	XİV
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Literatür Taraması .....	5
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı .....	17
1.3. Tezin İçeriği .....	17
<b>2. KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>19</b>
2.1. Gaz Yalıtımlı Transformatörler .....	19
2.1.1. Gaz Yalıtımlı Transformatörlerin Özellikleri.....	19
2.1.2. Gaz ve Yağ Yalıtımlı Transformatörlerin Karşılaştırılması .....	20
2.1.3. Gaz Yalıtımlı Transformatörlerin Olumsuzlukları .....	22
2.2. R410A Gazı .....	22
2.2.1. R410A Gazının Kimyasal Özellikleri.....	23
2.2.2. R410A Gazının Fiziksel Özellikleri .....	24
2.2.3. R410A Gazının İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri .....	29
2.2.4. R410A Gazının Çevresel Etkileri .....	30
2.2.5. R410A Gazının Bozunma Ürünleri .....	30
2.3. Elektrik Alan ve Potansiyel Hesaplama .....	31
2.3.1. Elektrostatik Alan .....	31
2.3.2. Coulomb Yasası.....	32
2.3.3. Elektrik Alan.....	32
2.3.4. Gauss Yasası .....	33
2.3.5. Elektrik Potansiyel.....	33
2.3.6. Poisson ve Laplace Denklemleri .....	34
2.4. Elektrot Yapılandırmalarında Elektrik Alan Dağılımı .....	34
2.4.1. Düzgün Alanda Dağılım .....	34
2.4.2. Düzgün Olmayan Alanda Dağılım .....	35
2.5. Sayısal Hesaplama.....	36
2.5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	37

2.6. Gazlarda Boşalma Teorileri.....	37
2.6.1. Korona Boşalması.....	38
2.6.2. Townsend Delinme Teorisi.....	40
2.6.3. Kanal Delinme Teorisi.....	43
2.7. Darbe Gerilimi Kuramı .....	47
<b>3. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>50</b>
3.1. R410A Gazının Delinme Gerilimi Deneyi.....	50
3.1.1. Küre-Küre Elektrot Sistemi ile Delinme Dayanımı Testi.....	52
3.1.2. Koni-Düzlem Elektrot Sistemi ile Delinme Dayanımı Testi .....	57
3.2. R410A Delinme Geriliminin Kuramsal Olarak Hesaplanması .....	60
3.2.1. Küre-Küre Elektrot Sisteminde Delinme Gerilimi Hesabı.....	60
3.2.2. Koni-Düzlem Elektrot Sisteminde Delinme Gerilimi Hesabı .....	63
3.3. R410A Gaz Yalıtımlı Transformator Tasarımı ve COMSOL Ortamında Modellenmesi .....	64
3.3.1. R410A Gaz Yalıtımlı Dağıtım Transformatorünün Yapısal Özellikleri ..	64
3.3.2. Yalıtım ve Soğutma Ortamı .....	66
3.3.3. Çekirdek.....	66
3.3.4. Sargılar.....	67
3.3.5. Tank Gaz Basıncı.....	67
3.4. Transformatorün COMSOL Ortamında Modellenmesi .....	67
3.4.1. Elektrostatik Analiz .....	69
3.4.2. Darbe Gerilimi Altında Analiz .....	79
3.4.3. Isıl Analiz.....	80
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>92</b>
4.1. Elektrostatik Analiz .....	92
4.2. 50kVA R410A GYT İçin Darbe Gerilimi Analizleri .....	98
4.2.1. Yıldırım Darbe Gerilimi Analizi .....	98
4.2.2. Anahtarlama Darbe Gerilimi Analizi.....	105
4.3. Isıl Analiz .....	110
4.4. Gaz Yalıtımlı Transformatorün Deneysel Analizi .....	112
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>116</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>120</b>
<b>ÖZ GEÇMİŞ .....</b>	<b>127</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### SİMGELER

$\bar{F}$	: Kuvvet
$q_s$	: Kaynak yük
$q_r$	: Rastgele elektrik yükü
$\epsilon_0$	: Boş alanın geçirgenliği
$r$	: İki yük arasındaki mesafe
$\hat{r}$	: Konum vektörü
$\vec{E}$	: Elektrik alan
$q$	: Yük
$\Phi_E$	: Elektrik akısı
$dA$	: Yüzey alanının sonsuz küçük elemanının temsil eden vektör
$\nabla$	: Diverjans
$\rho$	: Yük yoğunluğu
$d$	: Plakalar arası mesafe
$\eta$	: Birim mesafede moleküllere yapışan elektron sayısı
$\alpha$	: Townsend'in birinci iyonlaştırma katsayısı
$\beta$	: Townsend'in ikinci iyonlaştırma katsayısı
$p$	: Basınç
$a$	: İki elektrot arasındaki uzaklık
$N$	: Elektron-iyon çiftlerinin sayısı
$dx$	: Yüklü parçacıkların madde içerisinde aldığı yol
$U$	: İki elektrot arasındaki potansiyel fark
$V_d$	: Delinme gerilimi
$\gamma$	: Pozitif iyonun katottan kopardığı elektron sayısı
$e^{ax}$	: Bir elektronun katottan anoda varıncaya kadar meydana getirdiği elektron sayısı
$T_0$	: Havanın mutlak sıcaklığı
$p_0$	: Havanın mutlak basıncı
$\delta$	: Bağlı hava yoğunluğu
$r$	: Yarıçap
$T_1$	: Cephe süresi
$T_2$	: Sırt yarı değer süresi
$\rho_v$	: Serbest elektrik yükü yoğunluğu
$D$	: Elektrik yer değiştirme alanı
$u$	: Hız alanı
$Q$	: Isı kaynağı
$k$	: Isıl iletkenlik
$\mu$	: Akışkan dinamik viskozitesi
$J$	: Radyosite
$\rho_d$	: Dağınık yansıma
$G$	: Işınlama
$e_b(T)$	: Tüm dalga boylarında yayılan güç
$n$	: Kırılma indisi

$\sigma$	: Soğurma
$\rho_s$	: Aynasal yansıma
$M$	: Gazın mol kütlesi
$VL$	: Yıldırım darbesi

## KISALTMALAR

<b>SAR</b>	: Sodyum Absorpsiyon Oranı
<b>AKR</b>	: Ardışık Kesikli Reaktör
<b>BOİ</b>	: Biyolojik Oksijen İhtiyacı
<b>GYT</b>	: Gaz Yalıtımlı Transformator
<b>SF6</b>	: Kükürt Heksaflorür
<b>TEPCO</b>	: Tokyo Electric Power Company (Tokyo Elektrik Enerjisi Şirketi)
<b>KIP</b>	: Küresel Isınma Potansiyeli
<b>IPCC</b>	: Intergovernmental Panel On Climate Change (Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli)
<b>CO2</b>	: Karbondioksit
<b>NGET</b>	: National Grid Electricity Transmission (Ulusal Şebeke Elektrik İletimi)
<b>HF</b>	: Hidroflorik
<b>S02F2</b>	: Sülfüril Florür
<b>S2F10</b>	: Sülfür Hekzaflorid
<b>SF4</b>	: Kükürt Tetraflorür
<b>SOF2</b>	: Tionil Florür
<b>SOF4</b>	: Tionil Tetraflorür
<b>AA</b>	: Alternatif Akım
<b>DA</b>	: Doğru Akım
<b>KD</b>	: Kısmi Deşarj
<b>OTP</b>	: Ozon Tüketim Potansiyeli
<b>CF4</b>	: Perflorometan
<b>C2F6</b>	: Perfloroetan
<b>C3F8</b>	: Perfloropropan
<b>O3</b>	: Ozon
<b>C-C4F8</b>	: Oktaflorosiklobutan
<b>CF3I</b>	: Trifloriyodometan
<b>C5F10O</b>	: Perfloropentanon
<b>C6F12O</b>	: Flüoroketon
<b>C4F7N</b>	: Florlu Nitril
<b>R134a</b>	: Tetrafloretan
<b>R410A</b>	: Diflorometan-Pentafloroetan
<b>N2</b>	: Azot
<b>He</b>	: Helyum
<b>Ar</b>	: Argon
<b>O2</b>	: Oksijen
<b>Xe</b>	: Ksenon
<b>2B</b>	: 2 Boyutlu
<b>3B</b>	: 3 Boyutlu
<b>SEY</b>	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>H2O</b>	: Nem

<b>CFC</b>	: Kloroflorokarbon
<b>HCFC</b>	: Hidrokloroflorokarbon
<b>ASHRAE</b>	:American Society Of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Amerikan Isıtma-Soğutma ve Klima Mühendisleri Birliği)
<b>Cp</b>	: Sabit Basınçta Isı Kapasitesi
<b>Cv</b>	: Sabit Hacimde Isı Kapasitesi
<b>UV</b>	: Ultraviyole
<b>TEIE</b>	: Toplam Eşdeğer Isınma Etkisi
<b>1B</b>	: 1boyutlu
<b>Ccl2f2</b>	: Freon
<b>Ccl4</b>	: Tetra
<b>YG</b>	: Yüksek Gerilim
<b>AG</b>	: Alçak Gerilim

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yağ yalıtımlı transformatör yangını (Holman, 2013).....	2
Şekil 1.2. SF6 gazlı 275 kV-300 MVA kapasiteli dünyanın ilk büyük GYT'si (Yanarı, 2004) .....	8
Şekil 1.3. NGET yıllık SF6 emisyonları (Asset Group, 2020) .....	10
Şekil 2.1. R410A gazının kimyasal yapısı (Tomczyk, 2017) .....	22
Şekil 2.2. R410A gazının sıcaklıkla basınç değişim eğrisi .....	24
Şekil 2.3. Düzgün doğrusal elektrik alanında SF6 ve R410A delinme gerilimleri (Khan, et al., 2018).....	29
Şekil 2.4. Zıt yüklü sonsuz paralel plakalar (Sefa, 1997) .....	35
Şekil 2.5. İğne düzlemi yapılandırmasında elektrik alan dağılımı (Sefa, 1997) .....	36
Şekil 2.6. Korona boşalmasına ait akım-gerilim eğrisi (Göz, 2019).....	39
Şekil 2.7. Genel Paschen Yasası eğrisi .....	42
Şekil 2.8. Düzgün alanda kanal boşalması (Sefa, 1997) .....	44
Şekil 2.9. Plazma evresi (Sefa, 1997) .....	44
Şekil 2.10. Ana boşalmanın katoda doğru kayması (Sefa, 1997) .....	45
Şekil 2.11. Negatif çubuk- artı düzlem elektrot sisteminde elektron çığının gelişmesi (Sefa, 1997) .....	46
Şekil 2.12. Pozitif çubuk-negatif düzlem elektrot sisteminde elektron çığının gelişmesi (Sefa, 1997) .....	47
Şekil 2.13. Standart Yıldırım Darbe Formu $T1=1,2 \mu s$ ve $T2=50 \mu s$ . .....	48
Şekil 2.14. Standart Anahtarlama Darbe Formu $T1=250 \mu s$ ve $T2=2500 \mu s$ .....	49
Şekil 3.1. Küre-küre yapılandırmasında elektrot yüzeylerindeki elektrik alan dağılımı .....	51
Şekil 3.2. Koni-düzlem yapılandırmasında elektrot yüzeylerindeki elektrik alan dağılımı .....	51
Şekil 3.3. Küre-Küre elektrot sistemi.....	52
Şekil 3.4. Küresel elektrot sistemi.....	53
Şekil 3.5. Küresel elektrot sisteminde delinme gerilimi test düzeneği .....	54
Şekil 3.6. Küresel elektrot sisteminde farklı elektrotlar arası mesafe ve basınç değerlerinde R410A gazının delinme gerilimi eğrileri .....	56
Şekil 3.7. Koni-Düzlem elektrot sistemi test hücresi.....	57
Şekil 3.8. Koni-Düzlem elektrot sistemi .....	58
Şekil 3.9. Koni-düzlem elektrot sisteminde delinme gerilimi test düzeneği .....	59
Şekil 3.10. Koni-düzlem elektrot sisteminde farklı elektrotlar arası mesafe ve basınç değerlerinde R410A gazının delinme gerilimi eğrileri .....	60
Şekil 3.11. Kuramsal hesaplamalardan elde edilen R410A ve SF6 delinme gerilimi eğrileri .....	62
Şekil 3.12.Koni-Düzlem elektrot sistemi için kuramsal hesaplamalardan elde edilen R410A delinme gerilimi eğrileri .....	63
Şekil 3.13. R410A GYT'in önden, yandan ve üstten görünüşü .....	65
Şekil 3.14. R410A GYT'in genel görünümü.....	65
Şekil 3.15. Elektrostatik ve ısıl analiz için COMSOL'da oluşturulan model ağacı... ..	69
Şekil 3.16. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin 3B görünümü .....	71
Şekil 3.17. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin YG sargı, buşing ve bağlantılarının tanımlanması.....	71
Şekil 3.18. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin AG sargı ve buşinglerinin tanımlanması .....	72
Şekil 3.19. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin boyunduruk tanımlanması ....	72

Şekil 3.20. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin çekirdeğinin tanımlanması....	72
Şekil 3.21. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin ahşap kısımlarının tanımlanması .....	73
Şekil 3.22. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin topraklanan kısımlarının tanımlanması .....	73
Şekil 3.23.Farklı eleman türlerinin görüntüleri. Soldan sağa: dört yüzlü, altı yüzlü, üçgen prizma ve piramit (Fairclough, 2016).....	77
Şekil 3.24. 50kVA R410A GYT'nin COMSOL programı ile 3B ağı görünümü .....	78
Şekil 3.25. Isıl analizi için R410A GYT'nin 2B eksenel simetri görünümü .....	81
Şekil 3.26. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan bakır kısımlar (YG ve AG sargıları).....	82
Şekil 3.27. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan tahta kısımlar	82
Şekil 3.28.Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan yüksek mukavemetli alaşımlı çelik kısımlar .....	82
Şekil 3.29.Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan yumuşak demir (kayıpsız) kısımlar.....	83
Şekil 3.30. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan R410A'lı kısımlar .....	83
Şekil 3.31. R410A GYT'nin katılarda ısı iletimi seçim alanı .....	87
Şekil 3.32. R410A GYT'nin sıvılarda ısı iletimi seçim alanı .....	88
Şekil 3.33. R410A GYT'nin ısı iletimi ısı kaynağı (AG) modeli .....	88
Şekil 3.34. R410A GYT'nin ısı iletimi ısı akısı modeli.....	88
Şekil 3.35. R410A GYT'nin ısı iletimi laminar akış modeli .....	89
Şekil 3.36. R410A GYT'nin ısı iletimi laminar akış modeli için eksenel simetri .....	89
Şekil 3.37. R410A GYT'nin ısı iletimi laminar akış modeli için duvar seçim bölgesi .....	89
Şekil 3.38. R410A GYT'nin ısı iletimi yüzeyden yüzeye ışıma seçim bölgesi .....	90
Şekil 4.1. Tank içinde kV cinsinden potansiyel dağılımı.....	93
Şekil 4.2. Transformatör sargılarındaki kritik alanlar .....	94
Şekil 4.3. A Fazı için seçilen noktaların ark uzunluklarına karşı elektrik alan grafikleri .....	95
Şekil 4.4. A Fazı hat 1 için benzetilmiş R410A GYT elektrik alan dayanımı.....	95
Şekil 4. 5. A Fazı hat 2 için benzetilmiş R410A GYT elektrik alan dayanımı.....	96
Şekil 4.6. A Fazı hat 3 için benzetilmiş R410A GYT elektrik alan dayanımı.....	96
Şekil 4.7. A Fazı hat 1 için benzetilmiş SF6 GYT elektrik alan dayanımı .....	97
Şekil 4.8. A Fazı hat 2 için benzetilmiş SF6 GYT elektrik alan dayanımı .....	97
Şekil 4.9. A Fazı hat 3 için benzetilmiş SF6 GYT elektrik alan dayanımı .....	98
Şekil 4.10. B Fazına uygulanan standart yıldırım darbe gerilimi .....	99
Şekil 4.11. Normal çalışma sırasında yıldırım gerilimi altındaki transformatör.....	99
Şekil 4.12. Yıldırım darbesi sırasında pik elektrik potansiyellerinin yüzey grafiği	100
Şekil 4.13. B Fazı için seçilen noktalar.....	100
Şekil 4.14. B Fazı için seçilen noktaların ark uzunluklarına karşı elektrik alan grafikleri .....	101
Şekil 4.15. Yıldırım geriliminin uygulandığı R410A B Fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı.....	102
Şekil 4.16. Yıldırım geriliminin uygulandığı R410A B Fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı.....	102
Şekil 4. 17. Yıldırım geriliminin uygulandığı R410A B Fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı.....	103

Şekil 4.18. Yıldırım geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı .....	103
Şekil 4.19. Yıldırım geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı .....	104
Şekil 4.20. Yıldırım geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı .....	104
Şekil 4.21. B Fazına uygulanan standart anahtarlama darbe gerilimi.....	105
Şekil 4.22. Anahtarlama darbesi sırasında pik elektrik potansiyellerinin yüzey grafiği .....	106
Şekil 4.23. B Fazı için seçilen noktaların ark uzunluklarına karşı elektrik alan grafikleri .....	106
Şekil 4.24. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı R410A B fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı .....	107
Şekil 4.25. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı R410A B fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı .....	108
Şekil 4.26. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı R410A B fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı .....	108
Şekil 4.27. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı .....	109
Şekil 4.28. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı .....	109
Şekil 4.29. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı .....	110
Şekil 4.30. Isıl analizi için R410A GYT'nin sonlu elemanlar ile ayrıklaştırılmış 2B eksenel görünümü .....	110
Şekil 4.31. R410A GYT tank içindeki sıcaklık dağılımı. (a) 2B ve (b) 2B eksenel simetri analizi .....	111
Şekil 4.32. SF6 GYT transformatör için tank içindeki sıcaklık dağılımı .....	111
Şekil 4.33. Yağ yalıtımlı transformatör için tank içindeki sıcaklık dağılımı .....	112
Şekil 4.34. Yüzey gaz hızı büyüklüğü (m/s) (a) 2 boyutlu ve (b) 2boyutlu eksenel simetri analizi için .....	112
Şekil 4.35.Hava, SF6 ve R410A yalıtımlı gerilim transformatörü kısmi deşarj deney düzeneği (ESİTAŞ Elektrik Laboratuvarı) .....	114
Şekil 4. 36. Gerilim ölçü transformatörünün yalıtımında kullanılan R410A gazında meydana gelen kısmi deşarj (korona deşarjı).....	114
Şekil 4.37. 1,5 atm basınç altında kısmi deşarj gücüne karşı hava, SF6 ve R410A	115

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1. SF6'nın toksik ayrışma ürünlerinden kaynaklanan başlıca klinik semptomlar (Luwen, 2004). .....	10
Tablo 1.2. Elektriksel yalıtımda kullanılan bileşiklerin temel özellikleri (Khan, et. al., 2019; Ullah, et. al.2018; Wang, et al., 2019) .....	11
Tablo 2.1. R410A gazı ile transformatör yağının karşılaştırılması.....	21
Tablo 2.2. SF6 ve R410A gazlarının fiziksel özellikleri (Honeywell, 2007; Kieffel, et. al.,2016; Koch, 2003; Mitra, 2005; Zeng, et. Al., 2014 ).....	25
Tablo 3.1. Delinme gerilimi test cihazı.....	54
Tablo 3.2. Deneysel koşullar.....	55
Tablo 3.3. Küre-küre elektrot sistemi deneysel çalışmalar ölçülen veriler.....	56
Tablo 3.4. İğne-düzlem elektrot sistemi deneysel çalışmalar ölçülen veriler .....	59
Tablo 3.5. R410A GYT'yi oluşturan parçalar .....	64
Tablo 3.6. GYT'yi oluşturan malzemelerin fiziksel özelliklerine ait parametreler ...	74
Tablo 3.7. Elektrostatik analiz için sınır koşulları .....	77
Tablo 3.8. Yıldırım darbe gerilimi analiz için sınır koşulları .....	80
Tablo 3.9. Anahtarlama darbe gerilimi analiz için sınır koşulları.....	80
Tablo 3.10. R410A gazına ait parametreler .....	84
Tablo 3.11. R410A gazının elektriksel büyüklüklerine ait denklemler .....	84

# 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin insan hayatındaki öneminin artmasıyla, yani şehir merkezlerindeki nüfus artışı dolayısıyla yeni yerleşim alanları ve endüstri alanlarının artması, teknolojik gelişmelerle birlikte enerji tüketiminin artması gibi nedenler araştırmacıları enerjinin son kullanıcıya daha kaliteli ve güvenli iletilmesi ile ilgili çalışmalara yoğunlaştırmıştır. Üretilen enerjinin verimli bir biçimde taşınabilmesi için gerilimin yeterli miktarda büyük olması, çevrenin korunması, çalışma güvenliğinin sağlanması, bakım gereksinimleri ve yangın risklerinin en aza indirgenmesi gerekmektedir. Bu durum, dağıtım transformatörlerinde teknik ve ekonomik nedenlerden dolayı yüke (tüketici noktalarına) en yakın yerlere konumlandırılmalarından dolayı daha da önemli bir rol oynamaktadır.

Dağıtım transformatörleri geleneksel olarak yağ yalıtımlı veya kuru tip olarak imal edilmektedir. Şu anda elektrik dağıtım endüstrisinde kullanılan transformatörlerin çoğu hem elektrik yalıtımı hem de ısıl iletkenlik açısından mükemmel özelliklere sahip olduğu için madeni yağ yalıtımlıdır. Transformatörlere uygulanan ilk yalıtım yağı, petrolden elde edilen mineral yağdır. 1940'lardan bu yana, transformatör, reaktör, kapasitör, şalter, elektrik kabloları, regülatör gibi güç ekipmanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Kulkarni and Khaparde, 2017). Petrol kökenli bu madeni yalıtım yağları, diğer yalıtım maddelerine göre daha ucuzdur ve yapı malzemesiyle iyi uyum sağlamaktadır. Dahası, yüksek gerilimlerde çalışmak için yeterli dielektrik dayanımını korurken transformatör çekirdeğinin ve sarımlarının verimli bir şekilde soğutulmasını sağlamaktadır. Günümüzde halen, elektrik dağıtım endüstrisinde kullanılan transformatörlerin çoğu hem elektriksel yalıtım hem de termal iletkenlik açısından mükemmel özelliklere sahip olduğundan, mineral yağ ile doludur. (Gönenli, 2014).

Yağ yalıtımlı transformatör üniteleri dış mekânlar için son derece uygundur fakat soğutma için yanıcı sıvılar kullanır. Kullanılan sıvının türü ne olursa olsun, yağ ve sıvı tipi transformatörler kuru tiplerden daha iyi soğutma sağlamaktadır. Çünkü sıvılar, soğutma uygulamaları için daha kapsamlı bir ortamdır. Transformatörlerde yağ, yalıtım ve soğutma amacıyla kullanıldığından yağın sağlığı, doğrudan transformatörün çalışma ömrüne ve verimine etki eder. Transformatörün kullanım şartlarına ve bulunduğu ortama göre, zamanla yağda bozulmalar meydana gelebilir. Bundan dolayı, transformatör yağlarının periyodik olarak (belirlenen bakım dönemleri

içerisinde) testlerinin yapılması gerekir. Bu işlemler gerek zaman gerekse de ekonomik kayıplara yol açmakta ve transformatör imalatı sürecinde ek maliyetlere yol açmaktadır. Transformatör yağları içerisinde küçük parçacıklar, nem ve metal parçaları da barındırabilirler. Bu durum da zincir kuramı dolayısıyla yağda düşük gerilim seviyelerinde kısmi deşarjlara ve delinmelere yol açabilmektedir. Yağ yalıtımlı transformatörler genellikle güç transformatörlerinde toplam ağırlığın yarısına yakınına oluşturmaktadırlar. Bu durumda hem imalat hem de sevkiyat maliyetleri ciddi rakamlara ulaşmaktadır. Dahası, yalıtım yağı sızıntılarının su kaynakları üzerinde büyük etkisi olabileceği hidroelektrik santralleri gibi yerlerde, çevreye dikkat etmenin önemi arttıkça, yağ yalıtımlı transformatörlerin gaz yalıtımlı modellerle değiştirilmesi talebi de artmaktadır. Dağıtım ve güç transformatörleri için iyi bir yalıtım malzemesi olarak görülseler de patlama riski yağ yalıtımlı transformatörlerde her zaman bulunmaktadır. Şekil 1.1’de, 28 Eylül 2013’te Sidney’deki Surry Hills’de 11kV/415V 1000kVA yağ yalıtımlı bir transformatörde meydana gelen yangın görülmektedir. Küçük bir transformatör olmasına rağmen, yakınındaki arabaları ve binaları yok eden yaklaşık 500°C’lik yangının söndürülmesi 3 saatten fazla sürmüştür.



Şekil 1.1. Yağ yalıtımlı transformatör yangını (Holman, 2013).

Daha büyük yağ yalıtımlı transformatörlerde çıkacak yangınların tamamen söndürülmesi ve soğuması günler alabilmektedir. Yağ yalıtımlı transformatörlerin bu olumsuzluklarına alternatif olarak, 1960’lı yıllara kadar klasik kuru tip transformatörler kullanılmaya başlanmıştır (Nunn, 2000). Klasik kuru tip transformatörler yeterli olmayan dielektrik özelliklerinden dolayı yalnız 10kV’ a kadar olan anma gerilimlerinde uygun bir alternatif çözüm olabilmektedir.

Ayrıca klasik kuru tip transformatörlerin gürültü düzeyinin ve çekirdeğinin büyüklüğü, dolayısıyla yağlı tip transformatörlere oranla oldukça yüksek olması da klasik kuru tip transformatörlerin başka olumsuz yanındır.

Gürültü istenmeyen hastane, okul vs. gibi işletmelerde gürültünün kesilmesi için maliyeti artıran önlemlerin alınması gerekliliği dökme reçineli kuru tip transformatörlerin geliştirilmesi ile ortadan kalkmıştır (Özyalçın, 2007). Başlangıçta 630 kVA ile sınırlı olan anma gücü bugün 36 kV'da 2500 kVA'ya kadar imal edilmektedir (Dikmen, 1988). Kuru tip (dökme reçine) transformatörler ise yeni teknolojiye sahip ürünler olarak her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Nemli ve kirli ortamlarda kolaylıkla çalışabilmektedir. Sargılara kaplanan dökme reçine, yanmaz ve kendiliğinden sönebilir özelliktedir. Bu nedenle, yangın tehlikesi ve kirliliğe sebep olabilecek sızıntı riski yoktur. Emniyetli ve çevre dostudur. Kuru tip transformatörlerin boyutlarının yağlı tip transformatörlere göre daha küçük olması, daha az yer kaplama ve daha az inşaat işi gibi üstünlükler sağlamaktadır. Yağlı tip transformatörlere oranla düşük termal ve dielektrik yaşlanma etkisiyle daha uzun transformatör ömrü sağlamaktadır. Kısa devrelere karşı yüksek dayanım ve aşırı yükü destekleyen yüksek kapasite etkisiyle daha kullanışlıdır. Bakım gerektirmez. Bu özelliklerinden dolayı özellikle insanların yoğun olarak bulunduğu hastane, havaalanı, metro gibi yapılarda tercih edilmektedirler. Ancak harici uygulamalarda yağlı tip transformatörler kuru tip transformatörlerden daha düşük maliyet gerektirmektedir. Dahası, kuru tip transformatörler yağlı tip transformatörlere göre kısa ömürlüdür. Bir kuru tip transformatörün ömrü özellikle çalışma süresi boyunca gerçekleşen aşırı yüke bağlı olmakla birlikte, ortalama 20 yıldır (Soltanbayev, et. Al., 2017). Yağlı tip transformatörlerde ise 25-30 yıldır (Husnayain, et. Al, 2015). Kuru tip transformatörlerde etkin bir soğutma sağlanmadığından ötürü güçleri 30-30000kVA arasındadır ve sınırlı bir kullanım alanına sahiptir. Yağlı tip transformatörler ise geniş bir güç ve gerilim aralığında imal edilirler ve oldukça yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Fakat, daha önceden de belirtildiği gibi bu transformatörlerin iç sıcaklıkları aşırı yüklenmeler nedeniyle yükselmekte ve kullanılan yağ yalıtımının erken yaşlanmasına neden olmaktadır. Bu gibi nedenlerden dolayı bu tür transformatörler risk taşımaktadırlar. Kalabalıklaşan şehir merkezleri, transformatör merkezi sayısı ve transformatör kapasitesinin artmasına dolayısı ile daha küçük alanlarda transformatör odalarının kurulması ihtiyacını beraberinde getirmiştir. Dağıtım transformatörleri

hastane, okul, alış-veriş merkezleri gibi insanların yoğun yaşadığı alanlarda ve bina altlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Dağıtım transformatörlerinin tasarımında, çevreye olan etkileri, bakım gereksiniminin az olması ve yanma riski dikkat edilmesi gereken konulardan başlıcalarıdır. Ekonomik ve teknik nedenlerden ötürü transformatörlerin tüketici yüklerine yakın yerleştirilmelerinin istenmesi dolayısı ile transformatörlerin boyutlarının küçük olması önemlidir. GYT'ler, daha küçük, daha sessiz oldukları ve daha az elektromanyetik parazit oluşturduğu için (normalde yangın riskini azaltmak için kullanılan) kuru tip transformatörlerin ideal bir alternatifidir. Bu ihtiyaçlar neticesinde gaz yalıtımlı transformatörlerin (GYT) gelişim süreci başlamıştır.

Gazlar ile karşılaştırıldığında; transformatör yağının elektrik alan şiddetine karşı dayanımının kararlı olmaması, homojen olmayan elektrik alan şiddeti dağılımlarının olumsuz etkileri, transformatör yağı yerine daha saf olan gaz kullanılmasının hem iletkenler arası mesafelerde düşmeye yol açacak olması hem de kararsız yağ yerine daha güvenilir bir yalıtım malzemesi kullanılmasına olanak sağlaması gibi nedenler, gaz yalıtımlı transformatörlerin hayata geçişini hızlandırmıştır.

Bilim adamlarının yapmış oldukları araştırmalar, küçük alana sığan, çevre ve atmosferik etkenlerden etkilenmeyen kükürt heksaflorür (SF<sub>6</sub>) gaz yalıtımlı tesisleri (Bolin and Koch, 2005) ve transformatörlerini ortaya çıkarmıştır (Toda, 2002). SF<sub>6</sub> gazı, yüksek dielektrik dayanımı, yüksek kimyasal kararlılığı, ısı iletim yeteneği ve mükemmel ark söndürme kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı ideal bir yalıtım ortamı olarak kabul edilmiş ve yaklaşık 60 yıldır elektrik şalt cihazlarında kullanılmaktadır (Xiao, et al., 2018a). Fakat, SF<sub>6</sub>'nın küresel ısınma potansiyeline sahip en güçlü sera gazlarından biri olması, kimyasal veya fotokimyasal bozulmaya karşı büyük ölçüde dirençli olmasından kaynaklı atmosferik ömrünün uzun olması nedeniyle Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve 1997 Kyoto Protokolü ile kullanımı sınırlandırılmıştır (De Chazournes, 1998). Bu nedenle, araştırmacılar SF<sub>6</sub>'ya alternatif olarak güvenilir, çevre dostu, verimli ve uygun maliyetli bir yalıtım malzemesi arayışına yoğunlaşmışlardır (Tian, et al., 2020; Xiao, et al., 2018).

Bu tez çalışmasında; gaz yalıtım tesislerinde ve transformatörlerde kullanılan SF<sub>6</sub> gazına karşı güçlü bir alternatif yalıtım maddesi belirleme ve enerji sistemlerinin en önemli ekipmanlarından biri olan dağıtım transformatörlerinin en ekonomik ve çevre dostu yolla karşılanabilmesi problemi ele alınmıştır.

## 1.1. Literatür Taraması

Literatürde, transformatörlerde kullanılan yalıtım malzemeleri ve gelişim süreçleri kapsamında yapılmış çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu bölümde, literatür çalışmaları kapsamında transformatör tiplerinin gelişim süreçlerine yer verilmiştir.

Madeni yalıtım yağı elektrik donanımında ilk olarak, Fransalı bir mühendis tarafından, bir indüktörün yüzeyinde meydana gelen alevlenmeyi önlemek amacıyla 1850'li yıllarda kullanılmıştır. Transformatörü madeni yağ ile soğutma fikri ilk kez 1882'de ortaya atılmıştır (Lucas, 2000). Yağ yalıtımlı transformatörler ilk üretilmeye başlandığı zaman, yağın görevi sadece soğutmayı sağlamaktı. Yalıtım işlevini ise; pamuk, karton, kâğıt ve tahta gibi katı yalıtkan maddeler yapıyordu. Daha sonra yağ üreten rafinerinin 1899 yılında kurulmasıyla birlikte, yağa duyulan ilgi artmaya başladı. 1930'lu yıllara gelindiğinde ise, madeni yağların yalıtım özelliğini araştırmak ve kalitesini geliştirmek üzere yoğun bir çalışma içine girildi (Perrier, et. al.,2006). Yağ üretim teknolojisi hızla gelişerek bugünkü modern tekniklere ve üretim tesislerine kavuşmuştur. Çok yüksek kalitede ve istenen özelliklere sahip olan yağlar, bu çağdaş tesislerde artık kolayca üretilmektedir (Perrier, et al., 2006). Ancak; son yıllarda dünyadaki ham petrol üretiminin azalması ile petrol fiyatlarında görülen hızlı artışlar, artan çevresel problemler, günümüzün gelişen teknolojisi sonucu daha zor şartlarda çalışabilecek yağlara gereksinim duyulması nedeniyle sentetik yağların kullanılması ile ilgili çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır (Hosier, et al., 2006; Hosier, et al., 2008). Günümüzde, mineral yalıtım yağının ana hammaddeleri, hidrokarbonlardan oluşan parafin bazlı ve naftenik bazlı ham yağlardır (Wang, et al., 2018). Dağıtım ve güç transformatörleri için iyi bir yalıtım malzemesi olarak görülseler de mineral yağların düşük alev alma sıcaklığı, ek yalıtım maliyetleri ve söndürme ekipmanlarına olan gereksinimleri gibi olumsuzlukları vardır (Ozgonenel, vd., 2018).

İzolasyon yağının incelenmesi ile transformatör ile ilgili tanılar ortaya konulmaktadır. Yağlı transformatörlerde buşinglerin kırılmaları ve çatlamaları sonucunda yağ sızıntısı meydana gelmektedir. Transformatör yüzeyindeki bağlantılarda oluşan kısa devreler veya arklar, sızan yağlarla temas ettiğinde yangınlara ve patlamalara sebep olmaktadır. Bu yangınlar çevreye zarar vermekte hem can hem de mal kaybına sebep olmaktadır. Yağlı transformatörler, yüksek sıcaklık ve bol miktarda yakıt nedeniyle söndürülmesi zor olan birçok büyük yangına neden

olmuştur (Pompili, et al., 2016). Bununla beraber pek çok endüstri ülkesinde meydana gelen ağır birkaç yangın olayı madeni yağlarla yalıtılmış cihazların bina içinde kullanılmasını yasalarla kısıtlamışlardır (El-Harbawi and Al-Mubaddel, 2020).

1960' lı yılların ortalarına kadar yağlı transformatörlerin bu olumsuzluklarına seçenek olarak klasik kuru tip transformatörler kullanılmıştır (Nunn, 2000). Ancak, 10kV'a kadarki ama gerilimlerinde bile yalıtım sınıfı E, uzun süre devre dışı kalan bir transformatörde nem alıp tekrar devreye alınması sırasında kurutulması gerektiğinden, sorunlara neden olmuştur. Bu durum yalıtım sınıfı H seçilerek çözülebilmekte ise de bu tür yalıtım malzemelerinin pahalı olması yatırım maliyetini arttırmaktadır. Bunun yanında, yüksek gürültü düzeyleri ve geniş alan gereksinimleri, rutubete karşı yüksek hassasiyeti ve dielektrik dayanımındaki problemler gibi olumsuzlukları dökme reçineli kuru tip transformatörlerin gelişimine yol açmıştır.

1964 yılında ilk kez vakum altında dökülen dökme reçineli kuru tip transformatörler yapılmıştır (Brown Boveri, 1965). Dökme reçine kuru tip transformatörler, yüksek güvenlik derecesinde elektrik dağıtımı için en uygun transformatörlerdir. Sargı yalıtımında kullanılan ekopsi, kolay tutuşmayan ve kendiliğinden sönebilen yanmayan özelliklere sahiptir. Arka maruz kaldığı zaman bile çevreye zehirli gaz yaymayan özelliklere sahiptir. Soğutma sistemi sadece hava içerdiği için yangına karşı korunumludur ve yangın sırasında tetikleyici etkisi yoktur. Sargılar yapısı, kısa devre arızalar karşısında daha güvenli ve sağlam duruş gösterir. Bakım gerektirmediği için tüm çalışma süresi boyunca yağlı tip transformatörler kadar bakıma ihtiyaç duymaz. Bu sebeple işletme bakım onarım gideri çok azdır. Bu transformatörlerin neme karşı dayanımları yüksektir. %100 nemli ortamda işletilse bile sorunsuz çalışır. Fan ilaveli soğutma sistemi ile güç kapasitesi yaklaşık %50 oranında artırılabilir. Yük merkezine yakın yerlerde kurulduğu için kablo maliyetleri de düşüktür. Bu transformatörler, yağa batırılmış olanlara kıyasla daha hafiftir ve yanmazdır. Kuru dökme reçine transformatörleri, genellikle yanıcı mineral yağ dolgululu transformatörlerin kabul edilemez olduğu veya yağ sızıntısı ile ilgili çevresel endişeler nedeniyle yangın riskinin kabul edilemez sayıldığı konut, hastane, okul, otel, alışveriş merkezi, pompa istasyonları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır (Rahimpour and Azizian, 2007).

Kuru tip transformatörlerin kullanım alanları yağlı tip transformatöre göre daha fazladır. Ancak harici uygulamalarda yağlı tip transformatörler kuru tip

transformatörlerden daha düşük maliyet gerektirmektedir. Dahası, kuru tip transformatörler yağlı tip transformatörlere göre kısa ömürlüdür. Kuru tip transformatörlerin ömürleri ortalama 18 yıl iken, yağlı tip transformatörlerde 30 yılı aşkındır (Nunn, 2000). Kuru tip transformatörlerin bütün üstünlüklerine karşılık çok yüksek güç ve gerilim kademelerinde yağlı tip transformatör kullanımı gereklidir.

Yağlı tip transformatörlerdeki yangınların oluşturduğu zararları kaldırmak için ilk olarak, yalıtkan gaz olarak bir CCl<sub>4</sub> buharı ve havası karışımı kullanılmıştır. Rodine ve Herb (1937), CCl<sub>4</sub> buharının ve havasının dielektrik dayanımını, özellikle de daha düşük bir CCl<sub>4</sub> konsantrasyonu ile birlikte sinerjize edebileceğini ve artırabileceğini tespit etmiştir. Charlton ve Cooper (1937), CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> ve CF<sub>4</sub>'ün, N<sub>2</sub>'den daha iyi dielektrik kuvveti gösterdiğini bulmuştur.

SF<sub>6</sub>, ilk olarak Cooper (1940)' tarafından bir yalıtım gazı olarak patentlenmiştir. O zamandan beri sistematik olarak çalışılmaktadır. Pollock vd. (1939), SF<sub>6</sub>'nın mükemmel ark söndürme kabiliyetinin, yüksek ısı kapasitesi ile ayrışma ve yeniden birleşme özelliklerinden kaynaklandığını ispatlamıştır. Yüksek dielektrik dayanımını, gaz molekülleri ve serbest elektronlar arasındaki reaksiyonu etkileyen büyük moleküler ağırlığına, karmaşıklığına ve elektron doğruluğuna bağlamıştır. 1967'de Toshiba, Japonya'da ilk kez yalıtkan yağ yerine SF<sub>6</sub> gazı kullanan yanmaz 66 kV-3.000 kVA gücünde transformatörü geliştirmiştir (Yanari, 2004). O zamandan beri, sürekli devam eden araştırma ve geliştirme faaliyetleriyle Toshiba, büyük kapasiteli GYT' ler (örneğin, iki ünite 77kv -20 MVA) geliştirmişlerdir. Toshiba' nın SF<sub>6</sub> GYT' leri, mükemmel yalıtım / soğutma özellikleri ve ısıl kararlılık sunmaktadır. Ek olarak, bu transformatörler, aktif parçaların yanmaz, zararsız ve kokusuz SF<sub>6</sub> gazı ile kapatılmış bir tankta bulunmasından kaynaklanan üst düzey kararlılık, üstün kaza önleyici özellikler, alt yapı kompaktlığı, basitleştirilmiş bakım ve uzun ömür, kolay ve temiz kurulum gibi yüksek gerilim sistemleri için ideal özelliklere sahiptir (Özgönel, et al., 2018). Bu üstünlüklerinden dolayı SF<sub>6</sub> gazının yalıtkan bir ortam olarak şalt tesislerinde kullanımı, hızlı ve yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bununla birlikte, transformatörler söz konusu olduğunda, soğutma kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle SF<sub>6</sub>'nın kullanımı şalt tesislerindeki kadar yaygınlaşmamış, transformatörler için SF<sub>6</sub>'nın kullanımı yalnızca küçük transformatörlerle sınırlı kalmıştır. Öte yandan, mükemmel güvenlik özellikleri göz önüne alındığında, kentsel alanda yer altı transformatör merkezleri için büyük kapasiteli gaz yalıtımlı

transformatör ihtiyaçları giderek artmıştır. Bu durum, büyük kapasiteli GYT'lerin geliştirilmesi ihtiyaını doğurmuştur. 1980'lerin başında, Amerika Birleşik Devletleri'nde 300 MVA civarında büyük kapasiteye sahip yanmaz transformatörlerin geliştirilmesine başlanmıştır. Ancak bu plan, ABD hkmetinin mali sıkılaştırması nedeniyle iptal edilmiştir. Japonya'da ise büyük GYT'in geliştirilmesi 1983'te başlamıştır. 1989'da Toshiba, Tokyo Electric Power Company'nin (TEPCO) Asahi Trafo Merkezi için 154 kV-200 MVA kapasiteli ilk büyük GYT'sini geliştirmiştir. Ardından, 1990'da TEPCO'nun Shin-Sakado Trafo Merkezi için uygulamayı 275 kV-300 MVA değerine genişletmiştir. Toshiba, gazın soğutma kapasitesini artırmak için gazın soğutma özelliklerini, transformatör bobinlerinin içindeki gaz akışını ve yapıyı iyileştirmeye yönelik araştırmalara başlamış ve 1994 yılında TEPCO'nun Higashi-Shinjuku Trafo Merkezi için yalıtım ve soğutma ortamı olarak sadece SF6 gazını kullanarak Şekil 1.2'de verilen 275 kV-300 MVA kapasitesinde dünyanın ilk büyük kapasiteli GYT'sini tamamlanmıştır.



Şekil 1.2. SF6 gazlı 275 kV-300 MVA kapasiteli dünyanın ilk büyük GYT'si (Yanari, 2004)

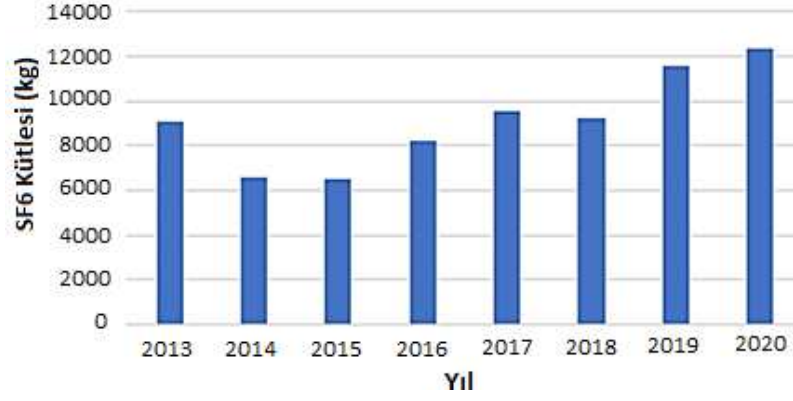
Toshiba, GYT üretimiyle dünya çapında tanınmaktadır ve 40 yılı aşkın bir süredir dünya çapında 700'den fazla ünite tedarik etmiştir. GYT teknolojisinde lider olan Toshiba, dünyanın en büyük GYT'si olan 400 MVA/330 KV'nin kurulumu da dahil olmak üzere kapsamlı bir deneyime sahiptir (Yanari, 2004). GYT'ler günümüzde 20 kV ile 500 kV arasındaki gerilimler için üretilmekte ve nominal güç 400 MVA'ya kadar çıkmaktadır.

GYT'lerin ana reticileri Asya merkezli olup, Toshiba ve Mitsubishi (Japonya), Hyosung (Güney Kore) ve Shihlin'i (Tayvan) içermektedir (Bolotinha, 2018).

Maiss ve Brenninkmeijer (1998), pratik uygulamalarda operasyon için güvenlik sağlayan, kimyasal olarak kararlı, zehirli ve yanıcı olmayan, dielektrik gücü, maliyet, stabilite, toksisite ve sıvılaştırma sıcaklığı dikkate alındığında, SF6'nın en iyi yalıtıcı gaz olarak göze çarptığını belirtmiştir. 1960'lı yıllardan itibaren hava yalıtımlı şalt cihazlarında ve gaz yalıtımlı şalt cihazlarında yaygın olarak kullanıldığını ifade etmişlerdir.

Yalıtım yağının SF6 gazına oranla daha iyi bir soğutucu olmasına rağmen SF6 gazı daha güvenli, yanmaz ve boyut olarak daha kompakt transformatörlerin üretilmesini sağlamaktadır. GYT'ler daha pahalıdır, ancak bu maliyet farkı, bakımın daha ucuz ve daha az olması nedeniyle transformatörün ömrü boyunca dengelenebilir. GYT'lerin en büyük üstünlüğü, gaz yanıcı olmadığı ve transformatör patlayıcı olmadığı için yangın riskinin azaltılmasıdır (Holman, 2013). SF6 gazı, alev almayan, renksiz, kokusuz, zehirli olmayan, havadan beş kat daha ağır ve kimyasal bakımdan son derece kararlı bir gaz olmasının yanı sıra sera etkisi yaptığından çevreye zarar verdiği araştırmalar ile tespit edilmiştir (Rabie and Franck, 2018). Günümüzde SF6 gazı, sera gazı emisyonlarının %15'inden fazlasını oluşturmaktadır. SF6'nın küresel ısınma potansiyeli (KIP), 2013'teki Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change) raporuna göre, 100 yıllık bir entegrasyon zaman diliminde kuvvetli bir sera gazı olan karbondioksit (CO2)'den 23,5 kat daha yüksektir ve atmosferdeki ömrü, 850 yıla ulaşmıştır (Ray, vd., 2017). Elektriksel yalıtım ortamının hızlı bir şekilde gelişmesiyle birlikte, büyük miktarlarda SF6 gazı sızıntı yapmakta veya atmosfere salınmaktadır. Şekil 1.3, Asset Grup'un gaz yatılım tesislerinde, sızıntı yapan parçaların yüksüz olarak değiştirilmesi ve bir onarım müdahale programı bağlamında 2013-2020 dönemi boyunca raporladığı Ulusal Şebeke Elektrik İletimi (National Grid Electricity Transmission-NGET) SF6 emisyonlarını göstermektedir.

Raporda, 2013'ten 2014'e düşüşün ardından, 2014'ten bugüne kadar tutarlı bir yükseliş gözlemlendiği, SF6 emisyonunun azaltılmasına yönelik önlemlerin yanı sıra, öncelikle sızıntı yapan parçaları düzeltmeye odaklanması durumunda, emisyonların gelecek yıllarda önemli ölçüde azaltılacağı belirtilmişti (Asset Group, 2020).



Şekil 1.3. NGET yıllık SF6 emisyonları (Asset Group, 2020)

SF6 basit bir boğucu gazdır. Bu gazla iletişime geçildiğinde solunum hızını ve kalp atış hızını hızlandırabilmektedir. Gaz ayrıca kas koordinasyonunu hafifçe etkileyebilir ve sinirlilik, yorgunluk, bulantı, kusma gibi başka semptomlara neden olabilmektedir. Yüksek SF6 seviyelerine tekrar tekrar maruz kalındığında ise bulantı, kusma, iştah kaybı, burun kanaması, ishal veya kabızlık yaşanabilir. SF6'nın yan ürünlerinin neden olduğu klinik semptomların özeti Tablo 1.1'de gösterilmektedir.

Tablo 1.1. SF6'nın toksik ayrışma ürünlerinden kaynaklanan başlıca klinik semptomlar (Luwen, 2004).

SF6'dan ayrışan gazlar	Klinik belirtiler
SF <sub>4</sub>	Solunum sistemini etkileyen akciğer hasarına neden olabilir.
S <sub>2</sub> F <sub>10</sub>	Solunum sistemi esas olarak hasar görür, bu da akciğer ödemeine neden olabilir.
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Ciddi akciğer ödemi ve mukoza zarı tahrişine neden olabilir.
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Bu kokusuz gazın solunması hızlı bir şekilde ölüme neden olabilir.
SO <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Akciğer hasarına neden olabilir.
HIFSO <sub>2</sub>	Cilt ve mukoza üzerinde güçlü bir uyarıcı etkiye sahiptir; akciğerlerde suya, mukoza tahrişine, şişme, zatürree ve solunum sistemi hasarına neden olabilir.

Bu gazın hidrolize edilmesi HF, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> ve diğer maddeleri üretebilmektedir (Xiao, et al., 2018b). Bu maddeler güçlü tahriş edicidir ve doğrudan insan sağlığını tehlikeye atmaktadır. Dahası, S<sub>2</sub>F<sub>10</sub> çok toksiktir (Yafen, et al., 2006).

1997 yılında Birleşmiş Milletler Konvansiyonel İklim Değişikliği sırasında tayin edilen Kyoto Protokolü, SF6'yı kullanım için kısıtlanan altı sera gazından biri olarak listeleterek kullanımını sınırlamıştır. Kaliforniya, 2020'de SF6'in elektrik alanının miktarını kademeli olarak azaltmayı teklif etmektedir. Avrupa Birliği, 2014'te SF6 emisyonlarını 2030 yılına kadar üçte iki oranında azaltmayı planlamaktadır (Mota-

Babiloni, et al., 2015). SF6 gazı kızılötesi ışımayı emebildiği için güçlü bir sera gazıdır ve kimyasal veya fotokimyasal bozulmaya karşı büyük ölçüde dirençlidir. Dahası 3200 yıllık bir atmosferik ömre sahiptir (Ragnauth et al., 2015). 2020'de emisyonların 4270 ± 1020 tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Fang, et al., 2013). Bu ömür, herhangi bir atmosferik salımı etkin bir şekilde geri dönüşümsüz kılar. Bu nedenle SF6 gazının çevresel olarak zararlı olması nedeniyle araştırmacılar SF6'ya alternatif olarak güvenilir, çevre dostu, verimli ve uygun maliyetli bir yalıtım malzemesi arayışına yoğunlaşmışlardır. Bu nedenle, SF6'yı tamamen değiştirmek için düşük küresel ısınma potansiyelli, sıfır ozon tüketme potansiyelli, toksik veya hipotoksik olmayan, yüksek dielektrik dayanımlı, iyi ısı iletkenlikli, düşük kaynama noktasına sahip, şalt malzemeleriyle uyumlu olabilecek bir alternatif gerekliliği doğmuştur (Kieffel, et al., 2016).

Tablo 1.2'de, SF6'ya alternatif olarak sunulan çevre dostu yalıtım gazları ile ilgili literatürdeki çalışmalarda kullanılan başlıca gazlar yer almaktadır.

Tablo 1.2. Elektriksel yalıtımda kullanılan bileşiklerin temel özellikleri (Khan, et. al., 2019; Ullah, et. al.2018; Wang, et al., 2019)

Kimyasal Formül	KIP/100-Yıl	Atmosferik Ömür/Yıl	SF6'ya Göre Dielektrik Dayanım	Sıvılaşma Sıcaklığı	Zehirlilik	OTP	Yanıcılık
SF6	23.000	3200	1	-64	Yok	0	Yok
CF4	9200	50.000	0,4	-128	Az	0	Yok
C2F6	12.200	10.000	0,76	-78,1	Yok	0	Yok
C3F8	8830	2600	1,01	-36,7	Yok	0	Yok
c-C4F8	8700	3200	1,3	-8	Yok	0	Yok
CF3I	0,4	0.0055	1,23	-22	Yok	0	Yok
C5F10O	1	0,044	1,5-2	27	Yok	0	Yok
C6F12O	1	0,014	2,7	49	Yok	0	Yok
C4F7N	2100	22	2	-4,7	Yok	0	Yok
R134a	1300	14	1,014	-26,3	Yok	0	Yok
R410A	2000	16	0,92	-52,7	Yok	0	Yok
CO2	1	-	0,32-0,37	-79	Yok	0	Yok
N2	-	-	0,34-0,43	-196	Yok	0	Yok
HAVA	-	-	1,000589	-193	Yok	0	Yok
He	-	-	0,02-0,06	-268,9	Yok	0	Yok
AR	-	-	0,04-0,10	-186	Yok	0	Yok

Kyoto Protokolü gereği yeni gazın, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun, iklime tehlikeli etki yapmayacak seviyelerde kalması gerekliliği alternatifler arasında önceliklidir. Alternatif gazların yalıtım performansı; KIP, OTP, dielektrik dayanım, sıvılaşma sıcaklığı, atmosferik ömür, zehirlilik ve yanıcılık özellikleri açısından değerlendirilmiştir.

Tablo 1.2’de yer alan karışım gazların çoğunda florin maddesi yer almaktadır. Perflorokarbonlar, florinin elektronegatifliği nedeniyle, iyi bir yalıtım performansına sahip olduğuna inanılmakta olup yeni yalıtım gazları olarak büyük ilgi görmüştür. Başlıca öne çıkan florokarbonlar; Perflorometan (CF<sub>4</sub>), Perfloroetan (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>), and Perfloropropan (C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>)’ dir. Küresel ısınma potansiyellerinin tümü SF<sub>6</sub>’nın değerinden daha düşüktür, ozon tükenme potansiyeli göstermezler ve karşılaştırılabilir dielektrik gücüne sahiptirler. CF<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> ve C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>, güçlü elektronegatif özelliklerinden dolayı gaz yalıtım ekipmanında kullanılma potansiyeline sahiptir. Tablo 1.2’den görüldüğü üzere, CF<sub>4</sub> ve C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>’nın ömürleri sırasıyla 50.000 ve 10.000 yıldır ve dielektrik güçleri, SF<sub>6</sub>’ninkinden daha düşüktür. Bu nedenle, CF<sub>4</sub> ve C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> gaz yalıtımı için uygun değildir. Okabe vd. (2015), C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>/C<sub>2</sub>F<sub>6</sub> ve N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> gaz karışımlarının dielektrik özelliklerini deneysel olarak çalışmışlardır. Bulgular, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>’in stratosferde O<sub>3</sub> açısından zararsız olduğunu, aynı zamanda düşük toksisiteye, iyi termal stabiliteye, nispeten düşük kaynama noktasına ve SF<sub>6</sub> ile karşılaştırılabilir dielektrik dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. C<sub>3</sub>F<sub>8</sub>’in küresel ısınma potansiyeli SF<sub>6</sub>’nın %38,7’si kadar, C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> (%12) / N<sub>2</sub> küresel ısınma potansiyeli SF<sub>6</sub>’nın %12’si ve C<sub>3</sub>F<sub>8</sub> (%12) / CO<sub>2</sub>’nin küresel ısınma potansiyeli SF<sub>6</sub>’nın %29’u olarak bulunmuştur.

Yamamoto vd. (2001), yalıtım ortamı olarak c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> içeren gaz karışımlarının uygulanması üzerine çalışmışlar, SF<sub>6</sub>’ya alternatif, çevre dostu bir yalıtım gazı potansiyeline sahip olduğunu belirtmişlerdir. Liu vd. (2008), c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> / CO<sub>2</sub> gaz karışımlarının, Monte Carlo yöntemini kullanarak, yalıtım özelliklerini analiz etmiş ve bunu güç ekipmanının gaz yalıtımına uygulama olasılığını incelemişlerdir. c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>’in yüksek kaynama noktasından (-8°C) dolayı, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> veya hava ile karıştırılarak kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> / CO<sub>2</sub>’nin dielektrik dayanımının SF<sub>6</sub> / CO<sub>2</sub>’den daha yüksek ve c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> / CO<sub>2</sub>’nin küresel ısınma potansiyelinin SF<sub>6</sub> / CO<sub>2</sub>’den daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. c-C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> / N<sub>2</sub> karışım gazına belirli bir miktarda O<sub>2</sub> eklendiğinde, delinme gerilimi belirgin şekilde azalmaktadır.

Holman (2013), çalışmasında C4F8 gazının SF6 için olası bir alternatif olduğunu belirtmiştir. C4F8'in, flor ve karbon atomlarından oluştuğunu ve ark sırasında zehirli kükürt bazlı gazların oluşma riskini ortadan kaldırdığını gözlemlemiştir. C4F8'in SF6'dan daha yoğun ve havanın delinme geriliminin 3,6 katı kadar daha yüksek bir dielektrik dayanımı olduğunu, SF6'ya kıyasla daha düşük bir küresel ısınma potansiyeline sahip olduğunu saptamıştır.

Fakat, Xiao vd. (2018), O2'nin, c-C4F8'in ayrışmasını teşvik etmesi ve çok toksik, aşındırıcı COF2'yi oluşturmasından dolayı c-C4F8'nin O2 olmadan kullanılması gerektiğini savunmuşlardır.

Zhong vd. (2018), SF6 ve dört karbon-florür yalıtım gazlarının (CF3I, C2F6, C3F8 ve c-C4F8) farklı dielektrik performanslarını ortaya çıkarmak için, dielektrik bozulma özelliklerinin karşılaştırmalı bir çalışmasını yapmışlardır. Çalışmanın sonuçları bu gazlar arasında c-C4F8'in en yüksek dielektrik dayanımını gösterdiğini, yalıtım kuvvetinin, SF6'dan yaklaşık 1,3 kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. c-C4F8'in küresel ısınma potansiyeli 8700 olup SF6'nın %38,2'si kadardır. Dahası, c-C4F8'in toksisite ve ozon tahribatı olmayan, yüksek termal stabilite özelliklerine sahip bir gaz olduğu belirtilmiştir. Deng ve Xiao (2014), Boltzmann denklem yöntemi ile CF3I gaz karışımlarının Ar, Xe, He, N2 ve CO2 ile yalıtım özelliklerinin analizi üzerine çalışmışlardır. CF3I'nın renksiz, kokusuz, yanmaz ve kararlı bir gaz olduğunu ve mükemmel elektronegatif özelliği nedeniyle, dielektrik kuvvetinin SF6'nın 1,2 katı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, CF3I'nin küresel ısınma potansiyelinin SF6'dan çok daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Atmosferdeki ömrünün 2 günden az olması ve ozon yıkımına neden olmaması nedeni ile CF3I'in, SF6'ya yeni bir yalıtım gazı olarak potansiyel bir alternatif olduğunu vurgulamışlardır (Solomon, et al., 1994). Fakat, -22,5 gibi yüksek kaynama noktasına bağlı olarak N2, CO2, hava, He gibi düşük kaynama noktasına sahip diğer gazlarla karıştırılarak kullanılması uygun olacaktır (Deng and Xiao, 2014). Zhang vd. (2016), CF3I / N2'nin gaz yalıtım ekipmanındaki uygulanabilirliğini araştırmışlardır. 0,3 MPa'da CF3I (%30) / N2'nin bazı düşük basınçlı yalıtım ekipmanlarına uygulanabileceği sonucuna varmışlardır. Xiao vd. (2018), CF3I gazının dielektrik malzemelerin araştırma alanında kararlı ve tipik bir elektronegatif gaz olarak dikkat çektiğini belirtmişlerdir. CF3I gazının termodinamik özelliklerinin ve elektriksel performansının olağanüstü aynı zamanda en umut verici

yalıtım gazı alternatifi olduğunu belirtilmişlerdir. Tan vd. (2018), 126 kV gaz yalıtımlı hatta bir CF3I (%20) / N2 karışımı uygulamışlardır. Yalıtım performansını, SF6 (%20) / N2'ninkinin %83'ü ve saf SF6'nın %59'u olarak bulmuşlardır. Yazarlar, CF3I (%20) / N2'nin basıncının 0.7MPa'yı aştığında, yalıtım ve güvenlik gereksinimlerini karşılayabileceğini, ancak uzun bir süre boyunca güvenlik ve fizibilite dikkate almadıklarını belirtmişlerdir. Chen vd. (2016)'daki çalışmalarında CO2 veya N2 ve CF3I karışımlarını çalışmış ve bunların toksik ve yüksek sıvılaştırma sıcaklığına sahip oldukları sonucuna varmışlardır.

Zhang vd. (2017, 2018a), C5F10O gazının ayrışma ürünlerini incelemiştir. Yapılan analizler neticesinde, C5F10O'nun bir yalıtım gazı olarak güvenilir olduğunu, gaz yalıtımlı tesislerdeki uygulamaların çevreye ve insan sağlığına tehdit oluşturmadığını tespit etmişlerdir. Li vd. (2018), C5F10O ve Cu arasındaki uyumluluğu kuramsal hesaplama ile incelemiştir. Karbonil grubunun C5F10O'daki yüksek aktivitesi nedeniyle, Cu yüzeylerinde kimyasal bağlanma ile güçlü bir şekilde absorbe edilebilir olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, Li vd. (2019), C5F10O ve Al veya Ag arasındaki uyumluluk üzerine çalışmışlar, Ag'nin C5F10O ile Cu'dan daha uyumlu olduğunu gözlemlemiştir.

Zhao vd. (2018), C6F12O / N2 ve C6F12O / havanın gaz bozunma ürünlerini nitel olarak analiz etmiş ve AA korona deşarjı altında gaz kromatografi-kütle spektrometrisi ile karşılaştırmışlardır. Yüksek kaynama noktasından dolayı, C6F12O'nun sıvılaştırmasını önlemek için N2 veya kuru hava gibi tampon gazlarla karıştırmışlardır. N2'ye %3 C6F12O eklendiğinde, sıvılaştırma sıcaklığının  $-26^{\circ}\text{C}$ 'ye düştüğünü, karışım gazının delinme geriliminin SF6 (%10) / N2'ye eşit olan saf N2'den 1,7 kat daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıştırılmış C6F12O / N2 ürünleri temel olarak CO, CO2 gibi birçok ürünün yanında CF3CN'yi üretmiştir. Analizler sonucunda bu ürünün ölümcül tehlikeye neden olduğunu tespit etmişlerdir. Zhang ve ark.(2018b), deneysel testleri ve kuramsal hesaplamayı birleştirerek C6F12O ve metal malzemeler arasındaki uyumluluğu sistematik olarak incelemiştir. C6F12O'nun, metal oksit üreten Cu ve Al yüzeyinde absorbe edilebilir olduğunu, 125 günlük reaksiyondan sonra bile Cu, Al veya Ag'nin yüzeyinde ciddi korozyona neden olmadığını gözlemlemiştir. Böylece, C6F12O ve Cu, Al ve Ag arasındaki uyumluluğun mükemmel olduğunu belirtmişlerdir.

Bir çeşit floronitril olan C4F7N, ilk olarak 3M<sup>TM</sup> Şirketi tarafından geliştirilmiş

ve piyasaya sürülmüştür. Düşük toksisite ve yüksek ısı iletimi özelliklerine sahiptir. Atmosferdeki yaşam süresi 22 yıldır. Küresel ısınma potansiyeli 2100'dür ve yalıtım gücü normal basınç altında SF6'dan yaklaşık bir kat daha yüksektir. Yalıtım özelliği, elektriksel yalıtım sistemlerinde SF6'ya umut verici bir alternatif olmasını sağlamıştır (Xu, et al., 2017). Bununla birlikte, Li vd. (2018a), C4F7N'in -4.7 °C yüksek kaynama noktası nedeniyle tek başına uygulanamadığını, bu nedenle, pratik uygulamalarda yalıtkan gaz karışımlarının kaynama noktasını azaltmak için başka N2 gibi tampon gazların eklenmesi gerektiğini belirtilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, C4F7N (%5) / N2 yalıtım direnci ve bozulma geriliminin, saf SF6'nın %83,34'ü kadar olduğu gözlemlenmiştir. Delinme geriliminin, 30 delinme testinden sonra 33,6 kV'a tutularak mükemmel bir kendini kurtarma özelliği gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca, C4F7N (%5) / N2'nin küresel ısınma potansiyelinin (600'den az) SF6'dan (23.000) çok daha az olduğu belirtilmiştir (Li, et al., 2018b).

Şenol (2002), Argon (Ar) gazının kimyasal olarak kararlı olması, iyi iletim kabiliyeti, sera etkisi yapmaması, düşük sıvılaşma sıcaklığı, diğer gazlarla temasta kimyasal ilgisizliği, SF6 gazına göre 10 kat ucuz olması ve zehirli olmaması gibi üstünlüklerinden dolayı SF6 ile argon gazını karıştırarak yüksek gerilim cihazlarında kullanımına katkılarını araştırmıştır. Alternatif gerilimde %75 SF6 + %25 Argon gaz karışımının delinme dayanımını incelemiş ve saf SF6 gazının delinme dayanımına çok yakın olduğu sonucu dikkate alındığında, şalt cihazlarında daha güvenilir bir uygulama sunacağı sonucuna varmıştır. Ayrıca, kullanılan SF6 gazından yılda 1600 ton tasarrufta bulunulacağını ve atmosfere atılan SF6 miktarından yaklaşık 72 ton tasarrufta bulunulacağını belirtmiştir.

Ullah ve ark (2018), N2 ve hava karışımları içeren bir R134 gazını incelemiş ve SF6'ya kıyasla daha az çevresel etki sağladığını, daha iyi dielektrik özelliğe sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Hem SF6 hem de R134, renksizlik, kokusuzluk, yanmazlık ve zehirlilik derecesi gibi özdeş özelliklere sahip olsa da araştırmaları sonucunda, R134 gazının ekonomik maliyet, daha az çevresel kirlenme ve iyi dielektrik gücü sağladığını, ancak R134'ün yüksek sıvılaştırma sıcaklığına sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Khan vd. (2018), yüksek gerilimli uygulamalar için SF6'ya alternatif olarak R410A gazının dielektrik özelliklerini analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, R410A gazının yanmazlık, toksisite, düşük sıvılaşma sıcaklığı, sıfır ozon

tükenme potansiyeli, düşük küresel ısınma potansiyeli, piyasadaki bulunabilirliği ve ekonomik maliyet açısından iyi bir potansiyele sahip olduğu, ancak R410A'nın SF6'dan daha yüksek sıvılaştırma sıcaklığına sahip olduğu belirlenmiştir. R410A, SF6'ninkinden az farkla yüksek olan 1 atmosferik basınçta  $-52,7$  °C sıvılaştırma sıcaklığına sahiptir. Bu farkı eşitlemek için, araştırmacılar R410A'yı karbondioksit ile karıştırarak  $-78$  °C sıvılaştırma sıcaklığını elde etmişlerdir. Performansı ve kuramsal kavramları doğrulamak için Khan vd. (2019a) deneysel olarak analiz etmişlerdir. Tampon gazlarından olan hava ve karbondioksit, sıvılaştırma sıcaklığını ve küresel ısınma potansiyelini azaltmak için R410A gazı ile karıştırılmış, R410A'nın dielektrik mukavemeti DA ve AA gerilimleri için test edilmiştir. R410A'nın yalıtım öz-kurtarılabirlik testi ve karışık gazların sinerjistik etkisi hesaplanmıştır. R410A'nın benzetim sonuçları, SF6'nın sonuçları ile karşılaştırılmış ve aynı koşullarda R410A için elektrik alan yoğunluğunun, SF6'nın 0,92 katı olduğu tespit edilmiştir. Diğer özelliklerinin yanı sıra, R410A'nın dielektrik dayanımı SF6'nın 0,92 katı kadar olup karşılaştırılabilir değere sahip ve SF6'ya iyi bir alternatif olarak görüldüğü belirtilmiştir.

Literatür araştırmasını özetleyecek olursak; C2F6, C3F8 ve c-C4F8'in küresel ısınma potansiyelleri, SF6'ya kıyasla önemli avantajlar gösteremeyecek kadar yüksektir. CF3I belirgin düşük küresel ısınma potansiyeli ve dielektrik dayanımını göstermektedir, ancak kanserojenik bir madde olarak tanımlanmıştır. Dahası, elektrik ekipmanları ile stabilitesi ve uyumluluğu henüz araştırılmamıştır. C5F10O, C6F12O ve C4F7N'nin küresel ısınma potansiyelleri düşüktür ve yüksek dielektrik dayanımları ve düşük toksisite göstermektedirler ve bu nedenle bazı elektriksiz yalıtım ekipmanlarında SF6'yı kısmen değiştirme potansiyeline sahiptirler. Bununla birlikte, bu yalıtıcı gazların ekipman malzemeleriyle uyumluluğu ve geleneksel sızdırmazlık malzemeleri kullanılarak elde edilen sızıntı oranı da yeteri kadar çalışılmamıştır. Yalıtım gazlarının karışımlarında kullanılan ve gazların ayrışmasını hızlandırabilen H2O ve O2'yi ortadan kaldırmak için kullanılan absorbanlar da ekipmanın güvenli çalışmasını sağlamak için elenmeli veya geliştirilmelidir. R410A gazının, yanmazlık, toksisite, düşük sıvılaştırma sıcaklığı, sıfır ozon tükenme potansiyeli, düşük küresel ısınma potansiyeli, piyasadaki bulunabilirliği ve ekonomik maliyet açısından iyi bir potansiyele sahip olduğu, yüksek gerilimli uygulamalar için SF6'ya en iyi alternatif olduğu düşünülmektedir. En belirgin olumsuzluğu, SF6'ninkinden ( $-63$ °C) daha

yüksek olan 1 atmosferik basınçta  $-52,7$  °C sıvılaştırma sıcaklığına sahip oluşudur. Fakat diğer tüm alternatiflerle ve SF6 ile kıyaslandığında R410A gazının yüksek gerilimli uygulamalar için SF6'ya en iyi alternatif olduğu ve açık farkla ön plana çıktığı düşünülmüştür. Orta ve yüksek gerilim uygulamaları için SF6'ya bir alternatif önerildiğinde, elektrik enerjisi endüstrisinde SF6'nın dielektrik gaz olarak sahip olduğu tüm özellikleri göz önünde bulundurmak çok önemlidir ve önerilen alternatif bu özelliklere göre değerlendirilmelidir. Bölüm 3.1.2'de SF6 gazı ve ona alternatif olarak en yakın olan R410A gazının soğutma ve yalıtımda önemli rol oynayan parametreleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

## **1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı**

Enerji iletim ve dağıtım sistemlerin en önemli elemanlarından biri olan transformatörler yüksek maliyet ve uzun zaman alan çalışmalar neticesinde üretilebilmektedir. Üretim sürecindeki bir transformatörün mekanik, elektriksel ve manyetik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Tasarımı yapılacak transformatörlerin hedeflenen değerlerde ve verimlilikte çalışabilmesi için güvenilir bir benzetim programı ile modellenmesi, test kriterlerinin sağlanması, sonradan ortaya çıkabilecek problemlerin en aza indirgenmesi açısından önemlidir.

Bu çalışmada, enerji sistemlerinin en önemli ekipmanlarından biri olan dağıtım transformatörlerinin, yalıtım maddesi olan transformatör yağı ve SF6 gazına karşı güçlü bir alternatif olduğu öngörülen R410A gazı ile en ekonomik ve çevre dostu yolla karşılanabilmesi için gerekli olan ön bilginin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada esas ilke; daha önceden transformatörlerde kullanılmamış R410A gazı ile gaz yalıtımlı bir dağıtım transformatörü modellemek ve normal çalışma koşullarında çalışma performansını analiz etmektir. Bu çalışma ile; literatürde ilk defa R410A GYT tasarımı ve imalatı için gerekli ön bilgi yer alacak, çevre dostu GYT'lerin ülkemizde imal edilebilmesi için gerekli olan bilgi birikimine önemli bir katkı yapılacaktır.

## **1.3. Tezin İçeriği**

Bu tez çalışmasında 34,5/0,4kV, 50 Hz anma değerlerine sahip bir dağıtım transformatörünün iki boyutlu (2B) ve üç boyutlu (3B) modelleri kullanılarak elektrostatik, darbe gerilimi ve ısı analizlerini gerçekleştirilmiştir. Analizler için ticari bir program olan COMSOL Multiphysics 5.2a programı kullanılmıştır. COMSOL, 2B

ve 3B paket yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçların kuramsal hesaplar ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın en önemli adımı, R410A gazının uygulanan gerilim, kazan basıncı ve ısı etkisi altında homojen ve homojen olmayan elektrik alan yoğunluğu değerlerinde dielektrik dayanım eğrilerinin, dielektrik katsayılarının çıkartılması ve model transformatöre uygulanmasıdır. Çalışmanın temelinde, 50kVA anma gücündeki dağıtım transformatörünün gerçekçi modeli üzerinde R410A GYT tasarımı araştırılmıştır. Tez çalışmasının kapsamı aşağıdaki gibidir:

- Farklı gaz basıncı ve elektrot aralıklarında R410A gazının elektriksel delinme dayanımlarının incelenmesi,
- R410A gazının kırılma dayanımı ve elektrik alan dağılımının kuramsal olarak elde edilmesi,
- COMSOL ortamında R410A gaz yalıtımlı transformatör için sayısal elektrik alan hesaplamalarının elde edilmesi,
- R410A gaz yalıtımlı dağıtım transformatörlerinin tasarım kriterlerinin belirlenmesi kapsamında:
  - Gazın yıldırım ve darbe gerilimleri altında yalıtım ve delinme performansının analizi,
  - Isıl analizler ve çözüm önerilerinin belirlenmesi,
  - Gerçek GYT üzerinde deneysel analizlerin gerçekleştirilmesi.

## **2. KURAMSAL TEMELLER**

### **2.1. Gaz Yalıtımlı Transformatörler**

#### **2.1.1. Gaz Yalıtımlı Transformatörlerin Özellikleri**

Gaz yalıtımlı bir transformatör, manyetik devresi ve sargıları bir yalıtım gazı ile çevrelenmiş bir transformatördür. GYT'ler, mükemmel yalıtım/soğutma özellikleri ve termal kararlılık sunmaktadır. Ayrıca bu transformatörler, aktif kısımların yanıcı olmayan, zararsız ve kokusuz bir gaz ile kapatılmış bir tankta bulunmasından kaynaklanan birçok üstün özelliklere sahiptir.

GYT'ler üst düzey kararlılıktadır. Transformatör kaza yapsa veya kurulum ortamında yangın çıksa bile yanma veya patlama meydana gelmemektedir. Tüm canlı parçalar topraklanmış metal kasalara yerleştirildiğinden, bakım ve muayene kolay ve güvenli bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

GYT'ler kaza önleyici özelliktedir. Yalıtım yağı içermeyen yanıcı olmayan yapısı, yangına dayanıklı gövde, yangınla mücadele ekipmanı veya petrol tankları gibi ilgili kaza önleyici tesislerin kapsamını en aza indirmeye katkıda bulunmaktadır. İçsel hatalardan kaynaklı basınç artışları gaz özelliğinden dolayı kolayca yok edilebilmektedir.

Trafo merkezleri kompakt yapıdadır. Gaz yalıtımlı şalt sistemi ile doğrudan bağlantı kurarak, kompakt tesislerin bir sonucu olarak transformatör alanı en aza indirilebilir. Koruyucu ve basınç önleme cihazlarının gerekli olmamasından dolayı transformatör odalarının yüksekliğinde ciddi bir azalma olur.

GYT'ler basitleştirilmiş bakım ve uzun hizmet ömrüne sahiptir. Transformatörler mahfaza kasalarında tamamen sızdırmaz olduklarından, dış atmosferik hava ile temas yoktur. Böylece nem veya toz birikiminin tetiklediği bozulma veya kirlenme sorunları ortadan kalkmaktadır. Bileşenlerinin aktif olmayan R410A gazıyla sürekli olarak sarılması, yalıtım malzemelerinin yaşlanmadan kaynaklı bozulma problemini en aza indirmekte ve transformatör hizmet ömrünü uzatmaktadır.

GYT'lerin kurulumu kolay ve temizdir. Yalıtım gazı, bir silindirden transformatör tankına hızlı bir şekilde aktarılabilir. Kurulum çalışmaları asla çevredeki alanları kirletmez ve temiz bir ortamın korunmasını sağlar. Ayrıca, gaz yoğunluğu yalıtım yağı yoğunluğunun yaklaşık 1/60 olduğundan ve akışkanlığı düşük

olduğundan, soğutma esnasında basınç düşüşü çok küçüktür (Ozgonenel, vd., 2016).

GYT'nin basit yapısı, hafifliği, azaltılmış yüksekliği ve küçük bir kurulum alanı transformatör merkezinin sermaye maliyetini büyük ölçüde azaltır. Özellikle gaz yalıtımlı şalt sahası GYT ile birlikte kullanıldığında bu üstünlükler daha belirgin hale gelmektedir.

GYT'ler yüksek gerilim sistemleri için ideal olarak kabul görmektedir. Sızdırmazlık basıncını artırarak, GYT'ler, 22 kV ila 154 kV arasındaki yüksek gerilimler için ideal olan, yağ yalıtımlı türlerle karşılaştırılabilir yalıtım performansı sunar. GYT'lerin mevcut eğilimleri, yeraltı transformatör merkezi uygulamasının, yani Gaz Yalıtımlı Şalt Tesisleri'nin geliştirilmesine yöneliktir. GYT'lerin ayrıca geleneksel yeraltı transformatör merkezlerinin ötesinde açık havada daha geniş bir uygulama bulması beklenmektedir (Metwally, 2010).

### **2.1.2. Gaz ve Yağ Yalıtımlı Transformatörlerin Karşılaştırılması**

GYT'lerin en büyük üstünlüğü, gazın yanıcı olmaması ve transformatörün patlayıcı olmaması nedeniyle yangın riskinin azalmasıdır. Bu önemlidir, çünkü bir arıza sırasında kontrolsüz enerji salınımı, genellikle patlamalara ve transformatördeki yanıcı maddelerin tutuşmasına neden olmaktadır. Yağ yalıtımlı transformatörleri, yüksek ısı ve bol yakıt nedeniyle söndürülmesi zor olan birçok büyük yangına neden olmuştur.

GYT'lerdeki gaz yanıcı değildir. Yanıcı olmamasının yanı sıra, gazın dielektrik olarak kullanılması dahili bir arızadan kaynaklanan patlama olasılığını da azaltır. Yağ bir sıvıdır ve bu nedenle bir arıza sırasında sıkışmaz ve enerjisi harici transformatör tankına aktarır. Gaz, iç arızalardan gelen basınç dalgasını emer ve transformatör tankı üzerindeki stresi azaltarak patlama olasılığını azaltır. Gazın sızması yakın çevreye zarar vermez ve yağ yalıtımlı transformatörlerde bulunan drenaj için yağ tutma, set veya ayırıcılara gerek yoktur. Bir genleşme tankına ihtiyaç duymadığından, GYT'lerin yüksekliği daha düşük ve daha hafiftir. Hava ve yağ dahil çoğu kimyasal, arklara maruz kaldığında ayrışır ve bozulur. Gaz ayrıştığında, flor atomları molekülden ayrılarak yeni bileşenler oluşturur. Gaz soğuduğunda ise flor, gazı yeniden oluşturmak için hemen yeniden birleşir, bu nedenle "kendi kendini iyileştirir". Ayrışan gaz, zararlı yan ürünler oluşturmak için oksijen ve hidrojen atomlarıyla bağlanabilir. GYT'lerde, nem veya oksijen bulunmamasının kritik olmasının nedeni budur.

Tablo 2.1’de ise R410A gazı ile transformatör yağının karşılaştırmalı özellikleri görülmektedir (Toda, 2002).

Tablo 2.1. R410A gazı ile transformatör yağının karşılaştırılması

<b>Madde</b>		<b>Gaz yalıtımlı Transformatörler</b>	<b>Yağ yalıtımlı Transformatörler</b>
<b>Güvenlik</b>	Yanma özelliği	R410A gazı alev almaz	Mineral yağ alev alır
	Patlama özelliği	R410A gazı patlamaz	Patlama ve yanma olasılığı var
	Temizlenebilirliği	R410A gaz sızıntısı çevreyi kirlletmez	Yağ sızıntısını önlemek gerekir
<b>Performans</b>	İzolasyon performansı	IEC 76 (1976) veya ANSI C57 (1980)	IEC 76 (1976) veya ANSI C57 (1980)
	İzolasyonun sıcaklık sınıfı (ısı yükseklik limiti)	E sınıfı (Sarım:75°C)	A sınıfı (Sarım:65°C)
<b>Yapı</b>	İzolasyon donanımı	R410A gazı, filim, ve diğerleri	Mineral yağ, kraft kağıt ve diğerleri
	Demir çekirdek/sarım	Çekirdek tipi/eşmerkezli plan	Çekirdek tipi/eşmerkezli plan
	Tank	Çelik hava sızdırmaz tank	Çelik hava sızdırmaz tank
<b>Koruma elemanı</b>	Isı derecesi	Kadranlı termometre (değmeli)	Kadranlı termometre(değmeli)
	Basınç	Bileşik sayaç, ısı basınç ayar anahtarı (ani gaz basınç rölesi)	Buchholtz röle, ani yağ basınç rölesi
	Gaz	-	Buchholtz röle, gaz yakalama rölesi
	Gaz boşalması	-	Basınç aleti
<b>Bakım/ denetim</b>		Gaz ısısı	Yağ ısısı
		Gaz basıncı	Yağ seviyesi
		Gaz kömürü (zorlanmış gaz dağıtma tipli durumda)	Yağ pompası
		Gaz ısısı	

### 2.1.3. Gaz Yalıtımlı Transformatörlerin Olumsuzlukları

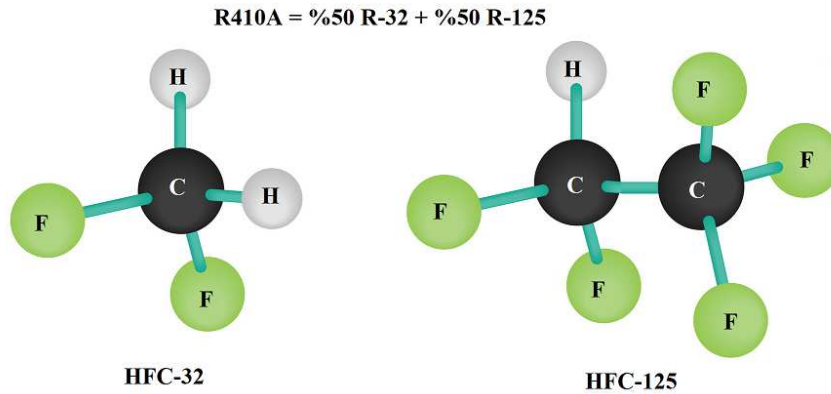
Gaz yalıtımlı transformatörler daha pahalıdır. Ancak, bu maliyet farkı, GYT'ler daha ucuz ve daha seyrek bakım gerektirdiğinden transformatörün ömrü boyunca dengelenebilmektedir.

Sera gazlarına ilişkin çevresel düzenlemeler, gazın dikkatli bir şekilde ele alınmasını ve mümkün olduğunda geri dönüştürülmesini gerektirir. Bu, yerel yasalara bağlı olarak ek kurulum ve onarım maliyetleri oluşturabilir.

Sisteme, parlamalara neden olacak toz parçacıklarının girmemesine dikkat edilmelidir. Arıza dahili olarak meydana geldiğinde, arızanın teşhisi ve düzeltilmesi çok uzun zaman almaktadır (kesinti süresi yüksektir).

### 2.2. R410A Gazı

R410A soğutma sistemlerinde kullanılan yeni bir soğutucu akışkandır. Ağırlıkça %50 R32(diflorometan) ve %50 R125'den (pentafloroetan) oluşan azeotropik bir karışımdır. Azeotropik bir karışım saf bir akışkan gibi davranır. Azeotropik bir soğutucu akışkan karışımına ısı eklendiğinde veya çıkarıldığında bütün işlem süresince saf bir akışkan gibi davranır. Şekil 2.1'de R410A gazının kimyasal yapısı görülmektedir.



Şekil 2.1. R410A gazının kimyasal yapısı (Tomczyk, 2017)

1980'lerde California'dan bir bilim adamı ekibi, CFC (kloro floro karbon) ve HCFC (hidro kloro floro karbon) soğutucularında bulunan tüm klorun ozon tabakasına zarar verdiğini tespit etmiştir. Bunun üzerine dünya hükümetleri Montreal Protokolü'nü oluşturmuş, CFC ve HCFC gibi ozon tüketen maddelerin kullanımını durdurmayı amaçlamıştır. 1980'lerin sonlarında yüzden fazla ülke tarafından imzalanmıştır. Bu antlaşma tüm dünya ülkelerinde yürürlüğe girmiştir. 1990'ların

ortalarından 2010 yılına kadar CFC ve HCFC soğutucu akışkanlar aşamalı olarak kullanımdan kaldırılmış ve yerlerine klor içermeyen HFC (hidro flor karbon) akışkanlar geliştirilmiştir. Bu tür soğutucu akışkanların yapısında ozon ile bileşik yapan, atmosferde ozonun tüketilmesine sebep olan klor bulunmamaktadır. Yapılarında bulunan hidrojen nedeniyle, CFC'ler kadar kimyasal durgunluğa sahip değildirler. Bu özelliklerinden dolayı atmosfere ulaşmadan HFC'lerin çoğu kimyasal bileşenlerine ayrılmakta ve ozon tabakasına ulaşmamaktadır. Bu nedenlerden ötürü, ozon tüketimine sebep olmazlar (Başaran, A. ve Özgener, L., 2013).

1991 yılında Honeywell Corporation tarafından yeni HFC soğutucu olan R410A geliştirilmiştir. O zamandan beri diğer üreticiler de kendi R410A ürünlerini geliştirmişlerdir. 2010 yılı itibariyle, Türkiye klima pazarında da sıklıkla kullanılan R22 gazının aşamalı olarak kullanımdan kaldırılması ile yerine R410A geçmiştir. Çok yeni bir gaz olmakla birlikte, 2017 yılından beri dünyada kullanılan en yaygın soğutucu akışkanlardan biri olmuştur (Johnson, A., 2017).

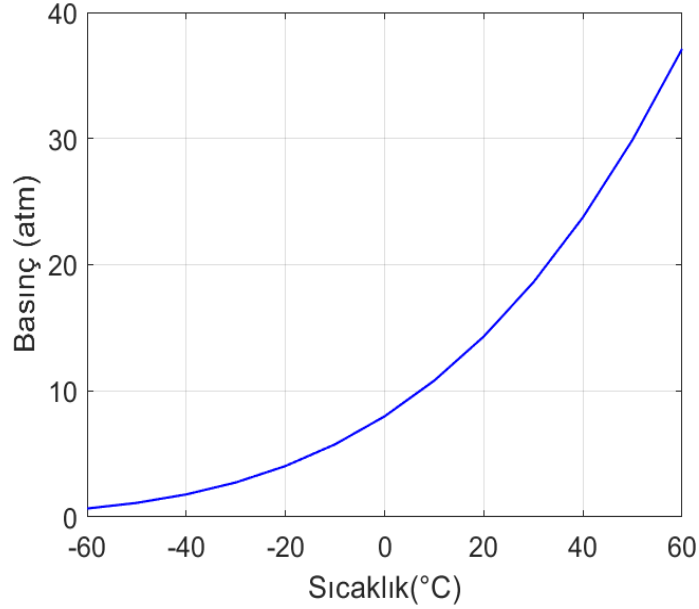
### **2.2.1. R410A Gazının Kimyasal Özellikleri**

R410A gazı, klor bulundurmadığından ozon tüketim katsayısının sıfır oluşu ile çevreye dost bir gazdır. R410A sıfır ozon inceltme potansiyeliyle ASHRAE (American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers- Amerikan Isıtma-Soğutma ve Klima Mühendisleri Birliği)'den A1 güvenlik derecesi almıştır. Yanıcı, patlayıcı ve zehirli değildir. Kimyasal ve ısıl kararlılığı normal çalışma koşullarında mükemmeldir. Yüksek dielektrik dayanıma sahiptir. Renksiz sıvılaştırılmış bir gaz olup kokusuzdur. R410A, SF6 gibi elektronegatif bir gazdır. Bir atomun kimyasal bağda elektronları kendisine çekme gücüne elektronegatiflik denir. R410A, elektronegatif bir gaz olduğundan, olası bir kısmi deşarj durumunda elektron yayılımını dar bir alanla sınırlı tutmakta, olası delinmeleri önlemektedir (Khan, et al., 2018).

R410A gaz yoğunluğu havadan yaklaşık 3,5- 4 kat daha fazladır. Özellikle hava ile kıyaslandığında R410A gazı da SF6 gazı gibi yüksek yoğunluk ve ısıl iletkenliğe sahiptir. Bu doğal dolaşım yoluyla daha da iyi bir ısı iletimi anlamına gelir ve iletim ortam basıncının artması ve fan kullanımı ile daha da artırılabilir. Şekil 2.2'de R410A gazının ortam ısı ile iç ortam basıncının değişimi görülmektedir.

Şekilden görüldüğü üzere çalışma sıcaklıklarında basıncın değişimi neredeyse

doğrusaldır. Bir gazın ideal olması, basınç ve sıcaklığının orantılı bir şekilde değişeceği anlamına gelmektedir. Soğutma sistemlerinde basınç-sıcaklık ölçümleri soğutma performansını değerlendirmede en önemli ölçümlerdir. Karışım gaz olarak bilinen R410A soğutucu akışkanlarda bu sıcaklık basınç uyumu birkaç derece farklı olabilmektedir.



Şekil 2.2. R410A gazının sıcaklıkla basınç değişim eğrisi

### 2.2.2. R410A Gazının Fiziksel Özellikleri

Tablo 2.2’de SF6 gazı ve ona alternatif olarak en yakın olan R410A gazının soğutma ve yalıtımda önemli rol oynayan parametreleri görülmektedir (Koch, 2003; Honeywell, 2007). Bu parametreler, yalıtım sistemlerinde üstün başarısı kabul görmüş SF6’ya kıyasla R410A’nın aynı sistemlerdeki performansını değerlendirmek açısından yardımcı olmaktadır.

Bu kısımda, gazların fiziksel özelliklerini tanımlamada kullanılan parametrelerin soğutma ve yalıtımdaki etkileri verilmiştir. Bu parametrelerden ilki olan molekül ağırlığı, gazın kütesinin mol sayısına bölünmesiyle elde edilir. Moleküler ağırlık, verilen soğutma kapasitesi ve çalışma koşullarında sistem boyutunu etkileyen önemli bir faktördür. Soğutucu akışkanın molekül ağırlığı büyük ise sistem daha kompakttır. Bu da molekül kütlesi ve yoğunluğu yüksek olan gaz akışkanlarda kısılma işlemi sonunda daha iyi soğuma dereceleri elde edileceğini gösterir (Kon ve Mertbaş, 2016). SF6’nın molekül ağırlığı 146,055 g/mol olup 72,6 g/mol değerindeki R410A’ya göre üstünlük göstermektedir.

En önemli parametrelerden biri ise sıvılaştırma sıcaklığı olup, akışkanın 1 atm basınç altında kaç derecede buharlaşacağını ifade etmektedir. Bilindiği üzere gazların sıkıştırılması sonucunda sıvılaştırma meydana gelmektedir. Gazın yalıtım gücü düşük sıcaklıkla zayıflar. Çünkü gazın basıncı düşer ve gaz sıvılaşır. Sıvı dönüşümünü önlemek için, gaz dielektriğinin düşük sıvılaştırma sıcaklığına sahip olması gerekmektedir. Bu değer SF6’da -63 °C iken R410A’da -52,7’dir. Bu fark çok büyük olmamakla birlikte R410A gazının çok düşük sıvılaştırma sıcaklığına sahip gazlardan CO2 ile karıştırılmasıyla -78°C’ye düşürülebileceği yapılan deneysel çalışmalarla tespit edilmiştir (Khan, et al., 2018).

Tablo 2.2. SF6 ve R410A gazlarının fiziksel özellikleri (Honeywell, 2007; Kieffel, et. al.,2016; Koch, 2003; Mitra, 2005; Zeng, et. Al., 2014 )

Özellikler	SF6	R410A
Moleküler ağırlık	146,055 g/mol	72,6 g/mol
Sıvılaştırma sıcaklığı	-63,9 °C	-51,58 °C
Buhar basıncı	21,49 bar	41,9 bar
Kritik sıcaklık	45,60 °C	71,358 °C
Kritik basınç	37,65 bar	49,03 bar
Kritik yoğunluk	729 kg/m <sup>3</sup>	459,53 kg/m <sup>3</sup>
Gaz yoğunluğu	6,04 kg/m <sup>3</sup>	4,1742 kg/m <sup>3</sup>
Özgül ağırlık	5,114	1,08
Sabit basınçta ısı kapasitesi (Cp) (1,013 bar ve 25 °C (77 °F))	0,609 kJ/kg·K	0,84 kJ/kg·K
Sabit hacimde ısı kapasitesi (Cv) (1,013 bar ve 25 °C (77 °F))	0,6689 kJ/mol·K	1,67 kJ/kg·K
Akışkanlık (1,013 bar ve 0 °C (32 °F))	13,771 uPa.s	13,85 uPa.s
Isıl iletkenlik (1,013 bar ve 0 °C (32 °F))	12,058 mW/mK	15,7 mW/mK
Suda çözünürlük	0,007	ihmal edilebilir
Küresel ısınma potansiyeli (Ref, CO2:1 ve 100 yıldan fazla)	22800	2000
Ozon tüketme potansiyeli (Ref, R11:1)	0	0
Atmosferik kullanım süresi (yıllar)	3200	16,95
Ayrışma sıcaklığı	>300 °C	>250 °C
Zehirlilik	0	0
Yanıcılık	0	0
Patlayıcılık	0	*
Ücret (US \$)	8	3

Buhar basıncı, sıvısıyla dinamik dengede olan, buhar halinde bulunan moleküllerin belli bir sıcaklıkta yaptığı basınçtır. SF<sub>6</sub>'nın buhar basıncı 21,49 bar iken R410A'nın 41,9 bar değerindedir. Yüksek buhar basıncı, cihazın sıcaklık aralığı için gaz formundan sıvı formuna faz değişimi olasılığını önler. Bu nedenle sistem tasarımının, çalışma sıcaklık aralığına göre yapılması gerekmektedir. Hava sızıntısıyla gelen su buharının soğuk kısımlarda katılarak işletme aksaklıklarına meyden vermesini önlemek için buharlaşma basıncının çevre basıncından bir miktar büyük olması gerekmektedir (Kim and Shin, 2005).

Kritik ısı veya sıcaklık, bir gazın basınç uygulanarak sıvılaştırılabileceği en yüksek sıcaklıktır. Gazların sıcaklığı arttıkça sıvılaşması zorlaşır. Bütün gazlar için kritik sıcaklık ayırt edici bir sıcaklık değeridir. SF<sub>6</sub>'nın kritik ısı değeri 45,57°C iken R410A'nın değeri 71,4 °C'dir. Bu sıcaklığın üzerinde gaz sıkıştırılarak sıvılaştırılmaz. Bu nedenle, soğutma sistemlerinde yüksek kritik sıcaklığa sahip bir soğutucu akışkan seçmek daha iyidir. Sabit bir sıcaklıkta daha fazla ısı iletimine sahip olmak için, soğutucu akışkanın kritik sıcaklığı, yoğuşma sıcaklığından mümkün olduğunca yüksek olmalıdır. Bu önlem alınmazsa, soğutma sistemi tarafından aşırı güç tüketimi olmaktadır (Hundry, 2008).

Kritik basınç, kritik sıcaklıkta sıvılaşmayı sağlamak için uygulanması gereken basınç değerini ifade eder. Kritik basınç orta ve pozitif olmalıdır. Çok yüksek bir basınç, sistemi ağır ve hacimli hale getirirken, çok düşük basınçlarda, soğutma sistemine hava sızma olasılığı vardır.

Kritik yoğunluk ise kritik basınç ve sıcaklıktaki birim hacim kütesidir. Kritik değerler, gazın miktarına değil cinsine bağlıdır. Dolayısıyla bu değerler aynı zamanda ayırt edici özelliklerdir. SF<sub>6</sub> 742,297 kg/m<sup>3</sup> değerine sahip iken R410A 493 kg/m<sup>3</sup> değerindedir. Kritik noktada, sıvı-gaz dengesi vardır. Gaz yoğunluğu yani özkütle, 0 °C sıcaklıktaki ve 101,3 kPa basıncındaki bir gaz hacminin kütlesi olarak tanımlanır (Hundry, 2008). Bu değer sıcaklık ve basınca bağlıdır. Gaz yoğunluğu değeri SF<sub>6</sub> için 37,55 bar ve R410A için 47,09 bar'dır.

Özgül ağırlık, belirli bir sıcaklık ve basınçta gazın yoğunluğunun havanın yoğunluğuna oranı olarak tanımlanır. Özgül ağırlık birimsizdir. Bir soğutma sisteminde kullanılacak maddenin özgül ağırlığı ve yoğunluğunun bilinmesi önemlidir (Mahdavi, et al., 2016). SF<sub>6</sub>'nın özgül ağırlığı 5,114 iken R410A'nın değeri 1,08'dir.

Bu değer sistem tasarımımda gaz tahrik noktasının konumunu belirlemede önemli bir etkindir.

Sabit basınç altında ısı kapasitesi ( $C_p$ ) ve sabit hacimde ısı kapasitesi ( $C_v$ ) genelde birbirine karıştırılan iki parametredir. Sabit basınçta ısı kapasitesi, sabit basınç altında bulunan 1 mol gazın sıcaklığını 1K değiştirmek için gerekli ısı alış-veriştir. Başka bir deyişle, sistem ile çevresi arasında sabit basınç altında iletilen enerjidir. SF6'nın  $C_p$  değeri 0,6582 kJ/kgK iken R410A'nın 0,83 kJ/kgK'dir. R410A soğutucu akışkanı SF6'ya göre kg başına %40 daha fazla ısı taşıma kapasitesine sahiptir. Bu olgu, ısı transfer etkileşimi sırasında daha düşük sıcaklık artışı ve buna bağlı olarak hava koşullandırma çevriminde azaltılmış kayıplar sağlamaktadır.  $C_p$  değeri denklem (2.1) ile hesaplanır.

$$C_p = \frac{f + 2}{2} \times R \quad (2.1)$$

Burada;  $f$  serbestlik derecesi katsayısı ve  $R$  evrensel gaz sabiti (8,31 j/K)'dir. Sabit hacimde ısı kapasitesi ise sabit hacimde bulunan 1 mol gazın sıcaklığını 1K değiştirmek için gerekli ısı alış-veriştir. Başka bir deyişle, sistem hacminde değişiklik olmadan bir sistem ile çevresi arasında aktarılan ısı enerjisidir. SF6'nın  $C_v$  değeri 0,665 kJ/kgK iken R410A'nın 1,34 kJ/kgK'dir.  $C_p$  değeri denklem (2.2) ile hesaplanır.

$$C_v = \frac{f}{2} \times R \quad (2.2)$$

Her zaman  $C_p > C_v$  'dir (Rathakrishnan, 2019). Her iki parametrede de R410A'nın değeri referans gaza nazaran biraz yüksektir ve ısı alış-verişi için daha fazla ısı yüklenmesi gerekmektedir.

Soğutucu akışkanlarda, maddenin molekülleri birbiri üzerinde kayar. Akışkanlar en küçük kayma gerilmesinde dahi direnç göstermezler. Böylece akışkan partikülleri sürekli olarak birbirlerine göre pozisyonlarını değiştirirler. SF6'nın akışkanlığı 13,771 uPa.s iken R410A'nın değeri 13,85 uPa.s değerle daha akışkan özelliindedir.

Bir diğer önemli parametre ise ısıl iletkenliktir. Isıl iletkenlik (genellikle  $k$ ,  $\lambda$  veya  $\kappa$  olarak ifade edilir) bir malzemenin ısıyı ne kadar ilettiğini gösteren değerdir ve bu değer her bir malzeme için farklıdır. İyi bir yalıtım gazının ısı geçirgenliği yüksek olmalıdır. SF6'nın değeri 11,627 mW/mK ve R410A'nın değeri 13,6 mW/mK'dır.

Yüksek ısı iletkenlik, iyi soğutma özelliği sunmaya izin verdiğiinden R410A gazı referans gaza göre üstünlüğe sahiptir.

Suyun içinde çözünen gaz miktarı çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunların en önemlisi gazın kısmi basıncıdır. Basınç arttıkça sıvı içerisinde daha fazla gaz çözünür. Basınç düştüğünde ise tam tersi olur ve çözülmüş olan gaz kabarcıkları serbest halde kalmaya başlar. Bu değer SF6'da 0,007 gibi yok denecek kadar az bir değer iken R410A'da ihmal edilebilir özelliktedir.

Küresel ısınma, sera gazlarının (insan kaynaklı olarak) atmosferdeki miktarlarının artmasına bağlı olarak dünyada yüzey sıcaklıklarının artmasıdır. Sera gazları; karbondioksit (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>), diazotmonooksit (N<sub>2</sub>O), hidroflorokarbonlar (HFC), perflorokarbonlar (PFC), kükürtheksaflorid (SF<sub>6</sub>)'dir. Ayrıca H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, Siyah Karbonun da sera etkisi vardır. SF<sub>6</sub>'nın KIP değeri 22800 iken R410A'nın 2000 değerinde olması, yalıtım malzemesi olarak tercih edilmesinin ana nedenlerinden biridir (Kieffel, et al., 2016).

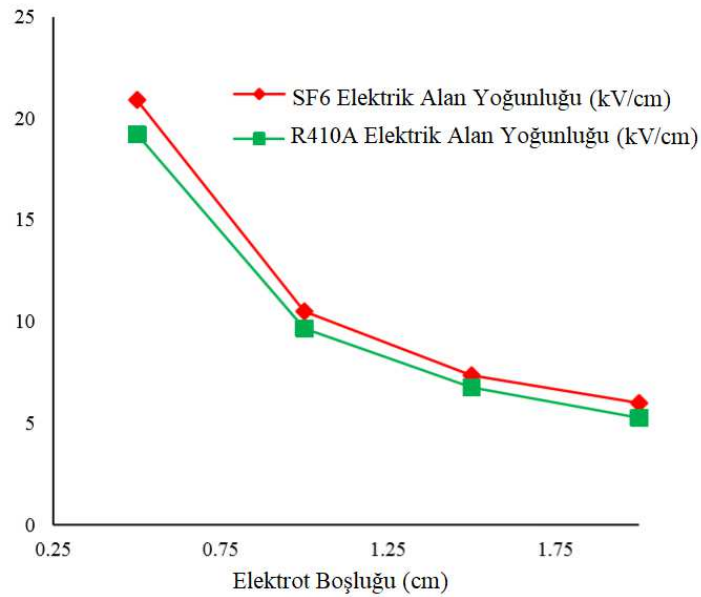
Bir diğer önemli ana etmen de OTP'dir. Ozon tabakası, güneşten gelen zararlı ışınları yansıtarak hem yer yüzünün fazla ısınmamasına hem de canlı hayatının korunmasına yardımcı olmaktadır. Ozon tabakasının incelmeye sebep olan kimyasalların başında klor gelmektedir. Ozon tabakasının incelmeye, dünyaya düşen UV ışınlarının artması sonucu deri kanserine, katarakta ve bağışıklık sistemi hastalıklarına sebep olabilir. Aynı zamanda hayvan ve bitki türlerine de zarar vermektedir (EPA, 2013). Hem SF<sub>6</sub> hem de R410A'nın OTP değeri sıfırdır. Zararlı gazların uzun süre atmosferde kalması demek ozon tabakasının incelmeye ve sera etkisinin devam etmesi anlamına gelir ki bu durum da tüm canlı hayatı için riskin devamı veya büyümesi anlamına gelmektedir. SF<sub>6</sub>'nın atmosferik kullanım süresi 3200 yıl, R410A'nınki ise 17 yıldır. SF<sub>6</sub> KIP'i yüksek olduğundan atmosferik kullanım süresi açısından R410A oldukça iyi bir üstünlüğe sahiptir.

Soğutma ve yalıtım sistemlerinde kullanılan gazların zehirli, yanıcı ve patlayıcı olmaması da aranan başlıca özelliklerdendir. Olası bir kaza, ihmal, sızıntı durumunda çevreye zarar vermemesi açısından bu özelliklere sahip gazlar tercih edilmektedir. Her iki gazın da zehirli, yanıcı ve patlayıcı özellik göstermemesi onların soğutma sistemlerinde tercih edilme nedenlerindedir.

Bir sistemi oluşturan unsurlarda güvenlik, verimlilik, çevreci olma kadar maliyet de ayırt edici özellikler arasındadır. Bu açıdan bakıldığında SF6'nın kg ücreti 8 \$ iken R410A'nınki 3\$'lık bir fiyat ile üstünlük sağlamaktadır.

En önemli özelliklerden biri de yalıtım malzemelerinin dielektrik dayanımıdır. Şekil 2.3'te, SF6 ve R410A dielektrik gazların elektrik alan yoğunluğunun benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Aynı koşullarda, yani aynı çap, elektrotlar arası boşluk, basınç, sıcaklık ve uygulanan gerilim altında, sabit bir noktada R410A'nın elektrik alan yoğunluğu, SF6'nin 0.92 katıdır (Khan, et al., 2018).

Elektrik alan şiddeti, delinme geriliminin ve dielektrik kuvvetinin ölçüsüdür. Hermetik olarak kapatılmış bir sistemde dielektrik dayanımı yüksek olan soğutucu akışkan, motor sargılarıyla doğrudan temas ettiğinde kısa devreyi önlemektedir. Herhangi bir malzemenin dielektrik dayanımı, yalıtım gücünün bir ölçüsüdür.



Şekil 2.3. Düzgün doğrusal elektrik alanında SF6 ve R410A delinme gerilimleri (Khan, et al., 2018)

### 2.2.3. R410A Gazının İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri

R410A gazı uçucu, kokusuz, renksiz ve yanmaz bir malzemedir. Solunum yoluyla gaz buharına aşırı maruz kalmak baş dönmesine ve konsantrasyon kaybına neden olabilmektedir. Daha yüksek seviyelerde, merkezi sinir sistemi depresyonu ve kalp ritim bozukluğu meydana gelebilmektedir. Buharlar havanın yerini aldığı anda, kapalı alanlarda boğulmaya neden olabilmektedir (Hudson Technologies, 2018).

#### **2.2.4. R410A Gazının Çevresel Etkileri**

Çevresel etkinin iki ölçüsü, OTP ve KIP'dir. Bir HFC olarak, R410A sıfır OTP derecesine sahiptir. OTP, bir soğutucunun atmosfere salındığında stratosferik ozon moleküllerini yok etme yeteneğini temsil etmektedir. Klor bulundurmadığından ozon tüketim katsayısının sıfır oluşu ile çevreye dost bir gazdır. Klor iyonları bir katalizör görevi görür ve ozon moleküllerini oksijen moleküllerine dönüştürerek ozon tabakasının incelmeye neden olur. Bu nedenle, R410A Montreal Protokolü kapsamında değildir ve herhangi bir aşamalı olarak sona erme tarihi yoktur.

KIP, bir soğutucunun radyant enerjiyi yakalama yeteneğini temsil eden normalleştirilmiş bir göstergedir. KIP değerleri, 100 yıllık bir entegrasyon dönemi boyunca karbondioksit ( $CO_2$ ) göre hesaplanmaktadır. R410A KIP değerleri SF6'ya kıyasla oldukça düşük olsa da küresel ısınma üzerinde hem doğrudan hem de dolaylı etkileri bulunmaktadır. KIP'nin ölçtüğü doğrudan etki, sızıntılar yoluyla atmosfere soğutucu akışkan salınımından gelmektedir. Dolaylı etki, soğutma üretmek için gerekli olan enerji tüketiminin bir fonksiyonudur. Elektrik kullanan iklimlendirme sistemleri, elektrik üretim istasyonlarında fosil yakıtların yanmasından kaynaklanan karbondioksit ve diğer sera gazlarının salınımı yoluyla küresel ısınmayı dolaylı olarak etkiler.

Araştırmacılar, bir soğutucunun hem doğrudan hem de dolaylı küresel ısınma etkilerini dikkate alan Toplam Eşdeğer Isınma Etkisi (TEIE) adlı bir endeks geliştirmişlerdir. Gopalnarayanan (1999), incelenen sekiz R410A gaz soğutucu arasında Puron soğutucusunun enerji verimliliği ve TEIE açısından en iyi performansa sahip olduğunu belirlemiştir. Çalışmada, her yıl soğutucu şarjının %4'ünün kaçak olarak kaybolduğu varsayıldığında, sızıntısı olmayan bir sistem için TEIE'nin tamamen enerji tüketimine bağlı olduğu ve KIP etkisinin sıfır kabul edilebileceği belirtilmiştir. Bahsedilen sonuçları destekleyen birçok başka çalışmalar da yapılmıştır ve çok sayıda yayın bulunmaktadır (Gopalnarayanan and Rolotti, 1999).

#### **2.2.5. R410A Gazının Bozunma Ürünleri**

R410A, normal çalışma koşulları altında stabildir. Çok yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmaktan kaçınmak önemlidir. Yüksek sıcaklıklarda ( $>250^{\circ}C$ ), bozunma ürünleri arasında hidrojen florür, hidrojen klorür, karbon monoksit, karbon dioksit ve klor bulunur. Bu malzemeler tehlikelidir, toksik ve tahriş edicidir (Hudson

Technologies, 2018).

### **2.3. Elektrik Alan ve Potansiyel Hesaplama**

Güç sistemlerinin anlaşılması için temel ilkelere birisi elektromanyetizmadır. Güç transformatörlerinde gerilim seviyelerinin artması ve azalması manyetizma analizinin temelidir. Elektromanyetizma, elektrikle yüklü parçacıklar arasındaki etkileşime neden olan fiziksel kuvvettir. Bu etkileşimin gerçekleştiği alanlar, elektromanyetik alan olarak tanımlanır. Elektromanyetizma, elektrik alanında da manyetik alanda da ortaya çıkar. Her iki alan da elektromanyetizmanın farklı sonuçları olmakla beraber öz itibarıyla birbirleriyle bağlantılıdır. Elektrik alanlar, elektrik yalıtımında, yüklü parçacıklardan yalıtım malzemelerine enerji iletiminin tanımlanmasında, iletim hatlarında ve transformatör merkezlerinde çeşitli olayların ortaya çıkmasında çok önemlidir (Michelarakis, 2016).

Güç sistemlerinde, elektrik ve manyetik alanlar, çoğunlukla zorlu hesaplamalar gerektirdiğinden, bir elektromanyetik problemin eşdeğer devre seviyesine indirgenmesi gibi bazı etkili yaklaşımlar geliştirilmiştir. Mevcut diğer bir seçenek de incelenmekte olan yapılandırmayı tasarlama fırsatı veren ve elektromanyetizmada kullanılan halihazırda bilinen sayısal yöntemlere dayalı çözüm yazılım paketlerinin kullanılmasıdır. Her durumda da doğru bir çözüm üretmek için, arka plan kuramı hakkında yeterli bilgi birikimi gereklidir.

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan benzetimlerde kullanılan elektrostatik alan analizleri ve buna ilişkin kuvvet denklemleri ile elektrik alanın özelliklerini tanımlayan denklemler verilmiştir. Ayrıca, bu tez kapsamında yapılan bilgisayar analizlerinde sayısal çözüm yöntemi olarak kullanılan, en popüler sayısal tekniklerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) açıklanmıştır.

#### **2.3.1. Elektrostatik Alan**

Elektrostatik, statik (hareketsiz) yüklerin neden olduğu bir elektrik alanını tanımlayan elektromanyetik alt alanıdır. Kısaca, duran veya çok yavaş hareket eden elektrik yüklerini inceleyen bir bilim dalıdır. Elektrik yüklerinin birbirine kuvvet uygulamasından doğar. Elektrostatik, Coulomb yasası ve Gauss yasası ile incelenir.

### 2.3.2. Coulomb Yasası

Klasik elektromanyetizma arkasındaki en temel ilke, kaynak olarak kabul edilen bir elektrik yükü  $q_s$  ile başka bir rastgele elektrik yükü  $q_r$  arasındaki kuvvetin hesaplanmasıdır. Her iki yükün de zamanın bir fonksiyonu olarak hareket halinde olduğu varsayılır. Kaynak yükü durağan olarak kabul edilirse, diğer yükler hareketli olsa da bu bir elektrostatik durumu olarak kabul edilir. Bu durumda, durağan kaynak yük ile hareket halindeki rastgele bir yük arasındaki  $\vec{F}$  kuvveti denklem (2.3)'teki Coulomb yasası ile hesaplanabilmektedir.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_s q_r}{r^2} \hat{r} \quad (2.3)$$

Burada,  $\epsilon_0$  boş alanın geçirgenliği,  $r$  iki yük arasındaki mesafe ve  $\hat{r}$  konum vektörüdür.

### 2.3.3. Elektrik Alan

Elektrik alanı  $\vec{E}$  uzayın her noktasında bulunan vektörel bir miktardır. Herhangi bir konumdaki elektrik alanı, eğer o noktaya artı bir yük konumlandırılırsa, o yüke uygulanacak olan kuvveti göstermektedir. Elektrik alanı ile herhangi bir  $q$  yüküne etki eden elektrik kuvveti arasındaki ilişki denklem (2.4)'teki gibi ifade edilir.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.4)$$

Elektrik alanı formülü Coulomb yasasıyla benzerlik göstermektedir. Birkaç nokta yükten gelen elektrik alanı denklem (2.5)'de verilmektedir.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_r}{r^2} \hat{r} \quad (2.5)$$

Burada  $\hat{r}$ , her bir  $q_r$  ve  $q$  arasındaki hattu ifade eden birim vektörüdür. Dağınmık durumda duran birden fazla yükün olduğu durumda, elektrik alanını her bir yükün  $q_i$  alanları toplanarak denklem (2.6)'daki gibi ifade edilir.

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{r}_i \quad (2.6)$$

Burada  $r$ ,  $dq$  ile ilgili konum arasındaki mesafedir (Wolski, 2011).

#### 2.3.4. Gauss Yasası

Elektrostatik alanları karakterize eden temel yasalardan biri Gauss yasasıdır. Gauss yasası, eğer elektrik alanı her yerde biliniyorsa, elektrik yükünü ortaya çıkan elektrik alan dağılımına ilişkilendiren matematiksel bir yasadır ve iki şekilde ifade edilebilir. Bunlardan ilki integral formudur. Elektrik akısı  $\Phi_E$ , elektrik alanının yüzey integrali olarak denklem 2.7'deki gibi tanımlanır:

$$\Phi_E = \oint_A E \cdot dA \quad (2.7)$$

Burada  $E$  elektrik alanını,  $dA$  yüzey alanının sonsuz küçük elemanını temsil eden bir vektörü temsil eder. Diverjans kuramı ile yasa diferansiyel formda da denklem (2.8)'deki gibi yazılabilir.

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

Burada  $\nabla \cdot E$  elektrik alanının diverjansı,  $\epsilon_0$  elektrik sabiti ve  $\rho$  birim hacimdeki yük miktarı ya da yük yoğunluğudur.

Gauss yasası, elektrostatikte kullanılan çok kullanışlı ve esnek kuramlardan biridir, ancak çalışılan geometride kullanılan şekillerin bir simetrisi olduğunda uygulaması daha kolaydır. Bunların en karakteristik özelliği düzlemsel, küresel ve silindirik olmalarıdır. Ancak bu tür simetride bile kısıtlamalar vardır (Michelarakis, 2016).

#### 2.3.5. Elektrik Potansiyel

Vektör olarak tanımlanan  $E$  elektrik alanını, skaler olarak tanımlanan  $V$  elektrik potansiyeline bağlayan denklem (2.9)'daki gibidir.

$$E = -\nabla V \quad (2.9)$$

Elektrik alanını, skaler potansiyelin gradyanı olarak ifade etmek mümkündür. Denklem (2.9)'daki eksi işareti, geleneksel bir role sahiptir ve elektrik alanına karşı hareket ederek potansiyelin arttığını ifade eder ve denklem (2.10)'deki gibi de ifade

edilebilir.

$$V = - \int E \cdot dl \quad (2.10)$$

Bu denklem, E zaten biliniyorken V'yi hesaplamak için çok kullanışlı bir denklemdir. Sürekli bir yük dağılımı için potansiyel denklem (2.11)'deki gibi ifade edilebilir.

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{r} \quad (2.11)$$

### 2.3.6. Poisson ve Laplace Denklemleri

Denklem (2.8) ile (2.9) sonuçları birleştirildiğinde, denklem (2.12) elde edilir.

$$\nabla^2 \cdot V = - \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) Poisson denklemleri olarak bilinir ve yükün olmadığı ( $\rho = 0$ ) yerlerde aynı denklem (2.13)'e indirgenir.

$$\nabla^2 \cdot V = 0 \quad (2.13)$$

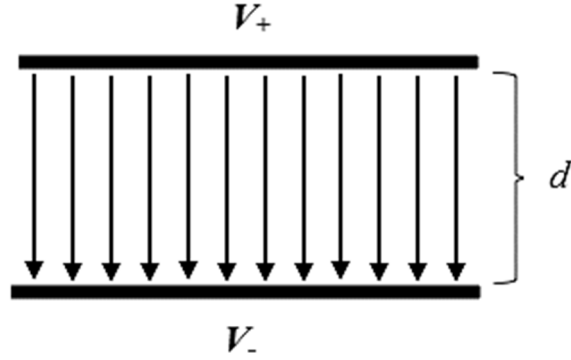
Ortamda yükün olmaması durumunu, Laplace denklemi (2.13) ile temsil eder. Her ikisi de eliptik tipte kısmi diferansiyel denklemlerdir.

## 2.4. Elektrot Yapılandırmalarında Elektrik Alan Dağılımı

### 2.4.1. Düzgün Alanda Dağılım

Elektrostatik alanın düzgün dağılımının ardındaki ilkelerler oldukça basittir. Her noktada aynı değere sahip olan elektrik alana (sabit elektrik alanı) düzgün alan denir. İki sonsuz, paralel ve zıt yüklü plaka arasındaki alanı tanımlayan çok yaygın bir örnekle düzgün bir şekilde açıklanabilmektedir (Michelarakis, 2016). Düzgün olmayan bir elektrik alanında, alan çizgileri eğri olma eğilimindedir ve yüklerin yakınında daha yoğundur. Düzgün bir elektrik alanında alan şiddeti değişmediği için alan çizgileri birbirine paralel ve eşit aralıktır. Düzgün alanlar, birbirinden belirli bir mesafe uzaklıkta yerleştirilmiş iki iletken plaka arasında bir potansiyel fark meydana getirerek yaklaşık olarak oluşturulmaktadır (Şekil 2.4). Yaklaşık olmasının sebebi

elektrik alanın köşelerde düzenli halinden uzaklaşmasıdır.



Şekil 2.4. Zıt yüklü sonsuz paralel plakalar (Sefa, 1997)

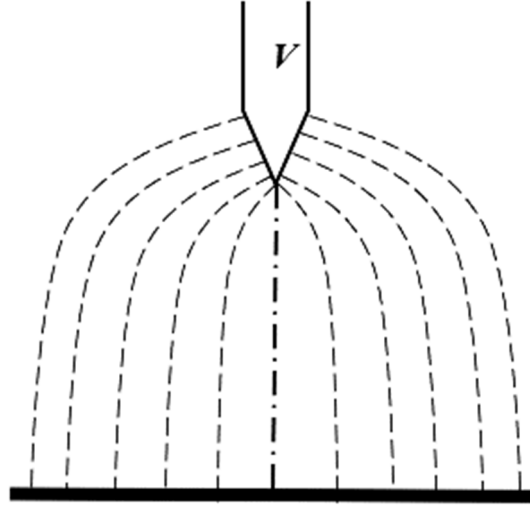
Şekil 2.4'te elektrik alanı pozitif yüklü plakadan negatif yüklü plakaya yönlendirilir. Denklem (2.9) uygulanarak, denklem (2.14) elde edilir.

$$E = -\frac{dV}{dz} = -\frac{V_+ - V_-}{d} = -\frac{V}{d} \quad (2.14)$$

Gerilim,  $d$  aralığı boyunca  $V_+$ 'dan  $V_-$ 'ye kararlı bir hızla azaldığı için, gerilimin gradyanı sabit olacak ve plakalar arasındaki mesafe üzerinden plakalar arasındaki potansiyel farka eşit olacaktır. Bu eşitlik sadece elektrik alanın büyüklüğünü vermektedir. Elektrik alanın yönü ise pozitif yüklü levhada negatif yüklü levhaya doğrudur. Denklem (2.14)'deki eksi işaret, alan vektörü yönünün yüksek potansiyelden alçak potansiyele doğru olduğunu gösterir. Düzlemsel elektrot sistemi düzgün alanlı bir elektrot sistemi olduğundan, delinme koşulu alanın her noktasında aynı anda sağlanır. Bu nedenle, boşalma elektrot aralığının her noktasında aynı anda ve tam delinme şeklinde gerçekleşir. Yani, boşalma başlangıç gerilimi ile tam delinmenin meydana geldiği gerilim birbirine eşittir (Kalenderli, vd., 2015).

#### 2.4.2. Düzgün Olmayan Alanda Dağılım

Hemen hemen tüm elektrot yapılandırmalarında, incelenen durumların çoğu için, elektrik alanının dağılımı düzgün değildir ve bu en gerçekçi yaklaşımdır. Düzgün olmayan bir elektrik alanda, alan çizgileri eğri olma eğilimindedir ve yüklerin yakınında daha yoğundur. Düzgün olmayan alan boşluğuna bir örnek Şekil 2.5'te gösterilmiştir (Michelarakis, 2016).



Şekil 2.5. İğne düzlemi yapılandırmasında elektrik alan dağılımı (Sefa, 1997)

Düz çizgi, topraklanmış düzleme en kısa mesafeye sahip noktaya karşılık gelen kritik alan çizgisini temsil eder. Bu tür bir yapılandırmada en yüksek elektrik alanı her zaman iğnenin ucunda meydana gelmektedir. Keskinliği nedeniyle bu nokta son derece büyük bir alan konsantrasyonunu ve aynı zamanda yakınında dik bir düşüşü göstermektedir (Arora ve Mosch, 2011).

Çubuk-düzlem boşlukları durumunda, çubuk elektrot çapından nispeten daha büyük boşluk mesafeleri için, elektrik alanının dağılımı çok uzun boşluklar için zayıftan çok düzgün olmayana değişir. Burada da kritik alan çizgisi, çubuk yüzeyinde topraklanmış düzleme en yakın noktaya karşılık gelir ve bu, normalde maksimum elektrik alanının meydana geldiği yerdir.

## 2.5. Sayısal Hesaplama

Yukarıda kısaca açıklanan ilkeleri özetlersek, bir elektrostatik problemin amacı, denklem (2.12) ve (2.13)'ün kısmi diferansiyel denklemlerinin tanımlanacağı ve daha sonra çözüleceği bir geometriyi uygun şekilde tanımlamaktır. Bu tür hesaplamalar için süreç oldukça zordur. 1B, 2B ve 3B gibi mevcut tüm uzay boyutlarına ve çeşitli sınır koşullarına uyarlanabilen çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Her yöntemin diğerlerine göre üstünlükleri ve olumsuzlukları vardır. Genellikle, en iyi yöntemi tanımlayan şey, çözüm altındaki problemin gereksinimleridir.

Sonraki başlık, bu yöntemlerden SEY'e kısa bir giriş niteliğindedir. Amaç, mevcut çalışmada ve sonraki bölümlerde açıklanacak olan model için SEY'in neden kullanıldığına dair bir genel bakış sağlamaktır.

### 2.5.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

SEY'in arkasındaki temel ilke, ilgilenilen alanın elementler olarak bilinen bir dizi alt bölgeye bölünmesidir. SEY'in kullanılabilmesi için, çözüm yapılacak sistemin kapalı bir alandan oluşması, sistemde bulunan tüm malzemelerin fiziksel özelliklerinin tanımlı olması, sınır koşullarının belirlenmesi gerekir. Tanımlanan sistemde çözümün yapılabilmesi için, sistem sonlu elemanlara bölünür. Elemanların sayısı ve boyutu, istenen geometrinin sınırları içine sığacak şekilde değişebilmektedir.

Çözülme üzere olan kısmi diferansiyel denklemin çözüm değerleri, elemanların düğüm değerleri ile temsil edilmektedir. SEY'in en büyük üstünlüğü; esnekliği ile çok karmaşık geometrilere ve farklı medya temsillerine uyarlanabilmesidir (Zhou, 2012). Bu yöntem sırasında izlenen süreç aşağıdaki adımlara ayrılabilir:

- İlk etki alanının sonlu elemanlara bölünmesi.
- Her bir eleman için temel denkleminin belirtilmesi.
- Çözüm bölgesindeki elemanların birleştirilmesi.
- Elde edilen lineer denklem takımının çözümüdür.

Yukarıdaki açıklama oldukça basitleştirilmiştir. Uygulamada ise tüm süreç, hesaplamalar ve zaman açısından oldukça zahmetlidir. Bütün bunlar, kısmi diferansiyel denklemleri SEY kullanılarak çözmek için geliştirilmiş modern karmaşık yazılım paketlerinin kullanımı ile değiştirilebilir. Mevcut çalışma için, çeşitli SEY çözücülerini arasından COMSOL programı tercih edilmiştir.

### 2.6. Gazlarda Boşalma Teorileri

Bir elektrik sisteminin delinme gerilimi, elektrot açıklığından başka elektrik alanının şekline (düzgün alan, düzgün olmayan alan, simetrik alan ve simetrik olmayan alan), gerilimin etki süresine, elektrik alanı büyük olan elektrodun kutbiyetine ve hava koşullarına (sıcaklık, basınç, nem gibi) bağlıdır. R410A gazının delinme dayanımı testlerinin amacı ve sonuçların yorumlanması açısından öncelikli olarak gazlarda boşalma olayları konusu ile ilgili temel teoremler genel hatlarıyla anlatılacaktır. Boşalma teoremleri vasıtasıyla, geliştirilen elektrot sistemleri üzerinde yapılan deneyler, gazların elektriksel dayanımı hakkında çok önemli pratik bilgiler sunmaktadır. Elektronegatif gazlarda elektronlar iyonizasyon aşamasında gaz moleküllerine yapışarak ortamdaki çekilirler. Geride kalan negatif iyonlar ise yavaş hareket edebildikleri için çığ oluşumuna katkıda bulunamazlar ve sonuç olarak gazın

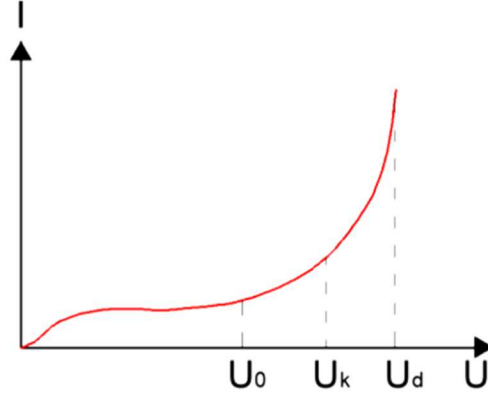
delinme dayanımı artış gösterir. Elektro negatif özellik gösteren R410A, freon (CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>), tetra (CCl<sub>4</sub>), sülfür hexaflorid (SF<sub>6</sub>) vb. gazlar havanın birkaç katı delinme dayanımına sahip olup, karıştırıldıkları gazların da delinme dayanımını arttırıcı özellik gösterirler.

Dış etkilerden korunmuş nötr bir gaz, boşluk ortamında olduğu gibi elektriği iletmemektedir. Ancak böyle bir ortamdaki iki elektrot arasına bir gerilim uygulanır ve bu gerilim gittikçe arttırılırsa, gerilimin belli bir değerinde ani bir akım akmasına neden olur. Bu andan itibaren ortam yalıtkanlık özelliğini kaybeder. Bir gazın veya havanın bu durum değişikliğine *boşalma (deşarj)* denir. Deşarj olayları, ortamın basıncına ve deşarj esnasında akan akım değerine göre sınıflandırılmaktadır.

- Işıklı Boşalma: Eğer basınç, atmosfer basıncı altında ve akımı da küçükse ortaya çıkan boşalma türüdür.
- Kıvılcım Boşalması: Eğer basınç yüksek, akım düşükse boşalmanın incelik bir kanal boyunca geliştiği boşalma türüdür.
- Ark Boşalması: Eğer basınç yüksek, akım da büyük ise meydana gelen boşalma türüdür.
- Korona Boşalması: Eğer elektrotlardan birinin veya her ikisinin eğrilik yarıçapları aralarındaki uzaklığa göre çok küçükse, elektrotların bütün yüzeyini ışıklı, ince bir tabaka halinde kaplayan ve kendi kendini besleyen boşalma türüdür.
- Yüzeysel Boşalma: Katı yalıtkan maddelerle, katı yalıtkan maddelerin yüzeylerinde görünen boşalma türüdür.

### **2.6.1. Korona Boşalması**

Küçük yarıçaplı elektrotların civarında görülen, tam olmayan, fakat kendi kendini besleyen boşalmaya *korona boşalması* adı verilir. Korona deşarjı, yüksek potansiyele sahip bir elektrottan nötr bir gaza, elektrot etrafında bir plazma bölgesi oluşturmak suretiyle akımın gazı iyonize ederek aktığı bir süreçtir. Elektrot açıklığına göre; küçük yarıçaplı elektrotlarda, keskin köşelerde, sivri uç gibi elektrik alan şiddetinin yüksek olduğu noktalarda meydana gelen bir kısmi boşlama türüdür. Korona boşalmasına ait akım-gerilim grafiği Şekil 2.6'daki gibidir.



Şekil 2.6. Korona boşalmasına ait akım-gerilim eğrisi (Göz, 2019)

Elektrotlar arasına uygulanan gerilim kademeli olarak arttırıldığında, çarpma suretiyle iyonizasyon olayı gerçekleşir. İyonlaşmanın başladığı andaki gerilim  $U_0$  ile temsil edilen *kritik korona gerilimidir*. Gerilim değerinin biraz daha artmasıyla birlikte hışırtı sesiyle birlikte hat boyunca bir mor ışık tabakası görülmeye başlar. Bu esnada ozon gazı da açığa çıkmaktadır. Bu andaki gerilim  $U_k$  ile temsil edilen *korona gerilimidir*. Uygulanan gerilim daha da arttırıldığında ise iyonize bölgeler büyür ve elektrotlar arasında delinme meydana gelir. Bu esnada geçen akım delinme akımı  $I_d$  ve gerilim ise  $U_d$  ile temsil edilen *delinme gerilimidir* (Kalenderli, vd., 2015).

Korona gerilimi; eğrilik yarıçapı, elektrotlar arası mesafeye, yüzeylerin pürüzlülük durumuna ve ortamın sıcaklık, basınç, nem gibi değerlerine bağlıdır. Korona geriliminin ifadesi Peek (1929) tarafından denklem (2.15)'deki gibi verilmiştir.

$$U_k = U_0 \cdot \delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \quad (2.15)$$

Burada;  $U_0$  çarpma suretiyle iyonizasyonun başladığı gerilim,  $\delta$  bağıl hava yoğunluğu,  $r$  iletkenin yarıçapıdır. Bağıl hava yoğunluğu denklem (2.16)'deki gibidir.

$$\delta = 0.392 \cdot \frac{P}{T} \quad (2.16)$$

Burada;  $P$  ortamın basıncı,  $T$  ortamın sıcaklığıdır. Korona gerilimine ulaşıldığında hat üzerindeki korona alan şiddeti ise denklem (2.17)'de verilmiştir.

$$E_k = E_0 \cdot \delta \left( 1 + \frac{0.3}{\sqrt{r \cdot \delta}} \right) \quad (2.17)$$

Burada;  $E_0$  çarpma suretiyle iyonizasyonun başladığı gerilime karşılık gelen alan şiddetidir.

Korona boşalması; aktif güç kayıpları, işitilebilir düzeyde gürültü, radyo ve televizyon parazitleri, ozon oluşumu gibi enerji sistemlerinde olumsuz etkileri nedeni ile istenen bir durum değildir. Ancak, enerji sistemlerindeki yıldırım boşalması, anahtarlama olayları gibi aşırı gerilim dalgalarının oluşturduğu yükün sistemden boşalmasının tek yoludur (Kalenderli, vd., 2015).

### 2.6.2. Townsend Delinme Teorisi

Boşalma olayları gaz içerisindeki kuvvetli bir elektrik alanın etkisiyle meydana gelen iyonizasyonun sonucudur. Bir elektrona, elektronu çekirdeğe bağlayan bağ enerjisini yenecek kadar bir enerji verilecek olursa, elektron atomu terk eder. Elektron, kazandığı enerji ile anoda doğru ilerlerken gaz ortamında bulunan atom veya moleküllerle çarpışarak iyonlaşmaya neden olur. Burada, elektron kazanan veya kaybeden atoma *iyon*, bu ayrılma olayına ise *iyonizasyon* denir (Akpınar, 1997).

Düzgün ve az düzgün alanlarda boşalma olayları “Townsend Delinme Teorisi” ile açıklanmaktadır. Townsend iki paralel düzlemsel elektrot kullanarak elektrotlar arasındaki akımın, uygulanan elektrik alanına bağlı olarak değişimini incelemiştir. Elektrotlar arasındaki akımın uygulanan gerilimle doğrusal olarak arttığını, çok yüksek gerilimlerde ise akımın hızla arttığını gözlemlemiştir. Townsend, bu ani artışın elektron çarpmasıyla gazın iyonize olmasına bağlamış ve bu akım artışını açıklamak için  $\alpha$  iyonlaştırma sayısını tanımlamıştır.

Bir elektronun elektrik alan doğrultusunda 1 cm lik yol gitmesi halinde çarpma suretiyle meydana getirdiği iyon çifti sayısına *Townsend’in Birinci İyonlaştırma Katsayısı* denir ve  $\alpha$  ile gösterilir. Bir pozitif iyonun elektrik alanı doğrultusunda 1 cm lik yol gitmesi halinde çarpma suretiyle meydana getirdiği iyon çifti sayısına *Townsend’in İkinci İyonlaştırma Katsayısı* denir ve  $\beta$  ile gösterilir.  $\beta$  sayısı  $\alpha$  nın yanında çok küçük olduğundan çoğu kez ihmal edilmektedir.

$\alpha$  sayısı, A ve B gazın cinsine ve sıcaklığına bağlı birer sabit olmak üzere denklem (2.18)’deki gibi ifade edilir.

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-\frac{Bp}{E}} \quad (2.18)$$

$\alpha$  , elektrik alan şiddeti E ve gazın basıncı  $p$ 'ye bağlı olarak ifade edilir. Düzgün bir elektrik alanda, aralarındaki uzaklık  $a$  olan iki elektrot arasındaki potansiyel fark  $U$  olmak üzere denklem (2.19) ile ifade edilir.

$$E_d = \frac{U_d}{a} \quad (2.19)$$

Burada  $U_d$  delinme gerilimidir. İki elektrot arasında sürekli boşalma olması için denklem (2.20)'deki koşulun sağlanması gerekmektedir.

$$\alpha \cdot a = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (2.20)$$

Burada,  $\gamma$  bir pozitif iyonun katottan kopardığı elektron sayısı olup tipik değeri (1/50-1/5000) arasında, malzeme cinsine göre değişir.  $\gamma$  katsayısı; gazın saflığı, elektrotların pürüzlülüğü gibi faktörlere bağlı olup yüksek basınç değerlerinde değeri ölçülememektedir.

Bir elektron katottan çıkıp anoda varıncaya kadar  $e^{\alpha x}$  adet elektron ve ( $e^{\alpha x} - 1$ ) adet pozitif iyon meydana getirir ve katottan çözdüğü toplam elektron sayısı  $\gamma(e^{\alpha x} - 1)$  olur.

Eğer bu sayı 1'e eşit ise boşalma kendi kendini besler. Çünkü katottan çıkan bir elektron, anoda ulaşıncaya kadar kendisi için bir yedek elektron meydana getirmiş demektir.

$$\gamma(e^{\alpha a} - 1) = 1 \quad (2.21)$$

Buna göre, denklem (2.21) boşalmanın kendi kendini besleme koşuludur. Bu durumda elektrotlar arasındaki gerilime *delinme gerilimi* denir.

Townsend, düzgün alanlarda delinme gerilimi bağıntısını ortaya koymuştur. Deneysel çalışmalar ise Paschen tarafından yapılmıştır. Delinme geriliminin elektrot açıklığı ve basıncın bir fonksiyonu olduğu Paschen tarafından gözlenmiştir (Arıkan, 2013).

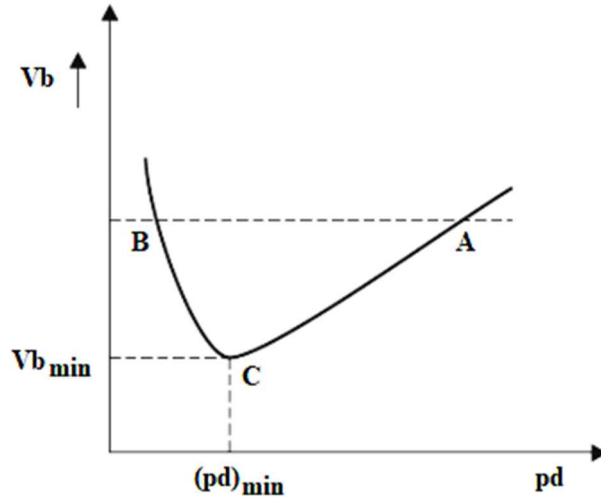
Bir gazın elektriksel olarak bozulmasına yol açan gerilim, Paschen Yasası ile yaklaşık olarak hesaplanır. Denklem (2.20) ve (2.21) kullanılarak elde edilen denklem (2.22) Paschen Eğrisi'ni verir.

$$U_d = \frac{B(p \cdot a)}{\ln \left[ \frac{A(p \cdot a)}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma'} \right)} \right]} = f(p \cdot a) \quad (2.22)$$

Denklem (2.22) oluşturulurken sıcaklık 20 °C sabit olarak kabul edilmiştir. Sıcaklığın etkisi hesaplamaya dahil edilirse, A ve B sabitleri sıcaklıkla ters orantılı olduğundan, denklemde A yerine  $AT_0/T$  ve B yerine  $BT_0/T$  konulur. Bu durumda; yeni denklem (2.23)'deki gibi elde edilir.

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} = \frac{293 p}{760 T} = 0.386 \frac{p}{T} \quad (2.23)$$

Denklem (2.23)'deki ifade denklem (2.22)'da yerine konursa,  $U_d = f(\delta d)$  olur. Elde edilen bu bağıntıya *Genelleştirilmiş Paschen Bağıntısı* denir. Buna göre, düzgün alanda delinme gerilimi, bağıl hava yoğunluğu ile elektrotlar arası açıklık çarpımının bir fonksiyonudur. Şekil 2.7'de çoğu gaz için geçerli genel Paschen arıza eğrisi verilmiştir.



Şekil 2.7. Genel Paschen Yasası eğrisi

Şekilde, eğrinin minimum noktası  $(pd)_{min}$  ve  $V_{bmin}$  ile temsil edilmektedir. Basıncın düşük ya da elektrotlar arası açıklığın dar olduğu  $Pd$  çarpımının düşük değerlerinde, çarpışmaların az olmasından dolayı delinme gerilimi  $V_b$  yüksek olur. Burada gaz çok yoğun değildir ya da elektrotlar çok yakındır. Bu nedenle, elektronlar çok yayılsa bile, katottan anoda hareketi sırasında herhangi bir doğal çarpışma olasılığı düşüktür.  $Pd$  değeri arttıkça, çarpışmalar daha olasıdır ve bu nedenle delinme gerilimi

daha düşüktür. Eğri bu noktada negatif bir eğime sahiptir. Basıncın yüksek ya da elektrotlar arası açıklığın geniş olduğu Pd çarpımının yüksek değerlerinde ise delinme gerilimi  $V_b$  çarpışmaların fazla olması dolayısıyla yüksektir. Pd değeri arttığında, çarpışmalar çok sık olur. Anoda giden bir elektron çok sık çarpışabilir, nötr bir atomu iyonize etmek için gereken yeterli enerji oluşturması için daha büyük bir giriş gerilimi gereklidir. Bu durum Paschen eğrisinin büyük pd değerlerindeki pozitif eğimini açıklar.

Farklı gazların ya da elektrot malzemelerinin Paschen eğrileri yaklaşık olarak aynı şekilde fakat farklı kayma noktalarına sahiptirler. Bu nedenle A ve B sabitleri her gaz için farklıdır.

Alçak basınçlı ortamlardak boşalma olayları “Townsend Teorisi” ile açıklanabilmektedir. Fakat yüksek basınçta ve büyük elektrotlar arası açıklıklarda oluşan boşalma olaylarını açıklamada bu kuram yeterli değildir. Bu nedenle araştırmacılar Kanal Teorisi’ni geliştirmişlerdir (Akpınar, 1997).

### **2.6.3. Kanal Delinme Teorisi**

Townsend, düzgün alanlarda delinme gerilimi bağıntısını ortaya koymuştur. Ancak Townsend Kuramı, elektrotlar arası mesafelerin büyük olduğu sistemlerindeki boşalma olaylarını açıklamakta yetersiz kalmıştır. Bunun üzerine, araştırmacılar büyük elektrot açıklıklarında deneysel çalışmalar yöneltmişlerdir. Çalışmalar sonucunda Loeb ve Meek (1940), düzgün alanlı büyük aralıklı elektrot sistemlerinde boşalma olaylarını açıklayan Kanal Kuramı’ni ortaya koymuşlardır. Bu kuram Nasser (1970) tarafından düzgün olmayan alanlı elektrot sistemlerindeki boşalma olaylarını açıklayacak şekilde geliştirilmiştir. Bu kuramın temeli pozitif iyonların meydana getirdiği elektrik alanına dayanmaktadır. Kanal boşalma olayları, düzgün olan ve düzgün olmayan elektrik alanları için ayrı ayrı incelenmektedir.

Kanal boşalması üç evreden oluşmaktadır:

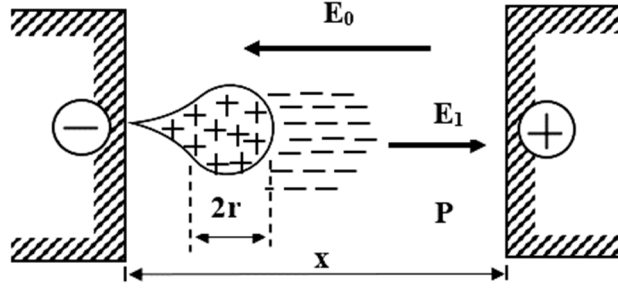
Çığ Evresi: Başlangıçta oluşan, serbest elektronların ortaya çıkma evresidir.

Plazma/Kanal Oluşum Evresi: (+) iyonlarla (-) elektronların birbirleriyle karşılaşp çarpışmasıyla yeni elektronların ortaya çıktığı evredir.

Ana Boşalma Evresi: Plazma anoda yeteri kadar yaklaşınca etkin elektrik aralığında oluşan kuvvetli boşalma evresidir.

### 2.6.3.1. Düzgün Elektrik Alanda Kanal Boşalması

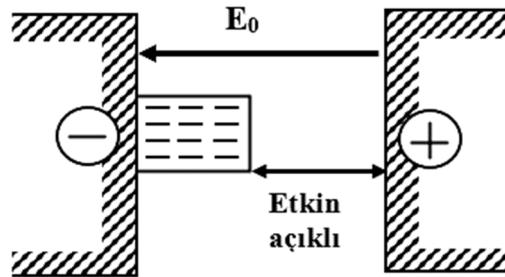
Düzgün elektrik alanda kanal boşalma, yüksek basınç ve büyük elektrot açıklıklarında, katot yakınına meydana gelen serbest elektronların bir çığ meydana getirmesiyle oluşur. Elektrotlar arasına uygulanan gerilimin etkisiyle katottan çıkan elektronların anoda doğru ilerlerken ortam içerisinde bulunan atomlarla çarpışması sonucu, bir çığ şeklinde çok sayıda elektron ortaya çıkar. Şekil 2.8'de düzgün alanda kanal boşalması verilmiştir.



Şekil 2.8. Düzgün alanda kanal boşalması (Sefa, 1997)

Burada; elektrotlar arasına uygulanan gerilimin oluşturduğu alan  $E_0$ , elektronlar ile pozitif yüklü iyonlar arasında ortaya çıkan alan  $E_1$ , pozitif yüklü iyon yığını çapı  $2r$  ve elektrotlar arası mesafe  $x$ 'dir.

Bu elektronlar anoda doğru yönelirken geride pozitif yüklü iyon yığını bırakır. Bu durumda, çığ başındaki elektronlar, artı yüklere doğru çekilirler. Böylece artı ve eksi yükler birbiri içine girerek boşalmanın ikinci evresi olan plazma veya kanalı oluştururlar. Plazmada bulunan artı ve eksi elektrikli parçacıklar birbirleriyle birleşmeye ve fotoiyonlaşma ile yeni serbest elektronlar oluşturmaya başlarlar. Boşalma olayının ikinci evresini oluşturan bu olaya *plazma evresi* denir. Plazma, ortaya çıkan yeni eksi yüklerden dolayı katot potansiyeline yükselir (Şekil 2.9).

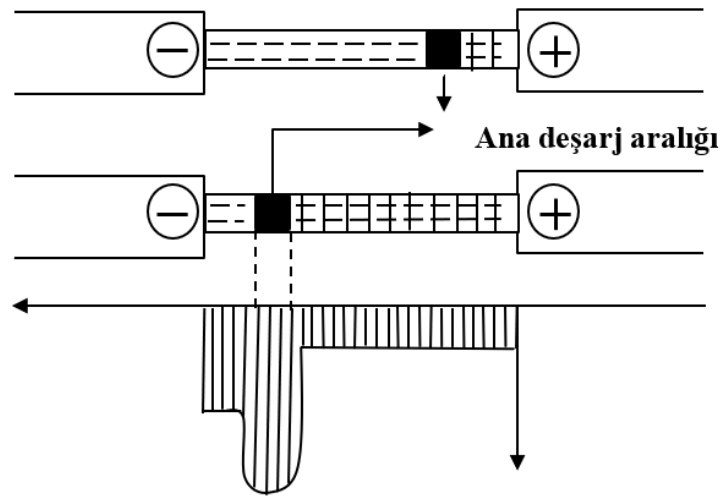


Şekil 2.9. Plazma evresi (Sefa, 1997)

Bu aralığın küçülmesiyle aralıktaki elektrik alan şiddeti giderek büyür. Plazma anoda yeteri kadar yaklaşınca etkin elektrik aralığında boşalmanın üçüncü evresini oluşturan *ana boşalma* olayı başlar. Bu boşalma esnasında plazmadaki serbest elektronlar anoda geçerek nötürleşirken; plazmadaki artı iyonlar, plazma oluşurken ortaya çıkan elektronları nötürleştirir.

Ancak, etkin elektrot aralığında nötürleşmeyen bir alan vardır. Şarj bu alanda devam eder. Bu bölge anottan katoda doğru büyük bir hızla hareket eder ve katoda vardığında iki elektrot arası kısa devre olur, dolayısıyla boşalma olayı biter (Şekil 2.9) (Sefa, 1997).

Elektrotlar arasındaki ortalama alan şiddetinin maksimum alan şiddetinden farklı olduğu ve elektrotların kutbiyetinin delinme gerilimine etki ettiği düzgün olmayan alanlarda ise deşarj, daima, eğrilik yarıçapı küçük olan elektrodun kutbiyetine bağlıdır. Uygulamalarda düzgün olmayan alan elde etmek için iğne-düzlem, çubuk-düzlem veya küre-düzlem elektrot sistemleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.10. Ana boşalmanın katoda doğru kayması (Sefa, 1997)

### 2.6.3.2. Düzgün Olmayan Elektrik Alanda Kanal Boşalması

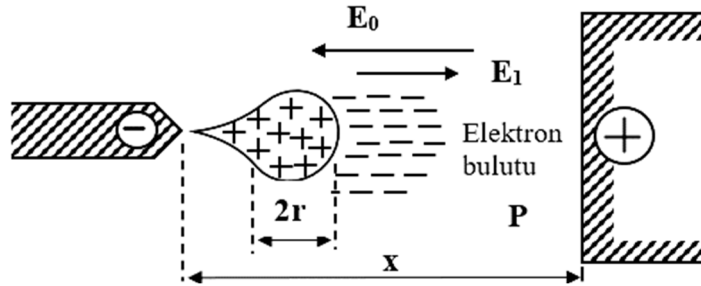
Düzgün olmayan elektrik alanda, alan şiddetinin büyümesiyle boşalma başlar. Boşalmanın başlaması elektrotların eğrilik yarıçapına bağlıdır. İki elektrot arasındaki elektrik alan şiddetinin maksimum olduğu nokta, eğrilik yarıçapı küçük olan elektrot üzerindedir. Eğrilik yarıçapı küçük olan elektrotun kutup türü delinme gerilimini etkileyen bir diğer faktördür.

Düzgün olmayan bir alanın farklı tür gerilimlerdeki delinme gerilimleri

birbirinden çok farklıdır. Doğru gerilimde, çubuk-düzlem elektrot sisteminin alanı simetrik olmadığından, delinme gerilimi daha çok kutbilyete bağlıdır. Çubuk elektrodun pozitif olması halindeki delinme gerilimi, negatif olması halindeki çok daha küçüktür. Çünkü çubuğun pozitif olması halinde çubuk elektrot yakınında bulunan pozitif iyonlar negatif düzlem elektrotu yönünde alanı kuvvetlendirirler ve boşalmanın başlamasını kolaylaştırırlar. Çubuğun negatif olması halinde ise pozitif iyonlar dış bölgede bir elektron çığının oluşumunu zorlaştırmaktadır (Kara, 2005).

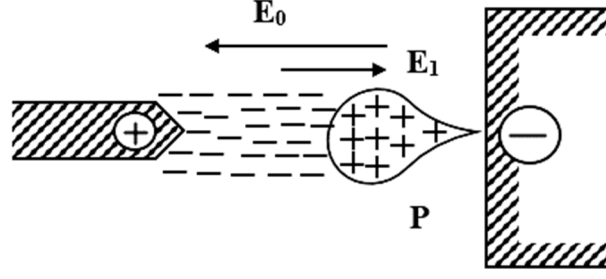
Alternatif gerilimde delinme, delinme gerilimi küçük olan kutbilyetteki yarı periyotta meydana gelir. Elektrikli parçacıkların meydana gelmesi ve birikmesi için belirli bir zamana ihtiyaç vardır. Bu yüzden, doğru gerilimde pozitif çubuk-negatif düzlem elektrot sistemi arasındaki delinme geriliminin farkı, alternatif gerilimdeki farka göre daha büyüktür (Kara, 2005).

Negatif çubuk-pozitif düzlem elektrot durumunda, elektron çığı doğrudan doğruya katottan yani çubuk elektrot ucundan başlar ve anot doğrultusunda büyür (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Negatif çubuk- artı düzlem elektrot sisteminde elektron çığının gelişmesi (Sefa, 1997)

Bu sırada çığ bölgesindeki artı iyonlar, elektrik alanını katot yönünde kuvvetlendirirken, anot yönünde de zayıflatır. Bunun sonucunda, iyonlaşma bölgesi katoda doğru kayar, dolayısıyla kanalın anot yönünde gelişmesi güçleşir (Yıldırım, 2003). Artı çubuk-eksi düzlem elektrot durumunda ise boşalma olayı başka bir karakter gösterir (Şekil 2.12). Burada ilk çığ, çubuk elektrottan belirli bir uzaklıkta oluşur ve çubuk elektroda doğru gelişir. Çığın elektronları artı çubuk elektrotta nötürleşirken, artı iyonlar da eksi düzlem elektrot yönünde elektrik alanını kuvvetlendirirler. Böylece, iyonlaşma bölgesi eksi düzlem elektroda doğru kayar ve kanalın gelişmesi kolaylaşır. Bu nedenden dolayı çubuk-düzlem elektrot sisteminde, artı çubuk durumundaki delinme gerilimi eksi çubuk durumundaki delinme geriliminden her zaman daha küçüktür (Yıldırım, 2003).



Şekil 2.12. Pozitif çubuk-negatif düzlem elektrot sisteminde elektron çığının gelişmesi (Sefa, 1997)

## 2.7. Darbe Gerilimi Kuramı

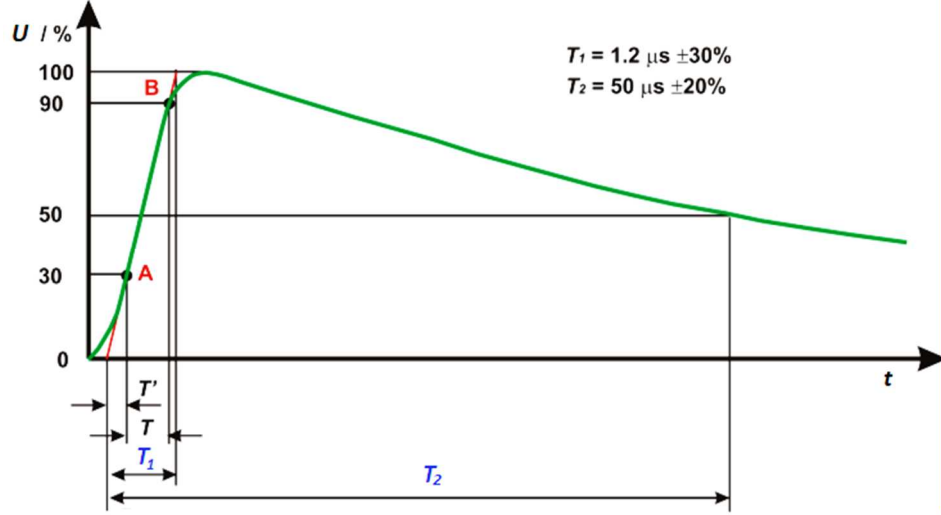
Ülkemizdeki enerji iletim ve dağıtım sistemleri 50 Hz şebeke frekanslı AA yüksek gerilim altında çalışmaktadır. Fakat normal AA çalışma gerilimini aşan iki ana geçici gerilim tipi, elektrik güç iletim ve dağıtım sistemlerinde sıklıkla bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle bu tip gerilimlere maruz kalabilecek tüm sistem, cihaz veya ürünlerin bu geçici tip gerilimler altında dayanım deneylerinin yapılması gerekmektedir. Standart darbe dayanım deneylerinde yıldırım darbe ve anahtarlama darbe olmak üzere iki çeşit gerilim kullanılır. Bir darbe geriliminin türü; tepe değeri, cephe süresi ve sırt yarı değer süresi ile belirlenir (Hallström, et al., 2003).

Yüksek gerilim teknolojisinde; darbe yüksek gerilimleri, iç (anahtarlama) ve dış (yıldırım) aşırı gerilimlerin yol açtığı zorlanmaları yüksek gerilim testlerinde temsil edebilmek, malzemelerin yüksek gerilime dayanım mekanizmaları ile ilgili temel araştırmalar yapmak ve üretilen elektromekanik ürünlerin ulusal/uluslararası standartlara uyumluluğunu deneylerle belirlemek için gerekmektedir (Kazemighotlou, 2013). Özellikle transformatörlerin yıldırım darbesi ya da anahtarlama sırasında meydana gelen yüksek frekanslı aşırı gerilimlere karşı dayanıklı olması beklenir.

Genel itibariyle aşırı anahtarlama gerilimleri, çalışma geriliminin iki-üç katına ulaşabilirken, yıldırım aşırı gerilimleri anma gerilimin 20 katına kadar ulaşabilmekte ve yüksek miktarda enerji taşıyabilmektedir. Düşük seviyedeki darbe gerilimleri yapı parçalarını sürekli yıprattığından dolayı, ilgili cihazın elektronik devresi belirli bir zaman geçtikten sonra tamamen kullanılamaz hale gelmektedir. Aşırı gerilimlerin tam olarak sebebine veya yıldırım deşarjının isabet ettiği yere bağlı olarak farklı koruyucu tedbirlerin alınması gereklidir (Merev, 2019).

### 2.7.1.1. Yıldırım Darbe Gerilimi

Standart yıldırım darbe gerilimi dalga formu Şekil 2.13'te verilmiştir. Yıldırım darbe yüksek gerilimleri, doğada yıldırımların neden olduğu aşırı gerilimlerin tepe değere ulaşma süresinin 1.2-50  $\mu\text{s}$  mertebelerinde olduğu darbe yüksek gerilim tipidir.



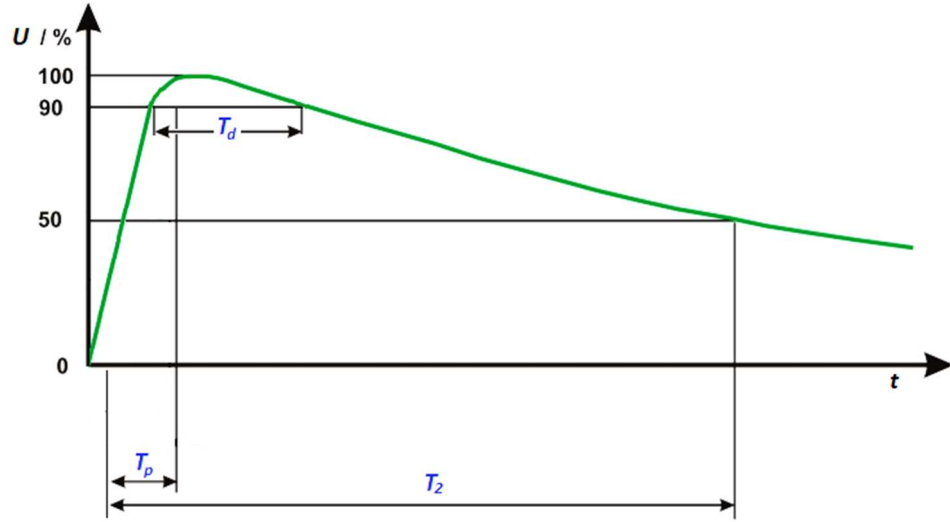
Şekil 2.13. Standart Yıldırım Darbe Formu T1=1,2  $\mu\text{s}$  ve T2=50  $\mu\text{s}$ .

Darbe geriliminin tepe değerinin %30 ve %90' nın arasında kalan sürenin 1,67 ile çarpımı ile  $T_1$  süresini yani cephe süresini verir. Darbe geriliminin başlangıç noktası ile tepe değerinin %50' sine düştüğü nokta arasında kalan süre  $T_2$  süresini yani "sırt yarı değer süresini" verir.

### 2.7.1.2. Anahtarlama Darbe Gerilimi

Anahtarlama darbe yüksek gerilimleri, elektromekanik ürünlerin açma-kapama olayları sırasında ortaya çıkan ve iç aşırı gerilimlerin tepe değere ulaşma süresinin 250-2500  $\mu\text{s}$  mertebelerinde olduğu darbe yüksek gerilim tipidir. Standart anahtarlama darbe gerilimi dalga formu Şekil 2.14'de gösterilmiştir.

Darbe geriliminin başlangıç noktası ile tepe değeri arasında kalan süre  $T_p$  süresini yani Cephe Süresini verir. Darbe geriliminin başlangıç noktası ile tepe değerinin %50' sine düştüğü nokta arasında kalan süre  $T_2$  süresini yani sırt yarı değer süresini verir.



Şekil 2.14. Standart Anahtarlama Darbe Formu  $T_1=250 \mu s$  ve  $T_2=2500 \mu s$

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

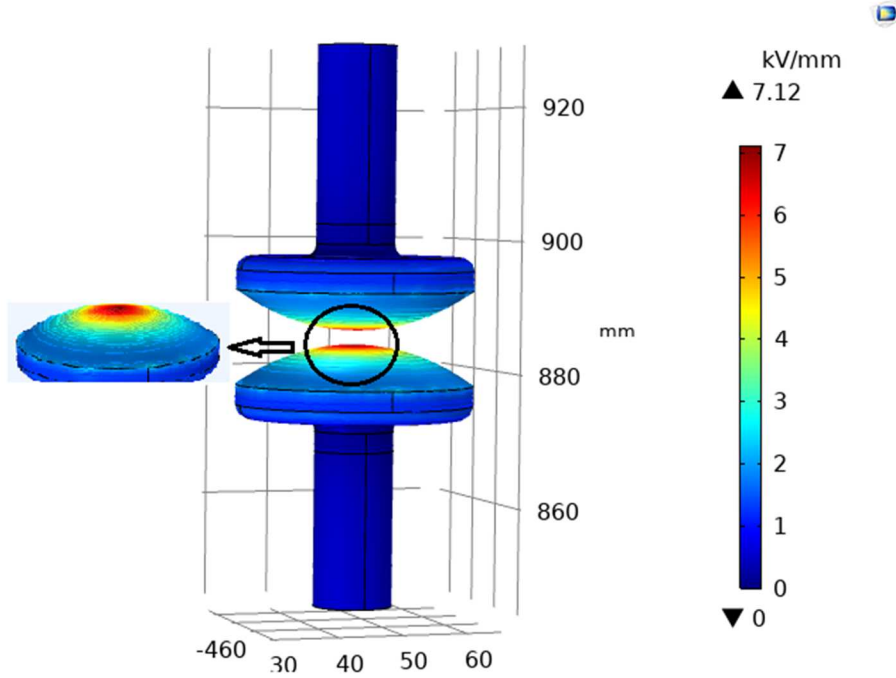
#### 3.1. R410A Gazının Delinme Gerilimi Deneyi

Yalıtım ve soğutmada kullanılması planlanan gazın fiziksel özelliklerinin yanı sıra farklı elektrot tipleri ile değişken elektrotlar arası boşluk ve basınç koşullarındaki performansının da bilinmesi gerekmektedir. Gaz yalıtkanlar, çoğunlukla düzgün olmayan elektrik alanına maruz kalmaktadır. Gazların düzgün olmayan elektrik alanındaki delinme dayanımları düzgün elektrik alanındaki delinme dayanımından farklıdır. Hemen hemen tüm elektrot yapılandırmalarında, incelenen durumların çoğu için, elektrik alanının dağılımı düzgün değildir ve aslında bu en gerçekçi yaklaşımdır. Sistemin sağlıklı çalışma koşullarının tespiti için emniyetli tank basıncı değerinin doğru tespit edilmesi büyük önem arz etmektedir. R410A gazı henüz yeni bir gaz olup aktif kullanım alanı iklimlendirme ve soğutma sistemleridir. Literatürde, R410A'nın yüksek gerilim altındaki davranışlarını inceleyen henüz iki çalışma bulunmaktadır (Khan et al., 2018; Khan et al.,2019a). Bu nedenlerden ötürü, bu çalışmada öncelikli olarak R410A gazının yüksek gerilim altındaki davranışları analiz edilmiştir. Bu kapsamda, pirinç malzemeden üretilmiş olan küre-küre ve koni-düzlem elektrot sistemleri kullanılarak düzgün olan ve düzgün olmayan elektrik alanlarında, 50 Hz sabit frekans değerinde, alternatif gerilim altında, farklı basınç ve elektrotlar arası mesafelerde delinme dayanımları elde edilmiştir.

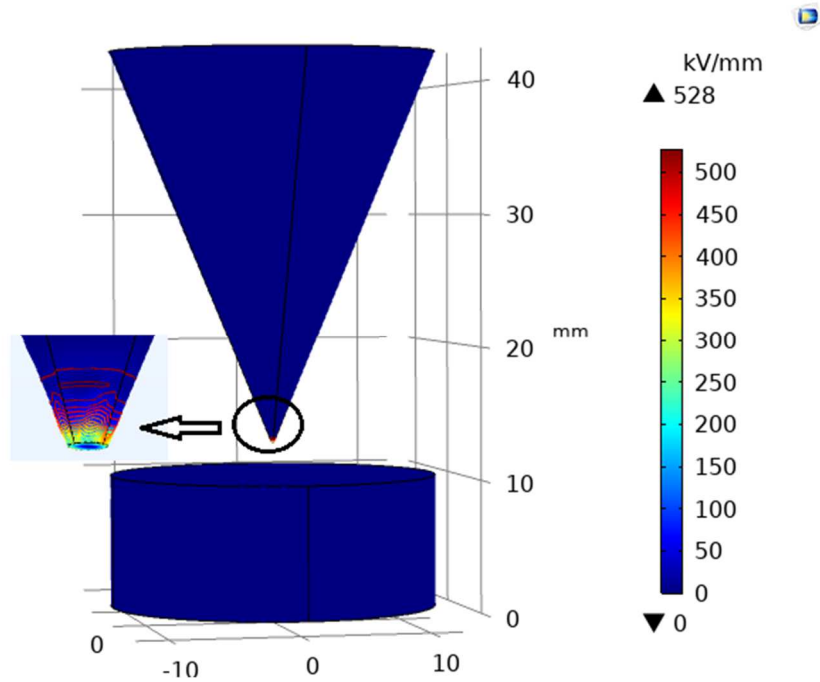
DeneySEL çalışmalardan önce her iki elektrot düzeneği için COMSOL ortamında elektrostatik analiz gerçekleştirilmiş, R410A gazının küre-küre ve koni-düzlem elektrot sistemlerinde elektrik alan dağılımları incelenmiştir. DeneySEL çalışmalarda elektrot yüzeylerindeki pürüzler ve test hücresi ortamında yer alan toz parçaları deney sonuçlarına etki etmektedir. Benzetim çalışmaları ise ideal koşullara göre gerçekleştirilmiştir. Uygulanan gerilimin 34,5 kV ve elektrotlar arası mesafenin 2,5 mm olduğu durumdaki elektrik alan dağılımları küre-küre elektrot sistemi için Şekil 3.1'de, koni-düzlem elektrot sistemi için Şekil 3.2'de verilmiştir.

Şekil 3.1, küre-küre elektrot yapılandırmasında elektrotlar arasındaki elektrik alanındaki değişimi göstermektedir. Elektrik alanları beklendiği gibi elektrotların birbirine en yakın yüzeylerinde en yüksek olup 7.12 kV/mm'dir. Şekil 3.2, koni-düzlem elektrot yapılandırmasında elektrotlar arasındaki elektrik alanındaki değişimi göstermektedir. Burada, koni elektrot yüzeyine sınır koşulu olarak 34,5 kV değeri ve

düzlem elektrot için toprak potansiyeli tanımlanmıştır. Şekil 3.2’de, koni elektrotun düzlemsel elektrota en yakın olduğu bölgede (sivri uçta) elektrik alan değerinin en büyük olduğu görülmektedir. Bu bölge, atlama ve delinme olasılığının en yüksek olduğu noktadır. Bu durumda elektrik alanın en büyük değeri 528 kV/mm’dir.



Şekil 3.1. Küre-küre yapılandırmasında elektrot yüzelerindeki elektrik alan dağılımı



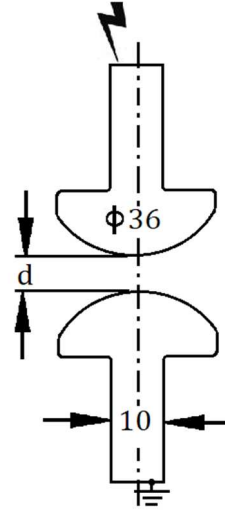
Şekil 3.2. Koni-düzlem yapılandırmasında elektrot yüzelerindeki elektrik alan dağılımı

### 3.1.1. Küre-Küre Elektrot Sistemi ile Delinme Dayanımı Testi

Küresel elektrotlar, eşit çaplı iki metal küreden oluşmaktadır. Malzeme olarak alüminyum, pirinç, bakır, bronz veya başka bir metal kullanılmaktadır. Küresel elektrotların yüzeyi pürüzsüz, tozsuz ve kuru olmalıdır. Çünkü kürelerin birbirine değdiği “atlama noktasında” olabilecek her türlü yabancı malzeme (yağ, vernik vb.) atlama gerilimini etkilemektedir.

Küresel elektrotlarla ölçme işlemi, iki elektrot arasındaki açıklığa bağlı olarak atlama geriliminin bilinmesi prensibine dayanmaktadır. Bu atlama gerilimleri küre çaplarına, küre düzenine ve farklı hava koşullarına göre değişim göstermektedir.

Tasarlanan test düzeneği, 36 mm çapında iki küresel elektrot, 60 cm yüksekliğinde ve 50 cm çapında silindirik bir pleksiglas malzemedan oluşan bir test hücresi ile arıza gerilimi test cihazından oluşmaktadır. Kullanılan küre-küre elektrot sisteminin biçimi ve boyutları (mm) Şekil 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3. Küre-Küre elektrot sistemi

Küresel elektrot sistemine ait test hücresi Şekil 3.4’te verilmiştir. Şekilde verilen 1 numara topraklama terminali, 2 numara küresel elektrot, 3 numara gaz enjeksiyonu, 4 numara yüksek gerilim terminali ve 5 numara basınç göstergesidir.



Şekil 3.4. Küresel elektrot sistemi

Test hücrenin gövdesi pleksiglas malzemeden yapılmış olup, yüksek basınçlara karşı dayanımını artırmak amacı ile dış kısmı 5 cm kalınlığında epoksi reçine ile doldurulmuştur. Bu düzeneklerde en büyük problem gaz sızıntısıdır. Bu çalışmada, gaz sızıntısını önlemek için, hücre içerisine monte edilmiş küresel elektrotların bağlantı terminalleri ile dış gövde arasındaki boşluklar da epoksi reçine ile doldurulmuştur. Böylelikle gaz sızıntısı önlenmiş olup öte yandan elektrotlar hücre içerisine sabitlenmiştir.

Küresel elektrotlarla ölçme yaparken elektrotlar arasındaki elektrik alanın düzgün olması istenir. Ancak, elektrotlar arası mesafe büyüdükçe elektrik alanın düzgünlüğü de bozulmaktadır. Bu nedenle mümkün olduğunca minimum hatalı bir ölçme yapabilmek için elektrotlar arası açıklığın ( $d$ ), küre çapına ( $R$ ) oranının  $0,5$ 'den küçük olması istenmektedir. ( $d/r \leq 0,5$ ) şartının sağlandığı durumda ön boşalmaların olmadığı ve elektrik alanının yaklaşık olarak düzgün olduğu kabul edilmektedir.  $d = 0,5 \cdot r$  elektrot açıklığına kadar yapılan ölçmelerde, ölçme hatası  $\pm \%3$  sınırları içerisinde kalmaktadır (Uhm, et al., 2003). Bu çalışmada, kürelerin yarıçapı  $r$ , küreler arasındaki mesafeden önemli ölçüde daha büyüktür, yani  $\frac{r}{d} \gg 1$  'dir.

Elektrotlar arası açıklık küçük iken kutbiyetin etkisi kararlı değildir ve atlamaların  $\%50$ 'si pozitif alternansta gerçekleşir. Elektrotlar arası açıklık arttıkça, negatif alternanstaki atlamaların sayısı artar ve belli bir değerden sonraki atlamalar sürekli olarak negatif alternansta gerçekleşir. Elektrot açıklıkları daha da fazla arttırılırsa ( $1,5 - 2d$ ) atlamalar pozitif alternansta gerçekleşir. Bu çalışmada, elektrotlar arası boşluk, ayarlanabilir bir vida ve mekanik kuplaj kullanılarak  $0,5$  mm ile  $5$  mm arasında değiştirilmiştir. Elektrot malzemesi olarak gazla reaksiyona girmediği ve arıza durumlarında yüzey direnci arttığı için pirinç tercih edilmiştir. Hücre, test gazı ile doldurulmadan önce  $0,02$  atm'den ( $1,5$  kPa) daha düşük bir basınca boşaltılmıştır.

### 3.1.1.1. Deney Düzeneği ve Test Prosedürü

Deney düzeneğinde kullanılan delinme gerilimi test cihazı, IEC 156, ASTM 877 ve IS-6792 standartlarına göre transformatör yağının ve diğer dielektrik sıvıların dielektrik gücünü ölçmek için tasarlanmıştır. Kullanılan test cihazının özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Delinme gerilimi test cihazı

Özellik	Tanım
Besleme gerilimi	220 V 50/60 Hz
Çıkış Gerilimi	0~80kV/100kV
Doğruluk	Okuma $\pm$ 0.2kV
Delinme gerilimi açma kapama süresi, ms	$\leq$ 1ms
Test standartları	IEC 156/ASTM 877/IS-6792

Test hücresi ve arıza gerilimi test ekipmanının deneysel kurulumu ise Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5. Küresel elektrot sisteminde delinme gerilimi test düzeneği

Gazın delinme gerilimi ölçümünde IEC 156 standardı kullanılmıştır (Lemke, et al., 2008). Deney koşulları Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. Deneysel koşullar

Elektrot yapılandırması	Küre-küre
Elektrotlar arası mesafe	0.5 mm – 5 mm
Elektrot çapı	36 mm
AA gerilim	0 – 100 kV
Elektrot malzemesi	pirinç
Gaz basıncı	0,5 atm – 2,5 atm

Elektrotlar test hücresine temizlenerek yerleştirilmiş ve ardından gaz sızıntısını önlemek için pleksiğlas hücrenin etrafı epoksi ile 5 mm çapında kaplanarak tüm hücre sabitlenmiştir. Bu nedenle ilk test sonrasındaki tüm testler, elektrotlar temizlenmeden gerçekleştirilmiştir.

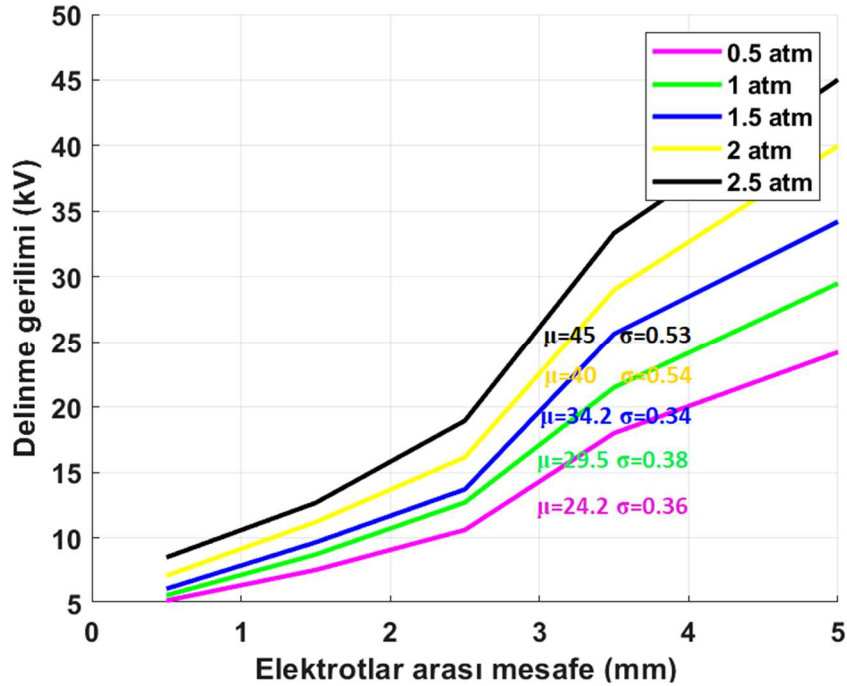
Küresel elektrotlar ile ölçme testi sabit elektrot açıklığı, sabit basınç ve değişken gerilim yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her ölçüm setinden önce, sırasıyla elektrotlar arası boşluk ayarlanmış, test hücresi vakumlanmış ve R410A gazı ile doldurulmuştur. Ardından, test hücresindeki elektrotlar arasında delinme meydana gelene kadar uygulanan AA gerilim IEC 156 standardı gereği 2kV/s'lik aralıklarla artırılmıştır. Gerilim artışı, boşalma ark moduna geçinceye kadar devam ettirilmiş ve ark başlangıcından sonra kademe kademe azaltılarak sıfıra çekilmiştir. Böylece ayarlanan açıklıktaki delinme gerilimi tayin edilmiş ve kaydedilmiştir. Her bir elektrotlar arası mesafede, basınç sırasıyla 0,5 atm'den 0,5 atm artışla 2,5 atm'ye kadar yinelenmiş ve delinme gerilimleri belirlenmiştir. Her bir basınç değeri ve elektrot boşluğu için sekiz okumanın ortalaması alınmıştır. Her elektrotlar arası mesafe değişiminden önce hücre içerisindeki gaz tahliye edilmiş, ortam vakumlanmış ve tekrar hücre gaz ile doldurulmuştur. Gaz doldurma işleminin ardından ortamın kararlı hale gelmesi için ortalama 30 dakika beklemek gerekir (İsmailoğlu, 2003). Bu çalışmada ortalama 15 dakika beklenilmiştir. Elektrotların soğumasını sağlamak ve elektrotların sıcaklık etkisini en aza indirmek için testler arasında 10 dakikalık bir ara verilmiştir. Deneyler, 758 mmHg hava basıncı ve 24°C ortam sıcaklığında, laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.

Pirinç malzemeden oluşturulan küre-küre elektrot sisteminde R410A gazının delinme dayanımı deneyinde kullanılan elektrotlar arası mesafe ve basınç değerlerine karşılık elde edilen sonuçları Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3. Küre-küre elektrot sistemi deneysel çalışma ölçüm verileri

Basınç P (atm)	Delinme gerilimi Vd (kV)				
	Elektrotlar arası mesafe d (mm)				
	0,5	1,5	2,5	3,5	5
0,5	5,2	5,6	6,1	7,12	8,5
1	7,57	8,72	9,65	11,2	12,67
1,5	10,6	12,7	13,7	16,15	18,95
2	18	21,5	25,63	29	33,34
2,5	24,2	29,5	34,21	39,98	45,025

Tablo 3.3'te verilen R410A gazının delinme gerilimi ile elektrotlar arası boşluk\*basınç ilişkisine ait veriler MATLAB 2017b programına aktarılarak Şekil 3.6'da verilen grafikler elde edilmiştir.



Şekil 3.6. Küresel elektrot sisteminde farklı elektrotlar arası mesafe ve basınç değerlerinde R410A gazının delinme gerilimi eğrileri

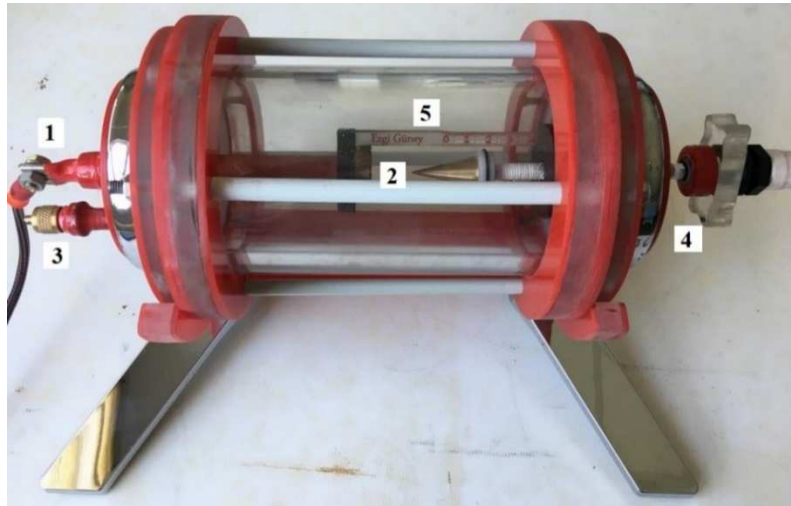
İdeal bir yalıtkanda, delinme gerilimi ile basınç\*elektrot boşluğu doğrusal olarak artar. Ancak bu grafikte, bu artış, 0,5 mm ile 3,5 mm aralığında doğrusal değildir. 3,5 mm'nin üzerinde doğrusal hale gelmektedir. Geniş bir basınç aralığında R410A'nın delinme gerilimi eğrisi Paschen Yasasına uygundur. Ancak belirli koşullar altında daha yüksek basınçlarda sapmalar gözlemlenebilmektedir (Berzak, et al., 2006). Burada  $\mu$  ve  $\sigma$  elektrotlar arası mesafenin 10mm olduğu andaki farklı basınç değerleri için alınan ölçümlerin ortalama ve standart sapmasıdır. Eğer birçok veri ortalamaya yakın ise,

standart sapma değeri küçük, birçok veri ortalamadan uzakta yayılmışlarsa standart sapma değeri büyük olur. Eğer bütün veri değerleri tıpatıp aynı ise standart sapma değeri sıfırdır. Şekildeki  $\sigma$  değerleri incelendiğinde ölçüm sonuçlarının kendi içinde tutarlı olduğu, basınç artışıyla standart sapmanın sıfırdan biraz uzaklaştığı görülmektedir.

### 3.1.2. Koni-Düzlem Elektrot Sistemi ile Delinme Dayanımı Testi

Deney sisteminde kullanılan önemli materyallerden biri de Koni-Düzlem elektrot sistemleridir. Bu yapılandırmanın seçilmesinin temel nedeni iletken-yer yapılandırmalarına eşdeğer olmasıdır.

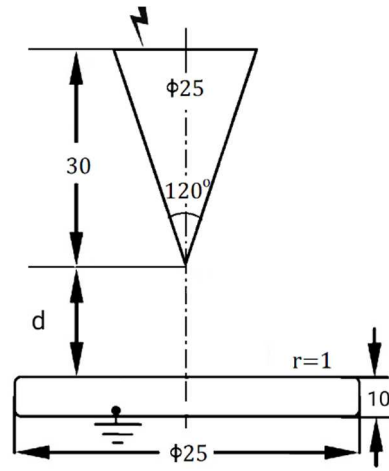
Test hücresi, yaklaşık 5 atm basınca dayanabilen, 165 mm uzunluğunda, 100 mm dış çapında, pürüzsüz, silindirik cam ile 10mm kalınlığında pleksiglas cam malzemeden oluşturulan alt-üst kapaklardan elde edilmiştir. Test düzeneği ise test hücresi ile arıza gerilimi test cihazından oluşmaktadır. Koni-düzlem elektrot sistemine ait test hücresi Şekil 3.7'de verildiği gibi tasarlanmıştır. Şekilde verilen 1 numara topraklama terminali, 2 numara koni-düzlem elektrotları, 3 numara gaz enjeksiyonu, 4 numara yüksek gerilim terminali, 5 numara mesafe göstergesidir.



Şekil 3.7. Koni-Düzlem elektrot sistemi test hücresi

Test hücresinin farklı basınç değerlerine ve vakumlama işlemine dayanımını artırmak amacı ile iki silindir cam arasına 10 mm epoksi reçine dökülmüştür. Koni – düzlem elektrot sistemini oluşturmak için tepe açısı 120° olan, 0,2 mm mil çağında, 10 mm çaplı, 30 mm uzunluğunda krom kaplı konik elektrot ile kenar eğrilik yarıçapı 1 mm olan, 10 mm kalınlığında, 25 mm çapında, disk şeklinde düzlem elektrot

kullanılmış ve birbirine paralel düzlemlere yerleştirilmiştir. Kullanılan koni-düzlem elektrot sisteminin biçimi ve boyutları (mm) Şekil 3.8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Koni-Düzlem elektrot sistemi

Düzlemsel elektrot topraklama terminaline bağlı olup, koni elektrot, hücre içerisine sabitlenmiş bir milimetrik cetvel kullanılarak 0 mm ile 40 mm arasında istenilen herhangi bir elektrot açıklığına göre ayarlanabilen hareketli bir platforma monte edilmiştir. Silindirik test hücresi, elektrik alanının kenar etkilerini en aza indirmek ve gaz sızıntısını önlemek amacıyla bir gaz giriş-çıkışı ve iki elektrottan oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Test hücresinin vakumlama işlemi de gaz giriş-çıkış noktasından gerçekleştirilmektedir. Hücre içindeki basınçları okuyabilmek için minimum skalası -1 bar olan bir manometre test hücresi ile irtibatlandırılmıştır. Test hücresi, 0 atm – 5 atm aralığındaki basınçlara karşı dayanıklıdır ve içi vakum pompası kullanılarak -1 bar basıncına kadar düşürülebilmektedir. Koni-düzlem elektrot sistemi ile delinme dayanımı testi için kullanılan deneysel kurulum Şekil 3.9’da verilmiştir.

Koni-Düzlem elektrot sisteminin test süreci bir önceki bölümde verildiği gibidir. Farklı olarak, elektrotlar arası mesafe 1mm ile 20 mm gibi geniş bir aralıkta tutulmuştur. Yeni test hücresi tasarımı daha esnek aralıklarda çalışmaya olanak sağlamaktadır.

Pirinç malzemeden oluşturulan koni-düzlem elektrot konfigürasyonunda R410A gazının delinme dayanımı deneyinde kullanılan elektrotlar arası mesafe ve basınç değerlerine karşılık elde edilen delinme gerilimi  $V_d$  verileri Tablo 3.4’te verilmiştir.



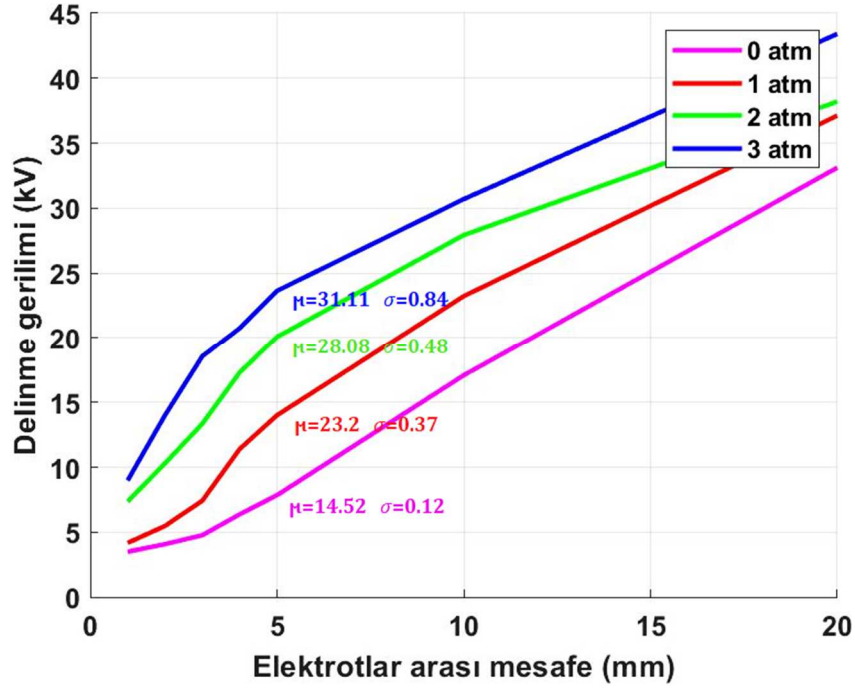
Şekil 3.9. Koni-düzlem elektrot sisteminde delinme gerilimi test düzeneği

Koni-düzlem elektrot sisteminde R410A gazının delinme dayanımı seviyeleri küre-küre elektrot konfigürasyonuna göre daha düşük değerlerdedir. Bu durum, koni-düzlem elektrot konfigürasyonunun homojen olmayan elektrik alanına sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 3.4. Koni-düzlem elektrot sistemi deneysel çalışma ölçüm verileri

Basınç P (atm)	Delinme gerilimi Vd (kV)						
	Elektrotlar arası mesafe d (mm)						
	1	2	3	4	5	10	20
0	3.5	4.08	4.77	6.38	7.85	17.08	33.12
1	4.18	5.48	7.43	11.4	14	23.23	37.12
2	7.36	10.3	13.35	17.3	20.08	27.93	38.2
3	8.980	14.105	18.55	20.75	23.64	30.70	43.40

Tablo 3.4'te verilen R410A gazının delinme gerilimi ile elektrotlar arası boşluk\*basınç ilişkisine ait veriler MATLAB programına aktarılarak Şekil 3.10'da verilen grafikler elde edilmiştir.



Şekil 3.10. Koni-düzlem elektrot sisteminde farklı elektrotlar arası mesafe ve basınç değerlerinde R410A gazının delinme gerilimi eğrileri

Şekil 3.10'da görüldüğü gibi, geniş bir basınç\*elektrot aralığında R410A'nın delinme gerilimi eğrisi doğrusaldır. Ancak belirli koşullar altında daha yüksek basınçlarda standart sapma değeri  $\sigma$ 'de küçük sapmalar gözlenebilmektedir.

### 3.2. R410A Delinme Geriliminin Kuramsal Olarak Hesaplanması

#### 3.2.1. Küre-Küre Elektrot Sisteminde Delinme Gerilimi Hesabı

Townsend Kuramı ve Paschen Yasası, farklı basınçlarda ve elektrot aralıklarında, bir gazın delinme gerilimini tespit etmek için kullanılır. Kuramsal hesaplamadan elde edilen değerler, deneysel sonuçların doğruluğu için bir referans sağlamaktadır. Yüksek gerilim varlığında gaz bozulması, Loveless (2017) tarafından verilen Paschen Yasası ile tanımlanmaktadır ve  $r/d \gg 1$  olmak koşuluyla denklem (3.1) ile ifade edilir.

$$Vb = Bpd / \ln(Apd) - \ln(\ln(1 + \frac{1}{\gamma})) = f(p, d) \quad (3.1)$$

Burada  $p$  boşluk basıncı,  $d$  elektrot boşluk mesafesi,  $\gamma$  katottaki ikincil elektron emisyon katsayısı, A ve B gaza bağlı sabitleridir. R410A soğutma sistemlerinde kullanılan yeni bir soğutucu gaz olduğundan, literatürde gaza ait A ve B katsayıları henüz bulunmamaktadır. A ve B katsayıları deneysel ölçümlerle veya sayısal ve analitik hesaplamalarla belirlenebilmektedir (Ghaleb and Belasri, A 2012). Bu

çalışmada, A ve B katsayılarının yaklaşık değerleri delinme gerilimi eğrisinden elde edilen veriler kullanılarak denklem 3.2'de verilen denklemlerden elde edilmiştir (Berzak, et al., 2006).

$$A = (\exp(1) * \ln(1/\gamma))/(pd)_{min}, B = (V_B)_{min}/(pd)_{min} \quad (3.2)$$

Deney düzeneğinde elektrotlar için pirinç kullanılmış ve  $\gamma$  değeri 0.025 olarak alınmıştır (Donaldson, 1982). Townsend birinci katsayısı  $\alpha$ , denklem (5.3) kullanılarak belirlenmiştir.

$$\alpha \cdot d = \ln(1 + 1/\gamma) \quad (3.3)$$

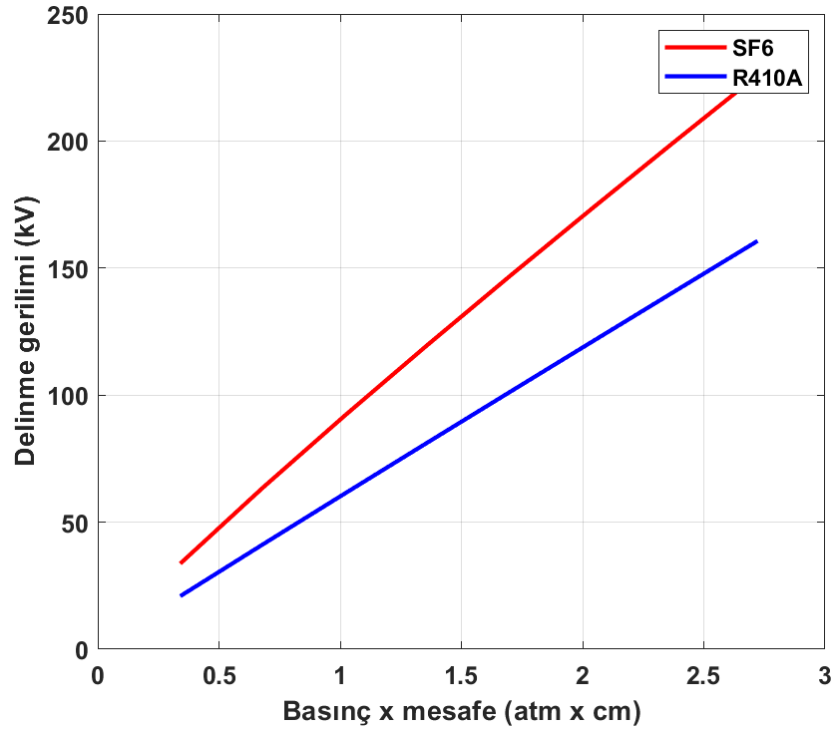
A ve B katsayılarının yaklaşık gerçek değerlerini hesaplayabilmek için vakum basıncının yaklaşık  $1.10^{-3}$  atm civarında olması gerekmektedir. Ancak, kullanılan deney düzeneğinin yapısı nedeniyle vakum değeri 0 atm ile sınırlı kalmıştır. Bu nedenden dolayı mevcut çalışmada küre-küre elektrot sistemine ait deneysel veriler kullanılarak “eğri uydurma” yöntemi ile delinme gerilimi denklemi elde edilmiştir.

Genellikle deneysel çalışmalar sonucu elde edilen veriler noktasal değerlerdir. Veriler arasında sürekli bir fonksiyon tanımı yoktur. Eğri uydurma, kısaca bir dizi veri noktasına en iyi uyan bir eğri veya matematiksel fonksiyon oluşturma işlemidir (Halli, et al., 1992). Ayrıca karmaşık bir fonksiyonun basitleştirilmiş bir fonksiyonuna gerek duyulabilir. Bunu yapmanın bir yolu, ilgilenen aralık boyunca belli açıda farklı noktalarda fonksiyonun değerlerini hesaplamaktır. Daha sonra bu değerlere uyan bir fonksiyon üretilebilir. Bu uygulamaların her ikisi de eğri uydurma olarak bilinir (Farebrother, 1999).

Bu çalışmada eğri uydurma yöntemi için MATLAB programı kullanılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen sonuçlar, MATLAB programına aktarılarak “Eğri Uydurma Araç Kutusu (Curve Fitting Toolbox)” menüsünde bulunan 12 yöntem tek tek denenmiş ve “Güç (Power)” yöntemi en uygun sonucu vermiştir. Güç serisi yöntemi ile  $f(x) = a \cdot (pd)^b$  denklemleri elde edilir. Hata kareleri (R-square=0,9934), 1'e yakın olduğu için eğrinin doğruları iyi temsil ettiği söylenebilir. Deneysel çalışmalar sonucunda eğri uydurma yöntemi ile elde edilen delinme gerilimi denklem (3.5)'te verilmiştir.

Şekil 3.11, kuramsal hesaplamalardan elde edilen R410A ve SF6 delinme gerilimi eğrilerini ( $Vd = f(p)$ ) vermektedir. SF6 için denklem (3.4)'de verilen formül

kullanılmıştır (Özgönel, vd., 2018). R410A için ise, bu çalışmanın deneysel verilerinden elde edilen denklem (3.5) kullanılmıştır.



Şekil 3.11. Kuramsal hesaplamalardan elde edilen R410A ve SF6 delinme gerilimi eğrileri

$$V_{SF6} = 1321pd^{0,915} \text{ kV} \quad (3.4)$$

Burada;  $p$  basınç olup birimi kPA ve  $d$  elektrotlar arası mesafe olup birimi cm'dir.

$$V_{R410A} = 60,15pd^{0,9812} \text{ kV} \quad (3.5)$$

Burada;  $p$  basınç olup birimi atm ve  $d$  elektrotlar arası mesafe olup birimi cm'dir.

Khan vd. (2019a), ideal şartlar altında gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, R410A'nın SF6'nın 0,90-0,92'si olan bir dielektrik dayanıma sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Bu çalışmada ise, düşük basınç\*elektrotlar arası boşluk değerlerinde, R410A'nın dielektrik dayanımının SF6'nın 0,78 katı ve yüksek basınçlarda dielektrik dayanımının yaklaşık 0,69 katı olduğu bulunmuştur. Sonuçların farklılık göstermesinin nedeni, deneylerin sabit bir test hücresi içinde gerçekleştirilmesi, dolayısıyla elektrot yüzeyleri temizlenemediğinden testlerin tamamlanmış olmasından kaynaklanmıştır.

### 3.2.2. Koni-Düzlem Elektrot Sisteminde Delinme Gerilimi Hesabı

Mason (1951), iç deşarjlardan kaynaklanan dielektriklerin bozulması üzerine yaptığı çalışmada, bir iğne-düzlem motor sisteminin en büyük alan yoğunluğunu hesaplamak için yaklaşık bir formül önermiştir.

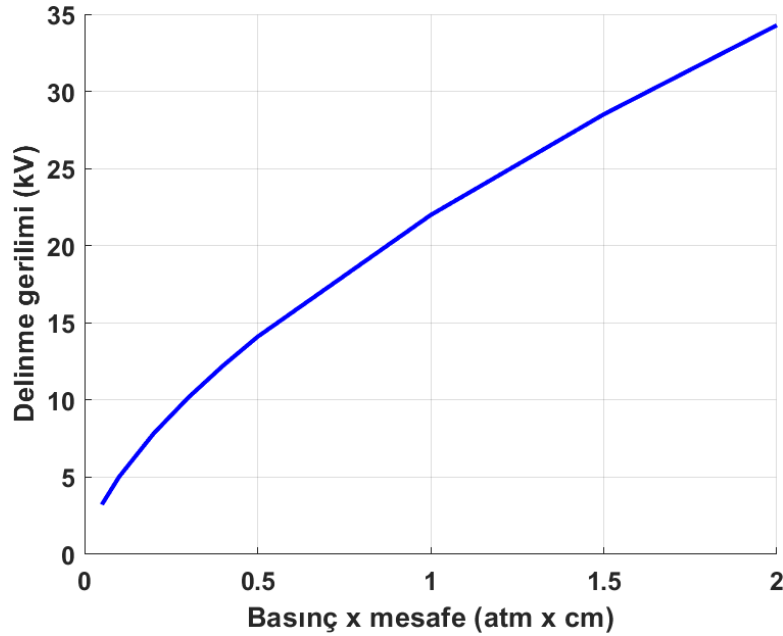
Mason (1951) tarafından geliştirilen formül yardımıyla elektrik alan dayanımı denklem (3.6)'de verildiği gibi elde edilmektedir.

$$E_{max} = \frac{2U}{r \ln(1 + \frac{4d}{r})} \quad (3.6)$$

Burada;  $r$  iğne elektrotunun yarıçapıdır,  $d$  iğne ucu ile düzlemsel elektrot arasındaki boşluk mesafesi ve  $U$  uygulanan gerilimdir. Mevcut çalışmada ise koni-düzlem elektrot sistemine ait deneysel veriler kullanılarak “eğri uydurma” yöntemi ile delinme gerilimi denklemi elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda eğri uydurma yöntemi ile elde edilen delinme gerilimi denklem (3.7)'da verilmiştir.

$$V_B = 5,09 * (pd)^{0,63} \quad (3.7)$$

Koni-düzlem elektrot sisteminde, delinme gerilimi eğrisi ( $V_d = f(p)$ ) Şekil 3.12'de verilmiştir.



Şekil 3.12.Koni-Düzlem elektrot sistemi için kuramsal hesaplamalardan elde edilen R410A delinme gerilimi eğrileri

### 3.3. R410A Gaz Yalıtımlı Transformatör Tasarımı ve COMSOL Ortamında Modellenmesi

#### 3.3.1. R410A Gaz Yalıtımlı Dağıtım Transformatörünün Yapısal Özellikleri

GYT, tank tasarım; düşük gaz basınç tipi ve yüksek gaz basınç tipi olmak üzere iki tipte sınıflandırılmaktadır. Gazının yalıtım ve soğutma kapasitesi gazın basıncına bağlıdır. Yani gaz basıncı ne kadar yüksek olursa, yalıtım ve soğutma özellikleri o kadar iyi olur. Ancak, tank ve soğutucunun dayanım güçleri nedeniyle daha yüksek basınç verimli olmayabilir. Çalışma sırasında sıcaklık artışlarının neden olduğu gaz basıncı artışları dikkate alındığında standart GYT'lerin nominal gaz basıncı (20°C'de) aralığı için 2-2.5 atm seçmek gelenekseldir (Takahashi, et al., 1996). Dahası, yüksek basınçlı transformatör tasarımı ağırlığı ve üretim maliyetini artırmaktadır. GYT'lerin tasarımında anma basıncı, anma gerilimi, güç kapasitesi, sıcaklık artışı ve ekonomik verimlilik göz önünde bulundurulmalıdır.

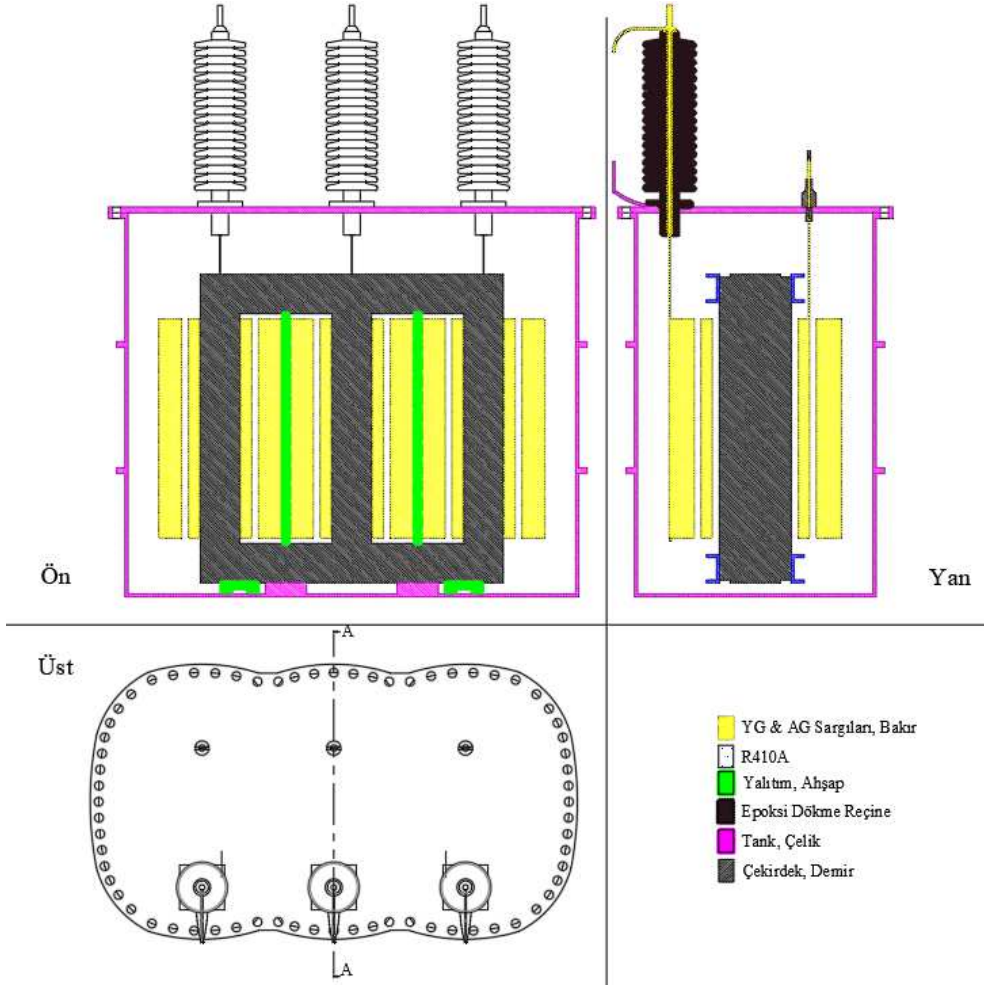
Bu tez çalışmasında, 34,5 / 0,4 kV 50 kVA gücünde dağıtım transformatörünün AutoCAD ortamında çizilmiş bire bir modeli kullanılmıştır. GYT geometrisine ait önden, yandan ve üstten görünüşü Şekil 3.13'te verilmiştir.

Tüm ayrıntıların modellenmesi için, gerçek boyutları dikkate alınarak, 3B transformatör modeli kullanılmıştır. Modele sargılar dışında, transformatörün tankı, demir çekirdeği, boyundurukları, geçit izolatörleri, ark boynuzu ve yalıtkan destek gibi ayrıntılar eklenmiştir. Ana tankı, tasarım yüksek basınca dayanabilmesi ve gazın homojen bir biçimde dağılmasına olanak verebilmesi için silindrsel yapıda tasarlanmıştır. Şekil 3.14'te ise tüm ayrıntıların görüldüğü 3B geometrisi verilmektedir.

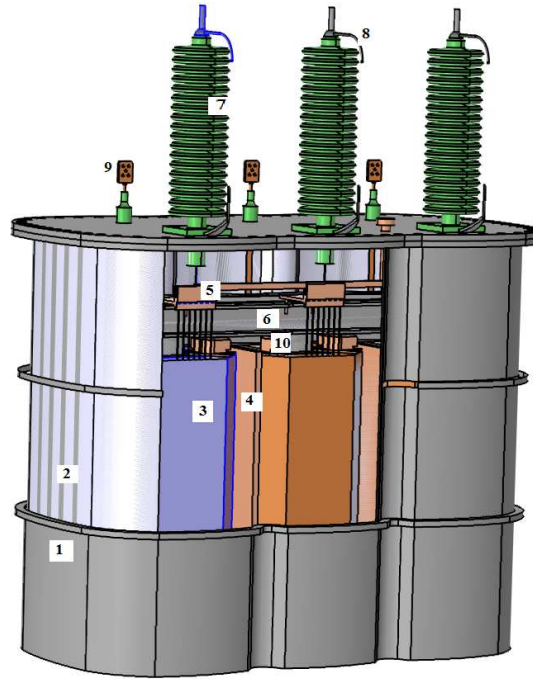
Şekil 3.14'te verilen sayısal etiketlerin karşılığı Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. R410A GYT'yi oluşturan parçalar

1	Transformatör kazanı	6	Boyunduruk
2	R410A gazı	7	Geçit izolatörü
3	YG sargısı	8	Ark boynuzu
4	Yalıtkan ekran	9	AG sargısı
5	Kademe değiştirici	10	Tahta takoz



Şekil 3.13. R410A GYT'in önden, yandan ve üstten görünüşü



Şekil 3.14. R410A GYT'in genel görünümü

### 3.3.2. Yalıtım ve Soğutma Ortamı

Gaz yalıtımlı transformatörün yalıtım ve soğutma işlemi için R410A gazı kullanılmıştır. Çünkü mükemmel bir dielektriğe, termal kararlılığa, kimyasal kararlılığa ve yüksek ısı iletkenlik gibi özelliklere sahiptir. R410A'nın dielektrik dayanımı aynı basınç şartları altında havanınkinden iki-üç kat daha büyüktür ve 2-3 atm'de yalıtım yağı ile karşılaştırılabilir. R410A gazı renksiz, kokusuz ve zehirli olmayan bir gazdır.

Transformatör yüklendikçe, sargı sıcaklığının bir sonucu olarak pozitif gaz basıncı bir dereceye kadar artmaktadır. Artan bir gaz basıncı, doğal gaz dolaşımını artırmaya yardımcı olmakta ve sargıların soğumasına katkıda bulunmaktadır.

Transformatörün sargıları ve çekirdeğin 50 kVA dereceye kadar soğutulması doğal hava sirkülasyonu ile elde edilebilir. Soğutma işlemi, transformatör tankı içindeki doğal taşıma (konveksiyon) ile sağlanır. Doğal taşımanın, önerilen tasarım için ilave soğutma bileşenleri gerektirmeyen transformatörü soğutmak için yeterli olduğu düşünülmektedir. Değerleri 50 kVA'dan yüksek olan transformatörler için doğal taşıma çok etkili olmamaktadır.

Şekilde 3.13'te görüldüğü üzere, tankın içinde yüksek basınç ve homojen gaz dağılımına izin vermek için genel tasarım silindir şeklindedir. Transformatör çekirdeği ve sargılar R410A gazı ile hem yalıtılmakta hem de soğutulmaktadır. Transformatör tankının ve soğutma elemanlarının tasarımı yağlı transformatörlerde olduğu gibidir

Tank hermetik yapıdadır ve dokunuş için güvenlidir. YG girişleri geçit izolatörü tipidir, AG girişleri ise çubuk tip geçit izolatörleridir. Herhangi bir nedenle bir R410A gaz kaçağı meydana gelirse, inert bir gaz olduğu ve yanıcı olmadığı için tehlike en aza indirilir. İner gaz veya âtil gaz, belirli şartlar altında kimyasal reaksiyona girmeyen bir gazdır. İner gazlar, genel olarak istenmeyen kimyasal reaksiyonların numuneyi etkilemelerini önlemek için kullanılmaktadır (Ozgonenel, vd., 2016).

### 3.3.3. Çekirdek

Gaz izoleli transformatörün çekirdek yapısıyla yağlı transformatörlerin çekirdek yapısı aynıdır. Gaz yalıtımlı transformatörlerdeki soğutma kanalları yağlı transformatörlerinkine oranla soğutma karakteristiklerinden kaynaklı olarak daha çoktur.

### **3.3.4. Sargılar**

R410A gazının darbe oranı, yani yıldırım darbe gerilimi ile AA gerilim arasındaki dielektrik oran yalıtım yağinkinden küçüktür. İzolasyon tasarımının yıldırım darbe dayanım gerilimine göre tasarlanması gerekmektedir. 66kV ve üzerindeki gerilim sınıfları için, yıldırım darbe varlığında iyi bir potansiyel dağıtımı olan ara sargılar kullanılır (Eren, 2008).

İletken olarak kullanılan bakır tellerde kaplama olarak, plastik film kullanılır. Bunun sebebi, yüksek hava sıkıştırılmalı film elemanları, gaz içerisinde yüksek yalıtım mukavemetine sahiptir. En çok kullanılan film türü polyethlene terephthalatedir. Bu film yüksek mekanik mukavemet yanında dielektrik ve ısı mukavemetine de sahiptir, aynı zamanda endüstriyel malzemelerde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

### **3.3.5. Tank Gaz Basıncı**

Gaz basıncı ne kadar fazla olursa, o kadar iyi yalıtım ve soğutma karakteristiği elde edilir. Fakat bu durum birtakım zorlukları beraberinde getirir çünkü yüksek basınç demek yüksek basınca dirençli, mukavemeti sağlam bir tank ve soğutucu ihtiyacı demektir, bu da tankta fazla ağırlık ve şekilsel değişikliğe sebep olur. Bu nedenle yüksek basınçlı modeller için oval veya silindirik tanklar kullanılmaktadır.

Genellikle gaz basıncı (20 °C de) düşük gaz basınçlı modeller için 1.18 atm-1.38 atm'dir ve yüksek gaz basınçlı modeller için 3.45 atm-3.95 atm'dir (Cui, et al., 2009). Düşük gaz basınçlı modeller için yağlı transformatörlerdeki gibi kare tanklar kullanılır, yüksek basınçlı modeller için ise oval veya silindirik tanklar kullanılır. Her ülke için izin verilen basınç değerleri farklılık gösterir ve bu durum seçilecek tank için göz önünde bulundurulmalıdır. R410A gazı sıcaklık ile genişir ve sıkışır fakat bu durum basınç değişiklikleri ile absorbe edilir.

## **3.4. Transformatörün COMSOL Ortamında Modellenmesi**

COMSOL programı; elektrik, kimya, matematik, ısı ve kütle iletimi, katı hal ve akışkanlar mekaniği vb. alanlarda, disiplinler arası SEY kabiliyeti ile ürün geliştirme için tasarlanmış güçlü bir yazılımdır. Geometri tanımları, ağ yapısını oluşturma, fizik ayarları, çözüm ve sonuçların görüntülenmesi gibi benzetim yazılım araçları tüm modelleme adımlarını bütünlük olarak sunmaktadır. Model oluşturma süreci, önceden tanımlı fizik ara yüzleri sayesinde hızlıdır ve akış problemlerinden ısı taşınımına, yapısal mekanikten elektromanyetik analizlere kadar geniş bir kapsama

sahiptir. Malzeme özellikleri, kaynak terimler ve sınır şartları alan değişkenlerinin fonksiyonları olarak atanabilmektedir. Farklı fizik seçme ve ara ilişkileri atama imkânı her aşamada mevcuttur. Dahası, kısmi türevli diferansiyel ara yüzleri ile denklemler genişletilebilir veya ileri seviyede ilişkilendirilebilmektedir.

Tezin benzetim çalışmaları için COMSOL Multiphysics 5.2a programı kullanılmıştır. Bu yazılım, iki ve üç boyutlu modeller oluşturmak, modellere uygulanan gerilimler ve sıcaklıklardaki değişikliği benzetmek ve değişimlerin modellerin boyutları üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmıştır.

Bu çalışmanın en önemli adımı, karmaşık 2B ve 3B transformatör modellerinde homojen ve homojen olmayan elektrik alanlarında tank basıncı, ısı etkileri ve delinme gerilim eğrilerini elde etmektir. Elektrik alan dağılımının düzgün olmadığı yerlerde kısmi deşarjların meydana geldiği ve gerilim seviyesi yükseldiğinde ciddi kısa devre akımlarının meydana geldiği bilinmektedir. R410A ortamında istenmeyen kısmi deşarjları önlemek için, gaz basıncı mümkün olduğunca uygun şekilde seçilmelidir.

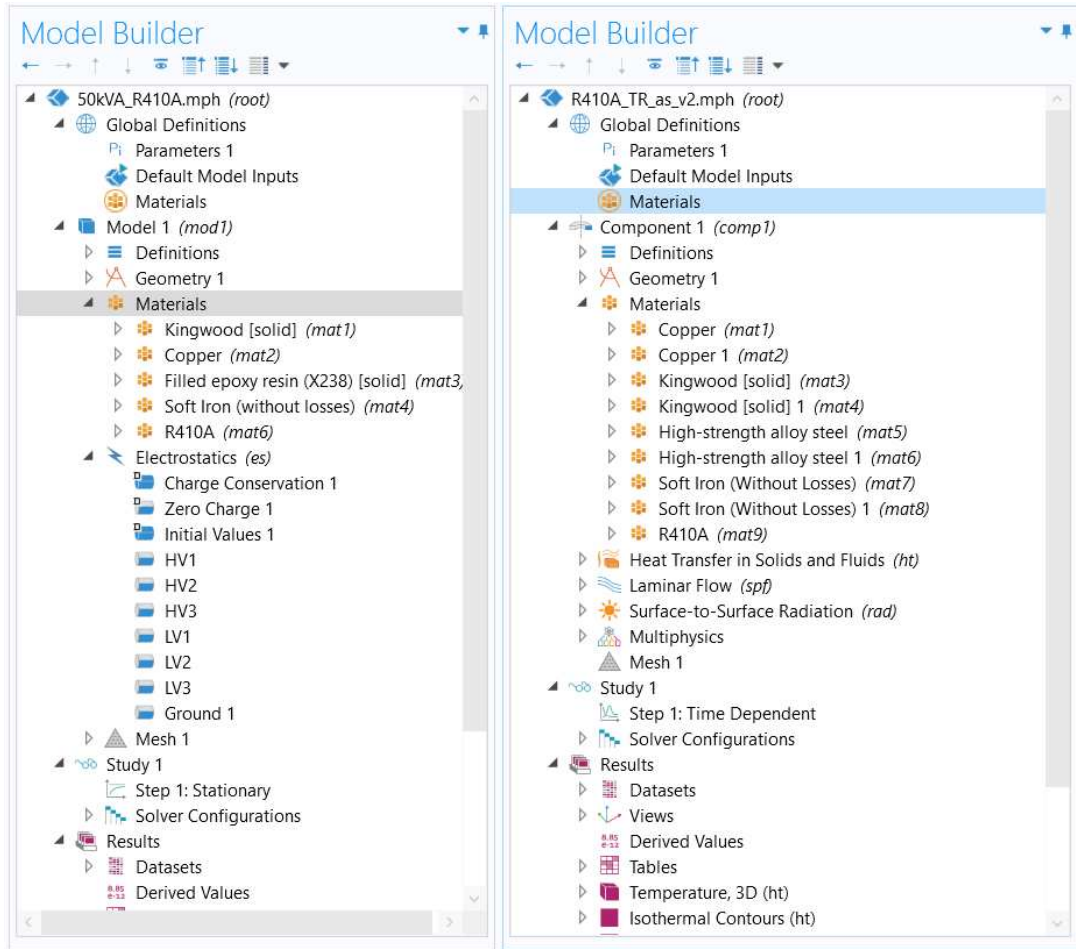
Tezin benzetim çalışmaları, tasarlanan R410A GYT'nin elektrostatik, darbe gerilimleri ve ısı analizlerini kapsamaktadır. Elektrostatik ve darbe gerilim analizleri için 3B modelleme, ısı analiz için ise 2B eksenel model kullanılmıştır. Elektrostatik analiz için “sabit (stationary)” bir çözüm, darbe gerilimleri ve ısı analiz için ise “zamana bağlı çözümler (time dependent)” çözümler kullanılmıştır. Elektrostatik ve ısı analizlerin tamamı sonlu eleman yöntemlerine dayanan COMSOL programının çeşitli modüllerinde gerçekleştirilmiştir.

COMSOL ortamında, model ağacı aracılığıyla geometrinin uzay boyutunu, fizik ara yüzünü ve modelin çalışma türünü belirlemek mümkündür. Benzetim sonuçlarının gerçeğe yakın çıkması için programa sistemin ayrıntılı bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Benzetim ve analizlerin bütün adımları model ağacı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Elektrostatik ve ısı analizler için oluşturulan model ağacı iskeleti Şekil 3.15'te verilmiştir.

COMSOL'da modellemenin ilk adımı model ortamının kurulmasıdır. Bu aşamada analiz türüne göre kullanılacak modül/modüller seçilir ve ardından geometri oluşturulur. Malzeme özelliklerinin tanımı, sınır koşulları, ağı oluşturulması ve çalışma kurulumu süreci bir sonraki adımı oluşturur. Bunların kurulumunda belirli bir sıra yoktur, ancak tüm geometri tanımlandıktan sonra ve modelin benzetim sürecinden

önce yapılmalıdır. Benzetim çalışmasını etkileyen tüm madde ve parametrelerin eksiksiz tanımlanması sonuçların doğruluğu açısından çok önemlidir. Model parametrelerinin tanımı, temel parametrelerden biri değiştirildiğinde nihai tasarımın kolayca ayarlanabilmesi için pratik bir düzenlemedir.

R410A GYT'nin COMSOL ortamında 2B ve 3B analizler için modellenmesi aşamaları alt başlıklar halinde ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Benzetim çalışmalarının tamamında, analiz sonuçlarının detaylı görüntülenmesi için tank katmanı gizlenmiştir.



Şekil 3.15. Elektrostatik ve ısı analiz için COMSOL'da oluşturulan model ağacı

### 3.4.1. Elektrostatik Analiz

#### 3.4.1.1. Çözüm Modülünün Belirlenmesi

Bu kısımda, benzetim çalışmasının matematiksel hesaplamaların yapılması için gerekli çözüm modülü model ağacına eklenerek, çözüme yönelik ayarlamalar yapılır. COMSOL programının çözümlenme modülleri on iki ana başlık altında toplanmış olup, her modülde kendine özgü alanları kapsayan alt çözümlenme modülleri bulunmaktadır.

Bu çalışmada, “AA/DA (AC/DC)” ana modülünün “Elektrik Alanlar ve Akımlar (Electric Fields and Currents)” dalı altında bulunan “Elektrostatik (Electrostatics)” fizik türü kullanılmıştır. AA/DA modülde elektrik alan ve akımı, elektrostatik ve manyetik alanla ilgili özel hesaplamaların yapılabildiği çözümlene modülleri mevcuttur. Electrostatic modülü yalıtkan ortamdaki elektrik alanı, elektrik yer değiştirme alanı ve dielektriklerdeki potansiyel dağılımları hesaplamak için kullanılmaktadır.

Elektrik alan analizi modelleme denklemleri, Maxwell denklemlerine dayanmaktadır. Bu kısımdaki denklemler statik çözümlene yapmaktadır. AA/DA ara yüzleri, başlangıç ve sınır koşullarında Maxwell denklemlerinin diferansiyel denklemlerini formüle eder ve bu denklemler SEY kullanılarak çözümler. Elektrik alan analizinde tanımlanan malzemelerin bağıl dielektrik sabitlerinin programa girilmesi yeterlidir. Çözümlenmede kullanılan denklemler (3.8) ’da verilmiştir.

$$\begin{aligned} E &= -\nabla V \\ \nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r E) &= \rho_v \\ D &= \varepsilon_0 \varepsilon_r E \end{aligned} \quad (3.8)$$

Burada;  $E$  elektrik alan,  $\nabla V$   $S$  yüzeyi tarafından çevrelenen  $v$  hacminin diferansiyel elemanı,  $\varepsilon_0$  boşluğun dielektrik sabiti,  $\varepsilon_r$  malzemenin dielektriği,  $\rho_v$  serbest elektrik yükü yoğunluğu,  $D$  elektrik yer değiştirme alanıdır.

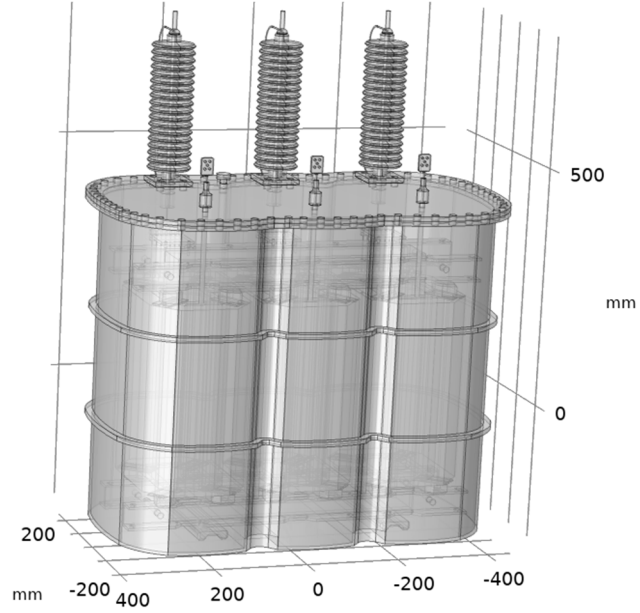
Modelin benzetime hazırlanma sürecini geometrik tasarım, madde tanımlama, ağ oluşturma, çözücü yapılandırma ve sonuç analizleri için grafik alma işlemleri takip eder.

#### 3.4.1.2. Geometrinin Oluşturulması

Benzetim çalışmasının diğer bir aşaması geometrinin COMSOL ortamında tasarımıdır. Geometrik çizimler programda 1B, 2B ve 3B olarak çizilebildiği gibi, farklı programlarda hazırlanan geometrik modeller de program sayfasına aktarılabilir. Bu çalışmada, daha önceden AutoCAD ortamında gerçeğinin bire bir ölçeğinde çizilmiş olan dağıtım transformatörünün 2B ve 3B modeli “.dxf” dosyası olarak kaydedilmiş ve COMSOL program sayfasında “Geometri (Geometry)” sekmesi altında bulunan “İçe Aktarma (Import)” komutu kullanılarak program sayfasına aktarılmıştır. Benzetim çalışmasında elektrostatik analiz için kullanılan 3B çizimi

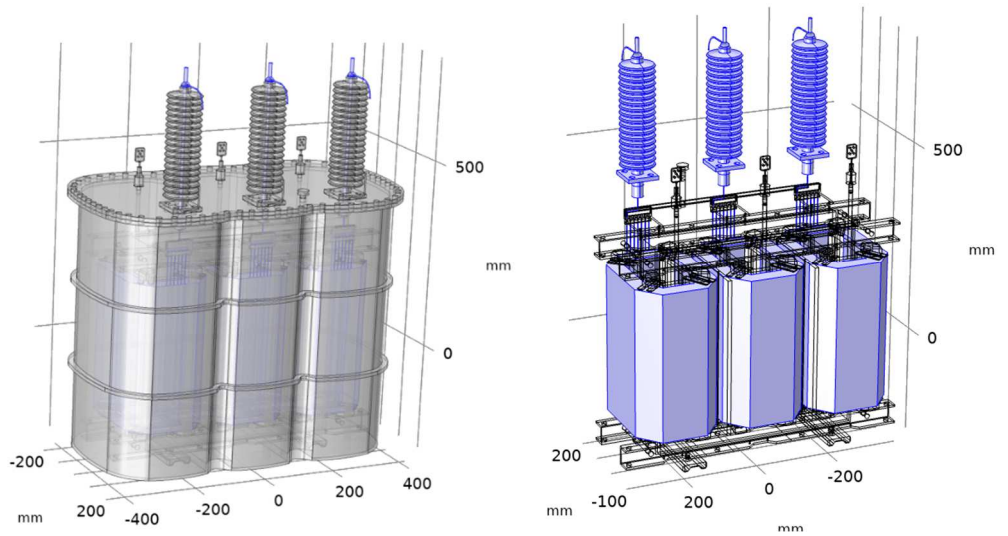
Şekil 3.16’da verilmiştir.

AutoCAD ortamında çizilen dağıtım transformatörünün 3B çizimleri COMSOL ortamına aktarıldıktan sonra, model oluşturma sırasında ön tanımlamalar yapılır. “Tanımlama (Definition)” bölümünde bulunan komutlar kullanılarak; tank, YG-AG sargıları, R410A, çekirdek, tahta takoz gibi transformatörü oluşturan her bir parça program üzerinde tanımlanmıştır.

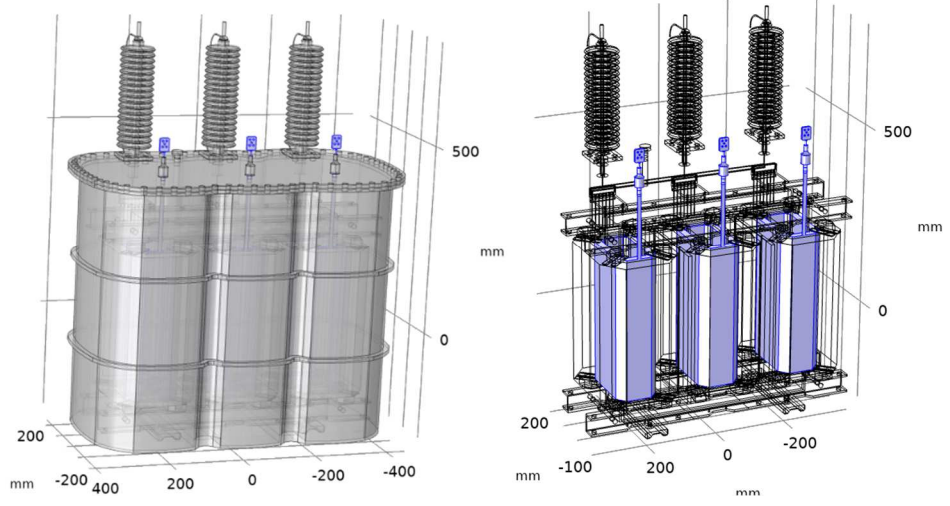


Şekil 3.16. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin 3B görünümü

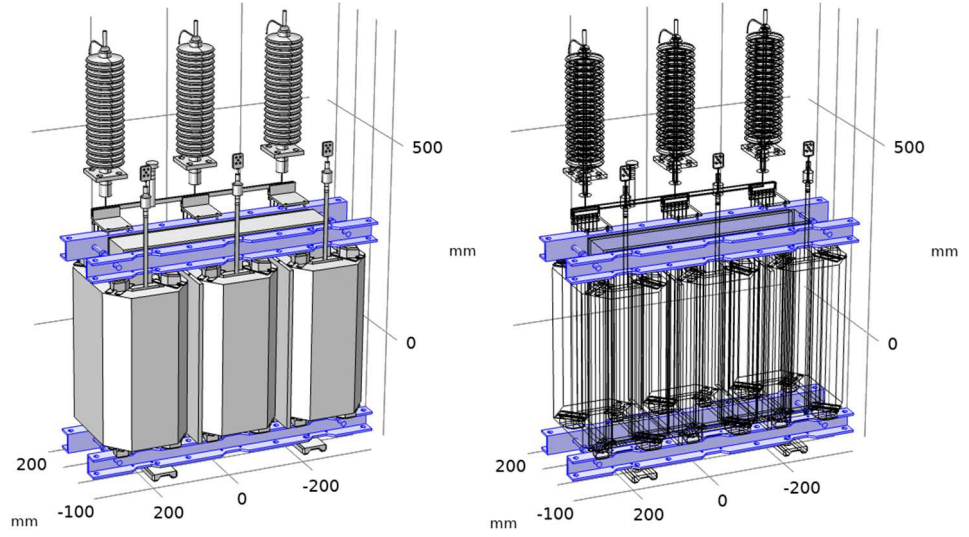
Tanımlamada kullanılan transformatör parçalarına ait geometriler Şekil 3.17-3.22’de verilmiştir.



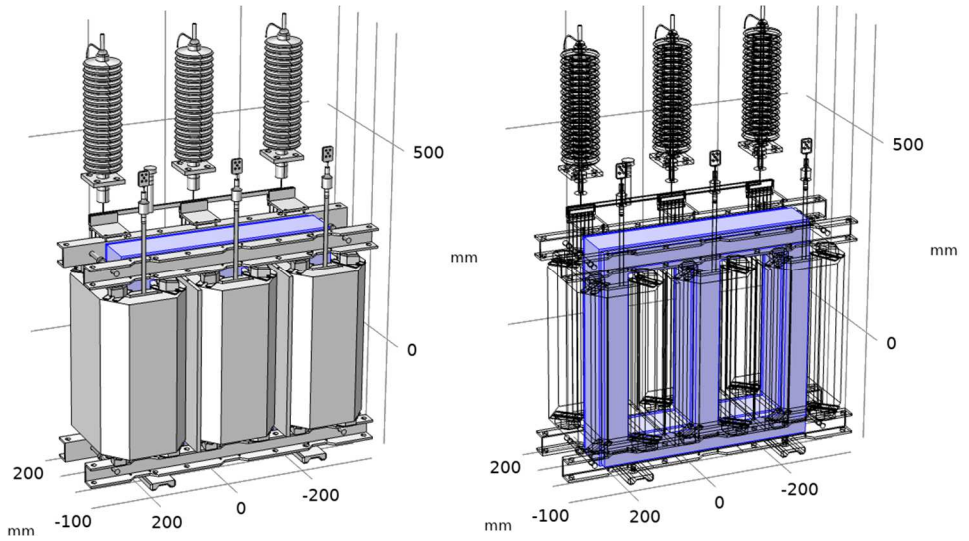
Şekil 3.17. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin YG sargı, buşing ve bağlantılarının tanımlanması



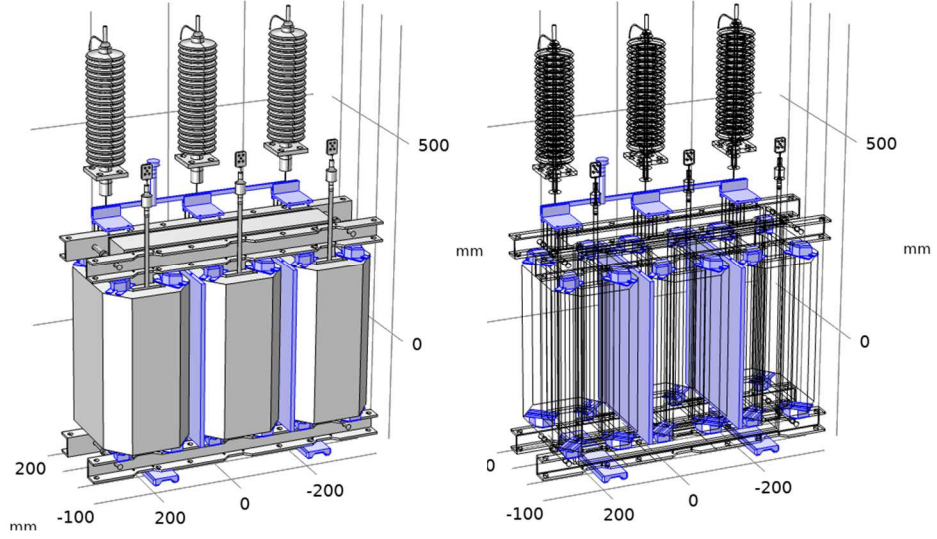
Şekil 3.18. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin AG sargı ve buşinglerinin tanımlanması



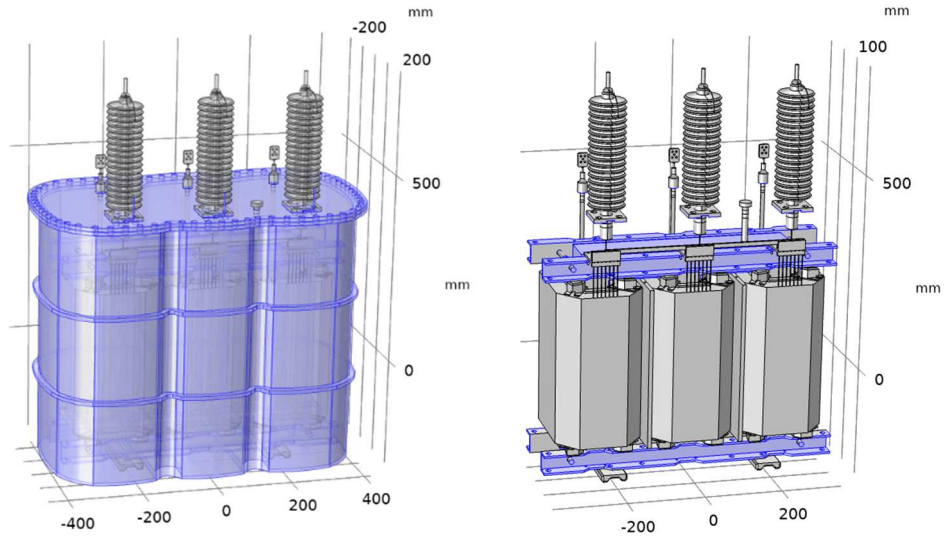
Şekil 3.19. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin boyunduruk tanımlanması



Şekil 3.20. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin çekirdeğinin tanımlanması



Şekil 3.21. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin ahşap kısımlarının tanımlanması



Şekil 3.22. Elektrostatik analiz için R410A GYT'nin topraklanan kısımlarının tanımlanması

### 3.4.1.3. Malzeme Tanımlama

Üç boyutlu geometriye ait tüm parçalar tanımlandıktan sonra, malzemelerin tanımlanmasına geçilmiştir. Programda, geometrik çizimler için madde tanımlaması “Malzemeler (Materials)” sekmesinden yapılır. GYT'nin tasarımında kullanılan malzemelerin fiziksel özelliklerine ait parametreler Tablo 3.6'da yer alan tabloda toplu olarak verilmiştir.

Tablo 3.6. GYT'yi oluşturan malzemelerin fiziksel özelliklerine ait parametreler

İsim	Değer	Tanım
<b>h0</b>	100 W/(m <sup>2</sup> ·K)	ısı iletim katsayısı
<b>power</b>	25981 W	sargılarda ısı kaynağı
<b>p0</b>	3,0398E5 Pa	başlangıç basıncı, 1.5 atm
<b>rho_çelik</b>	7500 kg/m <sup>3</sup>	yoğunluk, çelik
<b>rho_ahşap</b>	790 kg/m <sup>3</sup>	yoğunluk, ahşap
<b>rho_bakır</b>	8960 kg/m <sup>3</sup>	yoğunluk, bakır
<b>rho_demir</b>	7870 kg/m <sup>3</sup>	yoğunluk, demir
<b>k_çelik</b>	16 W/(m·K)	ısıl iletkenlik, çelik
<b>k_ahşap</b>	0,17 W/(m·K)	ısıl iletkenlik, ahşap
<b>k_bakır</b>	401 W/(m·K)	ısıl iletkenlik, bakır
<b>k_demir</b>	80 W/(m·K)	ısıl iletkenlik, demir
<b>Cp_çelik</b>	452 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, çelik
<b>Cp_ahşap</b>	1674 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, ahşap
<b>Cp_bakır</b>	387 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, bakır
<b>Cp_demir</b>	450 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, demir
<b>eps_çelik</b>	0,44	yüze emisyonu, çelik
<b>eps_ahşap</b>	0,95	yüze emisyonu, ahşap
<b>eps_bakır</b>	0,03	yüze emisyonu, bakır
<b>eps_demir</b>	0,44	yüze emisyonu, demir
<b>rho_epoksi</b>	1200 kg/m <sup>3</sup>	yoğunluk, epoksi
<b>k_epoksi</b>	1,66 W/(m·K)	ısıl iletkenlik, epoksi
<b>Cp_epoksi</b>	1000 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, epoksi
<b>eps_epoksi</b>	0,81	yüze emisyonu, epoksi
<b>rho_yağ</b>	875 kg/m <sup>3</sup>	yoğunluk, yağ
<b>k_yağ</b>	0,125 W/(m·K)	ısıl iletkenlik, yağ
<b>Cp_yağ</b>	1860 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, yağ
<b>eps_yağ</b>	2,2	yüze emisyonu, yağ
<b>gamma_yağ</b>	3	özgül ısı oranı, yağ
<b>M_yağ</b>	210 kg/mol	molar kütle, yağ
<b>Cp_dv</b>	2,2E-5 m <sup>2</sup> /s	dinamik viskozite, yağ
<b>eps_SF6</b>	1,0204	yüze emisyonu, sf6
<b>rho_SF6</b>	6,2569 kg/m <sup>3</sup>	yoğunluk, sf6
<b>k_SF6</b>	0,01205 W/(m·K)	ısıl iletkenlik, sf6
<b>Cp_SF6</b>	690 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, sf6
<b>gamma_SF6</b>	1.1074	özgül ısı oranı, sf6
<b>M_SF6</b>	0,14606 kg/mol	molar kütle, sf6
<b>Cp_dv</b>	1,3771E-5 Pa·s	dinamik viskozite, sf6

Tablo 3.6 (devam)

<b>eps_R410A</b>	0,99	yüze emisyonu, R410A
<b>rho_R410A</b>	4,1742	yoğunluk, R410A
<b>k_R410A</b>	0,0157 W/(m·K)	ısı iletkenlik, R410A
<b>Cp_R410A</b>	840 J/(kg·K)	ısı kapasitesi, R410A
<b>gamma_R410</b>	1,175	özgül ısı oranı, R410A
<b>M_R410A</b>	72,6	molar kütle, R410A
<b>Cp_dv</b>	1,385E-5 Pa·s	dinamik viskozite, R410A

Çizilen model temelde beş farklı malzemeden oluşturulmuş, geometriyi oluşturan her bir kısma ilgili madde tanımlaması yapılmıştır. Transformatörünün yalıtımında kullanılan malzemeler R410A, SF6 ve yağ maddeleri kullanılmıştır.

COMSOL malzeme kütüphanesinde, doğrudan eklenebilen birçok yerleşik malzeme mevcuttur. Program, binlerce maddeyi özellikleri ile birlikte içinde barındırmaktadır. Ancak, çalışmanın yalıtım malzemesi olan R410A gazı henüz çok güncel bir gaz olduğu için programda tanımlı değildir. R410A gazı programda “Boş Malzeme (Blank Material)” sekmesi kullanılarak tanımlanmıştır.

#### 3.4.1.4. Sınır Koşullarının Tanımlanması

Analizi yapılacak geometrinin ve kullanılan materyallerin gerekli tanımlamaları yapıldıktan sonraki adım sınır koşullarının programa tanımlanmasıdır. Sınır koşullarının belirlenmesi, mevcut çeşitli seçenekler aracılığıyla, modelin tasarımı sırasında yapılan fiziksel ve geometrik varsayımlara en uygun olanı seçilerek yapılır. Sınır koşulları iki düzeyde belirlenir: sınır yüzeyleri ve kenarlar için. Bu çalışmada, model ortamına “Elektrostatik” fiziği eklenmiş olup, sınır ve başlangıç koşulları, fiziğe ait alt sekmelerden tanımlanmıştır. Elektrostatik arabirimi eklendiğinde, model ağacında aşağıdaki varsayılan düğümler otomatik olarak eklenir:

- **Yük Korunumu (Charge Conservation)** : Yük korunumu düğümü, elektrik yer değiştirme alanı için Gauss yasasına göre yük korunumu denklemlerini ekler. Dielektrik model ve bağlı geçirgenlik gibi ilişkili özellikleri tanımlamak için bir ara yüz sağlar. Model ağacı, benzetim çalışma koşulları altında, kullanılan malzemelerin nasıl davranacağına ve malzeme özelliklerinin nasıl yorumlanacağına dielektrik modele göre karar verir. Ortamın makroskopik özelliklerini (elektrik yer değiştirme D'yi elektrik alanı E ile ilişkilendirerek)

ve bağıl geçirgenlik gibi uygulanabilir malzeme özelliklerini tanımlamak için kullanılan denklem (3.8)'de verilmiştir.

- Varsayılan Sınır Koşulu (Zero Charge) : Varsayılan sınır koşulu düğümü, kapalı bölge tanımlamada kullanılır. Sonlu elemanlar yönteminin uygulanabilmesi için kapalı bir bölgeye gereksinim vardır. Bu özellik, yapılacak analiz için oluşturulan modelin kapalı bir bölge içerisine alınması amacı ile kullanılır.
- Başlangıç Değerleri (Initial Values) : Başlangıç değerleri düğümü, geçici bir benzetim için bir başlangıç koşulu olarak hizmet edebilecek elektrik potansiyeli için başlangıç değerleridir. Bu değer 0V olarak ayarlanmıştır.

Bunların dışında, sınır koşullarını uygulayan diğer düğümlerden “Elektrik Potansiyel (Electric Potential)” ve “Toprak (Ground)” düğümleri de model ağacına eklenmiştir. Sınır koşulu tanımlanırken, potansiyel değeri atanacak sınır yüzeyi veya noktası belirlenir ve potansiyel değeri volt olarak yazılır. Bu çalışmada sınır koşulu olarak, Yüksek Gerilim (YG) ve Alçak Gerilim (AG) sargılarına (Şekil 3.13-3.14) faz-toprak geriliminin tepe değeri “elektrik potansiyel” olarak tanımlanmıştır. Transformatörün gerilimi 34,5/0,4 kV olduğu için faz gerilimleri sırasıyla denklem (3.9)'deki gibi olup, anlık olarak, gerilimin tepe değere ulaştığı 5ms için tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}U_A &= \frac{34,5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t) \\U_B &= \frac{34,5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\U_C &= \frac{34,5 \text{ kV}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})\end{aligned} \quad (3.9)$$

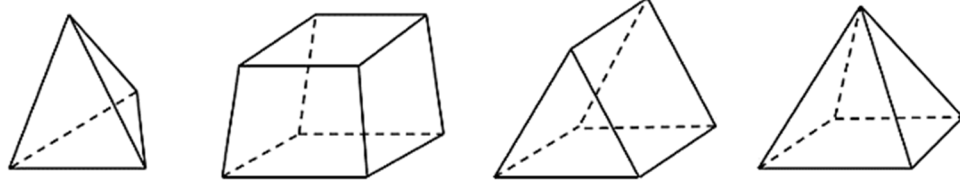
Burada transformatörün tankı ve boyunduruk kısımları ise toprak potansiyelinde oldukları için “toprak” sınır koşulu seçilmiştir. Tablo 3.7'de elektrostatik analizde kullanılan sınır koşulları toplu olarak verilmiştir

Tablo 3.7. Elektrostatik analiz için sınır koşulları

Sınır Parametreleri	Seçilen Bölge	Atanan Değer (V)
Elektrik Potansiyel	YG1	50912
	YG2	-25456
	YG3	-25456
	AG1	565,6854
	AG2	-282,8427
	AG3	-282,8427
Toprak	Boyunduruk ve Çekirdek	0

### 3.4.1.5. Ağ Yapısının Oluşturulması

Benzetim modelinin uygulanması sırasında en önemli kısımlardan biri de ağın oluşturulmasıdır. Benzetimi yapılacak geometrinin, sonlu elemanlar yöntemine uygun olarak, bölge elemanlarının ve sınır elemanlarının çok sayıda alt bölgeye ayrılmasına *ağ oluşturma (meshing)* adı verilir. Oluşturulan ağın yapısı, analizin gerçekleştirilme süresini ve sonucun kalitesini etkilemektedir. COMSOL’da ağ oluştururken kullanılan dört farklı 3B eleman türü vardır: dörtyüzlü (tetrahedral), altıyüzlü (hexahedral, tuğla), üçgen prizma (pentahedral) ve piramit. Ayrıca, son derece iyi (extremely fine)’ ile son derece kaba (extremely coarse) arasında değişen dokuz öge boyutu ayarı vardır (Şekil 3.23).



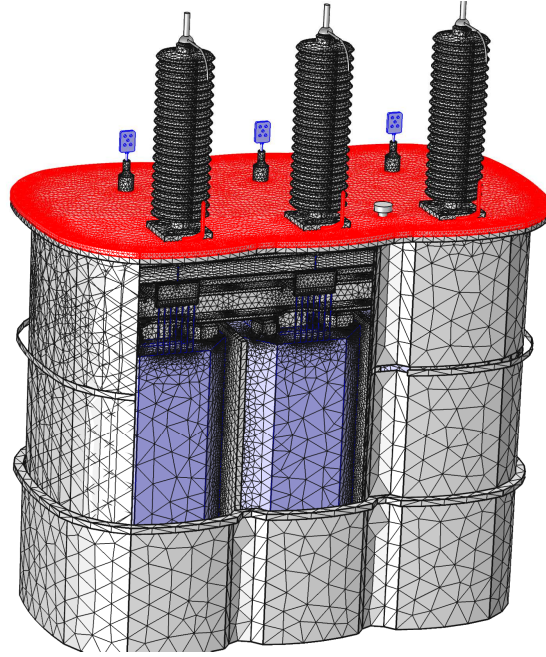
Şekil 3.23.Farklı eleman türlerinin görüntüleri. Soldan sağa: dört yüzlü, altı yüzlü, üçgen prizma ve piramit (Fairclough, 2016)

Herhangi bir 3B modeli sonlu elemanlarına ayırmak için, bu dört eleman tipi çeşitli kombinasyonlarda kullanılabilir. 2B modeller için ayrıca üçgen ve dörtgen elemanlar mevcuttur.

Dörtyüzlü elemanlar, şekle veya topolojiye bakılmaksızın herhangi bir 3B’ye uygulanabilir ve sorunsuzca sonlu elemanlara ayrılabilir. Bu eleman tipi, analiz çalışmalarına başlarken genellikle ilk tercih olabilmektedir.

Altı yüzlü, üçgen prizma ve piramit eleman türü ise yalnızca uygun durumlarda kullanılmalıdır. Bu eleman tiplerinin belirli bir geometriyi tam olarak sonlu elemanlara ayırıklaştırmaya yetmediği bilinmektedir. Bu nedenle bu tipteki elemanları kullanmadan önce geometrinin uygun olup olmadığına karar verilmelidir. Piramit elemanlar sadece altı yüzlü elemanların kendileri arasında eleman örgüsü oluşturduğu durumlarda kullanılmaktadır (Fairclough, 2016)

Alan analizlerinin doğru ve hassas bir biçimde yapılabilmesi için geometrinin yeterli sayıda sonlu elemanlar yardımı ile ayrıklaştırılması gerekmektedir. Model üzerinde oluşan ağ (mesh) sayısı arttıkça elde edilen analizin ve buna bağlı benzetimin değeri o derece gerçeğe yakın olur. Bir model için oluşan başlangıç düğüm miktarı genelde yeterli değildir. Daha sonra her eleman, alan çözümü için yeterli küçük bir bölgeye ayrılır ve ağ miktarı artırılarak doğru çözüme yaklaşılr. Yetersiz olarak oluşturulan ağlarda, analiz süresi düşük olmakla beraber sonuçlar tutarsızlaşmaktadır. Düğüm sayısı artırıldığında ise tutarlı ve hassas sonuçlar elde edilirken, hesaplama süresi uzamaktadır (Kazemighotlou, 2013). Aslında, bir sonlu eleman probleminin kurulması ve çözülmesi söz konusu olduğunda ağ oluşturma, en yoğun bellek gerektiren adımlardan biridir. Tasarlanan GYT'in COMSOL ortamında modellenen ağ yapısı Şekil 3.24'te verilmiştir.



Şekil 3.24. 50kVA R410A GYT'nin COMSOL programı ile 3B ağı görünümü

GYT'nin 3B modeli ağ yapısı belirlenirken, gerilim stresi altındaki parçalar ayrıntılı olarak ağa bölünmüştür. Bu parçalardan R410A gazı için dörtyüzlü ağ tipi ve daha ince (finer) ağ yapısı kullanılmıştır. YG-AG sargıları, YG-AG burçları, çekirdek, boyunduruk, ahşap için ince (fine) ağ yapısı kullanılmıştır. Daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için kademe değiştirici ve bağlantıları daha ince (finer) ölçekte ağa bölünmüştür.

#### **3.4.1.6. Benzetimin Çalıştırılması**

İş akışının tüm adımları ayrıntılı bir şekilde oluşturulduktan sonra benzetimi çalıştırmak ve daha önce tanımlanan problemi fiilen çözmek mümkündür. Benzetim öncesi gerekli tüm ayarlar tamamlandıktan sonra model ağacındaki “Çalışma (Study)” sekmesinden “Hesaplama (Compute)” komutu verilerek sonuçlar elde edilir. “Çalışma” sekmesi model ortamının kurulmasında tanımlanan çalışma türünün yönetilmesini ve kontrolünü sağlayan sekmedir. Daha önce belirtildiği gibi, elektrostatik analiz için 3B modelleme ve sabit bir çözüm kullanılmıştır.

Benzetim sürecinin en son adımı, sonuçların sonradan işlenmesidir. COMSOL arabirimi aracılığıyla çeşitli seçenekler mevcuttur. Ancak, sonuçlar uygun formattaki dosyalarda dışa aktarılabilir ve diğer yazılım paketleri (örn. MATLAB) aracılığıyla daha fazla çalışma ve hesaplamalar için kullanılabilirler (Michalarakis, 2016). Yapılan benzetim çalışmalarına ait elde edilen grafikler ve yorumları Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

#### **3.4.2. Darbe Gerilimi Altında Analiz**

Darbe analizleri için “AA/DA” ana modülünün “Elektrik Alanlar ve Akımlar” dalı altında bulunan “Elektrostatik” fizik türü kullanılmıştır. Çözüm modülünün belirlenmesi, geometrinin oluşturulması, malzeme tanımlama ve ağ yapısının oluşturulması süreçleri elektrostatik analizdeki gibidir. Benzetim analizleri R410A GYT'nin 3B modeli üzerinde, zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.8' de yıldırım darbe analizinde kullanılan sınır koşulları verilmiştir. Anahtarlama darbe gerilimi analizinde kullanılan sınır koşulları Tablo 3.9' da verilmiştir. Elektrik potansiyel değerleri, gerilimin 10ms'deki anlık gerilim değerleri için tanımlanmıştır.

Tablo 3.8. Yıldırım darbe gerilimi analiz için sınır koşulları

Sınır Parametreleri	Seçilen Bölge	Atanan Değer (V)
Elektrik Potansiyel	YG1	0
	YG2	110000
	YG3	$34500*\sqrt{2}$
	AG1	0
	AG2	$-400*\sqrt{2}$
	AG3	$400*\sqrt{2}$
Toprak	Boyunduruk ve Çekirdek	0

Tablo 3.9. Anahtarlama darbe gerilimi analiz için sınır koşulları

Sınır Parametreleri	Seçilen Bölge	Atanan Değer (V)
Elektrik Potansiyel	YG1	0
	YG2	170000
	YG3	$34500*\sqrt{2}$
	AG1	0
	AG2	$-400*\sqrt{2}$
	AG3	$400*\sqrt{2}$
Toprak	Boyunduruk ve Çekirdek	0

### 3.4.3. Isıl Analiz

#### 3.4.3.1. Çözüm Modülünün Belirlenmesi

Bir sistemin veya tasarımın gerçek dünyadaki davranışını sanal olarak incelemek için, ısı iletimi için aynı anda birden fazla fiziksel etkinin incelenmesi gerekir. COMSOL yazılımının çoklu fizik modelleme yetenekleriyle, fizik genelinde tutarlı bir iş akışını izleyerek tek bir benzetim ortamında eksiksiz ve kapsamlı analizler gerçekleştirilebilmektedir.

Bu çalışmada, “Isı İletimi (Heat Transfer)” ana modülünün altında bulunan “Katılarda ve Sıvılarda Isı İletimi (Heat Transfer in Solids and Fluids)” fiziği ile “Işıma (Radiation)” dalı altında bulunan “Yüzeyden Yüzeye Işıma (Surface-to-Surface Radiation)” fiziği ve “Akışkan Akışı (Fluid Flow)” ana modülünün “Tek Fazlı Akış (Single-Phase Flow)” dalı altında bulunan “Laminar Akış (Laminar Flow)” fiziği kullanılmıştır.

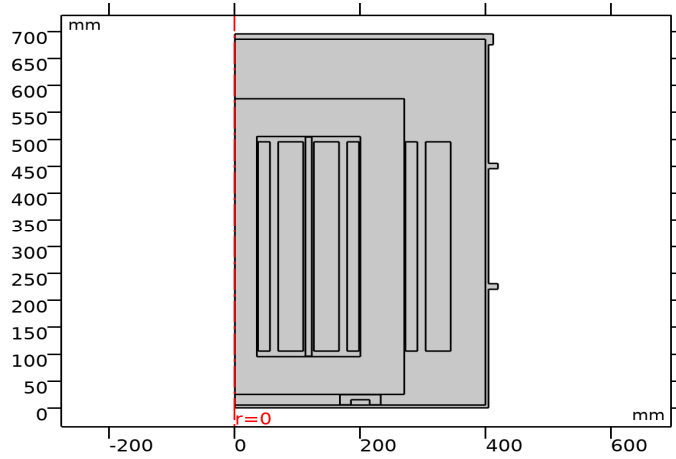
Isı iletim modülü, termal tasarımları ve ısı yüklerinin etkilerini araştırmak için kapsamlı bir dizi özellik içerir. Akışkanın termal özelliklerine ve akış rejimine bağlı olarak, konvektif veya kondüktif ısı iletimi baskın olabilir. Bir akışkan yoğunluğu sıcaklığa bağlı olduğundan, basınç terimi ısı denkleminde katkıda bulunur.

Yüzeyden yüzeye ışıma modülü, radyasyonla ısı transferini modellemek için kullanılır. Termal radyasyonu, ortamın radyasyona katılmadığı (saydam ortam) sınırlar ve dış ısı kaynakları arasında bir enerji transferi olarak ele alır. Yüzeyden yüzeye ışıma her zaman sabittir, ancak fizik ara yüzü tüm standart çalışma türleri ile uyumludur.

Laminer akış ara yüzü, laminer akış rejiminde tek fazlı bir akışkanın akışı için hız ve basınç alanlarını hesaplamada kullanılır. Bu akışlar doğal olarak kararsız hale gelme eğiliminde olduğundan, zamana bağlı çalışmalar kullanılmalıdır.

### 3.4.3.2. Geometrinin Oluşturulması

Benzetim çalışmasında ısıl analiz için kullanılan 2B aksel simetri çizimi Şekil 3.25'te verilmiştir. Isıl analiz için R410A GYT'nin 2B aksel modeli ve zamana bağlı çözümler kullanılmıştır.

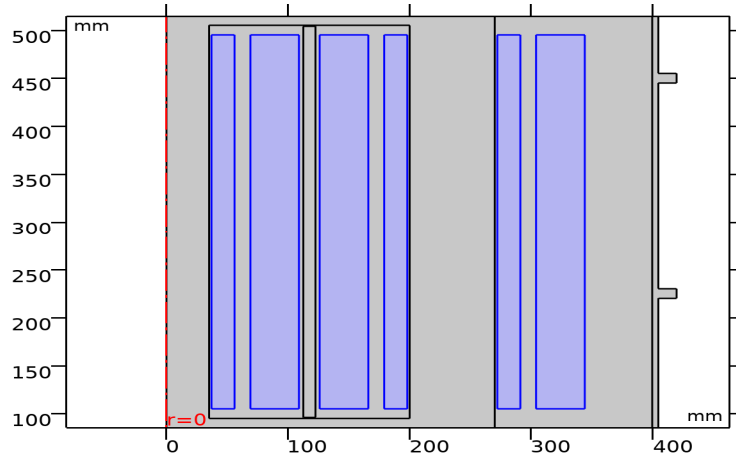


Şekil 3.25. Isıl analizi için R410A GYT'nin 2B aksel simetri görünümü

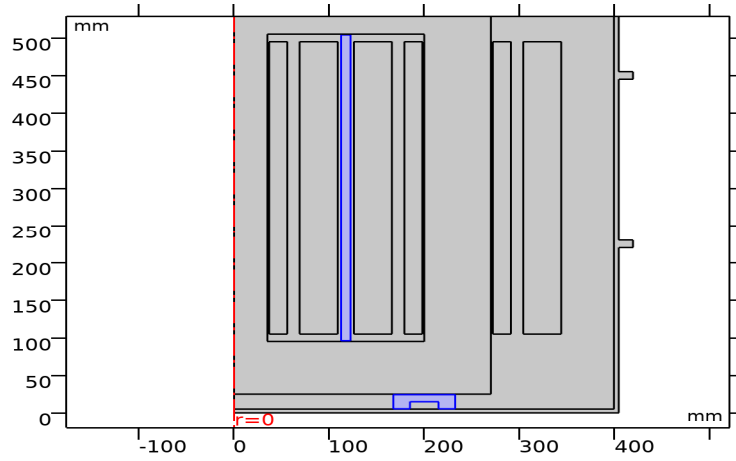
Bu çalışmada daha önceden AutoCAD ortamında gerçeğinin bire bir ölçeğinde çizilmiş olan dağıtım transformatorünün 2B modeli “.dxf” dosyası olarak kaydedilmiş ve COMSOL program sayfasında geometri sekmesi altında bulunan içe aktarma komutu kullanılarak program sayfasına aktarılmıştır.

AutoCAD ortamında çizilen transformatorünün 2B çizimleri COMSOL ortamına aktarıldıktan sonra, model oluşturma sırasında ön tanımlamalar yapılır.

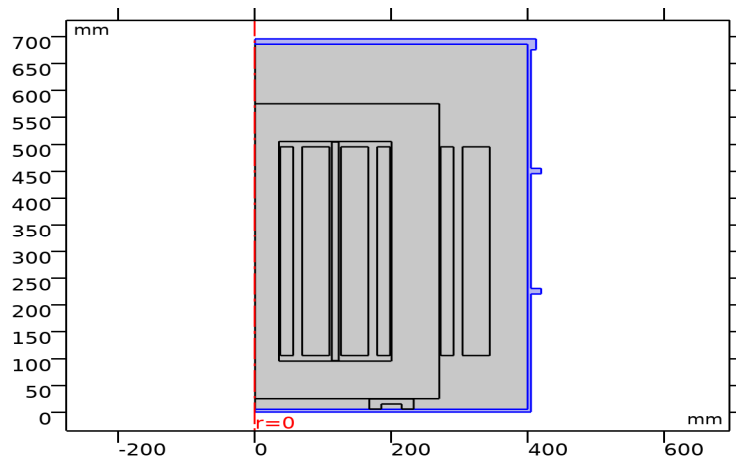
Tanımlamada kullanılan transformatör parçalarına ait geometriler Şekil 3.26-3.30'da verilmiştir.



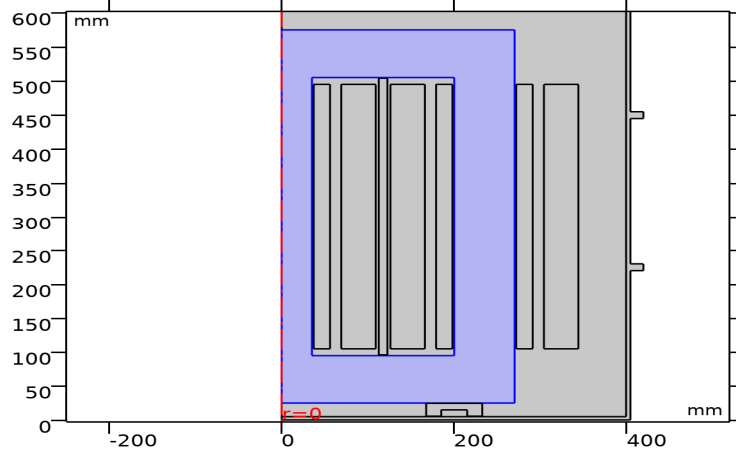
Şekil 3.26. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan bakır kısımlar (YG ve AG sargıları)



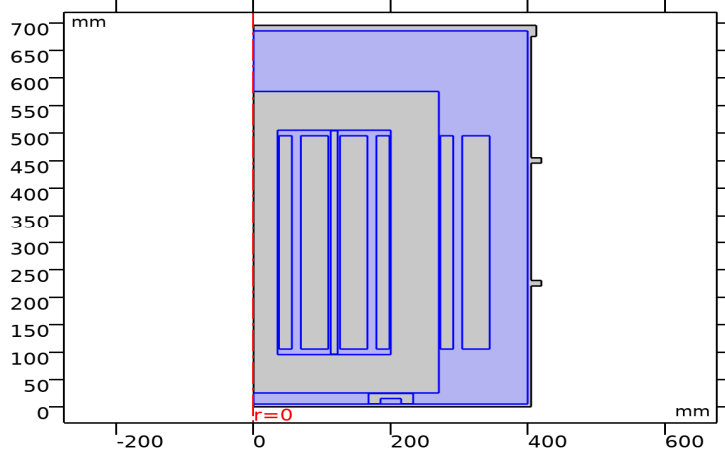
Şekil 3.27. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan tahta kısımlar



Şekil 3.28. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan yüksek mukavemetli alaşımlı çelik kısımlar



Şekil 3.29. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan yumuşak demir (kayıpsız) kısımlar



Şekil 3.30. Isıl analizi için 2B eksenel simetri modelinde tanımlanan R410A'lı kısımlar

### 3.4.3.3. Malzeme Tanımlama

Programda, geometrik çizimler için madde tanımlaması süreci Bölüm 3.4.1.3'te ayrıntılı olarak verilmiştir. R410A GYT'nin elektrostatik analizi için yalıtım ve soğumada kullanılan R410A gazına ait fiziksel özellikler Tablo 3.6'da verildiği gibi tanımlanmıştır. Ancak, R410A gazına ait parametreler sıcaklık ve basınç değerlerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden, ısıl analizlerde gerçeğe yakın veriler elde edebilmek için, gaza ait özellikler basınç-sıcaklık değişimine bağlı denklemler olarak elde edilmiştir. Tanımlanan parametreler ve elde edilen denklemler Tablo 3.10 ve Tablo 3.11'de verilmektedir.

Tablo 3.10. R410A gazına ait parametreler

<b>gamma_R410A</b>	1,175	özgül ısı oranı, R410A
<b>M_R410A</b>	72,585	molar kütle, R410A
<b>p1</b>	-1,049e-07	katsayı
<b>p2</b>	2,772e-06	katsayı
<b>p3</b>	-0,001708	katsayı
<b>p4</b>	1,915	katsayı
<b>rho_R410A</b>	4,1742	yoğunluk, R410A
<b>p5</b>	0,004244	katsayı
<b>p6</b>	0,01767	katsayı
<b>p7</b>	12,61	katsayı
<b>p8</b>	0,0008489	katsayı
<b>p9</b>	0,05353	katsayı
<b>p10</b>	12,63	katsayı

Tablo 3.11. R410A gazının elektriksel büyüklüklerine ait denklemler

<b>Name</b>	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
<b>Isıl iletkenlik</b>	$p5 \cdot T^2 + p6 \cdot T + p7$ [mW/(m·K)]	W/(m·K)
<b>Isı kapasitesi at constant pressure</b>	$p1 \cdot T^3 + p2 \cdot T^2 + p3 \cdot T + p4$ [kJ/(kg·K)]	J/(kg·K)
<b>Dinamik viskozite</b>	$p8 \cdot T^2 + p9 \cdot T + p10$ [mPa·s]	Pa·s
<b>Yoğunluk</b>	rho_R410A	kg/m <sup>3</sup>
<b>Özgül ısı oranı</b>	gamma_R410A	1

#### 3.4.3.4. Sınır Koşullarının Tanımlanması

Sınır koşullarının belirlenmesi, model tasarımı sırasında eklenen fiziklere göre geometrik varsayımlara en uygun olanı seçilerek yapılır. Isı İletim Modülü, COMSOL Multiphysics'de bulunan temel yetenekleri büyük ölçüde genişletmek için geliştirilmiştir. Modül; iletim (kondüksiyon), taşıma ve ışımaya (radyasyon)'lu ısı iletimi dahil tüm temel mekanizmaları destekler. Birim zamanda aktarılan ısı miktarı (ısı aktarım hızı), aktarım modunu tanımlayan temel fiziksel mekanizmalar olan iletim, taşıma ve ışımaya bağlıdır. Programda, multifizik yetenekleriyle birlikte bu modüldeki fizik ara yüzleri kullanılarak, bir sıcaklık alanı diğer fizikle paralel olarak modellenebilmektedir.

Isı iletimi arabirimi eklendiğinde, model ağacına aşağıdaki varsayılan düğümler de eklenir:

- Solid (Katı): Katılarda ısı iletimi ara yüzü, katılarda iletim, taşıma ve ışıma yoluyla ısı iletimini modellemek için kullanılır. Katı alanlarda tanımlanan sıcaklık denklemi, ısı kaynakları gibi ek katkılar içerebilen Fourier yasaasının diferansiyel formuna karşılık gelir.
- Fluid (Akışkan): Bu düğüm, akışkanlarda iletim, taşıma ve ışımaya yoluyla ısı iletimini modellemek için kullanılır. Akışkan alanlarında tanımlanan sıcaklık denklemi, ısı kaynakları gibi ek katkılar içerebilen taşıma-difüzyon denkleminde karşılık gelir.
- Initial Value (Başlangıç Değeri): Bu düğüm, başlangıç tahmini olarak hizmet edebilecek sıcaklık için bir başlangıç değeri ekler.
- Eksenel Simetri (Axial Symmetry) : Benzetim çalışmasında ısıl analiz için kullanılan 2B eksenel simetri çizimi Şekil 6.4'te verilmiştir.
- Thermal Insulation (Isı Yalıtım): Isı yalıtımı için sınır koşulunun belirlendiği düğümdür.

Bunların dışında, sınır koşullarını uygulayan diğer düğümlerden “Isı Kaynağı (Heat Source)” ve “Isı Akışı (Heat Flux)” düğümleri de model ağacına eklenmiştir. Bu düğüm, ısı iletimini modellemek için denklem (3.10) kullanır:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q \quad (3.10)$$
$$q = -k \nabla T$$

Burada;  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) katı malzemenin yoğunluğu,  $C_p$  ( $J/kg.K$ ) sabit basınç altında ısı kapasitesi,  $T$  mutlak sıcaklık,  $k$  ( $W/m.K$ ) ısıl iletkenlik,  $u$  ( $m/s$ ) hız alanı,  $Q$  ( $W/m^3$ ) ısı kaynağı ve  $q$  içe doğru yayılan ısı akısıdır.

Laminar akış arabirimi eklendiğinde, model ağacına aşağıdaki varsayılan düğümler de eklenir:

- Akışkan Özellikleri (Fluid Properties) : Akışkan özellikleri düğümü, sıvı ve gaz için malzeme özelliklerini içerir. Gaz yoğunluğu ve sıvı viskozitesi gibi sıvı özellikleri, kullanıcı girdileri aracılığıyla tanımlanabilir. Bu özellikleri tanımlamak için sıcaklık veya basınç gibi ek girdiler gerekebilir. Bu çalışmada,

gazın sıcaklığı, mutlak basınç, yoğunluğu ve dinamik viskozitesi ek girdi olarak kullanılmıştır.

- Duvar (Wall): Duvar düğümü, sabit, hareketli ve sızıntı yapan duvarlardaki sıvı akış koşullarını tanımlayan bir dizi sınır koşulu içerir. Bu çalışmada, duvarları modellemek için sınır koşulu “Kayma Yok ( No Slip)” olarak seçilmiştir.. Kaymayan bir duvar, sıvı hızının duvar hızına göre sıfır olduğu bir duvardır ( $u = 0$ ).
- Başlangıç Değerleri (Initial Values) : Başlangıç değerleri, geçici benzetim için başlangıç koşulları olarak veya durağan bir benzetimde doğrusal olmayan bir çözücü için bir başlangıç tahmini olarak hizmet eder. Başlangıç değeri olarak hız vektörü (0,0) olarak ayarlanmıştır.

Bunların dışında, sınır koşullarını uygulayan diğer düğümlerden “Yerçekimi (Gravity)” ve “Hacim Kuvveti (Volume Force)” düğümleri de model ağacına eklenmiştir. Hacim kuvveti düğümü, momentum denkleminde hacim kuvvetini belirtir.

Yerçekimi düğümü, yerçekimi ivmesi değerinden yerçekimi kuvvetlerini tanımlar. 2B modeller için varsayılan yerçekimi vektörü (0, -g.const) olarak tanımlanır. Burada g\_const, 9,8066 m/s<sup>2</sup>'ye eşit bir fiziksel sabittir. Laminar Akış ara yüzü tarafından çözülen denklemler, momentumun korunumu için Navier-Stokes denklemleri ve kütle korunumu için süreklilik denklemdir. Navier-Stokes denklemleri sıvıların hareketini yönetir ve denklem (3.8) ve (3.10)'u kullanır:

$$\underbrace{\rho(C_p \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u)}_1 = \underbrace{-\nabla p}_2 + \underbrace{\nabla \cdot (\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot u)I}_3 + \underbrace{F}_4 \quad (3.11)$$

Burada;  $u$  akışkan hızı,  $p$  akışkan basıncı,  $\rho$  akışkan yoğunluğu ve  $\mu$  akışkan dinamik viskozitesidir. Denklemden; atalet kuvvetleri (1), basınç kuvvetleri (2), viskoz kuvvetler (3) ve sıvıya uygulanan dış kuvvetler (4)'e karşılık gelir. Bu denklemler her zaman süreklilik denklemi (3.12) ile birlikte çözülür:

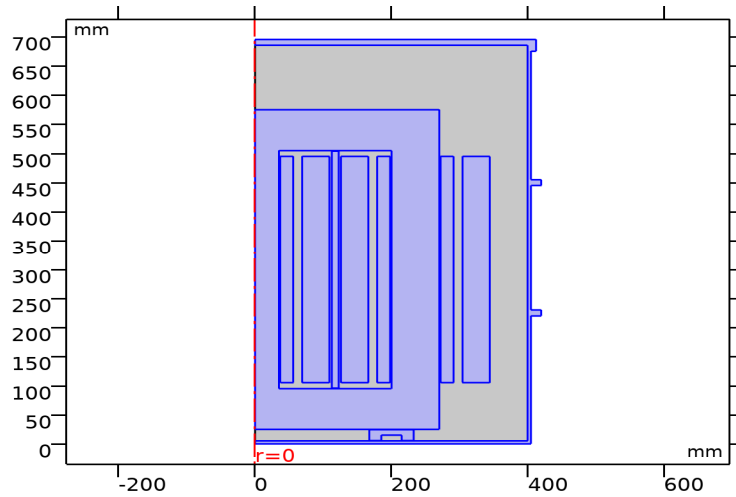
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3.12)$$

Geometriyi çevreleyen ortam ışımaya katılmadığında, sınırlardaki ışımayla ısı iletimini hesaba katmak için yüzeyden yüzeye ışıma multifizik bağlantılı ısı iletimini kullanılır. Yüzeyden yüzeye ışıma arabirimi eklendiğinde ise model ağacına varsayılan düğümlerden başlangıç değeri, eksenel simetri düğümleri ve “Dağınık Yüzey (Diffuse Surface)” eklenir. Başlangıç değeri ve eksenel simetri düğümlerinin benzetim sürecine katkıları yukarıda anlatıldığı gibidir. Dağınık yüzey düğümü ise, ışıma yoğunluğunu her yöne eşit olarak yansıtır. Bu düğüm, ışımayı bir görünüm faktörü hesaplamasıyla işler. Bu düğüm, belirlenen sınırlar içerisinde dağınık olarak yansıyan ve yayılan ışımayı denklem (3.13) ile çözer.

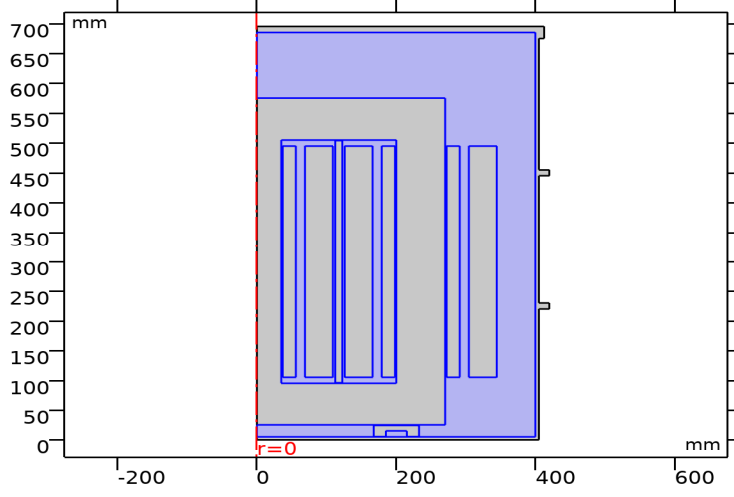
$$\begin{aligned}
 J &= \rho_d G + \varepsilon e_b(T) \\
 e_b(T) &= n^2 \sigma T^4 \\
 q &= (1 - \rho_s) G - J
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

Burada;  $J$  radyosite,  $\rho_d$  dağınık yansıma,  $G$  ışınlama,  $e_b(T)$  tüm dalga boylarında yayılan güç, emisyon,  $n$  kırılma indisi,  $\sigma$  soğurma,  $T$  sıcaklık,  $q$  net içe doğru yayılan ısı akısı ve  $\rho_s$  aynasal yansımadır.

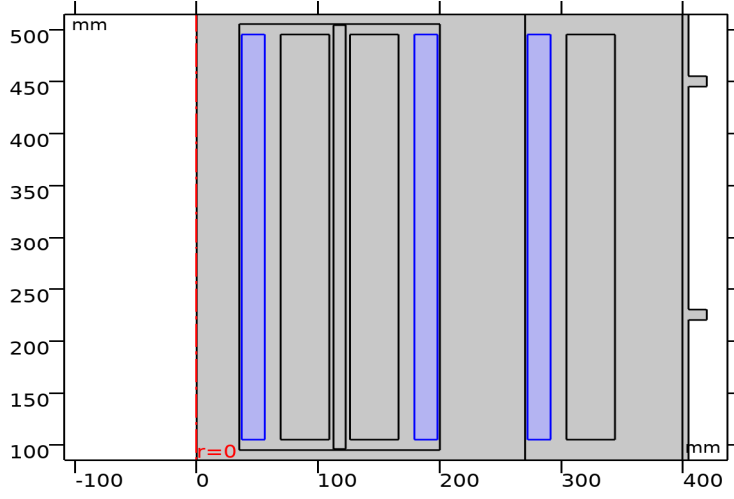
Isı iletimi analizinde kullanılan fiziklerin düğümlerine ait 2B transformatör modeli üzerinde tanımlanmış sınır koşulları Şekil 3.31-3.38’de verilmiştir.



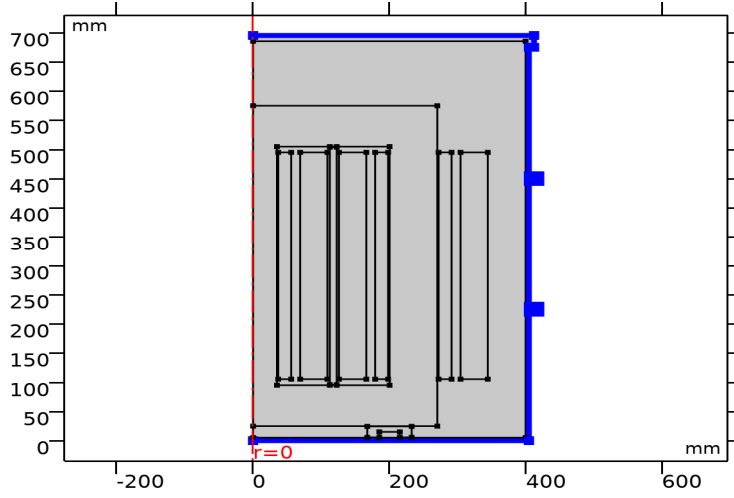
Şekil 3.31. R410A GYT'nin katılarda ısı iletimi seçim alanı



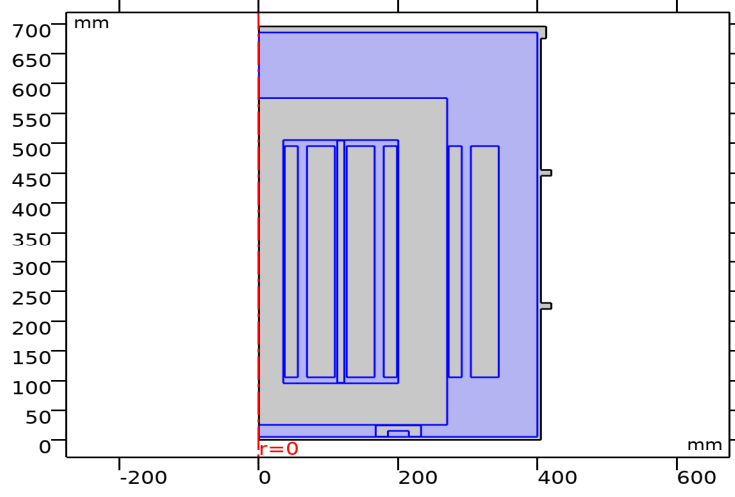
Şekil 3.32. R410A GYT'nin sıvılarda ısı iletimi seçim alanı



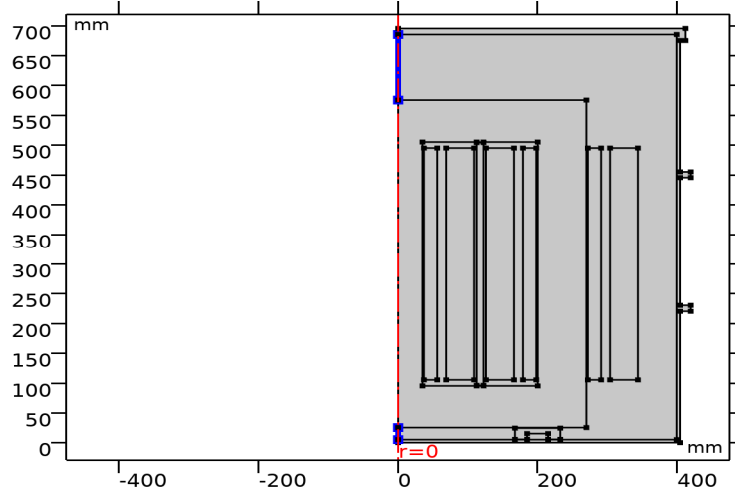
Şekil 3.33. R410A GYT'nin ısı iletimi ısı kaynağı (AG) modeli



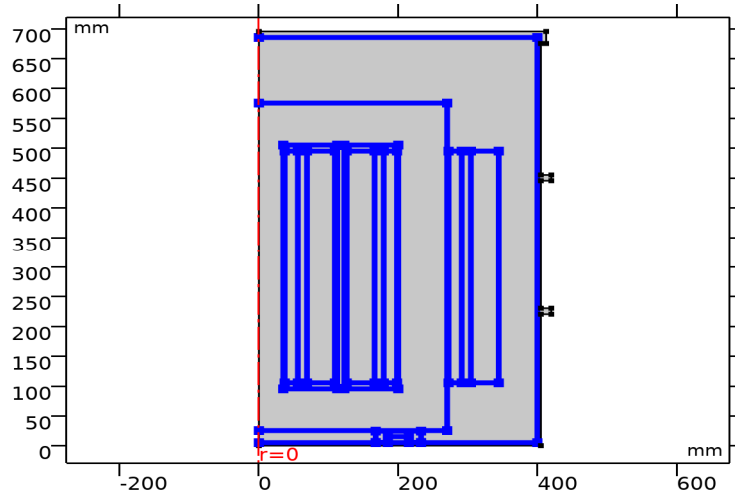
Şekil 3.34. R410A GYT'nin ısı iletimi ısı akışı modeli



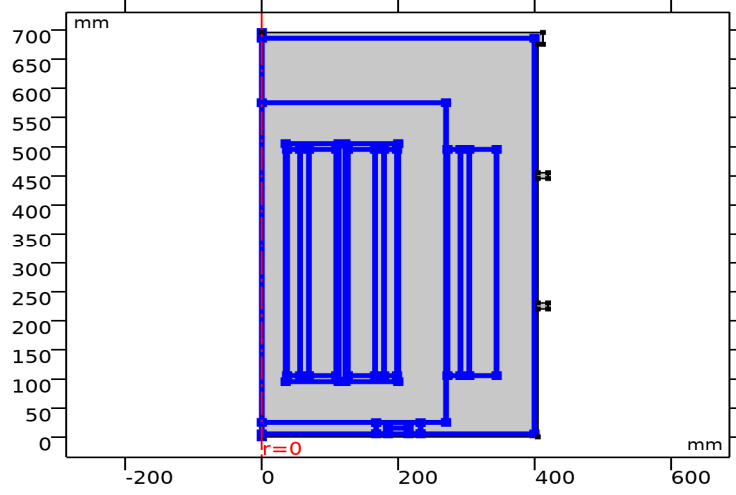
Şekil 3.35. R410A GYT'nin ısı iletimi laminar akış modeli



Şekil 3.36. R410A GYT'nin ısı iletimi laminar akış modeli için eksenel simetri



Şekil 3.37. R410A GYT'nin ısı iletimi laminar akış modeli için duvar seçim bölgesi



Şekil 3.38. R410A GYT'nin ısı iletimi yüzeyden yüzeye ışıma seçim bölgesi

GYT 2B modelin ısı analiz benzetimi, transformatör tankı içindeki R410A gazının izotermal olmayan akışını içerir. Çalışmanın amacı iletim, taşıma ve R410A'daki yoğunluk değişikliklerinin neden olduğu ışıma yoluyla (her üç ısı iletimi formununun) enerji taşınması arasındaki bağlantıyı göstermektir.

- Sıcaklık- (Sabit Basınçta) Isı Kapasitesi ( $C_p$ ),
- Sıcaklık- Isıl İletkenlik,
- Sıcaklık-Akışkanlık,
- Sıcaklık-Yoğunluk

Bu bağlamda literatür çalışmalarından elde edilen R410A gazına ait yukarıdaki eğri verileri kullanılarak MATLAB programında ilgili parametreler için eğri uydurma yöntemleri ile sıcaklığa bağlı denklemler elde edilmiştir. AG sargılarının nominal yükte (0.9 güç faktörü ile 50kVA) çalıştığı varsayılmış ve ısı kaynakları olarak modellenmiştir. AG sargıları, ısıyı kaynaktan R410A gazına aktarırlar (iletim). Daha sonra, taşıma ısı iletimi tank içindeki R410A gazını tahrik eder ve ısıyı YG sargılarına ve çekirdek malzemelere aktarır. Son olarak, yayılan yüzeyler arasındaki gölgeleme ve yansımaları benzetmek için yüzeyden yüzeye ve yüzeyden çevreye ışıma eklenir. AG sargıları tam yük akımı ile ısıtıldığından, üretilen ısı iletim, taşıma ve ışıma yoluyla çevreye taşınır. Bu işlem sırasında, R410A gazı ısıtılır ve tankın içindeki yoğunluğu, viskozitesi ve basıncı değişir. R410A gazının denklem 3.14-3.17'de verilen sıcaklığa bağlı değişkenlerini elde etmek için, gazın performans eğrileri kullanılmıştır.

Isıl iletkenlik,  $k$  [mW/(m\*K)]

$$k = 0.004244T^2 + 0.01767T + 12.61 \quad (3.14)$$

Sabit basınç altında ısı kapasitesi,  $C_p$  [kJ/(kg\*K)]

$$C_p = (-1.049E - 7)T^3 + (2.772E - 6)T^2 - 0.001708T + 1.915 \quad (3.15)$$

Yoğunluk,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

$$\rho = 41.91e^{(0.0244T)} - 12.53e^{(0.00895T)} \quad (3.16)$$

Dinamik viskosite,  $\mu$  [mPa\*s]

$$\mu = (8.489)T^2 + 0.005353T + 12.63 \quad (3.17)$$

(3.15–3.18)'da  $T$ , K cinsinden sıcaklık ve  $M_{R410A}$  R410A'nın mol kütlesi olup 72,585 (kJ/kg)'dir.

Bir ısı kaynağı olarak AG sargısı dikdörtgen şeklindedir ve içindeki herhangi bir iç etkiyi ihmal eder. R410A içindeki iletim ve taşıma ısı iletimi (3.18) 'de verilmiştir.

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = -\rho C_p u \cdot \nabla T + P_{total} \quad (3.18)$$

Burada  $P_{total}$ , R410A GYT'nin toplam nominal gücüdür.

### 3.4.3.5. Ağ Yapısının Oluşturulması

2B geometrilerde alanlar üçgen veya dörtgen elemanlara ayrılır. Bir model için oluşan başlangıç düğüm miktarı genelde yeterli değildir. Daha sonra her eleman, alan çözümü için yeterli küçük bir bölgeye ayrılır ve ağ miktarı artırılarak doğru çözüme yaklaşılr. Çalışmada kullanılan ağ kurulumu, Şekil 4.30'da verilmiştir.

### 3.4.3.6. Benzetimin Çalıştırılması

Isıl analiz için, 2B ekstenel simetri modeli ve zamana bağlı çözümler kullanılmıştır. Benzetim süresi iki (2) saat olarak ayarlanmıştır. Yapılan benzetim çalışmalarına ait elde edilen grafikler ve yorumları Bölüm 4'te ayrıntılı olarak verilmiştir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışması temel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım, yalıtkan gaz olarak seçilen R410A gazının delinme dayanım testlerini kapsamaktadır. Bu bağlamda, farklı elektrot tipleri ile değişken elektrotlar arası boşluk ve basınç koşullarındaki delinme gerilimleri belirlenmiştir. Katalog bilgilerinin yanı sıra bu bilgiler, COMSOL programında gazın doğru tanımlanması için gereklidir. Bu kısım Bölüm 3.1–3.2’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

İkinci kısım, COMSOL ortamında gaz yalıtımlı olarak tanımlanan gerçek bir dağıtım transformatör modelinin; elektrostatik, darbe yüksek gerilim ve ısı analizlerini kapsamaktadır. Elektrostatik ve darbe yüksek gerilim analizleri 3B model üzerinde, ısı analizleri ise 2B aksel simetri modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elektrostatik analizler sabit zamanlı olarak, darbe yüksek gerilim analizleri ile ısı analizleri zamana bağlı olarak çalışılmış olup detayları Bölüm 4.1, 4.2 ve 4.3’te verilmiştir.

Üçüncü kısım ise gaz yalıtımlı transformatörün deneysel analizini kapsamaktadır. Bu kapsamda, mevcut şartlar dahilinde, gaz yalıtımlı gerilim ölçü transformatörü üzerinde seçilen gaz ve referans gazlar kullanılarak kısmi deşarj testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaların detayları Bölüm 4.4’te verilmiştir.

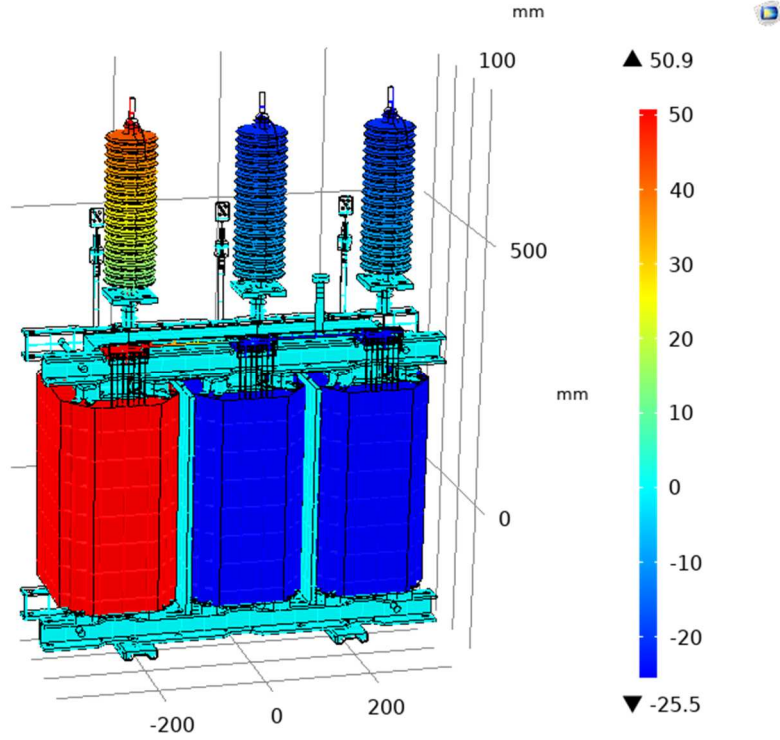
### 4.1. Elektrostatik Analiz

R410A gazının kırılma dayanımını elde etmek bu çalışma için en önemli adımdır. Özellikle yüksek gerilim sargıları ile topraklanmış bölümler arasındaki en kısa mesafeler atlama açısından kritik olmaktadır. Bu nedenle kritik noktalardaki potansiyel dağılımları ve elektriksel zorlanma değerleri hesaplanırsa kısmi boşalmalar ve olası arızaları önlemek mümkün olacaktır.

3B transformatör geometrisi oluşturulduktan sonra, transformatör malzemeleri ve sınır koşulları tanımlanmıştır. Sınır koşulu olarak, YG ve AG sargılarına faz-toprak geriliminin tepe değeri tanımlanmıştır. Transformatörün tankı ve boyunduruk kısımları ise toprak potansiyelinde oldukları için toprak sınır koşulu seçilmiştir. Tasarlanan GYT’in COMSOL ortamında modellenen ağ yapısı Şekil 3.24’te verilmiştir.

Transformatörün yapısı simetrik olmadığı için ağ yapısı istenildiği kadar düzgün verilememiştir. Ayrıca hesap süresini azaltabilmesi amacıyla, alan bakımından çok kritik olmayan bölümlerin ağı daha seyrek, AG ve YG sargıları ve R410A gazı gibi kritik olan yerler ise çok daha sık bir ağı bölünmüştür. Daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için kademe değiştirici ve bağlantıları da daha sık ölçekte ağı bölünmüştür.

Analizler sonucunda sargılarla yalıtkan gaz ortamı arasında elde edilen potansiyel dağılımı Şekil 4.1'de verilmiştir.



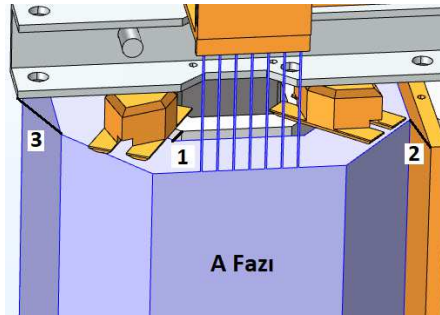
Şekil 4.1. Tank içinde kV cinsinden potansiyel dağılımı

Gerilim değerleri, zamana bağlı olarak değişmekle birlikte, 5ms için alınmıştır. Birinci faz 5 ms değerinde tepe değere ulaştığı için bu zaman aralığında birinci sargı etrafında gerilim diğer fazlara göre daha yüksek olmaktadır. Üç fazlı transformatörde bu durumda diğer iki fazdaki gerilimler negatiftir. Bu potansiyel dağılımı, alan dağılımını da etkilemektedir. Tank içindeki gerilim değişiminin ayrıntılarını görmek için tank, üst kapak ve R410A gaz üniteleri gizlenmiştir.

Tasarlanan transformatörde mesafelerin en kısa olduğu bölümlerden biri alçak gerilim sargısının dış köşesi ile yüksek gerilim sargısının iç köşesidir. Ayrıca yüksek gerilim sargısı ile boyunduruğun arasındaki bölge de atlama açısından kritik olabilir. Faz A sargısı için önem düzeyine göre üç kritik hat tanımlanmıştır. Bu sayede R410A

GYT'lerde belirlenen noktalar arasındaki delinme dayanımları hesaplanacaktır. Dolayısı ile transformatör tankı içerisindeki kısmi deşarjların varlığı ve bunlara karşı alınması gereken önlemler tespit edilecektir

Şekil 4.2'de görülen kırmızı hatlar seçilen kritik bölgeleri göstermektedir. Bu hatlardan 1 ile gösterilen bölge AG sargısının dış köşesi ile YG sargısının iç köşesi arasındadır. 2. hat, YG sargısı ile dielektrik bariyerin en yakın köşesi arasındadır. Son olarak 3. Hat ise YG sargısı ile boyunduruğun en yakın köşesi arasındadır.



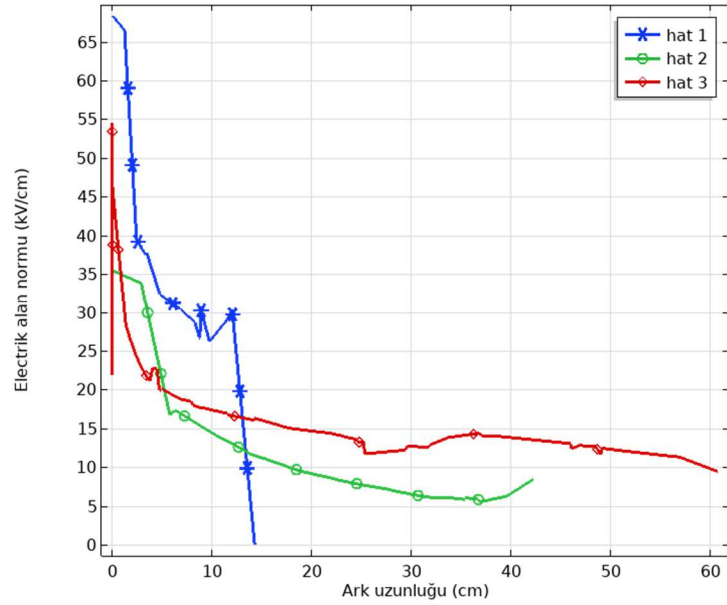
Şekil 4.2. Transformatör sargılarındaki kritik alanlar

Elektrostatik çözümlerle, bu üç hat arasındaki delinme gerilimleri ve elektrik alan kuvvetleri hesaplanmıştır. Elektrik alan hesaplamalarında, elektrik alanının vektör bileşenleri olan  $E_{dx}, E_{dy}, E_{dz}$  elektrik alanlarının normu kullanılmıştır (4.1).

$$Norm(E) = \sqrt{E_{dx}^2 + E_{dy}^2 + E_{dz}^2} \quad (4.1)$$

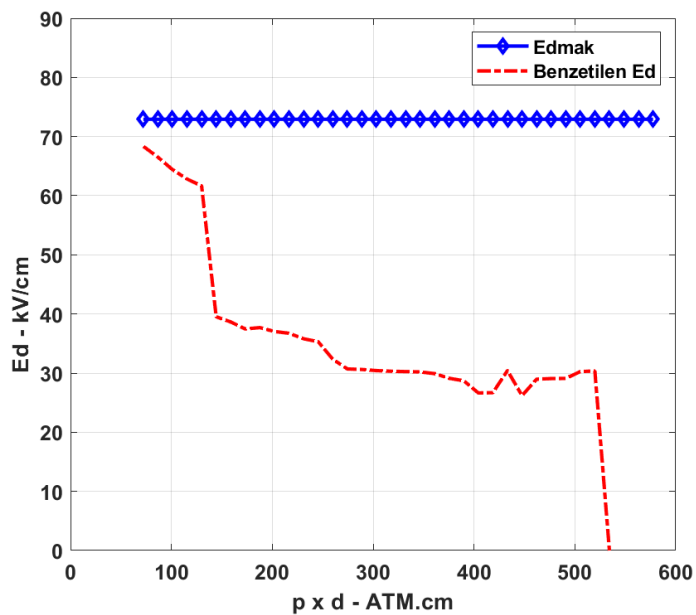
Burada  $Norm(E)$ , elektrik alanının genliği anlamına gelmektedir. Elektrik alan bir vektör alanıdır, yani uzayda her yerde bir yönü vardır. Vektörleri görselleştirmek zordur. Bu nedenle vektörlerle ilgili bilgileri temsil etmek için genellikle birim alan kullanılır.

A fazı için seçilen noktadaki benzetim sonucunda elde edilen elektrik alanlar Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekildeki alan dağılımları incelendiğinde, en yüksek elektrik alan yüksek gerilim ile alçak gerilim sargıları arasında yani hat 1'de meydana gelmiştir. Hat 1'de seçilen noktalar arasındaki mesafe 1,425 mm olup, meydana gelen alan şiddeti 68 kV/cm'dir. Bir diğer kritik bölge olan hat 2 ile temsil edilen yüksek gerilim sargısı ile fazlar arasındaki katı yalıtkan bariyerin mesafesi 4,223 mm'dir. Bu hatta görülen en yüksek alan değeri ise yaklaşık 52 kV/cm'dir. Hat 3, yani yüksek gerilim sargısı ile boyunduruğun arasında meydana gelen alan şiddeti ise yaklaşık 35 kV/cm'dir. Bu hattın uzunluğu ise 6,067 mm'dir.

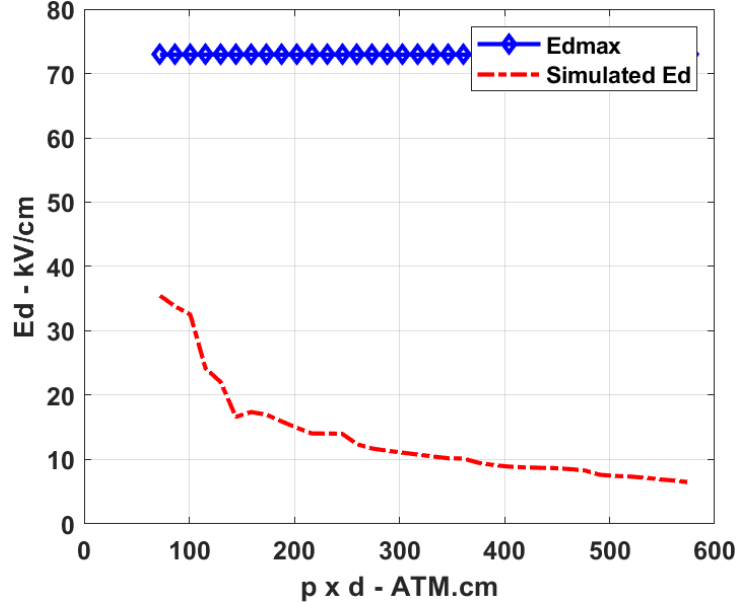


Şekil 4.3. A Fazı için seçilen noktaların ark uzunluklarına karşı elektrik alan grafikleri

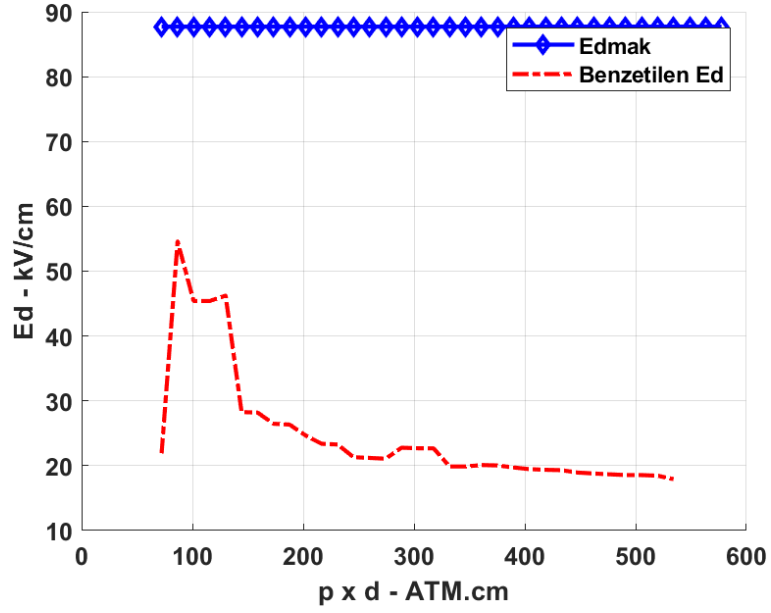
Cosmol ortamında yapılan benzetim çalışmasından elde edilen A Fazı'na ait kritik noktaların elektrik alan verileri MATLAB programına aktarılmıştır. MATLAB ortamında yazılan kodlar ile ilgili gaza ait (R410A ve SF6) maksimum elektrik alanları (Edmak) ile her bir kritik noktanın elektrik alanları (Benzetilen Ed) grafik olarak elde edilmiştir. R410A ve SF6 gazının en yüksek elektrik alan denklemleri (3.5) ve (3.6)'da verilmiştir. Şekiller, benzetim verileri kullanılarak MATLAB ortamında çizdirilmiştir. Şekil 4.4-4.6, normal çalışma koşulları sırasında 5 ms'deki elektrik alan hesaplamalarına ait grafikleri vermektedir.



Şekil 4.4. A Fazı hat 1 için benzetilmiş R410A GYT elektrik alan dayanımı



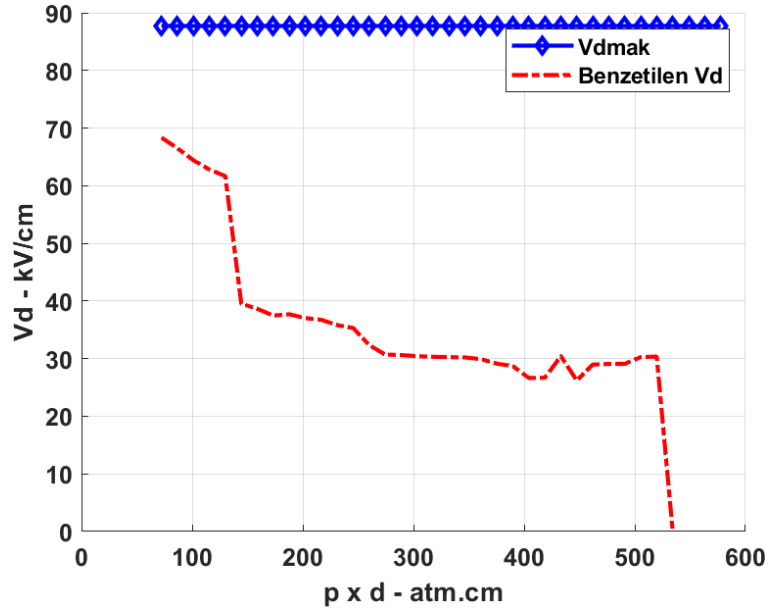
Şekil 4. 5. A Fazı hat 2 için benzetilmiş R410A GYT elektrik alan dayanımı



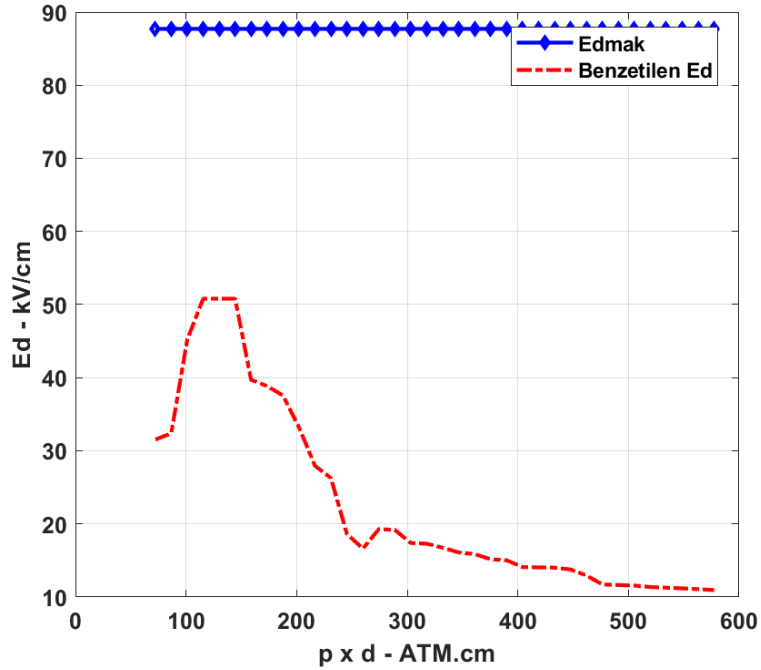
Şekil 4.6. A Fazı hat 3 için benzetilmiş R410A GYT elektrik alan dayanımı

Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 aynı şartlar altında R410A'nın elektrik alan kuvvetini göstermektedir. Şekil 4.4, AG sargısının dış köşesi ile YG sargısının iç köşesi arasındaki elektrik alan kuvvetini göstermektedir. Benzetim sonucu, Edmak sınırından düşüktür. Bu beklenen ve istenen bir durumdur. Hat 2 ve 3 için benzetilen elektrik alan dayanımları da Edmak değerinden daha düşüktür. Şekiller incelendiğinde, genel olarak başlangıçta maksimum elektrik alanında keskin bir düşüş görülmektedir. Ancak boşluk mesafesinin artmasıyla yavaş yavaş doygun hale gelmektedirler.

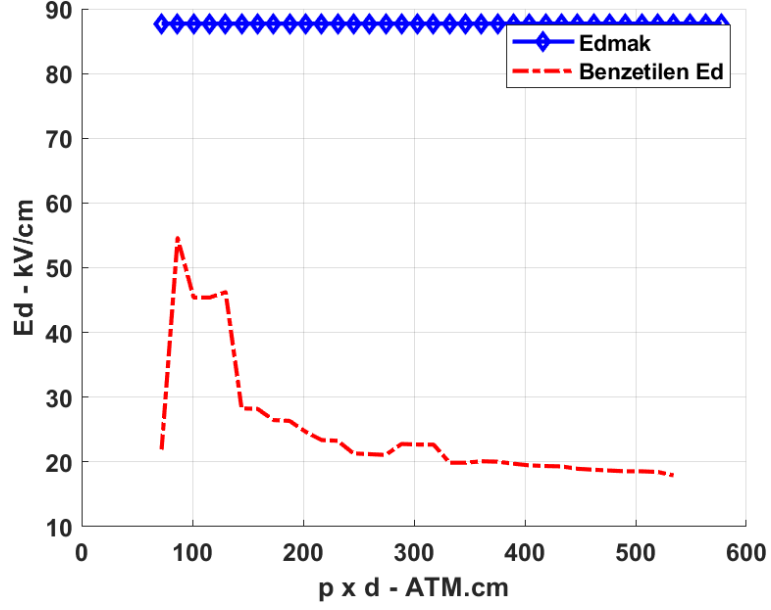
Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 aynı şartlar altında SF6'nın elektrik alan kuvvetini göstermektedir. 1. 2. ve 3. hat için diğer benzetilmiş elektrik alan güçleri Edmak sınırından daha düşüktür. Edmak'tan düşük elektrik alanı veren herhangi bir tank basıncı, SF6 GYT için arzu edilir görünmektedir. Bu, kuramsal Ed eğrisi üzerinde bir basınç değeri seçerek kolayca elde edilebilir. Ancak, gerçek tank basıncı, aydınlatma darbe çalışmalarından sonra tanımlanacaktır.



Şekil 4.7. A Fazı hat 1 için benzetilmiş SF6 GYT elektrik alan dayanımı



Şekil 4.8. A Fazı hat 2 için benzetilmiş SF6 GYT elektrik alan dayanımı



Şekil 4.9. A Fazı hat 3 için benzetilmiş SF6 GYT elektrik alan dayanımı

## 4.2. 50kVA R410A GYT İçin Darbe Gerilimi Analizleri

### 4.2.1. Yıldırım Darbe Gerilimi Analizi

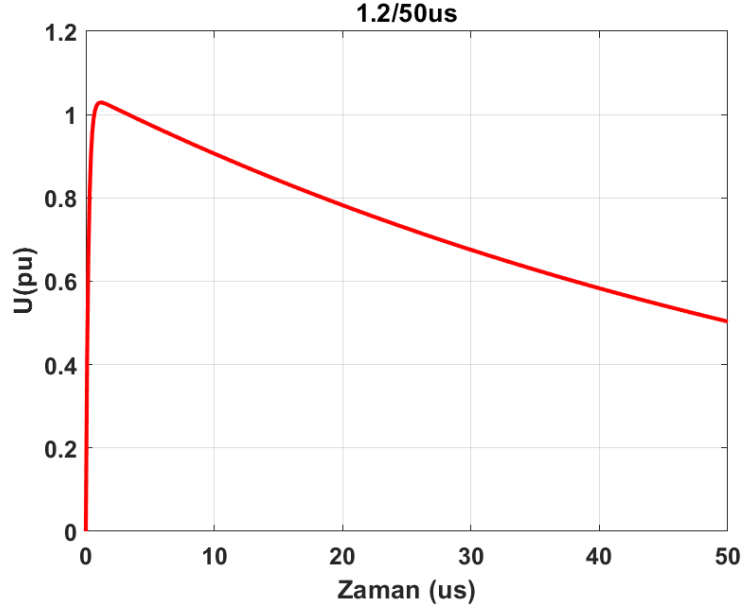
Gaz yalıtkanlar, endüstriyel uygulamalarda çoğu kez düzgün olmayan elektrik alanına maruz kalırlar ve düzgün olmayan elektrik alanında delinme mekanizmaları ve davranışları düzgün elektrik alanından farklıdır. Bu nedenle, bu çalışmada, koni-düzlem elektrot sistemi kullanılarak, R410A gazının, alternatif gerilimde, çeşitli basınç değerleri altındaki delinme dayanımları deneysel verileri kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile kuramsal bir yaklaşım bulunmaya çalışılmıştır.

Yalnız normal ve maksimum sistem gerilimini değil bir de transformatör içindeki R410A gazının yüksek gerilim dayanımını bilmek gerekir. Eğer transformatöre bir yıldırım darbesi gelirse hangi parçalar arasında bir atlama olacağına bilinmesi yalıtım koordinasyonu bakımından önemlidir.

Yıldırım darbe analizinde, B Fazı'nın normal çalışma koşulları sırasında yıldırım aşırı gerilimlerine maruz kaldığı varsayılmıştır. Denklem (4.2)'de verilen 1,2–50 µs'lik standart yıldırım darbesi (IEC 60076-3) uygulanmıştır.

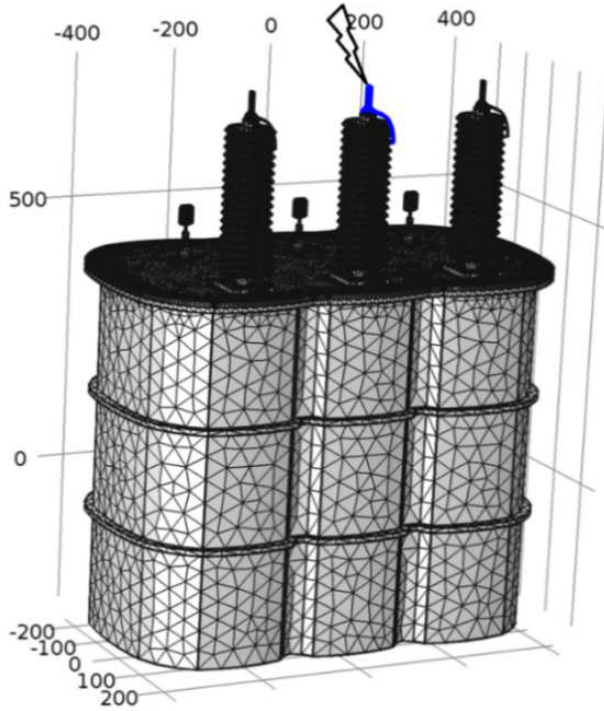
$$VL = 1.022(e^{-14700t} - e^{-5000000t}) \quad (4.2)$$

IEC 660076-3'e göre 1,2-50µsn (Eq. 2) standart yıldırım darbe gerilimi, Şekil 4.10'da verilmiştir.



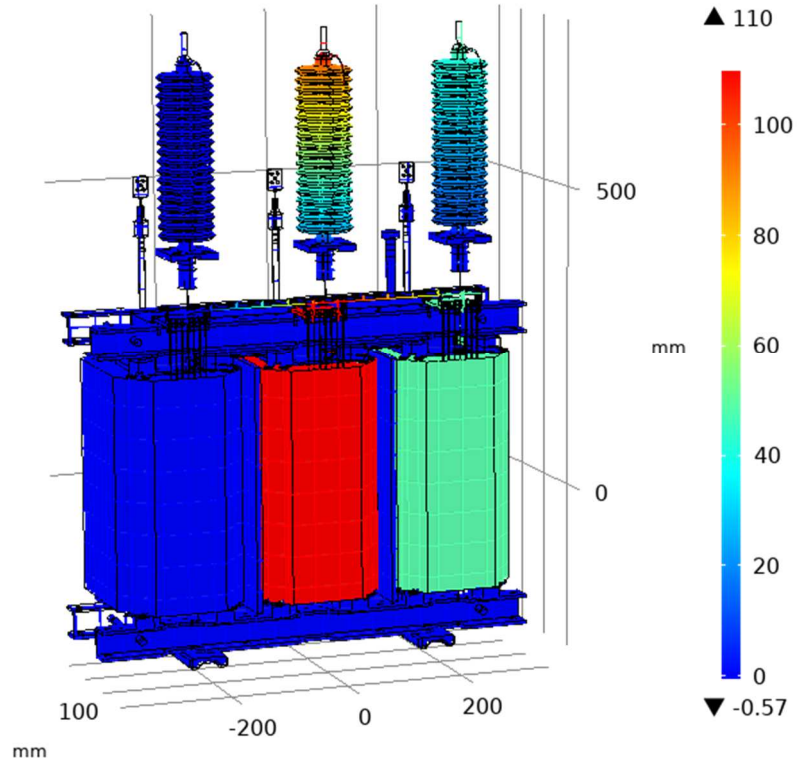
Şekil 4.10. B Fazına uygulanan standart yıldırım darbe gerilimi

COMSOL ortamında B Fazı'na normal çalışma koşulu sırasında uygulanan darbe gerilimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



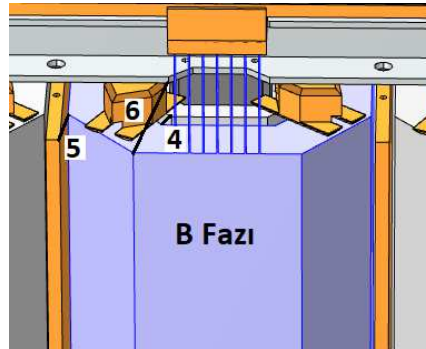
Şekil 4.11. Normal çalışma sırasında yıldırım gerilimi altındaki transformatör

Analiz, GYT içindeki tepe potansiyellerini ve YG sargısı ile transformatör içindeki seçilen parçalar arasındaki bozulmayı belirlemiştir. Şekil 4.12, pik gerilimleri sırasında tüm sargıların elektrik potansiyellerini göstermektedir.



Şekil 4.12. Yıldırım darbesi sırasında pik elektrik potansiyellerinin yüzey grafiği

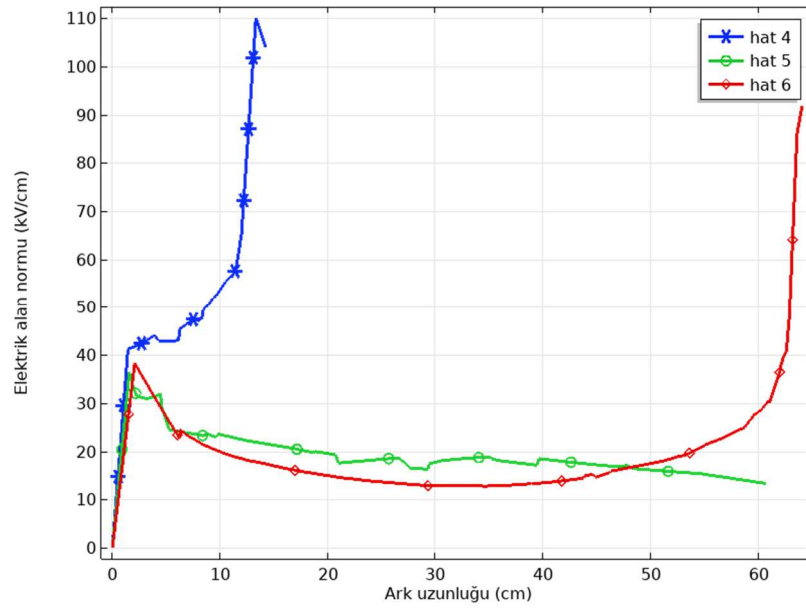
B Fazı sargısı için seçilen dört kritik nokta Şekil 4.13de verilmiştir. Seçilen bu noktalar A fazı için seçilen noktalarla aynı bölgeleri temsil etmektedir.



Şekil 4.13. B Fazı için seçilen noktalar

Yıldırım aşırı geriliminin uygulandığı B fazı için seçilen noktalardaki benzetim sonucunda elde edilen elektrik alanlar Şekil 4.14'te verilmiştir. Şekildeki alan dağılımları incelendiğinde, en yüksek elektrik alan hat 4'te, yani yüksek gerilim ile alçak gerilim sargıları arasında meydana gelmiştir. Bu hattın uzunluğu 1,425 mm olup oldukça yakın bir mesafedir. Bu nedenle, hat 4'e ait alan değerleri sargı uçlarında yıldırım darbesinin etkisiyle çok daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Meydana gelen alan şiddeti yaklaşık 110 kV/cm'dir. Diğer bir yüksek elektrik alan hat 6, yani yüksek

gerilim sargısı ile boyunduruk arasındadır. Bu hatta meydana gelen alan şiddeti ise yaklaşık 92 kV/cm'dir. Özellikle toprak bölgesine yakın sargı uçlarında yüksek alan dağılımları meydana gelmektedir. Bir diğer kritik bölge ise hat 5 ile temsil edilen yüksek gerilim sargısı ile fazlar arasındaki katı yalıtkan bariyerdir. Bu hatta görülen en yüksek alan değeri ise yaklaşık 52 kV/cm'dir. Yalıtkan bariyer üzerinde ise yaklaşık 37 kV/cm'lik bir alan şiddeti meydana gelmiştir. Üç hattın elektrik alan dağılımlarının, yüksek gerilim sargısı boyunca düzgün olmadığı ve alan değerlerinin sargı uçlarında daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

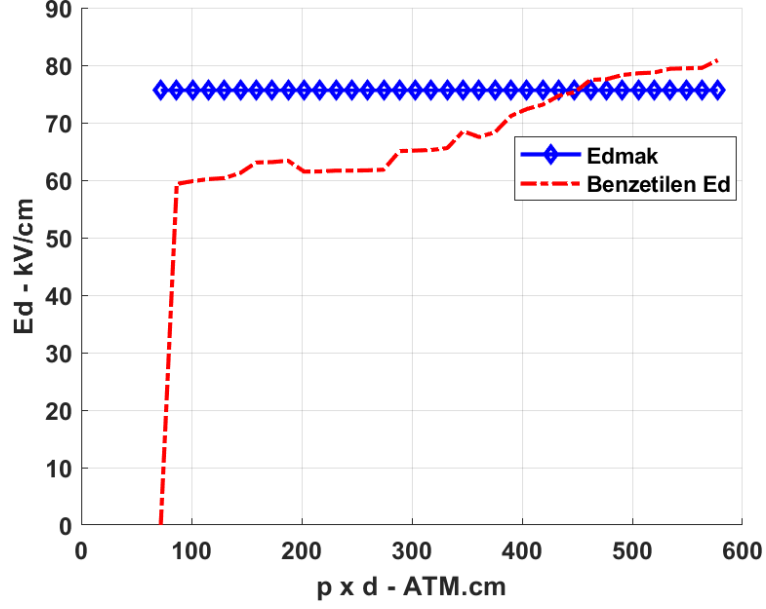


Şekil 4.14. B Fazı için seçilen noktaların ark uzunluklarına karşı elektrik alan grafikleri

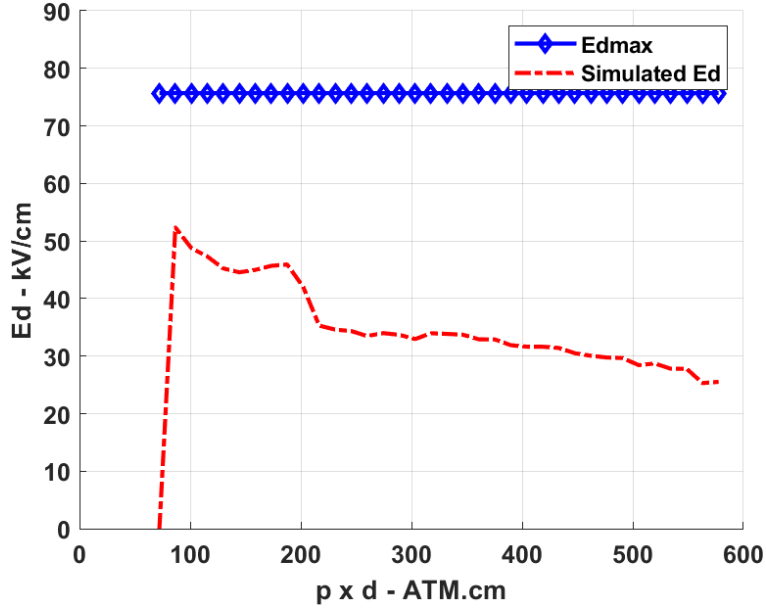
COMSOL ile oluşturulan yıldırım darbe benzetiminden elde edilen veriler (kritik noktalara ait veriler) MATLAB programına aktarılmış ve Şekil 4.15-4.17 arası grafikler çizdirilmiştir. Elde edilen eğriler, yıldırım darbesi altında basınç ve elektrotlar arası mesafeye karşı delinme gerilimlerini vermektedir.

Şekil 4.15'te R410A gaz basıncının 4,445 atm olduğunda, elektrik alanının 462 atm.cm üzerinde 77,45 kV/cm'lik kritik değeri aştığını göstermektedir. Bu durum, hat 1'in yani AG sargısının dış köşesi ile YG sargısının iç köşesi arasındaki mesafenin 1.425 mm kadar kısa olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.16 ve 4.17'de benzetilen elektrik alanların en yüksek değerleri sırasıyla 53 kV ve 56 kV olup hatların Edmak eğrisinin altındadır. Bu noktalardaki mesafeler ise 5. hat için 6,403 mm ve 6. hat için 6,067 mm'dir. Tank içindeki gaz basıncının Edmak eğrisinin altında olması istenir. Yıldırım aşırı geriliminin olumsuz etkisini önlemek için tank içindeki basınca bağlı

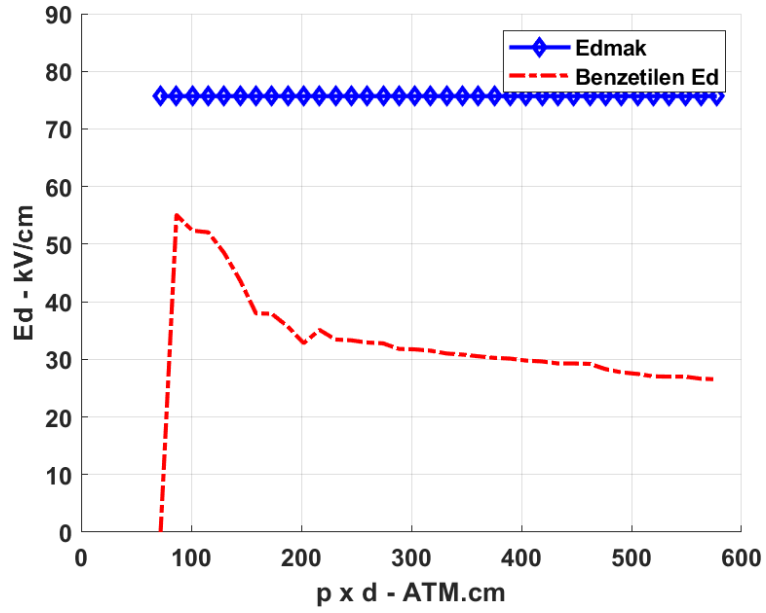
olan arıza geriliminin yıldırım aşırı geriliminin tepe değerinden fazla olması gerekir. IEC standartlarına göre yapılan yıldırım darbe analizi sonuçları, 50 kV'lık bir R410A gaz yalıtımlı dağıtım transformatörünün yıldırım darbe gerilimlerine dayanımı için optimum olarak ortalama 4 atm'lik bir tank basıncını belirtir.



Şekil 4.15. Yıldırım geriliminin uygulandığı R410A B Fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı

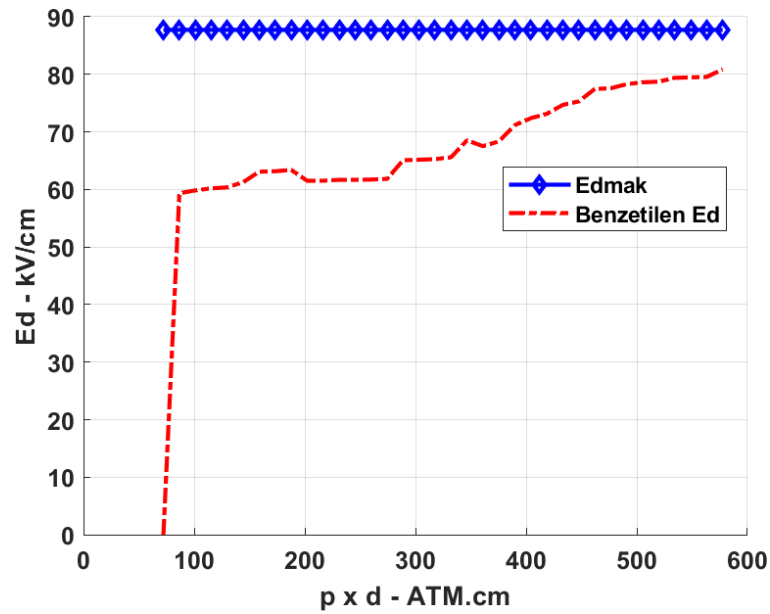


Şekil 4.16. Yıldırım geriliminin uygulandığı R410A B Fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı

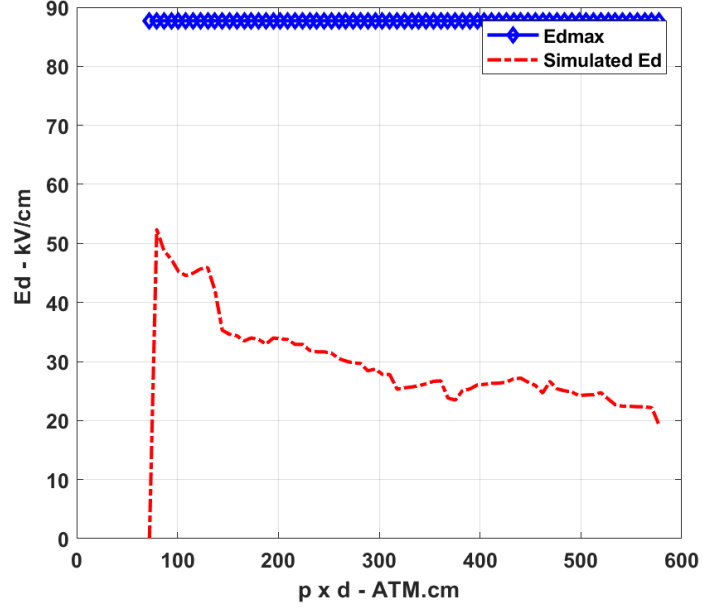


Şekil 4.17. Yıldırım geriliminin uygulandığı R410A B Fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı

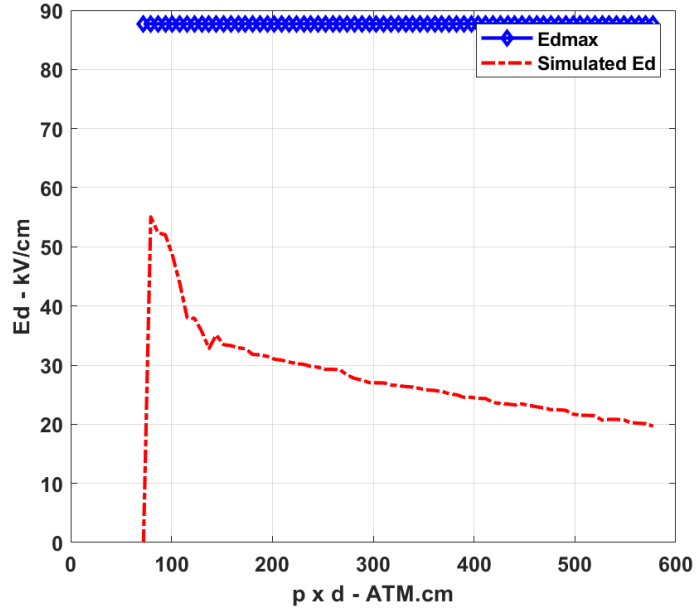
Aynı deney düzeneğinde SF6 gazının yıldırım aşırı gerilim altındaki davranışı da analiz edilmiştir. Analiz sonucunda üç kritik nokta için elde edilen grafikler Şekil 4.18-4.20’da verilmiştir.



Şekil 4.18. Yıldırım geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı



Şekil 4.19. Yıldırım geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı



Şekil 4.20. Yıldırım geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı

Şekil 4.18-4.20 incelendiğinde, en yüksek elektrik alanının yüksek gerilim ile alçak gerilim sargıları arasında meydana geldiği ve üç hatta da elektrik alan dağılımlarının, sargı boyunca düzgün olmadığı görülmektedir. SF6 için benzetilen üç kritik noktada da elektrik alan değerlerinin Edmax eğrisinin altında olması ve gaz basıncının 4 atm'nin üzerinde olması ise beklenen bir durumdur.

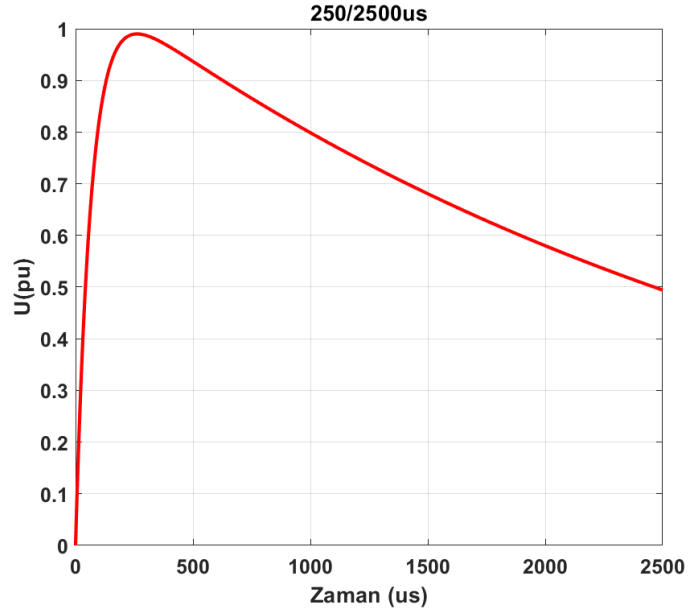
#### 4.2.2. Anahtarlama Darbe Gerilimi Analizi

Anahtarlama darbe gerilimi analizinin amacı, anahtarlama sırasında meydana gelen aşırı gerilimlere karşı transformatör yalıtımının dayanımını görebilmektir. Anahtarlama darbe gerilimleri şekil olarak yıldırım darbe gerilimlerine çok benzeyen ancak çok daha uzun süreli darbelerdir.

Anahtarlama darbe gerilimi analizinde, B Fazı'na normal çalışma koşulu sırasında 250–2500 µs'lik standart (IEC 60076-3'e göre) anahtarlama darbe gerilimi uygulanmıştır (4.3).

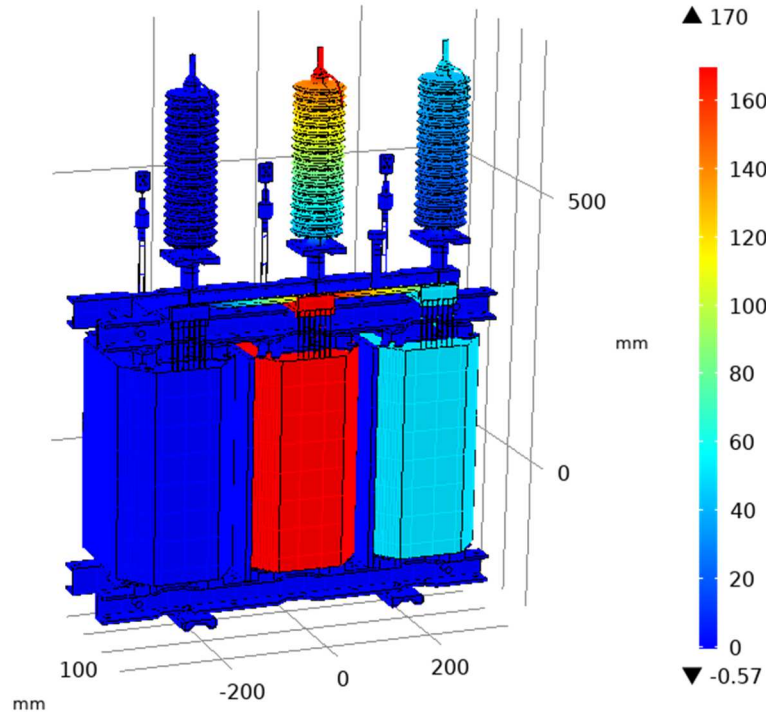
$$VL = 1.21(e^{-320t} - e^{-15000t}) \quad (4.3)$$

R401A GYT'ye uygulanan anahtarlama darbe gerilimi, Şekil 4.21'de verilmiştir.



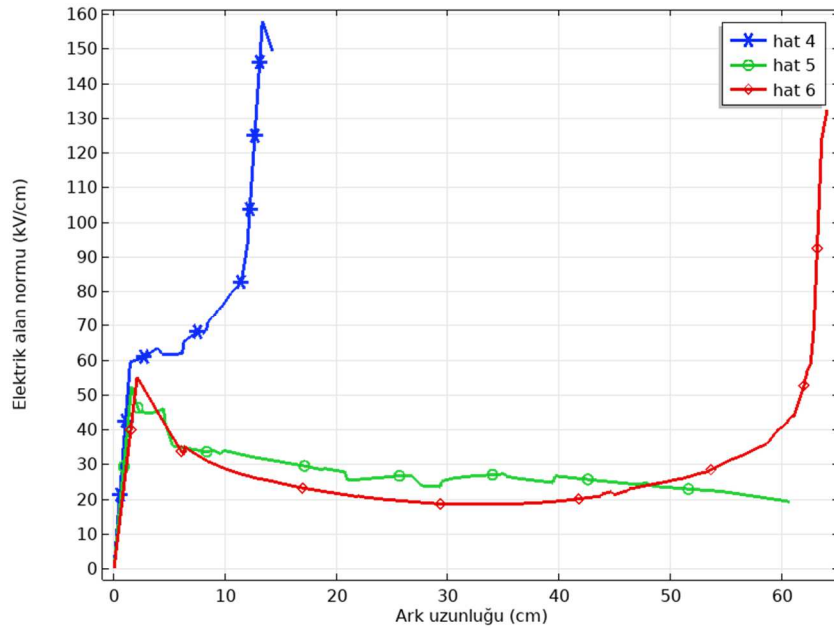
Şekil 4.21. B Fazına uygulanan standart anahtarlama darbe gerilimi

COMSOL ortamında B Fazı'na normal çalışma koşulu sırasında uygulanan anahtarlama darbe gerilimi Şekil 4.21'deki gibidir. Anahtarlama darbe analizi, arasında anahtarlama darbesi sonrasında oluşan GYT içindeki tepe potansiyellerini ve YG sargısı ile transformatör içindeki seçilen hatlar arasındaki bozulmayı belirlemiştir. Şekil 4.22, pik gerilimleri sırasında tüm sargıların elektrik potansiyellerini göstermektedir.



Şekil 4.22. Anahtarlama darbesi sırasında pik elektrik potansiyellerinin yüzey grafiği

Anahtarlama darbesinin uygulandığı B Fazı sargısı için seçilen üç kritik nokta yıldırım darbesi için seçilen noktalarla aynıdır. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı B fazı için benzetim sonucunda elde edilen elektrik alanlar Şekil 4.23’de verilmiştir.

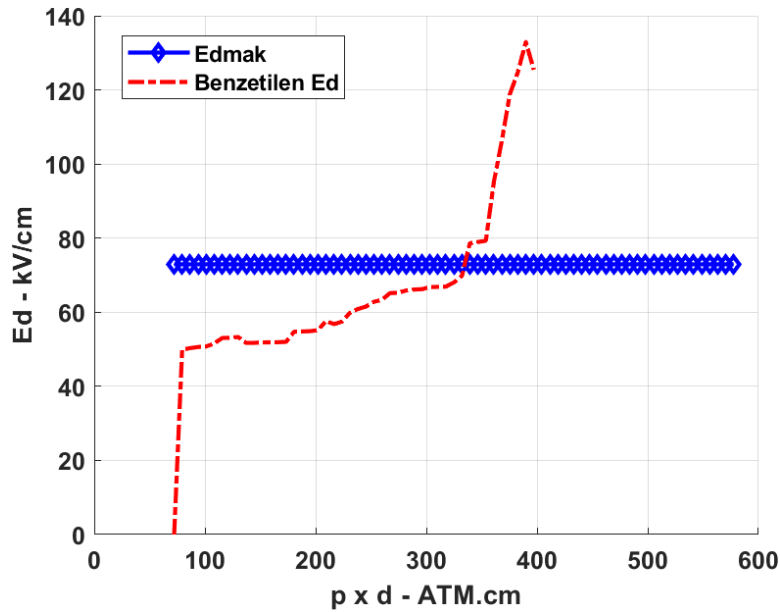


Şekil 4.23. B Fazı için seçilen noktaların ark uzunluklarına karşı elektrik alan grafikleri

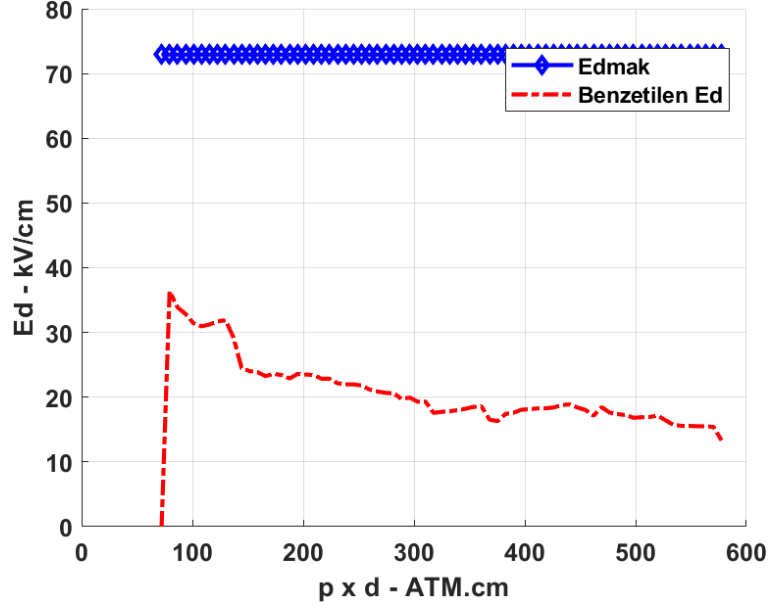
Şekildeki alan dağılımları incelendiğinde, yine, en yüksek elektrik alan hat 4'te, meydana gelmiştir. Yıldırım darbesinde olduğu gibi, alan değerleri sargı uçlarında daha yüksek değerlere ulaşmıştır. Meydana gelen alan şiddeti 157 kV/cm'dir. Diğer yüksek elektrik alan hat 6'da meydana gelmiş olup alan şiddeti ise yaklaşık 132 kV/cm'dir. Bu hatta da toprak bölgesine yakın sargı uçlarında yüksek alan dağılımları meydana gelmiştir. Hat 5'te görülen en yüksek alan değeri ise yaklaşık 54 kV/cm'dir. Üç hattın elektrik alan dağılımlarının, yüksek gerilim sargısı boyunca düzgün olmadığı ve alan değerlerinin sargı uçlarında daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir.

COMSOL ile oluşturulan anahtarlama darbe benzetiminden elde edilen veriler kullanılarak Şekil 4.24- 4.26 arası grafikler çizdirilmiştir.

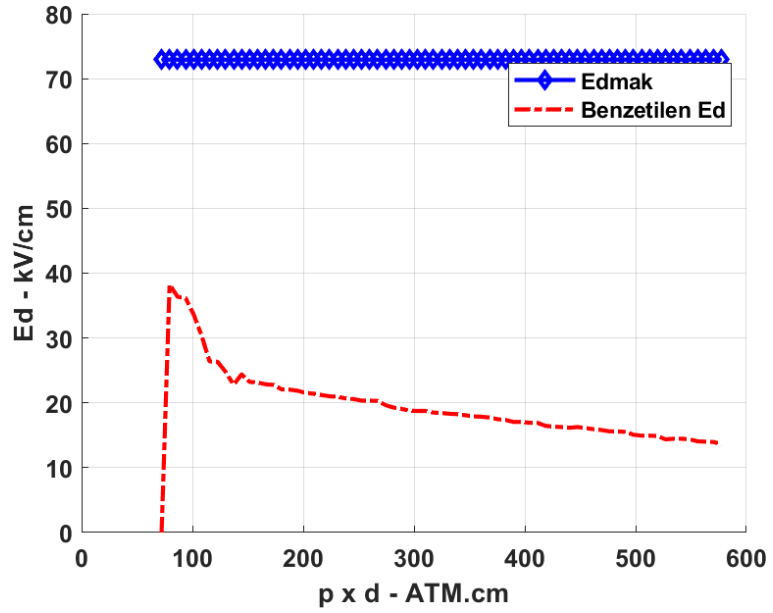
Şekil 4.24'te, R410A gaz basıncının 3,408 atm olduğunda, elektrik alanının 345,346 atm.cm üzerinde 72,92 kV/cm'lik kritik değeri aştığını göstermektedir. Şekil 4.25 ve 4.26'de benzetilen elektrik alanların en yüksek değerleri sırasıyla 36,5 kV ve 38,6 kV olup benzetilen elektrik alanlarının değerleri Edmak eğrisinin altındadır. IEC standartlarına göre yapılan anahtarlama darbe analizi sonuçları, 50 kV'lık bir R410A gaz yalıtımlı dağıtım transformatörünün anahtarlama darbe gerilimlerine dayanımı için optimum olarak 3-3,4 atm'lik bir tank basıncını belirtir.



Şekil 4.24. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı R410A B fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı

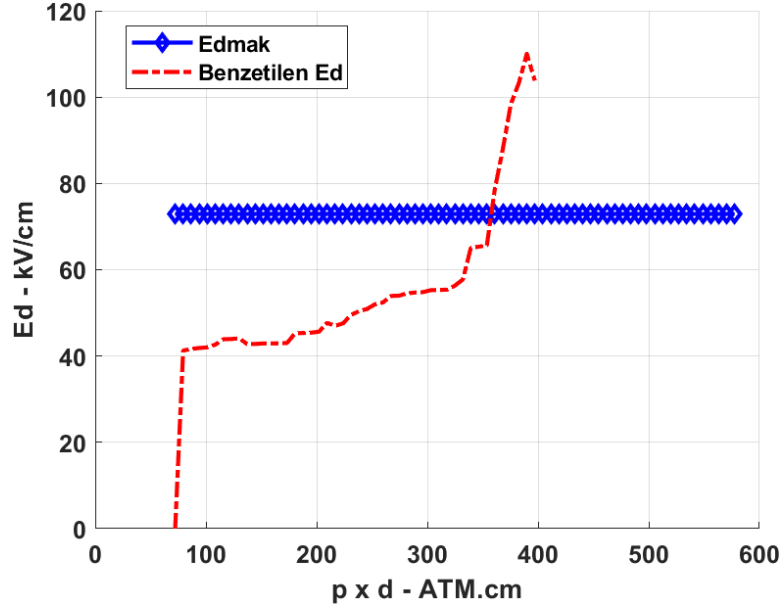


Şekil 4.25. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı R410A B fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı

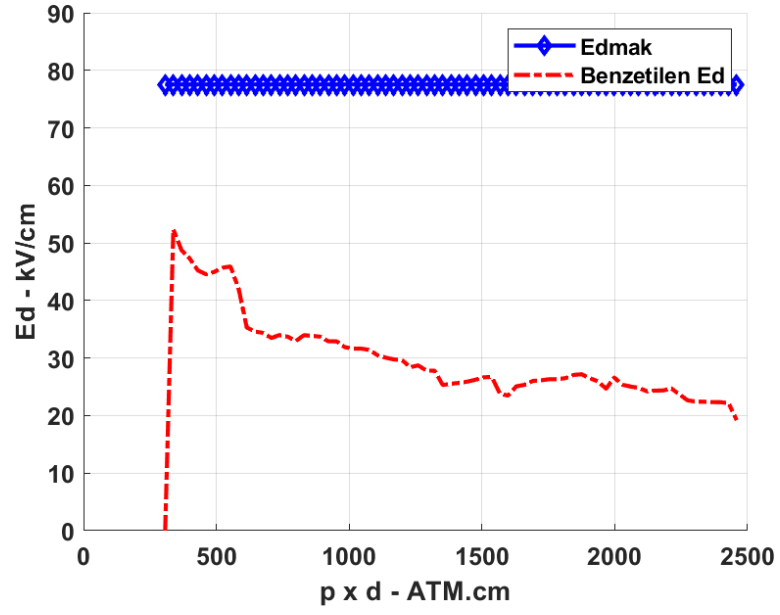


Şekil 4.26. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı R410A B fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı

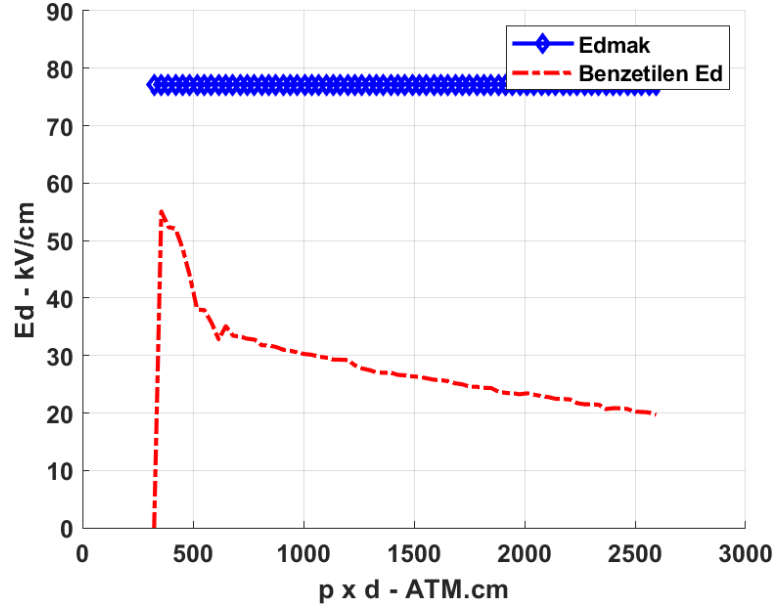
Aynı deney düzeneğinde SF6 gazının yıldırım aşırı gerilim altındaki davranışı da analiz edilmiştir. Analiz sonucunda üç kritik nokta için elde edilen grafikler Şekil 4.27-4.29'da verilmiştir. Şekil 4.27'de, SF6 gaz basıncının 3,57 atm olduğunda, elektrik alanının 362 atm.cm üzerinde 73,32 kV/cm'lik kritik değeri aştığını göstermektedir. Şekil 4.28 ve 4.29'da benzetilen elektrik alanının değerleri ise Edmak eğrisinin altındadır. Bu noktalarda 5. ve 6. Hatlardaki en yüksek elektrik alan değerleri sırasıyla 44,346 kV ve 47,06 kV'tur



Şekil 4.27. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 4 için benzetilmiş elektrik alanı



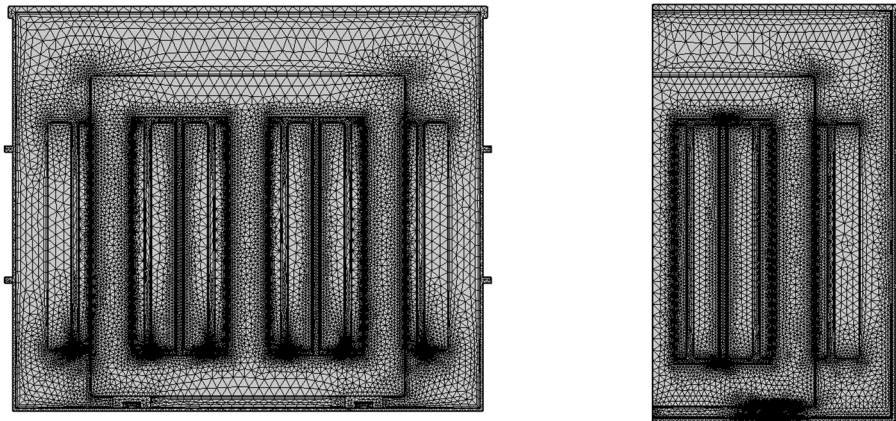
Şekil 4.28. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 5 için benzetilmiş elektrik alanı



Şekil 4.29. Anahtarlama darbe geriliminin uygulandığı SF6 B Fazı hat 6 için benzetilmiş elektrik alanı

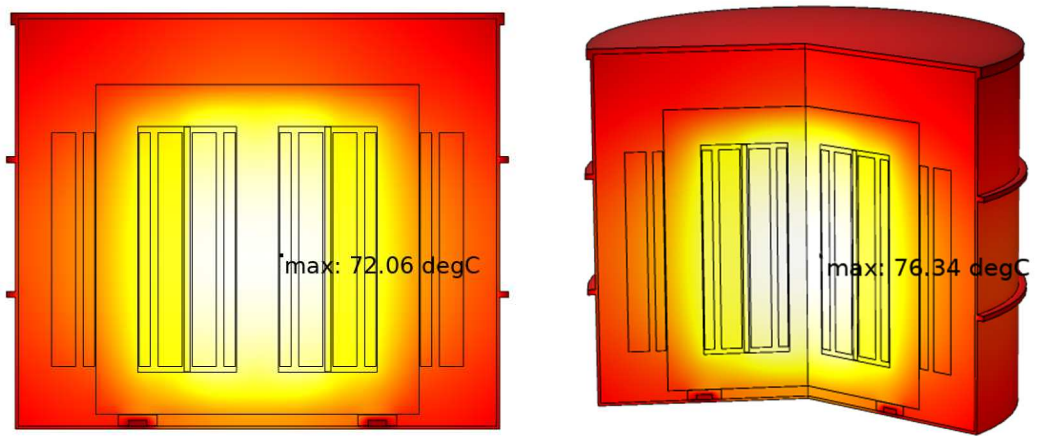
### 4.3. Isıl Analiz

Dağıtım transformatörlerinin çalışması üzerindeki ekonomik etki, güç şebekeleri için hayati öneme sahiptir. Termal durum, diğer operasyonel durum göstergeleri arasında, transformatörün ömrü (yaşlanma) ile doğrudan ilişkili olduğu için önemli bir rol oynamaktadır. Transformatörlerin istenmeyen bir şekilde kesilmesi, kâr kaybına ve güç kalitesi sorunlarına yol açabilir. Aşırı ısınmayı ve yaşlanmayı önlemek için, transformatörler için yeterli bir soğutma sistemi tasarlanmalıdır. Bu nedenle, tank içindeki maksimum sıcaklığın yerini tanımlamak için nominal yük altındaki transformatörler için termal analiz gereklidir. Bu amaçla, önerilen R410A GYT'in ısı analizi Şekil 4.30'da verilen 2B ve 2B eksenel simetri modelinde gerçekleştirilmiştir.



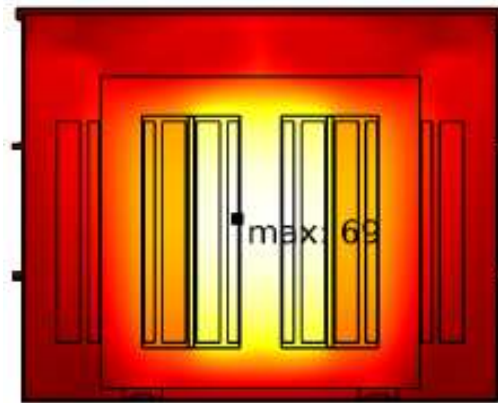
Şekil 4.30. Isıl analizi için R410A GYT'nin sonlu elemanlar ile ayrıklaştırılmış 2B eksenel görünümü

Şekil 4.31, 2 saatlik benzetim sonrası tank içindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekilde 2B analizi için  $72,06^{\circ}\text{C}$  ve 2B eksenel simetri analizi için  $76,34^{\circ}\text{C}$  olarak hesaplanmıştır. Değerlerin farklı çıkmasının nedeni Şekil 4.31 (a)'da bölgenin tamamı için, Şekil 4.31 (b)'de ise bölgenin eksenel simetrik yarısı için analizlerin yapılmış olmasıdır. İki analiz bölgesi arasındaki simetri farkından dolayı sistem içerisinde dolaşan gaz miktarının farklı olmasıdır. Daha küçük alanda çözüm sonucu fazla çıkarken, daha geniş alanda çözüm yapıldığında daha doğru bir sonuç elde edilmektedir. Benzetim süreleri uzun olmakla birlikte, hızlı cevap elde etmek açısından (b)'deki çözüm bilgisayarda daha kısa sürede tamamlanmaktadır.

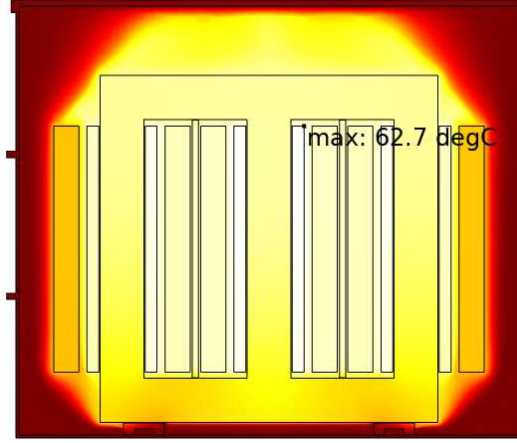


Şekil 4.31. R410A GYT tank içindeki sıcaklık dağılımı. (a) 2B ve (b) 2B eksenel simetri analizi

Aynı koşullar altında, sıcak nokta değeri SF6 gaz yalıtımlı transformatör için  $69^{\circ}\text{C}$  ve yağ yalıtımlı transformatör için  $62,69^{\circ}\text{C}$  olarak bulunmuştur. Sonuçlar Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te gösterilmektedir.

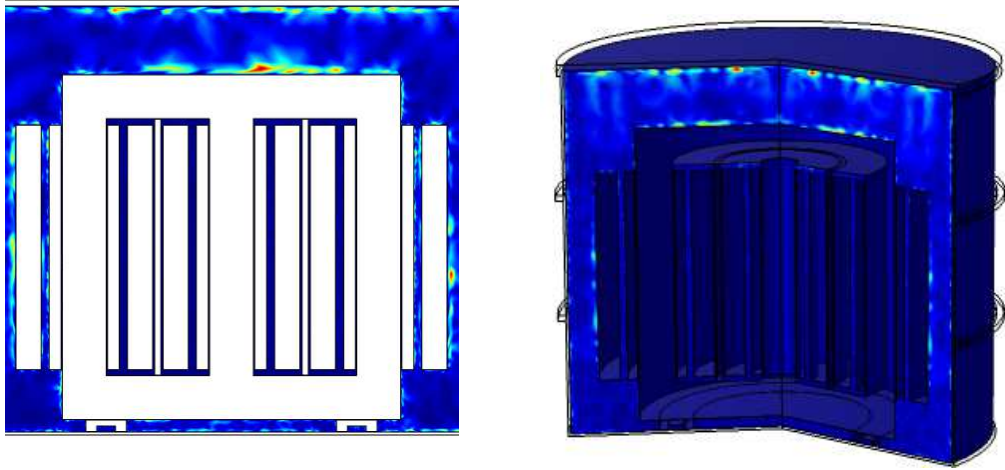


Şekil 4.32. SF6 GYT transformatör için tank içindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 4.33. Yağ yalıtımlı transformatör için tank içindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 4.34, sistem kararlı duruma yakın olduğunda  $t = 2$  saatteki gaz hızını göstermektedir.



Şekil 4.34. Yüzey gaz hızı büyüklüğü (m/s) (a) 2 boyutlu ve (b) 2boyutlu eksenel simetri analizi için

Hız büyüklüğü, doğal taşımının sıcak yüzeyler boyunca nasıl yukarı doğru bir akış oluşturduğunu gösterir. Gazın, YG-AG sargıları tarafından ısıtılması yoğunluğun azalmasına ve gazın yükselmesine neden olur. Üstteki gaz yer değiştirir ve dolaşır, gaz hızı üstte alttan daha yüksek olan bir taşıma modeli oluşturur.

#### 4.4. Gaz Yalıtımlı Transformatörün Deneysel Analizi

Kısmi deşarj (KD), yalıtkan malzemelerin içindeki homojen olmayan durumlarda meydana gelen yerel bir elektrik boşalmasıdır. Kısmi Deşarj ölçümü, KD elektrotlar arasındaki yalıtımı kısmen köprülediğinden, elektrik güç ekipmanının kalitesini değerlendirmek için önemli bir göstergedir. KD, gerilim stresi kritik değeri aştığında bir yalıtım sisteminde iyonizasyondan kaynaklanan yerel bir elektrik

boşalması, sistemin yalıtımı içinde veya dışında başlatılan arıza öncesi deşarjdır. KD ölçümünün genel ilkeleri ve yöntemleri, IEEE Std C57.113 (1991) ve IEC 270 (1981) kapsamındadır. Yalıtım sistemlerinin bütünlüğünü değerlendirmek için bir araç olarak KD testinin kullanılması, çok fazla muhakeme gerektirmektedir.

Cihazdaki kısmi boşalmalar, hava gibi kendi kendini onaran yalıtımla ilişkiliyse ve yakındaki kendi kendini onarmayan yalıtım malzemelerini etkilemiyorsa, nispeten yüksek düzeyde KD kabul edilebilir (Golinski, et al.,1979). Kendi kendini onarmayan yalıtımları içeren diğer daha kritik alanların daha dikkatli bir şekilde değerlendirilebilmesi için yüksek KD olan alanları geçici olarak izole etmek gerekebilir. Bu, kritik alanların test edilebilmesi için kritik olmayan alanları izole etmenin kabul edilen bir yoludur. Bu nedenle, KD testi, kendi kendini onarmayan yalıtımlarının bozulma olasılığı olan yüksek dielektrik strese sahip izole alanları değerlendirmek için daha etkili bir şekilde kullanılmaktadır. En geleneksel deşarj algılama tekniği, uygun bir kuplaj kapasitörü aracılığıyla KD tarafından enjekte edilen akımın (yükün) ölçümlerine dayanır. IEC 60270 (2015) tabanlı KD ölçüm yöntemi ile, Pico-Coulomb (pC) aralığındaki bir hassasiyetle, kritik kusurların çoğu tespit edilebilir (Khan et al., 2019b).

Okan vd. (2018) gaz yalıtımlı gerilim ölçü transformatorü tasarlamış, SF6 yalıtımlı transformatorünün deneysel ve benzetim çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Bu tez çalışmasının deneysel analizi için aynı transformator kullanılmıştır. Kısmi deşarj deney düzeneği Şekil 4.36'da verilmiştir.

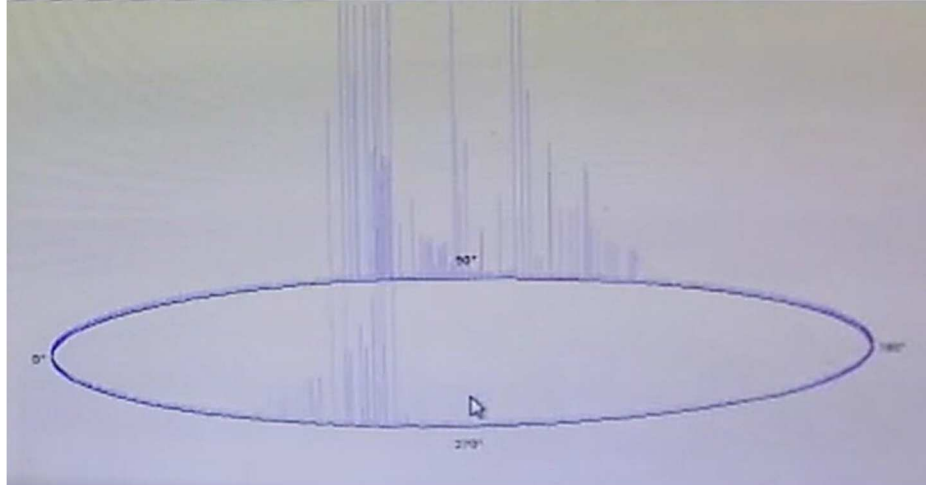
Yalıtım malzemesi olarak R410A'nın performansını değerlendirmek için, transformator sırayla hava, SF6 ve R410A gazları ile doldurularak KD testi yapılmıştır.

Transformator, R410A'nın performansını karşılaştırmak için sırasıyla hava, SF6 ve R410A ile doldurulmuştur. Her bir gaz için kısmi deşarj testi yapılmıştır. Kısmi deşarj testinde, gaz basıncı 1,5 atm'de sabit tutulmuş, uygulanan gerilim 3 kV'luk artışlarla transformatorün anma geriliminin (fazlar arası 36kV) 1,2 katına (43,2kV) kadar çıkarılmıştır. Transformator her gerilim seviyesinde 1 dakika bırakılmış ve daha sonra kısmi deşarj ölçülmüştür.



Şekil 4.35.Hava, SF6 ve R410A yalıtımlı gerilim transformatörü kısmi deşarj deney düzeneği (ESİTAŞ Elektrik Laboratuvarı)

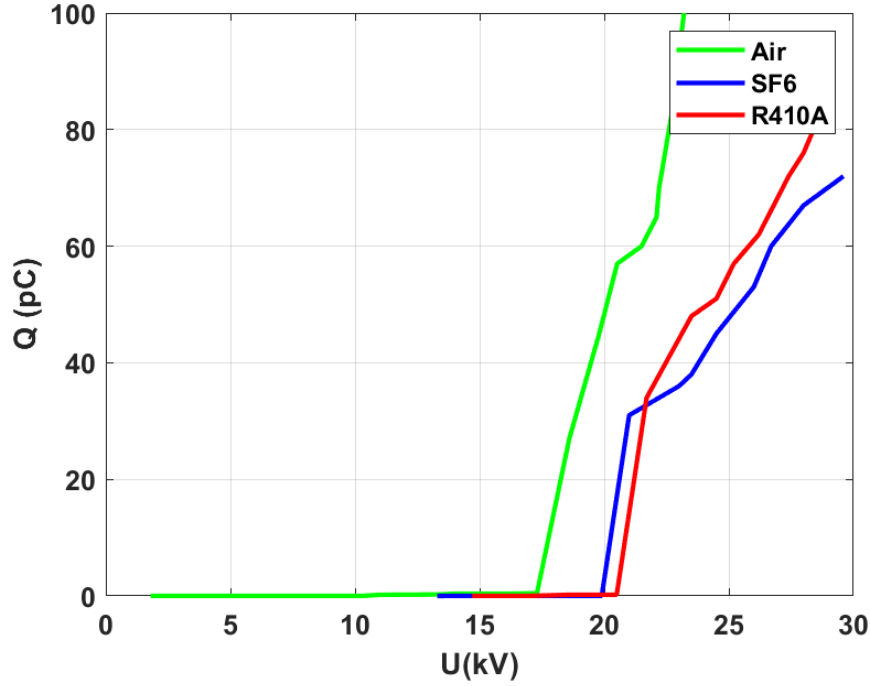
KD'lar, genellikle her iki yarım döngünün artan gerilim eğiminde bulunurlar ve normalde gerilim tepe noktalarını geçmezler; ancak sıfır geçişlere kadar uzanabilirler (IEC 60270, 2015). Şekil 4.36' da R410A gazının yalıtım yapısı içinde meydana gelen kısmi deşarjını göstermektedir.



Şekil 4. 36. Gerilim ölçü transformatörünün yalıtımında kullanılan R410A gazında meydana gelen kısmi deşarj (korona deşarjı)

Kısmi deşarj değeri piko coulomb (pC) cinsinden transformatör terminallerinde ölçülen görünür boşalmaları ifade etmektedir. Görünen yük, doğrudan ölçülemeyen,

deşarj bölgesinde yerel olarak yer alan şarj miktarına eşit değildir. Deşarj belli bir seviyenin üzerinde ise yalıtım sistemlerinde kalıcı hasarlara neden olabilmektedir. Kabul edilebilir maksimum deşarj büyüklüğü, ekipmanda kullanılan yalıtıkana bağlıdır.



Şekil 4.37. 1,5 atm basınç altında kısmi deşarj gücüne karşı hava, SF6 ve R410A

Üç gaz için kısmi deşarj eğrileri Şekil 4.37'de verilmiştir. Kısmi deşarjın herhangi bir başlangıcının ve sönmesinin tespit edilebilmesi ve kaydedilebilmesi için arka plan gürültü seviyesinin 100 pC'den önemli ölçüde düşük olması gereklidir (IEEE Standard 493-1997 (1998)). Yapılan deneysel KD çalışmalarında Deşarj geriliminin yaklaşık 18 kV değerinden itibaren, KD gücünün lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir. SF6 ve R410A'nın iyi bir yalıtıklık göstermesi için sonucun uluslararası standartlar gereği 50 pC'den az olması gerekmektedir. SF6 ve R410A için bu değer aşılmış olsa da sonuçlar kabul edilebilir bulunmaktadır. Olası bir arıza durumunda, meydana gelebilecek kısmi deşarjlarda havanın karakteristiği kısa sürede değişebilmektedir. Havanın 100 pC'ye yükselmesi ise beklenen bir sonuçtur. SF6 ve R410A gazları ise karakteristik özelliklerinden dolayı yüksek dayanım göstermektedir. R410A ile SF6 arasındaki fark 2-3 kV kadardır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, genel olarak enerji sistemlerinin en önemli ekipmanlarından biri olan dağıtım transformatörlerinin en ekonomik ve çevre dostu yolla karşılanabilmesi amacı ile R410A gaz yalıtımlı bir dağıtım transformatörünün tasarım ve imalatının gerçekleştirilebilmesi amacı ile gerekli olan ön bilginin belirlenmesi, modellenmesi ve diğer yalıtımlı modellere olan üstünlük-olumsuzluklarının incelenmesini kapsamaktadır.

Çalışmanın ilk aşamasında, günümüz artan enerji ihtiyacını çevreci ve ekonomik yolla karşılamaya yönelik yapılmış literatür çalışmaları kapsamlı olarak araştırılmıştır. Gaz yalıtımlı transformatörlerin yağ yalıtımlı transformatörlere olan üstünlüğü dikkate alınarak, performans üstünlüğü kanıtlanmış SF6 gazına alternatif çevreci bir gaz arayışına gidilmiştir. Literatürde yer almış alternatif gazların elektriksel özellikleri incelenmiş ve R410A gazının uygunluğu öngörülmüştür.

Bir sonraki aşamada amaç, seçilen gazın literatür verilerinden elde edilen bilgileri deneysel çalışmalardan elde edilen bilgilerle desteklemektir. Literatür araştırmaları neticesinde, ideal koşullar altında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda R410A'nın dielektrik dayanımının SF6'nın 0,90-0,92'si olduğu tespit edilmiştir. Bu tez çalışmasında ise aynı deneyler ideal olmayan koşullar altında gerçekleştirilmiş ve düşük basınç değerlerinde R410A'nın dielektrik dayanımının SF6'nın 0,78 katı ve yüksek basınçlarda dielektrik dayanımının 0,69 katı olduğu bulunmuştur. R410A'nın delinme gerilimlerinin, elektrotlar arası mesafenin artmasıyla yaklaşık doğrusal olarak artması ve SF6 gibi elektronegatif bir gaz olması, seçilen gazın iyi bir dielektirik olduğunu göstermiştir. Yalıtım malzemelerinin en önemli özelliklerden biri, yalıtım özelliğinin bir ölçüsü olan dielektrik dayanımıdır. SF6 dielektrik dayanımı, R410A'dan az bir farkla üstün görünse de en büyük olumsuzluğu ve kullanımının sınırlandırılmasının sebepleri olan yüksek OTP, KIP ve atmosferik ömründen dolayı R410A'nın büyük bir farkla öne çıktığı düşünülmüştür. Bu nedenle, bu aşamada elde edilen sonuçlar tatmin edici olarak yorumlanmış, tezin tasarım aşamalarına geçilmiştir.

R410A gaz yalıtımlı dağıtım transformatörlerinin tasarım kriterlerinin belirlenmesi amacı ile, öncelikli olarak AutoCAD programında çizilen transformatörünün 2B ve 3B modelleri COMSOL programına aktarılmış ve transformatörünün fiziksel özellikleri tüm ayrıntılarıyla programda tanımlanmıştır.

Bilgisayar benzetim sonuçlarının gerçeğe yakın çıkması için, malzeme özelliklerinin tanımı, sınır koşulları, ağın oluşturulması ve çalışma kurulumu süreci programa ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır. Benzetim çalışmasını etkileyen tüm parametreler sonuçların doğruluğu açısından çok önemli olduğundan eksiksiz olarak tanımlanmıştır.

Benzetim çalışmalarından elektrostatik analizi için 3 boyutlu transformatör geometrisi kullanılmıştır. Sınır koşulu olarak, YG ve alçak gerilim AG sargılarına faz-toprak geriliminin tepe değeri olan, Faz A gerilimi 50192 V ve 565 V, Faz B ve Faz C gerilimleri sırasıyla -25456 V ve -282 V tanımlanmıştır. Transformatörün tankı ve boyunduruk kısımları ise toprak potansiyelinde oldukları için toprak sınır koşulu seçilmiştir. Normal çalışma koşulları sırasında 5 ms'de R410A ve SF6 için elektrik alan hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda her iki gazın da delinme sınırının oldukça altında olduğu tespit edilmiştir. SF6'nın Ed değerinin 0,58 ile 0,72 atm arasında Edmax sınırının üzerinde çıktığı gözlemlenmiştir. Bu durum benzetim ortamından kaynaklı anlık bir yükselme olup delinme gerçekleşmesi olarak görülmemiştir. Ardından benzetim sonuçları teorik hesaplamalarla desteklenmiş, yaklaşık olarak eşit değerler elde edilmiştir. Tank basıncını, kuramsal Ed eğrisi üzerinden kolayca elde etmek mümkündür, ancak gerçek tank basıncını tanımlamak için darbe gerilimi çalışmalarının yapılması gereklidir. Bunun üzerine, GYT darbe gerilimi altında analiz edilmiş, normal çalışma koşullarında Faz B'ye 1,2-50us'lik standart yıldırım darbe gerilimi ve 250-2500us'lik standart anahtarlama darbe gerilimi uygulanmıştır. Tasarlanan GYT'nin yıldırım darbe analizinde, R410A gaz basıncının 4.445 atm olduğunda, elektrik alanının 462 atm.cm üzerinde 77,45 kV/cm'lik kritik değeri aştığı tespit edilmiştir. Aynı analiz SF6 için gerçekleştirildiğinde ise aynı basınç\*mesafe aralığında delinme gerçekleşmemiştir. SF6'nın daha yüksek basınçlara kadar çıkabildiği görülmüştür. Anahtarlama darbe analizinde R410A, 3,408 atm'de 72,92 kV/cm'lik kritik değerini aşmıştır. Aynı analiz şartlarında SF6, 3,57 atm'de 73,32 kV/cm'lik kritik değeri aşmıştır.

Tasarlanan R410A GYT için hem elektrostatik analiz hem de darbe gerilim analizleri sonuçları, emniyetli tank basıncının 3-3,4 atm aralığında olduğunu göstermektedir.

Transformatörlerde aşırı ısınmayı ve yaşlanmayı önlemek için, yeterli bir soğutma sistemi tasarlanması hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle, tank içindeki

maksimum sıcaklığın yerini tanımlamak için, nominal yük altındaki R410A GYT'nin 2B aksel simetri modelinde termal analiz gerçekleştirilmiştir. AG sargıları, nominal yükte (0.9 güç faktörü ile 50kVA) çalıştığı varsayılarak ısı kaynakları olarak modellenmiştir. 2 saatlik benzetim sonrası tank içindeki sıcaklık dağılımı R410A için 72.06°C olarak bulunmuştur. Benzetim modelinin ve çalışmalardan elde edilen sonuçların doğru yorumlanabilmesi için, piyasada yaygın olarak kullanılan ve performansları onaylanmış yalıtım malzemeleri olan SF6 ve transformatör yağı ile aynı analizler gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin tanımlanması ve diğer tüm benzetim süreçleri aynı hassasiyetle gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, tank içindeki sıcaklık dağılımı SF6 için 69°C ve yağ için 62.69°C olarak bulunmuştur. COMSOL Multiphysics ortamında gerçekleştirilen model üzerinde yapılan benzetim çalışmaları neticesinde, R410A kullanımının SF6 ve transformatör yağı ile hemen hemen aynı potansiyele sahip olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, R410A'nın test etmeye uygun olduğu sonucuna varılmış, özel bir deney düzeneği üzerinde gerçek zamanlı deneylerle sonuçların desteklenmesi planlanmıştır.

R410A gaz yalıtımlı transformatörünün prototipinin yapılması hedefi, pandemi sürecinden dolayı gerçekleştirilememiş olup, ESİTAŞ Elektrik şirketinin elektrik laboratuvarında, daha önceden tasarlanmış gaz yalıtımlı gerilim transformatörü üzerinde kısmi deşarj testleri gerçekleştirilmiştir. Transformatör, yalıtım malzemesi olarak sırayla hava, SF6 ve R410A gazları ile doldurulmuştur. Kısmi deşarj testi, yalıtımlarının bozulma olasılığı olan yüksek dielektrik strese sahip izole alanları değerlendirmek için yapılmıştır. R410A, SF6'dan 2-3 kV geridedir. SF6 ve R410A'nın iyi bir yalıtkanlık göstermesi için sonucun uluslararası standartlara göre 50 pC'den az olması gerekirken, bu değer aşılmış olsa da sonuçlar kabul edilebilir bulunmuştur.

Transformatörlerin yalıtımında yaygın olarak kullanılan yağ, gaz yalıtım sistemlerindeki üstün performansı bilinen SF6 gazı ve bu tez çalışmasında önerilen R410A gazı hem benzetim hem de deneysel olarak aynı modellerde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar üç yalıtım malzemesinin de paralel performanslar sergilediğini ispatlanmıştır. Benzetim ve deneysel sonuçlar; R410A yalıtımlı transformatörün SF6 ve yağ ile iyi bir şekilde karşılaştırıldığını ve çevre dostu, ucuz ve az bakım gerektiren bir yalıtkan olarak güçlü bir potansiyele sahip olduğu şeklinde yorumlanmıştır. Transformatörlerde SF6 yerine R410A kullanımı maliyet yaklaşık %62,5 oranında, KIP miktarını yaklaşık %90 oranında azaltacaktır. SF6 gazının atmosferik ömrü 3200

yıl iken R410A gazının ömrü 17 yıldır. Bu açıdan da değerlendirildiğinde R410A önemli bir üstünlük göstermektedir. Bu nedenle R410A gazının, yüksek gerilim sistemlerinde, yalıtım malzemesi olarak başarılı olduğu kabul edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, korona deşarjının ayrıntılı olarak COMSOL programda tanımlanması ile gerçeğe çok daha yakın bir performans elde edilebilir. Gaz henüz çok yeni olduğundan iyonlaşma katsayıları, enerji seviyeleri vb. bilgiler literatürde yer almamaktadır. Bu veriler, laboratuvar ortamında deneysel çalışmalarla elde edilebilir.

Tasarlanan R410A GYT prototipinin üzerinde benzetim çalışmalarının tamamının deneysel olarak yapılması ve sonuçların karşılaştırılması planlanmıştır. Ancak tüm dünyayı saran pandemi probleminden dolayı üretim süreci ertelenmiştir. Bunun yerine, üretime yönelik olması açısından, bir sonraki adım gerçekte Mitsubishi ve Toshiba'nın ürettiği, tamamen silindirik yapıda olan gaz yalıtımlı transformatör tasarımı üzerinden benzetim ve analiz çalışmaları yapılması planlanmıştır.

Bu tez çalışmasının, GYT tasarımını sıcak noktalara göre optimize etmek için gerçek zamanlı uygulamalarda öncü olacağına, SEM ile elde edilen bilgisayar benzetimlerinin, GYT imalatı alanında çalışan araştırmacı ve mühendislere gerekli ön bilgileri sağlayacağına inanılmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Akpınar, S. (1997). Yüksek gerilim tekniğinin temelleri. Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, Trabzon.
- Arora, R. and Mosch, W. (2011). High Voltage and Electrical Insulation Engineering. John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 320-368.
- Asset Group (2020). SF6 Investment Plan Asset Group Strategy. Erişim: 10 Ekim 2021. <https://www.nationalgrid.com/uk/electricity-transmission/document/134666/download>
- Başaran, A., Özgener, L. (2013). Doğaya Zararlı Halokarbon Soğutkanların Çevresel Etkileri ve Alınan Önlemler. Mühendis ve Makina, 54: 640, 45-53.
- Berzak, L.F.; Dorfman, S.E.; Smith, S.P. (2006). Paschen's Law in Air and Noble Gases. Retrieved October 10, 2021, from [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/XENON/REFERENCESandOTHER\\_MISC/paschen\\_report.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/XENON/REFERENCESandOTHER_MISC/paschen_report.pdf)
- Bolin, P. And Koch, H. (2005). *Introduction and applications of gas insulated substation (GIS)*. In IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 920-926.
- Bolotinha, M. (2018). Gas-insulated transformers. Transformers Magazine, 5:4, 100-102.
- Brown Boveri (1965). *The Brown Boveri review*. Issued By Brown, Boveri & Company, Limited, Baden, Switzerland, 52: 8.
- Charlton, E., Cooper, F. (1937). Dielectric strength of insulating fluids I. Gases and gas-vapour mixtures. General Electric Review, 40, 438-442. 3.
- Chen, L., Widger, P., Kamarudin, M. S., Griffiths, H., and Haddad, A. (2016). CF3I gas mixtures: breakdown characteristics and potential for electrical insulation. IEEE Transactions On Power Delivery, 32:2, 1089-1097.
- Cooper, F.S. (1940). Gas-Insulated Electric Device. U.S. Patent No. 2,221,670. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Cui, X., Bustin, A.M.M. and Bustin, R.M. (2009). Measurements of gas permeability and diffusivity of tight reservoir rocks: different approaches and their applications. Geofluids, 9:3, 208-223.
- De Chazournes, L.B. (1998). *Kyoto protocol to the united nations framework convention on climate change*. UN's Audiovisual Library of International Law. Retrieved October 10, 2021, from <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>
- Deng, Y., and Xiao, D. (2014). Analysis of the insulation characteristics of CF3I gas mixtures with Ar, Xe, He, N2, and CO2 using Boltzmann equation method. Japanese Journal of Applied Physics, 53:9, 096201.
- Dikmen, E. ve Kasırğa, S. (1988). Dökme reçineli kuru tip yanmaz transformatörlerin konvensiyel yağlı transformatörler ile ekonomik karşılaştırılması. AEG ETİ Elektrik Endüstrisi A.Ş.
- Donaldson, A.L. (1982). Electrode Erosion Measurements in a High Energy Spark Gap. Ph.D. Thesis. Texas Tech University, Lub-bock, TX, USA.
- El-Harbawi, M., and Al-Mubaddel, F. (2020). Risk of fire and explosion in electrical substations due to the formation of flammable mixtures. Scientific reports, 10:1, 1-9.

- EPA (2013). Environmental Protection Agency, "Global Mitigation of Non-CO<sub>2</sub> Greenhouse Gases: 2010 - 2030," Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Eren, U. (2008). *SF<sub>6</sub> gazlı transformatörler ile yağlı transformatörlerin karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 93.
- Fairclough, C. (2016). *Efficiently Mesh Your Model Geometry with Meshing Sequences*. COMSOL Blog. Retrieved October 10, 2021, from <https://www.comsol.com/blogs/efficiently-mesh-your-model-geometry-with-meshing-sequences/>
- Fang, X., Hu, X., Janssens, M.G., Wu, J., Han, J., Su, S., Zhang, J. and Hu, J. (2013) Sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) emission estimates for China: An inventory for 1990-2010 and a projection to 2020. *Environmental Science and Technology*, 47, 3848–3855.
- Farebrother, R. W. (1999). *Fitting linear relationships: A history of the calculus of observations*. Springer Science & Business Media. Springer-Verlag, New York, 1750-1900.
- Ghaleb, F. and Belasri, A. (2012). Numerical and theoretical calculation of breakdown voltage in the electrical discharge for rare gases. *Radiation Effects and Defects in Solids*, 167, 377–383.
- Golinski, J., Malewski, R., and Train, D. (1979). Measurements of RIV on large EHV apparatus in high voltage laboratory. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 3, 817-824.
- Gopalnarayanan, S. and Rolotti, G.D. (1999). Total equivalent warming impact of R-22 alternatives in air-conditioning and heat pump applications. *ASHRAE Transactions*, 105, 1228.
- Göz, A. (2019). *Çöl tozlarının yüksek gerilim havai hat iletkenleri arasında gerçekleşen elektriksel kayıplar üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Siirt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 56.
- Hallström, J., Chekurov, Y. and Aro M. (2003): A calculable impulse voltage calibrator for calibration of impulse digitizers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52, 400-403.
- Halli, S.S., Rao, K.V. and Rao, V.K. (1992). *Advanced techniques of population analysis*. Springer Science and Business Media, New York.
- Holman, T. (2013). *Gas Insulated Transformers (GYTs)*. University of Technology Sydney, 8.
- Honeywell (2007). Genetron® AZ-20 (R-410A) Brochure. Retrieved October 10, 2021, from <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/genetron-az-20/>
- Hosier, I.L.; Vaughan, A.S.; Montjen, F.A. (2006). Ageing of biodegradable oils for high voltage insulation systems. In *Proceedings of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Kansas City, MO, USA, 481–484.
- Hosier, I. L., Vaughan, A. S., and Swingler, S.G. (2008,). Studies on the ageing behavior of various synthetic and natural insulation oils. In *2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 1-4.
- Hudson Technologies, Safety Data Sheet - R-410A, November 21, 2018 Revised. Retrieved October 10, 2021, from [https://www.hudsonotech.com/pdfs/SDS/R410a/Hudson\\_410A-SDS.pdf](https://www.hudsonotech.com/pdfs/SDS/R410a/Hudson_410A-SDS.pdf)

- Hundry, G.F., Trott, A.R. and Welch, T.C. (2008). Refrigeration and Air Conditioning. Butterworth-Heinemann, USA, 392.
- Husnayain, F., Latif, M. and Garniwa, I. (2015). Transformer oil lifetime prediction using the Arrhenius law based on physical and electrical characteristics. In 2015 International Conference on Quality in Research (QiR), pp. 115-120.
- İsmailoğlu, H. (2003). Basınçlı Sf6 Gazının Düzgün Olmayan Alanda Darbe Gerilimi Davranışı. Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. ULUSAL Kongresi.
- IEEE Standart C57.113-1991. (1991). IEEE Guide for Partial Discharge Measurements in Liquid-Filled Power Transformers and Shunt Reactors.
- IEEE Standard 493-1997. (1998). IEEE Recommended Practice for Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers,Gold Book, New York.
- IEC 270-1981 (1981). Partial Discharges Measurements. Publication 270.
- IEC 60270 (2015). High Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements. Consolidated Version.
- Johnson, A. (2017, October). R410A Refrigerant History. Retrieved October 10, 2021, from <https://refrigeranthq.com/r-410a-refrigerant-history/>
- Kalenderli, Ö., vd. (2015). *Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği*. Birsen Yayınevi, Cilt 1, İstanbul.
- Kara, A. (2005). Düzgün Olmayan Alanda Paravanaların Havanın Delinme Dayanımına Etkisi (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Kazemighotlou, M. (2013). Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Transformatörün Manyetik Alan ve Kayıp Analizi. Yüksek lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Khan, B., Saleem, J., Khan, F., Faraz, G., and Rehman, N. U. (2018). Finite Element Analysis of Electric Field Distribution in the Dielectric Gas R410A as an Alternative to SF 6 for High Voltage Applications. In 2018 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM), 1-6.
- Khan, B., Saleem, J., Khan, F., Faraz, G., Ahmad, R., Ur Rehman, N., and Ahmad, Z. (2019a). Analysis of the dielectric properties of R410A Gas as an alternative to SF6 for high-voltage applications. High Voltage, 4:1, 41-48.
- Khan, Q., Refaat, S.S., Abu-Rub, H. and Toliyat, H.A. (2019b). Partial discharge detection and diagnosis in gas insulated switchgear: State of the art. IEEE Electrical Insulation Magazine, 35:4, 16-33.
- Kieffel, Y., Irwin, T., Ponchon, P. And Owens, J. (2016). Green gastoreplace SF6 inelectrical grids. IEEE Power Energy Magazine, 14, 32–39.
- Kim, M.H. and Shin, J.S. (2005). Evaporating heat transfer of R22 and R410A in horizontal smooth and microfin tubes. International Journal of Refrigeration, 28:6, 940-948.
- och, D. (2003). SF6 properties, and use in MV and HV switchgear. Cahier Technique, 188.
- Kulkarni, S.V. and Khaparde S.A. (2017). Transformer engineering: design, technology, and diagnostics. Boca Raton: CRC press.
- Lemke, E., Berlijn, S. and Gulski, E. (2008). Guide for electrical partial discharge measurements in compliance to IEC 60270. Electra, 241, 60–68.
- Liu, X., Wang, J., Wang, Y., Zhang, Z. and Xiao, D. (2008). Analysis of the insulation characteristics of c-C4F8/CO2 gas mixtures by the Monte Carlo method. Journal of Physics D: Applied Physics, 41:1, 015206.

- Li, Y., Zhang, X., Xiao, S., Chen, D., Chen, Q. and Wang, D. (2018). Theoretical evaluation of the interaction between C5-PFK molecule and Cu (1 1 1). *Journal of Fluorine Chemistry*, 208, 48–54.
- Li, Y., Zhang, X., Chen, Q., Fu, M., Zhuo, R., Xiao, S., and Tang, J. (2018a). Study on the dielectric properties of C4F7N/N2 mixture under highly non-uniform electric field. *IEEE Access*, 6, 42868-42876.
- Li, Y., Zhang, X., Xiao, S., Chen, Q., Tang, J., Chen, D. and Wang, D. (2018b). Decomposition properties of C4F7N/N2 gas mixture: An environmentally friendly gas to replace SF6. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 57, 5173–5182.
- Li, Y., Zhang, X., Chen, D., Li, Y., Zhang, J., Cui, Z., Xiao, S. and Tang, J. (2019). Theoretical study on the interaction between C5-PFK and Al (1 1 1), Ag (1 1 1): A comparative study. *Applied Surface Science*, 464, 586–596.
- Loeb, L. B. and Meek, J.M. (1940). The mechanism of spark discharge in air at atmospheric pressure. I. *Journal of applied physics*, 11:6, 438-447.
- Loveless, A.M. (2017). A new universal gas breakdown theory for classical length scales. Ph.D. Thesis. Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Lucas, J.R. (2000). *Historical development of the transformer*. In Chairman's Lecture.
- Luwen, X. (2004). Occupational hazards of sulphur hexafluoride in power system. *China Occupational Medicine*, 31:5, 66–67.
- Mahdavi, E., Suleymani, M. and Rahmanian, N. (2017). Oil and gas properties and correlations. *Fluid Phase Behavior for Conventional and Unconventional Oil and Gas Reservoirs*. Retrieved October 10, 2021, [https://www.researchgate.net/publication/311776432\\_Oil\\_and\\_Gas\\_Properties\\_and\\_Correlations](https://www.researchgate.net/publication/311776432_Oil_and_Gas_Properties_and_Correlations)
- Maiss, M. and Brenninkmeijer, C.A.M. (1998). Atmospheric SF6: Trends, sources, and prospects. *Environmental Science & Technology*, 32, 3077–3086.
- Mason, J. H. (1951). The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges. *Proceedings of the IEE-Part I: General*, 98:109, 44-59.
- Merev, A. (2019). Design and implementation of smart impulse voltage calibrator. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34:4, 2229-2239.
- Metwally, I.A. (2010). Technology progress in high-voltage gas-insulated substations. *IEEE Potentials*, 29:6, 25-32.
- Michelarakis, M. (2016). Electric field distribution of sphere-plane gaps: A SIMULATION APPROACH. Master Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Sweden.
- Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Barragán-Cervera, Á., Molés, F. and Peris, B. (2015). Analysis based on EU Regulation No 517/2014 of new HFC/HFO mixtures as alternatives of high KIP refrigerants in refrigeration and HVAC systems. *International Journal Of Refrigeration*, 52, 21-31.
- Nunn, T. (2000). “A comparison of liquid-filled and dry-type transformer technologies”. In 2000 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, 105-112.
- Okabe, S., Wada, J. and Ueta, G. (2015). Dielectric properties of gas mixtures with C3F8/C2F6 and N2/CO2. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22, 2108–2116.
- Ozgonenel, O., Font, A. ve İlhan, S.(2016). “SF6 Gaz Yalıtımlı Dağıtım Transformatörünün Elektrostatik Alan Analizi”. *Elektrik, Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (Eleco2016)* , Bursa.

- Ozgonenel, O., Cepken, B. and Cilsal, B. (2018). Design and Implementation of SF6 Gas Insulated Medium Voltage Instrument Transformer. COMSOL Conference in Lausanne.
- Özgonenel, O., Thomas, D., and Kurt, Ü. (2018). SF6 gas-insulated 50-kVA distribution transformer design. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 26:4, 2140-2150.
- Özyalçın, B. (2007). Enerji sistemlerinde 400 kVA ya kadar kuru tip transformatörler, verimi etkileyen faktörler ve tipik örnek. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Peek, F.W. (1929). *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. McGraw-Hill, New York.
- Perrier, C., Beroual, A., and Bessede, J. L. (2006). Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13:3, 556-564.
- Pollock, H.C., Cooper, F.S. (1939). The effect of pressure on the positive point-to-plane discharge in N2, O2, CO2, SO2, SF6, CCl2F2, A, He, and H2. *Physical Review*, 56, 170–175.
- Pompili, M., Calcara, L., Sturchio, A., and Catanzaro, F. (2016, October). “Natural esters distribution transformers: A solution for environmental and fire risk prevention”. In 2016 AEIT International Annual Conference (AEIT), (pp. 1-5). IEEE
- Rabie, M. And Franck, C.M. (2018). Assessment of eco-friendly gases for electrical insulation to replace the most potent industrial greenhouse gas SF6. *Environmental Science And Technology*, 52, 369–380.
- Ragnauth, S.A., Creason, J., Alsalam, J., Ohrel, S., Petrusa, J.E., and Beach, R.H. (2015). Global mitigation of non-CO2 greenhouse gases: marginal abatement costs curves and abatement potential through 2030. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 12:1, 155-168.
- Rahimpour, E., and Azizian, D. (2007). Analysis of temperature distribution in cast-resin dry-type transformers. *Electrical Engineering*, 89:4, 301-309.
- Rathakrishnan, E. (2010). *Applied gas dynamics*. Wiley, Hoboken, NJ, 513–519.
- Ray, E.A., Moore, F.L. Elkins, J.W. Rosenlof, K.H., Laube, J.C., Röckmann, T., Marsh, D.R. and Andrews, A.E. (2017). Quantification of the SF6 lifetime based on mesospheric loss measured in the stratospheric polar vortex. *Journal of Geophysical Research*, 122, 4626–4638.
- Rodine, M.T.; Herb, R.G. (1937). Effect of CCl4 vapor on the dielectric strength of Air. *Physical Review*, 51, 508–511.
- Salon, S. And Chari, M.V.K. (1999). *Numerical methods in electromagnetism*. Academic Press, Elsevier, U.K. Retrieved October 10, 2021, from <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780126157604>
- Solomon, S., Burkholder, J.B., Ravishankara, A.R. and Garcia, R.R. (1994). Ozone depletion and global warming potentials of CF3I. *Journal of Geophysical Research*, 99, 20929–20935.
- Soltanbayev, I., Sarmukhanov, R., Kazymov, S., Otelgen, T. and Bagheri, M. (2017). *Automated dry-type transformer aging evaluation: A simulation study*. In 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), pp. 1-6.

- Şenol, M.A. (2004). SF6/Argon Karışımlarının Delinme Dayanımı Açısından İncelenmesi ve Yüksek Gerilim Cihazlarında Kullanımına Katkıları. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 119.
- Takahashi, E., Tanaka, K., Toda, K., Ikeda, M., Teranishi, T., Inaba, M., and Yanari, T. (1996). Development of large-capacity gas-insulated transformer. IEEE Transactions On Power Delivery, 11:2, 895-902.
- Tan, D., Zhou, B., Xue, J., Cai, F. And Xiao, D. (2018). Basic impulse performance of high-pressure CF3I-N2 gas mixture and its application for 126 kV GIL. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25, 1380–1386.
- Tian, S., Zhang, X., Cressault, Y., Hu, J., Wang, B., Xiao, S., ... and Kabbaj, N. (2020). Research status of replacement gases for SF6 in power industry. AIP Advances, 10:5, 050702.
- Toda, K. (2002). Structural features of gas insulated transformers. In IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 1, 508-510.
- Tomczyk, J. (2017). What's the Latest with R-410A?. The NEWS Air Conditioning/ Heating/ Refrigeration. Erişim: 20 Ekim 2021, <https://www.achrnews.com/articles/135290-whats-the-latest-with-r-410a>
- Uhm, H.S., Jung, S.J., and Kim, H.S. (2003). Influence of gas temperature on electrical breakdown in cylindrical electrodes. Journal of the Korean Physical Society, 42, S989-S993.
- Ullah, R., Ullah, Z., Haider, A., Amin, S., and Khan, F. (2018). Dielectric properties of tetrafluoroethane (R134) gas and its mixtures with N2 and air as a sustainable alternative to SF6 in high voltage applications. Electric Power Systems Research, 163, 532-537.
- Wang, X., Tang, C., Huang, B., Hao, J., and Chen, G. (2018). Review of research progress on the electrical properties and modification of mineral insulating oils used in power transformers. energies, 11:3, 487.
- Wang, Y., Huang, D., Liu, J., Zhang, Y., and Zeng, L. (2019). Alternative environmentally friendly insulating gases for SF6. Processes, 7:4, 216.
- Wolski, A. (2011). Theory of Electromagnetic Fields. CAS - CERN Accelerator School: RF for Accelerators, Ebeltoft, Denmark, 15. Retrieved October 10, 2021, from <http://pcwww.liv.ac.uk/~awolski/teaching/cas/ebeltoft/theoryemfields.pdf>
- Xiao, S., Zhang, X., Tang, J. and Liu, S. (2018a). A review on SF6 substitute gases and research status of CF3I gases. Energy Reports, 4, 486-496.
- Xiao, S., Tian, S., Zhang, X., Cressault, Y., Tang, J., Deng, Z. and Li, Y. (2018b). The influence of O2 on decomposition characteristics of c-C4F8/N2 environmental friendly insulating gas. Processes 2018, 6, 174.
- Xu, M., Yan, J., Liu, Z., Geng, Y., and Wang, Z. (2017). Simulation of the decomposition pathways and products of Perfluoronitrile C4F7N (3M: Novec 4710). In 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST), 310-313.
- Yamamoto, O., Takuma, T., Hamada, S. and Yamakawa, Y. (2001). Applying a gas mixtures containing c-C4F8 as an insulation medium. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 8, 1075–1081.
- Yanari, T. (2004). History of power transformers in Japan and description of historical materials. National Museum of Nature and Science-Investigation Report of Technology Systematization, 4.

- Yafen, W., Minliang, S., Tsaicheng, H. and Tsaiperng, J. (2006). Total toxicity equivalents emissions of SF<sub>6</sub>, CHF<sub>3</sub>, and CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub> decomposed in a RF plasma environment. *Chemosphere*, 62:10, 1681–1688.
- Yıldırım, H. (2003). Elektriksel Boşalmaların Yük Benzetim Yöntemiyle Sayısal Analizi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Zhang, X., Xiao, S., Han, Y. and Cressault, Y. (2016). Experimental studies on power frequency breakdown voltage of CF<sub>3</sub>I/N<sub>2</sub> mixed gas under different electric fields. *Applied Physics Letters*, 108, 092901.
- Zhang, X., Li, Y., Xiao, S., Tang, J., Tian, S., and Deng, Z. (2017). Decomposition mechanism of C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O: an environmentally friendly insulation medium. *Environmental Science And Technology*, 51:17, 10127-10136.
- Zhang, X., Li, Y., Xiao, S., Huang, L., Tang, J., Deng, Z. and Tian, S. (2018a). Study on the discharge characteristics of an environmental-friendly insulating medium C<sub>5</sub>F<sub>10</sub>O. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 38, 4298–4306.
- Zhao, M., Han, D., Han, X., Yan, X. L., Rong, W. Q., and Zhang, G. Q. (2018b). Decomposition by-products of C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/N<sub>2</sub> and C<sub>6</sub>F<sub>12</sub>O/air mixed gases under AC 50Hz corona discharge. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 37:11, 1-8.
- Zhong, L., Wang, J., Wang, X. and Rong, M. (2018). Comparison of dielectric breakdown properties for different carbon-fluoride insulating gases as SF<sub>6</sub> alternatives. *AIP Advances*, 8, 085122.
- Zhou, P. (2012). Numerical analysis of electromagnetic fields. Springer Berlin Heidelberg, Retrieved October 10, 2021, from <http://www.springer.com/us/book/9783642503214>

## ÖZ GEÇMİŞ

Ezgi Güney, Sinop Anadolu Teknik, Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'ni bitirdikten sonra Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nden 2005 yılında mezun oldu. 2011 yılında KTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans programını bitirdi. 2017 yılında OMÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Doktora programına girdi. 2018 Aralık ayından bu yana Sinop Üniversitesi Meslek Yüksekokulunda öğretim görevlisi olarak görev yapan Ezgi GÜNEY, iyi derecede İngilizce bilmektedir. Temel ilgi alanları, elektrik tesisleri, dielektrik malzemeler, deşarjların modellenmesidir (18.11.2021).

### İletişim Bilgileri

Öğrenci no : 17210994

ORCID ID : 0000-0003-4868-0626

### Yayımlanmış Çalışmalar:

- 1. Guney, E., and Ozgonenel, O. (2020). *R410A Gas Insulated Distribution Transformer Design*. COMSOL Conference, Grenoble, France.**
- 2. Guney, E., and Ozgonenel, O. (2021). An Eco-Friendly Gas Insulated Transformer Design. *Energies*, 14: 12, 3698.**



**Ezgi GÜNEY**

**R410A GAZ YALITIMLI DAĞITIM TRANSFORMATÖRLERİNİN  
TASARIMI VE İMALATI**

Doktora Tezi 2021